



Valtteri Lankiniemi

Hulevesitulvahaittojen ehkäiseminen kaupunkialueilla

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten.

Espoossa 23.9.2013

Valvoja: Professori Harri Koivusalo

Ohjaaja: DI Ville Alatyppö

Tekijä Valtteri Lankiniemi

Työn nimi Hulevesitulvahaittojen ehkäiseminen kaupunkialueilla

Laitos Yhdyskunta- ja ympäristötekniikka

Professuuri Tekninen vesitalous

Professuurikoodi Yhd–12

Työn valvoja Professori Harri Koivusalo

Työn ohjaaja(t)/Työntarkastaja(t) DI Ville Alatyppö

Päivämäärä 23.9.2013

Sivumäärä 108 + 6

Kieli suomi

Tiivistelmä

Työn tarkoituksena oli tarkastella syitä tiheästi rakennetuilla taajama-alueilla tapahtuville hulevesitulville sekä esittää ratkaisuja kaupunkirakenteeltaan erilaisten kohteiden hulevesitulvien ehkäisylle ja hallinnalle. Esimerkkeinä on käytetty valittuja kohteita Helsingin kaupungin hulevesitulvaherkistä alueista tehdyssä selvityksessä esitetyistä ongelmakohteista. Työ jakautui kirjallisuustutkimukseen, kohteiden ongelma-analyysiin sekä näiden pohjalta tehtyihin ratkaisuehdotuksiin. Kohteiden viemäriverkoston toimintaa on mallinnettu Storm Water Management Model –ohjelmistolla ja mallia on käytetty apuna kohteiden ongelma-analyysissä. Mallin toimivuutta on tarkasteltu vertaamalla mallin antamia tuloksia todelliseen tunnettuun valuntatapahtumaan sekä suorittamalla mallin kalibrointiparametreille herkkyyshanalyysi. Ongelma-analyysin ja kirjallisuuden pohjalta kohteille on muodostettu useita vaihtoehtoisia suunnitelmia hulevesitulvien haittojen ehkäisemiseksi ja suunnitelmille on laadittu kustannusarviot. Kohteiden tulvimista nykyisellään sekä ehdotettujen muutosten jälkeen on tarkasteltu kerran sadassa vuodessa tapahtuvien tunnin ja 24 tunnin mitoitusasteiden aikana.

Kohteiden ongelma-analyysien ja kirjallisuustutkimuksen perusteella on pohdittu laajemmin syitä hulevesitulvien esiintymiselle tiiviisti rakennetuilla alueilla. Työn aikana SWMM havaittiin hyödylliseksi työkaluksi hulevesitulvaherkkien kohteiden ongelmien analysoinnissa ja ratkaisusuunnitelmien toimivuuden tarkastelussa. Lisäksi herkkyyshanalyysi osoitti, että SWMM:n kalibrointi mittauksin ei ole välttämätöntä vaan hyväksyttävään tarkkuuteen päästään myös kirjallisuudesta saatujen arvojen avulla. Tämä laskee kynnystä käyttää ohjelmistoa hulevesitulvien tarkastelussa, sillä kalibrointiparametrien määrittäminen mittamalla on usein aikaa vievää ja kallista.

Työn aikana havaittiin, että pääasiassa hulevesitulviminen aiheutuu ongelmakohteiden viemärikapasiteetin ylittymisestä, alapuolisen viemäriverkoston padotusvaikutuksesta sekä kohteen maastonmuodoista. Pelkän maastomallin käyttö ongelman tunnistamisessa ei kuitenkaan riitä, vaan viemäriverkoston toiminta tulee ottaa huomioon. Hulevesitulviin johtavat erityisesti kesällä tapahtuvat rankkasateet ja sateen suurella intensiteetillä vaikuttaa olevan huomattava merkitys hulevesitulvan synnylle. Mallin mukaan pitkät sateet, joiden intensiteetti on pienempi, eivät vaikuta merkittävästi tulvien syntyyn vaikka satava kokonaisvesimäärä saattaa vastata lyhytkestoista rankkasadetta. Työssä esitetään myös muutoksia nykyisiin mitoitusadekäytäntöihin erityisesti mallintamisen osalta, jotta lyhytaikaiset rankkasateet voidaan ottaa paremmin huomioon.

Avainsanat hulevedet, hulevesien hallinta, hulevesitulvat, viemäritulvat, SWMM



Author Valtteri Lankiniemi

Title of thesis Preventing storm water flooding in urban areas

Department Civil and Environmental Engineering

Professorship Water Resources Engineering

Code of professorship Yhd-12

Thesis supervisor Professor Harri Koivusalo

Thesis advisor(s) / Thesis examiner(s) M.Sc. Ville Alatypö

Date 23.9.2013

Number of pages 108 + 6

Language Finnish

Abstract

The aim of this study was to examine the reasons behind storm water flooding in urban areas and to present solutions for preventing and controlling these floods in areas of different urban structures. Some of the problem sites presented in an earlier flood risk report of the City of Helsinki have been used as an example. The study was divided into literature review, problem analyses of selected sites and solutions derived from the earlier study parts. The sewer systems of the case sites were modelled using the Storm Water Management Model (SWMM) and the created models were used in the problem analyses. The model was tested by comparing results with actual runoff event as well as conducting a sensitivity analysis to the calibration parameters. Based on the problem analysis and literature, several alternative plans and cost estimates were presented for the removal of storm water flooding. Flooding of the selected sites in current state as well as with the presented solutions was assessed with design storms of one hour and 24 hours with a return period of 100 years.

Based on the problem analyses and literature review, reasons for storm water flooding in urban areas were discussed. During the study, SWMM was identified as a valuable tool for analysing the reasons behind storm water floods as well as testing the functionality of possible corrective measures. The sensitivity analysis showed that it is not strictly required to calibrate SWMM against runoff measurements as reasonable accuracy is achieved with values obtained from literature. This makes SWMM a more attractive tool to use in storm water flood analysis as the calibration against measurements is often time consuming and costly.

During the study it was discovered that storm water flooding is mostly caused by exceeding the capacity of the sewers, backwater effect and site elevation. The sole use of terrain model is not sufficient for recognising the problems and therefore the sewer system has to be taken into account. The rain events leading to storm water flooding occur mainly in summertime and intensity seems to play a significant role in creating a flood. Created model suggests that long rain events with low intensity are not so important in flooding although the amount of rain can be equal with the heavier short rain events. The study also presents that currently used design storms should be renewed in order to take the short and heavy rain events better into consideration.

Keywords storm water, storm water management, urban flooding, SWMM

Alkusanat

Tämä työ on tehty Helsingin kaupungin Rakennusviraston toimeksiannosta ja haluan kiittää Rakennusvirastoa työn rahoittamisesta sekä mahdollisuudesta diplomityön tekemiseen kaupungin tuella.

Haluan kiittää työn valvojaa professori Harri Koivusaloa työn rahoituksen käytännön järjestelyistä ja kommentteista, joiden avulla työn valmistuminen oli mahdollista. Haluan myös kiittää työn ohjaajaa Ville Alatyppöä jämpästä otteesta diplomityöni ohjauksessa. Lisäksi erityiskiitos Rakennusviraston Marko Jylhänlehdolle, joka osaltaan mahdollisti työn tekemisen virastoon ja antoi työn aikana useita hyödyllisiä neuvoja sisällön suhteen. Myös muu ohjausryhmä ansaitsee kiitoksen.

Helsingissä 16.9.2013

Valtteri Lankiniemi

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Alkusanat

Sisällysluettelo	6
Kuvaluettelo	8
Taulukkoluetelo	14
1 Johdanto	15
2 Kaupunkialueen hydrologia	17
2.1 Sadanta	17
2.2 Valunta	20
2.3 Haihdunta	20
2.4 Imeyntä	21
2.5 Kaupungistumisen vaikutus hydrologiaan	22
3 Luonnonmukaiset hulevesien hallintamenetelmät	24
3.1 Viivytyrakenteet	24
3.2 Imeytyrakenteet	26
3.3 Hajautetut järjestelmät	29
4 Alueiden kuvaukset	32
5 Menetelmät	37
5.1 Ongelma-analyysi	37
5.2 Lähtötiedot	40
5.3 Viemäreiden mitoitus	46
5.4 Storm Water Management Model	47

5.5	Kustannustarkastelu.....	55
6	Ongelma-analyysit	56
7	Hulevesitulvien vähentäminen ja ehkäisy	71
7.1	Kapteeninpuistikko.....	71
7.1.1	Viemärikapasiteetin suurentaminen	71
7.1.2	Maanalainen viivytysrakenne.....	75
7.1.3	Ylivuotoputki ja suodatuspainanne	78
7.1.4	Hajautetut järjestelmät	82
7.2	Snellmaninkatu	83
7.2.1	Viemäriin suurentaminen	83
7.2.2	Ritiläkaivojen lisääminen.....	84
7.3	Pitäjänmäentien alikulku	85
7.3.1	Viemäriin suurentaminen	85
7.3.2	Pumppaamo.....	86
7.3.3	Hajautetut järjestelmät	87
7.4	Kustannustarkastelu.....	87
8	Virhetarkastelu ja herkkyysanalyysi	89
8.1	Virhelähteet	89
8.2	SWMM herkkyysanalyysi	91
8.3	SWMM:n puutteet	95
9	Johtopäätökset ja suositukset	97
10	Lähdeluettelo.....	100
Liitteet		

Kuvaluettelo

Kuva 1. Sateen intensiteetti-toistuvuus-kestoaja kuvaaja. Vasemmalla pystyakselilla sateen intensiteetti mm/min. (Katajisto 1969, ref. RIL 2004)	18
Kuva 2. Esimerkki Chicago design storm -mitoitussateen aika-intensiteettiriippuvuudesta. (Aaltonen et al. 2008)	19
Kuva 3. Kaisaniemessä mitattujen rankkasateiden ajallinen jakauma. (Kilpeläinen 2006)	19
Kuva 4. Kaupungistumisen vaikutus pintavalunnan määrään ja valuntahuipun ajoittumiseen. Lämpisemättömän pinnan osuuden kasvattaminen kasvattaa valuntahuipun arvoa ja siirtää valuntahuippua aikaisemmaksi. (Melanen 1982, ref. RIL 2003)	23
Kuva 5. Kennomainen hulevesien viivytysrakenne. (Wavin-Labko Oy. 2013)	25
Kuva 6. Putkimainen hulevesien viivytys- ja imeytysrakenne. Putken korkeus on noin puolitoista metriä. (StormTech 2012)	25
Kuva 7. Esimerkki imeytyskaivannon yhteydessä olevasta ylivuotojärjestelystä. Järjestelyn tarkoituksena on estää imeytyskaivannon veden nouseminen rakennuksen perustusten tasalle. (Warnaars et al. 1999)	27
Kuva 8. Tyypillinen suodatuspainanteen rakenne. Rakenteen läpi suodattuva vesi kerätään salaojaverkoston avulla. (Uhl & Dittmer 2005)	28
Kuva 9. Tyypillinen viherkaton rakenne. Rakenne koostuu kasvillisuudesta, kasvialustasta sekä kerrosten alapuolisesta kuivatuskerroksesta. (VanWoert et al. 2005)	29
Kuva 10. Kaltevalle katolle perustettu viherkatto. (American Hydrotech 2013b)	30
Kuva 11. Erilaisia sadevesitynnyreitä. Muotoilun tarkoituksena on sovittaa tynnyrit paremmin ympäröivään pihapiiriin. (Hayneedle Inc. 2013)	31
Kuva 12. Tarkastelualueiden sijainti. Kaikki kohteet sijaitsevat Helsingin kaupungin alueella ja kaksi kohteista sijaitsee tiiviisti rakennetussa kantakaupungissa. Helsinki on	

merkitty sinisellä ja Kapteeninpuistikko, Snellmaninkatu sekä Pitäjänmäentien alikulku vastaavasti numeroilla 1, 2 ja 3. (Maanmittauslaitos 2005).....	32
Kuva 13. Kapteeninkadun lähialueen maaperäkartta. Kallionpinta on lähellä maanpintaa tai kokonaan paljastunut useissa kohtaa tarkastelualueita. Ongelmakohde on osoitettu vihreällä ja maalajimerkinnät on esitetty Liitteessä 1.	34
Kuva 14. Snellmaninkadun lähialueen maaperäkartta. Ongelmakohde on osoitettu vihreällä ja maalajimerkinnät on esitetty Liitteessä 1.	35
Kuva 15. Pitäjänmäentien alikulun lähialueen maaperäkartta. Ongelmakohde on osoitettu vihreällä ja maalajimerkinnät on esitetty Liitteessä 1.	36
Kuva 16. Ongelma-analyysin kulku. Analyysi jakautuu taustatiedon hankintaan ja mallin määrittämiseen.	40
Kuva 17. Esimerkkejä korkeusmallin visualisoinnista. a)Laserkeilauksella tuotettu pistepilviaineisto. b)Aineistosta on poistettu korkeusmallin kannalta haitalliset pisteluokat. c)Pistepilviaineistosta luotu pintamalli.....	41
Kuva 18. Esimerkki pintamallin avulla määritetyistä pintavesien virtaussuunnista merkittynä vihreällä.	42
Kuva 19. Kymmenen minuutin välein mitattu sadanta Kaisaniemen mittausasemalta 22.8.2011. Suurin osa sateesta tuli sadetapahtuman ensimmäisen tunnin aikana.....	44
Kuva 20. Esimerkki SWMM:n tarkastelualueäkymästä. Kuvassa nähtävissä alueen jako osavaluma-alueisiin sekä viemäriverkosto solmukohtineen	48
Kuva 21. Viemäri tulvii kadulle ja vesi jatkaa kulkuaan avouomavirtauksena kadun kallistuksen suuntaisesti. (Mark et al. 2004).....	49
Kuva 22. Esimerkkejä työssä käytetyistä avouomien poikkileikkauksista, jotka kuvaavat katujen poikkileikkauksia.....	50
Kuva 23. Poikkileikkaus kaksoiskuivatusjärjestelmästä. Ylhäällä katuja kuvaavat avouomat ja alla viemäreitä kuvaavat putket. Vesi kulkee avouomien ja putkien välillä verkoston kaivoja esittävien solmukohtien kautta.	50

Kuva 24. Esimerkkikuvasarja keskimääräisten kaltevuuksien määrittämisestä. a) korkeusrasteri, b) kaltevuusrasteri ja c) kaltevuusrasteri, josta poistettu kattojen ja maanpinnan välinen alue (valkoisella).....	53
Kuva 25. Hydraulisen leveyden käsite havainnollistettuna. Kuvassa W on hydraulinen leveys ja q_L on pintavalunnan kulkema matka. (Gironás et al. 2009).....	53
Kuva 26. Kuvia Kapteeninkadun ja Tehtaankadun risteyksen tulvimisesta 22.8.2011. Vesi on noussut kuvien perusteella noin 40 cm kadun pinnan yläpuolelle.	56
Kuva 27. Kapteeninpuistikon tarkastelualueen rajausta osavaluma-alueisiin. Ongelmakohde ja purkupiste on merkitty vihreällä.....	57
Kuva 28. Mallin mukaan vuoden 2011 elokuun 22. päivän sateella tulvivat viemärikaivot. Vuorimiehenkadun ja Kasarmikadun risteyksessä ei tapahtuisi tulvimista, mutta mallin mukaan vedenpinta viemärikaivoissa nousisi kadun tasalle....	58
Kuva 29. Vuorimiehenkadun ja Kasarmikadun risteys 22.8.2011.	58
Kuva 30. Kapteeninpuistikon ympäristön korkeuskäyrät. Maastonpainanteet on merkitty keltaisella. Kuvasta havaitaan, että Tehtaankadun ja kapteeninkadun risteys sijaitsee laajassa maastonpainanteessa.....	59
Kuva 31. Mallin mukaan kerran sadassa vuodessa toistuvan tunnin sateen aikana tulvivat viemärikaivot.	60
Kuva 32. Snellmaninkadun tarkastelualueen jako osavaluma-alueisiin. Ongelmakohde ja purkupiste merkitty on vihreällä.	62
Kuva 33. Snellmaninkadun ympäristön korkeuskäyrät. Maastonpainanteet on merkitty keltaisella. Työn kannalta merkittävimmät painanteet ovat Snellmaninkadulla sekä Kaisaniemenkadulla.....	62
Kuva 34. Mallinnuksen mukaan vuoden 2011 elokuun 22. päivän sadetta vastaava tapahtuma ei aiheuttaisi hulevesitulvaa Snellmaninkadulle. Kuitenkin mallin mukaan tulvimista tapahtuisi Vironkadulla ja erityisesti Kaisaniemenkadulla.....	63
Kuva 35. Kaisaniemenkadun, Puutarhakadun ja Yrjö-Koskisen kadun risteys 22.8.2011.	64

- Kuva 36. Kaisaniemenkadun viemäriosuus mallinnettuna elokuun 2011 rankkasateen aikana. Kuvassa on havaittavissa johtokartan mukainen oikealle suuntautuvaan virtaukseen nähden negatiivinen kaltevuus. Vasemmalla alhaalla veden korkeus katuja esittävissä avouomissa. Kuvassa maanpinta on merkitty katkoviivalla, hydraulinen painekorkeus sinisellä sekä veden pinta turkoosilla. Pystypalkit esittävät viemärikaivoja.65
- Kuva 37. Pitäjänmäentien alikulku 22.8.2011. Tulvimisen seurauksena ajoneuvoliikenne alikulussa on estynyt.....66
- Kuva 38. Pitäjänmäen alikulun tarkastelualueen jako osavaluma-alueisiin. Sinisellä osoitettujen alueiden hulevedet päätyvät alikulkuun. Hulevesiä kerääntyy noin 2,8 hehtaarin alueelta. Ongelmakohde ja purkupiste merkitty vihreällä.....67
- Kuva 39. SWMM mallinnus Pitäjänmäentien alikulun tarkastelualueen tulvivista hulevesikaivoista. Kuvassa nähdään sekä alikulun (vihreällä), että Pitäjänmäentien ja Takkatien risteyksen (punaisella) kaivojen tulvivan. Vesi ei kuitenkaan lammikoidu Pitäjänmäentien ja takkatien risteykseen maastonmuotojen vuoksi.68
- Kuva 40. Pitäjänmäentien ja Takkatien risteyksen pintavesien virtaussuunnat. Virtaussuunnista voidaan nähdä, että pintavalunta on risteyksessä mahdollista kolmeen suuntaan.....69
- Kuva 41. Virtaus alikulkua kuivattavassa tunneliputkessa. Kuvaajasta nähdään, että virtaus on ajoittain negatiivista, jolloin vesi virtaa alikulun suuntaan.70
- Kuva 42. Runkoviemärin poikkileikkaus mitoitussateen aikana, kun runkoviemäri on vaihdettu halkaisijaltaan 1000 mm betoniputkeen lähtien tulvivasta risteyksestä Laivurinkadulle asti. Kuvassa maanpinta on merkitty katkoviivalla, hydraulinen painekorkeus sinisellä sekä veden pinta turkoosilla. Pystypalkit esittävät viemärikaivoja.72
- Kuva 43. Runkoviemärin vedenpinta mitoitussateen aikana kun nykyisen putken viereen on asennettu toinen vastaava putki.....73
- Kuva 44. Ylivuotokynnyksestä poistuvat vesimäärät kerran sadassa vuodessa toistuvan tunnin sateen aikana nykytilanteessa. Alhaalla verkostoon johdettu vesi ja ylhäällä ylivuotokynnyksen yli mereen johdettu vesi.....74

Kuva 45. Esimerkki Pietarinkadun alla sijaitsevasta kunnallistekniikasta. Eri johtokartat on erotettu värein siten, että ruskealla merkitään viemäreitä, sinisellä vesijohtoja, vaaleanpunaisella kaukolämpöä, vihreällä tietoliikennettä, oranssilla kaasua sekä punaisella sähköä.	75
Kuva 46. Maanalaisen viivytysrakenteen sijoittuminen Kapteeninpuistikkoon. Rakenteen sijoittelu puistikon alueelle on hankalaa tilanpuutteen vuoksi.....	76
Kuva 47. Maanalaisen viivytysrakenteen sijoittuminen Kapteeninpuistikkoon ja Vuorimiehenpuistikkoon. Käyttämällä kahta viivytysrakennetta, on mahdollista vähentää tilantarvetta Kapteeninpuistikossa.	78
Kuva 48. Ylivuotoputken poikkileikkaus ja ylin vesikorkeus kerran sadassa vuodessa toistuvan tunnin sateen aikana. Kuvassa maanpinta on merkitty katkoviivalla, hydraulinen painekorkeus sinisellä sekä veden pinta turkoosilla. Pystypalkit esittävät viemärikaivoja.....	79
Kuva 49. Ylivuotoputki Kapteeninkadulla. Putki purkaa Meripuistossa sijaitsevaan suodatuspainanteeseen.	80
Kuva 50. Suodatuspainanteen sijoittelu Meripuistoon. Ylivuotoputki purkaa rakenteeseen sen luoteiskulmasta ja tyhjennys tapahtuu eteläreunaan sijoitetusta purkuputkesta satama-altaaseen.	81
Kuva 51. Kaisaniemenkadun painanteen viemäriverkosto. 440 mm:n putkiosuus on merkitty kuvaan tummansinisellä.	83
Kuva 52. Kaisaniemen painanteen putkiosuuden (Kuva 51) vaihtamisen vaikutus mitoitussateen aiheuttamaan viemärivirtaamaan. Myös negatiivinen kaltevuus on korjattu. Kuvassa maanpinta on merkitty katkoviivalla, hydraulinen painekorkeus sinisellä sekä veden pinta turkoosilla. Pystypalkit esittävät viemärikaivoja.	84
Kuva 53. Pintavaluntaveden poisjohtamisen vaikutus mitoitussateella. Ritiäläkaivojen lisäämisen vaikutus ei ole yhtä suuri kuin putkilinjan korjaamisella. Kuvasta havaitaan, että kaivosta J18 alkavan 600/900 runkoviemärin kapasiteetti ei ylity vaikka painanteen valumavedet ohjattaisiin sinne.	85
Kuva 54. Esimerkki pakettipumppaamosta. (RIL 2004)	86

- Kuva 55. Esimerkki johtokartassa ilmenneistä virheistä. a) HSY Veden käytössä oleva johtokartta ja b) HKR:ssa käytössä oleva johtokartta, jossa havaittavissa korkomerkintöjen epäselvä asettelu ja puutteet saneerausmerkinnöissä.90
- Kuva 56. Kuvan kaivojen vedenpoistokapasiteetti on heikentynyt roskien (a ja b) tai rakenteellisten vikojen vuoksi (a ja c). Kaikki kuvissa näkyvät kaivot sijaitsevat Helsingin keskustassa.91
- Kuva 57. Veden virtaus viemäriin on rajoittunut ja verkostoon ei päädy sen kapasiteettin mukaista vesimäärää. (Mark et al. 2004)96

Taulukkoluetelo

Taulukko 1. Maalajien vedenläpäisevyyskertoimia. (Korhonen 1974, ref. RIL 2003) ..	21
Taulukko 2. Suurin vuorokausisadanta eräillä paikkakunnilla. (Kuusisto 1980, ref. Mustonen (1986).....	43
Taulukko 3. Erilaisten pintojen valumakertoimia. (Liikennevirasto 2013).....	47
Taulukko 4. Kapteeninpuistikon tarkastelualueen vesitase kerran sadassa vuodessa toistuvalla tunnin mitoitussateella.....	60
Taulukko 5. Snellmaninkadun tarkastelualueen vesitase kerran sadassa vuodessa toistuvalla tunnin mitoitussateella.....	65
Taulukko 6. Pitäjänmäen alikulun tarkastelualueen vesitase kerran sadassa vuodessa toistuvalla tunnin mitoitussateella.....	70
Taulukko 7. Arvioidut rakennuskustannukset eri menetelmille. Summat on pyöristetty lähimpään kymmeneen tuhanteen euroon.....	88
Taulukko 8. Manningin kertoimien vaihteluväli herkkyysanalyysissä.....	92
Taulukko 9. Herkkyysanalyysin parametrien vaikutus tarkastelualueelta purkupisteen kautta poistuvan veden määrään.	93

1 Johdanto

Laki tulvariskien hallinnasta tuli voimaan 30.6.2010 ja kyseisessä laissa on määritelty kunnan tehtäväksi tehdä alustava arviointi hulevesitulvariskeistä sekä nimetä merkittävät tulvariskialueet. Helsingin kaupungin rakennusvirasto on teettänyt edellä mainitun selvityksen (FCG Finnish Consulting Group Oy 2011), jonka lisäksi toisessa selvityksessä määriteltiin lain ulkopuolelle jäävät hulevesitulvaherkät alueet (Helsingin kaupunki 2012). Selvitykset valmistuivat hulevesitulvariskialueiden osalta joulukuussa 2011 ja -herkkien alueiden osalta huhtikuussa 2012.

Selvitystyössä ei havaittu hulevesien aiheuttamia lain määrittelemiä tulvariskialueita. Jälkimmäisen selvitystyön perusteella on kuitenkin esitetty alustavasti 16 kohdetta yksityiskohtaisempaan tarkasteluun, jonka tarkoituksena olisi tunnistaa hulevesitulvien syyt ja laatia korjaustoimenpiteet kohteille.

Tämän työn tarkoituksena oli pohtia syitä taajama-alueella tapahtuville hulevesitulville sekä tarjota ratkaisumalleja kaupunkirakenteeltaan erilaisten kohteiden hulevesitulvien ehkäisylle ja hallinnalle. Työssä käytettiin esimerkkeinä joitakin aiemmin mainitussa selvityksessä havaittuja ongelmakohteita. Työ jakautui kirjallisuustutkimukseen, kohteiden ongelma-analyysiin sekä analyysin pohjalta tehtäviin ratkaisusuunnitelmiin siten, että tavoitteena oli selvittää valittujen kohteiden tulvimiseen johtaneet syyt ja valita havaittujen ongelmien perusteella sopivia keinoja hulevesitulvien ehkäisemiseksi tai vähentämiseksi. Työssä pyrittiin löytämään esimerkkikohteista sekä kirjallisuudesta saatujen tietojen avulla yleisiä suunnitteluperusteita vastaavanlaisten kohteiden hulevesitulvien hallintaan. Lisäksi tavoitteena oli antaa esimerkkejä hulevesitulvista aiheutuvien kaupunkitulvien syiden tunnistamiseen ja johdonmukaisen ongelma-analyysin tekemiseen. Jokaiselle kohteelle oli tarkoitus laatia vähintään yksi toteutuskelpoinen esimerkiksi suunnitelma rakenteista ja ratkaisuista, joilla hulevesitulvia voidaan vähentää.

Koska työssä tarkasteltava ongelma on huleveden liiallisen määrän aiheuttamat vahingot, rajataan veden laadulliset tekijät pääasiassa aihealueen ulkopuolelle ja erityisesti mallintamisen osalta ongelmaa käsitellään puhtaasti hydrologian näkökulmasta. Kuitenkin eri menetelmiä ja suunnitteluratkaisuja esiteltäessä veden laatuun saatetaan ottaa kantaa. Lähtökohtana kohdeanalyysissä sekä suunnittelussa oli käyttää mitoitussateina kerran 100 vuodessa toistuvia tunnin ja 24 tunnin sateita. Tämän lisäksi tarkastelualu-

eista luotujen mallien toimivuutta pyrittiin arvioimaan vertaamalla mallin antamia tuloksia todellisen sadetapahtuman aiheuttamiin kaupunkitulviin. Työssä tarkasteltavat kohteet rajattiin valuma-alueen sekä viemäriverkoston mukaan siten, että kaikki ongelma-alueelle saapuvat vedet sekä alapuolisen verkoston padotusvaikutus pyrittiin ottamaan huomioon. Työssä tarkasteltiin lyhytaikaisista kesän rankkasateista aiheutuvia hulevesitulvia, joten mallinnuksessa on jätetty haihdunta sekä lumen sulaminen huomiomatta. Kuitenkin eri ratkaisujen teknistä toimivuutta arvioitaessa talven vaikutus on otettu huomioon.

Vaikka tuloksina saatuja suunnitelmia voidaan käyttää viitteinä tai niiden perusteella voidaan antaa suosituksia muidenkin alueiden suunnitteluun, niin laaditut suunnitelmat soveltuvat suoraan vain valittuihin kohteisiin. Sovellettaessa tuloksia tulee tiedostaa, että yhdessä paikassa toimivat ratkaisut eivät välttämättä sovi toisaalle ja jokainen hulevesitulville altis kohde on suunniteltava kohteen ominaispiirteiden sekä vallitsevien olosuhteiden pohjalta.

2 Kaupunkialueen hydrologia

2.1 Sadanta

Kostean ilman noustessa ilmakehässä, sen lämpötila laskee jolloin ilman sisältämä vesihöyry tiivistyy hiukkasten ympärille ja syntyy sade. Sateet jaetaan kolmeen perustyyppiin sen perusteella miten ilman kohoaminen on tapahtunut.

Sykloninen sade muodostuu kun lämpimän ja kylmän ilmamassan rajavyöhykkeellä muodostuu häiriötila, jonka seurauksena lämmin ilmamassa kohoaa kylmän ilmamassan yläpuolelle. Mikäli lämmin ilmamassa törmää kylmään ilmamassaan, on kyse lämpimästä rintamasta, jonka aiheuttama sade on intensiteetiltään vähäistä, pitkäkestoista ja laaja-alaista. Kylmässä rintamassa puolestaan kylmä ilmamassa törmää lämpimään aiheuttaen ilman nopeaa kohoamista sekä intensiteetiltään voimakkaampaa ja lyhytkestoisempaa sadetta. (Mustonen 1986)

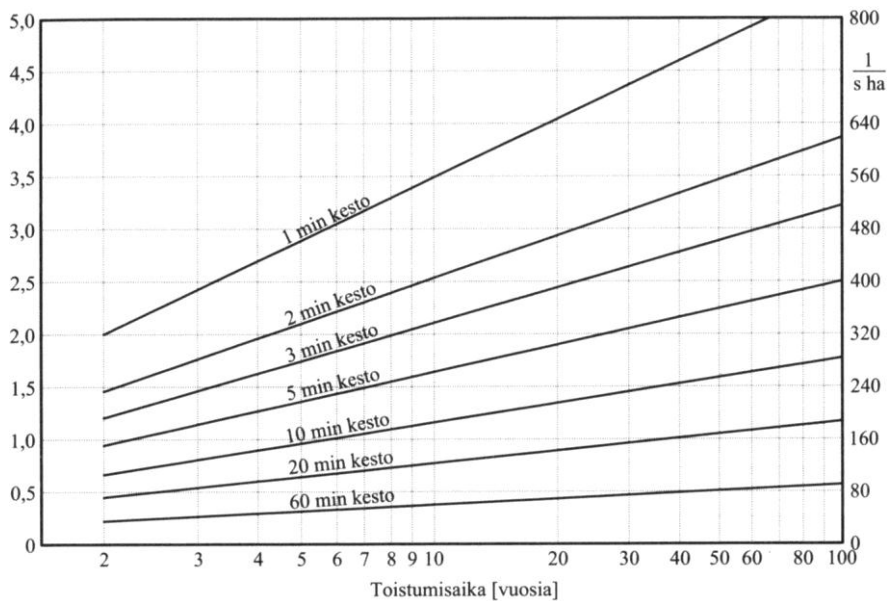
Konvektiivinen sade syntyy kun kuumana kesäpäivänä maanpinta lämpenee lämmittäen samalla maanpinnan läheisen ilmakerroksen (Mustonen 1986). Ilmakerros kohoaa ja jäähtyy, jolloin vesi tiivistyy sateeksi. Kesäsateet ovat pääasiassa konvektiivisia (mm. May 2008, Mustonen 1986) ja ne ovat erityisen rankkoja ja lyhytkestoisia. Näin ollen myös taajamatulvia aiheuttavat sateet ovat pääasiassa konvektiivisia.

Orografinen sade syntyy kun ilmamassa kohtaa maastoesteen ja kohoaa ylöspäin. Tyyppillisesti orografista sadetta esiintyy vuoristoisilla rannikoilla, mutta pinnanmuodot vaikuttavat sateen jakautumiseen myös alavammilla alueilla. (Mustonen 1986)

2.1.1 Sade Suomessa ja erityisesti pääkaupunkiseudulla

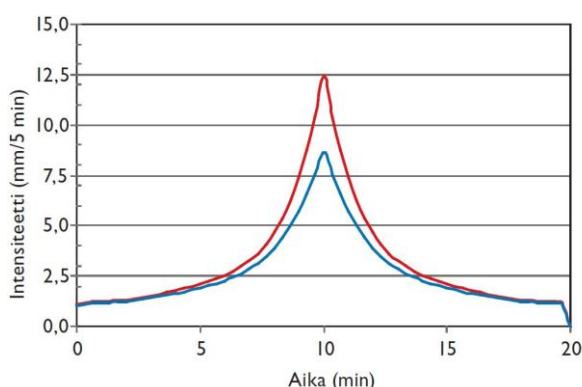
Pääosa Suomen sateista saapuu Atlantilta, jotka satavat syklonisina sateina. Kuitenkin runsassateisimmat kuukautemme ovat heinä- ja elokuu sillä rankimmat konvektiiviset sateet esiintyvät kesällä. Helsingissä meren läheisyys tasaa sadannan vuodenaikavaihtelua (Mustonen 1986). Keskimääräinen vuosisadanta Helsingissä vuosina 1981-2010 oli 655 mm. Kuitenkin sadannan vuosittainen vaihtelu on suurta ja vuosina 1900-2012 Helsingin vuosisadanta on vaihdellut n. 400 mm:stä aina yli 900 mm:iin asti (Ilmatieteen laitos 2013).

Keskimääräisen sadannan lisäksi hulevesien kannalta kiinnostavia sateen ominaisuuksia ovat sateen kesto-aika, sateen toistuvuus sekä sateen intensiteetti (RIL 2003). Sateen kestoajan ja rankkuuden arvioimiseksi vesihuollon suunnittelun tarkoituksiin on Suomessa yleisesti käytetty Katajiston vuonna 1969 laatimaa intensiteetti-toistuvuus-kesto-aika kuvaajaa, joka on esitetty Kuvassa 1.

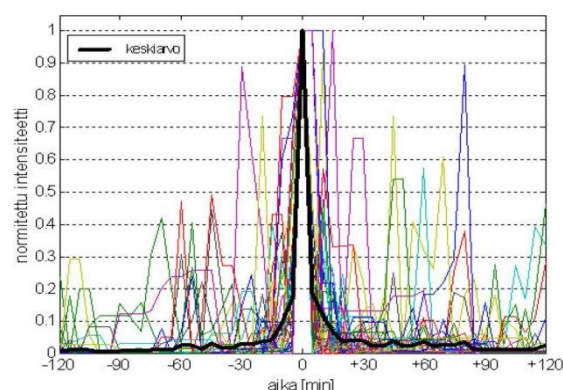


Kuva 1. Sateen intensiteetti-toistuvuus-kesto-aika kuvaaja. Vasemmalla pystyakselillä sateen intensiteetti mm/min. (Katajisto 1969, ref. RIL 2004)

Kuvaajan perusteella saatu mitoitussadetaapahtuma on intensiteetiltään samansuuruinen koko tapahtuman ajan, mutta todellisuudessa luonnollisten sadetaapahtumien aikana intensiteetti vaihtelee suuresti. Esimerkiksi Tanskassa (Madsen et al. 2009, Aaltonen et al. 2008) mitoitussateet määritetään niin kutsutulla *Chicago design storm* –menetelmällä (CDS), jolloin sateen intensiteetti on riippuvainen ajasta (Kuva 2). Rankkasateet ja taa-jamatulvat –hankkeen yhteydessä Kilpeläinen (2006) tarkasteli Kaisaniemessä tapahtu-neiden rankkasateiden intensiteetin ajallista jakautumista ja kuten Kuvista 2 ja 3 on ha-vaittavissa, vastaa CDS –mitoitussade keskimäärin paremmin todellisia sadetaapahtumia verrattuna nykyiseen tasaisen intensiteetin mitoituskäytäntöön, vaikkakin yksittäisen sadetaapahtuman aika-intensiteetti kuvaaja voi poiketa merkittävästi CDS –kuvaajasta (vrt. Kuva 2 ja Kuva 19). Luonnollisten sadetaapahtumien kuvaaminen muuttuvalla in-tensiteetillä tulisi ottaa mallinnuksessa huomioon ja tämän vuoksi mitoitussadekäytäntö-jä on suositeltu uudistettaviksi (Aaltonen et al. 2008).



Kuva 2. Esimerkki Chicago design storm -mitoitussateen aika-intensiteettiriippuvuudesta. (Aaltonen et al. 2008)



Kuva 3. Kaisaniemessä mitattujen rankkasateiden ajallinen jakauma. (Kilpeläinen 2006)

2.1.2 Ilmastonmuutoksen vaikutus sadetapahtumiin

Aaltonen et al. (2008) selvittivät ilmastonmuutoksen vaikutuksia sateiden esiintymiseen Suomessa ja raportissa on annettu ehdotuksia siitä, miten nykyisiä mitoituskäytäntöjä tulisi muuttaa ilmastonmuutoksen seurauksena. Mallien mukaan touko-syyskuun sademäärät kasvavat Suomessa 10–15% jaksolla 2071–2100 siten, että nimenomaan rankkasateet voimistuvat keskimääräistä enemmän. Aaltonen et al. (2008) suosittelevatkin, että mitoitushjeet tulisi tarkistaa ilmastonmuutos huomioon ottaen. Esimerkiksi nykyisten mitoitustapahtumien toistuvuuksia on esitetty muutettavan siten, että nykyisten 3, 5, 10 ja 25 vuoden välein toistuvien mitoitustapahtumien toistuvuus olisikin vastaavasti 2, 3, 5 ja 10 vuotta. Tanskassa puolestaan ilmastomallilla tehdyt tutkimukset osoittavat, että rankkasadetapahtumien esiintymistiheys vähintään kaksinkertaistuisi tulevaisuudessa (Grum et al. 2006). Madsen et al. (2009) esittävät lisäksi, että muutos on jo nyt havaittavissa viimeisen kymmenen vuoden aikana kerätystä aineistosta vaikkakin tutkimuksessa tiedostetaan Arnbjerg-Nielsenin (2006) havainnoima alueellinen vaihtelu. Myös useat muut ilmastomalleilla tehdyt tutkimukset (esimerkiksi Räisänen et al. 2004, May 2008) osoittavat rankkasateiden toistuvuuden ja voimakkuuden lisääntyvän Suomessa tulevaisuudessa.

May (2008) on tutkinut ilmastonmuutoksen vaikutusta rankkasateiden määrään Euroopan laajuisella mallilla ja hän esittää, että erityisesti Suomenlahden ympäristössä kesäaikaisten rankkasateiden toistuvuus ja voimakkuus lisääntyisivät vastaavasti 60 %:lla ja

30 %:lla. Artikkelissa kuitenkin suhtaudutaan Suomenlahdelta saatuihin tuloksiin osittain varauksella, sillä mallin antama kuuden asteen lämpötilannousu alueen pintavesille on tavallista suurempi. May (2008) perustelee monista muista aihetta käsittelevistä artikkeleista poiketen päätelmiään mallintamisen lisäksi yleisemmin ilmastonmuutoksen mahdollisesti aikaan saamalla makrotason meteorologisilla muutoksilla kuten merivirtojen ja matalapaineen keskusten kulkureittien muutoksilla, joten olettamukset eivät pohjaudu täysin tietokonemallin antamiin tuloksiin.

Alueellisten (Suomi, Pohjoismaat, Suomenlahden ympäristö jne...) ominaispiirteiden tunnistaminen meteorologian kannalta voisi helpottaa varautumista ja reagointia sateolojen muutoksiin ja tätä kautta mitoituskäytäntöjen muutostarpeisiin, mikäli maapallon suuren skaalan sääjärjestelmissä on tulevaisuudessa havaittavissa muutoksia.

2.2 Valunta

Valunta on veden määrä, joka jää kun maahan sataneesta vedestä vähennetään pidättyminen kasvustoon (interseptio), maahan imeytyminen (infiltraatio), painannesäilyntä sekä haihdunta. Interseptio kuvaa sitä osuutta sateesta, jonka kasvillisuus pidättää ja varastoi pinnalle, joten kasvittomilla pinnoilla interseptio luonnollisesti on hyvin vähäistä. Painannesäilyntä on se vesimäärä, joka sateesta kuluu pinnan epätasaisuuksien täyttämiseen ennen kuin vesi alkaa virrata pintaa pitkin. Painannesäilyntää kuvataan koko pinnalle jaetun vesikerroksen paksuudella, jonka tyypillisiä arvoja ovat läpäisemättömälle pinnalle 0,5-2 mm, tasakatoille 2,5-7,5 mm sekä noin 10 mm puutarhoille. Tietokonemalleissa interseptio sekä painannesäilyntä yleensä yhdistetään, kuten on tehty myös tämän työn yhteydessä. (Butler & Davies 2004)

2.3 Haihdunta

Haihdunnalla tarkoitetaan sitä sateen osaa, joka ei päädy valuntaan vaan palaa ilmakehään vesihöyrynä kasvien välityksellä sekä kosteilta pinnoilta. Haihdunta vaikuttaa maaperän vesimäärään ja täten välillisesti myös sadetapahtuman alkutilanteen maaperän vesipitoisuuteen ja veden imeytymiseen. Kuitenkin rankkasateiden aikana haihdunta voidaan olettaa merkityksettömäksi (Butler & Davies 2004) eikä sitä tämänkään työn yhteydessä käytetyssä mallissa ole huomioitu.

2.4 Imeyntä

Imeyntä eli se osa sateesta, joka imeytyy maanpinnan läpi maaperän huokosiin, määräytyy pinnan, maaperän ominaisuuksien sekä maaperän lähtötilaisen vesipitoisuuden mukaan ja se kuvaa kuinka paljon vettä aikayksikköä kohden (esimerkiksi mm/h) maaperä kykenee imemään (Butler & Davies 2004). Maaperään imeytyvää vettä kutsutaan pohjavedeksi silloin kun se saavuttaa pohjaveden pinnan (RIL 2003). Pohjaveden pinnan taso määritellään puolestaan siten, että sen alapuolella vesi täyttää maahiukkasten välisen huokostilan kokonaisuudessaan.

Normaalisti suurin osa Suomessa satavasta vedestä imeytyy maaperään (Mustonen 1986). Kuitenkin kaupungistuminen vähentää imeyntää, koska läpäisemättömän pinnan osuus kasvaa kaupungistumisen myötä (RIL 2003). Schueler (1995) esittää lisäksi, että kaupungeissa läpäiseväksi mielletty pinta ei aina ole läpäisevää vaan maaperän vedenjohtokyky heikkenee tiivistymisen vaikutuksesta. Pitt (1999) havaitsi puolestaan, että runsaasti kuormitetuilla alueilla maaperä saattoi olla tiivistymisen vuoksi täysin läpäisemätöntä jopa hiekkaisilla maalajeilla.

Eri maalajeille on määritetty vedenläpäisevyyskerroin, jonka esimerkkiarvoja on annettu Taulukossa 1. Kuten edellä on mainittu, veden imeytyminen maaperään vaihtelee maaperän ominaisuuksien lisäksi myös esimerkiksi maaperän sadetapahtumaa edeltävän vesipitoisuuden mukaan, joten vedenläpäisevyyskerrointa ei voida suoraan käyttää imeynnän määrää arvioitaessa. Imeyntän laskemiseen onkin kehitetty useita kaavoja, joista tunnetuimmat lienevät Hortonin kaava (esim. Butler & Davies 2004) sekä Green-Amptin kaava (esim. Rawls 1983).

Taulukko 1. Maalajien vedenläpäisevyyskerroimia. (Korhonen 1974, ref. RIL 2003)

Maalaji	Raekoko (mm)	Vedenläpäisevyyskerroin k (m/s)	Huomautuksia
Sora	2...60	$10^{-2} \dots 10^{-4}$	Hyvin vettäläpäisevä
Hiekka	0,06...2	$10^{-4} \dots 10^{-6}$	Hyvin vettäläpäisevä
Siltti	0,002...0,06	$10^{-5} \dots 10^{-9}$	Huonosti vettäläpäisevä
Savi	< 0,002	$10^{-8} \dots 10^{-10}$	Lähes vettäläpäisemätön

2.5 Kaupungistumisen vaikutus hydrologiaan

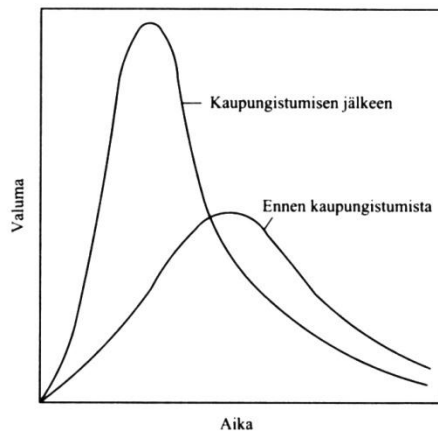
Kaupungistuminen vaikuttaa jokaiseen edellä kuvattuun hydrologiseen osaprosessiin. Vaikutuksen taustalla on yleensä lisääntynyt läpäisemättömän pinnan määrä ja sen aiheuttamat muutokset veden kulkeutumisessa. Taajama-alueilla myös vesitase kokonaisuudessaan poikkeaa luonnontilaisen alueen vesitaseesta (Mustonen 1986). Vesitase ei rakennetulla alueella määräydy valuma-alueen mukaan vaan käyttövetä tuodaan valuma-alueen ulkopuolelta samalla kun käytöstä poistettua viemärivettä sekä hulevesiä johdetaan alueelta pois.

Sateen määrään kaupungistuminen vaikuttaa tutkimusten mukaan lisäävästi. Kotolan & Nurmisen (2003) mukaan sateen määrä kaupungeissa olisi noin kymmenisen prosenttia suurempi kuin ympäröivillä alueilla. Selitystä tähän voidaan hakea rakennetun alueen kohonneesta lämpötilasta, virtausolojen muutoksesta sekä hiukkasmaisten epäpuhtauksien lisääntymisestä. Nämä tekijät kasvattavat sateen todennäköisyyttä. Kuitenkin kaupungistumisen vaikutusta on usein vaikea erottaa muista tekijöistä ja esimerkiksi Helsingissä meri lisää kesäaikaisten kuurosateiden määrää verrattuna ympäröiviin alueisiin.

Kaupungistumisen vaikutus haihduntaan on kaksijakoinen. Kuten edelläkin on mainittu, niin kaupungeissa lämpötila on korkeampi kuin ympäröivillä alueilla ja täten haihdunta on suurempaa. Jotta haihduntaa tapahtuisi, tulisi kuitenkin pinnoilla olla vettä ja kaupungistuminen vähentää tämän veden määrää. Lisääntyneen läpäisemättömän pinnan vuoksi vesi valuu pinnoilta nopeasti pois eikä haihduntaa ehdi tapahtua. Kaupungistumisen yhteydessä myös kasvien määrä vähenee ja näin ollen kasvien pidättämä sekä haihduttama vesimäärä pienenee. Esimerkiksi Ruotsissa tehdyssä tutkimuksessa (Hogland 1986, ref. Kotola & Nurminen 2003) todettiin haihdunnan olevan erään kaupungin keskustasta yli 30 % vähäisempää verrattuna läheiseen maaseutualueeseen. Vuodenajat vaikuttavat haihduntaan siten, että kasvukaudella haihduntapotentiaali on suurempi kuin sen ulkopuolella (RIL 2003). Tästä syystä kaupungistumisen aiheuttama kasvien määrän väheneminen vaikuttaa haihduntaan voimakkaammin nimenomaan kasvukauden aikana. Taajamatulvia tarkasteltaessa täytyy kuitenkin muistaa aikaisemminkin mainittu haihdunnan vähäinen merkitys lyhytaikaisten rankkasateiden aiheuttamassa valunnassa, joka vähentää tarvetta haihdunnan määrän yksityiskohtaiselle arvioinnille.

Imeyntään kaupungistuminen vaikuttaa pääasiassa läpäisemättömänä pintana. Päälystetty pinta heikentää veden imeytymistä maaperään. Tällä on kaksi merkittävää vaikutusta. Ensinnäkin alueen pohjaveden pinta laskee aiheuttaen ongelmia rakennusten perustuksille sekä heikentäen vedenhankinnan mahdollisuuksia. Toiseksi se vesimäärä joka ei imeydy maaperään, päätyy pintavalunnaksi ja lopulta hulevedeksi.

Valunnan määrä kaupunkialueella vaikuttaa suoraan hulevesien määrään ja kyseinen kaupungistumisen aiheuttama hydrologinen muutos on tämän työn kannalta mielenkiintoisin. Kaupungistuminen lisää läpäisemättömän pinnan määrää sekä tehostaa pinnan kuivatusta ojilla sekä viemäreillä ja kasvattaa täten pintavalunnan osuutta vesitaseessa samalla kun virtaamahuiput kasvavat, kuten Kuvassa 4 on esitetty.



Kuva 4. Kaupungistumisen vaikutus pintavalunnan määrään ja valuntahuipun ajoittumiseen. Läpäisemättömän pinnan osuuden kasvattaminen kasvattaa valuntahuipun arvoa ja siirtää valuntahuippua aikaisemmaksi. (Melanen 1982, ref. RIL 2003)

3 Luonnonmukaiset hulevesien hallintamenetelmät

Luonnonmukaisten hulevesien hallintamenetelmien tarkoituksena on luonnontilaisilla alueilla yleisten veden liikkeisiin ja laatuun vaikuttavien prosessien säilyttäminen ja edistäminen rakennetuilla alueilla. Menetelmien avulla on mahdollista vähentää hulevesien kokonaismäärää, pienentää virtaamahuippuja sekä poistaa epäpuhtauksia hulevesistä esimerkiksi viivyttämällä, imeyttämällä ja haihduttamalla hulevesiä erilaisissa luonnonmukaisissa rakenteissa (Butler & Davies 2004, Dietz 2007, Kuntaliitto 2012). Jäljempänä on käyty läpi yksityiskohtaisemmin erilaisia luonnonmukaisen hulevesien hallinnan ratkaisuja sekä pohdittu rakenteiden toimivuutta ja sopivuutta tiiviisti rakennetuille alueille.

3.1 Viivytyksrakenteet

Hulevesien viivytyksrakenteilla tarkoitetaan rakenteita, jotka hidastavat ja varastoivat hulevesiä sadetapahtuman ajan. Sadetapahtuman päätyttyä viivytyksrakenteisiin varastoitunut vesi puretaan painovoimaisesti tai pumpaamalla, jolloin vastaanottavan viemärin tai vesistön tulvahuippua saadaan tapahtuman osalta pienennettyä. Viivytyksrakenteella ei täten ole mahdollista vähentää hulevesien määrää, mutta viivyttämällä voidaan jakaa syntyvä hulevesi pidemmälle aikavälille. Koska imeytymistä ei viivytyksrakenteissa juurikaan tapahdu, on tärkeää kiinnittää erityistä huomiota tyhjennys- ja ylivuotorakenteiden mitoittamiseen ja toimivuuteen. Viivytyksrakenne voidaan toteuttaa joko maanpäällisenä tai maanalaisena ratkaisuna. Maanpäällisiä rakenteita ovat erilaiset rakennetut altaat, kosteikot ja lammikot kun taas maanalaiset ratkaisut perustuvat vesitilavuuden rakentamiseen maanpinnan alapuolelle. (Kuntaliitto 2012)

3.1.1 Maanpäälliset viivytyksrakenteet

Hulevesilammikko ja –kosteikko ovat rakenteita, jotka alentavat huleveden virtausnopeutta ja vähentävät hulevesivirtaamia rakenteen alapuolisilla alueilla. Lammikko ja kosteikko ovat molemmat kasvipeitteisiä painanteita, mutta tiiviisti rakennetuilla alueilla samankaltainen viivytyks voidaan saavuttaa ympäristöön mahdollisesti paremmin sopivalla rakennetulla altaalla. Rakennettu allas on täysin keinotekoinen elementti, jossa ei välttämättä ole lainkaan kasvillisuutta toisin kuin lammikoissa ja kosteikoissa. Kosteikko ja lammikko eroavat toisistaan kasvillisuuden sekä veden virtausreittien osalta. Kos-

teikossa yhtenä olennaisena tarkoituksena on myös veden laadun parantaminen pidättämällä ravinteita ja edistämällä kiintoaineksen laskeutumista virtausnopeuksia hidastamalla, mutta siihen ei tämän työn yhteydessä perehdytä mainintaa syvällisemmin.

Hulevesiä voidaan myös pyrkiä viivyttämään ja johtamaan painanteiden avulla. Painanne voi olla esimerkiksi ympäristöään alempana sijaitseva laaja ruohoalue, jonne muodostuu vesipinta vain suunnitellun mitoitusasteen aikana. Sadetapahtuman jälkeen vesitilavuus tyhjennetään hallitusti poistorakenteiden avulla ja painanne palautuu uudelleen vedettömäksi kasvipinnaksi. (Butler & Davies 2004, Kuntaliitto 2012)

3.1.2 Maanalaiset viivytyksrakenteet

Maanalaiset viivytyksrakenteet sopivat erityisesti tiiviisti rakennetuille kaupunkialueille, joissa ei ole vapaata tilaa maan päälle rakennettaville alueille tai lammikoille (Kuntaliitto 2012). Ratkaisu voidaan toteuttaa betonielementtien tai – putkien avulla, mutta markkinoilla on myös saatavilla erilaisia kaupallisia ratkaisuja (Butler & Davies 2004). Kouvolan kaupungissa on asennettu Kuvan 5 mukaisia hulevesikasetteja keskusta-alueen hulevesitulvien vähentämiseksi (Sänkiäho & Sillanpää 2012). Liitokset hulevesiviemäriverkkoon on suunniteltu niin, että hulevesiä ohjautuu kennorakenteeseen vain rankkasateiden aikana. Kuvassa 6 on puolestaan esitetty järjestelmä, joka perustuu maan alle asennettaviin muoviputkielementteihin. Avomemman rakenteen vuoksi tämänkaltaisen järjestelmän on mahdollisesti helpompi puhdistaa ja huoltaa (Harju 2013).



Kuva 5. Kennomainen hulevesien viivytyksrakente. (Wavin-Labko Oy. 2013)



Kuva 6. Putkimainen hulevesien viivytyks- ja imeytysrakente. Putken korkeus on noin puolitoista metriä. (StormTech 2012)

3.2 Imeytysrakenteet

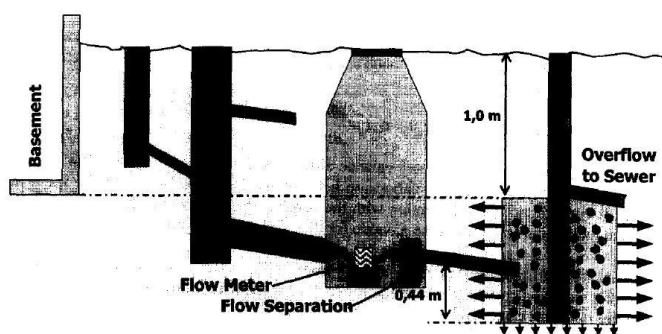
Imeytysrakenteiden tarkoituksena on imeyttää satanutta vettä maaperään, jolloin pintavaluntaa ja sitä kautta hulevesimäärää saadaan vähennettyä (Kuntaliitto 2012). Imeyttämisen etuina on, että sen avulla voidaan vähentää muodostuvien hulevesien kokonaismäärää ja sillä pystytään estämään pohjaveden pinnan alenemista, joka joillakin alueilla saattaa vahingoittaa rakennuksia. Kuitenkin erittäin tiiviisti rakennetuilla alueilla imeyttävien rakenteiden hyötyjä tulee arvioida erityisen tarkasti, mikäli imeytysrakenne sijaitsee lähellä rakennuksia. Tällöin imeytyvä vesi saattaa päätyä suoraan perustusten kuivatusjärjestelmiin ja tätä kautta viemäriverkostoon. Imeytysrakenteet ovat hyvin samankaltaisia kuin viivytysrakenteet, mutta merkittävä ero on imeytysrakenteiden pohjakerros, jonka avulla osa pintavalunnasta voidaan johtaa maaperään ja siten vähentää hulevesien kokonaismäärää (Kuntaliitto 2012). Veden johtaminen maaperään asettaa joitakin vaatimuksia alueen maalajille. Kirjallisuudessa on esitetty, että imeytysrakenteet eivät sovellu maaperään, jonka vedenläpäisevyys on alle 0,001 mm/h (Butler & Davies 2004), joten imeytysratkaisut eivät tämän rajauksen mukaan sovellu esimerkiksi savimaille.

3.2.1 Läpäisevät päällysteet

Läpäiseviä päällysteitä voidaan käyttää asfaltin sijasta kohteissa, joissa liikenne on kevyttä tai sitä ei ole lainkaan (Butler & Davies 2004). Tällaisia ovat esimerkiksi kevyeen liikenteen väylät, pysäköintialueet sekä kortteleiden sisäpihat. Helsingissä myös raitiovaunukiskojen välimateriaalina on käytetty läpäiseviä pinnoitteita. Läpäisevä päällyste perustuu karkean kiviaineksen päälle asennettuun kivetykseen, muovikennoihin tai avoimeen asfalttiin (Kuntaliitto 2012). Kivetykseen käytetään reiällisiä erikoiskiviä tai kivet ladotaan niin harvasti, että kivien väliin jäävä tila mahdollistaa veden kulkeutumisen alusrakenteeseen. Muovikenno puolestaan täytetään murskeella vedenläpäisevyyden aikaansaamiseksi. Avoin asfaltti on kiviaineksen ja bitumin seos kuten tavallinenkin asfaltti, mutta avoimessa asfaltissa bitumin ja hienoaineksen määrää on vähennetty. Näin rakenteesta saadaan huokoinen ja vettä läpäisevä. Läpäisevien päällysteiden huonona puolena on hienoaineksen aiheuttama mahdollinen tukkeutuminen, jonka lisäksi Ruotsissa suoritetuissa tutkimuksissa (Bäckström & Bergström 2000) läpäisevän asfaltin havaittiin menettävän 90% läpäisykyvystään lumen sulamisen aikana. Kuitenkin

tukkeutumisen aiheuttamaa heikkoa läpäisykykyä voidaan parantaa puhdistamalla päällyste, jolloin vedenläpäisevyys saadaan palautettua lähes alkuperäistä vastaavaksi (Scholz 2007, Sansalone 2011).

Läpäisevien pintojen käyttäminen tiiviisti asutulla alueella herättää kysymyksiä, joita ei ole vielä täysin ratkaistu. Helsingin kaupungin rakennusviraston projektinjohtajan (Rajala 2013) mukaan pääasiallisena esteenä läpäisevien pintojen käytölle kantakaupungissa on tällä hetkellä puutteellinen tieto ja kokemus ratkaisujen vaikutuksista ympäröivien kiinteistöjen kuivatukselle. Pelkona on, että rakennusten kuivatusjärjestelmät ylikuormittuvat johtaen kosteus- ja homevaurioihin, mikäli aiemmin läpäisemättömät pinnat muutetaan läpäiseviksi aiheuttaen korvausvaatimuksia kiinteistöjen omistajilta kaupungille. Kuitenkin esimerkiksi Tanskassa on yleisessä käytössä ratkaisuja, joissa imeytyskaivantojen avulla vettä johdetaan maaperään kortteleiden sisäpihoilla hyvinkin lähellä rakennusten perustuksia (Warnaars et al. 1999). Näissä ratkaisuissa veden ajautuminen rakenteisiin estetään imeytyskaivantoon liitetyllä ylivuotojärjestelyllä (Kuva 7). Onkin mahdollista, että varauksellinen suhtautuminen läpäiseviin pinnoitteisiin saattaa johtua enemmänkin vanhasta tottumuksesta ja haluttomuudesta uuden kokeiluun, kuin varsinaisista menetelmän tuomista tunnetuista ongelmista.



Kuva 7. Esimerkki imeytyskaivannon yhteydessä olevasta ylivuotojärjestelystä. Järjestelyn tarkoituksena on estää imeytyskaivannon veden nouseminen rakennuksen perustusten tasalle. (Warnaars et al. 1999)

Suomessa läpäisevien päällysteiden käyttö on vielä melko vähäistä ja osittain syy on edellä mainituissa epävarmuuksissa ja tutkimustiedon puutteessa. Siitä syystä Teknologian tutkimuskeskus VTT:ssä on vuoden 2012 lopussa käynnistetty kolmevuotinen tutkimushanke (VTT 2013), jonka tarkoituksena on

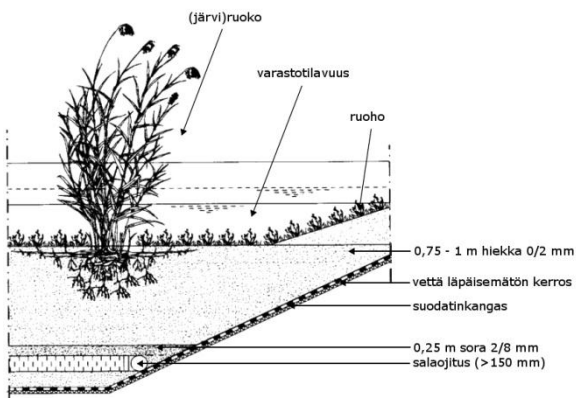
tutkia ja kehittää läpäiseviä pintamateriaaleja. Tutkimukseen osallistuu VTT:n lisäksi hulevesisuunnittelijoita, kaupunkien virkamiehiä sekä teollisuuden edustajia. Hankkeen tavoitteena on luoda suunnittelukäytäntöjä ja ratkaista talven aiheuttamia ongelmia läpäisevien pintojen käytössä.

3.2.2 Imeytyskaivannot

Imeytykseen voidaan myös käyttää karkealla kiviaineksella tai muovikennoilla täytettyä imeytyskaivantoa (Kuntaliitto 2012). Imeytyskaivannon toiminta perustuu karkean kiviaineksen väliin muodostuvaan huokostilaan, joka varastoi vettä ja päästää sen hiljalleen imeytymään maaperään (Butler & Davies 2004). Imeytyskaivanto voidaan sijoittaa kokonaan maan alle tai kaivanto voidaan jättää avoimeksi, jolloin vesi saa varastoitua imeytysrakenteen päälle muodostaen vapaan vesipinnan. Mikäli imeytyskaivannossa käytetään luvussa 3.1.2 esitettyä muovirakennetta, tulee sen perustuksissa ottaa imeytyminen huomioon. Hulevesiviemäriverkostoon on myös mahdollista liittää pohjattomia imeytyskaivoja, jotka mahdollistavat kaivantojen tavoin huleveden imeytymisen maaperään (Butler & Davies 2004). Imeytyskaivot kuitenkin vaativat säännöllistä huoltoa pohjarakenteen vedenläpäisykyvyn varmistamiseksi ja Helsingin kaupungilla erityisesti imeytyskaivojen tukkeutuminen on koettu ongelmalliseksi.

3.2.3 Imeytyspainanteet

Imeytyspainanne on kasvillisuuden peittämä laakea alue, joka mahdollistaa huleveden johtamisen, viivyttämisen sekä imeyttämisen. Hyvin vettä johtavassa maaperässä imeytyspainanne ei vaadi lammikoitumistilan muotoilun lisäksi juurikaan muita toimenpiteitä. Huonosti vettä läpäisevässä maaperässä voidaan painanteen alle rakentaa imeytyskaivannon tyyppinen kiviaineskerros, jolloin kyseessä on yhdistetty imeytyspainanne ja –kaivanto. Imeytyspainanne varustetaan aina ylivuotoreitillä, joka mahdollistaa mitoitustilanteen ylittävän vesimäärän hallitun johtamisen pois alueelta. (Kuntaliitto 2012)



Kuva 8. Tyypillinen suodatuspainanteen rakenne. Rakenteen läpi suodatettu vesi kerätään salaojaverkoston avulla. (Uhl & Dittmer 2005)

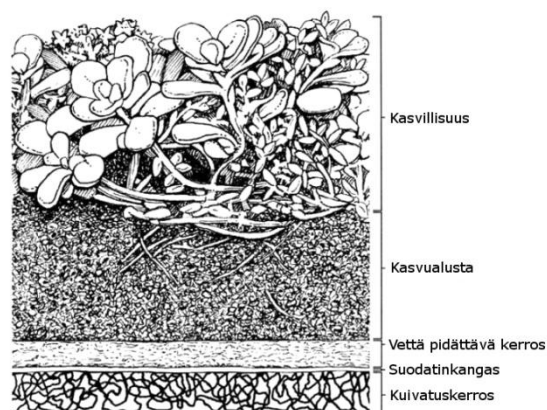
Joissakin Euroopan maissa on käytetty suodatuspainanteita (ts. biosuodatusrakenteita) parantamaan veden laatua sekaviemäreiden tulvimistilanteissa ennen ylivuodon laskemista vesistöön (Meyer et al. 2012). Tarkoituksena on pidättää ylitulvivan sekaviemärivereden mukana kulkeutuvia ravinteita ja kiintoaineita kasvillisuuden ja maaperäsuodatuksen avulla, mutta samalla

estää veden imeytyminen syvemmälle maaperään kalvorakenteen avulla. Kuvassa 8 on esitetty Saksassa tyypillinen suodatuspainanteen rakenne. Kyseisen kaltaisessa rakenteessa veden pääasiallinen kulkeutumisuuunta on maakerrosten läpi ja maaperään suodattunut vesi johdetaan pois salaojaputkien kautta. Painanteen annetaan tyhjentyä vedetömäksi ylivuototapahtumien välillä. Tutkimusten mukaan (Frechen et al. 2006) suodatuspainanteen avulla voidaan tehokkaasti vähentää erityisesti kiintoaine- ja ammoniumtyppikuormitusta sekä kemiallista ja biologista hapenkulutusta siihen johdetussa seka- viemärivedessä. Suodatuspainanteita on käytetty Saksassa jo yli kahden vuosikymmenen ajan ja esimerkiksi Uhl & Dittmer (2005) esittelevät siellä vallitsevaa suunnittelua ja mitoituskäytäntöä sekä suodatuspainanteiden ylläpidon vaatimuksia.

3.3 Hajautetut järjestelmät

3.3.1 Viherkatot

Viherkaton toiminta perustuu katon päälle istutetun kasvillisuuden ja alusrakenteen muodostamaan vedenpidätyskykyyn (Butler & Davies 2004). Rakenne koostuu usein kasvillisuuden muodostamasta päällyskerroksesta, turpeisesta kasvualustasta sekä kerrosten alapuolisesta kuivatusjärjestelystä (Kuva 9). Vedenpidätyskyvyn lisäksi kesäaikana viherkatto lisää haihduntaa, jolloin vallun määrä katolta vähenee entisestään (Kuntaliitto 2012). Viherkaton kyky pidättää



Kuva 9. Tyypillinen viherkaton rakenne. Rakenne koostuu kasvillisuudesta, kasvualustasta sekä kerrosten alapuolisesta kuivatuskerroksesta. (VanWoert et al. 2005)

vettä riippuu kasvillisuudesta, kerrospaksuudesta sekä katon kaltevuudesta siten, että vedenpidätyskyky nousee kasvillisuuden ja kerrospaksuuden kasvaessa sekä katon kaltevuuden pienentyessä (VanWoert et al. 2005). Yhteys kaltevuuden ja vedenpidätyskyvyn välillä ei kuitenkaan ole yhtä selkeä kuin kasvillisuuden ja kerrospaksuuden osalta.

Usein viherkattoja asennetaan tasakatoille ja suuri osa viherkattojen vedenpidätyskykyyn liittyvästä tutkimuksesta onkin suoritettu tasaisilla tai lähes tasaisilla katoilla. Kuitenkin kaupunkikeskustoissa, kuten Helsingissä kattojen kaltevuus voi olla jopa 45 astetta. Viherkaton sijoittaminen jyrkälle katolle asettaa suunnittelulle ja toteutukselle erityisiä haasteita, jotta kasvillisuus ei lähtisi liikkeelle ja valuisi pois. Osa viherkattorakenteiden valmistajista onkin tuonut markkinoille ratkaisuja, jotka mahdollistavat kasvualustan asentamisen erittäin jyrkille, jopa 45 asteen kattokaltevuuksille (ZinCO 2013, American Hydrotech 2013a).



Kuva 10. Kaltevalle katolle perustettu viherkatto. (American Hydrotech 2013b)

Kuvassa 10 näkyy esimerkki jyrkästä katosta, joka on päällystetty kasvillisuudella. Tutkimusten mukaan viherkaton jyrkkyyden kasvattaminen vähentää kasvillisuuden kykyä pidättää vettä, mutta suurempi merkitys vaikuttaa olevan sadetapahtumaa edeltävä kosteus viherkattorakenteissa. Villareal & Bengtsson (2005) tutkivat enimmillään 14 asteen kattokaltevuuksia ja he havaitsivat, että kyseisellä kaltevuudella viherkaton suurin vedenpidätyskyky on 10 mm. Tutkimusta viherkattojen toimivuudesta jyrkillä kaltevuuksilla on tehty vähän, mutta mikäli viherkatoilla onnistutaan pidentämään valunnan aikaa ja leikkaamaan huippuvaluntaa, niiden avulla on mahdollista ehkäistä sekaviemäreiden tulvimista (Getter et al. 2007).

Eräs viherkattojen merkittävä etu on tilankäytössä. Viherkatot ovat varteenotettava vaihtoehto erittäin tiiviisti rakennetuilla kaupunkialueilla, joissa hulevesien hallintajärjes-

telmille ei ole mahdollista varata tilaa maanpinnan tasosta (Hathaway et al. 2008). Viherkattojen avulla on myös mahdollista tasapainottaa kaupungin rakennettua ympäristöä tuomalla lisää kasvillisuutta kaupunkikuvaan (Villarreal & Bengtsson 2005). Suomessa viherkattojen käyttöä tutkitaan useissa kohteissa esimerkiksi pääkaupunkiseudun alueella (Helsingin yliopisto 2013). Kyseisen hankkeen painopiste on kuitenkin voimakkaasti kasvillisuudessa ja viherkattoja tulisi tutkia myös hulevesien vähentämisen kannalta Suomen oloissa ja kaltevilla kattopinnoilla.

3.3.2 Kiinteistösäiliöt

Katoilta tulevaa valuntaa voidaan viherkaton lisäksi viivyttää myös rännien syöksyputkien alaosaan sijoitetuilla sadetynnyreillä tai vastaavilla säiliörakenteilla (Butler & Davies 2004). Sadetynnyri kerää sateen alkaessa katolta rännien avulla kerättyä vettä kunnes säiliön tilavuuden täyttyessä vesi johdetaan tynnyrin ohi viemäriin tai pihalle. Sateen päättyessä tynnyrissä oleva vesimäärä voidaan purkaa esimerkiksi virtausta rajoittavan purkuputken avulla tai vaihtoehtoisesti vettä voidaan käyttää pihan viheralueiden hoidossa. Jälkimmäisessä tapauksessa sadetynnyreillä saadaan myös vähennettyä viheralueiden hoitoon käytettävän vesijohtoveden määrää.

Abi Aad et al. (2009) käyttivät yksittäisen sadetynnyrin kapasiteettina noin 280 litraa, mutta tynnyreitä voidaan sijoittaa valuma-alueelle hajautetusti useille eri kiinteistöille ja näin saavuttaa suurempi viivytystilavuus. Tynnyreitä valmistetaan erityyppisiin käyttötarkoituksiin ja esimerkiksi Kuvassa 11 on esitetty tynnyreitä jotka voivat toimia maisemasuunnittelun elementteinä kiinteistöllä. Vaihtoehtona tynnyreiden tarjoamalle kiinteistökohtaiselle viivytystilavuudelle voidaan katoilta tulevat sadevedet johtaa myös esimerkiksi istutusten alle rakennettavaan pienimuotoiseen viivyty- tai imeytysrakenteeseen.



Kuva 11. Erilaisia sadevesitynnyreitä. Muotoilun tarkoituksena on sovittaa tynnyrit paremmin ympäröivään pihapiiriin. (Hayneedle Inc. 2013)

4 Alueiden kuvaukset

Kaikki tarkasteltavat kohteet sijaitsevat Etelä-Suomessa Helsingin kaupungin alueella. Helsingin keskimääräinen vuosisadanta on noin 650 mm ja vuoden keskilämpötila on noin +6 °C (Ilmatieteen laitos 2013). Helsingissä vuosi jakautuu neljään vuodenaikaan ja tästä syystä lämpötila saattaa vaihdella vuoden aikana hieman alle -30 °C ja hieman yli +30 °C välillä. Terminen kasvukausi kestää Helsingissä keskimäärin hieman yli 185 vuorokautta. Kuvassa 12 on esitetty Helsingin sijainti Suomen kartalla samoin kuin tarkastelualueiden sijoittuminen Helsingissä.



Kuva 12. Tarkastelualueiden sijainti. Kaikki kohteet sijaitsevat Helsingin kaupungin alueella ja kaksi kohteista sijaitsee tiiviisti rakennetussa kantakaupungissa. Helsinki on merkitty sinisellä ja Kapteeninpuistikko, Snellmaninkatu sekä Pitäjänmäentien alikulku vastaavasti numeroilla 1, 2 ja 3. (Maanmittauslaitos 2005)

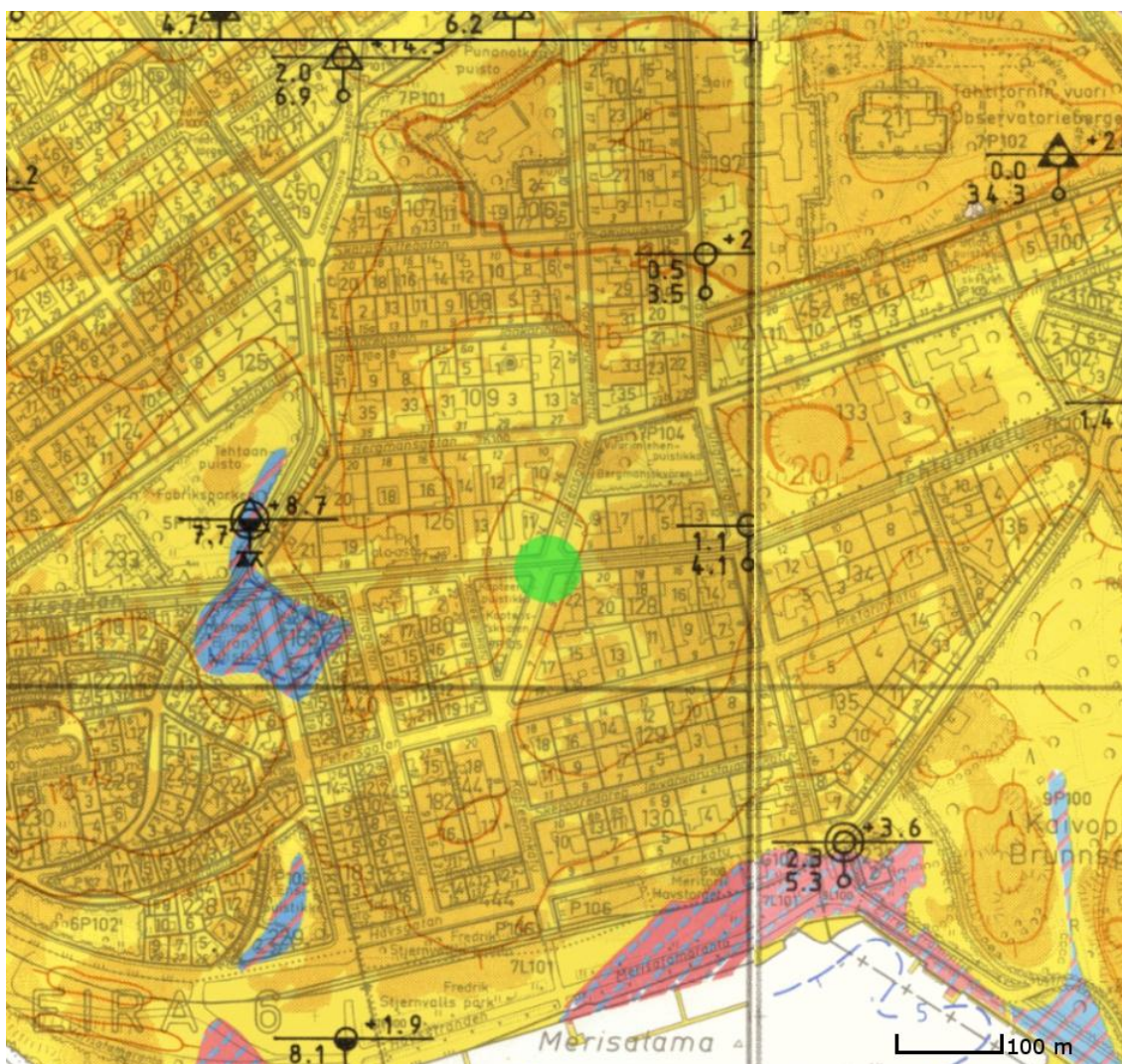
4.1 Kapteeninpuistikko

Hulevesitulvaherkäksi kohteeksi määritelty Kapteeninkadun ja Tehtaankadun risteys sijaitsee Kapteeninpuistikon koilliskulmassa Etelä-Helsingissä, erittäin tiivisti rakennetulla vanhalla keskusta-alueella (kohde 1 Kuvassa 12). Alueen viemäriverkko on vanhaa eivätkä putkikoot kaikilta osin täytä nykyisiä suunnittelukriteereitä. Hulevedet johdetaan koko alueella sekaviemäriverkostoon, jonka kunto on osittain heikentynyt ja joiltakin osin viemärilinjoja on sujutettu (Neiramo 2013a) heikentäen edelleen verkoston kapasiteettia. Ongelmakohdan lähimmät tulvavaurioille alttiit kohteet ovat puiston eteläkulmassa sijaitseva muuntamo sekä ympäröivien rakennusten kellaritilat.

Tarkasteltava alue rajaa sisäänsä kaksi puistikkoa, osan Tähtitornin vuorta sekä osan Kirurgisen sairaalan tontista. Muutoin alue koostuu kantakaupungille ominaisista umpikortteleista sekä katualueista. Kaiken kaikkiaan tarkastelualueen pinta-alasta noin 85 % on läpäisemätöntä pintaa.

Alueella suoritetun katselmuksen perusteella on laadittu kartta (Liite 2), joka osoittaa miltä osin kattovedet johdetaan syöksyputkien kautta kaduille ja miltä osin puolestaan suoraan sekaviemäriverkostoon. Kartasta voidaan havaita, että merkittäväällä osalla alueesta kattovedet johdetaan suoraan kaduille.

Alueen maaperäkartta on esitetty Kuvassa 13 ja siitä nähdään, että tarkasteltavan alueen maaperä vaihtelee kallion, kitkamaan ja täytemaan välillä niin, että kallio on merkittävän lähellä maanpintaa useassa paikassa.



Kuva 13. Kapteeninkadun lähialueen maaperäkartta. Kallionpinta on lähellä maanpintaa tai kokonaan paljastunut useissa kohtaa tarkastelualuetta. Ongelmakohte on osoitettu vihreällä ja maalaajimerkinnot on esitetty Liitteessä 1.

4.2 Snellmaninkatu

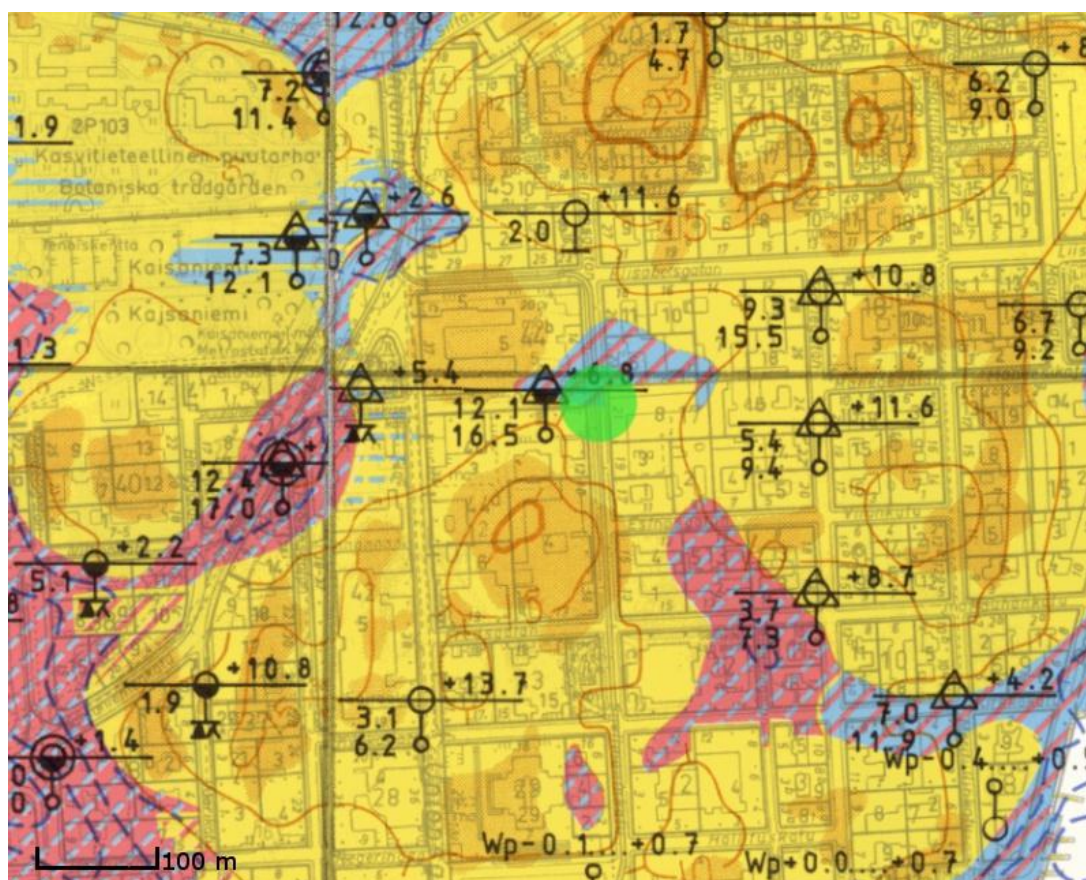
Edellisen kohteen tavoin Snellmaninkatu sijaitsee tiiviisti rakennetulla alueella Etelä-Helsingissä ja tarkasteltavana oleva hulevesitulvaherkkä kohde sijaitsee lähellä Snellmaninkadun ja Yrjö-Koskisen kadun risteystä (kohde 2 Kuvassa 12). Alue on kokonaisuudessaan sekaviemäriöity ja viemäriputket ovat pääosin vanhoja.

Alueen itäreuna koostuu asuintalojen muodostamista umpikortteleista, mutta muutoin alue koostuu lähes täysin muista toimintoja palvelevista rakennuksista. Rakennuksista suurin osa kuuluu Helsingin Yliopistolle. Alueella on myös joitakin liikerakennuksia,

julkishallinnon rakennuksia, yksi koulu ja yksi kirkko. Alueen puistot ovat Varsapuitikko sekä tarkastelualueen luoteiskulmassa sijaitseva Kaisaniemen puisto. Lämpäisemäntöntä pinta-alaa tarkastelualueella on lähes 88 %.

Katselmuksen perusteella alueen kattovesiä johdetaan lähes yhtäläisesti sekä kaduille, että suoraan viemäriverkkoon (Liite 3).

Alueen maaperä on esitetty Kuvassa 14 ja siitä voidaan huomata, että alue on pääasiassa luokiteltu kitkamaaksi, mutta kalliopinta on monin paikoin lähellä pintaa tai kokonaan paljastunut. Kartasta voidaan havaita myös joitakin savi- ja täytemaa-alueita.



Kuva 14. Snellmaninkadun lähialueen maaperäkartta. Ongelmakohde on osoitettu vihreällä ja maalajimerkinnät on esitetty Liitteessä 1.

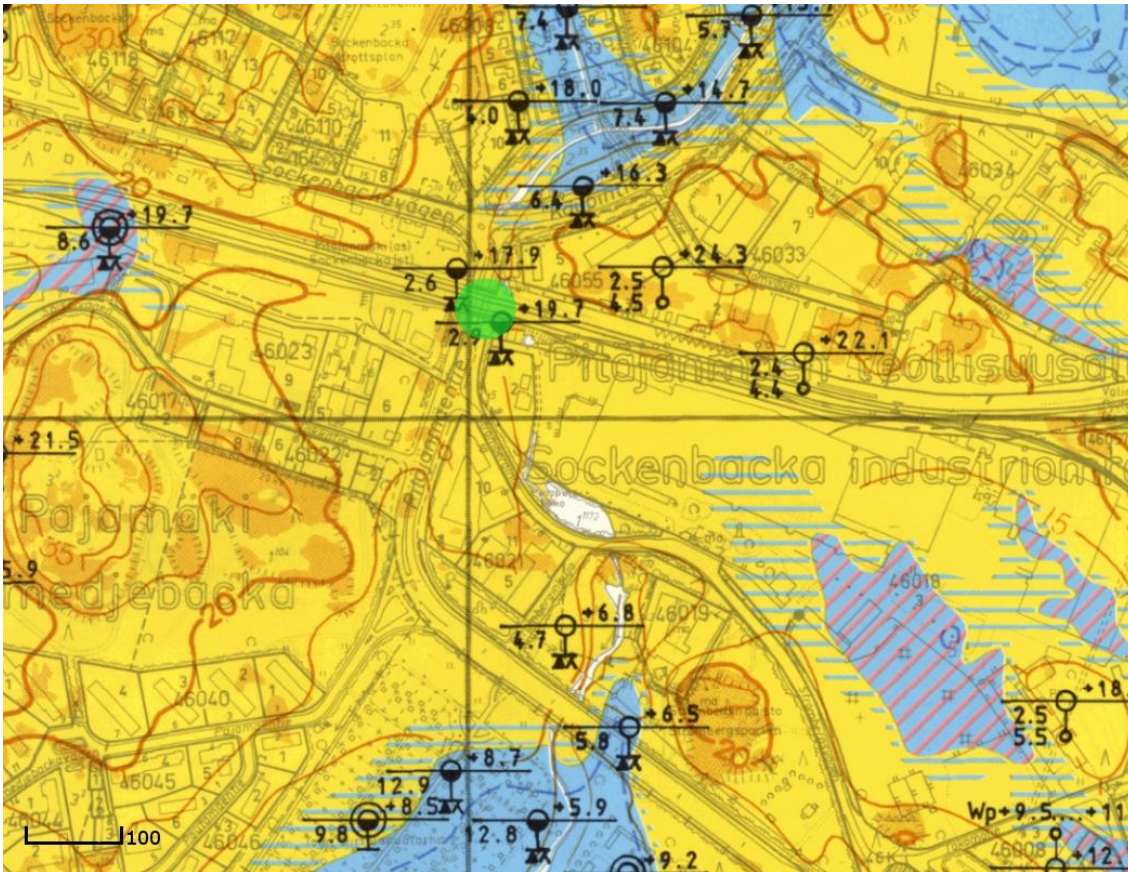
4.3 Pitäjänmäentien alikulku

Pitäjänmäki sijaitsee Länsi-Helsingissä lähellä Helsingin ja Espoon rajaa ja Pitäjänmäentie alittaa rautatien hieman Pitäjänmäen juna-aseman itäpuolelta. Kyseinen alikulku on määritelty hulevesitulvaherkäksi kohteeksi (kohde 3 Kuvassa 12). Alue on erillisviemäroitu, joten tarkastelussa otetaan huomioon vain hulevesiviemäriverkosto.

Alue koostuu junaradan pohjoispuolella pääasiassa asuinrakennuksista kun taas radan eteläpuolella sijaitsee laaja teollisuusalue. Alueella ei ole lainkaan puistoja, mutta tarkastelualueella on jonkin verran metsää alueen pohjois- ja eteläpäädyissä. Läpäisemättömän pinnan osuus tarkastelualueella on noin 76 %.

Erillisviemäröinnistä johtuen alueen kaikkien kattovesien oletetaan päätyvän viemäriin lukuun ottamatta yhtä rakennusta, jonka kattovesien tiedetään valokuvien perusteella päätyvän kadulle.

Tarkastelualueen maaperä on kokonaisuudessaan kitkamaata ja kallio on paikoittain lähellä maanpintaa (Kuva 15). Tarkastelualueen läheisyydestä löytyy lisäksi joitakin savialueita.



Kuva 15. Pitäjänmäentien alikulun lähialueen maaperäkartta. Ongelmakohde on osoitettu vihreällä ja maalajimerkinnät on esitetty Liitteessä 1.

5 Menetelmät

Ongelma-analyysissä valitulle kohteelle on rajattu valuma-alue sekä kohteeseen vaikuttava viemäriverkosto. Valuma-alue on rajattu laserkeilausaineistosta saatujen korkeustietojen perusteella määrittämällä ne alueet, joiden hulevedet päätyvät, joko itse ongelmakohteeseen tai ongelmakohteeseen vaikuttavaan viemäriverkkoon. Rakennusten osalta valuma-alueeseen on laskettu mukaan kaikki ne rakennukset, joiden oletetaan liittyneen kohteeseen vaikuttavaan viemäriverkoston. Viemäriverkosto on rajattu kohteen yläpuoliselta osalta siten, että mukana ovat kaikki ne verkoston osat, jotka johtavat hule- tai sekaviemäriveresiä ongelmakohteeseen viemäreiden kallistuksen ja liitoskohtien perusteella. Myös kohteen alapuolinen verkosto on otettu huomioon viemärin kapasiteetin ylittymisen seurauksena aiheutuvan padotuksen vuoksi. Alapuolisesta verkostosta on pyritty tunnistamaan jokin verkoston osa, jonka voidaan olettaa purkavan siihen saapuvan virtaaman vapaasti, jolloin verkon padotustarkastelu voidaan päättää kyseiseen paikkaan. Tällaisia verkoston osia voivat olla esimerkiksi ylivuotokaivot, pumppaamoiden imualtaat tai kalliotunnelit. Rajauksen jälkeen alueen ominaisuudet kuten läpäisevän pinnan osuudet, kaltevuudet, asukasmäärät jne. on määritetty kaupungilla käytössä olevien aineistojen perusteella. Tietojen avulla on mallinnettu alueen viemäriverkoston toimintaa SWMM (Storm Water Management Model) -ohjelmistolla (Rossman 2010), jonka toiminta kuvataan myöhemmin luvussa 5.4. Ongelma-analyysin kulku on puolestaan käyty tarkemmin läpi luvussa 5.1. Mallista ja kirjallisuudesta saatujen tietojen pohjalta on analysoitu mistä kyseisen kohteen hulevesitulvat aiheutuvat.

Analyysien ja kirjallisuuden perusteella on alustavasti määritelty mikä tai mitkä ratkaisut voisivat mahdollisesti ehkäistä tai vähentää kohteessa tapahtuvia hulevesitulvia, jonka jälkeen ratkaisujen toimivuutta on tarkasteltu viemällä ne osaksi tehtyä mallia. Jokaisesta ratkaisusta on tehty kustannuslaskelma helpottamaan saatavan hyödyn ja kustannusten suhteen arviointia. Lopulta valittujen ratkaisujen sijoittamisesta kaupunkitilaan on laadittu alustavia suunnitelmaehdotuksia.

5.1 Ongelma-analyysi

Työn yhteydessä on pyritty luomaan selkeä analyysimenetelmä, joka helpottaa havaitsemaan mitkä tekijät vaikuttavat kohteen tulvimiseen ja antaa perustan taajama-alueen hydrologiselle tarkastelulle. Tarkoituksena on ollut tunnistaa tarvittavat lähtöaineistot ja

työkalut, joiden avulla kohteesta voidaan luoda käyttökelpoinen malli ongelma-analyysin apuvälineeksi. Tässä työssä on käytetty Kapteeninpuistikon herkästi tulvivaa kohdetta menetelmän rakentamiseen ja menetelmää on sovellettu muihin kohteisiin sen toimivuuden varmistamiseksi. Ongelma-analyysin kulku on esitetty tiivistettynä Kuvassa 16.

Analyysimenetelmä koostuu osavaiheista, jotka voidaan jakaa taustatiedon hankintaan sekä mallin rakentamiseen ja käyttöön. Taustatiedon hankinta alkaa rajaamalla viemäri-verkosto alueen johtokartan avulla. Ongelmakohteen yläpuolelta huomioidaan kaikki viemärit, joiden vedet päätyvät kohteeseen ja alapuolelta määritetään jokin tunnettu vedenkorkeus tai vapaa purkupiste, jonne tarkastelu ulotetaan. Purkupiste voi olla esimerkiksi verkostossa sijaitseva pumppaamo, ylivuotokynnys tai kalliotunneli. Seuraavaksi määritetään kaikki ne kiinteistöt, jotka laskevat jäte- ja/tai hulevetensä edellä määritettyyn verkosto-osaan. Kolmanneksi määritetään ongelma-kohteen valuma-alue katujen ja viheralueiden osalta korkeustietojen perusteella. Tässä vaiheessa huomioidaan myös valuma-alueella sijaitsevat painaumat ja erityisesti mikäli itse ongelma-kohte sijaitsee maastonpainanteessa. Edellä mainitut alueet muodostavat ongelma-kohteeseen vaikuttavan tarkastelualueen.

Tarkastelualue jaetaan osavaluma-alueisiin siten, että samaan viemärikaivoon liitetyt ominaisuuksiltaan samanlaiset kiinteistöt kootaan osavaluma-alueiksi. Katujen ja puistojen jako osavaluma-alueiksi tehdään kaivokohtaisesti korkeustietojen perusteella. Katot joiden vesi johdetaan rännien kautta kaduille, tulee liittää vastaanottavan kadun osavaluma-alueeseen. Viemärikaivoihin johdettava perusvirtaama lasketaan luvussa 5.2.4 esitetyllä tavalla kiinteistökohtaisten asukastietojen ja putkiston pituuden perusteella. Mikäli vuorokausikohtaisen vaihtelun määrittämiseksi ei ole tarvittavia tietoja, käytetään maksimituntivirtaamaa. Muiden toimintojen, kuten kauppojen, sairaaloiden ja koulujen osalta virtaama arvioidaan tai käytetään todellista kulutusta, mikäli tieto on saatavilla. Tämän jälkeen määritetään osavaluma-alueiden parametrit kuten läpäisemättömän pinnan osuus, kaltevuus, pinta-ala, Manningin kertoimet sekä veden pintavarastot eli painannesäilyntä. Lopuksi määritetään tarvittavat sadetapahtumat. Näitä ovat haluttu mitoitussade sekä mallin kalibrointiin ja toimivuuden tarkasteluun käytettävä todellinen sadetapahtuma, jonka aiheuttamista tulvista tai virtaamista on saatavilla tietoa.

Mallin rakentaminen ja käyttö alkaa viemällä johtokartasta kuva Storm Water Management Model -ohjelmaan (SWMM) ja määrittämällä mallinnettava viemäriverkosto johtokartan avulla. Malliin viedään johtojen sijainti, pituus, materiaali, koko, korkotiedot ja kaivojen sijainnit. Malliin määritetään seuraavaksi osavaluma-alueiden sijainti sekä ominaisuudet ja liitetään osavaluma-alueet niihin verkoston solmukohtiin, joihin osavaluma-alueiden hulevedet päätyvät. Seuraavaksi SWMM malli ajetaan käyttäen sadetapahtumaa, jonka aiheuttamista virtaamista tai tulvista on havaintoja.

Mallin viemäriverkosto laajennetaan kaksoiskuivatusjärjestelmäksi (luku 5.4.1) ottamalla huomioon tulvivat kaivopisteet ja lisäämällä malliin katujen poikkileikkausta jäljittelevät avouomat kyseisiltä kaivoilta alemmille kaivoille. Mikäli tulvivan kaivon maasto viettää tarkastelualueen ulkopuolelle annetaan veden poistua mallista, kun taas kaivon ollessa maastonpainanteessa annetaan sen lammikoitua kaivon päälle. Tarkastelua jatketaan kunnes vain painaumissa sijaitsevat kaivot tulvivat tai kaikista tulvivista kaivoista lähtee myös maanpäällinen avouoma. Mallin esittämiä tulvivia kohteita tai virtaustietoja verrataan havaittuihin tulviin tai mittauksiin. Mikäli käytössä on mittauksia, korjataan kalibrointiparametreja mittausten mukaisesti. Lopuksi malli ajetaan valitulla mitoitusasteella ja määritellään tulvimisen aiheuttamat haitat sekä analysoidaan tulvimisen syyt. Mallia voidaan tämän jälkeen käyttää myös eri korjaustoimenpiteiden toteutettavuuden ja tehokkuuden arviointiin.



Kuva 16. Ongelma-analyysin kulku. Analyysi jakautuu taustatiedon hankintaan ja mallin määrittämiseen.

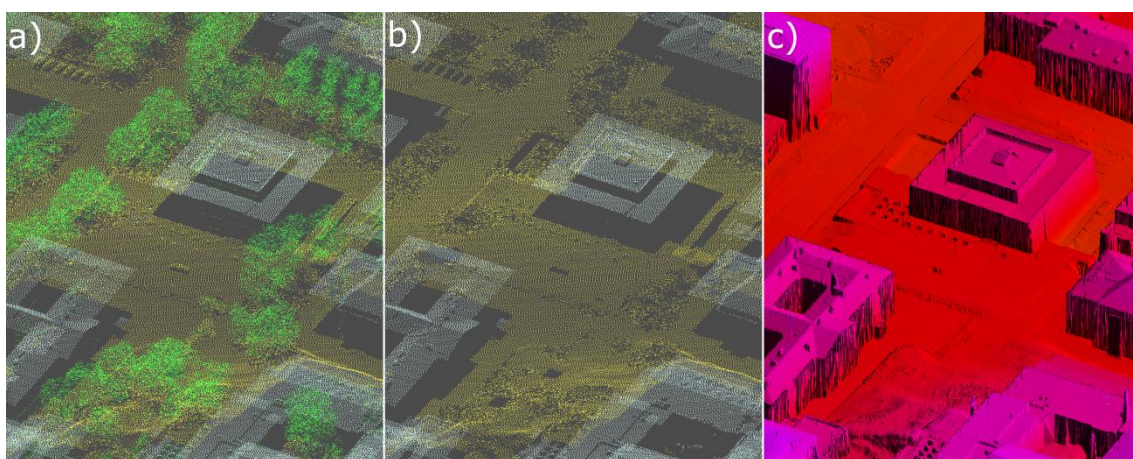
5.2 Lähtötiedot

Lähtötietoina kohteiden analysointiin on käytetty aineistoja Helsingin kaupungilta, HSY:ltä sekä Ilmatieteen laitokselta. Seuraavassa on käyty läpi miten eri aineistoja on käsitelty.

5.2.1 Laserkeilausaineisto

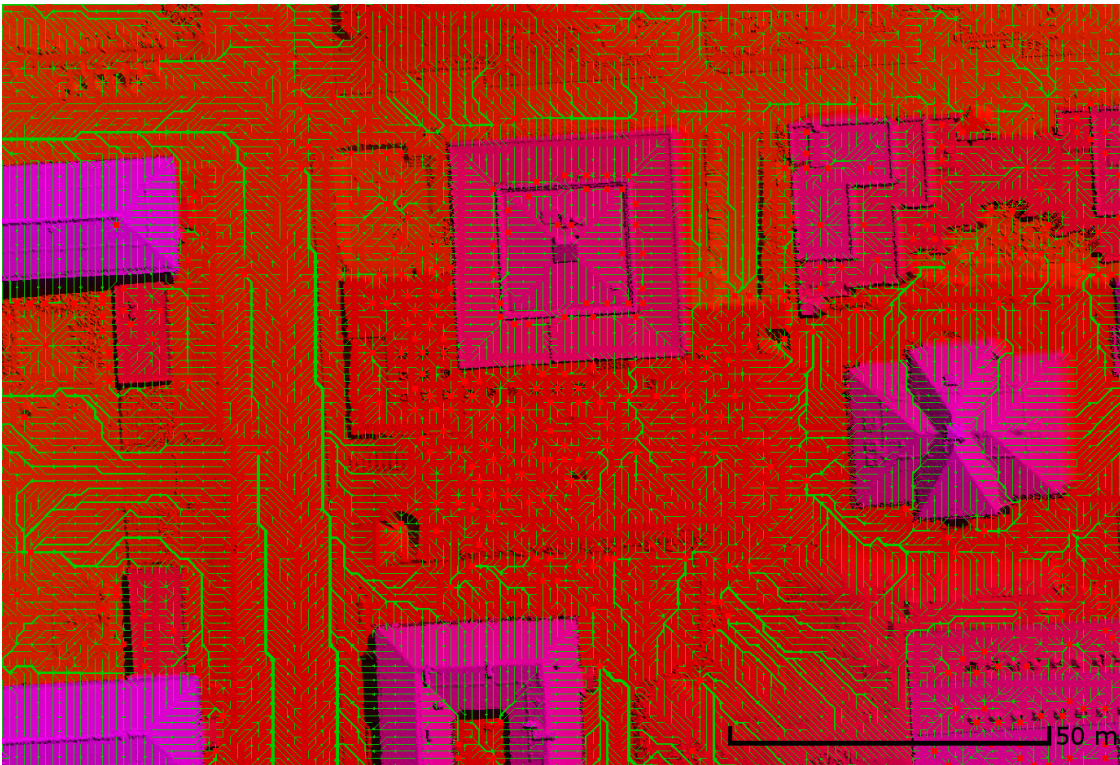
Laserkeilausaineisto on ilmasta kuvattua pistepilvimuotoista dataa, jossa jokaiselle pisteelle on määritelty sijainnin lisäksi korkeustieto ja pisteluokka mahdollistaen aineiston käytön tarkan korkeusmallin lähtötietona. Kuvassa 17 on esimerkki pistepilviaineistosta ja siitä johdetusta pintamallista. Pistepilviaineistoa on työssä käytetty valuma-alueiden rajaukseen sekä osavalmu-alueiden keskimääräisten kaltevuuksien määrittämiseen. Laserkeilausaineistoa on Helsingin kaupungista tuotettu vuodesta 1999 lähtien ja aineisto on jaettu ominaisuuksien perusteella pistepilviluokkiin (Kaupunkimittausosasto

2013). Tässä työssä on käytetty luokkia *maanpinta*, *matalat kohteet*, *matala kasvillisuus* sekä *rakennukset*. Tällä rajauksella on voitu poistaa esimerkiksi ajoneuvot ja puut korkeusmallista. Aineistosta on lopuksi siistitty pois yksittäiset pisteet, joiden korkeustieto poikkeaa selvästi ympäröivästä maastosta tai kattopinnoista. Laserkeilauksen pistetiheys on Helsingin kaupunkimittaussosaston paikkatietoasiantuntijan (Gröhn 2013) mukaan keskimäärin 20 pistettä/m² ja keilauspisteiden sijaintitarkkuus on noin 10 cm. Tämä tiheys riittää antamaan luotettavan korkeustiedon 0,5x0,5 m² kokoiselle alueelle vaikkakin aineistoa tarkastellessa tulee ottaa huomioon esimerkiksi tiheän puuston vaikutus maanpinnalta saatavan korkeustiedon pistetiheyteen.



Kuva 17. Esimerkkejä korkeusmallin visualisoinnista. a) Laserkeilauksella tuotettu pistepilviaineisto. b) Aineistosta on poistettu korkeusmallin kannalta haitalliset pisteluokat. c) Pistepilviaineistosta luotu pintamalli.

Aineistoa on jatkokäsitelty kahteen tarkoitukseen. Ensinnäkin valuma-alueen rajausta varten laserkeilausaineistosta on muodostettu pintamalli ja korkeuskäyrät. Mallin ja käyrien avulla on rajattu kokonaisvaluma-alue käsiteltävänä olevalle kohteelle, sekä tunnistettu mahdollisia painanteita, jotka vaikuttavat hulevesien kerääntymiseen sekä arvioitu pintavesien virtaussuuntia (Kuva 18). Toiseksi laserkeilausaineistoa on käytetty osavaluma-alueiden keskimääräisten kaltevuuksien määrittämiseen siten kuin luvussa 5.4.2.1 on esitetty.



Kuva 18. Esimerkki pintamallin avulla määritetyistä pintavesien virtaussuunnista merkittynä vihreällä.

5.2.2 Verkosto

Helsingin vesihuoltoverkostokartta oli käytössä digitaalisessa muodossa sisältäen tiedot putkien sijainnista, liityntäkorkeuksista, kaivojen korkeuksista, putkimateriaaleista, putkien läpimitoista sekä tehdyistä saneerauksista. HSY Vesi oli toimittanut aineiston Helsingin kaupunkimittausosastolle, joka oli muuntanut sen kaupungilla käytettävään paikkatietojärjestelmään. Muunnoksessa menetettiin HSY Veden verkostoon liittämät digitaaliset muistiinpanot sekä huomautukset, jonka lisäksi osa tarkastelualueiden verkostosta oli huomattavan iäkästä, joten käytössä ollut verkostoaineisto oli paikoittain epätäydellistä. Aineistoa on pyritty tarkentamaan HSY Veden edustajalta saatujen tietojen perusteella. Työn aikana havaittiin aineistossa puutteellisuuksia ja virheitä erityisesti putkien läpimitoissa ja liityntäkorkeuksissa.

Mallia (SWMM) varten tarkasteltavien kohteiden valuma-alueet on jaettu osavaluma-alueisiin sen mukaan mihin verkoston kaivoon kiinteistöjen, katualueiden ja puistojen vedet päätyvät. Osavaluma-aluejako on esitetty jokaisen kohteen tarkasteluissa erikseen.

5.2.3 Sadetapahtumat

Ongelma-analyysiin ja korjaustoimenpiteiden toimivuuden arviointiin on käytetty mitoitussateina kerran sadassa vuodessa toistuvia tunnin ja 24 tunnin sateita. Lisäksi mallin toimivuutta on tarkasteltu vertaamalla sitä taltioituun rankkasadetapahtumaan.

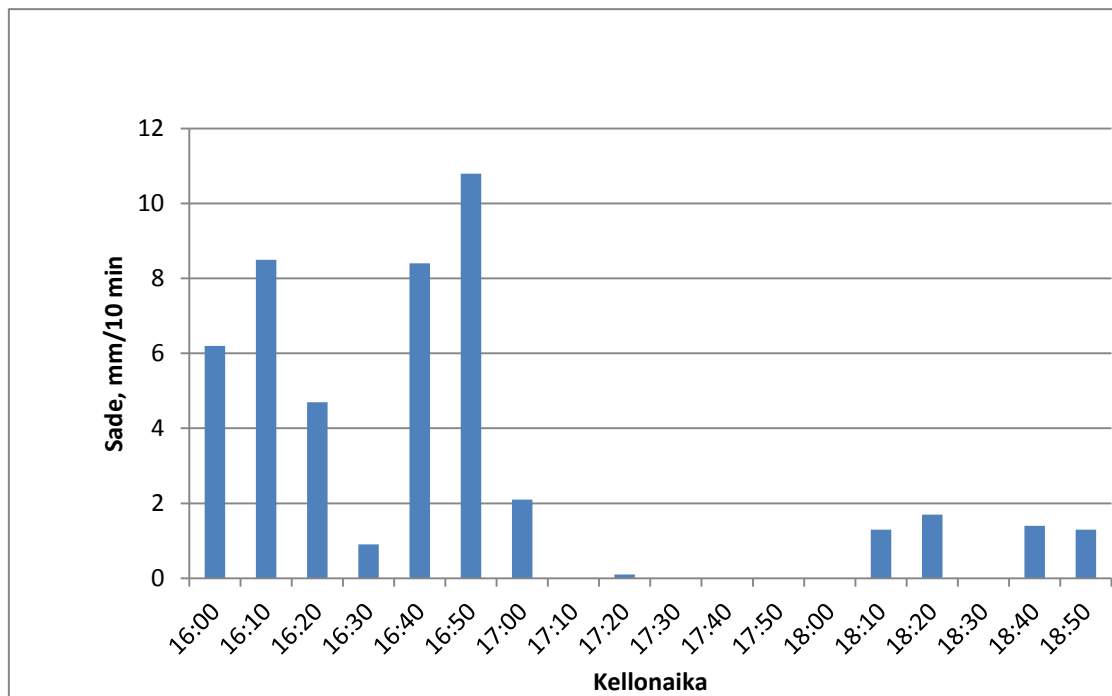
Kerran sadassa vuodessa toistuva kestoaltaan tunnin pituinen sade on saatu Katajiston vuonna 1969 (RIL 2004) laatimasta toistumisaika-kesto-intensiteetti kuvaajasta (Kuva 1). Kuvaajan mukaan kyseisellä toistumisaikalla tapahtuva tunnin sade olisi intensiteetiltään 0,6 mm/min, josta saadaan tunnin aikana satavaksi vesimääräksi 36 mm. Kerran sadassa vuodessa toistuva vuorokausisadanta on puolestaan alla esitetyn Kuusiston laattiman Taulukon 2 mukaan Helsingissä 73 mm (Mustonen 1986). Työn aikana havaittiin, että vuorokausisadannalla ei ole merkitystä mallinnettujen hulevesitulvien syntymisessä yhdenkään tarkastelukohteen osalta. Näin ollen vuorokausisadannan tarkastelu on jätetty pois analyysivaiheen kuvauksista ja samoin hulevesitulvien ehkäisylle ja vähentämiselle annetuissa ratkaisuehdotuksissa on mitoitussateena käytetty vain kerran sadassa vuodessa toistuvaa tunnin sadetta.

**Taulukko 2. Suurin vuorokausisadanta eräillä paikkakunnilla.
(Kuusisto 1980, ref. Mustonen (1986))**

Paikkakunta	Suurin vuorokausisadanta (mm) toistumisaikalla...vuotta				
	5	10	20	50	100
Helsinki	42	49	56	66	73
Turku	41	48	55	64	71
Jyväskylä	41	50	58	69	77
Kajaani	34	40	46	53	59
Sodankylä	29	34	38	44	48

Koska mallin tarkka kalibrointi valuntamittauksia vastaan ei ollut työn puitteissa mahdollista, on mallia pyritty vertaamaan todellisuuteen tunnetun hulevesitulvia aiheuttaneen sadetapahtuman avulla. Vuoden 2011 elokuun 22. päivä Helsingin yli kulki sadealue, jonka aikana mitattiin Ilmatieteen laitoksen Kaisaniemen mittausasemalla vajaan kolmen tunnin aikana noin 47 mm sade. Työtä varten on Ilmatieteen laitokselta saatu kyseisestä sadetapahtumasta kymmenen minuutin välein mitattu sadanta (Huttila 2013), joka on esitetty Kuvassa 19. Koska rankkasade aiheutti merkittävää tulvimista Helsingin keskustassa, voidaan tulvakohteista otettujen valokuvien ja kaupunkilaisten ilmoitusten

perusteella verrata osoittaako malli tulvimista niissä kohteissa, jotka ovat tulvineet myös todellisuudessa.



Kuva 19. Kymmenen minuutin välein mitattu sadanta Kaisaniemen mittausasemalta 22.8.2011. Suurin osa sateesta tuli sadetapahtuman ensimmäisen tunnin aikana.

Kuvasta 19 huomataan, että vertailusadetapahtuman ensimmäisen tunnin aikana sataa noin 40 mm vettä, joka vastaa suurin piirtein kerran sadassa vuodessa toistuvaa tunnin mitoitussadetta. Kuitenkin vertailusateen intensiteetti vaihtelee voimakkaasti sadetapahtuman aikana siten, että enimmillään kymmenen minuutin aikana sataa lähes 11 mm vettä kun taas mitoitussateen aikana sataa tasaisesti 6 mm kymmenen minuutin aikana. Näin ollen vertailusade antaa mitoitussadetta paremman mahdollisuuden tarkastella verkoston toimintaa voimakkaan rankkasateen aikana.

5.2.4 Jätevesivirtaamat

Sekaviemäröidyillä osavaluma-alueilla tulee hulevesien lisäksi ottaa huomioon asutuksesta aiheutuva jätevesivirtaama sekä putkiston pituuden mukaan määräytyvät vuotovedet, jotka yhdessä muodostavat niin sanotun pohjavirtaaman. Asukasmäärät on tässä työssä määritetty käyttäen Helsingin kaupungin käytössä olevaa HSY:n SeutuCD:n (HSY 2011) väestötietoaineistoa. Pohjavirtaamat on laskettu RIL:n (2010b) mukaisesti

siten, että asutuksen ja palvelutoimintojen käyttöveden oletetaan päätyvän kokonaisuudessaan viemäriverkostoon. Viemäriessä virtaava jätevesi on laskettu mitoitusvirtaamana

$$Q_{vmit} = Q_{jmit} + Q_{pmit},$$

missä Q_{jmit} on mitoittava jätevesimäärä ja Q_{pmit} on mitoittava vuotovesimäärä. Jätevesivirtaama on laskettu kaavalla

$$Q_{jmit} = \frac{c_{dmax} c_{hmax} P Q_{ominaisk}}{(3600)(24)},$$

missä P on alueen asukasmäärä, c_{dmax} on suurin vuorokausikäyttökerroin, c_{hmax} on suurin tuntikäyttökerroin ja $Q_{ominaisk}$ on ominaisvedenkulutus (l/as/d). Ominaisvedenkulutuksena on käytetty HSY:n verkostosuunnittelukäytännöissä (HSY 2012) annettua arvoa 140 l/as/d. Vuotovedet on arvioitu samaisten verkostosuunnittelukäytäntöjen mukaisesti käyttämällä vuotovesimäärää 0,2 l/s/johtokm.

Paikoittain osavaluma-alueet ovat koostuneet asutuksen sijaan palvelutoiminnoista kuten kouluista, sairaaloista, toimistorakennuksista tai teollisuudesta. Mikäli tarkempia arvioita vedenkulutuksesta ei ole saatavilla, on ominaisvedenkulutus $Q_{ominaisk}$ määriteltä näissä tapauksissa HSY:n verkostosuunnittelukäytäntöjen mukaisesti siten, että käyttöarvo on 4 l/k-m²/d. Tässä tapauksessa kiinteistöjen kerrosneliömetrit on määritetty SeutuCD:n rakennustietokannasta.

Pitäjänmäen alikulkutunnelin tarkastelualueella verkosto on erillisviemäroity, joten hulevesiverkoston mallinnuksessa otetaan huomioon vain verkoston vuotovedet, mutta ei asutuksesta ja palveluista johtuvaa jätevesivirtaamaa.

5.2.5 Maaperä

Tiedot tarkastelualueiden maaperästä saatiin Helsingin kaupungin paikkatietopalvelusta, jonka avulla voi tarkastella Helsingin kaupungin kiinteistöviraston geoteknisen osaston (1989) tuottamia geoteknisiä karttoja. Kartassa esitetään maalajialueet ja tietoa voidaan hyödyntää esimerkiksi ympäristöselvityksissä sekä alueellisessa suunnittelussa. Maaperällä on luonnonmukaisessa hulevesienhallinnassa merkitystä erityisesti arvioitaessa imeytysrakenteiden sekä maanalaisten rakenteiden toimivuutta ja sijoitusta tarkastelualueelle.

5.3 Viemäreiden mitoitus

Rakennusinsinööriliitto on julkaissut vuonna 2010 viemäreiden mitoitukseen liittyen kaksi teosta (RIL 2010a, RIL 2010b). Näiden lisäksi vesihuoltojärjestelmien suunnitteluun käytetään Suomessa kahta vanhempaa teosta (RIL 2003, RIL 2004). Huomionarvoista on se, että tällä hetkellä hulevesiviemäreiden mitoituksen ohjeistusta ollaan uudistamassa (RIL 2010b) ja siksi RIL (2010a) ja RIL (2010b) käsittelevät lähes ainoastaan jätevesiviemäreitä, joiden mitoitusvirtaamien määrittäminen esitellään luvussa 5.2.4.

Tässä työssä hulevesivirtaamien määrittämisen lähtökohtana on ollut RIL (2004). Hulevesien mitoitusvirtaama voidaan määrittää usealla eri tavalla, mutta jokaisen menetelmän lähtötietona käytetään mitoituslasketta, joka tarkoittaa ”suurinta sadevesimäärää, jonka välittömäksi poisjohtamiseksi viemäri mitoitetetaan” (RIL 2004). Tarkoitus ei siis ole mitoittaa viemäreitä kaikille mahdollisille sadetapahtumille, vaan mitoituslasketta valittaessa on näin ollen kompromissi viemärin rakennuskustannusten ja tulvavahinkojen välillä. Mitoituslasketta valittaessa on käsitelty luvussa 2.1.1 ja joitakin mitoitusvirtaaman määrittämenetelmiä on esitelty alla.

5.3.1 Rationaalinen menetelmä

Rationaalinen menetelmä mahdollistaa valuma-alueella muodostuvan valunnan suuruusluokan määrittämisen suhteellisen nopeasti. Se soveltuu erityisesti pienille valuma-alueille ja menetelmän tarkoituksena on täydellisen pintavalunnan aikariippuvuuden sijasta määrittää sadetapahtuman huippuvalunnan arvo (Butler & Davies 2004, Thompson 2007). Esimerkiksi Liikennevirasto (2013) on ohjeistanut teiden ja ratojen kuivatus- ja suosittelee rationaalista menetelmää rakennetuille alueille sijoitettavien kuivatusjärjestelmien mitoitusvirtaamien laskemiseksi. Rationaalisen menetelmän mukainen laskentakaava on myös esitelty teoksessa RIL (2004). Kaava on yleiseltä muodoltaan seuraava:

$$Q = q\varphi A,$$

missä Q on virtaama (l/s), q on mitoituslasketta rankkuus (l/s/ha), φ on valumakerroin (-) ja A on valuma-alueen pinta-ala. Näistä mitoituslasketta rankkuus määritetään Kuvasta 1 ja valumakerroin valuma-alueen pinnan mukaisesti esimerkiksi Taulukosta 3.

Taulukko 3. Erilaisten pintojen valumakertoimia. (Liikennevirasto 2013)

Pinnan tyyppi	Valumakerroin ϕ
katto	0,80...1,00
asfalttipäällyste	0,70...0,90
tien nurmetettu luiska	0,40...0,60
avoin kalliomaasto	0,30...0,50
soratie, soraluiska	0,20...0,50
nurmipintainen piha, puisto	0,10...0,40
niitty, pelto, puutarha	0,10...0,30
suo	0,05...0,15
kumpuileva sekametsä	0,05...0,20
tasainen metsämaasto	0,10...0,10
tasainen sorakenttä	0,00...0,05

5.3.2 Tietokonemallit

Viemäriverkoston mitoitus voidaan tehdä myös tietokoneella suoritettavalla verkostomallinnuksella. Mallin lähtötietona käytetään mitoitusadetta tai verkoston solmukohtiin johdettavia vesimääriä, jonka perusteella malli laskee virtaamat ja vedenkorkeudet verkoston eri osissa. Tulosten perusteella voidaan määrittää eri putkiosuuksille soveltuvat putkikoot samoin kuin verkoston laitteiden kuten pumppaamoiden, ylivuotojen ja altaiden mitoitukset. Mallinnus jakautuu hydrologiseen ja hydrauliseen osioon, joilla vastavasti ratkaistaan sateen aiheuttamat hulevesivirtaamat ja virtaus verkostossa. (RIL 2010b)

Malleja on olemassa useita ja tässä työssä käytetty Storm Water Management Model on esitelty seuraavassa luvussa.

5.4 Storm Water Management Model

Yhdysvaltain ympäristönsuojeluviraston kehittämä ja julkaisema Storm Water Management Model (SWMM) on pääosin rakennetun ympäristön tarkasteluun tarkoitettu sadanta-valuntamalli, jolla on mahdollista mallintaa sekä yksittäisiä, että pitkäaikaisia sadetapahtumia (Rossman 2010). Ohjelmisto jakautuu hydrologiseen ja hydrauliseen osioon siten, että hydrologisessa osassa ohjelma laskee sateen aiheuttamana pintavalunnan osavaluma-alueilta ja johtaa sen hydrauliseen osioon.

Hydrologisen osan lähtötietoina toimivat sateen lisäksi esimerkiksi imeyntä- ja haihduntaparametrit, osavaluma-alueiden geometria, kaltevuudet sekä pinnan karkeutta kuvaavat Manningin kertoimet. Näiden avulla ohjelma laskee osavaluma-alueelta poistuvan pintavalunnan ajan suhteen vähentämällä sadannasta imeynnän, haihdunnan sekä painannesäilynnän ja ohjaa saadun valunnan osavaluma-alueen purkupisteeksi määritettyyn verkoston solmukohtaan.

Hydraulisessa osassa käytetään lähtötietona hydrologisessa osassa laskettua valuntaa, joka johdetaan putkien, avouomien, säiliöiden, pumppujen ja kynnysten avulla siten, että verkoston jokaisen osan toimintaa kuten veden korkeuksia ja virtausnopeuksia voi tarkastella aika-askeleittain. Muita lähtötietoja hydraulisessa osassa ovat esimerkiksi viemärikaivojen korkeustiedot, putkien halkaisijat ja liitoskorkeudet sekä putkien ja avouomien karkeutta kuvaavat Manningin kertoimet. Veden kulkeutumista hydraulisessa osiossa voidaan ohjelmalla mallintaa joko tasaisen virtauksen, kinemaattisen aallon tai dynaamisen aallon mallilla. Tässä työssä käytettiin dynaamisen aallon mallia, joka ratkaisee täydellisesti Saint Venantin yksiulotteiset virtausyhtälöt (Butler & Davies 2004, Rossman 2010), jolloin voidaan ottaa huomioon esimerkiksi virtauksen kääntyminen, paineellinen virtaus sekä alapuolisen putkiston padotusvaikutus, jotka kaikki ovat merkittäviä ilmiöitä tämän työn yhteydessä käsiteltävissä verkostoissa.



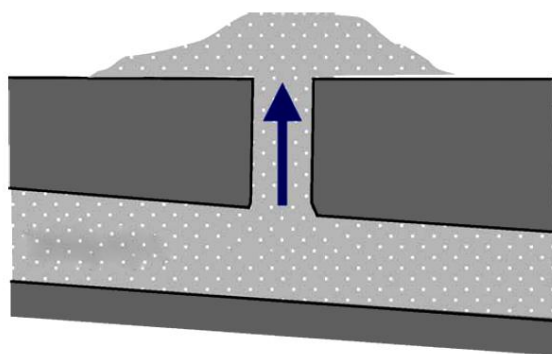
**Kuva 20. Esimerkki SWMM:n tarkastelu-
aluenäkymästä. Kuvassa nähtävissä alueen jako
osavaluma-alueisiin sekä viemäriverkosto sol-
mukohtineen**

Sekä hydrologisen, että hydraulisen osion komponentit kootaan ohjelmaan tarkastelualueeksi (Kuva 20), joka sisältää graafiset esitykset esimerkiksi osavaluma-alueista, viemäriverkostosta, purkupisteistä ja säiliöistä. Käyttöliittymän avulla jokaisen komponentin ominaisuuksia ja siihen liittyviä parametreja on mahdollista muokata erikseen.

SWMM toimii tässä työssä vain analyysin sekä päätöksenteon työkaluna ja tästä syystä sen toimintaa ei esitetä yksityiskohtaisesti vaan ohjelman osalta keskitytään pääasiassa parametrien määrittämiseen ja valittujen parametrien perusteluun. Ohjelman toiminnasta on kuitenkin saatavilla runsaasti yksityiskohtaista tietoa kahdesta käyttöohjeesta (Gironás et al. 2009, Rossman 2010) sekä aikaisemmasta kirjallisuudesta (Huber 1988, Butler & Davies 2004)

5.4.1 Kaksoiskuivatusmalli

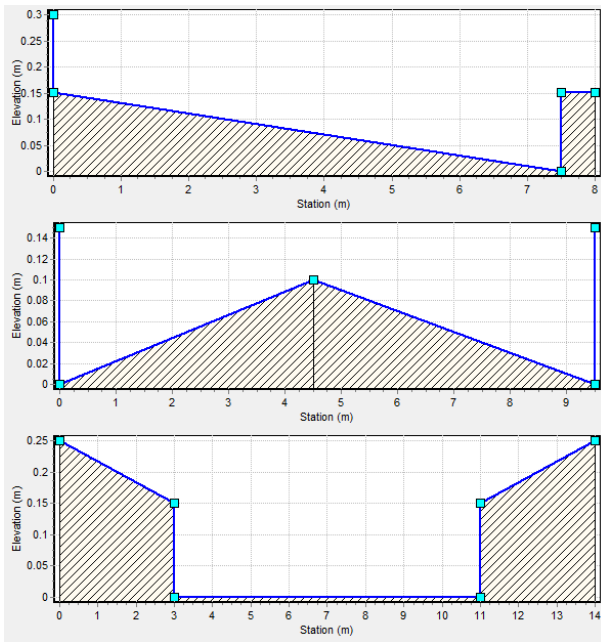
SWMM:llä mallinnetaan tavallisesti osavaluma-alueille tulevan sadeveden muuttuminen pintavalunnaksi ja lopulta veden päätyminen viemäriverkoston kuljetettavaksi. Voimakkaiden rankkasateiden yhteydessä on kuitenkin mahdollista, että viemärin kapasiteetti ylittyy ja lopulta vesi purkautuu verkoston solmukohdista maanpinnalle Kuvan 21 osoittamalla tavalla jatkaen mahdollisesti kulkuaan vir-



Kuva 21. Viemäri tulvii kadulle ja vesi jatkaa kulkuaan avouomavirtauksena kadun kallistuksen suuntaisesti. (Mark et al. 2004)

taamalla katua pitkin seuraavan sadevesikaivon suuntaan (Mark et al. 2004). Tätä viemäritulvailmiötä voidaan SWMM:ssä mallintaa niin kutsutulla kaksoiskuivatusmallilla (*dual drainage*), jossa hulevesi johdetaan ensisijaisesti osavaluma-alueilta viemäriverkoston välityksellä, mutta viemäriverkoston tulviessa vesi kulkeutuu kaduilla avouomavirtauksena (Gironás et al. 2009).

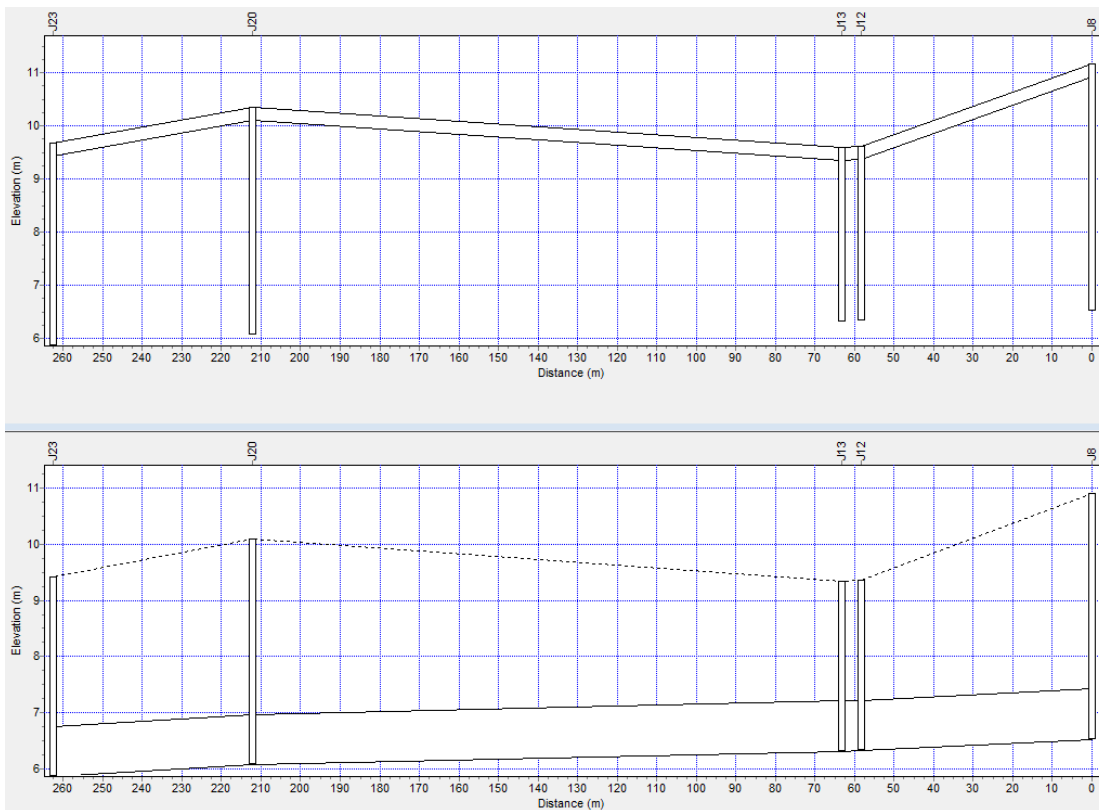
On huomioitava, että viemärin kapasiteetin ylittyminen ja viemäritulva eivät ole täysin sama asia. Viemärin kapasiteetin ylittyessä vedenpinta putkistossa yltää putken yläreunaan ja vesi alkaa kulkea verkostossa paineellisena, mutta vesi ei välttämättä tulvi kadulle. Vasta kun verkoston paine nostaa vedenpinnan kaivon kannen yläpuolelle, syntyy varsinainen viemäritulva.



Kuva 22. Esimerkkejä työssä käytetyistä avouomien poikkileikkauksista, jotka kuvaavat katujen poikkileikkauksia.

katuja esittävät avouomat liittyvät kaivojen yläosaan kuten Kuvassa 23 on esitetty.

Työssä käytetty kaksoiskuivatusmalli on laadittu Gironás et al. (2009) mukaisesti ja se koostuu viemäreitä kuvaavasta putkiverkostosta sekä katuja kuvaavista avouomista. Avouomien poikkileikkaukset on mitattu laserkeilausaineistosta, joten poikkileikkauksen muoto vaihtelee tarkasteltavana olevan kadun mukaisesti. Kuvassa 22 on esitetty joitakin käytettyjä poikkileikkauksia. Viemäreiden ja katujen välinen vedenvaihto tapahtuu verkoston solmukohdissa, jotka esittävät viemärikaivoja. Viemäriputket ovat liittyneet kaivojen pohjaan kun taas



Kuva 23. Poikkileikkaus kaksoiskuivatusjärjestelmästä. Ylhäällä katuja kuvaavat avouomat ja alla viemäreitä kuvaavat putket. Vesi kulkee avouomien ja putkien välillä verkoston kaivoja esittävien solmukohtien kautta.

Tässä työssä ei kuitenkaan ole mallinnettu jokaista tarkastelualueilla sijaitsevaa katua, koska mallintaminen on oleellista vain niissä paikoissa joissa tulvimista tapahtuu. Kaksoiskuivatusmallin tekeminen on aloitettu mallintamalla alueen putkiverkosto ensin kokonaisuudessaan ja ajamalla malli kertaalleen käyttäen elokuun 2011 vertailusadetta. Tämän jälkeen vain ne kadut, jotka viettävät poispäin tulvivista solmukohdista on mallinnettu maanpäällisinä avouomina. Tätä on toistettu kunnes kaikki tulvivista solmukohdista poispäin viettävät kadut on viety avouomina malliin. Mikäli tulvivan solmukohdan vedet päätyvät korkeusmallin mukaan tarkastelualueen ulkopuolelle, on vesi asetettu poistumaan mallista. Jos taas tulvivasta solmukohdasta ei lähde yhtäkään alaspäin viettävää katua eli solmukohta sijaitsee maastonpainanteessa, veden on annettu lammikoitua ja lammikoituva pinta-ala on arvioitu korkeustietojen perusteella.

5.4.2 Parametrien määrittäminen

SWMM malliin syötetyt parametrit voidaan jakaa kolmeen ryhmään (Liong et al. 1991, Krebs et al. 2013). Ensimmäisessä ryhmässä ovat mitatut parametrit, jotka määritetään lähtöaineistosta ja joita voidaan pitää muuttumattomina. Näitä parametreja ovat esimerkiksi osavaluma-alueiden pinta-ala, viemäriputkien pituus ja halkaisija sekä viemärikaivojen korkeusasemat. Toinen ryhmä koostuu parametreista, jotka voidaan määrittää paikkatietoaineistosta, mutta joiden määrittäminen ei ole yhtä yksiselitteistä kuin ensiksi mainittujen. Näiden parametrien määrittämisessä saattaa esiintyä virheitä, jolloin parametreja voidaan käyttää mallin kalibroimiseen. Toiseen ryhmään kuuluvat osavaluma-alueiden kaltevuus, osavaluma-alueiden hydraulinen leveys sekä läpäisemättömän pinnan osuus. Kolmas ryhmä koostuu niin sanotuista kalibroitiparametreista, jotka tavallisesti määritetään vertaamalla mallin tuloksia esimerkiksi mitattuihin virtaama- tai vedenkorkeuslukemiin. Kalibroitiparametreiksi luetaan osavaluma-alueiden Manningin kertoimet, painannesäilyntä sekä imeyntäparametrit. Yleensä tämän ryhmän parametreille haetaan aloitusarvot kirjallisuudesta ja lukuja muutetaan kunnes malli vastaa mahdollisimman tarkasti mitattuja arvoja. Tämän työn yhteydessä ei ollut mahdollista suorittaa mittauksia, joten myös kalibroitiparametrien arvot on valittu kokonaisuudessaan kirjallisuuden perusteella. Parametreille on kuitenkin suoritettu herkkyysanalyysi.

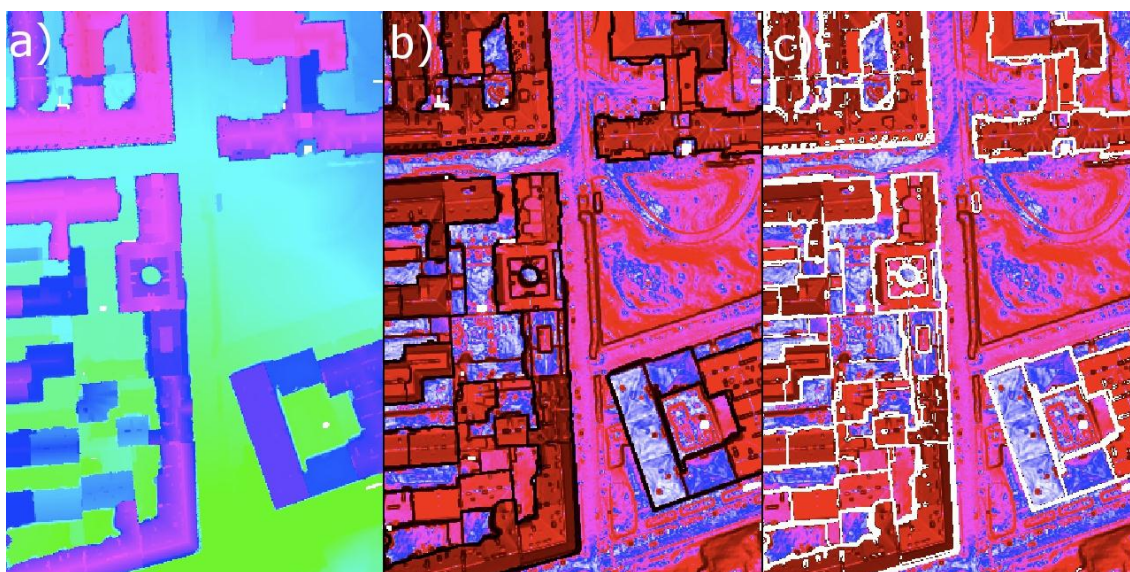
Alla esitetään edellä mainittujen toisen ja kolmannen ryhmän parametrien määrittäminen sekä valitut parametrit pois lukien läpäisemättömän pinnan osuuden määrittäminen. Ensimmäisen

ryhmän parametrit sekä läpäisemättömän pinnan osuus on joko mitattu paikkatietoaineistosta tai saatu lukuarvoina johtokartasta ja niiden valintaan ei perehdytä luvussa 5.2 kuvattua syvällisemmin.

Kalibrointiparametreille on suoritettu herkkyysanalyysi muuttamalla parametrien arvoja ja tarkastelemalla muutosten vaikutusta mallin antamiin tuloksiin. Herkkyysanalyysi kuvaillaan myöhemmin luvussa 8.2 yksityiskohtaisemmin.

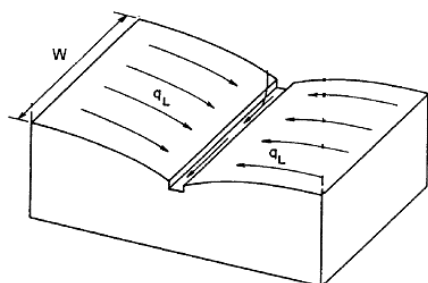
5.4.2.1 Kaltevuus

Osavaluma-alueiden keskimääräisen kaltevuuden laskemiseksi tarkastelualueet on laserkeilausaineiston pistepilven tarkkuuden perusteella jaettu rasteriruutuverkoksi, jonka yhden ruudun koko on $0,5 \times 0,5 \text{ m}^2$. Jokaiselle ruudulle on määritetty korkeustieto ruudun rajaamien laserkeilausaineiston pisteiden keskimääräisenä korkeusarvona. Tämän jälkeen näin muodostettu tarkastelualueen korkeusmalli on viety rasteriruutuverkkona GRASS paikkatieto-ohjelmistoon, jonka kaltevuudenlaskentafunktiolla jokaiselle ruudulle on määritetty korkeustietojen perusteella kaltevuusarvo. Koska solun kaltevuus määritetään suhteessa viereisiin soluihin, muodostuu korkealla olevan katon ja matalalla olevan maanpinnan väliin rasterisolujoukko, jonka kaltevuusarvoa ei tule ottaa huomioon alueen keskimääräistä kaltevuutta laskettaessa. Tästä syystä kaltevuusarvoista on poistettu kattojen ja maanpinnan väliin muodostuvat virheelliset kaltevuusarvot ja lopuksi osavaluma-alueiden keskimääräinen kaltevuus on määritetty ruutujen kaltevuuksien keskiarvona. Rasteriruutuverkkojen käsittelyn vaiheet GRASS ohjelmistossa on esitetty Kuvassa 24. Kuvasta 24a havaitaan miten rakennukset erottuvat korkeusmallista. Kuvasta 24b voidaan erottaa tasakattoinen rakennus (sinisellä) kaltevista katoista (tumman punaisella). Kattojen reunat on esitetty mustalla, joka osoittaa, että kyseisten rasterisolujen kaltevuusarvo on hyvin korkea. Kuvassa 24c kyseisille rasterisoluille on annettu ”no data” arvo (valkoisella).



Kuva 24. Esimerkkikuvasarja keskimääräisten kaltevuuksien määrittämisestä. a) korkeusrasteri, b) kaltevuusrasteri ja c) kaltevuusrasteri, josta poistettu kattojen ja maanpinnan välinen alue (valkoisella).

5.4.2.2 Hydraulinen leveys



Kuva 25. Hydraulisen leveyden käsite havainnollistettuna. Kuvassa W on hydraulinen leveys ja q_L on pintavalunnan kulkematka. (Gironás et al. 2009)

Osavaluma-alueen hydraulisen leveyden määrittämiseen on useita tapoja (Skotnickin & Sowskin 2009), mutta tässä työssä hydraulinen leveys on määritetty SWMM ohjelmiston käyttöohjeen (Rossman 2010) mukaisesti leveydeksi, joka pintavalunnalla on virtausreitinsä suhteen. Gironás et al. (2009) tarkentavat hydraulista leveyttä muun muassa Kuvalla 25. Ohjeiden mukaan leveyden arvo voidaan määrittää jakamalla osavaluma-alueen pinta-ala virtausreittien pituuksien painotetulla keskiarvolla. Vaikka ohjeissa painotetaan hydraulisen leveyden luonnetta kalibrointiparametrina, joudutaan tämän työn yhteydessä tyytymään laskettuihin arvoihin.

Keskimääräiset virtausreitit on määritetty paikkatieto-ohjelmistolla siten, että kaduilla pintavalunnan kulkemaksi matkaksi on oletettu 5 m, umpikortteleissa 10 m ja puistoissa 50 m. Hydraulista leveyttä laskettaessa on kuitenkin otettu huomioon Stephensonin

Keskimääräiset virtausreitit on määritetty paikkatieto-ohjelmistolla siten, että kaduilla pintavalunnan kulkemaksi matkaksi on oletettu 5 m, umpikortteleissa 10 m ja puistoissa 50 m. Hydraulista leveyttä laskettaessa on kuitenkin otettu huomioon Stephensonin

(1989) esittämä näkemys, että todellisuudessa pintavalunta saattaa kulkea jopa kaksi kertaa pidempää reittiä kuin paikkatietoaineiston perusteella voisi olettaa ja näin ollen pintavalunnan kulkemana matkana on hydraulisen leveyden laskelmissa käytetty 10, 20 ja 100 m:ä. Mikäli nämä virtausreittien pituudet eivät ole soveltuneet joillekin osavaluma-alueille, on paikkatietoaineistosta mitattu erikseen osavaluma-alueen pisin virtausreitti kuten Rossman (2010) on esittänyt.

5.4.2.3 Manningin kertoimet

Manningin kertoimet osavaluma-alueille on määritetty Engmanin (1986) mukaisesti, putkivalunnalle RIL:n (2003) mukaisesti ja katuja kuvaaville avouomille Rossmanin (2010) mukaisesti.

Valitut Manningin kertoimet osavaluma-alueille olivat 0,012 läpäisemättömille pinnoille ja 0,13 läpäiseville pinnoille. Betonisille viemäriputkille Manningin kertoimeksi valittiin 0,017, muoviputkille 0,010 sekä katujen avouomavirtaukselle 0,015. Arvoja valittaessa viemäriputkien on oletettu olevan huonossa kunnossa (suurempi Manningin kerroin) niiden iän vuoksi.

5.4.2.4 Painannesäilyntä

Painannesäilyntä on laskettu jokaiselle osavaluma-alueelle erikseen ottaen huomioon osavaluma-alueen pinnan laatu sekä kaltevuus (Butler & Davies 2004). Painannesäilyntä lasketaan kaavalla

$$d = \frac{k}{\sqrt{s}},$$

jossa k on pinnasta riippuva vakio (0.07 läpäisemättömälle ja 0.28 läpäisevälle pinnalle) ja s on pinnan kaltevuus.

5.4.2.5 Imeyntäparametrit

SWMM mallissa voidaan veden imeytymistä maaperään kuvata Hortonin menetelmällä, Green-Amptin menetelmällä tai käyränumeromenetelmällä (Rossman 2010). Hortonin menetelmä (Butler & Davies 2004) perustuu empiirisiin havaintoihin, käyränumeromenetelmä puolestaan Yhdysvalloissa käytettyihin imeyntäkäyrästöihin. Tässä työssä on valittu käytettäväksi fysikaalisperusteinen Green-Amptin menetelmä.

Imeyntäparametrit Green-Amptin menetelmässä ovat hydraulinen johtavuus, kapillaarisen imun syvyys sekä kuivan maaperän osuus (Rossman 2010).

Parametrit valittiin noudattamalla Rossmanin (2010) ohjeistusta, jonka on alun perin julkaissut Rawls et al. (1983). Kohteiden maaperäkarttojen mukaan (Kuvat 13–15) maaperä koostuu pääasiassa kitkamaalajeista ja kalliosta. Näin ollen jokaiselle kohteelle on käytetty maalajina hienoa hiekkaa, jonka Green-Amptin parametrit ovat hydrauliselle johtavuudelle (K_s) 30 mm/h, kapillaarisen imun syvyydelle (S_f) 61 mm sekä kuivan maaperän osuudelle (ϕ) 0,2.

5.5 Kustannustarkastelu

Kustannustarkastelu on tässä työssä suoritettu Fore kustannuslaskentaohjelmalla. Ohjelmistoon syötetään tehtävät rakennustoimenpiteet sekä käytetyt materiaalit ja ohjelmisto ottaa huomioon rakennus- ja tuotekustannusten lisäksi suunnittelusta ja työmaa-tehtävistä aiheutuvat kulut. Ohjelmalla voidaan myös arvioida eri kohteiden sijainnista aiheutuvia lisäkuluja sekä rakennushankkeen kokoluokan tuomaa kustannusvaikutusta. Ohjelmiston käyttämät hinnastot pohjautuvat toteutuneisiin hankkeisiin ja niitä päivitetään kaksi kertaa vuodessa.

Kustannuslaskennassa on tarkasteltu vain rakentamisesta aiheutuvia kustannuksia. Ehdotettujen rakenteiden ylläpitokustannuksia on sen sijaan arvioitu vain sanallisesti ja ennen toteutusvaihetta kustannuksista tulee suorittaa tarkempi arvio myös näiltä osin.

6 Ongelma-analyysit

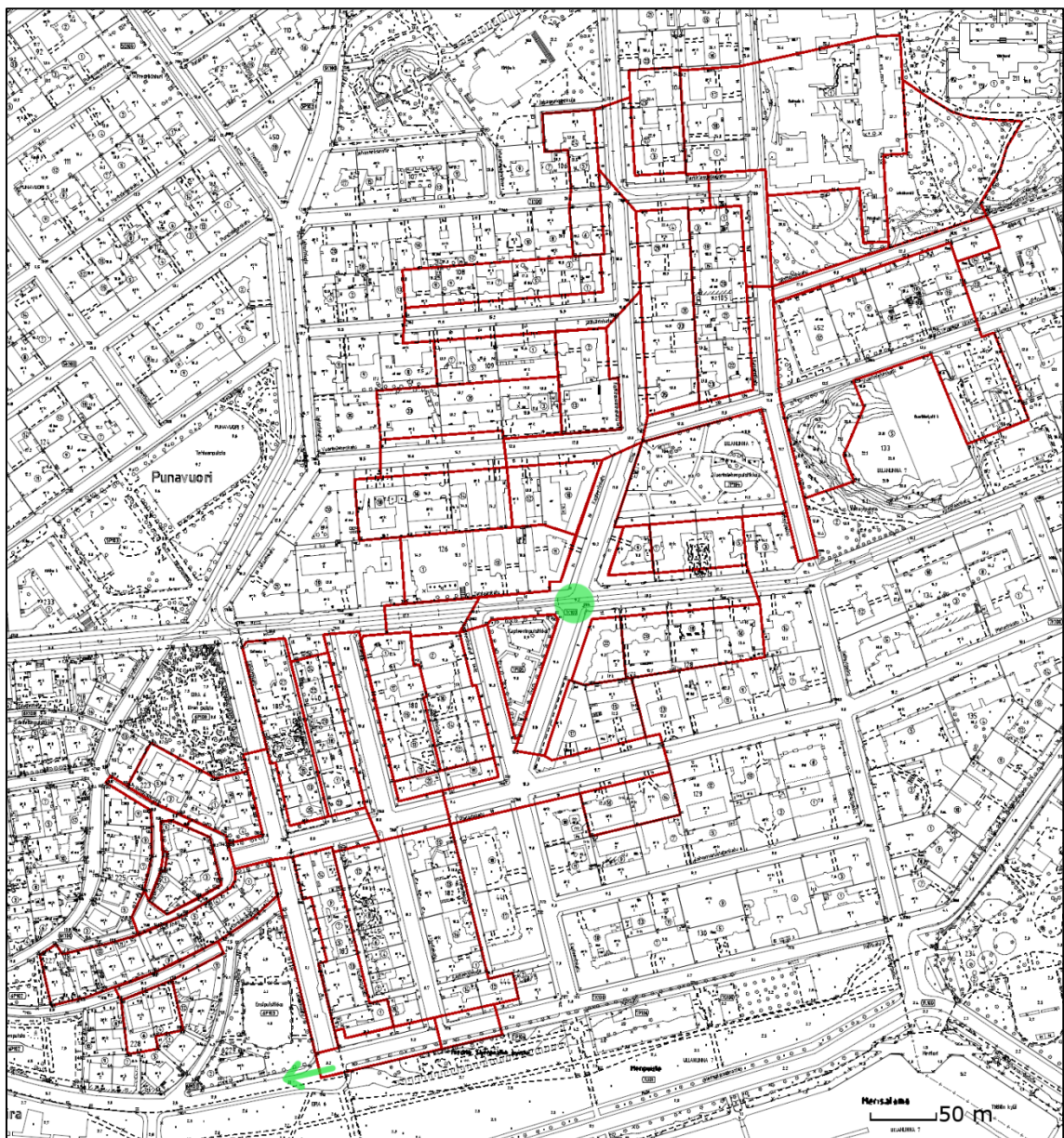
6.1 Kapteeninpuistikko

Kapteeninpuistikon koilliskulmassa sijaitsevan Tehtaankadun ja Kapteeninkadun risteuksen ympäristössä on kärsitty hulevesitulvista, jotka ovat ajoittain vaurioittaneet ympäröiviä kiinteistöjä (FCG Finnish Consulting Group 2011). Kuvassa 26 on esitetty risteyksessä vuoden 2011 elokuun rankkasateen aikaan ilmennyt tulvatilanne, jolloin paikalta otettujen kuvien perusteella risteyksessä oli vettä syvimmillään yli 40 cm. Lisäksi kaupunki sai paikalta useita ilmoituksia kiinteistöjen tulvimisesta.



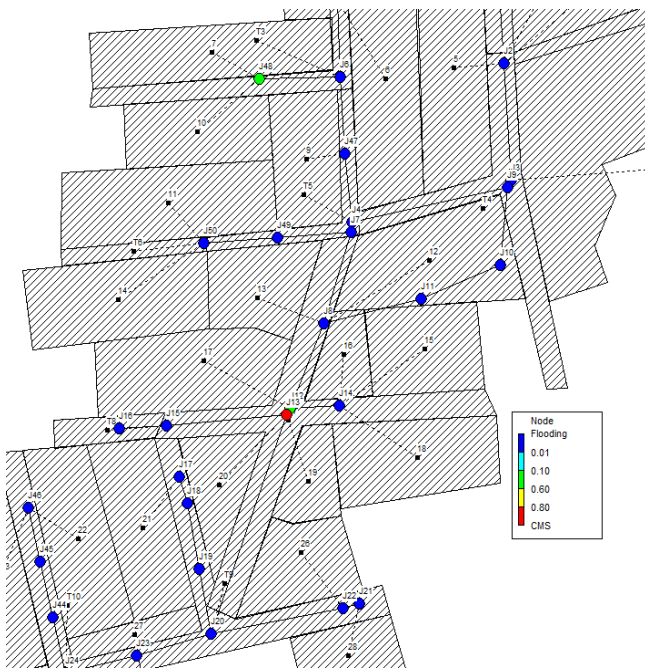
Kuva 26. Kuvia Kapteeninkadun ja Tehtaankadun risteuksen tulvimisesta 22.8.2011. Vesi on noussut kuvien perusteella noin 40 cm kadun pinnan yläpuolelle.

Risteysalueelle on suoritettu luvussa 5.1 kuvattua menetelmää käyttäen ongelma-analyysi. Korkeusmallin ja johtokartan pohjalta laadittu tarkastelualueen raja ja jako osavaluma-alueisiin on esitetty Kuvassa 27. Tarkasteltava viemäriverkosto rajautuu ongelmaristeyksen yläpuolelle siihen verkoston osaan, jonka vedet päätyvät risteyksessä sijaitsevaan sekaviemärikaivoon. Mahdollisen padotusvaikutuksen huomioon ottamiseksi tarkasteltu alapuolinen verkosto on rajattu Merikadun ja Laivurinkadun risteyksessä sijaitsevaan ylivuotorakenteeseen (Kuva 27 ja Liite 4), jota on mallinnettu neliömäisen aukon ja kynnyksen yhdistelmällä. Raja on tehty olettaen, että ylivuotokynnyksen



Kuva 27. Kapteenipuistikon tarkastelualueen raja osavaluma-alueisiin. Ongelmakohde ja purkupiste on merkitty vihreällä.

kapasiteetti ei ylitä tarkasteltavien sateiden aikana. Mallin toimivuutta on arvioitu syöttämällä siihen vuoden 2011 elokuun 22. päivän sadetapahtuma ja vertaamalla vaikutuksia kyseisen päivän kaupunkitulvista saatuihin ilmoituksiin ja kuvamateriaaliin.



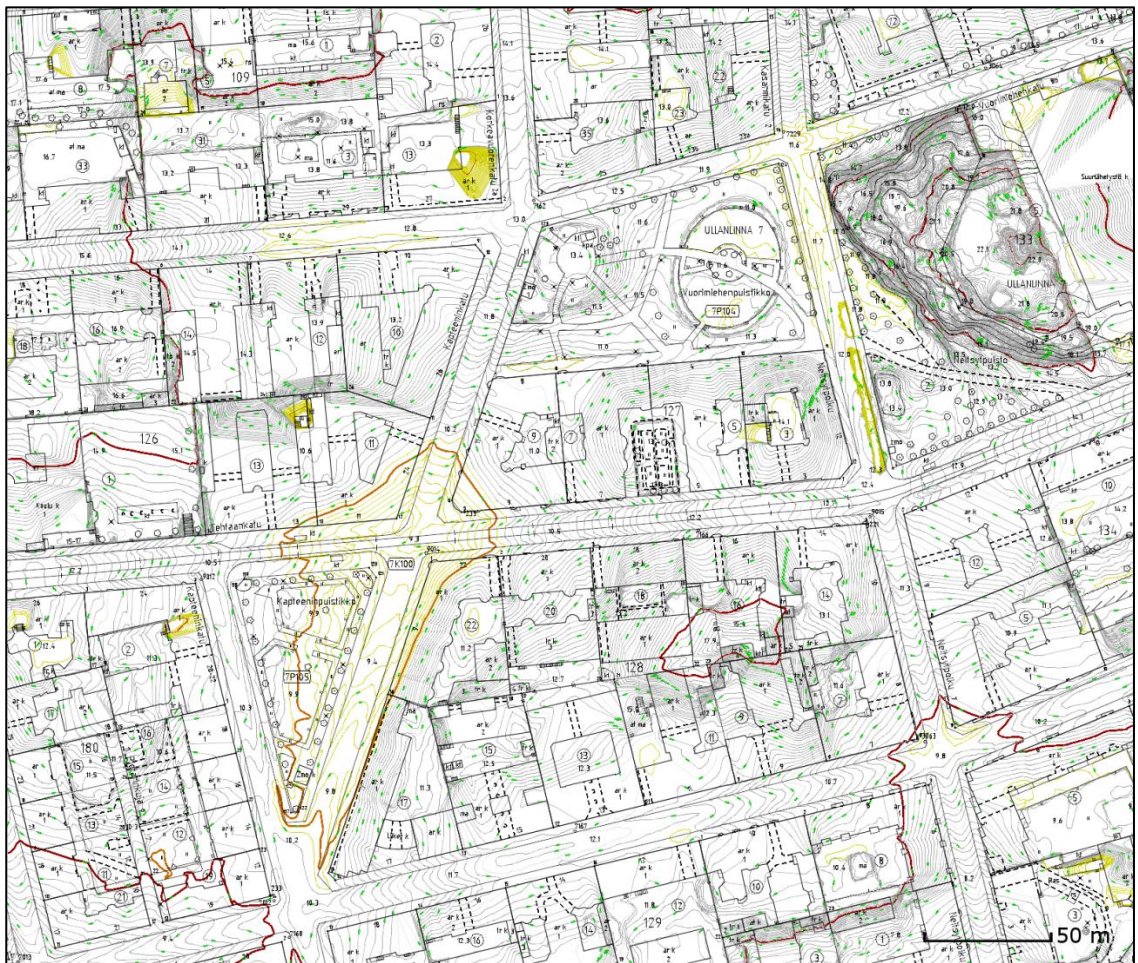
Kuva 28. Mallin mukaan vuoden 2011 elokuun 22. päivän sateella tulvivat viemärikaivot. Vuorimiehenkadun ja Kasarmikadun risteyksessä ei tapahtuisi tulvimista, mutta mallin mukaan vedenpinta viemärikaivoissa nousee kadun tasalle.

Mallinnuksen mukaan vuoden 2011 elokuun 22. päivän sateita vastaava sadetapahtuma saisi Kapteeninkadun ja Tehtaankadun risteysalueen sekä Jääkärikadun tulvimaan ja kyseisistä kohdista on myös tehty ilmoituksia tulvahaitoista (Kuva 28). Samoin Vuorimiehenkadun ja Kasarmikadun risteyksessä malli osoittaa, että vedenpinta viemärikaivoissa nousisi kadun tasalle, mutta vedenkorkeus ei vastaa Kuva 29. Näin ollen mallin oletetaan osoittavan myös mitoitussateena käytettävän kerran sadassa vuodessa tapahtuvan tunnin mittaisen sadetapahtuman aiheuttamien hulevesitulvien sijainnit.

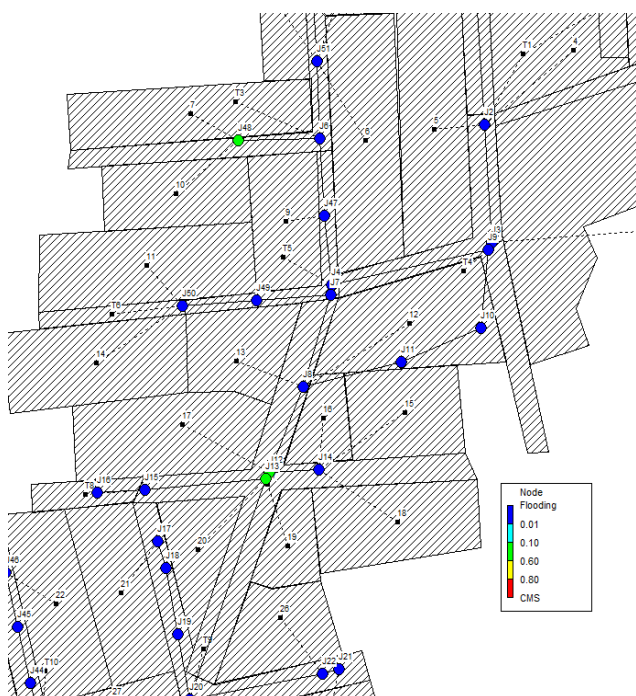


Kuva 29. Vuorimiehenkadun ja Kasarmikadun risteys 22.8.2011.

Analyysin aikana havaittiin, että tarkasteltava risteys sijaitsee maastonpainanteessa (Kuva 30) ja tämän vuoksi ympäröivien alueiden sadevesiä kerääntyy risteykseen, mutta merkittävämpänä vaikutuksena on risteyksen viemärikaivojen sijoittuminen ympäröivää verkostoa alemmalle tasolle. Verkoston ylikuormitustilanteessa kyseinen risteys toimii täten pisteenä, josta paineistunut sekaviemäri purkautuu kadulle veden hydraulisen paineen kohotessa risteyksen kaivon yläpuolelle. Mallin avulla voitiin havaita, että ongelmakohteen alapuolinen verkosto ei kykene johtamaan sateen aiheuttamia hulevesiä, jolloin padotusvaikutuksen seurauksena risteykseen yläpuolisesta verkostosta saapuvaa vettä ei saada johdettua pois ja se tulvii kaivoista katualueelle. Tarkasteltavana olevasta risteyksestä lähtevä runkoviemäri on johtokartan ja HSY Vedeltä saatujen tarkennuksien mukaan aluksi halkaisijaltaan 900 mm:n pyöreä betoniputki vaihtuen Pietarinkadusta eteenpäin kokoluokan 600/900 soikeanmuotoiseksi betoniputkeksi.



Kuva 30. Kapteenipuiston ympäristön korkeuskäyrät. Maastonpainanteet on merkitty keltaisella. Kuvasta havaitaan, että Tehtaankadun ja kapteeninkadun risteys sijaitsee laajassa maastonpainanteessa.



Kuva 31. Mallin mukaan kerran sadassa vuodessa toistuvan tunnin sateen aikana tulvivat viemärikaivot.

teyksessä syntyy edelleen hulevesitulva. On tosin mahdollista, että ritaläkaivojen tukkeutuminen voi osaltaan edesauttaa tulvatilanteen syntyä ja ainakin hidastaa tulvivan veden purkautumista viemäriin verkoston ylikuormituksen päätyttyä.

Alueen viemärihuolto on toteutettu sekaviemäroinnillä, jossa hulevedet sekoittuvat kiinteistöjen kuivatus- ja jätevesiin. Tämä vaikuttaa viemäristä tulvivan veden laatuun heikentävästi verrattuna erillisviemäroidyn alueen hulevesiviemäriin tulvintaan. Veden laatu on otettu huomioon erilaisten hulevesitulvia vähentävien ratkaisujen valinnassa ja suunnittelussa.

Mikäli malliin syötetään kerran sadassa vuodessa toistuva tunnin sade, osoittaa malli edelleen tulvimista aiemmin mainituissa kohteissa vaikkakin tulviminen on vähäisempää (Kuva 31).

Maastonpainanteen vuoksi veden määrä risteyksessä lisääntyy entisestään, mikäli verkoston ympäröivien kaivojen kapasiteetti ylittyy ja sadevesi kulkeutuu pintavaluntana maaston alimpiin kohtiin. Kohteeseen on asennettu lisää ritaläkaivoja, mutta niistä saatava hyöty on kyseenalainen sillä mallin perusteella ongelma ei aiheudu ritaläkaivojen vähäisestä määrästä vaan verkoston ylikuormituksesta ja siitä johtuvasta ylivuototilanteesta. Verkoston toimintaa on mallinnettu tilanteessa, jossa risteyksen lähivaluma-alueen vedet on johdettu toisaalle ja mallin mukaan risteyksessä

Taulukko 4. Kapteeninpuistikon tarkastelualueen vesitase kerran sadassa vuodessa toistuvalla tunnin mitoitusateella.

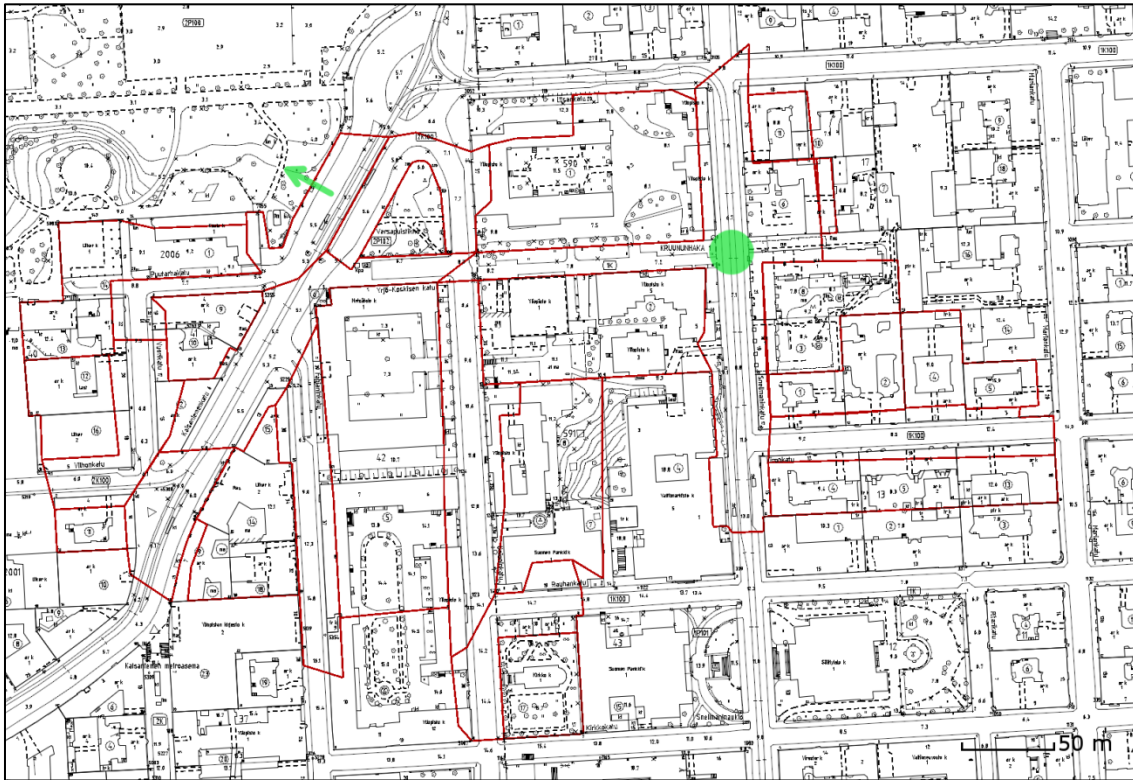
	m ³	mm
Sadanta	8310	36,000
Haihdunta	0	0,000
Imeyntä	1250	5,428
Pintavalunta	7050	30,541
Painannesäilyntä	30	0,116
Virhe (%)	-0,237	

Taulukossa 4 on esitetty SWMM mallilla laskettu vesitase tarkastelualueelle kerran sadassa vuodessa toistuvan tunnin mitoitussateen aikana.

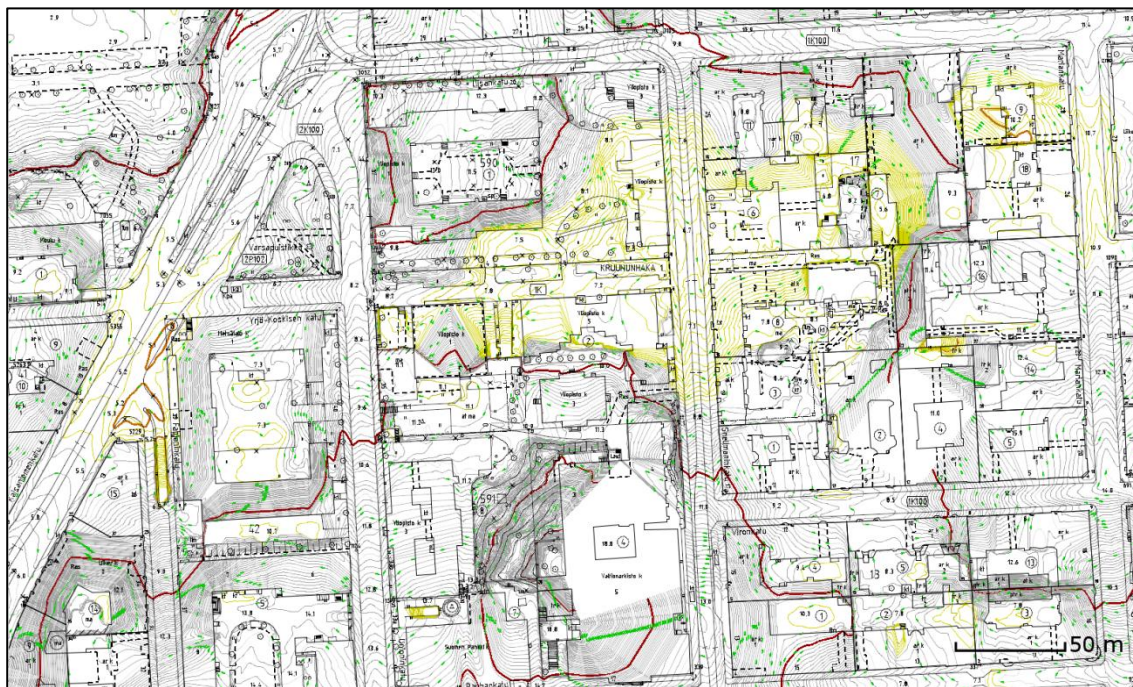
6.2 Snellmaninkatu

Snellmaninkadun ja Yrjö-Koskisen kadun risteys (Kuva 32 ja Liite 5) valittiin jatkokasteluun FCG:n (2011) tekemän selvityksen perusteella, jonka mukaan risteys on ilmoitettu tulvivan toistuvasti. FCG:n selvityksessä myös mainittiin, että Snellmaninkadulla sijaitsee maastonpainanne, johon on mahdollista muodostua tulvia valuma-alueen vesistä.

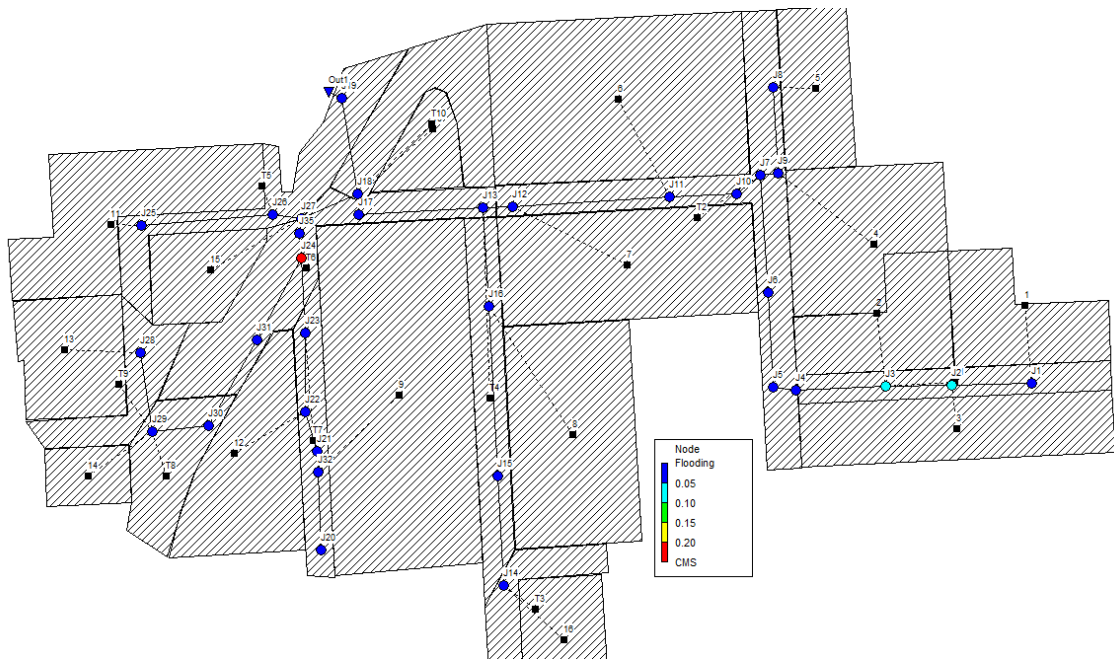
Alueesta on tehty analyysi noudattaen luvussa 5.1 kuvattua menettelytapaa siten, että tarkastelualue rajautui Kaisaniemen puiston itäreunalla kulkevaan DN1100 viemäriputkeen. Tarkastelualueen jako mallinnuksessa käytettyihin osavaluma-alueisiin on esitetty Kuvassa 32. Selvityksessä havaittu maastonpainanne on nähtävissä Kuvassa 33, mutta mallinnuksen mukaan tarkasteltavana olevassa risteyksessä ei pitäisi esiintyä hulevesitulvaa vuoden 2011 elokuun rankkasadetta vastaavan sadetapahtuman seurauksena (Kuva 34) ja tältä osin malli ei siis vastaa oletettua. Syynä tähän on luultavasti se, että FCG:n tekemä analyysi perustui ainoastaan maastomalliin eikä siinä ole otettu huomioon vettä poisjohtavaa viemäriverkostoa. Mallin mukaan viemäri kykenee johtamaan kyseisen sadetapahtuman painanteeseen tuoman vesimäärän vaikkakin viemäriputkien kapasiteetti käy äärirajoilla ja vesi kulkee putkistossa paineellisena. Myöskään kohteen läheisyydessä asuva rakennusviraston virkamies (Huhtonen 2013) ei ole havainnut kohteen tulvimista. Mikäli kohde kuitenkin tulvii, malli viittaisi ongelman olevan viemärikapasiteetin sijasta ritaläkaivoissa tai mahdollisesti viemäriputkivauriossa. On myös mahdollista, että johtokartan tiedot ovat virheellisiä johtaen virheelliseen verkostomalliin.



Kuva 32. Snellmaninkadun tarkastelualueen jako osavalue-alueisiin. Ongelmakohde ja purkupiste merkitty on vihreällä.



Kuva 33. Snellmaninkadun ympäristön korkeuskäyrät. Maastonpainanteet on merkitty keltaisella. Työn kannalta merkittävimmät painanteet ovat Snellmaninkadulla sekä Kaisaniemenkadulla.



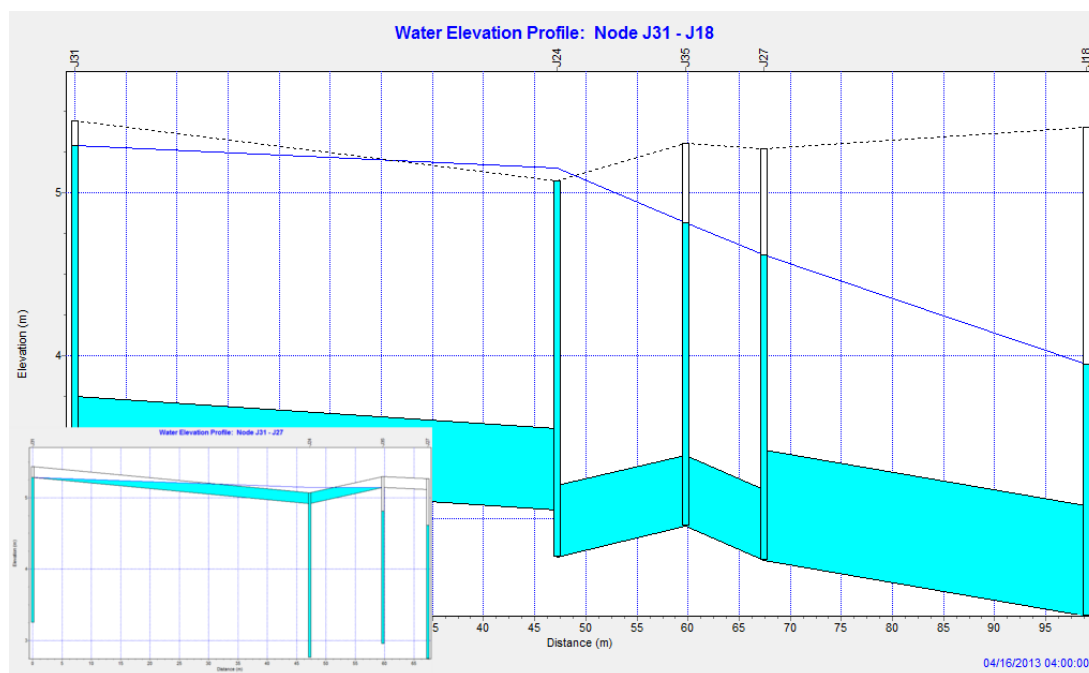
Kuva 34. Mallinnuksen mukaan vuoden 2011 elokuun 22. päivän sadetta vastaava tapahtuma ei aiheuttaisi hulevesitulvaa Snellmaninkadulle. Kuitenkin mallin mukaan tulvimista tapahtuisi Vironkadulla ja erityisesti Kaisaniemenkadulla.

Vaikka mallinnuksen perusteella Snellmaninkadulla ei hulevesitulvia esiintyisikään, malli osoitti kaksi muuta tulvivaa kohdetta tarkastelualueella (Kuva 34). Vironkadun keskikohdalla olevat viemärikaivot sijaitsevat ympäröivää verkostoa alempana ja viemäriin kapasiteetti on pienentynyt sujutuksen seurauksena. Mallin mukaan tulviminen on kohdassa mahdollista, mutta asukkailta ei ole tullut ilmoituksia tulvimisesta, joten kyseisen viemäriosuuden ei ole havaittu olevan ongelmallinen. On myös mahdollista, että rankkasateen aikana viemäriin kapasiteetin ylittyessä Vironkadun kiinteistöjen sadevedet lammikoituvat todellisuudessa pihoihin. Mallissa vesi kuitenkin ”pakotetaan” osavaluma-alueilta viemäriin johtaen lähimmän solmukohdan tulvimiseen ja mallin mahdolliseen virheeseen. Mallin perusteella myös Kaisaniemenkatu tulvisi Yrjö-Koskisen kadun ja Puutarhakadun välisellä risteysalueella. Taustatietoina annetusta kuvamateriaalista löytyi alla oleva Kuva 35, joka esittää kyseistä risteystä 2011 rankkasateen jälkeen. Mallin mukaan tulvan syvyys risteyksessä olisi kyseisen sadetapahtuman johdosta noin 25 cm, vastaten kuvasta arvioitua vesisyvyyttä.



Kuva 35. Kaisaniemenkadun, Puutarhakadun ja Yrjö-Koskisen kadun risteys 22.8.2011.

Koska malli osoitti vertailusadetahtuman tulvan Kaisaniemenkadun risteysalueella, sen avulla voitiin tehdä johtopäätöksiä tulvan syistä kyseisellä risteysalueella. Kuvassa 36 on esitetty pituusleikkaus risteysalueen (Liite 4) viemäriputkista ja kadusta elokuun 2011 rankkasateen aikana. Kuvasta havaitaan, että viemäriputkikoko pienenee juuri ongelmakohteessa, jonka lisäksi viemäriputken kaltevuus on negatiivinen yhden kaivovälin matkalta lisäten tukkeutumisen mahdollisuutta. Kuvasta 31 voidaan myös havaita risteysalueen sijaitsevan maastonpaineissa aiheuttaen tulvivien veden lammikoitumisen.



Kuva 36. Kaisaniemenkadun viemäriosuus mallinnettuna elokuun 2011 rankkasateen aikana. Kuvassa on havaittavissa johtokartan mukainen oikealle suuntautuvaan virtaukseen nähden negatiivinen kaltevuus. Vasemmalla alhaalla veden korkeus katuja esittävissä avouomissa. Kuvassa maanpinta on merkitty katkoviivalla, hydraulinen painekorkeus sinisellä sekä veden pinta turkoosilla. Pystypalkit esittävät viemärikaivoja.

Kerran sadassa vuodessa toistuvan tunnin mitoitussateen aikana malli osoitti tulvimista vain Vironkadun painanteessa. Kaisaniemenkadun painanteen kohdalla viemäriputkien kapasiteetti on täynnä, mutta tulvimista ei mallin mukaan esiinny. Snellmaninkadulla malli ei osoita tulvimista eikä viemäreiden kapasiteetin ylittymistä. Mikäli mallin toiminta Vironkadulla jätetään huomiotta, koko tarkastelualueella ei mallinnuksen perusteella ole oletettavissa hulevesitulvia valitulla mitoitussateella.

Snellmaninkadun tarkastelualueen vesitase kerran sadassa vuodessa toistuvan tunnin mitoitussateen aikana on esitetty Taulu-

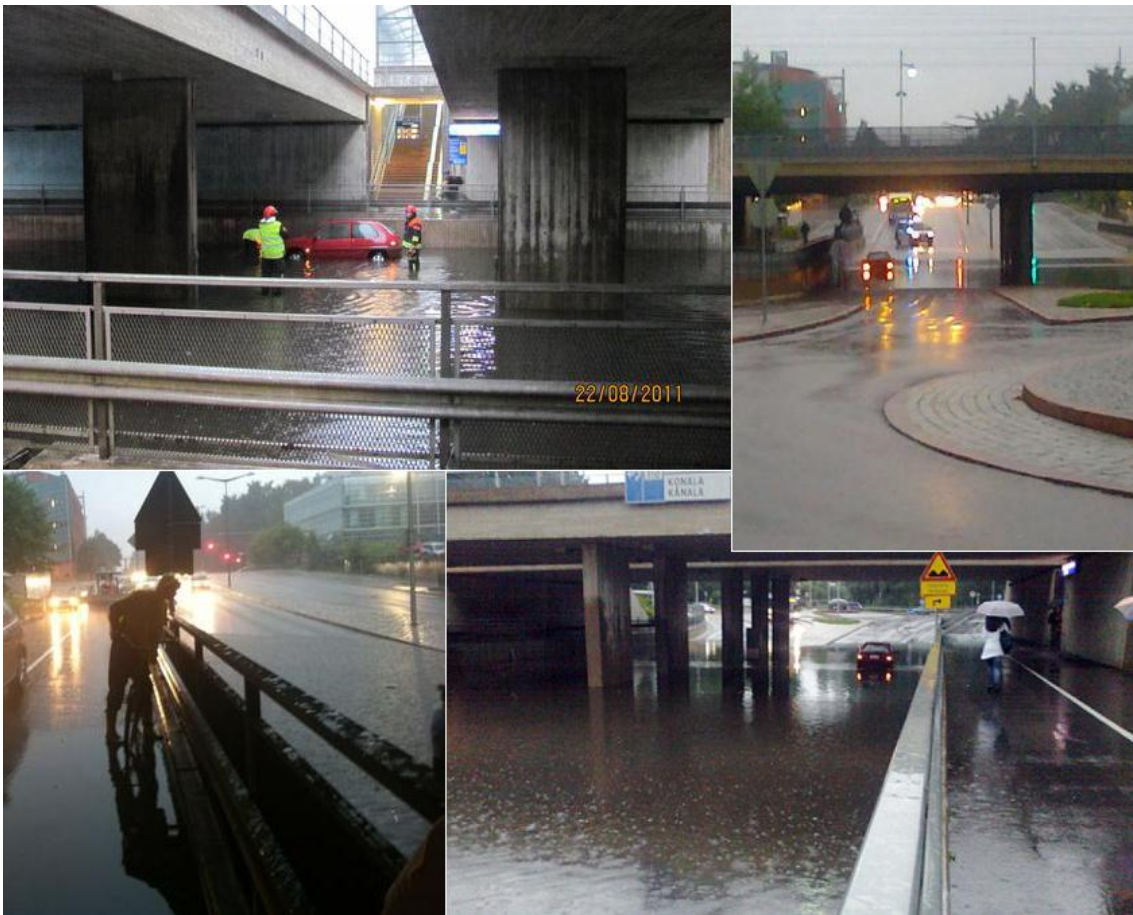
Taulukko 5. Snellmaninkadun tarkastelualueen vesitase kerran sadassa vuodessa toistuvalla tunnin mitoitussateella.

	m ³	mm
Sadanta	3970	36,000
Haihdunta	0	0,000
Imeyntä	480	4,381
Pintavalunta	3480	31,557
Painannesäilyntä	10	0,135
Virhe (%)	-0,202	

kossa 5.

6.3 Pitäjänmäentien alikulku

Pitäjänmäentie alittaa junaradan alikulussa, joka tulvi vuoden 2011 elokuun rankkasateiden aikana niin voimakkaasti, että ajoneuvoliikenne ei voinut käyttää kyseistä väylää (Kuva 37). Kuvien perusteella kertyneen veden syvyys oli alikulun syvimmissä kohtaa noin 30 cm. Alikulku sijaitsee ympäröiviä alueita alempana ja maastotietojen perusteella se kerää valumavesiä Kuvassa 38 esitetyltä yhteensä noin 2,8 ha alueelta. Alue on erillisviemäröity. Alikulun kohdalla Mätäjoki on johdettu junaradan alittavaan tunneliin, jonka jälkeen Mätäjoki jatkuu avouomana etelää kohti.

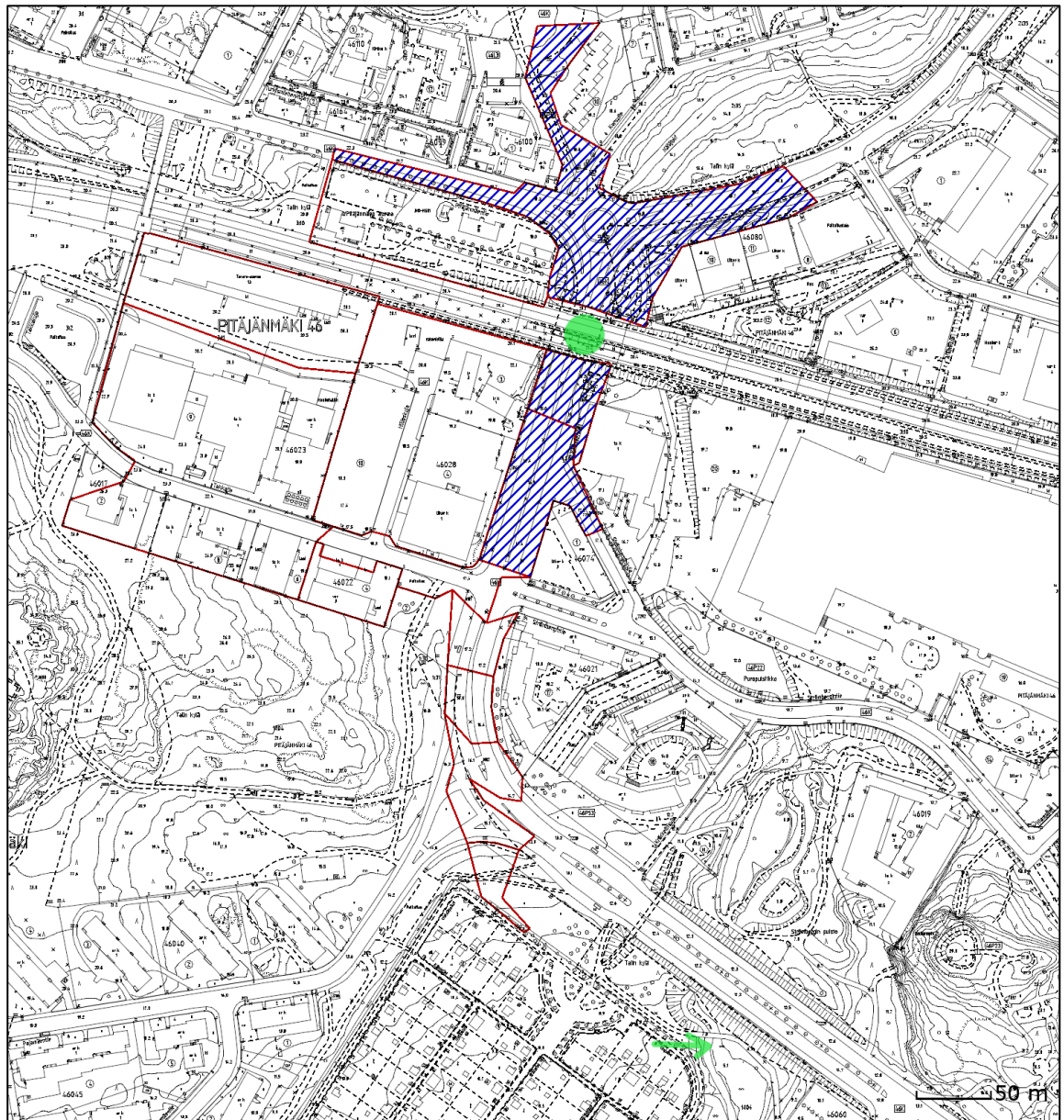


Kuva 37. Pitäjänmäentien alikulku 22.8.2011. Tulvimisen seurauksena ajoneuvoliikenne alikulussa on estynyt.

Alikulun kuivatus on toteutettu alikulkuun asennetuilla kahdella ritiläkaivolla, jotka on liitetty halkaisijaltaan 300 mm hulevesiviemäriin. Viemäri kulkee aluksi alikulun pohjoispuolelle, josta putki johdetaan junaradan alittavaan tunneliin. Tunnelissa kulkevan

putken halkaisija on HSY Vedeltä saatujen tietojen mukaan 250 mm (Neiramo 2013b). Putki kulkee tunnelissa noin 300 m:n matkan kaltevuudella 1,03 % ja tunneli päättyy Pitäjänmäentien ja Pajamäentien risteyksessä sijaitsevaan viemärikaivoon, josta hulevesiviemäri jatkuu maanalaisena purkaen kaakossa Mätäjokeen.

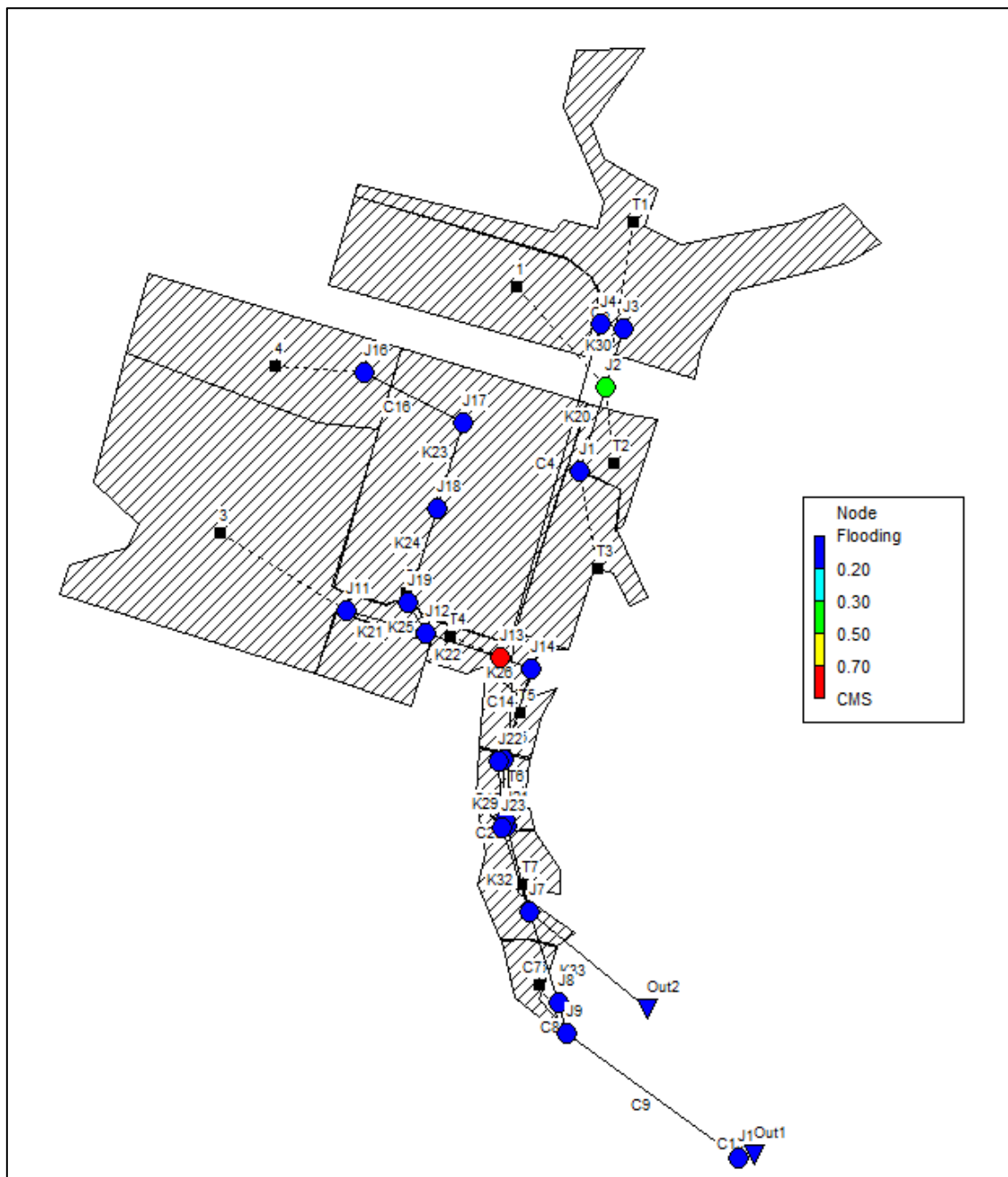
Alikulussa sijaitsevaan hulevesikaivoon päätyvän huleveden määräksi kerran sadassa vuodessa toistuvalla tunnin mitoitussateella saadaan rationaalisella menetelmällä hieman yli 150 l/s kun oletetaan, että asfaltin valumakerroin on 0,9 ja viheralueen 0,2. Tämä vastaa suuruusluokaltaan mallin antamaa noin 160 l/s. Viemäriputkien mitoituksessa käytetyn Colebrookin nomogrammin (RIL 2010b) mukaan tunnelissa kulkeva 250 mm:n hulevesiputki voi kaltevuudella 1,03 % johtaa vain hieman yli 20 l/s. Näin ollen



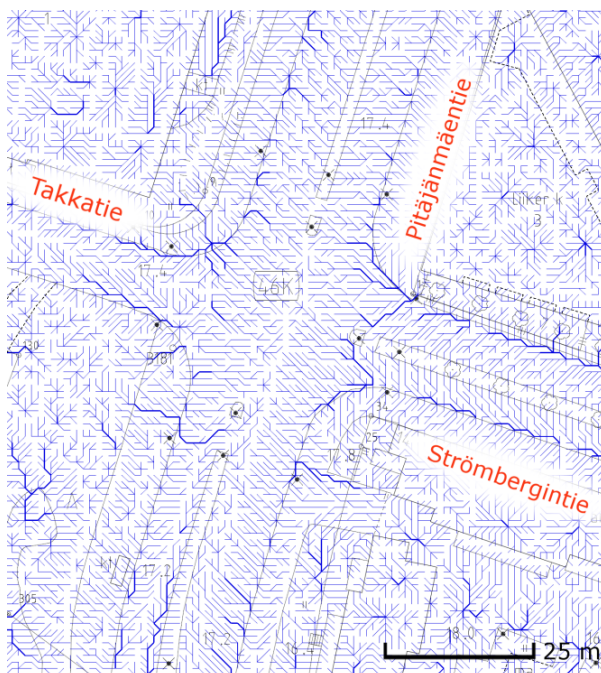
Kuva 38. Pitäjänmäen alikulun tarkastelualueen jako osavaluma-alueisiin. Sinisellä osoitettujen alueiden hulevedet päätyvät alikulkuun. Hulevesiä kerääntyy noin 2,8 hehtaarin alueelta. Ongelmakohde ja purkupiste merkitty vihreällä.

alikulun kuivatukseen tarkoitettu hulevesiviemäri on riittämätön johtamaan mitoitusta-
teesta aiheutuvia valumavesiä.

Tarkasteltavan alueen jako osavaluma-alueisiin on esitetty Kuvassa 38. Tarkastelualueesta tehty malli osoittaa Pitäjänmäentien alikulun tulvivan elokuun 2011 rankkasadetta vastaavan sadetapahtuman aikana sekä käytetyn mitoitusasteen aikana Kuva (39).



Kuva 39. SWMM mallinnus Pitäjänmäentien alikulun tarkastelualueen tulvivista hulevesikaivoista. Kuvassa nähdään sekä alikulun (vihreällä), että Pitäjänmäentien ja Takkatien risteyksen (punaisella) kaivojen tulvivan. Vesi ei kuitenkaan lammikoidu Pitäjänmäentien ja takkatien risteykseen maastonmuotojen vuoksi.



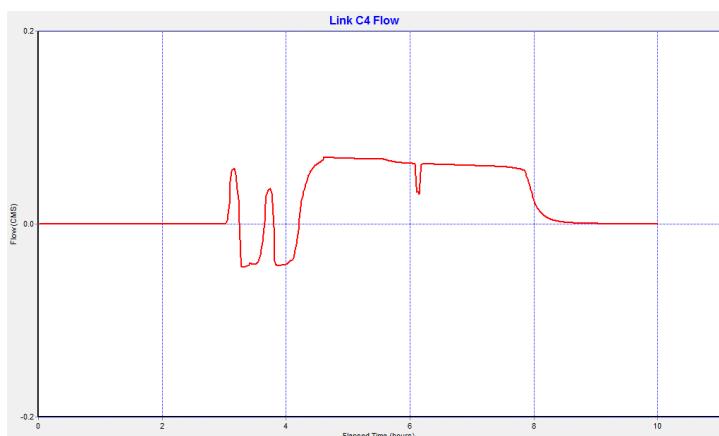
Kuva 40. Pitäjänmäentien ja Takkatien risteys-
pintavesien virtaussuunnat. Virtaussuunnista voi-
daan nähdä, että pintavalunta on risteyksessä mah-
dollista kolmeen suuntaan.

Pitäjänmäen alikulun tarkastelualueen mallin luomisessa ongelmia tuotti pintavesien virtaussuuntien määrittäminen Pitäjänmäentien ja Takkatien risteyksessä (Liite 6). Kuvassa 36 on esitetty pintamallin perusteella määritetyt pintaveden virtaussuunnat ja voidaan havaita, että risteykseen päätyntä vesi ei lammikoidu, vaan se saattaa lähteä Pitäjänmäentietä pohjoiseen tai etelään suuntaan, mutta myös poistua tarkastelualueelta Strömbergintietä itään. Mallin mukaan vesi tulvii kaivoista risteysalueelle vertailusateen aikana (Kuva 40) ja tulvivan veden kulkeutumissuunnan valinta vaikuttaa merkittävästi mallin antamiin tuloksiin.

Mikäli vesi määritetään poistumaan tässä työssä mallinnetulta alueelta, nousisi vesi alikulussa noin 55 cm:n korkeuteen mikä on enemmän kuin kuvien perusteella arvioitu todellinen vedenkorkeus.

Jos vesi määritetään virtaamaan Pitäjänmäentietä pohjoiseen, se päättyy alikulkuun. Tällöin mallin mukaan vedenkorkeus alikulussa kohoaa vertailusateen aikana noin 120 cm:iin. Tämä on elokuun 2011 rankkasateen aikana otettujen valokuvien mukaan huomattavasti yli sen syvyyden, joka alikulussa todellisuudessa oli. Näin ollen mallin määrittäminen siten, että risteysalueen tulvavedet päätyvät suoraan alikulkuun, ei todennäköisesti vastaa todellisuutta.

Mikäli tulvivan viemärikaivon vedet määritetään kulkeutumaan Pitäjänmäentietä etelään, ne päätyvät lopulta Pitäjänmäentien ja Pajamäentien risteysalueelle, jonne päättyy myös alikulusta lähtevä tunnelissa kulkeva hulevesiviemäri. Koska pintavesi päättyy alikulua kuivattavan viemäriputken toiseen päähän, muodostaa se mallin mukaan tilanteen, jossa vesi kulkee tunneliputkessa ajoittain vastakkaiseen suuntaan (Kuva 41). Tässä tapauksessa malli osoittaa alikulussa suurimmaksi tulvasyvyyydeksi noin 70 cm:ä.



Kuva 41. Virtaus alikulkua kuivattavassa tunneliputkessa. Kuvaajasta nähdään, että virtaus on ajoittain negatiivista, jolloin vesi virtaa alikulun suuntaan.

Edellä esitetyistä vaihtoehdoista malli, jossa Pitäjänmäentien ja Takkatien risteyksen vedet johdetaan pois tarkastelualueelta, vaikuttaa vastaavan parhaiten vuoden 2011 elokuun rankkasateen tulvatilanteesta otetuissa valokuvissa nähtävää tilannetta. Näin ollen ratkaisua on pyritty hakemaan kyseisen mallin perusteella.

Valitun mallin mukaan kerran

sadassa vuodessa toistuvan tunnin sateen aikana vesi nousisi alikulussa hieman alle 50 cm:iin.

Vaikka valitussa mallissa Pitäjänmäentien ja Takkatien risteyksestä ylitulviva vesi poistuu tarkastelualueelta, on hyvä tiedostaa toisessa malliasettelussa havaittu mahdollisuus siihen, että hulevesi virtaa alikulkua kuivattavassa tunneliputkessa vastakkaiseen suuntaan. Todellisen putkessa esiintyvän virtaussuunnan selvittämiseksi tulisi kyseisessä verkosto-osassa suorittaa virtausmittauksia voimakkaiden sateiden aikana.

Mitoitussateena käytetyn kerran sadassa vuodessa toistuvan tunnin sadetapahtuman aikainen vesitase Pitäjänmäentien alikulun tarkastelualueelle on esitetty Taulukossa 6.

Taulukko 6. Pitäjänmäen alikulun tarkastelualueen vesitase kerran sadassa vuodessa toistuvalla tunnin mitoitussateella.

	m ³	mm
Sadanta	3170	36,000
Haihdunta	0	0,000
Imeyntä	760	8,597
Pintavalunta	2400	27,279
Painannesäilyntä	10	0,162
Virhe (%)	-0,105	

7 Hulevesitulvien vähentäminen ja ehkäisy

Seuraavassa on käyty läpi eri kohteille tehtyjen ongelma-analyysien perusteella ehdotettuja ratkaisuvaihtoehtoja. Ratkaisuvaihtoehtojen laadinnassa on otettu huomioon työn alussa määritelty vaatimus, että vähintään yhden ratkaisusta tulee sijaita kokonaisuudessaan yleisellä alueella ja näiden yleisellä alueella sijaitsevien ratkaisuiden toteuttamiselle tulee laskea kustannukset. Mitoitussateena Kapteeninpuistikon ja Pitäjänmäen alikulun osalta esitetyissä ratkaisuissa on käytetty kerran sadassa vuodessa toistuvaa tunnin sadetta (36 mm/h). Snellmaninkadulla ei havaittu kyseisen mitoitussateen aiheuttavan tulvimista, mutta analyysin yhteydessä havaittiin Kaisaniemenkadun painanteen olevan mahdollisesti hulevesitulvaherkkä kohde.

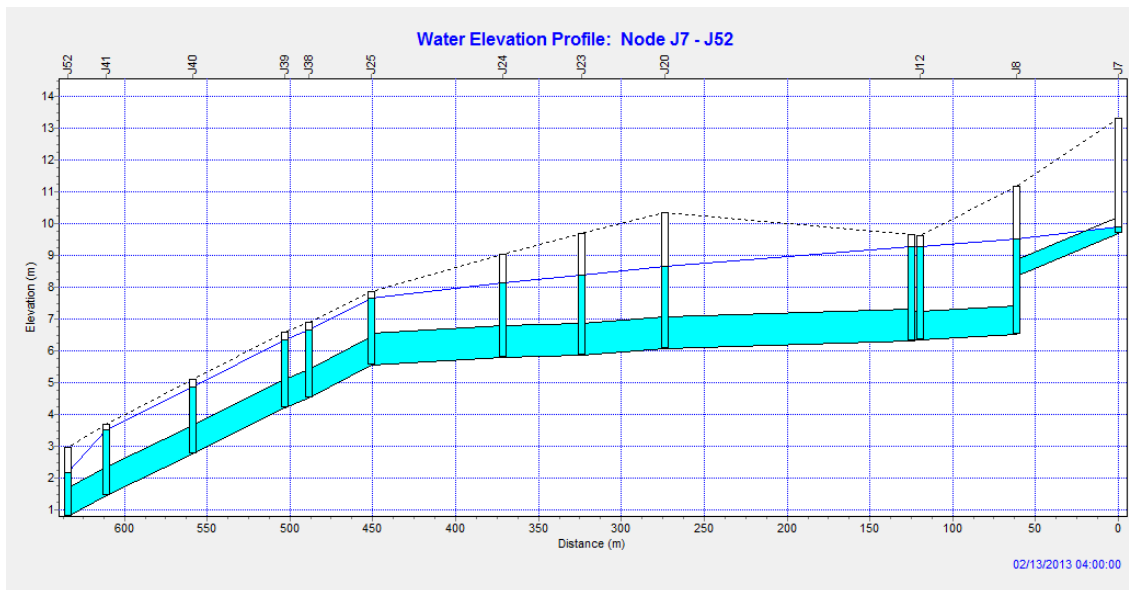
7.1 Kapteeninpuistikko

Analyysi osoitti hulevesitulvaherkäksi osoitetun risteyksen merkittävimmäksi ongelmaksi kohteen alapuolisen viemäriverkoston kapasiteetin riittämättömyyden mitoitussateella. Risteyksen sijoittuminen ympäröivää maastoa alemmas edesauttaa sadeveden kerääntymistä kohteeseen. Mallin avulla on tarkasteltu seuraavien toimenpiteiden soveltuvuutta hulevesitulvien vähentämiseksi.

7.1.1 Viemärikapasiteetin suurentaminen

Analyysin aikana havaittiin tarkasteltavana olevan kohteen alapuolisen viemäriverkoston johtokyvyn kapasiteetin ylittyminen mallinnetuilla sateilla. Yksi ratkaisu kapasiteetivajeen aiheuttaman padotusvaikutuksen vähentämiseksi on suurentaa tulvivan kohteen alapuolella sijaitsevaa runkoviemäriä siten, että viemäri kykenisi johtamaan kaiken risteykseen saapuvan veden ennen kuin vesi tulvii kadulle.

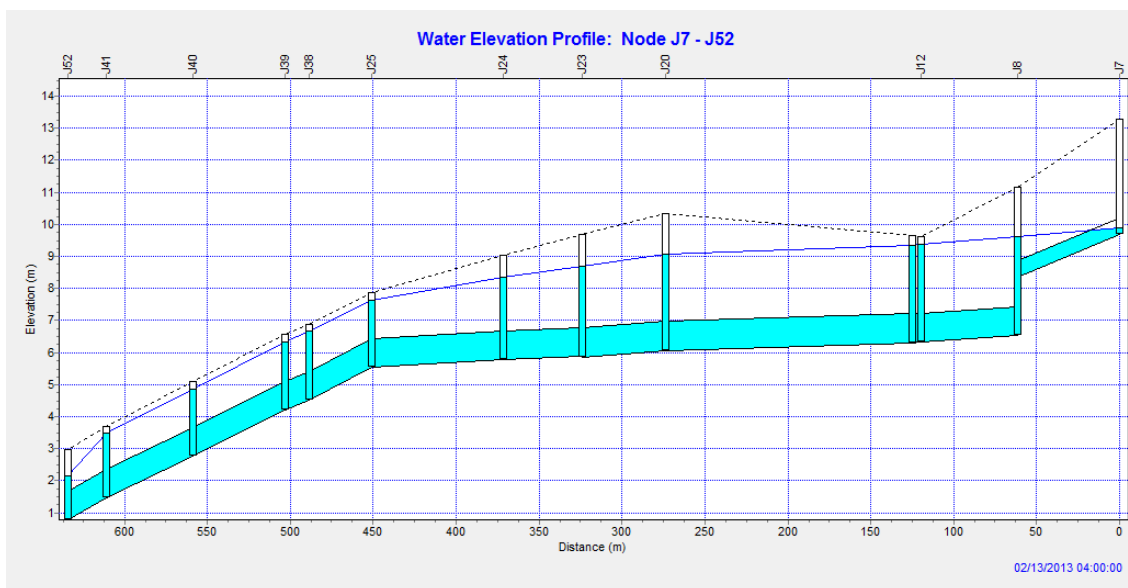
SWMM:lla tehdyn mallinnuksen mukaan Kapteeninkadun ja Tehtaankadun risteysalueelle mitoitussateella muodostuva hulevesitulva on mahdollista poistaa kasvattamalla runkoviemärin kapasiteettia tulvivasta risteyksestä Laivurinkadulle asti noin 330 m:n matkalta (Liite 4). Kapasiteetin kasvattaminen voidaan tehdä joko vaihtamalla vanhan viemäriputken tilalle uusi suurempi putki tai sijoittamalla katutilaan toinen vanhalle putkelle rinnakkainen viemäriputki.



Kuva 42. Runkoviemärin poikkileikkaus mitoitussateen aikana, kun runkoviemäri on vaihdettu halkaisijaltaan 1000 mm betoniputkeen lähtien tulvivasta risteyksestä Laivurinkadulle asti. Kuvassa maanpinta on merkitty katkoviivalla, hydraulinen painekorkeus sinisellä sekä veden pinta turkoosilla. Pystypalkit esittävät viemärikaivoja.

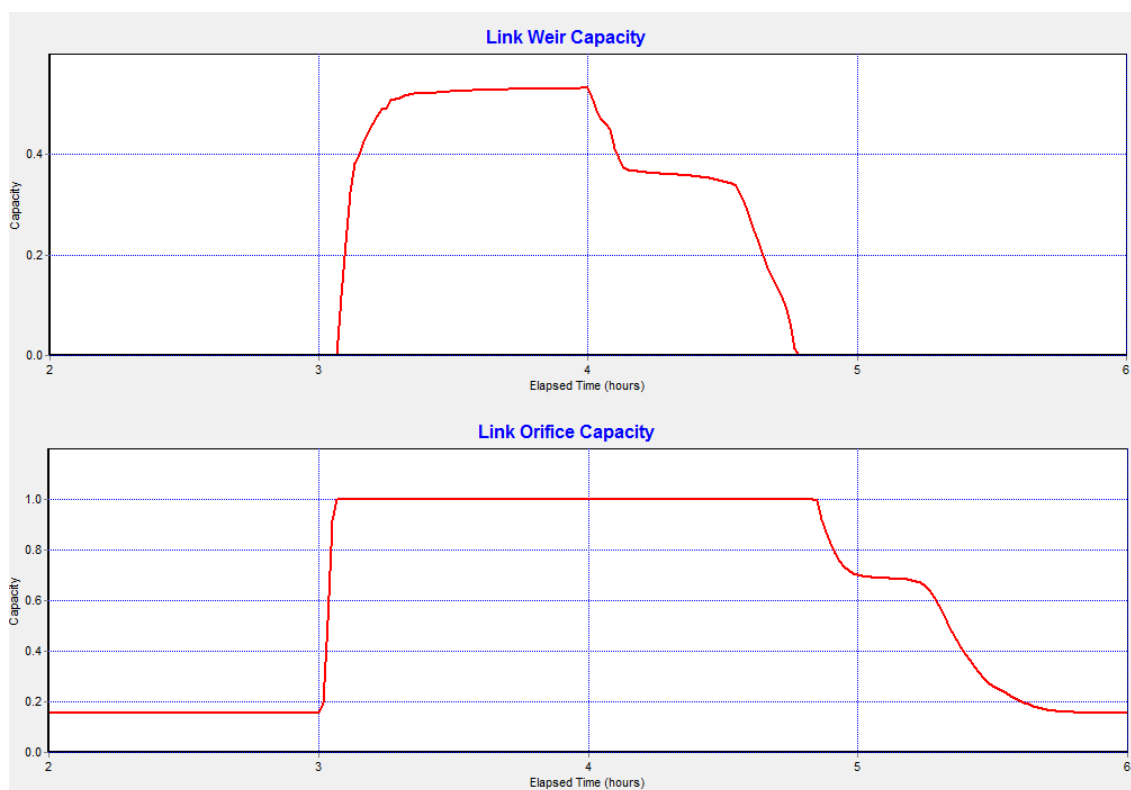
Runkoviemärin 900/600 kokoluokan putken vaihtaminen Kapteeninkadun ja Pietarinkadun osalta halkaisijaltaan 1000 mm:n pyöreään betoniputkeen laskisi mallinnetun hulevesitulvan tason katupinnan alapuolelle, kuten Kuvassa 42 on esitetty.

Hulevesitulva on mahdollista poistaa myös lisäämällä nykyisen viemäriputken viereen toinen vastaavanlainen putki (Kuva 43) Kapteeninkadun ja Pietarinkadun runkoviemäriosuuksille, jolloin säästytäisiin vanhan putken poistamiselta.



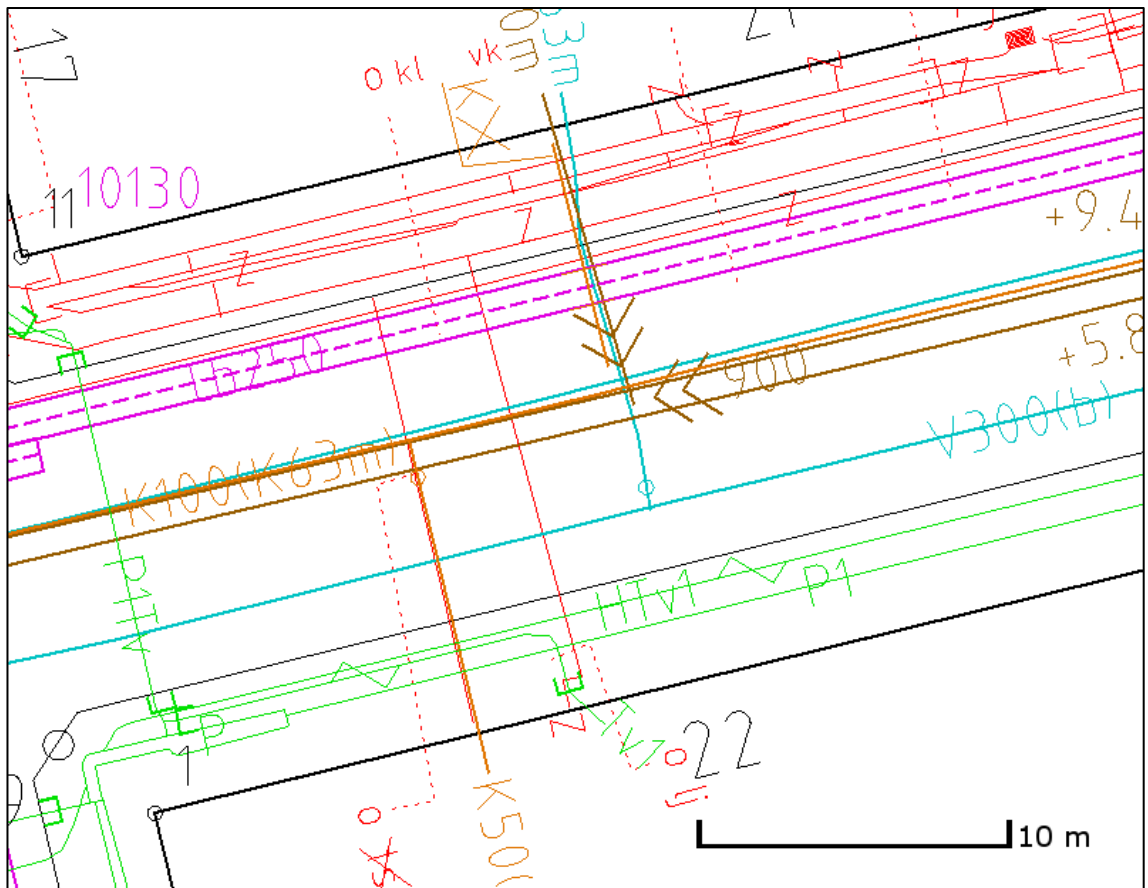
Kuva 43. Runkoviemärin vedenpinta mitoitussateen aikana kun nykyisen putken viereen on asennettu toinen vastaava putki.

Kummassakin ratkaisussa ongelmana on Pietarinkadun jälkeisen runkoviemäriosuuden tulviminen kadulle. Kuitenkin Laivurinkatu viettää voimakkaasti alaspäin päättyen Laivurinkadun ja Merikadun risteyksessä sijaitsevaan ylivuotorakenteeseen (Liite 4), joten vesi ei kerry painanteeseen samalla tavoin kuin Kapteeninkadun ja Tehtaankadun risteyksessä ja täten tulvavahingot olisivat oletettavasti vähäisempiä. Tulviminen voidaan poistaa kokonaisuudessaan jatkamalla runkoviemärin kapasiteettia kasvattavia muutostoimenpiteitä aina ylivuotorakenteeseen asti, mutta tällöin kustannukset nousevat huomattavasti. Toisena haittapuolena on edellä mainitusta ylivuotorakenteesta mereen johdetun sekaviemäriveden määrän lisääntyminen. Kuvassa 44 on esitetty ylivuotokynnyksen toiminta mitoitussateella nykyisessä tilanteessa. Tulvatilanteessa ylivuotorakenne rajoittaa viemäriverkostossa poistoaukosta eteenpäin johdettavan veden määrää ohjaamalla poistoaukon kapasiteetin ylittävän veden ylivuotokynnyksen kautta mereen. Näin ollen runkoviemärin kapasiteettia kasvatettaessa lisätään mereen johdettavan sekaviemäriveden määrää. Mikäli Tehtaankadun ja Pietarinkadun runkoviemäri vaihdetaan isompaan putkikokoon, kasvaa mereen johdettava sekaviemäriveden määrä 13,8 % kun taas kapasiteetin lisäys rinnakkaisella putkella lisää määrää 11,4 %.



Kuva 44. Ylivuotokynnyksestä poistuvat vesimäärät kerran sadassa vuodessa toistuvan tunnin sateen aikana nykytilanteessa. Alhaalla verkostoon johdettu vesi ja ylhäällä ylivuotokynnyksen yli mereen johdettu vesi.

Merkittävän ongelman rinnakkaisen viemäriputken lisäämiselle tuo katutilan alla nykyisellään sijaitseva muu kunnallistekniikka (Kuva 45). Erityisesti nykyisen viemäriputken lähellä kulkeva kaukolämpöputki saattaa aiheuttaa tilanpuutteen uuden viemäriputken sijoittelussa kadun poikkileikkauksessa, joten toisen runkoviemärin sijoittaminen saattaa osoittautua mahdottomaksi.



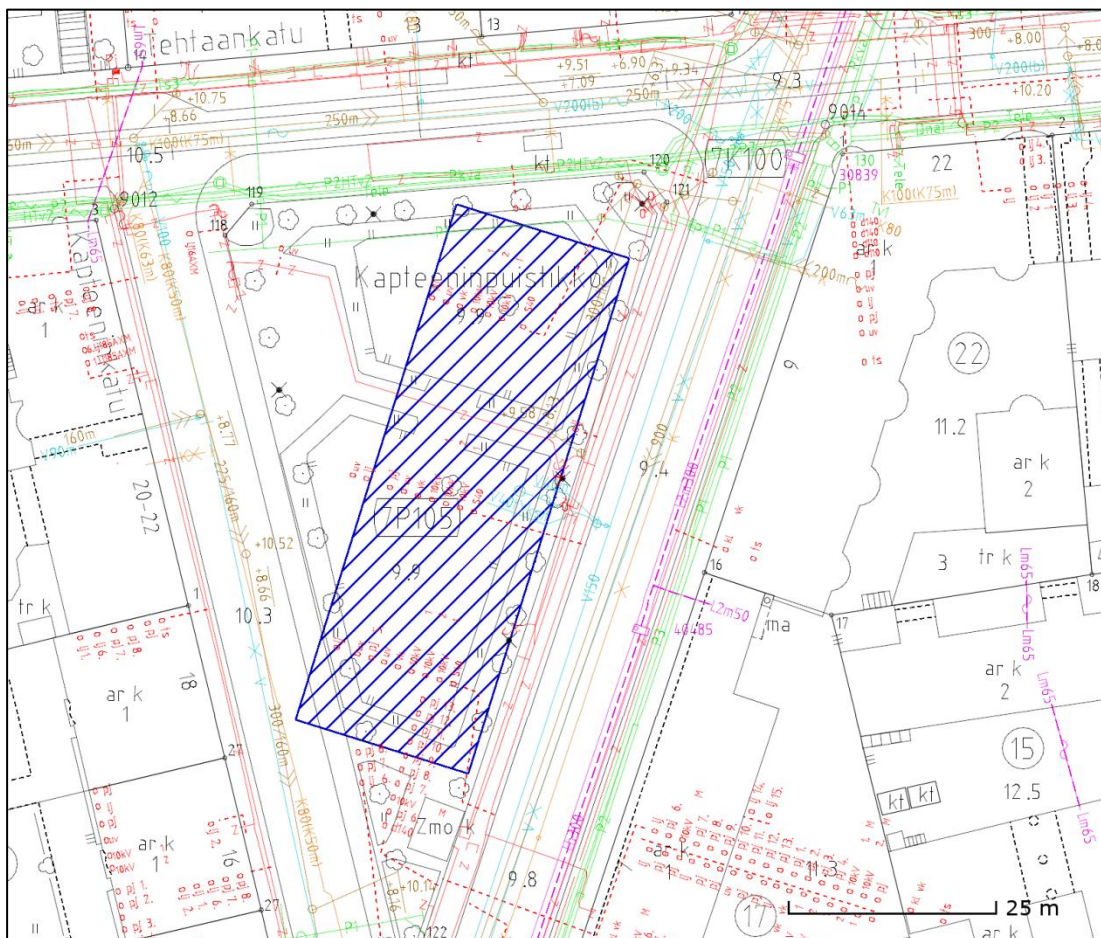
Kuva 45. Esimerkki Pietarinkadun alla sijaitsevasta kunnallistekniikasta. Eri johtokartat on erotettu värein siten, että ruskealla merkitään viemäreitä, sinisellä vesijohtoja, vaaleanpunaisella kaukolämpöä, vihreällä tietoliikennettä, oranssilla kaasua sekä punaisella sähköä.

7.1.2 Maanalainen viivytysrakenne

Viemäriverkostoon on mahdollista rakentaa ylimääräistä varastotilavuutta maanalaisen viivytysrakenteen avulla (luku 3.1.2). Koska katutilan alapuolinen maaperä on pääasiasa varattu muille kunnallisteknisille toiminnoille, on viivytysrakenteen sijoittaminen mielekkäintä puistojen tai aukoiden alle. Tarkastelualueella on kaksi puistoa, Kapteenipuistikko sekä Vuorimiehenpuistikko ja tässä työssä on tarkasteltu viivytysrakenteiden sijoittamista molempien tai vain Kapteenipuistikon alle. Tarvittava viivytystilavuus on arvioitu mallintamalla vesimäärä, joka kyseisissä kohteissa tulee molemmissa tapauksissa verkostosta poistaa, jotta tulvimista Kapteeninkadun ja Tehtaankadun risteyksessä ei mitoitussateella tapahdu. Mallinnus on toteutettu lisäämällä lähelle puistoa verkoston solmukohtiin putken ja purkupisteen yhdistelmä siten, että roudan vaatimat

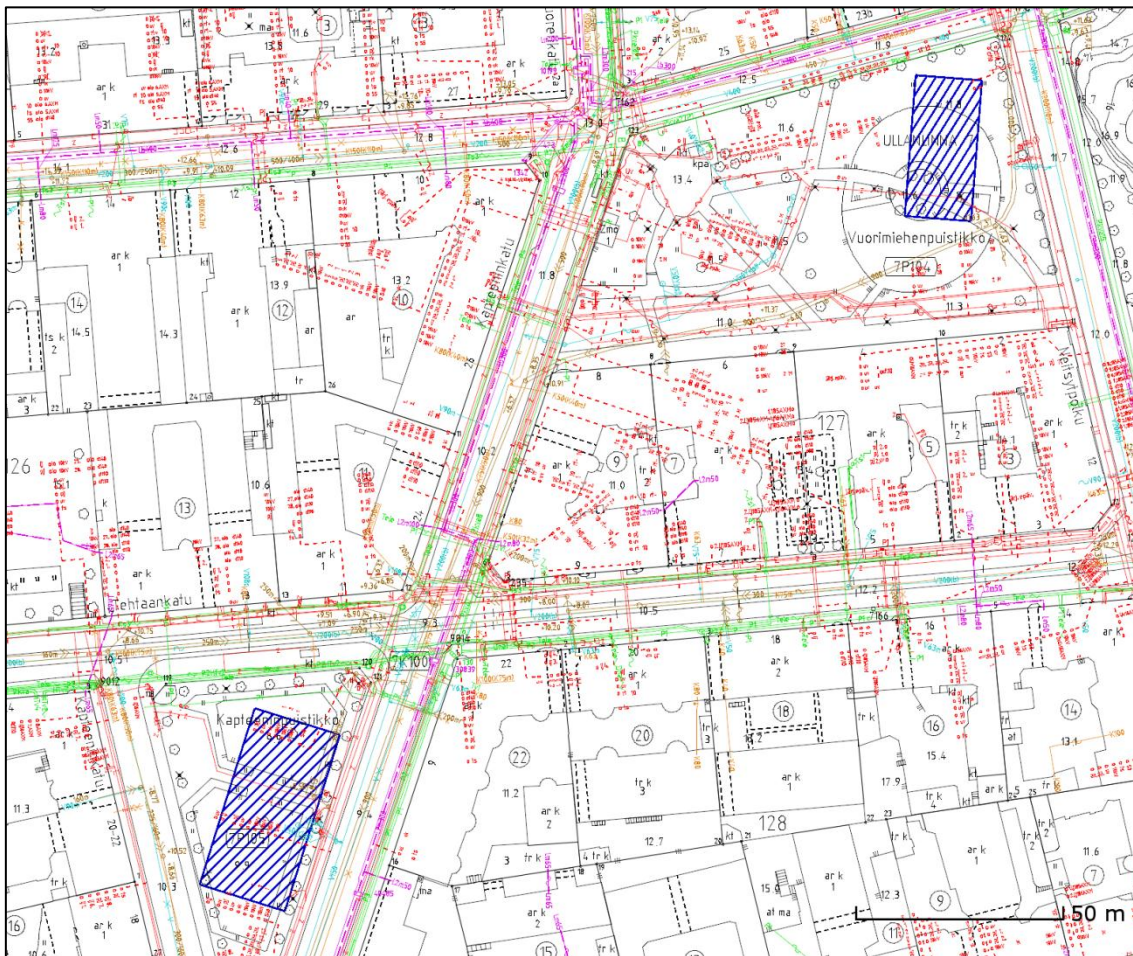
peitesyvytydet on otettu huomioon. Purkupisteestä poistuvan veden määrää voidaan pitää tilavuutena, jolle viivytyksrakenne on vähintään mitoitettava mallinnetun lopputuloksen saavuttamiseksi. Olennaista lopullisessa rakennesuunnittelussa on ottaa huomioon, että mallinnuksessa on oletettu viivytyksrakenteeseen päätyvän veden johdettavaksi takaisin viemäriverkkoon vasta kun kuormitustilanne on päättynyt.

Mikäli viivytyksrakenne sijoitettaisiin vain Kapteenipuistikon alle, olisi tarvittava viivytystilavuus noin 1850 m^3 . Rakenteen vaatima pinta-ala riippuu siitä toteutetaanko maanalainen tilavuus käyttäen betonielementtejä, hulevesikasetteja vai putkimaisia rakenteita. Tässä työssä on käytetty esimerkkinä luvussa 3.1.2 esiteltyä StormTechin putkimaista viivytyksrakennetta ja tarvittavat määrät sekä pinta-alat on laskettu kyseisen valmistajan suunnitteluohjeen (StormTech 2013) mukaisesti. Vaadittavan viivytystilavuuden omaavan imeytyksrakenteen pituus on 64,7 m ja leveys 21,7 m, jolloin pinta-ala olisi noin 1400 m^2 . Esimerkki kyseisen pinta-alan sijoittamisesta Kapteenipuistikon alle on esitetty Kuvassa 46, josta voidaan havaita, että rakenne ulottuu osittain katualueelle.



Rakenteen sijoittelussa on otettu huomioon olemassa oleva kunnallistekniikka ja puistikon luoteiskulmassa sijaitseva kalliopinta (Kuva 13). Tästä huolimatta kallio saattaa haitata rakenteen sijoittelua sillä suunnitteluohjeen (StormTech 2013) mukaan rakenne vaatii vähintään noin 2360 mm pystysuuntaista tilaa kun otetaan huomioon putkirakenteen ympärille tulevan maa-ainestäytön minimivaatimukset. Kuvasta 46 nähdään, että rakenteen vaatiman tilan vuoksi ainakin yhden sähkölinjan, yhden tietoliikennekaapelin ja puistikon koilliskulman hulevesiviemäröinnin sijoitukset tulisi uusida. Lisäksi Tehtaankadun ja Kapteeninkadun alla sijaitsevat kaasuputket ja telekaapelit saattavat olla liian lähellä rakennetta.

Viivytyksrakenteita on mahdollista sijoittaa Kapteeninpuistikon lisäksi myös Vuorimiehenpuistikon alle. Kahden viivytyksrakenteen vaatimaa tilavuutta on tarkasteltu samoin kuin edellä lisäämällä verkoston solmukohtiin purkupisteet ja niihin johtavat putket. Mitoitussateen Kapteeninkadun ja Tehtaankadun risteykseen aiheuttaman tulvan poistamiseksi tarvittava tilavuus on Kapteeninpuistikossa ja Vuorimiehenpuistikossa yhteensä hieman yli 2000 m³. Kahden viivytyksrakenteen tapauksessa tulee erityisesti ottaa huomioon se, että Vuorimiehenpuistikossa viivytetty tilavuus vaikuttaa Kapteeninpuistikossa vaadittavaan tilavuuteen siten, että mikäli viivytystilavuutta kasvatetaan Vuorimiehenpuistikossa, vaaditaan Kapteeninpuistikossa tilavuutta vähemmän. Vuorimiehenpuistikkoon sijoitettavan viivytyksrakenteen suurin mahdollinen tilavuus on voitu määrittää mallintamalla se vesimäärä, joka Vuorimiehenkadun ja Kasarmikadun risteyksestä voidaan poistaa kun otetaan huomioon routasyvyyden tuomat rajoitukset viivytyksrakenteen ja viemäriputkien sijoitukselle. Tällöin Vuorimiehenpuistikossa viivytettävä tilavuus olisi noin 730 m³ ja Kapteeninpuistossa 1300 m³. Putkimaista viivytyksrakennetta käytettäessä tarvittavat tilavuudet voidaan saavuttaa Kapteeninpuistikossa noin 21,7 m leveällä ja 44,9 m pitkällä rakenteella kun taas Vuorimiehenpuistikossa tilaa tarvitaan 16,2 m leveälle ja 34,3 m pitkälle rakenteelle. Rakenteiden sijoittelu on mahdollista tehdä esimerkiksi Kuvan 47 osoittamalla tavalla, jolloin on pyritty ottamaan huomioon puistikoiden maaperän ja maanalaisten johtolinjojen tuomat rajoitukset.



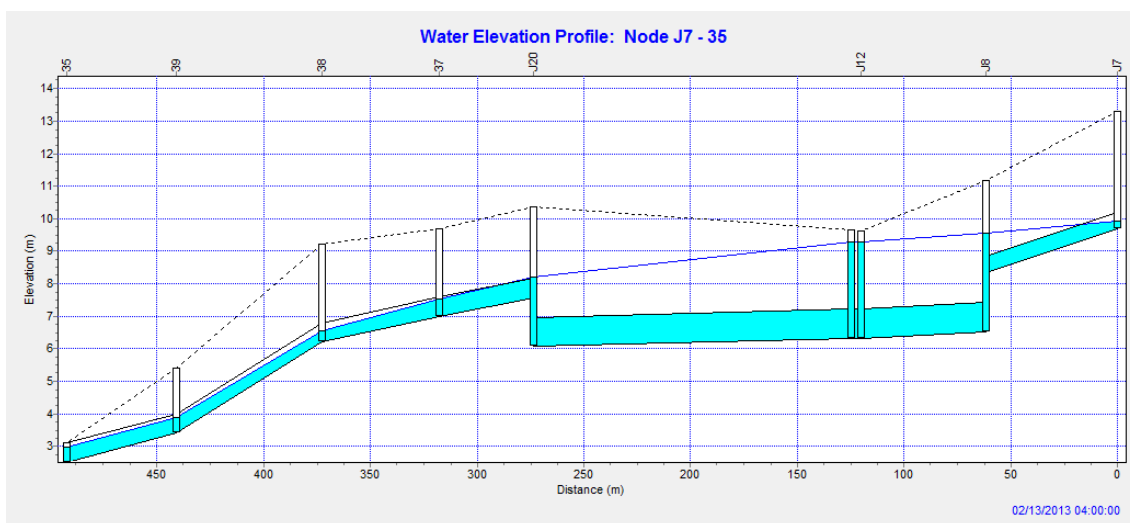
Kuva 47. Maanalaisen viivytysrakenteen sijoittuminen Kapteeninpuistiksoon ja Vuorimiehenpuistiksoon. Käyttämällä kahta viivytysrakennetta, on mahdollista vähentää tilantarvetta Kapteeninpuistikossa.

Kahden viivytysrakenteen vaihtoehdon pääasiallisena etuna on pienempi tilantarve Kapteeninpuistikossa. Vaikka tarvittava viivytystilavuus on suurempi kahden rakenteen vaihtoehdossa, saadaan Kapteeninpuistikossa vaadittua pinta-alaa pienennettyä, jolloin rakenteen sijoittelussa voidaan ottaa paremmin huomioon maaperä sekä olemassa oleva kunnallistekniikka.

7.1.3 Ylivuotoputki ja suodatuspainanne

Edellä on todettu, että yksi syy tarkasteltavan risteyksen tulvimiseen on alapuolisen verkoston kapasiteetin ylittyminen ja tästä aiheutuva viemäripadotus. Verkoston kapasiteetin lisäämiseen liittyvät ongelmat voidaan kuitenkin välttää, mikäli ylimääräinen vesi poistetaan verkostosta jo ennen padotuksen aiheuttavaa viemäriosuutta. Tässä tapauksessa tulisi siis vähentää Pietarinkadun runkoviemäriin johdettavan veden määrää. Vä-

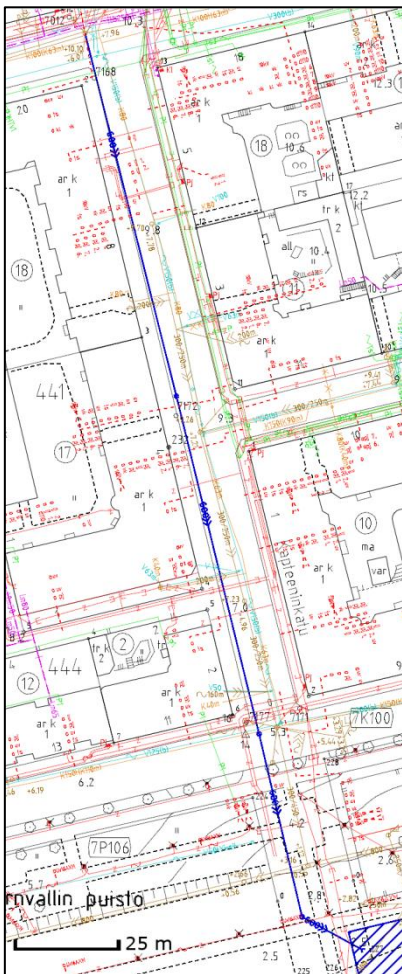
hentäminen on mahdollista toteuttaa esimerkiksi Kapteeninkadun ja Pietarinkadun risteykseen (Liite 4) lisättävällä ylivuotorakenteella ja -putkella, jonka kautta ylimääräinen vesi poistuu tarkasteltavasta verkostosta. Kuvassa 48 on esitetty ratkaisu, jossa Kapteeninkadun ja Pietarinkadun risteyksessä sijaitsevaan viemärikaivoon on lisätty halkaisijaltaan 600 mm:n ylivuotoputki, joka kulkee Kapteeninkatua pitkin Meripuiston suuntaan ja on pituudeltaan noin 220 m. Ylivuotoputken alareuna on liitetty viemärikaivoon 60 cm nykyisen runkoviemärin yläreunaa ylemmäs, jotta normaali jätevesivirtaama virtaa nykyiseen tapaan jätevedenpuhdistamolle ja ylivuotoputki on käytössä vain viemärin kapasiteetin ylittyessä. Katutilan riittävyys ei todennäköisesti ole ongelma Kapteeninkadun alla, sillä esitetyllä katuosuudella ei kulje lainkaan kaukolämpöputkia (Kuva 49). Mallin mukaan esitetty ratkaisu estäisi tulvimisen Kapteeninkadun ja Tehdaskadun risteyksessä mitoitussateella.



Kuva 48. Ylivuotoputken poikkileikkaus ja ylin vesikorkeus kerran sadassa vuodessa toistuvan tunnin sateen aikana. Kuvassa maapinta on merkitty katkoviivalla, hydraulinen painekorkeus sinisellä sekä veden pinta turkoosilla. Pystypalkit esittävät viemärikaivoja.

Sekaviemäristä ylivuotavien vesien johtaminen suoraan vesistöön aiheuttaa pelkkiin hulevesiin verrattuna merkittävää kuormitusta erityisesti ravinteiden osalta (Frechen et al. 2006, Meyer et al. 2012). Näin ollen edellä esitetyn ylivuotoputken lisäksi ratkaisuun kuuluu oleellisena osana Meripuistoon sijoitettava suodatuspainanne (luku 3.2.3), jonka tarkoituksena on puhdistaa sekaviemäristä poistettu vesi. Mallin mukaan mitoitussateen aikana ylivuotoputken kautta purkautuisi noin 1850 m^3 sekaviemärivettä, joten suodatuspainanteen yläpuolelle tulisi kyetä varastoimaan vastaava vesitilavuus. Kuntaliiton

(2012) hulevesioppaassa on imeytyspainanteen lammikoitumissyvyyydeksi suositeltu 10–20 cm, mutta esimerkiksi Saksassa käytetään yleisesti noin metrin varastosyvyyyttä (Meyer et al. 2012). Koska suodatuspainanteen sijoitus tapahtuisi keskeiselle paikalle Helsingissä, käytettävä pinta-ala tulisi pitää mahdollisimman pienenä. Ottaen huomioon kasvillisuuspainanteelle sopiva luiskakaltevuus 1:4 (Kuntaliitto 2012), saadaan mallinuksen mukainen 1850 m^3 ylivuoto varastoitua esimerkiksi 91 m pitkään ja 25 m leveään painanteeseen, jonka vesisyvyys on 1 m. Tällöin vaadittava pinta-ala suodatus-

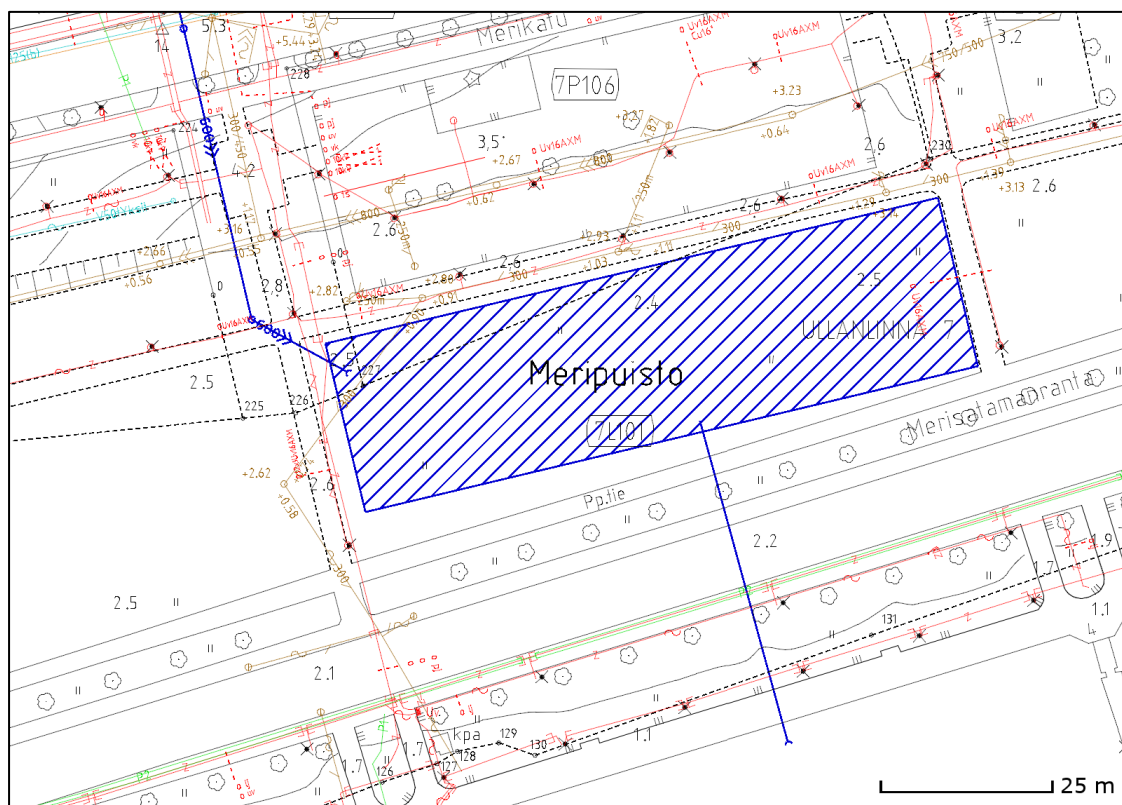


Kuva 49. Ylivuotoputki Kapteeninkadulla. Putki purkaa Meripuistossa sijaitsevaan suodatuspainanteeseen.

Suodatuspainanteen kuivatus tapahtuu suodatuskerroksen alaisella salaojituksella, jonka vedet johdetaan keräilykaivoon. Keräilykaivo tyhjennetään Merisataman satama-altaaseen, mutta johtuen rakenteiden matalasta korkeusasemasta, tyhjennys hoidetaan pumppaamalla. Painanne tulee myös varustaa ylivuotorakenteella, joka tässä tapauksessa johdetaan keräilykaivon kanssa samaan purkuputkeen.

painanteelle on noin 2300 m^2 . Kun otetaan huomioon maaperäkartan (Kuva 13) osoittama kalliopinta Fredrik Stjernvallin puistossa, suodatuspainanne on kannattavampaa sijoittaa Meripuistoon esimerkiksi Kuvan 50 osoittamalla tavalla. Kuvassa osoitettuun tilaan ei nykyisellään ole sijoitettu rajoittavaa kunnallistekniikkaa lukuun ottamatta luoteiskulman sadevesiviemärointiä, joka voidaan korvata suodatuspainanteeseen johtavalla sadevesiviemärillä.

Koska Meripuisto sijaitsee lähellä meren rantaa ja maanpinnan korkeustaso on vain noin 2,5 m, tulisi selvittää mille tasolle vesi nousee maaperässä. Kuvan 8 mukaisen suodatuspainanteen pohjarakenteiden paksuus on noin 1,25 m, joten lammikoitumistila huomioiden suodatuspainanteen vaatima syvyys olisi noin 2,25 m. Lammikoitumistila on kuitenkin mahdollista ympäröidä maavalleilla tai suodatuskerroksen paksuutta voidaan pienentää, jolloin rakenteen pohjakorkeutta on mahdollista nostaa.



Kuva 50. Suodatuspainanteen sijoittelu Meripuistoon. Ylivuotoputki purkaa rakenteeseen sen luoteiskulmasta ja tyhjennys tapahtuu eteläreunaan sijoitetusta purkuputkesta satama-altaaseen.

Suodatuspainanteen kasvillisuudeksi suositellaan järviruokoa ja osmankäämiä, mutta lajien aggressiivinen leviäminen tulee ottaa huomioon (Uhl & Dittmer 2005, Kuntaliitto 2012). Toisaalta juuri nopean kasvunsa vuoksi kyseiset lajit puhdistavat vettä tehokkaasti ja kasvien ei-toivottu leviäminen voidaan estää maanrakennusratkaisuilla tai hoitotoimenpiteillä (Kuntaliitto 2012). On erityisen tärkeää, että kasvien kasvamiselle varataan yhden kasvukauden mittainen jakso ennen kuin ylivuotovesiä aletaan johtaa suodatuspainanteeseen (Uhl & Dittmer 2005, Frechen et al. 2006), jotta pintakerroksen tukkeutumiselta heti aloitusvaiheessa vältytään.

Useiden Keski-Euroopassa toteutettujen kohteiden perusteella suodatuspainanteen kustannus on 200–500 euroa kuutiolta, mikäli painanteen tilavuus on alle 2000 m³ ja 100–200 euroa, mikäli tilavuus on yli 2000 m³ (Uhl & Dittmer 2005). Näin ollen Meripuistoon rakennettavan suodatuspainanteen kustannus olisi noin 200 €/m³.

Luvussa 7.1.2 esitettyä maanalaista viivytysrakennetta on myös mahdollista käyttää ylivuotoputken purkupaikkana. Tällöin rakenteeseen varastoitu vesimäärä purettaisiin pumppaamalla puiston pohjoisreunassa kulkevaan DN 800 runkoputkeen. Rakenteen

etu verrattuna suodatuspainanteeseen on sen vaatima pienempi pinta-ala, joka antaa liikkumavaraa rakenteen sijoittelussa puistoon. Esitetty suodatuspainanne tarvitsee noin 2300 m^2 tilan kun taas maanalaisen rakenteen tilantarve on vain 1400 m^2 . Vertailtaessa Fredrik Stjernvallin puistoa ja Meripuistoa sijoituspaikkoina, on Meripuisto edelleen suositeltavampi vaihtoehto Fredrik Stjernvallin puiston korkean kalliopinnan vuoksi. Vaikka rakenne voidaan sijoittaa suodatuspainannetta pienempään tilaan, tuottaa kallio-pinnan läheisyys todennäköisesti huomattavia lisäkustannuksia maanrakennustöiden yhteydessä.

Maanalaisen viivytyrakenteen huonona puolena on sen vaatima pystysuuntainen tila, joka on suurempi kuin suodatuspainanteella. Suodatuspainanteen vaatimaan pystysuuntaiseen tilaan on lisäksi mahdollista vaikuttaa kerrospaksuuksien valinnoilla, mutta viivytyrakenteen 2360 mm :n vähimmäisvaatimusta ei voida alittaa. Näin ollen puistojen matala korkeusasema ja meren läheinen sijainti saattavat tehdä viivytyrakenteen sijoittelusta teknisesti hankalaa ja maaveden päätyminen rakenteeseen on mahdollista.

7.1.4 Hajautetut järjestelmät

Hajautettuina hulevesien hallintajärjestelminä on tutkittu viherkattojen ja sadevesisäiliöiden toimivuutta hulevesitulvien ehkäisyssä.

Koska SWMM:n viherkattojen mallinnukseen tarkoitettu työkalu ei ota huomioon katon kaltevuutta, viherkattojen vaikutusta on mallinnettu määrittämällä jokaisen osavaluma-alueen kattopinta-alaa vastaavan läpäisemättömän pinnan painannesäilynnäksi 10 mm , joka vastaa luvussa 3.3.1 esitettyä kaltevan viherkaton vedenpidätyskykyä. Ohjelman rajoituksista johtuen osavaluma-alueiden muille läpäisemättömille pinnoille, kuten kaduille ei tällöin ole voitu määrittää painannesäilynnän arvoa. Koska Kapteenipuistikon tarkastelualueella sijaitsevien rakennusten katot ovat suurimmalta osalta kaltevia ja suurin osa viherkattotutkimuksesta on tehty tasakatoille, on vaikeaa arvioida mikä tarkastelualueelle sijoitettujen viherkattojen vedenpidätyskyky todellisuudessa voisi olla.

Mallinnuksen oletuksena oli, että viherkatto alkaa pidättää sadetta heti sen alettua ja kun pidätyskyky ylittyy, sade virtaa suoraan viemäriin. Koska työssä käsitellään lyhyitä rankkasadetapahtumia, viherkatto ei mallissa pura pidättämäänsä vesimäärää sadetapahtuman aikana vaan vesi kuivatetaan katolta hitaasti eikä sitä ole huomioitu mallinnuksessa.

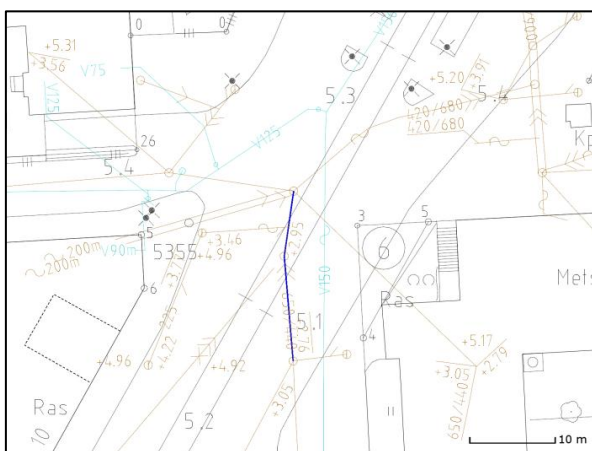
Mallin mukaan viherkatoilla ei olisi mahdollista poistaa mitoitussateella tapahtuvaa tulvintaa Kapteeninkadun ja Tehtaankadun risteyksessä vaikkakin hulevesitulvan pinta laskisi noin 5 cm. Mitoitussateella tapahtuva tulva voitaisiin mallin mukaan ehkäistä, mikäli viherkattojen vedenpidätyskyky olisi 35 mm, joka vastaa suurin piirtein koko mitoitussateen aikana katoille tulevaa vesimäärää.

7.2 Snellmaninkatu

Tarkastelualueesta suoritettujen analyysien perusteella kerran sadassa vuodessa toistuva mitoitussade ei ylittäisi Snellmaninkatua kuivattavan viemäriverkoston kapasiteettia. Analyysissä havaittiin kuitenkin tarkastelualueella toinen potentiaalisempi hulevesitulvakohde Kaisaniemenkadun ja Yrjö-Koskisen kadun risteyksessä sijaitsevassa painanteessa (Liite 5). Mallinnus osoitti kyseisen risteyksen tulvivana vertailusateen aikana, mutta ei mitoitussateen aikana. Kuitenkin myös mitoitussateen aikana risteyksessä sijaitsevien viemäriputkien kapasiteetti ylittyy, joten tässä tarkastellaan miten Kaisaniemenkadun painanteen hulevesitulvariskiä on mahdollista pienentää.

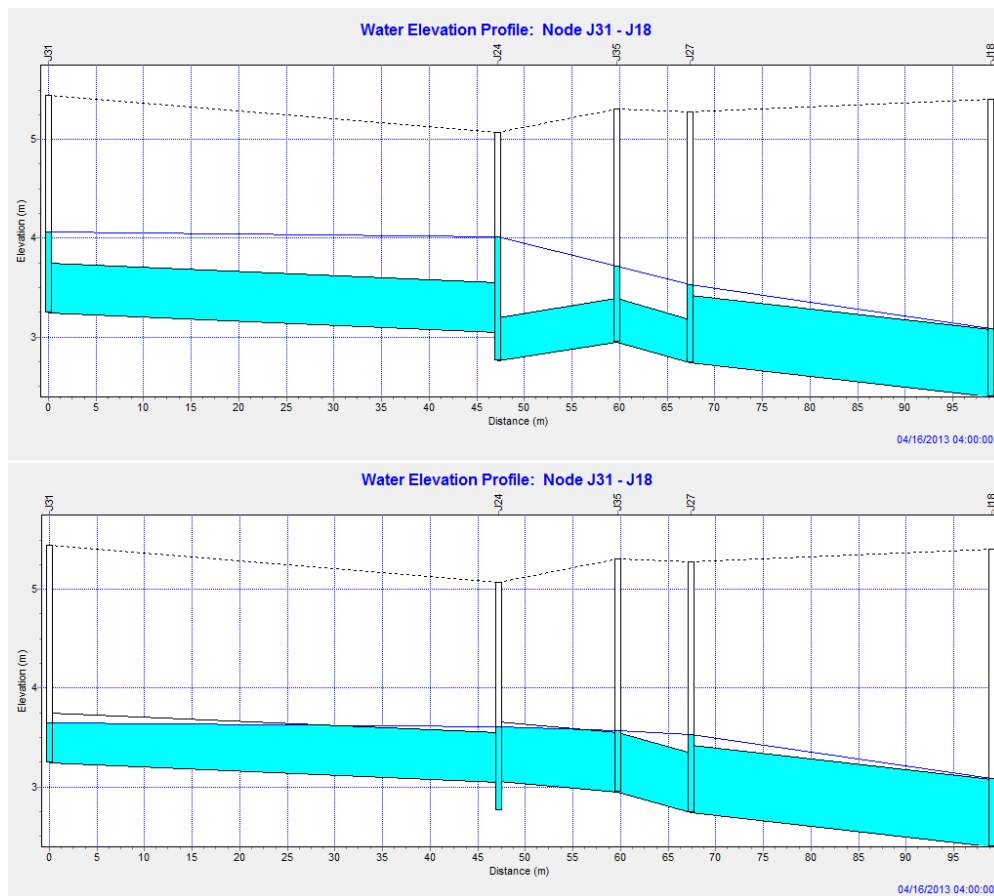
7.2.1 Viemärin suurentaminen

Analyysin aikana suoritettujen mallinnuksien perusteella maastonpainanteessa sijaitsevaan solmukohtaan virtaa vettä suurimmillaan noin 320 l/s. Colebrookin nomogrammin (RIL 2010b) mukaan kyseiselle virtaamalle tarvittava putkikoko olisi 600 mm, mikäli käytetään pienimpiä suositeltavia kaltevuuksia.



Kuva 51. Kaisaniemenkadun painanteen viemäriverkosto. 440 mm:n putkiosuus on merkitty kuvan tummansinisellä.

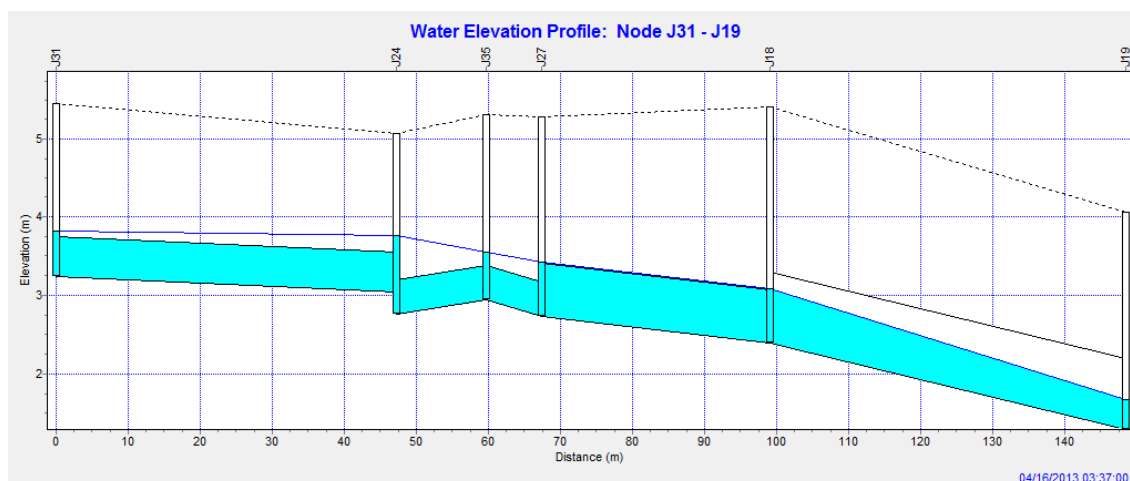
Mallinnuksen mukaan risteyksessä sijaitsevan halkaisijaltaan 440 mm putken (Kuva 51) vaihtamisella on mahdollista poistaa putkiston kapasiteetin ylitys mitoitussateella. Putken vaihtamisen halkaisijaltaan 600 mm putkeen ja negatiivisen kaltevuuden korjaamisen vaikutus on esitetty Kuvassa 52. Tätä suuremman putken vaihtamisesta ei saavuteta lisähyötyä, sillä siinä tapauksessa seuraava putkiosuus rajoittaa virtausta.



Kuva 52. Kaisaniemen painanteen putkiosuuden (Kuva 51) vaihtamisen vaikutus mitoitussateen aiheuttamaan viemärvirtaamaan. Myös negatiivinen kaltevuus on korjattu. Kuvassa maanpinta on merkitty katkoviivalla, hydraulinen painekorkeus sinisellä sekä veden pinta turkoosilla. Pystypalkit esittävät viemärikaivoja.

7.2.2 Ritiläkaivojen lisääminen

Mallin avulla on tarkasteltu myös vaihtoehtoa, jossa kaikki painanteeseen saapuvat pintavaluntavedet johdettaisiin erillisellä hulevesijärjestelyllä toisaalle. Tämä vaatisi ritiläkaivojen lisäämistä risteysalueelle ja kaivojen yhdistämistä uusilla putkilinjoilla runkoviemäriin. Mallin mukaan Varsapuistikon lounaiskulmasta lähtevä 600/900 runkoviemäri olisi tarpeeksi iso johtamaan lisääntyneen virtaaman, mikäli painanteeseen saapuvat pintavaluntavedet johdettaisiin sinne (Kuva 53). Kuitenkin vertaamalla kuvia 52 ja 53, voidaan havaita, että toimenpiteellä saavutettu hyöty on vähäisempi kuin painauman alapuolisen putkiosuuden vaihtamisella.



Kuva 53. Pintavaluntaveden poisjohtamisen vaikutus mitoitusasteella. Ritiäkaivojen lisäämisen vaikutus ei ole yhtä suuri kuin putkilinjan korjaamisella. Kuvasta havaitaan, että kaivosta J18 alkavan 600/900 runkoviemäriin kapasiteetti ei ylitä vaikka painanteen valumavedet ohjattaisiin sinne.

7.3 Pitäjänmäentien alikulku

Analyysin perusteella Pitäjänmäentien alikulun merkittävimmi on havaittu kohteen sijoittuminen muuta maastoa alemmaksi sekä alikulun kuivatukseen käytettävän runkoviemäriin pieni halkaisija. Lopputuloksena alikulkuun aiheutuu hulevesitulva kerran sadassa vuodessa toistuvan tunnin mitoitusasteen vaikutuksesta. Ongelman poistamiseksi on tarkasteltu seuraavissa luvuissa esitettyjä ratkaisumalleja.

7.3.1 Viemäriin suurentaminen

Alikulku sijaitsee verkoston yläpäässä, joten runkoviemäriin ei tarvitse kuljettaa muuta kuin alikulkuun päätyvät hulevedet. Näin ollen runkoviemäriin kapasiteettitarve on mahdollista laskea suoraan alikulun valuma-alueelta muodostuvat veden määrästä. Analyysissä on todettu, että mallin mukaan alikulkuun virtaa hulevesiä enimmillään 160 l/s. Colebrookin nomogrammista (RIL 2010b) kyseiselle virtaamalle sopivaksi putkihalkaisijaksi on saatu 500 mm, mikäli oletetaan tunnelissa kulkevan putkiosuuden kaltevuuden pysyvän ennallaan (1,03 ‰). Mallintamalla saadun tuloksen mukaan kyseinen putkikoko on riittävä kuivattamaan alikulun mitoitusasteella, mutta ongelmaksi muodostuu edelleen teollisuusaluetta kuivattava viemäri, joka yhdistyy alikulkuun kuivattavaan viemäriin Pitäjänmäentien ja Pajamäentien risteysalueella. Tästä syystä viemäriputkia pitäisi suurentaa aina Talin siirtolapuutarhan koillisreunassa sijaitseville hule-

vesiviemärikaivoille asti noin 470 m:n matkalta (Liite 6). Tällöin tulviminen siirtyisi kyseisten kaivojen ympäröimään maastoon, mutta tulviminen olisi maltillista (n. 10 cm) ja tuskin aiheuttaisi haittaa kaivojen sijainnin vuoksi.

7.3.2 Pumppaamo

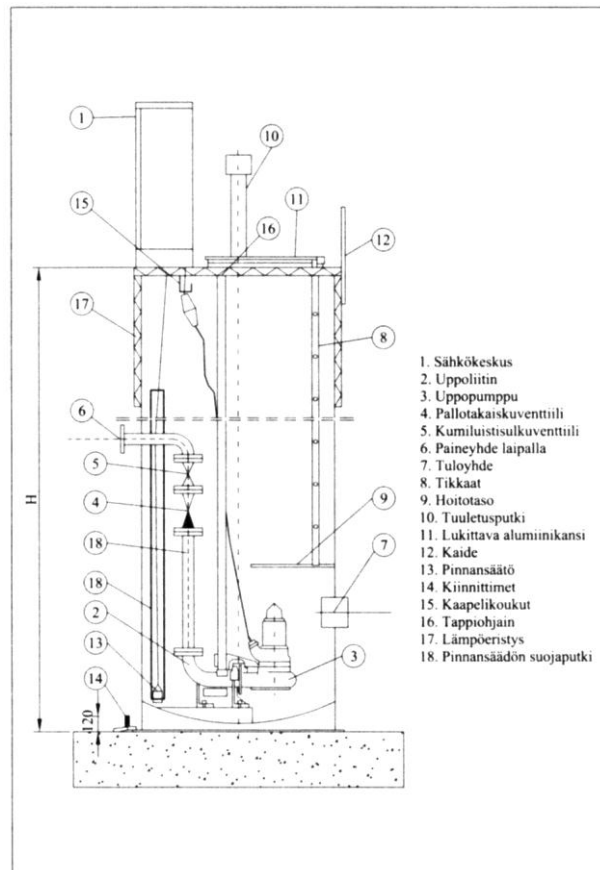
Alikulkuun sijoitetun pumppaamon vaikutusta on tarkasteltu poistamalla alimpaan solmukohtaan saapuva vesi solmukohtaan asennetulla putkella, jonka peitesyvyys on 60 cm. Tällä järjestelyllä alikulku ei tulvi ja solmukohdasta poistetaan hulevettä mitoitussateen aikana enimmillään 115 l/s ja kokonaisuudessaan vettä poistuu 381 m³. Näin ollen mikäli alikulun tulva halutaan estää mitoitussateen aikana, tulee pumppaamo mitoittaa kyseisille arvoille.

Pumppaamona voidaan käyttää esimerkiksi Kuvan 54 mukaista pakettipumppaamoa. Pumpun kapasiteetin mitoituksessa valinta tehdään kustannusten ja pumpun tuoton välillä.

Pumppaamon suunnitteluohjeiden

mukaan (RIL 2004) imualtaan tilavuuden tulisi vastata noin 3,5–4 kertaa pumppujen minuuttituottoa ja lisäksi pumppaamossa tulee olla kaksi rinnakkaista pumppua toimintavarmuuden takaamiseksi (Kuntaliitto 2012). Kuitenkin valmistajan ohjeet saattavat mahdollistaa suuremman käynnistystiheyden ja sitä kautta pienemmän imualtaan tilavuustarpeen. Pumppaamon purkuvedet johdettaisiin Mätäojaan junaradan eteläpuolelle noin 90 m:n päähän alikulusta.

Perinteisesti hulevesipumppaamoa käytetään painekorkeuden nostamiseksi ja täten painovoimaisen viemärin vaatiman kaltevuuden säilyttämiseksi (RIL 2004). Tästä syystä



Kuva 54. Esimerkki pakettipumppaamosta. (RIL 2004)

hulevesipumppaamon mitoituksessa sallitaan lyhytaikainen kapasiteetin ylitys ja veden tulviminen ympäristöön (Kuntaliitto 2012), jotta pumppaamo ei tarvitse ylimitoitaa suurimpia sadetapahtumia ajatellen. Tässä työssä tarkoituksena oli kuitenkin nimenomaisesti estää alikulun tulviminen, joten mitoitusvirtaamat ovat suuria jolloin pumpun tai imualtaan koko saattaa kasvaa kohtuuttoman suureksi. Mikäli alikulku halutaan kuivattaa pumppaamalla, tuleekin tarkemmin pohtia saavutettua hyötyä ja kustannuksia.

7.3.3 Hajautetut järjestelmät

Pitäjänmäellä on mallinnettu viherkattojen toimivuutta alikulun hulevesitulvan ehkäisyssä samalla menetelmällä kuin Kapteeninpuistikossa, siten kuin luvussa 7.1.4 on kuvattu. Koska kattoja on pääasiassa tarkastelualueen länsireunassa sijaitsevalla teollisuusalueella, on viherkatot mallinnettu sijoittumaan tälle alueelle. Viherkatot eivät poistaneet alikulun tulvaa, eikä niillä saada estettyä luvussa 7.3.1 esitettyä ongelmaa, joka seuraa kun teollisuusalueen vedet johdetaan alikulkua kuivattavan tunneliputken kanssa samaan viemärikaivoon. Kuitenkin mallin mukaan, mikäli teollisuuslaitoksen hulevedet poistettaisiin kokonaan, olisi mitoitusasteella esiintyvän hulevesitulvan ehkäiseminen mahdollista suurentamalla alikulkua kuivattava viemäri tunnelin ja alikulun osalta, jolloin viemärin suurentaminen olisi tarpeen 360 m:n matkalta (Liite 6). Teollisuusaluetta ollaan kaavoittamassa uudelleen toimitilarakennusten korttelialueiksi ja kaavoituksen yhteydessä on mahdollista vaikuttaa alueelta tuleviin hulevesiin esimerkiksi asettamalla määräyksiä kiinteistöjen hulevesien syntypaikkakäsittelystä.

7.4 Kustannustarkastelu

Edellä esitetyille ratkaisuille on arvioitu toteutuskustannuksia niiltä osin, kuin ne ovat sijoittuneet yleisille alueille. Kustannusten arvioimiseen on käytetty Helsingin kaupungilla käytössä olevaa Fore kustannuslaskentaohjelmistoa. Kustannusarviot eri menetelmille on esitetty Taulukossa 7 ja luvut on pyöristetty lähimpään kymmeneen tuhanteen euroon. Kustannuslaskelmissa on huomioitu vain rakentamiskustannukset.

Taulukko 7. Arvioidut rakennuskustannukset eri menetelmille. Summat on pyöristetty lähimpään kymmeneen tuhanteen euroon.

Kohde	Menetelmä	Kustannus, t€
Kapteeninpuistikko	Runkoviemärin suurentaminen	250
	Maanalainen viivytys, Kapteeninpuistikko	900
	Maanalainen viivytys, Kapteeninpuistikko ja Vuorimiehenpuistikko	730
	Ylivuotoputki ja suodatuspainanne	820
Snellmaninkatu	Runkoviemärin suurentaminen	10
	Hulevesien poisjohtaminen	40
Pitäjänmäen alikulku	Runkoviemärin suurentaminen	120
	Pumppaamo	120

Ylläpidon kustannuksille ei ole tehty euromääräistä arviointia, mutta suuntaa antavaa vertailua voidaan tehdä eri menetelmien välillä. On oletettavaa, että runkoviemärien suurentamisen jälkeen ylläpito vastaa normaalia viemärin ylläpitoa eikä näiltä osin kasvata alueen ylläpitokustannuksia. Maanalaiset viivytysrakenteet vaativat yleisesti tarkastuksen puolen vuoden välein ja rakenteeseen kerääntyvä kiintoaines tulee poistaa tarvittaessa. Koska tässä työssä on tarkasteltu maanalaisia viivytysratkaisuja sekaviemäroidylle alueelle, on rakenteen puhdistusväli todennäköisesti tiheämpi kuin erillisviemäroidyissä kohteissa. Luvussa 3.1.2. on esitelty kaksi erilaista rakennetta maanalaiseen viivytykseen ja luvussa on myös otettu kantaa rakenteiden huollettavuuteen. Suodatuspainanteen suurimmat ylläpitokustannukset tulevat todennäköisesti kasvillisuuden hoidosta. On myös mahdollista, että sekaviemärin mukana tulevaa lietettä joudutaan poistamaan, mutta liete toimii osaltaan kasvien kasvualustana ja ravinnelähteenä, joten lietteen poistoa ei ole välttämätöntä tehdä kovinkaan usein. Kaikki työssä esiteltyt pumppaamorakenteet vaativat ylläpitoa säännöllisten tarkastusten ja huoltotoimenpiteiden muodossa, mutta kustannukset ovat oletettavasti samaa luokkaa kuin tavallisella hulevesipumppaamalla.

8 Virhetarkastelu ja herkkyysanalyysi

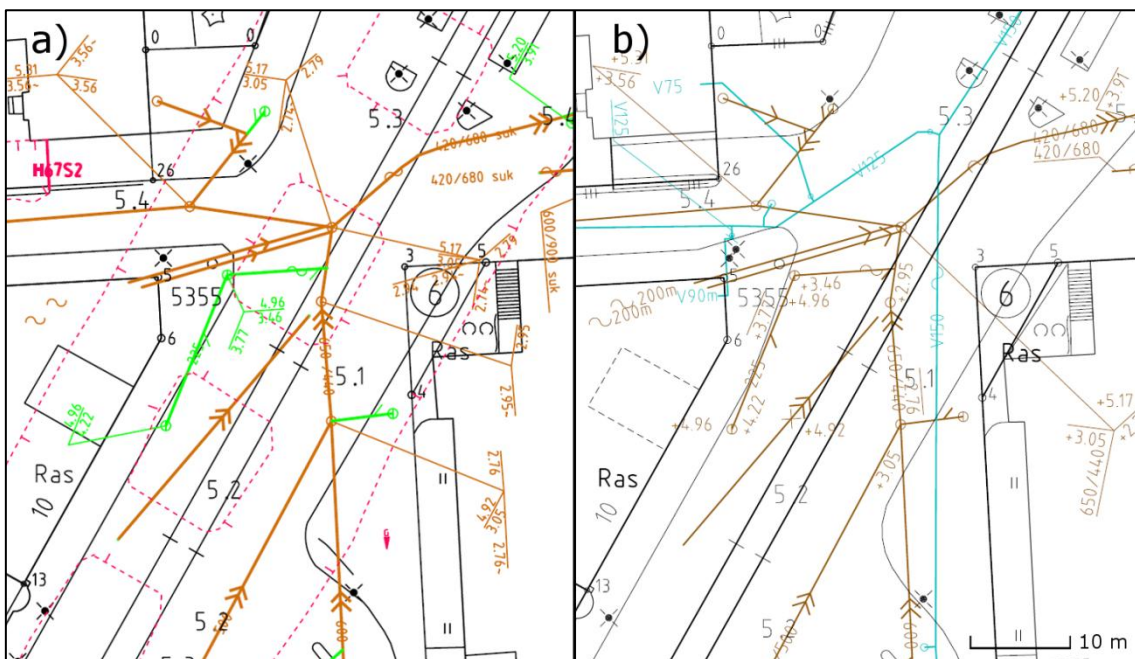
8.1 Virhelähteet

Työtä aloittaessa oli tiedossa, että työssä käytettäviä malleja ei ole mahdollista kalibroida todellisten sadetapahtumien ja alueelta saatavien virtaamamittausten avulla, vaan kalibroinnissa on turvauduttava tulvatapahtumista löytyviin kuviin ja kaupunkilaisten ilmoituksiin. Työssä käytettävä SWMM malli perustuu valuma-alueiden määrittämiseen useiden parametrien avulla, joista osaa pidetään ns. kalibrintiparametreina. Nämä parametrit vaihtelevat alueittain ja niiden määrittämiselle on vaikea antaa yleispäteviä ohjeita, joten mallin kalibrointi tehdään pääsääntöisesti muutamalla kyseisiä parametreja kunnes malli vastaa alueelta mitattuja verkostovirtaamia. Tässä työssä edellä kuvattu kalibrintiprosessi ei ollut mahdollinen mittaustietojen puuttuessa, joten työn aikana suoritettussa herkkyysanalyysissä on tarkasteltu kalibrintiparametrien merkitystä mallin antamaan lopputulokseen.

Alueen maastomalli on muodostettu Helsingin kaupungin ilmasta suoritettun laserkeilausaineiston avulla, joka saattaa aiheuttaa virhettä korkeustietoihin. Laserkeilaus perustuu mitattuun pistepilveen, jossa on mahdollisena virhelähteenä sekä pistepilven tiheys (n. 20 p/m²) sekä mittaustarkkuus (n. 10 cm). Laserkeilauksesta saatuja korkeustietoja käytetään työssä myös osavaluma-alueiden kaltevuuksien sekä hulevesien virtaussuuntien määrittämiseen, joten virhe aineistossa toistuu myös kyseisissä määrittämissä.

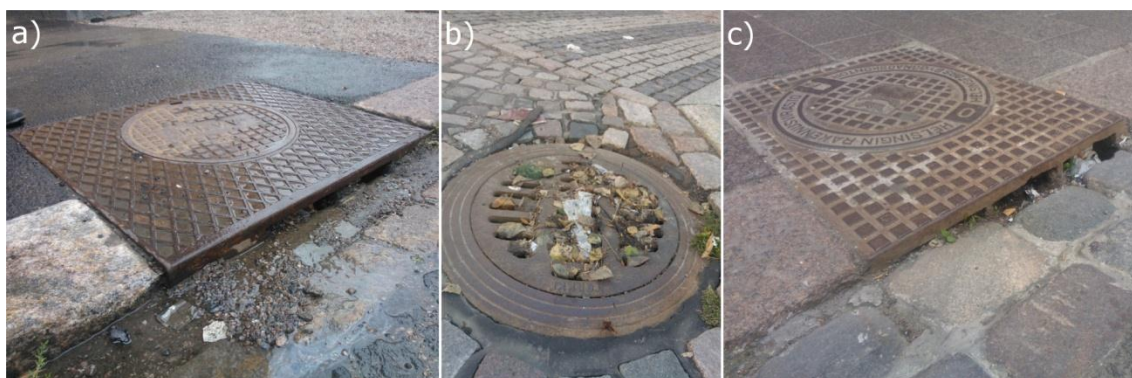
Tiedot tarkastelualueiden viemäriverkostoista on saatu pääasiassa Helsingin kaupungin rakennusviraston (HKR) käytössä olevasta johtokartasta, joka pohjautuu HSY Veden Helsingin kaupungin kaupunkimittausosastolle toimittamaan aineistoon. Käytön aikana johtokartassa on havaittu sekä puutteellisia merkintöjä, että teknisistä ongelmista aiheutuvia epäselvyyksiä (Kuva 55), jotka pääasiassa johtuvat aineiston siirtelystä eri tietokantojen välillä. HSY Vedeltä saatujen tietojen mukaan vanhoista viemäriosuuksista on tehty digitaaliset kartat syöttämällä ennen käytössä olleiden paperisten karttojen tiedot nykyisin käytössä olevaan sähköiseen verkostokarttaan. Paperisten karttojen merkinnät ovat saattaneet olla puutteellisia tai virheellisiä ja nämä virheelliset tiedot ovat päättyneet sellaisenaan uuteen verkostokarttaan. Joillakin tarkastelualueiden johto-osuuksilla on havaittu poikkeavuutta johtokartan merkintöjen ja HSY Veden aineistojen välillä. Poikkeavuuksia on havaittu erityisesti putkikokojen, putken muodon ja tehtyjen saneerauk-

sien suhteen. Ennen korjaustoimenpiteiden tekemistä kohteissa, epäselvät johto-osuudet tulisi tarkastaa ja varmistaa johtokartan merkintöjen oikeellisuus. Viemäriverkoston tietoja ei myöskään ollut mahdollista syöttää johtokartasta suoraan SWMM ohjelmistoon, joten verkoston luominen SWMM:n tapahtui osittain manuaalisesti. Myös Tikkanen (2013) on havainnut yhteensopivuusongelmia suomalaisten johtokartta-aineistojen, paikkatieto-ohjelmistojen ja SWMM:n välillä. Mikäli verkostomallintaminen yleistyy suunnittelun apuvälineenä, tulisi johtokarttojen ja mallinnusohjelmistojen yhteensopivuuteen kiinnittää nykyistä enemmän huomiota.



Kuva 55. Esimerkki johtokartassa ilmenneistä virheistä. a) HSY Veden käytössä oleva johtokartta ja b) HKR:ssa käytössä oleva johtokartta, jossa havaittavissa korkomerkintöjen epäselvä asettelu ja puutteet saneerausmerkinnöissä.

Vaikka johtokartan rutilä- ja kitakaivomerkinnät vaikuttivat pitävän pääosin paikkansa sijainnin suhteen, ei ainakaan rakennusviraston käytössä olevassa johtokartassa ole kaivoja koskevia lisämerkintöjä, joten kartan perusteella kaivojen toimivuuden arviointi on mahdotonta. Näin ollen kaikkien kaivojen on oletettu toimivan täydellisesti vaikka todellisuudessa kaivojen vedenpoistokapasiteetti saattaa olla lähes olematon tukkeutumisen (Kuva 56 a ja b) tai rakenteellisen virheen vuoksi (Kuva 56 a ja c). Kaivonkansien merkitystä mallinnuksessa on käsitelty tarkemmin luvussa 8.3.2.



Kuva 56. Kuvan kaivojen vedenpoistokapasiteetti on heikentynyt roskien (a ja b) tai rakenteellisten vikojen vuoksi (a ja c). Kaikki kuvissa näkyvät kaivot sijaitsevat Helsingin keskustassa.

8.2 SWMM herkkyysanalyysi

Edellä on kuvattu syyt jonka vuoksi tämän työn puitteissa ei SWMM:lla tehtyä tarkastelualuemallia ole voitu kalibroida niin tarkasti kuin olisi tarpeellista. Siitä syystä kalibroitiparametreille on suoritettu herkkyysanalyysi, jotta voidaan määrittää mikä niiden merkitys on lopputuloksen muodostumisessa ja tiedostaa virheen suuruus, joka kalibroinnin puuttuessa malliin mahdollisesti syntyy.

Herkkyystarkastelu on suoritettu Kapteeninkadun tarkastelualueesta laaditun mallin pohjalta. Herkkyysanalyysissä tarkastelun kohteeksi on valittu Laivurinkadun ja Merikadun risteyksen ylivuotorakenteesta muuhun viemäriverkostoon poistuvan veden määrä ja analyysissä tarkastellaan kalibroitiparametrien vaikutusta kyseiseen tarkastelusuureeseen kerran sadassa vuodessa toistuvan tunnin mittaisen mitoitussateen aikana. Parametrien vaihteluväli on valittu kirjallisuuden perusteella tai kirjallisuuden puuttuessa vaihteluväli on pyritty valitsemaan siten, että muutoksen vaikutus olisi havaittavissa.

8.2.1 Parametrien vaihteluväli

Herkkyysanalyysiin valitut kalibroitiparametrit olivat valuma-alueiden kaltevuus, valuma-alueiden hydraulinen leveys, painannesäilyntä läpäisevälle sekä läpäisemättömälle pinnalle, maalajille ominaiset Green-Amptin kertoimet ja Manningin kertoimet pintavalunnalle sekä putki- ja avouomavirtaukselle. Lisäksi on tarkasteltu asutuksen jätevesivirtaaman vaikutusta verkoston kokonaiskuormitukseen. Parametrien vaihteluvälin valinta on tehty pohjautuen Krebsin (2013) kanssa käytyyn keskusteluun.

Valuma-alueen kaltevuuden sekä hydraulisen leveyden vaihteluväliksi on valittu alkutilanne ± 90 %. Läpäisemättömän pinnan osuuden vaihteluväliksi on puolestaan valittu alkuperäinen osuus ± 20 % ja tässä on otettu huomioon, että läpäisemättömän pinnan osuus ei voi olla yli 100 %. Painannesäilynnän vaihteluvälit on valittu Butler & Daviesin (2004) mukaisesti siten, että luvussa 5.4.2.4 esitetyllä kaavalla lasketut lähtötilanteen arvot vastaavat vaihteluvälin alarajaa ja ylärajat läpäisevän ja läpäisemättömän pinnan painannesäilynnälle ovat vastaavasti 10 mm ja 2 mm. Green-Amptin imeyntäparametreja on tarkasteltu alkuperäisen savisen hiekan lisäksi hiekan ja saven osalta. Manningin kertoimien vaihteluvälit on valittu kirjallisuudesta (Rossman 2010, RIL 2003, Engman 1986) ja arvot on esitetty Taulukossa 8.

Taulukko 8. Manningin kertoimien vaihteluväli herkkyyksianalyysissä.

Tyyppi	Minimi	Alkutilanne	Maksimi
n-läpäisemätön	0,01	0,012	0,024
n-läpäisevä	0,13	0,13	0,8
Betoni	0,011	0,017	0,017
Muovi	0,008	0,01	0,01
Kadut	0,011	0,015	0,035

8.2.2 Herkkyyksianalyysin tulokset

Herkkyyksianalyysin tulokset on koottu Taulukkoon 9. Taulukosta voidaan nähdä, että usean kalibrointiparametrin osalta suurillakaan muutoksilla ei ole huomattavaa vaikutusta valuma-alueelta purkupisteen kautta poistuvaan vesimäärään, mutta osalla parametreista vaikutus on merkittävä. Huomattavia vaikutuksia tulokseen aiheuttavat erityisesti läpäisemättömän pinnan osuuden sekä imeyntäparametrien muutos. Läpäisemättömän pinnan osuuden vähentäminen 20 %:lla vähentää purkupisteestä poistuvan veden määrää noin 19 % ja imeyntäparametrien muutos lähes läpäisemätöntä (savi) maalajia vastaavaksi lisää poistuvaa vesimäärää noin 13 %. Myös painannesäilynnän lisäämisellä on vaikutusta lopputulokseen. Asutuksen jätevesivirtaaman poistaminen vähentää poistuvan veden määrää yli 6 %:lla.

Taulukko 9. Herkkyysanalyysin parametrien vaikutus tarkastelualueelta purkupisteen kautta poistuvan veden määrään.

Muutettu arvo	Purkupisteestä poistuva vesimäärä m³	Vesimäärän muutos %	Erotus % -yksikköä
Lähtötilanne	7548	100,00	0,00
Kaltevuus -90 %	7537	99,85	-0,15
Kaltevuus +90 %	7553	100,07	0,07
Hydr. leveys -90 %	7526	99,71	-0,29
Hydr. leveys +90 %	7553	100,07	0,07
Painannesäilyntä maks.	7181	95,14	-4,86
Maaperä: Hiekka	7548	100,00	0,00
Maaperä: Savi	8530	113,01	13,01
Pintavalunta N maks.	7538	99,87	-0,13
Pintavalunta N min.	7547	99,99	-0,01
Putki- ja avouoma N maks.	7548	100,00	0,00
Putki- ja avouoma N min.	7542	99,92	-0,08
Ei jätevesivirtaamaa	7065	93,60	-6,40
Läpäisemättömän pinta -20 %	6127	81,17	-18,83
Läpäisemättömän pinta +20 %	8018	106,23	6,23

Läpäisemättömän pinnan vähentäminen aiheuttaa Taulukon 9 mukaan huomattavasti suuremman muutoksen poistuvan veden määrään kuin läpäisemättömän pinnan lisääminen. Tämä selittyy sillä, että herkkyysanalyysissä käytetty alue sijaitsee tiiviisti rakennetussa kantakaupungissa ja useiden osavaluma-alueiden läpäisemättömän pinnan osuus on jo lähtökohtaisesti 100 % eikä läpäisemättömän pinnan osuutta voida täten lisätä. Kuitenkin läpäisemättömän pinnan osuuden vähentäminen osoittaa, että parametrilla on merkittävä vaikutus mallinnuksen lopputulokseen. Voidaan myös päätellä, että läpäisemättömän pinnan osuutta vähentämällä voidaan vähentää viemäriin päätyvän huleveden määrää ja ehkäistä viemäreiden tulvimista. Myös maalajin vaihtaminen lähes läpäisemättömäksi saveksi aiheuttaa merkittävän muutoksen poistuvan veden määrään. Muutoin maalajin valinnalla ei tunnu olevan tässä tapauksessa vaikutusta. Näin ollen mikäli maalaji tiedetään savea läpäisevämmäksi, niin sitä tarkemmalla määrittelyksellä ei ole merkitystä. Asutuksen jätevesivirtaaman merkitys on havaittavissa, mutta on kyseenalaista onko vaikutus merkittävä. Mikäli tiedot asukkaiden määristä osavaluma-alueilla on helposti saatavissa, on niiden käyttö perusteltua, mutta mallilla saadaan

suuntaa-antavia tuloksia myös jätevesivirtaamien puuttuessa. Muilta osin kalibrointiparametrien valinnalla ei vaikuta olevan juurikaan merkitystä mallin toimintaan. Myös Beling et al. (2011) havaitsivat läpäisemättömän pinnan osuuden sekä imeyntäparametrien merkittävän vaikutuksen valunnan määrään. On kuitenkin otettava huomioon, että kyseiset herkkyysanalyysit on suoritettu alueilla, joiden läpäisemättömien pintojen osuudet ovat olleet huomattavasti tässä työssä käytettyä pienempiä.

Krebs et al. (2003) esittivät, että imeyntäparametrien muuttamisella savea vastaavista hiekkaa vastaaviin ei olisi vaikutusta lopputulokseen, mutta tämän työn yhteydessä tehty herkkyysanalyysi viittaa maalajin vaikuttavan ainakin muita kalibrointiparametreja enemmän. Tässä tehtyjä havaintoja vastaavasti myös edellä mainitussa työssä (Krebs et al. 2003) oli havaittu painannesäilynnän mahdollinen vaikutus lopputulokseen, mutta kyseisen parametrin arvot olivat tässä työssä käytettyjä arvoja suurempia. Tämä johtuu luvussa 5.4.2.4 kuvatusta kaltevuuden ja painannesäilynnän välisestä suhteesta, joka johtaa tässä työssä käytetyillä suurilla kaltevuuksilla melko pieniin painannesäilynnän arvoihin.

Vaikka esitelty herkkyysanalyysi on suoritettu vain yhdelle valuma-alueelle ja sen tulokset pätevät suoraan vain kyseiselle mallille, ovat havainnot yhteneviä kirjallisuudesta löydettyjen herkkyysanalyysien (Krebs et al. 2003, Beling et al. 2011) kanssa siinä määrin, että joillakin kalibrointiparametreilla voidaan olettaa olevan vähäinen vaikutus lopputulokseen pysyttäessä kirjallisuudesta löytyvien vaihteluvälien rajoissa. Kuitenkin erityisesti läpäisemättömän pinnan osuudella sekä imeyntäparametreilla vaikuttaisi olevan merkittävä vaikutus valunnan määrään. Mikäli läpäisemättömän pinnan osuus voidaan määrittää esimerkiksi ilmakuvista ja alueen maaperä tiedetään savea läpäisevämmäksi, muiden parametrien tarkka määrittäminen kalibrointimittauksilla ei välttämättä ole tarpeellista, sillä kalibroinnin vaatimat virtaus- ja vedenkorkeusmittaukset ovat työläitä, aikaa vieviä ja kasvattavat kustannuksia. Tulee kuitenkin ottaa huomioon, että tässä työssä tarkasteltiin vain lyhytaikaisia rankkasateita erittäin tiiviisti rakennetussa kaupunkiympäristössä. Kalibroinnin tarpeellisuutta tulisi tutkia lisää vertaamalla kalibroituja ja kalibroimattomien mallien toimintaa erilaisissa kaupunkirakenteissa ja sadetapahtumissa.

8.3 SWMM:n puutteet

Vaikka SWMM osoittautui tämän työn yhteydessä hyödylliseksi apuvälineeksi kaupunkitulvien syiden selvittämisessä ja ratkaisumallien arvioimisessa, havaittiin kuitenkin ohjelmistossa joitakin puutteita, jotka on osittain huomioitu SWMM:n pohjalta tehdyissä kaupallisissa sovelluksissa (Hsu et al. 2000, Leandro et al. 2009, Seyoum et al. 2011).

8.3.1 Tulvan leviäminen ja laajuus

SWMM on puhtaasti yksiulotteinen malli, mutta kaupunkitulvia tutkittaessa olisi kuitenkin hyödyllistä, mikäli ohjelmistolla olisi mahdollista määrittää kuinka laajalle alueelle viemäreistä tulviva vesi leviää kaksiulotteisessa tasossa. SWMM käsittelee viemäritulvia siten, että veden on mahdollista tulla verkoston solmukohdista maanpinnalle ja ohjelman asetuksista riippuen tämä solmukohdasta ulos tulviva vesi voidaan asettaa joko katoamaan mallista tai se voi lammikoitua kyseisen solmukohdan päälle. Lammikoituvaksi määritelty vesi purkautuu verkoston kapasiteetin salliessa jälleen takaisin verkostoon. Tässä tapauksessa solmukohdalle määritetään lammikoituva pinta-ala, joka ei kuitenkaan muutu ylivuotavan veden korkeuden suhteen. Koska oikeassa maastossa tulvalammikon pinta-ala on riippuvainen veden korkeudesta eli lammikon seinämät eivät ole pystysuorat, ohjelmiston avulla ei ole mahdollista määrittää mille korkeudelle vesi todellisuudessa kyseisessä solmukohdassa lammikoituisi tai millaisen alueen tulviva vesi peittäisi.

Mikäli tulviva solmukohta ei sijaitse maastonpainanteessa, voidaan viemäristä maanpinnalle tulvivien vesien kulkeutumista katuverkossa mallintaa luvussa 5.4.1 esitetyllä kaksoiskuivatusmallilla, mutta edelleen virtausta käsitellään tässä tapauksessa yksiulotteisena avouomavirtauksena eikä malli pysty käsittelemään veden leviämistä tasossa. Tämä hankaloittaa vesisyvyiden arviointia laajoilla risteysalueilla, painanteissa, puistoissa, parkkialueilla ja muilla aukioilla.

Edellä kuvattuja ongelmia voidaan pyrkiä ratkaisemaan kahdella tavalla. Ensinnäkin korkeusmallista on mahdollista määrittää jokaiselle tulvivalle solmukohdalle vedenkorkeus-pinta-ala käyrä jonka avulla solmulle asetettavaa lammikoituvaa pinta-alaa muutetaan siten, että veden korkeuden noustessa myös lammikoituva pinta-ala kasvaa (Hsu et

al. 2000, Mark et al. 2004). Tämä malli ei kuitenkaan ota huomioon veden liikkeitä maanpinnalla.

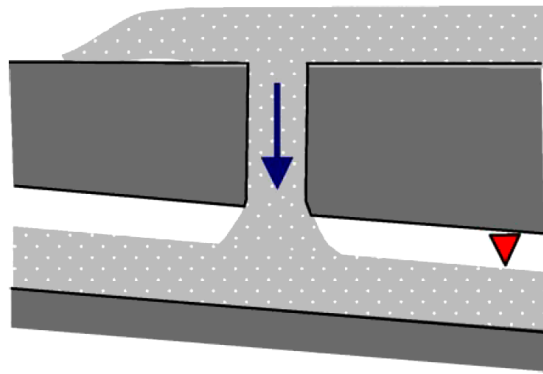
Vielä yksityiskohtaisempi tapa on yhdistää putkivirtauksen yksiulotteinen malli kaksiulotteiseen virtausmalliin, kuten esimerkiksi Seyoum et al. (2011) tai Hsu et al. (2000) esittävät. Tällöin viemäristä maanpinnalle purkautuvan veden eteneminen mallinnetaan ratkaisemalla kaksiulotteiset virtausyhtälöt, jolloin voidaan ottaa paremmin huomioon veden etenemisestä ja esteistä aiheutuvat virtausmuutokset.

Molempia edellä kuvatuista ratkaisuista on käytetty useissa kaupallisissa ohjelmistoissa (Hsu et al. 2000, Leandro et al. 2009, Seyoum et al. 2011).

8.3.2 Veden siirtyminen viemäriverkon ja katujen välillä

Työssä käytetyssä kaksoiskuivatusmallissa (luku 5.4.1) vesi kulkee viemärikaivoista ensin viemärin tulviessa kadulle ja lopulta viemärin kapasiteetin sallimassa kadulta takaisin viemäriin täysin esteettä. Kuitenkin todellisuudessa veden virtaus viemäristä kadulle tai päinvastoin ei ole vastuksetonta esimerkiksi kaivojen ritiläkansien johdosta

Mikäli mallin viemäriverkostossa on kapasiteettia, niin kadulla oleva vesi päättyy kokonaisuudessaan viemäriin. Kuitenkin todellisuudessa esimerkiksi kaltevalla kadulla oleva ritiläkansi saattaa rankkasateen aikana rajoittaa veden virtausta (Kuva 57), jolloin virtaava vesi jatkaa matkaa avouomassa seuraavalle solmupisteelle. Samasta syystä tukkeutuneiden ritiläkansien vaikutusta on hankala arvioida SWMM:n avulla. Tähän on esitetty erilaisia ratkaisuja (Mark et al. 2004, Leandro et al. 2009), joissa solmukohdat korvataan monimutkaisilla aukkojen ja kynysten sarjoilla tai virtausta rajoitetaan muilla tavoin tarkoituksena simuloida ritiläkansien vaikutusta. Kuitenkin laajoilla tarkastelualueilla kaivoja saattaa olla useita kymmeniä tai satoja, jolloin menetelmän vaatima työmäärä kasvaa suureksi.



Kuva 57. Veden virtaus viemäriin on rajoittunut ja verkostoon ei päädy sen kapasiteettin mukais- ta vesimäärää. (Mark et al. 2004)

9 Johtopäätökset ja suositukset

Työssä on tarkasteltu tiiviisti rakennetun kaupungin alueella tapahtuvia hulevesitulvia, niiden syitä sekä annettu esimerkkejä mahdollisista toimenpiteistä, joilla tulvien aiheuttamia vahinkoja voidaan vähentää tai estää kokonaan. Tarkastelun lähtökohtana on käytetty kolmea Helsingin kaupungin alueella sijaitsevaa hulevesitulvaherkäksi luokiteltua kohdetta sekä näistä työn aikana luotuja verkostomalleja.

Tiiviisti rakennetuilla alueilla esiintyvien hulevesitulvien pääasialliseksi syyksi jäivät runkoviemäreiden alhainen kapasiteetti, alapuolisen viemäriverkoston aiheuttama padoitus sekä katualueilla esiintyvät maastonpainanteet. Luonnonmukainen hulevesien hallinta antaa keinoja ehkäistä ja rajoittaa hulevesitulvista aiheutuvia haittoja viemäriverkoston tulviessa esimerkiksi väliaikaisen varastotilavuuden muodossa. Yleisesti voidaan myös todeta, että läpäisemättömien pintojen vähentäminen on tehokas keino pienentää valuma-alueilta viemäriin johdetun huleveden määrää. Helsingin kantakaupungin alueella hulevesitulviin liittyy alueen sekaviemäröinnistä johtuva vedenlaadullinen ongelma, joka tulee ottaa huomioon suunniteltaessa ratkaisuja hulevesitulvakohteisiin.

Luonnonmukaisten hulevesijärjestelmien sijoittelu tiiviisti rakennettuun kaupunkiympäristöön osoittautui hankalaksi. Myöskään sekaviemäröinnin muuttaminen erillisviemäröinniksi ei ole ongelmaton, sillä työn aikana havaittiin useita katuosuuksia, joihin ei todennäköisesti ole mahdollista sijoittaa enempää putkia muun kunnallistekniikan vuoksi. Jopa nykyisten viemäreiden suurentaminen saattaa olla vaikeaa ahtaan katutilan vuoksi. Tämän vuoksi hulevesien hallinta tulisi ottaa huomioon uusilla alueilla niiden kaavoituksessa sekä täydennysrakentamisessa. Kaavoituksella on myös mahdollista siirtää painopistettä hulevesiviemäröinnistä hulevesien syntypaikkakäsittelyn suuntaan.

Mitoitussateiden osalta Suomessa käytetään vanhoihin aineistoihin pohjautuvia tietoja ja mitoitussateet ovat intensiteetiltään muuttumattomia. Kuitenkin tulevaisuudessa sateet tutkimusten mukaan lisääntyvät ja mitoitussateet tulisikin päivittää vastaamaan näitä ennusteita. Samoin mallinuksissa käytettävät mitoitussadetahtumat tulisi muuttaa vastaamaan paremmin todellisia sadetahtumia käyttämällä ajan mukaan muuttuvaa sateen intensiteettiä. Nykyisellään viemäreiden suunnittelussa käytettävät mitoitussateet ovat huomattavasti tässä työssä käytettyjä mitoitussateita pienempiä ja on hyvä arvioida

onko tarkoituksenmukaista mitoittaa viemärikapasiteettia vastaamaan kovimpia rankkasateita, joita esiintyy melko harvoin.

Vaikka luonnonmukaisten hulevesijärjestelmien sijoittaminen kaupunkitilaan on haastavaa, se ei kuitenkaan ole mahdotonta. Työssä on esitetty joitakin ratkaisuehdotuksia, joissa on käytetty hyväksi tiiviisti rakennetun alueen viheralueita hulevesien hallintaan. Työn aikana havaittiin, että maanpäällisillä tai maanalaisilla viivytysrakenteilla voidaan saavuttaa parempia tuloksia hulevesitulvien ehkäisyssä kuin hajautetuilla järjestelmillä, kuten viherkatoilla.

Työn aikana on havaittu, että Yhdysvaltojen ympäristönsuojeluviraston kehittämä Storm Water Management Model (SWMM) sopii hyvin taajama-alueiden hulevesitulvien tarkasteluun. Ohjelmalla luodut mallit kykenevät toistamaan tapahtuneita hulevesitulvia ja mallien avulla voidaan pyrkiä analysoimaan tulviin johtavia syitä verkostosta sekä osavaluma-alueilta. Ongelmien tunnistamisen jälkeen mallintaminen antaa mahdollisuuden kokeilla eri ratkaisuvaihtoehtojen toimivuutta ja tarkastella ratkaisuilla saavutettavia hyötyjä. SWMM:a on myös mahdollista käyttää apuna hulevesien hallintamenetelmien sekä putkiosuuksien mitoituksessa. Herkkyyksianalyysissä on osoitettu, että mallin kalibroiminen mittauksin ei ole kaikissa tapauksissa välttämätöntä, mikäli lähtötietojen avulla voidaan määrittää malliin eniten vaikuttavat kalibrointiparametrit riittävällä tarkkuudella. Koska mittauksin suoritettava kalibrointi on kallista ja aikaa vievää, laskee kalibroinnin pois jättäminen kynnystä käyttää ohjelmistoa valuma-alue tarkastelussa. Työn aikana on havaittu myös, että pelkkää maastomallia hyödynnettäessä voidaan tehdä virheellisiä johtopäätöksiä tulvakohteista ja viemäriverkoston mallintaminen lisää huomattavasti analyysin tarkkuutta.

Työn aikana on havaittu, että HSY Veden ja Helsingin kaupungin tavoitteet ovat ajoittain erilaisia ja hulevesien osalta yhteistyössä haetaan vasta toimintamalleja. Kantakaupungissa osapuolien intressit saattavat ajoittain olla jopa täysin ristiriidassa. Hulevesitulvien ehkäisyssä ja luonnonmukaisessa hulevesien hallinnassa korostuu tarve yhteistyöhön, sillä hulevesi saattaa kulkea viemärin ja muiden hulevesirakenteiden välillä ja tästä syystä tulisi selkeyttää kuka hulevesistä on kokonaisuudessaan vastuussa.

Tasakatoille perustetuista viherkattojen kyvystä pidättää vettä on tehty vuosien varrella huomattava määrä tutkimusta, mutta tarvetta olisi myös kaltevien viherkattopintojen

vedenpidätyskyvyn arvioimiselle. Samoin läpäisevien pintojen ja imeytysrakenteiden vaikutuksista ympäröiviin rakennuksiin ja erityisesti rakennusten kuivatukseen löytyy vähäisesti tutkimustietoa. Tiedon puute hidastaa ja saattaa jopa estää uusien menetelmien käyttöönottoa. Kuitenkin tutkimustiedon puutteeseen on havahduttu, kuten kaksi Suomessa käynnistettyä tutkimushanketta (Helsingin Yliopisto 2013, VTT 2013) osoittavat.

10 Lähdeluettelo

Aaltonen, H. et al. 2008. Rankkasateet ja taajamatulvat (RATU). Helsinki. 123 s. Suomen ympäristö 31/2008. ISBN 978-952-11-3211-7.

Abi Aad, M. P., Suidan, M. T., & Shuster, W. D. 2009. Modeling techniques of best management practices: rain barrels and rain gardens using EPA SWMM-5. *Journal of Hydrologic Engineering*, 15(6), 434-443.

American Hydrotech, Inc. 2013a. GardNet Soil Confinement product data sheet.

[Viitattu 30.5.2013]. Saatavissa:

http://resources.hydrotechusa.com/resources.php?category=Product_Data_Sheets

American Hydrotech, Inc. 2013b. Internetsivut. [Viitattu 30.5.2013]. Saatavissa:

<http://resources.hydrotechusa.com/projects.php>

Arnbjerg-Nielsen, K. 2006. Significant climate change of extreme rainfall in Denmark. *Water science and technology: a journal of the International Association on Water Pollution Research*, 54(6-7), 1.

Beling, F. A., Garcia, J. I. B., Paiva, E. M. C. D., Bastos, G. A. P. & Paiva, J. B. D. 2011. Analysis of the SWMM Model Parameters for Runoff Evaluation in Periurban Basins from Southern Brazil. In 12nd ICUD-International Conference on Urban Drainage.

Butler, D. & Davies J. W. 2004. *Urban Drainage* 2nd edition. Spon Press. London and New York. 543 s. ISBN 0-415-30607-8.

Bäckström, M. & Bergström, A. 2000. Draining function of porous asphalt during snowmelt and temporary freezing. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 27(3), 594-598.

Dietz, M. E. 2007. Low impact development practices: A review of current research and recommendations for future directions. *Water, air, and soil pollution*, 186(1-4), 351-363.

Engman, E. T. 1986. Roughness coefficients for routing surface runoff. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 112(1), 39-53.

FCG Finnish Consulting Group Oy. 2011. Hulevesitulvariskien alustava arviointi Helsingin kaupungissa, arviointiselostus. Saatavissa: http://www.hel.fi/hel2/hkr/julkaisut/ohjeet/aluesuunnitelman_lahtoaineisto/hulevedet/Arviointiselostus_111212.pdf

Frechen, F. B., Schier, W., & Felmeden, J. 2006. The Plant-Covered Retention Soil Filter (RSF): The Mechanical and Biological Combined Sewer Overflow (CSO) Treatment Plant. *Engineering in Life Sciences*, 6(1), 74-79.

Getter, K. L. & Rowe, D. B. & Andresen, J. A. 2007. Quantifying the effect of slope on extensive green roof stormwater retention. *Ecological Engineering*, 31(4), 225-231.

Gironás, J., Roesner, L. A., Davis, J. & Rossman, L. A. 2009. Storm Water Management Model Applications Manual. National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency. 180 s.

Grum, M., Jørgensen, A. T., Johansen, R. M., & Linde, J. J. 2006. The effect of climate change on urban drainage: an evaluation based on regional climate model simulations. *Water science and technology*, 54(6-7), 9-15.

Gröhn, J. 2013. Paikkatietoasiantuntija. Helsingin kaupungin kiinteistövirasto, kaupunkimittausosasto, Viipurinkatu 2, 00099 Helsingin kaupunki. Puhelinkeskustelu 7.6.2013.

Harju, K. 2013. Projektipäällikkö. Helsingin kaupungin rakennusvirasto, Kasarmikatu 21, 00130 Helsinki. Haastattelu 3.4.2013.

Hathaway, A. M., Hunt, W. F. & Jennings, G. D. 2008. A field study of green roof hydrologic and water quality performance. Transactions of the ASABE, 51(1), 37-44.

Hayneedle Inc. 2013. Internetsivu. [Viitattu 30.5.2013]. Saatavissa: <http://www.rainbarrelsource.com/>

Helsingin kaupunki. 2012. Hulevesitulvariskialueiden ja hulevesitulvaherkkien alueiden selvittäminen Helsingin kaupungissa, loppuraportti. Saatavissa: http://www.hel.fi/hel2/hkr/julkaisut/ohjeet/aluesuunnitelman_lahtoaineisto/hulevedet/HKR_hulevesitulvaherkat_alueet_loppuraportti.pdf

Helsingin kaupungin kiinteistövirasto, Geotekninen osasto. 1989. Geotekninen kartta. Aineisto käytettävissä: <http://ptp.hel.fi/soili/>

Helsingin yliopisto. 2013. Viides ulottuvuus – viherkatot osaksi kaupunki. Tutkimushankkeen internetsivut. [Viitattu 12.6.2013]. Saatavissa: <http://www.luomus.fi/kasvitiede/tutkimus/viherkatot/>

Hogland, W. 1986. Rural and urban water budgets: a description and characterization of different parts of the water budgets with special emphasis on combined sewer overflows. Lund University, Institute of Science and Technology, Department of Water Resources Engineering. Report No 1006. Lund, Sweden. ISSN 0346-8062. 278 s.

Hsu, M. H., Chen, S. H., & Chang, T. J. 2000. Inundation simulation for urban drainage basin with storm sewer system. Journal of Hydrology, 234(1), 21-37.

HSY. 2011. SeutuCD'11. CD-ROM. Helsinki.

HSY. 2012. HSY:n vesihuolto, verkostosuunnittelukäytännöt. Ei julkaistu.

Huber, W. C. & Dickinson, R. E. 1988. Stormwater Management Model (SWMM) User's Manual, Version 4.0. United States Environmental Protection Agency, Athens, Georgia.

Huhtonen, S. 2013. Projektipäällikkö. Helsingin kaupungin rakennusvirasto, Kasarminkatu 21, 00130 Helsinki. Haastattelu 13.2.2013.

Hutila, A. 2013. Tietoja sadetapahtumista. Sähköpostiviesti tekijälle. 15.2.2013

Ilmatieteen laitos. 2013. Vuositilastot. [Viitattu 27.2.2013]. Saatavissa: <http://ilmatieteenlaitos.fi/vuositilastot>

Katajisto, R. 1969. Rankkasateiden voimakkuus ja toistumistiheys Suomessa. Rakennushallitus, tiedotuksia.

Kaupunkimittaussasto, Helsingin kaupunki. 2013. Korkeustiedot ja 3D, kuvailutiedot. Ei julkaistu.

Kilpeläinen, T. 2006. Kesäsateiden ilmastolliset piirteet Helsingin Kaisaniemessä 1951-2000. Helsingin yliopisto, matemaattis-luonnontieteellinen tiedekunta, fysikaalisten tieteiden laitos. Pro gradu -tutkielma. 75 s.

Kotola, J & Nurminen, J. 2003. Kaupunkialueiden Hydrologia – valunnan ja ainehuuhtouman muodostuminen rakennetuilla alueilla, Osa 1: kirjallisuustutkimus. Espoo. 92 s. Teknillisen korkeakoulun vesitalouden ja vesirakennuksen julkaisuja 7. ISBN 951-22-6496-X.

Krebs, G. 2013. Tohtorikoulutettava. Aalto -yliopisto, PL 15200, 00076 Aalto, Haastattelu. 6.5.2013.

Krebs, G, Kokkonen, T, Valtanen, M, Koivusalo, H. & Setälä, H. 2013. A high resolution application of a stormwater management model (SWMM) using genetic parameter optimization, Urban Water Journal, DOI:10.1080/1573062X.2012.739631

Korhonen K-H et al. 1974. Geotekninen maalajiluokitus. VTT, Geotekniikan laboratorio, tiedonantoja 14.

Kuntaliitto. 2012. Hulevesiopas. Helsinki. 298 s. ISBN 978-952-213-896-5

Kuusisto, E. 1980. On the intensity of rainfall in Finland. *Aqua Fennica* 10, s. 3-11.

Liikennevirasto. 2013. Teiden ja ratojen kuivatuksen suunnittelu. Helsinki. 114 s. Liikenneviraston ohjeita 5/2013. ISBN 978-952-255-250-1.

Liong, S. Y., Chan, W. T. & Lum, L. H. 1991. Knowledge-based system for SWMM runoff component calibration. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 117(5), 507-524.

Leandro, J., Chen, A. S., Djordjević, S., & Savić, D. A. 2009. Comparison of 1D/1D and 1D/2D coupled (sewer/surface) hydraulic models for urban flood simulation. *Journal of hydraulic engineering*, 135(6), 495-504.

Maanmittauslaitos. 2005. Suomen kartta. [Viitattu 24.7.2013]. Saatavissa: <http://www.maanmittauslaitos.fi/sites/default/files/Suomen%20kartta.pdf>

Madsen, H., Arnbjerg-Nielsen, K., & Mikkelsen, P. S. 2009. Update of regional intensity-duration-frequency curves in Denmark: tendency towards increased storm intensities. *Atmospheric Research*, 92(3), 343-349.

Mark, O., Weesakul, S., Apirumanekul, C., Aroonnet, S. B., & Djordjević, S. 2004. Potential and limitations of 1D modelling of urban flooding. *Journal of Hydrology*, 299(3), 284-299.

May, W. 2008. Potential future changes in the characteristics of daily precipitation in Europe simulated by the HIRHAM regional climate model. *Climate Dynamics*, 30(6), 581-603.

Melanen, M. 1982. Quantity, composition and aerial load of urban runoff water in Finland. Finnish academy of technical sciences. Acta Polytechnica Scandinavica Ci 80.

Meyer, D., Molle, P., Esser, D., Troesch, S., Masi, F., & Dittmer, U. 2012. Constructed Wetlands for Combined Sewer Overflow Treatment—Comparison of German, French and Italian Approaches. *Water*, 5(1), 1-12.

Mustonen, S. 1986. Sovellettu Hydrologia. Helsinki: Vesiyhdistys r.y. Mäntän Kirjapaino Oy. 503 s. ISBN 951-95555-1-X.

Neiramo, S. 2013a. Alueinsinööri. Helsingin seudun ympäristöpalvelut –kuntayhtymä HSY, PL 300, 00066 HSY, Haastattelu. 21.2.2013.

Neiramo, S. 2013b. Pitäjänmäentien alikulun kuivatuksesta. Sähköpostiviesti tekijälle. 14.6.2013.

Pitt, R. 1999. Small storm hydrology and why it is important for the design of stormwater control practices. *Advances in modeling the management of stormwater impacts*, 7, 61-91.

Rajala, J. 2013. Projektinjohtaja. Helsingin kaupungin rakennusvirasto, Kasarmikatu 21, 00130 Helsinki. Keskustelu 19.4.2013

Rawls, W. J., Brakensiek, D. L. & Miller, N. 1983. Green-Ampt infiltration parameters from soils data. *Journal of hydraulic engineering*, 109(1), 62-70.

RIL. 2003. 124-1 Vesihuolto I. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL r.y. Helsinki: Vammalan kirjapaino Oy. 314 s. ISBN 951-758-431-8.

RIL. 2004. 124-2 Vesihuolto II. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL r.y. Helsinki: Vammalan kirjapaino Oy. 684 s. ISBN 951-758-438-5.

RIL. 2010a. 237-1 Vesihuoltoverkkojen suunnittelu – perusteet ja toiminnallisuus. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL r.y. Saarijärven Offset Oy. 162 s. ISBN 978-951-758-526-2.

RIL. 2010b. 237-2 Vesihuoltoverkkojen suunnittelu – mitoitus ja suunnittelu. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL r.y. Saarijärven Offset Oy. 162 s. ISBN 978-951-758-521-7.

Rossman, L. A. 2010. Storm water management model user's manual, version 5.0. National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency. 285 s.

Räisänen, J., Hansson, U., Ullerstig, A., Döscher, R., Graham, L. P., Jones, C., Meier, H.E.M., Samuelsson, P. & Willén, U. 2004. European climate in the late twenty-first century: regional simulations with two driving global models and two forcing scenarios. *Climate dynamics*, 22(1), 13-31.

Sansalone, J, Kuang, X, Ying, G & Ranieri, V. 2011. Filtration and clogging of permeable pavement loaded by urban drainage, *Water Research*, 46(20), 6763-6774.

Scholz, M., & Grabowiecki, P. 2007. Review of permeable pavement systems. *Building and Environment*, 42(11), 3830-3836.

Schueler, T. 1995. The peculiarities of perviousness. *Watershed Protection Techniques*, 2(1), 233-238.

Seyoum, S. D., Vojinovic, Z., Price, R. K., & Weesakul, S. 2011. Coupled 1D and noninertia 2D flood inundation model for simulation of urban flooding. *Journal of Hydraulic Engineering*, 138(1), 23-34.

Skotnicki, M & Sowiński, M. 2009. A Comparative Study of Approaches for Hydraulic Width Determination of Sub-Catchments in Urban Stormwater Model. *International Symposium on Water Management and Hydraulic Engineering*. Paper: A07.

Stephenson, D. 1989. Selection of stormwater model parameters. *Journal of Environmental Engineering*, 115(1), 210-220.

StormTech. 2012. Internetsivu. [Viitattu 30.5.2013]. Saatavissa:
<http://www.stormtech.com/international/english/home.htm>

StormTech. 2013. MC-3500 and MC-4500 Design Manual – StormTech Chamber Systems for Stormwater Management. Saatavissa:
http://www.stormtech.com/download_files/pdf/design_manual_35004500.pdf

Sänkiäho, L & Sillanpää, N. 2012. STORMWATER-hankkeen loppuraportti; Taajami-
 en hulevesihaasteiden ratkaisut ja liiketoimintamahdollisuudet. Espoo. 54 s. Aalto-
 yliopiston julkaisusarja TIEDE + TEKNOLOGIA 4/2012. ISBN 978-952-60-4555-9

Thompson, D. The Rational Method – draft. 2007. [Viitattu 3.4.2013]. Saatavissa:
<http://drdbthompson.net/writings/rational.pdf>

Tikkanen, H. 2013. Hydrological modeling of a large urban catchment using a storm-
 water management model (SWMM). Aalto University, School of Engineering, Master's
 thesis, 64 p.

Uhl, M. & Dittmer, U. 2005. Constructed wetlands for CSO treatment: an overview of
 practice and research in Germany. *Water Science & Technology*, 51(9), 23-30.

VanWoert, N. D., Rowe, D. B., Andresen, J. A., Rugh, C. L., Fernandez, R. T. & Xiao,
 L. 2005. Green roof stormwater retention. *Journal of environmental quality*, 34(3),
 1036-1044.

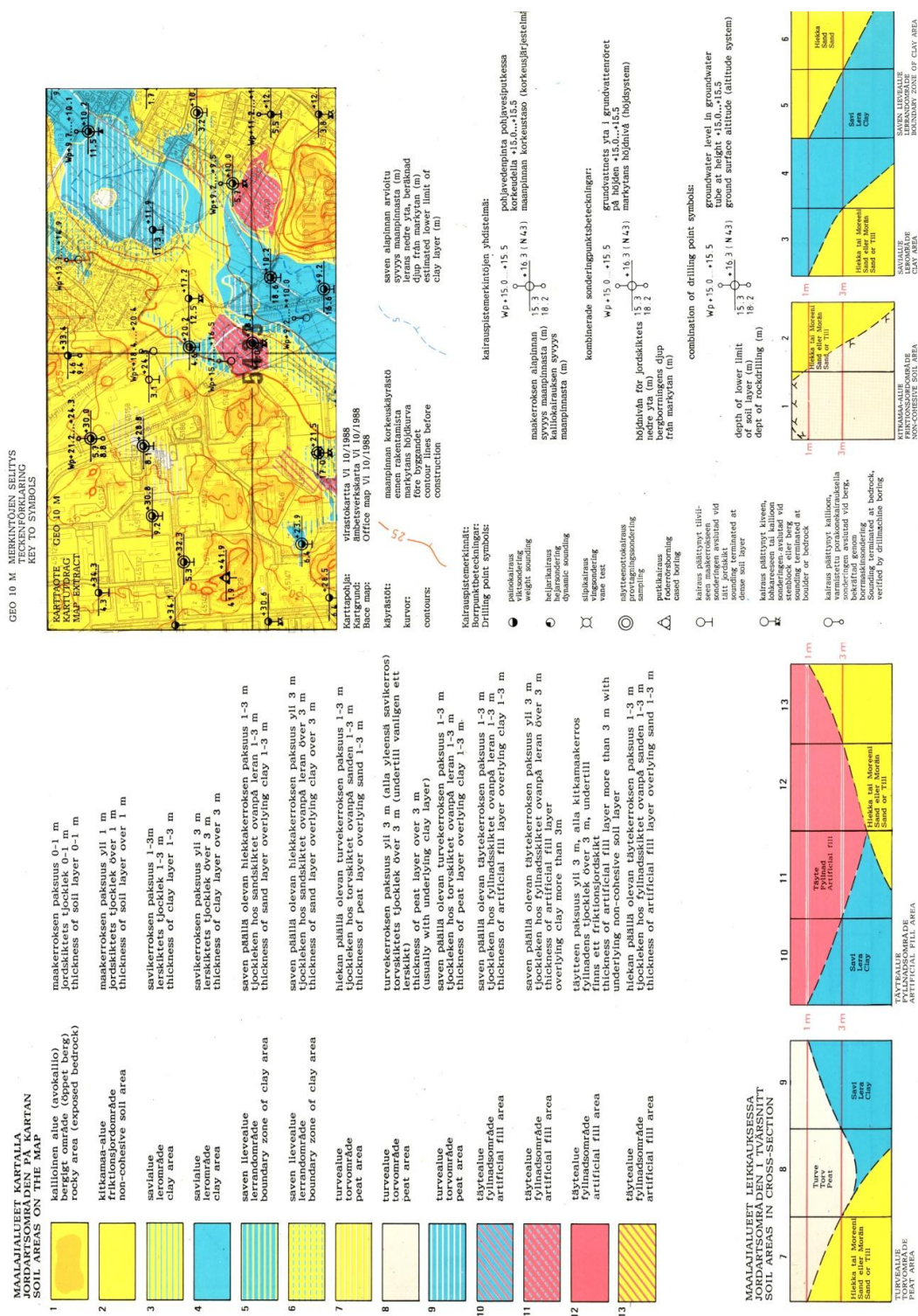
Villarreal, E. L. & Bengtsson, L. (2005). Response of a *Sedum* green-roof to individual
 rain events. *Ecological Engineering*, 25(1), 1-7.

Warnaars, E., Larsen, A. V., Jacobsen, P., & Mikkelsen, P. S. 1999. Hydrologic behaviour of stormwater infiltration trenches in a central urban area during 2 3/4 years of operation. *Water science and technology*, 39, 217-224.

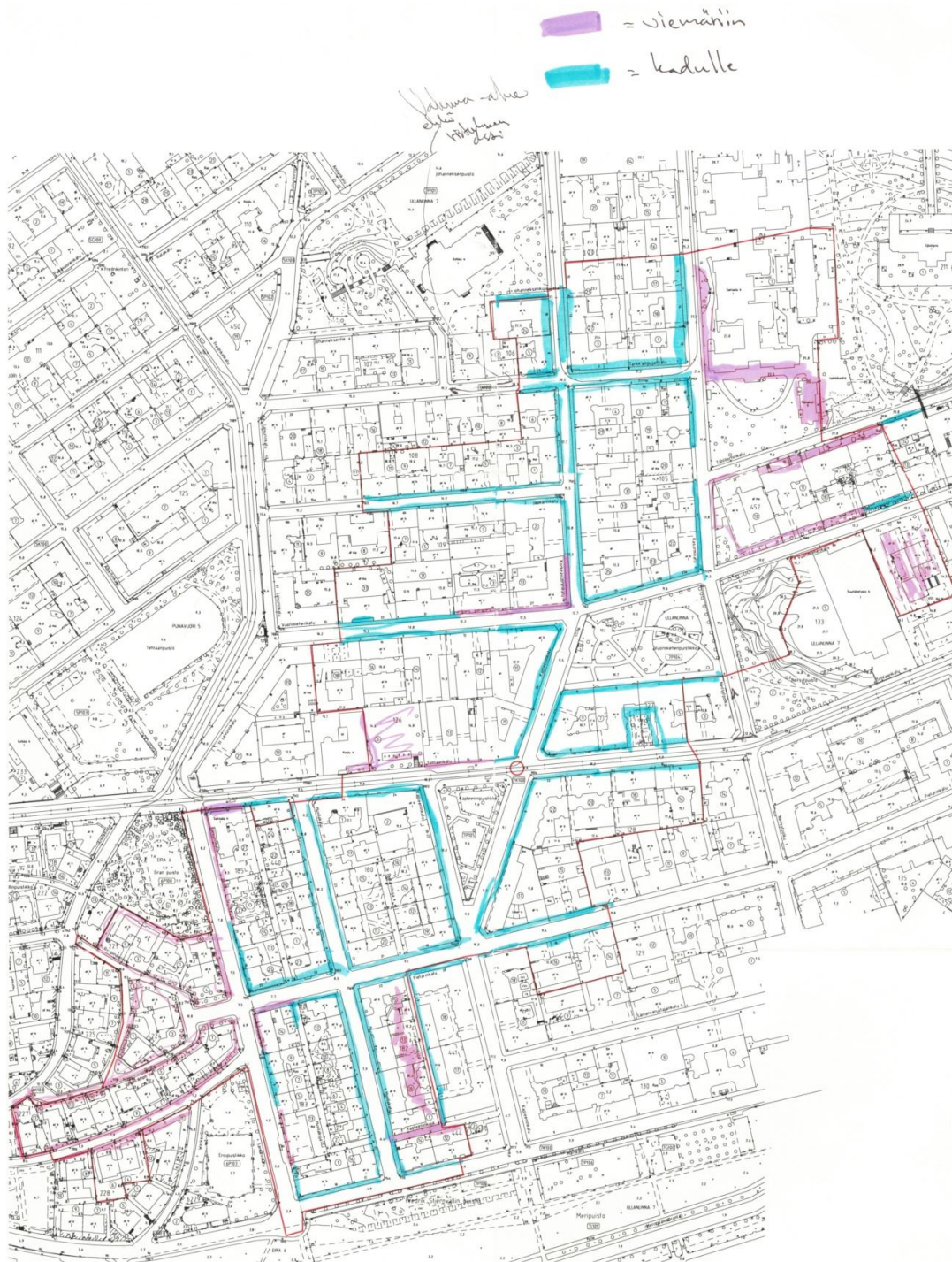
Wavin-Labko Oy. 2013. Internetsivu. [Viitattu 31.5.2013]. Saatavissa: <http://www.wavin-labko.fi>

VTT. 2013. CLASS – Climate Adaptive Surfaces. Internetsivu. [Viitattu 10.6.2013]. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/sites/class/>

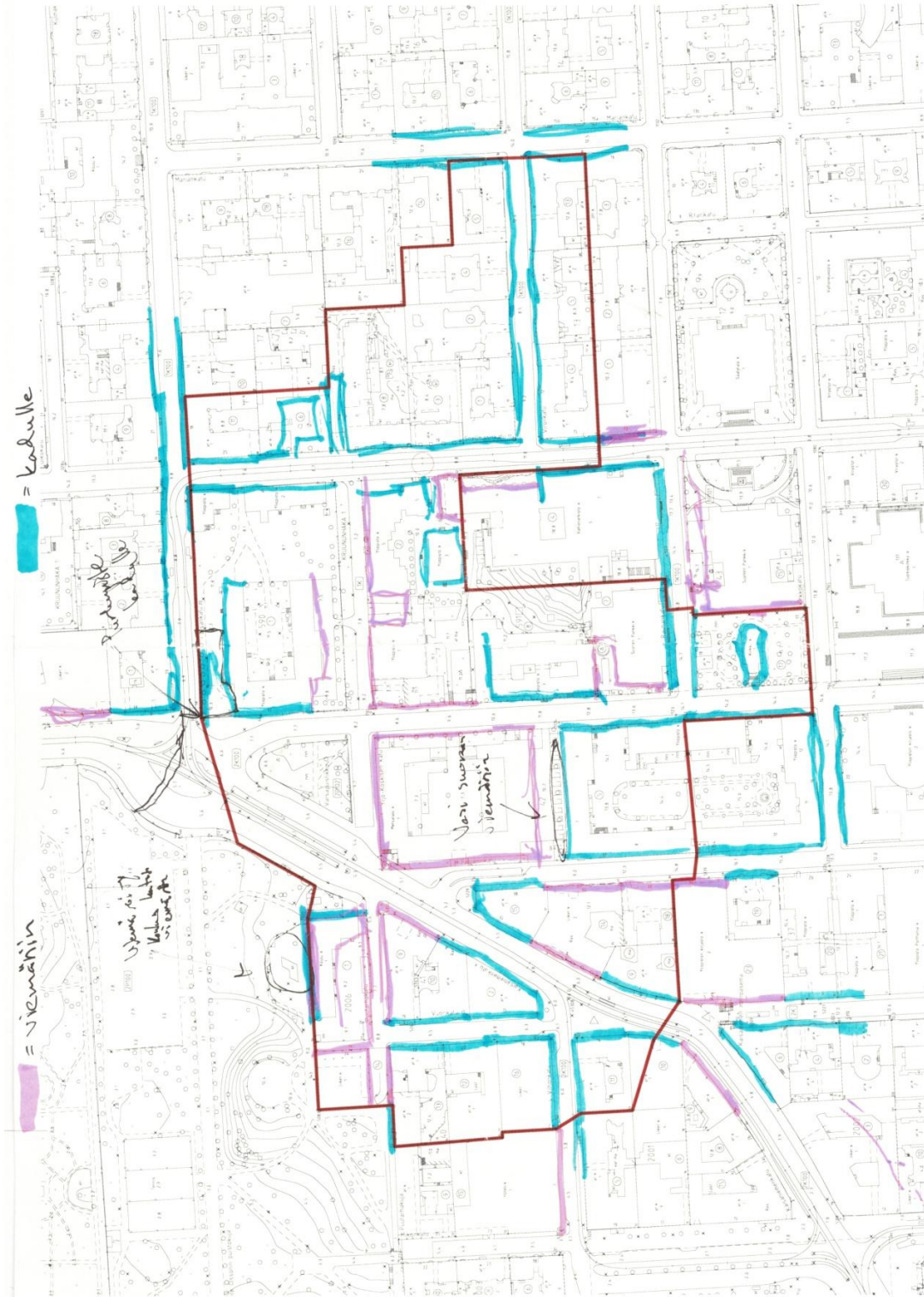
ZinCo. 2013. Internetsivu. [Viitattu 30.5.2013]. Saatavissa: <http://www.zinco-greenroof.com>



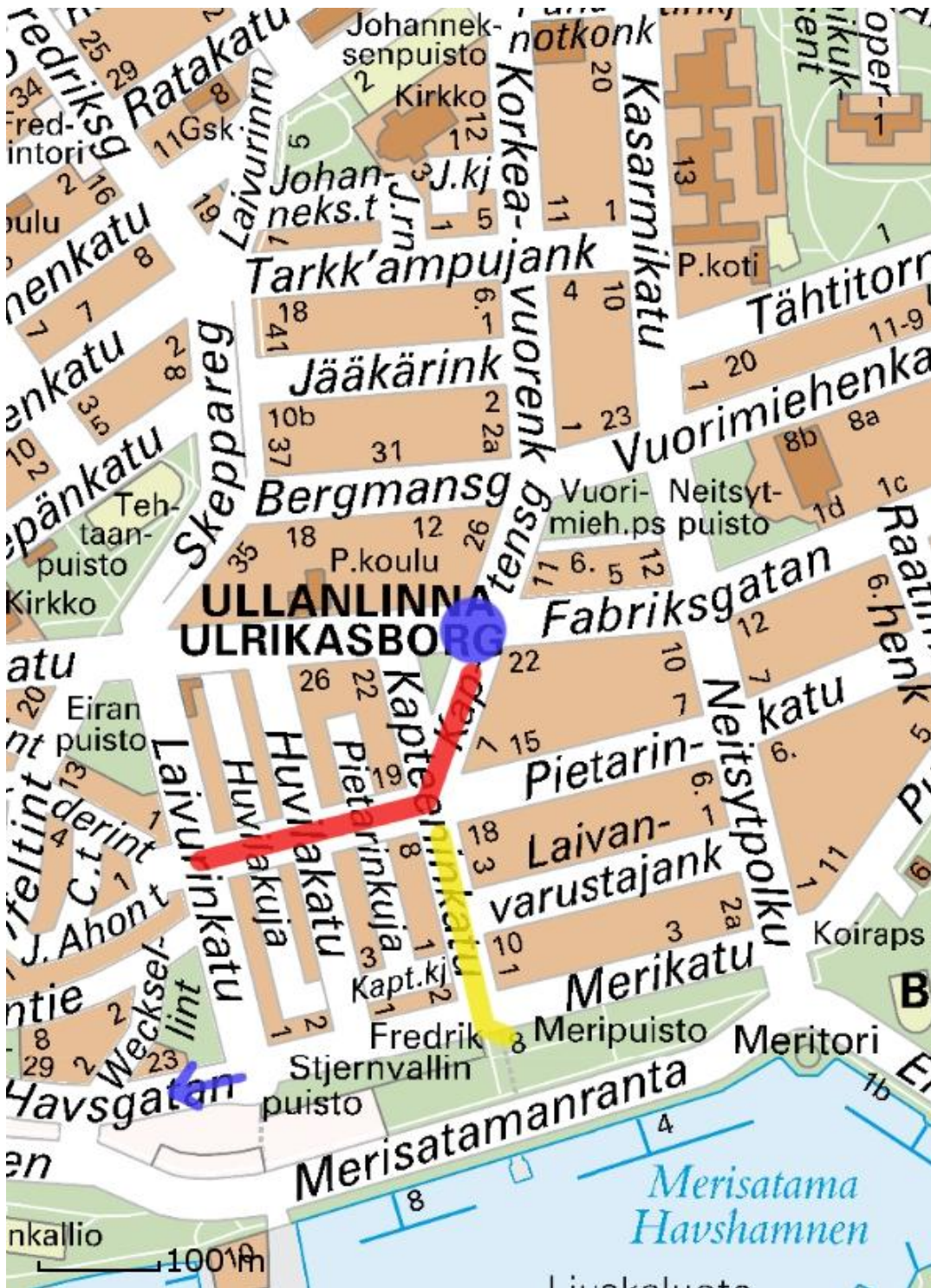
Liite 2. Kattovesien johtaminen Kapteeninpuistikon tarkastelualueella.



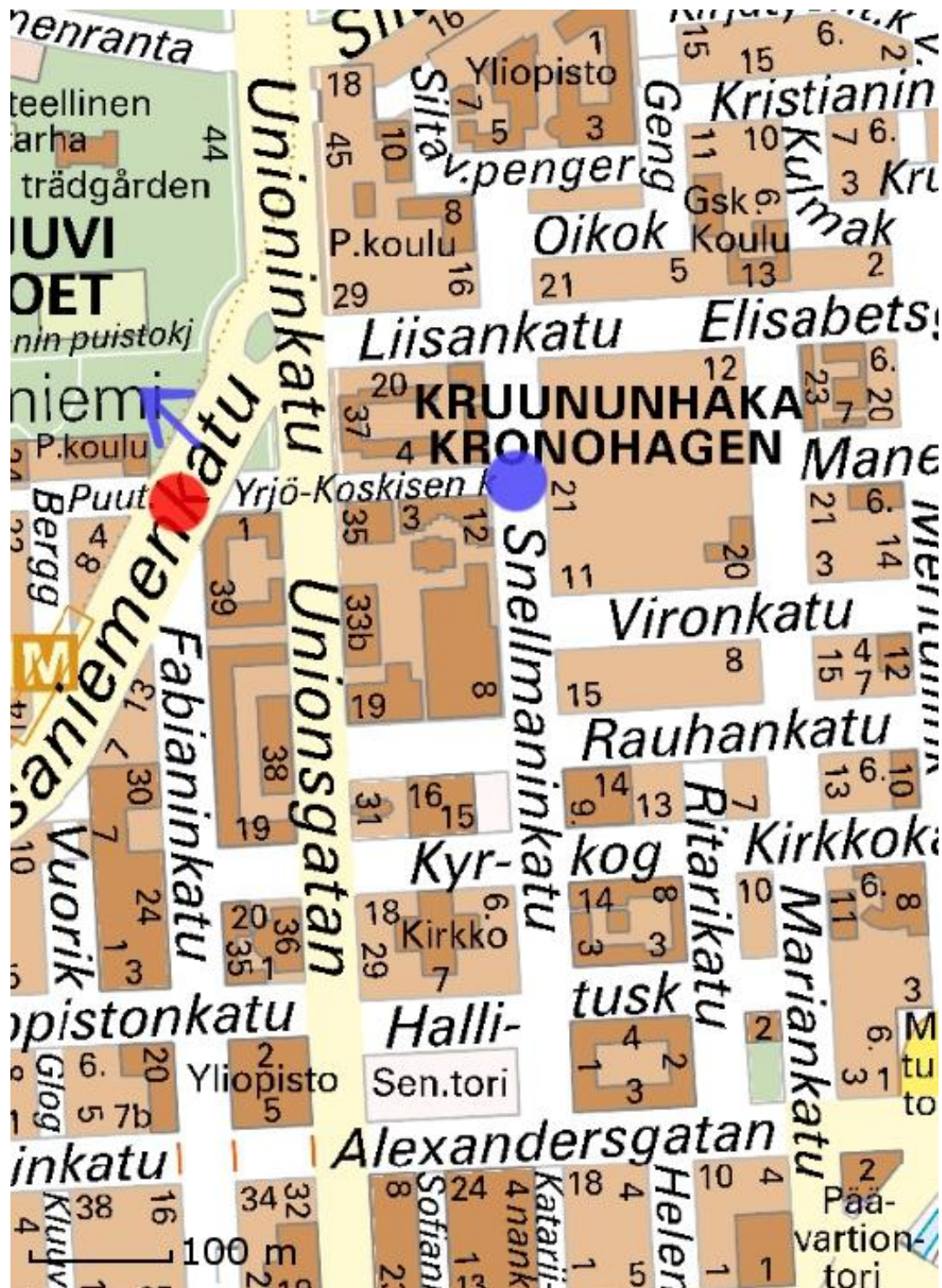
Liite 3. Kattovesien johtaminen Snellmaninkadun tarkastelualueella.



Liite 4. Kapteeninpuistikon lähialue. Ongelmakohde sekä purkupiste on merkitty sinisellä, Kapteeninkadun sekä Pietarinkadun runkoviemärit punaisella ja yli-vuotoputki keltaisella.



Liite 5. Snellmaninkadun lähialue. Ongelmakohde sekä purkupiste on merkitty sinisellä ja Kaisaniemenkadun tulvakohde punaisella.



Liite 6. Pitäjänmäen alikulun lähialue. Ongelmakohde sekä purkupiste on merkitty sinisellä ja runkoviemäri oranssilla. Pitäjänmäentien ja Takkatien tulviva risteys on merkitty punaisella.

