



Aalto-yliopisto
Insinöörیتieteiden
korkeakoulu

Miina Rautiainen

Hulevesimallinnus ja tulvariskin arviointi Turun sataman valuma-alueella

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

Espoossa 3.10.2016

Valvoja: Professori Harri Koivusalo

Ohjaajat: TkT Teemu Kokkonen, TkT Lassi Warsta

Tiivistelmä

Tekijä Miina Rautiainen

Työn nimi Hulevesimallinnus ja tulvariskin arviointi Turun sataman valuma-alueella

Koulutusohjelma Rakennus- ja ympäristötekniikka

Pääaine Vesi- ja ympäristötekniikka

Koodi R3005

Työn valvoja Prof. Harri Koivusalo

Työn ohjaajat TkT Teemu Kokkonen, TkT Lassi Warsta

Päivämäärä 3.10.2016

Sivumäärä 57**Kieli** suomi

Tiivistelmä

Kaupunkirakenteen tiivistyminen ja läpäisevien pintojen määrän ja laadun muuttuminen vaikuttavat kaupunkihydrologiaan ja lisäävät tarvetta hallita hulevesiä tulvavahinkojen välttämiseksi. Hulevesien hallinta on tullut osaksi kaupunkisuunnittelua ja sen huomiointiin kaavoituksessa ohjataan Suomessa myös lainsäädännöllä. Hulevedet nähdään yhä useammin mahdollisuutena ja osana kaupunkiympäristöä, sen sijaan että ne nähtäisiin haittana. Hulevesiä suositellaan pidättämään ja imeyttämään niiden syntypaikalla sen sijaan että ne johdetaisiin viemäriin.

Tämän työn tavoitteena oli mallintaa Turun sataman valuma-alueen hulevesiverkostoa rankkasadetilanteessa ja arvioida eri skenaarioiden avulla alueen tulvariskiä. Lisäksi mallinnuksen avulla tutkittiin, millaisia vaikutuksia viherkattoilla voisi olla alueen hulevesiin. Turussa hulevesien hallinta on mukana suunnittelussa, kun keskustan ja sataman aluetta kaavoitetaan. Turun sataman valuma-alueelle tyypillistä on sen tasaisuus. Hulevesiverkoston kapasiteettia rajoittavat osittain merenpinnan alapuolella sijaitseva verkoston alaosa sekä verkostoon liittyvä jätevedenpuhdistamon purkupuutki. Skenaarioiden avulla tutkittiin maaperän johtavuuden vaikutusta, merivesitulvaa sekä tilannetta, jossa jätevedenpuhdistamon purkuvesiä ei enää johdeta hulevesiverkostoon. Lisäksi mallinnettiin eripaksuisia viherkattoja eri alkukosteuksilla 100 %:lle ja 10 %:lle valuma-alueen katoista. Mallinnus tehtiin SWMM5-ohjelmalla. Mallin rakennuksessa käytettiin vastikään kehitettyä GisToSWMM5-ohjelmaa. Mallinnus tehtiin vuoden 2012 elo- ja lokakuun rankkasadetapahtumille, jotka aiheuttivat Turussa hulevesitulvia ja vahinkoja.

Tulosten perusteella jätevedenpuhdistamon purkuvesien poistaminen hulevesiverkostosta ei rankkasateella välttämättä vähentäisi merkittävästi verkoston tulvintaa, vaikka kokonaisvalunta vähenisikin huomattavasti. Merivesi rajoittaa hulevesiverkoston kapasiteettia rannikolla, mikä lisää myös hulevesitulvariskiä ylempänä verkostossa. Viherkattoilla puolestaan voidaan vaikuttaa hulevesien pidätykseen ja sadejakson ensimmäiseen virtaamahuippuun madaltavasti.

Avainsanat SWMM5, hulevedet, tulvariski, viherkatot



Abstract

Author Miina Rautiainen

Title of thesis Storm water modelling and flood risk assessment in Turku harbor catchment

Degree programme Civil and Environmental Engineering

Major Water and Environmental Engineering

Code R3005

Thesis supervisor Professor Harri Koivusalo

Thesis advisors D.Sc. (Tech.) Teemu Kokkonen, D.Sc. (Tech.) Lassi Warsta

Date 3.10.2016

Number of pages 57

Language Finnish

Abstract

Denser cities and changes in the amount and quality of pervious surfaces have an impact on the urban hydrology and increase the need to manage storm water to avoid flood damages. Storm water management has become a part of city planning and also the Finnish law requires storm water issues to be included in new city plans. Storm water is increasingly seen as an integral part of the city environment, rather than a problem that needs to be removed. Storm water is recommended to be retained and infiltrated on site instead of directing it to the sewage network.

The aim of this study was to model the storm water drainage network in Turku harbor catchment during a heavy rain and assess the flood risk of the area with the help of different scenarios. The impact of green roofs on the storm water quantity in the area was also modelled. In Turku storm water management is addressed in planning new developments in the city center and the harbor area. The harbor catchment is typically very flat. Factors limiting the capacity of the drainage network are the situation of lower part of the network below the sea level and the connection between wastewater treatment plant's discharge pipe and the network. Different scenarios were constructed for studying the impact of the hydraulic conductivity of soil, coastal flood, and conveying the wastewater treatment plant discharge directly to the sea with a new pipeline. In addition, the impact of green roofs with different thicknesses and initial moisture contents was modelled using 100 % and 10 % coverage of the catchment roof area. Modelling was carried out with SWMM5 using heavy rain events from August and October 2012, which had caused storm water flood damage in the study area. The model parametrizations were created with the aid of the recently developed GisToSWMM5 program.

According to the modelling results redirecting the wastewater discharge would not necessarily decrease significantly flooding in the although the total discharge would decrease. Sea level limits the capacity of the drainage network on the coast, which increases the risk of storm water floods also in the upper parts of the network. Green roofs increase the water retention capacity lowering especially the first flow peak.

Keywords SWMM5, storm water, flood risk, green roofs

Alkusanat

Tämä työ oli osa Varsinais-Suomen ELY-keskuksen koordinoimaa Maa- ja metsätalousministeriön EU-Kiina -hanketta. Hankkeen toteutuksessa olivat mukana Turun kaupunki, Aalto-yliopisto sekä FCG. Haluan kiittää kaikkia mukana olleita tahoja diplomityöni tukemisesta ja rahoittamisesta.

Kiitos myös Maa- ja vesitekniikan tuki ry:lle työn tukemisesta rahallisesti.

Kiitos Olli-Matti Verta Varsinais-Suomen ELY-keskuksesta diplomityöprojektin käynnistämistä, erinomaisen pohjatyön tekemisestä ja avusta aineistojen hankinnassa sekä kaikesta tuesta projektin alkumetreillä. Kiitos myös muille ELY:n vesiryhmäläisille viihtyisän työympäristön luomisesta.

Suurkiitos Anna Räisäselle ja Pekka Salmiselle Turun kaupungilta sekä kaavoitusosaston väelle avusta aineistojen hankinnassa ja muusta saamastani tuesta työn aikana.

Kiitos FCG:n Pekka Raukolalle teknisestä tuesta, hyvistä neuvoista ja ohjeista etenkin projektin alkuvaiheessa.

Erityiskiitos professori Harri Koivusalolle ja ohjaajilleni Teemu Kokkoselle ja Lassi Wartalle, joiden korvaamaton apu ongelmatilanteissa sekä eteenpäin vievät kommentit ja neuvot tukivat työntekoa koko projektin ajan.

Kiitos myös Stéphane, joka jaksat kulkea vierellä.

Espoossa 3.10.2016

Miina Rautiainen

Sisällysluettelo

Tiivistelmä	2
Abstract	3
Alkusanat	4
Lyhenteet	6
Kuvaluettelo	7
Taulukkuuettelo	8
1 Johdanto	9
2 Tutkimusalue ja aineistot	12
3 Menetelmät	15
3.1 Maankäyttö ja valuma-alueerajaus	15
3.2 GisToSWMM5	17
3.3 Storm Water Management Model (SWMM5)	18
3.4 Skenaariot ja parametrit	19
3.4.1 Hydrauliset parametrit	20
3.4.2 Jätevedenpuhdistamon virtaama ja merivesi	21
3.4.3 Viherkattoskenaariot	22
4 Tulokset	25
4.1 Verkosto ja valuma-alue	25
4.2 Mallinnustulokset	26
4.2.1 Jätevedenpuhdistamon purkutupki ja merivesitulva	26
4.2.2 Viherkatot	31
4.3 Mallinnettujen ja havaittujen tulvien vastaavuus	38
5 Tulosten tarkastelu	40
5.1 Verkosto ja valuma-alue	40
5.2 Tulvariski	40
5.3 Viherkatot	42
5.4 Epävarmuus- ja virhetekijät	43
6 Johtopäätökset	45
Kirjallisuus	47
Liitteet	52

Lyhenteet

DEM	<i>Digital Elevation Model</i>
GR	<i>Green roof</i>
LID	<i>Low Impact Development</i>
MRL	Maankäyttö- ja rakennuslaki
SWMM	<i>Storm Water Management Model</i>
TSP	Turun Seudun Puhdistamo Oy
VHL	Vesihuoltolaki

Kuvaluettelo

<i>Kuva 1 Turun sataman valuma-alue ja Juhannuskukkulan sääasema valuma-alueen pohjoispuolella (punanen kolmio).....</i>	<i>12</i>
<i>Kuva 2 Sataman valuma-alueen hulevesiverkosto ja purkupisteet (c4451, c 4647, c16183, c4346).....</i>	<i>13</i>
<i>Kuva 3 Tutkimuksen aineistot ja menetelmät.....</i>	<i>15</i>
<i>Kuva 4 Mallinnuksessa käytetty valuma-alerajaus (punainen) ja tarkistusrajaus (sininen).....</i>	<i>16</i>
<i>Kuva 5 Valuma-alueen maankäyttö luokiteltuna läpäisevyyden perusteella.....</i>	<i>17</i>
<i>Kuva 6 GisToSwmm5-ohjelman laskemat width-arvot alivaluma-alueille. Yhden solun koko on 8x8 m². Luku 8.00 kuvaa width-arvoa soluille, joista virtaus lähtee kohtisuoraan viereiseen soluun ja 5.66 soluille, joista virtaus lähtee vinosti. Katkoviivat kuvaavat virtauksen suuntaa solujen välillä.....</i>	<i>18</i>
<i>Kuva 7 Skenaariot ja niiden muodostus. SMD (soil moisture deficit) eli maaperän kosteusvaje laskettiin kolmella tavalla. GR (green roof) tarkoittaa viherkattoa.....</i>	<i>20</i>
<i>Kuva 8 Tutkimusalueen hulevesiverkosto. Punaisella merkitty meriveden alapuolinen verkoston osa ja sinisellä jätevedenpuhdistamon purkuputkien liitoskohta.....</i>	<i>21</i>
<i>Kuva 9 Viherkaton käsittely SWMM5:ssä (Rossman 2015). Kun LIDin width-arvo on nolla, kaikki reunapenkereen yli menevä vesi poistuu katolta välittömästi. Kun width saa muun arvon kuin nolla, ylimenevä osa vedestä haihtuu, varastoituu kasvukerrokseen tai valuu verkostoon salaajakerroksen kautta.....</i>	<i>24</i>
<i>Kuva 10 Esimerkki tilanteesta, jossa vesi reitittyy läpäisemättömältä alueelta (punainen) lähimpään kaivoon läpäisevän (vaaleansininen) alueen yli (kuva A). Tässä läpäisevän sora-alueen halkaisee rautatie ja reitille osuu myös rakennuksia (kuva C). Kuvassa B esimerkkialueen sijainti verkostoon nähden.....</i>	<i>26</i>
<i>Kuva 11 Virtaama (l/s) neljässä purkuputkessa (c4346, c4451, c4647, c16183) sekä sadanta (mm). Skenaario 0-clay, huonosti johtava maaperä, jakso 26.–27.8.2012.....</i>	<i>29</i>
<i>Kuva 12 Virtaama (l/s) neljässä purkuputkessa (c4346, c4451, c4647, c16183) sekä sadanta (mm). Skenaario noww, ei virtaamaa jätevedenpuhdistamolta, jakso 26.–27.8.2012.....</i>	<i>29</i>
<i>Kuva 13 Virtaama (l/s) neljässä purkuputkessa (c4346, c4451, c4647, c16183) sekä sadanta (mm). Skenaario 0-clay, huonosti johtava maa, jakso 4.–5.10.2012.....</i>	<i>30</i>
<i>Kuva 14 Virtaama (l/s) neljässä purkuputkessa (c4346, c4451, c4647, c16183) sekä sadanta (mm). Skenaario noww, ei virtaamaa jätevedenpuhdistamolta, jakso 4.–5.10.2012.....</i>	<i>30</i>
<i>Kuva 15 Virtaama (l/s) neljässä purkuputkessa (c4346, c4451, c4647, c16183) sekä sadanta (mm) jaksolla 26.–27.8.2012. Viherkattoskenaario GR2d (paksuus 100 mm), kaikki katot korvattu viherkatoilla. Katot kuivia ennen sadetapahtuman alkua.....</i>	<i>34</i>
<i>Kuva 16 Virtaama (l/s) neljässä purkuputkessa (c4346, c4451, c4647, c16183) sekä sadanta (mm) jaksolla 26.–27.8.2012. Viherkattoskenaario GR2w (paksuus 100 mm), kaikki katot korvattu viherkatoilla. Katot kyllästyneet vedellä sadetapahtuman alkaessa.....</i>	<i>34</i>
<i>Kuva 17 Virtaama (l/s) neljässä purkuputkessa (c4346, c4451, c4647, c16183) sekä sadanta (mm) jaksolla 4.–5.10.2012. Viherkattoskenaario GR2d (paksuus 100 mm), kaikki katot korvattu viherkatoilla. Katot kuivia sadetapahtuman alkaessa.....</i>	<i>35</i>
<i>Kuva 18 Virtaama (l/s) neljässä purkuputkessa (c4346, c4451, c4647, c16183) sekä sadanta (mm) jaksolla 4.–5.10.2012. Viherkattoskenaario GR2w (paksuus 100 mm), kaikki katot korvattu viherkatoilla. Katot kyllästyneet vedellä sadetapahtuman alkaessa.....</i>	<i>35</i>
<i>Kuva 19 Mallissa tulvivat kaivot ja vuonna 2012 ilmoitetut tulvat ja niiden aiheuttamat vahingot (Turun kaupunki).....</i>	<i>38</i>
<i>Kuva 20 Hulevesiverkosto ja kaivojen tulvinta (l/s) (B) ja runkolinjan profiilikuvat ennen sadetta (A) ja tulvahuipun aikana (C) skenaariossa 0-clay (vertailutila). Ennen sadetta alaosan putkissa on merivettä ja puhdistamon purkuvettä. Virtaamahuipun aikana putket ovat täynnä vettä ja osa kaivoista tulvii.....</i>	<i>39</i>

Taulukkoluetelo

<i>Taulukko 1 Valuma-alueen ominaisuudet</i>	16
<i>Taulukko 2 Mallinnuksessa käytetyt hydrauliset parametrit (Rossmann 2015)</i>	21
<i>Taulukko 3 Viherkattoparametrit (Krebs et al. 2016, *Rakennustieto 2016b)</i>	23
<i>Taulukko 4 Skenaarioiden kuvaukset</i>	27
<i>Taulukko 5 Skenaarioiden vesitasevertailu, 25.–27.8.2012</i>	28
<i>Taulukko 6 Skenaarioiden vesitasevertailu, 4.–5.10.2012</i>	28
<i>Taulukko 7 Viherkattoskenaarioiden tunnuksset</i>	31
<i>Taulukko 8 Eri viherkattoskenaarioiden vesitasevertailu, koko valuma-alue, 25.–27.8.2012</i>	32
<i>Taulukko 9 Eri viherkattoskenaarioiden vesitasevertailu, koko valuma-alue, 4.–5.10.2012</i>	33
<i>Taulukko 10 Kattojen vesitasetarkastelu, viherkatot vs. alkuperäiset katot 25.–27.8.2012</i>	36
<i>Taulukko 11 Kattojen vesitasetarkastelu, viherkatot vs. alkuperäiset katot 4.–5.10.2012</i>	36

1 Johdanto

Kaupungistuminen ja läpäisemättömien pintojen lisääntyminen ovat muuttaneet kaupunkien hydrologiaa (Fletcher et al. 2013), lisänneet valuntaa ja kasvattaneet huippuvirtaamia (Sillanpää 2013, Mejía & Moglen 2010). Siksi kaupunkisuunnittelussa ja rakentamisessa on tärkeää huomioida hulevedet ja niiden hallinta jo varhaisessa vaiheessa.

Aiemmin hulevedet on nähty vain ongelmana, josta pitää päästä eroon, mutta yhä useammin ne pyritään liittämään osaksi kaupunkirakenteita ja -maisemaa (Fletcher et al. 2013). Hulevesien hallittu johtaminen auttaa myös välttämään vahinkoja rakennuksille ja muille rakenteille tulvatilanteissa (Suomen Kuntaliitto 2012). Hulevesien hallinta on tullut osaksi kaupunkisuunnittelua ja päätöksentekoa myös Suomessa, ja useilla kunnilla on omat hulevesiohjelmasa. Hulevesien hallintaan ja käsittelyyn kestäväällä tavalla voidaan vaikuttaa esimerkiksi kaavoituksella (Rakennustieto 2015).

Hulevesien hallinta koskettaa monia eri hallinnonaloja ja suunnittelun tasoja (Turku 2016). Se liittyy kiinteästi muun muassa kaupunkisuunnitteluun, kaavoitukseen, rakentamiseen ja vesihuoltoon. Syksyllä 2014 hulevesien hallinta siirrettiin vesihuoltolain alaisuudesta maankäyttö- ja rakennuslakiin (Rontu 2014). Maankäyttö- ja rakennuslakiin lisättiin uusi luku 13a hulevesiä koskevista erityisistä säännöksistä (MRL 2014). Vesihuoltolakiin puolestaan lisättiin uusi hulevesien viemäroinnin järjestämisestä ja hoitoa koskeva luku 3a (VHL 2014). Lainmuutoksen jälkeen hulevedet eivät enää ole osa vesihuoltoa, vaan ”rakennetulla alueella maan pinnalle, rakennuksen katolle tai muulle pinnalle kertyviä sade- tai sulamisvesiä” sekä ”perustusten kuivatusvesiä” (MRL 2014). Sen sijaan että hulevedet johdettaisiin jätevesiviemäriin, tavoitteena on niiden imeytys ja viivytyt syntypaikalla. Lain mukaan vastuu hulevesien hallinnasta kiinteistöllä on nyt kiinteistön omistajalla tai haltijalla, ja kunnan tehtävä on valvoa säädösten noudattamista. Asemakaava-alueella hulevesien hallinnan järjestämisestä vastaa kunta.

Turun sataman valuma-alueella on käynnissä useita asemakaavahankkeita, joissa kaupunkirakennetta halutaan tiivistää rakentamalla lisää esimerkiksi asuntoja (Turku 2015). Kaupunkirakenteen tiivistyminen muuttaa läpäisevien pintojen määrää ja luonnetta. Turussa hulevesien hallintaan liittyviä ongelmia ovat rankkasadetulvat, joissa merivesi on osatekijä, sekä hulevesien pääsy jätevesiviemäriin, mikä heikentää laitoksen puhdistustehoa ja aiheuttaa ohijuoksutuksia (Turku 2016). Hule- ja jätevesiä keräävät sekaviemärit ovat olleet yleisiä vanhoissa eurooppalaisissa ja amerikkalaisissa kaupungeissa, mikä voi johtaa sekaviemärin kapasiteetin ylittymiseen rankkasateiden aikana (Delleur 2003). Ilmastonmuutos ja kaupungistuminen yhdessä voivat lisätä hulevesivirtaamia ja jätevesien määrää, mikä voi entisestään laskea järjestelmän kapasiteettia (Semadeni-Davies et al. 2008). Merivedenpinta ja hulevesiverkoston matala sijainti aiheuttavat Turussa rankkasateiden aikana putkiston kapasiteettiin liittyviä ongelmia. Tulevaisuuden muutokset vahvistavat entisestään tarvetta suunnitella ja hallita mahdollisesti lisääntyviä hulevesimääriä.

Mallintamalla voidaan saada lisätietoa hulevesiverkостosta, kaupunkihydrologiasta, tulvariskeistä sekä tukea päätöksentekoon ja kaupunkisuunnitteluun (Jacobson 2011, Ranger et al. 2011, Hsu et al. 2000). SWMM5 on yhdysvaltalainen avoimen lähdekoodin mallinnusohjelma, jota on käytetty paljon hulevesien mallinnukseen ja tulvariskien arvioimiseen eri puolilla maailmaa hyvin erilaisissa olosuhteissa, muiden muassa Latviassa (Koudelak & West 2008), Vietnamsissa (Huong & Pathirana 2011), Intiassa (Ranger et al. 2011) ja Etelä-Koreassa (Jang et al. 2007).

Kaupungistumisen lisäksi ilmastonmuutoksesta johtuva merivedenpinnan nousu voi lisätä ongelmia hulevesiverkostoissa rannikoilla. Siksi meriveden yhteys viemäriverkostoon ja mahdolliseen lisääntyvään tulvariskii on tärkeää huomioida jo suunnittelun alkuvaiheessa (Ranger et al. 2011, Titus et al. 1987). Suomessa maan kohoaminen on tähän asti kumonnut ilmastonmuutoksesta johtuvan merenpinnan nousun, mutta etelärannikolla tilanne on muuttumassa: vuosisadan loppuun mennessä Suomenlahdella merenpinta voi korkeimpien ennusteiden toteutuessa nousta jopa 90 cm (Ilmatieteenlaitos 2013).

Merivedenkorkeuden vaikutuksista rannikoilla sijaitsevan hulevesiverkoston toimintaan ja siihen liittyvistä SWMM5-mallinnuksista ei ole vielä saatavilla kovin paljon julkaistua tutkimustietoa. Huong & Pathirana (2011) tutkivat SWMM:n avulla kaupungin tulvariskiä ja ilmastonmuutoksen vaikutusta. Vietnamin Can Thon kaupungissa viemäriverkosto sijaitsee vain reilut 0,5 m merivedenpinnan yläpuolella ja se on kapasiteetiltaan riittämätön. Tulevaisuudessa merivesi voi korkeimpien ennusteiden mukaan nousta siellä jopa 1 m nykyisestä tasosta. Lisäksi alueella esiintyy rankkoja sateita ja hulevesiverkosto kattaa vain osan alueesta. Pahimmassa skenaariossa, jossa yhdistyivät 1 m merenpinnan nousu, virtaaman kasvu Mekong-joessa ja kaupungistumisesta johtuvat muutokset alueella, maksimitulvan syvyys kasvoi mallin mukaan jopa 80 % (Huong & Pathirana 2011). Etelä-Koreassa SWMM-ohjelmaa sovellettiin kaupungistumisen vaikutusten mallintamiseen käyttäen 50 vuoden suunnittelusadetta. Eri mallinnustyökaluja vertailevassa tutkimuksessa todettiin, että SWMM soveltuu hyvin kaupungistumisen ennen ja jälkeen -vaiheiden mallintamiseen (Jang et al. 2007).

Hulevesien hallintaan on tarjolla monia keinoja, joille tyypillistä on tavoite pidättää ja käsitellä hulevesiä niiden syntypaikoilla (Suomen Kuntaliitto 2012) ja joista käytetään usein nimitystä LID (*low impact development*). Yksi paljon viime vuosina tutkittu ja myös mallinnettu LID-rakenne ovat viherkatot (Krebs et al. 2016, Ahiablame et al. 2012, Gambi et al. 2011, Mentens et al. 2006). Viherkatolla voidaan lisätä muuten läpäisemättömän kattopinnan pidätys- ja viivytyiskykyä ja näin vähentää valuntaa ja madaltaa valuntahuippuja (Rakennustieto 2016a, Burszta Adamiak & Mrowiec 2013, Ahiablame et al. 2012, Bengtsson et al. 2005). Viherkattojen avulla voidaan useiden tutkimusten mukaan saavuttaa jopa noin 70 prosentin vedenpidätys verrattuna tavallisiin kattoihin (Burszta Adamiak & Mrowiec 2013, Bliss et al. 2009). Muita LID-rakenteita ovat esimerkiksi läpäisevät päällysteet, sadevesisäiliöt, viherpainanteet ja biosuodatus (Raudaskoski 2016, Rossman 2015).

Viherkaton kyky pidättää vettä ja vähentää valuntaa riippuu muun muassa paikasta, katon ominaisuuksista (esimerkiksi kasvukerroksen paksuus ja katon kaltevuus), alkukosteudesta ennen sadetapahtumaa, vuodenajasta, sadetapahtuman kestosta ja sademäärästä (Li 2015, Czemieli Berndtsson 2010, VanWoert et al. 2005). Myös paikallinen ilmasto ja viherkaton kasvillisuus vaikuttavat sen toimintaan (Schroll et al. 2011). Viherkaton valuntaa vähentävä vaikutus perustuu pidätyskyvyn lisäksi haihduntaan (Raudaskoski 2016). Siksi sadetapahtumien välillä olevilla kuivilla jaksoilla voi olla merkitystä viherkattojen pidätyskykyyn.

Viherkattojen tarkka mitoitus ja toimivuuden ennustaminen voivat olla vaikeita, koska ne riippuvat niin monista katon ominaisuuksiin liittyvistä tekijöistä sekä ajasta ja paikasta. Mallinnuksen avulla voidaan saada viitteitä viherkattojen toimivuudesta ja tutkia erilaisten viherkattoratkaisujen pidätyskykyä. Viherkatto koostuu yksinkertaisimmillaan kolmesta kerroksesta: kasvillisuus-, kasvualusta- ja salaojakerros, joiden avulla viherkattoja mallinetaan esimerkiksi SWMM5:ssä. Lisäksi viherkattoihin kuuluu muita rakennusten suoja-

uksen kannalta oleellisia kerroksia kuten juurisuojaus sekä veden- ja lämmöneristeet (Rakennustieto 2016a). Viherkattoja voidaan luokitella useilla tavoilla. Suomessa suositaan luokittelua kasvillisuuden ja kasvukerroksen paksuuden perusteella: maksaruohokatto (60–80 mm), niitty/ketokatto (150–200 mm), heinäkatto (200–300 mm) ja kattopuutarha (200–1000 mm) (Rakennustieto 2016a).

Hulevesien pidättämisen ja laadun parantamisen lisäksi on useita muitakin käytännöllisiä, esteettisiä ja viihtyisyyttä lisääviä syitä rakentaa viherkattoja (Rakennustieto 2016a). Niitä voidaan käyttää esimerkiksi lämpöeristeenä, lämpösaarekevaikutuksen vähentämisessä, luonnon monimuotoisuuden lisäämisessä ja vesi- ja viheralueiden luomisessa kaupunkiympäristöön (Bengtsson et al. 2005). Viherkattoja ei pitäisikään ajatella ratkaisuna vain yhteen tekniseen ongelmaan kerrallaan, vaan pitäisi nähdä niiden avulla saatava laajempi hyöty (Czemiel Berndtsson 2010).

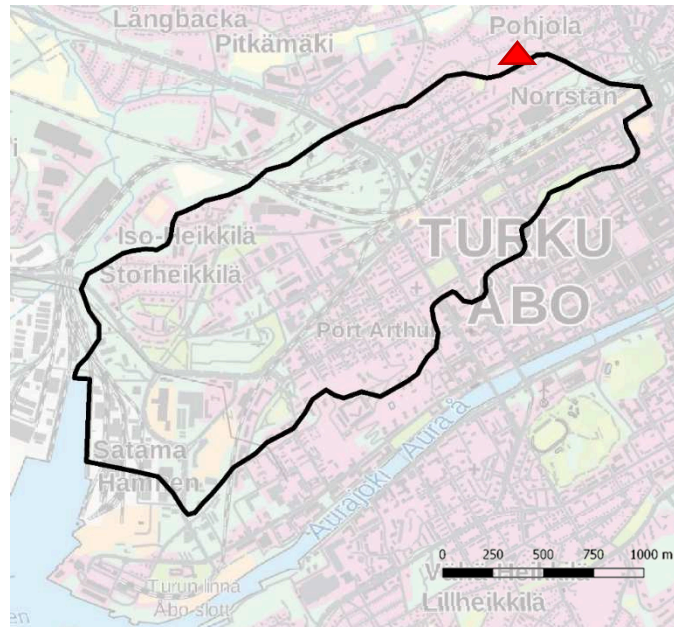
Hulevesistä ja veden tulvimisesta kiinteistöihin ja kaduille on aiheutunut Turussa merkittäviä ongelmia viime vuosina. Viranomaisille hulevesiongelma-kohteiden kartoittamiseksi tehdyn kyselytutkimuksen mukaan vuosina 2005–2014 tulvatapahtumia oli raportoitu yhteensä 276 (Turku 2016). Niistä noin 40 sijaitsee sataman valuma-alueella.

Tämän työn tavoite oli mallintaa Turun sataman hulevesiverkostoa ja tarjota lisätietoa hulevesiverkoston toiminnasta ja mahdollisista ongelmapaikoista erityisesti tulevaa kaavoitusta ja muuta maankäytön suunnittelua varten. Lisäksi tavoitteena oli tutkia viherkattojen vaikutusta valuma-alueen hulevesien pidätyskykyyn. Viherkattojen vaikutusta haluttiin tutkia SWMM5:n avulla, jotta tuloksia voitaisiin käyttää myös päätöksenteon ja suunnittelun tukena.

Työn tavoitteena oli rakentaa kaupunkihydrologinen malli Turun sataman valuma-alueelle *Storm water management model* (SWMM) -ohjelmalla. Mallin rakennus tehtiin vastikään kehitetyllä GisToSWMM5-ohjelmalla. Alueen hulevesiä ei ollut ennen mallinnettu tällä tarkkuudella. Tavoitteena oli arvioida valuma-alueen tulvaherkkyyttä eri skenaarioiden avulla ja tarjota tietoa suunnittelun tueksi. Skenaarioissa tutkittiin merivesitulvan, jätevedenpuhdistamolta tulevan virtaaman ja viherkattojen vaikutusta valuntaan rankkasadetapahtuman aikana. Kakolan jätevedenpuhdistamolle suunnitellaan erillistä mereen johtavaa purkuputkea, koska hulevesiverkoston kapasiteetin on havaittu olevan rajallinen. Siksi mallin avulla tutkittiin tilannetta, jossa puhdistamolta ei enää tulisi lainkaan vettä hulevesiverkoston. Lisäksi haluttiin selvittää, miten tilanne, jossa merivesi on hyvin korkealla samaan aikaan rankkasadetapahtuman kanssa, vaikuttaa hulevesiverkoston toimintaan sekä tutkia veden reitittymistä läpäisevien ja läpäisemättömien alueiden välillä mallissa. Mallinnettuja tulvia myös verrattiin aiemmin valuma-alueelta kerättyihin tulvahavaintoihin. Työ oli osa Varsinais-Suomen ELY-keskuksen koordinoimaa EU-Kiina -hanketta.

2 Tutkimusalue ja aineistot

Turun sataman valuma-alue sijaitsee Lounais-Suomessa Turun keskustassa (kuva 1). Alue rajautuu Turun päärautatieasemalta ja linja-autoasemalta Iso-Heikkilän ja Port Arthurin kaupunginosien kautta Turun satamaan (kuva 1). Valuma-alue on pinta-alaltaan noin 3 km².



Kuva 1 Turun sataman valuma-alue ja Juhannuskukkulan sääasema valuma-alueen pohjoispuolella (punanen kolmio).

Alueen yläosa on melko tiiviisti rakennettua kaupunkikeskustaa. Geologisen tutkimuskeskuksen maaperäkartan perusteella suurin osa valuma-alueesta on täytemaata (GTK 2016). Täytemaan paksuudesta ja sen alla olevasta maalajista ei ole tarkkaa tietoa, mutta se on todennäköisesti savea. Pieniä viheralueita on melko paljon ja valuma-alueen pohjoisosassa on myös metsäistä maastoa. Muutamissa kohdissa näkyvissä on avokalliota. Rautatie kulkee alueen halki satamaan. Valuma-alueen alempi puolikas sijaitsee alueella, joka on vuonna 2011 määritetty merkittäväksi tulvariskialueeksi (Tulvakeskus 2016). Alaosassa sijaitsee muun muassa satama- ja teollisuusalueita.

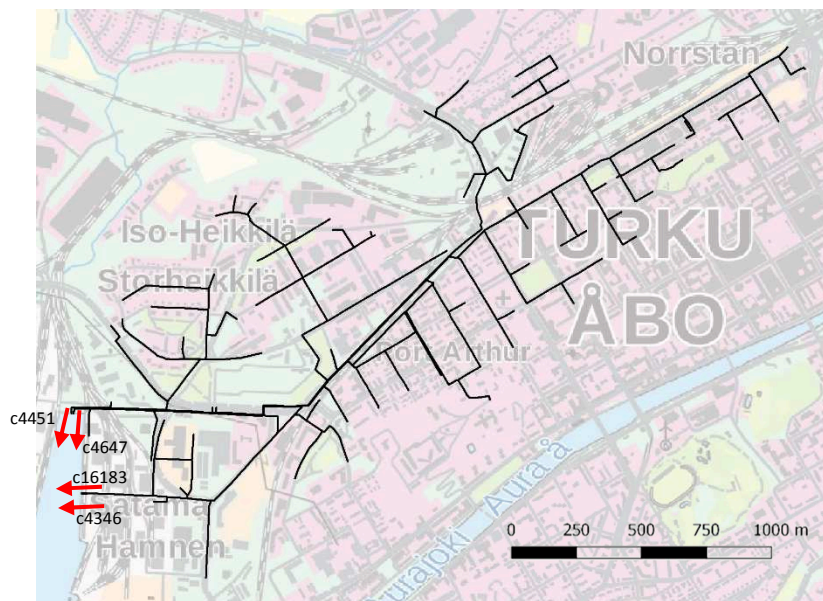
Sataman valuma-alueen hulevedet kootaan kaduilta ja piha-alueilta hulevesiviemäriverkostoon (kuva 2). Verkoston runkolinja kulkee Ratapihankadun ja Tukholmankadun alla, minkä jälkeen se haarautuu. Ennen haarautumista linjaan liittyy myös Kakolanmäen jätevedenpuhdistamon purkuputki. Haarautumat kulkevat Pansiontien ja Nosturikadun suuntaisesti ja purkavat vetensä Linnanaukon satama-altaaseen kahdessa kohdassa. Purkuputkia on kaksi kummassakin haarassa. Tarkastellussa hulevesiverkosto-osuudessa on putkia yhteensä noin 23 km. Mallinnetut putket ovat muutamia poikkeuksia lukuun ottamatta betonia ja niiden halkaisijat ovat 0,25–1,8 m. Hulevesikaivoja tarkastellussa verkostossa on yhteensä 580. Hulevesiverkoston vanhimmat putket ovat verkostokartan mukaan peräisin 1930-luvulta. Maastokäynneillä havaittiin useita painuneita hulevesikaivoja, joiden muodostamiin painanteisiin kertyy vettä sateella.

Hulevesiverkoston kapasiteettiin sataman valuma-alueella vaikuttaa tällä hetkellä hulevesiverkostoon liittyvä Kakolanmäen jätevedenpuhdistamon purkuputki. Kakolanmäen

jätevedenpuhdistamolla puhdistetaan Turun ja yhdeksän muun lähikunnan jätevedet eli yhteensä lähes 300 000 seudun asukkaan sekä teollisuuden jätevedet (TSP 2015).

Toinen kapasiteettiin vaikuttava tekijä on merenpinnan alapuolella sijaitseva verkoston alaosa. Alavasta maastosta johtuen verkoston alaosassa noin 3 km eli noin 13 % koko tarkastellusta verkostosta on merenpinnan alapuolella. Käytännössä hulevesiverkoston alaosassa on siis aina jonkin verran sekä merivettä että puhdistettua jätevettä. Merivesi voi riittävän korkealle noustessaan päästä viemärin kautta jopa puhdistamolle asti, minkä vuoksi puhdistamolle tuleva vesimäärä voi korkean merenpinnan vuoksi kasvaa, vaikka samaan aikaan ei sataisikaan (Leino 2012).

Leinon (2012) mukaan vuoden 2012 rankkasadetapahtumien aikana viemäriverkostossa esiintyi ohituksia ja ylivuotoja poikkeuksellisen suurten vesimäärien vuoksi. Puhdistamon tehoa heikentävät kovien sateiden aikana sinne sekaviemärien kautta tulevat hulevedet. Hulevesitulvia esiintyi vuonna 2012 muun muassa Port Arthurin alueella, missä vettä tulvi kaivoista talojen kellareihin ja kaduille. Puhdistamo joutui rajoittamaan tulevan veden virtaamaa, koska jätevesi alkoi tulvia puhdistamolla poistoputken padotuksen vuoksi. Ylivuotokaivoa ei pystytty käyttämään ohituksiin, koska kaduille tulvineet hulevedet olivat lukinneet ylivuotokaivon takaiskuventtiilit.



Kuva 2 Sataman valuma-alueen hulevesiverkosto ja purkupisteet (c4451, c 4647, c16183, c4346).

Mallia varten kerättiin paikkatietoaineistoja tarkasteltavalta valuma-alueelta. Hulevesiverkosto-aineisto koostui putkista ja sadevesikaivoista. FCG-SWMM-mallista saatiin verkoston putki- ja kaivotiedot. Epäselvät kohdat verkostossa tarkistettiin Turun kaupungin vesilaitokselta, verkostokartasta ja TSP Oy:ltä. Korkeusaineistot hankittiin Maanmittauslaitokselta. Rakennukset sekä liikenne- ja puistoalueet saatiin Turun kaupungilta valmiina paikkatietoaineistoina. Niiden ulkopuoliset alueet ja läpäisevyys määritettiin käsin Turun kaupungin kartta-aineiston ja ilmakuvan, maastokäyntien sekä *Google Street view*:n avulla.

Merivedenkorkeustiedot hankittiin Ilmatieteen laitokselta. Sadeaineistot saatiin Turun kaupungin omalta mittausasemalta, Juhannuskukkulalta, joka sijaitsee valuma-alueen pohjoispuolella (kuva 1). Juhannuskukkulalla on käytössä Vaisala WXT 520 -

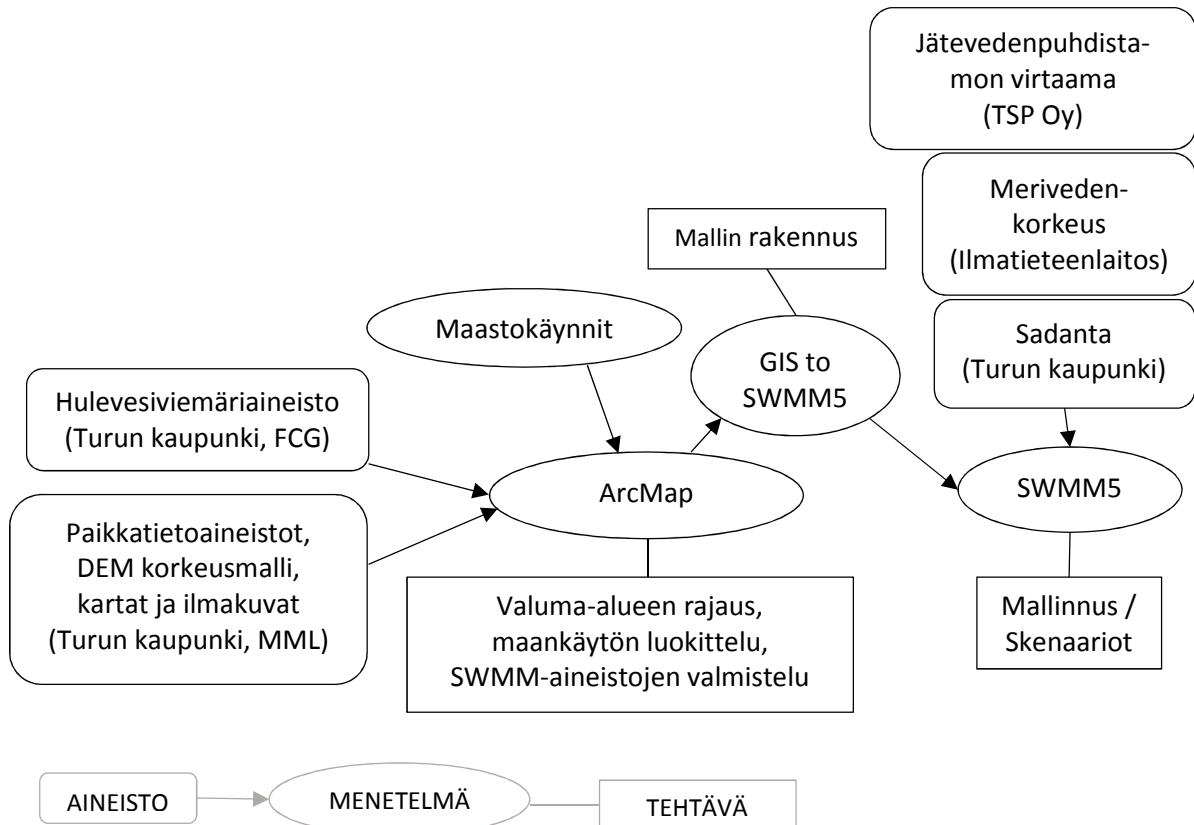
säälähetin, joka sijaitsee 70 m korkeudessa merenpintaan nähden. Laite on uusittu vuonna 2010. Vuoden 2012 rankkasateiden ja tulvien jälkeen annetun Turun kaupungin ympäristönsuojeluyksikön lausunnon mukaan ”pitkän aikavälin sadantatulokset ovat lähellä Ilmatieteen laitoksen Artukaisen aseman tuloksia silloin, kun sade tulee vetenä” (Turku 2012).

Käytössä olivat sademäärät ja lämpötilatiedot. Mallinnus tehtiin jaksoille 25.8.–27.8.2012 ja 4.–5.10.2012. Elokuun sadetapahtuman on arvioitu olevan toistuvuudeltaan harvinaisempi kuin kerran 200 vuodessa tapahtuva (Aaltonen et al. 2008). 26.8.2012 Ilmatieteenlaitoksen Artukaisella mitattiin 68,6 mm vuorokauden sadekertymäksi. Käytännössä suurin osa vedestä tuli muutaman tunnin aikana aamuyöllä 27.8.2012. Lokakuussa 4.10. puolestaan satoi 32,3 mm ja 5.10. 21,4 mm vuorokauden aikana.

Kakolanmäen jätevedenpuhdistamolta saatiin tulevien virtaamien tiedot tarkastelujaksoilta. Lähtövirtaamista ei ole mittaustietoa, mutta puhdistamolta saadun tiedon mukaan tulevan ja lähtevän veden määrä on sama. Puhdistetut jätevedet johdetaan kahden putken kautta hulevesiverkoston runkolinjassa sijaitsevaan kaivoon. Normaaleilla virtaamilla jätevedenpuhdistamolla vesien viipymä on puhdistamolta saatujen tietojen mukaan 36 h. Puhdistamolta saadun arvion mukaan tulvatilanteessa viipymä on vain noin 6 min, joten virtaamat syötettiin malliin ilman muutoksia ajan suhteen.

3 Menetelmät

Paikkatietoaineistojen, karttojen, ilmakuvien ja maastokäyntien avulla määritettiin valuma-alueen maankäyttö. Sataman valuma-alueen käsittävä hulevesiverkostomalli saatiin FCG:ltä. Sitä tarkistettiin Turun Vesilaitoksen verkostokartan avulla. Warsta et al. (2016) tarjosivat käyttöön vastikään kehitetyn GisToSWMM5-ohjelman. Mallinnuksessa käytetyt sadantatiedot saatiin Turun kaupungin omalta mittauspisteeltä, merivedenkorkeustiedot Ilmatieteenlaitokselta ja jätevedenpuhdistamon virtaamatiedot TSP:ltä. Työn vaiheet, menetelmät ja aineistot on esitetty kuvassa 3.



Kuva 3 Tutkimuksen aineistot ja menetelmät.

3.1 Maankäyttö ja valuma-alueerajaus

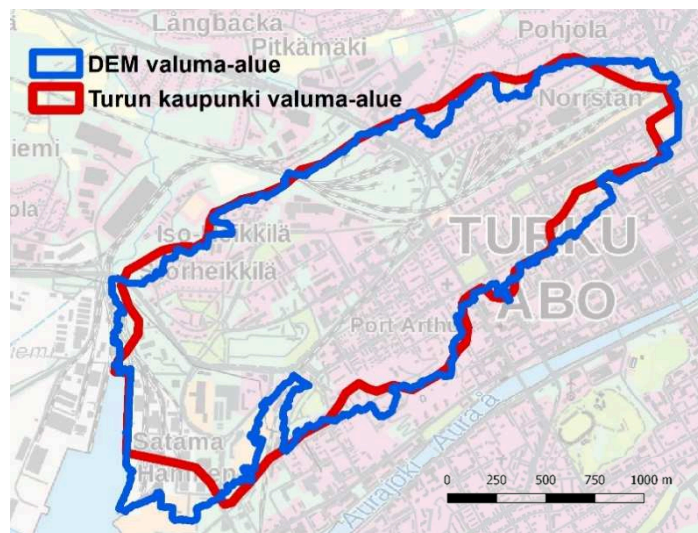
Sataman valuma-alue on suurelta osin täytemaata (GTK 2016), jonka alla on todennäköisesti savea. Tällä on vaikutusta etenkin sora- ja hiekka-alueiden läpäisevyyteen, koska maakerrosten paksuudesta ei ole tietoa. Läpäiseväksi luokiteltu sora-alue saattaa todellisuudessa olla lähes läpäisemätön, jos saven päällä oleva sorakerros on ohut. Tämä huomioidiin ja sen vaikutusta tutkittiin mallin hydraulisia parametreja määritettäessä.

Paikkatietoaineistoja käsiteltiin ArcMap 10.3.1 -ohjelmalla sekä avoimen lähdekoodin QGis 2.14.1 -ohjelmalla. Turun kaupungilta saadun valuma-alueerajauksen (kuvassa 4 punaisella) paikkansapitävyys tarkistettiin tekemällä uusi rajaus ArcMap-ohjelmalla DEM 2x2 m -korkeusmallista (kuvassa 4 sinisellä). Uuden rajauksen tekemiseen käytettiin menetelmää, jossa määritettiin valuma-alueen rajat DEM-korkeusaineistosta ArcMap-

ohjelmalla. Ensin valuma-aluearjaus määritettiin suoraan korkeusaineistosta Watershed-työkalulla, mikä johti valuma-alueen levittäytymiseen paljon oletettua laajemmalle alueelle.

Seuraavaksi verkosto ”poltettiin” korkeusaineistoon *Raster Calculator* -työkalun avulla alentamalla putkien kohdalla olevien solujen korkeusarvoja (Tikkanen 2013, Gironás et al. 2010). Sen jälkeen mahdollisesti virheitä aiheuttavat kuopat täytettiin *Fill*-työkalulla ja valuma-alueet määritettiin *Watershed*-työkalulla (Tikkanen 2013). Näin määritetyn valuma-alueen kooksi tuli noin 3,13 km² ja rajausta vastasi huomattavasti paremmin alkuperäistä rajausta (kuva 4).

Rajaukset ovat muutamia poikkeuksia lukuun ottamatta hyvin lähellä toisiaan (kuva 4). Molemmilla rajauksilla tehtiin muutama testisimulaatio ja -parametrisointi, joiden perusteella rajauksella ei ollut merkittävää vaikutusta mallin antamiin tuloksiin. Lopullisessa mallinnuksessa käytettiin Turun kaupungilta saatua rajausta.



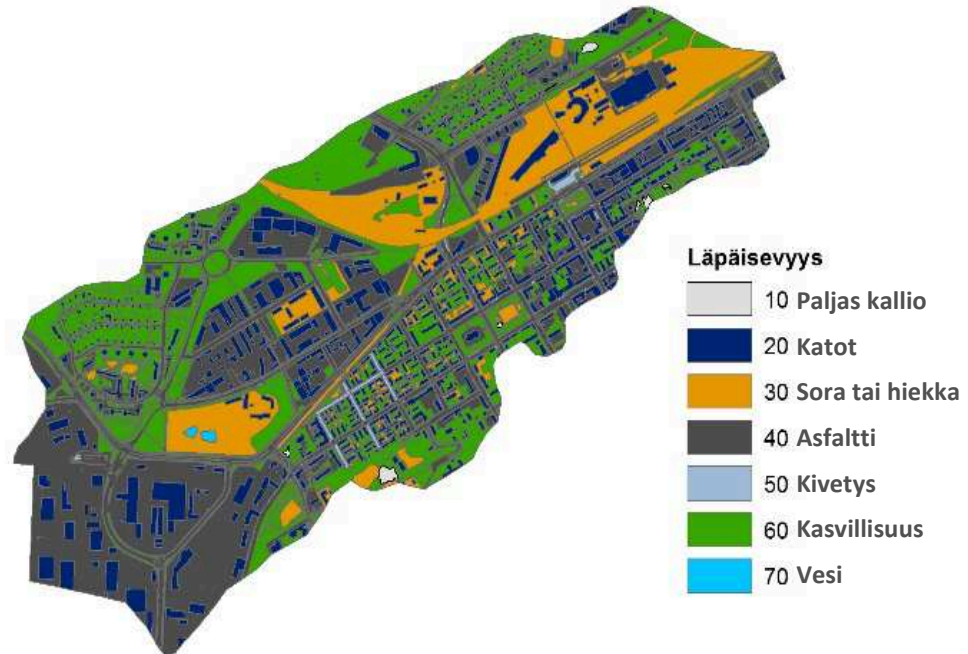
Kuva 4 Mallinnuksessa käytetty valuma-aluearjaus (punainen) ja tarkistusarjaus (sininen).

Kaikkien kattojen oletettiin liittyvän suoraan viemäriverkostoon. Maankäyttö ja alueet luokiteltiin läpäisevyyden perusteella (kuva 5). Läpäisemättömiä alueita on vain hieman enemmän kuin läpäiseviä alueita (taulukko 1).

Taulukko 1 Valuma-alueen ominaisuudet.

Maankäyttö	ala (ha)	osuus (%)
Läpäisevä (sora tai hiekka, kasvillisuus)	129	43
Läpäisemätön (kallio, katto, asfaltti, kivetys, vesi)	172	57
Yhteensä	301	100

Noin 36 % valuma-alueesta on asfaltin peitossa. Kasvillisuutta on vajaa kolmasosa pinta-alasta. Rakennusten katot peittävät 17 % alueen pinta-alasta. Sora tai hiekka peittää 14 % alueesta, mistä suuri osa kuuluu rautatiehen ja ratapihaan. Suuri hiekkainen kenttä on myös Iso-Heikkilän ja Port Arthurin alueiden välisessä Vaasanpuistossa, jota käytetään lumenkaatopaikkana.



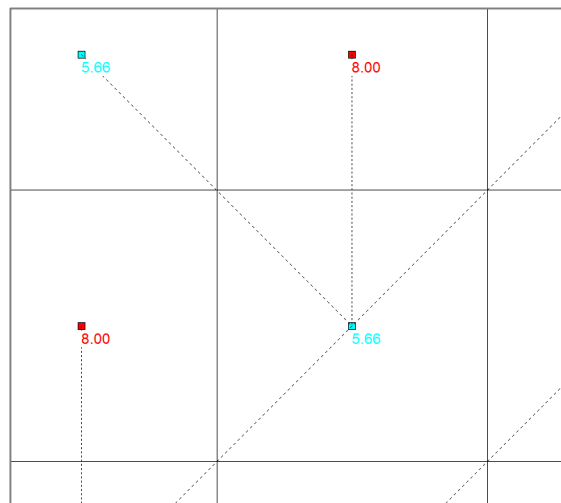
Kuva 5 Valuma-alueen maankäyttö luokiteltuna läpäisevyyden perusteella.

3.2 GisToSWMM5

Warsta et al. (2016) ovat vastikään kehittäneet GisToSWMM5 -ohjelman, joka muuntaa rasterimuotoisen maankäyttö- ja korkeusaineiston sekä vektorimuotoisen putkistokuvauksen automaattisesti SWMM5-luettavaan muotoon. Ohjelman käyttö nopeuttaa mallin rakentamista merkittävästi, koska käsin tehtynä usein työläät vaiheet on nyt automatisoitu (Warsta et al. 2016). Ohjelmaa käytettiin tässä työssä ensimmäistä kertaa näin laajalla valuma-alueella.

Ohjelmaan syötetään rasterimuotoiset korkeus- ja maankäyttöaineistot, hulevesiverkoston geometria ASCII-muodossa ja maankäyttö ja parametritiedot tekstitiedostoina (Liite 1). Niiden ja erilaisten asetustiedostojen pohjalta ohjelma luo SWMM5-luettavan syötetiedoston (.inp). Ohjelma asettaa valitun resoluution mukaisen laskentaverkon tarkastelualueen päälle ja jakaa valuma-alueen pienempiin osiin niin, että jokaisesta laskentasuorasta tulee yksi alivaluma-alue (Warsta et al. 2016). Sataman valuma-alueella yhden alivaluma-alueen koko oli $8 \times 8 \text{ m}^2$. Resoluutiota ei tarkennettu valuma-alueen laajuuden vuoksi ja malliajojen hidastumisen välttämiseksi. Alivaluma-alueita muodostui käytetyllä tarkkuudella yhteensä 47 056. Jokaiselle solulle määritettiin maankäyttö ja läpäisevyys rasteriaineistojen perusteella.

Warsta et al. (2016) kehittämä ohjelma laskee kunkin solun keskikaltevuuden viereisten solujen kaltevuuksien aritmeettisena keskiarvona. Virtausreititin ohjelma laskee D8-menetelmällä, jossa jokaisesta solusta lähtevä virtaus ohjataan viereiseen soluun kohti jyrkintä kaltevuutta. Kattosolut reititetään lähimpään hulevesikaivoon. Solut, joissa on hulevesikaivo, reititetään verkostoon. Lämpäisemättömistä painanteista vesi johdetaan lähimpään hulevesikaivoon, mutta läpäisevillä alueilla olevista painanteista vettä ei johdeta suoraan verkostoon. Valuma-alueelta valuntaa tuottavan alueen leveyttä kuvaava *width*-arvo määritetään automaattisesti laskentaverkon perusteella. Soluille, joista virtaus lähtee kohtisuoraan viereiseen soluun *width*-arvoksi tuli 8 m. Soluille, joista virtaus lähtee vinosti kohti kulmanaapuria *width*-arvoksi tuli 5,66 m (kuva 6).



Kuva 6 GisToSwmm5-ohjelman laskemat *width*-arvot alivaluma-alueille. Yhden solun koko on $8 \times 8 \text{ m}^2$. Luku 8.00 kuvaa *width*-arvoa soluille, joista virtaus lähtee kohtisuoraan viereiseen soluun ja 5.66 soluille, joista virtaus lähtee vinosti. Katkoviivat kuvaavat virtauksen suuntaa solujen välillä.

3.3 Storm Water Management Model (SWMM5)

Storm Water Management Model (SWMM) on Yhdysvaltain ympäristönsuojeluviraston (US-EPA) alun perin vuonna 1971 kehittämä avoimen lähdekoodin mallinnustyökalu, jonka tuorein versio on SWMM 5.1. Rossman (2015) mukaan SWMM:n avulla on mahdollista mallintaa valuntaa ja virtaamia maan pinnalla ja hulevesiverkostossa. Tarkasteltava alue jaetaan pienempiin alivaluma-alueisiin, joita käsitellään mallissa epälineaarisina varastoina. Niihin tuleva vesi on peräisin joko sadannasta, yläpuolisilta alivaluma-alueilta tai molemmista. Alivaluma-alueella vesi voi haihtua, imeytyä, jatkaa pintavaluntana seuraaviin alivaluma-alueisiin tai sadevesikaivoon riippuen kunkin alueen ominaisuuksista.

SWMM:ssä on käytettävissä useita virtaus- ja imeytymismallivaihtoehtoja (Rossman 2015). Tässä työssä käytössä oli *Dynamic wave* -virtausmalli ja *Green-Ampt* -imeytymismalli. SWMM5 on yksi harvoista mallinnustyökaluista, joissa virtauksen reititys hulevesiverkostoon ja alivaluma-alueiden välillä on mahdollista ja jossa on mahdollista käyttää *dynamic wave* -reititystä verkostossa (Elliott & Trowsdale 2007).

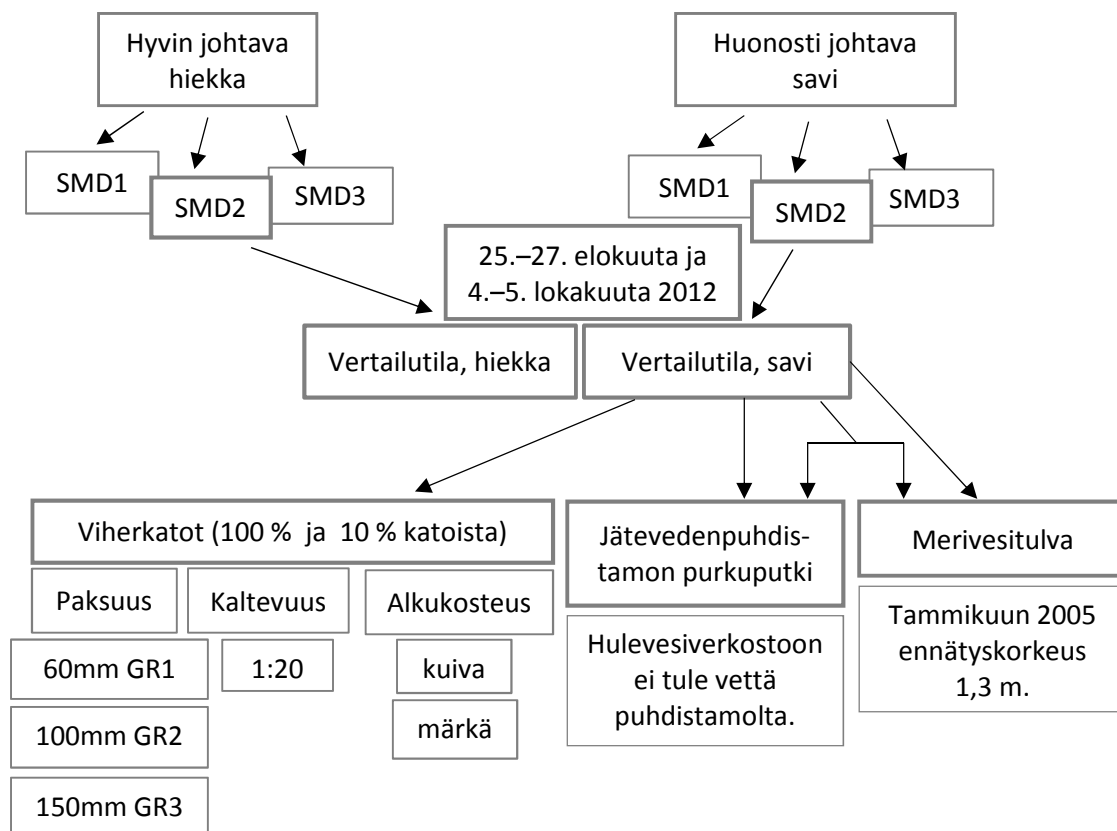
Green-Ampt -imeytymismalli olettaa, että maassa ylimpänä on vedellä kyllästynyt puskuri, joka erottaa pintamaan sen alapuolisesta kuivemmasta maasta (Rossman 2015). *Dynamic*

wave -virtausmalli puolestaan käyttää yksiulotteista *Saint Venant* -virtausyhtälöä. Se sisältää jatkuvuuden ja liikemäärän yhtälöt putkissa sekä tilavuuden jatkuvuusyhtälön kaivoissa. Näin on Rossman (2015) mukaan mahdollista esittää paineistettu virtaama putken täytyessä niin, että virtaama voi ylittää täyden putken normaaliarvon. Tulvimista tapahtuu, kun kaivon vesisyvyys on suurempi kuin kaivon maksimisyvyys.

SWMM5:ssä tulvivia kaivoja voidaan käsitellä kahdella tavalla. Kaivosta tulviva vesi joko menetetään systeemistä tai sen annetaan muodostaa määrätyn alueen kokoinen lammikko tai ”vesipatsas” kaivon kohdalle (*allow ponding*), mistä se palaa putkistoon, kun tilaa vapautuu (Rossman 2015). Molempia tulvimisvaihtoehtoja kokeiltiin, mutta lopullisessa mallinnuksessa käytettiin vaihtoehtoa, jossa tulviva vesi menetetään systeemistä. Jotta tulviva vesi voisi palata verkostoon, pitäisi määritellä pinta-ala, jolle se voi muodostaa lammikon kaivon kohdalle. Tämän alueen realistinen määrittäminen kaikille kaivoille havaittiin kuitenkin vaikeaksi. Kun kokeiltiin esimerkiksi 2 m²:n aluetta, muodostui osalle kaivoista vesipatsas, joka saattoi olla syvyydeltään jopa parikymmentä metriä. Antamalla tulvaveden poistua systeemistä nähtiin selkeästi, kuinka paljon vettä kaivoista tulvii maan pinnalle mallin mukaan. Reitityksen aika-askeleena käytettiin 5 s, paitsi skenaariossa ilman jätevettä aika-askeleeksi muutettiin 1 s, jotta vesitaseen jatkuvuusvirhe asettui hyväksyttävälle tasolle (< 1 %). Jatkuvuusvirhe kuvaa systeemiin tulevan ja lähtevän veden määrän erotusta suhteessa tulevan veden määrään. Tulvinnalla tarkoitetaan tässä työssä verkostosta poistuvan veden vesisyvyyttä, jonka laskennassa käytettiin koko valuma-alueen pinta-alaa (3 011 584 m²).

3.4 Skenaariot ja parametrit

Skenaariot muodostettiin lähtötietoihin ja suunnittelutarpeisiin perustuen. Mallinnetut skenaariot ja niiden muodostus on esitetty kuvassa 7. Maaperän kosteusvaje (SMD, soil moisture deficit) laskettiin kolmella tavalla, jotta voitiin vertailla maaperän alkukosteuden vaikutusta: SMD1 vähentämällä huokoisuusarvosta lakastumisraja-arvo (*wilting point*) (kuiva maa); SMD2 vähentämällä huokoisuusarvosta maan vedenpidätyskyky-arvo (*field capacity*) (jonkin verran kosteutta maaperässä); SMD3 maaperän kosteusvaje nolla (maa on kokonaan kyllästynyt vedellä). SMD:n arvolla ei juurikaan ollut vaikutusta tuloksiin, joten lopullisiin skenaarioihin valittiin käytettäväksi SMD2.



Kuva 7 Skenaariot ja niiden muodostus. SMD (soil moisture deficit) eli maaperän kosteusvaje laskettiin kolmella tavalla. GR (green roof) tarkoittaa viherkattoa.

3.4.1 Hydrauliset parametrit

Hydraulisia parametreja määritettäessä verrattiin tilanteita, joissa maa on hyvin tai huonosti vettä johtavaa (taulukko 2). Näin mallissa pyrittiin kuvaamaan valuma-alueen pinnan täyttömaan ja alapuolisen savikerroksen mahdollista vaikutusta valuntaan. Parametrit määritettiin kirjallisuuden perusteella hiekalle (hyvin johtava) ja savelle (huonosti johtava) (Rossman 2015). Samoja hydraulisia parametreja sovellettiin valuma-alueen kaikille läpäiseville alueille (hiekka, sora ja kasvillisuus). Testiajoissa hydraulisilla parametreilla ei havaittu olevan suurta vaikutusta purkupuutkien virtaamiin. Muut mallinnuksessa käytetyt parametrit, kuten painannevarasto, Manningin kerroin ja läpäisemättömyys, määritettiin kirjallisuuden avulla (Raudaskoski 2016, Guan et al. 2015a, Rossman 2015, Krebs et al. 2014). Painannevarasto ja Manningin kerroin läpäiseville ja läpäisemättömille pinnoille asetettiin samoiksi (Krebs et al. 2014).

Skenaarioiden mallinnuksessa käytettiin huonosti vettä johtavan saven parametreja, jotka kuvaavat tilannetta, jossa yläpuolinen täyttömaa on kyllästynyt vedellä ja sen alapuolinen savi hidastaa imeytymistä. Näin voitiin tarkastella pahinta mahdollista tilannetta tulvariskin kannalta. Maaperän kosteusvajeena (SMD) käytettiin arvoa, joka määritettiin vähentämällä huokoisuusarvosta maan vedenpidätyskykyarvo. Lisäksi vertailutilaa mallinnettiin hiekan parametreilla, mikä kuvasi tilannetta, jossa pintakerros on kuiva ja pystyy imeyttämään sataneen veden. Näin nähtiin hyvin ja huonosti johtavan maaperän välinen ero.

Taulukko 2 Mallinnuksessa käytetyt hydrauliset parametrit (Rossman 2015).

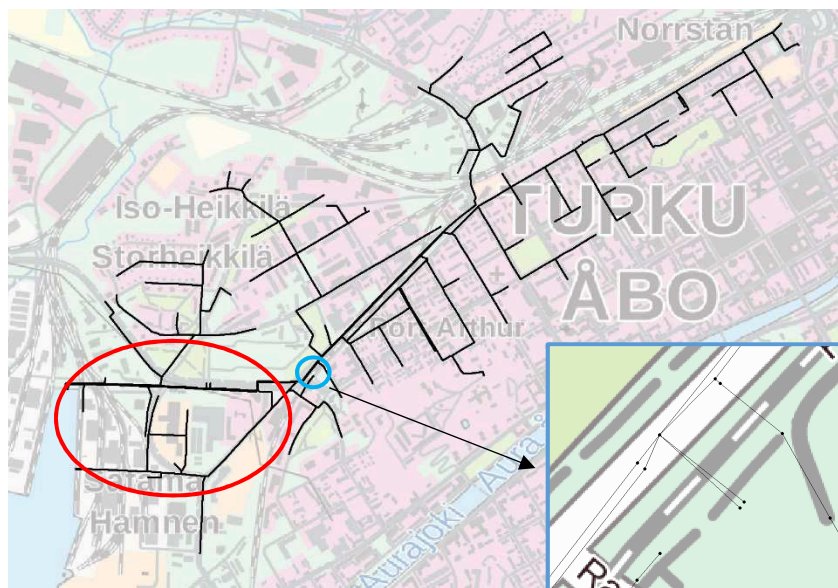
	Johtavuus (mm/h)	Imukorkeus (mm)	Huokoisuus (-)	Vedenpidätyskyky (-)	Lakastumisraja (-)	Maaperän kosteusvaje (-)
Huonosti johtava savi (0-clay)	0.254	320.04	0.475	0.378	0.265	0.097
Hyvin johtava hiekka (0-sand)	120.396	49.022	0.437	0.062	0.024	0.375

3.4.2 Jätevedenpuhdistamon virtaama ja merivesi

Kakolanmäen jätevedenpuhdistamo purkaa tällä hetkellä puhdistetut jätevedet hulevesiverkostoon. Se liittyy hulevesiviemäriin kahdella liityntäputkella (kuvassa 8 sinisellä). Puhdistamolle suunnitellaan erillistä mereen johtavaa purkuputkea, koska hulevesiverkoston kapasiteetin on havaittu olevan rajallinen. Siksi mallin avulla tutkittiin tilannetta, jossa puhdistamolta ei enää tulisi lainkaan vettä hulevesiverkostoon.

Puhdistetun jäteveden lähtövirtaamista ei ollut mitattua tietoa, mutta puhdistamon mukaan tulvatilanteessa tulevan ja lähtevän virtaaman välinen viive on vain noin 6 min ja tulevan ja lähtevän veden määrä on sama. Siksi puhdistamon tulovirtaamatiedot syötettiin malliin sellaisinaan. Puhdistamon virtaama lisättiin *inflow*-tietona kahteen purkukaivoon, jotka liittyvät putkilla hulevesiverkoston runkolinjan kaivoon.

Merivedenkorkeus vaikuttaa hulevesiverkoston toimintaan, koska osa verkoston alaosasta sijaitsee merenpinnan alapuolella (kuvassa 8 punaisella). Merivedenkorkeuden vaikutusta tutkittiin tilanteessa, jossa merivesi on tarkasteltujen sadetapahtumien aikana 1,29 m korkeudessa. Kyseinen merivedenkorkeusennätys on toteutunut Turussa vuoden 2005 tammi-kuussa. Tarkastelulla haluttiin selvittää, miten tilanne, jossa merivesi on hyvin korkealla samaan aikaan rankkasadetapahtuman kanssa, vaikuttaa hulevesiverkoston toimintaan. Merivedenkorkeustiedot lisättiin verkoston purkukaivoihin aikasarjana (*timeseries*).



Kuva 8 Tutkimusalueen hulevesiverkosto. Punaisella merkitty meriveden alapuolinen verkoston osa ja sinisellä jätevedenpuhdistamon purkuputkien liitoskohta.

Merivedenkorkeustietojen ja jätevedenpuhdistamolta tulevan virtaaman lisääminen malliin aiheutti kahden purkuputken virtaamissa runsaasti värähtelyä ennen sadetapahtumaa ja sen jälkeen. Värähtelyllä tarkoitetaan mallin numeerisesta ratkaisusta johtuvaa heilahtelua ajan virtaamassa. Merivesi aiheuttaa normaalitilanteessakin verkoston putkissa jonkin verran veden edestakaista liikettä, mutta mallin värähtely oli siihen nähden liian runsasta. Merivedenkorkeuden asettaminen vakioksi ei korjannut ongelmaa.

Ongelman aiheuttajaksi epäiltiin verkoston alaosan monihaarausuuutta. Runkolinjan haarautumisen jälkeen haarojen välissä on vielä ne yhdistävä poikittainen putkilinja. SWMM jakaa veden haarakohdissa kaivon vedenkorkeuden ja putkien korkeusaseman, koon ja kaltevuuden perusteella (Dickinson 2012). Jos haarautuvat putket ovat samanlaiset ja samalla korkeudella, vesimäärä jakautuu tasan niiden kesken, muussa tilanteessa putken haarioihin päätyvä vesimäärä on eri.

Värähtelyä havaittiin esiintyvän etenkin verkoston alaosassa ja purkulinjoiden läheisyydessä. Reitityksen aika-astelehen lyhentämisellä ja muilla numeerisilla muutoksilla ei ollut vaikutusta. Värähtelystä päästiin eroon yksinkertaistamalla hieman verkoston alaosaa poistamalla kolme lyhyttä putkea ja kaksi niihin liittyvää kaivoa sekä nostamalla purkukaivojen korkeuksia lähemmäs niitä edeltävien kaivojen tasoa (ks. Liite 2). Muutokset tehtiin niin, että reititykseen ja alivaluma-alueisiin tuli mahdollisimman vähän muutoksia.

3.4.3 Viherkattoskenaariot

Mallin avulla tutkittiin teoreettista tilannetta, jossa kaikki valuma-alueen katot korvataan viherkatoilla ja sen vaikutusta vesitaseeseen ja virtaamiin. Lisäksi mallinnettiin tilanne, jossa viherkatot peittivät 10 % valuma-alueen katoista (Mentens et al. 2006). Tällöin viherkatot sijoitettiin valuma-alueelle satunnaisesti. Kattoja on 17 % koko valuma-alueen pinta-alasta.

Parametrit (taulukko 3) määritettiin kirjallisuuden avulla (Rakennustieto 2016b, Krebs et al. 2016). Kasvukerroksen paksuuden vaikutusta testattiin mallintamalla kolmea eripaksuista kattovaihtoehtoa: GR1 60 mm (maksaruohokatto) (Rakennustieto 2016b), GR2 100 mm (Krebs et al. 2016) ja GR3 150 mm (niitty-/ketokatto) (Rakennustieto 2016b). Krebs et al. (2016) käyttivät parametrien kalibrointiin testikattona ruotsalaisvalmisteista maksaruohokattoa, jossa kasvoi myös sammalta ja heiniä.

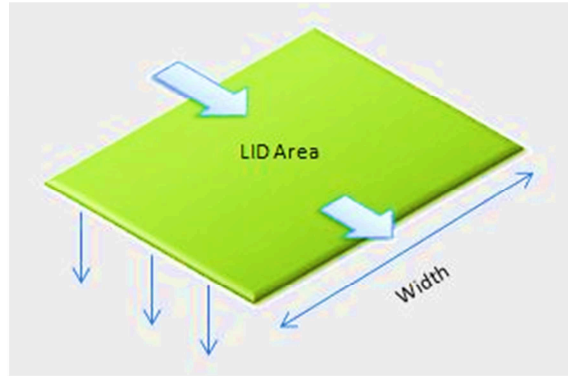
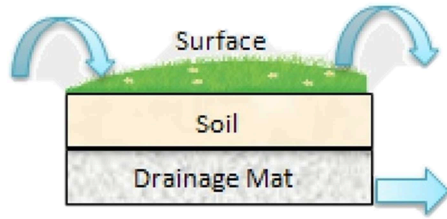
Kaikista kolmesta eri paksuisesta viherkattosta tehtiin mallinnukset kuiville ja täysin vedellä kyllästyneille katoille. Kattojen todelliset kaltevuudet valuma-alueella vaihtelevat tasakatoista kalteviin kattoihin, mutta tarkkoja rakennuskohtaisia kaltevuustietoja ei ollut saatavilla. Mallissa käytettiin kaltevuutta 1:20 (Rakennustieto 2016c), joka on myös GisToSWMM5-ohjelman oletuskaltevuus katoille.

Taulukko 3 Viherkattoparametrit (Krebs et al. 2016, *Rakennustieto 2016b).

Kerros	Muuttuja	Arvo (GR1 / GR2 / GR3)
Kasvillisuus	Pengerkorkeus (mm)	30
	Kasvillisuuden osuus tilavuudesta (-)	0.1
	Karkeus (-)	0.168
	Kaltevuus (%)	5*
Kasvukerros	Paksuus (mm)	60* / 100 / 150*
	Huokoisuus (-)	0.41
	Vedenpidätyskapasiteetti (-)	0.29
	Lakastumispiste (-)	0.02
	Johtavuus (mm/h)	37.9
	Maan johtokyky kosteuden funktiona (kulma-kerroin) (Conductivity slope) (-)	40
	Imukorkeus (mm)	61.3
	Salaoja	Paksuus (mm)
	Huokoisuuskerroin (-)	0.41
	Karkeus (-)	0.01

SWMM5:ssä viherkattoja mallinnetaan kolmen kerroksen avulla: pintakerros, maakerros ja salaojamatto (kuva 9 vasen), joille kullekin määritetään parametrit (Rossman 2015). LID-yksiköt, kuten viherkatto, liitetään erikseen kuhunkin alivaluma-alueeseen. LID-rakenne voi peittää alivaluma-alueen kokonaan tai vain osan siitä. Jokaisella aika-askeleella lasketaan kunkin alivaluma-alueen valunta ensin siltä osalta, jossa ei ole viherkattoa ja sitten viherkaton peittämälle osalle. Valunnat lasketaan yhteen, mistä saadaan alivaluma-alueen kokonaisvalunta.

Tässä työssä viherkatto peitti kokonaan kattovaluma-alueet ja kunkin viherkattoyksikön pinta-alaksi tuli näin ollen 64 m². Viherkatoille testattiin kahta eri arvoa alueen valuntaa tuottavalle leveydelle eli *width*-arvoa (kuva 9 oikea). Katoille annettiin ensin *width*-arvoksi nolla ja sitten alkuperäisten emokattojen arvot (8 tai 5,66 m). Emokatolla tarkoitetaan alkuperäistä kattoa, johon viherkatto lisätään. 0-arvoa käytetään, kun kyseessä on säiliömäinen LID-rakenne (esim. sadevesitynnyri), josta ylitulviva vesi poistuu välittömästi reunan yli (Rossman 2015). *Width*-arvon muuttamisella oli huomattava vaikutus viherkaton toimintaan. Viherkatoissa ylimääräinen vesi joko haihtuu, varastoituu kasvukerrokseen tai poistuu salaojakerroksen kautta. Mallissa katot oli kytketty suoraan hulevesiverkostoon, joten myös viherkatoilta poistunut vesi valui suoraan verkostoon.



Kuva 9 Viherkaton käsittely SWMM5:ssä (Rossmann 2015). Kun LIDin width-arvo on nolla, kaikki reunapenkereen yli menevä vesi poistuu katolta välittömästi. Kun width saa muun arvon kuin nolla, ylimenevä osa vedestä haihtuu, varastoituu kasvukerrokseen tai valuu verkostoon salaojakerroksen kautta.

GisToSWMM5-ohjelmassa ei vielä ollut mahdollisuutta syöttää viherkattojen tietoja automaattisesti, joten se tehtiin käsin. Viherkattojen tiedot lisättiin suoraan SWMM:n syötetiedostoon (Liite 3). Kattojen runsaasta lukumäärästä johtuen (kattoalivaluma-alueita yhteensä 7975) annettiin kaikille katoille samat tiedot ja mallinnettiin vain yhtä viherkattotyyppiä kerrallaan kaikilla valuma-alueen katoilla.

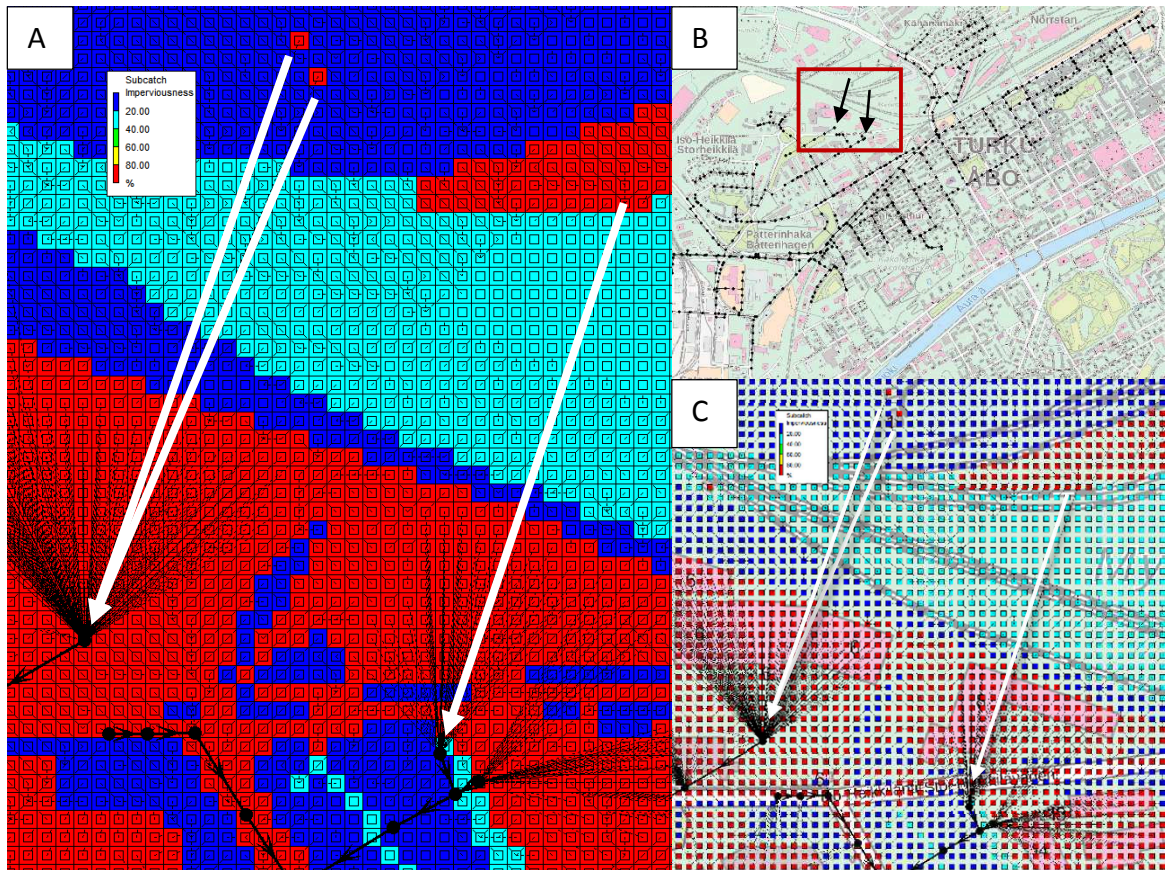
4 Tulokset

4.1 Verkosto ja valuma-alue

Ennen varsinaisia malliajoja tehtiin testiajoja, joiden perusteella todettiin, että maaperän hydraulisilla parametreilla (taulukko 2) ei ollut juurikaan vaikutusta purkuputkien virtaamiin. Huonosti johtavan maan eli saven parametreilla virtaamat olivat hieman suuremmat kuin hiekalla. Eri maaperän kosteusvajeen laskentatapojen välillä ei havaittu merkittäviä eroja. Koska hydraulisten parametrien vaikutus oli niin pieni kokonaisvirtaamaan, tutkittiin alivaluma-aluekohtaisia vesitaseita. Alivaluma-aluekohtaisella tarkastelulla eroja imeytymässä ja valunnassa oli nähtävissä. Huonosti johtavilla parametreilla läpäisevien alueiden valunta oli suurempi ja vastaavasti hyvin johtavilla parametreilla läpäisevien alueiden imeyntä oli suurempi. Lisäksi selvitettiin, miten vesi reitittyy läpäisevien ja läpäisemättömien alueiden välillä mallissa. Reitittymistä tutkittiin tilanteissa, joissa sadantaa tuli vain joko läpäiseville tai läpäisemättömille alueille. Tilanne ei ole realistinen, mutta se on mahdollista toteuttaa SWMM5:ssä lisäämällä valituille alivaluma-alueille oma sadeasema, jonka sadanta on nolla. Vettä reitittyi enemmän läpäiseviltä alueilta läpäisemättömille alueille kuin toisin päin.

Saven parametreilla havaittiin, että osa sataneesta vedestä katosi vesitaseesta. Alivaluma-alueilta ei siis valunut verkostoon yhtä paljon vettä kuin taseen perusteella olisi pitänyt. Hiekan parametreilla vettä sen sijaan ei kadonnut. GisToSWMM5 ei reititä läpäiseviä painanteita ja tasaisia läpäiseviä alueita hulevesiverkostoon samalla tavalla kuin läpäisemättömiä alueita, vaan ne reitittyvät itseensä, koska veden oletetaan imeytyvän maahan. Vesitaseesta ”kadonnut” vesi saatiin laskennallisesti näkyväksi kasvattamalla itseensä reitittyvien läpäisevien alueiden painannesäilynnän kokoa näennäisen suureksi (hypoteettinen arvo 50 000 mm). Vesi jää siis seisomaan painanteeseen tai tasaiselle läpäisevälle alueelle ja imeytyy maahan vähitellen. Saven tilanteessa vettä jää seisomaan enemmän kuin hiekalla, koska saven hydraulinen johtavuus on pienempi, ja imeyntä on sen vuoksi hitaampaa. Tästä syystä alivaluma-alueilla havaittu ero hydraulisissa parametreissa ei näy erona purkuputkien virtaamisissa.

GisToSWMM5:n reitityksestä johtuen (läpäisemätön alue reititetään lähimpään hulevesikaivoon) saattaa joissain tapauksissa syntyä epärealistinen tilanne, jossa läpäisemätön alue reitittyy läpäisevän tasaisen alueen yli lähimpänä sijaitsevaan kaivoon (kuva 10). Jos erikoisella tavalla reitittyvä alue on katto, joka ei ole yhteydessä hulevesiverkostoon, tilanteen voisi todennäköisesti korjata kytkemällä katon mallissa irti verkostosta, jolloin vesi reitittyisi kaivon sijaan ensin viereisiin soluihin. Tämä luokitteluvaihtoehto on olemassa GisToSWMM5-ohjelmassa. Muun läpäisemättömän alueen ollessa kyseessä auttaisi todennäköisesti tasaisten alueiden poistaminen korkeusmallista. Kuvan 10 tilanteessa maaston perusteella vesi todellisuudessa valunee läpäisemättömältä alueelta sitä ympäröiville läpäiseville alueille tai haihtuu suoraan läpäisemättömältä pinnalta eikä päädy hulevesiverkostoon asti. *Google Street View*:n perusteella kyseisen paikan asfalttialueella olisi muutamia sadevesikaivoja, vaikka niitä ei näy verkostokartassa eikä näin ollen ole myöskään mallissa.



Kuva 10 Esimerkki tilanteesta, jossa vesi reitittyä läpäisemättömältä alueelta (punainen) lähimpään kaivoon läpäisevän (vaaleansininen) alueen yli (kuva A). Tässä läpäisevän sora-alueen halkaisee rautatie ja reitille osuu myös rakennuksia (kuva C). Kuvassa B esimerkkialueen sijainti verkostoon nähdään.

4.2 Mallinnustulokset

4.2.1 Jätevedenpuhdistamon purkutupki ja merivesitulva

Vertailutilassa mallissa olivat mukana jätevedenpuhdistamolta tuleva virtaama sekä sade-tapahtuman aikana mitattu merivedenkorkeus. Vertailutilan pyrkimys oli kuvata sadetapahtuman aikaista tilannetta. Malliajot vertailutilassa tehtiin sekä hiekan että saven parametreilla (*0-clay* ja *0-sand*), jotta voitiin verrata hyvin ja huonosti johtavaa maaperää. Lisäksi mallinnettiin skenaariot ilman jätevedenpuhdistamolta tulevaa virtaamaa, merivesitulva ja niiden yhdistelmä (taulukko 4). Reitityksen aika-askel oli 5 s, mikä havaittiin riittäväksi jatkuvuusvirheen kannalta. Vain skenaariossa, jossa jätevedenpuhdistamolta ei tule vettä verkostoon (*noww*), reitityksen aika-askeleeksi muutettiin 1 s, jotta jatkuvuusvirhe saatiin hyväksyttävälle tasolle (< 1 %). Tulvimisen osalta mallissa käytettiin vaihtoehtoa, jossa kaivosta tulvintua vettä ei palautettu verkostoon.

Skenaarioiden vesitaseita on vertailtu taulukoissa 5 (elokuu) ja 6 (lokakuu). Vesitaseet on esitetty kahdessa osassa, erikseen valuma-alueille ja putkistolle, jolloin valuma-alueilta lähtevä pintavalunta on sama kuin valunta putkistoon. Vesitaseiden laskennassa käytettiin koko valuma-alueen pinta-alaa (3 011 584 m²). Elokuun skenaarioissa sademäärä oli noin puolitoistakertainen verrattuna lokakuuhun. Suurin osa sateesta tuli muutaman tunnin aikana aamuyöllä 27.8., mikä johti verkoston tulvintaan, kun putkien kapasiteetti ei riittänyt nopeasti sataneen veden poisjohtamiseen. *0-sand*-skenaariossa imeyntä on huomattavasti

suurempi kuin *0-clay*-skenaariossa, koska savimaalle vesi varastoituu pidemmäksi aikaa nopean imeytymisen sijaan. *0-clay*-skenaariossa tulvinta on runsaampaa ja putkistoon valuu enemmän vettä, mikä johtaa myös suurempaan kokonaisvaluntaan putkiston purkupisteillä.

Taulukko 4 Skenaarioiden kuvaukset.

Skenaarion tunnus	Kuvaus
0-clay	vertailutila saven parametreilla, huonosti johtava maaperä
0-sand	vertailutila hiekan parametreilla, hyvin johtava maaperä
noww	ei virtaamaa jätevedenpuhdistamolta, huonosti johtava maaperä
seamax	merivesitulva, huonosti johtava maaperä
noww + seamax	merivesitulva ilman virtaamaa jätevedenpuhdistamolta, huonosti johtava maaperä

Mallinnuksen perusteella jätevedenpuhdistamon purkuvesien poistaminen hulevesiverkostosta pienentää merkittävästi kokonaisvirtaamaa, mutta ei rankkasateen aikana pienennä juurikaan huippuvirtaamia, kuten nähdään kuvista 11-12 elokuussa ja kuvista 13-14 lokakuussa. Kuvien 11-12 kuvaajat esittävät neljän purkuputken virtaamia ja sadantaa elokuussa ja kuvien 13-14 kuvaajat vastaavia tietoja lokakuussa. Sen sijaan tulvinta verkostossa väheni purkuvesien poiston seurauksena vain reilun viidenneksen verrattuna *0-clay*-skenaarioon, jossa jätevedenpuhdistamon purkuvesi on mukana. Putkissa ennen sadetapahtumaa ollut vesimäärä puolestaan aleni, ollen ensin 2 mm ja poiston jälkeen 1 mm. Elokussa virtaus jätevedenpuhdistamolta (taulukko 5, muut virtaukset putkistoon) on pienempi kuin lokakuussa (taulukko 6), mikä selittyy todennäköisesti elokuun rankkasateiden aiheuttamalla runsaammalla tulvinnalla muualla verkostossa ja puhdistamon padotuksella.

Taulukoista 5 (elokuu) ja 6 (lokakuu) nähdään, että merivesitulvan aikana (*seamax*) tulvinta verkostossa lisääntyy ja putkissa ennen sadetapahtumaa oleva vesimäärä on suurempi. Elokussa tulvinta lisääntyy 5 mm verrattuna skenaarioon *0-clay* (taulukko 5). Sen sijaan kokonaisvalunta pienenee 7 mm elokuussa (taulukko 5) ja 2 mm lokakuussa (taulukko 6) verrattuna *0-clay*-skenaarioon. Skenaario, jossa merivesitulva yhdistettiin tilanteeseen ilman jätevedenpuhdistamon purkuvesiä (*noww+seamax*), sijoittuu tulvinnan osalta edellisten välimaastoon. Kokonaisvalunta sen sijaan on *noww+seamax*-skenaariossa pienimmillään. Tulvinnan kannalta paras tilanne saavutettiin sekä elo- että lokakuussa skenaariolla *0-sand*, jossa läpäisevien alueiden maaperän hydraulinen johtavuus oli suuri.

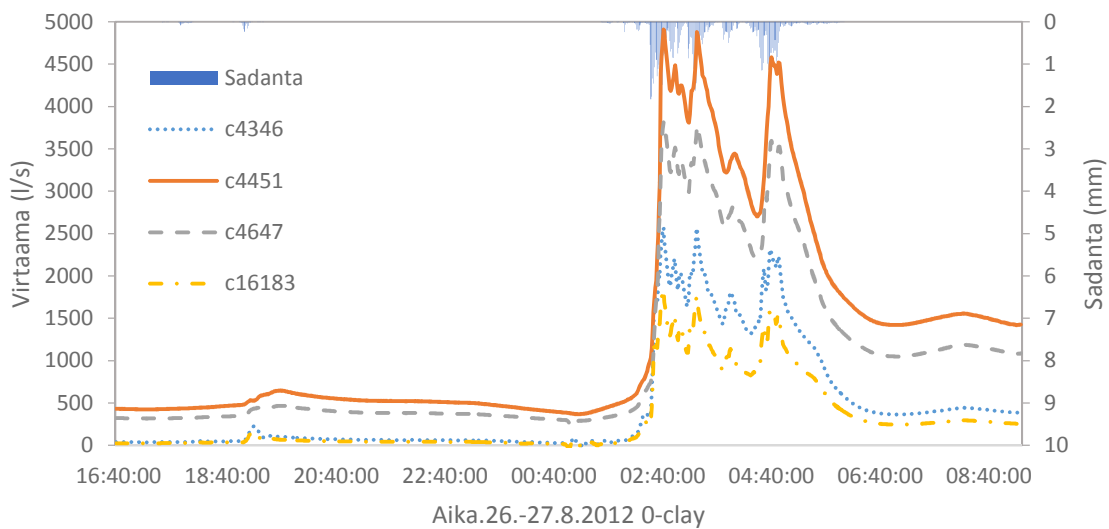
Taulukko 5 Skenaarioiden vesitasevertailu, 25.–27.8.2012.

Elokuu	Vesitase (mm) / Skenaario	0-clay	0-sand	noww	seamax	noww+seamax
	Sadanta	73	73	73	73	73
Valuma-alueet	Haihdunta	1	1	1	1	1
	Imeyntä	5	36	5	5	5
	Varasto valuma-alueilla	24	2	24	24	24
	Pintavalunta	43	34	43	43	43
	Varaston muutos	0	0	0	0	0
Putkisto	Valunta putkistoon	43	34	43	43	43
	Muut virtaukset putkistoon	70	70	0	70	0
	Tulvinta	18	12	14	23	17
	Varasto putkissa	2	2	1	3	2.5
	Kokonaisvalunta putkistosta	94	91	29	87	23

Taulukko 6 Skenaarioiden vesitasevertailu, 4.–5.10.2012.

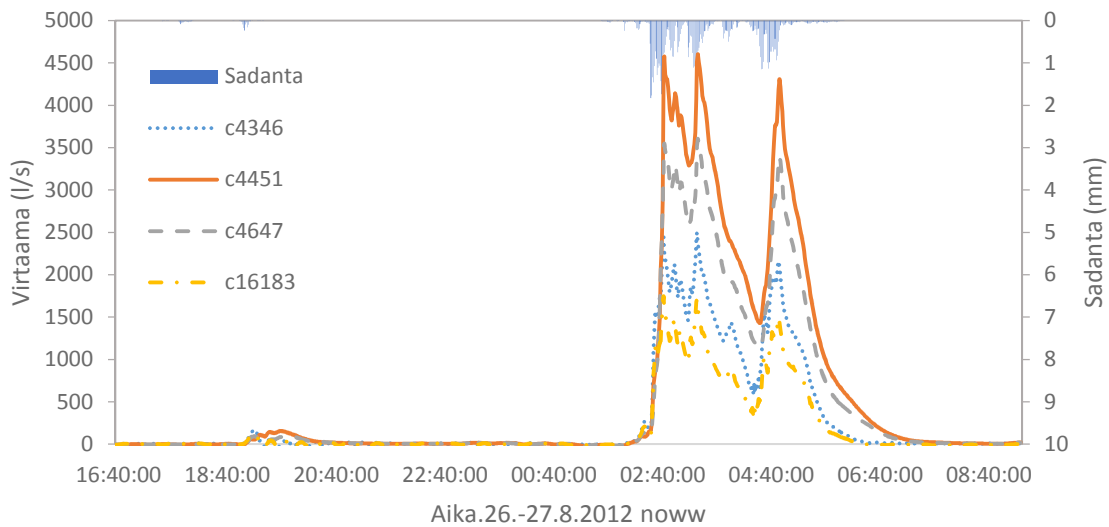
Lokakuu	Vesitase (mm) / Skenaario	0-clay	0-sand	noww	seamax	noww+seamax
	Sadanta	42	42	42	42	42
Valuma-alueet	Haihdunta	0.4	0.3	0.4	0.4	0.4
	Imeyntä	8	21	8	8	8
	Varasto valuma-alueilla	11	1	11	11	11
	Pintavalunta	23	19	23	23	23
	Varaston muutos	0	0	0	0	0
Putkisto	Valunta putkistoon	23	19	23	23	23
	Muut virtaukset putkistoon	113	113	0	113	0
	Tulvinta	0.3	0.2	0.3	1.1	0.4
	Varasto putkissa	2	2	1	3	2.5
	Kokonaisvalunta putkistosta	135	131	22	133	20

Virtaama purkuputkissa (l/s)



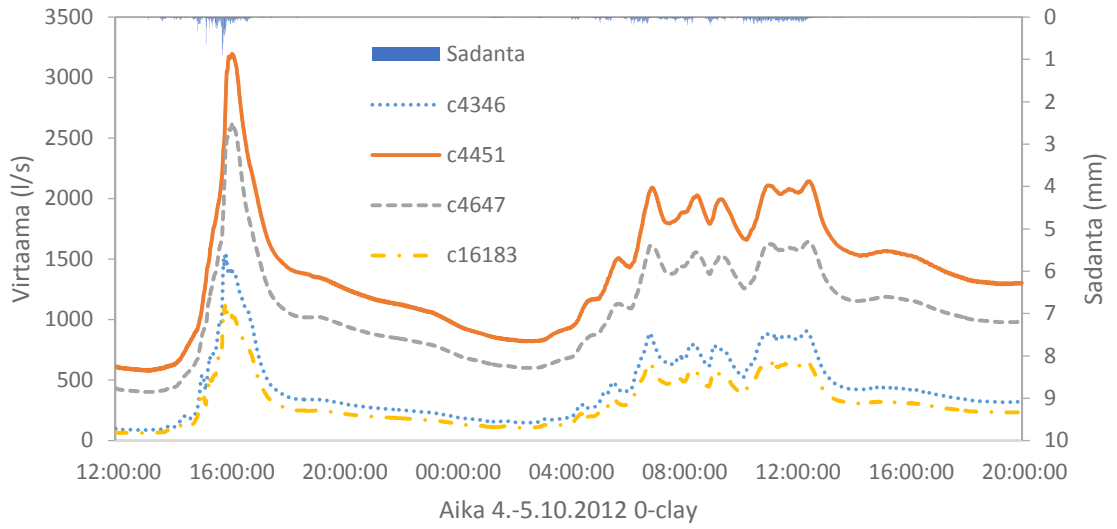
Kuva 11 Virtaama (l/s) neljässä purkuputkessa (c4346, c4451, c4647, c16183) sekä sadanta (mm). Skenaario 0-clay, huonosti johtava maaperä, jakso 26.–27.8.2012.

Virtaama purkuputkissa (l/s)



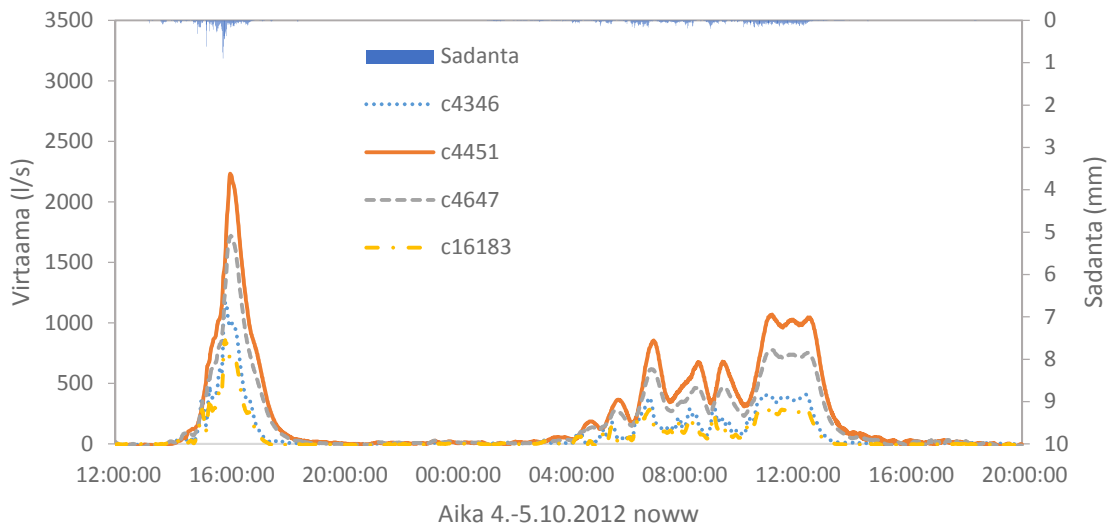
Kuva 12 Virtaama (l/s) neljässä purkuputkessa (c4346, c4451, c4647, c16183) sekä sadanta (mm). Skenaario noww, ei virtaamaa jätevedenpuhdistamolta, jakso 26.–27.8.2012.

Virtaama purkputkissa (l/s)



Kuva 13 Virtaama (l/s) neljässä purkputkessa (c4346, c4451, c4647, c16183) sekä sadanta (mm). Skenaario 0-clay, huonosti johtava maa, jakso 4.-5.10.2012.

Virtaama purkputkissa (l/s)



Kuva 14 Virtaama (l/s) neljässä purkputkessa (c4346, c4451, c4647, c16183) sekä sadanta (mm). Skenaario noww, ei virtaamaa jätevedenpuhdistamolta, jakso 4.-5.10.2012.

4.2.2 Viherkatot

Viherkatot mallinnettiin kaikille valuma-alueen katoille kolmella eri paksuudella, kukin ennen sadetapahtumaa sekä kuivana että kokonaan vedellä kyllästyneenä. Kattojen kaltevuudeksi asetettiin 1:20 ja valuntaa tuottavan alueen leveydeksi (*width*) sama arvo kuin emokatoilla. Viherkatto peitti aina kokonaan emokaton. Kunkin viherkaton pinta-alaksi tuli näin ollen 64 m². Lisäksi mallinnettiin tilanne, jossa vain satunnaisesti valitut 10 % katoista oli viherkattojen peitossa. Tuloksia verrattiin *0-clay*-skenaarioon. Vesitaseiden laskennassa käytettiin koko valuma-alueen pinta-alaa (3 011 584 m²). Taulukoiden luvut on pyöristetty, mutta valunnan muutoksen laskennassa käytettiin pyöristämättömiä lukuja.

Taulukko 7 Viherkattoskenaarioiden tunnuksat.

Skenaarion tunnus	Kuvaus
0-clay	vertailutila saven parametreilla ilman viherkattoja
GR1d	viherkatto 60 mm, kuiva
GR2d	viherkatto 100mm, kuiva
GR3d	viherkatto 150mm, kuiva
GR1w	viherkatto 60 mm, märkä
GR2w	viherkatto 100mm, märkä
GR3w	viherkatto 150 mm, märkä
GR2d10	viherkatto 100 mm, kuiva, 10 % katoista korvattu viherkatoilla

Koko valuma-alueen tasolla tarkasteltuna viherkatot vähentävät putkistoon päätyvän valunnan määrää ja verkoston tulvintaa (taulukko 8, elokuu ja taulukko 9, lokakuu) alle *0-clay*-skenaarion tason. Valunnan muutos (%) laskettiin vertaamalla kunkin skenaarion ”valunta putkistoon” -arvoa skenaarion *0-clay* vastaavaan arvoon. Mitä paksumpi viherkaton kasvukerros on, sitä paremmin katto pidättää vettä. Kuivat viherkatot pidättävät vettä huomattavasti märkiä paremmin. Täysin vedellä kyllästyneet katot lisäsivät hieman tarkastelujakson valuntaa, kun osa niihin ennen sadetapahtuman alkua varastoituneesta vedestä muuttui valunnaksi. Sen sijaan kuivien kattojen vaikutus näkyy vain valunnassa putkistoon, mutta ei kokonaisvalunnassa. Tämä saattaa olla virhe laskennassa tai useista muuttuvista tekijöistä johtuva ongelma laskennan jossain vaiheessa.

Valunnan (valunta putkistoon) muutos verrattuna *0-clay*-skenaarioon on elokuussa sitä suurempi mitä paksumpi viherkatto kuivana on kyseessä (GR1d, GR2d, GR3d, taulukko 8). Vastaavasti märkinä paksuin katto, johon on alussa varastoitunut eniten vettä (GR1w, GR2w, GR3w), lisää valuntaa eniten verrattuna *0-clay*-skenaarioon. 10 % peittävyys (GR2d10) riitti myös pienentämään valuntaa, mutta näin kovilla sateilla vain hyvin vähän, elokuussa 1 % ja lokakuussa 2 %.

Purkuputkien virtaamissa ja putkiston kokonaisvalunnan osalta erot sen sijaan ovat pienempiä. Kuvien 15–16 (elokuu) ja 17–18 (lokakuu) kuvaajista nähdään, että huippuvirtaamat ovat hieman suurempia, kun katto on kokonaan vedellä kyllästynyt ennen sadetapahtuman alkua, kuin sen ollessa kuiva. Kun verrataan tilanteeseen ilman viherkattoja (kuvat 11 ja 13), sekä kuivilla että vedellä kyllästyneillä viherkatoilla on ensimmäistä virtaama huippua pienentävä vaikutus, mikä näkyy etenkin elokuun sadetapahtuman aikana. Esimerkiksi purkuputken c4451 huippuvirtaama (4910,7 l/s) *0-clay*-skenaariossa tapahtui 27.8. klo 2.44, kun taas skenaariossa GR2d huippuvirtaama (4726,6 l/s) ajoittui 27.8. klo 3.22. Tulvahuipun virtaama siis madaltui ja viivästyi viherkattojen avulla reilulla puolella

tunnilla. Lisäksi esimerkiksi skenaariossa GR3d tulvivien kaivojen lukumäärä väheni lähes puolella verrattuna 0-clay-skenaarioon (246:sta 149:ään).

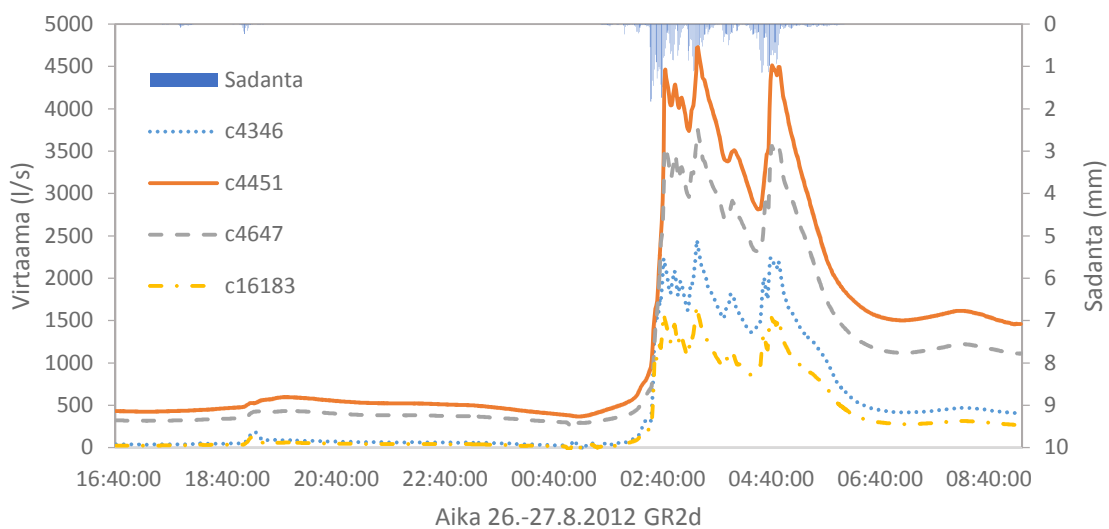
Taulukko 8 Eri viherkattoskenaarioiden vesitasevertailu, koko valuma-alue, 25.–27.8.2012.

Elokuu	Vesitase (mm) / Skenaario	0-clay	GR1d	GR2d	GR3d	GR1w	GR2w	GR3w	GR2d10
	Sadanta	73	73	73	73	73	73	73	73
Valuma- alueet	Haihdunta	1	1	1	1	1	1	1	1
	Imeyntä	5	5	5	5	5	5	5	5
	Alkuvarasto viherkatoissa	-	0.2	0.3	0.5	5	7.5	11	0
	Varasto valuma- alueilla	24	27	29	32	27	29	32	24
	Viherkattojen salaojavalunta	-	9	7	5	13	14	14	0.7
	Pintavalunta	43.2	31	31	31	31	31	31	42
	Varaston muutos	0	9	7	4	9	6	3	1
Putkisto	Valunta putkistoon	43.2	41	38	36	44	45	45	42.7
	Muut virtaukset putkistoon	70	70	70	70	70	70	70	70
	Tulvinta	18	15	12	10	17	16	15	17
	Varasto putkissa	2	2	2	2	2	2	2	2
	Kokonaisvalunta putkistosta	93.6	94	94.3	93.7	96	97	99	93.6
	Valunnan muutos %	0	-6	-11	-17	2	3	5	-1

Taulukko 9 Eri viherkattoskenaarioiden vesitasevertailu, koko valuma-alue, 4.–5.10.2012.

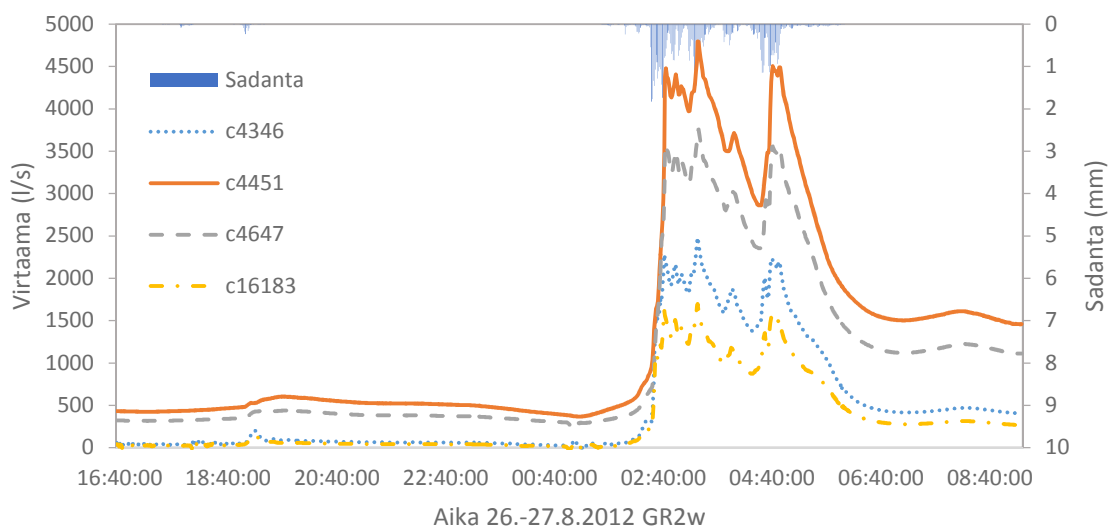
Lokakuu	Vesitase (mm) / Skenaario	0-clay	GR1d	GR2d	GR3d	GR1w	GR2w	GR3w	GR2d10
	Sadanta	42	42	42	42	42	42	42	42
Valuma- alueet	Haihdunta	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0
	Imeyntä	8	8	8	8	8	8	8	8
	Alkuvasto viherkatoissa	-	0.2	0.3	0.5	5	7.5	11	0
	Varasto valuma- alueilla	11	14	16	18	14	16	18	11
	Viherkattojen salaojavalunta	-	4	2	0.2	9	9	10	0
	Pintavalunta	23	16	16	16	16	16	16	23
	Varaston muutos	0	4	2	0	4	2	-1	0
Putkisto	Valunta putkistoon	23	21	19	17	24	25	25	23
	Muut virtaukset putkistoon	113	113	113	113	113	113	113	113
	Tulvinta	0.3	0.1	0.1	0.1	0.3	0.2	0.2	0.3
	Varasto putkissa	2	2	2	2	2	2	2	2
	Kokonaisvalunta putkistosta	135	132	130	128	136	136	136	134
	Valunnan muutos %	0	-11	-19	-29	4	6	7	-2

Virtaama purkuputkissa (l/s)



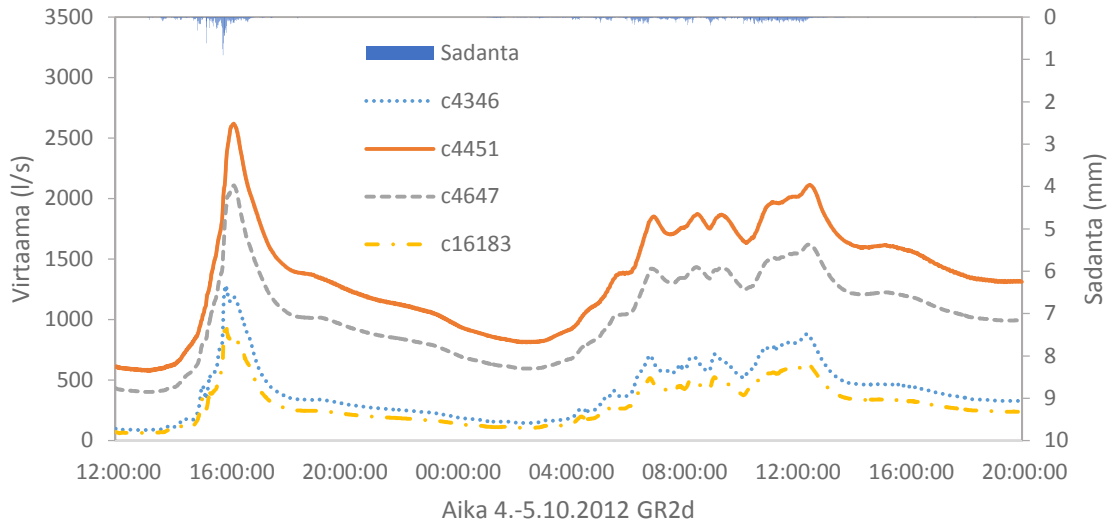
Kuva 15 Virtaama (l/s) neljässä purkuputkessa (c4346, c4451, c4647, c16183) sekä sadanta (mm) jaksolla 26.–27.8.2012. Viherkattoskenaario GR2d (paksuus 100 mm), kaikki katot korvattu viherkatoilla. Katot kuivia ennen sadetapahtuman alkua.

Virtaama purkuputkissa (l/s)



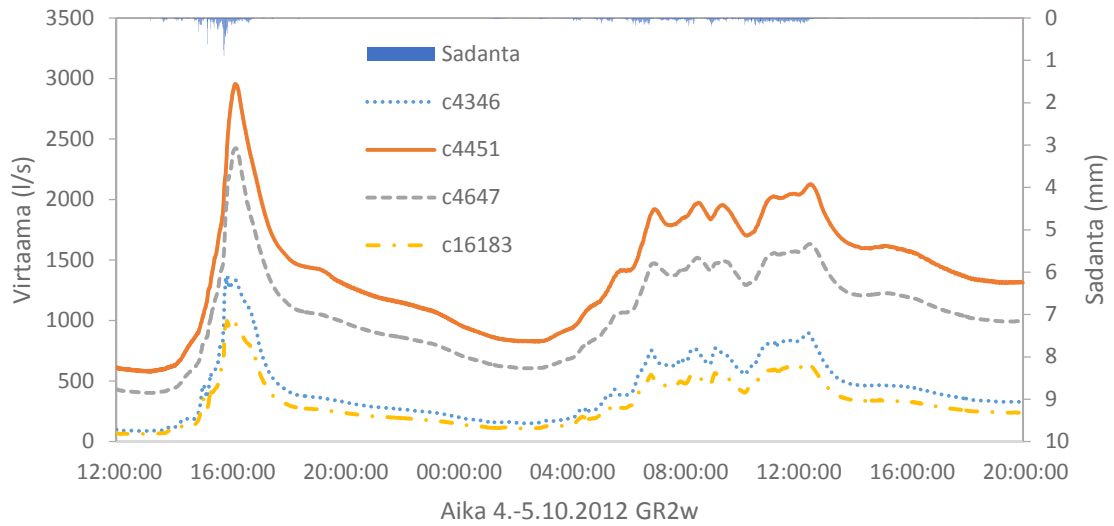
Kuva 16 Virtaama (l/s) neljässä purkuputkessa (c4346, c4451, c4647, c16183) sekä sadanta (mm) jaksolla 26.–27.8.2012. Viherkattoskenaario GR2w (paksuus 100 mm), kaikki katot korvattu viherkatoilla. Katot kyllästyneet vedellä sadetapahtuman alkaessa.

Virtaama purkupuotkissa (l/s)



Kuva 17 Virtaama (l/s) neljässä purkupuotkessa (c4346, c4451, c4647, c16183) sekä sadanta (mm) jaksolla 4.-5.10.2012. Viherkattoskenaario GR2d (paksuus 100 mm), kaikki katot korvattu viherkatoilla. Katot kuivia sadetapahtuman alkaessa.

Virtaama purkupuotkilla (l/s)



Kuva 18 Virtaama (l/s) neljässä purkupuotkessa (c4346, c4451, c4647, c16183) sekä sadanta (mm) jaksolla 4.-5.10.2012. Viherkattoskenaario GR2w (paksuus 100 mm), kaikki katot korvattu viherkatoilla. Katot kyllästyneet vedellä sadetapahtuman alkaessa.

Kun tarkastellaan pelkkien kattoalivaluma-alueiden vesitaseita (taulukot 10 ja 11), nähdään selkeästi, että märillä viherkatoilla on näin lyhyellä tarkastelujaksolla valuntaa lisäävä vaikutus (elokuussa 8–18 % ja lokakuussa 23–46 % kattotyypistä riippuen). Kuivilla katoilla sen sijaan on selkeä valuntaa vähentävä (elokuussa 22–62 % ja lokakuussa 38–97 %) ja pidätyskykyä lisäävä vaikutus tavallisiin kattoihin verrattuna. Mallin mukaan viherkatot eivät koskaan sadetapahtuman jälkeen ole kokonaan vedellä kyllästyneitä, vaan loppuvarasto on aina pienempi kuin täysin kyllästyneiden kattojen alkuvarasto.

Taulukko 10 Kattojen vesitasetarkastelu, viherkatot vs. alkuperäiset katot 25.–27.8.2012.

Elokuu	Alkuperäiset katot	GR1d	GR2d	GR3d	GR1w	GR2w	GR3w
Sadanta (mm)	73	73	73	73	73	73	73
Alkuvarasto (mm)	-	1	2	3	28	44	65
Haihdunta (mm)	1	1	1	1	5	5	5
Imeyntä (mm)	0	0	0	0	0	0	0
Loppuvarasto (mm)	-	18	31	47	18	31	47
Salaojavalunta (mm)	-	55	43	27	77	80	84
Pintavalunta (mm)	71	0	0	0	0	0	0
Varaston muutos (mm)	1	0	0	0	2	2	2
Valunnan muutos %	0	-22	-39	-62	8	13	18

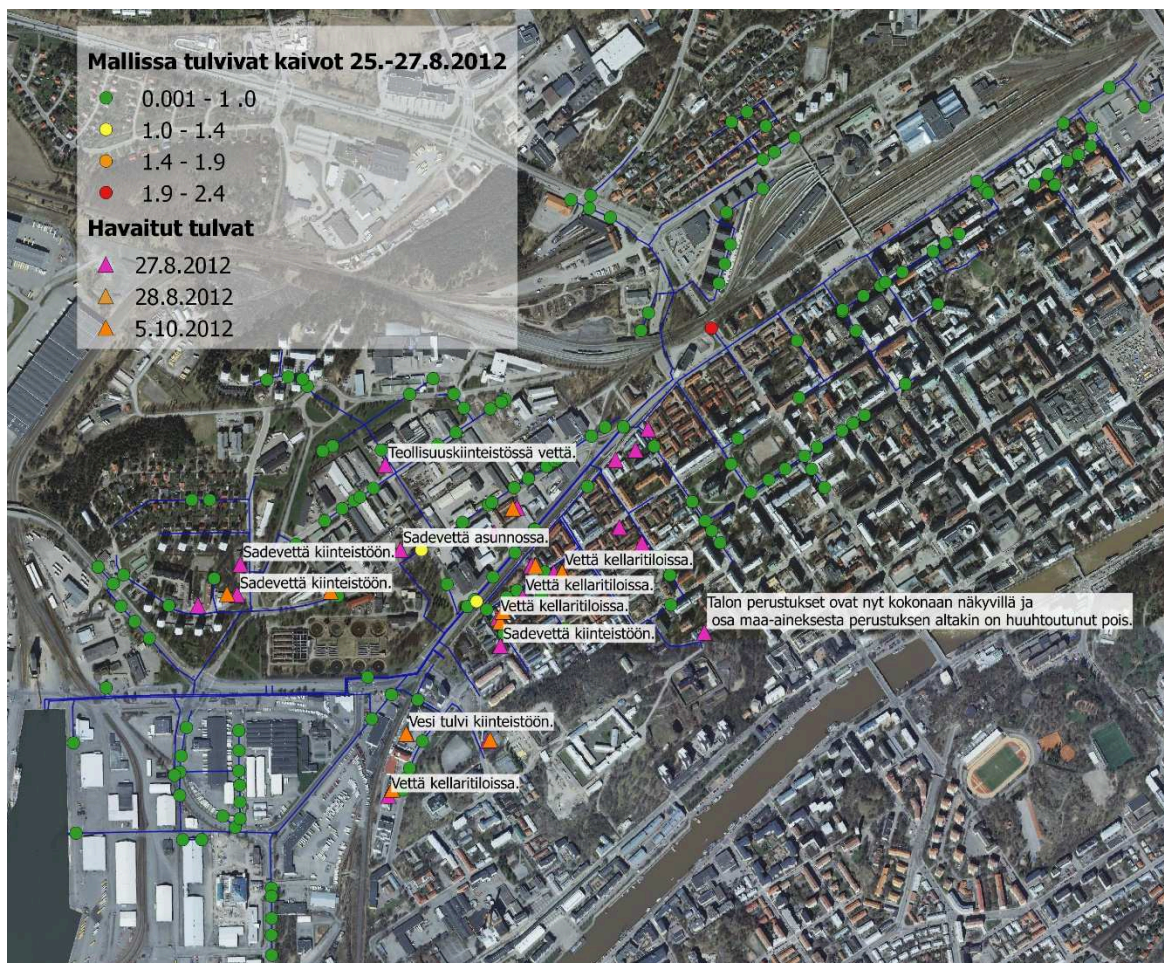
Taulukko 11 Kattojen vesitasetarkastelu, viherkatot vs. alkuperäiset katot 4.–5.10.2012.

Lokakuu	Alkuperäiset katot	GR1d	GR2d	GR3d	GR1w	GR2w	GR3w
Sadanta (mm)	42	42	42	42	42	42	42
Alkuvarasto (mm)	-	1	2	3	28	44	65
Haihdunta (mm)	0.4	0.4	0.4	0.4	0.7	0.7	0.7
Imeyntä (mm)	0	0	0	0	0	0	0
Loppuvarasto (mm)	-	17	29	43	17	29	45
Salaojavalunta (mm)	-	26	15	1	50	55	60
Pintavalunta (mm)	41	0	0	0	0	0	0
Varaston muutos (mm)	1	0	0	0	2	2	2
Valunnan muutos %	0	-38	-64	-97	23	34	46

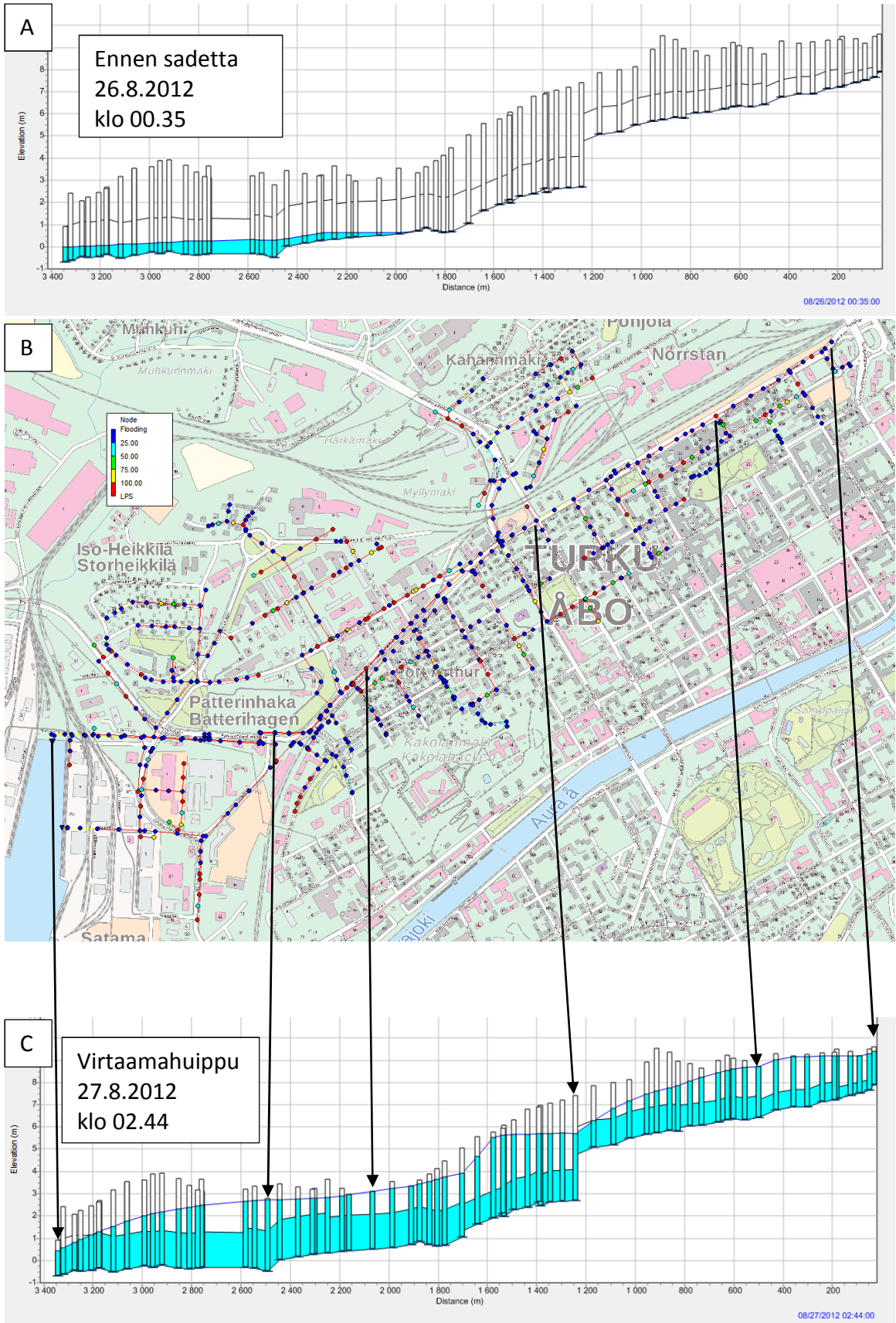
4.3 Mallinnettujen ja havaittujen tulvien vastaavuus

Mallin mukaan lähes puolet valuma-alueen kaivoista (249 kaivoa 580:sta) tulvi jonkin verran elokuun rankkasateen aikana. Kuvassa 19 on verrattu mallin mukaan tulvivia kaivoja vuonna 2012 ilmoitettuihin todellisiin tulvakohteisiin. Yhteensä koko valuma-alueella tulvintaa oli elokuun tarkastelujaksolla mallin mukaan 18 mm (taulukko 5). Mallissa tulvinta kuvaa tilannetta, jossa kaivossa oleva vesimäärä ylittää kaivon maksimisyvyyden ja tulvii ulos kaivosta. Mallinnetun tulvamäärän (18 mm) laskennassa käytettiin koko valuma-alueen pinta-alaa (3 011 584 m²).

Suuri osa havaituista tulvista on asukkaiden kaupungille tai pelastuslaitokselle ilmoittamia tilanteita, joissa vettä on tulvinut esimerkiksi kellariin. Osassa ilmoituksista kyseessä on hulevesikaivon tulviminen kadulle. Osa tiedoista on saatu vesilaitoksen kautta. Yleisin syy ilmoituksen tekemiseen on aineiston perusteella ollut mahdolliset vahingot omalle kiinteistölle, minkä vuoksi kaduille tulviva vesi ei välttämättä aina johda ilmoituksen tekemiseen. Eniten ilmoituksia on tullut Port Arthurin asuinalueelta. Pahimmat tulvahuiput sattuiivat 27.8. aamuyöllä, mikä voi myös olla syynä ilmoittamatta jäämiseen. Toinen syy tietojen puuttumiseen voi olla tulvivien kaivojen syrjäisempi sijainti, missä ei ehkä tulvan tapahtumahetkellä ollut ketään paikalla. Kuvassa 20 on esitetty mallin mukaisen tulvahuipun kaivot ja verkostoprofiili.



Kuva 19 Mallissa tulvivat kaivot ja vuonna 2012 ilmoitetut tulvat ja niiden aiheuttamat vahingot (Turun kaupunki).



Kuva 20 Hulevesiverkosto ja kaivojen tulvinta (l/s) (B) ja runkolinjan profilikuvat ennen sadetta (A) ja tulvahuipun aikana (C) skenaariossa 0-clay (vertailutila). Ennen sadetta alaosan putkissa on merivettä ja puhdistamon purkuvettä. Virtaamahuipun aikana putket ovat täynnä vettä ja osa kaivoista tulvii.

5 Tulosten tarkastelu

5.1 Verkosto ja valuma-alue

Hydraulisten parametrien vaikutusta virtaamaan tutkittiin, mutta niillä ei todettu olevan juurikaan vaikutusta kokonaisvirtaamiin. Myös Krebs et al. (2013) totesivat, ettei läpäisevien pintojen hydraulisilla parametreilla ollut vaikutusta mallinnustuloksiin. Eniten mallin tuloksiin vaikuttivat läpäisemättömien pintojen painannevarasto ja putkien Manningin kerroin. Heidän tutkimuksessaan 86 % pinta-alasta oli läpäisemätöntä. Mahdollisena syynä hydraulisten parametrien olemattomaan vaikutukseen pidettiin läpäisemättömien pintojen suurta osuutta valuma-alueesta (Krebs et al. 2013). Turun sataman valuma-alueella läpäisemättömien pintojen osuus on 57 %, joten tässä työssä todennäköisempi syy on tasaisille läpäiseville alueille varastoituva vesi, joka ei reitity eteenpäin.

Automatisoitu SWMM-mallin rakennus GisToSWMM5-ohjelmalla oli tässä työssä käytössä ensimmäistä kertaa näin laajalla valuma-alueella. Se toimi hyvin ja nopeutti merkittävästi mallin rakentamista. Aiemmissä tutkimuksissakin on todettu, että GIS ja SWMM yhdessä muodostavat hyödyllisen mallinnustyökalun, joka soveltuu myös laajoille valuma-alueille (Barco et al. 2008). Mallinnuksessa käytettiin $8 \times 8 \text{ m}^2$ resoluutiota, mikä vaikutti riittävältä näin suuren valuma-alueen tarkasteluun. Käyttämällä pienempää resoluutiota voitaisiin maankäyttöä tarkentaa, mikä lisäisi samalla alivaluma-alueiden määrää. Ranger et al. (2008) arvioivat tulvariskiä käyttäen SWMM-mallinnuksessa vuoden 2005 tulvaa Mumbaissa ja totesivat mallin aliarvioivan havaittua tulvaa noin 20 %. Mahdollisena syynä tutkijat pitivät käytetyn korkeusaineiston matalaa resoluutiota. Toisaalta Warsta et al. (2016) totesivat, että käytettäessä GisToSWMM5-ohjelmaa SWMM-mallin rakentamiseen Helsingissä sijaitsevilla valuma-alueilla $8 \times 8 \text{ m}^2$ resoluutioisen mallin tulokset olivat lähempänä mittaustuloksia kuin $2 \times 2 \text{ m}^2$ resoluutiolla.

Turun hulevesiverkostosta ja sen virtaamista ei ollut saatavilla mittausaineistoa, joten mallin ja tulosten kalibrointia ja validointia ei voitu tehdä. Tulokset ovat suuntaa antavia, mutta lisäävät ymmärrystä ja tietoa hulevesiverkoston toiminnasta ja siitä miten eri skenaarioiden ratkaisut voivat vaikuttaa valuntaan.

5.2 Tulvariski

Kaivojen tulvinnassa päädyttiin käyttämään vaihtoehtoa, jossa kaivoista ulos tulvinut vesi ei enää palautunut verkostoon, vaan poistui systeemistä. Tämä ei vastaa todellista tilannetta, jossa tulviva vesi saattaisi imeytyä, muodostaa lammikon tai jatkaa matkaa pintavaluntana palaten verkostoon mahdollisesti toisen kaivon kautta. Toisaalta Turun sataman valuma-alueella on maastokäynneillä havaittu useita kaivoja, jotka ovat painuneet ja muodostavat luonnostaan läpäisemätöntä painannesäilyntää. Jos tulvivan veden annettaisiin mallissa palata verkostoon, se näkyisi purkuvalunnassa, mutta todennäköisesti vasta hieman pidemmän ajan jälkeen.

Jätevedenpuhdistamolta tulevan virtaaman poistolla oli suuri vaikutus verkoston kokonaisvaluntaan, mutta verkostossa esiintynyt tulvinta väheni sen seurauksena vain reilun viidenneksen. Tämä viittaa hulevesiverkoston kapasiteetin riittämättömyyteen ja ongelmakohtisiin muualla verkostossa. Kun sademäärä on riittävän suuri ja se tulee hyvin lyhyen ajan sisällä, verkosto ei pysty johtamaan kaikkea vettä riittävän nopeasti pois. Purkuvesien johtaminen muuta kautta mereen toisikin todennäköisesti enemmän hyötyä Kakolanmäen jä-

tevedenpuhdistamon kannalta, kun purkureitin kapasiteetti ei olisi enää riippuvainen sadeveden määrästä hulevesiverkostossa. Vanhat sekaviemärit sen sijaan vaikuttaisivat edelleen puhdistustulokseen ja ohijuoksutuksiin kovilla sateilla. Ruotsissa todettiin mallinnuksen avulla, että hule- ja jätevesiviemärien erottaminen yhdessä hulevesiratkaisujen kanssa vähentäisi puhdistamattoman jäteveden ohijuoksutuksia huomattavasti ilmastonmuutos- ja kaupungistumisskenaarioissa (Semadeni-Davies et al. 2008).

Kun mallissa tulvivia kaivoja verrattiin ilmoitettuihin tulvahavaintoihin, nähtiin tulvahavaintojen sijoittuvan verkoston alaosaan (kuva 17). Mallissa tulvivia kaivoja on paljon, mutta niiden tulvamäärät ovat pieniä. Vain muutamassa kaivossa vettä tulvi yhteensä yli 1 mm elokuun tarkastelujaksolla (tulvamäärän laskennassa käytettiin koko valuma-alueen pinta-alaa, 3 011 584 m²). Tulvivat kaivot osoittavat, että verkosto oli elokuun sateilla hetkittäin aivan täynnä vettä. Lokakuun sateilla kaivot eivät mallin mukaan tulvineet juuri lainkaan. Ilmoituksia tulvista sen sijaan on tehty myös lokakuussa. Lämpäisevän pinnan ja esimerkiksi viherkattojen lisäämisellä alueelle voitaisiin mallin mukaan kuitenkin tulvintaa vähentää. Pelkkä läpäisevyyden lisääminen ei aina ole riittävä ratkaisu rankkasadetulvissa, jos muut hulevesien hallintakeinot ovat riittämättömiä (Meierdiercks et al. 2010).

Läpäisemättömien alueiden määrä vaikuttaa hulevesivalunnan muodostumiseen useiden tutkimusten mukaan (Ouyang et al. 2012, Lee & Heaney 2003). Suoraan verkostoon liittyvät läpäisemättömät alueet tuottavat merkittävän osan valunnasta, Yhdysvalloissa tehdyn tutkimuksen mukaan jopa 72 % kokonaisvalunnasta 52 vuoden aikana, kun läpäisemättömä aluetta oli 44 % valuma-alueesta (Lee & Heaney 2003). Meierdiercks et al. (2010) puolestaan totesivat SWMM-mallinnuksen perusteella, että viemäriverkoston tiheydellä ja pidätysaltailla voi olla suurempi vähentävä vaikutus huippuvirtaamiin ja hulevesitulviin kuin maankäytöllä ja läpäisemättömien alueiden määrällä. Turun sataman valuma-alueella hulevesiverkosto on tiheydeltään riittävä, mutta putket ovat paikoitellen kooltaan riittämättömiä rankkasateiden aikana. Alueiden läpäisemättömyys vaikuttaa kokonaisvaluntaan, mikä näkyy vertailtaessa hyvin ja huonosti johtavien maaperien skenaarioita (*0-clay* ja *0-sand*). Savi johtaa vettä huonosti, kun taas hiekka johtaa vettä hyvin. Hydraulisella johtavuudella ja maaperän ominaisuuksilla voikin mallin perusteella olla viherkattoja suurempi vaikutus valuntaan etenkin rankkasateen aikana. Myös mallin esittämässä tulvinnassa hyvin ja huonosti vettä johtavien skenaarioiden (*0-clay* ja *0-sand*) välillä on selkeä ero.

Myös Wu et al. (2013) totesivat, että läpäisemättömyyden lisäys lisää huippuvirtaamia. Sen sijaan läpäisemättömien pintojen sijainnilla voidaan vaikuttaa enemmän huippuvirtaaman ajoitukseen kuin virtaaman määrään (Wu et al. 2013). He havaitsivat myös, että ilmastonmuutoksen ja maankäytön muutosten vaikutukset yhdessä ovat suuremmat kuin kummaankaan tekijän vaikutukset yksin. Tämä olisi syytä huomioida myös Turussa tulevassa hule- ja jätevesiin liittyvässä suunnittelussa. Jos esimerkiksi valuma-alueen yläosan läpäisemättömyys lisääntyy merkittävästi voi sillä olla vaikutusta verkoston alemman osan toimintaan. Ilmastonmuutoksen seurauksena mahdollisesti lisääntyvät rankkasateet voivat lisätä kaupunkitulvia ja esimerkiksi haitata jätevedenpuhdistamon toimintaa. Turussa rankkasateiden aiheuttamat ongelmat kaupungissa ja jätevedenpuhdistamolla tulivat todeksi jo vuoden 2012 elokuussa. Jos rankkasateeseen liittyy myös esimerkiksi myrskystä johtuvia sähkökatkoja, voi tulvariski entisestään kasvaa (Olsson et al. 2009).

Läpäisevyyden kartoitusta ja luokittelua tarkentamalla mallin antamia tuloksia voitaisiin vielä parantaa. Esimerkiksi pinnat, joita yleensä pidetään läpäisemättöminä, eivät aina ehkä olekaan täysin läpäisemättömiä. Sen sijaan päällysteissä olevat saumakohdat ja jopa pääl-

lysteet, etenkin vanhat ja halkeilleet päällysteet, voivat päästää vettä lävitseen (Wiles & Sharp 2008, Rodriguez et al. 2008). Katukivetykset määritettiin tässä työssä kokonaan läpäisemättömiksi, vaikka kivetysten välisillä raoilla ja saumakohdilla voi ainakin pienemmillä sateilla olla merkitystä vedenpidätyksen kannalta. Lisäksi kattojen kytkeminen verkostoon tulisi tarkistaa, jotta erikoisilta reitittymisratkaisuilta vältytään. Mallin tarkistamiseksi olisikin tärkeää tehdä virtaamamittauksia sataman valuma-alueella ja kalibroida ja validoida malli niiden perusteella.

5.3 Viherkatot

Viherkatoilla saavutettiin tavallisiin kattoihin verrattuna 22 – 62 % vedenpidätys elokuussa ja 38–97 % pidätys lokakuussa katon paksuudesta riippuen (taulukot 10 ja 11), kun tarkasteltiin vain kattoalivaluma-alueilta lähtevää vettä. Tämä vastaa hyvin aiempia tutkimuksia, joissa virtaaman vähennys on vaihdellut välillä 20–100 % (Ahiablame et al. 2012). Sademäärän kasvaessa viherkattojen pidätyskyky puolestaan useiden tutkimusten mukaan heikenee (Guan et al. 2015b, Ahiablame et al. 2012). Sademäärän vaikutus näkyi myös Turussa. Lokakuun pienemmällä sademäärällä kattojen pidätyskyky oli suurempi kuin elokuun sateilla. Koko valuma-alueen valunta puolestaan väheni elo- ja lokakuussa 6–29 % riippuen katon paksuudesta.

Mentens et al. (2006) arvioivat, että jos 10 % katoista Brysselissä muutettaisiin paksuiksi viherkatoiksi, valunta voisi vähentyä 2,7 % (Mentens et al. 2006). Turun sataman valuma-alueella 10 prosentin viherkattojen lisäys vähensi mallin mukaan 73 mm sadannalla verkostoon tulevaa valuntaa 1 % (taulukko 8, elokuu) ja 42 mm sadannalla 2 % (taulukko 9, lokakuu). Osa viherkattoihin pidättyneestä vedestä poistuu haihdunnan kautta (Raudaskoski 2016, Li 2014), mikä ei tosin tässä työssä tullut näkyville todennäköisesti tarkastelujaksojen lyhyydestä ja vuodenajasta johtuen, koska haihdunta määräytyy mallissa lämpötilojen mukaan.

Krebs et al. (2016) tutkivat SWMM:n kykyä mallintaa viherkattoja ja totesi, että se soveltuu siihen hyvin. Malli antoi mittauksiin nähden hyviä tuloksia etenkin rankkasadetapahtumien aikana. Sadetapahtumien väliin jäävien kuivien kausien haihdunnan on todettu vaikuttavan viherkaton pidätyskykyyn (Krebs et al. 2016). Pidempi tarkastelujakso muuttaisi mahdollisesti myös tässä työssä saatuja tuloksia haihdunnan osalta. Carter ja Jackson (2007) mallinsivat viherkattojen vaikutusta SWMM:llä vastaavalla tavalla eri sademäärillä lisäämällä viherkattoja kaikkiin kattoihin tai vain tasakattoihin. Tutkimusalueella läpäisevää pintaa oli 54 % ja kattoja 16 % kokonaisalasta (Carter & Jackson 2007). He havaitsivat merkittävän eron tasakattojen ja kaltevien kattojen sekä erilaisten sadetapahtumien välillä. Myös Getter (2007) totesi, että katon kaltevuudella on vaikutusta viherkaton pidätyskykyyn. Mitä pienempi kaltevuus, sitä paremmin katto pidättää vettä (Getter et al. 2007).

Palla ja Gnecco (2015) mallinsivat SWMM:llä viherkattojen ja läpäisevän päällysteen vaikutusta Italian Genovassa. Testikaton kasvukerroksen paksuus oli 120 mm ja kaltevuus 2 %. Mallinnuskenaarioissa vertailtiin läpäisemättömän pinnan vähenemisen vaikutusta, viherkattoja ja läpäisevää päällystettä. He havaitsivat, että läpäisemättömän pinnan vähenemisen on oltava vähintään 5 %, jotta sillä on vaikutusta valuntaan. Mitä suurempi vähenys on, sitä suurempi on myös sen vaikutus valuntaan.

Alkukosteus vaikuttaa viherkaton pidätyskykyyn ja huippuvirtaamiin (Palla & Gnecco 2015, Stovin 2010), ja myös tässä työssä alkukosteudella oli suuri vaikutus valuntaan.

Alussa täysin kyllästyneet katot lisäsivät tarkastelujakson valuntaa elokuussa 2–5 % ja lokakuussa 4–7 % viherkaton paksuudesta riippuen. Osa viherkattoon alussa varastoituneesta vedestä muuttui siis valunnaksi tarkastelujakson aikana, koska loppuvarasto on aina alkuvarastoa pienempi (taulukot 10 ja 11). Tällä voi olla merkitystä etenkin silloin, jos viherkattoja joudutaan kuivina kausina kastelemaan runsaasti ja kasteluvesi on muuta kuin valuma-alueelta kerättyä sadevettä. Kastelu voi olla muun hoidon ja ylläpidon lisäksi tarpeen kuivina kausina kattotyypistä riippuen (Rakennustieto 2016a). Todellisuudessa kastelu ei liene koskaan niin runsasta, että katto olisi täysin vedellä kyllästynyt seuraavan sateen alkaessa. Pidemmällä mallinnusjaksolla vesitaseiden erot luultavasti tasaantuisivat, kun viherkatot ehtisivät kuivua sadetapahtumien välillä ja edellinen katot kastellut sade olisi huomioitu myös muualla verkostossa.

Kuvien 12 ja 16 kuvaajia verrattaessa nähdään, että myös märät viherkatot pystyvät vettä pidättämällä alentamaan ensimmäisiä virtaamahuippuja ja vähentämään hieman tulvintaa verkostossa, kuten ovat todenneet myös Carter ja Jackson (2007). Villarreal ja Bengtsson (2005) puolestaan havaitsivat, että märät viherkatot pystyvät kyllä viivyttämään vettä, mutta eivät varastoimaan kuten kuivat katot. Tässä työssä merkiin ja kuiviin viherkattoihin lopussa varastoitunut vesimäärä puolestaan on sama, mikä viittaisi siihen, että viherkatto pystyy aina pidättämään varastonsa verran vettä sopivissa olosuhteissa. Krebs et al. (2016) vertasivat mitattuja ja mallinnettuja tuloksia ja totesivat, että vaikka SWMM:n tapa esittää viherkattojen alkukosteus ja sen vaikutus haihduntaan on yksinkertaistettu, sillä ei ole merkittävää vaikutusta tulosten kannalta. Viherkatot voivat useiden tutkimusten mukaan vähentää valuntaa merkittävästi (Ahiablame et al. 2012). Niiden toimivuus riippuu kuitenkin monista tekijöistä. Suomessa esimerkiksi pitkä talvi vaikuttanee viherkattojen toimivuuteen. Siksi viherkatot yksin eivät riitä hulevesien hallintaan, vaan niiden rinnalle tarvitaan myös muita järjestelmiä ja ratkaisuja (Guan et al. 2015b, Mentens et al. 2006).

5.4 Epävarmuus- ja virhetekijät

Epävarmuudet voivat liittyä esimerkiksi parametreihin, lähtöaineistoihin, malliin ja skenaarioihin (Bach et al. 2014, Deletic et al. 2012). Mallin rakennus tehtiin GisToSWMM5-ohjelmalla, mikä yhtäältä vähentää moniin vaiheisiin liittyviä epävarmuuksia ja mahdollisia virheitä verrattuna mallin rakentamiseen käsin. Toisaalta mallin automatisoitu rakentaminen luo uusia epävarmuuslähteitä, esimerkiksi veden reititys läpäisemättömältä alueelta melko kaukana sijaitsevaan kaivon läpäisevien alueiden yli. Lähtöaineistot sen sijaan valmisteltiin käsin ja useista eri lähteistä, mikä lisää virheen mahdollisuutta niissä. Tarkastelualueen laajuus on yksi mallinnuksen epävarmuuksia lisäävä tekijä. Valuma-alueen laajuudesta johtuen ei esimerkiksi jokaista piha-alueita ollut mahdollista kartoittaa ilmakuvaa tarkemmalla tasolla. Lisäksi kaikille katoille annettiin sama kaltevuus kaltevuustiedon puuttumisen vuoksi. Epävarmuuksia liittyy myös valuma-alueen määritykseen. Turun kaupungilta saatu rajausta on määritetty käsin korkeuskäyrien perusteella eikä se näin ollen ole kovin tarkka. DEM 2x2 m² -korkeusmallin perusteella tehty rajausta on osittain tarkempi, mutta sekään ei välttämättä kuvaa kaikin paikoin todellista tilannetta. Toisaalta nämä kaksi eri tavoin määritettyä rajausta vastasivat toisiaan melko hyvin.

Muiden kuin rakennusten, teiden ja puistojen määrittely ja läpäisevyyden luokittelu tehtiin tässä työssä käsin ilmakuvan ja kantakartan perusteella. Näin ollen luokittelu ei ole täydellinen ja siihen sisältyy virheen mahdollisuus. Esimerkiksi puut voivat peittää alleen läpäisemättömiä alueita (Jacobson 2011) ja rakennusten räystäiden alla voi olla läpäiseviä alueita. Joissain tapauksissa käsin määrittely voi antaa tarkemman tuloksen alueiden lä-

päisevyydestä kuin automaattinen luokittelu satelliittikuvasta (Beighley et al. 2009). Barco et al. (2008) puolestaan havaitsivat, että maankäyttöaineiston perusteella käsin määritetty läpäisevyys aliarvioi alueen läpäisemättömyyttä.

Valuma-alueen maaperän ominaisuuksista ei ole täyttä varmuutta. Suuri osa alueesta on täytemaata (GTK 2016), jonka alla on todennäköisesti savikko. Savikon läpäisevyys on huomattavasti pienempi kuin soran. Täytemaakerroksen paksuudesta ei ole tietoa. Tämän vuoksi parametrit määritettiin sekä hyvin että huonosti johtavalle maaperälle. Jätevedenpuhdistamolta ei ollut saatavissa lähtevän virtaaman mittaustietoa, joten käytössä oli tulovirtaama. Sen viipymien arviointiin ja tarkkoihin määriin voi liittyä epävarmuuksia. Malli ei myöskään pysty täydellisesti kuvaamaan tilannetta, joka tapahtui elokuussa 2012, kun jätevedenpuhdistamo joutui rajoittamaan tulevan veden virtaamaa. Mallissa jätevettä virtaa koko ajan verkostoon, vaikka todellisuudessa myös jätevedenpuhdistamolla tulvi eikä hulevesiverkoston ylivuotokaivoa pystytty käyttämään padotuksen vuoksi.

Viherkattojen kaltevuudet voivat myös aiheuttaa epävarmuuksia. Kaltevuuden vaikutuksesta viherkaton pidätyskykyyn on erilaisia tutkimustuloksia (Czemieli Berndtsson 2010, Villarreal & Bengtsson 2005), joten kattojen kaltevuuksien osalta mallia voisi vielä tarkentaa ja kaltevuuden vaikutuksia tutkia lisää. Reititys läpäisemättömältä alueelta läpäisevän yli ei kuvaa todellista tilannetta ja se voitaisiin todennäköisesti korjata muokkaamalla korkeusaineistoa niin, ettei siinä olisi lainkaan kokonaan tasaisia alueita ja kuoppia, jotta vesi ei jäisi seisomaan alueille, vaan siirtyisi aina eteenpäin seuraavalle alivaluma-alueelle. Sataman valuma-alue on hyvin tasaista, joten reitittymättömiä alueita muodostui melko paljon. Viherkattotaseissa elokuussa (taulukko 8) on myös laskentaan liittyviä epävarmuuksia, koska kuivat viherkatot vähentävät valuntaa putkistoon, mutta vähennys ei näy kokonaisvalunnassa.

Turun sataman valuma-alueen hulevesiviemäriverkosto vaatisi muutamien kaivojen osalta vielä tarkistusmittauksia. Lisäksi kattojen kytkentä hulevesiverkostoon tulisi tarkistaa, koska väärin kuvattu kattojen kytkentä voi johtaa virheellisiin virtaamiin (Krebs et al. 2014). Mallin avulla voidaan esimerkiksi paikallistaa kaivoja, joiden verkostokarttaan merkityt korkeustiedot eivät ehkä pidä paikkaansa tai joiden mitoitus ei ole kunnossa. Kalibrointia ja validointia ei tässä työssä voitu tehdä, koska mittausaineistoa ei ollut vielä saatavilla tutkimusalueelta. Siksi mallin antamia tuloksia tulisi ajatella enemmän suuntaa antavina ja ymmärrystä lisäävinä kuin absoluuttisesti oikeina hulevesimäärinä.

6 Johtopäätökset

Turun sataman valuma-alueella on vuonna 2012 rankkasateiden aikana esiintynyt hulevesitulvia, jotka olivat tämän tarkastelun lähtökohta. Työssä mallinnettiin SWMM5-ohjelmalla alueen hulevesiä ja arvioitiin tulvariskiä erilaisten skenaarioiden avulla. Lisäksi mallin tulvimistietoja verrattiin vuoden 2012 ilmoitettuihin tulvahavaintoihin. Malli näyttää mahdollisia ongelma- ja tulvakohteita hulevesiverkostossa ja auttaa havainnollistamaan verkoston toimintaa. Mallin kalibrointia ja validointia varten tarvittaisiin kuitenkin mittaus-tietoa, jotta saataisiin vielä paremmin todellisuutta kuvaavia tuloksia.

Tutkittavat skenaariot määriteltiin Turun kaupungin maankäyttösuunnittelun tarpeita kuunnellen. Vertailutilana käytettiin vuoden 2012 rankkasadetapahtumia ja tapahtumien aikaisia mitattuja merivedenkorkeuksia. Maankäyttö oli nykytilanteen mukainen. Mallin avulla haluttiin selvittää myös, miten viherkattojen lisääminen vaikuttaa valuma-alueen pidätyskykyyn ja pystyttäisiinkö niiden avulla parantamaan hulevesien hallintaa. Lisäksi tutkittiin, miten merivesitulva vaikuttaa hulevesiverkoston toimintaan ja millainen vaikutus jätevedenpuhdistamon purkuputkella olisi hulevesiverkoston kapasiteettiin. Gis-ToSWMM5-ohjelman käyttö nopeutti mallin rakentamista huomattavasti, kun kyseessä on näin suuri valuma-alue.

Mallinnuksen aikana huomattiin, että valuma-alueen tasaisuus vaikutti veden reititykseen ja etenemiseen alivaluma-alueilla. Vesi ei etene tasaisilta läpäiseviltä alueilta, mikä johtaa suuriin varastotilavuuksiin ja siihen, että läpäisevien alueiden maaperän vaikutus ei juuri näy purkuputkien virtaamisissa, vaikka valuma-alueilla se onkin nähtävissä. Reitityksen parantamiseksi voisi olla hyvä poistaa korkeusaineistosta kuoppien lisäksi myös tasaiset alueet kokonaan, jotta vesi ei jäisi seisomaan valuma-alueille, vaan siirtyisi aina eteenpäin. Lisäksi monimutkainen ja haarautuva viemäriverkosto voi aiheuttaa virtaamiin ylimääräistä heilahtelua purkuputkissa.

Jätevedenpuhdistamon purkuvesien poisto hulevesiverkostosta vähensi huomattavasti kokonaisvaluntaa, mutta tulvintaa vain reilun viidenneksen rankkasateen aikana. Erillinen purkuputki jätevesille ei siis riitä estämään hulevesiverkoston tulvintaa kovien rankkasateiden aikana, jos verkoston kapasiteetti on riittämätön. Merivesitulva yhtä aikaa rankkasateen kanssa lisäsi tulvintaa verkostossa, ja vähensi kokonaisvaluntaa. Kun verkostoon ei tullut jätevedettä, pelkän merivesitulvan vaikutus jäi pieneksi. Suurin hyöty jäteveden purkamisesta erillisen putken kautta saataisiin todennäköisesti silloin, kun merivedenpinta on korkealla.

Viherkatot vähentävät mallin mukaan tulvintaa verkostossa, mutta niiden vaikutus kokonaisvaluntaan on mallin perusteella melko pieni kovan rankkasateen aikana. Viherkaton alkukosteustila vaikutti sen tuottamaan valuntaan, mutta ei lopussa varastoidun veden määrään. Täysin vedellä kyllästyneillä viherkatoilla oli jopa valuntaa lisäävä vaikutus, mikä todennäköisesti korjaantuisi pidentämällä mallinnusjaksoa. Alkukosteuden vaikutusta olisi syytä tutkia lisää Turussa ja mallintaa pidemmällä ajanjaksolla ja erilaisilla sadetapahtumilla. Lisäksi olisi syytä tutkia kastelun vaikutuksia viherkattoihin ja verrata tilanteita, joissa viherkatot on kastellut edellinen sadetapahtuma, tai ne on kasteltu valuma-alueelta kerätyllä sadevedellä tai systeemin ulkopuolelta tulleella vedellä. Mallin ja tulosten kalibroimiseksi ja validoimiseksi tarvittaisiin myös testikattoa ja mittaus-tuloksia.

Turun sataman valuma-alueen hulevesiverkoston vanhimmat putket ovat peräisin 1930-luvulta, joten kunnostus- ja uusimistarve on todennäköinen osissa verkostoa. Mallinnuksen perusteella verkoston kapasiteetti on nykyisellään riittämätön vastaanottamaan elokuun 2012 kaltaisia harvinaisempia kuin kerran 200 vuodessa tapahtuvia rankkasateita, vaikka jätevedenpuhdistamolta ei enää tulisi purkuvesiä verkostoon. Putkien koko on paikoitellen riittämätön vastaanottamaan suuria määriä vettä lyhyessä ajassa. Pahin tulvariski syntyy, jos merivesitulva sattuu yhtä aikaa rankkasateen kanssa. Viherkatoilla voitaisiin joissain tilanteissa parantaa vedenpidätyskykyä, mutta niiden lisäksi olisi syytä tutkia myös muita keinoja kuten esimerkiksi viherpainanteita ja läpäiseviä päällysteitä, joilla voitaisiin pidättää enemmän sadevettä ja näin pienentää hulevesiverkoston kuormitusta.

Kirjallisuus

- Aaltonen, J. & Hohti, H. & Jylhä, K., et al. 2008. *Rankkasateet ja taajamatulvat (RATU). Rankkasateet ja taajamatulvat (RATU)*. Suomen ympäristökeskus.
- Ahiablame, L.M. & Engel, B.A. & Chaubey, I. 2012. *Effectiveness of low impact development practices: literature review and suggestions for future research*. Water, Air, & Soil Pollution. Vol. 223. No. 7. p. 4253-4273.
- Bach, P.M. & Rauch, W. & Mikkelsen, P.S., et al. 2014. *A critical review of integrated urban water modelling – Urban drainage and beyond*. Environmental Modelling & Software. Vol. 54. p. 88-107. ISSN 1364-8152.
- Barco, J. & Wong, K.M. & Stenstrom, M.K. 2008. *Automatic calibration of the US EPA SWMM model for a large urban catchment*. Journal of Hydraulic Engineering. Vol. 134. No. 4. p. 466-474.
- Beighley, R. & Kargar, M. & He, Y. 2009. *Effects of Impervious Area Estimation Methods on Simulated Peak Discharges*. Journal of Hydrologic Engineering. Vol. 14. No. 4. p. 388-398. ISSN 1084-0699.
- Bengtsson, L. & Grahn, L. & Olsson, J. 2005. *Hydrological function of a thin extensive green roof in southern Sweden*. Hydrology Research. Vol. 36. No. 3. p. 259-268.
- Bliss, D.J. & Neufeld, R.D. & Ries, R.J. 2009. *Storm water runoff mitigation using a green roof*. Environmental Engineering Science. Vol. 26. No. 2. p. 407-418.
- Burszta Adamiak, E. & Mrowiec, M. 2013. *Modelling of green roofs' hydrologic performance using EPA's SWMM*. Water science and technology. Vol. 68. No. 1. p. 36-42. ISSN 0273-1223.
- Carter, T. & Jackson, C.R. 2007. *Vegetated roofs for stormwater management at multiple spatial scales*. Landscape and Urban Planning. Vol. 80. No. 1–2. p. 84-94. ISSN 0169-2046.
- Czemiel Berndtsson, J. 2010. *Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review*. Ecological Engineering. Vol. 36. No. 4. p. 351-360. ISSN 0925-8574.
- Deletic, A. & Dotto, C. & McCarthy, D., et al. 2012. *Assessing uncertainties in urban drainage models*. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C. Vol. 42. p. 3-10.
- Delleur, J.W. 2003. *The evolution of urban hydrology: past, present, and future*. Journal of Hydraulic Engineering. Vol. 129. No. 8. p. 563-573.
- Dickinson, R. 2012. *Flow splitting in dynamic wave routing. SWMM knowledge base*. [Viitattu: 13.7.2016]. Saatavissa: <https://www.openswmm.org/Topic/4393/flow-splitting-in-dynamic-wave-routing>.

- Elliott, A.H. & Trowsdale, S.A. 2007. *A review of models for low impact urban storm-water drainage*. Environmental Modelling & Software. Vol. 22. No. 3. p. 394-405. ISSN 1364-8152.
- Fletcher, T. & Andrieu, H. & Hamel, P. 2013. *Understanding, management and modelling of urban hydrology and its consequences for receiving waters: A state of the art*. Advances in Water Resources. Vol. 51. p. 261-279.
- Gambi, G. & Maglionico, M. & Tondelli, S. 2011. *Water management in local development plans: the case of the old Fruit and Vegetable Market in Bologna*. Procedia Engineering. Vol. 21. p. 1110-1117. ISSN 1877-7058.
- Getter, K.L. & Rowe, D.B. & Andresen, J.A. 2007. *Quantifying the effect of slope on extensive green roof stormwater retention*. Ecological Engineering. Vol. 31. No. 4. p. 225-231. ISSN 0925-8574.
- Gironás, J. & Niemann, J. & Roesner, L., et al. 2010. *Evaluation of Methods for Representing Urban Terrain in Storm-Water Modeling*. Journal of Hydrologic Engineering. Vol. 15. No. 1. p. 1-14. ISSN 1084-0699.
- GTK. 2016. *Maankamara*. [Viitattu: 11.5.2016]. Saatavissa: <http://gtkdata.gtk.fi/Maankamara/index.html>.
- Guan, M. & Sillanpää, N. & Koivusalo, H. 2015b. *Assessment of LID practices for restoring pre-development runoff regime in an urbanized catchment in southern Finland*. Water Science and Technology. Vol. 71. No. 10. p. 1485-1491.
- Guan, M. & Sillanpää, N. & Koivusalo, H. 2015a. *Modelling and assessment of hydrological changes in a developing urban catchment*. Hydrological Processes. Vol. 29. No. 13. p. 2880. ISSN 0885-6087.
- Hsu, M.H. & Chen, S.H. & Chang, T.J. 2000. *Inundation simulation for urban drainage basin with storm sewer system*. Journal of Hydrology. Vol. 234. No. 1–2. p. 21-37. ISSN 0022-1694.
- Huong, H. & Pathirana, A. 2011. *Urbanization and climate change impacts on future urban flood risk in Can Tho city, Vietnam*. Hydrology & Earth System Sciences Discussions. Vol. 8. No. 6.
- Ilmatieteenlaitos. 2013. *Ilmastonmuutos nostaa merenpintaa Suomenlahdella*. 26.4.2013. [Viitattu: 15.7.2016]. Saatavissa: <http://ilmatieteenlaitos.fi/tiedote/650329>.
- Jacobson, C.R. 2011. *Identification and quantification of the hydrological impacts of imperviousness in urban catchments: A review*. Journal of environmental management. Vol. 92. No. 6. p. 1438-1448. ISSN 0301-4797.
- Jang, S. & Cho, M. & Yoon, J., et al. 2007. *Using SWMM as a tool for hydrologic impact assessment*. Desalination. Vol. 212. No. 1–3. p. 344-356. ISSN 0011-9164.

- Koudelak, P. & West, S. 2008. *Sewerage network modelling in Latvia, use of InfoWorks CS and Storm Water Management Model 5 in Liepaja city*. Water and environment journal. Vol. 22. No. 2. p. 81-87. ISSN 1747-6585.
- Krebs, G. & Kuoppamäki, K. & Kokkonen, T. & Koivusalo, H. 2016. *Simulation of green roof test bed runoff*. Hydrological Processes. Vol. 30. No. 2. p. 250. ISSN 0885-6087.
- Krebs, G. & Kokkonen, T. & Valtanen, M., et al. 2014. *Spatial resolution considerations for urban hydrological modelling*. Journal of Hydrology. Vol. 512. p. 482-497. ISSN 0022-1694.
- Krebs, G. & Kokkonen, T. & Valtanen, M., et al. 2013. *A high resolution application of a stormwater management model (SWMM) using genetic parameter optimization*. Urban Water Journal. Vol. 10. No. 6. p. 394-410. ISSN 1573-062X.
- Lee, J. & Heaney, J. 2003. *Estimation of Urban Imperviousness and its Impacts on Storm Water Systems*. Journal of Water Resources Planning and Management. Vol. 129. No. 5. p. 419-426. ISSN 0733-9496.
- Leino, N. 2012. *Kakolanmäen jätevedenpuhdistamon tarkkailututkimus, Vuosiraportti 2012*.
- Li, Y. 2015. *Modeling Hydrologic Performance of a Green Roof System with HYDRUS-2D*. Journal of Environmental Engineering. Vol. 141. No. 11. ISSN 0733-9372.
- Li, Y. 2014. *Green roof hydrologic performance and modeling: A review*. Water science and technology. Vol. 69. No. 4. p. 727-738. ISSN 0273-1223.
- Meierdiercks, K.L. & Smith, J.A. & Baeck, M.L. & Miller, A.J. 2010. *Analyses of Urban Drainage Network Structure and its Impact on Hydrologic Response1*. JAWRA Journal of the American Water Resources Association. Vol. 46. No. 5. p. 932-943. ISSN 1752-1688.
- Mejía, A.I. & Moglen, G.E. 2010. *Impact of the spatial distribution of imperviousness on the hydrologic response of an urbanizing basin*. Hydrological Processes. Vol. 24. No. 23. p. 3359-3373. ISSN 1099-1085.
- Mentens, J. & Raes, D. & Hermy, M. 2006. *Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century?* Landscape and Urban Planning. Vol. 77. No. 3. p. 217-226. ISSN 0169-2046.
- MRL. 2014. *Maankäyttö- ja rakennuslaki.13 a luku (22.8.2014/682) Hulevesiä koskevat erityiset säännökset*. Saatavissa: <http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1999/19990132#L13a>.
- Olsson, J. & Berggren, K. & Olofsson, M. & Viklander, M. 2009. *Applying climate model precipitation scenarios for urban hydrological assessment: A case study in Kalmar City, Sweden*. Atmospheric Research. Vol. 92. No. 3. p. 364-375. ISSN 0169-8095.

- Ouyang, W. & Guo, B. & Hao, F., et al. 2012. *Modeling urban storm rainfall runoff from diverse underlying surfaces and application for control design in Beijing*. Journal of environmental management. Vol. 113. p. 467-473. ISSN 0301-4797.
- Palla, A. & Gnecco, I. 2015. *Hydrologic modeling of Low Impact Development systems at the urban catchment scale*. Journal of Hydrology. Vol. 528. p. 361-368. ISSN 0022-1694.
- Rakennustieto. 2016c. RT 85-11205, *Viherkatot ja katto- ja kansipuutarhat, rakenteet*.
- Rakennustieto. 2016b. RT 85-11204, *Viherkatot ja katto- ja kansipuutarhat, kasvillisuus ja kasvualusta*.
- Rakennustieto. 2016a. RT 85-11203, *Viherkatot ja katto- ja kansipuutarhat, periaatteet*.
- Rakennustieto. 2015. RT 89-11196, *Hulevesien hallinta*.
- Ranger, N. & Hallegatte, S. & Bhattacharya, S., et al. 2011. *An assessment of the potential impact of climate change on flood risk in Mumbai*. Climatic Change. Vol. 104. No. 1. p. 139-167.
- Raudaskoski, O. 2016. *Hulevesien hallintavaihtoehtojen mallinnus tiiviissä taajamassa*. Diplomityö, Rakennetun ympäristön laitos, Insinööritieteiden korkeakoulu, Aalto-yliopisto.
- Rodriguez, F. & Andrieu, H. & Morena, F. 2008. *A distributed hydrological model for urbanized areas – Model development and application to case studies*. Journal of Hydrology. Vol. 351. No. 3–4. p. 268-287. ISSN 0022-1694.
- Rontu, K. 2014. *Hulevedet ja vesihuoltolaki. Hulevedet eivät ole enää vesihuoltoa. PP-esitys. Kuntamarkkinat 10.9.2014. Kuntaliitto*. [Viitattu: 28.7.2016]. Saatavissa: <http://www.kunnat.net/fi/tietopankit/tapahtumat/aineisto/2014/kuntamarkkinat/ayk-kuma-2014/hulevedet/RontuKirsi.pdf>.
- Rossman, L.A. 2015. *Storm Water Management Model User's Manual Version 5.1. Storm Water Management Model User's Manual Version 5.1*. U.S. Environmental Protection Agency.
- Schroll, E. & Lambrinos, J. & Righetti, T. & Sandrock, D. 2011. *The role of vegetation in regulating stormwater runoff from green roofs in a winter rainfall climate*. Ecological Engineering. Vol. 37. No. 4. p. 595-600. ISSN 0925-8574.
- Semadeni-Davies, A. & Hernebring, C. & Svensson, G. & Gustafsson, L. 2008. *The impacts of climate change and urbanisation on drainage in Helsingborg, Sweden: Combined sewer system*. Journal of Hydrology. Vol. 350. No. 1–2. p. 100-113. ISSN 0022-1694.
- Sillanpää, N. 2013. *Effects of suburban development on runoff generation and water quality. Effects of suburban development on runoff generation and water quality*. Espoo. Aalto University. Doctoral Dissertations, 160/2013. ISBN 978-952-60-5374-5.

- Stovin, V. 2010. *The potential of green roofs to manage urban stormwater*. Water and environment journal. Vol. 24. No. 3. p. 192. ISSN 1747-6585.
- Suomen Kuntaliitto. 2012. *Hulevesiopas*. Suomen Kuntaliitto. Saatavissa: <http://shop.kunnat.net/download.php>.
- Tikkanen, H. 2013. *Hydrological modeling of a large urban catchment using a stormwater management model (SWMM)*. Diplomityö, Aalto-yliopisto.
- Titus, J. & Kuo, C. & Gibbs, M., et al. 1987. *Greenhouse Effect, Sea Level Rise, and Coastal Drainage Systems*. Journal of Water Resources Planning and Management. Vol. 113. No. 2. p. 216-227. ISSN 0733-9496.
- TSP. 2015. *Turun Seudun puhdistamo Oy*. [Viitattu: 12.5.2016]. Saatavissa: www.turunseudunpuhdistamo.fi.
- Tulvakeskus. 2016. *Tulvakarttapalvelu*. [Viitattu: 11.5.2016]. Saatavissa: <http://paikkatieto.ymparisto.fi/tulvakartat/SL/Viewer.html?Viewer=Tulvakarttapalvelu>.
- Turku. 2016. *Turun kaupungin hulevesiohjelma*.
- Turku. 2015. *Kaavoituskatsaus 2015*. Saatavissa: https://www.turku.fi/sites/default/files/atoms/files/turkuposti_kaavoituskatsaus_2015-1.pdf.
- Turku. 2012. *Lausunto, sademäärät 27.8. ja 5.10.2012*. Ympäristötoimiala, Ympäristön-suojeluyksikkö.
- VanWoert, N.D. & Rowe, D.B. & Andresen, J.A., et al. 2005. *Green roof stormwater retention*. Journal of environmental quality. Vol. 34. No. 3. p. 1036-1044.
- VHL. 2014. *Vesihuoltolaki. 3 a luku (22.8.2014/681) Huleveden viemäroinnin järjestäminen ja hoitaminen*. Saatavissa: <http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2001/20010119#L3a>.
- Villarreal, E.L. & Bengtsson, L. 2005. *Response of a Sedum green-roof to individual rain events*. Ecological Engineering. Vol. 25. No. 1. p. 1-7.
- Warsta, L. & Niemi, T. & Taka, M., et al. 2016. *Development and application of an automated subcatchment generator for SWMM using open data*. Urban Water Journal, arvi-
oitavana.
- Wiles, T.J. & Sharp, J.M. 2008. *The secondary permeability of impervious cover*. Environmental & engineering geoscience. Vol. 14. No. 4. p. 251-265.
- Wu, J. & Thompson, J.R. & Kolka, R.K., et al. 2013. *Using the Storm Water Management Model to predict urban headwater stream hydrological response to climate and land cover change*. Hydrology and Earth System Sciences. Vol. 17. No. 12. p. 4743.

Liitteet

Liite 1

Ohje aineiston valmisteluun GisToSWMM5 -ohjelmaa varten (Warsta et al. 2016).

SWMM INPUT-TIEDOSTOT

sadanta.DAT Sadantamittaukset SWMM formaatissa:

aseman nimi; vuosi; kuukausi; päivä; tunti; minuutti; sadanta (mm)

climate.DAT Päivittäiset säätiedot:

aseman nimi; kuukausi; päivä; minimi ilmanlämpötila (°C); maksimi ilmanlämpötila (°C); etukäteen laskettu potentiaalinen haihdunta PE (mm/d) ja tuulennopeus (km/h)

KORKEUSMALLIT

2x2 m², 4x4 m² ja 8x8 m² korkeusmallit tallennetaan ASCII muodossa (.asc). Tiedoston header-osassa on oltava seuraavat tiedot: ncols; xllcorner; yllcorner; cellsize; NODATA_value.

MAANKÄYTTÖ

raster_landuse_2x2m.asc

landuse_4x4m.asc

landuse_8x8m.asc

Maankäyttö shape-tiedostoon lisätään "id" niminen kenttä, jonka arvot määritetään eri maankäyttöille (Taulukko 1 alla). Maankäyttö shape-tiedosto muunnetaan 2x2 m², 4x4 m² ja 8x8 m² rasteriksi ja tallennetaan ASCII (.asc) -muodossa.

Tiedoston header-osassa on oltava seuraavat tiedot: ncols; xllcorner; yllcorner; cellsize; NODATA_value. NODATA_value -arvo asetetaan nolllaksi.

Taulukko 1. Maankäyttöalueiden koodit.

10	Paljas kallio
20	Katot, jotka on liitetty hulevesiverkoston
21	Katot, joita ei ole liitetty hulevesiverkoston
30	Sora- ja hiekka-alueet
40	Asfalttialueet
50	Kivetysalueet
60	Kasvillisuusalueet
70	Vesialueet

MAANKÄYTÖN OMINAISUUDET*table_catchment_props.txt*

id	maankäyttöalueen koodi (ks. Taulukko 1);
imperv	läpäisemättömien alueiden osuus (%);
dst_imp	läpäisemättömien alueiden painannevaraston koko (mm);
n_imper	läpäisemättömien alueiden karkeus eli Manningin n (-);
dst_per	läpäisevien alueiden painannevaraston koko (mm);
n_perv	läpäisevien alueiden karkeus eli Manningin n (-);
perc_z_i	osuus läpäisemättömistä alueista, joiden painannevarasto on nolla (%);
rain_ga	sademittarin nimi (esim. JUHANNUSKUKKULA);
conduct	Green-Ampt -infiltraatiomallin kyllästynyt hydraulinen johtavuus (mm/h);
initdef	Green-Ampt -infiltraatiomallin parametri, joka kuvaa tyhjää huokostilavuutta maassa simulaation alussa (fraktio);
suction	veden kapillaarinen nousukorkeus (mm);
Snowpacks	lumimallin nimi, jota sovelletaan alivaluma-alueella.

HULEVESIVERKOSTON PUTKET*table_conduits.txt*

Ominaisuudet shape-tiedostossa:

name	putken nimi (esim. c1, c2 ... cn)
elev_in	putken yläpään korkeusasema (m)
elev_out	putken alapään korkeusasema (m)
diameter	putken halkaisija (m)
length	putken pituus
junc_in	kaivon nimi, josta vesi virtaa putkeen (esim. j1, j2 ... jn)
junc_out	kaivon nimi johon vesi virtaa putkesta (esim. j1, j2 ... jn)
roughness	putken karkeus eli Manningin n (-)
elev_in_of	putken alareunan etäisyys kaivon alimman putken alareunasta kaivossa, josta vesi virtaa putkeen (m)
elev_out_of	putken alareunan etäisyys kaivon alimman putken alareunasta kaivossa, johon vesi virtaa putkesta (m).

Taulukon voi kopioida suoraan QGIS- tai ArcGIS-ohjelmista, jolloin se sisältää myös kentät x_0 = putken alkupään x-koordinaatti (m); y_0 = putken alkupään y-koordinaatti (m); x_1 = putken loppupään x-koordinaatti (m); y_1 = putken loppupään y-koordinaatti (m).

HULEVESIVERKOSTON KAIVOT*table_junctions.txt*

Ominaisuudet shape-tiedostossa:

name	kaivon nimi (esim. j1, j2 ... jn)
elevation	kaivon kannen korkeusasema (m)
inv_elev	alimman putken alareunan korkeusasema (m)
max_depth	kaivon syvyys eli elevation - inv_elev (m)
open	kaivon avonaisuus (0 = umpikansi ja 1 = ritiläkansi).

Taulukon voi kopioida suoraan QGIS- tai ArcGIS-ohjelmista, jolloin se sisältää myös kentät: x_0 = kaivon x-koordinaatti (m); y_0 = kaivon y-koordinaatti (m).

HULEVESIVERKOSTON PURKUPISTEET*table_outfalls.txt*

Hulevesiverkoston purkupisteiden ominaisuudet shape-tiedostossa:

Outfall purkupisteen nimi (esim. o1, o2,..., on)
 Invert purkupisteen alareunan korkeusasema (m).

SADEMITTARIT*table_raingages.txt* Sadetiedot**MUUT TULOVIRTAAMAT***table_inflows.txt* Kaivoihin tulevat muut virtaamat**AIKASARJAT***table_timeseries.txt* Aikasarjat, esim. merivedenkorkeus**RAPORTOINTIASETUKSET***table_report.txt* Mallin tulostusasetukset

Malli tulostaa virtaaman, virtausnopeuden ja pinnan syvyyden ajan funktiona näistä putkista.

SYMBOLIT*table_symbols.txt* Sademittarin sijainti kartalla**HAIHDUNNAN ASETUKSET***table_evaporation.txt* Haihdunnan asetukset

Haihdunta lasketaan lämpötilan perusteella. Haihduntaa ei tapahdu sateen aikana.

LUMIMALLIT*table_snowpacks.txt* Alivaluma-aleilla käytetyt lumimallit**MALLITIEDOSTON OTSIKKO-OSIO***table_SWMM5_header.txt*

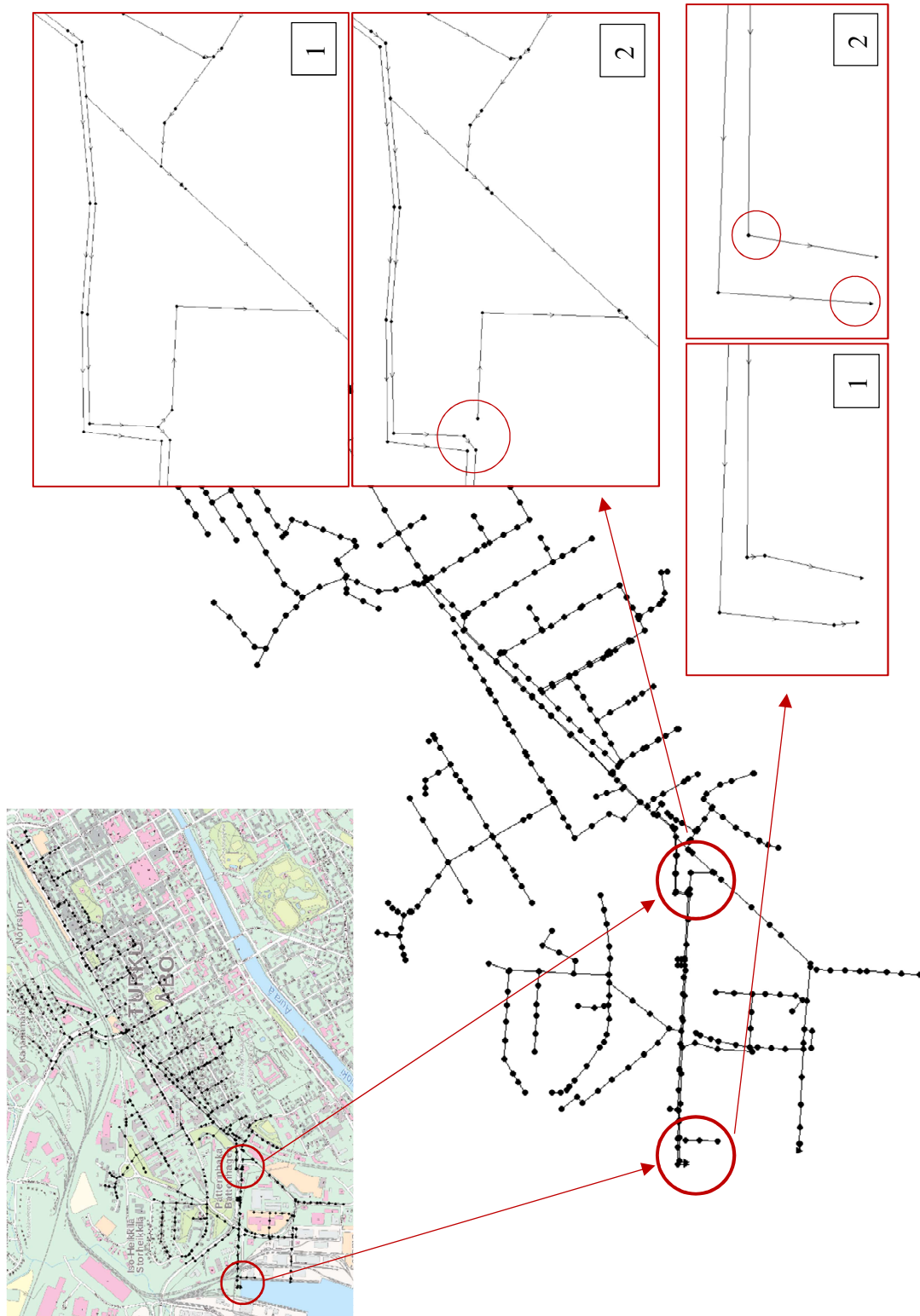
Tiedostossa asetetaan simulaation asetukset, kuten käytetyt mallit, aloitus- ja lopetuspäivämäärät (kk-pp-vvvv), raportointi- ja laskenta aika-askleet sekä asetuksia, joita käytetään putkistovirtausmallin (dynaaminen aalto) numeerisessa ratkaisussa. ROUTING_STEP kuvaa aika-askleen pituutta, jota käytetään putkistovirtausmallissa ja WET_STEP aika-askelta, jota käytetään alivaluma-alueiden välisen virtauksen laskennassa.

Liite 2

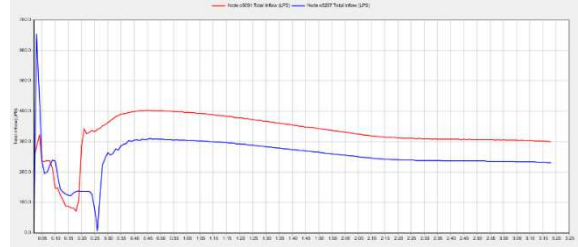
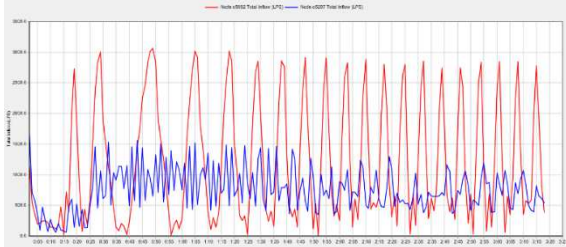
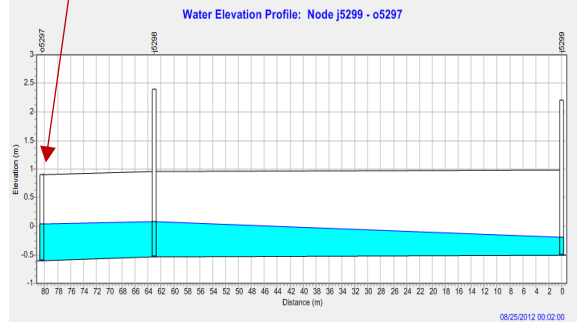
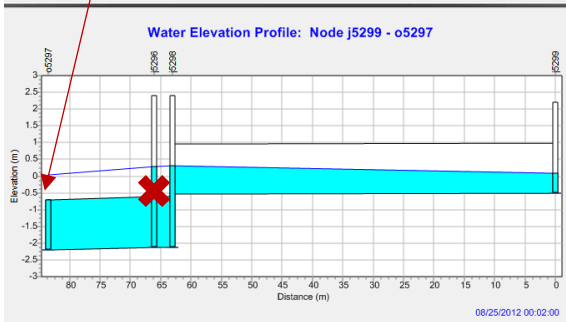
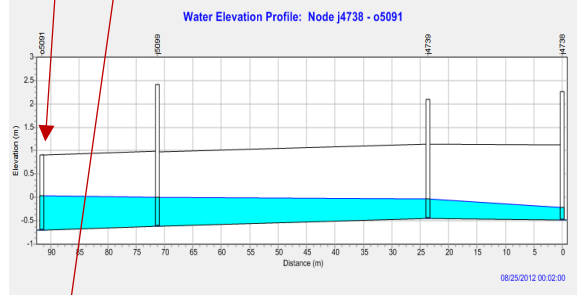
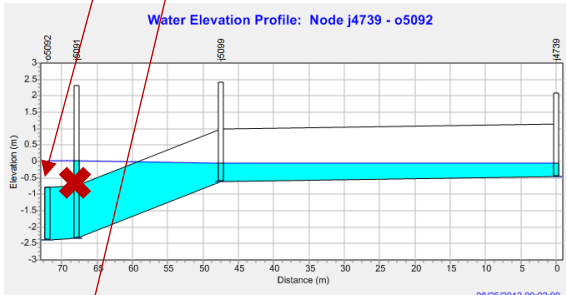
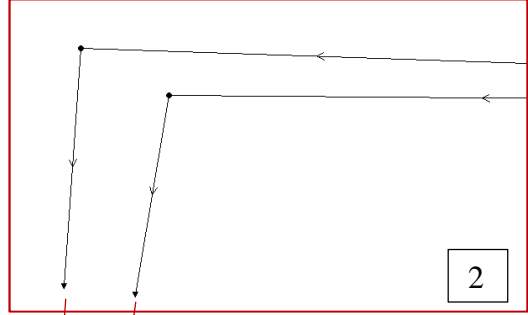
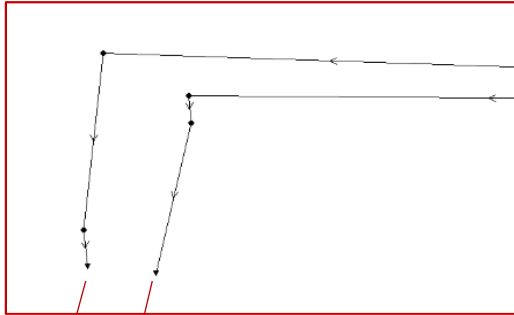
Verkostokorjaukset

Kuvissa 1 alkuperäinen verkosto, meriveden lisäys aiheutti värähtelyä ennen sadetapahtumaa. Kuvissa 2 korjattu verkosto, jossa värähtely on tasoittunut. Purkukaivoja nostettiin ylempäs, ja purkuputkisysteemejä yksinkertaistettiin. Lisäksi verkoston haarat yhdistävä ja kehän muodostava lyhyt putki poistettiin.

Putkisto:



Purkukaivot ja niiden virtaamat ennen (1) ja jälkeen (2) muutosten:



Liite 3

SWMM5-tiedostot viherkatoille (Rossman 2015)

Tiedot liitetään SWMM5-syötetiedostoon (.inp) *SNOWPACKS*-osion edelle:

[LID_controls]

;Name	Type / Layer	Parameters
VIHERKATTO	GR	
VIHERKATTO	SURFACE	30 0.1 0.168 5 0
VIHERKATTO	SOIL	100 0.41 0.29 0.02 37.9 40 61.3
VIHERKATTO	DRAINMAT	3.8 0.41 0.01

[LID_usage]

;Subcatchment	LID Process	Number	Area	Width	InitSat	FromImp	ToPerv
s100160	VIHERKATTO	1	64	0	100	0	0
s100162	VIHERKATTO	1	64	0	100	0	0
s100163	VIHERKATTO	1	64	0	100	0	0

...

Width Kun *width*-arvo on nolla, kaikki pengerkorkeuden yli menevä vesi poistuu katolta välittömästi.

InitSat Arvo nolla kuvaa kuivaa kattoa (*wilting point*, lakastumispiste) ja arvo 100 kuvaa kokonaan vedellä kyllästynyttä kattoa.