



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

LASSI LAHTI  
PAIKKATIETOJÄRJESTELMÄPOHJAISEN MAANPEITELUOKI-  
TUKSEN HYÖDYNTÄMINEN HULEVESIMALLINNUKSESSA  
Diplomityö

Tarkastaja: professori Jukka Rintala  
Tarkastaja ja aihe hyväksytty  
Luonnontieteiden tiedekuntaneuvos-  
ton kokouksessa 12. elokuuta 2015

## TIIVISTELMÄ

**LASSI LAHTI:** Paikkatietojärjestelmäpohjaisen maanpeiteluokituksen hyödyntäminen hulevesimallinnuksessa  
Tampereen teknillinen yliopisto  
Diplomityö, 97 sivua, 16 liitesivua  
Joulukuu 2015  
Ympäristö- ja energiatekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma  
Pääaine: Vesi- ja jätehuoltotekniikka  
Tarkastaja: professori Jukka Rintala

Avainsanat: maanpeiteluokitus, hulevesimallinnus, valuntamalli, aika-pinta-ala-menettely, mitoitusaste

Hulevesimallinnusta hyödynnetään yhä enenevässä määrin hulevesijärjestelmien suunnittelussa. Mallinnukseen sisältyy kuitenkin useampia epävarmuustekijöitä – mitoitusasteen ajallinen resoluutio, valuntamallien parametrisointi ja läpäisemättömän pinnan määrän arviointi – joilla on havaittu olevan merkittäviä vaikutuksia mallinnustuloksiin. Diplomityön ensisijaisena tavoitteena oli luoda paikkatietoaineistoja hyödyntävä menetelmä läpäisemättömän pinnan määrän arviointiin. Toisena tavoitteena oli tutkia mallinnukseen sisältyvien epävarmuustekijöiden vaikutusta hulevesivalunnan muodostumiseen mitoituskäytäntöjen kehittämisen näkökulmasta kolmella kohdealueella Jyväskylässä: keskusta-alueella sekä uudella ja vanhalla omakotitaloalueella.

Diplomityössä luotu maanpeitteenluokitusmenetelmä mahdollistaa spatiaalisesti tarkan läpäisemättömän pinnan määrän arvioinnin. Menetelmä soveltuu käytettäväksi kaikkialla Suomessa, sillä se hyödyntää ainoastaan Maanmittauslaitoksen avoimia paikkatietoaineistoja: maastotietokantaa, väri-infra ortokuvia ja laserkeilausaineistoa. Tuotettujen maanpeiteaineistojen perusteella lasketut valumakertoimet erosivat kohdealueilla tilastollisesti merkitsevästi asemakaavarajausten perusteella lasketuista valumakertoimista. Suurinta maanpeiteaineistojen perusteella laskettujen valumakertoimien alueellinen hajonta oli maankäytöltään muita kohdealueita monimuotoisemmalla keskusta-alueella, mikä näkyi suoraan myös hulevesimallinnuksen tuloksissa. Spatiaalisesti tarkkojen maanpeiteaineistojen hyödyt korostuvat kooltaan suuremmilla ja maankäytöltään heterogeenisimmilla valuma-alueilla, joilla asemakaavarajausten mukaiset maankäyttöluokat eivät selvistäkään riitä kuvaamaan läpäisemättömän pinnan alueellista jakautumista.

Korkean ajallisen resoluution omaavat, intensiteettiä sisältävät mitoitusasteet tuottivat tasaisen intensiteetin omaavia sateita suurempia ja nopeammin kehittyviä huippuvirtaamia. Tavallisimmin suurimmat huippuvirtaamat liittyivät ajalliselta muodoltaan kiihtyviin, intensiteettiä sisältäviin sadetapahtuman loppuhetkillä sisältäviin mitoitusasteisiin. Läpäisevien pintojen alkuhäviöiden huomioiminen erikseen vaikutti erityisesti pienempien hulevesiverkostohaarojen toimintaan. Hulevesiverkoston mitoituksessa olisikin suositeltavaa käyttää intensiteetiltään vaihtelevia mitoitusasteita, jotka sisällyttäisiin osaksi pidempiä sadetapahtumia. Sadetapahtuman alkukertymää muuntelemalla pystyttäisiin luomaan eri mitoitusvalunnan toistuvuutta edustavia mitoitusasteita. Laskenta-periaatteeltaan toisistaan eroavien valuntamallien tuottamat, selvästi erisuuret huippuvirtaamat osoittavat, että tarve hulevesivaluntamallien parametrien kalibrointiin tähtäävään tutkimukseen on Suomessa tulevaisuudessa ilmeinen.

## ABSTRACT

**LASSI LAHTI:** Application of geographic information system -based land cover classification in stormwater modelling

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 97 pages, 16 Appendix pages

December 2015

Master's Degree Programme in Environmental and Energy Engineering

Major: Water and Waste Engineering

Examiner: Professor Jukka Rintala

**Keywords:** land cover classification, stormwater modelling, runoff model, time-area -method, design rainfall

Stormwater modelling is becoming a common practice in the design of stormwater systems. However, modelling includes several uncertainties – spatial resolution of design rainfall, runoff model parametrization and estimation of impervious surface area – which are observed to have considerable effects on modelling results. The primary aim of this thesis was to create a method exploiting geographical information in the estimation of impervious surface area. The second aim was to investigate the effects of modelling uncertainties on runoff generation from the perspective of design criteria refinement at three catchments in the city of Jyväskylä: old and new low-density residential areas and the city center.

The land cover classification method created in this thesis enables the estimation of impervious surface area with high spatial resolution. The method is applicable all over Finland by utilizing open geographical information offered by the National Land Survey of Finland: topographic database, color-infrared orthophotos and laser scanning data. There was a statistically significant difference in the runoff coefficients calculated for study catchments according to the produced land cover data and the land use classifications defined from town plan. The spatial distribution of runoff coefficients calculated according to land cover data was largest at the more diverse city center which was directly seen in the modelling results. The advantages of spatially accurate land cover data are emphasized at large, urban catchments with heterogeneous land use where land use classifications defined from town plan are clearly not accurate enough to describe spatial distribution of impervious surfaces.

Design rainfalls with high temporal resolution including intensity peak produced higher peak discharges with shorter lag times than rainfalls with constant intensity. In most cases, the highest peak discharges occurred during design rainfalls with an intensity peak at the end of rain event. Considering initial losses separately for pervious surfaces there was a significant effect on the function of smaller drainage pipelines. Consequently, it would be advisable to employ design rainfalls with varying intensity and antecedent rain in the design of drainage systems. By controlling the amount of antecedent rain it would be possible to create design situations with the same rainfall recurrence intervals but different runoff recurrence intervals. Obviously unequal peak discharges produced by runoff models with different computational schemes indicate a need for future research in Finland focusing on calibration of runoff model parameters.

## ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Tampereella Ramboll Finland Oy:lle. Työn ensisijaisena tavoitteena oli luoda menetelmä maanpeiteaineistojen paikkatietojärjestelmäpohjaiseen tuottamiseen, jota voitaisiin hyödyntää hulevesimallinnuksessa.

Kiitän lämpimästi Tampereen teknillisen yliopiston kemian ja biotekniikan laitokselta työni tarkastajaa professori Jukka Rintalaa ja dosentti, tekniikan tohtori Riitta Kettusta työni ohjauksesta ja neuvoista. Ramboll Finland Oy:stä kiitän erityisesti diplomi-insinööri Päivi Paavilaista diplomityöni aiheen alkuperäisestä ideoinnista ja hyvistä neuvoista työni aikana sekä suunnittelupäällikkö Kimmo Helliä työn aihesisällön kommentoinnista. Lämpimät kiitokset myös muulle Ramboll Finland Oy:n hulevesiporukalle kannustavasta työilmapiiristä.

Erityiskiitokset avopuolisolleni Elina Pelimannille maailman toiselta puolelta antamastasi tuesta erityisesti kirjoitusprosessini vaikeimmilla hetkillä. Kiitokset myös perheeleni, että olette jaksaneet tukea minua läpi opintojeni ja viime aikoina osoittaa kiinnostustanne hulevesimallinnusta käsitteleviin tarinoihini. Lisäksi haluan kiittää opiskelutovereitani opiskelumotivaatiota ylläpitäneistä yhteisistä kahvi- ja juttutuokioista.

Tampereella, 13.12.2015

Lassi Lahti

## SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO .....	1
2.	TAAJAMAHYDROLOGIA .....	3
2.1	Rankkasateet.....	4
2.1.1	Rankkasateiden ominaisuudet.....	4
2.1.2	Rankkasateiden esiintyminen.....	6
2.1.3	Mitoitussateet .....	7
2.2	Hulevesivalunnan muodostuminen .....	8
2.2.1	Interseptio.....	9
2.2.2	Haihdunta .....	10
2.2.3	Infiltraatio.....	10
2.2.4	Pintojen kastuminen ja painannesäilyntä .....	12
2.3	Hulevesivalunnan erityispiirteet.....	14
2.4	Taajamavaluma-alueiden pinnan parametrisointi .....	15
2.4.1	Maankäyttö- ja maanpeiteluokitus .....	16
2.4.2	Paikkatietojärjestelmäpohjainen maanpeiteluokitus .....	17
2.4.3	Valumakerroin .....	20
2.4.4	Valumakerroimen määrittäminen maanpeiteluokille .....	23
2.5	Hulevesijärjestelmien mitoituskäytännöt .....	24
3.	HULEVESIMALLINNUS.....	26
3.1	Valuntamallien luokittelu .....	26
3.2	Hulevesivaluntamallit.....	28
3.2.1	Aika-pinta-ala-menetelmä.....	28
3.2.2	Epälineaarisen altaan -malli .....	31
3.3	Verkostomallinnus .....	34
3.3.1	Hydraulinen laskenta.....	35
3.3.2	Paikallis- ja kitkahäviöt.....	37
4.	AINEISTOT JA MENETELMÄT .....	39
4.1	Kohdealueiden kuvaus .....	39
4.2	Mitoitussateet .....	40
4.3	Maankäyttö- ja maanpeiteluokitus .....	41
4.3.1	Asemakaava-aineisto .....	42
4.3.2	Maastotietokanta .....	43
4.3.3	Väri-infra ortokuvat .....	45
4.3.4	Laserkeilausaineisto .....	47
4.3.5	Maanpeiteaineistojen yhdistäminen .....	48
4.4	Valuntamallit .....	49
4.4.1	Aika-pinta-ala-menetelmän parametrisointi .....	49
4.4.2	Epälineaarisen altaan -mallin parametrisointi.....	52
4.5	Verkostomalli .....	55

4.6	Tilastolliset menetelmät .....	57
5.	TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU .....	60
5.1	Valumakertoimet .....	60
5.1.1	Osavaluma-aluekohtaiset valumakertoimet .....	60
5.1.2	Maankäyttöluokitusrajausten mukaiset valumakertoimet.....	62
5.1.3	Valumakertoimien yleinen tarkastelu .....	65
5.2	Hulevesivirtaamat.....	68
5.2.1	Mitoitussateen vaikutus hulevesivirtaamiin.....	69
5.2.2	Maanpeiteluokituksen vaikutus hulevesivirtaamiin.....	72
5.2.3	Valuntamallin vaikutus hulevesivirtaamiin .....	75
5.2.4	Mallinnustulosten yleinen tarkastelu .....	78
5.3	Hulevesijärjestelmien mitoituskäytäntöjen kehittäminen .....	82
6.	YHTEENVETO .....	85
	LÄHTEET .....	88

LIITE A: KOHDEALUEIDEN MAANPEITEAINEISTO

LIITE B: KOHDEALUEIDEN HULEVESIVERKOSTO

LIITE C: KOHDEALUEIDEN OSAVALUMA-ALUEKOHTAISET VALUMAKER-  
TOIMET

LIITE D: KOHDEALUEIDEN MAANKÄYTTÖRAJAUSTEN MUKAISET VALU-  
MAKERTOIMET

LIITE E: MITOITUSSATEIDEN TARKASTELUSSA KOHDEALUEILLA TULVI-  
VAT KAIVOT

LIITE F: MAANPEITEAINESTON VAIKUTUSTEN TARKASTELUSSA KOHDE-  
ALUEILLA TULVIVAT KAIVOT

LIITE F: VALUNTAMALLIEN TARKASTELUSSA KOHDEALUEILLA TULVI-  
VAT KAIVOT

## KUVALUETTELO

<b>Kuva 1.</b>	<i>Kilpeläisen (2006) tutkimusaineistonaan käyttämien rankkasateiden normitettu ajallinen muoto sekä näistä laskettu keskiarvokäyrä.</i> .....	5
<b>Kuva 2.</b>	<i>Helsingin Kaisaniemessä suurimmat 5-30 min sadetapahtumien aikana kertyneet sademäärät vuosina 1951–2000 (Kilpeläinen 2006).</i> .....	6
<b>Kuva 3.</b>	<i>Säätutkilla mitattujen 5, 15, 30 ja 60 min pituisten, 1 km<sup>2</sup> alueellisen rankkasateen toistuvuus (värilliset käyrät) verrattuna Katajiston (1969) määrittämiin rankkasateen toistuvuuksiin (harmaat viivat ja pisteet) (perustuen Aaltonen et al. 2008).</i> .....	7
<b>Kuva 4.</b>	<i>Tehoisan sadannan kehittyminen ja häviöiden suhteellinen osuus valuma-alueelle tulevasta kokonaissadannasta sadetapahtuman aikana (perustuen Bulter &amp; Davies 2010; Karamouz et al. 2010).</i> .....	9
<b>Kuva 5.</b>	<i>Kaupungistumisen aiheuttamat muutokset taajama-alueiden valuntavasteessa luonnontilaisiin valuma-alueisiin verrattuna (perustuen Fletcher et al. 2013).</i> .....	14
<b>Kuva 6.</b>	<i>Esimerkki Corine Land Cover, Soil sealing ja Urban Atlas maankäyttö- ja maanpeiteaineistoista Tampereelta. @ SYKE 2013, @ EEA 2015, @MML 2015</i> .....	16
<b>Kuva 7.</b>	<i>NDVI-luokitus Jyväsjärven alueelta. © MML, 2015</i> .....	19
<b>Kuva 8.</b>	<i>Mitoitussateen ja koko sadetapahtuman välinen ajallinen yhteys (perustuen ASCE &amp; WPCF 1970)</i> .....	25
<b>Kuva 9.</b>	<i>Yleiskuva hulevesimallinnuksen osavaiheista.</i> .....	26
<b>Kuva 10.</b>	<i>Mike Urban -valunnanlaskentamoduulin aika-pinta-alakäyrät</i> .....	30
<b>Kuva 11.</b>	<i>Aika-pinta-alakäyriä vastaavat valuma-alueiden muodot.</i> .....	30
<b>Kuva 12.</b>	<i>Epälineaarisen altaan -mallin rakenne (perustuen Danish Hydraulic Institute 2012a; Akram et al. 2014)</i> .....	32
<b>Kuva 13.</b>	<i>Preismannin rako (perustuen Butler &amp; Davies 2010)</i> .....	36
<b>Kuva 14.</b>	<i>Virtausyhtälöiden numeerinen ratkaisu (perustuen Bulter &amp; Davies 2010)</i> .....	37
<b>Kuva 15.</b>	<i>Keskustan (1.), Halssilanmäen (2.) ja Mäki-Matin (3.) kohdealueiden sijainti Jyväskylässä sekä ilmakuvat kohdealueilta. @ MML, 2015</i> .....	39
<b>Kuva 16.</b>	<i>Hulevesimallinnuksessa käytettyjen mitoitussateiden ajallinen muoto</i> .....	41
<b>Kuva 17.</b>	<i>Esimerkki käsin tehdystä ajantasa-asemakaavan mukaisesta maankäytön digitoinnista Halssilanmäen kohdealueelta</i> .....	42
<b>Kuva 18.</b>	<i>Esimerkki Halssilanmäen kohdealueelta tehdystä väri-infra ortokuvan maanpeiteluokituksesta. @ MML, 2015</i> .....	46
<b>Kuva 19.</b>	<i>Laseraineiston luokittelussa huomioidut kasvillisuuspisteet</i> .....	47
<b>Kuva 20.</b>	<i>Esimerkki osavaluma-alueiden kaltevuusviivojen tekemisestä Halssilanmäen kohdealueelta.</i> .....	53

<b>Kuva 21.</b>	<i>Kohdealueille laskettujen valumakertoimien eroja havainnollistavat laatikko-jana-kuviot (kts. luku 4.6).</i>	62
<b>Kuva 22.</b>	<i>Kohdealueiden maankäyttöluokitusrajausten mukaisten alueiden valumakertoimien (%) hajontaa havainnollistavat laatikko-jana-kuviot (kts. luku 4.6).</i>	64
<b>Kuva 23.</b>	<i>Kohdealueiden tarkastelupisteillä havaitut hulevesivirtaamat mitoitusateen erilaisilla ajallisilla muodoilla.</i>	71
<b>Kuva 24.</b>	<i>Kohdealueiden tarkastelupisteillä havaitut hulevesivirtaamat maankäyttö- ja maanpeiteluokitusten perusteella tehdyissä simulaatioissa.</i>	74
<b>Kuva 25.</b>	<i>Kohdealueiden tarkastelupisteillä havaitut hulevesivirtaamat aika-pinta-ala-menetelmällä ja epälineaarisen altaan -mallilla tehdyissä simulaatioissa.</i>	77



## TAULUKKOLUETTELO

<b>Taulukko 1.</b>	<i>Ilmatieteenlaitoksen raja-arvot rankkasateelle (perustuen Ilmatieteen laitos 2015a).</i> .....	4
<b>Taulukko 2.</b>	<i>Hortonin yhtälössä käytettävien parametrien kirjallisuusarvoja (Butler &amp; Davies 2010; Karamouz et al. 2010; Rossman 2010).</i> .....	11
<b>Taulukko 3.</b>	<i>Pintojen kastumisesta ja painannesäilynnästä aiheutuvat kokonaissadannan häviöt eri pintatyypeille (perustuen Arnell 1980).</i> .....	13
<b>Taulukko 4.</b>	<i>Yhteenveto kirjallisuudessa käytetyistä valumakerrointyypeistä.</i> .....	21
<b>Taulukko 5.</b>	<i>Maankäytön mukaan ilmoitettujen valumakertoimien <math>C_i</math> vertailu suomalaisten suunnitteluoppaiden sekä ASCE:n ja WPCF:n yhteisjulkaisun välillä.</i> .....	21
<b>Taulukko 6.</b>	<i>Maanpeitteen mukaan ilmoitettujen valumakertoimien <math>C_i</math> vertailu suomalaisten suunnitteluoppaiden sekä ASCE:n ja WPCF:n yhteisjulkaisun välillä.</i> .....	22
<b>Taulukko 7.</b>	<i>Hulevesivaluntamallien luokitteluperusteita (Nix 1994; Zoppou 2001; Beven 2012).</i> .....	27
<b>Taulukko 8.</b>	<i>Tutkimuksissa havaittuja alkuhäviön suuruuksia läpäisemättömille ja läpäiseville pinnoille.</i> .....	29
<b>Taulukko 9.</b>	<i>Epälineaarissa mallissa valuma-alueen eri osa-alueilla huomioitavat häviöt (perusten Thorndahl &amp; Schaarup-Jensen 2007).</i> .....	33
<b>Taulukko 10.</b>	<i>Manningin karkeuskertoimia erilaisille maanpeitteille (Krebs et al. 2014).</i> .....	34
<b>Taulukko 11.</b>	<i>Manningin karkeuskertoimia eri putkimateriaaleille ja avouomille.</i> .....	37
<b>Taulukko 12.</b>	<i>Työssä käytettyihin maankäyttöluokkiin luetut kaavamerkinnot.</i> .....	43
<b>Taulukko 13.</b>	<i>Maanpeiteluokituksessa käytetyt maastotietokannan aineistot sekä niiden kohdetyyppi ja vähimmäissijaintitarkkuus.</i> .....	44
<b>Taulukko 14.</b>	<i>Maanpeiteluokituksessa käytetyt tieluokat, niille määritetyt leveydet ja tienpinnan kuvaus.</i> .....	44
<b>Taulukko 15.</b>	<i>Maanpeiteaineistojen pinoamisjärjestys.</i> .....	48
<b>Taulukko 16.</b>	<i>Kohdealueille arvioidut maankäyttöluokituksen mukaiset valumakertoimet.</i> .....	50
<b>Taulukko 17.</b>	<i>Kohdealueille arvioidut maanpeiteluokituksen mukaiset valumakertoimet.</i> .....	50
<b>Taulukko 18.</b>	<i>Arvioidut alkuhäviöt ja keskimääräinen pintavirtausnopeus läpäisemättömille, läpäiseville ja yhdistetyille valuma-alueille.</i> .....	51
<b>Taulukko 19.</b>	<i>Epälineaarisen altaan -mallissa käytetyt hydrologiset parametrit.</i> .....	54
<b>Taulukko 20.</b>	<i>Kohdealueiden hulevesiverkoston putkimateriaalit, niiden muoto ja nimellishalkaisija sekä verkostopituus halkaisijoittain.</i> .....	56

<b>Taulukko 21.</b> Kohdealueille arvioidut hulevesiviemäreiden ja avouomien Manningin yhtälön (21) karkeuskertoimet. ....	57
<b>Taulukko 22.</b> Kohdealueille laskettujen valumakertoimien eroja kuvaavat tilastolliset otossuureet (kts. luku 4.6). ....	61
<b>Taulukko 23.</b> Kohdealueiden valumakertoimien erojen tilastollisen testauksen tunnusluvut (kts. luku 4.6). ....	62
<b>Taulukko 24.</b> Maankäyttöluokitusrajojen mukaisille alueille lasketut keskimääräiset valumakertoimet (%) ja näille kirjallisuudessa ilmoitetut referenssiarvot. ....	63
<b>Taulukko 25.</b> Kohdealueiden maankäyttöluokitusrajauksille maanpeiteaineistojen perusteella laskettuja valumakertoimia (%) kuvaavat otossuureet (kts. luku 4.6). ....	64
<b>Taulukko 26.</b> Maankäyttöluokitusrajauksille maanpeiteaineistojen perusteella laskettujen valumakertoimien tilastollisen testauksen tunnusluvut (kts. luku 4.6). ....	65
<b>Taulukko 27.</b> Mitoitussateen ajallisen muodon vaikutuksia kohdealueiden huippuvirtaamiin ja verkostotulvimiseen kuvaavat tarkastelusuureet. ....	70
<b>Taulukko 28.</b> Maanpeiteaineistojen vaikutuksia kohdealueiden huippuvirtaamiin ja verkostotulvimiseen maankäyttöluokkiin verrattuna kuvaavat tarkastelusuureet. ....	73
<b>Taulukko 29.</b> Käytetyn valuntamallin vaikutuksia kohdealueiden huippuvirtaamiin ja verkostotulvimiseen kuvaavat tarkastelusuureet. ....	76

## LYHENTEET

ASCE	engl. American Society of Civil Engineers, Amerikan maa- ja vesirakennusinsinöörien yhdistys
CDS	engl. Chicago Design Storm, rankkasateen ajallista muotoa kuvaava synteettinen mitoitussade
DCIA	engl. directly connected impervious area, hulevesiverkostoon suoraan kytköksissä oleva läpäisemätön alue
DHI	engl. Danish Hydraulic Institute, Tanskan hydraulinen instituutti
EEA	engl. European Environment Agency, Euroopan ympäristökeskus
EIA	engl. effective impervious area, tehoisa läpäisemätön alue
EPA	engl. United States Environmental Protection Agency, Yhdysvaltojen ympäristöhallinto
GIS	engl. Geographic Information System, paikkatietojärjestelmä
HSY	Helsingin seudun ympäristöpalvelut
IDF	engl. intensity-duration-frequency -curve, rankkasateita kuvaava intensiteetti-kesto-toistuuksikäyrä
IPCC	engl. Intergovernmental Panel on Climate Change, hallitusten välinen ilmastopaneeli
MML	Maanmittauslaitos
NDVI	engl. the normalized difference vegetation index, normalisoitu kasvillisuusindeksi
OSAPOL	Optimaaliset sademittaukset kaksoispolarisaatiosäätökallalla - tutkimusprojekti
RATU	Rankkasateet ja taajamatulvat -hanke
RYVE	Kaupunkivedet ja niiden hallinta -projekti
SYKE	Suomen ympäristökeskus
TIA	engl. total impervious surface area, läpäisemättömän pinnan kokonaisala
TIN	engl. triangular irregular network, epäsäännöllinen kolmioverkko
WPCF	engl. Water Pollution Control Federation, nyk. Water Environment Federation (WEF), kansainvälinen Vesiensuojeluliitto
SWMM	engl. Storm Water Management Model, Yhdysvaltojen ympäristöhallinnon kehittämä hulevesivaluntamalli

## MERKINNÄT

$a$	aika-pinta-alakerroin [-]
$A$	valuma-alueen pinta-ala, [ $ha$ ]
$A_p$	virtauksen poikkipinta-ala [ $m^2$ ]
$A_{cum}$	hulevesivaluntaa kerryttävä pinta-ala, [ $ha$ ]
$A_{red}$	vähentynyt, todellinen hulevesivaluntaa kerryttävä pinta-ala, [ $ha$ ]
$B$	valuma-aluetta kuvaavan suorakulmaisen altaan leveys [ $m$ ]
$C$	valuma-alueen keskimääräinen valumakerroin [-]
$C_i$	kirjallisuudessa taulukoitu maankäyttö- tai maanpeiteluokittainen valumakerroin [-]
$C_p$	huippuvalumakerroin [-]
$C_v$	volumetrinen valumakerroin [-]
$\bar{d}$	vastinalkioiden erotuksen keskiarvo [-]
$d_i$	vastinalkioiden erotus [-]
$d_l$	painannesäilynnän aiheuttama häviö [ $mm$ ]
$\Delta E_{in}$	kaivon sisääntulohäviö [ $m$ ]
$\Delta E_{out}$	kaivon lähtöhäviö [ $m$ ]
$f$	infiltraatiokapasiteetti [ $mm/h$ ]
$f_i$	infiltraation aiheuttama häviö [ $mm/h$ ]
$f_c$	täysin vedellä kyllästyneen maaperän infiltraatiokapasiteetti, [ $mm/h$ ]
$f_0$	kuivan maaperän infiltraatiokapasiteetti [ $mm/h$ ]
$F(t)$	kumulatiivinen infiltraatio sateen intensiteetin ollessa maaperän sen hetkistä infiltraatiokapasiteettia pienempi [ $mm$ ]
$F(t_p)$	kumulatiivinen infiltraatio sateen intensiteetin ollessa maaperän sen hetkistä infiltraatiokapasiteettia suurempi [ $mm$ ]
$F(t_{test})$	Studentin t-jakauman kertymäfunktio [-]
$g$	putoamiskiikkyvyys [ $m/s^2$ ]
$i$	sateen intensiteetti, [ $l/(s*ha)$ ] tai [ $mm/h$ ]
$i_{eff}$	tehoisan sadannan intensiteetti, [ $l/(s*ha)$ ] tai [ $mm/h$ ]
$i(t_{av})$	mitoitussateen keskimääräinen intensiteetti aikavälillä $t_{av}$ (valuma-alueen kertymisajan pituinen huippuvirtaamaa vastaavan ajankohdan molemmiin puolin sijoittuva aikaikkuna), [ $l/(s*ha)$ ] tai [ $mm/h$ ]
$I_f$	kitkalkaltevuus [-]
$I_0$	pohjan kaltevuus [-]
$IL$	alkuhäviötermi [ $mm$ ]
$k_f$	infiltraatiokapasiteetin aikavakio [ $l/h$ ]
$n$	Manningin karkeuskerroin [-]
$n_{tot}$	otoskoko [-]
$NDVI$	normalisoitu kasvillisuusindeksi [-]
$NDVI_{Arc}$	Arcgis paikkatieto-ohjelmiston normalisoitu kasvillisuusindeksi [-]
$NIR$	kohteen heijastaman lähi-infrapuna-aallonpituusalueen säteilyn määrä [-]
$m$	vakioaikakäyrien lukumäärä [-]
$P_w$	märkäpiiri [ $m$ ]
$Q$	virtaama [ $l/s$ ]
$Q_{ca}$	valuma-alueen purkupisteelle kulkeutuva valunta [ $l/s$ ]

$Q_p$	huippuvirtaama [ $l/s$ ]
$R$	hydraulinen säde [ $m$ ]
$R_{red}$	kohteen heijastaman punaisen aallonpituusalueen säteilyn määrä [-]
$RF$	hydrologinen häviökerroin [-]
$s$	otoshajonta [-]
$S_0$	valuma-alueen keskimääräinen kaltevuus virtaussuunnassa [-]
$t$	aika [ $s$ ]
$\Delta t$	laskenta-aika-askeleen pituus [ $s$ ]
$t_{\alpha/2}$	t-testin riskitasoa vastaavat kvantiilit [-]
$t_c$	valuma-alueen kertymisaika [ $min$ ] tai [ $s$ ]
$t_p$	täyttä infiltraatiokapasiteettia kuvaava ekvivalenttiaika [ $s$ ]
$t_{test}$	Studentin t-testin testisuure [-]
$v_i$	virtausnopeus kaivon tulevassa putkessa [ $m/s$ ]
$v_m$	virtausnopeus kaivossa [ $m/s$ ]
$v_{out}$	virtausnopeus kaivosta lähtevässä putkessa [ $m/s$ ]
$w_l$	pintojen kastumisen aiheuttama häviö [ $mm/h$ ]
$u$	yksikötön kertymisaika [-]
$\mu$	perusjoukon odotusarvo testauksessa [-]
$\mu_0$	odotusarvon referenssiarvo [-]
$x$	etäisyys virtaussuunnassa [ $m$ ]
$\bar{x}$	otoskeskiarvo [-]
$y$	vesisyvyys [ $mm$ ]
$y_d$	painannesäilynnän suuruus [ $mm$ ]
$y_R$	valunnan syvyys (alaindeksit 1 ja 2 ilmaisevat valunnan syvyyttä aika-askeleen alussa ja lopussa) [ $m$ ]
$y_w$	pintojen kastumisesta aiheutuva kokonaishäviö [ $mm$ ]
$z$	yksikötön todellista hulevesivaluntaa kerryttävän pinta-alan kertymä [-]
$\xi_{out,k}$	häviökerroin virtauksen poistuessa kaivosta [-]

## TERMIT JA NIIDEN SELITYKSET

Evapotranspiraatio	Kokonaishaihdunta käsittäen järvistä, joista, paljaalta maanpinnalta ja kasvillisuuden pinnalta tapahtuvan haihtumisen; kasvien elintoimintoihin liittyvän haihtumisen eli transpiraation; sekä sublimoitumisen jään ja lumen pinnalta
Hulevesi	Rakennetulta alueelta maanpinnalle, rakennuksen katolle, tai muulle pinnalla kertyvä sade- tai sulamisvesi (VHL 119/2001 & MRL 132/1999 muutoksineen)
Infiltraatio	Veden imeytymistä maaperään eli siirtymistä maanpinnalta maaperän huokostilaan
Infiltraatiokapasiteetti	Sadeveden imeytymisnopeus maaperään
Interseptio	Sateen pidättymistä kasvien pinnalle ja haihtumista tästä myöhemmin takaisin ilmakehään
Kertymisaika	Aika, joka valunnalta kestää kulkeutua valuma-alueen etäisimmästä pisteestä purkupisteeseen, kun sekä pintavaluntaan että putkivirtaukseen kuuluva aika lasketaan mukaan
Maankäyttöluokitus	Alueen käyttötarkoitukseen perustuva luokitus; ensisijaisesti aina asemakaavan osoittaman käyttötarkoituksen mukainen
Maanpeiteluokitus	Maanpinnan fyysiseen kuvaukseen perustuva luokitus
Maanpeiteaineisto	Maanpeiteluokista muodostettava alueen peitteisyyttä kokonaisvaltaisesti kuvaava maanpeitteen luokitteluaineisto
Paikkatieto	Tietoa, johon liittyy maantieteellinen sijainti
Paikkatietojärjestelmä	Järjestelmä, jonka avulla voidaan tallentaa, hallita, analysoida tai esittää paikkatietoa
Painannesäilyntä	Sadeveden pidättymistä maanpinnalla oleviin painanteisiin
Rasterimuotoinen	Säännöllisestä hilaruudukosta eli pikseleistä koostuvaa kuva-aineistoa, jossa jokaiseen rasterisoluun on tallennettu sijainti- ja ominaisuustieto kuvattavalle kohteelle
Vektorimuotoinen	Kuvaa kohteet geometrisina pisteinä, viivoina tai alueina; pisteille määritetty sijaintitieto ja useampia ominaisuustietoja

# 1. JOHDANTO

Kaupungistumisen aiheuttamia muutoksia taajama-alueiden sadanta-valuntaprosesseissa on tutkittu maailmalla kiihtyvällä tahdilla jo 1960-luvulta lähtien (Jacobson 2011). Taajama-alueiden läpäisemättömän pinnan määrän lisääntymisen onkin osoitettu olevan suorassa yhteydessä kasvaneisiin hulevesivirtaamiin ja tulvimisen yleistymiseen (Leopold 1968; Schueler 1994; Miller *et al.* 2014). Itse asiassa Chen *et al.* (2009) ovat todenneet taajama-alueiden ja niiden hulevesiverkostojen olevan kaikkein haavoittuvaimpia järjestelmiä rankkasateiden haitallisille vaikutuksille.

Suomessa merkittävimpiä kokeellisia hulevesitutkimuksia ovat olleet 1970-luvun lopulla toteutettu, taajama-alueiden sadanta-valuntavasteita selvittänyt *Valtakunnallinen hulevesitutkimus 1977–1979* (Melanen & Laukkanen 1981) sekä vuosina 2001–2003 tehty kaupungistumisen vaikutuksia hulevesien muodostumiseen selvittänyt *Kaupunkivedet ja niiden hallinta (RYVE) -projekti* (Kotola & Nurminen 2003). Todenteolla hulevesiin kohdistuva tutkimus Suomessa on lähtenyt kiihtyvään kasvuun kuitenkin vasta 2010-luvulle tultaessa. Uutta hulevesiin liittyvää kokeellista tutkimustietoa on tuotettu eritoten Teknillisen korkeakoulun (nyk. Aalto-yliopisto) ohjaamissa hulevesihankkeissa, joista päällimmäisenä on Sillanpään (2013) hulevesivalunnan muodostumista kaupungistuvilla alueilla käsitellyt väitöstyö. Hulevesiin liittyvää yleistä tietoutta on niin ikään merkittävästi lisännyt Kuntaliiton (2012) julkaisema *Hulevesiopus*, jonka pohjalta useat Suomen kaupungit ovatkin laatineet omat hulevesiohjelmansa.

Kiihtyvään tahtiin tuotettavan niin kotimaisen kuin ulkomaisen hulevesiä koskevan tutkimustiedon merkittävyyden kannalta ensiarvoisen tärkeää on, kuinka tätä tietoa pystytään jalkauttamaan jokapäiväiseen suunnittelutyöhön. Uusi tällainen voimakkaasti kasvava suuntaus suunnittelutyönä tehtävässä hulevesijärjestelmien tarkastelussa, joka vaatii tuekseen vielä runsaasti uutta tutkimustietoa, on hulevesimallinnus. Myös uudessa Kuntaliiton (2012) *Hulevesioppaassa* kannustetaan hulevesijärjestelmien mitoituksessa mallinnukseen siitä huolimatta, ettei tähän ole esitetty minkäänlaista yleistä ohjeistusta. Sillanpää (2013) onkin jo aiemmin esittänyt, että suomalaisten mitoituskäytäntöjen kehittäminen vaatisi tuekseen niin mittauksin kuin mallintamalla tehtävää lisätutkimusta.

Hulevesimallinnus antaa mahdollisuuden hyvinkin yksityiskohtaiseen hulevesijärjestelmien toimivuuden tarkasteluun mahdollistaen muun muassa intensiteetiltään vaihtelevien ja mitoituksen ylittävien sadetapahtumien tarkastelun sekä maankäyttöön liittyvien muutosten vaikutusten arvioimisen (Salvadore *et al.* 2015). Käytettäessä hulevesimallinnusta päätöksenteossa, on ensiarvoisen tärkeää, että mallinnuksen antamat tulokset vastaavat todellisuutta (Thorndahl & Schaarup-Jensen 2007). Luotettava hulevesi-

mallinnus edellyttääkin tekijältään hyvää hulevesivalunnan muodostumiseen vaikuttavien taajamahydrologisten prosessien tuntemusta sekä ymmärrystä siitä, kuinka nämä prosessit on integroitu osaksi hulevesivaluntamalleja (Salvadore *et al.* 2015).

Tutkimuksissa (mm. Aronica *et al.* 2005; Ochoa-Rodriguez *et al.* 2015) erityistä epävarmuutta hulevesimallinnuksessa on todettu aiheutuvan mallinnuksessa käytetystä sateen ajallisesta resoluutiosta eli kyvystä kuvata sateen intensiteettivaihteluita sadetapah-tuman aikana. Yhtäläillä epävarmuutta on havaittu liittyvän mallinnuksessa käytetyn hulevesivaluntamallin ja siinä valunnan muodostumiseen vaikuttavien hydrologisten parametrien valintaan (Artina *et al.* 2007; Thorndahl & Schaarup-Jensen 2007). Kaikkein tärkeimpänä mallinnustulosten tarkkuuteen vaikuttavana tekijänä pidetään kuitenkin hulevesivaluntaa muodostavan läpäisemättömän pinnan määrän arviointia (Lee & Heaney 2003; Shuster *et al.* 2005; Dhakal *et al.* 2012 & 2013).

Tuoreet tutkimukset (mm. Krebs *et al.* 2014; Petrucci & Bonhomme 2014) osoittavat spatiaalisesti tarkkojen maanpeiteaineistojen, joiden kuvaamat pinnat ovat suorassa fyysisessä yhteydessä hulevesivalunnan muodostumiseen, mahdollistavan lähes yhtä tarkkojen mallinnustulosten saamisen kalibroituja hulevesivaluntamallien kanssa. Samaan aikaan yhä useammat kunnat ja viranomaisorganisaatiot Suomessa saattavat paikkatietoaineistojaan julkisesti saataville. Nämä muun muassa ilmakuvia, laserkeilausaineistoja sekä valmiiksi luokiteltuja maastokohteita, kuten rakennuksia ja teitä käsittävät paikkatietoaineistot mahdollistavatkin hulevesimallinnuksessa hyödynnettävien, spatiaalisesti tarkkojen maanpeiteluokitusten tekemisen paikkatietojärjestelmäpohjaisesti.

Kirjallisuustutkimus on tässä työssä jaettu kahteen aihekokonaisuuteen: taajamahydrologian erityispiirteitä hulevesivalunnan muodostumisessa kuvaavaan sekä valuntamalleja ja verkostomallinnusta käsittelevään osaan. Oma painoarvonsa kirjallisuustutkimuksessa on annettu maanpeiteluokitusten tuottamiselle ja suomalaisissa suunnitteluoppaisissa esitettyjen valumakertoimien alkuperän selvittelylle. Aihealueen ulkopuolelle on rajattu huleveden laadulliset tarkastelut sekä hulevesien hallintaan tähtäävät toimenpiteet.

Työn soveltavassa osuudessa luodaan menetelmä maanpeiteaineistojen tuottamiseen paikkatietojärjestelmäpohjaisesti. Luodulla menetelmällä tuotettuja maanpeiteaineistoja testataan kolmella maankäytöltään toisistaan eroavalla kohdealueella Jyväskylässä. Testaus suoritetaan vertaamalla maanpeiteaineistojen ja asemakaavarajausten osoittamien maankäyttöluokkien perusteella laskettuja valumakertoimia keskenään. Tämän jälkeen testausta jatketaan tarkastelemalla, eroavatko maanpeiteaineistojen ja maankäyttöluokkien hulevesimallinnuksessa antamat tulokset toisistaan. Maanpeiteaineistojen ja maankäyttöluokkien vertailun lisäksi hulevesimallinnuksella arvioidaan mitoitussateiden ajallisen muodon, alkuhäviöiden ja valuntamallin vaikutuksia mallinnustuloksiin. Hulevesimallinnuksessa saatavien tulosten perusteella esitetään suuntaviivoja sille, mihin suomalaisten mitoituskäytäntöjen kehittämisessä hulevesimallinnuksen osalta erityisesti tulisi kiinnittää huomiota tulevaisuudessa.



## 2. TAAJAMAHYDROLOGIA

Hydrologinen kierto kuvaa veden jakaantumista ja kiertoa Maan vesikehässä eli hydro-sfäärissä maan, merten ja ilmakehän välillä (Kuusisto 1986a; Dingman 2002). Veden kiertokulkua siinä kuvaavia perussuureita ovat sadanta, haihdunta, infiltraatio ja valunta. Näiden lisäksi vesi esiintyy osana hydrologista kiertoa erilaisina veden varastomuotoina: lumipeitteessä, kasvien sitomana, maanpinnan painanteissa, maaperän huokosrakenteessa, pohjavetenä sekä pintavetenä järvissä, joissa ja merissä.

Hydrologian sitä osa-aluetta, joka tutkii rakennetun ympäristön vaikutuksia hydrologiseen kiertoon, kutsutaan taajamahydrologiaksi (Kotola & Nurminen 2003). Kaupungistuminen vaikuttaa hydrologisen kierron kaikkiin vaiheisiin. Erityisesti muutokset näkyvät kuitenkin pintavalunnassa ja sen muodostumiseen vaikuttavissa osaprosesseissa. (Jacobson 2011) Taajama-alueella muodostuvalle pintavalunnalle onkin muodostunut oma käsitteensä, hulevesi, joskin sen suomenkieliset määritelmät ovat vuosien saatossa vaihdelleet hieman kirjoittajan mukaan (Kotola & Nurminen 2003). Uudessa vesihuolto- (VHL 119/2001 muutoksineen) sekä maankäyttö- ja rakennuslaissa (MRL 132/1999 muutoksineen) hulevesi on määritelty ”rakennetulla alueella maanpinnalle, rakennuksen katolle, tai muulle pinnalle kertyvänä sade- tai sulamisvetenä”.

Taajamahydrologiassa erityishuomio kiinnittyy lyhytkestoisiin rankkasateisiin sekä näiden aiheuttamaan hulevesivaluntavasteeseen. Vettä läpäisemättömän pinnan lisääntyminen kaupunkialueilla tekee niistä erittäin herkkiä juuri lyhytkestoisille rankkasateille luonnontilaisiin alueisiin verrattuna (Fletcher *et al.* 2013; Salvatore 2015). Läpäisemättömiltä pinnoilta ei juuri pääse tapahtumaan sadeveden maahan imeytymistä, eivätkä tasaiset pinnat tarjoa painanteita, joihin vettä voisi kertyä (Miller *et al.* 2014). Tämän johdosta läpäisemättömiltä alueilta alkaa muodostua hulevesivaluntaa välittömästi sateen alettua toisin kuin luonnontilaisilta alueilta, joilla valuntaa merkittävässä määrin tuottavat vain pidempikestoiset sadetapahtumat.

Hulevesimallinnuksen näkökulmasta erityisen kiinnostuksen kohteeksi nousevat rankkasateiden ominaisuudet, kuten sateiden ajallinen muoto, kesto ja toistuvuus; sadannan häviöt sadetapahtuman alussa ja aikana, ennen kuin hulevesivaluntaa pääsee muodostumaan sekä tekniikka, jolla läpäisemättömän pinnan määrää ja jakautumista valuma-alueella voidaan arvioida (Fletcher *et al.* 2013; Salvatore 2015). Nimittäin viime kädessä juuri nämä tekijät määräävät, kuinka paljon ja missä ajassa valuntaa hulevesiverkostoon voi päätyä.

## 2.1 Rankkasateet

Rankimmat sateet Suomessa aiheutuvat yleensä konvektiivisista kesäaikaisista kuurosateista (Aaltonen *et al.* 2008), joiden syntymekanismia on yksityiskohtaisemmin kuvattu hydrologian alan oppi- ja käsikirjoissa (esim. Kuusisto 1986b; Dingman 2002). Olennaisimpia sateen rankkuuteen, keston ja laajuuteen vaikuttavia tekijöitä on sadetapahtumiin liittyvä ilmassa kohoamisnopeus (Linsley *et al.* 1982), joka konvektiivisten sateiden yhteydessä voi olla jopa yli kymmenkertainen rintamasateisiin verrattuna (Dingman 2002). Tämän vuoksi vesihöyryä sisältävän ilmassa jäähtyminen kaste-pisteeseensä ja kondensoituminen tapahtuu nopeasti konvektiivisten sateiden yhteydessä, mikä tuottaa tyypillisesti intensiteetiltään rankkoja kuurosateita (Aaltonen *et al.* 2008).

Suomessa Ilmatieteen laitoksen käyttämät raja-arvot rankalle sateelle (taulukko 1) perustuvat Rastekransin (1967) määrittämiin rankkasateen raja-arvoihin (katso Kilpeläinen 2006), jotka riippuvat sekä sateen kestosta että intensiteetistä. Nämä raja-arvot rankoille sateille on määritetty siten, että sateet toistuvat yhdellä mittauspaikalla keskimäärin useammin kuin kerran vuodessa.

**Taulukko 1.** Ilmatieteenlaitoksen raja-arvot rankkasateelle (perustuen Ilmatieteen laitoksen 2015a).

Aika	Sademäärä (mm)	Intensiteetti (mm/h)
5 min	2,5	30
30 min	5,5	11
60 min	7	7
4 h	10	2,5
12 h	15	1,25
24 h	20	0,83

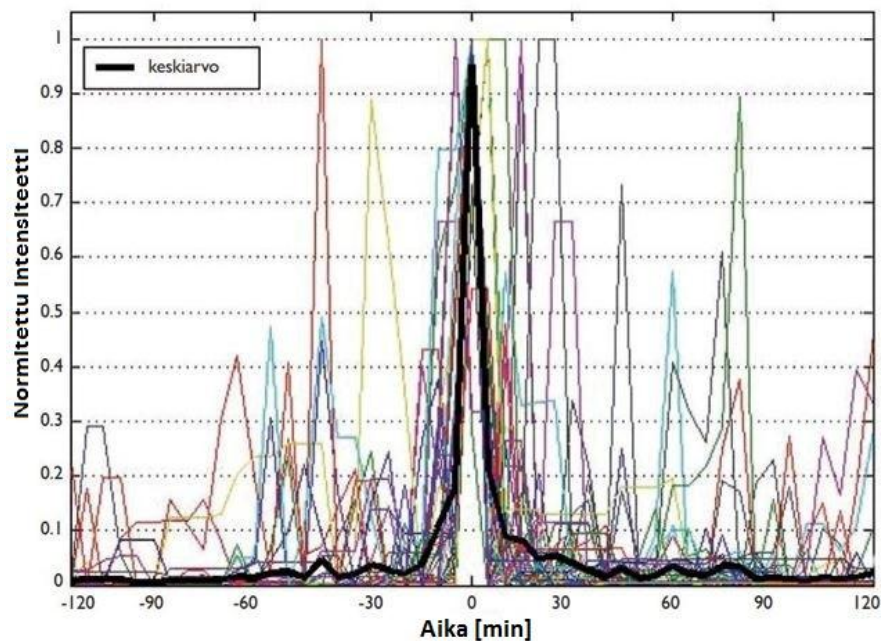
### 2.1.1 Rankkasateiden ominaisuudet

Valunnan muodostumisen kannalta rankan sateen keskeisimpiä ominaisuuksia ovat sateen intensiteetti, kesto, ajallinen ja alueellinen jakauma sekä liikesuunta ja -nopeus (Kuusisto 1986b; Aaltonen *et al.* 2008). Konvektiiviset sateet ovat luonteeltaan lyhytkestoisia ja hyvin paikallisia, koska yksittäiset konvektiosolut ovat erittäin pienialaisia (noin 10 km<sup>2</sup>) ja lyhytikäisiä (10–25 min) (Austin & Houze 1972). Konvektiiviset sateet muodostuvat kuitenkin tavallisesti useammista peräkkäisistä ja eri-ikäisistä konvektiosoluista, minkä vuoksi sateen rankkuus pilven eri osien välillä voi vaihdella suuresti (Aaltonen *et al.* 2008).

Sateen nopeudesta ja liikesuunnasta puolestaan riippuu, kuinka paljon valuntaa yhdellä valuma-alueella sadetapahtuman aikana ehtii kertyä ja kuinka valuma-alueen eri osien tuottamat valuntahuiput ajoittuvat valuma-alueen purkupisteellä suhteessa toisiinsa

(Kuusisto 1986b; Aaltonen *et al.* 2008). Pahimmasta mahdollisesta tilanteesta hyvänä esimerkkinä on Porissa 2007 laajaa tulvimista aiheuttanut sadetapahtuma (Porin kaupunkitulva 2007). Tällöin kapea vain noin 3 km levyinen rankkasateen keskus liikkui hitaasti ensin muodoltaan pitkähkön valuma-alueen latvojen yli siirtyen sitten valuma-alueen alaosiin Porin keskusta-alueelle. Tämän vuoksi valuma-alueen latva- ja alaosien tuottama valuntahuippu saavutti samanaikaisesti hulevesiverkoston purkupisteen aiheuttaen verkoston tulvimista.

Valuma-alueelta muodostuu rankkasateen aikana sitä enemmän valuntaa, mitä vettyneempi sen maaperä on ennen sateen alkua (Sillanpää 2013). Näin ollen heikkona alkava sade, joka ensiksi kastelee maaperän ja voimistuu vasta sitten rankaksi sateeksi, tuottaa enemmän pintavaluntaa (Kuusisto 1986b). Suomessa rankkasateiden ajallista muotoa ensimmäisenä tutkineen Kilpeläisen (2006) tutkimusaineistonaan käyttämistä rankkasateista muodostama normitettu keskiarvokäyrä vastaa juuri tällaista tilannetta (kuva 1).

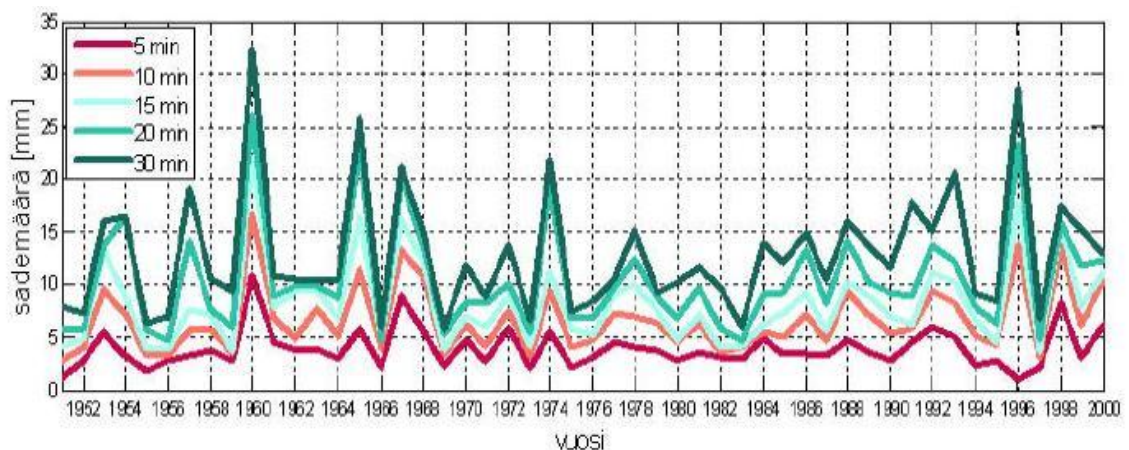


**Kuva 1.** Kilpeläisen (2006) tutkimusaineistonaan käyttämien rankkasateiden normitettu ajallinen muoto sekä näistä laskettu keskiarvokäyrä.

Huolimatta yksittäisten sadetapahtumien suuresta ajallisesta vaihtelusta, tuo niistä laskettu keskiarvokäyrä kuitenkin hyvin esille rankkasateen ajallisen muodon ominaispiirteet. Kilpeläisen (2006) mukaan rankkasateen päämaksimia edeltää ja sitä seuraa tyypillisesti pidempi sadejakso, jonka intensiteetti on vain murto-osan päämaksimin intensiteetistä. Sateen intensiteetti alkaa keskimäärin kasvaa voimakkaasti noin 15 min ennen päämaksimia ja päämaksimin jälkeen intensiteetti yleensä heikkenee heti nopeasti. Päämaksimin jälkeen sade jatkuu intensiteetiltään keskimäärin aavistuksen voimakkaampana kuin ennen päämaksimia.

## 2.1.2 Rankkasateiden esiintyminen

Rankkasateiden esiintymistä tutkiessaan Kilpeläinen (2006) on havainnut selvän ajallisen yhteyden eripituisten rankkasateiden esiintymisessä. Tutkimuksessa 50 vuoden havaintojakson rankimmat sateet koottiin aikasarjaksi, jossa on esitetty jokaisen vuoden suurin 5–30 min sadetapahtuman aikana kertynyt sademäärä (kuva 2). Kilpeläisen (2006) johtopäätöksen mukaisesti erimittaisten rankkasateiden välinen korrelaatio on selvästi havaittavissa. Tämä viittaa siihen, että eripituiset vuoden suurimmat rankkasadetapahtumat edustavat todellisuudessa yhtä ja samaa sadetapahtumaa, josta eripituiset rankkasateet on poimittu tietyn aikaikkunan suuruksina.



**Kuva 2.** Helsingin Kaisaniemessä suurimmat 5-30 min sadetapahtumien aikana kertyneet sademäärät vuosina 1951–2000 (Kilpeläinen 2006).

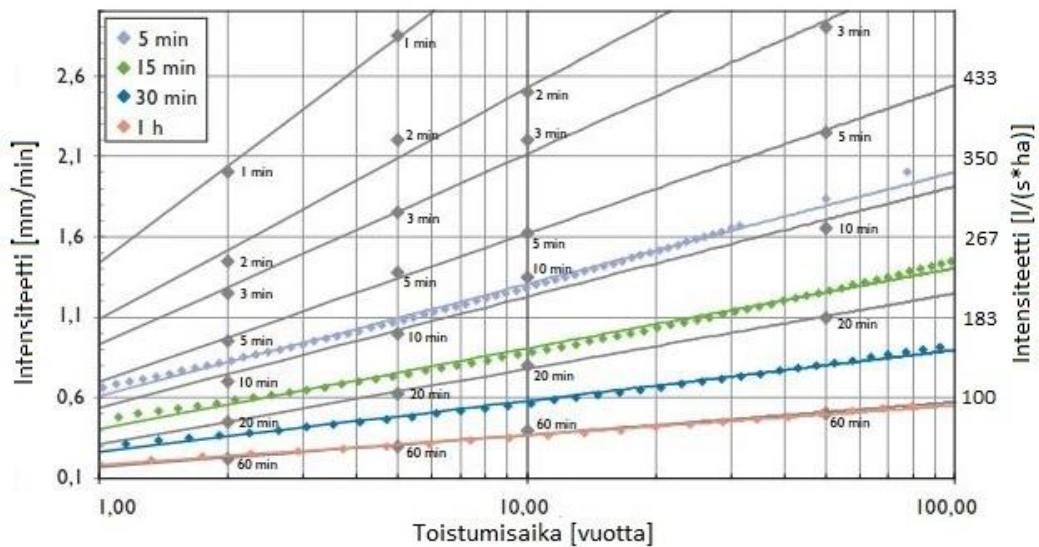
Kattavimmin rankkasateiden esiintymistä Suomessa on tutkittu Rankkasateet ja taajamatulvat (RATU) -hankkeen yhteydessä (Aaltonen *et al.* 2008). Hankkeessa rankkasateiden toistuvuutta Suomessa erisuuruksilla alueilla ja maantieteellisillä paikoilla pyrittiin arvioimaan sademittariaineistojen lisäksi sadetutkamittausten perusteella, sillä rankkasateiden pienialaisuuden ja lyhytkestoisuuden vuoksi, on todennäköistä, etteivät rankimmat sateet osu sademittareiden kohdalle. Sadetutkamittausten perusteella lasketujen lyhytkestoisten sateiden rankkuuden havaittiin olevan yleisillä, 2–10 vuoden välein toistuvilla sateilla jopa pienempi, mutta harvinaisilla kerran 100 vuodessa toistuvilla sateilla suurempi kuin Suomessa aiemmin sademittariaineiston perusteella tehdyissä tutkimuksissa on todettu (mm. Katajisto 1969; Kuusisto 1980; Kilpeläinen *et al.* 2008). Vastaavasti sademittariaineistojen perusteella rankkasateiden esiintymistodennäköisyyden todettiin pienenevän Pohjois-Suomeen päin siirryttäessä (Aaltonen *et al.* 2008).

Euroopan alueen ilmastomalleilla tehtyjen simulaatioiden perusteella ilmastonmuutoksen on ennustettu lisäävän rankkasateiden esiintymistä ja voimakkuutta Suomessa (mm. Räisänen *et al.* 2004; Jylhä *et al.* 2007). Tehdyt simulaatiot perustuvat hallitusten välisen ilmastopaneelin (IPCC) päästöskenaarioihin, jotka ovat eriasteisia arvioita ihmiskunnan kasvihuonekaasu- ja hiukkaspäästöjen kehityksestä tulevan vuosisadan aikana (Nakićenović & Swart 2000). RATU-hankkeen yhteydessä, valitusta päästöskenaariosta

riippuen, vuorokaudenmittaisten rankkasateiden on ennustettu kasvavan Suomessa 10–30 % ajanjaksoon 2071–2100 mennessä (Aaltonen *et al.* 2008). Vastaavasti kuuden tunnin rankimpien sateiden on ennustettu kasvavan 15–40 % kyseiseen ajanjaksoon mennessä. Tätä lyhyempien sateiden tai sateen hetkellisen intensiteetin muutosta ei ilmastomallien perusteella ole voitu luotettavasti arvioida. Aaltosen *et al.* (2008) mukaan valitusta päästöskenaariosta riippumatta voidaan kuitenkin olettaa, että ilmastomuutoksen vaikutuksesta tulevaisuudessa rankat lyhytkestoiset sadetapahtumat tulevat voimistumaan suhteessa enemmän kuin pidempikestoiset rankkasateet.

### 2.1.3 Mitoitussateet

Hulevesiviemäreiden, -hallintarakenteiden ja tulvareittien mitoituksessa käytetyt mitoitussateet perustuvat tilastoituihin sateisiin ja näistä laskettuihin rankkasateen toistuvuuskäyriin (kuva 3) (Butler & Davies 2010). Suomessa hulevesijärjestelmien mitoitus on aiemmin perustunut yksinomaan 1960-luvulla Katajiston (1969) julkaisemiin rankkasateen toistuvuusarvoihin. Tuoreessa Kuntaliiton Hulevesioppaassa on kuitenkin annettu RATU-hankkeen tulosten pohjalta uudet suositukset käytettävistä rankkasateen toistuvuuskäyristä (Kuntaliitto 2012).



**Kuva 3.** Säätuokilla mitattujen 5, 15, 30 ja 60 min pituisten, 1 km<sup>2</sup> alueellisen rankkasateen toistuvuus (värilliset käyrät) verrattuna Katajiston (1969) määrittämiin rankkasateen toistuvuuksiin (harmaat viivat ja pisteet) (perustuen Aaltonen *et al.* 2008).

Rankkasateen toistuvuuskyriltä luettavia mitoitussateen määrittäviä parametreja ovat sateen intensiteetti, kesto-aika ja toistuvuus. Taajama-alueiden hulevesiviemärit mitoitaan tavallisesti kerran 2–3 vuodessa toistuville rankkasateille (Karttunen 2004). Tarkempi ohjeistus rankkasateen toistuvuuskyriltä luettavien parametrien valintaan on annettu suomalaissa suunnitteluoppaissa (esim. Karttunen 2004; Liikennevirasto 2013).

Kuntaliiton (2012) uusissa hulevesijärjestelmien mitoitusta koskevissa suosituksissa ilmastonmuutoksen vaikutus rankkasateiden voimistumiseen tulevaisuudessa on kehoitettu huomioimaan korottamalla 20 %:lla toistuvuusikäyriä luettuja sateen intensiteettejä. Lisäksi maantieteellisen sijainnin vaikutus valitun rankkasateen toistuvuuteen tulisi ottaa huomioon RATU-hankkeessa lasketun leveyspiiristä riippuvan korjauskertoimen (0,83–1,80 leveyspiireillä 60–70°N) avulla.

Suomessa perinteisesti hulevesijärjestelmien mitoitukseen käytetyt mitoitussateet ovat muodoltaan suorakulmaisia siten, että niiden intensiteetti säilyy vakiona koko sadetapahtuman ajan (Suomen kuntatekniikan yhdistys 2003; Karttunen 2004). Uusissa mitoitussuosituksissa esitetään kuitenkin, että sateen ajallinen muoto tulisi ottaa huomioon hulevesijärjestelmiä mitoitettaessa käyttämällä esimerkiksi Chicago Design Storm (CDS) -sadetta (Kuntaliitto 2012). Suomen rankkasateisiin sovitettujen CDS-mitotussateiden käyttö edellyttäisi tilastoiduista rankkasateista muodostettujen sateen intensiteetti-kesto-toistuvuus (IDF) -käyrien muotoa kuvaavien parametrien tilastollista määrittämistä (Madsen & Arnbjerg-Nielsen 2006). Ainakaan toistaiseksi Suomessa ei tietävästi ole tällaisia CDS-mitotussateiden vaatimia muotoparametreja julkaistu. Aaltonen (2008) on kuitenkin osana RATU-hanketta tekemässään diplomityössä esittänyt menettelytavan Suomen olosuhteisiin sovitettujen CDS-mitotussateiden muodostamiseen Tanskan Spildevandskomiteen julkaiseman Excel-laskurin avulla.

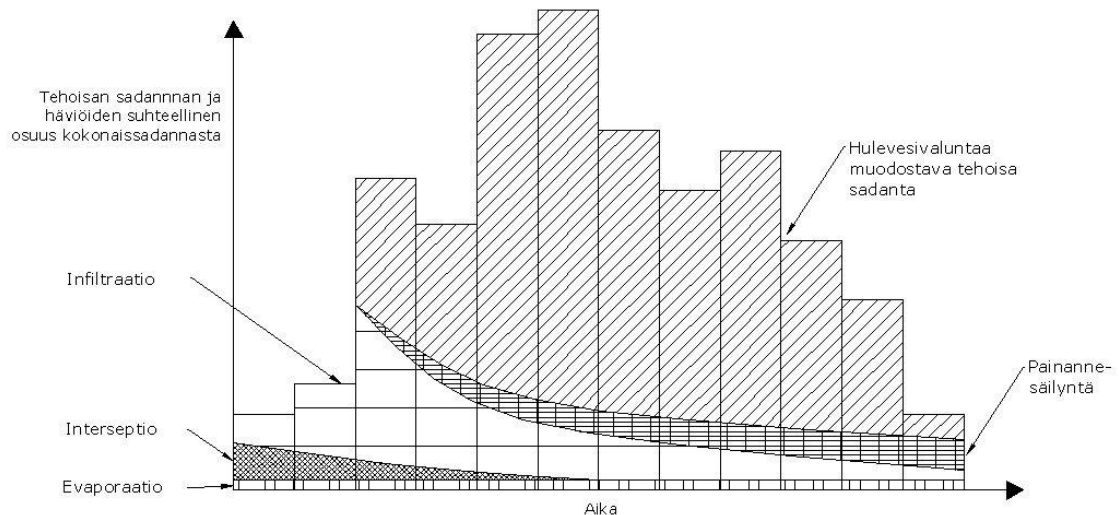
CDS-mitotussateet muistuttavat muodoltaan Kilpeläisen (2006) määrittämää rankimpien sateiden keskiarvokäyrää (kts. kuva 1). Niistä erottuu selkeä intensiteettiipiikki, joka pienenee eksponentiaalisesti sateen huippuajankohdan molemmin puolin (Niemczynowicz 1989). Intensiteettihiipun paikkaan voidaan vaikuttaa sateen symmetriakerointa muuttamalla, jolloin intensiteettiipiikki voidaan painottaa esimerkiksi sadetapahtuman alkuun tai sen puoliväliin. CDS-mitotussateille on ominaista, että sateen huippukohdan intensiteetti on sitä suurempi suhteessa sadetapahtuman keskimääräiseen intensiteettiin, mitä pidemmästä sadetapahtumasta on kyse.

## 2.2 Hulevesivalunnan muodostuminen

Hulevesivaluntaa muodostavaa osaa taajamavaluma-alueelle tulevasta sadannasta kutsutaan tehoisaksi sadannaksi (Dingman 2002). Tehoisa sadanta saadaan laskettua, kun kokonaissadannasta poistetaan interseption, haihdunnan, infiltraation sekä painannesäilynnän ja pintojen kastumisen aiheuttamat häviöt (Karamouz *et al.* 2010). Tehoisan sadannan muodostuminen sadetapahtuman aikana voidaan esittää sadanta-aikasarjana, jossa häviöiden suhteellinen osuus kokonaissadannasta pienenee sadetapahtuman edetessä (kuva 4). Häviöt ovat aina suurimmillaan sadetapahtuman alussa maaperän ja kasvuston ollessa kuivia (Karamouz *et al.* 2010). Maaperän ja kasvuston kostuessa niiden kyky pidättää valuma-alueelle tulevaa sadantaa heikkenee ja tehoisan sadannan osuus kokonaissadannasta kasvaa sitä suuremmaksi, mitä voimakkaampaa ja pitkäkestoisempaa sade on.



Käytettävästä hulevesien valutamallista riippuen, kokonaissadannan häviöt on voitu jakaa eri tavoin alkuhäviöihin ja jatkuviin häviöihin (Butler & Davies 2010). Tässä alkuhäviöillä tarkoitetaan häviöitä, jotka laskennassa huomioidaan vain yhtenä sadetapahtuman alussa kokonaissadannasta poistettavana häviöterminä. Jatkuvat häviöt sen sijaan huomioidaan koko sadetapahtuman ajalta ja poistetaan kokonaissadannasta jokaisella laskenta-aika-askeleella erikseen. Eri valutamalleissa jatkuvat häviöt voidaan huomioida vakiosuuruisena osuutena jokaisella aika-askeleella tulevasta kokonaissadannasta tai ne voivat olla ajan suhteen muuttuvia.



**Kuva 4.** Tehoisan sadannan kehittyminen ja häviöiden suhteellinen osuus valuma-alueelle tulevasta kokonaissadannasta sadetapahtuman aikana (perustuen Butler & Davies 2010; Karamouz et al. 2010).

## 2.2.1 Interseptio

Dingmanin (2002) mukaan interseptiohäviöt riippuvat paitsi kasvillisuuden tyypistä, tiheydestä ja iästä, myös sateen intensiteetistä, kestosta ja muodosta. Toba & Ohta (2005) ovat pohjoisella havumetsä- ja lauhkealla sekametsävyöhykkeellä tekemässään tutkimuksessa todenneet interseptiohäviöiden suuruuden riippuvan jopa enemmän sateen ominaisuuksista kuin kasvillisuudesta. Keim *et al.* (2004) ovatkin osoittaneet interseptiohäviön olevan pienempi intensiteetiltään rankemmilla sateilla.

Vaikka interseptiohäviön arvioimiseen on kehitetty lukuisia matemaattisia malleja ja aihetta on tutkittu runsaasti erilaisilla ilmastollisilla vyöhykkeillä ja kasvillisuuslajeilla (Muzylo *et al.* 2009), ovat Inkiläinen *et al.* (2013) esittäneet etteivät tehdyt tutkimukset ja kehitetyt mallit välttämättä päde taajama-alueilla. Inkiläinen *et al.* (2013) ovatkin havainneet tutkimuksessaan verratessaan taajama-alueen ja rakentamattoman alueen interseptiohäviön eroja, että rakentamattomalla alueella huomattavasti harvempi kasvillisuus riittää tuottamaan yhtä suuren interseptiohäviön kuin tiheämpi kasvillisuus taajama-alueella. Saatuja tuloksia on perusteltu erityisesti puunhoidosta johtuvalla taajama-alueen puuston luonnollisesta poikkeavalla rakenteella.

Interseptiohäviön suhteellinen osuus kokonaissadannasta on suurimmillaan heti sadetapahtuman alussa (vrt. kuva 4). Kasvillisuuden maksimaalinen vedenpidätyskyky on kuitenkin hyvin rajallinen, minkä vuoksi interseptiohäviöt lähenevät nopeasti nolaa sadetapahtuman edetessä (Butler & Davies 2010). Taajama-alueiden interseptiohäviöiden ollessa rankkasateiden aikana suhteellisen pieniä (<1 mm) verrattuna kokonaissadantaan jätetään ne hulevesivaluntamalleissa usein kokonaan huomioimatta tai yhdistetään esimerkiksi painannesäilynnän aiheuttamiin alkuhäviöihin.

### 2.2.2 Haihdunta

Taajama-alueilla tapahtuvan kokonaishaihdunnan on todettu tutkimuksissa olevan yleisesti ympäröiviä maaseutualueita pienempää (Chandler 1976; Taha 1997; Chen *et al.* 2009). Tätä on perusteltu erityisesti kasvillisuuden peittämien alueiden korvautumisella päällystetyillä pinnoilla, ja tämän myötä transpiraation voimakkaalla vähenemisellä. Toisaalta joissain tutkimuksissa (esim. Ferguson & Suckling 1990) kaupungistumisen on todettu kasvattaneen haihduntaa erityisesti vähäsateisina vuosina (katso Kotola & Nurminen 2003). Vuositasolla tarkasteltuna haihdunnan aiheuttama häviö kokonaissadannasta on hyvin merkittävä, pääasiassa alueiden järvisyydestä aiheutuvan vaihteluvälin ollessa Pohjois-Suomessa 35–55 % ja vastaavasti Etelä-Suomessa 45–65 % (Jakkila & Vehviläinen 2015).

Yksittäisten rankkasadetapahtumien aikana haihdunnan aiheuttama häviö nähdään kuitenkin yleensä suhteellisen merkityksettömänä (Butler & Davies 2010). Tätä selittää ensinnäkin se, että yksittäisen rankkasateen kesto on niin rajallinen, ettei haihduntaa juurikaan ehdi tapahtua sen aikana. Esimerkkinä kesäpäivän aikana tapahtuva haihdunta voi olla korkeintaan muutamia millijä (Korhonen & Haavanlammi 2012). Kun tämä jaetaan esimerkiksi puolen tunnin rankkasadetapahtuman ajalle, voisi haihdunta ideaalitulanteessa olla vain muutamia millin kymmenyksiä. Toiseksi sateen aikana ilma on vesihöyryn kyllästämää, mikä osaltaan vähentää rankkasateen aikana tapahtuvaa haihduntaa (Hogland 1986, Kotolan & Nurmisen 2003 mukaan). Näin ollen mallinnettaessa yksittäisiä hulevesivaluntatapahtumia haihdunta jätetään yleensä kokonaan huomioimatta tai yhdistetään yleisiin jatkuviin häviöihin (vrt. kuva 4).

### 2.2.3 Infiltraatio

Infiltraatiokapasiteettiin vaikuttavat maanpinnan karkeus, kaltevuus ja kasvipeitteisyys; maaperän ominaisuudet, kuten sen huokoisuus, tiiveys ja hydraulinen johtavuus; maanpinnan päällystäminen sekä maaperän sen hetkinen vesipitoisuus (Chow *et al.* 1988). Myös sateen ominaisuuksilla ja vallitsevalla lämpötilalla on vaikutusta infiltraatiokapasiteettiin (Dingman 2002). Suurimmillaan niin infiltraatiokapasiteetti kuin infiltraatiohäviötkin ovat sateen alkaessa maaperän ollessa kuiva (vrt. kuva 4). Sadetapahtuman edetessä ja maan kosteuspitoisuuden kasvaessa infiltraatiokapasiteetti kuitenkin vähenee



eksponentiaalisesti kohti näennäistä vakiotasoa, jota kutsutaan täysin vedellä kyllästyneen maaperän infiltraatiokapasiteetiksi. (Butler & Davies 2010) Infiltraatiokapasiteetin pienentyessä myös infiltraatiohäviöiden suhteellinen osuus kokonaissadannasta vähenee sadetapahtuman edetessä.

Taajama-alueilla läpäisevien pintojen päällystäminen vähentää voimakkaasti alueella tapahtuvaa infiltraatiota (Jacobson 2011). Läpäisemättömiltä pinnoilta, kuten talojen katoilta, teiltä ja parkkipaikoilta sadeveden imeytymistä maaperään ei juuri pääse tapahtumaan. Kaikki läpäisemättömät alueet eivät kuitenkaan ole suorassa hydraulisessa yhteydessä hulevesiviemäriin, vaan kattovedet saatetaan purkaa suoraan talojen kasvillisuuden peittämille piha-alueille ja yhtälailta tiealueilta sadevesiä johtuu pintavaluntana myös niitä reunustaville läpäiseville alueille ja imeytyy maaperään. (Schueler 1994) Huolimatta taajama-alueiden vähentyneestä sadeveden maahan imeytymisestä, infiltraatio muodostaa silti useissa tapauksissa merkittävimmän yksittäisen häviön kokonaissadannasta (Karamouz *et al.* 2010).

Yleisesti hulevesivaluntamalleissa infiltraatiokapasiteetin  $f(t)$  kuvaamiseen ajanhetkellä  $t$  on käytetty Hortonin (1939) empiiristä yhtälöä (katso Butler & Davies 2010):

$$f(t) = f_c + (f_0 - f_c)e^{-k_f t}, \quad (1)$$

missä  $f_c$  on maaperän lopullinen infiltraatiokapasiteetti sen ollessa täysin vedellä kyllästynyt,  $f_0$  on infiltraatiokapasiteetti sateen alkaessa maaperän ollessa kuiva ja  $k_f$  on empiirisesti määritettävä aikavakio, joka kuvaa kuinka nopeasti infiltraatiokapasiteetti saavuttaa maaperän lopullisen infiltraatiokapasiteetin.

Hortonin yhtälössä käytettäville parametreille – sateen alkuhetken infiltraatiokapasiteetille, kyllästyneen maaperän infiltraatiokapasiteetille ja aikavakiolle – löytyy kirjallisuudesta useita toisistaan suurestikin poikkeavia maaperästä ja maankäytöstä riippuvia arvoja (taulukko 2) (mm. Butler & Davies 2010; Karamouz *et al.* 2010; Rossman 2010; Danish Hydraulic Institute 2012a). Eri kirjallisuuslähteistä haettujen arvojen vertailua toisiinsa nähden vaikeuttaa se, että eri maalajeille ei ole käytetty mitään täsmällisiä raja-arvoja tai ne on luokiteltu vain huonosti, kohtalaisesti tai hyvin vettäläpäiseviksi. Vertailua tehdessä savimaat on luettu huonosti, hiesu- ja hietamaat kohtalaisesti sekä hieka- ja soramaat hyvin vettäläpäiseviksi.

**Taulukko 2.** Hortonin yhtälössä käytettävien parametrien kirjallisuusarvoja (Butler & Davies 2010; Karamouz *et al.* 2010; Rossman 2010).

Maaperän veden- läpäisevyys	Infiltraationopeus sateen alussa, $f_c$ [mm/h]	Infiltraatiokapasiteetti lopullinen, $f_0$ [mm/h]	Aikavakio, $k_f$ [1/h]
Huono	3 – 75	0,3 – 3	0,4 – 5,4
Kohtalainen	36 – 152	3 – 6	1,8 – 5,4
Hyvä	72 – 200	10 – 18	1,8 – 5,4

Hortonin yhtälön (1) heikkoutena on nähty, ettei se huomioi maaperään imeytyneen veden määrää ja olettaa infiltraatiokapasiteetin riippuvan vain ajasta (Karamouz *et al.* 2010). Yhtälö ei pysty ottamaan huomioon tilannetta, jossa sateen intensiteetti on heikompi kuin maaperän sen hetkinen infiltraatiokapasiteetti. Nimittäin tällaisessa tilanteessa maaperän infiltraatiokapasiteetin ei pitäisi heikentyä niin nopeasti, jos ollenkaan. Tämän vuoksi yhtälö aliarvioi maaperän infiltraatiokapasiteetin sadetapahtumissa, joissa sateen intensiteetti alittaa hetkellisesti maaperän infiltraatiokapasiteetin.

Useissa hulevesivaluntamalleissa Hortonin yhtälöä (1) on muokattu matemaattisesti siten, että myös intensiteetiltään heikot sadejaksot tulevat oikein huomioiduiksi infiltraatiohäviön laskennassa (Karamouz *et al.* 2010). Yksi keino tähän on Hortonin yhtälössä (1) käytetyn ajan  $t$  korvaaminen täyttävällä infiltraatiokapasiteetilla kuvaavalla ekvivalenttiajalla  $t_p$ . Ekvivalenttiaika voidaan ratkaista iteratiivisesti kahdesta kumulatiivista infiltraatiota kuvaavasta yhtälöstä, jotka vastaavat tilanteita, joissa sateen intensiteetti on suurempi ja vastaavasti pienempi kuin maaperän sen hetkinen infiltraatiokapasiteetti (Danish Hydraulic Institute 2012a). Näistä ensimmäisessä tilanteessa kumulatiivinen infiltraatio  $F(t_p)$  sateen alkuhetkestä ajanhetkeen  $t_p$  saadaan laskettua integroimalla infiltraatiokapasiteetti (1) ajansuhteen (Arnell 1980):

$$F(t_p) = \int_0^{t_p} f(t) dt, \quad (2)$$

$$F(t_p) = f_c t_p + \frac{f_0 - f_c}{k_f} (1 - e^{-k_f t_p}). \quad (3)$$

Vastaavasti sateen intensiteetin ollessa maaperän sen hetkistä infiltraatiokapasiteettia pienempi, on kumulatiivinen infiltraatio  $F(t)$  yhtä suuri kuin tehoisan sadannan  $i_{eff}$  kertymä:

$$F(t) = \int_0^t i_{eff} dt \quad (4)$$

Nyt yhtälöistä (3) ja (4) iteratiivisesti ratkaistu ekvivalenttiaika  $t_p$  on aina pienempi tai yhtä suuri kuin todellinen aika  $t$ , minkä ansiosta infiltraatiokapasiteetti ei riipu pelkästään kuluneesta ajasta, vaan myös maaperään imeytyneen veden määrästä (Danish Hydraulic Institute 2012a).

## 2.2.4 Pintojen kastuminen ja painannesäilyntä

Sadetapahtuman alussa osa kosteudesta imeytyy maanpinnan päällikerrokseen riippumatta siitä, edustaako maanpinta luonnollista vettä läpäisevää vai päällystettyä läpäisemättömää aluetta (Mansell & Rollet 2009). Tämä valuma-alueen pintojen kastumisesta aiheutuva häviö on suuruusluokaltaan vain muutamia millin kymmenesosia ollen tyypillisesti hieman suurempi läpäisevillä kuin läpäisemättömillä pinnoilla (Geiger *et al.* 1987). Pintojen kastumisesta aiheutuva häviö on luonnollisesti suoraan riippuvainen

sadetahtuvaa edeltävistä maanpinnan kosteusolosuhteista; pintojen ollessa valmiiksi määrät ei häviötä tapahdu, ja pintojen ollessa täysin kuivat huomioidaan häviö täysimääräisenä (Mansell & Rollet 2009). Hulevesivaluntamalleissa pintojen kastuminen yhdistetään yleensä muihin alkuhäviöihin (Karamouz *et al.* 2010).

Valuma-alueen pintojen kastuttua alkaa sadevesi imeytyä maaperään (Mansell & Rollet 2009). Mikäli sateen intensiteetti ylittää maaperän infiltraatiokapasiteetin tai kyseessä on läpäisemätön pinta, jolla infiltraatiota ei tapahdu, alkaa sadevesi kertyä pinnalla oleviin painanteisiin Linsleyn *et al.* (1982) yksityiskohtaisemmin kuvaamien prosessien mukaisesti. Sadetahtuman edetessä yhä suurempi osa sadevedestä jää pinnalla oleviin painanteisiin heikentyneen infiltraation johdosta kasvattaen painannesäilynnästä aiheutuvia häviöitä (vrt. kuva 4) (Butler & Davies 2010).

Painannesäilynnän suuruuteen vaikuttavat oleellisesti pintatyyppi sekä pinnankarheus ja -kaltevuus (Borselli & Torri 2010). Taajama-alueilla tasaiset, vähän mikropainanteita sisältävät läpäisemättömät pinnat rajoittavat tehokkaasti painannesäilynnästä syntyvän häviön suuruutta. Myös pintojen tasaaminen ja kuivatusjärjestelmien rakentaminen pienentävät taajama-alueiden painannesäilyntää. (Linsley *et al.* 1982) Painannesäilynnän suuruus pienenee pinnankaltevuuden kasvaessa riippumatta siitä, onko kyseessä läpäisemätön vai läpäisevä pintatyyppi (Borselli & Torri 2010). Topografialtaan vaihtelevilla alueilla painannesäilynnästä aiheutuvat häviöt voivatkin olla huomattavasti pienemmät kuin vastaavilla saman pintatyyppin omaavilla tasaisemmillä alueilla.

Erikseen pintojen kastumisesta ja painannesäilynnästä aiheutuvia häviöitä erilaisille läpäisemättömille ja läpäiseville pintatyypeille (taulukko 3) on määrittänyt Pecher (1969 & 1970) (katso Arnell 1980). Näiden arvojen on tutkimuksissa (Falk & Niemczynowick

**Taulukko 3.** *Pintojen kastumisesta ja painannesäilynnästä aiheutuvat kokonaissadannan häviöt eri pintatyypeille (perustuen Arnell 1980).*

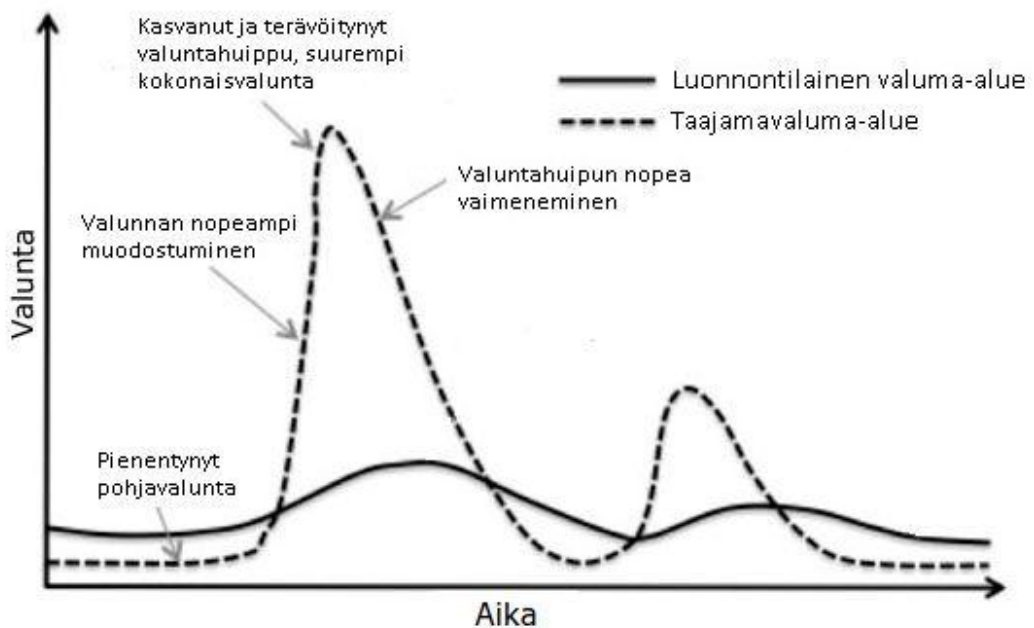
Pintatyyppi	Häviö kokonaissadannasta [mm]	
	Pecher (1969 & 1970)	Krebs <i>et al.</i> (2014) <sup>1</sup>
<b><i>Pintojen kastuminen</i></b>		
Läpäisemätön alue (katot, päällystetyt tiet, jne.)	0,20 – 0,50	
Läpäisevä alue (nurmetut pihat, puistot, pellot, jne.)	0,20 – 2,00	
<b><i>Painannesäilyntä</i></b>		
Erittäin tasaiset läpäisemättömät pinnat	0,20 – 0,40	0,10 – 0,87
Tasaiset läpäisemättömät pinnat	0,50 – 0,70	0,39 – 0,62
Matalan kasvillisuuden alueet (nurmetut pihat, niityt, laidunmaa)	0,60 – 2,50	2,54 – 5,07
Korkean kasvillisuuden alueet	2,50 – 4,00	3,00 – 7,53

<sup>1</sup> Krebsin *et al.* (2014) esittämät arvot yhteensä painannesäilynnälle ja pintojen kastumiselle

1978, Arnellin 1980 mukaan) todettu vastaavan hyvin ainakin Ruotsissa määritettyjä valuma-aluekohtaisia pintojen kastumisen ja painannesäilynnän yhteensä aiheuttamia häviöitä. Myös Suomessa Krebsin *et al.* (2014) mallintamilleen taajamavaluma-alueille esittämät painannesäilynnästä ja pintojen kastumisesta yhteensä aiheutuvat häviöt ovat suuruudeltaan samaa kokoluokkaa Pecherin (1969 & 1970) esittämien arvojen kanssa (katso Arnell 1980). Hulevesivaluntamalleissa painannesäilyntä huomioidaan usein omana alkuhäviönään tai yhdistetään muihin alkuhäviöihin (Karamouz *et al.* 2010).

### 2.3 Hulevesivalunnan erityispiirteet

Kaupungistumisen aiheuttama läpäisemättömän pinnan lisääntyminen, kasvillisuuden väheneminen ja luonnollisten pintavalunnan johtumisreittien korvautuminen tehokkailla kuivatus- ja viemäröintijärjestelmillä muuttaa oleellisesti taajama-alueiden sadantavaluntaprosessin luonnetta. Häviöiden osuus kokonaissadannasta pienenee kasvattaen tehoisan sadannan muodostumista, mikä puolestaan kasvattaa ja äärevöittää muodostuvaa hulevesivaluntaa (kuva 5). (Jacobson 2011; Miller *et al.* 2014)



**Kuva 5.** Kaupungistumisen aiheuttamat muutokset taajama-alueiden valuntavasteessa luonnontilaisiin valuma-alueisiin verrattuna (perustuen Fletcher *et al.* 2013).

Oleellisin taajama-alueella hulevesivalunnan muodostumiseen vaikuttava tekijä on läpäisemättömän pinnan määrä (Schueler 1994; Lee & Heaney 2003), sen alueellinen jakautuminen ja yhteys hulevesijärjestelmiin (Shuster *et al.* 2005; Jacobson 2011). Läpäiseviltä pinnoilta, kuten kaduilta ja katoilta alkaa muodostua hulevesivaluntaa lähes välittömästi sateen alettua (Boyd *et al.* 1993; Sillanpää 2013). Katuja ja kattoja pitkin tapahtuva hulevesivalunta on myös huomattavan nopeaa (Leopold 1968) ja saavuttaa tehokkaasti taajama-alueille rakennetut kuivatus- ja viemäröintijärjestelmät (Miller *et al.*

2014). Lisääntynyt ja kiihtynyt hulevesivalunta lyhentää sateen huippuintensiteetin ja huippuvalunnan välistä viivettä sekä kasvattaa ja terävöittää valuntahuippua aiheuttaen aiempaa suurempaa ja vakavampaa tulvariskiä (Leopold 1968; Schueler 1994; Sillanpää 2013). Infiltraation estymisen läpäisemättömillä alueilla on niin ikään havaittu aiheutta- neen pohjavalunnan vähentymistä (Spinello & Simmons 1992).

## 2.4 Taajamavaluma-alueiden pinnan parametrisointi

Taajamavaluma-alueet voidaan jakaa pintojen läpäisevyyden ja niiden yhteyden hule- vesijärjestelmiin perusteella kolmeen erilaiseen tyyppiin (Boyd *et al.* 1993):

- suoraan hulevesiverkostoon kytköksissä olevat läpäisemättömät alueet (DCIA), joita tyypillisesti edustavat kadut, parkkipaikat ja osa talojen katoista
- muut läpäisemättömät alueet, jotka eivät ole suoraan kytköksissä hulevesiver- kostoon vaan purkavat läpäiseville alueille
- läpäisevät alueet, joita edustavat muun muassa nurmikot, puistot, pellot ja metsät

Kirjallisuudessa DCIA:lle käytetään usein synonyymina tehoisan läpäisemättömän pin- nan (EIA) käsitettä (Sutherland 2000). EIA ja muut läpäisemättömät alueet yhdessä muodostavat valuma-alueen läpäisemättömän kokonaispinnan (TIA) (Boyd *et al.* 1993).

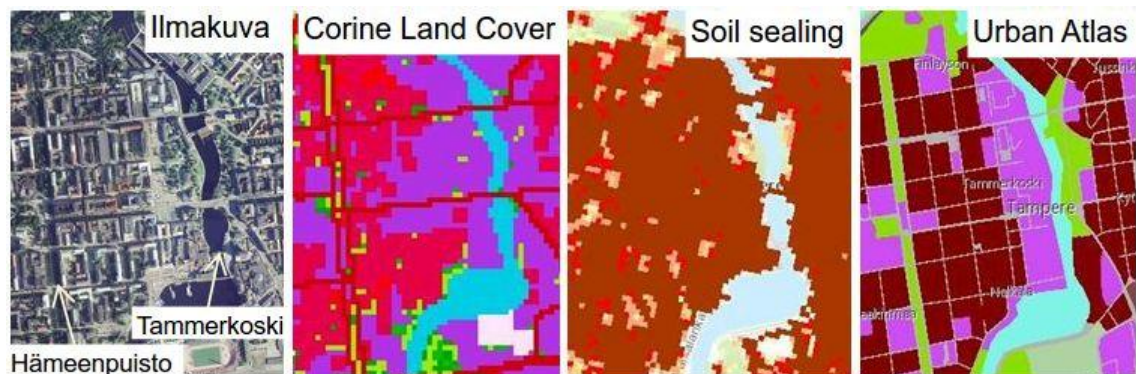
Pienten sadetapahtumien yhteydessä valtaosan hulevesivalunnasta on tutkimuksissa todettu muodostuvan valuma-alueen EIA:lla (Pitt 1987; Boyd *et al.* 1993; Lee & Hea- ney 2003; Sillanpää 2013). EIA:n luotettava määrittäminen ei kuitenkaan ole mitenkään yksioikoista. Valuma-alueen TIA voidaan sen sijaan määrittää suoraan erilaisin satelliit- ti- ja ilmakuvatulkintana tehtävin maanpeiteluokituksin, joiden perusteella myös EIA:n määrää voidaan karkealla tasolla arvioida. (Lee & Heaney 2003) Lisäksi useammissa tutkimuksissa hulevesivaluntaa on raportoitu muodostuvan myös läpäiseviltä alueilta erityisesti sademäärältään suurempien sadetapahtumien yhteydessä (Pitt 1987; Boyd *et al.* 1993; Sillanpää 2013).

EIA:n muodostaessa pääosan hulevesivaluntaa tuottavasta valuma-alueen pinnasta, mut- ta myös läpäisevien ja EIA:n ulkopuolisten läpäisemättömien alueiden osallistuessa hulevesivalunnan muodostukseen tietyin reunaehdoin, on valuma-alueen jakaminen pinnaltaan erilaisiin maanpeiteluokkiin käytännöllisintä hulevesivalunnan mallinnuksen näkökulmasta. Näin menetellen kaikki pinnaltaan erilaiset tehoisaan läpäisemättömään alueeseen, muihin läpäisemättömiin alueisiin ja läpäiseviin alueisiin kuuluvat maanpei- teluokat pystytään parametrisoimaan hulevesivaluntamallissa omina valuntaa tuottavina komponentteinaan.

## 2.4.1 Maankäyttö- ja maanpeiteluokitus

Tilastokeskuksen (2000) mukaan suomalainen maankäyttöluokitus on hajautettu maankäyttöä, peitteisyyttä ja maaperää koskevaan luokitukseen. Tämän määritelmän mukaan maankäyttö perustuu alueen käyttötarkoitukseen ja peitteisyys pinnan fyysiseen kuvaukseen. Tässä työssä maanpeiteluokituksella onkin tarkoitettu aina ensisijaisesti maanpinnan fyysiseen kuvaukseen perustuvaa luokitusta. Samaa määritelmää on vakiintuneesti käyttänyt jo ainakin Helsingin seudun ympäristöpalvelut (HSY) pääkaupunki-seudun maa-alueet kattavaa maanpeitteen luokitteluaineistoa tuottaessaan (HSY 2015). Maankäyttöluokituksilla on puolestaan tässä työssä Tilastokeskuksen (2000) määritelmää mukailleen tarkoitettu aina ensisijaisesti asemaakaavan osoittamaa, alueelliseen käyttötarkoitukseen perustuvaa luokitusta.

Euroopan alueelle on 2000-luvulla tuotettu useampia maankäyttö- ja maanpeiteluokituksia Euroopan ympäristökeskuksen (EEA) toimeenpanemissa hankkeissa. Näistä esimerkkeinä ovat Corine Land Cover ja Urban Atlas -maankäyttö- ja maanpeiteaineistot sekä Soil sealing -pinnanläpäisevyysrasteri (kuva 6). (SYKE 2013; EEA 2015a; EEA 2015b)



**Kuva 6.** Esimerkki Corine Land Cover, Soil sealing ja Urban Atlas maankäyttö- ja maanpeiteaineistoista Tampereelta. @ SYKE 2013, @ EEA 2015, @MML 2015

Corine Land Cover ja Soil Sealing -aineistojen soveltuvuutta taajama-alueiden hulevesimallinnukseen heikentää oleellisesti niiden riittämätön spatiaalinen resoluutio eli alueellinen erotuskyky (20 m) (SYKE 2013; EEA 2015a; Salvatore *et al.* 2015). Alueelliselta erotuskyvyltään tarkempaa Urban Atlas -aineistoa ei sitä vastoin ole Suomessa saatavilla kuin Helsingistä, Turusta, Tampereelta ja Oulusta (EEA 2015b). Näiden Euroopan alueen maankäyttö- ja maanpeiteluokitusten lisäksi Suomessa on tuotettu oma koko maan kattava 10 m erotuskyvyn omaava maankäyttöluokitus Maanmittauslaitoksen (MML) johtamassa SLICES-yhteistyöprojektissa (Hallin-Pihlatie *et al.* 2014). SLICES-aineistojen tuottaminen on kuitenkin lopetettu 2010 eikä näitä aineistoja näin ollen ole tarkoitus saattaa julkisesti saataville.

Suomessa hulevesijärjestelmien mitoittamista ohjaavissa lähteissä ei ole annettu tarkempia ohjeita maankäyttö- tai maanpeiteluokitusten tuottamisesta (Suomen kuntatekniikan

yhdistys 2003; Karttunen 2004; Kuntaliitto 2012; Liikennevirasto 2013). Suunnittelu-työssä luokitus on perinteisesti tehty käsivaraisesti ilmakuvatulkintana tai ajantasa-  
 asemakaavan mukaisesti. Käsivaraisesti tehtynä luokitus on hyvin työlästä, aikaa vievää  
 ja subjektiivista, eivätkä näin luokitellut alueet ole keskenään yhteismitallisia. Ajantasa-  
 asemakaavan mukaisessa maankäyttöluokituksessa alueiden jako esimerkiksi kerrosta-  
 lokortteleiksi, omakotitalo- tai teollisuusalueiksi on sitä vastoin hyvin yleispiirteistä ja  
 käytetyt maankäyttöluokat edustavatkin vain keskimääräisiä arvioita luokitellun alueen  
 peitteisyydestä (Shuster *et al.* 2005).

Tuoreimmissa tutkimuksissa (mm. Krebs *et al.* 2014; Petrucci & Bonhomme 2014),  
 joissa hulevesimallinnuksesta saatuja tuloksia on verrattu kenttämittauksiin, on yhtenä  
 mallinnustarkkuuden kannalta oleellisimpina tekijänä todettu olevan maanpeiteaineisto-  
 jen alueellinen tarkkuus. Esimerkkinä Krebs *et al.* (2014) ovat tutkimuksessaan kalib-  
 roineet kolme maankäytöltään eri tyyppistä Lahdessa sijaitsevaa taajamavaluma-alueita  
 niiden maanpeitteen ominaisuuksia kuvaavien parametrien, kuten pinnan karkeuden,  
 painannesäilynnän ja läpäisemättömyyden suhteen. Näiden kalibroittujen malliparamet-  
 rien on todettu vastaavan hyvin toisiaan eri valuma-alueiden välillä. Saatua tulosta on  
 perusteltu mallissa käytetyillä korkean alueellisen erotuskyvyn omaavilla maanpeiteai-  
 neistoilla sekä näiden kuvaamien pintojen suoralla fyysisellä yhteydellä hulevesivalun-  
 nan muodostumiseen. Tästä onkin esitetty johtopäätöksenä, että alueellisesti tarkoilla  
 maanpeiteaineistoilla olisi mahdollista arvioida hulevesivaluntaa suhteellisen tarkasti  
 myös sellaisilla valuma-alueilla, joilla mallin antamia tuloksia ei pystytä varmentamaan  
 mittauksista.

Myös Petrucci & Bonhomme (2014) ovat tutkimuksessaan todenneet, että riittävän tar-  
 kan maanpeiteaineiston omaavan kalibroimattoman hulevesimallin antamat tulokset  
 ovat vertailukelpoisia kalibroidun mallin kanssa. Tässä tutkimuksessa kalibroimattomi-  
 en hulevesimallien valuma-alueita kuvaavia ominaisuuksia tarkennettiin asteittain, ja  
 mallien antamia tuloksia verrattiin kalibroituihin malleihin. Suurin vaikutus kalibroi-  
 mattomien mallien antamien tulosten tarkkuuteen todettiin olevan juuri korkean alueel-  
 lisen erotuskyvyn omaavilla maanpeiteaineistoilla.

## 2.4.2 Paikkatietojärjestelmäpohjainen maanpeiteluokitus

Nykyään kunnat ja eri viranomaisorganisaatiot Suomessa tarjoavat enenevässä määrin  
 paikkatietoaineistojaan vapaaseen käyttöön avoimen datan latauspalveluiden ja rajapin-  
 tojen kautta (Maa- ja metsätalousministeriö 2010; MML 2015a). Nämä paikkatietoai-  
 neistot käsittävät muun muassa maastoa, maankäyttöä ja -peitettä, maaperää, liikenne-  
 verkkoja, kasvillisuutta, rakennuksia ja asutusta kuvaavia kartta-aineistoja, satelliitti- ja  
 ilmakuvia sekä ympäristön kolmiulotteisia malleja (Maa- ja metsätalousministeriö  
 2010). Kaikkeen paikkatietoon sisältyy sijaintitieto (MML 2014), mikä mahdollistaa  
 aineistojen hyödyntämisen maanpeiteluokitusten tuottamisessa. Nimittäin paikkatieto-  
 järjestelmillä (GIS) aineistoja pystytään yhdistelemään, analysoimaan ja esittämään

samanaikaisesti niiden sijaintitietoon perustuen (MML 2014). GIS mahdollistaa aineistojen tehokkaan ja osin automatisoidun käsittelyn, minkä ansiosta tarkempia maanpeiteluokituksia on mahdollista tuottaa objektiivisesti, yhteismitallisesti ja kustannustehokkaasti myös laajemmille taajamavaluma-alueille.

Jako läpäiseviin ja läpäisemättömiin alueisiin voidaan karkeimmillaan toteuttaa jakamalla taajamavaluma-alue kasvillisuuden peittämiin ”vihreisiin” alueisiin ja jäljelle jääviin ”harmaisiin” alueisiin (Schueler 1994). Kaukokartoituksessa eli satelliitti- ja ilmakuvilta tehtävässä kohteiden tunnistuksessa yleisin kasvillisuuden määrän arviointiin käytetty menetelmä on normalisoitu kasvillisuusindeksi (NDVI), jonka fysikaalista perustaa tarkemmin ovat kuvanneet Xie *et al.* (2008). Rousen *et al.* (1974) alun perin kehittämän NDVI-arvon laskenta perustuu kohteen heijastaman punaisen ( $R_{red}$ ) ja lähi-infrapuna-aallonpituusalueen ( $NIR$ ) säteilyn määrän vertaamiseen (katso Pettorelli 2013):

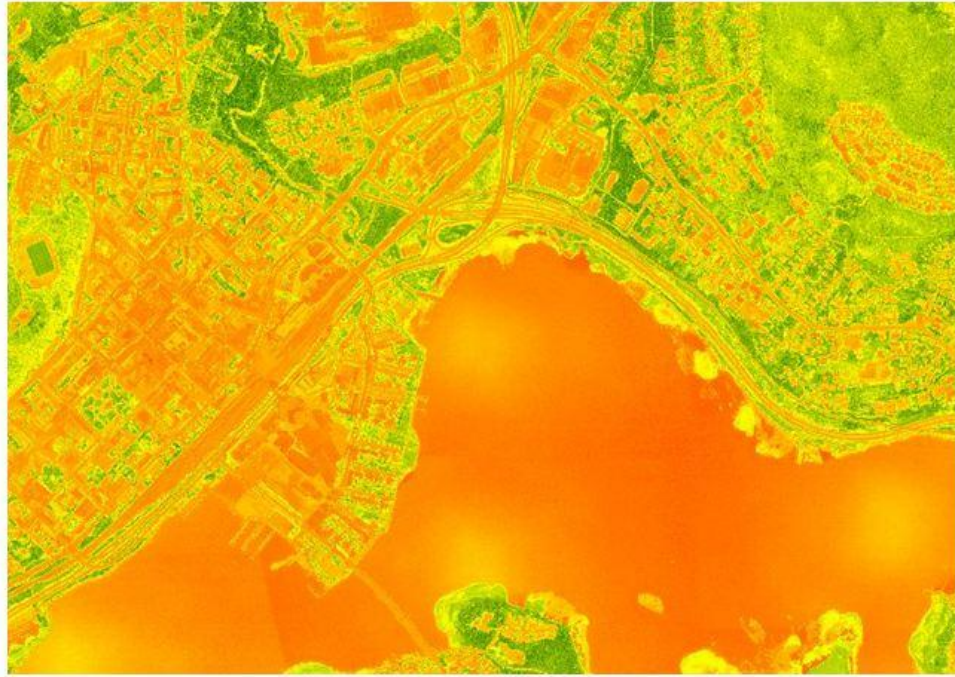
$$NDVI = \frac{NIR - R_{red}}{NIR + R_{red}}. \quad (5)$$

Satelliitti- ja ilmakuvat ovat rasterimuotoista paikkatietoa, jossa jokaiseen rasterisoluun on talletettu sijaintitieto ja sävyarvo jokaiselle havainnoitavalle aallonpituusalueelle eli kanavalle (Henderson 2014). Kun näistä rasterikuvista erotetaan punaista ja lähi-infrapunakanavaa esittävät tasot, voidaan niiden avulla laskea yhtälön (5) mukaisesti NDVI-arvo jokaiselle rasterikuvan pikselille. Rasterikuvassa kasvillisuuden peittämät alueet saavat lähellä +1,0 olevan arvon; paljas maa, betoni ja asfaltti lähellä nollaa olevan arvon ja vesialueet -1,0 lähentyvän arvon (Pettorelli 2013). Tavallisesti nämä NDVI-arvot esitetään paikkatietojärjestelmissä siten, että positiiviset arvot skaalataan näkymään vihreän eri sävyinä ja negatiiviset vastaavasti punaisen eri sävyinä (kuva 7). Suomessa NDVI-menetelmää maanpeiteluokituksissa on hyödyntänyt ainakin HSY tuottaessaan maanpeiteaineistoja pääkaupunkiseudulle (Blom Kartta Oy 2015).

Kuntien ja viranomaisorganisaatioiden ylläpitämät paikkatietoaineistot sisältävät runsaasti valmiiksi luokiteltuja maastokohteita, joita on mahdollista suoraan hyödyntää maanpeiteluokituksissa. Esimerkiksi Lee & Heaney (2003) ovat hyödyntäneet Boulderin kaupungissa Yhdysvalloissa tekemässään hulevesimallinnuksessa läpäisemättömän pinnan kartoitukseen kaupungin paikkatietokannassa olevia päällystettyjä katuja, kävelyteitä, parkkipaikkoja sekä rakennuksia. Näin tarkasteltavan alueen TIA on saatu määritettyä käytännössä suoraan GIS-pohjaisesti. Suomessa kattavin ja sijainniltaan tarkin tällainen paikkatietoaineisto on Maanmittauslaitoksen (MML) maastotietokanta (MML 2015b).

Viime vuosina maanpeiteluokitusten tuottamisessa on alettu hyödyntää laserkeilausaineistoja (Yan *et al.* 2015), joiden tuottamista on tarkemmin eritelty MML:n (2015c) aineistokuvauksissa. Laserkeilausaineistot muodostuvat pistepilvestä, jossa jo-





**Kuva 7.** NDVI-luokitus Jyväsjärven alueelta. © MML, 2015

kainen piste sisältää koordinaattitiedot ja sävyarvon kartoitetuille maastokohteille. Pinnaltaan erilaiset kohteet omaavat erilaisen sävyarvon, mitä voidaan käyttää pisteiden koordinaattitietojen ohella hyödyksi maanpeiteluokituksessa (Yan *et al.* 2015). Suomessa MML:n vapaaseen käyttöön tarjoamat laserkeilausaineistot on valmiiksi luokiteltu siten, että ne sisältävät omat pisteluokkansa esimerkiksi maanpinnalle, kasvillisuudelle sekä vesialueille.

Laserkeilausaineistojen ohella maanpeiteluokitusten tuottamisessa ovat viime aikoina lisääntyneet voimakkaasti erilaiset satelliittikaukokartoitusmenetelmät (Salvadore *et al.* 2015). Erilaisia satelliittikuvatulkinnaissa maanpeitteen luokitteluun käytettyjä menetelmiä on lueteltu ja kuvannut tarkemmin Weng (2012). Aiemmin satelliittikuvien käyttöä taajamahydrologiassa on rajoittanut erityisesti niiden riittämätön spatiaalinen resoluutio maanpeiteaineistoilta tarkkuutta vaativissa hulevesimallinnuksissa (Lee & Heaney 2003). Nykypäivänä satelliittikuvia on kuitenkin jo saatavissa erittäin tarkalla alueellisella erotuskyvyllä sen ollessa parhaimmillaan vain kymmenien senttimetrien luokkaa (Weng 2012). Näiden korkean erotuskyvyn satelliittikuvien käyttöä tavallisessa suunnittelutyössä rajoittaa kuitenkin edelleen niiden suhteellisen korkea hintataso (Verbeiren *et al.* 2013). Lisäksi satelliittikuvien luokittelu vaatii usein oman erityisohjelmistonsa ja -ammattitaitonsa. Tästä huolimatta Weng (2012) näkee satelliittikuvatulkinna yhdistettynä laserkeilausaineistojen käyttöön ehdottomana tulevaisuuden suuntauksena taajama-alueiden maanpeiteaineistojen tuottamisessa.

### 2.4.3 Valumakerroin

Valumakerroin on empiirinen termi, jota käytetään kuvaamaan sadannan ja hulevesivalun välistä suhdetta (Beven 2012). Ensimmäisenä termin otti käyttöön Mulvaney (1850) kehittäessään mallin ennustamaan sateen aikaista huippuvirtaamaa (katso Beven 2012). Nykyään tämä malli tunnetaan *rationaalisena menetelmänä*, joka on edelleen yleisin hulevesiviemäreiden mitoituksessa käytetty yhtälö (McCuen 2004; Kuntaliitto 2012). Yhtälön mukaisesti sateen aikainen huippuvirtaama  $Q_p$  saadaan laskettua mitoitussateen keskimääräisen intensiteetin  $i(t_{av})$  (keskimääräinen intensiteetti aikavälillä  $t_{av}$ ), valuma-alueen pinta-alan  $A$  ja huippuvalumakertoimen  $C_p$  tulona (Beven 2012):

$$Q_p = C_p i(t_{av}) A. \quad (6)$$

Yhtälön taustalla on oletamus pahimmasta mahdollisesta mitoitustilanteesta, jossa koko valuma-alue kerryttää samanaikaisesti valuntaa purkupisteelle mitoitussateen keston ollessa vähintään valuma-alueen kertymisajan pituinen (Butler & Davies 2010). Sovellettaessa yhtälöä (6) huippuvalumakertoimen  $C_p$  määrittämiseen tehtyjen sadantavaluntamittausten perusteella tulisi keskimääräisen intensiteetin laskennassa käyttää valuma-alueen kertymisajan pituista aikaikkunaa  $t_{av}$ , joka sijoittuu tasaisesti huippuvirtaamaa vastaavan ajankohdan molemmiin puolin (Kuichling 1889; Dhakal *et al.* 2013 mukaan).

Huippuvalumakertoimen ohella tutkimuksissa käytetään usein sadetapahtuman aikaisen kokonaisvalun ja -sadannan suhdetta kuvaavaa volumetrasta valumakerrointa  $C_{vol}$  (Dhakal *et al.* 2012; Guo & Urbonas 2014). Kirjallisuudessa huippuvalumakerrointa ja volumetrasta valumakerrointa ei ole usein erotettu riittävän selkeästi toisistaan, minkä seurauksena ne toisinaan sekoitetaan helposti keskenään suunnittelutyössä (Dhakal *et al.* 2012 & 2013). Uusimmissa, suomalaisissa suunnitteluoppaissa – Suomen Rakennusinsinöörien Liiton (2004) *Vesihuolto II*, Kuntaliiton (2012) *Hulevesiopas*, Liikenneviraston (2013) *Teiden ja ratojen kuivatuksen suunnittelu* – taulukoitujen valumakertoimien viite on Kaupunkiliiton (1979) julkaisussa B63 *Vesijohtojen ja viemäreiden suunnittelu* sekä Jäämiehen (1968) teoksessa *Maa- ja vesirakennus* esitetyissä valumakertoimissa. Näistä suomalaisista lähde- ja lähdeteoksista ei kuitenkaan löydy mainintaa valumakertoimien todellisesta alkuperästä eikä niiden tyypistä.

Kansainvälisissä taajamahydrologiaa käsittelevissä oppi- ja käsikirjoissa (esim. Chow *et al.* 1988; Viessman & Lewis 2003; McCuen 2004) taulukoitujen valumakertoimien alkuperäviite on Amerikan maa- ja vesirakennusinsinöörien yhdistyksen (ASCE) ja kansainvälisen Vesiensuojeluliiton (WPCF) yhteisessä julkaisussa *Design and Construction of Sanitary and Storm Sewers* vuodelta 1960. Sen mukaan valumakertoimet on määritetty kyselytutkimuksella, johon saatiin “71 vastausta laajaan kyselylomakkeeseen, joka toimitettiin 380 julkiselle ja yksityiselle organisaatiolle kaikkialla Yhdysvalloissa” (ASCE & WPCF 1970). Dhakal *et al.* (2013) korostavat kuitenkin, ettei tällä kyselytut-

kimuksella saatuja valumakertoimia ole millään tavoin varmennettu sateen intensiteetti- ja huippuvirtaamahavainnoista tehdyillä tutkimuksilla. Tämän vuoksi kirjallisuudessa taulukoiduille, rationaalisella menetellä (6) huippuvirtaamien arviointiin tarkoitettuille valumakertoimille käytetään tässä työssä pelkästään käsitettä *valumakerroin*,  $C_i$  erotuksena muille valumakertoimille (taulukko 4).

**Taulukko 4.** Yhteenvedo kirjallisuudessa käytetyistä valumakerrointyypeistä.

Valumakerrointyyppi	Lyhenne	Selite
Huippuvalumakerroin	$C_p$	Kuvaa sateen aikaisen huippuvirtaaman ja keskimääräisen maksimi-intensiteetin välistä suhdetta. Määritetään sadantavaluntamittauksista. (Dhakai <i>et al.</i> 2013)
Volumetrinen valumakerroin	$C_{vol}$	Sadetapahtuman aikaisen kokonaisvalunnan ja -sadannan suhde (Dhakai <i>et al.</i> 2012)
Valumakerroin	$C_i$	Periaate sama kuin huippuvalumakertoimella, alkuperä kuitenkin ASCE:n teettämässä kyselytutkimuksessa (ASCE 1970)

ASCE:n & WPCF:n yhteisjulkaisussa (1970) taulukoidut valumakertoimet vastaavat niille esitettyjen vaihteluvälien rajoissa suomalaisissa suunnitteluoppaissa esitettyjä valumakertoimia (taulukko 5 ja 6). Tämä viittaa siihen, että myös Suomessa käytetyt valumakertoimet pohjautuisivat tähän samaan alkuperäisjulkaisuun. Vertailua tehtäessä suomalaisissa suunnitteluoppaissa ilmoitetuille valumakertoimille on pyritty löytämään mahdollisimman hyvin niitä kuvaava vastine ASCE:n ja WPCF:n alkuperäisjulkaisusta huolimatta alueellista käyttötarkoitusta ja pinnan laatua kuvaavien termien vaihtelusta eri lähteiden välillä. Vertailusta on lisäksi jätetty pois yksittäisiä Kaupunkiliiton (1979) julkaisussa esitettyjä alueellista käyttötarkoitusta kuvaavia valumakertoimia niiden muista lähteistä poikkeavan jaottelun vuoksi.

**Taulukko 5.** Maankäytön mukaan ilmoitettujen valumakertoimien  $C_i$  vertailu suomalaisten suunnitteluoppaiden sekä ASCE:n ja WPCF:n yhteisjulkaisun välillä.

Alueen käyttötarkoitus	Lähdekirjallisuus	
	Kaupunkiliitto (1979), Karttunen (2004), Liikennevirasto (2013)	ASCE & WPCF (1970)
Liike- ja toimistorakennusalue (keskusta)	0,70 – 0,90 <sup>1</sup>	0,70 – 0,95
Avoimet kerrostalokorttelit	0,50 – 0,60	0,40 – 0,75
Rivitaloalueet	0,35	0,30 – 0,50
Omakotitaloalueet	0,20 – 0,30	0,25 – 0,50
Teollisuus		0,50 – 0,90
Puistoalueet	0,05 – 0,35	0,10 – 0,25
Urheilu- ja leikkikentät, ratapiha-alueet	0,20	0,20 – 0,35

<sup>1</sup> Liike- ja toimistorakennuksiksi on luokiteltu umpinaiset kerrostalokorttelit

**Taulukko 6.** Maanpeitteen mukaan ilmoitettujen valumakertoimien  $C_i$  vertailu suomalaisten suunnitteluoppaiden sekä ASCE:n ja WPCF:n yhteisjulkaisun välillä.

Pinnan laatu	Lähdekirjallisuus	
	Kaupunkiliitto (1979), Karttunen (2004), Liikennevirasto (2013)	ASCE & WPCF (1970)
Katto	0,80 – 1,00	0,75 – 0,95
Betoni- ja asfalttipinta	0,70 – 0,90	0,70 – 0,95
Soratie	0,40 – 0,50	
Sorakenttä ja -käytävä	0,20 – 0,30	
Nurmikko (hiekkamaa)	0,05 – 0,20	0,05 – 0,20
Nurmikko (heikosti läpäisevä maa)	0,13 – 0,35	0,13 – 0,35
Pelto, niitty	0,01 – 0,30	0,08 – 0,40 <sup>1</sup>
Metsä	0,01 – 0,10	0,05 – 0,20 <sup>1</sup>
Paljas maa		0,10 – 0,30

<sup>1</sup> Pelto, niitty ja metsä lähteestä McCuen (2004)

ASCE:n ja WPCF:n yhteisjulkaisussa esitettyjen valumakertoimien esitetään olevan soveltuvia kerran 5–10 vuodessa toistuville sadetapahtumille. Julkaisussa esitetyt kerran 5–10 vuodessa toistuvat sadetapahtumat vastaavat kuitenkin rankkuudeltaan Suomen olosuhteissa jopa kerran 25–50 vuodessa toistuvia sadetapahtumia (ASCE & WPCF 1970; Aaltonen *et al.* 2008). Tämä nostaa esille epäilyksen, että Yhdysvalloista suoraan lainatut valumakertoimet saattaisivat antaa liian suuria huippuvirtaama-arvioita Suomen olosuhteisiin varsinkin, kun niitä sovelletaan tavallisesti kerran 2–3 vuodessa toistuviin taajama-alueiden hulevesiviemärit mitoittaviin sadetapahtumiin.

Saman johtopäätöksen ovat tehneet myös Sillanpää & Koivusalo (2014) Espoossa koevaluma-alueilla toteutettujen sadanta-valuntamittausten perusteella. Tutkimuksessa suomalaisissa suunnitteluoppaissa esitettyjä valumakertoimia on tosin hieman kyseenalaisesti, mutta kuitenkin tiedostaen, verrattu sadanta-valuntamittauksista määritettyihin volumetrisiin valumakertoimiin. Huippuvalumakertoimia eripuolella Suomea sijaitseville kaupunkivaluma-alueille ovat sen sijaan määrittäneet Melanen & Laukkanen (1981) 1970-luvun lopulla toteutettujen mittausten perusteella. Tutkimuksesta saadut keskimääräiset huippuvalumakertoimet ovat selvästi pienempiä kuin suunnitteluohjeissa esitetyt valumakertoimet. Melasen & Laukkasen (1981) laskemat huippuvalumakertoimet on kuitenkin määritetty sateen 5 minuutin intensiteettimaksimien perusteella Kuichlingin (1889) suosittelman valuma-alueiden kertymisajan sijasta (katso Dhakal *et al.* 2013). Näin ollen Suomessa kaivattaisiin sadanta-valuntamittauksin tehtävää lisätutkimusta, jossa taajamavaluma-alueiden huippuvalumakertoimia määritettäisiin valuma-alueiden kertymisajan pituisten sateen intensiteettimaksimien mukaisesti.

#### 2.4.4 Valumakertoimen määrittäminen maanpeiteluokille

Taajamavaluma-alueet ovat tyypillisesti varsin heterogeenisiä maankäytöltään ja -peitteeltään (Vakkilainen *et al.* 2005) jakautuen useisiin erilaisiin osa-alueisiin, joiden valumakertoimet  $C_i$  poikkeavat toisistaan (vrt. taulukko 5 & 6). Tällöin valuma-alueella muodostuvan hulevesivalunnan laskemiseen on käytettävä valuma-alueen keskimääräistä valumakerrointa  $C$  (McCuen 2004). Se lasketaan eri maankäyttömuotojen edustamien osa-alueiden pinta-aloilla  $A_i$  painotettuna keskiarvona:

$$C = \frac{\sum_{i=1}^n C_i A_i}{\sum_{i=1}^n A_i}. \quad (7)$$

Keskimääräistä valumakerrointa voidaan käyttää valuma-alueelta muodostuvan huippuvirtaaman arvioimiseen rationaalisella menetelmällä sijoittamalla se yhtälöön (6).

Huippu- ja volumetrinen valumakerroin riippuvat taajamavaluma-alueen geofysikaalisista ja ilmastollisista tekijöistä, kuten läpäisemättömän pinnan määrästä, kaltevuudesta, maaperän koostumuksesta ja sen kosteuspitoisuudesta, kasvillisuudesta sekä sateen kestosta, intensiteetistä ja muodosta (Park *et al.* 2009). Nämä todelliset, mittauksiin perustuvat valumakertoimet eivät olekaan vakioita, vaan vaihtelevat sadetapahtumasta toiseen (Beven 2012; Dhakal *et al.* 2013; Sillanpää 2013). Suunnittelutyössä ei kuitenkaan ole mielekästä eikä edes tavallisessa tapauksessa mahdollista ottaa huomioon kaikkia valumakertoimeen vaikuttavia geofysikaalisia ja ilmastollisia tekijöitä. Tämän vuoksi suunnitteluoppaissa esitettyjen valumakertoimien (kts. taulukko 5 & 6) valinnan tulisi perustua tutkimuksissa vain kaikkein oleellisimmaksi havaittuihin tekijöihin.

Suurimman osan hulevesivalunnasta muodostuessa tehoisalla läpäisemättömällä pinnalla (Pitt 1987; Boyd *et al.* 1993; Lee & Heaney 2003; Sillanpää 2013) voidaan pintojen läpäisemättömyyden päätellä olevan myös oleellisin valumakertoimen arvoon vaikuttava tekijä. Schuelerin (1994) mukaan suurilla läpäisemättömän pinnan arvoilla valuma-alueen keskimääräinen valumakerroin riippuukin lähes yksinomaan sen läpäisemättömän pinnan määrästä. Sen sijaan läpäisevien pintojen osuuden kasvaessa myös maaperän koostumus ja kaltevuus nousevat tärkeiksi tekijöiksi valumakerrointa arvioitaessa (Schueler 1994). Myös Vakkilainen *et al.* (2005) ja Sillanpää (2013) ovat Espoon koevaluma-alueilla tehdyissä tutkimuksissaan havainneet, että suurilla läpäisemättömän pinnan osuuksilla valuma-alueen muilla geofysikaalisilla ominaisuuksilla ei juurikaan ole vaikutusta valumakertoimeen. McCuen (2004) ohjeistaa valitsemaan taulukoidut valumakertoimet siten, että niille esitettyjen vaihteluvälien rajoissa pienimmät arvot vastaavat tasaisia maaperältään hyvin vettä läpäiseviä alueita, ja vastaavasti suurimmat arvot kaltevia heikosti vettä läpäiseviä maa-alueita.

Sen lisäksi, että todellisten valumakertoimien arvo vaihtelee sadetapahtumien välillä, on valumakertoimien arvo jatkuvassa muutoksessa myös sadetapahtuman aikana (Kaupunkiliitto 1979; Sen 2008). Sadetapahtuman edetessä yhä suuremman osan kokonaissa-

dannasta muodostaessa hulevesivaluntaa (vrt. kuva 4) on myös hetkellisen valumaker-toimen kasvettava sitä suuremmaksi, mitä rankempaa ja pitkäkestoisempaa sade on. Tätä päätelmää tukee myös Sillanpään (2013) havainto volumetrisen valumaker-toimen ja sademäärän välisestä positiivisesta korrelaatiosta. Jotta sademäärältään suuremmat sadetapahtumat voisivat saada pienempiä sadetapahtumia suuremman volumetrisen va-lumaker-toimen, on hetkellisen valumaker-toimen oltava jatkuvassa kasvussa sadetapah-tuman edetessä.

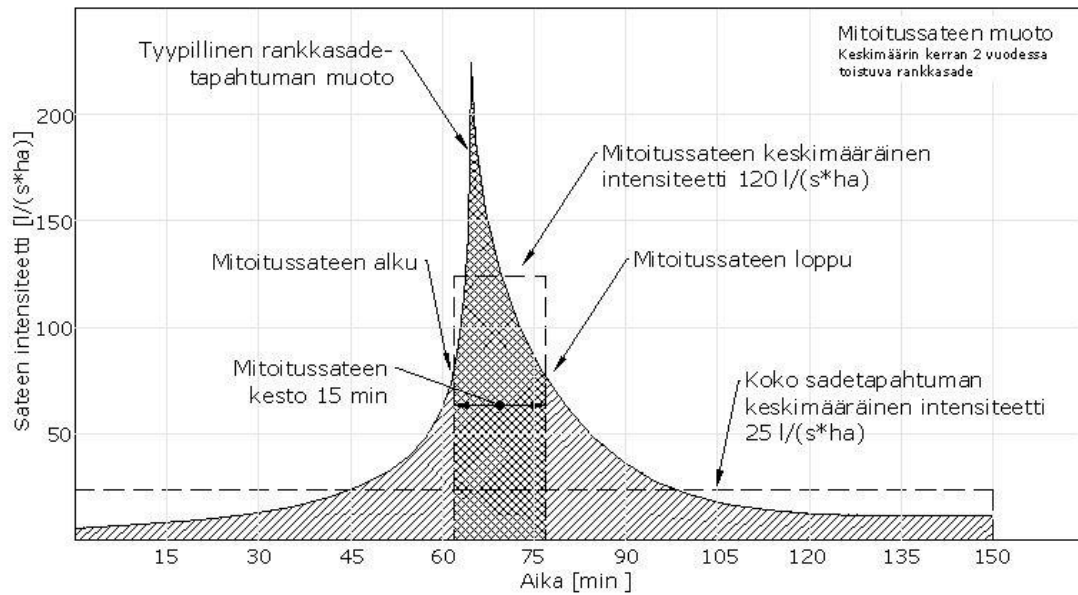
## 2.5 Hulevesijärjestelmien mitoituskäytännöt

Kuntaliiton *Hulevesioppaassa* (2012) hulevesijärjestelmien mitoituksen perustana ole-vat, mitoitusasteita vastaavat hulevesivirtaamat neuvotaan määrittämään joko käsin las-kennalla tai hulevesimallinnusta hyödyntäen. Käsin laskennalla tehtävä mitoitus perus-tuu lähes poikkeuksetta rationaalisen menetelmän (6) käyttöön mitoitusasteita vastaavi-en huippuvirtaamien määrittämisessä tarkastelupisteelle (Thanapura *et al.* 2007; Beven 2012). Tällä tasolla tehtävää mitoitusta tulisikin soveltaa vain yksinkertaisimpiin hule-vesiverkostoihin, joiden ainoana vaatimuksena on pystyä johtamaan tietty maksimivir-taama pois alueelta (McCuen 2004; Thanapura *et al.* 2007).

Hulevesimallinnuksella sen sijaan pyritään jäljittelemään sadetapahtuman aikana muo-dostuvan virtaama-aikakäyrän todellista muotoa pelkän huippuvirtaaman arvioinnin sijasta (Thanapura *et al.* 2007). Tämä mahdollistaa niin huippuvirtaaman ajankohdan kuin sadetapahtuman aikana kertyvän kokonaisvirtamaan arvioinnin jokaiselle verkosto-osalle erikseen. Hulevesimallinnusta tulisikin hyödyntää mitoitusasteissa, joissa pelk-kä huippuvirtaaman arviointi ei ole riittävää hulevesijärjestelmän suuren koon tai mo-nimutkaisten rakenteiden vuoksi (Thanapura *et al.* 2007; Beven 2012; Kuntaliitto 2012).

Laskettaessa huippuvirtaamia rationaalisella menetelmällä (6) mitoitusasteen kesto ei itsessään sisälly laskentaan. Se on ainoastaan valuma-alueen kertymisaikaa vastaava apusuure, jota käytetään pahimman mahdollisen mitoitusasteen tuottavan mitoitusasteen valinnassa (kts. luku 2.4.3). Hulevesimallinnuksessa käytettävän sateen kestolla ja ajallisella muodolla sen sijaan on keskeinen merkitys virtaama-aikakäyrän muodostami-ssa sekä kokonaisvirtaamia arvioitaessa. ASCE:n & WPCF:n (1970) yhteisjulkaisussa onkin korostettu, että huippuvirtaamien laskennassa käytettävät mitoitusasteet edustavat ajallisesti vain osaa ne sisältäviä, kokonaisia sadetapahtumia (kuva 8).

ASCE:n ja WPCF:n (1970) esittämän mukaisesti hulevesivalunnan kulkeutumista mal-linnettaessa sadetapahtumalle, johon varsinainen mitoitusaste sisältyy, tulisikin määrit-tää erikseen tyypillistä rankkasadetapahtumaa edustava kesto-aika. Kuntaliiton *Hule-vesioppaassa* (2012) tätä ei ole huomioitu vaan mitoitusasteen ja sadetapahtuman kesto on pikemminkin esitetty yhtäläisenä. Kuitenkin mikäli hulevesimallinnuksella pyritään jäljittelemään todellisuutta, tulisi mallinnukseen ottaa mukaan myös mitoitusasteen ul-kopuolelle jäävä osa koko sadetapahtumaa. Esimerkkinä huomioitaessa alkuhäviöt täy-

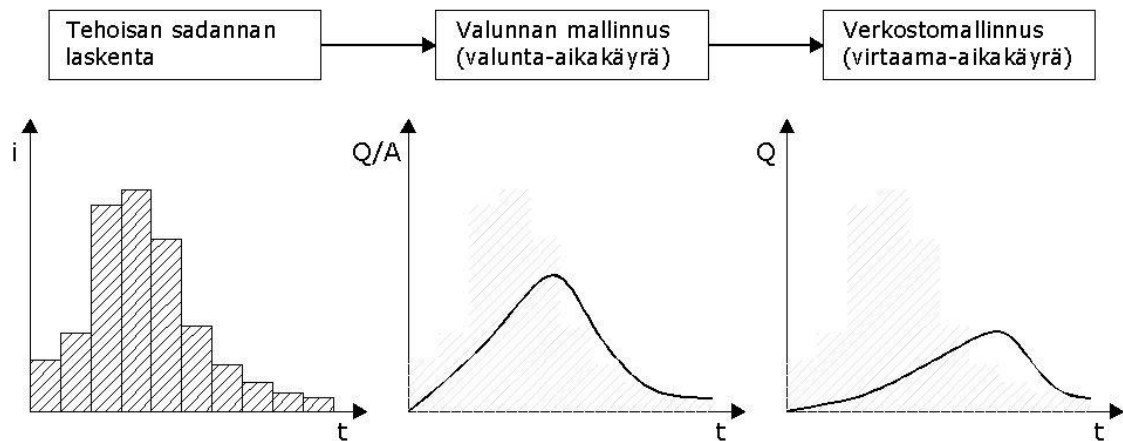


**Kuva 8.** Mitoitussateen ja koko sadetapahtuman välinen ajallinen yhteys (perustuen ASCE & WPCF 1970)

simääräisinä, on mallinnuksen kannalta täysin eri tilanne, jos mallinnuksen alkuehki on sadetapahtuman alkuehken sijasta mitoitussateen alkuehkeessä (vrt. kuva 8). ASCE:n ja WPCF:n (1970) suunnitteluohjeiden mukaisesti koko sadetapahtumalle tulisikin määrittää sellainen muoto, että myös ennen mitoitussateen alkuehkeä kertyvä sademäärä vastaisi tilastoitujen rankkasateiden alkukertymää ennen sateen huippuintensiteettiä.

### 3. HULEVESIMALLINNUKSEN

Hulevesimallinnuksen voidaan nähdä koostuvan kolmesta erillisestä osavaiheesta: tehoisan sadannan laskemisesta, hulevesivalunnan kuljettamisesta pintoja pitkin hulevesiverkostoon ja verkostomallinnuksesta (kuva 9) (Zoppou 2001). Kun hulevesivalunta muodostava tehoisa sadanta on saatu laskettua, sitä edustava sadanta-aikakäyrä muutetaan valunta-aikakäyräksi pintavalunnan kulkeutumisesta valuma-alueelta hulevesiverkostoon mallintavassa prosessissa (Butler & Davies 2010). Verkostomallinnuksessa valunta-aikakäyrä muutetaan puolestaan virtaama-aikakäyräksi, kun virtaama kuljetetaan avouomia, putkia, kaivoja ja säiliöitä käsittävän hulevesiverkoston lävitse (Zoppou 2001).



**Kuva 9.** Yleiskuva hulevesimallinnuksen osavaiheista.

Hulevesivalunnan määrällinen mallinnus on tyypillisesti jaettu hulevesimallinnusohjelmissa kahteen erilliseen laskentamoduuliin (esim. Rossman 2010; Danish Hydraulic Institute 2012a). Ensimmäinen valunnan laskentamoduuli määrittää muodostuvan hulevesivalunnan jokaisella laskenta-aika-askeleella ja kuljettaa sen viiveellisesti (vrt. valunta-aikakäyrä kuvassa 9) hulevesiverkoston lähimpään sisäänottopisteeseen. Toinen putkivirtauksen laskentamoduuli käyttää valunnan laskentamoduulin edellisen laskenta-aika-askeleen tulosta lähtötietonaan ja kuljettaa seuraavalla laskenta-aika-askeleella hulevesivirtauksen yhtäläillä viiveellisesti (vrt. virtaama-aikakäyrä kuvassa 9) verkoston purkupisteeseen.

#### 3.1 Valuntamallien luokittelu

Hulevesivaluntamallien luokittelu voi perustua niiden antamien tulosten satunnaisuuteen, siihen kuinka mallit kuvaavat todellisia hydrologisia prosesseja sekä mallien ajalli-



seen ja alueelliseen ulottuvuuteen (taulukko 7) (Nix 1994; Zoppou 2001; Beven 2012). Deterministiset mallit antavat aina yhtäläisen tuloksen samoille lähtöarvoille, kun taas stokastisissa malleissa vastauksena saadaan mahdollisia tuloksia edustava todennäköisyysjakauma lähtöarvoihin sisältyvästä satunnaisuudesta johtuen (Beven 2012).

**Taulukko 7.** Hulevesivaluntamallien luokitteluperusteita (Nix 1994; Zoppou 2001; Beven 2012).

Luokitteluperuste	Malliluokka	Selitys
Tulosten satunnaisuus	Deterministinen	Vakiotulos
	Stokastinen	Satunnaisuus tuloksissa
Todellisuuden kuvaaminen	Empiirinen	Lineaarinen regressio
	Konseptuaalinen	Yksinkertaistettu kuvaus fysiikan laeista
	Fysikaalisperusteinen	Fysiikan lait täydellisinä
Alueellinen ulottuvuus	Keskitetty	Valuma-alue homogeenisena yksikkönä
	Hajautettu	Valuma-alue rasterisolukkona
Ajallinen ulottuvuus	Sadetahtumakohtainen	Yksittäiset malliajot
	Jatkuva	Pitkän ajanjakson mallinnukset

Yksinkertaisimmat valuntamallit ovat luonteeltaan empiirisiä. Ne eivät kuvaa hydrologisia prosesseja fysiikan laein, vaan perustuvat ainoastaan sadannan ja valunnan väliin regressioon. Konseptuaaliset mallit sitä vastoin kuvaavat hydrologisia prosesseja yksinkertaistetuin fysiikan laein ja käsittävät tärkeimmät fysikaaliset elementit – intersepto-, maanpinta-, maavesi- ja pohjavesivarastot – tavallisesti mallin sisäisinä vesivarastoina. (Beven 2012) Fysikaalisperusteisissa valuntamalleissa veden liike on kuvattu mahdollisimman tarkasti fysiikan lakeihin, kuten massan-, liikemäärän ja energian säilymlakeihin perustuen (Li *et al.* 2013). Lisäksi fysikaalisperusteiset mallit pyrkivät sisällyttämään kaikki todellisuutta kuvaavat fysikaaliset elementit mallirakenteeseen.

Malliparametrien alueellisen jakautumisen perusteella valuntamallit voidaan jakaa keskitettyihin ja hajautettuihin malleihin (Nix 1994, Beven 2012). Keskitetyt mallit käsittelevät valuma-aluetta yhtenä homogeenisena yksikkönä, jossa malliparametrit edustavat keskiarvoja koko valuma-alueelta. Hajautetut mallit puolestaan perustuvat tavallisesti rasterimuotoiseen esitykseen, jossa valunnan muodostumista kuvataan rasterisolujen sisäisesti kulkeutumisen tapahtuessa rasterisolusta toiseen. Keskitettyjen ja hajautettujen mallien välimuotona voidaan nähdä vielä niin kutsutut osittain hajautetut mallit, jotka ovat yleisimmin käytettyjä taajama-alueiden hulevesimallinnuksissa (Nix 1994). Näissä malleissa valuma-alue on pilkottu pienemmiksi homogeenisiksi osavaluma-alueiksi, jotka kytkeytyvät esimerkiksi hulevesiverkoston välityksellä toisiinsa.

Ajallisen ulottuvuuden perusteella valuntamallit voidaan jakaa sadetapahtumakohtaisiin ja jatkuviin malleihin (Nix 1994; Zoppou 2001). Jatkuvilla malleilla on hydrologinen muisti, sadetapahtumakohtaisilla malleilla ei. Tämä tarkoittaa, että jatkuvatoimisilla malleilla pystytään ajamaan myös pitkän ajanjakson mallinnuksia, joissa sadetapahtuman valuntavaste on riippuvainen sitä edeltäneistä sateista.

## 3.2 Hulevesivaluntamallit

Hulevesivaluntamallien yleisimmin käyttämät pintavalunnan kuljetusmenetelmät pohjautuvat joko yksikkövaluntakäyriin, varastoyhtälöihin tai kinemaattisen aallon menetelmään (Zoppou 2001; Akram *et al.* 2014). Yksikkövaluntakäyriin pohjautuvat menetelmät perustuvat oletukseen, että tietyn suuruinen tehoisa sadanta tuottaa aina yhtäläisen ja ajasta riippumattoman virtaama-aikakäyrän (Zoppou 2001). Varastoyhtälöt taas käsittelevät valuma-alueita yhtenä tai useana sarjaan kytkettynä altaana, joiden lähtövirtaama riippuu altaan vesimäärästä. Luetelluista kuljetusmenetelmistä fysikaalisperusteisin kinemaattisen aallon menetelmä puolestaan perustuu jatkuvuus- ja liikemääräyhtälöiden yksinkertaistettujen muotojen ratkaisemiseen (Akram *et al.* 2014).

Suomessa suunnittelutoimistojen yleisimmin käyttämiä hulevesimallinnusohjelmia ovat Yhdysvaltojen ympäristöhallinnon (EPA) kehittämä SWMM-malli (Storm Water Management Model) sekä Tanskan hydraulisen instituutin (DHI) kehittämä Mike Urban -malli. Mike Urban -ohjelmiston oletuksena käyttämä pintavalunnan kuljetusmenetelmä on nimeltään aika-pinta-ala-menetelmä ja SWMM-mallin käyttämä menetelmä epälineaarisen altaan -malli (Rossman 2010; Danish Hydraulic Institute 2012a). Aika-pinta-ala-menetelmä voidaan nähdä yksikkövaluntakäyriin kuuluvana menetelmä, kun taas epälineaarisen altaan -malli omaa sekä varastoyhtälöiden että kinemaattisen aallon menetelmän piirteitä (Akram *et al.* 2014).

### 3.2.1 Aika-pinta-ala-menetelmä

Aika-pinta-ala-menetelmä on yksi käytetyimpiä menetelmiä hulevesivalunnan mallinnuksessa (Akram *et al.* 2014). Menetelmän suosio perustuu sen yksinkertaisuuteen sekä vähäiseen tarvittavien malliparametrien määrään (Artina *et al.* 2007). Menetelmä hyödyntää tehoisaa sadantaa kuvaavaa sadanta-aikasarjaa yhdessä valuma-alueesta muodostetun aika-pinta-alakäyrän kanssa lasiessaan valuma-alueen purkupisteelle kertyvää hulevesivaluntaa jokaiselle laskenta-aika-askeleelle (Akram *et al.* 2014).

Muodostuva hulevesivalunnan määrä lasketaan keskimääräisen valumakertoimen  $C$ , alkuhäviötermin  $IL$  ja hydrologisen häviökertoimen  $RF$  perusteella (Thorndahl & Schaarup-Jensen 2007). Tässä alkuhäviötermi käsittää sateen alussa pintojen kastumisesta ja painannesäilynnästä syntyvät häviöt. Alkuhäviöiden suuruuksia erikseen läpäisemättömille ja läpäiseville pinnoille (taulukko 8) ovat esittäneet mm. Melanen & Laukkanen (1981), Arnell (1982), Boyd *et al.* (1993) ja Sillanpää (2013).

**Taulukko 8.** Tutkimuksissa havaittuja alkuhäviön suuruuksia läpäisemättömille ja läpäiseville pinnoille.

Lähde	Alkuhäviö, <i>IL</i> (mm)	
	Läpäisemätön	Läpäisevä
Melanen & Laukkanen (1981)	0,4 – 1,0	
Arnell (1982)	0,4 – 0,7	
Boyd <i>et al.</i> (1993)	0,0 – 6,1 <sup>1</sup>	10 – 56
Sillanpää (2013)	0,3 – 0,6 <sup>2</sup>	17 – 20

<sup>1</sup> keskiarvo 0,85

<sup>2</sup> alkuhäviöt kohteissa joiden TIA on 37 % ja 50 %

Sadetapahtuman aikaiset interseption, haihdunnan ja infiltraation synnyttämät jatkuvat häviöt sisältyvät keskimääräiseen valumakertoimeen ja hydrologisen häviökertoimeen. Hulevesivaluntaa kerryttävä pinta-ala  $A_{cum}$  lasketaan valuma-alueen kokonaispinta-alan  $A$  sekä yhtälöstä (7) ratkaistavan keskimääräisen valumakertoimen  $C$  perusteella (Thorndahl & Schaarup-Jensen 2007):

$$A_{cum} = C * A \quad . \quad (8)$$

Aina kaikki hulevesiviemäriverkostoon kulkeutuvaksi oletettu valunta ei päädykään järjestelmään esimerkiksi tiealueiden pintojen epätasaisuuden vuoksi. Tämä epävarmuus huomioidaan hydrologisella häviökertoimella  $RF$  (Schaarup-Jensen *et al.* 2005):

$$A_{red} = RF * A_{cum} \quad (9)$$

Nyt tuloksena saatu vähentynyt pinta-ala  $A_{red}$  kuvaa todellista hulevesivaluntaa kerryttävää pinta-alaa. Kirjallisuudessa hydrologiselle häviökertoimelle suositellaan käytettäväksi arvoja 0,7–0,9 (Thorndahl.& Schaarup-Jensen 2007).

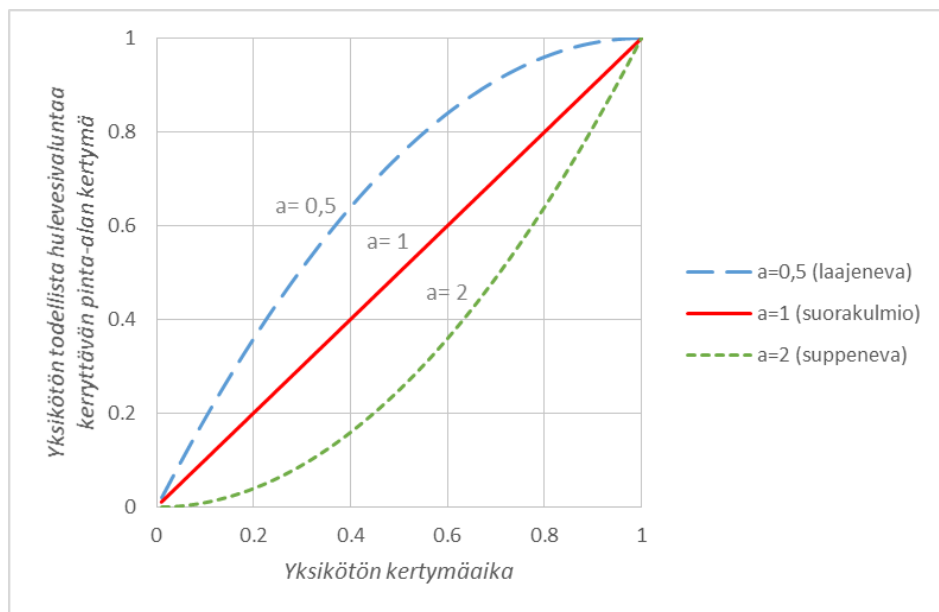
Hulevesivalunnan kuljetus aika-pinta-ala-menetelmässä valuma-alueen purkupisteelle perustuu hulevesivaluntaa kerryttävän todellisen pinnan jakamiseen vakioaikakäyrien perusteella osa-alueisiin, joilta valunnan kulkeutumisaika purkupisteelle on yhtä pitkä (Artina *et al.* 2007). Tämä jako osa-alueisiin tehdään valuma-alueen muotoa kuvaavan aika-pinta-alakäyrän, valuma-alueen kertymisajan ja valitun laskenta-aika-asteleen pituuden perusteella. Valuma-alueen kertymisaika lasketaan keskimääräisen pintavirtausnopeuden sekä valuma-alueen purkupisteen ja etäisimmän osan etäisyyden perusteella (Danish Hydraulic Institute 2012a). Pintavirtausnopeuksia pinnan kaltevuuden perusteella läpäisemättömille ja läpäiseville alueille on esittänyt mm. McCuen (2004):

- Läpäisemätön alue: 0,40–0,85 m/s (kaltevuus 0,5–2 %)
- Läpäisevä alue: 0,06–0,35 m/s (kaltevuus 0,5–2 %, pinnan laatu: metsä – ruohottunut uoma)

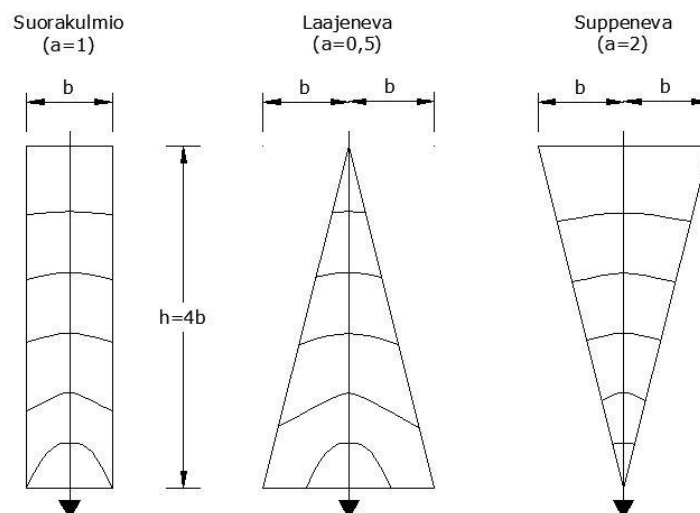
Aika-pinta-alakäyrän ja täten myös valuma-alueen muoto (kuva 10 & 11) määritetään aika-pinta-alakertoimen  $a$  perusteella (Danish Hydraulic Institute 2012a):

$$u = \begin{cases} 1 - (1 - z)^{\frac{1}{a}}, & 0 < a < 1 \\ z^a, & 1 \leq a \end{cases} \quad (10)$$

missä  $u$  on yksikötön todellista hulevesivaluntaa kerryttävän pinta-alan kertymä ja  $z$  on yksikötön kertymisaika. Mike Urban -laskentamoduulissa on valmiina kolme ennalta määritettyä erimuotoista aika-pinta-alakäyrää, jotka vastaavat aika-pinta-alakertoimen arvoja 0,5; 1 ja 2.



**Kuva 10.** Mike Urban -valunnanlaskentamoduulin aika-pinta-alakäyrät.



**Kuva 11.** Aika-pinta-alakäyriä vastaavat valuma-alueiden muodot.

Olettamalla pintavirtausnopeus vakioksi, valuma-alue voidaan jakaa tiettyyn määrän samankeskisiä ympyröitä eli vakioaikakäyriä, joiden keskipiste on valuma-alueen purkupisteessä (vrt. kuva 11) (Artina *et al.* 2007). Näiden vakioaikakäyrien lukumäärä  $m$

saadaan laskettua valuma-alueen kertymisajan  $t_c$  ja laskenta-aika-askeleen pituuden  $\Delta t$  perusteella:

$$m = \frac{t_c}{\Delta t}. \quad (11)$$

Nyt jokainen vakioaikakäyrien väliin jäävä alue  $A_{red,j}$  edustaa valuma-alueen osaa, josta hulevesivalunnan kestää kulkeutua  $j \cdot \Delta t$  verran seuraavalle osa-alueelle (Shokoohi 2008). Tämän perusteella jokaisella aika-askeleella  $j$  valuma-alueen purkupisteelle kulkeutuvan hulevesivalunnan  $Q_{ca,j}$  määrä saadaan yhtälöstä:

$$Q_{ca,j} = \sum_{k=1}^j i_k A_{red,j-k+1}, \quad (12)$$

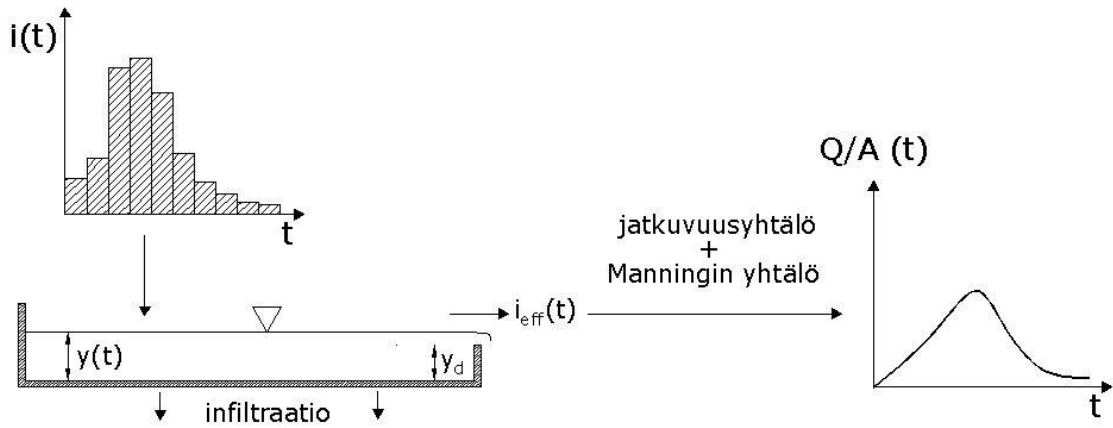
missä  $i_k$  on aika-askelta  $k=j$  vastaavan tehoisan sadannan intensiteetti. Vakioaikakäyrien väliin jäävän alueen  $A_{red,j}$  koko määräytyy suoraan aika-pinta-alakäyrän perusteella. Koko sadetapahtumaa vastaava valunta-aikakäyrä saadaan muodostettua, kun  $j$  saa arvoja  $1, 2, \dots, n$ . Valunta-aikakäyrää laskettaessa valuma-alueen muoto määrittelee sen, päätyykö hulevesivaluntaa tasaisesti valuma-alueen purkupisteelle vai painottuuko valunta-hiippu sadetapahtuman alkuun tai loppuun.

### 3.2.2 Epälineaarisen altaan -malli

Epälineaarisen altaan -malli on aika-pinta-ala-menetelmän tavoin erittäin suosittu (Akram *et al.* 2014), mutta huomattavasti useamman malliparametrin määrittämistä vaativa hulevesivaluntamalli (Thorndahl.& Schaarup-Jensen 2007). Mallissa valuma-alueet on kuvattu erittäin matalina altaina, joilta valuma-alueen purkupisteelle kulkeutuva valunta on laskettu altaassa olevan vedenkorkeuden  $y(t)$  epälineaarisenä funktiona (kuva 12) (Rossman 2010; Krebs *et al.* 2014). Altaat täydentyvät jokaisella laskenta-aika-askeleella tulevasta sadannasta ja tyhjenevät infiltraation sekä muodostuvan valunnan vaikutuksesta. Altaassa muodostuvan valunnan kuljetus valuma-alueen purkupisteelle perustuu puolestaan kinemaattisten aaltoyhtälöiden ratkaisemiseen.

Altaiden kapasiteetti eli valuma-alueilla muodostuvat häviöt sadetapahtuman alussa ennen kuin tehoisaa sadantaa  $i_{eff}(t)$  alkaa muodostua määrittyvät valuma-alueille annettujen pintojen kastumista, infiltraatiota ja painannesäilyntää kuvaavien parametrien perusteella (Krebs *et al.* 2014). Valuntaa alkaa muodostua vasta, kun altaassa oleva vedenkorkeus  $y(t)$  ylittää painannesäilyntän suuruuden  $y_d$ . Mike Urban -laskentamoduulissa tämä valunnan muodostumisen laskenta on järjestetty sarjana ehtolausekkeita, joiden perusteella tehoisa sadanta määritetään erikseen jokaiselle laskenta-aika-askeleelle (Danish Hydraulic Institute 2012a). Aika-askeleella muodostuva tehoisa sadanta  $i_{eff}(t)$  saadaan, kun kokonaissadannasta  $i(t)$  poistetaan pintojen kastumisen  $w_l(t)$ , infiltraation  $f_l(t)$  ja painannesäilyntän  $d_l(t)$  aiheuttamat häviöt:

$$i_{eff}(t) = i(t) - w_l(t) - f_l(t) - d_l(t), \quad \text{missä } i_{eff}(t) \geq 0. \quad (13)$$



**Kuva 12.** Epälineaarisen altaan -mallin rakenne (perustuen Danish Hydraulic Institute 2012a; Akram et al. 2014)

Sadetahtuman alussa kaikki sade kuluu valuma-alueen pintojen kastelemiseen. Kun pinnat ovat täysin kastuneet, asettuu pintojen kastumisesta aiheutuva alkuhäviö  $w_l(t)$  nollaan. Tämä voidaan esittää yhtälöparilla:

$$w_l(t) = \begin{cases} i(t), & y(t) < y_w \\ 0, & y(t) \geq y_w, \end{cases} \quad (14)$$

missä  $y_w$  on pintojen kastumisesta aiheutuva kokonaishäviö. Pintojen kastuttua täysin alkaa sadeveden infiltraatio maaperään, joka on kuvattu mallissa jatkuvana häviönä. Sateen intensiteetin ylittäessä maaperän infiltraatiokapasiteetin lasketaan infiltraatiosta aiheutuva häviö Hortonin yhtälöiden (1–4) perusteella. Muutoin infiltraatiohäviö  $f_l(t)$  on sateen intensiteetin suuruinen. Tämä on esitetty mallissa yhtälöillä:

$$f_l(t) \begin{cases} f(t_p), & y(t) \geq y_w \wedge i(t) - w_l(t) \geq f(t_p) \\ i(t) - w_l(t), & y(t) \geq y_w \wedge i(t) - w_l(t) < f(t_p) \\ 0, & y(t) < y_w \end{cases} \quad (15)$$

Painannesäilyntä on infiltraation tavoin mahdollista vasta, kun valuma-alueen pinnat ovat täysin kastuneet. Lisäksi painannesäilyntän syntymisen ehtona on, että sateen intensiteetti ylittää maaperän sen hetkisen infiltraatiokapasiteetin. Tällöin painannesäilyntästä aiheutuva häviö  $d_l(t)$  saadaan ratkaistua yhtälöparista:

$$d_l(t) = \begin{cases} i(t) - w_l(t) - f_l(t), & y(t) \leq (y_w + y_d) \\ 0, & y(t) > (y_w + y_d) \end{cases} \quad (16)$$

Nyt yhtälön (13) mukaisesti hulevesivaluntaa alkaa muodostua välittömästi, kun tehoisan sadannan intensiteetti on nollaa suurempi (Rossman 2010). Muodostuva valunta-aikakäyrä lasketaan ratkaisemalla samanaikaisesti kinemaattisista aaltoyhtälöistä johdetut Manningin yhtälö ja allasta edustava jatkuvuusyhtälö (Vatankhah & Easa 2013). Manningin yhtälön mukaisesti valuma-alueen purkupisteelle tulevaksi valunnaksi  $Q_{ca}(t)$  ajanhetkellä  $t$  saadaan:

$$Q_{ca}(t) = \frac{1}{n} * B * S_0^{\frac{1}{2}} * y_R(t)^{\frac{5}{3}}, \quad (17)$$

missä  $n$  on Manningin karkeuskerroin,  $B$  on valuma-alueen esittävän suorakulmaisen altaan leveys,  $S_0$  on valuma-alueen keskimääräinen virtaussuunnan mukainen kaltevuus ja  $y_R(t)$  on valunnan syvyys, joka saadaan kun altaassa olevasta vedenkorkeudesta  $y(t)$  vähennetään painannesäilyntään  $y_d$  ja pintojen kastumisen  $y_w$  suuruus. Manningin yhtälössä esiintyvä valunnan syvyys ja sen muutos aika-askeleella saadaan altaan jatkuvuusyhtälöstä (Akram *et al.* 2014):

$$i_{eff}(t) * A - Q_{ca}(t) = \frac{y_{R2} - y_{R1}}{\Delta t} * A, \quad (18)$$

missä  $A$  on valuma-alueen pinta-ala,  $y_{R2}$  ja  $y_{R1}$  ovat valunnan syvyydet aika-askelen lopussa ja alussa mainitussa järjestyksessä ja  $\Delta t$  on aika-askelen pituus.

Epälineaarisen altaan -mallissa valuma-alueet on vielä jaettu viiteen osa-alueeseen niiden maanpeitteen perusteella – kahteen läpäisemättömään, yhteen puoliläpäisevään ja kahteen läpäisevään alueeseen – jotka on määritetty mallissa prosentuaalisena osuutena valuma-alueen kokonaisalasta (Thorndahl.& Schaarup-Jensen 2007). Näiden kaikkien eri osa-alueiden kokonaishäviöt on huomioitu mallissa eritavoin (taulukko 9), minkä lisäksi niille myös määritetään yksilölliset parametrit tehoisan sadannan muodostumisen ja valunnan kuljetuksen laskentaan (Krebs *et al.* 2014).

**Taulukko 9.** Epälineaarisisessa mallissa valuma-alueen eri osa-alueilla huomioitavat häviöt (perusten Thorndahl & Schaarup-Jensen 2007).

Läpäisevyys	Maanpeite	Häviötermit
Läpäisemätön	Kattopinnat	Pintojen kastuminen
	Päällystetyt kadut, Parkkipaikat	Pintojen kastuminen, Painannesäilyntä
Puoliläpäisevä	Jalkakäytävät, Pihatiet	Pintojen kastuminen, Painannesäilyntä, Infiltraatio
Läpäisevä	Paljasmaa, Nurmialueet	Pintojen kastuminen, Painannesäilyntä, Infiltraatio
	Pellot, Metsät	Pintojen kastuminen, Painannesäilyntä, Infiltraatio

Läpäisemättömät alueet on jaettu mallissa kattopintoihin sekä päällystettyihin katuihin ja parkkipaikkoihin (Thorndahl.& Schaarup-Jensen 2007). Näillä osa-alueilla häviöitä muodostuu vain pintojen kastumisen ja painannesäilyntään synnyttämistä alkuhäviöistä. Puoliläpäisevillä alueilla, kuten jalkakäytävillä ja pihateilla näihin alkuhäviöihin lisätään vielä infiltraation aiheuttamat jatkuvat häviöt. Myös läpäisevillä alueilla kaikki

häviötermit tulevat huomioiduiksi, mutta erona puoliläpäiseviin pintoihin alkuhäviöt voivat olla huomattavasti suuremmat ja infiltraatio voimakkaampaa. Läpäisevät osa-alueet onkin jaettu vielä kahteen alaluokkaan niiden vedenläpäisevyyden perusteella. Käytännössä tässä luokituksessa tulisi huomioida myös maaperän vedenläpäisevyys, mutta tavallisessa tapauksessa vedenläpäisevyyden indikaattorina on käytetty kasvillisuuden määrää (Butler & Davies 2010). Näin ollen läpäiseviä osa-alueita edustavat paljasmaa ja nurmialueet yhtenä luokkana sekä pellot ja metsät toisena.

Hulevesivalunnan kulkeutumisenopeus eri osa-alueilta on huomioitu mallissa antamalla niille omat Manningin yhtälössä (17) käytettävät karkeuskertoimet. Manningin karkeuskertoimia erilaisille maanpeitteille ovat määrittäneet Krebs *et al.* (2014) (taulukko 10).

**Taulukko 10.** Manningin karkeuskertoimia erilaisille maanpeitteille (Krebs *et al.* 2014)

Maanpeite	Karkeuskerroin, $n$
Kattopinnat	0,010 - 0,014
Asfaltoidut kadut	0,011 - 0,013
Kiveys, soratie	0,020 - 0,030
Nurmialueet	0,168 - 0,300
Pelto, metsä	0,326 - 0,790

Valuma-alueen jako viiteen osa-alueeseen huomioidaan laskennassa viitenä erillisenä valuntaa tuottavana altaanaan, joiden pituus/leveysuhde on oletettu samaksi kuin koko valuma-alueen (Danish Hydraulic Institute 2012a). Purkupisteelle kulkeutuva kokonaisvalunta saadaan laskemalla osa-alueiden tuottamat valunta-aikakäyrät yhteen.

### 3.3 Verkostomallinnus

Käytetystä hulevesimallinnusohjelmistosta riippumatta on hulevesiverkosto esitetty putkivirtauksen laskentamoduulissa tyypillisesti solmuin ja niitä yhdistävin linkein (Artina *et al.* 2007; Fernández-Pato & Garcia-Navarro 2014). Linkit ovat putkia tai avouomia, joiden virtaustila eli muutokset veden korkeudessa ja virtaamassa määritetään jokaisella aika-askeleella niille annettujen alku- ja reunaehtojen perusteella. Solmuja puolestaan ovat esimerkiksi kaivot ja verkoston purkuaukot, joiden virtaustilaa kuvaavat kaivojen vedenpinnan korkeus sekä virtauksen nopeuskorkeus kaivojen kohdalla.

Linkkien virtaustilan määrittäminen Mike Urban -putkivirtauksen laskentamoduulissa perustuu jatkuvuus- ja liikemääräyhtälöistä johdettujen virtausyhtälöiden ratkaisemiseen kahden solmun välillä (Danish Hydraulic Institute 2012b). Linkkien virtaustila riippuu paitsi solmujen kulloisenkin virtaustilan asettamista reunaehdoista myös linkissä tapahtuvista kitkahäviöistä sekä erilaisten ulkoisten häiriötekijöiden muodostamista reunaehdoista. Näitä ulkoisia reunaehtoja voivat olla esimerkiksi valunnanlaskentamoduulin



kaivon kautta verkostoon syöttämä valunta-aikakäyrä tai verkoston purkuaukolle määritetty ulkoisen vedenpinnan korkeus. Solmujen virtaustila lasketaan vastaavasti niihin liittyvien linkkien virtaustilan ja solmuissa tapahtuvien paikallishäviöiden perusteella.

### 3.3.1 Hydraulinen laskenta

Asteittain muuttuvalla epästationäärisellä virtauksella tarkoitetaan virtaustilaa, jossa virtaustekijät eli vesisyvyys ja virtausnopeus ovat niin ajan kuin paikan suhteen muuttuvia (Pohjamo & Hooli 1990). Tällaista avouomassa tai osittain täydessä putkessa tapahtuvaa yksidimensionaalista virtausta kuvataan tavallisesti Barre de Saint-Venantin vuonna 1871 johtamalla osittaisdifferentiaaliyhtälöparilla (Butler & Davies 2010; Fernández-Pato & Garcia-Navarro 2014). Tämä Saint-Venantin yhtälöinä tunnettu yhtälöpari muodostuu jatkuvuus- (19) ja liikemääräyhtälöstä (20):

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A_p}{\partial t} = 0, \quad (19)$$

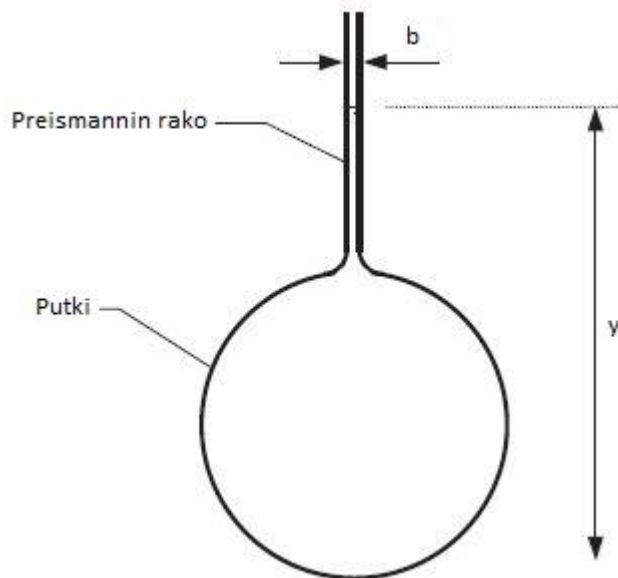
$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \alpha \frac{Q^2}{A_p} \right) + g A_p \frac{\partial y}{\partial x} + g A_p I_f = g A_p I_0, \quad (20)$$



missä  $Q$  on virtaama,  $A_p$  on virtauksen poikkipinta-ala,  $y$  on vesisyvyys,  $g$  on putoamiskiihtyvyys,  $x$  on etäisyys virtaussuunnassa,  $t$  on aika,  $\alpha$  on nopeusjakaumakerroin,  $I_f$  on kitkalkaltevuus ja  $I_0$  on pohjan kaltevuus.

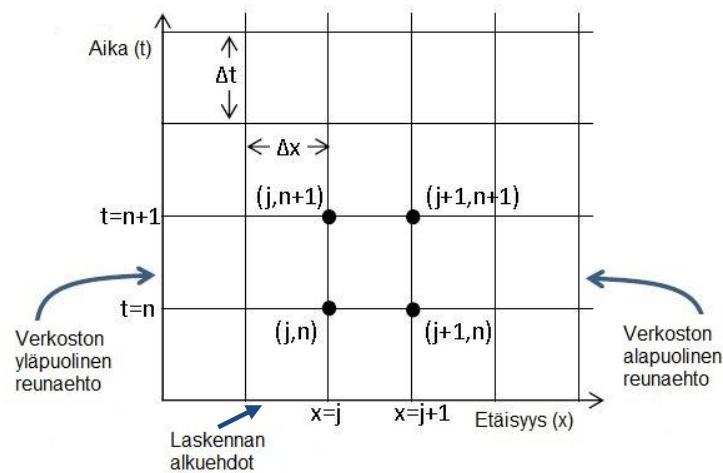
Saint-Venantin liikemääräyhtälön (20) monimutkaisuuden vuoksi on sille johdettu yksinkertaistetut kinemaattisen aallon (1.) ja diffusiivisen aallon mallit (2.), joiden ominaisuuksia tarkemmin on kuvannut Zoppou (2001). Nämä yksinkertaistetut mallit eivät kuitenkaan pysty huomioimaan solmujen paikallishäviöitä eivätkä vastakkaissuuntaista tai paineellista virtausta (Rossman 2010). Hulevesimallinnuksessa suositellaankin yleisesti käytettäväksi Saint-Venantin liikemääräyhtälön dynaamisen aallon malliksi (3.) kutsuttua täydellistä muotoa, ellei erikseen pystytä osoittamaan, että kinemaattisen tai diffusiivisen aallon malli olisi riittävä kyseenomaisen virtaustilanteen tarkasteluun (Danish Hydraulic Institute 2012b; Salvadore *et al.* 2015). Dynaamisen aallon malli pystyy huomioimaan laskennassa yksinkertaistetuista malleista poiketen myös solmujen paikallishäviöt, haarautuneet ja silmukalliset verkostot, veden varastoitumisen ja vastakkais-suuntaisen virtauksen verkostossa sekä erityistapauksena paineellisen virtauksen (Zoppou 2001; Rossman 2010).

Rankkasateiden aikana on yleistä, että hulevesiverkoston putkikapasiteetti ylittyy ja virtaus muuttuu vapaasta paineelliseksi. Saint-Venantin yhtälöt (19) & (20) pystyvät kuitenkin kuvaamaan ainoastaan vapaata virtausta (Butler & Davies 2010). Tämä ongelma voidaan ratkaista lisäämällä putkien laelle Preismannin raon nimellä tunnettu kuvitteellinen kapea rako (kuva 13) (Fernández-Pato & Garcia-Navarro 2014). Nyt putkikapasiteetin täytyessä vesisyvyys  $y$  pääsee nousemaan putken laen yläpuolelle ja mallinnusta pystytään jatkamaan vapaata virtausta kuvaavilla yhtälöillä. Preismannin raon leveys  $b$  määritetään siten, että vesisyvyys raossa vastaa paineviivan korkeutta. Toisin sanoen Preismannin rako mahdollistaa paineellisen virtauksen jäljittelyn vapaata virtausta kuvaavilla yhtälöillä (19) & (20).



**Kuva 13.** Preismannin rako (perustuen Butler & Davies 2010)

Yleisimmin Saint-Venantin yhtälöt ratkaistaan numeerisesti äärellisen erotuksen menetelmään perustuen (Zoppou 2001). Menetelmässä etäisyys  $x$  ja aika  $t$  on jaettu erillisiin pieniin askeleisiin  $\Delta x$  ja  $\Delta t$ , mikä voidaan esittää kaksiulotteisena ruudukkona (kuva 14). Ruudukossa risteykset edustavat laskentasolmuja, joissa virtaama  $Q(x,t)$  ja vesisyvyys  $y(x,t)$  määritetään. Kunkin laskentasolmun virtaustila saadaan määritettyä, kun viereisten solmujen virtaustila tunnetaan. Laskenta etenee siten, että ensin määritetään laskentasolmujen virtaustila yhdellä aika-askeleella eli siirtymät ruudukossa tapahtuvat vaakasuorasti etäisyydeltä  $x=j$  etäisyydelle  $x=j+1$ . Kun koko tarkasteltavan verkoston virtaustila yhdellä aika-askeleella  $t=n$  tunnetaan, siirrytään laskennassa seuraavalle aika-askeleelle  $t=n+1$ . Laskennassa lähdetään aina liikkeelle tunnetuista alku- ja reunaehdoista eli laskentasolmuista, joissa virtaustila tunnetaan. Alkuehtona laskennassa on tyypillisesti kuvitteellinen, äärimmäisen pieni perusvirtaama verkostossa ennen varsinaista hulevesivirtaamaa. (Butler & Davies 2010) Mike Urban -putkivirtauksen laskentamoduulissa käytettyä äärellisen erotuksen menetelmän numeerista ratkaisua on tarkemmin kuvannut Danish Hydraulic Institute (2012b).



Kuva 14. Virtausyhtälöiden numeerinen ratkaisu (perustuen Bulter & Davies 2010)

### 3.3.2 Paikallis- ja kitkahäviöt

Saint-Venantin liikemääräyhtälössä (20) esiintyvää kitkakaltevuutta  $I_f$  voidaan arvioida kaivovälillä putkessa virtausvastuksesta aiheutuvien kitka- eli energiahäviöiden perusteella (Mays 2001). Yleisimmin vapaan virtauksen kitkahäviöiden arvioimiseen käytetään Manningin yhtälön (17) avouomavirtaukselle tarkoitettua muotoa. Kun yhtälö ratkaistaan kitkakaltevuuden  $I_f$  suhteen, saadaan:

$$I_f = n^2 * \frac{Q^2}{A_p^2 * R^{4/3}}, \quad (21)$$

missä  $n$  on Manningin karkeuskerroin,  $A_p$  on virtauksen poikkipinta-ala ja  $R$  on hydraulinen säde ja  $Q$  on putken virtaama. Hydraulinen säde,  $R = A/P_w$ , lasketaan virtauksen poikkipinta-alan ja märkäpiirin  $P_w$  suhteen. Manningin karkeuskertoimen arvoja eri putkimateriaaleille ovat esittäneet mm. ASCE & WPCF (1970), Karttunen (2004) ja Krebs *et al.* (2014) (taulukko 11).

**Taulukko 11.** Manningin karkeuskertoimia eri putkimateriaaleille ja avouomille.

Materiaali	Lähde		
	ASCE & WPCF (1970)	Karttunen (2004)	Krebs <i>et al.</i> (2014) <sup>1</sup>
Teräsputki	0,011–0,012		
Muoviputki	0,011–0,015	0,008–0,010	0,011
Betoniviemäri	0,011–0,017	0,013–0,017	0,011–0,015
Uoma (hyväkuntoinen)		0,018–0,025	
Uoma (ruohottunut)	0,030–0,400	0,022–0,033	0,049

<sup>1</sup> Krebs *et al.* (2014) määrittämät arvot kalibroituun malliin perustuvia

Putkien kitkahäviöiden lisäksi energiahäviöitä muodostuu verkostossa kaivojen paikallishäviöinä, jotka ovat teoreettiselta kokoluokaltaan yhtä suuria kitkahäviöiden kanssa. Kaivoissa muodostuvat paikallishäviöt voidaan jakaa sisääntulo- ja lähtöhäviöihin. (Mays 2001) Mike Urban -putkivirtauksen laskentamoduulissa sisääntulohäviö  $\Delta E_{in}$

lasketaan kaivoon tulevan putken virtausnopeuden  $v_i$  ja kaivon virtausnopeuden  $v_m$  perusteella (Danish Hydraulic Institute 2012b):

$$\Delta E_{in} = \frac{v_{in}^2 - v_m^2}{2g}. \quad (22)$$

Vastaavasti lähtöhäviöt  $\Delta E_{out}$  lasketaan lähtevän putken virtausnopeuden  $v_{out}$  ja häviökertoimen  $\xi_{out,k}$  perusteella:

$$\Delta E_{out} = \sum_k \xi_{out,k} * \frac{v_{out}^2}{2g}. \quad (23)$$

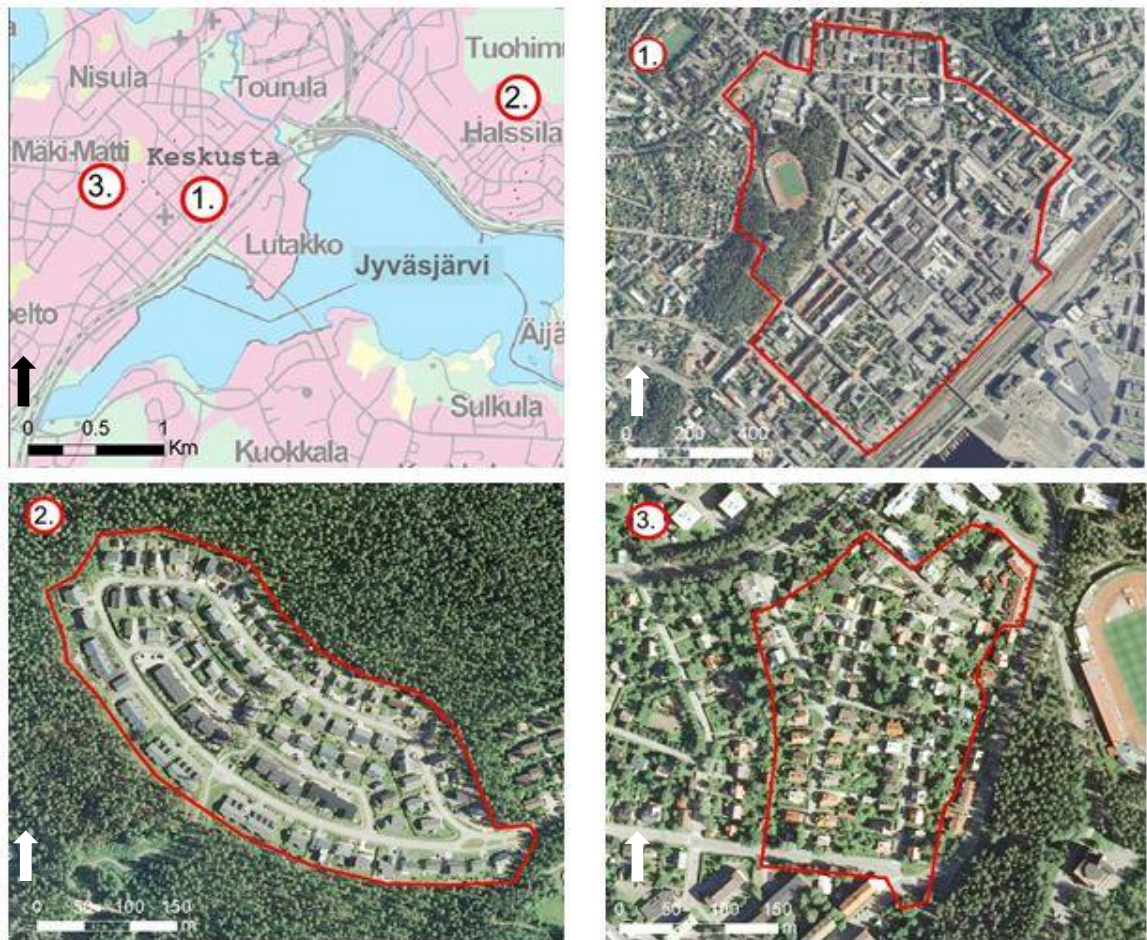
Yhtälössä (23) kokonaislähtöhäviö on virtaussuunnan muutoksista, tulevan ja lähtevän putken korkeuseroista ja virtauksen supistumisesta aiheutuvien häviöiden summa. Tarkemmin paikallis- ja kitkahäviöiden laskentaa Mike Urban -putkivirtauksen laskentamoduulissa on kuvannut Danish Hydraulic Institute (2012b).

Tutkimustietoa kaivojen paikallishäviöiden kokoluokasta on olemassa hyvin rajoitetusti, mutta yksi perustuvaa laatua olevan tutkimus on Pedersenin & Markin (1990) tekemä vertailu perinteisten paikallishäviön laskentaan käytettyjen yhtälöiden antamien tulosten ja laboratoriomittausten välillä. Tutkimustuloksena hulevesikaivoissa muodostuvien todellisten häviöiden onkin todettu olevan huomattavasti pienempiä kuin laskentayhtälöiden antamat häviöt. Tästä johtopäätöksenä Pedersen & Mark (1990) ovat suositelleet hulevesikaivojen paikallishäviöiden laskennassa käytettävän tehokkaan virtausalan menetelmää, jonka laskentaperusteita yksityiskohtaisemmin on kuvattu kyseisessä tutkimuksessa.

## 4. AINEISTOT JA MENETELMÄT

### 4.1 Kohdealueiden kuvaus

Työssä tarkasteltavat kolme kohdealuetta sijaitsevat Jyväskylässä: yksi Keskustassa, toinen Halssilanmäessä ja kolmas Mäki-Matissa (kuva 15). Kohdealueet valittiin siten, että ne kuvastaisivat keskenään erilaista maankäyttöä; Keskustan kohdealue edustaa tyypillistä paljon läpäisemätöntä pintaa omaavaa kerrostalokortteleiden hallitsemaa keskusta-aluetta, Halssilanmäen kohdealue on uusi vastarakennettu asuinalue ja Mäki-Matin kohdealue vanhempi omakotitaloalue.



*Kuva 15. Keskustan (1.), Halssilanmäen (2.) ja Mäki-Matin (3.) kohdealueiden sijainti Jyväskylässä sekä ilmakuvat kohdealueilta. © MML, 2015*

Keskustan kohdealue (0,92 km<sup>2</sup>) on erittäin tiivistä rakentamista edustavaa asuin-, liike- ja toimistorakennusten korttelialuetta. Maaperältään alue on pääosin joko kartoittamaton tai täytemaan peittämää (*Geologian tutkimuskeskuksen digitaaliset kartat*). Korke-

userot alueella ovat suhteellisen suuret (80–140 m mpy.) alueen viettäessä voimakkaasti kaakkoon päin. Google Street View -palvelulla ja Bing-satelliittikuvapalvelun lintuper-spektiivistä tehdyn tarkastelun perusteella lähes kaikki kadut alueella ovat asfaltoituja ja reunakivettyjä. Katualueiden kuivatus on järjestetty ritiläkansi- ja kitakaivoin. Katualueiden tavoin myös jalkakäytävät ja kiinteistöjen sisäpihat keskusta-alueella ovat pääosin asfaltoituja tai kivettyjä. Kiinteistöjen kattovedet ja sisäpihoilla muodostuvat hulevedet on johdettu suoraan hulevesiviemäriin verkoston kattaessa koko keskusta-alueen.

Halssilanmäen kohdealue (0,11 km<sup>2</sup>) on vastarakentunut erillispien- ja rivitalojen korttelialue, joka edustaa nykypäivälle tyypillistä tiivistä omakotitalorakentamista. Alueen maaperä on kalliomaata sekä tätä alle metrin paksuudelta peittävää moreenia. Maanpinnan korkeus alueella on 147–164 m mpy. Kadut ovat asfaltoituja ja niitä erottaa pientareesta uusi reunakiveys. Katujen kuivatus on hoidettu ritiläkansikaivoin. Talojen pihat ovat pääosin nurmettuja vain pihateiden ollessa asfaltoituja tai kivettyjä. Kattovedet ja perustusten kuivatusvedet on johdettu hulevesiviemäriin Jyväskylän kaupungin rakennusjärjestyksen (2009) uusilta kiinteistöiltä edellyttämän mukaisesti. Hulevesiverkosto kattaa koko uuden rakennetun alueen. Kohdealueen koillispuolella on metsäinen rinne, joka liittyy sen kanssa samaan valuma-alueeseen.

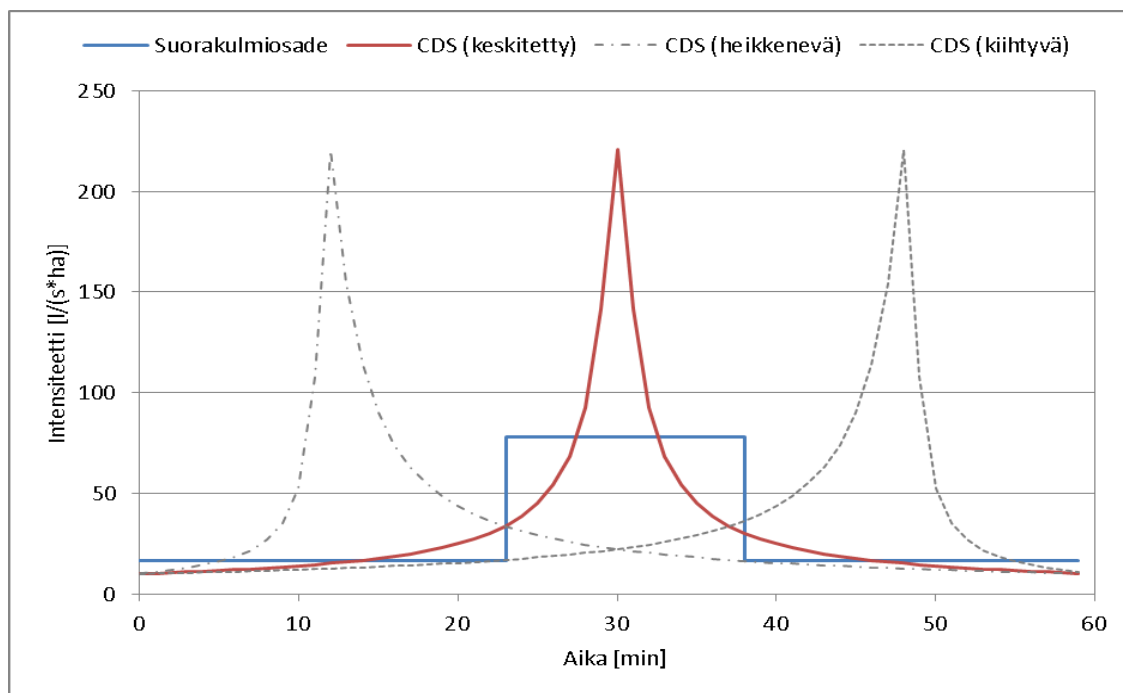
Mäki-Matin kohdealue (0,07 km<sup>2</sup>) käsittää Kotikadun ja Sopukadun suuntaisten hulevesiviemäreiden kattaman valuma-alueen. Kaavaltaan alue on asuinpien- ja erillispien-talojen korttelialuetta, joka edustaa tyypillistä vanhempaa väljää omakotitalorakentamista. Alueen maaperä on jääkauden ajan rantakerrostumille ominaista hiekkaa, sillä alue osuu Sisä-Suomen reunamuodostuman kulkureitille (Jyväskylän kaupunki 2015). Maanpinnan korkeus alueelle on 106–121 m mpy. Kadut alueella ovat asfaltoituja kuivatuksen järjestyessä ritiläkansikaivoin. Katuja reunustaa matala ja paikoin rappeutunut reunakiveys. Talot alueella sijaitsevat lähes kiinni kaduissa, mutta etenkin vanhemmissa taloissa kattovedet on silti johdettu talojen nurmipihoille. Nurmetuksen lisäksi talojen pihaja luonnehtii myös runsaahko korkeampi kasvillisuus ja puusto.

## 4.2 Mitoitussateet

Työssä käytettäväksi mitoitussateeksi valittiin keskimäärin kerran vuodessa (leveyspiiristä aiheutuva korjauskerroin 0,94) toistuva, 15 min pituinen rankkasade, jonka keskimääräinen intensiteetti on 78 l/(s\*ha) (vrt. kuva 3). Valitsemalla taajama-alueiden hulevesiviemäreiden mitoituksessa tavallisesti käytettyjä mitoitussateita toistuvuudeltaan yleisempi rankkasade tavoiteltiin, ettei verkostossa esiintyisi täyden putken virtaamaa eikä mitoitussateen aikaista tulvimista. Tällöin mitoitussateiden ajallisen muodon, maankäyttö- ja maanpeiteluokitusten tarkkuuden sekä keskenään erilaisten valuntamalien vaikutusta hulevesivalunnan muodostumiseen voidaan arvioida suoraan hulevesiverkostossa esiintyvän virtaaman perusteella.



Mitoitussateiden ajallista muotoa on kuvattu perinteisellä suorakulmiosateella ja CDS-sateilla (kuva 16). CDS-sateiden ajallinen muoto määritettiin Aaltosen (2008) esittämän mukaisesti. Sateen ajallinen muoto laskettiin Tanskan Spildevandskomiteen julkaisemalla Excel-laskurilla käyttäen vuotuisena sademääränä Jyväskylän pitkän ajanjakson (1981–2010) keskimääräistä 643 mm:ä (*ilmastopalvelu@fmi.fi*). Lopuksi CDS-sateen keskimääräinen intensiteetti ja kertymä skaalattiin vastaamaan valittua mitoitussadetta. CDS-sateelle laskettiin kolme erilaista ajallista muotoa, jotka kuvaavat heikkenevän, keskitetyn ja kiihtyvän intensiteetin omaavia sadetapahtumia.



**Kuva 16.** Hulevesimallinnuksessa käytettyjen mitoitussateiden ajallinen muoto.

Kilpeläisen (2006) eripituisten rankkasateiden ajallisesta yhteydestä tekemän havainnon (kts. kuva 2) sekä ASCE:n ja WPCF:n (1970) mitoitushjeiden pohjalta (kts. luku 2.5) mitoitussateen sisältävien sadetapahtumien kesto venytettiin 60 minuuttiin. CDS-sateella 15 min mitoitussade sisältyy automaattisesti 60 minuutin pituista mitoitussadetta vastaavaan sadetapahtumaan. Suorakulmiosateella sadetapahtuman alku- ja loppuintensiteetti määritettiin puolestaan siten, että koko sadetapahtuman keskimääräinen intensiteetti vastaa kerran vuodessa esiintyvää 60 minuutin mitoitussadetta.

### 4.3 Maankäyttö- ja maanpeiteluokitus

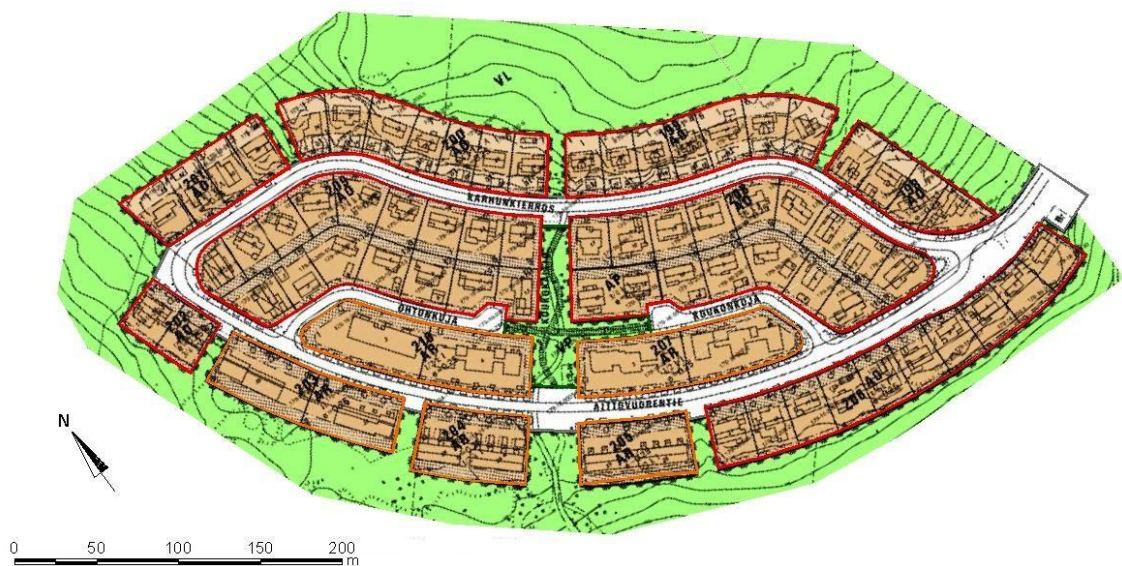
Maankäyttö- ja maanpeiteluokitusten vertailua varten työssä tuotettiin erikseen maankäyttöluokitukset kohdealueille perinteisellä tavalla käsivaraisesti ajantasa-asemakaavan pohjalta sekä maanpeiteluokitukset paikkatietojärjestelmäpohjaisesti avoimia paikkatietoaineistoja hyödyntäen. Maankäyttöluokituksessa hyödynnettiin Jyväskylän kaupungin interaktiivisen karttapalvelun kautta kohdealueille tulostettua ajantasa-asemakaavaa. Paikkatietojärjestelmäpohjaisessa maanpeiteluokituksessa käytettiin puolestaan pelkäs-

tään MML:n avoimien aineistojen tiedostopalvelusta ladattuja paikkatietoaineistoja. Näin haluttiin varmistaa, etteivät tuotetut maanpeiteaineistot olisi riippuvaisia paikallisista erityisaineistoista, jotta työssä luotu menetelmä maanpeiteluokitusten tuottamiseksi olisi sovellettavissa kaikkialla Suomessa.

MML:n latauspalvelusta maanpeiteluokitusten tuottamiseen hyödynnettiin maastotietokannan valmiiksi luokiteltuja maastokohteita, väri-infra ortokuvia sekä laserkeilausaineistoa. Aineistojen käsittelyssä ja yhdistämisessä käytettiin Arcgis-paikkatieto-ohjelmistoa. Maanpeiteaineistojen tuottamisen menetelmäkuvauksessa on esitetty ensin vaihe-vaiheelta yksittäisten maanpeiteluokitusten tuottaminen sekä lopuksi näiden aineistojen yhdistäminen ja esittäminen yhdessä.

### 4.3.1 Asemakaava-aineisto

Kohdealueiden maankäyttö digitoitiin käsivaraisesti AutoCAD-suunnitteluohjelmistolla. Jyväskylän kaupungin karttapalvelusta tulostetut ajantasa-asemakaavat tuotiin kuvina ohjelmiston taustalle ja maankäyttöluokat rajattiin niiden päälle kaavan osoittaman alueellisen käyttötarkoituksen mukaisesti. Esimerkkinä käytetystä menettelytavasta on esitetty Halssilanmäen maankäyttöluokkien rajausta (kuva 17).



**Kuva 17.** Esimerkki käsin tehdystä ajantasa-asemakaavan mukaisesta maankäytön digitoinnista Halssilanmäen kohdealueelta.

Rajauksessa käytetyt maankäyttöluokat (taulukko 12) valittiin siten, että ne vastaisivat mahdollisimman hyvin suunnitteluoppaissa esitettyjä maankäyttöluokkia, joille on ilmoitettu valumakerroin (vrt. taulukko 5). Näin ollen esimerkiksi omakotitaloasumista edustavan maankäyttöluokan alle on luettu kaikki kaavamerkintöjä asuinpien- (AP) ja erillispientalojen (AO) korttelialuetta edustavat alueet. Asemakaavassa käytettyjä merkintöjä on kuvattu maankäyttö- ja rakennuslaista annetun asetuksen (A 342/2000) kaavamerkinnät sisältävässä liitteessä.



**Taulukko 12.** Työssä käytettyihin maankäyttöluokkiin luetut kaavamerkinnot.

Maankäyttöluokka	Kaavamerkinnot
Omakotitaloalue	AP, AO, A <sup>1</sup>
Rivitaloalue	AR
Kerrostaloalue	A, AK, AL, AH
Liike- ja toimistorakennusten alue	K, TP, P <sup>1</sup> , Y <sup>1</sup> , C, ET
Teollisuusalue	T <sup>1</sup>
Liikenne- ja pysäköintialue	L <sup>1</sup> , LH <sup>1</sup>
Urheilu- ja virkistysalue	VU, VK
Puistoalue	VP, EH
Metsäalue	V, VL, PL

<sup>1</sup> Kaikki loput samalla kirjaimella alkavat kaavamerkinnot

AutoCAD-ohjelmistossa rajatut maankäyttöluokat kirjoitettiin lopuksi paikkatiedon omaavaan shape-tiedostomuotoon. Näin digitoidut maankäyttöluokat olivat suoraan hyödynnettävissä Arcgis-paikkatieto- ja Mike Urban -hulevesimallinnusohjelmistossa.

### 4.3.2 Maastotietokanta

Maastotietokannassa kaikki paikkatietoaineistot on jaettu loogisia kokonaisuuksia muodostaviin kohderyhmiin (MML 2015b), joista maanpeiteluokituksen tuottamisen kannalta oleellisimpina nähtiin tiestöä, rautatiestöä, rakennuksia sekä maanpintaa ja vesialueita kuvaavat kohderyhmät. Aineistoja tuotetaan ja päivitetään MML:n operaattoreiden toimesta, jotka tulkitsevat kohteita digitaalisesti kolmiulotteisilta stereokuvilta sekä ortokuvilta. Lisäksi maastotietokantaan suoraan ladattavaa tietoa saadaan nykyään yhä enenevässä määrin muilta tiedon tuottajilta, kuten kunnilta, liikennevirastolta ja sähköyhtiöiltä. (MML Sovellustuki 2015)

Maanpeiteluokituksen kannalta tärkeimpiä maastotietokannan aineistoja kuvaavia ominaisuuksia ovat tietojen ajantasaisuus ja sijaintitarkkuus. Aineistoista tiestö, rakennukset ja pellot ovat jatkuvan ajantasaistuksen piirissä (MML Sovellustuki 2015). Muita kohteita sen sijaan ajantasaistetaan 3–10 vuoden määrävälein alueella tapahtuvien muutosten mukaan. Maastotietokannan aineistot voivat olla kohdetyypiltään piste-, viiva-, tai aluemaisia kohteita (MML 2015b), joille on maastotietokannan laatumallissa määritetty vähimmäissijaintitarkkuus (MML 2015a). Tässä sijaintitarkkuudella tarkoitetaan, että kohde sijaitsee 95 %:n todennäköisyydellä sille etäisyytenä ilmoitetun sijaintitarkkuuden sisällä todellisesta sijaintipaikastaan. Kohteiden sijaintitarkkuuteen vaikuttavat oleellisesti niiden identifioitavuus sekä käytetty tiedonkeruumenetelmä (MML Sovellustuki 2015). Yleisesti ottaen kohteilla, kuten rakennuksilla, tiestöllä ja vesialueilla, joiden rajat ovat selkeästi osoitettavissa maastossa, on parempi sijaintitarkkuus.

Maanpeiteluokituksessa käytetyt maastotietokannan aineistot pyrittiin valitsemaan siten, että ne edustaisivat mahdollisimman hyvin nimenomaan maan peitteisyyttä, olisivat ajantasaisia ja omaisivat korkean vähimmäissijaintitarkkuuden (taulukko 13). Erityisesti

**Taulukko 13.** Maanpeiteluokituksessa käytetyt maastotietokannan aineistot sekä niiden kohdetyyppi ja vähimmäissijaintitarkkuus.

Kohteen nimi	Kohdetyyppi	Sijaintitarkkuus (m)
Autotie	Viiva	3
Autoliikennealue	Alue	5
Kevytväylä	Viiva	3
Rautatie	Viiva	3
Rakennus	Alue	3
Allas	Alue	5
Pelto	Alue	5
Urheilu- ja virkistysalue	Alue	5
Vakavesi	Alue	7,5
Virtavesi	Viiva/Alue	5–7,5

vesialueilla aineistojen näennäinen sijaintitarkkuus heikkenee selkeästi. Ilmakuvatarkastelun perusteella vaka- ja virtavesialueiden rajat ovat pääosin kuitenkin huomattavasti vähimmäissijaintitarkkuutta tarkemmat. Maan peitteisyyttä koskevasta valintakriteeristä poikkeaa selkeästi urheilu- ja virkistysalueiden kohdeluokka, joka kuvaa pikemminkin maankäyttöä. Tämän erityisalueen mukaan ottamista maanpeiteluokitteluun voidaan perustella sillä, että yleisurheilu- ja jalkapallokentillä on usein oma hulevesi- ja salaoja-putkijärjestelmänsä, jota ei pystytä huomioimaan pelkällä peitteisyyden luokittelulla.

Autotiet ja kevytväylät on tallennettu maastotietokantaan ajoratojen keskiviivoina. Lisäksi tiet on jaettu alaluokkiin niiden liikennekelpoisuuden mukaan, joka riippuu ajoratojen ja -kaistojen lukumäärästä sekä ajoratojen leveydestä. (MML 2015b) Jokaiselle tieluokalle arvioitiin erikseen karttatarkastelun perusteella koko tiealuetta kuvaava keskimääräinen leveys sekä tienpinnan päällysteisyys (taulukko 14).

**Taulukko 14.** Maanpeiteluokituksessa käytetyt tieluokat, niille määritetyt leveydet ja tienpinnan kuvaus.

Tieluokka <sup>1</sup>	Tiealueen leveys (m)	Tienpinnan kuvaus
Autotie Ia	10	Päällystetty
Autotie Ib	10	
Autotie IIa	9	
Autotie IIb	9	
Autotie IIIa	8	
Autotie IIIb	5	
Kävely- ja pyörätie	4	
Ajotie	4	Päällystämätön
Ajopolku	2	

<sup>1</sup> Tieluokat jaettu alaluokkiin (a ja b) tien liikennekelpoisuuden eli ajoratojen ja -kaistojen lukumäärään sekä ajoratojen leveyden mukaan. (MML 2015b)

Tieviivat puskuroitiin luokittain aluemaisiksi kohteiksi niille määritetyn tiealueen leveyden mukaan. Lopuksi kaikki päällystetyt tieluokat yhdistettiin omaksi päällystettyjä teitä kuvaavaksi alueekseen ja vastaavasti päällystämättömät tieluokat omaksi alueekseen. Autoteiden tapaan myös rautatiet on tallennettu maastotietokannassa kiskoparin keskiviivana (MML 2015b). Rautatiealueiden keskimääräiseksi leveydeksi arvioitiin ilmakuvien perusteella 7 m, jonka mukaisesti rataviivat puskuroitiin omiksi aluekohteikseen.

Maastotietokannan aluemaisista kohteista pellot sekä urheilu- ja virkistysalueet otettiin maanpeiteaineistoon mukaan sellaisenaan omina luokkinaan. Myös rakennuksista muodostettiin oma luokkansa, mutta tätä luokkaa varten yhdistettiin kaikki maastotietokantaan tallennetut asuin-, liike- tai julkisia, loma-, teollisia, kirkollisia sekä muita rakennuksia kuvaavat aluemaiset kohteet. Autoliikennealueisiin on maastotietokannassa luettu muun muassa pysäköinti-, levähdys- ja lastauspaikat (MML 2015b). Ilmakuvien perusteella nämä alueet sisältävät useassa tapauksessa erilaisia puu- ja istutusrivistöjä. Tämän vuoksi autoliikennealueista leikattiin pois väri-infra ortokuvien perusteella rajatut kasvillisuusalueet (kts. 4.3.3). Lopuksi muokatut autoliikennealueet yhdistettiin vielä päällystettyjen teiden kanssa omaksi maanpeiteluokakseen.

Kaikki maastotietokannan vesialueita kuvaavat kohteet yhdistettiin niin ikään omaksi maanpeiteluokakseen. Maastotietokannan vesialueista vakavedet eli järvet, yli 5 m leveät virtavedet sekä keinotekoisia vesirakennelmia käsittävät altaat olivat hyödynnettävissä sellaisenaan. Sen sijaan alle 2 m ja 2–5 m leveät virtavedet on tallennettu maastotietokantaan viivamaisina kohteina (MML 2015b). Ilmakuvien perusteella niiden keskimääräiseksi leveydeksi arvioitiin 1,5 m ja 3 m mainitussa järjestyksessä, jonka mukaan ne myös puskuroitiin aluemaisiksi kohteiksi.

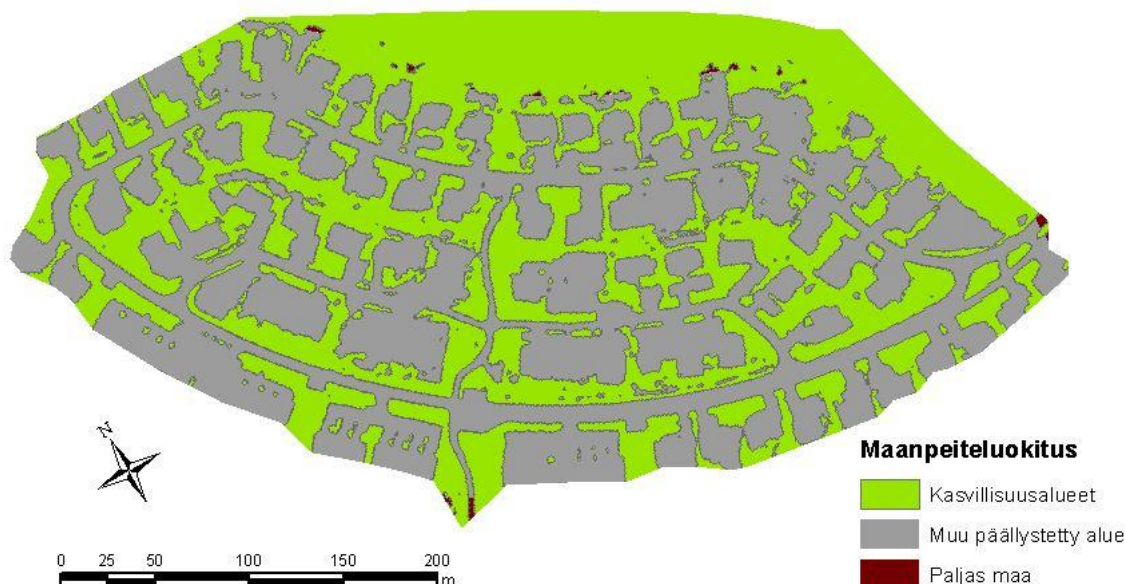
### 4.3.3 Väri-infra ortokuvat

Väri-infra ortokuvat ovat maastoa vastaavaksi oikaistuja mittatarkkoja ilmakuvia, jotka koostuvat kolmesta aallonpituuskanavasta: lähi-infrapunasta, punaisesta ja vihreästä (MML Sovellustuki 2015). Maanpeiteluokituksessa väri-infra ortokuvilta erotettiin kolme erillistä aluetta: kasvillisuuden peittämät alueet, paljas maa sekä muut päällystetyt alueet (kuva 18).

Ensinnä kohdealueiden väri-infra ortokuvista erotettiin toisistaan lähi-infrapuna- ja punaisen aallonpituusalueen rasteritasot, joiden kanavasuhteista muodostettiin uusi NDVI-rasteri yhtälön (5) mukaisesti. Arcgis-paikkatieto-ohjelmistossa yhtälön (5) antamaa rasterisolun arvoa  $NDVI$  on muokattu vielä seuraavasti:

$$NDVI_{Arc} = NDVI * 100 + 100. \quad (24)$$

Näin lopullisen NDVI-rasterin solut saavat helpommin havainnollistettavan arvon väliltä 0 ja 200 verrattuna alkuperäisen NDVI-rasterin soluarvoihin. Kohdealueiden ilmakuva ja lopullista NDVI-rasteria vierekkäin tulkitsemalla kasvillisuuden peittämien alueiden ja muiden alueiden väliseksi raja-arvoksi arvioitiin NDVI-rasterin soluarvo 110. Arvioidun raja-arvon perusteella kasvillisuuden peittämät ja muut alueet eroteltiin toisistaan ja tallennettiin omiksi vektorimuotoisiksi alueikseen.



*Kuva 18. Esimerkki Halssilanmäen kohdealueelta tehdystä väri-infra ortokuvan maanpeiteluokituksesta. © MML, 2015*

Kasvillisuuden peittämät alueet on jaettu niiden rinnekaltevuuden perusteella edelleen kolmeen alaluokkaan:

- Tasaiset kasvillisuusalueet (kaltevuus alle 2 %)
- Loivat kasvillisuusalueet (kaltevuus 2–7 %)
- Jyrkät kasvillisuusalueet (kaltevuus yli 7 %)

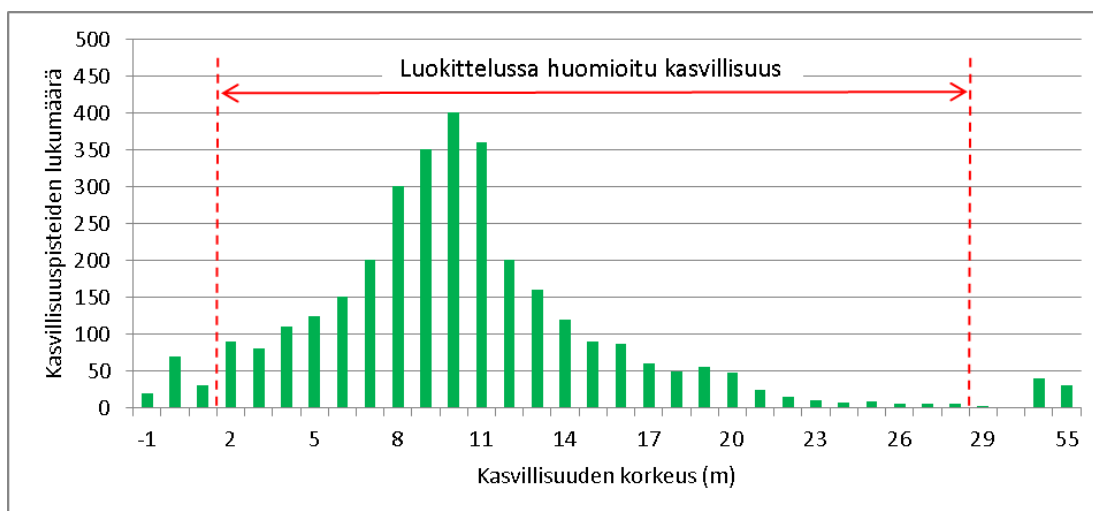
Rinnekaltevuudet laskettiin alueittain MML:n avoimesta tiedostopalvelusta ladattujen rasterimuotoisten maanpinnan korkeusmallien, joiden ruutukoko on 2x2 m, perusteella. NDVI-rasterin tavoin eri kaltevuusluokkiin kuuluvat alueet eroteltiin toisistaan ja tallennettiin omiksi vektorimuotoisiksi alueikseen, joiden avulla kasvillisuuden peittämät alueet leikattiin kolmeen rinnekaltevuuden mukaiseen alaluokkaansa.

NDVI-rasterista jäljelle jääneiden muiden alueiden jatkoluokittelussa sovellettiin maastotietokannan taajaan rakennettujen alueiden -rajausta. Taajaan rakennettujen alueiden -rajaus on maastotietokannan rakennusten ympärille puskuroitu yhtenäinen aluerajaus, joka luodaan tietyn rakennustiheyden ylittävälle taajama-alueille (MML 2015b). Jatkoluokittelussa taajaan rakennetut alueet -maskin alle jäävät muut alueet luokiteltiin muuksi läpäisemättömäksi pinnaksi ja vastaavasti maskin ulkopuolelle jäävät alueet paljaaksi maaksi.

#### 4.3.4 Laserkeilausaineisto

Maanpeiteaineistojen tuottamisessa laserkeilausaineistoa on hyödynnetty metsäalueiden sekä taajamien puistojen ja yksittäisten puurivien luokituksessa. Ensimmäisenä laseraineistosta poimittiin erikseen kaikki kasvillisuutta ja maanpintaa edustavat pisteet. Maanpintapisteistä luotiin epäsäännöllinen kolmioverkko (TIN), joka kuvaa maanpintaa 3-ulotteisin, jatkuvin, 3-kulmaisoin pinnoin (Aguilar & Dymond 2014).

Kasvillisuuspisteitä edustavan puuston korkeus laskettiin vähentämällä kasvillisuuspisteiden z-koordinaateista TIN-maanpintamallista pisteiden kohdalle interpoloitu maanpinnan korkeusasema. Saadusta kasvillisuuden korkeutta kuvaavasta pisteaineistosta poistettiin kaikki alle 2 m korkeat puut sekä selkeästi virheelliset negatiivisen tai aineistosta selvästi poikkeavan, suuren korkeuden saaneet puut (kuva 19).



**Kuva 19.** Laseraineiston luokittelussa huomioitavat kasvillisuuspisteet.

Maanpeiteluokittelussa huomioitavista kasvillisuuspisteistä muodostettiin 2x2 m ruutu-koossa oleva rasteriaineisto, josta kasvillisuutta edustavat rasterisolut poimittiin erikseen ja tallennettiin omaksi vektorimuotoiseksi puustoalueekseen. Vektorimuotoiseen aineistoon jääneet aukot, jotka selkeästi ilmakuvan perusteella olivat metsäalueita, lisättiin puustoalueeseen automaattisella aukkojentäydennystoiminnolla.

Puustoalueet jatkoluokiteltiin paljaan maan ja muiden läpäisemättömien pintojen tavoin taajaan rakennettujen alueiden -maskilla metsäalueiksi ja taajamapuustoksi. Metsäalueet jaettiin rinnekaltevuuden perusteella edelleen kolmeen alaluokkaan:

- Tasaiset metsät (kaltevuus alle 2 %)
- Loivat metsät (kaltevuus 2-7 %)
- Jyrkät metsät (kaltevuus yli 7 %)

Metsäalueiden rinnekaltevuuden laskennassa hyödynnettiin jo aiemmin luotuja vektorimuotoisia rinnekaltevuusalueita (kts. kappale 4.3.3).

### 4.3.5 Maanpeiteaineistojen yhdistäminen

Tuotetut maanpeiteaineistot eivät rajaudu toisiinsa, vaan sisältävät runsaasti päällekkäisyyksiä toistensa suhteen. Esimerkiksi rakennusten käsittämät alueet ovat useassa tapauksessa päällekkäin muun läpäisemättömän pinnan -alueen kanssa. Yhtälailta metsäalueet ovat lähes poikkeuksetta päällekkäisiä kasvillisuusalueiden kanssa. Tämän vuoksi maanpeiteaineistoille määritettiin pinoamisjärjestys, jossa maanpeiteluokat tulevat oikein kuvatuksi toisiinsa nähden (taulukko 15). Pinoamisjärjestys on yhtälailta oleellinen silloin, kun maanpeiteaineistojä käytetään alueellisten valumakertoimien laskentaan.

*Taulukko 15. Maanpeiteaineistojen pinoamisjärjestys.*

Pinoamisjärjestys	Maanpeiteluokka
1	Rakennukset
2	Päällystetty tiealue
3	Päällystämätön tiealue
4	Vesialue
5	Rautatiealue
6	Urheilu- ja virkistysalue
7	Pelto
8	Taajamapuusto
9	Metsä <sup>1</sup>
10	Muu päällystetty pinta
11	Paljas maa
12	Nurmialueet <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Metsä ja nurmialueisiin sisältyy lisäksi kolme kaltevuuden mukaista alaluokkaa: tasainen (kaltevuus alle 2 %), loiva (2–7 %) ja jyrkkä (yli 7 %)

Maanpeiteaineistojen pinoaminen päällekkäin mahdollistaa myös sen, ettei pinoamisjärjestyksessä alempien luokkien ole nyt välttämätöntä antaa yhtä eksaktia kuvausta maanpeitteestä kuin päällimmäisten maanpeitteen kuvaukseltaan tarkempien luokkien. Esimerkkinä pohjimmaisena maanpeiteluokista on esitetty NDVI-rasterista rajatut kasvillisuusalueet, jotka edustavat valuma-alueen kaikkea vihreää pintaa. Kun kasvillisuusalueiden päälle lisätään nyt metsää, taajamapuustoa, peltoa sekä urheilu- ja virkistysalueita edustavat maanpeiteluokat, jää kasvillisuusalueista näkyviin enää nurmikkoa ja matalaa kasvillisuutta edustavat alueet.

Maanpeiteluokituksista muodostettiin maanpeiteaineistot kaikille kolmelle työssä tarkasteltavalle kohdealueelle (liite 1). Tuotetut maanpeiteaineistot ulottuvat osittain myös kohdealueiden ulkopuolelle. Tämä johtuu siitä, että varsinaisia kohdealueita on hyödynnetty ainoastaan maankäyttö- ja maanpeiteluokituksen tuottamien alueellisten valumakertoimien vertailussa, mutta varsinaiset hulevesimallinnuksessa käytettävät valuma-alueet ulottuvat myös kohdealuerajausten ulkopuolelle.

## 4.4 Valuntamallit

Kohdealueilla muodostuvan hulevesivalunnan tarkastelussa käytettiin pääasiassa aika-pinta-ala-menetelmään perustuvaa hulevesivaluntamallia. Mallin valintaa puoltavina tekijöinä nähtiin erityisesti:

- yksinkertaisuuden kautta saavutettava kustannustehokkuus
- maanpeiteaineistojen suora hyödynnettävyys mallissa
- malliparametrien suora yhteys maanpeiteaineistoihin
- mahdollisuus kehittää mallin toimintaa maanpeiteaineistojen avulla

Aika-pinta-ala-menetelmään perustuvasta hulevesivaluntamallista luotiin kaksi erilaista versiota mallinnuksia varten. Pääosassa hulevesimallinnuksia käytettiin uutta kehittyneempää versiota, jossa läpäisemättömiltä ja läpäiseviltä alueilta muodostuva hulevesivalunta pystytään huomioimaan erikseen tuotettujen maanpeiteaineistojen avulla. Perinteistä versiota sen sijaan sovellettiin maankäyttöluokituksiin perustuvissa mallinnuksissa, joissa läpäisemätöntä ja läpäisevää pintaa ei pystytä erottamaan toisistaan. Lisäksi valuntamallien keskinäistä vertailua varten luotiin epälineaarisen altaan -malliin perustuva hulevesivaluntamalli.

Valuma-alueet kaikkia kolmea valuntamallia varten rajattiin MML:n rasterimuotoisen 2x2 m maanpinnan korkeusmallin ja Jyväskylän Energialta saadun hulevesiverkostokartan perusteella. Ensiksi kohdealueille määritettiin päävedenjakajat hulevesiverkoston purkupisteen tai tarkastelun kohteena olevan verkosto-osan mukaisesti. Päävaluma-alueet jaettiin edelleen pienemmiksi osavaluma-alueiksi, jotka yhdistettiin niiden purkupisteenä toimiviin verkostokaivoihin. Näin ollen kaikki käytetyt hulevesivaluntamallit voidaan nähdä alueelliselta ulottuvuudeltaan osittain hajautettuina valuntamalleina, joissa ominaisuuksiltaan homogeenisia osa-alueita yhdistää yhteinen hulevesiverkosto.

Kaikkien kolmen kohdealueen valuma-aluejako numeroituine osavaluma-alueineen on esitetty verkostokartan yhteydessä (liite 2). Keskustan kohdealueen valuma-aluejako sisältää myös päävaluma-alueen ulkopuolisia osavaluma-alueita alueen hulevesiverkostossa olevien ylivuotorakenteiden seurauksena.

### 4.4.1 Aika-pinta-ala-menetelmän parametrisointi

Aika-pinta-ala-menetelmä on luonteeltaan deterministinen, hulevesivaluntatapahtumaa empiirisesti kuvaava malli, joka yksinään soveltuu ainoastaan sadetapahtumakohtaisiin simulointeihin. Menetelmää varten määritettäviä malliparametreja ovat osavaluma-alueiden keskimääräiset valumakertoimet sekä hydrologiset parametrit, kuten sadetapahtuman alkuhäviöiden suuruus, hydrologinen häviökerroin, valuma-alueen muoto ja kertymisaika.

Valumakertoimet kohdealueiden maankäyttö- ja maanpeiteaineistoille arvioitiin omaan asiantuntemukseen sekä luvussa 2.4.3 esitettyyn kirjallisuustietoon pohjautuen (taulukko 16 & 17). Kohdealueiden välisiin eroihin arvioituissa valumakertoimissa vaikuttaa muun muassa alueen maaperä, korkeuserot ja yleinen luonne. Mäki-Matin muita kohdealueita parempi maaperän vedenläpäisevyys näkyy pienempinä valumakertoimina niin maankäyttöluokkien kuin läpäisevien maanpeitteidenkin osalta. Lisäksi Keskustan valumakertoimet arvioitiin osan maankäyttöluokista sekä muun päällystetyn pinnan - maanpeiteluokan osalta muita kohdealueita suuremmiksi ydinkeskusta-alueen hulevesiverkoston laajan kattavuuden, kortteleiden umpinaisen luonteen ja suurten alueellisten korkeuserojen perusteella.

**Taulukko 16.** Kohdealueille arvioidut maankäyttöluokituksen mukaiset valumakertoimet.

Maankäyttöluokka	Valumakerroin		
	Keskusta	Halssilanmäki	Mäki-Matti
Omakotitaloalue	0,25	0,25	0,20
Rivitaloalue	0,35	0,35	0,30
Kerrostaloalue	0,70	0,55	0,50
Liike- ja toimistorakennusten alue	0,80	0,75	0,70
Teollisuusalue	0,80	0,70	0,60
Liikenne- ja pysäköintialue	0,80	0,80	0,80
Urheilu- ja virkistysalue	0,20	0,20	0,20
Puistoalue	0,10	0,07	0,05
Metsäalue	0,02	0,02	0,01

**Taulukko 17.** Kohdealueille arvioidut maanpeiteluokituksen mukaiset valumakertoimet.

Maanpeiteluokka	Valumakerroin		
	Keskusta	Halssilanmäki	Mäki-Matti
Rakennukset	0,90	0,90	0,90
Päällystetty tiealue	0,80	0,80	0,80
Päällystämätön tiealue	0,45	0,45	0,40
Vesialue	1,00	1,00	1,00
Rautatiealue	0,05	0,05	0,05
Urheilu- ja virkistysalue	0,20	0,20	0,15
Pelto	0,10	0,10	0,05
Taajamapuusto	0,05	0,05	0,04
Metsä	< 2 %	0,01	0,01
	2-7 %	0,02	0,01
	> 7 %	0,03	0,02
Muu päällystetty pinta	0,60	0,50	0,40
Paljas maa	0,20	0,20	0,10
Nurmialueet	< 2 %	0,08	0,05
	2-7 %	0,10	0,07
	> 7 %	0,15	0,10



Keskimääräiset valumakertoimet jokaisen kohdealueen osavaluma-alueille laskettiin Mike Urban -ohjelmiston automaattisella valuma-alueiden prosessointityökalulla yhtälön (7) mukaisesti. Laskenta suoritettiin erikseen maankäyttöluokille ja maanpeiteaineistoille. Valumakertoimien laskennassa maanpeiteaineistojen perusteella noudatettiin niille määritettyä pinoamisjärjestystä (vrt. taulukko 15).

Maanpeiteaineistojen etuna maankäyttöluokkiin verrattuna voidaan nähdä, että niiden perusteella valuma-alueen läpäisemätön ja läpäisevä pinta ovat erotettavissa toisistaan. Tätä maanpeiteaineistojen tarjoamaa etua hyödyntäen perinteistä aika-pinta-ala-menetelmää kehitettiin siten, että jokaista osavaluma-aluetta kohden luotiin kaksi päällekkäistä osavaluma-aluetta: ensimmäinen läpäisemättömille ja toinen läpäiseville maanpeiteluokille. Nyt keskimääräiset valumakertoimet ja hydrologiset parametrit voitiin määrittää erikseen näille päällekkäisille osavaluma-alueille. Tämän uuden menetelytavan myötä läpäisemättömät ja läpäisevät alueet pystyttiin käsittelemään valuntamallissa omina hulevesivaluntaa tuottavina komponentteinaan. Näin hulevesivaluntamallilla pystyttiin tarkemmin jäljittelemään tutkimuksissa (esim. Boyd *et al.* 1993; Sillanpää 2013) havaittua sadetapahtuman aikaista hulevesivalunnan todellista luonnetta.

Kehitetyssä aika-pinta-ala-menetelmässä sadetapahtuman alkuhäviöiden suuruus, hydrologinen häviökerroin ja keskimääräinen pintavirtausnopeus valuma-alueilla arvioitiin erikseen läpäisemättömille ja läpäiseville alueille omaan asiantuntemukseen ja esitettyyn kirjallisuustietoon (kts. luku 3.2.1) pohjautuen (taulukko 18). Alkuhäviöiden arvioimisessa suurin painoarvo annettiin Sillanpään (2013) Suomen olosuhteissa tekemille havainnoille. Perinteisessä menetelmässä alkuhäviöt ja keskimääräinen pintavirtausnopeus edustavat läpäisemättömien ja läpäisevien alueiden yhdistettyä vaikutusta. Hulevesivalunnasta pääosan muodostuessa kuitenkin läpäisemättömillä alueilla painotettiin yhdistettyjen alueiden alkuhäviöiden ja pintavirtausnopeuden arvioinnissa läpäisemättömille alueille esitettyjä kirjallisuusarvoja. Kaikille kohdealueille käytettiin muutoin samoja alkuhäviöiden ja pintavirtausnopeuden arvoja, mutta Mäki-Matissa alkuhäviöt arvioitiin aavistuksen muita alueita suuremmiksi alueen maaperän hyvän vedenläpäisevyyden perusteella.

**Taulukko 18.** *Arvioidut alkuhäviöt ja keskimääräinen pintavirtausnopeus läpäisemättömille, läpäiseville ja yhdistetyille valuma-alueille.*

Valuma-alueen tyyppi	Alkuhäviö, IL (mm)	Pintavirtausnopeus (m/s)	Hydrologinen häviökerroin
Läpäisemätön	0,5	0,40	0,9 <sup>1</sup>
Läpäisevä	17,0 <sup>2</sup>	0,20	0,9
Yhdistetty	1,0	0,35	0,9 <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Mäki-Matin kohdealueella läpäisemättömien ja yhdistettyjen alueiden hydrologinen häviökerroin 0,8

<sup>2</sup> Mäki-Matin kohdealueella läpäisevien alueiden alkuhäviöt 20,0 mm

Hydrologista häviökerrointa valittaessa arvioitiin erityisesti, kuinka tehokkaasti hulevedet johtuvat katualueilta verkostoon, ja onko kiinteistöjen kattovedet johdettu hule-

vesiviemäriin kohdealueilla. Katualueilla ratkaisevana tekijänä tehokkuuden suhteen nähtiin hulevesivaluntaa verkostoon ohjaavat reunakiveykset. Näin ollen Keskustassa ja Halssilanmäessä hydrologisen häviökertoimen arvoksi valikoitui 0,9. Mäki-Matissa hydrologiseksi häviökertoimeksi valittiin sen sijaan 0,8 alueen vanhemmista, hulevesiviemäriin liittymättömistä kiinteistöistä sekä katujen osin heikkokuntoisesta reunakiveyksestä johtuen.

Osavaluma-alueiden muoto ja kertymisaika kaikilla kohdealueilla laskettiin keskimääräisten valumakertoimien tavoin Mike Urban -ohjelmiston automaattisella valuma-alueiden prosessointityökalulla. Valuma-alueiden muodon laskennassa käytettiin ohjelmistossa ennalta määritettyjä kolmen aika-pinta-alakertoimen arvoja (kts. kuva 10 & 11). Lopullinen valuma-alueen muoto valittiin seuraavien ehtojen mukaisesti:

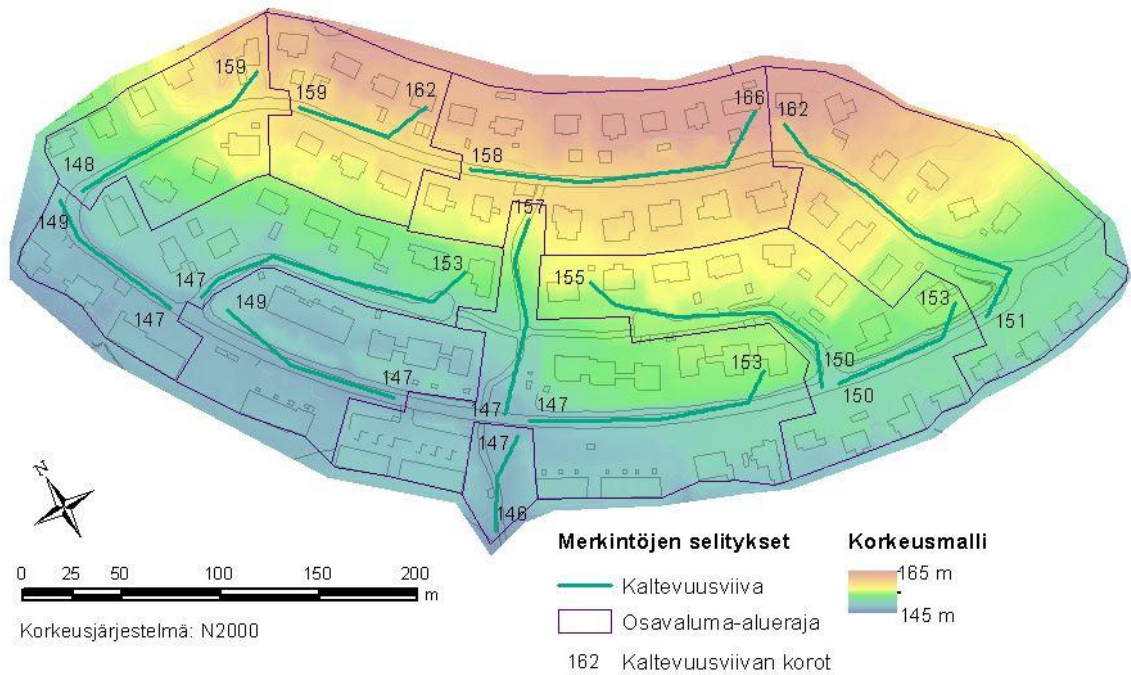
- Katgoria 1:  $A-50/A = 0,00 - 0,37$  → Suppeneva,
- Katgoria 2:  $A-50/A = 0,38 - 0,60$  → Suorakulmainen,
- Katgoria 3:  $A-50/A = 0,61 - 1,00$  → Laajeneva,

missä  $A-50$  on se osa valuma-alueen pinta-alasta  $A$ , joka on 50 % etäisyydellä valuma-alueen purkupisteestä kertymisajan suhteen mitattuna. Toisin sanoen, mikäli esimerkiksi 30 %:lla valuma-alueen pinta-alasta huleveden kertymisaika valuma-alueen purkupisteelle on lyhyempi kuin puolet koko valuma-alueen kertymisajasta, sijoittuu valuma-alue kategoriaan 1 saaden suppenevan muodon.

#### 4.4.2 Epälineaarisen altaan -mallin parametrusointi

Epälineaarisen altaan -malli kuvaa hulevesivaluntatapahtumaa konseptuaalisesti oman myös fysikaalisperusteisen mallin piirteitä. Tulosten satunnaisuuden suhteen malli on deterministinen ja soveltuu rajoitetusti myös pidemmän ajanjakson mallinnuksiin, mikäli mallin infiltraatiokapasiteetille on määritetty tietty palautumisnopeus. Mallin vaatimia parametreja ovat osavaluma-alueiden erilaisia maanpeitteitä edustavien osa-alueiden (kts. taulukko 9) prosentuaalinen osuus niiden kokonaisalasta sekä osavaluma-alueiden pituus ja kaltevuus. Lisäksi kaikille osa-alueille on vielä erikseen määritettävä niillä muodostuvan hulevesivalunnan määrää säätelevät hydrologiset parametrit pintojen kastumiselle, painannesäilynnälle, infiltraatiolle ja pinnan karkeudelle.

Osavaluma-alueiden pituudet ja kaltevuudet kohdealueille määritettiin Mike Urban -ohjelmiston automaattisella pituus-kaltevuus-työkalulla. Tätä varten kaikille osavaluma-alueille luotiin Arcgis-paikkatieto-ohjelmistolla vektorimuotoiset kaltevuusviivat, joiden alku- ja loppupisteiden korkeus sidottiin alla olevaan MML:n rasterimuotoisen 2x2 m maanpinnan korkeusmalliin (kuva 20). Tämän jälkeen kaltevuusviivat yhdessä korkeusmallin kanssa tuotiin Mike Urban -ohjelmistoon automaattista laskentaa varten.



**Kuva 20.** Esimerkki osavaluma-alueiden kaltevuusviivojen tekemisestä Halssilän kohdealueelta.

Osa-alueiden prosentuaalisten osuuksien laskennassa hyödynnettiin tuotettua maanpeiteaineistoa yhdessä Mike Urban -ohjelmiston valuma-alueiden prosessointityökalun kanssa. Tätä varten maanpeiteaineistot jaettiin osa-alueisiin taulukossa 9 esitettyä ryhmittelyä mukaillen:

- Läpäisemätön alue 1: rakennukset, vesialue
- Läpäisemätön alue 2: päällystetty tiealue
- Puoliläpäisevä alue: päällystämätön tiealue, muu päällystetty pinta, paljas maa
- Läpäisevä alue 1: rautatiealue, urheilu- ja virkistysalue, nurmialueet
- Läpäisevä alue 2: pelto, taajamapuusto, metsä

Osa-alueiden prosentuaaliset osuudet laskettiin keskimääräisten valumakertoimien tapaan yhtälöä (7) hyödyntäen ja maanpeiteaineistoille määritettyä pinoamisjärjestystä noudattaen yksi osa-alue kerrallaan. Nyt kulloinkin laskennan kohteena oleville maanpeiteaineistoille annettiin valumakertoimen  $C_i$  arvoksi 100 % ja vastaavasti lopuille maanpeiteaineistoille 0 %. Esimerkiksi läpäisemättömän osa-alueen 1 prosentuaalista osuutta laskettaessa rakennukset ja vesialueet saivat valumakertoimen  $C_i$  arvoksi 100 % ja vastaavasti kaikki loput maanpeiteluokat arvon 0 %. Näin ollen laskettu yhtälön (7) antama keskimääräinen valumakerroin ilmaisi suoraan osa-alueen prosentuaalista osuutta osavaluma-alueen kokonaispinta-alasta. Jokaisen laskentakierroksen jälkeen osavaluma-aluekohtaiset osa-alueiden prosentuaaliset osuudet vietiin Excel-taulukkoon, ennen kuin laskenta pystyttiin toistamaan seuraaville osa-alueille. Lopuksi osa-alueiden prosentuaaliset osuudet kirjattiin Excel-taulukosta käsin Mike Urban -ohjelmiston epälineaarisen altaan -malliin.

Epälineaarisen altaan -mallissa käytettyjä hydrologisia parametreja eli pintojen kastumisesta ja painannesäilynnästä aiheutuvia alkuhäviöitä, maaperän infiltraatiokapasiteettia sateen alkuhetkellä ja täysin vedellä kyllästyneenä, infiltraatio-aikavakioita sekä Manningin karkeuskertoimia eri osa-alueille arvioitiin omaan asiantuntemukseen ja esitettyyn kirjallisuustietoon (kts. luku 2.2.3, 2.2.4 & taulukko 10) pohjautuen (taulukko 19). Kaikille kohdealueille käytettiin samoja hydrologisia parametreja lukuun ottamatta infiltraatiokapasiteetteja Mäki-Matissa, jotka alueen paremmin vettä läpäisevän maaperän vuoksi arvioitiin tietyn prosenttiosuuden verran muita alueita paremmiksi.

**Taulukko 19.** Epälineaarisen altaan -mallissa käytetyt hydrologiset parametrit.

Hydrologinen parametri	Osa-alue				
	Läpäisemätön <sup>1</sup>		Puoliläpäisevä <sup>2</sup>	Läpäisevä <sup>3</sup>	
	1	2		1	2
Pintojen kastuminen (mm)	0,5	0,5	0,5	1	2
Painannesäilyntä (mm)	-	0,5	1	3	5
Infiltraatiokapasiteetti sateen alussa (mm/h)	-	-	5 <sup>4</sup>	50 <sup>4</sup>	100 <sup>4</sup>
Täysin kyllästyneen maaperän infiltraatiokapasiteetti (mm/h)	-	-	2 <sup>5</sup>	5 <sup>5</sup>	15 <sup>5</sup>
Infiltraatio-aikavakio (1/h)			5	3	2
Manningin karkeuskerroin, n	0,010	0,012	0,025	0,200	0,500

<sup>1</sup> Läpäisemätön osa-alue 1 sisältää talot ja vesialueet, osa-alue 2 päällystetyt tiealueet

<sup>2</sup> Puoliläpäisevä osa-alue sisältää päällystämättömät tiealueet, muun päällystetyn alueen ja paljaan maan

<sup>3</sup> Läpäisevä osa-alue 1 sisältää rautatiealueet, urheilu- ja virkistysalueet sekä nurmialueet, läpäisevä osa-alue 2 sisältää pellot, taajamapuuston ja metsät

<sup>4</sup> Mäki-Matin kohdealueella 50 % suuremmat sateen alkuhetken infiltraatiokapasiteetit

<sup>5</sup> Mäki-Matin kohdealueella 20 % suuremmat täysin kyllästyneen maaperän infiltraatiokapasiteetit

Pintojen kastumisen ja painannesäilynnän aiheuttamissa häviöissä painotettiin Krebsin *et al.* (2014) suomalaisille taajamavaluma-alueille mallintamalla kalibroimia yhteen laskettuja häviöarvoja (kts. taulukko 3). Näiden häviöiden keskinäinen suuruus määritettiin kuitenkin Pecherin (1969 & 1970) pintojen kastumiselle ja painannesäilynnälle erikseen esittämien arvojen mukaisesti (katso Arnell 1980). Manningin karkeuskertoimien valinnassa pääpaino oli niin ikään Krebsin *et al.* (2014) erilaisille maanpeitteille kalibroimissa arvoissa (kts. taulukko 10).

Infiltraatiokapasiteeteissa korostettiin alueen maaperän ohella osa-aluetta luonnehtivan kasvillisuuden määrää, mikä näkyy erityisesti ilman kasvillisuutta olevan puoliläpäisevän osa-alueen sateen alkuhetken muita osa-alueita selvästi pienempänä infiltraatiokapasiteettina. Infiltraatio-aikavakioiden kohdalla osa-alueiden infiltraatiokapasiteetin oletettiin heikkenevän sadetapahtuman aikana nopeammin vähemmän kasvillisuutta

omaavilla osa-alueilla. Mäki-Matin infiltraatiokapasiteetit sateen alkuhetkelle ja täysin kyllästyneelle maaperälle arvioitiin 50 % ja 20 % muita kohdealueita suuremmiksi, minkä nähtiin vastaavan likimääräisesti siirtymistä kohtalaisesti vettä läpäisevältä alueelta hyvin vettä läpäisevälle alueelle (vrt. taulukko 2).

## 4.5 Verkostomalli

Verkostomallin lähtöaineistona työssä oli Jyväskylän Energian Trimble NIS -verkostotietojärjestelmä, josta hulevesiverkosto oli valmiiksi käännetty shape-tiedostomuotoon. Tämä hulevesiverkosto tuotiin Mike Urban -ohjelmiston verkostotietokannaksi ohjelmiston automaattisella tiedoston tuontityökalulla. Mukaan verkostotietokantaan luettiin kaikki putket, rummut, kaivot sekä verkoston purku- ja sisäänottoaukot.

Ensinnä kohdealueiden hulevesiverkostoista tarkastettiin, että kaikki niiden linkit ja solmut olivat liittyneet verkoston tuontimenettelyssä oikein toisiinsa. Tarvittaessa väärin yhdistyneet tai yhdistymättömät linkit ja solmut korjattiin ohjelmistossa yhdistämällä ne uudestaan käsin. Alkuperäinen verkostotietojärjestelmä sisälsi myös jonkin verran puutteita ja selkeitä virheitä esimerkiksi putkikokojen ja materiaalien, putkien ylä- ja alapään vesijuoksujen sekä kaivojen halkaisijoiden, pohjankorkojen ja kansien korkeuksien suhteen.

Verkostomallissa puuttuvat putkikoot, materiaalit, kaivojen halkaisijat ja pohjankorot interpoloitiin putkilinjoittain tunnetun verkostotiedon perusteella. Vastaavasti puuttuvat kaivojen kansien korkeudet interpoloitiin MML:n rasterimuotoisesta 2x2 m maanpinnan korkeusmallista. Putket, joilta puuttui tieto ylä- ja alapään vesijuoksusta yhdistettiin suoraan niiden päissä olevien kaivojen pohjankorkoihin. Lopuksi kohdealueiden verkostoa karsittiin käsittämään ainoastaan kaikki oleellisimmaksi katsotut verkoston päälinjat. Karsimista perusteltiin sillä, että alkuperäisessä verkostotietojärjestelmässä kaikkein eniten puutteita ja virheitä sisältyi juuri putkikooltaan pienimpiin verkostohaaroihin. Lisäksi Krebs et al. (2014) ovat tutkimuksessaan todenneet, ettei verkoston päälinjoja putkikooltaan pienempien verkostohaarojen sisällyttäminen hulevesiverkostomalliin vaikuta juuri ollenkaan mallinnustuloksiin.

Kohdealueiden verkostokartoilla on kuvattu kaikki kohdealueiden mallinnetut hulevesiputket ja avouomat, kaivot sekä verkoston purku- ja sisäänottoaukot (liite 2). Lisäksi verkostokartoille on merkattu hulevesiputkien sisähalkaisijat linjoittain sekä tarkastelupisteet, joilla hulevesivirtaamatarkastelut on tehty.

Keskustan verkostomalliin on luettu mukaan kaikki vähintään 300 mm verkoston päälinjat sekä yksi yksittäinen tätä pienempi kohdealueen luoteiskulmassa sijaitseva ylivuotorakenne. Keskustan kohdealue sisältää kaikkinsa kaksi verkostokarttaan merkittyä ylivuotorakennetta, joista hulevettä karkaa suurimpien virtaamien aikana tarkastelu-

pisteille määritetyn päävedenjakajan ulkopuolelle. Verkoston kokonaispituus Keskustassa on 11,7 km siitä pääosan ollessa rakennettu 60- ja 70-luvulla. Käytetyt putkimateriaalit vaihtelevat betoni-, muovi- ja teräsputkien välillä, suurimman osan verkostopituudesta ollessa kuitenkin betoniputkea (taulukko 20). Betoniputkista osa on pyöreästä muodosta poiketen suorakulmaisia tai munanmuotoisia.

Keskustan verkosto purkaa vetensä Jyväsjärven pinnan alapuolelle, mikä on huomioitu mallinnuksen reunaehtona. Mallinnuksessa Jyväsjärven vedenkorkeutena käytettiin Päijänteen pohjoisen mittausaseman vuosien 2000–2015 kesäkuukausien suurinta keskimääräistä vedenkorkeutta 79,0 m mpy. (N2000), joka laskettiin Suomen ympäristökeskuksen (SYKE) ylläpitämästä OIVA- ympäristö- ja paikkatietopalvelusta ladattujen vedenkorkeushavaintojen perusteella.

**Taulukko 20.** Kohdealueiden hulevesiverkoston putkimateriaalit, niiden muoto ja nimellishalkaisija sekä verkostopituus halkaisijoittain.

Kohdealue	Putkimateriaali	Muoto	Nimellishalkaisija [mm]	Verkostopituus [m]	
Keskusta	Muovi (MUO)	Pyöreä	250	150	
			300 – 350	800	
			400 – 560	280	
			680	230	
	Teräs (TER)	Pyöreä	500 – 600	210	
			1800	100	
	Betoni	Pyöreä	300	2760	
			400	2230	
			500	1260	
			600	780	
			800	290	
			1000	820	
			1800	120	
			Suorakulmainen	1000 x 900	50
				1050 x 300	10
				1700 – 2000 x 900	190
2600 x 900	260				
Munanmuotoinen	520 x 350	310			
	800 x 700	440			
	1010 x 900	380			
Halssilanmäki	Muovi (MUO)	Pyöreä	200	860	
			315	470	
			450	50	
Mäki-Matti	Betoni (BET)	Pyöreä	300	640	
			400	70	

Halssilanmäen verkostomalliin laskettiin mukaan kaikki nimellishalkaisijaltaan vähintään 200 mm putket. Alueen verkoston kokonaispituus on 1,4 km verkoston koostuessa

pelkästään uusista muoviputkista. Mäki-Matin verkostomallin pienin putkikoko 300 mm määräytyi Kotikadun ja Sopukadun suuntaisten huleveden kokoojaviemäreiden betoni-putkien koon mukaiseksi. Verkostopituus alueella on 0,7 km verkoston ollessa rakennettu pääosin 80-luvun alussa.

Karkeuskertoimet kohdealueiden hulevesiviemäreille ja avouomille valittiin omaan asiantuntemukseen ja esitettyyn kirjallisuustietoon (kts. taulukko 11) pohjautuen. Viemäreiden karkeuskertoimien valinnassa huomioitiin niin putkimateriaali kuin niiden keskimääräinen ikä kohdealueella, jonka oletettiin korreloivan käyttökunnon kanssa (taulukko 21). Lyhyet avouomaosuudet Keskusta-alueen etelälaidalla arvioitiin ilmakuvataarkastelun perusteella kunnoltaan osin ruohottuneiksi.

**Taulukko 21.** Kohdealueille arvioidut hulevesiviemäreiden ja avouomien Manningin yhtälön (21) karkeuskertoimet.

Materiaali	Manningin karkeuskerroin, n		
	Keskusta	Halssilanmäki	Mäki-Matti
Teräspanputki	0,012	-	-
Muoviputki	0,011	0,009	-
Betoniviemäri	0,014	-	0,013
Avouoma	0,030	-	-

Verkostomallinnuksessa kaivojen paikallishäviöiden laskennassa käytettiin Pedersenin & Markin (1990) suosittamaa tehokkaan virtausalan menetelmää (kts. luku 3.3.2). Varsinainen hydraulinen laskenta verkostomallinnuksessa suoritettiin dynaamisen aallon mallilla, joka hyödynsi paineellisen virtaustilan laskennassa Preismannin rakoa (kts. luku 3.3.1).

## 4.6 Tilastolliset menetelmät

Työssä kohdealueille maanpeiteaineistojen ja maankäyttöluokitusten perusteella lasketuja valumakertoimia vertailtiin niin osavaluma-aluekohtaisesti kuin asemakaavan osoittamin maankäyttöluokitusrajausten mukaisesti. Ensimmäisessä tapauksessa testattiin eroavatko osavaluma-alueille maanpeite- ja maankäyttöluokitusten perusteella lasketut keskimääräiset valumakertoimet tilastollisesti toisistaan. Toisessa tapauksessa puolestaan arvioitiin maanpeiteaineistojen perusteella maankäyttöluokitusrajausten mukaisille alueille laskettujen keskimääräisten valumakertoimien tilastollista eroavaisuutta maankäyttöluokkien mukaisiin referenssiarvoihin (vrt. taulukko 16).

Molemmissa tapauksissa testattavana oli otos, joiden perusjoukon voitiin olettaa noudattavan normaalijakaumaa, mutta perusjoukon varianssia  $\sigma^2$  ei tunnettu. Tällaisessa tapauksessa perusjoukon odotusarvon  $\mu$  testaamiseen voidaan soveltaa Studentin t-jakaumaa vapausastein  $n_{tot}-1$ , missä  $n_{tot}$  on otoskoko (Walpole *et al.* 2011). Tällöin testisuureeksi  $t_{test}$  saadaan:

$$t_{test} = \frac{\bar{x} - \mu_0}{s/\sqrt{n_{tot}}}, \quad (25)$$

missä  $\bar{x}$  on otoskeskiarvo,  $\mu_0$  on odotusarvon referenssiarvo ja  $s$  on otoshajonta. Molemmissa tapauksissa käytettiin kaksipuoleista testiä:

- Nollahypoteesi  $H_0$ :  $\mu = \mu_0$
- Vaihtoehtoinen hypoteesi  $H_1$ :  $\mu \neq \mu_0$

Riskitasona  $\alpha$  eli testauksen merkitsevyytenä käytettiin arvoa 0,05. Nyt valittua riskitasoa vastaavat t-jakauman kvantiilit ( $t_{0,025}$  ja  $t_{0,975}$ ) ratkaistiin t-jakauman käänteisfunktioista Excel-taulukkolaskentaohjelmalla. Kvantiilien perusteella muodostettiin 95 %:n luottamusrajat perusjoukon odotusarvolle  $\mu$  (Walpole *et al.* 2011):

$$\bar{x} \pm t_{\alpha/2} \frac{s}{\sqrt{n_{tot}}}, \quad (26)$$

missä  $t_{\alpha/2}$  edustaa riskitasoa vastaavia kvantiileja ( $t_{0,025}$  ja  $t_{0,975}$ ). Luottamusrajojen ohella testauksen tuloksen ilmoittamiseen käytetään tyypillisesti testin p-arvoa, joka ilmaisee pienintä riskiä, jolla nollahypoteesi voidaan käytetyn otoksen nojalla hylätä (Walpole *et al.* 2011). Testin p-arvo ratkaistiin niin ikään Excel-taulukkolaskentaohjelmalla t-jakauman kertymäfunktioista  $F(t_{test})$  kaksipuoleiselle testille:

$$p - arvo = 2 * \min[F(t_{test}), 1 - F(t_{test})]. \quad (27)$$

Ensimmäisessä testaustapauksessa vertailtaessa maanpeiteaineistojen ja maankäyttöluokitusten perusteella laskettuja osavaluma-aluekohtaisia keskimääräisiä valumakertoimia oli kyseessä kaksi parittaisista havainnoista muodostuvaa satunnaisotosta. Tällaisessa tapauksessa tilastollinen testaus voidaan suorittaa T-testillä vastinalkioista laskettujen realisoituneiden erotusten  $d_i$  perusteella:

$$d_i = x_{1,i} - x_{2,i}, \quad (28)$$

missä  $x_{1,i}$  edustaa maanpeiteaineistojen ja  $x_{2,i}$  maankäyttöluokitusten perusteella laskettuja keskimääräisiä osavaluma-aluekohtaisia valumakertoimia (Walpole *et al.* 2011). Nyt kaavoissa (25) ja (26) esiintyvien otoskeskiarvojen paikalle sijoitettiin erotusten keskiarvo  $\bar{d}$ , otoshajonnan paikalle erotusten hajonta ja odotusarvon referenssiarvona käytettiin nollaa.

Toisessa testaustapauksessa verrattaessa maanpeiteaineistojen perusteella maankäyttöluokitusrajausten mukaisille alueille laskettuja keskimääräisiä valumakertoimia suhteessa maankäyttöluokkien mukaisiin vakioarvoihin, oli kyseessä sen sijaan vain yhden otoksen odotusarvon testaus. Yhtälöissä (25) ja (26) otoskeskiarvo  $\bar{x}$  ja otoshajonta laskettiin maanpeiteaineistosta muodostettujen keskimääräisten valumakertoimien perusteella ja odotusarvon referenssiarvona  $\mu_0$  käytettiin kulloinkin tarkasteltavana olevan



maankäyttöluokan mukaista valumakertoimen referenssiarvoa (vrt. taulukko 16). Molemmissa testaustapauksissa lähtöoletuksena pidettiin, että valumakertoimien erotus voi saada niin positiivisia kuin negatiivisiakin arvoja.

Varsinaisen tilastollisen testauksen ohella maanpeiteaineistojen ja maankäyttöluokitusten tuottamien keskimääräisten valumakertoimien vertailussa hyödynnettiin erilaisia tilastollisia otossuureita, kuten otoskeskiarvoja, -keskihajontaa, -maksimia ja -minimiä, -mediaania sekä ala- ja yläkvartiileja. Lisäksi viimeksi mainittuja otoskvantiileja hyödynnettiin tuloksia havainnollistavien laatikko-jana-kuvioiden laadinnassa. Kuvioissa laatikko-osa eli kvartiiliväli muodostuu otoksen ylä- ja alakvartiilin välisestä osasta otosarvoja, jonka sisään 50 % otosarvoista sijoittuu. Vastaavasti laatikon keskiviiva edustaa otosmediaania, joka jakaa otoksen täsmälleen kahteen yhtä suureen osaan. Laatikon ulkopuoliset viikset merkkäävät otoksen maksimi- ja minimiarvoa.

## 5. TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU

### 5.1 Valumakertoimet

Työssä on vertailtu maanpeiteaineistojen ja maankäyttöluokkien vaikutusta keskimääräisiin valumakertoimiin Jyväskylän kohdealueilla, kun yksittäisten maankäyttö- ja maanpeiteluokkien valumakertoimet on valittu hulevesisuunnitteluoppaissa esitettyjen referenssiarvojen mukaisesti (kts. luku 4.4.1). Tarkastelut on suoritettu sekä osavaluma-aluekohtaisesti että asemakaavan osoittamien maankäyttöluokitusrajausten mukaisesti.

Osavaluma-aluekohtaisessa vertailussa on tarkasteltu maanpeiteaineistojen ja maankäyttöluokitusten perusteella laskettujen keskimääräisten valumakerrointen erotuksia. Valumakerrointen erotukset muodostettiin osavaluma-aluekohtaisesti havaintopareittain yhtälön (28) mukaisesti aina siten, että maanpeiteaineistojen mukaan lasketusta valumakertoimen arvosta vähennettiin maankäyttöluokitusten mukainen valumakerroin (liite C). Samassa yhteydessä on esitetty myös osavaluma-aluekohtaiset pinta-alat.

Maankäyttöluokitusrajausten mukaisessa tarkastelussa maanpeiteaineistojen perusteella laskettuja, asemakaavarajausten mukaisia, keskimääräisiä valumakertoimia on verrattu maankäyttöluokille kirjallisuudessa esitettyihin referenssiarvoihin (kts. taulukko 5 ja 16). Tarkastelussa maankäyttöluokitusrajaukset tehtiin kortteleittain siten, että mikäli yhteen kortteliin sisältyi useampi asemakaavarajausten mukainen yhtäläinen maankäyttöluokka, muodostettiin tästä vain yhden otosalkion muodostava luokitusrajaus (liite D). Osittain tästä syystä otosalkioiden pinta-aloissa esiintyy paikoin suhteellisen suurta vaihtelua. Tuloksissa kaikki valumakertoimet on ilmoitettu prosentteina.

#### 5.1.1 Osavaluma-aluekohtaiset valumakertoimet

Maanpeiteaineistojen ja maankäyttöluokitusten perusteella laskettujen osavaluma-aluekohtaisten valumakertoimien eroja arvioitiin kohdealueittain havaintoparien erotuksista laskettujen tilastollisten otossuureiden avulla (taulukko 22). Keskustan ja Halssilanmäen havaintoparien erotuksista poistettiin sellaiset yksittäiset poikkeavat arvot, jotka sijoittuivat laatikko-jana-kuvioissa silmän nähden selvästi erilleen kaikista muista otosarvoista (vrt. kuva 21). Tämän johdosta molempien kohdealueiden otoskoko pieneni kahdella arvolla: Keskustasta poistettiin yksi liikenne- ja toinen puistoaluetta edustava havaintopari, Halssilanmäestä puolestaan kaksi metsäaluetta edustavaa havaintoparia.

Keskustan kohdealueella valumakertoimien erotusten keskiarvo sai voimakkaasti negatiivisen arvon -8,0 otoshajonnan ollessa kuitenkin suhteellisen suuri (8,6) ja ulottuessa

**Taulukko 22.** Kohdealueille laskettujen valumakertoimien eroja kuvaavat tilastolliset otossuureet (kts. luku 4.6).

Tilastollinen otossuure	Kohdealue		
	Keskusta	Halssilanmäki	Mäki-Matti
Otoskoko, $n$	58 <sup>1</sup>	9 <sup>1</sup>	7
Erotusten otoskeskiarvo, $\bar{d}$	-8,0	9,1	5,4
Erotusten otoshajonta, $s$	8,6	1,7	3,6
Erotusten luottamusväli, 95 %	(-10,2 – -5,7)	(7,8 – 10,3)	(2,0 – 8,7)
Erotuksia kuvaavat otoskvantiilit			
Maksimi	100 %	10,8	11,1
Yläkvartiili	75 %	-1,2	10,1
Mediaani	50 %	-6,6	9,4
Alakvartiili	25 %	-14,9	8,2
Minimi	0 %	-26,6	5,6

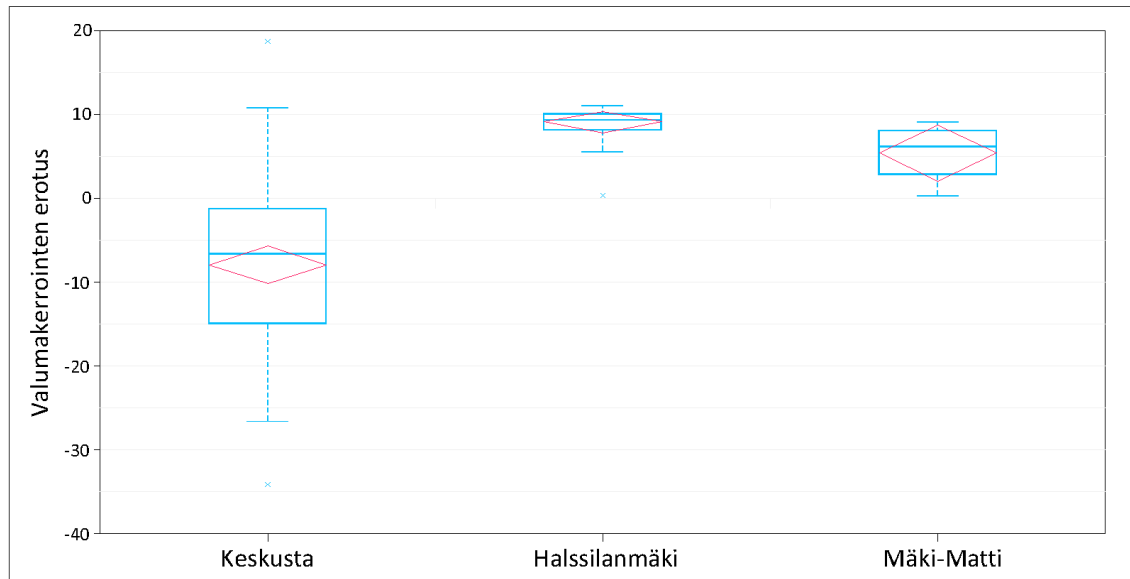
<sup>1</sup> Keskustan ja Halssilanmäen kohdealueiden otoksista poistettu molemmista kaksi arvoa, jotka poikkesivat selkeästi muista otosarvoista.

täten myös positiivisten erotusten puolelle. Halssilanmäen ja Mäki-Matin kohdealueilla valumakertoimien erotusten keskiarvot saivat sitä vastoin selvästi positiiviset arvot 9,1 ja 5,4 mainitussa järjestyksessä. Myös otoshajonta näillä alueilla oli pienempää (1,7 ja 3,6) Keskustan kohdealueeseen verrattuna.

Otoskeskiarvon ja -hajonnan ohella kohdealueiden valumakertoimien erotusten hajontaa kuvattiin tyypillisimpien otoskvantiilien sekä näitä havainnollistavien laatikko-janakuvioiden avulla (kuva 21). Kohdealueille laskettujen kvantiilien perusteella kvartiiliväli Keskustassa oli 160 ja 610 % suurempi kuin Halssilanmäessä tai Mäki-Matissa mainitussa järjestyksessä. Vastaava maksimi- ja miniarvojen väli Keskustassa oli 320 ja 580 % suurempi.

Laatikko-jana-kuvioissa on esitetty lisäksi kohdealueiden perusjoukon odotusarvoa kuvaavat keskiarvoruudut, joiden keskikohdalla on otoskeskiarvo ja joiden kärjet antavat valitun riskitason mukaisen 95 %:n luottamusvälin odotusarvolle (kts. taulukko 22). Luottamusvälit kohdealueiden perusjoukon odotusarvoille laskettiin yhtälön (26) mukaisesti. Keskiarvoruutujen sijainnin perusteella valumakertoimien erotuksen odotusarvo poikkeaa selvästi toisistaan eri kohdealueiden välillä. Odotusarvon poikkeavuutta kohdealueiden välillä ilmentää myös se, ettei yhdenkään kohdealueen mediaani sisälly muiden kohdealueiden kvartiiliväleihin. Lisäksi laatikko-jana-kuvioista nähdään, etteivät kohdealueiden otosten jakaumat ole täysin normaaleja. Tämä ei kuitenkaan tarkoita sitä, etteivät niiden taustalla olevat perusjoukot olisi normaalisti jakautuneita.

Kohdealueiden valumakertoimien erojen tilastollista merkitsevyyttä arvioitiin t-testillä. Tätä varten jokaisen kohdealueen otokselle laskettiin vapausasteiden lukumäärä, kriittinen t-arvo ja p-arvo yhtälön (27) mukaisesti (taulukko 23).



**Kuva 21.** Kohdealueille laskettujen valumakertoimien eroja havainnollistavat laatikko-jana-kuviot (kts. luku 4.6).

Tilastollisen testauksen mukaan jokaisella kohdealueella – Keskusta ( $2,3 \cdot 10^{-7}$  %), Halssilanmäki ( $1,9 \cdot 10^{-5}$  %) ja Mäki-Matti (0,81 %) – valumakertoimien erotukset eroavat tilastollisesti merkitsevästi toisistaan, kun testauksen riskitasona on 5 %:a. Toisin sanoen maanpeiteaineistojen ja maankäyttöluokitusten mukaan laskettujen osavalmualuekohtaisten valumakertoimien voidaan katsoa olevan erisuuria perusjoukkojensa osalta, eikä eroja voida selittää pelkällä otantavirheellä.

**Taulukko 23.** Kohdealueiden valumakertoimien erojen tilastollisen testauksen tunnusluvut (kts. luku 4.6).

Testin tunnusluvut	Kohdealue		
	Keskusta	Halssilanmäki	Mäki-Matti
Vapausasteet, $n - 1$	57	8	6
t-kriittinen, $t_{\alpha/2}$	2,00	2,31	2,45
p-arvo	2,3E-09	1,9E-07	8,1E-03

### 5.1.2 Maankäyttöluokitusrajausten mukaiset valumakertoimet

Maanpeiteaineistojen perusteella laskettuja valumakertoimia arvioitiin ensinnä vertaamalla niistä muodostettuja otoskeskiarvoja maankäyttöluokille määritettyihin valumakertoimen referenssiarvoihin ja näille kirjallisuudessa esitettyihin vaihteluväleihin (taulukko 24). Kuvissa ja taulukoissa eri kohdealueita ja maankäyttöluokkia edustuvat otokset on esitetty kohdealueen nimen ja maankäyttöluokan ensimmäisen kirjaimen osoittavalla lyhenteellä (vrt. taulukko 24). Keskustassa sekä liike- ja toimistorakennusten alueen (KL) että kerrostaloalueen (KK) otokset saivat selvästi referenssiarvojaan pienemmät keskimääräiset valumakertoimet. Keskustan liike- ja toimistorakennusten alueella

keskimääräisen valumakertoimen arvo jäi lisäksi referenssiarvolle esitetyn vaihteluvälin alapuolelle. Vastaavasti Halssilanmäen omakotitalo- (HO) ja rivitaloalueen (HR) sekä Mäki-Matin omakotitaloalueen (MO) otoksissa keskimääräiset valumakertoimen arvot olivat huomattavasti referenssiarvojaan suurempia. Erityisesti Halssilanmäessä ero referenssiarvoihin oli huomattava, omakotitaloalueen keskimääräisen valumakertoimen yltäessä reilusti referenssiarvon vaihteluvälin yläpuolelle.

**Taulukko 24.** Maankäyttöluokitusrajojen mukaisille alueille lasketut keskimääräiset valumakertoimet (%) ja näille kirjallisuudessa ilmoitetut referenssiarvot.

Lyh.	Alue	Maankäyttöluokka	Keskimääräinen valumakerroin	Referenssiarvo	Referenssiarvon vaihteluväli <sup>1</sup>
KL	Keskusta	Liike- ja toimistorakennusten alue	61,5	80	70 – 90
KK		Kerrostaloalue	58,1	70	50 – 90
HO	Halssilanmäki	Omakotitaloalue	40,0	25	20 – 30
HR		Rivitaloalue	47,0	35	30 – 50 <sup>2</sup>
MO	Mäki-Matti	Omakotitaloalue	28,6	20	20 – 30

<sup>1</sup> Suomalaisissa suunnitteluoppaissa esiintyvä vaihteluväli maankäyttöluokan valumakertoimelle (vrt. taulukko 5)

<sup>2</sup> Vaihteluväli lähteestä ASCE & WPCF (1970)

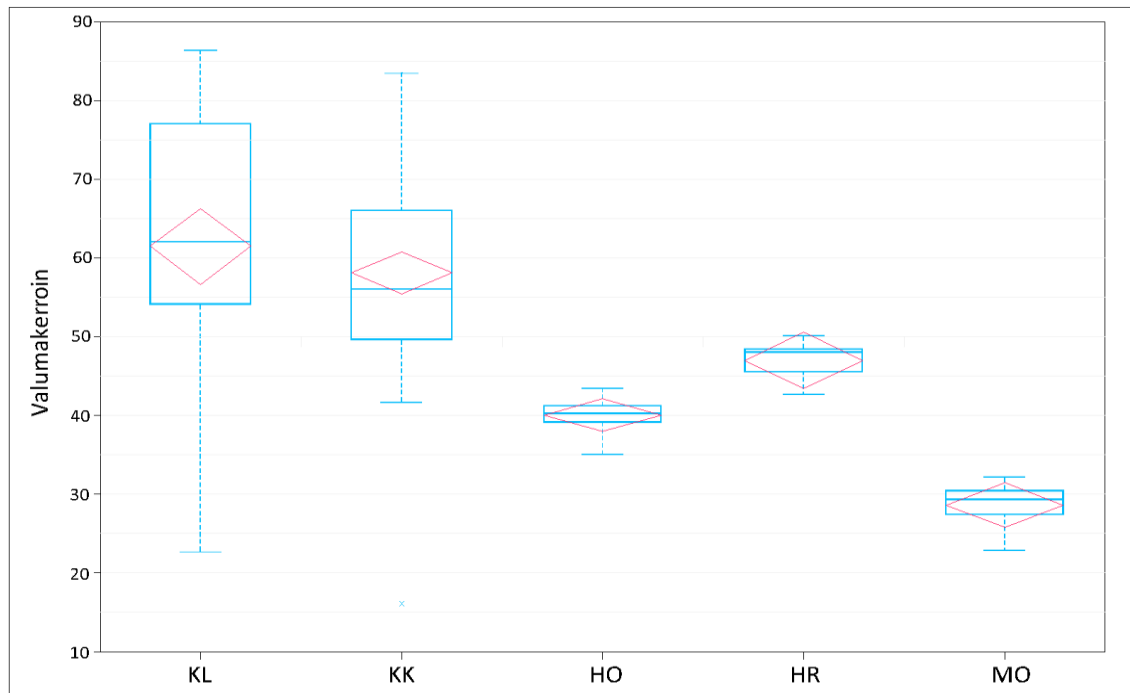
Keskimääräisen valumakertoimen ohella saatuja tuloksia arvioitiin myös muiden tilastollisten otossuureiden, kuten keskihajonnan, luottamusvälin ja kvantiilien perusteella (taulukko 25). Ainoana poikkeavana arvona otosten tilastollisten analyysien ulkopuolelle jätettiin Keskustan kerrostaloalueen (KK) järjestysnumerolla 25 oleva luokitusrajaus (vrt. kuva 22 & liite D). Suurin mielenkiinto tuloksissa keskittyi kohdealueiden välisen vertailun sijasta kohdealueiden sisäiseen eri maankäyttöluokkien sekä Halssilanmäen ja Mäki-Matin omakotitaloalueita edustavien otosten keskinäiseen vertailuun. Keskustassa liike- ja toimistorakennusten alueen (KL) otoshajonta oli 65 % kerrostaloaluetta (KK) suurempaa. Halssilanmäen sisäisten otosten (HO & HR) tai Halssilanmäen ja Mäki-Matin omakotitaloalueita edustavien otosten (HO & MO) välillä ei vastaavan suuruisia eroja otoshajontaan syntynyt pienemmän otoskoon aiheuttamasta satunnaisuudesta huolimatta.

Lasketut otoskvantiilit sekä 95 %:n luottamusvälit esitettiin graafisesti havainnollisemmassa muodossa laatikko-jana-kuvioiden ja keskiarvoruutujen avulla (kuva 22). Keskustassa liike- ja toimistorakennusten alueen (KL) kvartiiliväli oli 40 % suurempi kuin kerrostaloalueen (KK) ja vastaava maksimi- ja miniarvojen väli 73 % suurempi. Huomion arvoista keskustan otoksista oli myös niiden perusjoukon odotusarvoa kuvaavien luottamusvälien mukaisten keskiarvoruutujen päällekkäisyys. Laatikko-jana-kuvioiden perusteella otokset eivät myöskään ole täysin normaalisti jakautuneita.

Halssilanmäessä omakotitaloalueen (HO) kvartiiliväli oli puolestaan 29 % pienempi kuin rivitaloalueen (HR), mutta maksimi- ja minimiarvojen väli päinvastoin 11 % suu-

**Taulukko 25.** Kohdealueiden maankäyttöluokitusrajauksille maanpeiteaineistojen perusteella laskettuja valumakertoimia (%) kuvaavat otossuureet (kts. luku 4.6).

Tilastollinen otos- suure	Maankäyttöluokitusrajaus					
	KL	KK	HO	HR	MO	
Otoskoko, <i>n</i>	49	58	8	5	7	
Otoskeskiarvo,	61,5	58,1	40,0	47,0	28,6	
Otoshajonta, <i>s</i>	17,0	10,3	2,4	2,9	3,1	
Luottamusväli, 95 %	(56,6 – 66,3)	(55,4 – 60,8)	(38,0 – 42,1)	(43,4 – 50,6)	(25,8 – 31,5)	
<b>Otoskvanttiilit</b>						
Maksimi	100 %	86,4	78,5	43,5	50,2	32,2
Yläkvartiili	75 %	77,1	66,1	41,3	48,5	30,5
Mediaani	50 %	62,1	56,1	40,3	48,1	29,4
Alakvartiili	25 %	54,2	49,7	39,2	45,6	27,5
Minimi	0 %	22,7	41,7	35,1	42,7	22,9



**Kuva 22.** Kohdealueiden maankäyttöluokitusrajausten mukaisten alueiden valumakertoimien (%) hajontaa havainnollistavat laatikko-jana-kuviot (kts. luku 4.6).

rempi. Odotusarvon luottamusvälin osalta otokset erosivat toisistaan. Omakotitaloaluetta edustavista maankäyttörajauksista Mäki-Matin (MO) kvartiiliväli oli 33 % suurempi kuin Halssilanmäen (HO) ja vastaava maksimi- ja minimiarvojen väli 10 % suurempi. Huolimatta otosten yhtäläisestä maankäyttöluokasta niiden perusjoukkojen odotusarvot poikkesivat jo silmin nähden selvästi toisistaan, luottamusvälien rajojen välisen eron ollessa jo pelkästään 6,5 yksikköä.

Maanpeiteaineistojen perusteella laskettujen valumakertoimien ja niitä edustavien maankäyttöluokkien referenssiarvojen erojen tilastollista merkitsevyyttä arvioitiin yhden otoksen t-testillä. Tätä varten otoksille laskettiin vapausasteiden lukumäärä, kriittinen t-arvo sekä p-arvo yhtälön (27) mukaisesti (taulukko 26). Tilastollisen testauksen mukaan jokaisen otoksen maanpeiteaineistosta lasketut valumakertoimet eroavat tilastollisesti merkitsevästi niitä edustaville maankäyttöluokille määritetyistä referenssiarvoista (vrt. taulukko 24), kun testauksen riskitasona on 5 %:a. Toisaalta, mikäli Keskustan kerrostaloalueita (KK), Halssilanmäen rivitaloalueita (HR) ja Mäki-Matin omakotitaloalueita (MO) edustaville otoksille, joilla keskimääräinen valumakerroin sijoittui referenssiarvon vaihteluvälin sisäpuolelle, olisi osattu valita referenssiarvo riittävän läheltä maanpeiteaineistoista laskettua keskimääräistä valumakerrointa, ei tilastollisesti merkitsevää eroa olisikaan muodostunut perusjoukkojen välille.

**Taulukko 26.** Maankäyttöluokitusrajauksille maanpeiteaineistojen perusteella laskettujen valumakertoimien tilastollisen testauksen tunnusluvut (kts. luku 4.6).

Testin tunnusluvut	Maankäyttöluokitusrajaus				
	KL	KK	HO	HR	MO
Vapausasteet, $n - 1$	48	57	7	4	6
t-kriittinen, $t_{\alpha/2}$	2.01	2.00	2.36	2.78	2.45
p-arvo	7.8E-10	3.2E-12	5.0E-07	7.8E-04	3.3E-04

### 5.1.3 Valumakertoimien yleinen tarkastelu

Vaikka maankäyttö- ja maanpeiteluokille suunnitteluoppaissa esitettyjä valumakertoimia hyödyntävä rationaalinen menetelmä on kaikkein yleisin lähestymistapa hulevesijärjestelmien mitoittamiseen (Thanapuran *et al.* 2007; Dhakal *et al.* 2013), on maankäyttö- ja maanpeiteluokkien perusteella määritettyjen valumakerrointen keskinäiseen vertailuun kiinnitetty varsin vähän huomiota tieteellisessä tutkimuksessa. Tuoreet tutkimukset (mm. Verbeiren *et al.* 2013; Petrucci & Bonnehomme 2014) painottuvat enemmänkin maanpeiteaineistojen hyödyntämiseen hulevesivaluntamallien kalibroinnissa, jonka myötä tarve valumakertoimien analysoinnille on jäänyt taka-alalle hulevesimallinnukseen keskittyvässä tutkimuksessa. Suunnittelutyönä tehtävä hulevesimallinnus Suomessa perustuu kuitenkin edelleen lähes poikkeuksetta kalibroimattomiin valuntamalleihin, joten kysyntä menetelmille, joilla keskimääräisiä valumakertoimia pystytään arvioimaan tarkemmin, on vielä tulevaisuudessakin ilmeinen.

Maanpeiteaineistojen ja maankäyttöluokitusten perusteella lasketut niin osavalmualuekohtaiset kuin maankäyttöluokitusrajausten mukaiset valumakertoimet erosivat tilastollisesti merkitsevästi toisistaan, kun yksittäisten maankäyttö- ja maapeiteluokkien valumakertoimina käytettiin laskennassa suomalaisissa suunnitteluoppaissa niille esitettyjä arvoja (vrt. taulukko 16 & 17). Maankäyttöluokille lasketuista keskimääräisistä valumakertoimista Keskustan kerrostaloalueen, Halssilanmäen rivitaloalueen ja Mäki-

Matin omakotitaloalueen keskimääräiset valumakertoimet osuivat kuitenkin näille maankäyttöluokille kirjallisuudessa esitettyihin vaihteluväleihin (kts. taulukko 24).

Vastaavalla tavalla eri maankäyttöluokille määritettyjä maanpeiteaineistosta laskettuja keskimääräisiä valumakertoimia suhteessa niille kirjallisuudessa esitettyihin arvoihin ovat vertailleet Thanapura *et al.* (2007) Yhdysvalloissa, Dakotassa, Sioux Fallsin kaupungissa tekemässään tutkimuksessa. Thanapurin *et al.* (2007) omakotitaloille (tonttikoko 500–1000 m<sup>2</sup>), kerrostaloille sekä liike- ja toimistorakennuksille määrittämät keskimääräiset valumakertoimet ovat järjestäen noin 5–10 prosenttiyksikköä suurempia kuin tässä työssä saadut valumakertoimet. Tämä ero selittyy kuitenkin Thanapurin *et al.* (2007) käyttämällä erilaisella maanpeiteluokituksella sekä osittain suuremmilla maanpeiteluokkien valumakertoimilla: Tutkimuksessa alue oli jaettu läpäisemättömään pintaan ( $C=0,85$ ) ja viherpintaan, joka oli lisäksi jaettu 12:een maalajin ja rinnekaltevuuden mukaiseen alaluokkaan ( $C=0,08-0,30$ ). Keskimääräisten valumakertoimien vertailun referenssiarvoina Thanapura *et al.* (2007) ovat käyttäneet ASCE:n ja WPCF:n (1970) yhteisjulkaisussa esitettyjä maankäyttöluokittaisia valumakertoimien vaihteluvälejä, jotka ovat osittain laajemmat kuin vastaavat suomalaisissa suunnitteluoppaissa esitetyt vaihteluvälit (vrt. taulukko 5). Tutkimuksen johtopäätöksenä maankäyttöluokkien keskimääräisten valumakertoimien onkin todettu vastaavan niille kirjallisuudessa esitettyjä referenssiarvoja. Toisaalta myös tässä työssä saadut keskimääräiset valumakertoimet olisivat sijoittuneet Thanapurin *et al.* (2007) käyttämien referenssiarvojen vaihteluvälille.

Osavaluma-aluekohtaisessa valumakertoimien vertailussa valumakertoimien erotus sai Keskustassa vahvasti negatiivisen arvon kun taas Halssilanmäessä ja Mäki-Matissa erotus oli selvästi positiivinen. Vaikka tuoreimmat tutkimukset (mm. Verbeiren *et al.* 2013; Krebs *et al.* 2014; Petrucci & Bonhomme 2014) osoittavat korkean resoluution maanpeiteaineistojen antavan realistisempia arvioita valumakertoimista perinteisiin maankäyttöluokituksiin verrattuna, ei tämä silti automaattisesti tarkoita sitä, että maankäyttöluokitukset välttämättä yliarvioisivat keskusta-alueiden valumakertoimia ja vastaavasti aliarvioisivat omakotitaloalueiden valumakertoimia. Nimittäin huolimatta maanpeiteaineistojen objektiivisesta tuottamistavasta, on varsinainen valumakertoimien valinta maanpeiteluokille edelleen varsin subjektiivista. Esimerkkinä kohdealueiden maanpeiteaineistoista (liite A) suhteellisen suurta osaa niiden pinta-alasta peittää muun läpäisemättömän pinnan -luokka, jolle suoranaisia referenssiarvoja ei kirjallisuudessa ole esitetty. Lisäksi jonkin asteista epävarmuutta muun läpäisemättömän pinnan määrässä aiheuttaa NDVI-rasterilta tehty maanpeiteluokitus, joka Wengin (2012) mukaan kasvukauden aikana tehtynä yliarvioisi kasvillisuuden määrää suhteessa läpäisemättömään pintaan.

Maanpeiteaineistojen perusteella lasketut valumakertoimet eivät välttämättä vastaa todellisia huippuvalumakertoimia, vaan edustavat ainoastaan kirjallisuusarvojen (kts. taulukko 17) perusteella laskettua arviota. Näin ollen tulosten perusteella ei pystytä millään



tavoin ottamaan kantaa siihen, ovatko suunnitteluoppaissa esitetyt maanpeite- tai maankäyttöluokittaiset valumakertoimet liian suuria Suomen olosuhteisiin Sillanpään & Koivusalon (2014) epäilemän mukaisesti. Työssä kehitetty menetelmä maanpeiteaineistojen tuottamiseen tarjoaa kuitenkin erinomaisen lähtökohdan maanpeiteluokkia vastaavien todellisten valumakertoimien kalibroimiseen sadanta-valuntamittausten perusteella. Menetelmän soveltuvuus maanpeiteaineistojen tuottamiseen kaikkialla Suomessa mahdollistaisikin jo olemassa olevien sadanta-valuntamittausaikaasarjojen hyödyntämisen maanpeiteluokkien todellisten valumakertoimien määrittämisessä. Tämä tosin edellyttää, ettei alueilla, joilla sadanta-valuntamittaukset on toteutettu, ole tapahtunut oleellisia muutoksia maankäytössä mittausajankohdasta nykyhetkeen. Esimerkkinä sekä Sillanpään (2013) Espoon koevaluma-alueilla että Krebsin *et al.* (2014) Lahden tutkimusvaluma-alueilla käyttämät useamman vuoden pituiset mittausaikaasarjat tarjoaisivat erinomaisen lähtökohdan maanpeiteluokkien valumakertoimien kalibrointiin usealla maankäyttöltään toisistaan eroavalla, mutta tyypillisellä taajamavaluma-alueella. Tällöin kertaalleen kalibroidut maanpeiteluokittaiset valumakertoimet olisivat suhteellisen hyvällä luotettavuudella hyödynnettävissä myös muilla taajamavaluma-alueilla Krebsin *et al.* (2014) esittämän mukaisesti.

Huolimatta siitä, etteivät työssä tuotetut keskimääräiset valumakertoimet välttämättä täysin vastaa todellisia huippuvalumakertoimia, soveltuvat ne kuitenkin hyvin maankäyttöluokille maanpeiteaineistojen perusteella määritettyjen valumakertoimien keskinäisten suhteiden vertailuun. Keskustassa liike- ja toimistorakennusten alueen sekä kerrostaloalueen maankäyttöluokille maanpeiteaineistojen perusteella määritettyjen keskimääräisten valumakertoimien ero osoittautui kirjallisuudessa esitettyjä referenssiarvoja selvästi pienemmäksi, kun taas Halssilanmäessä omakotitaloalueen ja rivitaloalueen välinen ero vastasi hyvin oletettua (vrt. taulukko 25 & kuva 22). Huomionarvoista on myös yli 10 prosenttiyksikön ero Halssilanmäen ja Mäki-Matin omakotitaloalueiden keskimääräisissä valumakertoimissa.

Havaitut erot tuovat esiin maanpeiteaineistojen ensimmäisen selkeän edun maankäyttöluokkiin verrattuna: Maanpeiteaineistoja käytettäessä eri alueiden väliset suhteelliset erot keskimääräisissä valumakertoimissa tulevat aina objektiivisesti kuvatuiksi niiden todellisen maanpeitteen mukaisesti, eivätkä ole yhtä herkkiä suunnittelijan tekemille subjektiivisille valinnoille luokkakohtaisten valumakertoimien valinnan suhteen kuin maankäyttöluokat. Tulokset antavat myös vahvan viitteen siitä, että maankäyttöluokkia käytettäessä uudet tiiviit ja vanhat väljemmät omakotitaloalueet tulisi ehdottomasti huomioida omina eri valumakertoimen omaavina maankäyttöluokkinaan.

Tuloksista kaikkein oleellisimman asian välittävät niin osavaluma-aluekohtaisten kuin maankäyttöluokitusrajausten mukaisten valumakertoimien otosten hajontaa kuvaavat tilastolliset otossuureet. Käytännössä, mitä suurempaa näitä otoksia kuvaava hajonta on, sitä paremmin maanpeiteaineistot soveltuvat suhteessa maankäyttöluokituksiin kuvaamaan näiden otosten mukaisilla alueilla muodostuvaa valuntaa. Halssilanmäessä ja Mä-

ki-Matissa, joissa otosten hajonta on pientä, kohdealueet rajoittuvat tarkasti hyvin yhtenevää rakentamista edustaviin alueisiin, mikä tekee niiden maankäyttöluokista maanpeitteeltään suhteellisen homogeenisiä. Tällaisessa tapauksessa maankäyttöluokitukset pystyvät kuvaamaan valumakertoimien spatiaalista vaihtelua valuma-alueella lähes yhtä hyvin kuin maanpeiteaineistot.

Sitä vastoin Keskustassa, missä otosten hajonta on suurta, kohdealueen sisälle mahtuu luonteeltaan toisistaan selkeästi poikkeavia alueita, mikä aiheuttaa maankäyttöluokkien sisällä voimakasta heterogeenisyyttä maanpeitteen suhteen. Esimerkkinä Keskustan kerrostaloalueiden maankäyttöluokassa aivan ydinkeskustassa sijaitsevat kerrostaloalueet saattavat poiketa maanpeitteeltään huomattavasti laita-alueiden kerrostaloalueista, mikä on omiaan aiheuttamaan suurta hajontaa valumakertoimissa. Siten maankäyttöluokitukset eivät sovellu kuvaamaan valumakertoimien spatiaalista vaihtelua valuma-alueella toisin kuin maanpeiteaineistot. Johtopäätöksenä saaduista tuloksista voidaan todeta, että valuma-alueen koon ja sen myötä maankäytön heterogeenisyyden kasvaessa, korostuu maanpeiteaineistojen kyky kuvata valumakertoimien spatiaalista vaihtelua suhteessa maankäyttöluokkiin.

Vastaavia tutkimuksia, joissa maanpeiteaineistojen ja maankäyttöluokkien tuottamien valumakertoimien hajontaa olisi suoranaisesti arvioitu suhteessa toisiinsa, ei juurikaan ole olemassa. Useammassa tuoreessa tutkimuksessa (mm. Verbeiren *et al.* 2013; Krebs *et al.* 2014; Petrucci & Bonhomme 2014) on kuitenkin selvitetty maanpeiteaineistojen spatiaalisen tarkkuuden vaikutuksia hulevesivalunnan muodostumiseen koejärjestelyillä, jossa maanpeiteaineistojen spatiaalista tarkkuutta on kasvatettu vaiheittain. Yhtäläistä näille kaikille tutkimuksille on ollut, että maanpeiteaineistojen suuremman spatiaalisen tarkkuuden on paitsi todettu vaikuttavan muodostuvaan hulevesivaluntaan, myös parantavan mallinnustuloksia merkittävästi verrattuna mitattuun dataan. Näin ollen tehdyt tutkimukset korostavat nyt tehtyä johtopäätöstä maanpeiteaineistojen merkityksestä valumakertoimien spatiaalisen vaihtelun kuvaamisessa erityisesti maankäytöltään heterogeenisillä valuma-alueilla.

## 5.2 Hulevesivirtaamat

Työssä tehdyt hulevesivirtaamatarkastelut on jaettu kolmeen erilliseen kategoriaan: ensimmäisessä on tarkasteltu mitoitussateen ajallisen muodon, toisessa vertailtu maankäyttö- ja maanpeiteluokitusten antamien valumakertoimien, ja kolmannessa tutkittu hulevesivaluntamallin valinnan vaikutuksia hulevesivirtaamiin. Kaikissa muissa kategoriaissa, ensimmäistä mitoitussateen ajallisen muodon vaikutuksia koskevaa tarkastelua lukuun ottamatta, mallinnuksessa mitoitussateena on käytetty keskitettyä CDS-mitoitussadetta (kts. kuva 16).

Huolimatta taajama-alueiden hulevesiviemäreiden mitoituksessa tavallisesti käytettyjä mitoitussateita toistuvuudeltaan yleisemmän mitoitussateen valinnasta, ei lähtötavoit-

teen vastaisesti täyden putken virtaamien esiintymiseltä, eikä mitoitussateen aikaiselta tulvimiselta välttytty kaikilla kohdealueilla. Tämän vuoksi tarkasteluissa huomioitiin hulevesiverkoston tarkastelupisteellä esiintyvän huippuvirtaaman, sen viiveen sekä kokonaisvirtaaman lisäksi myös hulevesiverkostosta pinnalle tulviva vesimäärä.

### 5.2.1 Mitoitussateen vaikutus hulevesivirtaamiin

Sateen ajallisen muodon vaikutuksen hulevesivirtaamiin voidaan lähtökohtaisesti olettaa olevan suurimmillaan tilanteissa, joissa myös läpäisevät alueet alkavat tuottaa valuntaa keskellä sadetapahtumaa. Valitun mitoitussateen koko sadetapahtuman aikainen kertymä (11,4 mm) on kuitenkin selvästi kohdealueiden läpäiseville alueille kirjallisuuden perusteella määritettyjä alkuhäviöitä pienempi (vrt. taulukko 18). Tämän vuoksi tarkastelua varten luotiin kuvitteellinen tilanne, jossa varsinaista mitoitussadetta oletettiin edeltäneen jo toinen pidempikestoinen sadetapahtuma, joka oli ehtinyt jo kuluttaa osan kohdealueiden läpäisevien pintojen alkuhäviöistä. Täten sateen ajallisen muodon vaikutuksia tarkasteltaessa jokaisen kohdealueen läpäisevien pintojen alkuhäviöinä käytettiin 5,7 mm:ä, jolloin tasaisella sateen intensiteetillä ne alkaisivat tuottaa valuntaa ajallisesti sadetapahtuman puolivälissä.

Mallinnukset ajettiin jokaisella kohdealueella mitoitussateen neljällä erilaisella muodolla (vrt. kuva 16). Mitoitussateen ajallisen muodon vaikutuksia kohdealueilla muodostuviin hulevesivirtaamiin arvioitiin tarkastelupisteiden huippuvirtaamien, huippuvirtaamien viiveen, verkostoissa mitoitussateen aikana tulvivien kaivojen lukumäärän sekä pinnalle yhteensä tulvivan vesimäärän perusteella (taulukko 27). Mitoitussateiden välisessä vertailussa tarkasteltavia suureita verrattiin aina suorakulmiosateella saatuihin tuloksiin. Tarkastelupisteillä havaituista virtaamista muodostettiin lisäksi virtaaman sadetapahtuman aikaista kehitystä kuvaavat virtaama-aikakäyrät (kuva 23). Huippuvirtaamien viiveet laskettiin huippuvirtaaman ja mitoitussateen intensiteettihuipun ajankohdan erotuksena minuutin tarkkuudella. Keskustassa ja Halssilanmäessä mitoitussateiden aikaisen verkostotulvimisen merkitystä analysoitiin lisäksi alueellisesti verkostokartan perusteella (liite E). Mäki-Matissa mitoitussateiden aikaista tulvimista ei esiintynyt.

Suurin mitoitussateen aikainen huippuvirtaama kaikilla kohdealueilla esiintyi ajallisesti kiihtyvän intensiteetin omaavalla CDS-sateella. Samoin mitoitussateen intensiteettihuipun ja huippuvirtaaman välinen viive oli kaikilla kohdealueilla pienimmillään kiihtyvällä CDS-sateella. Yleisesti ottaen huippuvirtaamat kasvoivat CDS-sateita käytettäessä, eniten kiihtyvän ja vähiten heikkenevän intensiteetin omaavilla sadetapahtumilla. Vastaava muutos oli havaittavissa myös huippuvirtaaman viiveen lyhentymisessä CDS-sateita käytettäessä. Poikkeuksen tähän yleiseen linjaan tekevät Keskustan tarkastelupisteellä 1 tehdyt heikkenevän CDS-sateen aikaiset havainnot sekä Keskustan tarkastelupisteen 2 huippuvirtaamahavainnot. Vastoin kaikissa muissa simulaatioissa saatuja tuloksia, heikkenevällä CDS-sateella tehdyssä simulaatiossa Keskustan tarkastelupisteen 1 huippuvirtaama pieneni 17 %:lla suorakulmiosateella saatuaan huippuvirtaamaan näh-

**Taulukko 27.** Mitoitussateen ajallisen muodon vaikutuksia kohdealueiden huippuvirtaamiin ja verkostotulvimiseen kuvaavat tarkastelusuureet.

Tarkastelusuure	Suorakulmiosade	CDS					
		(keskitetty)			(heikkenevä)		
<b>Keskusta, tarkastelupiste 1<sup>1</sup></b>							
Huippuvirtaama <sup>2</sup> [l/s]	2216	2589	(+17 %)	1844	(-17 %)	2944	(+33 %)
Huippuvirtaaman viive <sup>3</sup> [min]	10	8	(-2)	14	(+4)	6	(-4)
<b>Keskusta, tarkastelupiste 2<sup>1</sup></b>							
Huippuvirtaama <sup>2</sup> [l/s]	793	897	(+13 %)	954	(+20 %)	871	(+10 %)
Huippuvirtaaman viive <sup>3</sup> [min]	7	3	(-4)	5	(-2)	2	(-5)
<b>Keskusta, yhteensä</b>							
Tulvivien kaivojen lkm <sup>4</sup>	4	8	(+4)	7	(+3)	9	(+5)
Tulviva vesimäärä <sup>5</sup> [m3]	54	143	(+165 %)	80	(+48 %)	153	(+183 %)
<b>Halssilanmäki<sup>1</sup></b>							
Huippuvirtaama <sup>2</sup> [l/s]	195	206	(+6 %)	202	(+4 %)	208	(+7 %)
Huippuvirtaaman viive <sup>3</sup> [min]	6	1	(-5)	3	(-3)	1	(-5)
Tulvivien kaivojen lkm <sup>4</sup>	6	8	(+2)	8	(-2)	10	(-4)
Tulviva vesimäärä <sup>5</sup> [m3]	65	84	(+31 %)	77	(+18 %)	92	(+42 %)
<b>Mäki-Matti<sup>1</sup></b>							
Huippuvirtaama <sup>2</sup> [l/s]	150	233	(+55 %)	211	(+41 %)	241	(+60 %)
Huippuvirtaaman viive <sup>3</sup> [min]	7	3	(-4)	5	(-2)	2	(-5)

<sup>1</sup> Tarkastelupisteet sijaitsevat kohdealueen käsittämän valuma-alueen hulevesiverkoston purkupisteissä

<sup>2</sup> Huippuvirtaaman prosentuaalinen muutos suorakulmiosateeseen verrattuna suluissa

<sup>3</sup> Sateen intensiteettihiipun ja huippuvirtaaman välisen viiveen absoluuttinen muutos suorakulmiosateeseen verrattu suluissa

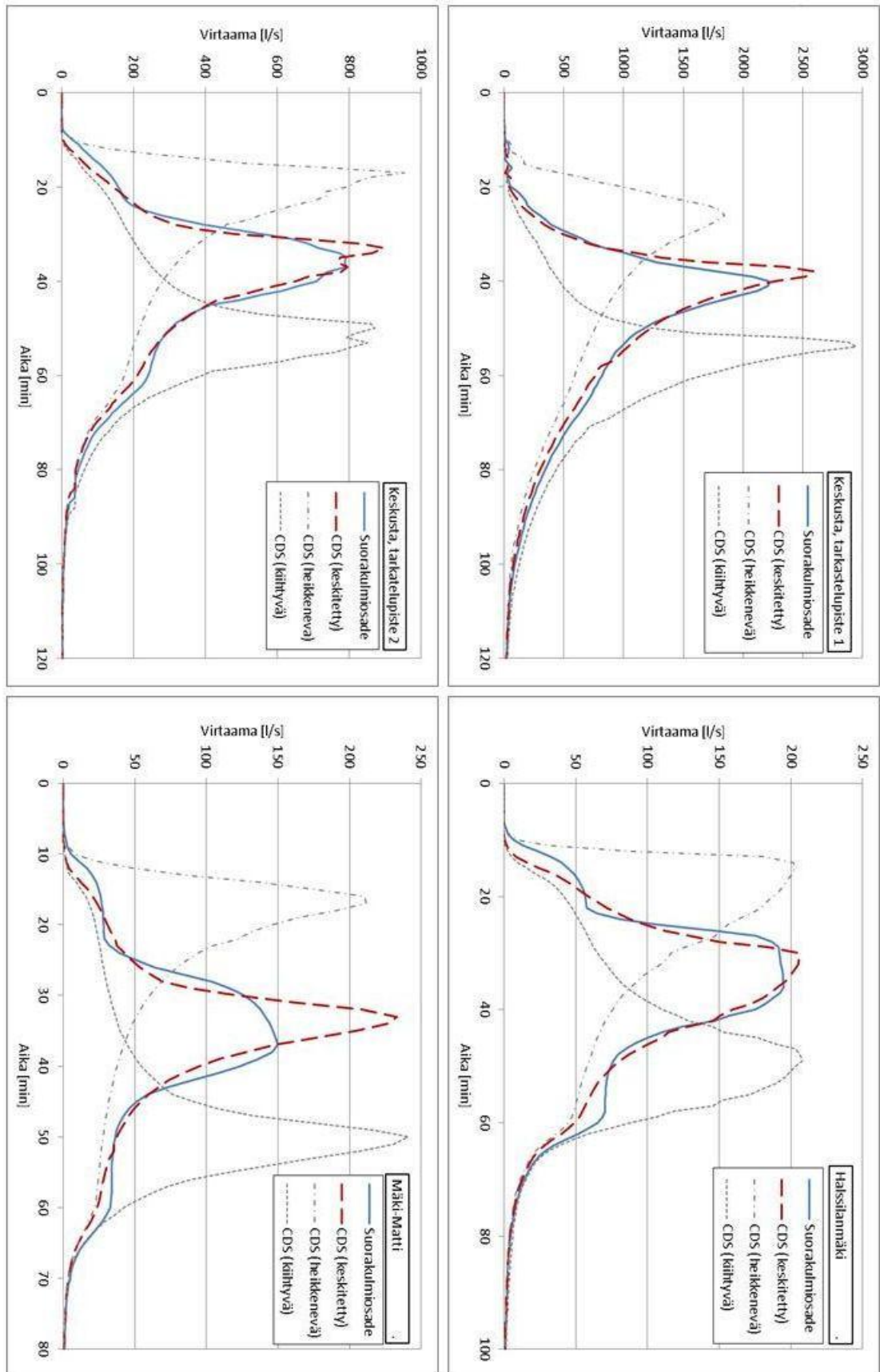
<sup>4</sup> Tulvivien kaivojen lukumäärän muutos suorakulmiosateeseen verrattu suluissa

<sup>5</sup> Tulvivan vesimäärän prosentuaalinen muutos suorakulmiosateeseen verrattuna suluissa

den. Myös sateen intensiteettihiipun ja huippuvirtaaman välinen viive kasvoi neljällä minuutilla. Vastaavasti Keskustan tarkastelupisteellä 2 huippuvirtaaman suhteellinen kasvu oli suurinta heikkenevällä ja pienintä kiihtyvällä CDS-sateella.

Suurimmillaan CDS-sateiden väliset erot huippuvirtaamien muutoksissa olivat Keskustan tarkastelupisteellä 1. Sitä vastoin suurimmat muutokset huippuvirtaamissa suorakulmiosateen ja CDS-sateiden välillä havaittiin Mäki-Matissa. Siellä CDS-sateiden tuottamat virtaama-aikakäyrät olivat myös selvästi terävämpiä verrattuna suorakulmiosateen tuottamaan virtaama-aikakäyrään. Pienimmillään muutokset niin CDS-sateiden välillä kuin suhteessa suorakulmiosateeseen olivat puolestaan Halssilanmäessä.

Keskustassa ja Halssilanmäessä, missä verkostotulvimista esiintyi, lisääntyi tulviminen CDS-sateita käytettäessä niin tulvivien kaivojen lukumäärässä kuin vesimäärässäkin mitattuna. Huippuvirtaamien tavoin tulviminen lisääntyi kasvavassa järjestyksessä siirryttäessä heikkenevästä keskitettyyn ja edelleen kiihtyvään CDS-sateeseen. Prosentuaaliset muutokset tulvivassa vesimäärässä suorakulmiosateen ja CDS-sateiden välillä olivat Keskustassa moninkertaiset Halssilanmäkeen verrattuna. Keskustassa tulviminen



**Kuva 23.** Kohdealueiden tarkastelupisteillä havaitut hulevesivirtaamat mitoitusteen erilaisilla ajallisilla muodoilla.

painottui tarkastelupisteiltä katsottuna etäisimpiin kohdealueen luoteisosiin, missä verkosto oli putkikooltaan pienekkää (300 mm). CDS-sateiden aikana tulvimista esiintyi lisäksi tarkastelupisteelle 2 luoteen suunnasta laskevien suurempien hulevesiviemäreiden (800 mm) kohdalla. Halssilanmäessä kaikki tulviminen tapahtui käytännössä katsottuna tarkastelupisteelle luoteen suunnasta laskevassa verkostohaarassa.

## 5.2.2 Maanpeiteluokituksen vaikutus hulevesivirtaamiin

Maanpeiteluokitusten vaikutusta hulevesivirtaamiin maankäyttöluokkiin verrattuna tarkasteltiin neljällä erilaisella mallinnusskenaariolla. Ensimmäisessä skenaariossa simulaatiot tehtiin perinteisillä maankäyttöluokilla niille suomalaisten suunnitteluoppaiden perusteella määritettyjen valumakertoimien perusteella (kts. taulukko 16). Toisessa skenaariossa maankäyttöluokkien valumakertoimina käytettiin maanpeiteaineistojen perusteella niille muodostettuja pinta-aloilla painotettuja maankäyttöluokkakohtaisia keskiarvoja. Käytännössä tämä valuntamalli oli näin ollen kalibroitu tuottamaan yhtä suuri verkoston kokonaisvirtaama kuin maanpeiteaineistojen mukainen valuntamalli edellyttäen, että molemmissa valuntamalleissa alkuhäviöt ovat samansuuruiset. Kolmannessa skenaariossa simulaatiot suoritettiin maanpeiteaineistojen pohjalta kehitetyllä valuntamallilla, jossa läpäisemättömät ja läpäisevät pinnat on jaettu omiksi valuntaa tuottavaksi osa-alueikseen. Neljännessä skenaariossa valumakertoimet laskettiin kolmannen skenaarion tavoin maanpeiteaineistojen perusteella, mutta nyt läpäisemättömiä ja läpäiseviä alueita ei käsitelty erillisinä, ja yhteisinä alkuhäviöinä oli maankäyttöluokista muodostettujen valuntamallien tavoin 1 mm.

Maanpeiteaineiston vaikutusta kohdealueilla muodostuviin hulevesivirtaamiin arvioitiin samoin tarkastelusuurein kuin mitoitussateen ajallisen muodonkin vaikutuksia: tarkastelupisteiden huippuvirtaamien, sateen intensiteettihiipun ja huippuvirtaaman välisen viiveen, verkostossa mitoitussateen aikana tulvien kaivojen lukumäärän sekä pinnalle yhteensä tulvivan vesimäärän perusteella (taulukko 28). Lisäksi tarkasteluun otettiin mukaan hulevesiverkostossa sadetapahtuman aikana kumuloitunut kokonaisvirtaama, johon laskettiin mukaan tarkastelupisteiden virtaamakertymät sekä verkostosta pinnoille tulviva ja ylivuotojen kautta karkaava vesimäärä. Mallinnusskenaarioiden välisessä vertailussa tarkastelusuureita verrattiin aina perinteisillä maankäyttöluokilla tehdyn simulaation tuloksiin. Tarkastelusuureiden lisäksi mallinnusskenaarioiden vertailussa hyödynnettiin tarkastelupisteiden virtaama-aikakäyriä (kuva 24) sekä Keskustan ja Halssilanmäen tulvakarttoja (liite F).

Maankäyttöluokkien ja maanpeiteaineistojen perusteella laskettujen kumuloituneiden kokonaisvirtaamien erot kohdealueilla mallinnusskenaarioiden 1 ja 3 välillä ovat oletetun mukaisesti suoraan verrannollisia maankäyttö- ja maanpeiteluokitusten perusteella laskettujen valumakertoimien erotuksiin (vrt. kuva 21). Myös kalibroittujen maankäyttöluokkien ja maanpeiteaineistojen (IL = 1 mm) voidaan todeta vastaavan melko hyvällä

**Taulukko 28.** Maanpeiteaineistojen vaikutuksia kohdealueiden huippuvirtaamiin ja verkostotulvimiseen maankäyttöluokkiin verrattuna kuvaavat tarkastelusuureet.

Tarkastelusuure	Maankäyt- töluokat	Maankäyttö- luokat, kalib.	Maanpeite- aineisto	Maanpeiteaineisto (IL=1mm)
<b>Keskusta, tarkastelupiste 1<sup>1</sup></b>				
Huippuvirtaama <sup>2</sup> [l/s]	2947	2203 (-25 %)	2514 (-15 %)	2548 (-14 %)
Huippuvirtaaman viive <sup>3</sup> [min]	9	10 (+1)	9 (±0)	9 (±0)
<b>Keskusta, tarkastelupiste 2<sup>1</sup></b>				
Huippuvirtaama <sup>2</sup> [l/s]	928	890 (-4 %)	900 (-3 %)	948 (+2 %)
Huippuvirtaaman viive <sup>3</sup> [min]	2	3 (+1)	3 (+1)	3 (+1)
<b>Keskusta, yhteensä</b>				
Tulvivien kaivojen lkm <sup>4</sup>	16	9 (-7)	8 (-8)	10 (-6)
Tulviva vesimäärä <sup>5</sup> [m3]	386	217 (-44 %)	123 (-68 %)	200 (-48 %)
Kum. kokonaisvirtaama <sup>6</sup> [m3]	5176	4549 (-12 %)	4668 (-10 %)	4731 (-9 %)
<b>Halssilanmäki<sup>1</sup></b>				
Huippuvirtaama <sup>2</sup> [l/s]	202	205 (+2 %)	209 (+3 %)	207 (+3 %)
Huippuvirtaaman viive <sup>3</sup> [min]	1	1 (±0)	1 (±0)	1 (±0)
Tulvivien kaivojen lkm <sup>4</sup>	7	10 (+3)	8 (+1)	10 (+3)
Tulviva vesimäärä <sup>5</sup> [m3]	273	314 (+15 %)	307 (+12 %)	315 (+15 %)
Kum. konaisvirtaama <sup>6</sup> [m3]	333	419 (+26 %)	386 (+16 %)	424 (+27 %)
<b>Mäki-Matti<sup>1</sup></b>				
Huippuvirtaama <sup>2</sup> [l/s]	205	250 (+22 %)	222 (+8 %)	248 (+21 %)
Huippuvirtaaman viive <sup>3</sup> [min]	4	3 (-1)	3 (-1)	3 (-1)
Kum. kokonaisvirtaama <sup>6</sup> [m3]	179	212 (+18 %)	193 (+7 %)	210 (+17 %)

<sup>1</sup> Tarkastelupisteet sijaitsevat kohdealueen käsittämän valuma-alueen hulevesiverkoston purkupisteissä

<sup>2</sup> Huippuvirtaaman prosentuaalinen muutos maankäyttöluokat-skenaarioon verrattuna suluissa

<sup>3</sup> Sateen intensiteettihuipun ja huippuvirtaaman välisen viiveen absoluuttinen muutos maankäyttöluokat-skenaarioon verrattu suluissa

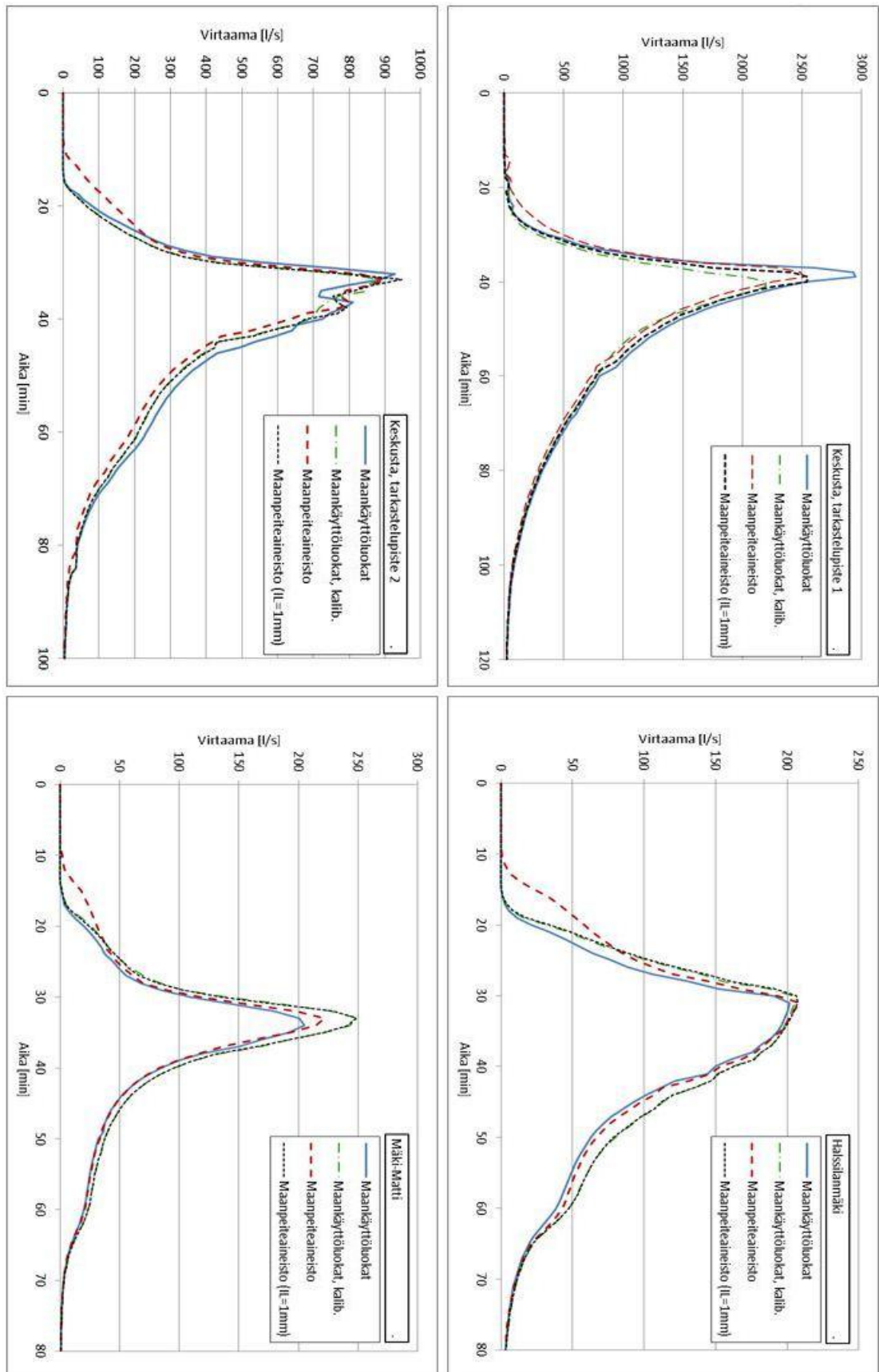
<sup>4</sup> Tulvivien kaivojen lukumäärän muutos maankäyttöluokat-skenaarioon verrattuna suluissa

<sup>5</sup> Tulvivan vesimäärän prosentuaalinen muutos maankäyttöluokat-skenaarioon verrattuna suluissa

<sup>6</sup> Kokonaisvirtaaman prosentuaalinen muutos maankäyttöluokat-skenaarioon verrattuna suluissa

tarkkuudella kumuloituneelta kokonaisvirtaamaltaan toisiaan mallinnusskenaarioissa 2 ja 4. Ainoastaan Keskustassa näiden kumuloituneiden kokonaisvirtaamien välinen ero on yli yhden prosenttiyksikön suuruinen. Tämä viittaa maankäyttöluokkien valumaker-  
toimien kalibroinnin onnistumiseen mallinnusskenaariossa 2, vaikka niissä lievää epä-  
tarkkuutta Keskustassa esiintyykin.

Huippuvirtaamien väliset erot eri mallinnusskenaarioiden välillä ovat selkeimmät Kes-  
kustan tarkastelupisteellä 1 ja Mäki-Matissa. Keskustan tarkastelupisteellä 1 mallin-  
nusskenaarioiden 2, 3 ja 4 aikaiset huippuvirtaamat olivat selvästi perinteisten maan-  
käyttöluokitusten perusteella mallinnettua huippuvirtaamaa pienemmät (14–25 %), kun  
taas Mäki-Matissa ero oli yhtä selkeä mutta päinvastainen (8–22 %). Keskustan tarkas-  
telupisteellä 2 tai Halssilanmäessä ei vastaavan suuruisia eroja huippuvirtaamissa ha-  
vaittu. Erityishuomiona Keskustan tarkastelupisteellä 1 maanpeiteaineistojen, joilla al-



**Kuva 24.** Kohdealueiden tarkastelupisteillä havaitut hulevesivirtaamat maankäyttö- ja maanpeiteluokitusten perusteella tehdyissä simulaatioissa.



kuhäviö on 1 mm:n, tuottama huippuvirtaama oli yli 300 l/s suurempi kuin kalibroituja maankäyttöluokkien tuottama huippuvirtaama. Vastaavasti Mäki-Matissa näiden mallinnusskenaarioiden tuottamat huippuvirtaamat olivat lähestulkoon yhtä suuret, mutta sitä vastoin läpäisemättömät ja läpäisevät pinnat erikseen huomioivien maanpeiteaineistojen tuottama huippuvirtaama mallinnusskenaariossa 3 oli lähes 30 l/s edellä mainittuja skenaarioita pienempi. Virtaama-aikakäyrillä läpäisemättömät ja läpäisevät pinnat erikseen huomioivat maanpeiteaineistot erottuvat muista mallinnusskenaarioista virtaaman nopeampana kehittymisenä sadetapahtuman alussa, mutta erot kuitenkin tasaittuvat nopeasti mitoitussateen huippuintensiteetin ajankohtaa lähestyttäessä. Sateen intensiteetti-huipun ja huippuvirtaaman välisessä viiveessä ainut ero (1 min) havaittiin kalibroituilla maankäyttöluokilla Keskustan tarkastelupisteellä 1.

Keskustassa, missä verkostotulvimista esiintyi, erot tulvivien kaivojen lukumäärässä ja pinnoille tulvivassa vesimäärässä eivät eri mallinnusskenaarioiden välille olleet keskenään samassa suuruusjärjestyksessä kuin muutokset huippuvirtaamassa ja kumuloituneessa kokonaisvirtaamassa. Erityisesti läpäisemättömät ja läpäisevät pinnat erikseen huomioivilla maanpeiteaineistoilla tehdyssä simulaatiossa tulviva vesimäärä on selvästi kalibroituilla maankäyttöluokilla tehtyä simulaatiota pienempi, vaikka huippuvirtaama ja kumuloitunut kokonaisvirtaama ovatkin päinvastoin suurempia. Todennäköisesti myös maanpeiteaineistojen, joilla alkuhäviö on 1 mm:n, ja kalibroituja maankäyttöluokkien tuottaman tulvivan vesimäärän ero olisi suurempi, mikäli kokonaisvirtaaman suhteen tehty valumakertoimien kalibrointi olisi ollut tarkempi.

Halssilanmäessä, missä verkostotulvimista niin ikään esiintyi, muutokset tulvivien kaivojen lukumäärässä ja pinnoille tulvivassa vesimäärässä eri mallinnusskenaarioiden välillä olivat samansuuntaisia kumuloituneessa kokonaisvirtaamassa esiintyneiden muutosten kanssa. Toisin sanoen valunnan määrän kasvu näkyi suoraan verkoston lisääntyneenä tulvimisena. Mitoitussateen ajallisella muodolla tehdyn tarkastelun tavoin painotui tulviminen Keskustassa myös maanpeiteaineistojen vaikutuksia tarkasteltaessa kohdealueen putkikooltaan pienehköihin (300 mm) luoteisosiin ja Halssilanmäessä vastaavasti luoteen suunnasta laskevaan verkostohaaraan. Keskustassa perinteisillä maankäyttöluokilla tehdyssä simulaatiossa esiintyi suuruudeltaan lievää tulvimista lisäksi myös useammassa muissa kooltaan pienehköissä (300–400 mm) verkostohaaroissa.

### 5.2.3 Valuntamallin vaikutus hulevesivirtaamiin

Valuntamallin vaikutusta hulevesivirtaamiin tarkasteltiin simuloimalla kaikki kohdealueet kahdella työssä luodulla keskenään erilaisella valuntamallilla (kts. luku 4.1.1 & 4.4.2). Aika-pinta-ala-menetelmään pohjautuvana valuntamallina hyödynnettiin jo maanpeiteluokitusten vaikutusten tarkastelussa käytettyä, erikseen läpäisemättömät ja läpäisevät pinnat huomioivaa, maanpeiteaineistojen pohjalta kehitettyä valuntamallia. Näin ollen nyt esitetyt aika-pinta-ala-menetelmällä saadut tulokset ovat yhtenevät maanpeiteluokitusten vaikutusten tarkastelun mallinnusskenaariossa 3 tuloksiin.

Valuntamallien vaikutusta kohdealueilla muodostuviin hulevesivirtaamiin arvioitiin maanpeiteaineistojen vaikutusten tarkastelun tavoin tarkastelupisteillä muodostuvien huippuvirtaamien, sateen intensiteettihiipun ja huippuvirtaaman välisen viiveen, verkostossa mitoitussateen aikana tulvivien kaivojen lukumäärän, pinnalle yhteensä tulvivan vesimäärän sekä kumuloituneiden kokonaisvirtaamien perusteella (taulukko 29). Valuntamallien välisessä vertailussa epälineaarisen altaan -mallilla saatuja tuloksia verrattiin aina suhteessa aika-pinta-ala-menetelmällä saatuihin tuloksiin. Tarkastelusuureiden lisäksi valuntamallien vertailussa hyödynnettiin tarkastelupisteiden virtaama-aikakäyriä (kuva 25) sekä Keskustan ja Halssilanmäen tulvakarttoja (liite G).

**Taulukko 29.** Käytetyn valuntamallin vaikutuksia kohdealueiden huippuvirtaamiin ja verkostotulvimiseen kuvaavat tarkastelusuureet.

Tarkastelusuure	Aika-pinta-ala-menetelmä	Epälineaarisen altaan -malli
<b>Keskusta, tarkastelupiste 1<sup>1</sup></b>		
Huippuvirtaama <sup>2</sup> [l/s]	2514	3031 (+21 %)
Huippuvirtaaman viive <sup>3</sup> [min]	9	8 (-1)
<b>Keskusta, tarkastelupiste 2<sup>1</sup></b>		
Huippuvirtaama <sup>2</sup> [l/s]	900	961 (+4 %)
Huippuvirtaaman viive <sup>3</sup> [min]	3	3 (±0)
<b>Keskusta, yhteensä</b>		
Tulvivien kaivojen lkm <sup>4</sup>	8	16 (+8)
Tulviva vesimäärä <sup>5</sup> [m3]	123	355 (+190 %)
Kum. kokonaisvirtaama <sup>6</sup> [m3]	4722	6151 (+30 %)
<b>Halssilanmäki<sup>1</sup></b>		
Huippuvirtaama <sup>2</sup> [l/s]	209	219 (+5 %)
Huippuvirtaaman viive <sup>3</sup> [min]	1	1 (±0)
Tulvivien kaivojen lkm <sup>4</sup>	8	10 (+2)
Tulviva vesimäärä <sup>5</sup> [m3]	79	150 (+89 %)
Kum. kokonaisvirtaama <sup>6</sup> [m3]	386	517 (+34 %)
<b>Mäki-Matti<sup>1</sup></b>		
Huippuvirtaama <sup>2</sup> [l/s]	222	335 (+51 %)
Huippuvirtaaman viive <sup>3</sup> [min]	3	2 (-1)
Kum. kokonaisvirtaama <sup>6</sup> [m3]	193	276 (+43 %)

<sup>1</sup> Tarkastelupisteet sijaitsevat kohdealueen käsittämän valuma-alueen hulevesiverkoston purkupisteissä

<sup>2</sup> Huippuvirtaaman prosentuaalinen muutos aika-pinta-ala-menetelmään verrattuna suluissa

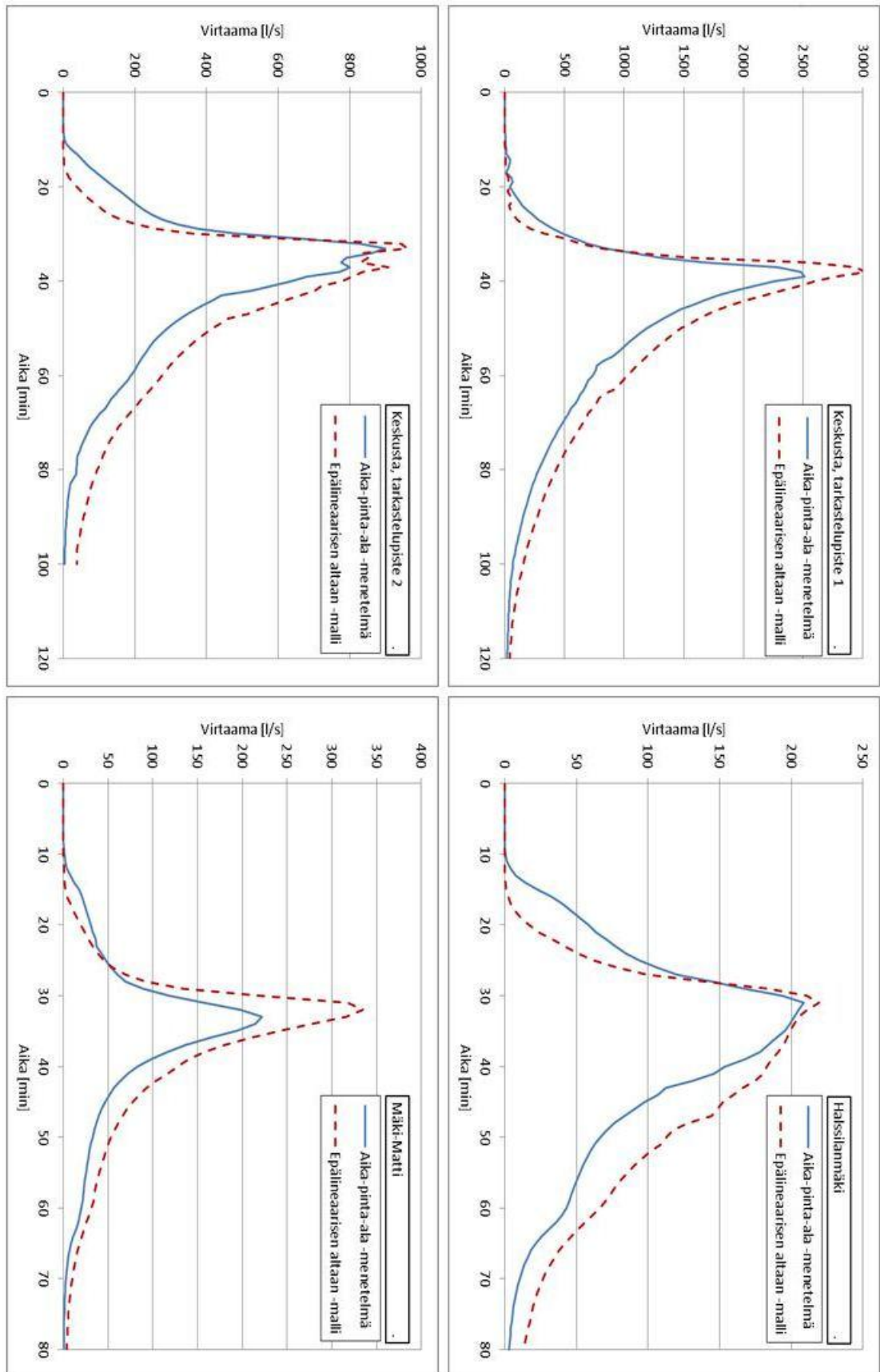
<sup>3</sup> Sateen intensiteettihiipun ja huippuvirtaaman välisen viiveen absoluuttinen muutos aika-pinta-ala-menetelmään verrattu suluissa

<sup>4</sup> Tulvivien kaivojen lukumäärän muutos aika-pinta-ala-menetelmään verrattuna suluissa

<sup>5</sup> Tulvivan vesimäärän prosentuaalinen muutos aika-pinta-ala-menetelmään verrattuna suluissa

<sup>6</sup> Kokonaisvirtaaman prosentuaalinen muutos aika-pinta-ala-menetelmään verrattuna suluissa

Epälineaarisen altaan -mallin antamat kumuloituneet kokonaisvirtaamat ja huippuvirtaamat olivat kaikilla kohdealueilla huomattavasti aika-pinta-ala-menetelmällä saatuja arvoja suurempia. Kumuloituneissa kokonaisvirtaamissa suhteellinen ero valuntamallien



**Kuva 25.** Kohdealueiden tarkastelupisteillä havaitut hulevesivirtaamat aika-pinta-ala-menetelmällä ja epälineaarisen altaan -mallilla tehdyissä simulaatioissa.

välillä oli pienin Keskustassa ja suurin Mäki-Matissa. Epälineaarisen altaan -mallilla saatu huippuvirtaama oli Mäki-Matissa jopa 51 %:a aika-pinta-ala-menetelmän mukaisista huippuvirtaamaa suurempi. Myös Keskustan tarkastelupisteellä 1 ero huippuvirtaamassa oli huomattavan suuri ollen 21 %. Keskustan tarkastelupisteellä 2 ja Mäki-Matissa suhteelliset erot huippuvirtaamissa olivat sitä vastoin maltillisempia ollen noin 5 %:n luokkaa.

Epälineaarisen altaan -mallin ja aika-pinta-ala-menetelmän tuottamat virtaama-aikakäyrät poikkeavat eri kohdealueiden välillä toisistaan hyvin systemaattisesti (vrt. kuva 25). Epälineaarisen altaan mallilla tehdyissä simulaatioissa virtaaman muodostuminen sadetapahtuman alkuhetkillä on huomattavasti hitaampaa, mutta kiihtyy sitten kohti virtaamahuippua voimakkaammin aika-pinta-ala-menetelmään verrattuna. Virtaaman heikentyminen molemmissa valuntamalleissa sitä vastoin tapahtuu hyvin samaan tahtiin, mutta on epälineaarisen altaan -mallilla tehdyissä simulaatioissa muutaman aikayksikön jäljessä suurempien huippuvirtaamien vuoksi. Epälineaarisen altaan -mallin tuottamat virtaama-aikakäyrät ovat muodoltaan myös tasaisempia eikä niissä juurikaan esiinny samanlaisia nopeita lyhyen aikavälin muutoksia virtaaman kasvu- tai heikkenemisnopeudessa kuin aika-pinta-ala-menetelmällä tehdyissä simulaatioissa. Ainoan poikkeuksen tähän tekee oikeastaan Halssilanmäen virtaaman heikkenemiskäyrä, jossa epätasaisuutta esiintyy myös epälineaarisen altaan -mallilla tehdyssä simulaatioissa.

Sateen intensiteettihiipun ja huippuvirtaaman välisessä viiveessä ei valuntamallien välillä esiintynyt merkittäviä eroja. Keskustan tarkastelupisteellä 1 ja Mäki-Matissa epälineaarisen altaan -mallin tuottaman huippuvirtaaman viive oli yhden minuutin lyhyempi kuin aika-pinta-ala-menetelmällä saatu viive. Keskustassa ja Halssilanmäessä, missä verkostotulvimista esiintyi, oli tulviminen huomattavasti voimakkaampaa niin tulvivassa vesimäärässä kuin tulvivien kaivojenkin lukumäärässä mitattuna epälineaarisen altaan -mallilla tehdyissä simulaatioissa. Erityisesti Keskustassa myös tulvivien kaivojen lukumäärä kasvoi voimakkaasti. Epälineaarisen altaan -malli ei tuonut eroja tulvimisen alueelliseen painottumiseen aiempiin simulaatioihin nähden.

#### 5.2.4 Mallinnustulosten yleinen tarkastelu

Taajamavaluma-alueiden hulevesivaluntamalleilta edellytetään tyypillisesti huomattavan yksityiskohtaista hydrologisten prosessien kuvausta tarkalla ajallisella ja alueellisella resoluutiolla (Salvadore *et al.* 2015), mikä mallirakenteiden monimutkaistuessaa nostaa esiin kysymyksen mallinnustulosten luotettavuudesta. Tuorein hulevesimallinnusta koskeva tutkimus keskittyykin vahvasti kalibroiduilla valuntamalleilla tehtäviin herkkyystarkasteluihin malliparametreilla, kuten sateen ajallisella resoluutiolla (mm. Aronica *et al.* 2005; Ochoa-Rodriguez *et al.* 2015) tai läpäisemättömän pinnan spatiaalisella resoluutiolla (mm. Krebs *et al.* 2014; Petrucci & Bonhomme 2014). Tämän myötä hulevesijärjestelmien mitoituksen näkökulmasta tehtävä tutkimus, jossa tarkasteltiin kalibroimattomien hulevesivaluntamallien parametrisointiin liittyvää epävarmuutta

muun muassa mitoitussateiden ajallisen muodon, hulevesivaluntaa kerryttävän pinnan määrän laskentatavan tai laskentaperiaatteeltaan erilaisten valuntamallien osalta, on jäänyt varsin vähäiseksi.

Hulevesivirtaamamallinnuksissa kohdealueiden välinen täysin suora vertailu ei ole mahdollista Keskustassa ja Halssilanmäessä mitoitussateiden aikana esiintyneen verkostotulvimisen vuoksi. Sadetapahtuman edetessä ja virtaamien kasvaessa verkostossa täytyvät hulevesiputket ainakin osalla näistä alueista kokonaan ja virtaus muuttuu vapaasta paineelliseksi Preismannin raon (kts. luku 3.2.1) mukaisesti. Tällöin virtaamat verkostossa eivät pääse enää kasvamaan vapaasti, vaan riippuvat paineviivan kaltevuudesta kaivovälillä. Tällaisessa tilanteessa alapuolisen verkoston voimakas padotus estää hulevesivirtaamien kasvun ja saa kaivot tulvimaan painekorkeuden noustessa niiden kohdalla maanpinnan tasolle. Mahdollisia syitä havaittuun tulvimiseen voivat olla niin suomalaisissa suunnitteluoppaissa esitetyt, mahdollisesti Suomen olosuhteissa huippuvirtaamia yliarvioivat valumakertoimet (kts. luku 2.4.2) kuin hulevesiverkoston rakentamisen jälkeen vaiheittain lisääntyneestä läpäisemättömän pinnan määrästä johtuva tai hulevesiverkoston alkuperäinen alimitoituskkin. Tarkempi tulvimiseen johtaneiden syiden erittely edellyttäisi kuitenkin hulevesimallin kalibrointia sadanta-valuntamittausten perusteella tai havaittujen tulvatilanteiden mallinnusta toteutuneilla sadetapahtumilla.

Eryteisesti Halssilanmäessä hulevesiverkoston mitoitussateiden aikainen padotus rajoitti huippuvirtaamien kasvua hyvin tehokkaasti, ja muutokset eri mallinnusskenaarioiden välillä näkyvätkin lähinnä tulvivassa vesimäärässä ja kumulatiivisessa kokonaisvirtaamassa. Lisäksi ainoastaan yhden minuutin viive mitoitussateen intensiteettihiipun ja huippuvirtaaman välillä pääosassa Halssilanmäessä tehtyjä simulaatiota viittaa vahvasti siihen, että itse asiassa havaittu virtaama-hippu tapahtuu verkoston padotuksen takia jo ennen kuin varsinainen valuntahuippu on edes ehtinyt saavuttaa sitä. Tehdyissä mallinnuksissa mitoitussateen ajallisella muodolla, maanpeitteen kuvauksen spatiaalisella tarkkuudella tai valuntamallilla ei havaittu olevan vaikutuksia tulvimisen alueelliseen jakautumiseen. Tulviminen vaikuttikin olevan kiinteämmin yhteydessä niin Keskustassa kuin Halssilanmäessä hulevesiverkoston ominaisuuksiin, kuten putkikokoon ja kaltevuuteen kuin ulkoisiin tekijöihin.

Hulevesivirtaamamallinnuksissa suurimmat suhteelliset muutokset huippuvirtaamissa ja eritoten suurimmat absoluuttiset erot sateen intensiteettihiipun ja huippuvirtaamien välisessä viiveessä havaittiin mitoitussateiden ajallista muotoa tarkasteltaessa. Tästä voidaan todeta, että mitoitussateen ajallisella muodolla on varsin oleellinen merkitys taajama-alueiden sadanta-valuntamallinnuksissa. Eryteisesti suorakulmiosateiden antamat huippuvirtaamat ja virtaama-aikakäyrien muodot poikkesivat pääosassa simulaatioista melko systemaattisesti kaikista CDS-sateista tuottaen pienempiä ja muodoltaan tasaisempia huippuvirtaamapiikkejä. Tämä osoittaa, että ainakin tässä työssä tarkastelun kohteena olleiden kohdealueiden kokoluokan (10–100 ha) omaavilla taajamavaluma-alueilla korkean ajallisen resoluution sadanta-aikakäyrien intensiteettihiipit eivät ehdi

täysin vaimentua verkoston purkuaukolle kulkeutuessaan. Tätä johtopäätöstä tukevat myös Aronican *et al.* (2005) ja Ochoa-Rodriguezin *et al.* (2015) tekemät havainnot sateiden ajallisen resoluution vaikutuksista hulevesivirtaamiin.

Tässä työssä käytettyjä kohdealueita kokoluokaltaan vastaavalla taajamavaluma-alueella (13 ha) todellisilla sateille tekemissään simulaatioissa ovat Aronica *et al.* (2005) todenneet mallinnettujen huippuvirtaamien yhtä lailla pienentyvän lähes tasaisesti sateen ajallisen resoluution heikentyessä. Vastaavasti myös Ochoa-Rodriguez *et al.* (2015) totesivat huomattavasti suuremmilla taajamavaluma-alueilla (200–900 ha) jo yli 5 min resoluution sadanta-aikakäyrissä johtavan virtaamamittauksissa havaittujen huippuvirtaamien leikkaantumiseen pois mallinnetuilta virtaama-aikakäyriltä. Lisäksi Ochoa-Rodriguez *et al.* (2015) havaitsivat sateen ajallisen resoluution vaikutuksen huippuvirtaamiin olevan merkittävästi suurempi kooltaan pienemmillä taajamavaluma-alueilla. Myös tässä työssä Keskustan tarkastelupisteen 1 ja Mäki-Matin mitoitussateiden ajallista muotoa koskevat virtaamahavainnot antaisivat viitteitä tähän, mutta yhtä suorien johtopäätösten tekeminen on kuitenkin epävarmaa vain näiden kahden vertailukohteen perusteella.

Hulevesiviemäreiden mitoituksen näkökulmasta pahin skenaario liittyi kiihtyvään CDS-sateeseen, joka tuotti pääosalla tarkastelupisteistä suurimman huippuvirtaaman. Poikkeuksen tässä teki Keskustan tarkastelupisteellä 2 heikkenevän CDS-sateen tuottama suurin huippuvirtaama. Tämä havainto on selitettävissä sillä, että aikaisen huippuintensiteetin omaavan, heikkenevän CDS-sateen tapauksessa tarkastelupisteen 2 alapuolisen verkoston padotus ei ehdi muodostua sadetapahtuman huippuintensiteettiä ennen niin suureksi kuin muilla mitoitussateilla, mikä mahdollistaa suuremman huippuvirtaaman purkautumisen tarkastelupisteen läpi. Nyt saatu tulos osoittaaakin, että erityisesti suuremmissa, rakenteeltaan monimutkaisemmissa hulevesiverkostoissa rankkasateen ajallisella muodolla voi olla erilaiset vaikutukset verkoston eri osissa. Tämän vuoksi hulevesiverkoston toimintaa olisi sitä mitoitettaessa hyvä tarkastella useammilla erimuotoisilla sateilla.

Maanpeiteaineistojen vaikutusta hulevesivirtaamiin tarkasteltaessa perinteisen maankäyttöluokituksen sekä maanpeiteaineistojen pohjalta kehitetyllä valuntamallilla saadut tulokset erosivat selvästi toisistaan jokaisella kohdealueella, kun kaikki valumakertoimet oli arvioitu suomalaisten suunnitteluoppaiden perusteella (kts. luku 4.4.1). Keskustassa maankäyttöluokkien tuottamat huippuvirtaamat ja kumuloituneet kokonaisvirtaamat olivat suurempia, kun taas Halssilanmäessä ja Mäki-Matissa tulokset olivat päinvastaisia. Samaan tapaan maankäyttöluokkien ja maanpeiteaineistojen tuottamia hulevesivirtaamia kalibroimattomilla valuntamalleilla vertailleet Lee & Heaney (2003) ovat todenneet niiden antamien tulosten eroavan merkittävästi toisistaan.

Lähinnä omakotitaloja käsittävällä taajamavaluma-alueella (6 ha) tekemissään mallinuksissa Lee & Heaney (2003) ovat kuitenkin raportoineet maanpeiteaineistojen tuot-

tamien virtaamien olleen pienempiä kuin maankäyttöluokkien tuottamien virtaamien päinvastoin kuin tässä työssä Halssilanmäen ja Mäki-Matin kohdealueilla. Eroa tutkimustulosten välillä selittää erityisesti Leen & Heaney (2003) valunnan mallinnusta varten kenttätutkimuksin määrittämä DCIA, joka näin määritettynä pienensikin todellisen hulevesivaluntaa kerryttävän pinta-alan jopa puoleen alkuperäisestä. Joka tapauksessa sekä nyt saatujen tulosten että Leen & Heaney (2003) tekemien havaintojen perusteella on selvää, että maankäyttöluokkien perusteella tehdyt hulevesimallinnukset voivat antaa hyvinkin toisenlaisia tuloksia verrattuna maanpinnan todellista fyysistä luonnetta kuvaaviin maanpeiteaineistoihin.

Pelkän maanpeiteaineistojen spatiaalisen tarkkuuden vaikutuksia mallinnustuloksiin voidaan arvioida kalibroiduilla maankäyttöluokilla ja maanpeiteaineistoilla, joilla alkuhäviöt ovat 1 mm, tehtyjä simulaatioita vertailemalla. Saatujen tulosten perusteella maanpeiteaineistojen spatiaalisella tarkkuudella havaitaankin olevan huomattava vaikutus huippuvirtaamiin Keskustan tarkastelupisteellä 1, mutta sitä vastoin Halssilanmäessä ja Mäki-Matissa erot ovat hyvin marginaaliset (kts. taulukko 28). Tämä on suoraan selitettävissä jo valumakertoimien tarkastelussa tehdyllä havainnolla maankäyttöluokkien sisäisestä homogeenisyydestä maanpeitteen suhteen Halssilanmäessä ja Mäki-Matissa, ja vastaavasti heterogeenisyydestä Keskustassa. Keskustassa tarkastelupisteellä 1 maanpeiteaineistoilla tehdyissä simulaatioissa saatu suurempi huippuvirtaama ja 1 min lyhempi viive huippuvirtaamassa maankäyttöluokkiin verrattuna osoittaa suurimman osan valunnasta muodostuvan lähellä tarkastelupistettä sijaitsevilla ydinkeskusta-alueilla. Toisin sanoen maankäyttöluokituksia käytettäessä tämä ydinkeskustan vaikutus hulevesivirtaamiin ei tule yhtä voimakkaasti esille. Näin ollen nyt saadut tulokset tukevat jo aiemmissa tutkimuksissa (Krebs *et al.* 2014; Petrucci & Bonhomme 2014) tehtyä johtopäätöstä siitä, että maanpeiteaineistojen spatiaalinen tarkkuus parantaa mallinnustulosten tarkkuutta merkittävästi.

Maanpeiteaineistojen pohjalta kehitetyn valuntamallin, jossa läpäisemättömät ja läpäisevät pinnat on jaettu omiksi valuntaa tuottavaksi osa-alueikseen, vaikutukset mallinnustuloksiin näkyivät pääasiassa tulvivissa vesimäärissä ja kumuloituneissa kokonaisvirtaamissa. Ainoastaan Mäki-Matissa myös huippuvirtaama pieneni selkeästi verrattaessa tulosta maanpeiteaineistoilla, joilla yhteiset alkuhäviöt ovat 1 mm, tehtyyn simulaatioon. Näin ollen läpäisemättömille ja läpäiseville osa-alueille määritetyistä hydrologisista parametreista vain alkuhäviöllä vaikuttaisi olevan mallinnustuloksiin merkittävää vaikutusta, sillä huolimatta läpäisemättömille osa-alueille arvioidusta suuremmasta pintavirtausnopeudesta, ei sateen intensiteettihiipun ja huippuvirtaaman välisessä viiveessä havaittu muutoksia. Alkuhäviön merkitys sen sijaan vaikuttaisi korostuvan putkikooltaan pienempien verkostohaarojen tulvimista tarkasteltaessa. Tämä selittyy läpäiseviltä alueilta muodostuvan lisävalunnan aiheuttamalla suhteellisesti suuremmalla virtaamien kasvulla kapasiteetiltaan pienemmissä verkostohaaroissa kuin verkoston päälinjoissa.

Valuntamallin vaikutusta hulevesivirtaamiin tarkasteltaessa, olivat epälineaarisen altaan -mallin tuottamat niin kumulatiiviset kokonaisvirtaamat kuin huippuvirtaamatkin valtavasti suurempia kaikilla kohdealueilla. Kokonaisvirtaaman kasvun myötä myös tulvivat vesimäärät kasvoivat voimakkaasti Keskustassa ja Halssilanmäessä. Vastaavasti kolmea erilaista kalibroitua valuntamallia testanneet Artina *et al.* (2007) ovat sitä vastoin todenneet jokaisen valuntamallin antaneen hyvän valuntavasteen suhteessa mitattuun dataan, kun mallien toimivuutta on arvioitu niiden tarkkuutta kuvaavalla ns. Nash-Sutcliffen luvulla. Eri valuntamallien antamat Nash-Sutcliffen luvut poikkesivat Artinan *et al.* (2007) tekemässä tutkimuksessa kuitenkin toisistaan, eikä tuloksista käy ilmi onko eri valuntamallien antamissa virtaama-aikakäyriä systemaattisia eroavaisuuksia.

Lisäksi Artina *et al.* (2007) ovat johtopäätöksensä todenneet, että kalibroitaessa valuntamallit kahdelle erilaiselle sadetapahtumalle on osaan malliparametreista jouduttu tekemään suuriakin muutoksia kalibrointien välillä. Yhdessä nyt saatujen tulosten kanssa tämä osoittaa valuntamallien olevan varsin sensitiivisiä mallintajan tekemille parametri-valinnoille. Pelkästään kirjallisuustietoon perustuva malliparametrien valinta voi näin ollen tuottaa suuriakin poikkeamia eri valuntamallien antamiin tuloksiin. Myös Thorn-dahl & Schaarup-Jensen (2007) ovat tulleet samaan johtopäätökseen todetessaan aikapinta-ala-menetelmän ja epälineaarisen altaan -mallin olevan hyvin sensitiivisiä hydrologisten parametrien valinnan suhteen erityisesti valuntamallien ollessa kalibroimattomia.

### 5.3 Hulevesijärjestelmien mitoituskäytäntöjen kehittäminen

Suomesta puuttuu kokonaan hulevesimallinnusta ohjaava yleinen ohjeistus, mikä näyt-täytyy nyt saatujen tulosten perusteella ongelmallisena. Hulevesiviemäreiden ja -hallintajärjestelmien mitoituksen perustuessa pitkälti rankkasateiden aikaisiin huippu-virtaamiin ja kumuloituneisiin kokonaisvirtaamiin on täysin selvää, että käytetyllä mi-toitussateen ajallisella muodolla, maanpeiteaineistojen spatiaalisella tarkkuudella ja va-luntamallilla voi olla ratkaiseva vaikutus mitoitustuloksissa. Petruccin & Bonhommen (2014) sanomaa mukaillen onkin olemassa vähintään yhtä monta mallinnustulosta kuin on suunnittelijoita ja valuntamallejakin.

Vaikka hulevesimallinnus mahdollistaa hulevesiverkoston hyvinkin yksityiskohtaisen toiminnan tarkastelun erilaisissa mitoitustilanteissa (Kuntaliiton 2012), ei se tarkoita, että hulevesivalunnan muodostuminen ja kulkeutuminen tulisivat automaattisesti kuva-tuiksi todellisuutta vastaavasti. Tehdyt tutkimukset (mm. Artina *et al.* 2007; Petrucci & Bonhomme 2014) puoltavatkin sitä tosiasiaa, että kalibroimattomien hulevesivalunta-mallien ennusteet voivat poiketa merkittävästi todellisuudesta. Muissa Pohjoismaissa tämä on jo otettu huomioon, ja esimerkiksi Ruotsissa ja Norjassa useilla kunnilla on nykyään käytössään kalibroituja hulevesivaluntamalleja (Sægrov 2015). Olisi suositel-tavaa, että myös Suomessa hulevesivaluntamallien kalibrointi lisääntyisi lähivuosina.



Niin pitkään kuin hulevesijärjestelmien analysointia ja mitoitusta Suomessa ei pystytä riittävällä varmuudella perustamaan mittaustutkimuksista ja mallinnoista saatuihin tuloksiin ja kokemuksiin, tarvitsee mallinnus tuekseen sitä ohjaavaa yleistä ohjeistusta. Nyt saadut mallinnustulokset vastaavatkin osaltaan Sillanpään (2013) peräänkuuluttamaan tarpeeseen suomalaisten mitoituskäytäntöjen kehittämiseksi antamalla suuntaviivat sille, mihin hulevesimallinnuksen lähtökohtiin hulevesiverkostojen mitoituksessa ohjeistusta erityisesti tarvittaisiin.

Tehdyissä hulevesivirtaamatarkasteluissa ensimmäinen mallinnustuloksiin vaikuttava tekijä, joihin tämän hetkissä suunnitteluohjeissa ei ole lainkaan otettu kantaa ovat alkuhäviöt. Esimerkkinä Sillanpään (2013) läpäiseville pinnoille havaitsemilla alkuhäviöillä (kts. taulukko 8) on keskimäärin kerran vuodessa toistuvan sateen keston oltava lähes 3 h ennen kuin näiltä alueilta alkaa edes muodostua valuntaa. Yhtäläillä taajama-alueiden hulevesiviemäreiden mitoituksessa tavallisesti kerran 2-3 vuodessa toistuvilla rankkasateilla, ei tällä lähtöoletuksella alkuhäviöistä, ehdi muodostua lainkaan valuntaa läpäiseviltä pinnoilta lyhyillä sateen kestoilla (< 60 min). Tämän vuoksi mitoitussateen toistuvuuden rinnalle pitäisi nostaa mitoitussateen toistuvuuden käsite. Erityisesti paljon läpäisevää pintaa käsittävillä alueilla valunnan muodostumisen kannalta on nimittäin täysin eri tilanne, oletetaanko maaperä täysin kuivaksi vai onko suurin osa alkuhäviöistä jo käytetty ennen mitoitussateen alkua.

Hulevesivalunnan mallinnuksessa selkein tapa samaa mitoitussateen toistuvuutta, mutta eri mitoitussateen toistuvuutta, edustavien tilanteiden simulointiin olisi liittää mitoitussateen osaksi tämän sisältävää kokonaista sadetapahtumaa (vrt. kuva 8). Tällöin sadetapahtuman kestoja muuntelemalla pystyttäisiin kontrolloimaan ennen varsinaisen mitoitussateen alkua kertyvää sademäärää. Luonnollisesti ennen mitoitussateen alkua kertyvä sademäärä olisi suoraan verrannollinen mitoitussateen toistuvuuteen, pienen kertymän vastatessa yleistä ja suuren harvinaisempaa mitoitussateen toistuvuutta. Nyt tehdyissä hulevesivirtaamatarkasteluissa tätä mitoitussateen toistuvuuden vaikutusta mallinnustuloksiin havainnollistavat erimuotoisilla CDS-sateilla tehdyt simulaatiot (kts. taulukko 27).

Tässä työssä saadut tulokset mitoitussateen ajallisen muodon vaikutuksista hulevesivirtaamiin tukevat Kuntaliiton (2012) *Hulevesioppaan* suositusta mitoitussateen ajallisen muodon huomioimisesta hulevesijärjestelmien mitoituksessa. Parhailtaan käynnissä olevan *Optimaaliset sademittaukset kaksoispolarisaatio-anturilla* (OSAPOL) - tutkimusprojektin osana Suomeen ollaan luomassa kaikille käyttäjille avointa mitoitussadekirjastoa (Ilmatieteen laitos 2015b). Valmistuessaan tämä mitoitussadekirjasto tulisi sisältämään eri sateentoistuvuustasoille määritettyjä tapahtuneita sadetapahtumia, joiden ajallinen resoluutio olisi 1–2,5 min. Tällainen mitoitussadekirjasto näyttäytyykin varsin ideaalisena nyt mitoitussateen ajallisen resoluution merkittävyyydestä tehdyn johtopäätöksen rinnalla ja tulisi ehdottomasti ottaa hyötykäyttöön hulevesijärjestelmien mitoituksessa välittömästi valmistumisensa jälkeen.

Mitoitussadekirjaston ohella olisi hyödyllistä luoda Suomeen myös kansallinen sadanta-valunta-kirjasto. Tällöin eripuolilla Suomea taajamavaluma-alueilla tehdyt sadanta- ja valuntamittausaikasarjat olisivat yleisesti saatavilla, ja niitä pystyttäisiin hyödyntämään erilaisten valuntamallien parametrien kalibroinnissa. Parhaassa tapauksessa nyt luotujen maanpeiteaineistojen tai niitä maanpeitteisyyden fyysiseltä kuvaukselta vastaavien muiden spatiaalisesti tarkkojen maanpeiteluokittusten mukaiset malliparametrit epävarmuusrajoineen saataisiin Krebsin et al. (2014) esittämän mukaisesti kalibroitua ja validoitua jo muutaman kohdealueen perusteella. Tämä pienentäisi ratkaisevasti niin valumakertoimien valinnan kuin erilaisten valuntamallien aiheuttamaa epävarmuutta mallinnustuloksissa. Thorndahl & Schaarup-Jensen (2007) ovatkin esittäneet, että juuri hulevesivalunnan muodostumista säätelevien malliparametrien kalibroinnilla voidaan useissa tapauksissa saavuttaa merkittäviä kustannussäästöjä, kun esimerkiksi liian suurten valumakerrointen aiheuttamalta hulevesijärjestelmien ylimitoitukselta vältytään.

Tärkeää olisi, että kalibroidut arvot valumakertoimille kohdetietoineen saatettaisiin kalibroinnin lähteenä olevien sadanta-valuntamittausten tavoin yleisesti saataville. Tällöin pystyttäisiin todella arvioimaan, vastaavatko eri puolilla Suomea maankäytöltään vaihteleville alueille kalibroidut maanpeiteluokittaiset valumakertoimet toisiaan. Maanpeiteluokille kalibroituja valumakertoimia olisi tällöin mahdollista myös ryhmitellä esimerkiksi valuma-alueiden maaperän, kaltevuuden ja maankäytön yleisen luoteen mukaisiin alaluokkiin, jotta valumakertoimet olisivat luotettavammin sovellettavissa kalibroimattomilla valuma-alueilla. Näin kaikkein suurimpaan hulevesimallinnukseen sisältyvään epävarmuustekijään eli hulevesivaluntaa muodostavan läpäisemättömän pinnan määrän arviointiin (Shuster *et al.* 2005; Jacobson 2011) pystyttäisiin vastaamaan kansallisella tasolla, eikä kaikkein Suomen kuntien olisi välttämätöntä kalibroida hulevesimallejaan.

Mitoituskäytäntöjen ulkopuolelle jäävä, mutta oleellinen hulevesiverkostomallinnuksessa epävarmuutta aiheuttava tekijä on niin ikään alkuperäisen verkostotiedon laatu. Esimerkiksi puuttuvat putkikoot ja tiedot vesijuoksujen korkeuksista ovat omiaan aiheuttamaan ylimääräistä epävarmuutta verkostomallinnukseen ja saattavat pahimmassa tapauksessa johtaa verkoston toiminnan kannalta oleellisempien pullonkaulojen havaitsematta jäämiseen. Tämän vuoksi myös kuntien ja vesihuoltolaitosten toimintaa tulisi kehittää suuntaan, jossa verkostotietokantojen kattavuus ja ajantasaisuus nähtäisiin oleellisena osana niiden omaisuuden hallintaa. Oivana esimerkkinä verkostotietokannan tehokkaasta integroinnista osaksi omaisuuden hallintaa on Norjassa yli 90 %:lla kunnista käytössä oleva Gemini-verkostotietokanta (Sægrov 2015). Tämän verkostotietokannan ajantasaisuus perustuu ideaan, jossa jokaisella kunnan palveluksella olevalla verkostotöitä tekevällä on kirjoitusoikeus järjestelmään. Näin esimerkiksi tehdyt putkisaneraukset ja verkostokuvaukset tulevat välittömästi kirjatuiksi verkostotietokantaan oikein, kun tietokannan päivitys koetaan myös kentällä työskentelevien osalta merkityksellisenä.

## 6. YHTEENVETO

Tässä työssä luotu menetelmä maanpeiteluokitusten paikkatietojärjestelmäpohjaiseen tuottamiseen soveltuu käytettäväksi kaikkialla Suomessa. Menetelmä hyödyntää ainoastaan MML:n avoimen aineiston tiedostopalvelun kautta ladattavia koko Suomen alueelta saatavissa olevia paikkatietoaineistoja: maastotietokantaa, väri-infra ortokuvia ja laserkeilausaineistoa. Näiden aineistojen perusteella maanpeite on luokiteltu yhteensä 12 erilliseen maanpeiteluokkaan, joille on määritetty tarkka pinoamisjärjestys, jonka perusteella maanpeiteluokat tulevat oikein kuvatuksi toisiinsa nähden. Maanpeiteluokitus pystytään tekemään menetelmää hyödyntäen objektiivisesti, minkä ansiosta eri alueiden hulevesivaluntaa muodostavan pinnan määrä tulee arvioiduksi yhteismitallisesti.

Luotu menetelmä maanpeiteaineistojen tuottamiseen ei ole millään tavoin sidottu nyt käytettyihin MML:n paikkatietoaineistoihin, vaan pystyy joustavasti hyödyntämään myös muita saatavilla olevia paikkatietoaineistoja. Yhtälaillla menetelmällä tuotettujen maanpeiteluokkien määrää ja osittain myös spatiaalista tarkkuutta voidaan säätää kulloisenkin tarpeen ja käytettävissä olevien paikkatietoaineistojen mukaan. Esimerkkinä nyt tuotetuissa maanpeiteaineistoissa metsät ja nurmialueet jaettiin niiden rinnekaltevuuden perusteella vielä kolmeen erilliseen alaluokkaan. Menetelmä näyttäytyykin erittäin potentiaalisena suunnittelutyön apuvälineenä, jonka joustavuus maanpeiteaineistojen tuottamisessa mahdollistaa sen sovittamisen kustannustehokkaalla tavalla suunnittelutyön edellyttämään tarkkuustasoon sekä käytettävissä olevaan aikaan ja resursseihin.

Menetelmällä tuotetut spatiaalisesti tarkat maanpeiteaineistot mahdollistavat hulevesimallinnuksessa käytettävien valuntamallin huomattavasti aiempaa tarkemman parametrisoinnin. Aika-pinta-ala-menetelmässä läpäisemättömät ja läpäisevät alueet pystytään käsittelemään omina valuntaa tuottavina komponentteinaan, minkä ansiosta sadetapah-tuman aikaista valunnan muodostumista pystytään jäljittelemään paremmin todellisuutta vastaavasti. Yhtälaillla epälineaarisen altaan -mallissa maanpeiteeltään toisistaan eroavien osa-alueiden pinta-ala ja alueellinen jakautuminen tulee maanpeiteaineistojen avulla kuvatuksi todellisuuden mukaisesti.

Tuotettujen maanpeiteaineistojen ja perinteisten asemakaavarajausten mukaisten maankäyttöluokitusten mukaiset osavaluma-aluekohtaiset keskimääräiset valumakertoimet poikkesivat tilastollisesti merkittävästi toisistaan kaikilla Jyväskylän kohdealueilla, kun maanpeite- ja maankäyttöluokkien valumakertoimina käytettiin suomalaisissa suunniteluoppaissa esitettyjä valumakertoimia. Havaitut erot eivät selity minkään yksittäisen maankäyttöluokan poikkeavuudella, sillä eri maankäyttöluokitusrajausten mukaisille alueille maanpeiteaineistojen perusteella lasketut keskimääräiset valumakertoimet poik-

kesivat yhtäläillä tilastollisesti merkitsevästi maankäyttöluokille esitetyistä referenssiarvioista. Saadut tulokset osoittavat niin maanpeite- kuin maankäyttöluokkienkin valumakertoimien valinnan olevan äärimmäisen subjektiivista, eikä samaan lopputulokseen keskimääräisissä valumakertoimissa ole mahdollista päästä kuin sattumalta. Maanpeite-  
luokkien etu maankäyttöluokkiin verrattuna on kuitenkin niiden linkittyminen maanpinnan fyysiseen kuvaukseen: maanpeiteluokille yhdellä valuma-alueella kalibroidut valumakertoimet antaisivat hyvällä todennäköisyydellä realistisia tuloksia myös muilla valuma-alueilla. Ideaalinen jatkotutkimushanke tälle työlle olisikin kalibroida maanpeiteluokille valumakertoimia sadanta-valuntamittausten perusteella.

Maanpeiteaineistojen perusteella maankäyttöluokitusrajausten mukaisille alueille lasket-  
tujen valumakertoimien hajonta oli varsin suurta Keskustan kohdealueella, kun taas Halssilanmäessä ja Mäki-Matissa hajonta oli suhteellisen pienehköä. Tätä havaintoa selittävät kohdealueiden koko ja niiden sisäinen rakentamisen yhteneväisyys. Kooltaan pienehköt Halssilanmäen ja Mäki-Matin kohdealueet rajautuvat rakentamistyyliältään hyvin yhteneväisiin alueisiin, mikä tekee niiden maankäyttöluokista maanpeitteeltään homogeenisiä. Huomattavasti kooltaan suurempi Keskustan kohdealue sitä vastoin sisältää rakentamistyyliältään varsin vaihtelevia alueita, mikä aiheuttaa voimakasta heterogeenisyyttä alueen maankäyttöluokissa maanpeitteen suhteen. Maanpeiteaineistojen etu maankäyttöluokkiin verrattuna vaikuttaisikin korostuvan suurilla, maankäytöltään heterogeenisillä taajamavaluma-alueilla, joilla maankäyttöluokkien spatiaalinen tarkkuus ei enää selvästikään ole riittävä kuvaamaan valumakertoimien spatiaalista vaihtelua. Suunnittelutyössä onkin tavallista, että mallinnettava hulevesiverkosto ulottuu laajalle, maankäytöltään vaihtelevalle alueelle. Näin ollen maanpeiteaineistot voivat tarjota merkittävää lisäarvoa valumakertoimien spatiaalisen vaihtelun kuvaamisessa tulevaisuudessa monissa suunnittelukohteissa.

Maanpeiteaineistojen spatiaalisen tarkkuuden tuoma lisäarvo hulevesimallinnuksen tuloksiin vaikuttaisi olevaan suoraan yhteydessä maankäyttöluokitusrajausten mukaisille alueille lasket-  
tujen valumakertoimien hajontaan. Halssilanmäessä ja Mäki-Matissa, missä hajonta oli pientä, ei maanpeiteaineistojen spatiaalisella tarkkuudella juurikaan ollut vaikutusta hulevesivirtaamiin maankäyttöluokilla tehtyihin simulaatioihin verrattuna. Sen sijaan Keskustassa maanpeiteaineistot aiheuttivat suuremman ja nopeammin kehittyvän huippuvirtaaman maankäyttöluokkiin verrattuna, minkä katsottiin johtuvan maanpeiteaineistojen paremmin kuvaamasta Jyväskylän ydinkeskustan suuren läpäisemättömän pinnan määrän vaikutuksesta huippuvirtaaman kehittämisessä. Tämä tuokin esille spatiaalisesti tarkkojen maanpeiteaineistojen potentiaalin paremmin todellisuutta vastaavien hulevesimallinnustulosten tuottamisessa.

Mitoitussateen ajallisella muodolla oli hulevesimallinnuksissa erittäin voimakas vaikutus huippuvirtaamien suuruuteen ja erityisesti huippuvirtaamien viiveeseen sateen intensiteettihiippuun nähden. Kokoluokaltaan pienehköillä taajama-valuma-alueilla (10–100 ha) sadanta-aikakäyrien intensiteettihiipit eivät ehdi vaimentua pintavalunnan kulkeu-

tumisen ja verkostovirtauksen aikana niin paljoa, etteivätkö CDS-sateet aiheuttaisi merkittävästi suurempaa ja nopeammin kehittyvää huippuvirtaamaa kuin suorakulmiosateet. Vaikka hulevesiverkostojen mitoituksen näkökulmasta pahin mitoituskenaario, joka tuotti pääosalla tarkastelupisteistä suurimmat huippuvirtaamat, liittyikin kiihtyvän intensiteetin omaavaan CDS-sateeseen, havaittiin tässä myös oleellinen poikkeus. Nimitään verkstorakenteeltaan monimutkaisella Keskustan kohdealueella tarkastelupisteen 2 suurin huippuvirtaama osuikin heikkenevän intensiteetin omaavaan CDS-sateeseen. Tämän vuoksi erityisesti rakenteeltaan monimutkaisempien hulevesiverkostojen toimintaa tulisikin mallinuksissa tarkastella useammilla ajalliselta muodoltaan erilaisilla mitoitusasteilla. Tästä näkökulmasta pyrkimys luoda Suomeen oma mitoitusadekirjasto osana OSAPOL-tutkimusprojektia onkin ehdottoman oikea suuntaus, jonka myötä hulevesiverkostojen toimintaa pystyttäisiin tulevaisuudessa tarkastelemaan todellisilla muodoltaan vaihtelevilla sadetapahtumilla.

Alkuhäviöiden huomioiminen erikseen läpäisemättömille ja läpäiseville pinnoille vaikuttaa erityisesti pienemmissä verkostohaaroissa tehtäviin mallinnustarkasteluihin. Kun läpäisevien pintojen todellisuudessa suurempia alkuhäviöitä ei oteta mallinuksessa huomioon, ehtii näiltä alueilta muodostua sadetapahtuman aikana huomattavasti enemmän valuntaa kuin huomioitaessa alkuhäviöt täysimääräisinä. Tämä näkyy putkikooltaan pienemmissä verkostohaaroissa suhteellisesti suurempana virtaaman kasvuna, joka saattaa johtaa todellisuudessa havaitun vastaiseen verkostotulvimisen esiintymiseen. Luonnollisesti läpäisevien alueiden alkuhäviöiden huomioimisen vaikutus korostuu vähemmän päällystettyä pintaa omaavilla valuma-alueilla.

Läpäisevien alueiden alkuhäviöiden täysimääräinen huomioiminen tai huomiotta jättäminen eivät kumpikaan sinällään ole väärin tehtyä hulevesimallinnusta. Ne vain vastaavat täysin päinvastaisia oletuksia sadetapahtumaa edeltävästä maaperän kosteudesta. Suomalaisissa hulevesimallinnusta ohjaavissa suunnitteluoppaissa olisikin syytä ottaa kantaa alkuhäviöiden huomioimiseen. Selkeä tapa tähän olisi nostaa mitoitusasteiden rinnalle käsite mitoitusvalunnasta. Tällöin mitoitusaste sisällytettäisiin osaksi pidempää sadetapahtumaa, jonka mitoitusastetta edeltävä kertymä vastaisi mitoitusvalunnan eri toistuvuuksia.

Epälineaarisen altaan -mallin tuottamat niin kumulatiiviset kokonaisvirtaamat kuin huippuvirtaamatkin olivat kaikilla kohdealueille selvästi suurempia kuin aika-pinta-alamenetelmällä saadut arvot. Malliparametrien sensitiivisyydestä johtuen pelkkään kirjallisuustietoon perustuva malliparametrien valinta voikin johtaa hyvin poikkeaviin tuloksiin eri valuntamallien välillä. Ideaalitalanteessa Suomessa olisikin käytössä myös kansallinen sadanta-valunta-kirjasto, jota sisältäisi eripuolilla Suomessa tehtyjä sadanta-valuntamittauksia. Tällöin spatiaalisesti tarkkojen maanpeiteaineistojen päälle rakennetut valuntamallit olisi mahdollista kalibroida ja validoida jo muutaman kohdealueen perusteella ja näin vähentää eri valuntamallien käytöstä aiheutuvaa epävarmuutta mallinustuloksissa.

## LÄHTEET

A 31.3.2000/342. Ympäristöministeriön asetus maankäyttö- ja rakennuslain mukaisissa kaavoissa käytettävistä merkinnöistä.

Aaltonen, J. (2008). Sadanta-valuntaprosessi taajama-alueella: MOUSE ja MIKE SHE -ohjelmien testaaminen. Diplomityö. Helsinki, Teknillinen korkeakoulu, insinööritieteiden ja arkkitehtuurin tiedekunta. 113 s.

Aaltonen, J., Hohti, H., Jylhä, K., Karvonen, T., Kilpeläinen, T., Koistinen, J., Kotro, J., Kuitunen, T., Ollila, M., Parvio, A., Pulkkinen, S., Silander, J., Tiihonen, T., Tuomenvirta, H. & Vajda, A. (2008). Rankkasateet ja taajamatulvat (RATU). Helsinki, Suomen ympäristökeskus, Suomen ympäristö 31. 123 s.

Aguilar, M.F. & Dymond, R.L. (2014). Innovative Technologies for Storm-Water Management Programs in Small Urbanized Areas, *Journal of Water Resources Planning & Management*, Vol. 140(11), pp. 1-10.

Akram, F., Rasul, M.G., Khan, M.K. & Amir, M.S. (2014). Comparison of Different Hydrograph Routing Techniques in XPSTORM Modelling Software: A Case Study, *International Journal of Environmental, Chemical, Ecological, Geological and Geophysical Engineering*, Vol. 8(3), pp. 213-223.

Arnell, V. (1980). Description and validation of the CTH-urban runoff model. Göteborg, Chalmers University of Technology, Department of Hydraulics. Report Series A:5. 192 p.

Arnell, V. (1982). Estimating Runoff Volumes from Urban Areas. *Water Resources Bulletin*, Vol. 18(3), pp. 383-387.

Aronica, G., Freni, G. & Oliveri, E. (2005). Uncertainty analysis of the influence of rainfall time resolution in the modelling of urban drainage systems, *Hydrological Processes*, Vol. 19(5), pp. 1055-1071.

Artina, S., Bolognesi, A., Liserra, T. & Maglionico, M. (2007). Simulation of a storm sewer network in industrial area: Comparison between models calibrated through experimental data, *Environmental Modelling & Software*, Vol. 22(8), pp. 1221-1228.

ASCE & WPCF. (1970). Design and construction of sanitary and storm sewers. Second Printing. Washington, DC. 332 p.

Austin, P. M. & Houze, R.A. Jr. (1972). Analysis of the structure of precipitation patterns in New England, *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 11, pp. 926-934.

- Beven, K.J. (2012). *Rainfall-Runoff Modelling: The Primer*. Second Edition. Wiley-Blackwell. 488 p.
- Blom Kartta Oy. (2015). Menetelmäkuvaus ja laadunvarmennus – Ortoilmakuvatulkinta: Seudullinen maanpeiteaineisto TP 35/14. 6 s. Saatavissa (viitattu 18.8.2015): <https://www.hsy.fi/fi/asiantuntijalle/avoindata/Sivut/Avoindata.aspx?dataID=38>.
- Borselli, L. & Torri, D. (2010). Soil roughness, slope and surface storage relationship for impervious areas, *Journal of Hydrology*, Vol. 393(3–4), pp. 389-400.
- Boyd, M.J., Bufill, M.C. & Knee, R.M. (1993). Pervious and impervious runoff in urban catchments, *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 38(6), pp. 463-478.
- Butler, D., Davies, J. (2010). *Urban Drainage*. Third Edition. New York, Spon Press. 632 p.
- Chandler, T.J. (1976). *Urban climatology and its relevance to urban design*. Geneve, World Meteorological Organization, Technical Note No. 149. 66 p.
- Chen, J., Hill, A.A. & Urbano, L.D. (2009). A GIS-based model for urban flood inundation, *Journal of Hydrology*, Vol. 373(1-2), pp. 184-192.
- Chow, V.T., Maidment, D.R. & Mays, L.W. (1988). *Applied hydrology*. International ed. New York, McGraw-Hill. 572 p.
- Danish Hydraulic Institute. (2012a). *MOUSE Surface Runoff Models Reference Manual*. Hørsholm, Denmark, MIKE BY DHI Software.. 60 p.
- Danish Hydraulic Institute (2012b). *MOUSE Pipe Flow Reference Manual*. Hørsholm, Denmark, MIKE BY DHI Software. 118 p.
- Dhakal, N., Fang, X., Cleveland, T.G., Thompson, D.B., Asquith, W.H. & Marzen L.J. (2012). Estimation of Volumetric Runoff Coefficients for Texas Watersheds Using Land-Use and Rainfall-Runoff Data, *Journal of Irrigation & Drainage Engineering*, Vol. 138(1), pp. 43-54.
- Dhakal, N., Fang, X., Asquith, W.H., Cleveland, T.G. & Thompson, D.B. (2013). Rate-based estimation of the runoff coefficients for selected watersheds in Texas, *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 18(12), pp. 1571-1580.
- Dingman, S.L. (2002). *Physical Hydrology*. Second Edition. Upper Saddle River, New Jersey, Prentice-Hall. 646 p.
- EEA. (2015a). *European Soil Sealing V2*. Saatavissa (viitattu 12.9.2015): <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/explore-interactive-maps/european-soil-sealing-v2>.

EEA. (2015b). Urban Atlas. Saatavissa (viitattu 12.9.2015):

<http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/urban-atlas#tab-gis-data>.

Fernández-Pato, J. & Garcia-Navarro, P. (2014). Finite volume simulation of unsteady water pipe flow, *Drinking Water Engineering and Science*, Vol. 7(2), pp. 83-92.

Fletcher, T.D., 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, pp. 261-279.

Geiger, W.F., Marsalek, J., Rawls, W.J. & Zuidema, F.C. (1987). Manual on drainage in urbanized areas, Volume I, Planning and design of drainage systems. Paris, Unesco Press, Studies and reports in hydrology 43. 203 p.

Guo, J. & Urbonas, B. (2014). Volume- Based Runoff Coefficients for Urban Catchments, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 140(2), pp. 1-5.

Helsingin seudun ympäristöpalvelut (HSY). (2015). Seudullinen maanpeiteaineisto.

Päivitetty 17.6.2015. Saatavissa (viitattu 11.9.2015):

<https://www.hsy.fi/fi/asiantuntijalle/seututieto/paikkatiedot/kartta-aineistot/taustakartat/Sivut/seudullinenmaanpeiteaineisto.aspx>.

Hallin-Pihlatie, L., Hannonen, T., Kallio, M., Koistinen, K., Laitinen, M., Metsälä, M., Mikkola, A., Muhli, P., Nurmi, L. & Repo, R. (2014). INSPIREn määrittelyjen mukaisen tietotuotteen muodostaminen: Maankäyttö. 28.5.2014. INSPIRE-verkosto. Muistio. 24 s.

Henderson, T.C. (2014). *Analysis of Engineering and Raster Map Images*. Springer Science Business Media. 241 p.

Ilmatieteen laitos (2015a). Sade. Saatavissa (viitattu 27.7.2015):

<http://ilmatieteenlaitos.fi/sade>.

Ilmatieteen laitos (2015b). OSAPOL-sadetuotteiden sisältö ja formaatit. 1.9.2015. Helsinki, Dynamicum. Muistio. 3 s.

Inkiläinen, E.N.M., McHale, M.R., Blank, G.B., James, A.L. & Nikinmaa, E. (2013). The role of the residential urban forest in regulating throughfall: A case study in Raleigh, North Carolina, USA, *Landscape and Urban Planning*, Vol. 119pp. 91-103.

Jacobson, C.R. (2011). Identification and quantification of the hydrological impacts of imperviousness in urban catchments: A review, *Journal of environmental management*, Vol. 92(6), pp. 1438-1448.



- Jakkila, J. & Vehviläinen, B. (2015). Hydrologi & Johtava hydrologi, Suomen ympäristökeskus. Sähköpostitiedonanto 6.11.2015.
- Jylhä, K., Tuomenvirta, H. & Ruosteenoja, K. (2004). Climate change projections for Finland during the 21st century, *Boreal Environment Research*, Vol 9, pp. 127–152.
- Jyväskylän kaupungin rakennusjärjestys. (2009). Saatavissa (viitattu 28.9.2015): <http://www.jyvaskyla.fi/rakennus/rakennusjarjestys>.
- Jyväskylän kaupunki, Kaupunkirakennepalvelut. (2015). Tourujoen kehittämissuunnitelma. Saatavissa (viitattu 28.9.2015): <http://www2.jkl.fi/kaavakartat/tourujoki/kehittamissuunnitelma.pdf>.
- Jäämies, A. (1968). Viemärlaitos. Teoksessa Mustonen, S. (toim.) Maa- ja vesirakennus, Vammala, Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL r.y. 881 s.
- Karamouz, M., Moridi, A. & Nazif, S. (2010). *Urban Water Engineering and Management*. CRC Press. 602 p.
- Karttunen, E. (2004). RIL 124-2 Vesihuolto II. Helsinki, Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. 684 s.
- Katajisto, R. (1969). Rankkasateiden voimakkuus ja toistumistiheys Suomessa. Rakennushallitus, tiedotuksia. 13 s.
- Kaupunkiliitto (1979). Vesijohtojen ja viemäreiden suunnittelu. Kaupunkiliiton julkaisu B 63. 316 s.
- Keim, R., Skaugset, R.F., Link, T.E. & Iroume A. (2004). A stochastic model of throughfall for extreme events, *Hydrology And Earth System Sciences*, Vol. 8(1), pp. 23-34.
- Kilpeläinen, T. (2006). Kesäsateiden ilmastolliset piirteet Helsingin Kaisaniemessä 1951–2000. Pro gradu -tutkielma. Helsinki, Helsingin yliopisto, matemaattisluonnontieteellinen tiedekunta, fysikaalisten tieteiden laitos. 75 s.
- Kilpeläinen, T., Tuomenvirta, H. & Jylhä, K. (2008). Climatological characteristics of summer precipitation in Helsinki during the period 1951-2000, *Boreal Environment Research*, Vol. 13(1), pp. 67-80.
- Korhonen, J. & Haavanlammi, E. (2012). *Hydrologinen vuosikirja 2006–2010*. Helsinki, Suomen ympäristökeskus, Suomen ympäristö 8. 234 s. Saatavissa (viitattu 3.8.2015): <http://www.ymparisto.fi/julkaisut>.

Kotola, J. & Nurminen, J. (2003). Kaupunkialueiden hydrologia - valunnan ja ainehuuhtouman muodostuminen rakennetuilla alueilla, osa 1: kirjallisuustutkimus. Espoo, Teknillisen korkeakoulun vesitalouden ja vesirakennuksen julkaisuja 7. 92 s.

Krebs, G., Kokkonen, T., Valtanen, M., Setälä, H. & Koivusalo, H. (2014). Spatial resolution considerations for urban hydrological modelling, *Journal of Hydrology*, Vol. 512, pp. 482-497.

Kuntaliitto (2012). Hulevesiopas. Helsinki, Suomen Kuntaliitto. 262 s.

Kuusisto, E. (1980). On the intensity of rainfall in Finland, *Aqua Fennica*, Vol. 10, pp. 3-11.

Kuusisto, E. (1986a). Veden kiertokulku. Teoksessa: Mustonen, S. (toim.) *Sovellettu hydrologia*. Helsinki, Vesiyhdistys r.y. 503 s.

Kuusisto, E. (1986b). Sadanta. Teoksessa: Mustonen, S. (toim.) *Sovellettu hydrologia*. Helsinki, Vesiyhdistys r.y. 503 s.

Lee, J.G. & Heaney, J.P. (2003). Estimation of Urban Imperviousness and its Impacts on Storm Water Systems, *Journal of Water Resources Planning & Management*, Vol. 129(5), pp. 419-426.

Leopold, L.B. (1968). Hydrology of urban land planning – A guidebook on the hydrologic effects of urban land use. Washington, United States Department of the Interior, Geological Survey Circular 554. 17 p.

Li, H., Wigmosta, M.S., Wu, H., Huang, M., Ke, Y., Coleman, A.M. & Leung, R.L. (2013). A Physically Based Runoff Routing Model for Land Surface and Earth System Models, *Journal of Hydrometeorology*, Vol. 14(3), pp. 808-828.

Liikennevirasto (2013). Teiden ja ratojen kuivatuksen suunnittelu. Helsinki, Liikenneviraston ohjeita 5/2013. 118 s.

Linsley, R. K., Kohler, M. A. & Paulhus, J. L. H. (1982). *Hydrology for Engineers*. Third Edition. New York, McGraw-Hill Book Co. 508 p.

Maa- ja metsätalousministeriö. (2010). Sijainti yhdistää – Kansallinen paikkatietostrategia 2010–2015. Helsinki, Maa- ja metsätalousministeriön julkaisuja 3/2010. 28 s. Saatavissa (viitattu 17.8.2015):

[http://www.mmm.fi/fi/index/etusivu/maanmittaus\\_paikkatiedot/paikkatietojenyhteiskaytto/kansallinenpaikkatietostrategia.html](http://www.mmm.fi/fi/index/etusivu/maanmittaus_paikkatiedot/paikkatietojenyhteiskaytto/kansallinenpaikkatietostrategia.html).

- Madsen, H. & Arnbjerg-Nielsen, K. (2006). Statistisk bearbejdning af nedbørsdata fra Spildevandskomiteens Regnmålersystem 1979 – 2005. Styregruppen for Spildevandskomiteens Regnmålersystem, Endelig rapport, marts 2006. 68 p.
- Mansell, M. & Rollet, F. (2009). The effect of surface texture on evaporation, infiltration and storage properties of paved surfaces, *Water Science & Technology*, Vol. 60(1), pp. 71-76.
- Mays, L.W. (2001). *Stormwater Collection Systems Design Handbook*. New York, The McGraw-Hill Companies, Inc. 1008 p.
- McCuen, R.H. (2004). *Hydrologic Analysis and Design*. Third Edition. New Jersey, Pearson Prentice Hall. 888 p.
- Melanen, M. & Laukkanen, R. (1981). Quantity of storm runoff water in urban areas. Helsinki, Finland, Water Research Institute, National Board of Waters, Report No.42, pp. 2-39.
- Miller, J.D., Kim, H., Kjeldsen, T.R., Packman, J., Grebby, S. & Dearden, R. (2014). Assessing the impact of urbanization on storm runoff in a peri-urban catchment using historical change in impervious cover, *Journal of Hydrology*, Vol. 515(0), pp. 59-70.
- MML (2014). *Geoinformatiikan sanasto*. Helsinki, Sanastokeskus TSK ry, TSK 45. 92 s.
- MML (2015a). Maastotiedot. Saatavissa (viitattu 17.8.2015):  
<http://www.maanmittauslaitos.fi/aineistot-palvelut/maastotiedot>.
- MML (2015b). Maanmittauslaitoksen maastotietokohteet, Maanmittauslaitoksen julkaisuja ISSN 1236-5084, päivitetty 21.4.2015. 114 s. Saatavissa (viitattu 19.8.2015):  
<http://www.maanmittauslaitos.fi/digituotteet/maastotietokanta>.
- MML (2015c). Laserkeilaustekniikka. Saatavissa (viitattu 19.8.2015):  
<http://www.maanmittauslaitos.fi/kartat/laserkeilausaineistot/laserkeilaustekniikka>.
- MML Sovellustuki (2015). Maastotietokannan aineistojen tuottaminen ja sijaintitarkkuus. Sähköpostitiedonanto 31.7.2015.
- MRL 5.2.1999/132. Maankäyttö- ja rakennuslaki muutoksineen (L 22.8.2014/682).
- Muzylo, A., Llorens, P., Valente, F., Keizer, J.J., Domingo, F. & Gash, J.H.C. (2009). A review of rainfall interception modelling, *Journal of Hydrology*, Vol. 370(1–4), pp. 191-206.

Nakićenović, N. & Swart R. (2000). *Special Report on Emissions Scenarios*. Cambridge University Press, A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 599 p.

Niemczynowicz, J. (1989). Impact of the greenhouse effect on sewerage systems – Lund case study, *Hydrological Sciences Journal-Journal*, Vol. 34(6), pp. 651-666.

Nix, S.J. (1994). *Urban stormwater modeling and simulation*. Boca Raton, Florida, USA, CRC Press Inc. 212 p.

Ochoa-Rodriguez, S., Wang, L., Gires, A., Pina, R.D., Reinoso-Rondinel, R., Bruni, G., Ichiba, A., Gaitan, S., Cristiano, E., van Assel, J., Kroll, S., Murlà-Tuyls, D., Tisserand, B., Schertzer, D., Tchiguirinskaia, I., Onof, C., Willems, P. & ten Veldhuis, M. (2015). Impact of spatial and temporal resolution of rainfall inputs on urban hydrodynamic modelling outputs: A multi-catchment investigation, *Journal of Hydrology*. In Press.

Park, M., Swamikannu, X. & Stenstrom, M.K. (2009). Accuracy and precision of the volume–concentration method for urban stormwater modeling, *Water research*, Vol. 43(11), pp. 2773-2786.

Pedersen, F. & Mark, O. (1990). Head Losses in Storm Sewer Manholes: Submerged Jet Theory, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 116(11), pp. 1317-1328.

Petrucci, G. & Bonhomme, C. (2014). The dilemma of spatial representation for urban hydrology semi-distributed modelling: Trade-offs among complexity, calibration and geographical data, *Journal of Hydrology*, Vol. 517, pp. 997-1007.

Pettorelli, N. (2013). *The Normalized Difference Vegetation Index*. United Kingdom, Oxford University Press. 208 p.

Pitt, R.E. (1987). *Small storm urban flow and particulate washoff contributions to out-fall discharges*. Dissertation. University of Wisconsin-Madison. 514 p.

Pohjamo, T. & Hooli, J. (1990). *Sovellettu hydromekaniikka*. Helsinki, Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL r.y. 139 s.

Porin kaupunkitulva. (2007). Loppuraportti 12.8.2007. 42 s. Saatavissa (viitattu 24.7.2015):  
<http://www.pori.fi/tpk/kadutjaliikenne/raportitjatilastotiedot/kunnallistekniikka.html>.

Rossman, L. (2010). *Storm Water Management Model – Users' Manual, Version 5.0*. United States Environmental Protection Agency, EPA/600/R-05/040. 285 p.

Räisänen, J., Hansson, U., Ullerstig, A., Döscher, R., Graham, L.P., Jones, C., Meier, H.E.M., Samuelsson, P. & Willén, U. (2004). *European climate in the late twenty-first*

century: regional simulations with two driving global models and two forcing scenarios, *Climate Dynamics*, Vol. 22, pp. 13-31.

Sægrov, S. (2015). Professor, Norwegian University of Science and Technology. Electronic mail announcement 17.6.2015. !

Salvadore, E., Bronders, J. & Batelaan, O. (2015). Hydrological modelling of urbanized catchments: A review and future directions, *Journal of Hydrology*, Vol. 529(1), pp. 62-81.

Schaarup-Jensen, K., Johansen, C. & Thorndahl, S. (2005). Uncertainties related to extreme event statistics of sewer system surcharge and overflow. In: *Proceedings of the 10th International Conference on Urban Drainage*, Copenhagen, Denmark, 21-26.8.2005.

Schueler, T.R. (1994). The importance of imperviousness, *Watershed Protection Techniques*, Vol. 1(3), pp. 100-111.

Şen, Z. (2008). Instantaneous Runoff Coefficient Variation and Peak Discharge Estimation Model. *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 13(4), pp. 270–277.

Shokoohi, A. (2008). A new approach for isochrone mapping in one dimensional flow for using in time area method, *Journal of Applied Sciences*, Vol. 8(3), pp. 516-521.

Shuster, W.D, Bonta, J., Thurston, T., Warnemuende, E. & Smith, D.R. (2005). Impacts of impervious surface on watershed hydrology: A review, *Urban Water Journal*, Vol. 2(4), pp. 263-275.

Sillanpää, N. (2013). Effects of suburban development on runoff generation and water quality. Dissertation. Helsinki. Aalto University, Department of Civil and Environmental Engineering, Aalto University publication series, Doctoral Dissertations 160/2013. 226 p.

Sillanpää, N. & Koivusalo, H. (2014). Impacts of Urbanization and Event Magnitude on Runoff Contributing Area and Runoff Coefficients. *Proceedings International Conference on Urban Drainage*, Sarawak, Malaysia, 7-12.9.2014.

Spinello, A. & Simmons, D.L. (1992). Base Flow of 10 South-Shore Streams, Long Island, New York, 1976-85, and the Effects of Urbanization on Base Flow and Flow Duration. New York, U.S. Geological Survey, Water-Resources Investigations Report 90-4205. 34 p.

Suomen kuntatekniikan yhdistys. (2003). *Katu 2002 - kadunrakennuksen tekniset ohjeet*. 281 s.

Sutherland, R.C. (2000). Methods for estimating the effective impervious area of urban watersheds. Teoksessa: Schueler, T.R., Holland, H.K. (toim.) The practice of watershed protection. Ellicott City, MD, Center for Watershed Protection. pp. 193-195.

SYKE. (2013). Maankäyttö- ja maanpeiteaineistojen tuottaminen CORINE Land Cover 2012 -hankkeessa. Julkaistu 24.4.2013. Saatavissa (viitattu 12.9.2015): <http://www.syke.fi/maanpeiteseuranta>.

Taha, H. (1997). Urban climates and heat islands: Albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat, *Energy and Buildings*, Vol. 25(2), pp. 99-103.

Thanapura, P., Helder, D.L., Burckhard, S., Warmath, E., O'Neill, M. & Galster, D. (2007). Mapping Urban Land Cover Using QuickBird NDVI Image and GIS Spatial Modeling for Runoff Coefficient Determination, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol 73(1), pp. 57-65.

Thorndahl, S. & Schaarup-Jensen, K. (2007). Comparative analysis of uncertainties in urban surface runoff modelling. In: *Proceedings of Novatech 2007: Sixth International Conference on Sustainable Techniques and Strategies in Urban Water Management*, Lyon, France, 25-28.6.2007.

Tilastokeskus. (2000). Maankäyttöluokitus. Helsinki, Tilastokeskus, Käsikirjoja 40. 115 s.

Toba, T. & Ohta, T. (2005). An observational study of the factors that influence interception loss in boreal and temperate forests, *Journal of Hydrology*, Vol. 313(3-4), pp. 208-220.

Vakkilainen, P., Kotola, J. & Nurminen, J. (2005). Rakennetun ympäristön valumavedet ja niiden hallinta. Helsinki, Ympäristöministeriö, Suomen ympäristö 776. 116 s.

Vatankhah, A.R. & Easa, S.M. (2013). Depth-independent kinematic wave parameters for trapezoidal and power-law channels, *Ain Shams Engineering Journal*, Vol. 4(2), pp. 173-183.

Verbeiren, B., Van De Voorde, T., Canters, F., Binard, M., Cornet, Y. & Batelaan, O. (2013). Assessing urbanisation effects on rainfall-runoff using a remote sensing supported modelling strategy, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Vol. 21, pp. 92-102.

VHL 9.2.2001/119. Vesihuoltolaki muutoksineen (L 22.8.2014/681).

Viessman, W. & Lewis, G. L. (2003). *Introduction to hydrology*. 5th Edition. Upper Saddle River, NJ, Pearson Education. 612 p.

- Walpole, R.E., Myers, R.H., Myers, S.L. & Ye, K. (2011). *Probability & Statistics for Engineers & Scientists*. Ninth Edition. Upper Saddle River, NJ, Prentice-Hall. 816 p.
- Weng, Q. (2012). Remote sensing of impervious surfaces in the urban areas: Requirements, methods, and trends, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 117, pp. 34-49.
- Xie, Y., Sha, Z. & Yu, M. (2008). Remote sensing imagery in vegetation mapping: a review, *Journal of Plant Ecology*, Vol. 1(1), pp. 9-23.
- Yan, W.Y., Shaker, A. & El-Ashmawy, N. (2015). Urban land cover classification using airborne LiDAR data: A review, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 158, pp. 295-310.
- Zoppou, C. (2001). Review of urban storm water models, *Environmental Modelling & Software*, Vol. 16(3), pp. 195-231.

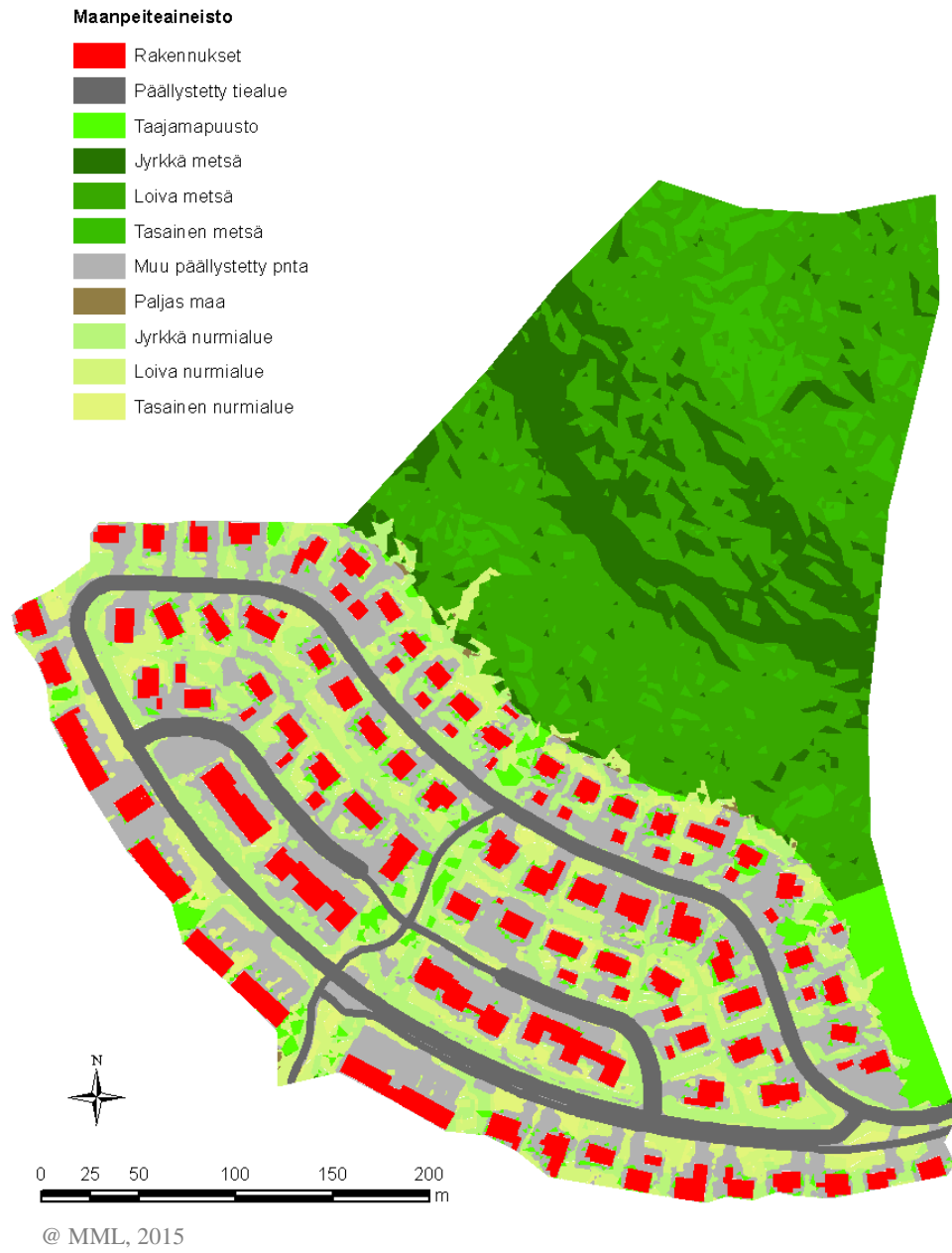
## LIITE A: KOHDEALUEIDEN MAANPEITEAINEISTO

### Keskustan kohdealue (1.)

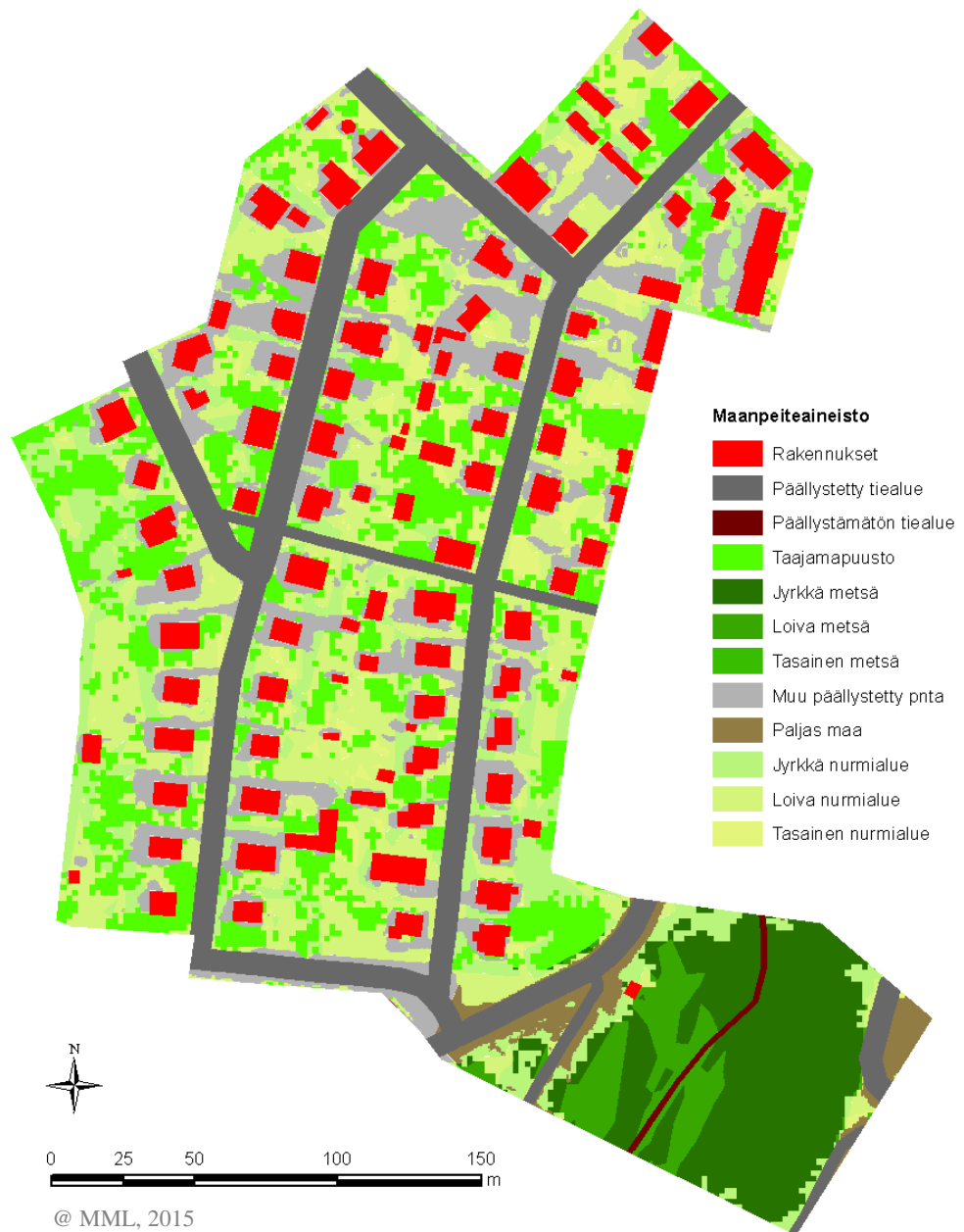




## Halssilanmäen kohdealue (2.)

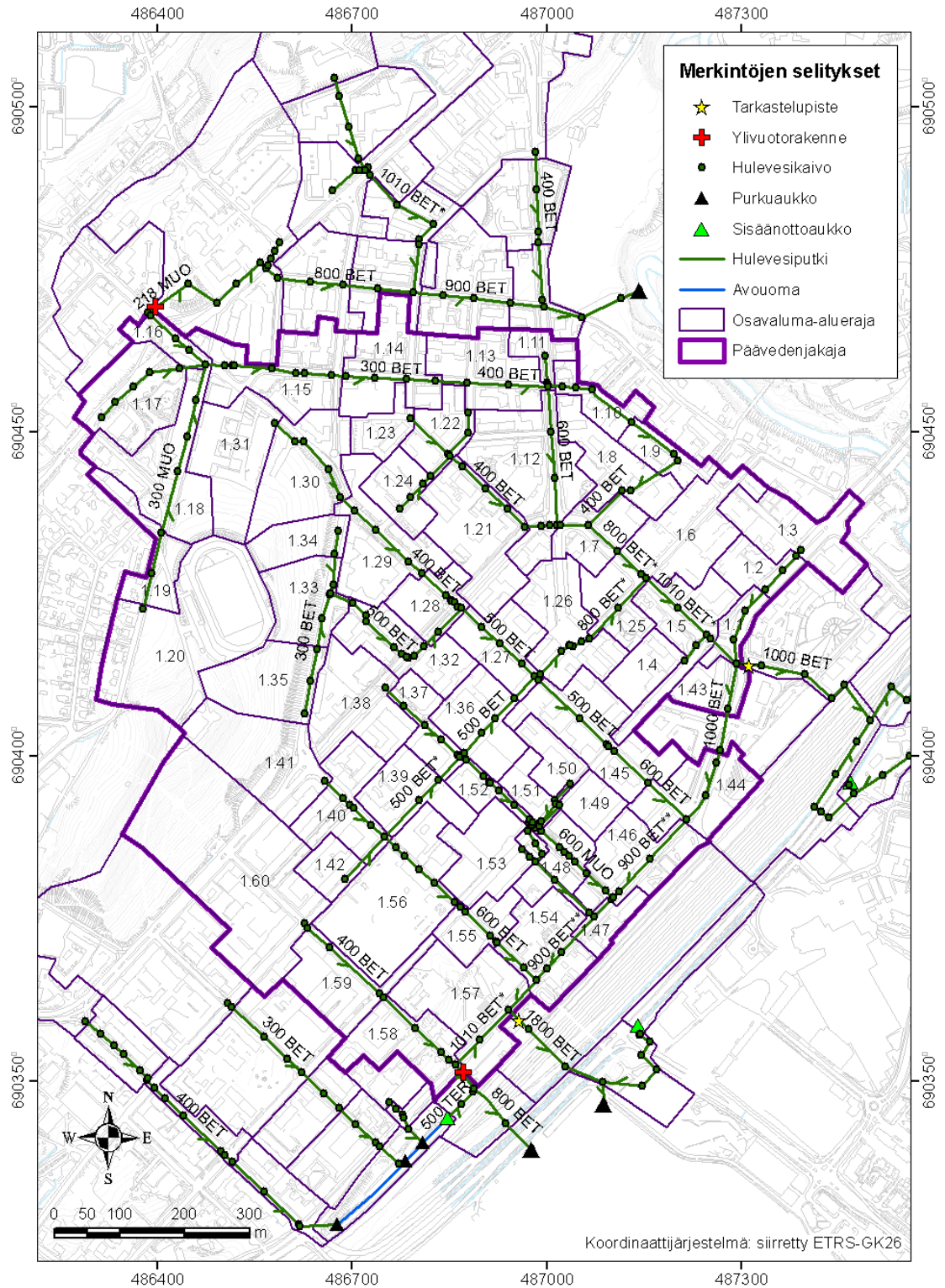


### Mäki-Matin kohdealue (3.)

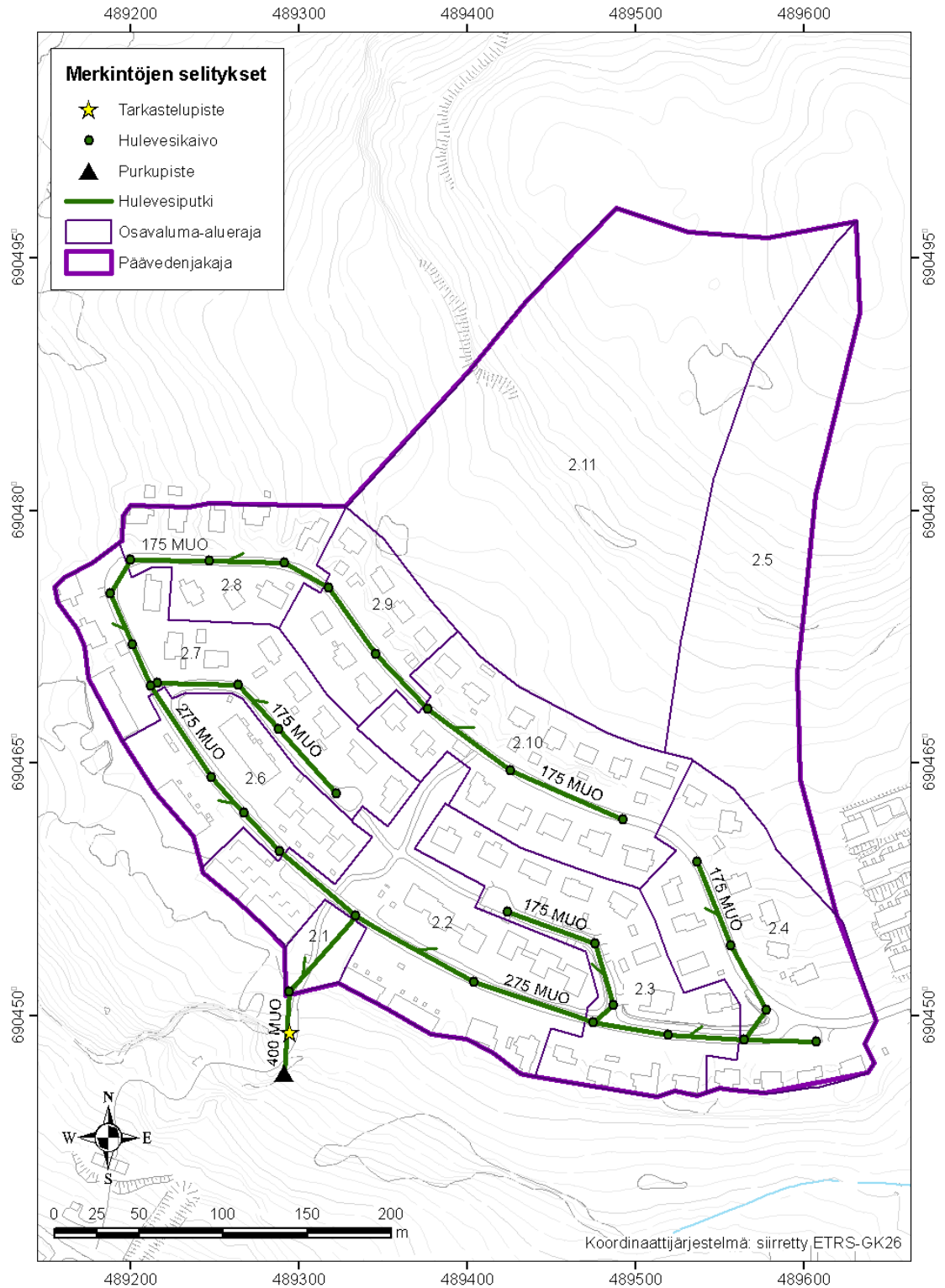


## LIITE B: KOHDEALUEIDEN HULEVESIVERKOSTO

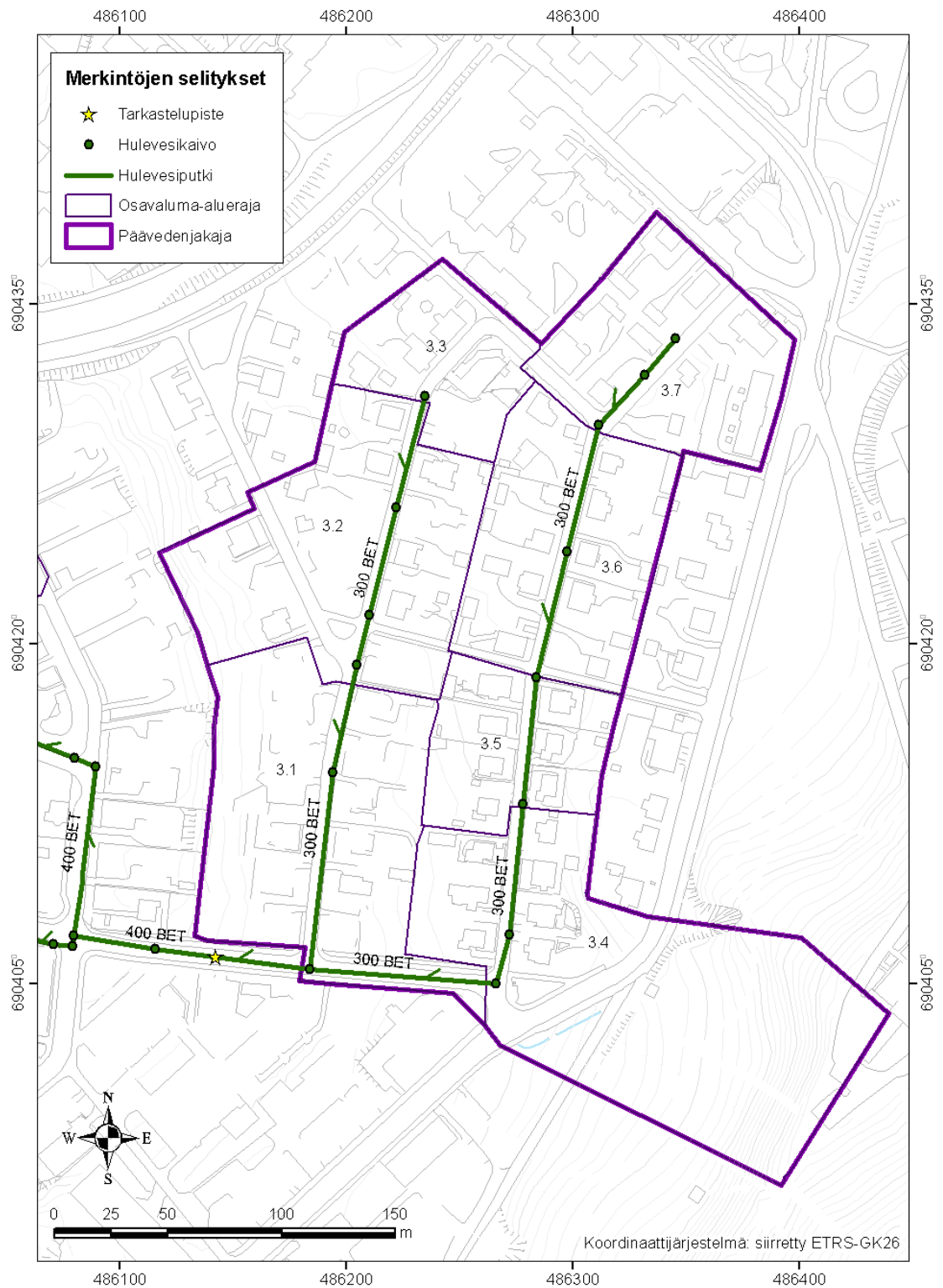
### Keskustan kohdealue (1.)



## Halssilanmäen kohdealue (2.)



## Mäki-Matin kohdealue (3.)





## LIITE C: KOHDEALUEIDEN OSAVALUMA-ALUEKOHTAISET VALUMAKERTOIMET

### Keskustan kohdealue (1.)

Valuma-alue	Pinta-ala (ha)	Valumakerroin, C (%)		Erotus, $d_i$
		Maanpeiteaineisto, $x_{1,i}$	Maankayttöluokitus, $x_{2,i}$	
1.1	0.55	69.1	80.0	-10.8
1.2	0.76	54.0	73.3	-19.3
1.3	1.79	57.3	75.7	-18.3
1.4	0.79	59.1	70.1	-10.9
1.5	1.62	60.9	75.0	-14.1
1.6	2.02	55.9	72.7	-16.8
1.7	1.08	64.4	71.0	-6.5
1.8	1.51	50.9	58.3	-7.4
1.9	0.68	50.2	74.6	-24.4
1.10	0.72	56.2	73.1	-16.9
1.11	0.50	58.1	73.7	-15.6
1.12	2.85	52.7	69.9	-17.2
1.13	1.66	58.8	72.2	-13.5
1.14	1.87	61.0	74.3	-13.4
1.15	2.25	62.4	77.6	-15.2
1.16	0.53	43.9	78.1	-34.2
1.17	1.85	34.0	58.4	-24.4
1.18	2.31	42.3	46.4	-4.1
1.19	1.02	39.7	42.2	-2.5
1.20	4.53	23.6	22.4	1.2
1.21	2.32	65.8	72.5	-6.7
1.22	0.94	60.2	74.9	-14.8
1.23	0.64	49.8	71.8	-22.0
1.24	0.89	57.6	71.5	-13.9
1.25	1.02	68.4	76.8	-8.4
1.26	1.86	71.3	74.9	-3.6
1.27	1.28	80.1	78.8	1.3
1.28	0.95	63.7	78.6	-15.0
1.29	1.99	65.1	73.5	-8.5
1.30	2.11	26.9	46.4	-19.4
1.31	2.04	50.7	68.0	-17.3
1.32	1.54	76.2	78.1	-1.9
1.33	1.39	18.1	24.6	-6.5
1.34	0.91	11.8	14.9	-3.2
1.35	1.72	11.8	12.6	-0.8
1.36	1.44	83.5	79.9	3.6
1.37	0.85	78.9	76.7	2.2
1.38	1.98	65.7	78.0	-12.3
1.39	1.29	78.0	75.8	2.2
1.40	1.53	69.0	72.7	-3.7
1.41	2.32	34.3	33.4	1.0
1.42	0.61	74.5	71.5	3.0
1.43	0.75	78.0	80.0	-2.0
1.44	1.64	72.3	77.9	-5.7
1.45	2.32	75.6	76.0	-0.4
1.46	1.67	70.0	73.6	-3.6
1.47	1.00	66.9	56.1	10.8
1.48	0.70	73.2	80.0	-6.8
1.49	0.63	74.8	80.0	-5.2
1.50	0.67	78.4	73.6	4.8
1.51	0.57	77.3	80.0	-2.7

1.52	0.49	80.0	80.0	0.0
1.53	1.47	79.9	78.7	1.2
1.54	1.63	59.9	72.6	-12.7
1.55	0.88	79.5	75.7	3.8
1.56	3.21	45.2	26.5	18.7
1.57	2.47	53.2	79.9	-26.6
1.58	1.55	48.9	65.3	-16.3
1.59	1.53	67.6	71.9	-4.3
1.60	5.95	43.2	44.2	-0.9

### Halssilanmäen kohdealue (2.)

Valuma-alue	Pinta-ala (ha)	Valumakerroin, C (%)		Erotus, $d_i$
		Maanpeiteaineisto, $x_{1,i}$	Maankäyttöluokitus, $x_{2,i}$	
2.1	0.17	28.9	19.5	9.4
2.2	1.65	47.9	37.5	10.4
2.3	1.27	46.1	38.3	7.8
2.4	1.55	40.9	35.2	5.6
2.5	2.11	2.3	2.0	0.3
2.6	0.85	50.6	42.4	8.2
2.7	1.23	48.9	38.7	10.1
2.8	0.71	45.2	35.6	9.6
2.9	0.72	42.6	33.5	9.2
2.10	1.41	43.2	32.1	11.1
2.11	4.72	2.3	2.0	0.3

### Mäki-Matin kohdealue (3.)

Valuma-alue	Pinta-ala (ha)	Valumakerroin, C (%)		Erotus, $d_i$
		Maanpeiteaineisto, $x_{1,i}$	Maankäyttöluokitus, $x_{2,i}$	
3.1	1.28	31.4	31.1	0.3
3.2	1.21	37.0	30.8	6.2
3.3	0.46	39.4	30.3	9.1
3.4	1.77	20.3	19.8	0.5
3.5	0.51	31.9	24.6	7.3
3.6	0.91	37.0	28.2	8.8
3.7	0.79	39.2	33.9	5.3

## LIITE D: KOHDEALUEIDEN MAANKÄYTTÖRAJAUSTEN MUKAISET VALUMAKERTOIMET

### Keskustan kohdealue (1.)

Liike- ja toimistorakennusten alue, KL

Nro	Pinta-ala (ha)	Valumakerroin, C (%) Maanpeiteaineisto, $x_{1,i}$
1	0.38	64.0
2	0.52	83.4
3	0.06	75.4
4	0.96	77.1
5	2.28	72.9
6	0.22	77.4
7	0.26	26.6
8	2.33	55.4
9	0.28	64.4
10	0.53	83.3
11	0.27	62.6
12	1.10	58.6
13	1.64	54.2
14	0.52	49.8
15	1.83	83.3
16	0.92	83.7
17	1.11	79.5
18	1.69	84.0
19	0.85	65.8
20	0.17	78.8
21	0.51	60.2
22	0.15	77.8
23	0.28	84.4
24	0.91	86.4
25	1.08	45.5
26	0.20	58.6
27	0.25	56.3
28	0.33	69.0
29	0.36	68.9
30	2.12	54.8
31	0.58	62.5
32	0.46	51.8
33	0.32	57.3
34	0.13	28.4
35	0.37	56.1
36	0.48	50.5
37	0.10	62.1
38	0.37	55.5
39	4.14	53.1
40	0.44	41.4
41	0.81	42.4
42	0.27	54.6
43	0.18	79.4
44	1.76	22.7
45	0.48	27.1
46	0.69	57.4
47	0.65	28.5
48	0.65	62.7
49	0.37	76.6

Kerrostaloalue, KK

Nro	Pinta-ala (ha)	Valumakerroin, C (%) Maanpeiteaineisto, $x_{1,i}$
1	0.72	62.0
2	0.72	48.9
3	0.69	43.3
4	1.16	54.8
5	1.61	68.0
6	2.17	55.5
7	1.71	53.6
8	1.66	74.4
9	1.86	60.8
10	1.05	76.4
11	1.05	71.4
12	1.06	69.7
13	0.39	77.5
14	1.64	74.2
15	0.27	46.5
16	0.82	76.7
17	0.58	78.5
18	0.41	66.8
19	0.88	68.3
20	2.47	61.6
21	1.21	68.5
22	2.02	65.3
23	0.48	49.2
24	1.75	45.4
25	0.16	16.1
26	0.24	63.6
27	0.81	70.9
28	0.73	47.3
29	0.08	73.2
30	2.14	54.4
31	0.85	47.7
32	0.17	66.2
33	1.41	55.5
34	1.31	47.4
35	0.89	43.2
36	0.64	50.8
37	0.69	56.6
38	1.05	57.6
39	1.39	52.9
40	0.39	59.9
41	0.19	63.7
42	0.43	52.0
43	0.93	55.5
44	0.28	50.5
45	0.50	58.7
46	0.52	50.5
47	0.45	54.7
48	0.59	65.6
49	0.37	58.3
50	0.52	54.3



## Kerrostaloalue, KK

Nro	Pinta-ala (ha)	Valumakerroin, C (%) Maanpeiteaineisto, $x_{1,i}$
51	0.64	59.9
52	0.54	55.2
53	0.25	57.7
54	0.54	44.0
55	0.67	49.4
56	0.40	42.9
57	1.19	48.6
58	2.68	44.1
59	0.26	41.7

## Halssilanmäen kohdealue (2.)

## Omakotitaloalue, HO

Nro	Pinta-ala (ha)	Valumakerroin, C (%) Maanpeiteaineisto, $x_{1,i}$
1	0.36	40.7
2	0.17	39.2
3	0.61	40.0
4	1.32	39.3
5	0.62	41.2
6	0.33	43.5
7	1.36	41.3
8	0.92	35.1

## Rivitaloalue, HR

Nro	Pinta-ala (ha)	Valumakerroin, C (%) Maanpeiteaineisto, $x_{1,i}$
1	0.45	45.6
2	0.48	48.1
3	0.25	50.2
4	0.28	42.7
5	0.40	48.5

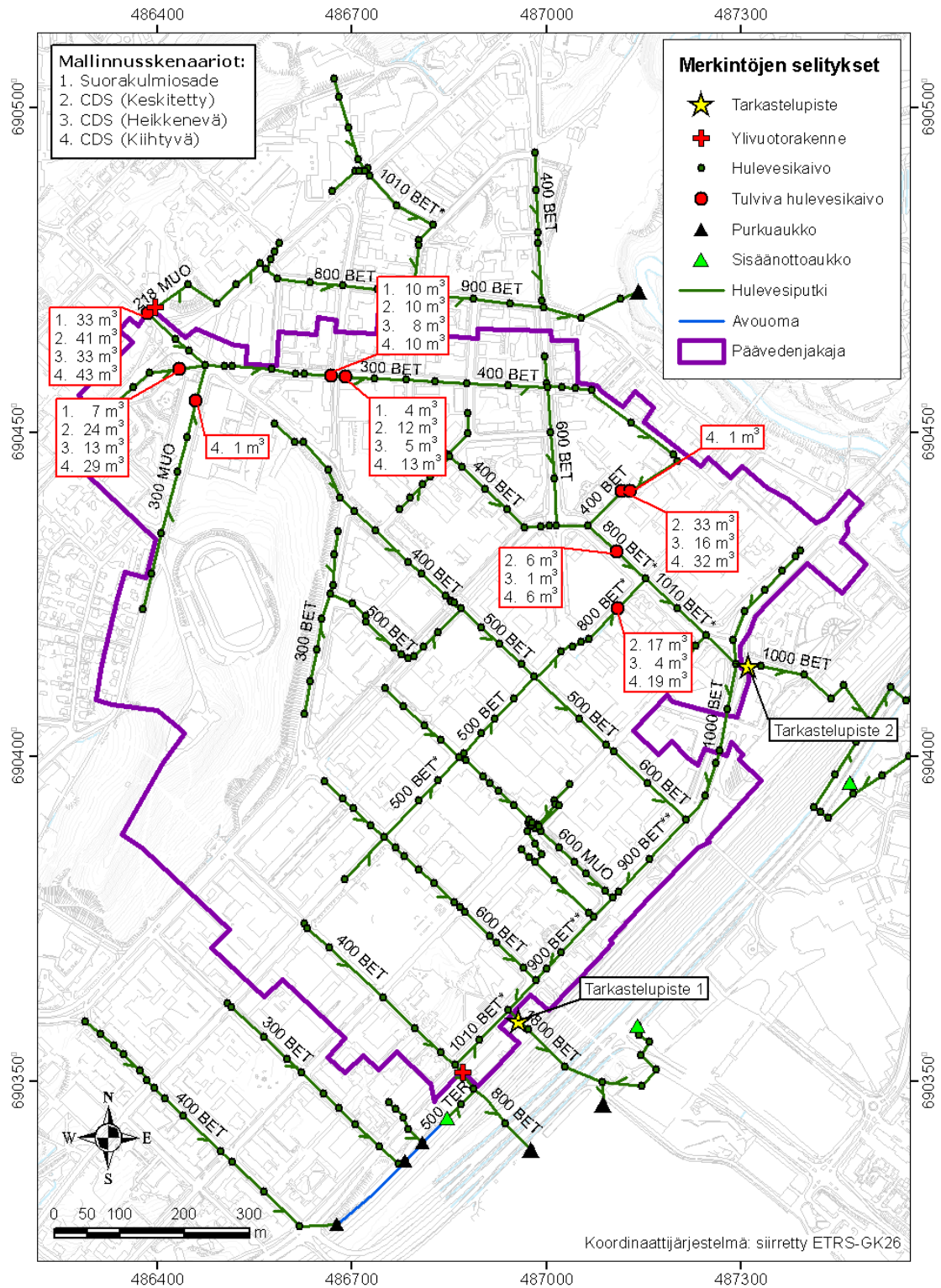
## Mäki-Matin kohdealue (3.)

## Omakotitaloalue, MO

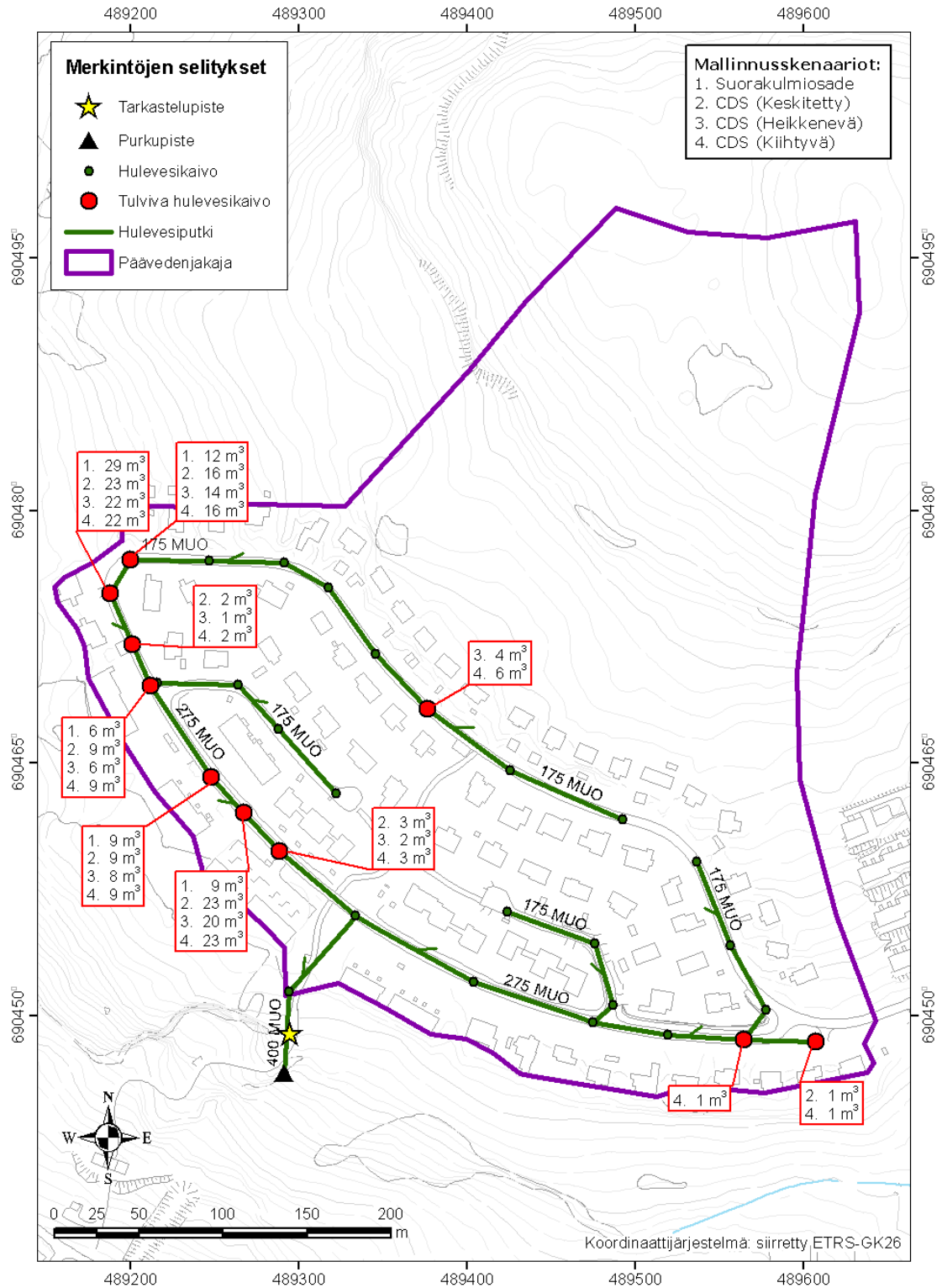
Nro	Pinta-ala (ha)	Valumakerroin, C (%) Maanpeiteaineisto, $x_{1,i}$
1	0.75	31.6
2	0.77	29.4
3	0.76	27.2
4	1.04	27.8
5	2.22	22.9
6	1.00	29.4
7	0.33	32.2

# LIITE E: MITOITUSSATEIDEN TARKASTELUSSA KOHDEALUEILLA TULVIVAT KAIVOT

## Keskustan kohdealue (1.)

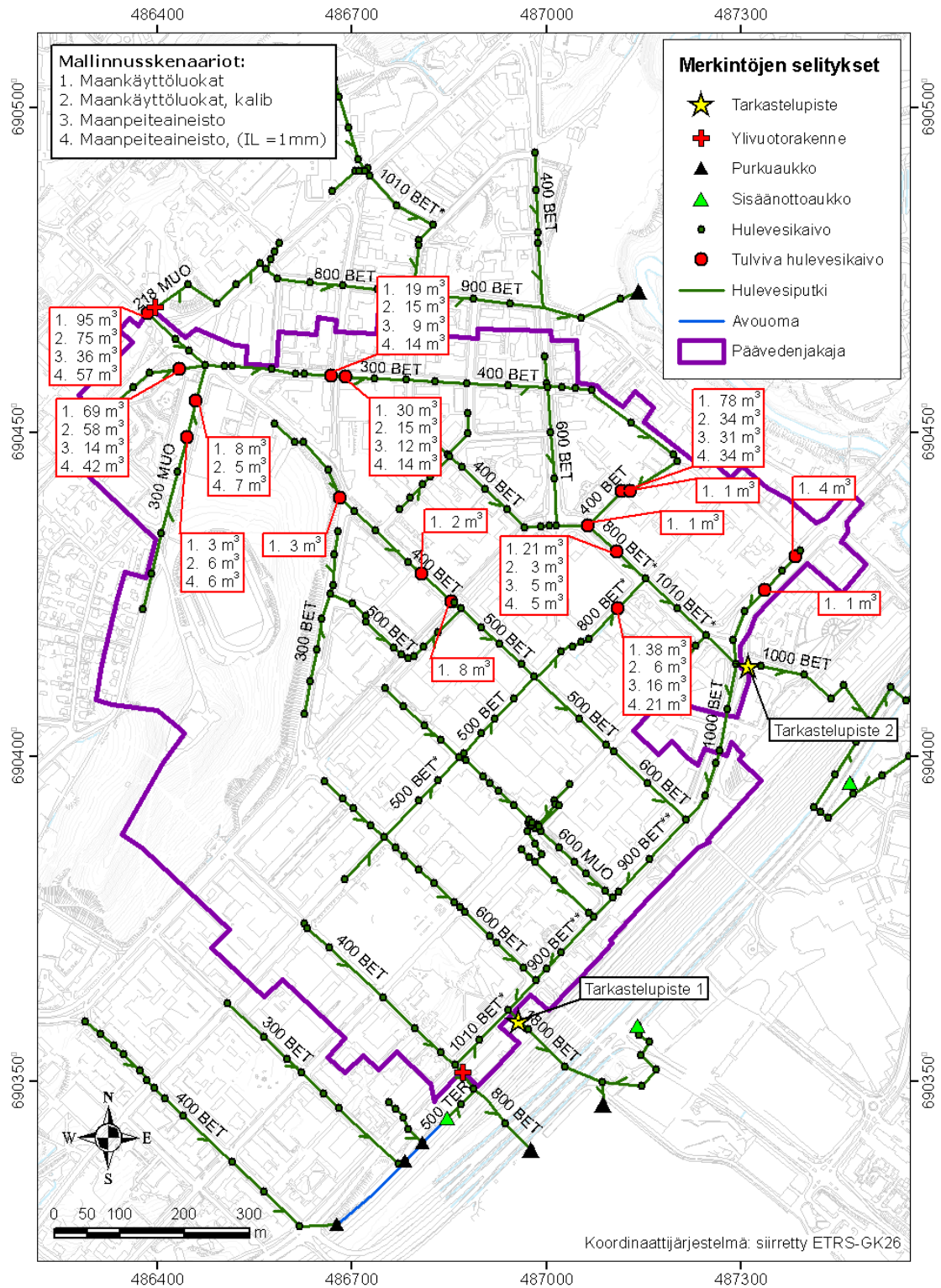


## Halssilanmäen kohdealue (2.)



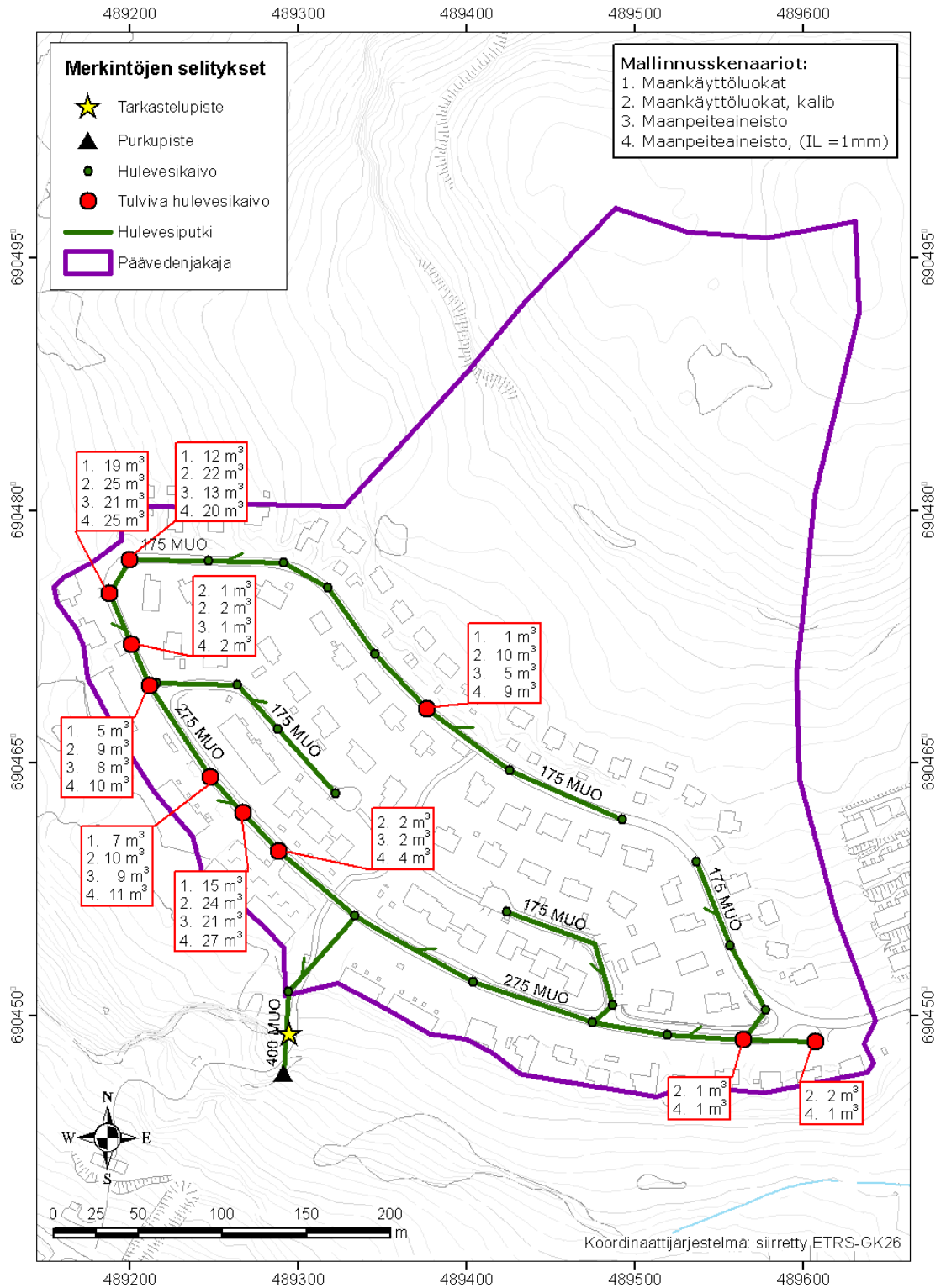
# LIITE F: MAANPEITEAINEISTOJEN VAIKUTUSTEN TARKASTE- LUSSA KOHDEALUEILLA TULVIVAT KAIVOT

## Keskustan kohdealue (1.)



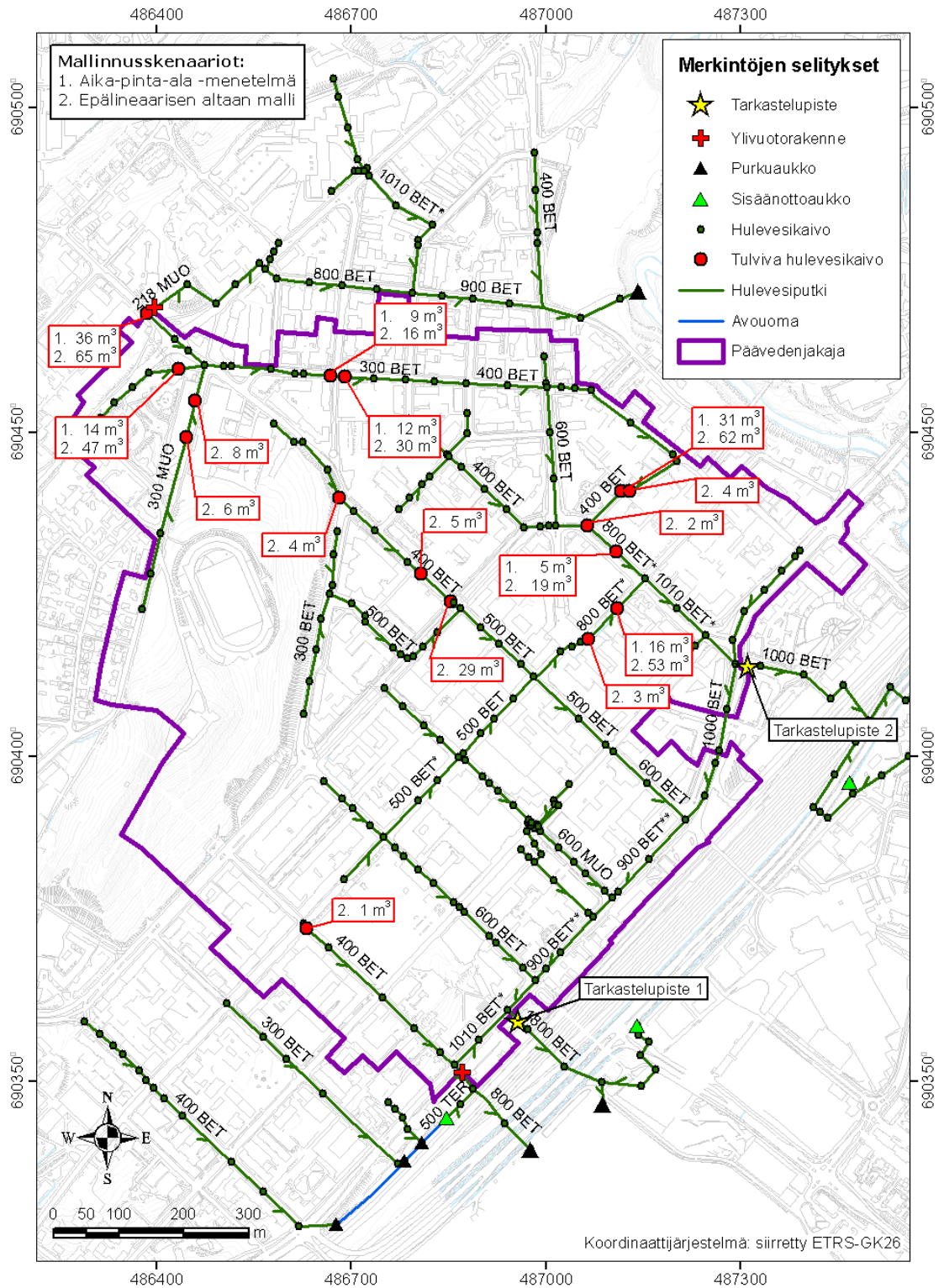


### Halssilanmäen kohdealue (2.)



# LIITE G: VALUNTAMALLIEN TARKASTELUSSA KOHDEALUEILLA TULVIVAT KAIVOT

## Keskustan kohdealue (1.)



## Halssilanmäen kohdealue (2.)

