



Aalto-yliopisto
Insinöörیتieteiden korkeakoulu

Katariina Aarnio

Pintamittauksen hyödyntämismahdollisuudet viemäriverkostomallin kalibroinnissa

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

Espoossa 28.10.2016

Valvoja: Professori Riku Vahala

Ohjaajat: DI Tuija Laakso, DI Matti Heikkinen

Tekijä Katariina Aarnio

Työn nimi Pintamittauksen hyödyntämismahdollisuudet viemäriverkostomallin kalibroinnissa

Koulutusohjelma Yhdyskunta- ja ympäristötekniikka

Pääaine Vesi- ja ympäristötekniikka**Koodi** R3005

Työn valvoja Professori Riku Vahala

Työn ohjaajat DI Tuija Laakso ja DI Matti Heikkinen

Päivämäärä 28.10.2016**Sivumäärä** 94 + 18**Kieli** suomi

Tiivistelmä

Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymä HSY käynnisti vuonna 2015 koko toiminta-alueensa viemäriverkoston hydraulisen mallinnuksen. Mallia on tarkoitus käyttää muun muassa kapasiteettitarkasteluihin ja vuotovesien analysointiin. Mallinnuksessa huomioidaan verkoston valuma-alueen hydrologia ja yleensä malli kalibroidaan vastaamaan mahdollisimman hyvin mitattuja virtaaman arvoja. Luotettavien virtaamamittausten suorittaminen on kuitenkin kallista ja verkoston pumppaamoiden virtaamatiedot usein puutteellisia. Vaihtoehtona virtaamamittauksille voisivat olla viemäriverkostosta suoritettut vedenpinnankorkeusmittaukset, joiden käyttö on verrattain helppoa ja edullista.

Tässä työssä on tarkasteltu pintamittausten käyttökelpoisuutta viemärimallin kalibrointiin. Tavoitteena oli selvittää, voiko mallin kalibroida pintamittausten avulla, ja mitä tietoja ja työvaiheita se vaatii. Lisäksi tavoitteena oli selvittää mittaustaikojen olosuhteiden vaikutusta mittaustuloksiin. Työssä tarkasteltiin myös käytetyn sadedatatyyppin vaikutusta mallinnustuloksiin. Mallinnusalueena oli Munkkiniemi, jossa mittauksia suoritettiin vuoden 2016 kevään ja kesän aikana. Tammiston alueella tehtyjä mittauksia käytettiin mittareiden käytettävyyden arviointiin.

Munkkiniemen alueen viemäriverkosto mallinnettiin SWMM-ohjelmalla (Storm Water Management Model, hulevesien hallintamalli) ja kalibrointi tehtiin PEST-ohjelmalla. Mallinnuksessa hyödynnettiin HSY:n verkosto-, vedenkulutus- ja maanpeitetietoja. Ilmasto- ja sadedata saatiin Ilmatieteen laitokselta ja korkeusmalli Maanmittauslaitokselta. Munkkiniemen verkoston valuma-alue jaettiin osavaluma-alueisiin maanpeitetyyppin mukaan. Kalibroinnissa kalibroitiin jokaisen maanpeitetyyppin Manningin kerrointa, painannesäilyntää ja läpäisemättömyyttä.

Mittaustulosten perusteella esimerkiksi pumppaamoiden läheisyys, verkostotyyppi ja virheet mittarien asennuksessa vaikuttavat mittaustulosten luotettavuuteen. Luotettava mittaustaikka on mahdollisimman häiriötön, kuten myös paikan virtaama. Tarkasteluaikavälillä sovitettu sadetutkadata antoi mallinnusalueen ulkopuolella sademittarilla mitattua sadantaa hieman paremman mallinnustuloksen. Kalibrointi paransi mallinnustulosta hieman mutta mallin toimivuutta kuvaavat NSE-luvut jäivät silti hyvän tason alle. Tämän työn perusteella vaikuttaa mahdolliselta käyttää pintamittareita ainakin osaan kalibroinnin vaatimista mittauksista edellyttäen, että mittarit on sijoitettu luotettaviin mittaustaikoihin. Ennen lopullisten johtopäätösten tekoa mittareita tulisi kuitenkin testata vielä uusissa, tarkkaan harkituissa paikoissa. Kalibrointi tulisi tehdä erikseen seka- ja erillisviemäroidyille alueille. Jotta mallin toimivuutta voitaisiin tarkastella paremmin, käytössä olisi hyvä olla virtaamadataa, johon mallin tuottamaa virtaamaa voisi verrata.

Avainsanat SWMM, pintamittaus, kalibrointi, jätevesi, maanpeite



Author Katariina Aarnio

Title of thesis Utilizing possibilities of level measurement in the calibration of a sewerage model

Degree programme Civil and Environmental Engineering

Major Water and Environmental Engineering

Code R3005

Thesis supervisor Professor Riku Vahala

Thesis advisors M. Sc. (Tech.) Tuija Laakso and M. Sc. (Tech.) Matti Heikkinen

Date 28.10.2016

Number of pages 94 + 18

Language Finnish

Abstract

The Helsinki Region Environmental Services Authority (HSY) started a hydraulic modelling of their waste water network in 2015. The model is intended, for example, to study capacity and analyse infiltration. In a modelling process the hydrology of the catchment is considered and a model is usually calibrated against measured discharges. However, reliable discharge measurements are expensive to conduct and the discharge data from pumping stations is often unreliable. Instead, water level measurements conducted in a waste water network can represent a good alternative since they are easier and more cost effective to conduct.

Consequently, the thesis studied utilizing possibility of level measurements for the calibration of a sewerage model. The goal was to identify whether the calibration of a model is possible with level measurements and what kinds of data and stages are required for their utilisation. Moreover, the thesis aims to research the effect of the measuring point conditions on the measuring results. The effect of utilised rainfall data type was also observed on the modelling results. The modelling was conducted for Munkkiniemi and the measurements were conducted during the spring and summer of 2016. The measurements conducted in Tammisto were used to study the usability of the meters.

The sewerage of the Munkkiniemi area was modelled with SWMM (Storm Water Management Model) and the model calibrated with PEST. The land cover data from HSY and rainfall data from the Finnish Meteorological Institute were exploited in the modelling. The catchment of the Munkkiniemi sewerage was shared into subcatchments based on the land cover. Calibrated parameters were the Manning factor, depression storage and imperviousness of the land cover types.

According to the measurement results, the close location of a pumping station, network type and mistakes in the meter installation process, for example, have an effect on the reliability of the measuring results. A reliable measuring point should be as undisturbed as possible. The weather radar seemed to provide a slightly better modelling result compared to the rainfall data from the measuring station outside the area during the examined period. Calibration improved the modelling result somewhat but Nash-Sutcliffe efficiencies did not achieve an adequate level. According to the results of the thesis, it seems possible to use level measurements at least for a part of the measurements calibration demands. However, the meters must be set to reliable measuring points. Before final conclusions can be drawn, it would thus be useful to test new, carefully considered measuring points. Moreover, calibration should be conducted separately for the combined and separate sewerage. In order to better study the reliability of the model, it would be informative to have measured discharge data so that the modelled discharge could be compared with it.

Keywords SWMM, level measurement, calibration, waste water, land cover

Alkusanat

Tämä diplomityö on tehty Ramboll Finland Oy:ssä Aalto-yliopiston insinööritieteiden korkeakoululle Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymän HSY toimeksiannosta. Työ on tehty osana laajempaa SmartWater-hanketta, jonka tarkoituksena on etsiä uudenlaisia ratkaisuja ja tapoja toimia vesihuollossa digitaalista tietoa hyödyntäen.

Ensimmäiseksi haluan kiittää TkT Anna Mikolaa Aalto-yliopistosta aiheen löytämisestä ja HSY:tä mielenkiintoisen aiheen tarjoamisesta ja rahoituksesta. Maa- ja vesitekniikan tuki ry:lle kiitos apurahasta ja Ramboll Finland Oy:lle työn mahdollistamisesta.

Työn ohjaajina toimivat DI Matti Heikkinen Ramboll Finland Oy:stä ja DI Tuija Laakso Aalto-yliopistosta. Heille kiitos hyvistä ja nopeista kommentteista sekä vastauksista kaikkiin kysymyksiin. HSY:stä ohjaukseen osallistuivat DI Tommi Fred, DI Mari Heinonen ja DI, FT Tiia Lampola, joita kiitän myös projektin kommentoinnista. Kiitos myös työtä valvo-neelle professori Riku Vahalalle.

Työn valmistuminen ei olisi ollut mahdollista ilman monien muiden henkilöiden osuutta. Kiitän Perttu Saarista HSY:stä mittareiden asennuksesta ja mittareihin ja pumppaamoihin liittyvien tietojen toimittamisesta sekä Tero Niemeä Aalto-yliopistosta sade- ja ilmastodatan kanssa avustamisesta. Ennen kaikkea erikoiskiitos Lassi Warstalle, joka jaksoi auttaa ja neuvoa mallin rakentamisessa ja kalibroinnissa, ja jota ilman kyseisten osuuksien tekeminen olisi ollut paljon haastavampaa. Kiitän myös kaikkia työtä kommentoineita ja apua tarjon-neita.

Lopuksi haluan kiittää kaikkia opiskelukavereita, ystäviä ja läheisiä, jotka motivoivat minua opinnoissani ja tekivät opiskelujasta ikimuistoisen. Erityiskiitos Blondeille vertaistuesta ja mahtavista hetkistä niin opiskelujen parissa kuin vapaa-ajallakin. Viimeisimpänä suuri kiitos vielä vanhemmilleni ja veljelleni tuesta, kannustuksesta, mielenkiinnosta opintojani kohtaan sekä hyvistä neuvoista kaikkien näiden vuosien aikana.

Espoo 28.10.2016

Katariina Aarnio

Sisällysluettelo

Tiivistelmä	
Abstract	
Alkusanat	
Sisällysluettelo	5
Merkinnät	7
Lyhenteet	9
1 Johdanto	10
2 Pinnankorkeuden ja virtaaman mittaaminen viemäreissä	12
2.1 Virtaamamittaukset	12
2.1.1 Astiamittaus	12
2.1.2 Ultraääni	12
2.1.3 Magneettinen virtaamamittaus	14
2.1.4 Mittaus virtausnopeuden ja pinnankorkeuden perusteella	15
2.2 Pintamittaukset	15
2.2.1 Ultraääni	16
2.2.2 Paineanturi	17
2.2.3 Tutka	18
2.3 Pinnankorkeuden ja virtaaman hydraulinen riippuvuus	18
2.3.1 Yleistä	18
2.3.2 Tasainen virtaus	19
2.3.3 Epätasainen virtaus	20
2.3.4 Kiito- ja verkkavirtaus	22
3 Verkoston hule- ja vuotovesivirtaamiin vaikuttavia tekijöitä	24
3.1 Sadanta	24
3.1.1 Sade Suomessa ja Helsingissä	24
3.1.2 Sateen mittaaminen	25
3.1.3 Vaikutus valuntaan	26
3.2 Valuma-aluekijät	27
3.2.1 Valuma-alueen mitat	27
3.2.2 Päällystetyn pinnan osuus	27
3.2.3 Painannesäilyntä	28
3.2.4 Manningin karkeuskerroin	29
3.3 Verkoston kunto	29
4 Mallinnusohjelma	30
4.1 Perusperiaate	30
4.2 Pintavalunnan muodostuminen	31
4.3 Dynaaminen aaltoyhtälö	33
5 Kirjallisuuskatsaus mallin kalibrointiin	35
5.1 Yleistä	35
5.2 Parametrit	35
5.3 Pintamittaukset vertailutietoina	36
5.4 Lähtö- ja vertailutietojen vaikutus tuloksiin	38
5.5 Tulosten hyvyyden arviointi	39
6 Pintamittauksen käyttö verkoston hallinnassa	41
6.1 Viemärien virtaama	41
6.2 Ylivuotojen virtaama	42

7	Tutkimusaineisto ja -menelmät.....	44
7.1	Tutkimusalueet.....	44
7.1.1	Valuma-alueen määrittäminen.....	44
7.1.2	Munkkiniemi.....	45
7.1.3	Tammisto.....	47
7.2	Käytetyt pinnankorkeusmittarit.....	48
7.2.1	Mittariesittely.....	49
7.2.2	Mittarien asennus.....	49
7.2.3	Sijainti Munkkiniemessä.....	51
7.2.4	Sijainti Tammistossa.....	52
7.3	Muu käytetty data.....	53
7.3.1	Vedenkulutustiedot.....	53
7.3.2	Ilmasto- ja sadetiedot.....	54
7.4	Mallin rakentaminen ja kalibrointi.....	55
7.4.1	Mallin rakentaminen.....	56
7.4.2	Kalibrointiin valitut parametrit.....	57
7.4.3	Kalibrointitekniikka.....	58
8	Tulokset ja niiden tarkastelu.....	60
8.1	Pintamittaustulosten arviointi.....	60
8.1.1	Pintamittausten laadun ja olosuhteiden vaikutuksen tarkastelu.....	60
8.1.2	Suosituksia mittauspäivästä.....	67
8.2	Käytetyn sadedatan vaikutus mallinnustuloksiin.....	68
8.3	Kalibrointi ja validointi.....	71
8.3.1	Kalibrointi.....	71
8.3.2	Validointi.....	76
8.4	Virtaaman ja pinnankorkeuden yhteys.....	79
8.5	Virhelähteet.....	81
9	Johtopäätökset.....	84
	Lähdeluettelo.....	87
	Liiteluettelo.....	94
	Liitteet	

Merkinnot

A	[m ²]	pinta-ala
A_m	[m ²]	keskimääräinen pinta-ala
B	[T = Vs/m ²]	magneettivuon tiheys
C_d	[-]	virtauksen kuroutumisesta aiheutuva kerroin
D	[m]	halkaisija
D_h	[m]	hydraulinen halkaisija
Fr	[-]	Frouden luku
H	[m]	hydraulinen korkeus
H_w	[m]	vedenpinnan korkeus patoaukon alaosaan mitattuna
L	[m]	poikkileikkausten välinen etäisyys
L_u	[m]	pulssin kulkema matka
Q	[m ³ /s]	virtaama
R	[m]	hydraulinen säde
R_m	[m]	keskimääräinen hydraulinen säde
R_x	[m]	osavaluma-alueen hydraulinen säde
S	[-]	kaltevuus
S_f	[m]	kitkalkaltevuus
U	[V]	jännite
V	[m ³]	tilavuus
V_k	[m ³]	imukaivon vesitilavuus pumppujen käynnistyessä
V_p	[m ³]	imukaivon vesitilavuus pumppujen pysähtyessä
W	[m]	valuma-alueen leveys
Y_i^{obs}	[-]	havaittu arvo
Y_i^{sim}	[-]	mallinnettu arvo
$Y_i^{obs,mean}$	[-]	havaittujen arvojen keskiarvo
d	[m]	veden syvyys
d_s	[mm]	painannesäilyntä
e	[m/s]	haihdunta
f	[m/s]	suotautuminen
g	[m/s ²]	gravitaatiokiihtyvyys
h_l	[m]	Bernoullin yhtälön kitkahäviötermi
h_p	[m]	Bernoullin yhtälön paikallishäviötermi
i	[m/s]	sadanta
k	[-]	paikallishäviökerroin
k_l	[mm]	pinnan tyypistä riippuva kerroin
k_m	[-]	vakio magneettisessa virtaamamittauksessa
n	[s/m ^{1/3}]	Manningin karkeuskerroin
n	[-]	havaintojen lukumäärä
p	[Pa]	hydrostaattinen paine
q	[m/s]	valunta
q_L	[m]	pisin valunnan kulkema matka

s	[m]	etäisyys anturista vedenpintaan
t	[s]	aika
t_l	[s]	pumppujen pysähdyksissä oloaika
v	[m/s]	veden nopeus
v_m	[m/s]	keskimääräinen virtausnopeus
v_u	[m/s]	ultraäänipulssin nopeus
x	[m]	etäisyys
y	[m]	vedenpinnan korkeus
z	[m]	korkeus merenpinnasta
α	[-]	nopeuden epätasaisesta jakautumisesta johtuva kerroin
β	[°]	v-padon purkautumisaukon kulma
θ	[°]	veden virtaussuunnan ja ultraäänipulssin välinen kulma
ρ	[kg/m ³]	tiheys

Lyhenteet

EPA	U.S. Environmental Protection Agency, Yhdysvaltain ympäristöministeriö
GTK	Geologian tutkimuskeskus
HSY	Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymä
NSE	Nash-Sutcliffe efficiency, Nash-Sutcliffe-tehokkuus
RIL	Suomen Rakennusinsinöörien Liitto ry
SSE	Sum of Squared Errors, jäännösneliösumma
SSOAP	Sanitary Sewer Overflow Analysis and Planning, työkalu jätevesiviemärin ylivuodon analysointiin ja suunnitteluun
SWMM	Storm Water Management Model, hulevesien hallintamalli

1 Johdanto

Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymä HSY käynnisti syksyllä 2015 viemäri-verkostonsa hydraulisen mallinnuksen. Tätä aikaisemmin tehdyt mallit olivat epäyhteneväisiä, osittain vanhentuneita ja nisitä puuttui viemärintialueen koko. Mallinnuksen tavoitteena on rakentaa viemärimalli HSY:n koko toiminta-alueesta. Viemärimallin tarkoituksena on vastata mahdollisimman hyvin todellisen viemäriverkoston toimintaa ja siten mallin avulla voidaan luoda kokonaiskuva viemäriverkoston toimivuudesta. Mallinnuksen tuloksia voidaan hyödyntää muun muassa viemäriverkon vuotovesitilanteen analysoimisessa, viemäriverkkoon kuuluvien pumppaamoiden ynnä muiden hydraulisten rakenteiden mitoituksessa ja toiminnan analysoinnissa sekä olemassa olevan viemäriverkon hydraulisen kapasiteetin ja pullonkaulakohtien selvittämisessä (RIL 2010). HSY:n tavoitteena on myös tulevaisuuden kasvun edellyttämä verkostokapasiteetin mallinnus.

Viemäriverkostoa kuvaava malli koostuu erillis- ja sekavesiviemäreistä, kaivoista, pumppaamoista, ylivuotorakenteista, jätevesitunneleista, kiinteistöjen tuottamista jätevesistä sekä HSY:n verkostoon syötteinä jätevettä tuottavien sopimuskuntien mittapisteistä. Jotta hydraulinen viemärimalli saadaan vastaamaan mahdollisimman hyvin todellisuutta, sitä pitää täydentää hydrologisella mallilla. Tämä tarkoittaa valuma-alue-tietojen eli esimerkiksi pinta-alojen, maankäytön ja läpäisemättömien pintojen osuuden sisällyttämistä malliin. Mallinnuksen jälkeen tarkoituksena on kalibroida malli mitta-alue kerrallaan, ja siten ottaa malli käyttöön. Kalibroinnissa mallin parametreja säädetään siten, että mallin tuottamat arvot, tyyppillisesti virtaamat, vastaavat verkostosta mitattuja arvoja.

Koska mallinnettava viemäriverkosto kattaa koko HSY:n toiminta-alueen, on mallin kalibrointi haastavaa. Pumppaamoilta saatava virtaamadata ei usein ole luotettavaa, ja näin ollen se ei aina sovi kalibrointiin. Virtaamamittareiden asennus verkostoon on puolestaan haastavaa ja aikaa vievää, ja mittarit ovat kalliita. Sen sijaan pintamittausten etuina virtaamamittaukseen verrattuna ovat ainakin asennuksen nopeus ja alhaisemmat kustannukset. Ongelmana on kuitenkin, että pinnankorkeudesta ei verkosto-olosuhteissa voida suoraan päätellä virtaamaa. Sen takia pinnankorkeuksia ei ole käytetty kalibrointiin aiemmin.

Tässä diplomityössä on tarkoitus selvittää viemäriverkoston vedenpinnankorkeusmittausten soveltamista ja hyödyntämismahdollisuuksia mallin kalibrointiin. Työssä tarkastellaan soveltuvuutta erityisesti seuraavista näkökulmista:

- Pintamittausten laatu ja olosuhteiden vaikutus mittaustulosten luotettavuuteen
- Kalibroinnin onnistuminen pintamittausten avulla

Lisäksi tarkastellaan käytetyn sadedatatyypin vaikutusta mallinnustuloksiin. Jos pintamittauksiin perustuva viemäriverkon kalibrointimenetelmä todetaan käyttökelpoiseksi, tässä työssä esitettävällä tutkimuksella on tarkoitus helpottaa jatkossa tehtävää, koko pääkaupunkiseudun viemäriverkoston hydraulisen mallin kalibrointia.

Tutkimus toteutetaan kahden, Helsingissä ja Vantaalla, sijaitsevan viemäröintialueen mittaustulosten avulla. Tutkimusalueiksi on valittu sekä seka- että erillisviemäröityjä alueita. Munkkiniemen alueelle Helsinkiin sijoitettiin yhteensä kuusi pinnankorkeusmittaria, joiden mittaustulosten avulla alueelta rakennettavaa mallia kalibroidaan. Tammiston alueelle Vantaalle sijoitettiin neljä pinnankorkeusmittaria, joiden tuloksia käytetään mittaustaikkojen sopevuuden arvioinnissa.

Työ koostuu yhdeksästä luvusta. Ensimmäisessä luvussa käydään läpi työn tausta, tavoitteet, rajaus ja rakenne. Luvussa kaksi käsitellään virtaama- ja pinnankorkeusmittauksien toteutustapoja sekä pinnankorkeuden ja virtaaman hydraulista riippuvuutta. Kolmannessa luvussa käsitellään verkoston hule- ja vuotovesiin vaikuttavia tekijöitä ja neljännessä SWMM-mallin peruseriaatetta ja teorioita. Viides ja kuudes luku koostuvat kirjallisuuskatsauksesta aikaisempiin mallien kalibroimista ja pintamittausten hyödyntämistä koskeviin tutkimuksiin. Luvun seitsemän sisältö koostuu valuma-alueiden määrityksen kuvauksesta, käytetyn datan esittelystä sekä mallin rakentamis- ja kalibrointiprosessien läpikäymisestä. Kahdeksannessa luvussa esitellään tulokset, vertaillaan niitä aikaisempiin tutkimustuloksiin ja arvioidaan virhelähteitä. Yhdeksäs luku keskittyy johtopäätöksiin.

2 Pinnankorkeuden ja virtaaman mittaaminen viemäreissä

Usein viemäreistä mitataan virtaamaa pinnankorkeuden sijaan, sillä verkoston toiminnan ymmärtämisen ja seuraamisen kannalta virtaaman suuruus on oleellinen asia. Vedenpinnan korkeuden mittaamiseen tarkoitettut mittarit ovat kuitenkin usein halvempia ja mittarien asennus nopeampaa kuin virtaamamittarien kohdalla. Tässä luvussa käydään läpi muutamia vaihtoehtoisia tapoja suorittaa mittauksia viemäreissä sekä pinnankorkeuden ja virtaaman hydraulista riippuvuutta.

2.1 Virtaamamittaukset

Virtaamaa voidaan viemäriverkostossa mitata joko suoraan esimerkiksi astiamittauksella pumppaamon imusäiliöstä tai välillisesti hydraulisten apusuureiden, kuten veden nopeuden ja pinnankorkeuden avulla. Lisäksi on käytössä menetelmiä, jotka perustuvat esimerkiksi ultraääneen ja magneettikenttään. (RIL 2003) Usein virtaamamittaukset vaativat täynnä olevan putken. Tässä esitellään viemäriverkoston mittaustapoja, joissa ei tarvitse muokata tai muuttaa virtaamaa eli esimerkiksi asentaa verkostoon mittapatoa.

2.1.1 Astiamittaus

Astiamittaus on RIL:n (2003) mukaan yksinkertaisin virtaaman mittausmenetelmä. Astiamittauksella mitataan pumppaamolta lähtevää virtaamaa käyttäen pumppaamon imukaivoa astiana. Imukaivon vedenpinnan nousunopeus voidaan määrittää ja kaivon täyttymisnopeus ja tulovirtaama laskea. Pumppujen käynti- ja pysähdysajat saadaan myös tietoon, jolloin pumppaamolta lähtevä virtaama voidaan tarvittaessa laskea yhtälön 1 avulla. (Jalonen 2012)

$$Q = \frac{V_k - V}{t} + \frac{V_k - V_p}{t_1} \quad (1)$$

missä Q on pumpattu virtaama pumppujen käydessä aikavälillä t [m^3/s]
 V_k on imukaivon vesitilavuus pumppujen käynnistyessä [m^3]
 V_p on imukaivon vesitilavuus pumppujen pysähtyessä [m^3]
 V on vesitilavuus hetkellä t [m^3]
 t_1 on pysähdyksissä oloaika [s]
 t on aika käyntijakson alusta [s]

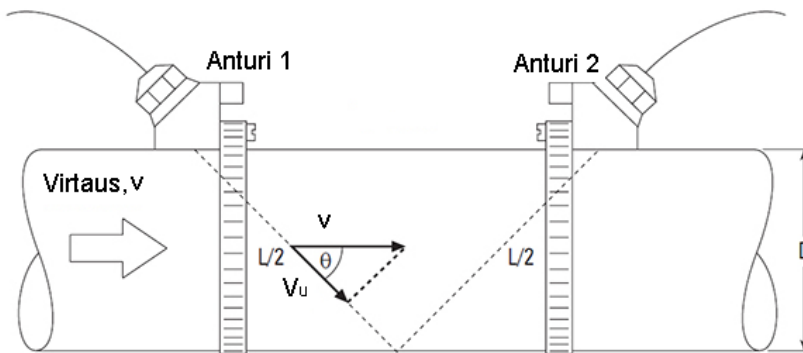
Virtaamaa laskettaessa tulovirtaaman oletetaan olevan muuttumaton pumppauksen aikana (Jalonen 2012). Jos mittausaika on riittävä pitkä, saadaan luotettava tulos. Astiamittaus ei kuitenkaan sovi kaikkiin käytännössä esiintyviin tapauksiin. (RIL 2003)

2.1.2 Ultraääni

Ultraäänimittari koostuu kahdesta anturista, jotka asennetaan putken ulkopuolelle. Ultraäänimittarit ovat tarkkoja mutta herkkiä vedessä oleville epäpuhtauksille ja virtauksen ominai-

suuksien vaihteluille, joten ne on sijoitettava sellaiseen paikkaan, jossa virtaustilassa ei tapahdu muutoksia. (RIL 2004) Toimiakseen ne vaativat täynnä vettä olevan, riittävän suoran putken ja tarpeeksi suuren virtausnopeuden. Ultraäänimittarit voivat olla myös siirrettäviä.

Virtaamamittaus ultraäänen avulla perustuu oletukseen, että äänen nopeus nesteessä on vakio. Ultraäänimittari lähettää ultraääniaaltoja putkeen tietyssä kulmassa sekä myötä- että vastavirtaan ja mittaa niiden kulkeutumiseen kuluneen ajan. (RIL 2003) Dopplerin ilmiöstä johtuen myötävirtaan kulkeva ääniaalto on vastavirtaan kulkevaa aaltoa nopeampi. Esimerkki mittarin toimintaperiaatteesta kahdella erillisellä anturilla on esitetty kuvassa 1. Anturi 1 lähettää ultraääniaaltoja, jotka heijastuvat putken alareunasta anturille 2. Anturi 2 lähettää vastaavasti pulsseja anturille 1.



Kuva 1. Ultraääni virtaamamittauksessa (Spirax Sarco).

Kuvassa 1 v on veden nopeus, v_u ultraäänipulssin nopeus, θ kulma veden virtaussuunnan ja pulssin välillä, L_u pulssin kulkema matka ja D putken halkaisija.

Veden virtausnopeus v saadaan kuvan 1 tilanteessa laskettua yhtälön 2 avulla (Spirax Sarco):

$$v = \left(\frac{L_u}{2 \cos \theta} \right) \left(\frac{t_{12} - t_{21}}{t_{12} t_{21}} \right) \quad (2)$$

missä v on veden nopeus [m/s]
 L_u on pulssin kulkema matka [m]
 θ on veden virtaussuunnan ja pulssin kulkusuunnan välinen kulma [°]
 t_{12} on pulssin anturilta 1 anturille 2 kulkema aika [s]
 t_{21} on pulssin anturilta 2 anturille 1 kulkema aika [s]

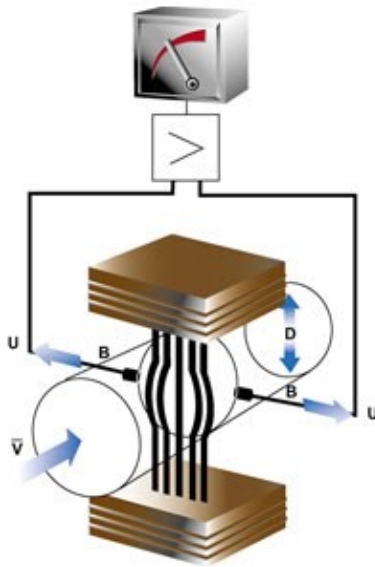
Kun putken poikkipinta-ala tiedetään, putken ollessa täynnä vettä virtaama saadaan laskettua yhtälöstä 3. Laskettu virtaama muutetaan sähköiseksi signaaliksi ja toimitetaan valvontajärjestelmiin.

$$Q = vA \quad (3)$$

missä Q on virtaama [m^3/s]
 v on veden nopeus [m/s]
 A on putken poikkipinta-ala [m^2]

2.1.3 Magneettinen virtaamamittaus

Magneettinen virtaamamittaus perustuu nesteen sähkönjohtokykyyn ja Faradayn lakiin. Magneettinen virtaamamittari synnyttää viemäriputkeen sähkömagneettisen kentän. Vesi toimii putkessa liikkuvana johtimena, johon indusoituu virtausnopeuteen verrannollinen, sähkökentän aikaansaama jännite (Kuva 2). Jännite saadaan mitattua putken seinämiin kiinnitetyillä mittauselektrodeilla. (RIL 2004)



Kuva 2. Magneettisen virtaamamittarin toimintaperiaate (Flotech 2016).

Kuvassa 2 U on jännite, B magneettivuon tiheys, v veden nopeus ja D putken halkaisija. Veden nopeus saadaan laskettua yhtälöllä 4. Jännitteen suuruus on suoraan verrannollinen virtausnopeuteen, ja kun putken poikkipinta-ala on tiedossa, saadaan virtaama määritettyä yhtälöllä 3. (Hofmann 2003)

$$v = \frac{U}{k_m B D} \quad (4)$$

missä v on veden nopeus [m/s]
 U on jännite [V]
 k_m on dimensioton vakio [-]
 B on magneettivuon tiheys [$\text{T} = \text{Vs}/\text{m}^2$]
 D on putken halkaisija [m]

Magneettiset virtaamamittarit ovat tarkkoja ja niiden avulla voidaan mitata myös vajaan putken virtaamaa (Krohne 2013). Myös ne vaativat tarpeeksi suoran häiriöttömän putkiosuuden ja riittävän suuren virtausnopeuden. Mittarit soveltuvat hyvin viemäriveredelle, sillä veden

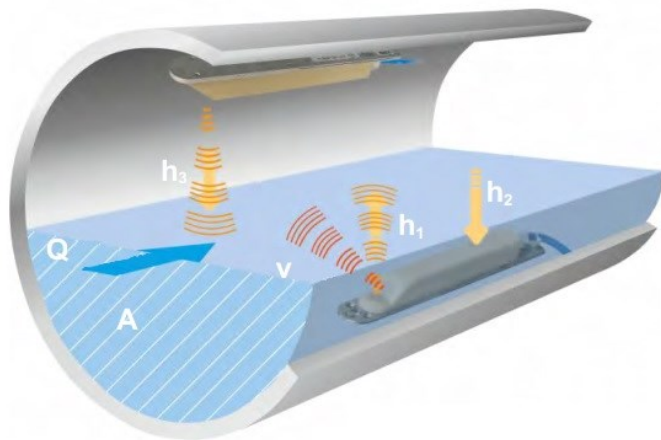
kanssa kosketuksissa olevia liikkuvia osia ei ole. Viemärivedessä on myös hyvin sähkönjohtokykyä lisääviä komponentteja. (RIL 2004)

Magneettinen virtaamamittaus on Suomessa laajasti käytössä uusilla tai saneeratuilla jätevedenpumppaamoilla korvaten perinteisen astiamittauksen. Pumppaamoilla mittari kiinnitetään pumppaamolta lähtevään paineputkeen.

2.1.4 Mittaus virtausnopeuden ja pinnankorkeuden perusteella

Vajaissa putkissa eli tässä tapauksessa viettoviemäreissä virtaama voidaan määrittää virtausnopeuden ja pinnankorkeuden perusteella. Tällöin viemäristä mitataan sekä virtausnopeutta että pinnankorkeutta samaan aikaan, ja virtaama lasketaan niiden avulla.

Mittaaminen tapahtuu putken pohjaan asennettavan sensorin avulla (Kuva 3). Se mittaa virtausnopeutta v magneettisesti tai ultraäänellä ja pinnankorkeutta ultraäänen (h_1) tai paineanturin avulla (h_2). Paineanturin toiminta on selitetty luvussa 2.2.2. Vaihtoehtoisesti pinnankorkeus voidaan mitata putken yläosaan kiinnitettävällä erillisellä ultraäänianturilla (h_3). Pinnankorkeuden perusteella tietokone saa laskettua virtaaman poikkipinta-alan A , kun putken sisähalkaisija on tiedossa. Lopulta virtaama Q saadaan laskettua yhtälöllä 3, missä A on virtaaman poikkipinta-ala. (MACE, Görlich Meß- und Regeltechnik GmbH 2005, Krohne 2013)



Kuva 3. Esimerkki virtaaman määrittämisestä vajaassa putkessa. (Nivus 2012)

Tämän mittaustavan ongelmana on muun muassa se, että jätevesi saattaa tukkia putken pohjassa olevan mittausturin tai häiritä muuten mittaamista. Lisäksi mittaustavan vaatima minimivesisyvyys ei välttämättä aina toteudu. (Hassinger 2016)

2.2 Pintamittaukset

Vedenpinnan korkeutta voidaan mitata viemäreissä eri tavoilla pääasiassa kaivojen kohdalla, sillä mittareita on hankala asentaa putkiosuudelle, ellei kyseessä ole avoin kanava. Pinnankorkeutta voidaan mitata manuaalisesti mitta-asteikkoa käyttämällä tai automaattisesti laitteilla. Yleiset mittaustavat laitteilla perustuvat ultraääneen, vedenpaineeseen ja tutkaan.

Näissä menetelmissä ainoastaan vedenpainemittauksessa paineanturin kalvo joutuu kosketuksiin jäteveden kanssa (RIL 2004).

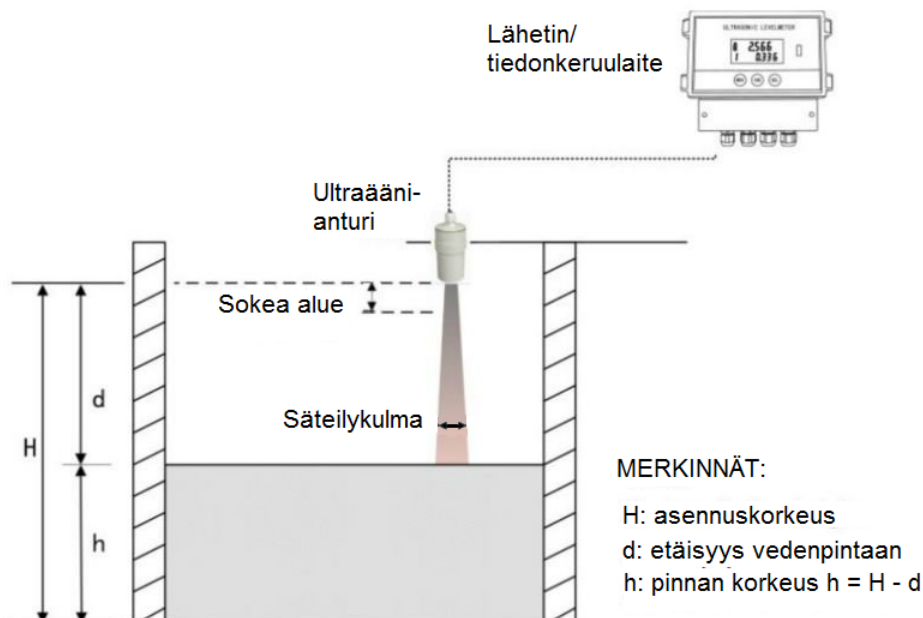
2.2.1 Ultraääni

Ultraääneen perustuvat mittarit koostuvat yleensä anturista ja lähettimestä, joka toimii myös tiedonkeruulaitteena. Ultraäänianturin lähetin lähettää lyhyitä suuritaajuuksisia ultraäänipulsseja mitattavaan kohteeseen eli vedenpintaan. Ultraäänen käyttämä taajuus riippuu siitä, kuinka lähellä mitattava kohde on. Suuremmat taajuudet käyvät paremmin lyhyen etäisyyden mittaamiseen. Vedenpinta heijastaa pulssit takaisin anturin vastaanottimelle, joka mittaa pulssin kulkeutumiseen kuluneen ajan ja laskee äänen nopeuden avulla etäisyyden vedenpintaan yhtälön 5 mukaan. Koska äänen nopeus riippuu lämpötilasta, anturiin on asennettu myös lämpötilamittari. Anturi ottaa siten lämpötilan huomioon laskiessaan äänen nopeutta ja etäisyyttä vedenpintaan. (Burgess 2008)

$$s = \frac{v_u t}{2} \quad (5)$$

missä s on etäisyys anturista vedenpintaan [m]
 v_u on pulssin nopeus [m/s]
 t on pulssin kulkeutumiseen kulunut aika [s]

Tiedonkeruulaite tallentaa mitatut arvot, ja lähettimen kautta tietojärjestelmään saadaan automaattisesti laskettu tieto vedenpinnan korkeudesta, kun anturin asennuskorkeus ja kaivon pohjan taso tiedetään. (Kuva 4) Kuvassa ultraäänianturi on kaivossa, mutta anturi voidaan kiinnittää myös viemärin sisälle sen yläreunaan.

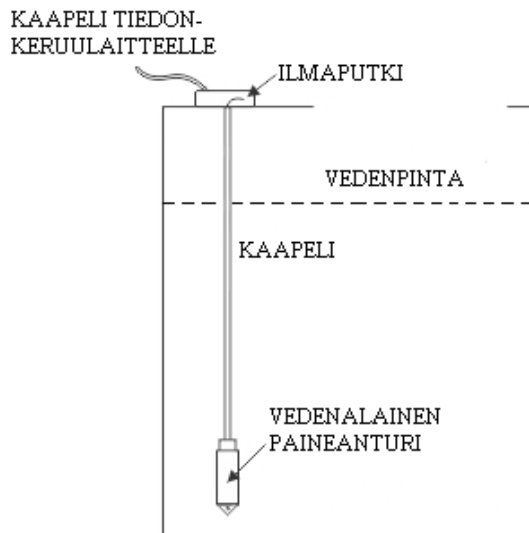


Kuva 4. Ultraäänimittausjärjestelmä (muokattu lähteestä (Vacorda 2016)).

Ultraäänianturin edessä on aina niin sanottu sokea alue, joka on liian lähellä mittaamiseen. Sen pituus riippuu lähetetyn taajuuden suuruudesta siten, että taajuuden kasvaessa sokea alue lyhenee. Ultraääniantureista ilmoitetaan lisäksi aina säteilykulma, joka on säteilyn kulma äänen intensiteetin ollessa -3 dB. (Higginson 2005a)

2.2.2 Paineanturi

Vedenpaineen mittaus sopii sekä pumppaamon tulokaivon, ylivuotokaivon että normaalin viettoviemärikaivon vedenpinnan tarkkailuun. Järjestelmä koostuu kaapelin varassa roikkuvasta vedenalaisesta paineanturista sekä kaapelin toisessa päässä olevasta erillisestä tiedonkeruulaitteesta (Kuva 5). Anturin päässä on painevaihtelun aistiva kalvo. Anturin sensori havainnoi kalvon aistiman painetason, ja sensorilta painehavainto kulkeutuu edelleen kaapelia pitkin tiedonkeruulaitteelle sähköisenä signaalina. (SFS-EN ISO 4373 2008, Global Water 2015)



Kuva 5. Paineanturijärjestelmä (Higginson 2005b).

Koska anturiin johtavassa kaapelissa kulkee myös ulkoilmaan yhteydessä oleva ilmaputki, saadaan ilmanpaineen osuus eliminoitua anturin aistimasta paineesta. Kun jäteveden tiheys tiedetään, vedenpinnan korkeus voidaan määrittää lasketusta hydrostaattisesta paineesta yhtälöllä 6. (Bossart 2015) Usein anturissa on myös lämpötilamittari, jonka avulla lämpötilan vaikutus saadaan otettua huomioon (Burgess 2008).

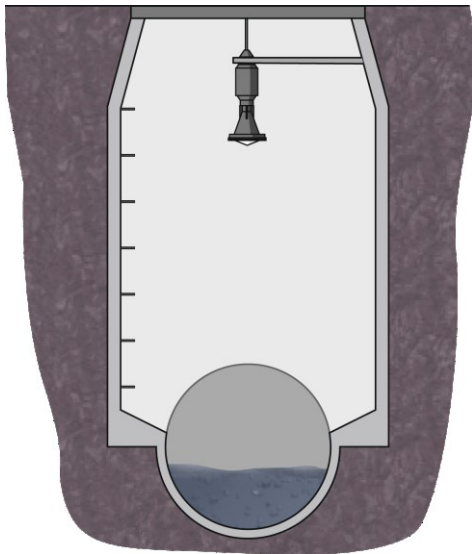
$$y = \frac{p}{\rho g} \quad (6)$$

missä y on vedenpinnan korkeus [m]
 p on hydrostaattinen paine [Pa]
 ρ on nesteen tiheys [kg/m^3]
 g on gravitaatiokiihtyvyys [m/s^2]

2.2.3 Tutka

Tutka toimii mikroaaltojen avulla. Yleensä laitteeseen kuuluu sensori sisäänrakennetulla lähettimellä. (Burgess 2008) Tutka voidaan asentaa kaivon kannen alapuolelle tai tuen avulla kaivon tai viemärin seinämään. (Kuva 6)

Pulssitutkassa tutkan antenni lähettää lyhyitä tutkapulsseja, joiden nopeus noin 300 000 km/s. Kuten ultraäänessäkin, pulssit heijastuvat mitattavan nesteen pinnasta takaisin antennille, joka mittaa kuluneen ajan. Aika, joka kuluu lähetettyjen mikroäänipulssien heijastumien havaitsemiseen, on verrannollinen niiden kulkemaan matkaan ja siten vedenpinnan etäisyyteen tutkasta. (Burgess 2008)



Kuva 6. Tutka vedenpinnan mittauksessa (Vega).

Etäisyys tutkasta vedenpintaan saadaan laskettua ultraäänien tapaan yhtälöllä 5, kun äänen nopeus muutetaan valon nopeudeksi ilmassa. Vedenpinnan korkeus saadaan laskettua, kun kaivon pohjan taso tiedetään. Laskettu vedenpinnan korkeus muutetaan sähköiseksi signaaliksi ja lähetetään eteenpäin mitattuna arvona. (Burgess 2008)

2.3 Pinnankorkeuden ja virtaaman hydraulinen riippuvuus

Viemäriputkessa tapahtuva virtaus voi olla joko täyden putken paineellista virtausta tai osittain täyden eli vajaan putken virtausta. Tässä käsitellään vajaan putken eli viettoviemärin stationääristä eli ajan suhteen muuttumatonta virtausta.

2.3.1 Yleistä

Kun lasketaan virtaamaa viettoviemäreissä, viemäreitä voidaan käsitellä avouomina, joiden poikkileikkaus on ympyrän muotoinen. Virtaaman määrittämismahdollisuudet pinnankorkeusmittauksien perusteella riippuvat virtauksen laadusta ja ominaisuuksista. Lähtökohtaisesti virtaama voidaan määrittää yhden pinnankorkeusmittauksen avulla, jos kyseessä on tasainen- tai kiitovirtaus. Epätasaisessa virtauksessa mittauksia tarvitaan kahdesta kohdasta.

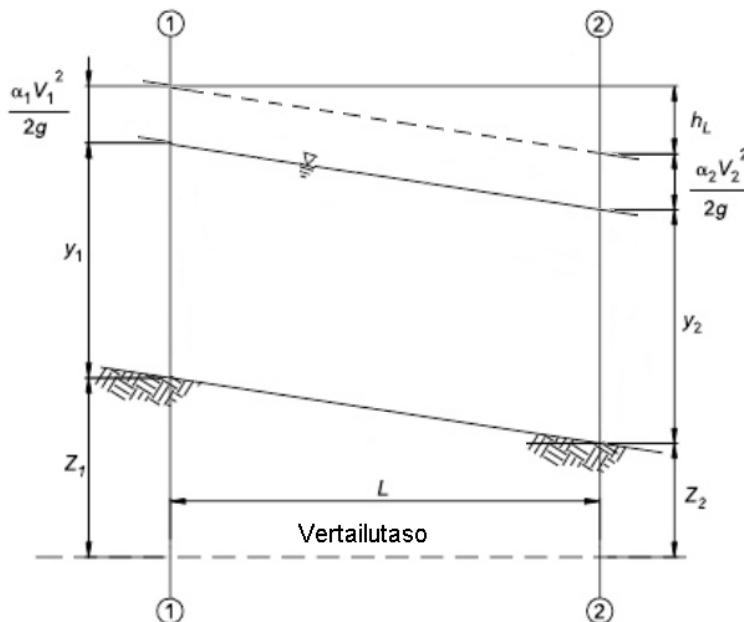
Viemäreissä virtaus on myös usein epästationääristä eli uomapoikkileikkauksen virtaama, virtausnopeus ja vesisyvyys vaihtelevat ajan suhteen. Tällainen tilanne esiintyy esimerkiksi viettoviemärissä, jonka ylävirran puolella olevan pumppaamon tuotto vaihtelee tai pumppu käynnistyy ja pysähtyy.

2.3.2 Tasainen virtaus

Tasaiselle virtaukselle viettoviemärissä virtaama, veden syvyys, leveys ja keskinopeus ovat yhtä suuria putken jokaisessa poikkileikkauksessa. Tällöin virtaamalle pätee yhtälö 3 eli virtaama voidaan laskea, kun nopeus ja virtaaman poikkipinta-ala tiedetään. Jos veden nopeutta ei tiedetä, tasaisen virtauksen suuruus paineistamattomassa putkessa voidaan laskea Bernoullin yhtälön avulla (Yhtälö 7) (Kuva 7).

$$z_1 + y_1 + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = z_2 + y_2 + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_l \quad (7)$$

missä z_1 on poikkileikkauksen 1 korkeus merenpinnasta [m]
 y_1 on vedenpinnan korkeus poikkileikkauksessa 1 [m]
 v_1 on veden keskimääräinen nopeus poikkileikkauksessa 1 [m/s]
 g on gravitaatiokiihtyvyys [m/s^2]
 z_2 on poikkileikkauksen 2 korkeus merenpinnasta [m]
 y_2 on vedenpinnan korkeus poikkileikkauksessa 2 [m]
 v_2 on veden keskimääräinen nopeus poikkileikkauksessa 2 [m/s]
 α on nopeuden epätasaisesta jakautumisesta johtuva kerroin [-]
 h_l on kitkahäviötermi [m]



Kuva 7. Bernoullin yhtälön periaate tasaiselle avouomavirtaukselle (muokattu kohteesta Durrans 2003).

Koska tasaisessa virtauksessa virtausnopeus on kaikkialla yhtä suuri, nopeustermejä ei tarvita, ja yhtälö 7 yksinkertaistuu. Häviötermi h_l saadaan Manningin kaavan avulla (Yhtälö 8). Virtaaman poikkipinta-alan ja hydraulisen säteen laskemiseen tarvitaan vedenkorkeutta. (Hyvärinen & Puupponen 1986, Hamill 2011)

$$h_l = \frac{n^2 L Q^2}{A^2 R^{4/3}} \quad (8)$$

missä n on karkeuskerroin [$s/m^{1/3}$]
 L on poikkileikkausten 1 ja 2 välinen etäisyys [m]
 Q on virtaama [m^3/s]
 A on poikkileikkausten poikkipinta-ala [m]
 R on poikkileikkausten hydraulinen säde [m]

Virtaama saadaan lopulta sijoittamalla yhtälö 8 yhtälöön 7 (Yhtälö 9):

$$Q = \sqrt{\frac{A_m^2 R_m^{4/3} (z_1 + y_1 - z_2 - y_2)}{n^2 L}} \quad (9)$$

2.3.3 Epätasainen virtaus

Epätasaisessa virtauksessa veden syvyys ja keskinopeus vaihtelevat putkessa paikasta riippuen, vaikka virtaama pysyisikin samana. Tyypillisesti epätasaista virtausta esiintyy joissa ja muissa luonnonuomissa. (Hamill 2011) Myös viemärien virtaus on suurimmaksi osaksi epätasaista johtuen muun muassa liittyvistä putkista, muuttuvista poikkileikkauksista ja halkaisijoista sekä padotuksesta verkostossa. Epätasaista virtausta voidaan arvioida Bernoullin yhtälön (Yhtälö 10) avulla (Kuva 8). Tällöin virtaaman määrittämiseen tarvitaan aina kaksi pinnankorkeuden mittauspistettä samassa putkessa. (Hyvärinen & Puupponen 1986)

$$z_1 + y_1 + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = z_2 + y_2 + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_l \quad (10)$$

missä z_1 on poikkileikkauksen 1 korkeus merenpinnasta [m]
 y_1 on vedenpinnan korkeus poikkileikkauksessa 1 [m]
 v_1 on veden keskimääräinen nopeus poikkileikkauksessa 1 [m/s]
 g on gravitaatiokiihtyvyys [m/s^2]
 z_2 on poikkileikkauksen 2 korkeus merenpinnasta [m]
 y_2 on vedenpinnan korkeus poikkileikkauksessa 2 [m]
 v_2 on veden keskimääräinen nopeus poikkileikkauksessa 2 [m/s]
 α on nopeuden epätasaisesta jakautumisesta johtuva kerroin [-]
 h_l on kitkahäviötermi [m]

Yleensä kertoimen α arvo on välillä 1,10...1,20 (Durrans 2003). Häviötermi h_l saadaan yhtälön 8 avulla, kun poikkipinta-alan A ja hydraulisen säteen R tilalla käytetään poikkileikkausten 1 ja 2 keskimääräistä poikkipinta-alaa A_m ja keskimääräistä hydraulista sädettä R_m .

Yhtälön 13 käyttö tuo lisää epätarkkuutta virtaaman suuruuden laskentaan pinnankorkeusmittausten perusteella yhtälöllä 10.

2.3.4 Kiito- ja verkkasvirtaus

Virtaus voi lisäksi olla tyypiltään myös joko verkkasvirtausta, kriittistä virtausta tai kiitovirtausta. Näiden virtaustyyppien ominaisuudet ovat erilaiset. Virtauksen tyyppi voidaan määrittää Frouden luvun (Fr) avulla (Yhtälö 14). Verkkasvirtaus on tyypillisesti suhteellisen syvää ja hidasta virtausta ($Fr < 1$), kun taas kiitovirtaus on suhteellisen matalaa ja nopeaa ($Fr > 1$). Kriittinen virtaus esiintyy, kun virtaustyyppi vaihtuu kiitovirtauksesta verkkasvirtaukseksi tai päinvastoin ($Fr = 1$). (Hamill 2011) Frouden luvun ollessa 1 veden syvyys on yhtä suuri kuin rajasyvyys. Jos syvyys on rajasyvyyttä pienempi, virtaus on kiitovirtausta ja jos suurempi, vastaavasti verkkasvirtausta (Hyvärinen & Puupponen 1986).

$$Fr = \frac{v_m}{\sqrt{gD_h}} \quad (14)$$

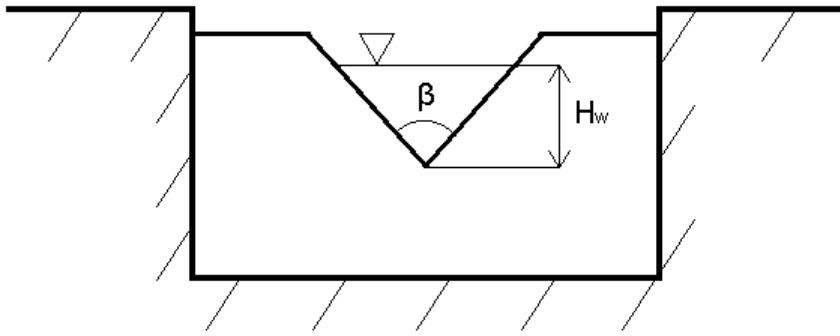
missä Fr on Frouden luku [-]
 v_m on poikkileikkauksen keskimääräinen virtausnopeus [m/s]
 g on gravitaatiokiihtyvyys [m/s^2]
 D_h on hydraulinen halkaisija [m]

Jos virtaama on verkkasvirtauksessa tasaista, voidaan sen suuruus määrittää vain yhden pinnankorkeuden mittauspisteen avulla. Kiitovirtauksessa vedenpinnan korkeuden ja virtaaman välillä on yksiselitteinen yhteys ja tilanteesta voidaan piirtää yksiehtoinen purkautumiskäyrä. Kiitovirtaustilanne voidaan luoda avouomaan esimerkiksi ylisyoksypadon avulla. Tällöin virtaama voidaan laskea, kun vedenpinnan korkeus vain padon yläpuolella tiedetään. (Hyvärinen & Puupponen 1986)

Esimerkiksi suorakulmaiseen kanavaan sijoitetun kolmionmallisen ja teräväreunaisen ylisyoksypadon (Kuva 9) avulla virtaama voidaan laskea yhtälöllä 15, kun mittausolosuhteet järjestetään sopiviksi siten, että padon alapuolisella vedenkorkeudella ei ole vaikutusta padon yläpuoliseen vedenkorkeuteen (Hyvärinen & Puupponen 1986, Durrans 2003, RIL 2004). Viemäreissä ylisyoksypadon käyttäminen on haastavaa johtuen muun muassa vedessä olevista kiintoainepartikkeleista ja usein pienistä korkeuseroista.

$$Q = \frac{8}{15} C_d \tan \frac{\beta}{2} \sqrt{2g} H_w^{5/2} \quad (15)$$

missä Q on virtaama [m^3/s]
 C_d on virtauksen kuroutumisesta aiheutuva kerroin [-]
 β on purkautumisaukon kulma [$^\circ$]
 g on gravitaatiokiihtyvyys [m/s^2]
 H_w on vedenpinnan korkeus patoaukon alaosaan mitattuna [m]



Kuva 9. Kolmionmallinen ylisyoeksypato.

Kerroin C_d voidaan määrittää esimerkiksi erilaisten käyrästöjen avulla. Kertoimen arvoon vaikuttavat kolmionmallisella padolla purkautumisaukon kulma ja vedenpinnan korkeus aukon alaosasta mitattuna. (Durrans 2003)

3 Verkoston hule- ja vuotovesivirtaamiin vaikuttavia tekijöitä

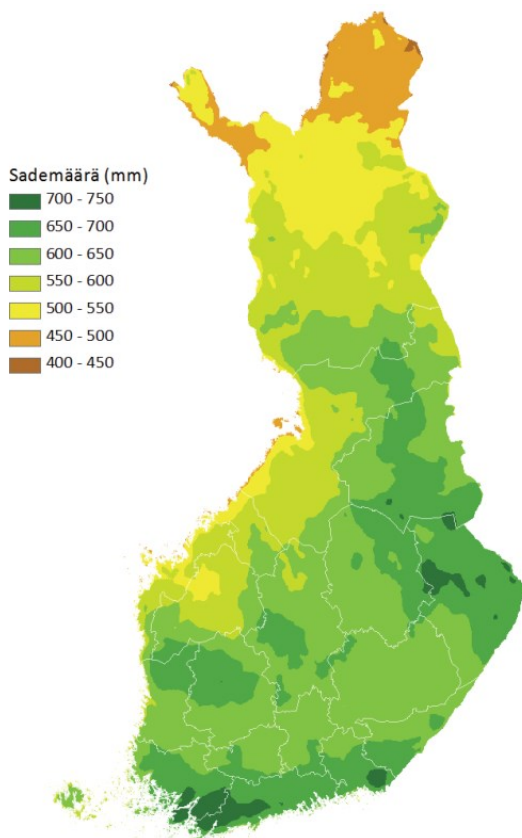
Kaupunkialueilla viemäröinti voi olla joko erillis- tai sekaviemäröintiä. Sekaviemäriin johdetaan myös hulevesiä, kun taas jätevesiviemäreissä pitäisi teoriassa virrata vain jätevettä. Tässä luvussa käsitellään tekijöitä, jotka vaikuttavat viemäriin päätyviin hule- ja vuotovesiin, sillä tässä työssä tehtävä SWMM-mallin kalibrointi perustuu verkoston virtaamaan vaikuttavien parametrien kalibrointiin.

3.1 Sadanta

Sadantaa sen ja mittaamista käsitellään, koska käytetyllä sadedatatyypillä on merkitystä mallinnustuloksiin tämän työn pienestä mallinusalueesta johtuen.

3.1.1 Sade Suomessa ja Helsingissä

Keskimääräinen vuosisade Suomessa riippuu paikasta. Ilmatieteen laitoksen mukaan vertailukaudella 1981-2010 vuosisade vaihteli noin 400 mm ja 750 mm välillä (Kuva 10). (Ilmatieteen laitos 2015)



Kuva 10. Keskimääräinen sademäärä vuodessa vuosien 1981-2010 aikana. (Pirinen et al. 2012)

Atlantilta tulevat syklonit aiheuttavat suurimman osan Suomen sateista, mutta kesällä rankat konvektiiviset sateet ovat yleisiä. Suomessa sadeolot ovat melko tasaiset ympäri vuoden,

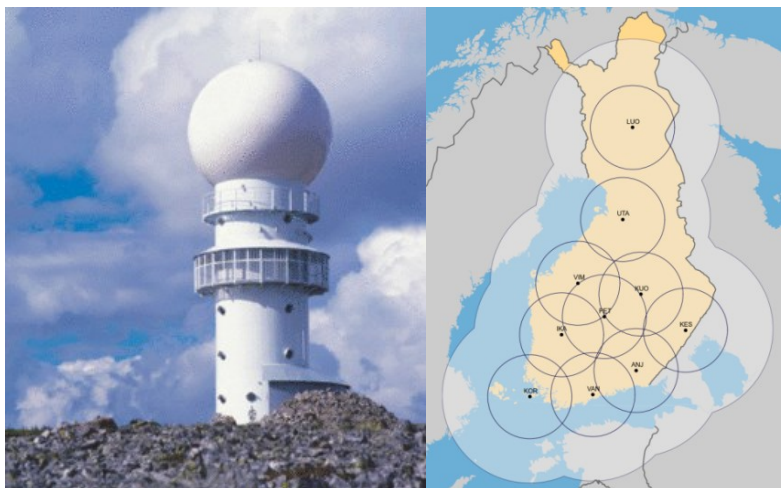
mutta kuukausisadantojen vaihtelurajat ovat kuitenkin kohtalaisen suuret. Helsingissä sadannan vuodenaikaisvaihtelut ovat vähäisemmät kuin Pohjois-Suomessa, sillä mantereinen ilmasto johtaa suurempiin suhteellisiin vaihteluihin. (Kuusisto 1986)

Keskimääräinen sadanta Helsingissä Kaisaniemen mittauspisteessä vuosina 1981-2010 oli 655 mm vuodessa. Vuosisadanta on kuitenkin vuodesta 1901 jälkeen vaihdellut 399 mm ja yli 900 mm välillä. (Ilmatieteen laitos 2015) Kaisaniemessä kuukaudesta sateisimmat vuosien 1981-2010 tilastojen perusteella ovat elo-, loka- ja marraskuu (70-80 mm/kk), kun taas helmi-, huhti- ja toukokuussa sataa keskimäärin vähiten (36-37 mm/kk) (Pirinen et al. 2012).

3.1.2 Sateen mittaaminen

Sademäärää mitataan Suomessa sademittarien ja säätutkien avulla. Sademittarit ovat automaattisia punnitsevia sadevaakoja tai manuaalisesti käytettäviä sadeastioita. Sadevaakojen toiminta perustuu nestemäisen sademäärän massan punnitsemiseen. Punnittu massa muutetaan millimetreiksi laskentakaavan avulla. Sademäärä ilmoitetaan tunnin kertymänä, ja automaattinen mittari pystyy tuottamaan myös tietoa sateen intensiteetistä. Lumisade saadaan muutettua nestemäiseksi mittarissa käytettävän sulatusnesteen avulla. Manuaalisesti käytettävät sadeastiat vaativat kerran vuorokaudessa tehtävän tyhjennyksen, jolloin kertynyt sade mitataan mittalasin avulla. Lumen annetaan sulaa sisätiloissa ennen tyhjennystä ja mittausta. (Ilmatieteen laitos b)

Säätutkien avulla mitataan sateen voimakkuuden lisäksi sen alueellista jakaumaa. Ilmatieteen laitoksella on säätutkaverkossa kymmenen tutkaa (Kuva 11). Kuvassa vaalea alue kuvaa kesäsateiden havaitsemisetasyyttä, joka on 250 kilometriä tutkasta. Ympyröiden säde on 120 kilometriä, ja ne kuvaavat etäisyyttä, jolla talven lumisateet havaitaan. (Ilmatieteen laitos a)



Kuva 11. Säätutka (Ilmatieteen laitos c) ja Ilmatieteen laitoksen säätutkaverkko (Hohti 2016).

Säätutkan toiminta perustuu eri suuntiin lähetettäviin suuritehoisiin mikroaaltopulsseihin. Kun pulssi kohtaa sadepisaran tai muun esteen, sen tehosta erittäin pieni osa heijastuu takaisin antennille. Koko pulssi ei heijastu heti sadepilven tutkanpuoleisesta reunasta vaan kulkeutuu myös pilven sisälle, jolloin tietoa saadaan myös pilven sisä- ja takaosasta. Säätutkan antennia pyörittämällä voidaan sadealueet kartoittaa tutkan ympäriltä siis jopa 250 km säteellä. (Ilmatieteen laitos c) Helsinkiä lähin säätutka sijaitsee Vantaalla, ja se on perustettu vuonna 1994 (Ilmatieteen laitos a).

Tutka näkee hyvin, missä sataa, mutta sademäärästä se ei pysty antamaan kovinkaan tarkkaa tietoa. Lisäksi tutka näkee tutkakulmasta riippuen sadannan maanpinnan yläpuolella, jolloin sadepilvi saattaa ehtiä liikkumaan alueen yli ennen kuin sade osuu maahan asti. Toisaalta tutka antaa yksittäistä sademittaria huomattavasti paremman kuvan sateen paikallisesta vaihtelusta. Ilmatieteen laitoksen mukaan alle neliökilometrin kokoisella mallinnusalueella sijaitseva sademittari antaa kuitenkin tarkemman arvon sateesta kuin sadetutka.

3.1.3 Vaikutus valuntaan

Sateen kesto ja intensiteetti vaikuttavat valunnan syntymiseen. Jos sateen kesto on pidempi kuin valuma-alueen tyypillinen valunnan keräytymisaika, valuntaa kertyy samanaikaisesti koko valuma-alueelta, ja valunnan huippu on suurempi kuin keräytymisaikaa ylittämättömässä sateessa. Sateen jatkuessa pintavalunta kasvaa, koska maaperän imeyntäkyky pienenee sateen aikana. Jos sateen intensiteetti ei ylitä maaperän imeyntäkykyä suurella osalla valuma-aluetta, pintavalunta jää pieneksi. (Hyvärinen & Puupponen 1986)

Pienillä valuma-alueilla sateen ajallinen jakauma vaikuttaa valunnan huipun esiintymiseen. Jos sateen intensiteetti on suurin sateen alussa, valunta lisääntyy silloin nopeasti, kun taas intensiteetin ollessa suurin sateen loppupuolella valunta lisääntyy hitaammin huipun ollessa loivapiirteisempi. (Hyvärinen & Puupponen 1986)

Lisäksi sateen alueellinen jakauma sekä liikesuunta vaikuttavat valuntaan. Suurimman sateen esiintyessä valuma-alueen alaosassa valuntakäyrä on terävahuippuinen. Vastaavasti huippu on matalampi ja valuntakäyrä hitaammin nouseva, jos alueen yläosassa sataa eniten. Pitkähköillä valuma-alueilla saderintaman liikkuessaa alaspäin valuma-alueen yläosasta tulevan valunnan huippu voi osua samaan aikaan alaosasta tulevan huipun kanssa. Tämä voi johtaa hyvin korkeaan kokonaishuippuun. (Hyvärinen & Puupponen 1986)

Lumen sulaminen lisää valuntaa keväällä ja syyssateet syksyllä. Muutoin valunnan määrä on tyypillisesti pieni talvella lumipeitteestä ja kesällä suuresta haihdunnasta johtuen. Lämpimän talven aikana valunta on normaalia suurempi. (Hyvärinen & Puupponen 1986)

Tulevaisuudessa pääkaupunkiseudulla ilmastonmuutoksen seurauksena valunnan määrä kasvaa talvella, sillä sadanta tulee aiempaa enemmän vetenä. Keväällä tästä johtuen valuntamäärät pienenevät, kun lumien sulamista ei tapahdu. Kesällä nousevat lämpötilat saattavat kompensoida myös lisääntyvää sadantaa ja siten pienentää valuntaa. (Olsson et al. 2015)

3.2 Valuma-aluekijät

Valuma-aluekijät vaikuttavat siihen, kuinka suuri osuus sataneesta vedestä pääsee suotautumaan maaperään tai valumaan maan pinnalla. Tässä osassa käsitellään tekijöitä, joilla on merkitystä SWMM-mallinnusohjelmaa käytettäessä ja joiden avulla malli voidaan kalibroida. Maalajien osuutta ei käsitellä.

3.2.1 Valuma-alueen mitat

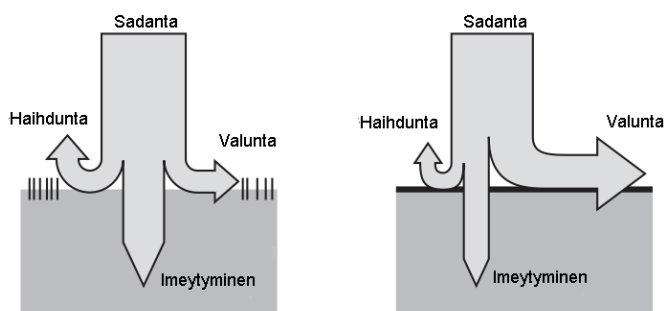
Valuma-alueen pinta-ala vaikuttaa siltä virtaavan veden määrään. Jos muita valuma-aluekijöitä ei oteta huomioon, samansuuruinen sade tuottaa suuremmalla alueella enemmän vettä. Pienemmällä alueella vesi kuitenkin saavuttaa viemäriin todennäköisesti nopeammin. (Hyvärinen & Puupponen 1986)

Valuma-alueen leveys W kuvaa sen alueen leveyttä, jolla pintavalunta syntyy. Jos valuma-alueen leveys on suuri mutta etäisyys viemäriin pieni, valunta saavuttaa viemäriin nopeasti. (Rossman & Huber 2016) Gironas et al. (2009) mukaan leveys voidaan määrittää jakamalla valuma-alueen pinta-ala pisimpien virtausreittien pituuden keskiarvolla. Jos pinta-valunnan kulkema matka vaihtelee paljon valuma-alueen sisällä, leveyden laskemiseen käytetään pinta-alalla painotettua keskiarvoa.

Valuma-alueen kaltevuus S tarkoittaa maanpinnan kaltevuutta viemäriä kohti. Kaltevilta pinoilta vesi pääsee virtaamaan helpommin kuin tasaisilta. Kaltevuuden arvo saadaan laskettua jakamalla korkeusero virtausmatkan pituudella. Jos virtausmatkoja on useampia, lasketaan niiden kaltevuuksista virtausmatkan pituudella painotettu keskiarvo. (Rossman & Huber 2016)

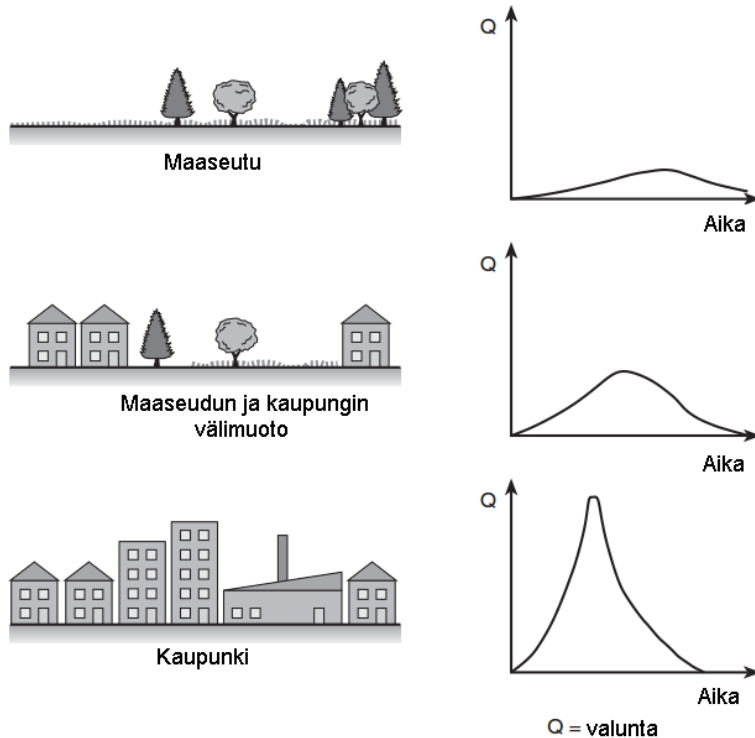
3.2.2 Päällystetyn pinnan osuus

Maahan sataneesta vedestä osa haihtuu suoraan tai kasvien kautta takaisin ilmakehään, osa imeytyy maaperään, ja osa valuu pintavaluntana. Lisäksi osa jää väliaikaisesti painannesäilyntään. (Butler & Davies 2004) Se, missä suhteessa sade jakaantuu, riippuu olosuhteista ja pinnasta, jolle vesi on satanut. Lisäksi osuudet riippuvat ajanhetkestä sadannan aikana. Pintavalunta esimerkiksi lisääntyy, kun maa on jo veden kyllästämä tai kun pinta on läpäisemätön (Kuva 12) (Hyvärinen & Puupponen 1986). Kuvassa 12 vasemmalla puolella on esitetty sateen luonnollinen jakautuminen ja oikealla kaupunkialueen eli päällystetyn pinnan vaikutus jakautumiseen. (Butler & Davies 2004)



Kuva 12. Kaupunkialueen vaikutus sadannan jakautumiseen (Butler & Davies 2004).

Kaupunkialueilla päällystettyjen pintojen osuus on suuri. Tämä lisää pintavaluntaa suhteessa imeytymiseen. Pintavalunta on päällystetyillä alueilla nopeaa ja saavuttaa hulevesi- tai sekavesiviemärin nopeammin kuin päällystämättömillä alueilla. Tällöin myös virtaaman huippu on suurempi. (Kuva 13) (Urbonas & Roesner 1993, Butler & Davies 2004)



Kuva 13. Päällystetyn pinnan vaikutus valunnan huipun ajoittumiseen ja suuruuteen (Butler & Davies 2004).

3.2.3 Painannesäilyntä

Painannesäilyntä d_s tarkoittaa sitä satanutta vettä, joka on varastoitunut valuma-alueen pinnalla oleviin pieniin painaumiin, eikä siten pääse virtaamaan eteenpäin. Vesi voi päästä pois painanteesta imeynnän, haihdunnan tai suotautumisen vaikutuksesta. Painannesäilyntän suuruuteen vaikuttavat pinnan tyyppi, kaltevuus ja sateen toistumisaika. Painannesäilyntä voidaan laskea esimerkiksi yhtälön 16 mukaan: (Butler & Davies 2004)

$$d_s = \frac{k_1}{\sqrt{S}} \quad (16)$$

missä d_s on painannesäilyntä [mm]
 k_1 on pinnan tyypistä riippuva kerroin: 0,07 läpäisemättömille pinnoille ja 0,28 läpäiseville pinnoille [mm]
 S on pinnan kaltevuus [-]

Butler & Davies (2004) mukaan painannesäilyntän tyypillinen arvo on läpäisemättömien pintojen kohdalla välillä 0,5...2 mm, katoilla 2,5...7,5 mm ja viheralueiden kohdalla noin

maksimissaan 10 mm. Osavaluma-alueen sisällä läpäiseville ja läpäisemättömille pinnoille voidaan käyttää omia arvoja (Rossman & Huber 2016).

3.2.4 Manningin karkeuskerroin

Manningin karkeuskerroin n kuvastaa pintavalunnan virratessaan kohtaamaa maanpinnan vastusta. Läpäiseville ja läpäisemättömille pinnoille tarvitaan eri arvot, sillä karkeuskertoimen arvo riippuu pinnan laadusta. Suurempi karkeuskertoimen arvo tarkoittaa hitaampaa pintavaluntaa. (Gironás et al. 2009, Rossman & Huber 2016)

Karkeuskertoimien arvoja erilaisille pinnoille ei ole voitu määrittää luotettavasti vaan eri tutkimuksissa on saatu erilaisia tuloksia (Gironás et al. 2009, Rossman & Huber 2016). Taulukossa 1 on esitetty esimerkkinä Engmanin (1986) määrittämiä arvoja erilaisille pinnoille.

Taulukko 1. Manningin karkeuskertoimen n arvoja Engmanin (1986) mukaan.

Pinnan tyyppi	n	Vaihteluväli
Betoni tai asfaltti	0,011	0,010 – 0,013
Hiekka	0,010	0,01 – 0,016
Sora	0,02	0,012 – 0,03
Savi	0,02	0,012 – 0,033
Luonnontilainen laidun	0,13	0,01 – 0,32
Nurmikko	0,45	0,39 – 0,63
Niitty	0,15	0,10 – 0,20
Bermudaruoho	0,41	0,30 – 0,48

3.3 Verkoston kunto

Verkoston kunto vaikuttaa viemäreihin päätyvän vuotoveden määrään. Vuotovesi voi olla pohjavettä, peräisin muista putkista tai hulevettä. Vuotovedet pääsevät viemäriin esimerkiksi juurten rikkoman putken tai viallisen kaivorakenteen takia. Myös kiinteistöt ovat voineet tehdä omia luvattomia liitoksia viemäriverkkoon ja johtaa sinne vesiä tontiltaan. (Butler & Davies 2004) Vastaavasti verkoston huonon kunnon takia vettä voi päästä virtaamaan myös pois jäte- ja hulevesiputkista (Karpf et al. 2011).

Jos pohjavedenpinta on viemäriputkien yläpuolella ja verkosto huonokuntoista, vaikuttaa pohjavesi suuresti vuotovesien määrään. Pohjavedestä aiheutuva vuotovesimäärä muuttuu yleensä vuodenajan mukaan, jolloin määrän voidaan vuodenajan sisällä olettaa pysyvän vakiona (Vallabhaneni et al. 2007)

Vuotovedet lisäävät viemäreissä virtaavaa vesimäärää ja pienentävät siten niiden jätevesikapasiteettia. Tämä voi aiheuttaa muun muassa viemärien tulvimista ja ongelmia pumppaamoilla. (Butler & Davies 2004, RIL 2004)

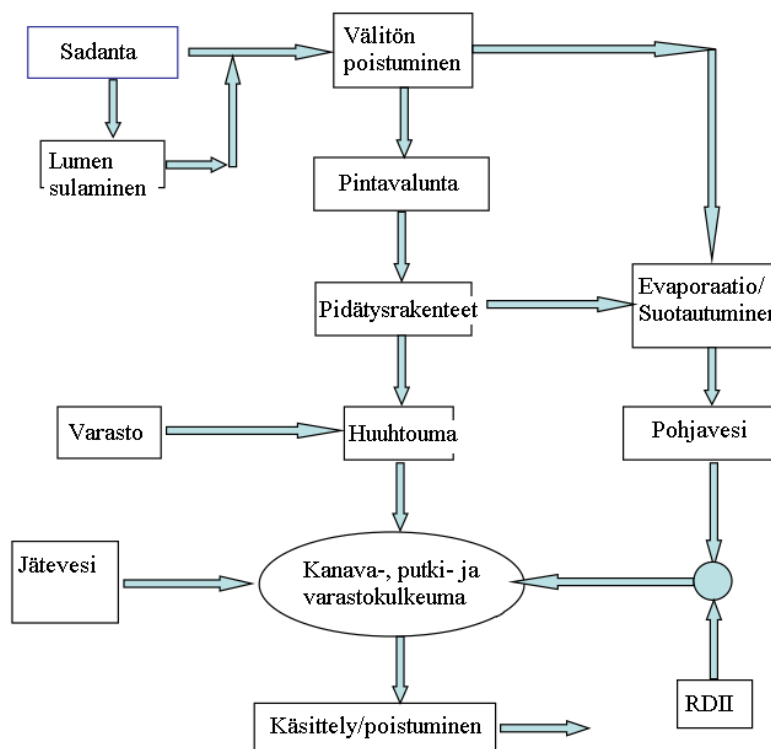
4 Mallinnusohjelma

Mallinnusohjelmana käytettiin SWMM-ohjelmaa. EPA SWMM on Yhdysvaltain ympäristöministeriön (Environmental Protection Agency, EPA) alun perin vuonna 1971 kehittämä sadanta-valuntamalli, jonka avulla voidaan mallintaa sekä yksittäisiä että pitkäaikaisia sade-tapahtumia pääasiassa kaupunkialueilla. SWMM:ä voidaan käyttää niin hule-, seka- ja erillisviemärien kuin valuma-alueiden ja jokien mallinnukseen. (Rossman 2015) Mallia on sittemmin päivitetty useaan otteeseen ja viimeisin versio SWMM 5.1 on julkaistu vuonna 2014.

4.1 Peruseriaate

SWMM koostuu hydrologisesta ja hydraulisesta osasta. Hydrologinen osa tuottaa pintavalunnan, kun taas hydraulinen osa mallintaa pintavalunnan ja jätevesien virtaamaa. Virtaamien syntymisen ja liikkumisen mallintamisen lisäksi SWMM:ä voidaan käyttää myös arviomaan virtaavien vesien sisältämää kuormitusta. (Rossman 2015)

Valunta ja virtaama kulkeutuvat putkien, kanavien, varastojen, pumppujen ja venttiilien läpi. SWMM tarkastelee mallinnuksen aikana valunnan määrää ja laatua jokaisella valuma-alueella sekä virtaamaa, veden korkeutta ja laatua jokaisessa putkessa ja kanavassa. (Rossman 2015) Kuvassa 14 on esitetty SWMM:n mallintamat prosessit ja niiden suhteet.

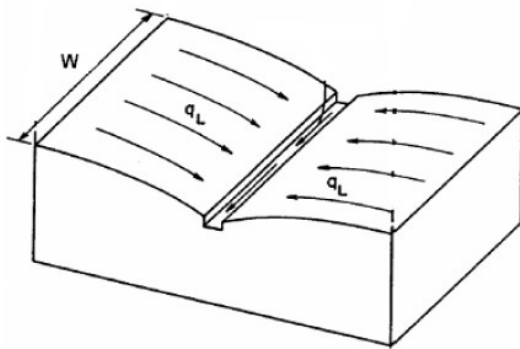


Kuva 14. SWMM:n mallintamat prosessit (Rossman & Huber 2016).

4.2 Pintavalunnan muodostuminen

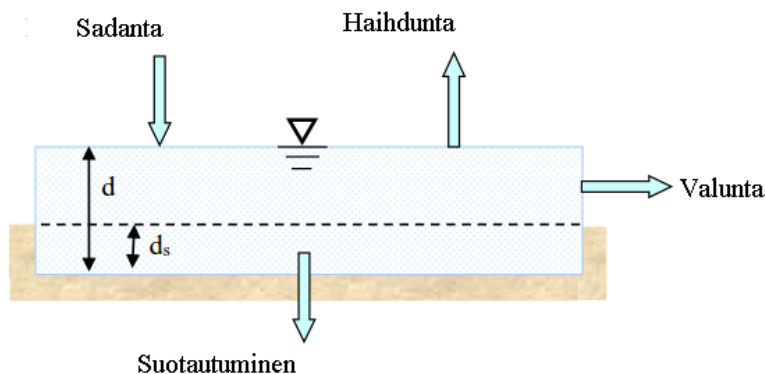
Tässä luvussa käsitellään sitä, miten SWMM muodostaa sateesta pintavalunnan. SWMM:n laskentaprosesseissa saavutetaan alueellinen vaihtelevuus jakamalla tarkasteltu alue useampaan pieneen osavaluma-alueeseen. Jokaisella näistä osavaluma-alueista on oma osuutensa läpäisemättömiä ja läpäiseviä osa-alueita. Pintavalunta voi siten ohjautua osa-alueiden, osavaluma-alueiden ja viemäriverkoston aloituskohtien välillä. (Rossman 2015)

SWMM:ssä tarkasteltava alue voidaan jakaa kuinka moneen osavaluma-alueeseen tahansa. Osavaluma-alueiden muoto voi myös vaihdella vapaasti. Ideaalinen osavaluma-alue käsitellään suorakulmaisena pintana, jonka kaltevuus on S ja leveys W , ja joka johtaa valumavedet kuvan 15 mukaisesti ojaan tai viemäriin. q_L tarkoittaa valuntaa yksikköleveyttä kohden. Pintavalunta luodaan mallintamalla osavaluma-aluetta epälineaarisenä varastona. (Rossman & Huber 2016)



Kuva 15. Ideaalisen osavaluma-alueen kuvaus (Rossman & Huber 2016).

SWMM:ssä pintavalunnan syntyminen perustuu kuvan 16 mukaiseen malliin (Rossman & Huber 2016).



Kuva 16. SWMM käyttämä konseptuaalinen malli pintavalunnasta (Rossman & Huber 2016).

Jokainen osavaluma-alue ajatellaan varastona, johon tulee vettä sadannasta ja jolta vettä lähtee alueelta haihdunnan, pintavalunnan ja suotautumisen mukana. Se osa vedestä, joka ei haihdu tai suotaudu maaperään, jää maanpinnalle muodostaen varaston, jonka syvyys on d . Varaston tai osavaluma-alueen kapasiteettia eli varastoon mahtuvaa vettä kuvaa painannesäilyntä d_s . Jos maanpinnalle jäävän veden syvyys on suurempi kuin painannesäilyntä, voi painannesäilyntän ylijäävästä osasta syntyä pintavalunta q . Pintavalunta määritetään Manningin yhtälön perusteella, ja veden syvyys d päivitetään jatkuvasti jokaiselle ajanhetkelle ratkaisemalla numeerisesti vesitaseyhtälö osavaluma-alueella. (Rossman 2015, Rossman & Huber 2016)

Vesitaseyhtälö on seurausta massan säilymisestä eli siitä, että veden syvyyden d muutos ajanhetkellä t on osavaluma-alueelle tulevien ja sieltä lähtevien vesimäärien erotus (Yhtälö 17). Yksikkö m/s saadaan, kun tarkastellaan virtaamaa pinta-alaa kohti. (Rossman & Huber 2016)

$$\frac{\partial d}{\partial t} = i - e - f - q \quad (17)$$

missä d on veden syvyys [m]
 t on aika [s]
 i on sadanta [m/s]
 e on haihdunta [m/s]
 f on suotautuminen [m/s]
 q on valunta [m/s]

Virtaama Q voidaan laskea Manningin yhtälön perusteella, kun oletetaan, että valunta osavaluma-alueen pinnalla on yhtenäistä leveydellä W , korkeudella $d-d_s$ ja kaltevuudella S :

$$Q = \frac{1}{n} S^{1/2} R_x^{2/3} A \quad (18)$$

missä Q on virtaama [m³/s]
 n on pinnan karkeuskerroin [s/m^{1/3}]
 S on pinnan kaltevuus [-]
 R_x on osavaluma-alueen hydraulinen säde [m]
 A on virtaaman poikkileikkauspinta-ala osavaluma-alueella [m²]

Poikkileikkauspinta-ala A_x lasketaan osavaluma-alueen leveyden W ja painannesäilyntän yli jäävän veden korkeuden $d-d_s$ tulona. Koska leveys W on aina paljon suurempi kuin veden korkeus $d-d_s$, seuraa tästä, että $A_x = W(d - d_s)$ ja $R_x = d - d_s$. Sijottamalla nämä yhtälöt yhtälöön 18 saadaan yhtälö 19:

$$Q = \frac{1}{n} W S^{1/2} (d - d_s)^{5/3} \quad (19)$$

Jotta saadaan määritettyä virtaama pinta-alaa kohti, jaetaan yhtälö 19 osavaluma-alueen pinta-alalla A :

$$q = \frac{WS^{1/2}}{An} (d - d_s)^{5/3} \quad (20)$$

missä q on valuta [m/s]

A on osavaluma-alueen pinta-ala [m²]

Sijoittamalla yhtälö 20 alkuperäiseen vesitaseyhtälöön (Yhtälö 17) saadaan yhtälö 21:

$$\frac{\partial d}{\partial t} = i - e - f - \alpha (d - d_s)^{5/3} \quad (21)$$

missä α on määritelty seuraavasti:

$$\alpha = \frac{WS^{1/2}}{An} \quad (22)$$

Yhtälöstä 21 voidaan ratkaista numeerisesti korkeus d jokaisella ajanhetkellä, kun i , e , f , d_s ja α tiedetään. Tämän jälkeen voidaan laskea valunta yhtälön 20 avulla. Jos d :n arvo on pienempi kuin d_s , yhtälöä 21 ei voida käyttää, sillä valunta q on nolla, ja vesitase yksinkertaistuu: (Rossman & Huber 2016)

$$\frac{\partial d}{\partial t} = i - e - f \quad (23)$$

4.3 Dynaaminen aaltoyhtälö

SWMM:ssä virtaamaa putkissa reititetään Saint Venant -virtausyhtälöiden avulla. Tässä työssä yhtälöiden ratkaisemiseen käytettiin dynaamista aaltoyhtälöä, joka ratkaisee yksiulotteiset Saint Venant -yhtälöt täydellisesti ja tuottaa siten teoreettisesti tarkimmat tulokset. (Rossman 2015) Yhtälöt koostuvat putkien jatkuvuus- (Yhtälö 24) ja liikemääräyhtälöistä (Yhtälö 25) sekä tilavuuden jatkuvuusyhtälöistä kaivoissa. (Rossman 2006)

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (24)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial \left(\frac{Q^2}{A} \right)}{\partial x} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + gAS_f + gAh_l = 0 \quad (25)$$

missä A on virtaaman poikkileikkauksen ala [m^2]
 t on aika [s]
 Q on virtaama [m^3/s]
 x on etäisyys putkessa [m]
 g on gravitaatiokiihtyvyys [m/s^2]
 H on hydraulinen korkeus putkessa [m]
 S_f on kitkalkaltevuus [m]
 h_l on häviötermi [m]

Dynaamisen aaltoyhtälön käyttäminen mahdollistaa paineellisen virtaaman, veden varastoitumisen verkostoon, padottumisen, virtauksen suunnan vaihtumisen sekä kaivoissa ja putkissa tapahtuvien sisään- ja ulostulohäviöiden mallintamisen. Aaltoyhtälöä käytettäessä laskennassa tulee käyttää menetelmän toimivuuden takaamiseksi pieniä aika-askelia. (Rossman 2015)

5 Kirjallisuuskatsaus mallin kalibrointiin

Tässä luvussa käsitellään aikaisempia tutkimuksia, joissa verkostomalli on kalibroitu eri tavoilla.

5.1 Yleistä

Viemäriverkkomallin kalibroinnissa yleensä sadannan ja verkoston virtaamien välisen vuorovaikutuksen parametrit yritetään sovittaa vastaamaan mittaushavaintoja. Joskus myös putkiverkon virtausvastustekijät voi olla syytä ottaa mukaan kalibrointiin. (RIL 2010)

Joissakin mallinnusohjelmissa on sisäänrakennettuna optimointialiohjelma, joka auttaa kalibrointiprosessissa. Tällaisilla ohjelmilla on kuitenkin samat heikkoudet kuin simulointimalleillakin: algoritmien ymmärtäminen on käyttäjille vaikeaa ja algoritmeihin on vaikea tehdä muutoksia. (Liong et al. 1991) SWMM:n kalibrointiin on yritetty kehittää automaattisia menetelmiä, sillä mallin kalibrointi on usein työlästä ja aikaa vievää (Jain et al. 2016).

Erilaisia esitettyjä ratkaisuja ovat esimerkiksi systeemiteknologiaan perustuva menetelmä (Baffaut & Delleur 1989), menetelmä, joka valikoi kalibroitavia parametreja tulosten mukaan (Liong et al. 1991), geneettinen algoritmi (Liong et al. 1995, Krebs et al. 2013), kompleksimenetelmän sovellus (Barco et al. 2008) sekä yleistetty epävarmuuden arviointimenetelmä (Sun et al. 2014). Lähes kaikki asiasta kirjoittaneet toteavat, että automaattisen kalibrointimenetelmän käyttö mahdollistaa merkittävän ajansäästön.

5.2 Parametrit

SWMM:ssä kalibrointiin määritettävät parametrit voidaan jakaa karkeasti kahteen ryhmään (Baffaut & Delleur 1989, Liong et al. 1991, Jain et al. 2016). Ensimmäiseen ryhmään kuuluvat niin sanotut fysikaaliset parametrit, joita ovat esimerkiksi osavaluma-alueiden pinta-alat, kaltevuudet sekä putkien halkaisijat ja pituudet. Toinen ryhmä koostuu hydrologisista parametreista eli esimerkiksi Manningin karkeuskertoimista, painannesäilynnöistä sekä suoutaumiskertoimista. (Baffaut & Delleur 1989, Lankiniemi 2013, Jain et al. 2016)

Ensimmäisen ryhmän parametrien arvot saadaan suoraan lähtötiedoista tai niiden arvot voidaan päätellä paikkatietoaineiston avulla. Paikkatietojen pohjalta määritetyt arvot voivat kuitenkin sisältää virheitä paikkatietojen virheellisyydestä tai niiden määrittämisessä tehdyistä vääristä oletuksista johtuen, jolloin kyseisiä parametrien arvoja voidaan myös kalibroida. Toisen ryhmän parametrien arvot pitää aina kalibroida. (Baffaut & Delleur 1989, Lankiniemi 2013, Jain et al. 2016) Barco et al. (2008) muistuttavat, että parametrien herkkyyksilyysissä osavaluma-alueen leveyden arvoa täytyy muuttaa harkiten, sillä SWMM olettaa pintavalunnan syvyyden olevan paljon valunnan viemää leveyttä pienempi. Jos leveyttä pienennetään, oletus suhteesta ei enää välttämättä pidä paikkaansa, ja malli voi arvioida virtaamat väärin (Barco et al. 2008).

Varsinaisen mallin kalibroinnin lisäksi kalibroitavien parametrien määrää on pyritty minimoimaan ja parametrien arvojen arvioimista on yritetty helpottaa erilaisilla menetelmillä.

Paikkatietojärjestelmien hyödyntämisestä ovat kirjoittaneet muun muassa (Barco et al. 2008, Sun et al. 2014, Jain et al. 2016). Sun et al. (2014) ja Jain et al. (2016) käyttivät esimerkiksi digitaalista korkeusmallia pinnanmuotoparametrien määrittämiseen. Valunnan ajoittumiseen ja määrään viemäreissä liittyvien RTK-parametrien kalibrointi on yksinkertaisempaa SWMM:iin liitettävän SSOAP-työkalun (Sanitary Sewer Overflow Analysis and Planning, työkalu jätevesiviemärin ylivuodon analysointiin ja suunnitteluun) avulla (Karuppasamy & Inoue 2012). Kalibrointiin valitut parametrit ja niiden määrä vaihtelevat tutkimuksesta, tutkimusalueesta ja lähtötietojen saatavuudesta riippuen.

Herkkyysanalyysin avulla voidaan arvioida kunkin parametrin merkitystä saatuihin mallinnustuloksiin ja siten myös vähentää kalibroinnissa käytettäviä parametreja. Herkkyysanalyysi on hyvä suorittaa, sillä on havaittu, että usein useampi kuin yksi yhdistelmä kalibrointiparametreja voi tuottaa yhtä hyvän mallinnustuloksen (Kleidorfer et al. 2008). Herkkyysanalyysissä yhtä parametria muutetaan kerrallaan ja arvioidaan siten sen vaikutusta (Liong et al. 1991).

Krebs et al. (2013) tutkivat yhdeksän parametrin vaikutusta ja havaitsivat, että vain painannesäilynnällä ja putkien Manningin karkeuskertoimella oli huomattavaa merkitystä mallin antamiin tuloksiin johtuen tutkimusalueen suuresta läpäisemättömien pintojen osuudesta. Alkuarvot ja vaihteluvälit kaikille parametreille annettiin kirjallisuuden pohjalta. (Krebs et al. 2013)

Muissa tutkimuksissa on saatu osin poikkeavia tuloksia. Tutkimuksissa kokonaisvirtaamaan on vaikuttanut eniten pintojen läpäisemättömyys (Temprano et al. 2006, Barco et al. 2008, Kleidorfer et al. 2008, Yu et al. 2014), painannesäilyntä (Barco et al. 2008, Yu et al. 2014) ja jonkin verran suotautumisparametrit (Yu et al. 2014).

Myös huippuvirtaamaan vaikuttavat parametrit vaihtelevat tutkimuksesta riippuen. Yu et al. (2014) tutkimuksessa niitä havaittiin olevan muun muassa pintojen läpäisevyys ja putkien karkeus. Temprano et al. (2006) sen sijaan mainitsevat vaikuttaviksi parametreiksi pintojen läpäisemättömyyden, kaltevuuden, leveyden ja Manningin karkeuskertoimen, kun taas Barco et al. (2008) päätyivät pintojen läpäisemättömyyteen ja painannesäilyntään.

5.3 Pintamittaukset vertailutietoina

SWMM-mallin menestyksekkäs kalibrointi ei kuitenkaan vaadi vain hyviä parametrien alkuarvauksia vaan myös hyvälaatuista dataa, johon mallinnettuja tuloksia voidaan vertailla ja niiden hyvyttä arvioida. Tällaisten tietojen, kuten virtaamakäyrien ja huippuvirtaamien, puuttuminen on edistänyt erilaisten, edelläkin mainittujen parametrien arvojen päättelymallien käyttöä. (Jain et al. 2016)

Useissa SWMM-mallin kalibroimista käsittelevissä artikkeleissa lähtötietoina on käytetty sademittauksia ja vertailutietoina virtaamatietoja verkostosta (Baffaut & Delleur 1989, Ibrahim & Liong 1992, Barco et al. 2008, Karuppasamy & Inoue 2012, Krebs et al. 2013, Sun

et al. 2014, Yu et al. 2014). Usein virtaama määritetään näissä artikkeleissa sekä veden nopeuden että pinnankorkeuden avulla. Sadedatan ja virtaamatietojen käyttö onkin yleisin tapa SWMM-mallin kalibrointiin. Muutamissa tutkimuksissa virtaama- ja sadetietojen lisäksi verkostosta on mitattu vedenpinnan korkeutta yhdessä tai useammassa pisteessä (Majaniemi 2011, Hansen et al. 2014). Mallin kalibroimista sadedatan lisäksi pelkkien pinnankorkeus-tietojen avulla on tutkittu yleisesti vielä harvemmin (Chiang et al. 2010, Ponce & Dietrich 2011).

Majaniemi (2011) mallinsi työssään Helsingin Rautatien ympäristön sekaviemärointi-järjestelmää SWMM:llä. Mallin kalibroimiseksi hän käytti sadedatan lisäksi virtaamamit-tauksia neljässä eri verkoston pisteessä sekä pintamittausta yhdessä pisteessä. Kalibroinnissa käytettiin kahta sadetapahtumaa, joista toinen oli lyhyt mutta intensiteetiltään suuri ja toinen pitkä mutta intensiteetiltään pieni. Sateiden intensiteetit oli mitattu läheisessä Kaisaniemen havaintopisteessä. Varsinainen kalibrointi suoritettiin muuttamalla manuaalisesti putkien Manningin karkeuskertoimen arvoja, osavaluma-alueiden arvoja sekä tarkentamalla virtaa-man tuntivaihtelukäyrää. Koska osavaluma-alueet olivat pieniä, ei valuma-alueen ominai-suuksilla Majaniemen mukaan ollut suurta merkitystä. Laskennassa käytettiin dynaamista aaltoyhtälöä mahdollisimman tarkkojen tulosten saamiseksi. Myös Krebs et al. (2013) ja Yu et al. (2014) ovat käyttäneet dynaamista aaltoyhtälöä. Mallilla saadut tulokset olivat luotet-tavia. Majaniemen mukaan se, että mittauksia oli saatavilla myös mallinnettavan alueen sisältä, osoittautui tässä kohteessa tärkeäksi tarkasteltaessa tuloksia, joissa verkoston suu-rimmat täyttöasteet sijaitsivat alueen sisällä pienemmissä putkissa. (Majaniemi 2011) Maja-niemi viittaa työssään Aaltonen et al. (2008) raporttiin, jonka mukaan mallinnuksessa voi myös aiheutua ongelmia, jos malli kalibroidaan vedenkorkeuksista johdettujen virtaamien mukaan.

Hansen et al. (2014) kirjoittavat, että viemäreissä suoritettavien pintamittausten avulla voi-daan osin vähentää mallin ja todellisuuden välillä esiintyviä väistämättömiä poikkeavuuksia. He käyttivät mallintamiseen MIKE URBAN -mallia, sillä se mahdollisti sellaisen menetel-män kokeilemisen, jossa mallia päivitetään mitattujen pinnankorkeuksien avulla. He halusivat selvittää, miten tämä vaikuttaa mallintamiseen ja virtaaman ennustamiseen. Seka- ja eril-lisviemäriverkostoon oli asennettuna yhteensä kahdeksan pintamittaria ja yksi virtaamamit-tari. Virtaamamittari sijaitsi alueelta pois johtavassa poistoputkessa. Pintamittareista suurin osa oli sijoitettuna pumppujen lähelle, jolloin sateettoman ajan virtaamaa hallitsivat jatkuvat vaihtelut. Mallissa virtaamat määritettiin pinnankorkeuksien avulla. (Hansen et al. 2014) Koska tarkoituksena ei suoraan ollut kalibroida mallia mittauksien avulla, tutkimus ei kerro pintamittausten sopivuudesta siihen. Tutkimus antaa kuitenkin tietoa siitä, että pinta-mittauksia voidaan hyödyntää virtaaman määrittämisessä.

Chiang et al. (2010) tarkoituksena oli kehittää SWMM:n ja dynaamisen neuroverkon avulla malli, jonka avulla voi ennustaa vedenpinnan korkeutta viemäreissä. Kohteena oli Taipeiissa, Taiwanissa, sijaitseva valuma-alue. Siellä vedenpinnan tarkka ennustaminen on tärkeää,

koska pumppaamoiden täytyy toimia voimakkaiden sateiden aikana. Pinnankorkeutta verkostossa oli mitattu neljän vuoden ajan kymmenessä eri pisteessä ja sademäärää vastaavasti viidessä. SWMM:ä käytettiin ennen neuroverkon rakentamista arvioimaan pinnankorkeutta pisteissä, jossa sitä ei ollut mitattu. Mitattujen tietojen avulla SWMM-malli kalibroitiin käyttäen kymmentä eri muokattavaa parametria, joihin kuuluivat muun muassa valuma-alueen leveys ja kaltevuus, painannesäilynnät sekä läpäisemättömille että läpäiseville pinnoille ja läpäisemättömän pinnan osuus. Tulosten perusteella SWMM:n ennustamat vedenpinnankorkeudet osuivat hyvin kahdessa tarkastellussa mittauspisteessä havaittuihin trendeihin. Chinag et al. (2010) esittävät, että malli täytyy kalibroida yksitellen joka sadetapahtumalle, jos halutaan tarkkoja mallinnustuloksia. Hyvin kalibroitu malli mahdollistaa vedenpinnankorkeuden toimivan arvioimisen, ja mallia voidaan siten hyödyntää mittaamattomien pisteiden pinnankorkeuksien arvioimisessa. (Chiang et al. 2010)

Ponce & Dietrich (2011) tutkivat myös SWMM:n kalibroimista vain pinnankorkeuksien avulla. Tutkimusalueena oli yliopiston parkkipaikka Toledossa, Yhdysvalloissa. Siellä pinnankorkeutta mitattiin paineanturien avulla hulevesiverkostosta ja sadetta alueelle asennetulla sääasemalla. Mitattuja pinnankorkeustuloksia käsiteltiin ennen SWMM:iin syöttämistä Pythonilla kirjoitetun, absoluuttiseen poikkeaman mediaaniin (MAD, Median Absolute Deviation) pohjautuvan algoritmin avulla, mikä esimerkiksi pehmensi havainnoituja, laboratoriokokeiden perusteella liian suuria piikkejä datassa. Ainakin turbulenssin havaittiin aiheuttavan heilahtelua mittarin antamissa tuloksissa. Tutkimuksen tulosten perusteella SWMM-mallin kalibroiminen on mahdollista pinnankorkeusdatan avulla. (Ponce & Dietrich 2011) Tämä tutkimus koski hyvin pientä valuma-aluetta, eikä mallin kalibrointia avattu tarkemmin. Siitä johtuen tulokset eivät välttämättä päde kaikissa tilanteissa, mutta ovat kuitenkin lupaavia, sillä mallinnettu vedenkorkeus vastasi hyvin mitattua vedenkorkeutta.

5.4 Lähtö- ja vertailutietojen vaikutus tuloksiin

Mallin kalibroimiseen käytettävien vertailutietojen laadulla voi olla vaikutusta mallin antamiin tuloksiin. Vertailu- ja lähtötiedoissa voi olla suuriakin virheitä. Mitä suuremmalta alueelta, enemmän ja tarkempia mittaustietoja on, sitä paremmin mittaustietojen virheitä voidaan arvioida ja sitä tarkempi mallista todennäköisesti saadaan.

Kleidorfer et al. (2008) havaitsivat, että heidän tutkimuksessaan vain sadedatan sisältämällä systemaattisilla virheillä oli suuri vaikutus mallin parametreihin. Kuitenkin he havaitsivat myös, että otettaessa sadedatan sisältämät virheet huomioon, ne pystyttiin kokonaan kompensoimaan kalibroimalla mallinnustulokselle herkintä virtaamaparametria, joka tässä tutkimuksessa oli tehokas läpäisemätön alue. Aikaisemmassa tutkimuksessa oli jo arvioitu, että lähtötietojen epävarmuuksien vaikutus ylittää viemäreissä tehtävien mittauksien vaikutuksen. (Kleidorfer et al. 2008)

Vastaavasti sadetietojen merkitystä kalibroinnille ja tuloksille ovat korostaneet myös muut tutkimukset, kuten Gheith (2011), Karuppasamy & Inoue (2012), Krebs et al. (2013) ja Yu

et al. (2014) osoittavat. Karuppasamy & Inoue (2012) muistuttavat, että tarkasteluun valittavien sadetapahtumien valintaan on syytä kiinnittää huomiota, jos kalibrointiin käytettävää aikaa halutaan vähentää. Gheithin (2011) mukaan paras sadetapahtuma kalibrointiin olisi kesäsade, jota on vähän aikaa sitten edeltänyt toinen sade. Tällöin ensimmäinen sade aiheuttaa valuma-alueen maan saturoitumisen, ja lyhyt väli sateiden välillä johtaa siihen, että seuraavan sateen alussa sateesta minimaalinen määrä imeytyy maaperään (Gheith 2011).

Krebs et al. (2013) mukaan sekä laadukas sadanta- että valuntadata on edellytyksenä urbaanin hydrologisen mallin menestyksekkäälle kalibroinnille ja validoinnille. Kalibroitavien parametrien määrän rajoittaminen yksinkertaistaa sekä mitatun datan arvioimista että sen arvioimista, miten epävarmuudet vaikuttavat parametrien arvoon (Krebs et al. 2013).

Yu et al. (2014) havaitsivat, että kokonaisvirtaaman kohdalla erot mallin ja todellisuuden välillä olivat pienempiä suurempia sateita käytettäessä. Tämä saattaa olla seurausta siitä, että suotautumiseen liittyvien parametrien osuus on kalibroinnissa pieni suurilla sateilla. Näihin parametreihin saattoi liittyä epävarmuuksia, jotka siten näkyivät helpommin heikkojen sateiden tuloksissa. Poikkeamat huippuvirtaaman mallinnustuloksissa saattoivat johtua mallin rajoitteista ja käytetyn datan virheistä. (Yu et al. 2014)

5.5 Tulosten hyvyyden arviointi

Mallin tulosten hyvyyttä voidaan arvioida erilaisilla menetelmillä. Muun muassa ASCE Task Committee (1993) ja Moriasi et al. (2007) ovat suositelleet käytettäväksi erilaisia arviointikriteerejä. Paras menetelmä riippuu aina tapauksesta, mutta menetelmien määrä olisi hyvä pitää minimissään. Kaikissa mallinnustapauksissa pitäisi tulosten hyvyys muistaa esittää menetelmän lisäksi graafisesti. (ASCE Task Committee 1993)

Kleidorfer et al. (2008) ja Krebs et al. (2013) käyttivät arvioinnissa esimerkiksi Nash-Sutcliffe-tehokkuutta eli NSE-lukua. NSE-lukua käytetään yleisesti arvioimaan hydrologisten mallien suorituskykyä ja se voidaan laskea yhtälöllä 26. NSE-luvun arvot voivat vaihdella välillä $-\infty \dots 1$ luvun 1 ollessa optimaalinen arvo. Negatiiviset luvut viittaavat siihen, että mallin suorituskyky on huono, kun taas positiiviset arvot kertovat, että malli toimii hyväksyttävästi. Mallinnustuloksen voidaan katsoa olevan hyvä, jos NSE-luvun arvo on yli 0,65. (Moriasi et al. 2007)

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{obs,mean})^2} \right] \quad (26)$$

missä Y_i^{obs} on havaittu arvo [-]
 Y_i^{sim} on mallinnettu arvo [-]
 $Y_i^{obs,mean}$ on havaittujen arvojen keskiarvo [-]
 n on havaintojen lukumäärä [-]

NSE-luvun lisäksi usein käytetty menetelmä on neliösummamenetelmä (Yhtälö 27), joka laskee niin sanottujen residuaalien neliösummaa eli jäännöseliösummaa (SSE, Sum of Squared Errors). Neliösumma pyritään saamaan mahdollisimman lähelle arvoa nolla, sillä tällöin mallinnustuloskin on hyvä. Tämän menetelmän avulla mallin hyvyttä ovat arvioineet muun muassa Liong et al. (1991), Liong et al. (1995) ja Krebs et al. (2013).

$$SSE = \sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2 \quad (27)$$

Baffaut & Delleur (1989), Barco et al. (2008) ja Yu et al. (2014) puolestaan arvioivat mallin suorituskykyä suhteellisen virheen perusteella eli jakamalla mallinnetun ja mitatun arvon erotuksen mitatulla arvolla.

6 Pintamittauksen käyttö verkoston hallinnassa

Viemäreissä virtaavan veden pinnankorkeusmittauksia voidaan hyödyntää muun muassa viemärien virtaaman arvioimisessa (Nguyen et al. 2009, Kouyi et al. 2010, Isel et al. 2012) ja ylivuotojen virtaaman arvioimisessa (Kouyi et al. 2005, Isel et al. 2011, Isel et al. 2014).

6.1 Viemärien virtaama

Erilaisia pinnankorkeuden mittaustapoja viemärien virtaaman määrittämiseen on tutkittu eri artikkeleissa. Yleensä perinteiset pinnankorkeuden mittausten menetelmät, kuten ultraääni ja paineanturi, tarjoavat vain paikallisia tuloksia, eikä niiden ole mahdollista tunnistaa esimerkiksi vesikynnyksiä. Menetelmät eivät myöskään anna kuvaa mittaustulosten luotettavuudesta. (Nguyen et al. 2009, Kouyi et al. 2010)

Nguyen et al. (2009) käyttivät pinnankorkeuksien mittaamiseen kuvankäsittelytekniikoita. Pinnankorkeuden arvioimisessa käytettiin apuna myös mittatikkuja. Viemäreistä tallennettiin videokuvaa ja niihin liittyen kehitettiin kuvaan perustuvia vedenpinta-algoritmeja. Algoritmien tarkoituksena oli tunnistaa vedenpinta viemäreissä otetuista kuvista ja määrittää sen korkeusasema koordinaatteihin sidottuna. Tällä tavalla saatuja pinnankorkeuksia verrattiin viemäriin asennettujen ultraäänimittarien ja paineanturien antamiin tuloksiin. Kokonaisuudessaan vedenpinta-algoritmit tarjosivat yhtä tarkan tai tarkemman arvion vedenpinnasta vertailumittareihin verrattuna. Tallennettujen kuvien perusteella oli mahdollista arvioida mittaustulosten luotettavuutta ja havaita esimerkiksi mittarien avulla määritettyjen virtaamien poikkeaviin arvoihin johtaneita syitä. Erityisesti sateen aikana virtaaman arviointi viemäriin on hankalaa, mutta artikkelissa käsitellyn menetelmän avulla virtaama voidaan määrittää kuvien perusteella. Kuvaan perustuva menetelmä mahdollistaa viemärivirtaaman suhteellisen virheettömän tarkkailun, ja siitä on lisäksi hyötyä esimerkiksi viemärien ylivuotojen ja siten ympäristön saastumisen tarkkailussa. (Nguyen et al. 2009)

Kouyi et al. (2010) esittelevät menetelmän, joka mahdollistaa virtaaman määrittämisen viemäriin mittaamalla vain pinnankorkeuksia ja käyttämällä 1D- ja numeerisia virtausdynamiikan mallinnustyökaluja. Menetelmä perustui ranskalaiseen CANOE-ohjelmistoon. Tulosten perusteella pinnankorkeuksista päätelty virtaama oli luotettava. Menetelmä voi helpottaa virtaaman arvioimista ilman nopeuden mittaamista, sillä nopeussensori tukkeutuu usein viemärivedestä. Kirjoittajien mukaan menetelmää voidaan käyttää myös muille alueille, jos luotettavia geometria-, hydraulikka- ja sadetietoja on saatavilla. (Kouyi et al. 2010)

Isel et al. (2012) määrittivät puolestaan viemäriin virtaamaa kahden pinnankorkeusmittarin avulla. Tarkoituksena oli ottaa huomioon mittaustapaan hydraulinen monimutkaisuus, joka johtuu muun muassa ajan suhteen muuttuvasta virtauksesta. Tästä johtuen pinnankorkeus ei aina yksiselitteisesti määrittänyt virtaamaa. Menetelmää sovellettiin suuren valuma-alueen alajuoksulla oleviin viemäriin, joiden lähellä ei ollut esimerkiksi pumppuja. Menetelmän käytettävyydelle on vaatimuksena muun muassa, että virtauksen on oltava verkkasvirtausta ja mittarien väliseen viemäriosuuteen ei saa liittyä putkia. Epätasaisen virtauksen yhtälön tu-

lokset sovitettiin käyttämällä neuroverkkoa, ja lopulta muodostettiin interpolointifunktio linkittämään pinnankorkeudet ja virtaama. Tulosten arvioimiseksi pinnankorkeusmittarien väliin asennettiin yksi Doppler-mittari mittaamaan virtaamaa. Toinen Doppler- sekä yksi elektromagneettinen mittari asennettiin alemman pintamittarin jälkeiseen putkiosuuteen. Simuloitu virtaama vastasi tulosten perusteella sateen aikana alempien mittareiden virtaamaa mutta kuivalla säällä ylemmän Doppler-mittarin tuloksia. Virtaamamittarien tulokset voivat olla vääristyneitä, mutta menetelmän käyttö on mahdollista, jos epävarmuudet otetaan huomioon. (Isel et al. 2012)

6.2 Ylivuotojen virtaama

Ylivuotorakenteissa hydrauliset olosuhteet voivat vaihdella ja virtaaman mittaaminen sekä pinnankorkeuksien että veden nopeuden avulla on siten haastavaa. Virtaaman tarkkailu ja sen liikkeen ymmärtäminen on kuitenkin tärkeää, sillä ylivuotojen kautta vesistöihin pääsee purkautumaan puhdistamattomia jätevesiä. (Kouyi et al. 2005, Isel et al. 2014)

Kouyi et al. (2005) tarkoituksena oli määrittää ylivuotovirtaama pinnankorkeusmittausten ja mallien avulla sekä määrittää kolmen pinnankorkeusmittarin optimaalinen määrä ja mittausta paikka ylivuotokourussa. Pinnankorkeuden mittaamiseen käytettiin ultraäänimittareita, jotka asennettiin ylivuotorakenteisiin vedenpinnan yläpuolelle kiskojen avulla. Kiskot mahdollistivat mittarien paikan helpon muuttamisen. Ylivuotovirtaamaa mallinnettiin mitausten perusteella sekä 1D- että 3D-malleilla, ja vertailutietoina käytettiin aikaisemmin mitattuja ylivuotovirtaamia. 1D-mallissa virtaaman mallinnuskaava pyrittiin saamaan muotoon $Q_{overflow} = a_1 h_1^{b_1} + a_2 h_2^{b_2} + a_3 h_3^{b_3}$, missä a_1, a_2, a_3, b_1, b_2 ja b_3 ovat kuhunkin tilanteeseen muokattavia parametreja ja h_1, h_2 ja h_3 mitattuja pinnankorkeuksia. Molemmilla malleilla mallinnetut virtaamat olivat luotettavia mitattuihin virtaamiin verrattaessa. (Kouyi et al. 2005)

Ylivuotovirtaaman määrittämiseen tarvittava nopeuden mittaaminen voidaan muun muassa Isel et al. (2014) mukaan välttää käyttämällä virtaaman arvioimiseen numeerista virtausdynamiikkamallia. Mallia varten mitataan vedenpinnankorkeutta ultraääni- tai tutkalaitteilla, jotta kosketus veden kanssa vältetään. Mittarit asennetaan paikkaan, jossa virtausolosuhteet ovat mahdollisimman vakaat. Tämän menetelmän käyttö virtaaman laskemiseen tarjoaa useita etuja. Se muun muassa yhdistää mittarien sijaintipaikan optimoinnin ja laitteiden herkkyyksianalyysin reunaehtojen vaihtelevuutta vastaan. Lisäksi veteen koskemattomat mittarit eivät tarvitse yhtä paljon huoltoa veteen upotettaviin mittareihin verrattuna. (Isel et al. 2014)

Vuonna 2011 julkaistussa artikkelissaan Isel et al. keskittyvät arvioimaan ylivuotovirtaamaa viemäriverkostossa ja erityisesti sekavesiviemärien ylivuotokammioissa yleisellä menetelmällä, joka perustuu virtausdynamiikkaan ja joka hyödyntää myös ylivuotorakenteissa suoritettuja pintamittauksia. He käsittelevät artikkelissaan lisäksi epävarmuuksien hallintaa, joita liittyy veden syvyyden ja virtaaman suhteen määrittämiseen. Epävarmuuksia voi liittyä sekä numeeriseen malliin, reunaehtoihin että mittarien tarkkuuteen. Ylivuotorakenteiden

monimutkainen rakenne vaatii kolmiulotteista mallinnusta, jotta saadaan paremmin todellisuutta vastaava mallinnustulos. Reunaehdot, kuten virtauksen tyyppi vaihtelevat kohteesta ja virtausolosuhteista riippuen. Tässä tutkimuksessa mittarit ennen ja jälkeen ylivuotokammion autoivat hahmottamaan virtaaman vaihteluvälejä. Epävarmuuksien oletettiin olevan riippumattomia, mutta ne näyttävät kuitenkin olevan kytköksissä toisiinsa. (Isel et al. 2011)

7 Tutkimusaineisto ja -menelmät

Tässä luvussa käsitellään valuma-alueiden määrittystä, tutkimusalueita ja saatuja mittaus- sekä muita lähtötietoja. Lisäksi käsitellään SWMM-mallin rakentamista ja kalibrointia.

7.1 Tutkimusalueet

Tutkimusalueiksi valittiin kaksi aluetta, Munkkiniemi Helsingistä ja Tammisto Vantaalta (Liite 1). Munkkiniemessä oli jo valmiiksi ennen työn aloittamista pinnankorkeusmittari, ja lisäksi alueella on sekä seka- että jätevesiviemäriverkostoa. Tammiston alue keskikokoinen viemäröintialue Vantaalla, jolta on melko luotettavaa virtaamatietoa.

7.1.1 Valuma-alueen määrittäminen

Valuma-alueiden määrittämisessä käytettiin apuna Aalto-yliopiston vesihuollon tutkimusryhmässä kehitettyä menetelmää, joka ottaa huomioon sekä maanpinnan muodot että verkoston sijainnin. Menetelmässä eheä viemäriverkosto, joka ulottuu myös tarkasteltavan alueen ulkopuolelle, upotetaan ensin ArcGIS:ssä rasterina korkeusmalliin. Upotettavan verkoston kohdalla korkeusmalli saa tietyn määrätyn arvon, mutta verkoston ulkopuolella olevissa pisteissä pisteen korkeusmallin arvon. Seuraavaksi voitiin määrittää virtaussuunnat maalta verkostoon ja lopuksi valuma-alue. Saatua valuma-aluetta jouduttiin vielä muokkaamaan käsin: esimerkiksi meren päälle ulottuvat alueet poistettiin.

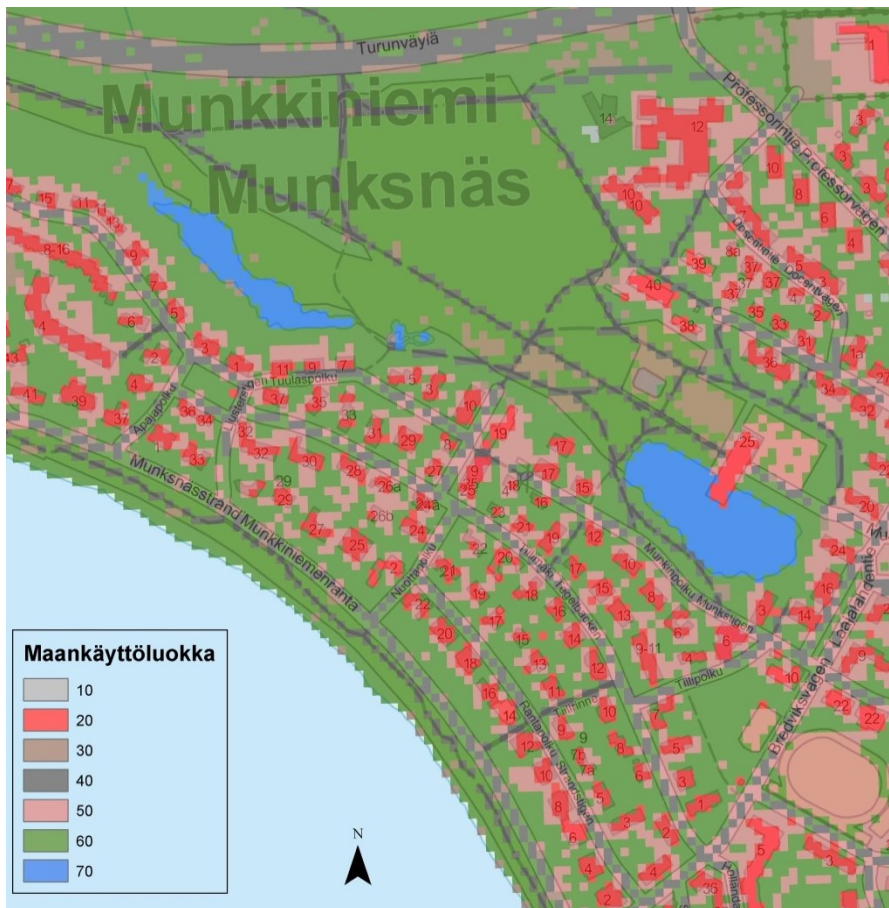
Osavaluma-aluejako pohjattiin maanpeitteeseen siten, että jokaisella osavaluma-alueella oli vain yhtä maanpeitettä. Tämä mahdollisti osavaluma-alueiden ominaisuuksien määrittämisen maanpeitteen ominaisuuksien mukaan. HSY on julkaissut yhdessä pääkaupunkiseudun kuntien kanssa pääkaupunkiseudun alueelta maanpeiteaineiston, jossa on eriteltyä eri maanpeitemuodot.

Tähän tutkimukseen maanpeiteaineistoa jouduttiin hieman muokkaamaan, jotta maanpeitteet saatiin kalibrointia varten PEST-ohjelmaan sopiviksi. Työssä oletetaan esimerkiksi, että sekä puusto että matala kasvillisuus muodostavat yhdessä kasvillisuudet, ja että vettä läpäisemättömät pinnat ovat suurimmaksi osaksi kivetystä. Lopullisia maanpeiteluokkia olivat kallio, katot, hiekka/sora, asfaltti, kivetys, kasvillisuus ja vesistöt. (Taulukko 2)

Taulukko 2. Maanpeiteluokat.

Maanpeite HSY:n aineistossa	Vastaava maanpeite tässä työssä	Koodi
Avokalliot	Kallio	10
Rakennukset	Katot	20
Paljas maa	Hiekka/sora	30
Tiet	Asfaltti (myös hiekkaa ja soraa)	40
Vettä läpäisemättömät pinnat	Kivetys (myös hiekkaa, soraa ja asfalttia)	50
Puusto	Kasvillisuus	60
Matala kasvillisuus	Kasvillisuus	60
Vedet	Vesistöt	70

Kuvassa 17 on esitetty maankäytön eli maanpeitteen jakautuminen pienellä alueella Munkkiniemessä. Maanpeiteluokkien koodit on selitetty Taulukossa 2. Digitaaliset korkeusmallit ladattiin ensin Maanmittauslaitoksen Internet-sivuilta 2 metrin resoluutiolla, mutta ne muokattiin siten, että lopullinen rasterisolun koko oli 8 m x 8 m. Myös maanpeiterasterisolujen kooksi muokattiin 8 m x 8 m, ja rasterit asetettiin siten, että niiden solut osuivat päällekkäin korkeusmallirasterien solujen kassa. Lisäksi maanpeiterasterit leikattiin valuma-alueen muotoisiksi.



Kuva 17. Maankäytön jakautuminen pienellä alueella Munkkiniemessä.

7.1.2 Munkkiniemi

Munkkiniemi sijaitsee Länsi-Helsingissä Laajalahden rannalla. Tässä työssä Munkkiniemen alueeseen laskettiin kuuluvaksi myös Kuusisaari ja Lehtisaari, sillä niiltä tulevat jätevedet virtaavat Munkinpuiston kautta. Tarkasteltavalla alueella asuu noin 9 000 asukasta (Mäki & Vuori 2015). Pääasiassa alueen maanpeite koostuu omakoti- ja kerrostaloasutuksesta sekä puistoista tai kasvillisuudesta. Lehti- ja Kuusisaarella asutus on harvempaa eikä päällystettyä pintaa ole yhtä paljon kuin Munkkiniemessä. Tarkastellulla alueella ei ole isoja liike- tai teollisuusrakennuksia. Maaperä alueella on Geologian tutkimuskeskuksen (GTK) ja Helsingin kaupungin karttapalvelun mukaan suurimmaksi osaksi hiekkaa ja moreenia, mutta Munkinpuiston alueella savi on vallitseva maalaji (GTK, Helsingin kaupunki).

Valuma-alue rajattiin koskemaan sitä osaa verkostosta, jonka johtamat vedet kulkevat Munkkiniemenrannan jätevedenpumppaamon JVP1053 kautta tai lopulta Munkinpuiston läpi johtavan betonisen 600 mm sekavesiviemärin läpi. Kokonaisuudessaan valuma-alueen pinta-ala on noin 90 ha. Verkosto on varsinaisessa Munkkiniemessä pääasiassa sekavesiviemäriverkoston, mutta tarkasteltavalla alueella Lehti- ja Kuusisaarella verkosto koostuu jätevesiviemäreistä. Valuma-alue, pumppaamot, ylivuodot sekä tarkasteltavan alueen viemäriverkosto on esitetty kuvassa 18. Runkolinjojen virtaussuunnat on esitetty liitteen 2 kartassa. Tarkempi selostus kuvan 18 merkinnöistä on kuvan jälkeen.



Kuva 18. Munkkiniemen valuma-alue, verkosto, pumppaamot ja ylivuodot.

Jätevedenpumppaamot (JVP) on merkitty kuvaan 18 punaisilla pisteillä. Pinkki piste kuvaa pistettä, josta alueen vedet jatkavat matkaansa eteenpäin verkostossa, ja valuma-alue on rajattu mustalla. Kuvassa ei näy alueen ulkopuolista verkostoa. Sekavesiviemärit on merkitty kuvaan vihreällä, jätevesiviemärit ruskealla ja paineviemärit punaisella. Alueella sijaitsevat ylivuodot on puolestaan merkitty vihreillä pisteillä (tässä työssä käytetty tunnus O).

7.1.3 Tammisto

Tammisto sijaitsee Etelä-Vantaalla Helsingin rajalla, tarkemmin Vantaanjoen ja Keravanjoen haarassa Tuusulanväylän varrella. Tammiston alueeseen luettiin tässä työssä kuuluvaksi myös Pakkala siltä osin, kun verkosto sitä vaati. Aukkaita tarkastellulla alueella asuu noin 9 000 (Vantaan kaupunki 2015). Maankäytöllisesti alueella on isoja liikerakennuksia normaalin omakoti-, rivi- ja kerrostaloasutuksen lisäksi. Metsää, peltoa ja viheralueita löytyy lisäksi melko paljon. Maaperä on pääasiassa savea, mutta muutamassa korkeammalla olevassa kohdassa esiintyy kalliota, hiekkaa, moreenia ja silttiä (GTK, Vantaan kaupunki).

Tarkasteltava alue rajattiin siten, että purkupisteenä alueelta poistuville vesille toimii Silta-
mäen jätevedenpumppaamo edeltävä halkaisijaltaan 500 mm betoninen putkiosuus. Kokonaisuudessaan alueen pinta-ala on noin 380 ha. Tammiston alue sekä alueen viemäriverkosto on esitetty kuvassa 19. Käytössä olleessa verkostokartassa ei ollut saatavilla ylivuototietoja. Jätevedenpumppaamot (JVP) on merkitty Kuvaan 19 punaisilla pisteillä. Pinkki piste kuvaa pistettä, josta alueen vedet jatkavat matkaansa eteenpäin verkostossa. Alueen verkosto on pääasiassa jätevesiverkostoa, ja se on merkitty ruskealla. Paineviemärit on merkitty punaisella. Virtaussuunta päälinoissa on esitetty liitteessä 2.



Kuva 19. Tammiston alueen verkosto ja pumppaamot.

7.2 Käytetyt pinnankorkeusmittarit

Tässä työssä käytetyt pinnankorkeusmittarit olivat isobritannialaisen Technolog-yrityksen tuotteita. Ne valikoituivat käyttöön, koska HSY:llä oli ennestään onnistuneessa testikäytössä yksi vastaava mittari.

7.2.1 Mittariesittely

Mittarien malli on Cello CSO – GSM Ultrasonic Level Recorder, ja niissä yhdistyy Siemens Milltronicsin ultraäänianturi pinnankorkeusmittaukseen sekä Technologyn GSM/SMS-datankeruulaite (Kuva 20). Mittarien säteilykulma on 12° ja sokea alue 300 mm. Mittarit mittaavat tarkkuudella +/- 10 mm ja ne toimivat lämpötilavälillä -20 °C...+60 °C (Technolog Limited 2012), joten ne sopivat myös Suomen olosuhteisiin.



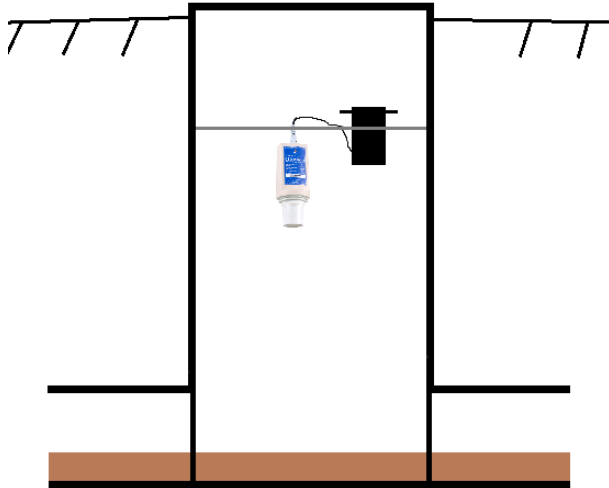
Kuva 20. Cello CSO – GSM Ultrasonic Level Recorder -mittari. (Technolog Limited 2016)

Mittarisysteemissä on litiumakku, joka kestää jopa yli viisi vuotta mittausvälistä ja ulkolämpötilasta riippuen. Datankeruulaite antaa virtaa ultraäänianturille, ja anturi määrittää ajan, joka kuluu lähtevältä ääniaallolta heijastua takaisin anturiin. Mittarissa on sisäänrakennettu lämpötilamittari, jonka avulla ultraäänianturi huomioi äänen nopeuden lämpötilasta riippuvana. (Technolog Limited 2012)

Datankeruulaite tallentaa ultraäänianturin mittaamia pinnankorkeuslukemia oletuksena 15 minuutin välein. Mittausväliä voidaan kuitenkin muuttaa. Mitattua dataa pääsee tarkastelemaan Internetissä tunnuksien kanssa WaterCore-sivustolla. (Technolog Limited 2012)

7.2.2 Mittarien asennus

Mittarit asennettiin viemärikaivoihin erillisen tuen avulla. Tuki kiinnitettiin poikittain kaivon yläreunaan, ja jos kaivo oli liian syvä, tukeen kiinnitettiin vielä pystysuora tuki, jonka avulla mittari saatiin lähemmäs vedenpintaa. Tämän pystysuoran tuen alaosaan kiinnitettiin varsinainen ultraäänimittari. Jos kaivo oli matala, mittari kiinnitettiin suoraan kaivon yläreunaan asennettuun tukeen. Tuessa oli paikka myös datankeruulaitteelle, joka oli yhteydessä mittariin kaapelin avulla. Kuvassa 21 on esitetty periaatekuva asennetusta mittarista kaivossa ja kuvassa 22 mittauslaitteisto asennettuna kaivoon ilman pystysuoraa tukea.



Kuva 21. Periaatekuva mittarista kaivossa.



Kuva 22. Kaivoon asennettu ultraäänimittauslaitteisto.

Mittarien mittaama pinnankorkeus sidottiin kaivon pohjan korkeuteen. Pinnankorkeus mitattiin ensin käsin mitalla ja kalibroitiin mittariin sitten asennusohjelman avulla. Mittausvälinä käytettiin aluksi kymmenen tai viiden minuutin väliä mittauspisteestä riippuen, mutta kokeilumielessä väliä pienennettiin kahteen minuuttiin yhden mittarin kohdalla. Mittausvälien vaihtelulla haluttiin kokeilla mittarien toimivuutta ja niiden tallentaman datan laatua.

Mittarit pyrittiin sijoittamaan viettoviemäriosuuksiin eri puolille verkostoa, jotta mahdollisimman monesta alueen osasta saataisiin mittaustietoa. Sijaintia jouduttiin joidenkin mittarien kohdalla muuttamaan, sillä alkuperäisellä paikalla saadut mittaustulokset olivat huonoja johtuen esimerkiksi kaivon liiallisesta syvyydestä, painuneesta putkesta, pumppaamon aiheuttamasta vedenpinnan heilahtelusta sen ylävirrassa sekä paineviemärin purkukaivon liian läheisestä sijainnista, joka aiheutti virtaamaan turbulenssia heikentäen siten mittausten laatua.

Jotta tulosten tulkinta helpottuisi, mahdollisuuksien mukaan yritettiin välttää kaivoja, joihin liittyi useampi linja. Lisäksi yritettiin välttää mittarien asentamista sellaisiin kaivoihin, joissa vettä tiedettiin virtaavan vähän esimerkiksi pienen asukasmäärän takia. Mittauskaivojen olosuhteet Munkkiniemessä on esitetty liitteessä 3.

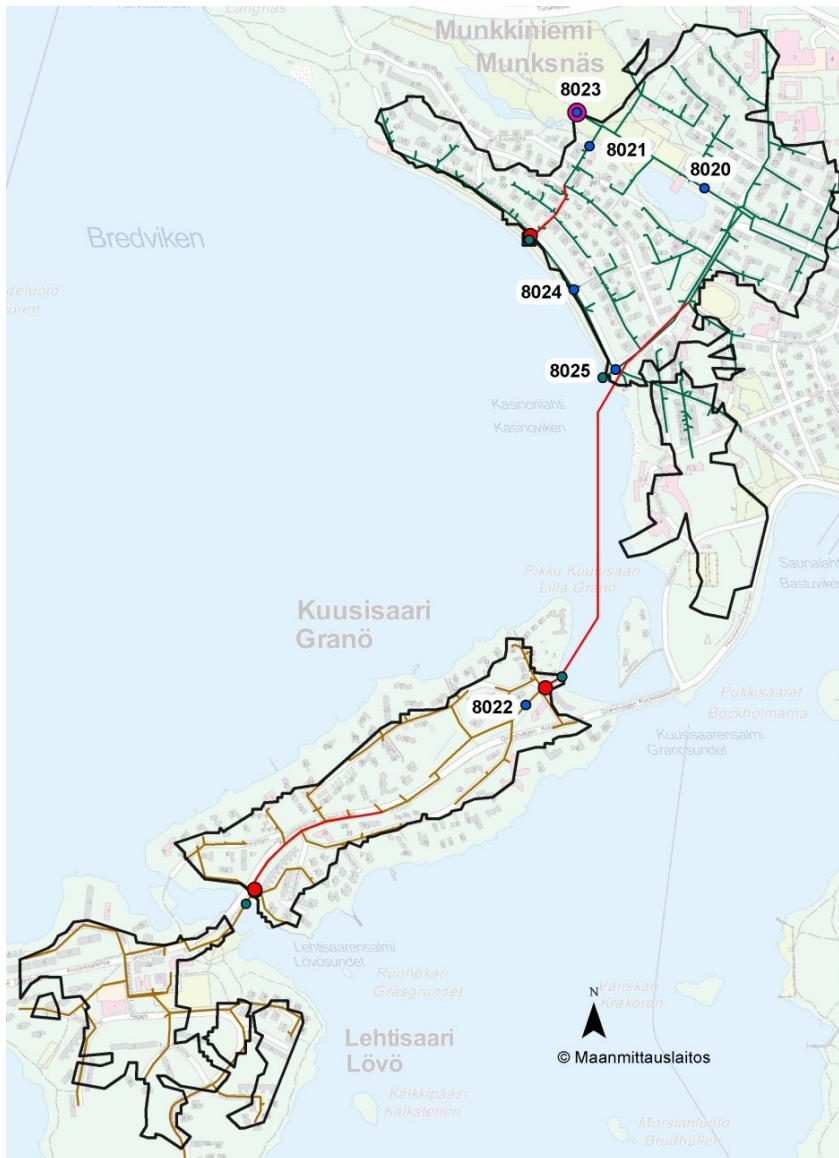
7.2.3 Sijainti Munkkiniemessä

Munkkiniemen alueella pinnankorkeuksia mitattiin kuudella mittarilla huhtikuun alusta ke-säkuun puoleen väliin. Mittarien asennusajankohta vaihteli, joten osa mittareista mittasi pidemmän aikavälin kuin toiset. Lisäksi yhdestä mittauspisteestä mittaustietoa oli alun perin alkaen jo vuoden 2015 puolelta, sillä paikalla oli ollut käytössä testimittari. Se kuitenkin vaihdettiin samanlaiseksi muiden mittarien kanssa.

Kunkin mittarin mittaama tässä työssä huomioitu aikaväli on esitetty taulukossa 3. Osassa mittauspisteitä aikaväli on muita lyhempi, sillä mittareita jouduttiin siirtämään niiden alkuperäisiltä paikoilta datan selkeän virheellisuuden takia. Ennen mittausdatan hyödyntämistä kalibroinnissa osaa käytetystä datasta käsiteltiin siten, että negatiiviset arvot muutettiin arvoiksi nolla. Mittarien lopullinen sijainti tunnistenumeroineen on esitetty kuvassa 23 sinisillä pisteillä. Kuvassa punaisina pisteinä näkyvät pumppaamot ja pinkkinä pisteenä alueen vesien ja verkoston purkupiste. Valuma-alue on rajattu mustalla, ja verkosto näkyy vihreänä, punaisena ja ruskeana viivana. Ylivuodot ovat vihreitä pisteitä.

Taulukko 3. Mittarien mitaamat aikavälit Munkkiniemessä.

Mittari	Kaivo	Aikaväli
8020	SEK4438	13.4.2016 14:30 – 21.6.2016 22:00
8021	SEK5122	16.5.2016 10:30 – 21.6.2016 22:00
8022	JV99792	16.5.2016 11:45 – 13.6.2016 10:30
8023	SEK4488	13.4.2016 13:00 – 21.6.2016 22:00
8024	JV117906	16.5.2016 11:15 – 13.6.2016 04:15
8025	YVK072	13.4.2016 11:00 – 21.6.2016 22:00



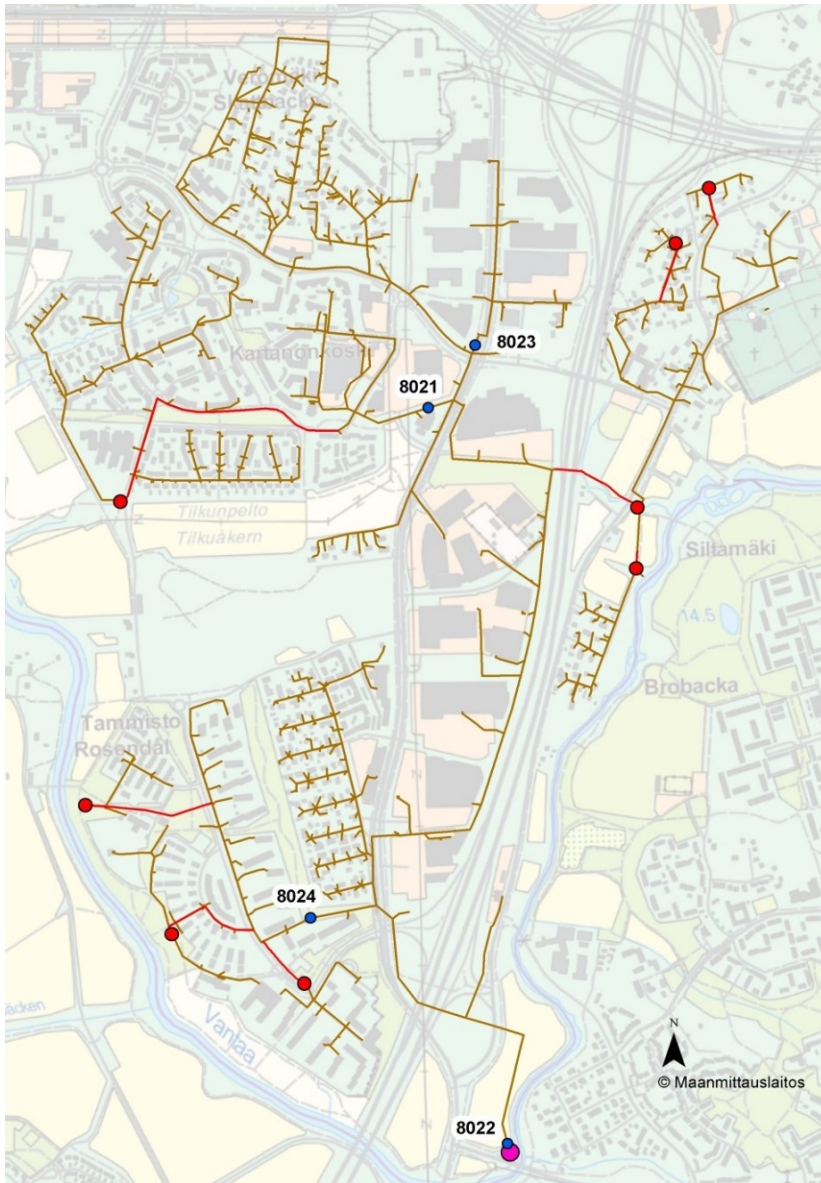
Kuva 23. Mittareiden sijainti Munkkiniemessä.

7.2.4 Sijainti Tammistossa

Neljä Munkkiniemessä käytettyä mittaria siirrettiin kokeen toisessa vaiheessa Tammiston alueelle, jossa niiden tarkastelussa huomioonotettu aikaväli on esitetty taulukossa 4. Mittarien lopullinen sijainti tunnistenumeroineen on esitetty kuvassa 24 sinisillä pisteillä. Kuvassa punaisella näkyvät pumppaamot ja pinkillä alueen vesien ja verkoston purkupiste. Verkosto on merkitty punaisella ja ruskealla. Kuvassa ei näy alueen ulkopuolista verkostoa.

Taulukko 4. Mittarien mittaama aikaväli Tammistossa.

Mittari	Kaivo	Aikaväli
8021	JK60928	26.7.2016 10:00 – 12.9.2016 0:00
8022	JK55960	*) 16.5.2016 12:00 – 12.9.2016 0:00
8023	JK92743	29.6.2016 13:50 –
8024	JK87388	26.7.2016 11:00 – 12.9.2016 0:00



Kuva 24. Mittareiden sijainti Tammistossa.

7.3 Muu käytetty data

Mallin rakentamiseen ja mallinnukseen tarvittiin myös vedenkulutustietoja sekä ilmasto- ja sadantatietoja.

7.3.1 Vedenkulutustiedot

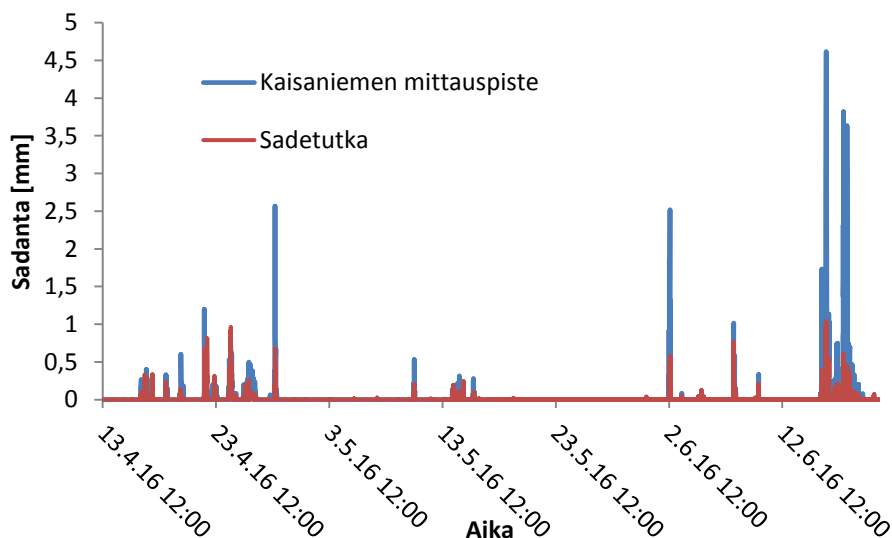
Mallissa käytetyt vedenkulutustiedot saatiin HSY:ltä sidottuna alueella oleviin kaivoihin, ja tiedot perustuivat vuosiennusteisiin. Mallin rakentamiseen käytettiin myös HSY:n Suomenojan viemäröintialueen vedenkulutuskäyriä, sillä mallinnettavalta alueelta niitä ei vielä ollut saatu tuotettua. Suomenojan kulutuskäyriä voitiin kuitenkin siis käyttää tässä työssä, sillä vedenkäytön voidaan olettaa Suomenojan viemäröintialueella vaihtelevan samalla tavoin kuin Munkkiniemessä. Munkkiniemen alueelle käytettiin Haukilahden ja Kauniaisten kulutuskäyrien keskiarvoja, sillä näillä alueilla asutus käyttää suuren osan vedestä. Käytettyjä vedenkulutuskäyriä olivat tunti-, vuorokausi- ja viikonpäivävaihtelukäyrät.

7.3.2 Ilmasto- ja sadetiedot

Sade- ja ilmastotiedot saatiin Ilmatieteen laitokselta. Työssä testattiin ajaa mallia kahdella eri tavalla estimoiduilla sadannoilla, sovitetulla sadetutkadatalla ja sademittarilla mitatulla sadannalla. Sään ja sateen mittauspisteenä käytettiin lähintä eli Kaisaniemen mittauspistettä, josta sadedatan kertymä oli mitattu kymmenen minuutin välein sademittarilla. Sovitettu sadetutkadata toimitettiin Ilmatieteen laitokselta pyynnöstä halutulle alueelle ja sen resoluutio oli 500 x 500 metriä ja mittausväli viisi minuuttia. Sovitettu sadetutkadata on tutkadataa, jota on verrattu maassa sademittarilla mitattuun sademäärään ja sen jälkeen mahdollisesti korjattu.

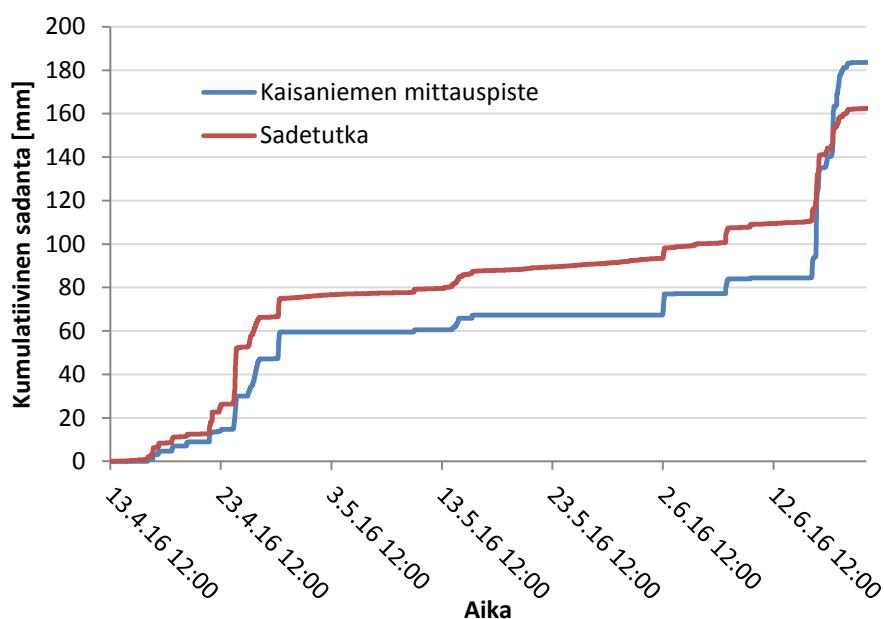
Tutkadataa testattiin ennen varsinaista mallinnusta kahdella tavalla. Ensimmäisessä tavassa Munkkiniemen alueen päälle ulottuvasta tutkarasterista laskettiin jokaiselle ajanhetkelle yksi keskimääräinen sateen arvo. Toisessa tavassa sadearvo saatiin kertomalla vain valuma-alueen päälle ulottuvien tutkasolujen arvot kunkin solun alle jäävän valuma-alueen pinta-alasta lasketulla painotetulla arvolla. Mallintamisen helpottamiseksi kummassakin tavassa ajateltiin sateen olevan mitattu yhdestä pisteestä suurin piirtein toimitetun tutkarasterialueen keskeltä. Tämä paikka sijaitsi Laajalahdella lähellä Kuusisaarta. Tutkatatassa oli muutama puuttuva jakso touko- ja kesäkuussa, koska Vantaan tutkalla oli tällöin huoltokatkoja. Molemmat tavat antoivat suurin piirtein samoja tuloksia, joten jatkossa käytettiin ensimmäisen tavan mukaan määritettyä sadantaa.

Kuvassa 25 on esitetty aikavälin 13.4. – 21.6.2016 mitatut akkumuloituneet sademäärät sekä sadetutkan että Kaisaniemen sademittarin osalta. Sademittarin mitaama sade näkyy kuvassa sinisellä ja tutkan mitaama sade punaisella. Kuvasta huomataan, että tutkalla havaitut sademäärät ovat suurimmaksi osaksi huomattavasti pienempiä kuin sademittarilla mitatut. Ainoastaan muutaman piikin kohdalla tutkan ilmoittama sademäärä on sademittarilla havaittua suurempi. Koska sadantoja ei ole mitattu samalla tavalla ja samasta paikasta, niiden ei voida kuitenkaan edes olettaa olevan täysin yhteneviä.



Kuva 25. Sadetutkalla ja sademittarilla mitatut sademäärät tarkasteltavalla aikavälillä.

Kuvassa 26 on puolestaan esitetty kumulatiivinen sademäärä tarkastellulta aikaväliltä. Kuvan perusteella molemmat mittaustavat ovat tunnistaneeet suuria sadekertymiä, mutta Kaisaniemen mittauspisteessä on mitattu enemmän sadetta kuin pelkän tutkan perusteella voisi olettaa. Tutka näyttää kuvan perustella antavan pienemmän tuloksen Kaisaniemessä mitatuille suurille sateille, kuten erityisesti kesäkuun lopun tilanne näyttää. Tutka näyttää myös huomaavan paremmin pienet mahdolliset sateet tai olettavan sadetta myös pilvistä, jotka eivät välttämättä sada, sillä tutkalla havaittu sademäärä kasvaa hieman koko ajan myös niinä ajanhetkinä, kun Kaisaniemen mittauspisteessä ei ole satanut. Kuten myös kuvassa 25 tässäkin kuvassa näkyy, että vain muutaman kerran tutkan ilmoittama sademäärä on Kaisaniemen mittauspisteessä havaittua suurempi. Näin on esimerkiksi huhtikuun 25. päivän kohdalla. Edelleen on kuitenkin muistettava, että sademääriä ei ole mitattu samasta paikasta.



Kuva 26. Kumulatiiviset sademäärät tarkasteltavalla aikavälillä.

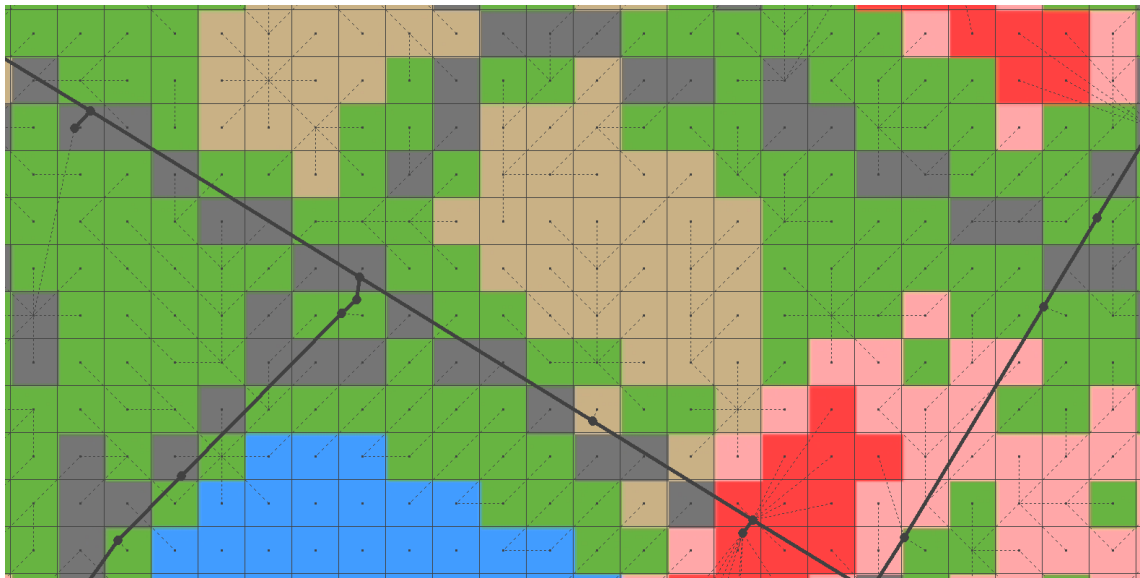
Mallinnustulokseen vaikuttaa sadedatatyypin lisäksi myös mallinnuksessa käytetyn sateen aika-askelväli eli se, kuinka monen minuutin välein tallennettuja sateen arvoja mallinnukseen käytetään sekä myös sadetutkalla rasterin koko alueen kokoon nähden. Esimerkiksi mallinnuksessa käytetyn sadetutkadatan pidempi aika-askelväli mahdollistaa myös huippujen poisjäämisen, ja suuri rasterikoko ei anna yhtä tarkkaa kuvaa sateesta kuin pienempi.

7.4 Mallin rakentaminen ja kalibrointi

Mallin verkostoon tarvittavat lähtötiedot saatiin HSY:ltä ja malli kalibroitiin käyttäen PEST-ohjelmaa. Tässä käydään läpi SWMM-mallin rakentaminen, sen vaatimat parametrit ja niiden arvojen asettaminen sekä kalibrointitekniikka.

7.4.1 Mallin rakentaminen

Tässä työssä mallin rakentamisessa käytettiin Aalto-yliopiston vesitekniikan tutkimusryhmässä luotua C++-koodipohjaista mallin rakentamisohjelmaa (GisToSWMM5), joka koostaa csv-tiedostoista SWMM:n lukeman inp-tiedoston. Ohjelmaa on aikaisemmin käytetty tutkimusryhmässä hulevesiverkoston rakentamiseen ja mallintamiseen, joten tähän työhön liittyvää mallintamista varten siihen jouduttiin tekemään muokkauksia. Komentorivillä toimiva ohjelma mahdollisti lähtötietojen helpomman ja laajemman muokkaamisen verrattuna suoraan SWMM:ssä tehtyihin muutoksiin sekä esimerkiksi sen, että valuma-alueelta tulevat hulevedet voitiin ohjata tiettyihin, ei-paineputkikaivoihin. Kuvassa 27 on esitetty esimerkki osavaluma-alueilta tulevien vesien johtamisesta kaivoihin SWMM:ssä. Kaivot on merkitty paksuilla mustilla pisteillä. Katkoviivat kuvaavat hulevesien reittiä, ja katkeamattomat paksut viivat kaivojen välillä putkia. Kuvassa näkyy myös maankäyttö väreillä ja maankäyttöön pohjautuva osavaluma-aluejako ruutuina. Maankäytön värikoodit on selitetty kuvassa 17 ja taulukossa 2.



Kuva 27. Esimerkki hulevesien reitityksestä kaivoihin SWMM:ssä.

HSY:ltä lähtötietona saatu verkosto sisälsi virheitä muun muassa putkien korkeusasemissa ja kaivojen koroissa. Siksi verkosto jouduttiin ensin eheyttämään ja käymään käsin läpi muun muassa putkien korkojen tarkistamiseksi HSY:n käyttämässä Trimble NIS-ohjelmassa. Sieltä esieheytetty verkosto saatiin uloskirjattua shape-muodossa, jolloin sen tietojen muokkaaminen ArcGIS:ssä oli mahdollista.

ArcGIS:ssä verkostoa, putkien korkeusasemia ja kaivojen korkoja jouduttiin edelleen muokkaamaan. Koska SWMM-ohjelma lukee inp-tiedostoja, mallin rakentamisohjelmaa varten tarvittavat yksityiskohtaiset tiedot verkostosta ominaisuuksineen kuten esimerkiksi putket, kaivot, pumpit ja ylivuodot piti taulukoida omiin taulukoihinsa csv-muodossa. Tämän ta-

kia ArcGIS:stä uloskirjattuja tietoja muokattiin Excelissä ja valmiiden tietojen pohjalta määritettiin muun muassa, mitkä kaivot liittyvät mihinkin putkeen, ja mikä virtaussuunta näissä putkissa on. Lisäksi esimerkiksi määritettiin, mihin kaivoihin ei voi päätyä hulevesiä.

Tämän jälkeen csv-tiedostot voitiin kääntää GisToSWMM5-ohjelmalla yhteiseksi inp-tiedostoksi ja kokeilla mallin toimivuutta SWMM:ssä. Mallia, lähtötietoja ja csv-tiedostoja jouduttiin muokkaamaan niin kauan, että mallin voitiin olettaa toimivan hyväksyttävästi. Tämä tarkoittaa sitä, että ohjelma ei antanut varoituksia, ja jatkuvuusvirheet olivat tarpeeksi pieniä eli välillä -5...+5 %. Laskennassa käytettiin dynaamista aaltoyhtälöä ja Green-Amptin suotautumismallia. Koska sadantadata saatiin UTC-ajassa, jouduttiin pinnankorkeusmittaustuloksia aikaistamaan mallia varten kesäajan takia yhdellä tunnilla. Mallintamisessa ei otettu huomioon maaperää eikä kuvan 14 mukaisia pohjavesiä, vuotovesiä ja suotautuneita vesiä, koska niistä ei ollut tarkkoja lähtötietoja saatavilla.

7.4.2 Kalibrointiin valitut parametrit

Kalibroitaviksi parametreiksi valittiin Krebs et al. (2014) tutkimuksen perusteella painannesäilyntä, Manningin karkeuskerroin ja tiettyjen pintojen läpäisemättömyys. Heidän tutkimansa alueet vastaavat monilta osin tässä työssä tutkittuja alueita, ja siten parametrien vaikutuksen arvioitiin olevan hyvin samanlainen.

Kalibroitavat parametrit jaettiin maanpeitteen mukaan siten, että jokaiselle maanpeiteluokalle oli omat parametrinsa. Kalibroitavien parametrien lähtöarvojen sekä minimi- ja maksimiarvojen määrittämisessä käytettiin kirjallisuutta (Engman 1986, Corvallis Forestry Research Community 2006, Krebs et al. 2014, Guan et al. 2015). Läpäisemättömyyden arvot perustettiin myös kirjallisuuteen (Krebs et al. 2013, Krebs et al. 2014) eikä niitä kalibroitu kaikkien maanpeitetyyppien osalta. Kalibroimattomien parametrien arvot on esitetty taulukossa 5 ja kalibroitavien parametrit taulukossa 6. Taulukossa 5 ei esitetä maaperäparametreja, joita ei siis kalibroitu, sillä niiden vaikutus tuloksiin on vähäinen (Krebs et al. 2013, Warsta 2016). Koska tutkimusalueella oli erittäin vähän kalliota, sen parametriarvoja ei myöskään kalibroitu.

Taulukko 5. Kalibroimattomien parametrien arvot.

Parametri	Pinta	Arvo
Manningin kerroin ($s/m^{1/3}$)	Kallio	0,04 ^{d)}
Painannesäilyntä (mm)	Kallio	4
Läpäisemättömyys (%)	Katot	100
	Kallio	100
	Kasvillisuus	0

a) Engman1986; b) Guan et al. (2015); c) Krebs et al. (2014); d) Corvallis Forestry Research Community 2006; e) Krebs et al. (2013)

Taulukko 6. Kalibroittavat parametrit ja niiden minimi-, maksimi- ja lähtöarvot.

Parametri	Pinta	Minimi	Maksimi	Lähtöarvo
Manningin kerroin (s/m ^{1/3})	Asfaltti	0,010 ^{a)}	0,015 ^{b)}	0,011 ^{a)}
	Katot	0,001 ^{c)}	0,014 ^{c)}	0,012 ^{c)}
	Hiekka/sora	0,01 ^{a)}	0,03 ^{a)}	0,02 ^{a)}
	Kivetys	0,010 ^{c)}	0,020 ^{c)}	0,016
	Kasvillisuus	0,1 ^{c)}	0,8 ^{c)}	0,3 ^{b)}
Painannesäilyntä (mm)	Asfaltti	0,3	2,54 ^{c)}	0,4 ^{c)}
	Katot	0,01 ^{c)}	2,54 ^{c)}	0,8
	Hiekka/sora	0,3 ^{c)}	2,54 ^{c)}	1,5
	Kivetys	0,3 ^{c)}	2,54 ^{c)}	0,7
	Kasvillisuus	2,5 ^{c)}	7,60 ^{c)}	6,0 ^{b)}
Läpäisemättömyys (%)	Asfaltti	80 ^{c)}	100 ^{c)}	95
	Hiekka/sora	30 ^{c)}	70 ^{c)}	33 ^{c)}
	Kivetys	80 ^{c)}	100 ^{c)}	85

^{a)} Engman (1986); ^{b)} Guan et al. (2015); ^{c)} Krebs et al. (2014); ^{d)} Corvallis Forestry Research Community 2006; ^{e)} Krebs et al. (2013)

7.4.3 Kalibrointitekniikka

Mallin kalibrointi suoritettiin PEST-ohjelman avulla Munkkiniemen alueelle. PEST valittiin käyttöön, koska sitä on aikaisemmin kokeiltu Aalto-yliopistossa menestyksekkäästi muun muassa pienen hulevesiverkoston kalibroimiseen (Raudaskoski 2016). PEST on Dohertyn (2005) alun perin vuonna 1994 kehittämä menetelmä, jota voi käyttää erilaisten mallien kalibrointiin ja optimaalisten parametriarvojen löytämiseen. Ohjelmalla voi kalibroida useita parametreja samanaikaisesti. Toimiakseen PEST tarvitsee erillisen tiedoston, jonka arvoihin se vertaa mallinnettuja arvoja, parametrien vaihteluvälit ja alkuarvot sisältävän tiedoston sekä verkostomallin tietoineen. (Doherty 2005)

Parametrien estimoimiseen PEST käyttää epälineaarista Gauss-Marquardt-Levenberg-menetelmää. Menetelmän etuna on erityisesti se, että se ei aja mallia yhtä useita kertoja kuin muut estimointimenetelmät, jolloin ajan säästö on suurilla malleilla huomattava. PEST etsii parasta parametrien yhdistelmää ajamalla mallia useita kertoja kalibroittavien parametrien yhdistelmillä, ja vertaamalla sitten mallinnustulosta vertailutiedoston arvoihin. (Doherty 2005)

PEST:n käyttö edellyttää, että vertailutuloksia on vertailutiedostossa yhtä monta kuin saatuja mallinnustuloksia mallin raportissa. PEST:n vertailutiedostoon ei voi sisällyttää aikatietoja, joten kaikki vertailu- eli mittaustulokset jouduttiin asettamaan tasa-aikaväleille raportointi-aikavälin kanssa. Aikaväliksi valittiin kymmenen minuuttia, sillä kaikki mittaustulokset saatiin muokattua tähän sopiviksi. Jos mittauksia oli tehty tiheämmällä aikavälillä, otettiin kalibroinnissa huomioon vain joka kymmenes minuutti saatu arvo. Siten myös kalibrointi tehtiin kymmenen minuutin raportointivälillä.

Kalibroinnissa vertailutietoina otettiin huomioon Munkkiniemen mittauspiste 8020 eli kaivo SEK4438. Mittauspisteen 8020 mittaustulos oli kaikkein tasaisin, sen ylävirrassa ei heti ollut pumppaamoja, ja kyseessä oli sekavesiverkoston kaivo, jolloin maankäytön parametreilla on todennäköisesti pelkkää jätevesiverkostoa enemmän merkitystä mallinnustulokseen. Lisäksi kyseisen pisteen yleinen mallinnettu pinnankorkeustaso oli ennen kalibrointia melko hyvä. Dohertyn (2005) mukaan kalibroinnista ei ole hyötyä, jos valitut parametrit eivät vaikuta mallinnustulokseen. Tämä tarkoittaa esimerkiksi tilannetta, jossa yleinen mallinnettu pinnankorkeustaso on jo ennen kalibrointia huomattavan väärällä tasolla.

Kalibrointi suoritettiin käyttäen aikavälin 13.4.2016 klo 14:30 – 21.5.2016 klo 21:00 mittaustuloksia. Näinkin pitkä aikaväli valittiin, koska virtaamaan vaikuttaa niin moni asia, ja pidemmällä aikavälillä sateiden vaikutus näkyi lyhyttä aikaväliä enemmän. Lyhyellä aikavälillä parametrien kalibrointi olisi voinut esimerkiksi keskittyä liikaa vedenkulutuksen vaihteluissa esiintyvien erojen pienentämiseen. Valitun aikavälin kokonaissademäärä oli sadetutkadatan perusteella noin 89 mm suurimman yhtäjaksoisen sadetapahtuman sademäärän ollessa noin 26 mm. Mallinnustulosten hyvyttä arvioitiin yleisesti käytettyjen, luvussa 4.1.4 esiteltyjen NSE-luvun (Yhtälö 26) ja SSE-luvun eli jäännösneliösumman (Yhtälö 27) avulla. Lisäksi mallin toimivuutta eli saatujen parametrien pätevyyttä arvioitiin kalibroinnin jälkeen validoimalla malli aikavälille 1.6.2016 klo 0:00 – 21.6.2016 klo 00:00. Kokonaissademäärä tälle aikavälille oli sadetutkadatan mukaan noin 69 mm ja suurin yhtäjaksoisen sadetapahtuman sademäärä noin 30 mm.

8 Tulokset ja niiden tarkastelu

Tässä luvussa tarkastellaan mittausten, mallinnuksen ja kalibroinnin tuloksia sekä mahdollisia virhelähteitä.

8.1 Pintamittaustulosten arviointi

Tässä arvioidaan pintamittareiden antamien mittaustulosten laatua ja olosuhteiden vaikutusta mittaustuloksiin sekä kerrotaan, millaisia tämän työn perusteella parhaat mittarien sijoituspaikat ovat.

8.1.1 Pintamittausten laadun ja olosuhteiden vaikutuksen tarkastelu

Mitattuja pinnankorkeuksia arvioitiin sen perusteella, miten hyvin tulokset sopivat ympäröivään alueeseen ja verkostoon sekä miten tulokset esimerkiksi heilahtelivat. Luotettava data oli melko tasaista, eivätkä arvot esimerkiksi olleet negatiivisia. Melko luotettavassa datassa mitatussa tasossa on voinut tapahtua muutos, johon voi olla realistinenkin mutta ei välttämättä selkeä selitys. Epäluotettavassa datassa mittaustulokset olivat myös negatiivisia. Luvussa tarkastellaan ensin Munkkiniemen ja sitten Tammiston mittaustuloksia.

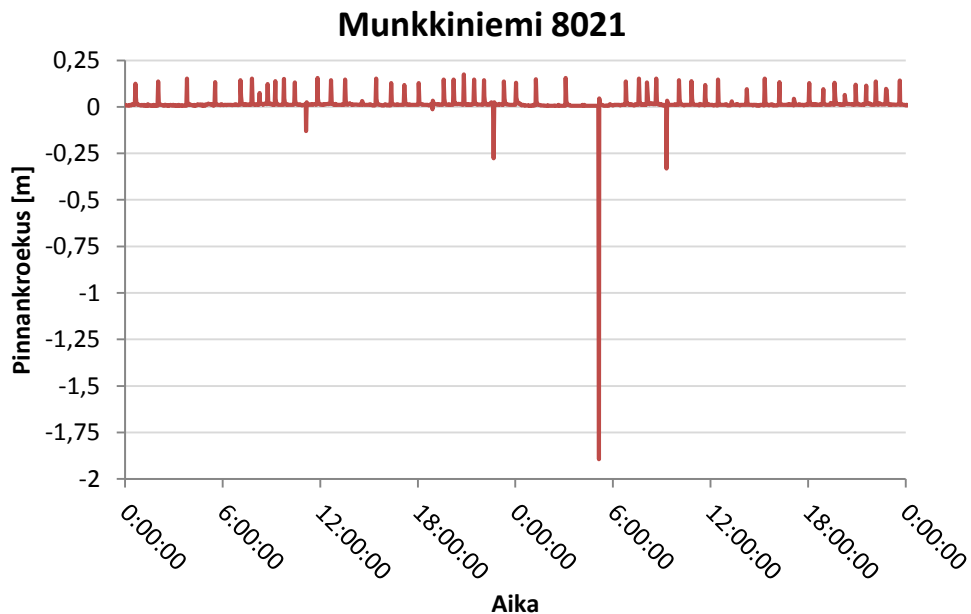
Munkkiniemessä kaksi mittaria (8021 ja 8024) jouduttiin siirtämään alkuperäisten asennusten jälkeen, sillä niiden havaittiin olevan huonossa paikassa. Kyseiset mittarit oli sijoitettu ennen Munkkiniemenrannan pumppaamoa ja sen jälkeen. Ilmeisesti mittarit olivat kuitenkin liian lähellä pumppaamoa, koska mittaustulokset olivat selkeästi virheellisiä. Alavirrassa pumppaamolta tuleva purkuvesi sekoitti vastaavasti pumppaamon alapuolisen mittarin, ja todennäköisesti ylävirrassa putki oli liian tasainen. Yksi mittari (8022) oli myös asennettu väärään, liian syvään kaivoon, joten sekin siirrettiin alkuperäisestä paikasta. Siirtojen vuoksi näistä pisteistä luotettavaa mittaustietoa on vain lyhyeltä ajalta.

Taulukossa 7 on esitetty lopullisissa paikoissaan olleiden Munkkiniemen mittarien mittaman datan laatu. Munkkiniemen osalta mittaustuloksia löytyy liitteistä 5 ja 6 kalibrointi- ja validointitulosten esittelyn yhteydestä. Mittaustuloksia on kuitenkin muokattu muuttamalla osittain epäluotettavien mittarien negatiiviset tulokset arvoon nolla.

Taulukko 7. Munkkiniemen lopullisten mittauspisteiden datan laatu.

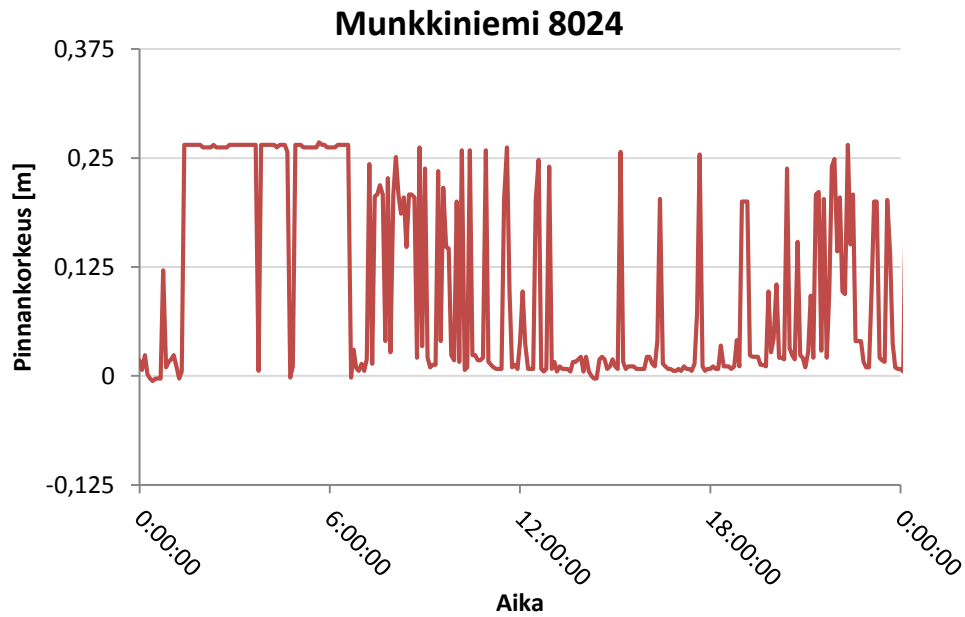
Mittari	Kaivo	Laatu
8020	SEK4438	Luotettava
8021	SEK5122	Osittain epäluotettavaa dataa: muun muassa mittaustuloksia, jotka < 0 m
8022	JV99792	Luotettava
8023	SEK4488	Melko luotettava: tasonnousu
8024	JV117906	Osittain epäluotettavaa dataa: muun muassa mittaustuloksia, jotka < 0 m
8025	YVK072	Osittain epäluotettavaa dataa: muun muassa mittaustuloksia, jotka < 0 m

Pumppaamoiden liian läheinen sijainti yläjuoksulla häiritsi Munkkiniemessä mittaustuloksia aiheuttaen niihin heilahtelua (Kuva 28). Kuvassa 28 näkyy heilahtelua mittaustuloksissa Munkkiniemen mittauspisteessä 8021, joka sijaitsi Munkkiniemenrannan jätevedenpumppaamolta JVP1053 lähtevän paineputken purkukaivon jälkeen. Mittaustulokset ovat myös osittain negatiivisia. Pumppaamolta tuleva virtaama selittää arvojen heilahtelun myös negatiivisten arvojen osalta siinä mielessä, että äkillisesti kaivoon tuleva vesi saattaa sekoittaa mittarin. Tässä tapauksessa suuret negatiiviset arvot eivät kuitenkaan ole selitettävissä suoraan pumppaamon toiminnalla tai mittarin väärällä kalibroinnilla.



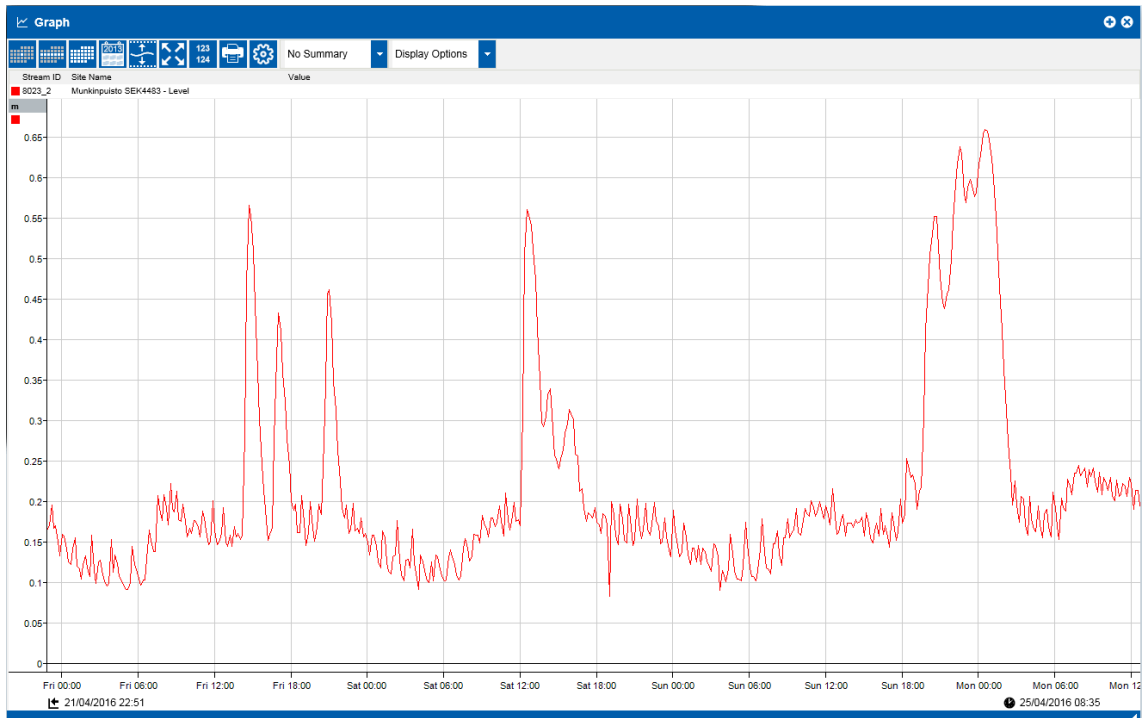
Kuva 28. Esimerkki pinnankorkeuden heilahtelusta paineputken jälkeisessä kaivossa.

Pumppaamo saattaa joissain tapauksissa myös padottaa ylävirtaan, kuten pelkän kuvan 29 perustella näyttäisi tapahtuvan Munkkiniemen mittauspisteessä 8024, joka sijaitsi noin 200 metriä ennen Munkkiniemenrannan jätevedenpumppaamoja. Vaihtoehtoisesti mittauspisteessä verkosto voi olla myös liian jyrkkä, jolloin jätevesipulssit virtaavat nopeasti mittari-kaivon läpi. Molemmat tilanteet aiheuttavat äkillistä heilahtelua mitattuihin pinnankorkeuksiin.



Kuva 29. Esimerkki mittaustuloksista pumppaamoa edeltävässä putkiosuudessa.

Munkkiniemessä mittausjaksolle osui useita sadetapahtumia. Sateiden vaikutus näkyi selkeästi piikkeinä parhaiden sekavesiverkoston mittauspisteiden mittaamassa viemäriveden pinnankorkeudessa (Kuva 30). Kuvassa 30 näkyy lisäksi viemärivertaaman vuorokausivaihtelun mutta myös tuntivaihtelun aiheuttamat muutokset pinnankorkeuksissa.

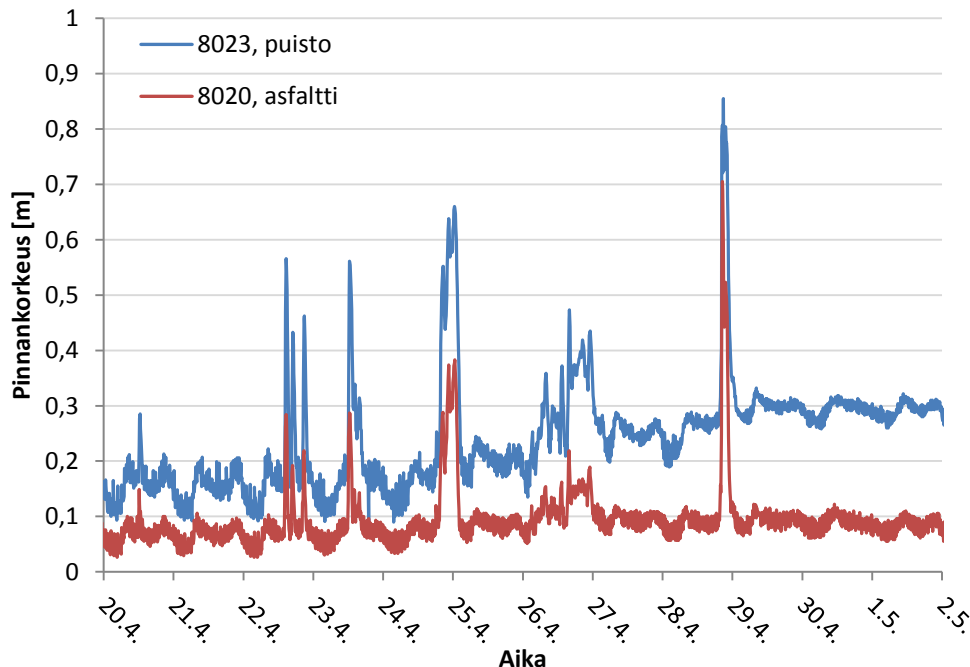


Kuva 30. Esimerkki pinnankorkeuden vaihtelusta Munkkiniemen mittauspisteessä 8023.

Vedenkulutusvaihtelu erottui myös suurimmassa osassa muiden mittauspisteiden tuloksia. Pumppaamoiden paineputkien jälkeen sijaitsevat mittarit 8022 ja 8021 näyttivät pääasiassa

vain vedenpinnan heilahtelun pumppujen käymisen seurauksena eikä kulutusvaihtelu näkynyt siten yhtä selvästi, jos ollenkaan. Vedenpinnan korkeudet viemäreissä vaihtelivat myös mittarin yläpuolisesta kulutuksesta riippuen. Jos mittarin yläpuolisessa verkostossa oli vähän kulutusta, pinnankorkeudet pysyivät normaalisti matalalla kuten mittauspisteessä 8022. Vastaavasti suuremman virtaaman takia toisissa putkissa pinnankorkeudet olivat normaalisti korkeammalla kuten esimerkiksi mittauspisteessä 8023. Jätevesiverkostossa sijaitsevan mittauspisteen 8022 mittaustulosten heilahteluun ja matalaan perustasoon vaikuttivat kulutuksen lisäksi todennäköisesti myös yläjuoksun pumppaamo JVP1050 ja kaivon jälkeinen melko tasainen putki, joka on myös halkaisijaltaan melko suuri, ja johon vettä pääsee keraantymään jonkin verran ennen sen virtaamista eteenpäin. (Liite 5, Liite 6)

Kuvassa 31 on esitetty esimerkki maankäytön ja mittarin sijainnin vaikutuksesta mittauspisteen pinnankorkeuksiin Munkkiniemessä. Mittari 8023 sijaitsi Munkkiniemen Munkinpuistossa ja mittari 8020 Munkkiniemen puistotien länsipäässä. Piikit pinnankorkeuksissa ovat sateiden aikaansaamia. Kuvasta näkyy selkeästi, miten puistoalueella ja verkoston alaosassa olevan mittauspisteen 8023 pinnankorkeus ei palaudu entiselle tasolle huhtikuun 23.-25. ja 28. päivien sateiden jälkeen yhtä nopeasti kuin asfaltin ja kivetyksen ympäröimässä pisteessä 8020. Näin käy todennäköisesti myös kesäkuun puolen välin sateiden jälkeen. Pelkän maaperästä imeytymisen ja vuotovesien vaikutukseksi tason muutos vaikuttaa kuitenkin melko suurelta ottaen huomioon, että mittauspisteet sijaitsevat melko vierekkäin. Voikin olla, että alajuoksulle on ilmestynyt jokin padottava tekijä.



Kuva 31. Maankäytön vaikutus mitattuihin pinnankorkeuksiin Munkkiniemessä.

Erityisesti sekavesiverkostossa sijaitsevien mittareiden mittaustuloksiin vaikuttaa lähtökohteisesti vedenkulutuksen lisäksi siis myös maankäyttö. Jos suoraan mittauskaivoon huleve-

det johtavalla valuma-alueella on paljon läpäisemätöntä pintaa, kaivoon ohjautuu sateen aletua nopeasti paljon hulevesiä. Mitatut pinnankorkeudet myös palautuvat melko nopeasti sadetta edeltävälle tasolle. Vastaavasti jos kaivon ympärillä sen hulevesien valuma-alueella on paljon kasvillisuutta ja läpäisevää pintaa, osa sadevedestä imeytyy maaperään eikä virtaa heti kaivoihin. Sateen jälkeen pinnankorkeus kaivossa palautuu tällöin hitaammin ennalleen, sillä vesi suotautuu maaperästä kaivoon ja verkostoon hitaammin. Lisäksi jos mittauspisteen yläpuolella on paljon verkostoa, näyttää sateen vaikutus näkyvän pisteessä pidempään kuin pienen valuma-alueen ja yläpuolisen verkoston omaavan mittarin kohdalla. Tämä johtuu siitä, että ensimmäisessä tapauksessa muusta verkostosta tulevat hulevedet ovat alemmassa pisteessä myöhemmin sateen alkamisen jälkeen kuin verkoston yläosassa olevassa pisteessä. (Kuva 31)

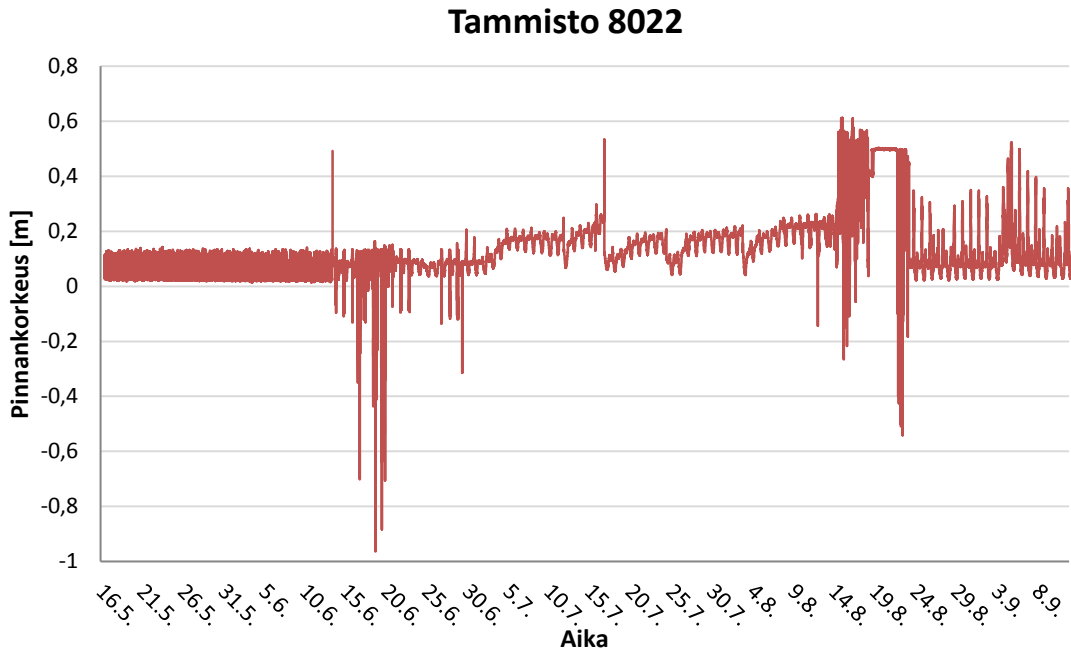
Munkkiniemen lisäksi myös Tammistossa kaksi mittareista (8021 ja 8024) jouduttiin siirtämään alkuperäiseltä paikaltaan, sillä kyseisten mittarien mittaustulokset olivat heikkoja. Ilmeisesti niiden alkuperäisissä mittauskaivoissa jätevetä virtasi liian vähän. Tämä voi pitää paikkansa, sillä mittarit sijaitsivat aluksi sellaisissa paikoissa, joissa yläpuolinen verkosto ei ollut kovin laaja.

Taulukossa 8 on esitetty Tammistossa mitatun tässä työssä tarkastellun datan laatu. Liitteessä 4 on esitetty Tammiston tarkat mittaustulokset mittarien 8021, 8022 ja 8024 osalta. Mittari 8023 ehdittiin siirtää ennen datan talteenottoa. Toisin kuin Munkkiniemessä, Tammistossa kaikki mittarit sijaitsivat jätevesiverkostossa eikä sekavesiverkostokohteita ollut.

Taulukko 8. Tammiston mittauspisteiden datan laatu.

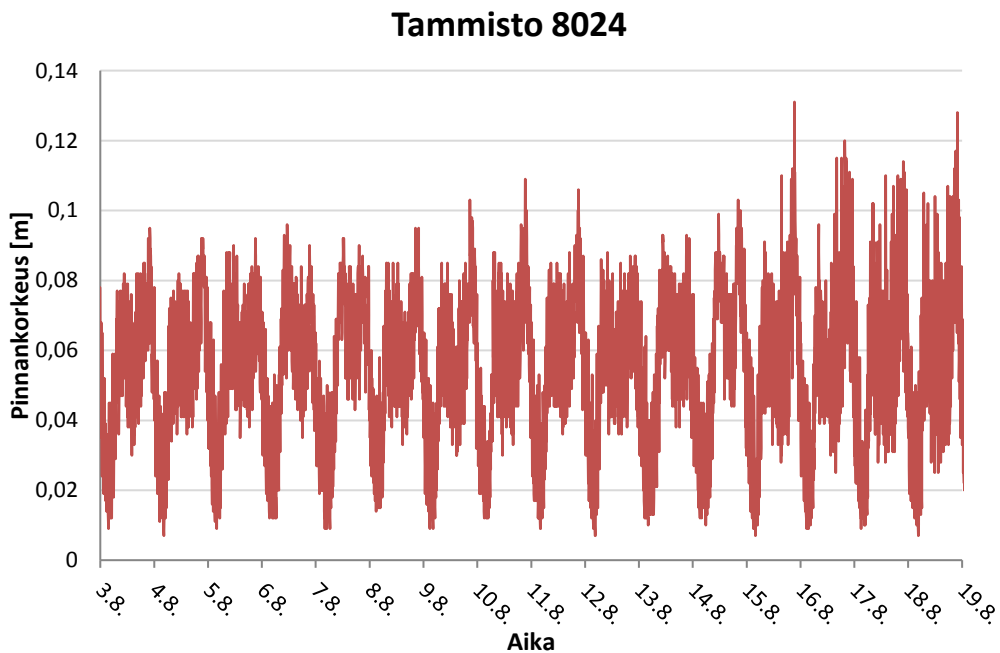
Mittari	Kaivo	Laatu
8021	JK60928	Melko luotettava: tasonnousuja
8022	JK55960	Osittain epäluotettavaa dataa: muun muassa mittaustuloksia, jotka < 0 m
8023	JK92743	Melko luotettava: matala taso ja pieni heilahteuväli
8024	JK87388	Luotettava

Mittarin 8022 antamat tulokset vaihtelevat suuresti (Kuva 32). Mittausvälinä on ollut koko ajan viisi minuuttia. Kuvasta 32 nähdään, että aluksi tulosten taso on vakaa mutta sitten tulokset heilahtelevat kesäkuun puolella välissä useasti alle nollan. Tämän jälkeen heinäkuun alussa yleinen taso nousee mutta vuorokausivaihtelu erottuu selkeämmin. Lisäksi mittausvälillä näkyy elokuun puolella välissä yksi muutaman päivän ajanjakso, jolloin tulokset nousevat selkeästi muuta aikaa korkeammalle ja välillä tipahtavat useasti taas alle nollan. Kaikki suuret heilahtelut ja tasonnousut mallissa osuvat sadetapahtumien kohdalle. Todennäköisesti alajuoksulla oleva pumppaamo padottaa sateiden aikaan mutta myös läheisellä joella saattaa olla vaikutusta. Jos mittauspiste on tarpeeksi lähellä jokea, joen pinnan noustessa vettä saattaa päätyä mittaускаivoon myös muiden vuotovesien lisäksi.



Kuva 32. Mittaustuloksia Tammiston mittauspisteessä 8022.

Sateiden vaikutus ei Tammistossa muissa mittauspisteissä näy yhtä selvästi kuin Munkkiniemessä, sillä verkosto on jätevesiverkostoa eikä kaivoihin lähtökohtaisesti pitäisi siis päästä hulevesiä. Normaalit vedenkulutuksen vaihtelut sen sijaan näkyvät mittaustuloksissa selkeästi (Kuva 33, Liite 4). Kuvassa 33 Tammiston mittauspisteessä 8024 mitatuissa pinnankorkeuksissa ei juuri esiinny sateista muttei myöskään yläjuoksun pumppaamosta aiheutuvaa heilahtelua. Vaikutusta saattaa olla yläpuolisella kerrostaloasutuksella, jonka vedet eivät kulje pumppaamoiden kautta.



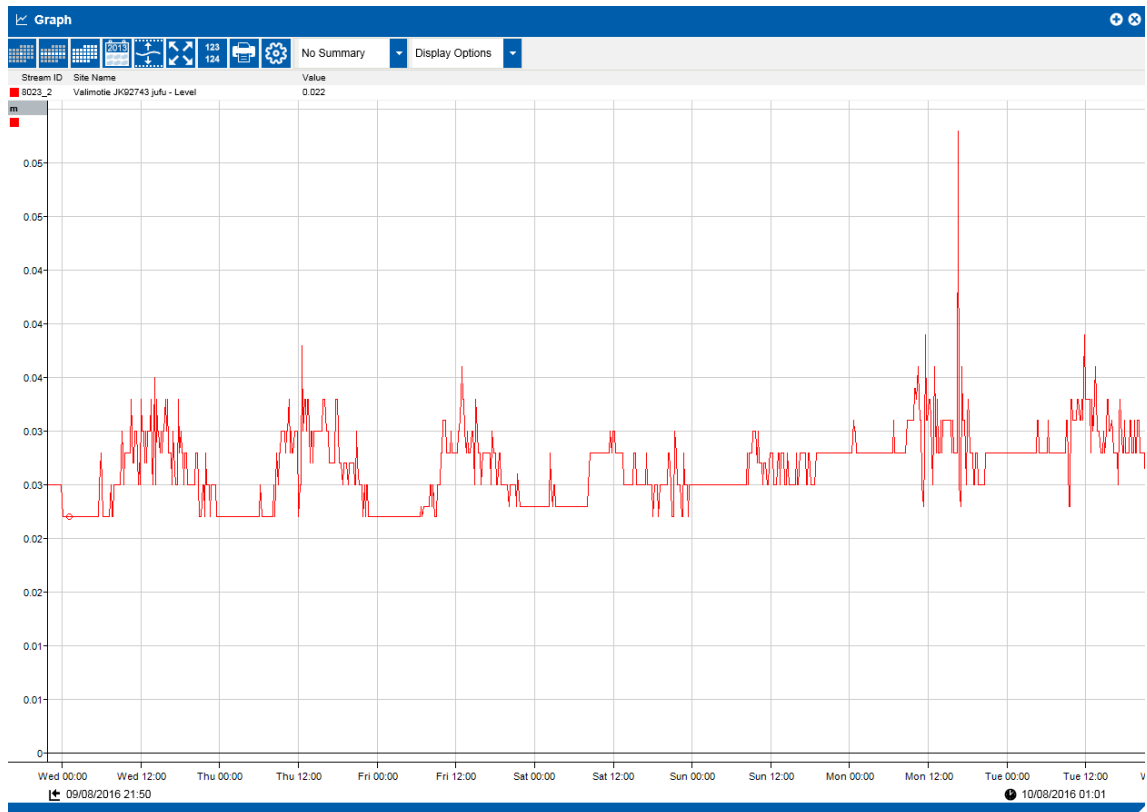
Kuva 33. Esimerkki mitatusta pinnankorkeudesta Tammiston mittauspisteessä 8024.

Vuotovesien vaikutus saattaa jätevesiverkostossa kuitenkin näkyä sateiden jälkeen piikkeinä pintamittustuloksessa tai erityisesti yleisenä tason nousuna. Myös yllättävän korkea tai matala perustaso voi johtua vuotovesistä. Vuotovesien takia jätevesiverkoston kohdalla maaperän ominaisuuksilla on todennäköisesti suurempi merkitys kuin sekavesiverkostossa. Kuvan 33 mukaan mitattu pinnankorkeustaso pysyy melko tasaisena huolimatta siitä, että kuvaajan aikavälillä on satanut kaikkina muina päivinä paitsi 5., 6., 11. ja 12. elokuuta. Pieni yleinen tasonnousu on kuitenkin havaittavissa 15. päivän kohdalla. Liitteen 4 mukaan taso ei palaudu tarkasteluajavälillä, vaan pinnankorkeudet heilahtelevat laajemmalla välillä kuin ennen elokuun puoltaväliä. Tämä saattaa johtua juuri vuotovesien pääsystä verkostoon.

Tammiston mittauspisteen 8021 mittaustulokset ovat myös kohtuullisen tasaiset mutta yleisiä tasonnousuja on useampi (Liite 4). Ne näyttävät osuvat sadetapahtumien kohdalle. Todennäköisesti verkostoon pääsee siis tässäkin mittauspisteessä jonkin verran vuotovesiä. Yläjuoksulla sijaitseva pumppaamo ei näytä häiritsevän mittaustuloksia kovin paljon johtuen varmasti osittain melko korkeasta, noin kymmenen senttimetrin perustasosta. Se taas voi johtua esimerkiksi läheisestä leipomosta, huoltoasemasta tai jopa vuotovesistä.

Jätevesiverkostossa olisi tärkeä löytää mittauspaikka, jossa virtaa tarpeeksi vettä mittaamista varten. Esimerkiksi nyt käytettyjen mittarien mittaustulos voi olla yhden senttimetrin liian suuri tai pieni, jolloin pienet vaihtelut eivät tule huomatuiksi. Jos mittauspaikan yläpuolinen kulutus on pientä, vedenpinnan korkeus jätevesiverkoston mittauskaivossa ei koskaan nouse kovin suureksi eikä pinnankorkeuden vaihtelu siten myöskään ole suurta (Kuva 34).

Kuvassa 34 näkyy esimerkki pinnankorkeuksien vaihtelusta Tammiston mittauspisteessä 8023. Alkuviikon perusvesipiikki voi olla peräisin alueella olevasta Halvan makeistehtaasta. Mittausväli on ollut 10 minuuttia. Kyseiseen mittauskaivoon tulee jätevettä erittäin pieneltä alueelta, mikä näkyy mitatuissa pinnankorkeuksissa, jotka vaihtelevat vain muutaman senttimetrin sisällä. Tällöin mittarin olisi erittäin tärkeä mitata täsmälleen oikein eli mittarin mitaustoleranssin pitäisi olla todella pieni, jotta tulokset eivät vääristy. Käytännössä tämä kuitenkin on mahdotonta. Myös sekavesiverkostossa perusvirtaaman pitäisi olla tarpeeksi suuri.



Kuva 34. Mitattuja pinnankorkeuksia Tammiston mittauspisteessä 8023.

Mittaustuloksiin vaikuttaa lisäksi mitä todennäköisimmin se, jos putkilinja ja kaivo ovat painuneita. Painuneissa verkoston kohdissa mittauskaivossa on todennäköisesti koko ajan enemmän vettä kuin malli pystyy kertomaan, jos painuma ei ole etukäteen tiedossa korkoineen. Tulosten luotettavuuden kannalta helpointa olisi, jos mittauskaivoon ei liity kuin yksi tuleva ja yksi lähtevä putki. Tällöin kaivon vedenpintaan ei vaikuta hulevesien lisäksi kuin yhdestä putkesta tulevat jätevedet.

8.1.2 Suosituksia mittauspaikoista

Tehtyjen mittausten perusteella mittarien sijainnin vaikutus mittaustuloksiin on ilmeinen. Hyvässä mittauspaikassa mittaustulokset ovat järkeviä verkostoon, vedenkulutukseen ja kaivon sateen seurauksena tuleviin hulevesiin nähden. Huonossa mittauspaikassa mittaustulokset ovat epärealistisia ja tulokset saattavat heilahdella äkillisesti ala- tai yläpuolisesta verkostosta johtuen. Normaalisti verkostossa esiintyy paikasta riippumatta koko ajan pieniä muutoksia vedenpinnan korkeudessa vedenkulutuksesta johtuen, mutta nämä heilahtelut ovat pieniä verrattuna esimerkiksi pumppaamon aiheuttamiin heilahduksiin.

Hyviä paikkoja pinnankorkeusmittareille ovat paikat, joissa kaivoon ei liity kuin lähtö- ja tuloputki, linjassa ei ole painumia eikä linja ole liian kalteva. Virtaaman olisi hyvä olla riittävä siten, että pinnankorkeuden suuruus on normaalisti enemmän kuin muutama senttimetri. Normaalin pinnankorkeuden vaihtelun pitäisi lisäksi olla ainakin yhtä senttimetriä suurempi.

Pumppaamo ei saisi olla liian lähellä ylä- tai alavirrassa, jotta sen vaikutus mittaustuloksiin olisi mahdollisimman pieni. Pumppaamolta lähtevän paineputken purkukaivoon olisi hyvä olla ainakin muutaman kaivovälin matka ja tähän osuuteen olisi myös hyvä liittyä muita putkia. Tässä työssä reilusti yli sadan metrin matka oli Munkkiniemen jätevesikaivolla JV99792 (mittauspiste 8022) liian vähän, sillä väliin ei liittynyt tarpeeksi muita linjoja. Sekavesikaivon SEK5122 (8021) kohdalla noin sadan metrin matka oli myös liian vähän. Tammistossa pumppaamot eivät aiheuttaneet vastaavaa häiriötä mittaustuloksiin. Pumppaamon vaikutus yläjuoksulla riippuu todennäköisesti hyvin paljon verkoston tasaisuudesta ja pumppaamon imusäiliön sallitusta maksimipinnankorkeudesta sekä pumppujen pumppaustehosta. Nämä kaikki vaikuttavat mahdolliseen padotukseen, joka aiheuttaa heilahtelua tarpeeksi lähellä ennen pumppaamoja sijaitsevan mittarin tuloksiin. Hyvä etäisyys riippuu täysin verkoston ominaisuuksista.

Mittareiden sijoittelussa olisi tärkeä huomioida myös verkoston ulkopuoliset häiriötekijät. Esimerkiksi liikenteen tai rakennustyömaiden aiheuttama mittareiden ja siten mittaustulosten tärähtely tulisi pyrkiä minimoimaan.

8.2 Käytetyn sadedatan vaikutus mallinnustuloksiin

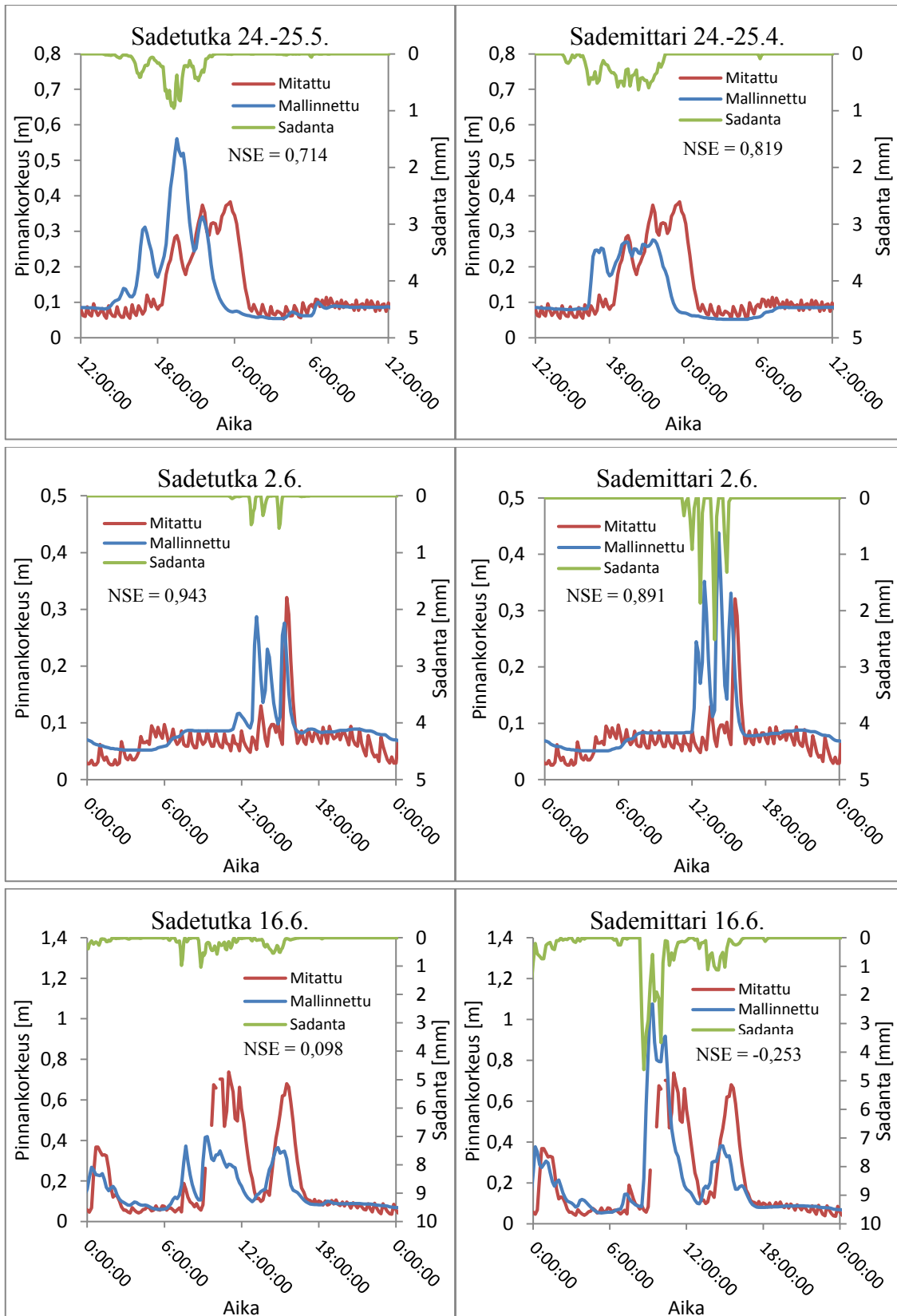
Mallin antamia tuloksia arvioitiin ennen kalibrointia käyttämällä sadedatana sekä Kaisaniemestä mitattua dataa että sovitettua sadetutkadataa. Malli ajettiin ennen kalibrointia koko mittausjakson ja muutaman eripituisen ja erisuuruisen sadetapahtuman osalta kummallakin datatyypillä.

Mallinnuksen perusteella erityisesti sadetapahtumat, jolloin sataa nopeasti paljon tai joiden sademäärä kasvaa loppua kohti, tuottivat SWMM:lle vaikeuksia mallintaa pinnankorkeuksia oikein. Tällöin mallinnettu pinnankorkeus nousi herkästi liian suureksi mitattuun korkeuteen nähden. Pienempi ja tasainen sademäärä antoi oikeamman mallinnustuloksen. Tähän ei vaikuttanut, onko sade havaittu tutkalla vai mittarilla. Sateen vaikutus näkyi mallinnustuloksissa heti. Mittaustuloksissa sateen vaikutusnopeus riippui mittarista. Sateen nopea vaikutus mallissa saattaa johtua siitä, että mallinnuksessa ei käytetty yksikkövaluntakäyrämenetelmää, joka saattaisi mahdollistaa paremmin vesien viivästyttämisen.

Ajettaessa malli käyttäen sadetutkadataa mallin antamat tulokset paranivat suurimmaksi osaksi yksittäisen sademittarin antamiin sadantoihin verrattuna. Tämä johtui todennäköisesti siitä, että sadetutkalla mitatut sademäärät olivat suurimmaksi osaksi pienempiä ja jakautuivat tasaisemmin kuin sademittarilla mitatut. Sadetutkadataa käytettäessä mallin tuottamat pinnankorkeushuiput pääasiassa pienenevät aiheuttaen sen, että sademittarin datalla mallinnetut liian korkeat huiput pienenevät hyvälle tasolle mutta liian matalat huiput pienenevät usein entisestään. Kummallakin datatyypillä malli kuitenkin yliarvioi erityisesti kovien mitattujen sateiden aikaansaamia pinnankorkeuksia. Kumpaakin dataa käytettäessä tuloksissa on nähtävissä vaihe-ero mitattujen ja mallinnettujen pinnankorkeuksien välillä. Tämä käy ilmi kuvasta 35. Pidempiaikaisen, melko tasaisen ja sademäärältään melko suuren sateen kohdalla vaihe-ero näyttää olevan pientä sadetta suurempi. Kymmenien minuuttien vaihe-

erot hankaloittavat kalibroitua, sillä parametrien muutoksella eroa on vaikea saada korjattua. Vaihe-ero saattaa johtua esimerkiksi mittarin aikavirheestä tai jätevesivirtaaman epävarmuuksista.

Kuvassa 35 on esitetty esimerkkejä sekä sadetutkalla että -mittarilla mitattujen sademäärien vaikutuksesta mallinnettuihin pinnankorkeuksiin Munkkiniemen mittauspisteessä 8023. Esimerkkiaikavälit valittiin pidemmistä mallinnusaikaväleistä. Jokainen kuvapari edustaa samalle ajanhetkelle tehtyä mallinnusta. Vasemmassa sarakkeessa on tilanne sadetutkan ja oikeassa sademittarin osalta. NSE-luku kuvaa mallinnuksen hyvyyttä kuvissa näkyviltä aikaväleiltä parhaan saavutettavissa olevan arvon ollessa yksi. NSE-luvut ovat kuvan tilanteissa yleisesti melko hyviä, mikä saattaa olla seurausta lyhyestä mallinnusaikavälistä tai positiivisesti mallinnustulokseen vaikuttavista kalibroimattoman verkoston virheistä.



Kuva 35. Esimerkkejä mitatun sateen vaikutuksesta mallinnustulokseen Munkkiniemen pisteessä 8023.

Edellä mainitut ja kuvassa 35 näkyvät tasoerot mallinnetuissa pinnankorkeuksissa saattavat johtua juuri siitä, että tutka aliarvio kovia sateita. Vaihtoehtoisesti Munkkiniemessä on oikeasti satanut vähemmän kuin Kaisaniemen mittauspisteessä, mikä on todennäköisempää. Käytetty sadetutkadata on sovitettua, jolloin sitä on verrattu läheisten alueiden mittauspisteissä havaittuihin sademääriin, ja jolloin sen pitäisi olla huomattavan luotettavaa.

Sadedatan oikeellisuus onkin erittäin tärkeä tekijä erityisesti sekavesiviemäriverkoston mallinnuksessa, sillä sateiden aikaan huomattava osa verkostossa virtaavasta vedestä voi olla hulevettä. Mallinnuksessa on kuitenkin huomioitava, että sekä sadetutka- että sademittari-data sisältävät todennäköisesti virheitä. Todellinen kuva Munkkiniemen sademääristä olisi saatu, jos alueella olisi ollut yksi tai useampi oma sademittari. Alle neliökilometrin kokoiselle alueelle riittää yksi sademittari, muuten vaaditaan yksi mittari neliökilometriä kohden. Suurempaa aluetta mallinnettaessa sadetutkadata on todennäköisesti hyvä vaihtoehto, sillä useampaa mittaria on hankala asentaa ja tarkkailla. Lisäksi tutka ottaa hyvin huomioon sateen paikallisen vaihtelun.

Sadedatojen vertailun perusteella kalibrointiin valittiin käytettäväksi sadetutkadata, sillä sen avulla tehty mallinnus vastasi loppujen lopuksi kokonaisuudessaan hieman paremmin mitattuja pinnankorkeustuloksia. NSE- ja SSE-lukujen välinen ero ei ollut kuitenkaan kovin suuri, pienimmillään sadasosia verrattaessa mallinnus- ja mittaustuloksia eri sadedatalla kaikkien mittauskaivojen kohdalla.

8.3 Kalibrointi ja validointi

Malli kalibroitiin muuttamalla valittujen parametrien arvoja ja validoitiin sen jälkeen kalibroituksen parametriarvojen toimivuuden arvioimiseksi.

8.3.1 Kalibrointi

Mallin kalibrointi suoritettiin aikavälille 13.4. – 21.5.2016. Vertailutiedostona käytettiin kaivossa SEK4438 eli mittauspisteessä 8020 tehtyjä pinnankorkeusmittauksia. Kyseisen pisteen mitattujen pinnankorkeuksien yleinen taso oli vain hieman matalampi verrattuna ennen kalibrointia mallinnettuihin pinnankorkeuksiin. Kalibrointiprosessi PEST:ssä oli kuitenkin yllättäen erittäin hidas johtuen ilmeisesti siitä, että parametrien muutoksilla ei voitu kompensoida mitatun ja mallinnetun pinnankorkeuden eroja. Kalibrointi keskittyi todennäköisesti liikaa tämän eron pienentämiseen, vaikka sen pitäisi keskittyä eniten sateesta aiheutuviin pinnankorkeuden muutoksiin. Optimointikierroksia tarvittiin myös normaalia enemmän, ja ne olivat huomattavasti normaalia hitaampia. Herkimmät parametrit pysyivät samoina viimeisimmissä hyväksikäytetyissä optimointikierroksissa, eivätkä parametrien arvot enää muuttuneet merkittävästi. Tämän takia mallinnukseen ja validointiin valittiin ennen kalibroinnin loppumista saadut parhaat parametriarvot, jotka on esitetty taulukossa 9. Parametrit ovat tässä tapauksessa vain kaivolle SEK4438 sovitettuja ja todennäköisesti muutenkin mallinnusaluekohtaiset maanpeitteestä ja sen osuuksista riippuen.

Taulukko 9. Kalibroidut parametrit.

Parametri	Pinta	Minimi	Maksimi	Lähtöarvo	Kalibroitu arvo
Manningin kerroin ($s/m^{1/3}$)	Asfaltti	0,010 ^{a)}	0,015 ^{b)}	0,011 ^{a)}	0,014
	Katot	0,001 ^{c)}	0,014 ^{c)}	0,012 ^{c)}	0,002
	Hiekka/sora	0,01 ^{a)}	0,03 ^{a)}	0,02 ^{a)}	0,02
	Kivetyks	0,010 ^{c)}	0,020 ^{c)}	0,016	0,020
	Kasvillisuus	0,1 ^{c)}	0,8 ^{c)}	0,3 ^{b)}	0,33
Painannesäilyntä (mm)	Asfaltti	0,3	2,54 ^{c)}	0,4 ^{c)}	0,37
	Katot	0,01 ^{c)}	2,54 ^{c)}	0,8	1,08
	Hiekka/sora	0,3 ^{c)}	2,54 ^{c)}	1,5	1,74
	Kivetyks	0,3 ^{c)}	2,54 ^{c)}	0,7	0,56
	Kasvillisuus	2,5 ^{c)}	7,6 ^{c)}	6,0 ^{b)}	6,36
Läpäisemättömyys (%)	Asfaltti	80 ^{c)}	100 ^{c)}	95	93
	Hiekka/sora	30 ^{c)}	70 ^{c)}	33 ^{c)}	34
	Kivetyks	80 ^{c)}	100 ^{c)}	85	82

^{a)} Engman1986; ^{b)} Guan et al. (2015); ^{c)} Krebs et al. (2014); ^{d)} Corvallis Forestry Research Community 2006; ^{e)} Krebs et al. (2013)

PEST tuotti kalibroiduille parametreille herkkyysluvut, joiden perusteella selvisi kalibrointitulokseen eniten vaikuttavat parametrit eli tässä tapauksessa asfaltin, kattojen, hiekan/soran ja kivetyksen Manningin kertoimet. Herkkyysanalyysin mukaan vähiten herkkiä parametreja tässä työssä olivat pintojen läpäisemättömyys sekä kasvillisuuden painannesäilyntä. Herkkyysanalyysin tulokset eroavat Krebs et al. (2013) tutkimuksesta, jossa herkkimmät parametrit olivat läpäisemättömän pinnan painannesäilyntä ja putkiston Manningin kerroin. Tässä työssä ei kuitenkaan kalibroitu Manningin kertoimia putkistolle, vaan niiden oletettiin olevan HSY:ltä saatujen lähtötietojen mukaiset. Lisäksi Krebs et al. (2013) tutkimuksessa käytetty valuma-alue eroaa maankäytöllisesti hieman tämän tutkimuksen Munkkiniemen alueesta, joka sisältää enemmän kasvillisuutta ja läpäisevää pintaa. Muissa tutkimuksissa on saatu herkkimpien parametrien osalta vaihtelevia tuloksia (Temprano et al. 2006, Barco et al. 2008, Kleidorfer et al. 2008, Yu et al. 2014), joten voidaan päätellä, että parametrien merkitys mallinnustulokseen vaihtelee ainakin hieman tutkimusalueittain ja esimerkiksi maanpeitteestä johtuen.

Kalibroitujen parametrien arvot olivat kuitenkin monelta osin lähellä Krebs et al. (2014) tutkimuksen vähemmän tiiviisti rakennettujen alueiden kalibroitujen parametrien arvoja. Hiekan/soran, kivetyksen ja kasvillisuuden kalibroidut Manningin kertoimet, kivetyksen painannesäilyntä sekä kaikki läpäisemättömyydet vastasivat hyvin Krebs et al. (2014) saamia tuloksia. Usein tässä tutkimuksessa kalibroitu arvo oli Krebs et al. (2014) tutkimuksen vähemmän tiiviisti rakennettujen alueiden arvojen välissä. Painannesäilyntän muut arvot puolestaan eivät vastanneet kyseisen tutkimuksen tuloksia yhtä hyvin. Todennäköisesti eri tutkimusten välisten tutkimusalueiden erojen lisäksi sadetapahtumien eroavaisuudet vaikuttavat saatuun tulokseen. Lisäksi mallinnetulla verkostotyypillä saattaa olla vaikutusta. Pelkän

hulevesiverkon mallinnus saattaa antaa erilaisen tuloksen parametreille verrattuna seka- tai jätevesiverkoston. Tärkeä tekijä on myös kalibroinnissa käytettävän vertailutiedoston datan laatu. Kuten aikaisemmin mainittiin, nyt vertailutiedostossa käytetyt pinnankorkeudet olivat yleisesti hieman mallinnettuja pinnankorkeuksia pienempiä, jolloin kalibroinnin oli todennäköisesti vaikeampi löytää oikeita parametrien arvoja, kun se keskittyi myös mallinnetun perustason sovittamiseen.

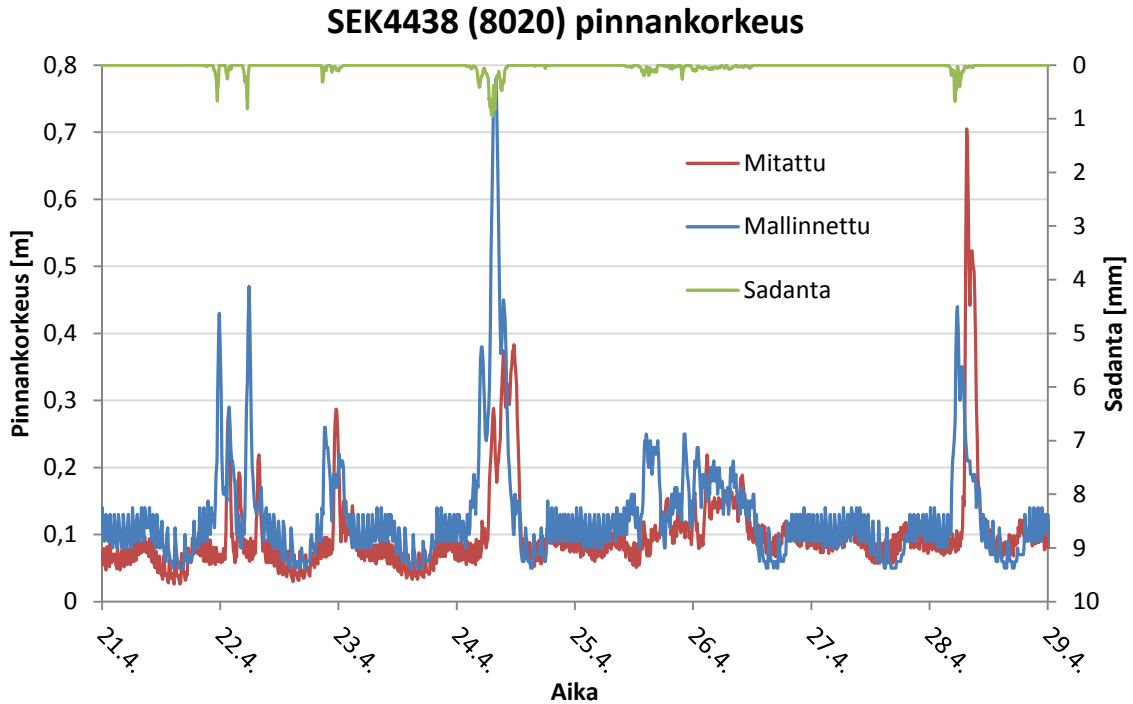
Kalibroinnin seurauksena NSE- ja SSE-luvut paranivat osalla kaivoista, mutta osalla ne puolestaan huononivat (Taulukko 10). Taulukossa on esitetty hyvyysluvut kaikille mittauskaivoille, myös niille, joiden alkuperäistä mittausdataa muokattiin. On muistettava, että mallin on mahdoton edes tuottaa mittauksissa havaittuja epärealistisia, kuten negatiivisia arvoja eikä kalibrointi voi korjata tällaisia virheitä. NSE-lukua laskettaessa paras tulos olisi arvo 1 ja SSE:lle arvo 0. Mallin voidaan sanoa toimivan hyväksyttävästi, jos NSE-luvun arvo on yhden ja nollan välillä. Minkään kaivon kohdalla tulokset eivät ole riittävän hyviä kalibroinnin jälkeen hyvyyslukuja tarkastellessa.

Kaivojen SEK5122 (mittauspiste 8021), JK99792 (8022) ja JK117906 (8024) kohdalla mitaustuloksia ei ollut saatavilla koko tarkasteluajavälillä, joten luvut laskettiin vain mittausajaväliltä. Kaivon SEK5122 hyvyysluvut pysyivät suurin piirtein samoina, ja kyseisellä kaivolla on paras tulos hyvyyslukujen perusteella. Sen mittaus- ja mallinnustuloksiin vaikuttaa suurelta osin Munkkinimenrannan jätevedenpumppaamo JVP1053, sillä kaivo sijaitsee noin 100 metriä pumppaamolta lähtevän paineputken purkukaivon jälkeen. Myös kaivon JK99792 mallinnustulos on muihin verrattuna hyvä, vaikka se kalibroinnissa hieman huononikin. Kaivon SEK4438 (8020) mallinnustulos on hyvä, kun otetaan huomioon, että kaivossa pinnankorkeudet vaihtelevat paljon laajemmalla välillä kuin kaivoissa SEK5122 ja JK99792.

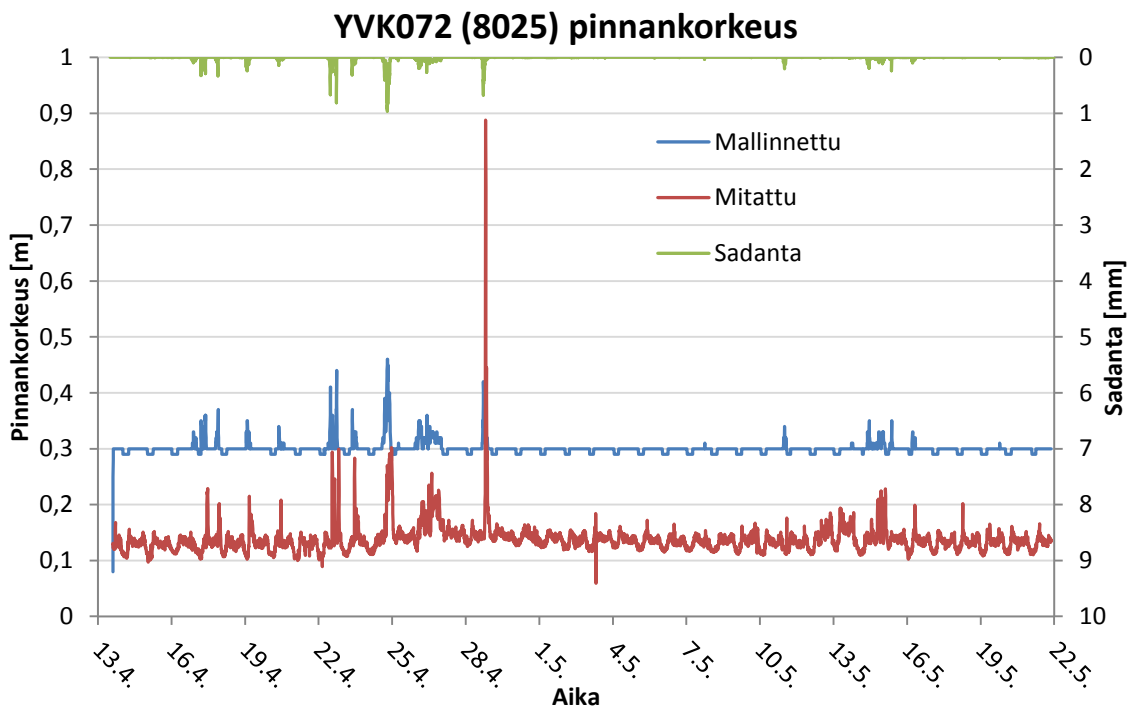
Taulukko 10. Mittauskaivojen hyvyysluvut ennen kalibrointia ja sen jälkeen.

Kaivo	Mittauspiste	Ennen kalibrointia		Kalibroinnin jälkeen	
		NSE	SSE	NSE	SSE
SEK4488	8023	-3,168	111,96	-3,167	111,95
SEK4438	8020	-1,142	16,13	-1,091	15,92
SEK5122	8021	-0,343	0,81	-0,341	0,81
YVK072	8025	-34,901	150,82	-34,65	149,78
JK99792	8022	-0,824	0,84	-0,882	0,87
JK117906	8024	-1,242	19,71	-1,269	19,95

Kuvassa 36 on esitetty kaivon SEK4438 (8020) pinnankorkeudet mitattuna sekä kalibroinnin jälkeen kalibrointiaikavälin alkuosassa. Kuvassa 37 puolestaan näkyy huonompi mallinnustulos eli pinnankorkeus kaivossa YVK072 (8025) koko kalibrointiaikavälillä. Koko kalibrointiaikavälin mallinnustulokset pinnankorkeuden ja kumulatiivisen pinnankorkeuden osalta kaikissa mittauskaivoissa on esitetty liitteessä 5.



Kuva 36. Kaivon SEK4438 pinnankorkeudet kalibrointiaikavälin alkuosassa.



Kuva 37. Kaivon YVK072 pinnankorkeudet kalibrointiaikavälillä.

Kuvien 36 ja 37 perusteella malli toimii kaivon SEK4338 (8020) kohdalla melko hyvin ja kaivon YVK072 (8025) kohdalla perustason kannalta huonosti. Perusvirtaaman tason mallinnustulos on kaivossa SEK4438 melko hyvällä tasolla, mutta pieni tasoero saattaa olla seurausta virheellisistä vedenkulutustiedoista tai verkoston vuotavuudesta. Malli sekä yli-

aliarvioi sateesta johtuvaa vedenpinnan nousua kaivoissa. Tähän saattaa olla syynä sadedatan virheellisyys eli väärä ajoitus tai sademäärä. Myös mittaustulosten ajassa ja vedenkulutustiedoissa voi olla virheitä. Kaivon YVK072 perustason tasaisuus johtuu todennäköisesti mittaus- tai mallinnusvirheestä, ja sateen aikaansaamat piikit pumppaamon JVP1053 padotuksesta verkostoon sateen aikana.

Liitteestä 5 selviää, että myös muiden kaivojen osalta mallinnustulokset vaihtelevat. Malli tuottaa kaivoille sekä liian suuria että pieniä pinnankorkeuksia mittauspaikasta riippuen. Myös sateen aikaansaamien pinnankorkeuspiikkien mallinnustulokset vaihtelevat liian pienistä liian suuriin. Sadedatan virheellisyyden lisäksi tähän voivat vaikuttaa mallinnetun maanpeitteen ja sen ominaisuuksien eroaminen todellisuudesta ja siten esimerkiksi odotettua suurempi hulevesivirtaama, kun asfaltti ei pysty pidättämään tarpeeksi vettä painannesäilytyksessä tai vesi ei pääse imeytymään maaperään. Myös verkoston mahdollisilla mallinnusvirheillä saattaa olla vaikutusta. (Liite 5)

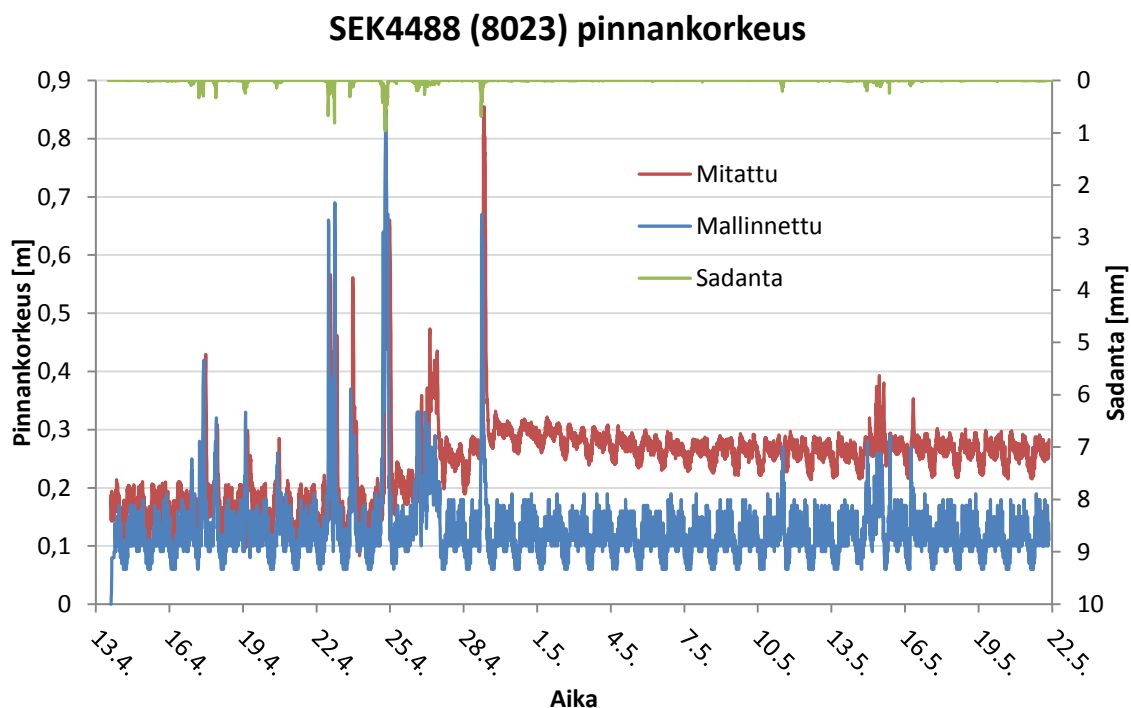
Liitteestä 5 selviää myös, että mallinnuksen perustasot ovat suurin piirtein kohdallaan suurimmassa osassa kaivoista. Kaivossa JK117906 (mittauspiste 8024) malli aliarvioi perustasoja jonkin verran ja kaivossa YVK072 (8025) puolestaan yliarvioi huomattavasti. Kaivon JK117906 tilanne saattaa johtua verkoston ja läheisen pumppaamon mallinnuksesta ja toiminnasta. Mittaustulosten perusteella kaivon JK117906 tulevan putkiosuuden pitäisi aina välillä täytyä mutta mallinnustulosten perusteella niin ei käy. Malli ei näytä pystyvän seuraamaan kaikkia mitattuja äkillisiä pinnankorkeuden vaihteluita, jotka johtuvat esimerkiksi ennen tai jälkeen kaivon sijaitsevasta pumppaamosta. Näin on kaivojen JK117906, JK99792 (8022) ja SEK5122 (8021) kohdalla. Tähän saattaa olla vaikutusta mallinnus- ja raportointiaikavälillä tai sillä, että mallinnuksessa käytetyt pumppaamotiedot eivät täysin vastaa todellisuutta. Lyhyt mallinnus- ja raportointiaikaväli tuottaa todennäköisemmin tarkempaa pumpaustietoa. Vähäiset, muutamien senttimetrien erot mallinnetun ja mitatun perustason välillä kertovat lähinnä todennäköisestä mittausvirheestä, virheellisestä arvioidusta jätevesivirtaamasta tai mahdollisesti myös verkoston vuotavuudesta. (Liite 5)

Vaihe-ero mitattujen ja mallinnettujen pinnankorkeuksien välillä näkyy kaikkien kaivojen tuloksissa siten, että mallinnetut pinnankorkeushuiput esiintyvät pääsääntöisesti mitattuja aikaisemmin. Vaihe-eron suuruus näyttää riippuvan jonkin verran kaivosta, sillä kaivolla YVK072 (8025) vaihe-erot ovat hieman pienempiä kuin esimerkiksi kaivolla SEK4488 (8023). Tähän ei näytä vaikuttavan se, että kaivon SEK4488 virtaavat koko tarkastellun alueen läpi tulevat vedet, jolloin voisi olettaa vaihe-eron olevan pienempi kyseisessä kaivossa, kun virtaushuippu esiintyy myöhemmin. Vaihe-erot saattavat johtua ainakin sadedatan aikavirheestä tai vastaavasti mittarien tai vedenkulutuskäyrien aikavirheestä. (Liite 5)

Liitteen 5 kuvaajien perustella myös kumulatiivisen pinnankorkeuden mallinnustulokset vaihtelevat kaivosta riippuen. Kaikissa muissa kaivoissa paitsi kaivoissa SEK4438 (8020) ja YVK072 (8025) mitattu kumulatiivinen pinnankorkeus on mallinnettua suurempi. Kaivon YVK072 kohdalla mallinnettu kumulatiivinen pinnankorkeus on noin kaksi kertaa mitatun

suuruinen. Kaivolla SEK4488 mallinnettu kumulatiivinen pinnankorkeus jää puoleen mitattusta, ja kaivolla JK117906 (8024) mallinnettu kumulatiivinen pinnankorkeus on noin kymmenesosan mitattusta. Paras mallinnustulos on kaivon SEK4438 kohdalla, sillä ero kumulatiivisten pinnankorkeuksien välillä on lopussa suhteessa vähän. Kaikkien kaivojen kohdalla ero kasvaa tasaisesti koko mallinnusaikavälin ajan. Vaikka malli siis yliarvioisikin saateesta aiheutuvia pinnankorkeushuippuja, jää mallinnettu kumulatiivinen pinnankorkeus silti alle mitatun tason.

Kalibrointi ei paranna kaivon SEK4488 (8023) mallinnustulosta siltä osin, että huhtikuun lopussa mitattu yleisen pinnankorkeustason nousu saataisiin mallinnettua (Kuva 38). Mitattu tasonnousu saattaa johtua maaperästä sateiden jälkeen suotautuvasta vedestä, mutta pelkäänsä siitä aiheutuvaksi tasonnousu on melko suuri ja varsinkin hidas palautumaan. Toinen mahdollinen syy voisi olla mallinnusalueen ulkopuolella kaivon alavirrassa esiintyvä padotus tuntemattomasta syystä.



Kuva 38. Pinnankorkeudet kaivossa SEK4488.

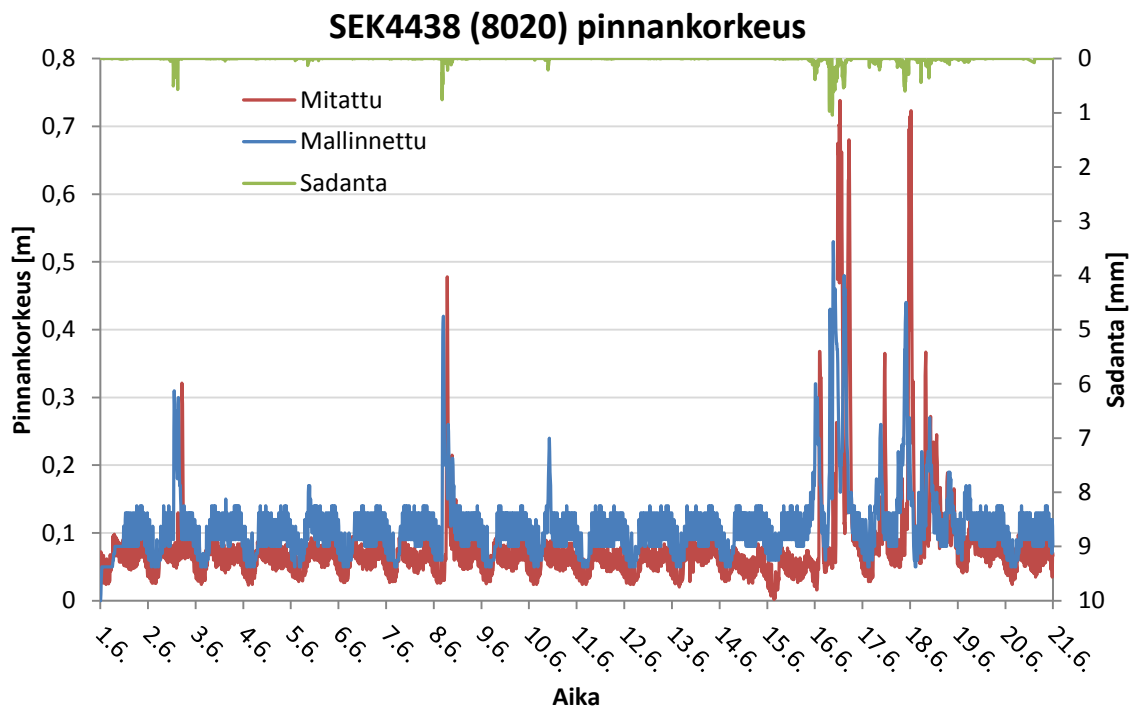
8.3.2 Validointi

Validointi suoritettiin aikavälillä 1.6. – 21.6.2016. Mittauskaivojen hyvyysluvat tällä aikavälillä on esitetty taulukossa 11. Kaivojen JK99792 (mittauspiste 8022) ja JK117906 (8024) kohdalta mittautuloksia oli vain 13.6. asti, joten hyvyysluvat on laskettu aikavälillä 1.6. – 13.6.2016. NSE-lukujen perusteella paras tulos on kaivolla SEK4438 (8020), sillä NSE-luvun arvo on lähinnä arvoa yksi. SSE-lukujen perusteella paras tulos on kuitenkin kaivolla JK99792 (8022), sillä luku on lähinnä arvoa nolla. Kaivojen SEK4438, YVK072 (8025) ja JK117906 NSE-luvut ja kaivojen SEK4488 (8023) ja YVK072 SSE-luvut ovat paremmat kuin kalibrointi-aikavälillä. Yleisesti hyvyyslukujen perusteella mallinnustulos validointiaikavälillä ei kuitenkaan ole riittävän hyvä millään kaivolla.

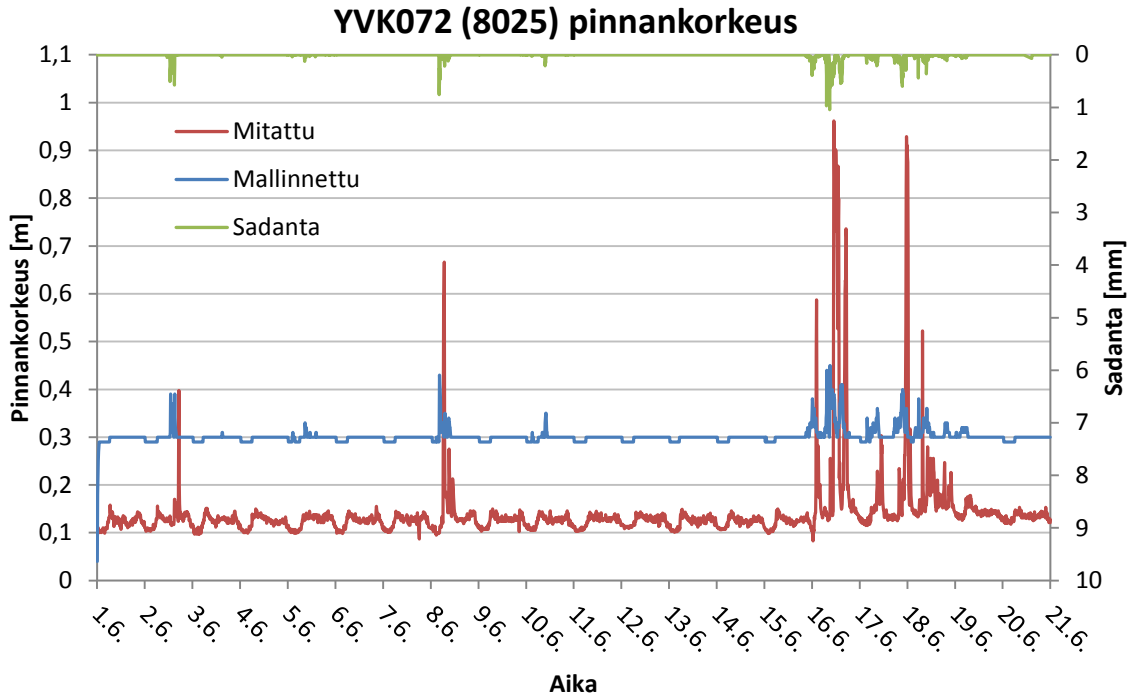
Taulukko 11. Mittauskaivojen hyvyysluvut validointiaikavälillä.

Kaivo	Mittauspiste	NSE	SSE
SEK4488	8023	-4,528	92,94
SEK4438	8020	-0,269	18,30
SEK5122	8021	-0,415	4,53
YVK072	8025	-4,603	90,66
JK99792	8022	-0,869	2,06
JK117906	8024	-0,784	37,67

Kaivon SEK4438 (mittauspiste 8020) pinnankorkeudet validointiaikavälillä on esitetty kuvassa 39 ja huonomman mallinnustuloksen antaneen kaivon YVK072 (8025) pinnankorkeudet kuvassa 40. Kaikkien kaivojen tilanne on esitetty liitteessä 6 myös kumulatiivisen pinnankorkeuden osalta. Kuvien 39 ja 40 perusteella malli aliarvioi pinnankorkeuksia erityisesti voimakkaan sateen aikana. Vaihe-ero mitattujen ja mallinnettujen pinnankorkeuspiikkien välillä vaihtelee taas sadetapahtumasta riippuen. Perusvirtaaman mallinnustulos kaivossa SEK4438 on kohtalaisen hyvä, vaikka malli hieman yliarvioikin sitä. Kaivossa YVK072 perustaso taas on edelleen selvästi liian suuri, ja sade aikaansaa edelleen piikkejä pinnankorkeuteen, kun Munkkiniemenrannan jätevedenpumppaamo JVP1053 padottaa yläpuoliseen verkostoon.



Kuva 39. Kaivon SEK4438 pinnankorkeudet validointiaikavälillä.



Kuva 40. Kaivon YVK072 pinnankorkeudet validointiaikavälillä.

Kaikkien kaivojen osalta mallinnustulos vaihtelee validoinnissakin. Valmiiksi väärät vedenpinnan perustasot eivät muutu validoinnissa, eikä malli pysty tarkasti seuramaan mitattujen pinnankorkeuksien pumppaamoista johtuvaa nopeaa edestakaista vaihtelua. Tähän saattaa olla vaikutusta sekä mittaus- että mallinnusaikavälillä. Kaivon SEK5122 (8021) kohdalla mallinnettu perustaso on hyvä. Malli tuottaa kaivoille kalibrointiaikavälin tapaan sekä liian suuria että liian pieniä sateesta aiheutuvia pinnankorkeuksia. Edelleen mitattujen ja mallinnettujen pinnankorkeuksien välillä esiintyy vaihe-eroja. (Liite 6)

Liitteen 6 kuvaajien perusteella kumulatiivisen pinnankorkeuden mallinnustulokset riippuvat kaivosta kuten kalibroinnissakin. Kaivojen SEK5122 (8021) ja JK99792 (8022) mallinnettu ja mitattu kumulatiivinen pinnankorkeus ovat erittäin lähellä toisiaan. Sen sijaan kaivoilla SEK4488 (8023) ja JK117906 (8024) mallinnettu kumulatiivinen pinnankorkeus jää jopa alle puoleen mitatusta, kun taas kaivolla YVK072 (8025) mallinnettu on huomattavasti mitattua suurempi. Kaivojen SEK4488 ja JK117906 tulokseen vaikuttaa se, että mallinnettu perustaso on koko ajan selkeästi mitattua pienempi. Tilanne on päinvastoin kaivon YVK072 kohdalla. Tähän taas on todennäköisesti vaikutusta sekä virheellisillä lähtötiedoilla että mittaus- ja mallinnavirheillä. Yleisesti erot mitattujen ja mallinnettujen kumulatiivisten pinnankorkeuksien välillä kasvavat melko tasaisesti koko validointiaikavälin ajan. (Liite 6)

Kalibroinnin ja validoinnin perusteella lähtötiedoissa kuten esimerkiksi sademäärissä, sateen ajankohdissa, vedenkulutustiedoissa ja verkoston tiedoissa mahdollisesti esiintyviä virheitä ja niistä johtuvia mallinnavirheitä ei voida korjata kalibroinnilla ja parametrien arvoja säätämällä. Kleidorfer et al. (2008) havaitsivat tutkimuksessaan vain sadedatan systemaattisten virheiden vaikuttavan suuresti mallin parametreihin ja siten kalibrointitulokseen. Tässä

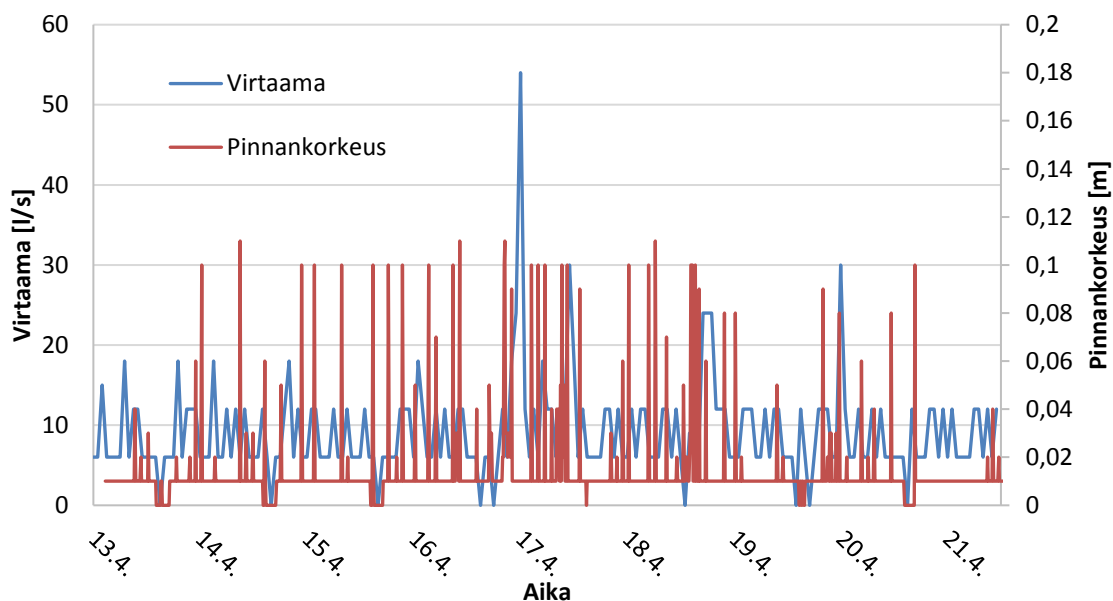
työssä tehdyssä tutkimuksessa on kuitenkin selkeästi havaittavissa, että esimerkiksi jo ennen kalibrointia mallinnetut epärealistiset pinnankorkeudet tietyissä kaivoissa ovat liian virheellisiä korjattaviksi kalibroinnilla ja parametrien muutoksilla. Sadedatan mahdollisesti sisältämät määrä- ja aikavirheet ovat myös kalibroinnin kannalta erityisen haasteellisia, sillä ne vaikuttavat suuresti parametrien arvoihin. Tämä johtopäätös sadedatan oikeellisuuden tärkeydestä täsmää myös Krebs et al. (2013) päätelmään, jonka mukaan laadukas sadantadata on edellytyksenä urbaanin hydrologisen mallin menestyksekkäälle kalibroinnille ja validoinnille. Toisaalta vaihe-erojen syntymisen syynä voivat olla myös mittausvirheet tai se, että vesi ei pidäty mallissa tarpeeksi pitkään. Kuitenkin kaikkien lähtö- ja mittaustietojen olisi hyvä olla mahdollisimman oikein, jotta kalibrointitulos olisi mahdollisimman luotettava.

8.4 Virtaaman ja pinnankorkeuden yhteys

Virtaaman ja pinnankorkeuden yhteyttä tarkasteltiin mallinnettujen virtaamien ja pinnankorkeuksien osalta kaivossa SEK4438 (8020). Lisäksi Munkkiniemenrannan jätevedenpumppaamolta (JVP1053) saatiin laskettuja lähtevän virtaaman arvoja, joita verrattiin pumppaamon paineputken purkukaivosta SEK5122 (8021) mitattuihin pinnankorkeuksiin. Mitattujen pinnankorkeuksien yhteyttä kaivoista mitattuun virtaamaan ei tutkittu datan puuttumisesta johtuen.

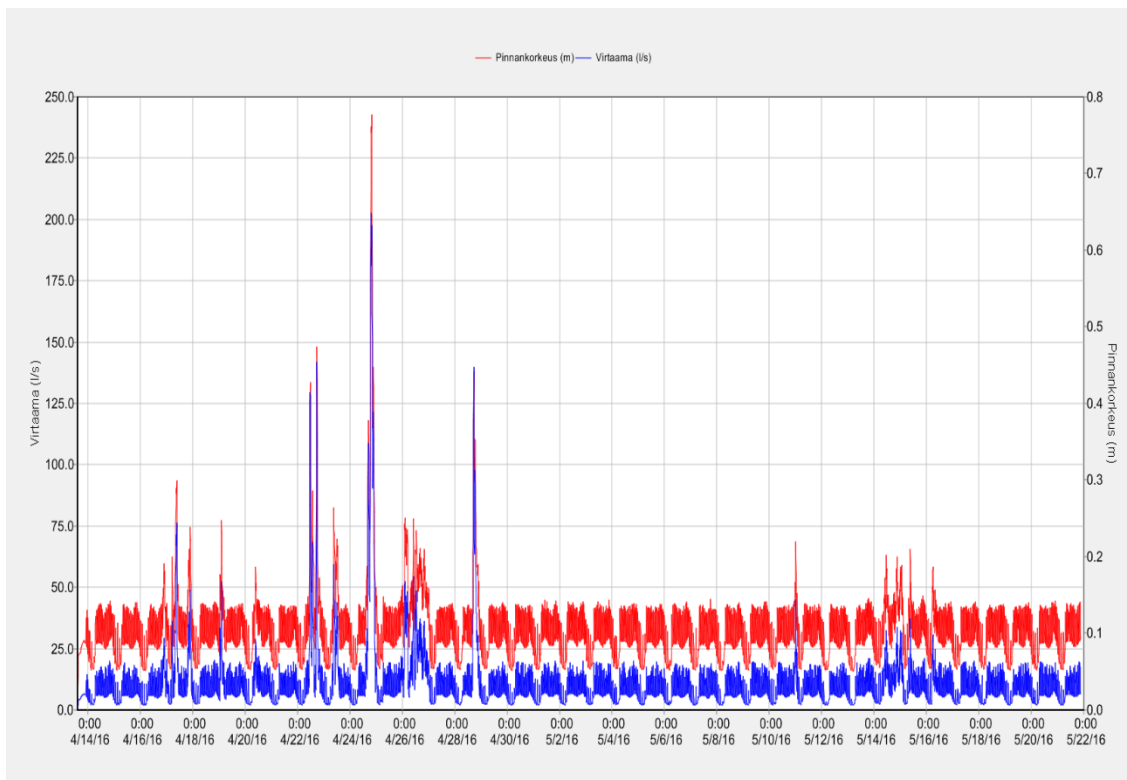
Munkkiniemenrannan jätevedenpumppaamolta laskettu lähtevä virtaama ja pumppaamolta lähtevän paineputken purkukaivon jälkeen sijaitsevan kaivon SEK5122 (8021) mitattu pinnankorkeus on esitetty kuvassa 41. Virtaama on esitetty kuvassa sinisellä ja pinnankorkeus punaisella. Munkkiniemenrannan pumppaamolta saatu lähtevä jätevesivirtaama tunneittain on laskettu pumppujen käyntiaikojen ja vakioksi oletetun tuoton perusteella. Virtaamat saavat tästä johtuen vain tiettyjä tasa-arvoja eikä pumppaamodata ole täydellisen luotettavaa. Pinnankorkeudet on mitattu kymmenen minuutin välein. Pinnankorkeuksissa näkyy selkeästi piikkejä pumppauksesta johtuen, ja ne osuvat tyydyttävästi yhteen pumppaamon virtaaman nousun kanssa. Suuremman virtaaman jälkeen pinnankorkeudessa esiintyy tiheämpää heilahtelua. Lisäksi usein sekä pinnankorkeus että virtaama ovat yhtä aikaa nollassa.

Lasketun virtaaman ja mitatun pinnankorkeuden yhteys



Kuva 41. Lasketun pumppaamovirtaaman (JVP1053) ja mitatun pinnankorkeuden (8021) yhteys.

Mallinnetun virtaaman ja pinnankorkeuden yhteyttä tarkasteltiin mallinnuskaivossa SEK4438 (8020) (Kuva 42). Virtaaman suuruutta tarkasteltiin kaivosta pois johtavassa putkessa.



Kuva 42. Mallinnetun virtaaman ja mallinnetun pinnankorkeuden yhteys kaivossa SEK4438 (8020).

Kuvan 42 perusteella mallinnetun virtaaman suuruus on normaalisti keskimäärin noin 10 l/s, kun sateita ei oteta huomioon. Virtaama näkyy kuvassa sinisellä ja pinnankorkeus punaisella. Molemmissa käyrissä on näkyvissä sekä kulutusvaihtelut että sateesta aiheutuvat piikit. Virtaaman suuruus vaikuttaa melko realistisen suuruiselta mutta kuitenkin hieman pieneltä. Virtaama sopii noin 4000...5000 asukkaan tuottamaksi, ja vähintään kyseisen määrän ihmisiä tuottamat jätevedet kulkeutuvat tarkasteltuun kaivoon.

8.5 Virhelähteet

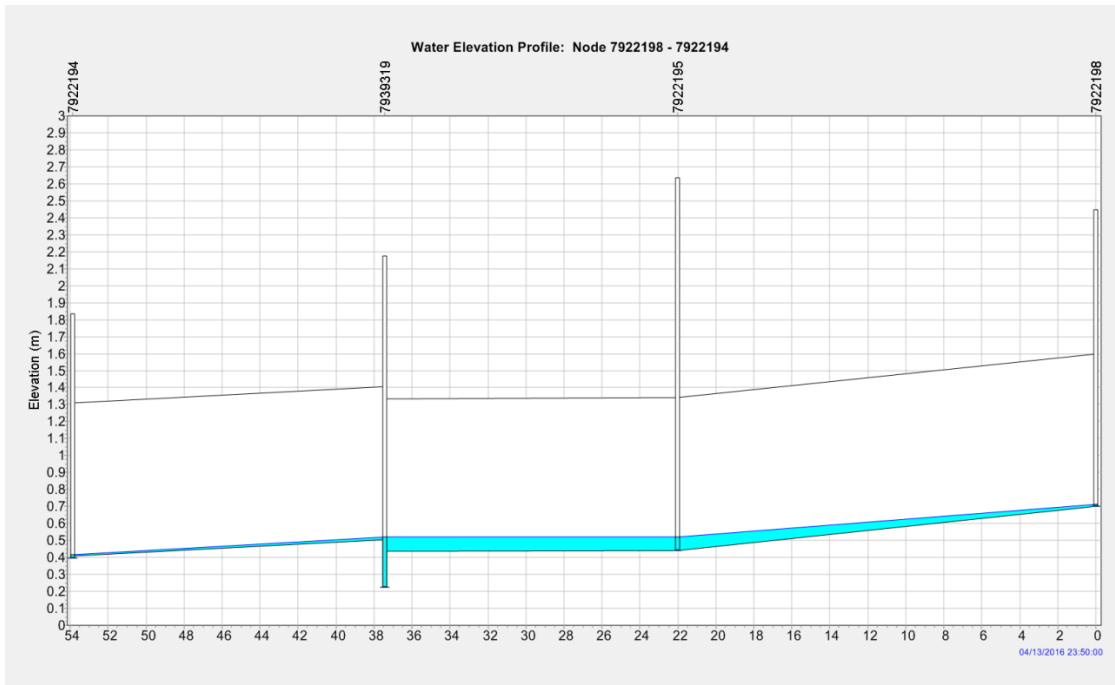
Pinnankorkeuksien mittauksiin, mittareiden tuloksiin, mallinnuksen lähtötietoihin kuten vedenkulutuksiin, mallinnukseen ja kalibrointiprosessiin parametrien määrittäminen sisältyy paljon virhemahdollisuuksia.

Mittarit kalibroitiin käsin näyttämään oletettua oikeaa pinnankorkeutta. Vedenpinnan korkeus kaivossa ja kaivon pohjan etäisyys mittariin mitattiin käsin rullamitalalla. Sen jälkeen mittarin antamaa tulosta muokattiin siten, että se olisi mahdollisimman lähellä mitalla mitattua korkeutta. Tähän prosessiin sisältyy monta kohtaa, jotka voivat vääristää saatuja mittaus tuloksia. Ensinnäkin käsin mitattu korkeus kaivon pohjasta mittariin ei välttämättä ollut tasan oikea etäisyys mittarin ja pohjan välillä. Käsin mitattu korkeus ja edelleen mittarille annettu arvo voi siten heilahdella jopa useita senttimetrejä todellisesta arvosta. Tällaisessa tilanteessa mittarin antama tulos voi olla esimerkiksi negatiivinen. Mitalla mittaus olisi myös hyvä toistaa useamman kerran, jotta saataisiin luotettavampi mittaus tulos.

Toiseksi mittanauha ei välttämättä mitannut itse vedenkorkeutta oikein vaan esimerkiksi kaivon pohjalla on saattanut mittaushetkellä olla jokin vedenpintaa hetkellisesti nostava kiintoainepartikkeli. Tällöin mittarin näyttämät mittaustulokset ovat koko ajan todellisuutta pienemmät, ja malli saattaakin näyttää todellista oikeaa pinnankorkeutta. Tällainen tilanne voisi olla esimerkiksi kaivon YVK072 eli Munkkiniemen mittarin 8025 kohdalla, jos tarkastellaan vain mittarin asennusta (Kuva 37, Liite 5). Kesken mittaamisen kaivoon on myös voinut tulla esimerkiksi jokin vedenpintaa nostava puukappale, jonka seurauksena mittausten yleinen taso nousee. Vaihtoehtoisesti alavirrassa voi esiintyä jokin tuntematon padottava tekijä. Tällainen tilanne on voinut olla esimerkiksi kaivon SEK4488 eli Munkkiniemen mittarin 8023 kohdalla, jossa mitatun pinnankorkeuden yleistasossa tapahtuu selkeä nousu (Kuva 38, Liite 5). Lisäksi mittarien tallentamat ajanhetket tuloksille saattavat olla virheellisiä vaikuttaen näin esimerkiksi siihen, että malli ei tuota samaa pinnankorkeutta mitatun kanssa samalle ajanhetkelle.

Itse mallin rakentaminen on tärkeässä osassa, ja siihen käytetyillä lähtötiedoilla on suuri merkitys. Esimerkiksi vedenkulutustiedot ja -käyrät saattavat sisältää virheitä. Nyt käyrinä käytettiin Suomenojan viemärintialueen Haukilahden ja Kauniaisten kulutuskäyristä laskettuja keskiarvokäyriä, jotka eivät välttämättä täysin vastaa Munkkiniemen todellisuutta. Myös ennusteisiin perustuvissa vedenkulutustiedoissa on saattanut olla virheitä. Sadedatan sisältämällä virheillä on erityisesti sekavesiverkoston mallinnuksessa suuri merkitys varsinkin sateesta aiheutuvien pinnankorkeuden nousujen mallinnuksessa.

Verkostotietojen mahdollisesti sisältämät virheet voivat vaikuttaa mallinnustulokseen yllättävästikin. Muun muassa virheelliset korot, kaltevuudet ja esimerkiksi putkien karkeuskerrointyyppit vääristävät tuloksia. Esimerkiksi kaivon YVK072 (8025) mittaustulokset (kuvasssa numero 7939319) ovat epärealistisia (Kuva 43, Liite 5).



Kuva 43. Kaivon YVK072 (mittauspiste 8025) mallinnus.

Kaivossa YVK072 oli mittari (8025), ja mittarin antamat tulokset ovat suuruudeltaan koko ajan vähintään hieman yli 10 cm eivätkä ylitä 20 cm paitsi kovalla sateella. Verkostossa virtaa koko ajan vettä, sillä kyseessä on sekavesiverkosto. Verkostotietojen mukaan mittaustulokset ovat selkeästi vääriä, sillä kaivon pohjan ja matalimmalle liittyvän lähtöputken liittymiskohdan väli on hieman alle 30 cm. Kaivosta lähtevän veden pitäisi siis päästä purkautumaan normaalivirtaamalla tältä korkeudelta, kuten mallissa tapahtuu. Mittaustuloksissa pitäisi siten näkyä yli 30 cm mittaustuloksia, mutta nyt ne jäävät siis lähtevän putken vesijuoksu-tason alapuolelle. Mittaustulosten vääryydelle vaihtoehto on, että putkien ja kaivojen korot ovat mallissa väärin, vaikka korot onkin tarkemittattu.

Mallinnettuihin pinnankorkeuksiin voi myös vaikuttaa SWMM:n ominaisuus olettaa kaikki kaivot saman levyisiksi. Mallissa käytettyjen ja todellisten kaivojen halkaisijoiden erilaisuus aiheuttaa eroa verkoston varastotilan suuruudessa, mikä voi ilmetä eroina mitatun ja mallinnetun vedenkorkeuden arvoissa. Jos verkoston kaivot ovat oikeasti kapeammat kuin SWMM olettaa, mahtuu todelliseen verkostoon varastoitumaan mallinnettua vähemmän vettä, ja mitatut pinnankorkeudet ovat siten mallinnettuja pinnankorkeuksia suurempia. Vastaavasti mallinnetut pinnankorkeudet voivat olla mitattuja suurempia, jos mallin kaivojen halkaisijat ovat todellisuutta pienemmät.

Mallissa syntyvään valuntaan ja verkostoon päätyviin vesiin vaikuttaa varsinkin sekavesiverkoston tapauksessa valuma-alueen koko ja sen ja maanpeiteaineiston ominaisuudet. Tässä työssä Munkkiniemen valuma-alue määritettiin eheyttämättömän verkoston avulla. Koska tässä käytetyssä verkostossa putket olivat kuitenkin olemassa oikeilla paikoilla, ei valuma-alueen määrittämisessä olisi pitänyt syntyä virhettä, ja valuma-alueen pitäisi siten olla oikean kokoinen.

Käytetty maanpeiteaineisto olisi voinut olla laadultaan parempaa. Nyt sen ongelmana oli muun muassa se, että asfaltin, kivetyksen ja soran/hiekan osuudet eivät olleet täsmällisesti oikein vaan kuhunkin maanpeitetyyppiin sisältyi muita maanpeitetyyppisiä. Tämä saattoi vaikuttaa kalibroinnissa saatuihin parametrien arvoihin, jotka eivät nyt siis kuvaa yksiselitteisesti vain yhden maanpeitetyyppin ominaisuuksia. Maanpeitetyyppien parametrien vaihteluvälit perustettiin kirjallisuuteen ja aikaisempiin tutkimuksiin. Parametrien arvot voivat kuitenkin todennäköisesti vaihdella paljonkin maanpeitteestä ja alueesta riippuen. Siten tässä työssä käytetyt rajat eivät välttämättä olleet optimaaliset vaan eri rajoilla olisi saatettu saada parempi mallinnustulos. Tässä työssä käytettiin vertailutiedostona vain yhtä, kohtuullisen mallinnustuloksen antanutta kaivoa SEK4438. Tämä kaivo kuvaa kuitenkin vain yhden aluetyyppin vaikutusta pinnankorkeuksiin, ja siten sille optimaaliset parametriarvot eivät välttämättä ole esimerkiksi enemmän tai vähemmän kasvillisuutta sisältävälle kaivolle tai alueelle parhaat. Näin ollen kokonaisuudessaan parempi tulos olisi saatu, jos kalibroinnissa olisi voitu käyttää useampaa kaivoa.

Lisäksi kalibrointiin todennäköisesti vaikutti vertailutiedostona käytetyn kaivon SEK4438 mitatun ja mallinnetun pinnankorkeuden mahdollisesti virheellisistä vedenkulutustiedoista tai verkoston vuotavuudesta johtunut tasoero, jota kalibrointi pyrki myös pienentämään, vaikka se ei parametrien avulla käytännössä ole mahdollista. Tästä johtuen kalibrointi saattoi hieman vääristyä, sillä parametrien arvojen muuttamiseen perustuvan kalibroinnin tarkoitus tässä tapauksessa oli yrittää sovittaa sateesta aiheutuvat pinnankorkeuden vaihtelut, ei perusvirtaamaa.

Parametrien määrittämiseen liittyvä toinen virhemahdollisuus koskee parametrien määrittämistapaa. Hyödyllistä olisi ollut niiden määrittäminen erikseen seka- ja erillisviemäroidyille alueille, sillä erillisviemäriin ei pitäisi periaatteessa ollenkaan päästä hulevesiä. Tällaiselle alueelle parametriarvot olisivat todennäköisesti olleet hyvin erilaiset. Nyt erillisviemäroidystä verkostosta ei ollut tarpeeksi laadukkaita mittaustuloksia tämän tekemiseen. Myös mittareiden määrä oli liian vähäinen.

9 Johtopäätökset

Tässä työssä on tarkasteltu mahdollisuutta kalibroida viemärimalli jäte- ja sekavesiverkostosta mitattujen pinnankorkeuksien avulla. Pintamittausten käyttö on kiinnostava vaihtoehto, sillä niiden suorittaminen on yleensä kalibrointiin käytettyjä virtaamamittauksia helpompaa ja edullisempaa. Haasteena on kuitenkin sopivien, luotettavia tuloksia antavien mittaustaikojen löytyminen. Työssä on arvioitu mittarien sijainnin vaikutusta mittaustulosten laatuun ja testattu mallin kalibrointiä pintamittausten avulla esimerkkialueella. Lisäksi on arvioitu käytetyn sadedatatyypin vaikutusta mallinnustuloksiin.

Pintamittausten käytöstä viemärimallin kalibrointiin löytyy vähänlaisesti tietoa. Useissa raportoiduissa tutkimuksissa kalibrointiin on käytetty pintamittausten lisäksi virtaamamittauksia tai pelkästään virtaamamittauksia, sillä yleensä virtaama on kiinnostava tieto verkoston toiminnan kannalta: sen avulla saadaan kuva siitä, mitä verkostossa tapahtuu. Lisäksi pintamittausten avulla ei voida verkoston virtausolosuhteista johtuen useinkaan päätellä virtaamaa verkostossa.

Mittaustulosten laatua ja olosuhteiden merkitystä mittaustuloksiin on työssä arvioitu kuuden mittarin avulla Munkkiniemessä ja neljällä mittarilla Tammistossa. Tulosten perusteella mittaustuloksiin vaikuttavat monet asiat. Pintamittausta käytettäessä mittaustaikojen valintaan on kiinnitettävä erityistä huomiota, jotta saadaan niin laadukasta mittaustietoa, että sitä voidaan käyttää mallin kalibrointiin. Mittareita olisi hyvä asentaa mallinnettavalle alueelle useita ja nämä myös maanpeitteellisesti erilaisille alueille. Mittauskaivoissa tulisi olla mahdollisimman tasainen virtaustila ja tarpeeksi suuri pinnanvaihtelu, jotta mittaus olisi mahdollisimman helppoa. Sekä liian matalat että liian syvät ja kapeat kaivot vaikeuttavat mittauksia. Matalissa kaivoissa mittarien sokea alue aiheuttaa vaikeuksia mittaamiseen, kun taas syvissä ja kapeissa kaivoissa mittarin keilana lähettämä ultraääni osuu herkästi kaivon seinään väärinä siten mittaustulosta. Lisäksi kaivon seinämien ominaisuudet saattavat yleisesti hankaloittaa mittarin asennusta.

Pumppaamon ja paineputken purkukaivon läheisyys mittarin yläjuoksulla aiheuttaa heilahdusta mittaustuloksiin ja vaikeuttaa siten kalibrointiä. Pumppaamon purkukaivon ja mittari-kaivon väliin olisikin hyvä liittyä tarpeeksi muita linjoja, jotta pumppaamon vaikutus pienenis. Tässä työssä sekä noin sadan metrin että yli sadan metrin etäisyydet purkukaivoon olivat Munkkiniemessä liian vähän mutta Tammistossa pumppaamoiden vaikutus ei ollut yhtä ilmeinen. Joissain tapauksissa myös pumppaamon läheisyys mittarin alajuoksulla saattaa vaikuttaa mittaustuloksiin, jos pumppaamolle johtavan putken kaltevuus on vähäinen ja pumppaamo padottaa. Myös muutoin liian kalteva tai liian loiva putkiosuus mittaustaikojen läheisyydessä tai jopa painunut mittaustaikojen ovat huonoja kohteita, sillä painuma aiheuttaa veden seisomista verkostossa ja liian jyrkässä putkessa vesi ei pysy paikallaan, jolloin mittauksesta ei ole hyötyä. Kaivon pohjan olisi myös hyvä olla tasainen eli pohjalla ei saisi olla kynnyksiä tai pudotuksia. Mittauskaivoon tulisi liittyä vain yksi tuloputki ja sieltä lähteä vain

yksi putki, jotta mittauskaivon vedenkorkeus ei heilahtelisi ja häiriintyisi useasta putkesta tulevan veden takia.

Kuten aikaisemmissa tutkimuksissa, tämänkin työn tulosten mukaan sadedatan laatu on tärkeää erityisesti sekavesiverkoston mallinnuksessa ja kalibroinnissa, sillä sateiden aikaan suurin osa virtaamasta voi olla peräisin sadannasta. Työssä verrattiin, miten mallin antamat tulokset muuttuivat, kun lähtötietoina käytettiin Ilmatieteen laitokselta saatua sovitettua sadetutkadataa tarkastelulle alueelle tai kun käytössä oli verkostoalueen ulkopuolella olevasta sademittarista saatua sadantatietoa. Tuloksena sovitettu sadetutkadata antoi hieman paremman mallinnustuloksen. Ero ei kuitenkaan ollut huomattava, mutta erityisesti suuremmilla alueilla sadetutkadatan käyttö on suositeltavaa. On kuitenkin muistettava, että mallissa mahdollisesti olleista virheistä johtuen sadedatatyypin vaikutusta ei voida arvioida kovin luotettavasti.

Työn tulosten perusteella mittarien asennuspaikkojen lisäksi mittauksessa ja mallinnuksessa käytettävät aikavälit vaikuttavat mallinnuksen ja kalibroinnin onnistumiseen. Mallinnuksessa voidaan käyttää eri aika-asteleita kuin mittauksessa, mutta tulosten vertailemiseksi mittaukset ja ainakin mallin raportointi olisi hyvä tehdä samalla aikavälillä mittausten kanssa. Liian pitkä aikaväli vääristää muun muassa sateiden aikaansaamia piikkejä ja mallinnettua virtaamaa. Jos pumppaamoilta ei ole tarkkaa virtaamatietoa, pidempi aikaväli voi antaa pumppaamoille oikean virtaaman mallinnustuloksen. Myös liian pitkät aikavälit sadedatassa voivat aiheuttaa sen, että sadannan piikit ja siten virtaaman piikit jäävät pois. On kuitenkin muistettava, että esimerkiksi pienistä aikaväleistä johtuva suuri ja erittäin tarkka tiedosto- ja siten datamäärä hidastaa kalibrointia. Kalibrointi saattaa viedä hyvinkin paljon aikaa, jopa useita viikkoja pienellekin alueelle, jos datamäärä on suuri, tietokone hidas ja lähtö- ja vertailutiedot epätarkkoja.

Tämän työn tulosten mukaan viemärimallin kalibrointi pintamittausten avulla saattaa olla mahdollista. Työssä kalibroinnilla ei saavutettu hyvyyslukujen perusteella riittävän hyvää tulosta, mutta käyttötarkoituksesta riippuen saavutettu mallinnustarkkuus voi olla myös riittävä. NSE-luvut jäivät kalibroinnin jälkeen alle hyvän mallinnustason arvojen ollessa negatiivisia. SSE-lukujen arvot vaihtelivat alle yhdestä yli sadan. Jos mallia halutaan hyödyntää tulevaisuudessa yleiseen verkoston toimivuuden tarkkailuun, tulos on riittävä. Jos taas halutaan tarkastella esimerkiksi mallin tuottamia virtaamia tarkemmin, tarkkuus ei riitä. Edellytyksenä mallin onnistuneelle kalibroinnille kuitenkin on, että mittaus- ja lähtötiedot ovat mahdollisimman oikein, jotta mallinnustuloskin on luotettava. Tarkemmat ja siten paremmat lähtötiedot mahdollistavat totuudenmukaisemman mallinnustuloksen. Tähän on syytä kiinnittää erityistä huomiota.

Työn kalibrointituloksia on hyödynnettävä harkiten, sillä mallinnetun alueen verkosto ja maanpeitetyyppien osuudet vaikuttavat kalibroinnissa saatuihin parametrien arvoihin. Siten erilaisella alueella parametrien arvot saattavat olla hyvinkin erilaiset verrattuna tässä työssä saatuihin arvoihin johtuen juuri verkoston ja maanpeitteen ominaisuuksista ja osuuksista.

Lisäksi kalibrointi pitäisi tehdä erikseen alueille, joilla on sekaviemärointi ja joilla erillisviiemärointi, koska parametrien arvot tällaisilla alueilla todennäköisesti poikkeavat toisistaan. Erillisviiemäroidyillä alueilla maanpeiteparametreja enemmän merkitystä saattaa olla myös maaperäparametreilla.

Kalibroinnin toimivuuden varmistamiseksi olisi jatkossa hyvä tarkastella mallin tuottaman virtaaman oikeellisuutta vertaamalla sitä verkostosta mitattuun virtaamaan. Nyt virtaamatiedon puuttumisen vuoksi tarkastelua ei voitu tehdä. Myös pintamittausten avulla erikseen laskettua virtaamaa voisi verrata mitattuun virtaamaan, jolloin selviäisi, voiko virtaamaa verkostossa laskea yksinkertaisilla kaavoilla pelkästään pintamittausten avulla ilman mallinnusta. Lisäksi mallinnus suoritettiin nyt vain kevät- ja kesäajalle, mutta talven ja erityisesti alkukevään mukaanotto tuottaisi paremman kuvan mallin luotettavuudesta ja toimivuudesta. Uusien mittauspaiikkojen testaaminen antaisi vielä tarkemman kuvan paikoista, joihin mittarit sopivat. Vuoto- ja pohjavesillä saattaa ollaa mittaustuloksiin yllättävän suuri merkitys, joten niiden osuutta pitäisi pystyä tarkentamaan. Tulevaisuudessa kannattaisi käyttää tarkempaa maanpeiteaineistoa ja mahdollisesti myös pienempirasterista sadetutkadataa luotettavamman tuloksen saamiseksi. Erillisviiemäroityjen alueiden kalibrointivaihtoehtoja olisi myös hyvä tarkastella tarkemmin.

Lähdeluettelo

- ASCE Task Committee 1993. *Criteria for evaluation of watershed models*. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. [Verkkolehti]. Vol. 119:3. [Viitattu 15.6.2016]. S. 429-442. DOI:10.1061/(ASCE)0733-9437(1993)119:3(429).
- Baffaut, C. & Delleur, J.W. 1989. *Expert system for calibrating SWMM*. Journal of Water Resources Planning and Management. [Verkkolehti]. Vol. 115:3. [Viitattu 11.4.2016]. S. 278-298. DOI:10.1061/(ASCE)0733-9496(1989)115:3(278).
- Barco, J., Wong, K.M. & Stenstrom, M.K. 2008. *Automatic calibration of the U.S. EPA SWMM model for a large urban catchment*. Journal of Hydraulic Engineering. [Verkkolehti]. Vol. 134:4. [Viitattu 8.3.2016]. S. 466-474. DOI:10.1061/(ASCE)0733-9429(2008)134:4(466).
- Bossart, E. 2015. *Fundamentals of hydrostatic level measurement*. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 22.3.2016]. Saatavissa: http://en-co.wika.de/upload/TA_0315_ATE_en_co_65407.pdf.
- Burgess, S. 2008. *Case Study - Level Sensors in Pumping Stations*. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 10.3.2016]. Saatavissa: http://www.wioa.org.au/conference_papers/08_qld/documents/scottburgess.pdf.
- Butler, D. & Davies, J.W. 2004. *Urban Drainage 2nd Edition*. [e-kirja]. 2nd ed. London, United Kingdom and New York, United States: Spon Press. 543 s. Saatavissa: <https://vannpiseth.files.wordpress.com/2015/07/urban-drainage-butler.pdf>. ISBN 0-203-34190-2.
- Chiang, Y., Chang, L., Tsai, M., Wang, Y. & Chang, F. 2010. *Dynamic neural networks for real-time water level predictions of sewerage systems-covering gauged and ungauged sites*. Hydrology and Earth System Sciences. [Verkkolehti]. Vol. 14:7. [Viitattu 12.4.2016]. S. 1309-1319. DOI:10.5194/hess-14-1309-2010.
- Corvallis Forestry Research Community. 2006. *Manning's n Values*. [Internet-sivu]. [Viitattu 25.4.2016]. Saatavissa: http://www.fsl.orst.edu/geowater/FX3/help/8_Hydraulic_Reference/Mannings_n_Tables.htm.
- Doherty, J. 2005. *PEST. Model-Independent Parameter Estimation. User Manual*. 5th ed. Watermark Numerical Computing. 333 s.
- Durrans, S.R. 2003. *Stormwater Conveyance Modeling and Design*. [Verkkodokumentti]. 1st ed. Waterbury, United States: Haestad Methods, Inc. 686 s. [Viitattu 18.5.2016]. Saatavissa: <https://www.scribd.com/doc/76459116/Storm-Water-Conveyance-Modeling-Design>. ISBN 0-9657580-8-7.
- Engman, E.T. 1986. *Roughness coefficients for routing surface runoff*. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. [Verkkolehti]. Vol. 112:1. [Viitattu 20.4.2016]. S. 39-53. DOI:10.1061/(ASCE)0733-9437(1986)112:1(39).

Flotech. 2016. *Electromagnetic Flowmeter - EFS800 - CFT180/RFT200*. [Internet-sivu]. [Viitattu 23.3.2016]. Saatavissa: <http://images.flotech-controls.com/electromagnetic-flow-meter-efs800-principle.jpg>.

Gheith, H. 2011. *A Detailed Procedure for Separating RDII Stages and Generating a Single Set of RTK Hydrographs for Continuous Simulation*. Journal of Water Management Modeling. [Verkkolehti]. [Viitattu 21.4.2016]. S. 187-207. ISSN 978-0-9808853-4-7. DOI:10.14796/JWMM.R241-11.

Gironás, J., Roesner, L.A. & Davis, J. 2009. *Storm Water Management Model Applications Manual*. [Verkkodokumentti]. Cincinnati, United States: U.S. Environmental Protection Agency. 180 s. Saatavissa: <https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm>.

Global Water. 2015. *WL400 Water Level Sensor*. [Internet-sivu]. [Viitattu 23.3.2016]. Saatavissa: <http://www.globalw.com/products/levelsensor.html>.

Görlich Meß- und Regeltechnik GmbH. 2005. *Magnetic inductive run-off measurements for open and partially filled systems with sensor integrated level measurement by pressure sensor*. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 12.9.2016]. Saatavissa: http://www.goerlichgmbh.com/fileadmin/user_upload/Downloads/Produktloesungen/Durchfluss/UFM_535-P-MAG-eng_1.3_e_01.pdf.

GTK. *Maankamara*. [Internet-sivu]. [Viitattu 2.6.2016]. Saatavissa: <http://gtkdata.gtk.fi/maankamaraflex/index.html>.

Guan, M., Sillanpää, N. & Koivusalo, H. 2015. *Modelling and assessment of hydrological changes in a developing urban catchment*. Hydrological Processes. [Verkkolehti]. Vol. 29:13. [Viitattu 26.5.2016]. S. 2880-2894. DOI:10.1002/hyp.10410.

Hamill, L. 2011. *Understanding Hydraulics*. 3rd ed. London, United Kingdom: Palgrave Macmillan. 631 s. ISBN 978-0-230-24275-3.

Hansen, L.S., Borup, M., Møller, A. & Mikkelsen, P.S. 2014. *Flow forecasting using deterministic updating of water levels in distributed hydrodynamic urban drainage models*. Water (Switzerland). [Verkkolehti]. Vol. 6:8. [Viitattu 22.4.2016]. S. 2195-2211. DOI:10.3390/w6082195.

Hassingier, R. 2016. *Durchflussmessung: Innovative Methoden für Regenentlastungskanäle*. [Internet-sivu]. IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur GmbH. [Viitattu 12.9.2016]. Saatavissa: <http://www.ikt.de/website/printversion.php?doc=172>.

Helsingin kaupunki. *Karttapalvelu*. [Internet-sivu]. [Viitattu 2.6.2016]. Saatavissa: http://kartta.hel.fi/?setlanguage=fi&e=25496709&n=6673050&r=4&w=&l=Maapera-kartta_vanha&o=100#.

Higginson, E. 2005a. Wastewater level measurement techniques. Teoksessa: Randy, D.D & Jay, H.L. (toim.). *Environmental Instrumentation and Analysis Handbook*. Hoboken, United States: John Wiley & Sons. S. 791-814. ISBN 0-471-46354-X.

- Higginson, E. 2005b. *Wastewater Level Measurement Techniques*. [Internet-sivu]. [Viitattu 18.3.2016]. Saatavissa: <http://www.greyline.com/WastewaterLevelMeasurementTechniques.htm>.
- Hofmann, F. 2003. *Fundamental principles of Electromagnetic Flow Measurement*. [Verkkodokumentti]. Duisburg, Germany: KROHNE Messtechnik GmbH & Co. KG Duisburg. [Viitattu 23.4.2016]. Saatavissa: http://cdn.krohne.com/dlc/BR_MID_en_72.pdf.
- Hohti, H. 2016. Ilmatieteen laitos. Sähköposti 16.3.2016.
- Hyvärinen, V. & Puupponen, M. 1986. Valunta. Teoksessa: Mustonen, S. (toim.). *Sovellettu Hydrologia*. Helsinki: Vesiyhdistys r.y. S. 152-225. ISBN 951-95555-1-X.
- Ibrahim, Y. & Liong, S.Y. 1992. *Calibration strategy for urban catchment parameters*. Journal of Hydraulic Engineering. [Verkkolehti]. Vol. 118:11. [Viitattu 11.4.2016]. S. 1550-1570. DOI:10.1061/(ASCE)0733-9429(1992)118:11(1550).
- Ilmatieteen laitos. 2015. *Vuositilastot*. [Internet-sivu]. [Viitattu 14.3.2016]. Saatavissa: <http://ilmatieteenlaitos.fi/vuositilastot>.
- Ilmatieteen laitos. a. *Suomen tutkaverkko*. [Internet-sivu]. [Viitattu 14.3.2016]. Saatavissa: <http://ilmatieteenlaitos.fi/suomen-tutkaverkko>.
- Ilmatieteen laitos. b. *Säähavainnot*. [Internet-sivu]. [Viitattu 14.3.2015]. Saatavissa: <http://ilmatieteenlaitos.fi/avoin-data-saahavainnot>.
- Ilmatieteen laitos. c. *Säätutkat*. [Internet-sivu]. [Viitattu 14.3.2016]. Saatavissa: <http://ilmatieteenlaitos.fi/saatutkat>.
- Isel, S., Araud, Q., Philippe, R., Dufresne, M. & Vazquez, J. 2012. *Assessment of the discharge in sewer pipes using two water level measurements and the relationship of gradually varying flow*. 9th International Conference on Urban Drainage Modelling. Belgrade, Serbia.
- Isel, S., Dufresne, M., Fischer, M. & Vazquez, J. 2014. *Assessment of the overflow discharge in complex CSO chambers with water level measurements - On-site validation of a CFD-based methodology*. Flow Measurement and Instrumentation. [Verkkolehti]. Vol. 35. [Viitattu 8.3.2016]. S. 39-43. DOI:10.1016/j.flowmeasinst.2013.11.003.
- Isel, S., Dufresne, M., Napoly, A., Francois, P., Lawniczak, F., Araud, Q., Schmitt, V., Bardiaux, J.B., Thenault, F., Fischer, M. & Vazquez, J. 2011. *A method taking uncertainties into account to evaluate the rate overflow in CSO using water-depth measurements*. 12th International Conference on Urban Drainage. Porto Alegre, Brazil.
- Jain, G.V., Agrawal, R., Bhandari, R.J., Jayaprasad, P., Patel, J.N., Agnihotri, P.G. & Samtani, B.M. 2016. *Estimation of sub-catchment area parameters for Storm Water Management Model (SWMM) using geo-informatics*. Geocarto International. [Verkkolehti]. Vol. 31:4. [Viitattu 11.4.2016]. S. 462-476. DOI:10.1080/10106049.2015.1054443.

- Jalonen, T. 2012. *Mallipumppaamoiden automaatiokeselustus - ala-asemaurakka*. Finnish Consulting Group Oy. 13 s.
- Karpf, C., Hoefft, S., Scheffer, C., Fuchs, L. & Krebs, P. 2011. *Groundwater infiltration, surface water inflow and sewerage exfiltration considering hydrodynamic conditions in sewer systems*. Water Science and Technology. [Verkkolehti]. Vol. 63:9. [Viitattu 26.4.2016]. S. 1841-1848. DOI:10.2166/wst.2011.388.
- Karuppasamy, E. & Inoue, T.J. 2012. *Application of USEPA SSOAP software to sewer system modeling*. World Environmental and Water Resources Congress 2012: Crossing Boundaries, Proceedings of the 2012 Congress. Albuquerque, United States.
- Kleidorfer, M., Deletic, A., Fletcher, T.D. & Rauch, W. 2008. *Impact of input data uncertainties on stormwater model parameters*. 11th International Conference on Urban Drainage. Edinburgh, United Kingdom.
- Kouyi, G.L., Besson, F., Bier, M., Chocat, B. & Lucchinacci, P. 2010. *Assessment of flow rate in a complex sewer pipe by means of a water depth sensor and modelling*. 7th International Conference on sustainable techniques and strategies for urban water management. Lyon, France.
- Kouyi, G.L., Vazquez, J., Gallin, Y., Rollet, D. & Sadowski, A.G. 2005. *Use of 3D modelling and several ultrasound sensors to assess overflow rate*. Water Science and Technology. [Verkkolehti]. Vol. 51:2. [Viitattu 18.4.2016]. S. 187-194. Saatavissa: IWA Publishing.
- Krebs, G., Kokkonen, T., Valtanen, M., Koivusalo, H. & Setälä, H. 2013. *A high resolution application of a stormwater management model (SWMM) using genetic parameter optimization*. Urban Water Journal. [Verkkolehti]. Vol. 10:6. [Viitattu 7.3.2016]. S. 394-410. ISSN 1573062X. DOI:10.1080/1573062X.2012.739631.
- Krebs, G., Kokkonen, T., Valtanen, M., Setälä, H. & Koivusalo, H. 2014. *Spatial resolution considerations for urban hydrological modelling*. Journal of Hydrology. [Verkkolehti]. Vol. 512. [Viitattu 26.5.2016]. S. 482-497. DOI:10.1016/j.jhydrol.2014.03.013.
- Krohne. 2013. *TIDALFLUX 2300 F. Technical Datasheet. Electromagnetic flow sensor for partially filled pipes*. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 12.9.2016]. Saatavissa: http://cdn.krohne.com/dlc/TD_TIDALFLUX2300F_en_130627_4002489802_R02.pdf.
- Kuusisto, E. 1986. Sadanta. Teoksessa: Mustonen, S. (toim.). *Sovellettu Hydrologia*. Helsinki: Vesiyhdistys r.y. S. 29-47. ISBN 951-95555-1-X.
- Lankiniemi, V. 2013. Hulevesihaittojen ehkäiseminen kaupunkialueella. Diplomityö. Aalto-yliopisto, Insinööritieteiden korkeakoulu, yhdyskunta- ja ympäristötekniikan laitos. Espoo. 108 s.
- Liong, S.Y., Chan, W.T. & Lum, L.H. 1991. *Knowledge-based system for SWMM runoff component calibration*. Journal of Water Resources Planning and Management. [Verkkolehti]. Vol. 117:5. [Viitattu 19.4.2016]. S. 507-524. DOI:10.1061/(ASCE)0733-9496(1991)117:5(507).

Liong, S.Y., Chan, W.T. & Shreeram, J. 1995. *Peak-flow forecasting with genetic algorithm and SWMM*. Journal of Hydraulic Engineering. [Verkkolehti]. Vol. 121:8. [Viitattu 19.4.2016]. S. 613-617. DOI:10.1061/(ASCE)0733-9429(1995)121:8(613).

MACE. *FloPro XCi. Monitor wastewater, stormwater & industrial flows in full pipes, partially full pipes and open channels*. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 12.9.2016]. Saatavissa: http://macemeters.com/pdf/MACE_FloPro_XCi_Brochure.pdf.

Majaniemi, A. 2011. Sekaviemärintijärjestelmän mallintaminen – Case: Helsingin Rautatientorin ympäristö. Diplomityö. Aalto-yliopisto, Insinööritieteiden korkeakoulu, yhdyskunta- ja ympäristötekniikan laitos. Espoo. 109 s.

Mäki, N. and Vuori, P. 2015. *Helsingin väestö vuodenvaihteessa 2014/2015 ja väestönmuutokset vuonna 2014*. [Verkkójulkaisu]. Helsinki: Helsingin kaupungin tietokeskus. 75 s. [Viitattu 24.5.2016]. Saatavissa: http://www.hel.fi/hel2/tietokeskus/julkaisut/pdf/15_07_02_Tilastoja_21_Maki%26VuoriP.pdf ISBN 1796-721X.

Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Bingner, R.L., Harmel, R.D. & Veith, T.L. 2007. *Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations*. Transactions of the ASABE. [Verkkolehti]. Vol. 50:3. [Viitattu 15.6.2016]. S. 885-900.

Nguyen, L.S., Schaeli, B., Sage, D., Kayal, S., Jeanbourquin, D., Barry, D.A. & Rossi, L. 2009. *Vision-based system for the control and measurement of wastewater flow rate in sewer systems*. Water Science and Technology. [Verkkolehti]. Vol. 60:9. [Viitattu 18.4.2016]. S. 2281-2289. DOI:10.2166/wst.2009.659.

Nivus. 2012. *NIVUS - Produkte und Leistungen*. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 12.9.2016]. Saatavissa: https://www.nivus.de/fileadmin/user_upload/Allgemeines/Produkte_Leistungen.pdf.

Olsson, T., Jakkila, J., Veijalainen, N., Backman, L., Kaurola, J. & Vehviläinen, B. 2015. *Impacts of climate change on temperature, precipitation and hydrology in Finland - Studies using bias corrected Regional Climate Model data*. Hydrology and Earth System Sciences. [Verkkolehti]. Vol. 19:7. [Viitattu 19.4.2016]. S. 3217-3238. DOI:10.5194/hess-19-3217-2015.

Pirinen, P., Simola, H., Aalto, J., Kaukoranta, J.P., Karlsson, P. and Ruuhela, R. 2012. *Raportteja 2012:1. Tilastoja Suomen ilmastosta 1981-2010*. [Verkkodokumentti]. Ilmatieteen laitos. [Viitattu 15.3.2016]. Saatavissa: https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/35880/Tilastoja_Suomen_ilmastosta_1981_2010.pdf ISBN 978-951-697-766-2.

Ponce, L. and Dietrich, A. 2011. *Using a Smoothing Algorithm to Process Water Level Logger Data*. [Verkkodokumentti]. Department of Civil Engineering, University of Toledo. [Viitattu 25.4.2016]. Saatavissa: <https://www.utoledo.edu/nsm/lec/reu/pdfs/Ponce.pdf>.

Raudaskoski, O. 2016. Hulevesien hallintavaihtoehtojen mallinnus tiiviissä taajamassa. Diplomityö. Aalto-yliopisto, Insinööritieteiden korkeakoulu, yhdyskunta- ja ympäristötekniikan laitos. Espoo. 78 s.

- RIL. 2003. *RIL 124-1 Vesihuolto I*. Karttunen, E. (toim.). Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. 314 s. ISBN 951-758-431-8.
- RIL. 2004. *RIL 124-2 Vesihuolto II*. Karttunen, E. (toim.). Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. 684 s. ISBN 951-758-438-5.
- Rossmann, L.A. 2006. *Storm Water Management Model Quality Assurance Report: Dynamic Wave Flow Routing*. Cincinnati, United States: U.S. Environmental Protection Agency. 115 s.
- Rossmann, L.A. 2015. *Storm Water Management Model User's Manual Version 5.1*. [Verkkodokumentti]. Cincinnati, United States: U.S. Environmental Protection Agency. 352 s. Saatavissa: <http://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi?Dockey=P100N3J6.TXT>.
- Rossmann, L.A. & Huber, W.C. 2016. *Storm Water Management Model Reference Manual Volume 1 - Hydrology (Revised)*. [Verkkodokumentti]. Cincinnati, United States: U.S. Environmental Protection Agency. 231 s. Saatavissa: <http://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi?Dockey=P100NYRA.txt>.
- SFS-EN ISO 4373. 2008. *Hydrometry. Water level measuring devices*. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto. 20 s.
- Spirax Sarco. *Terminology*. [Internet-sivu]. [Viitattu 22.3.2016]. Saatavissa: <http://pointing.spiraxsarco.com/resources/steam-engineering-tutorials/flowmetering/principles-of-flowmetering.asp#top>.
- Sun, N., Hall, M., Hong, B. & Zhang, L. 2014. *Impact of SWMM catchment discretization: Case study in Syracuse, New York*. Journal of Hydrologic Engineering. [Verkkolehti]. Vol. 19:1. [Viitattu 21.4.2016]. S. 223-234. DOI:10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000777.
- Technolog Limited. 2012. *Cello CSO - GSM Ultrasonic Level Recorder*. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 9.3.2016]. Saatavissa: <http://www.technolog.com/water/product/download/11/cellocso-ds5p9003pdf>.
- Technolog Limited. 2016. *Cello CSO - GSM Ultrasonic Level Recorder*. [Internet-sivu]. [Viitattu 9.3.2016]. Saatavissa: <http://www.technolog.com/water/products/environmental-monitoring/11/cello-cso-gsm-ultrasonic-level-recorder.html>.
- Temprano, J., Arango, O., Cagio, J., Suárez, J. & Tejero, I. 2006. *Stormwater quality calibration by SWMM: A case study in Northern Spain*. Water SA. [Verkkolehti]. Vol. 32:1. [Viitattu 19.4.2016]. S. 55-63. Saatavissa: http://www.wrc.org.za/Knowledge%20Hub%20Documents/Water%20SA%20Journals/Manuscripts/2006/01/WaterSA_2006_01_1883.pdf. ISSN 1816-7950 (online).
- Urbanas, B.R. & Roesner, L.A. 1993. *Hydrologic design for urban drainage and flood control*. Maidment, D.R. (toim.). United States: McGraw-Hill, Inc. ISBN 0-07-039732-5.

- Vacorda. 2016. *Ultrasonic level sensor*. [Internet-sivu]. [Viitattu 22.3.2016]. Saatavissa: http://vacorda.en.alibaba.com/product/627978052-220958506/Ultrasonic_Level_Sensor.html.
- Vallabhaneni, S., Chan, C.C. & Burgess, E.H. 2007. *Computer Tools for Sanitary Sewer System Capacity Analysis and Planning*. [Verkkodokumentti]. Cincinnati, United States: U.S. Environmental Protection Agency. [Viitattu 20.3.2016]. Saatavissa: <http://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/P1008BBP.PDF?Dockey=P1008BBP.PDF>.
- Vantaan kaupunki. *Kartta.Vantaa*. [Internet-sivu]. [Viitattu 3.6.2016]. Saatavissa: <http://kartta.vantaa.fi/>.
- Vantaan kaupunki. 2015. *Vantaan väestö 2014/2015*. [Verkojulkaisu]. Vantaa: Vantaan kaupunki, tietopalveluyksikkö. [Viitattu 24.5.2015]. Saatavissa: https://www.vantaa.fi/instancedata/prime_product_julkaisu/vantaa/embeds/vantaawwwstructure/117563_Vaestoraportti_2015.pdf ISBN 1799-7127.
- Vega. *Level measurement in sewer network*. [Internet-sivu]. [Viitattu 23.3.2016]. Saatavissa: https://www.vega.com/en/home_dk/Applications/Water-wastewater/Wastewater-treatment/Sewer-network.
- Warsta, L. 2016. Tutkijatohtori. Aalto-yliopisto, rakennetun ympäristön laitos. Espoo. Sähköposti 31.8.2016.
- Yu, H., Huang, G. & Wu, C. 2014. *Application of the stormwater management model to a piedmont city: A case study of Jinan City, China*. Water Science and Technology. [Verkkolehti]. Vol. 70:5. [Viitattu 22.4.2016]. S. 858-864. DOI:10.2166/wst.2014.302.

Liiteluettelo

Liite 1. Tutkimusalueiden sijainti. 1 sivu.

Liite 2. Virtaussuunnat tutkimusalueiden runkolinjoissa. 2 sivua.

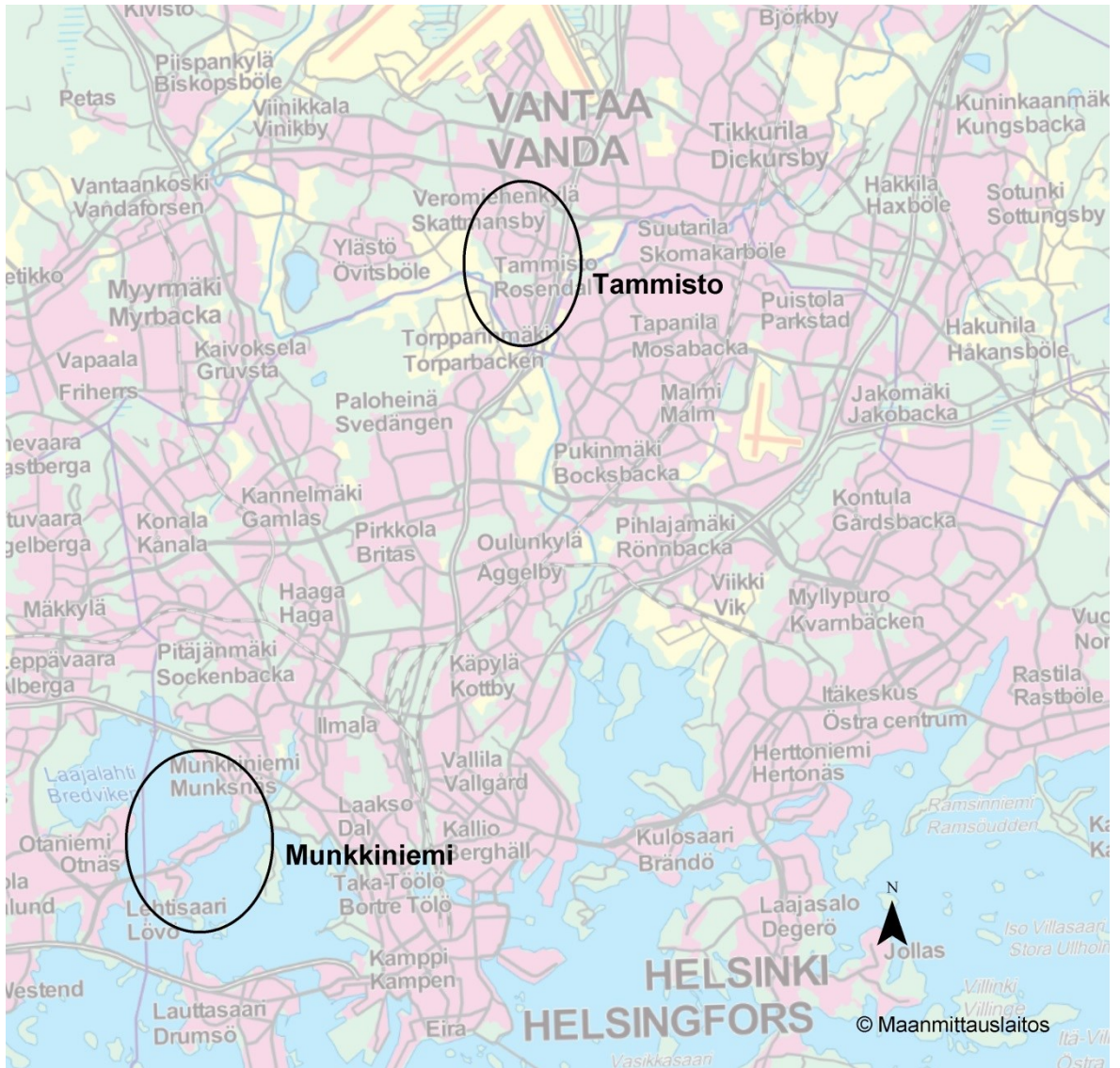
Liite 3. Munkkiniemen mittauskaivojen olosuhteet. 1 sivu.

Liite 4. Mittaustulokset Tammiston mittauskaivoissa. 2 sivua.

Liite 5. Kalibrointitulokset Munkkiniemen mittauskaivoissa. 6 sivua.

Liite 6. Validointitulokset Munkkiniemen mittauskaivoissa. 6 sivua.

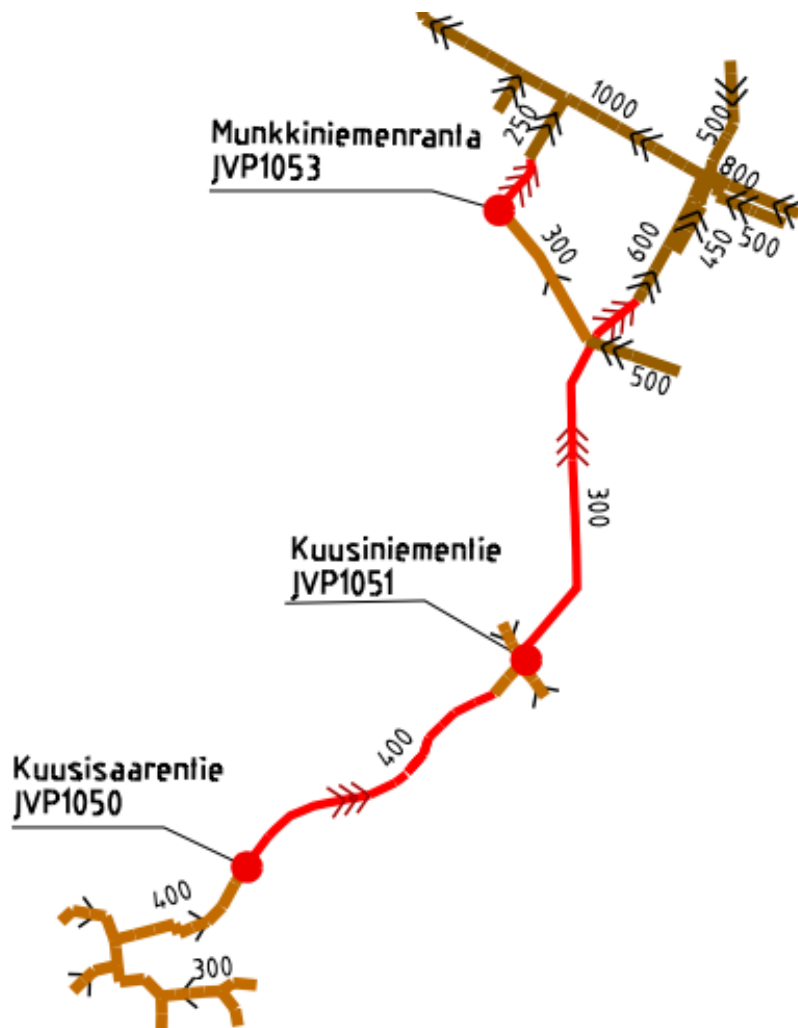
Liite 1. Tutkimusalueiden sijainti



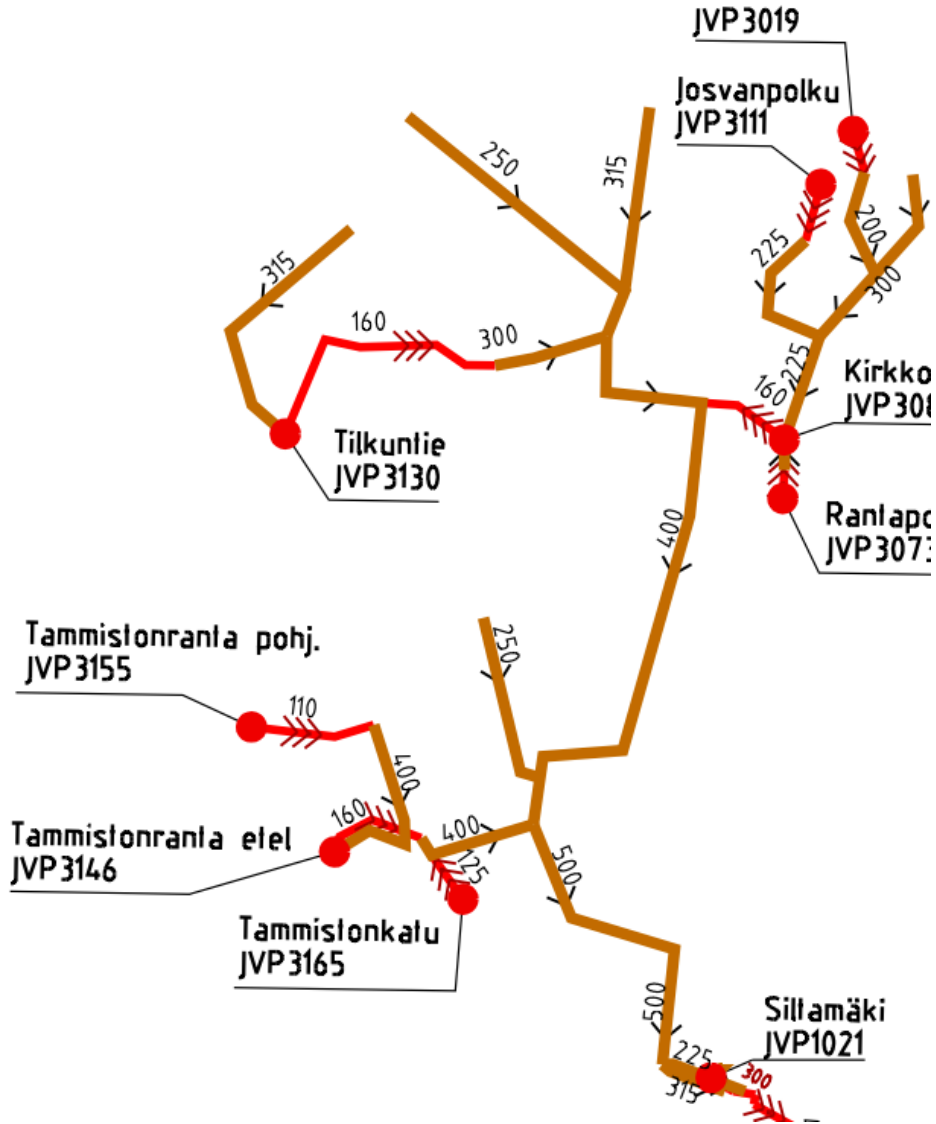
Liite 2. Virtaussuunnat tutkimusalueiden runkolinjoissa

Virtaussuunnat on merkitty nuolilla. Painelinjoissa virtaussuunta on esitetty kolmella väkäsellä, jätevesiverkostossa yhdellä ja sekavesiverkostossa kahdella. Kuvissa näkyvät myös runkolinjojen putkikoot.

Munkkiniemi



Tammisto



Liite 3. Munkkiniemen mittauskaivojen olosuhteet

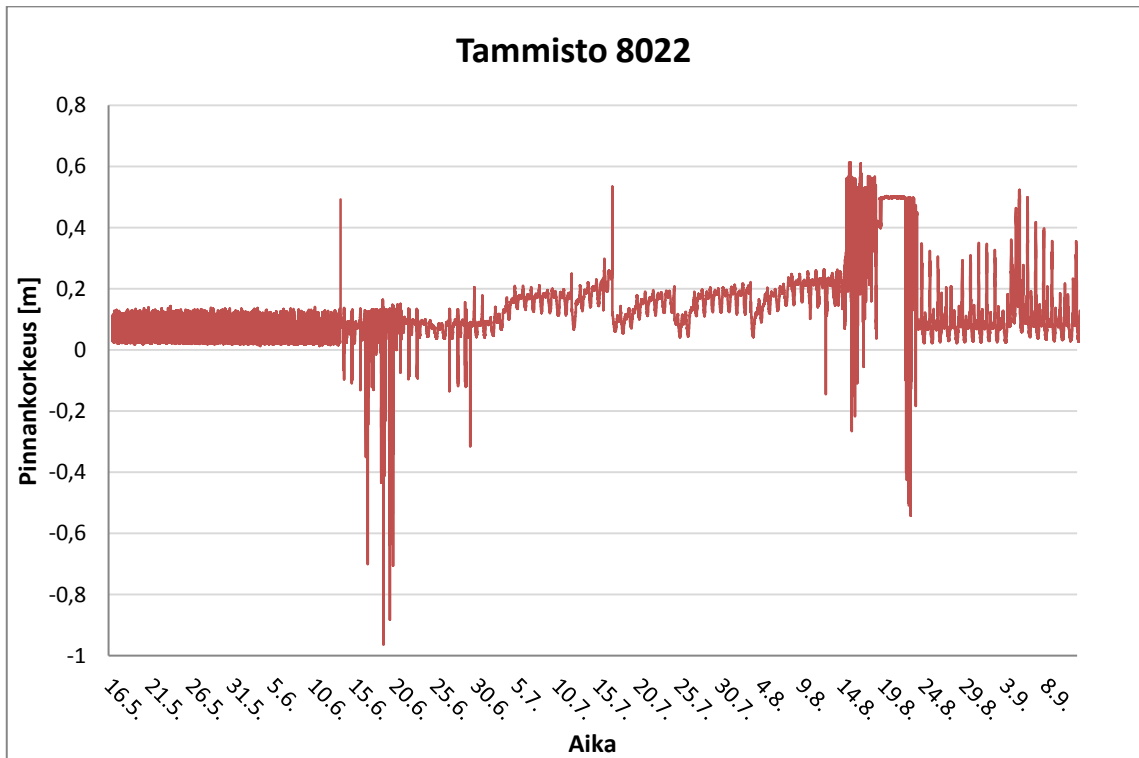
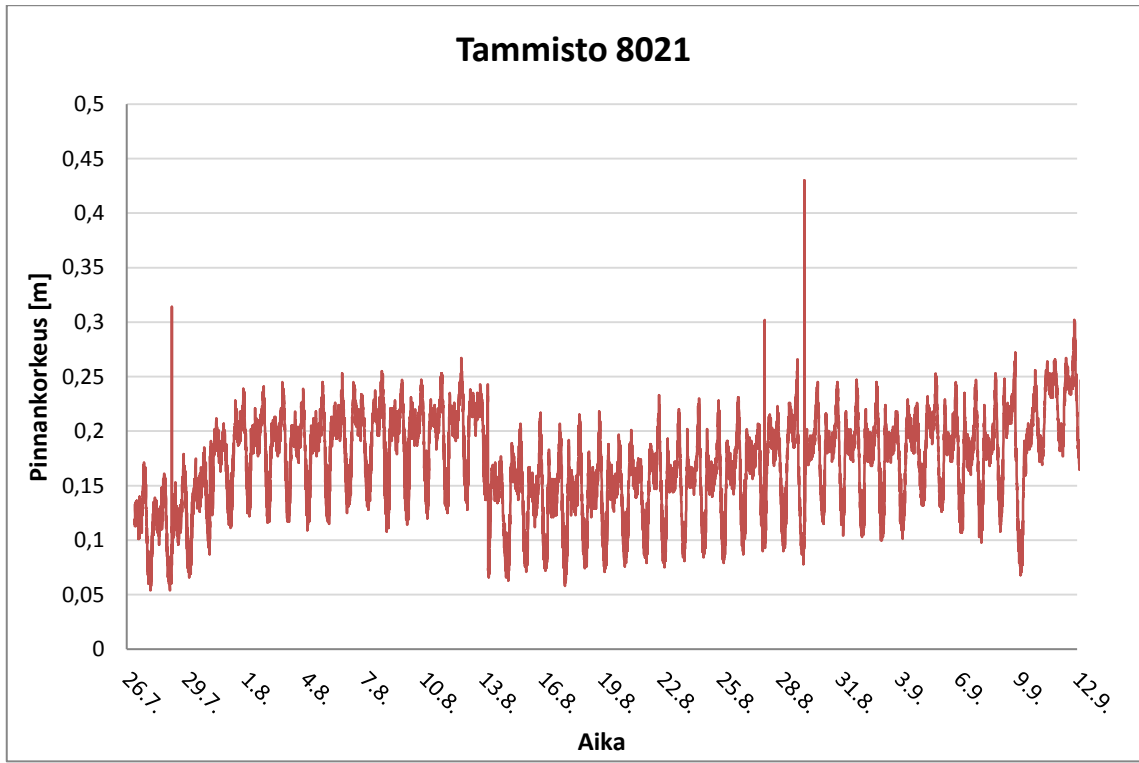
Korkeusjärjestelmänä on N2000.

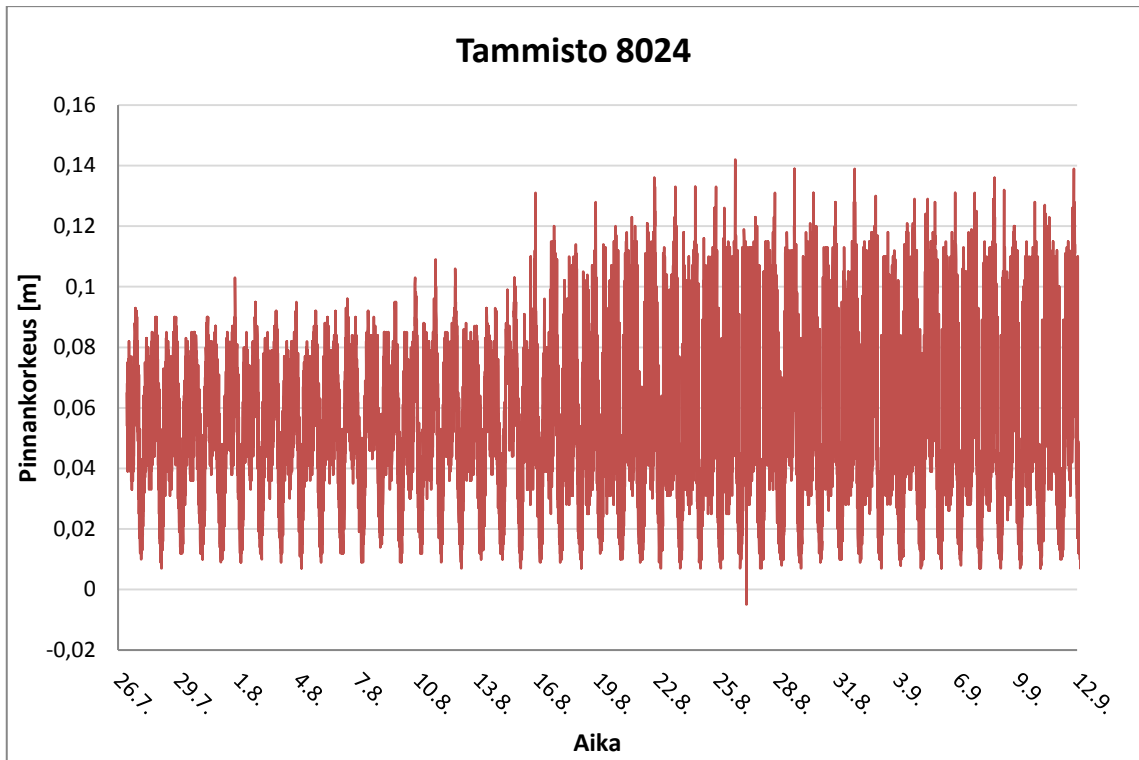
	SEK4483/8020	SEK4488/8023	SEK5122/8021
Kaivon pohjan korko (m)	1,27	0,79	2,915
Tulevan putken koron ja kaivon pohjan koron erotus (m)	0	0,09	0,015
Lähtevän putken koron ja kaivon pohjan koron erotus (m)	0	0	-0,015 (Mallissa käytetty arvoa 0)
Kaivoon liittyy muita putkia (kpl)	-	-	-

	YVK072/8025	JK99792/8022	JK117906/8024
Kaivon pohjan korko (m)	0,225	0,555	-0,25
Tulevan putken koron ja kaivon pohjan koron erotus (m)	0,21	0,03	0,02
Lähtevän putken koron ja kaivon pohjan koron erotus (m)	0,28	0	0
Kaivoon liittyy muita putkia (kpl)	3	-	1 (tontti)

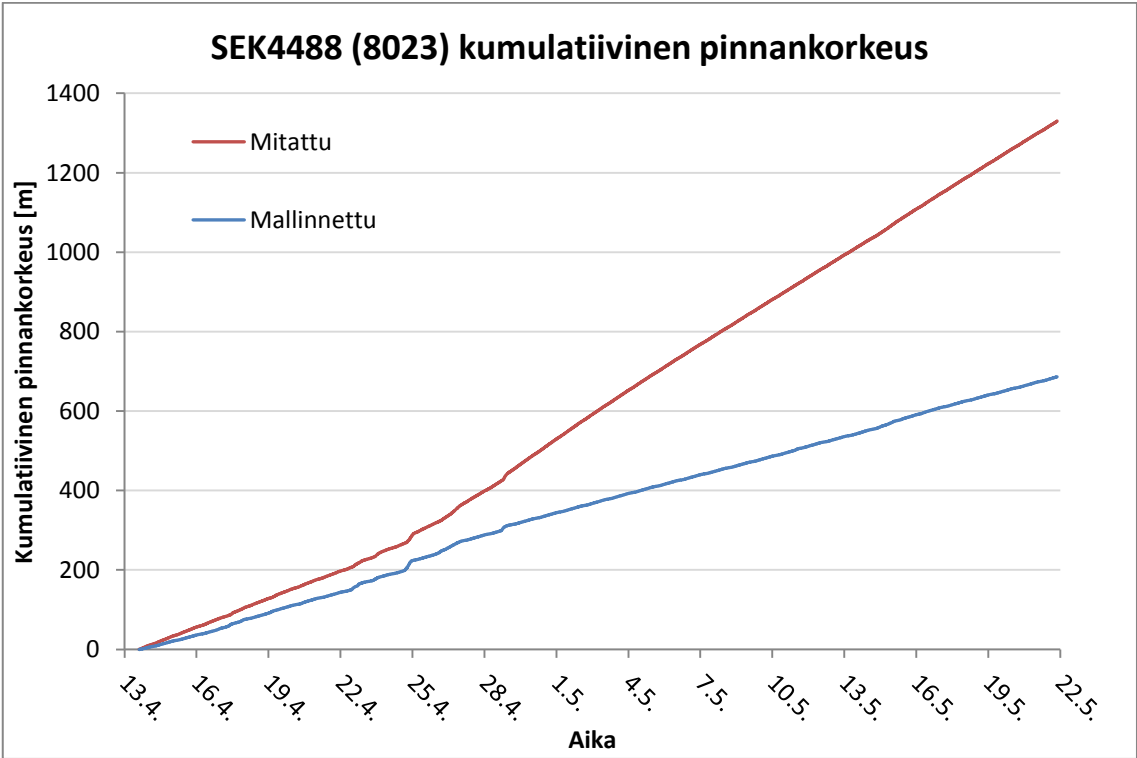
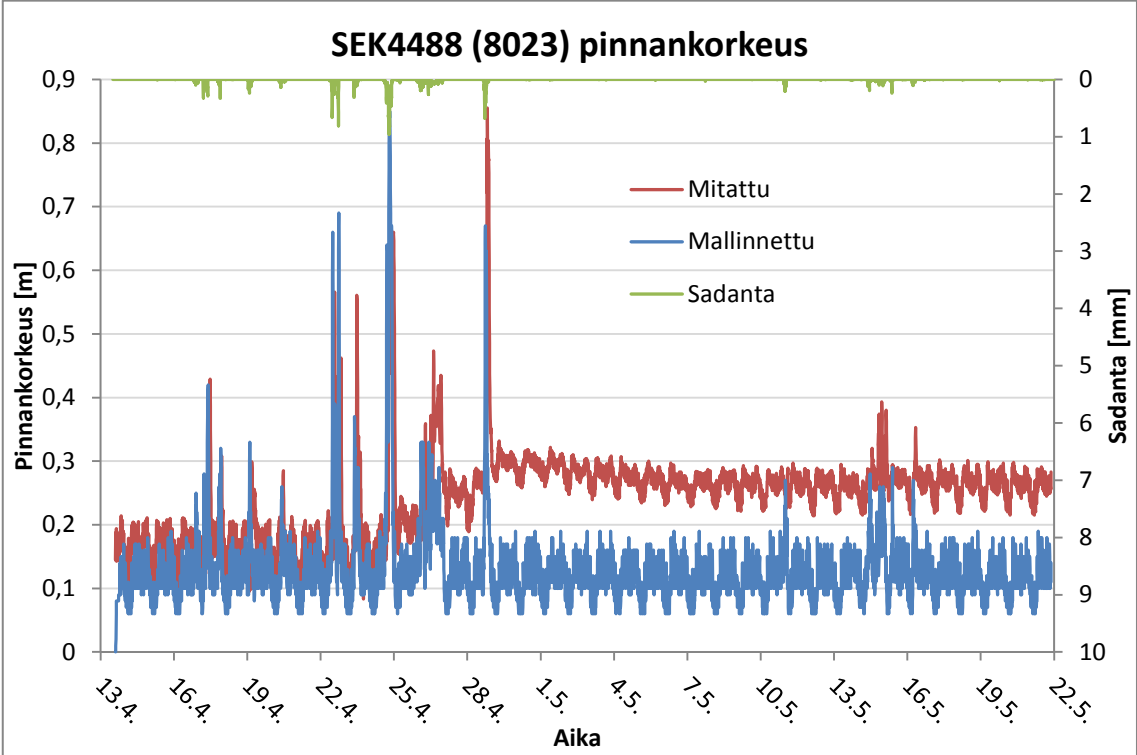
Liite 4. Mittaustulokset Tammiston mittauskaivoissa

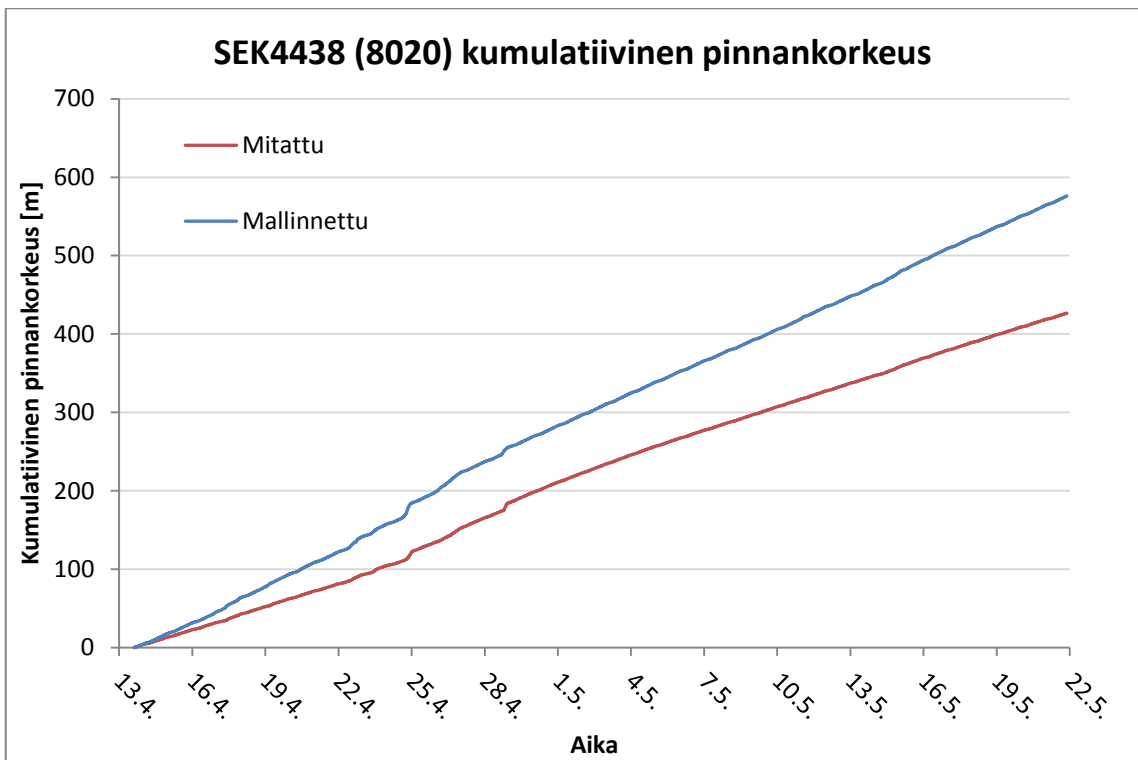
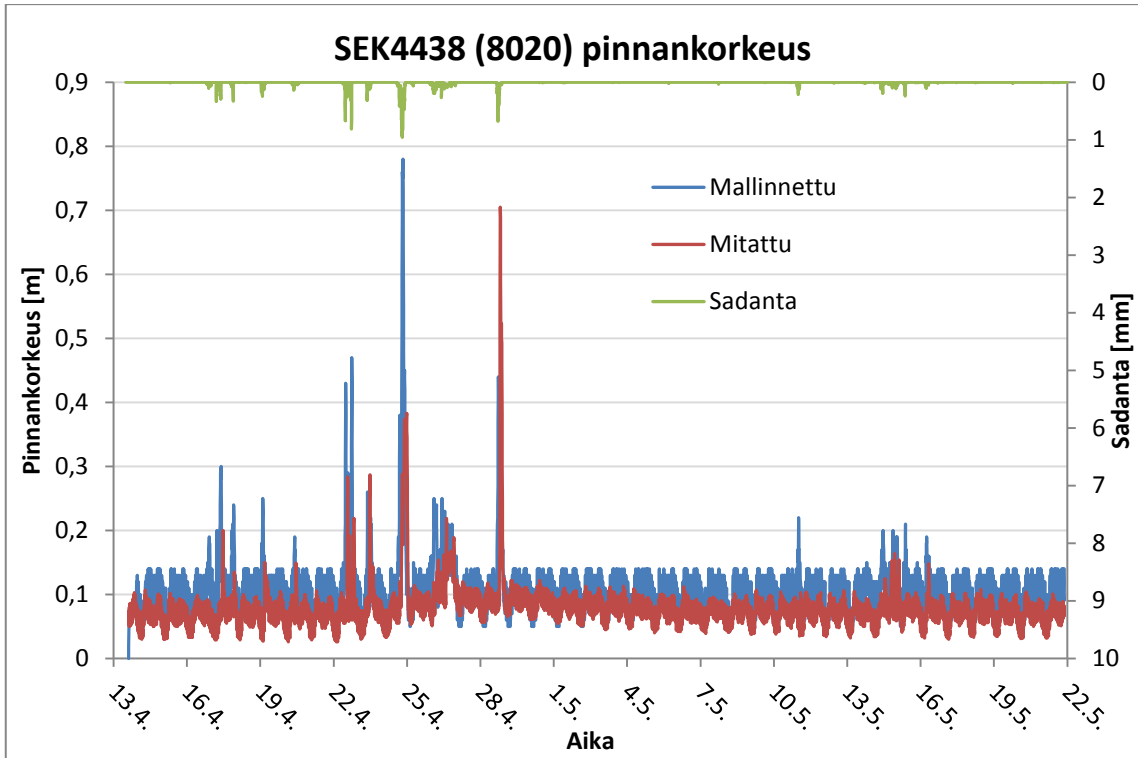
Tämä liite sisältää Tammistossa mitatut pinnankorkeudet mittauspisteittäin.

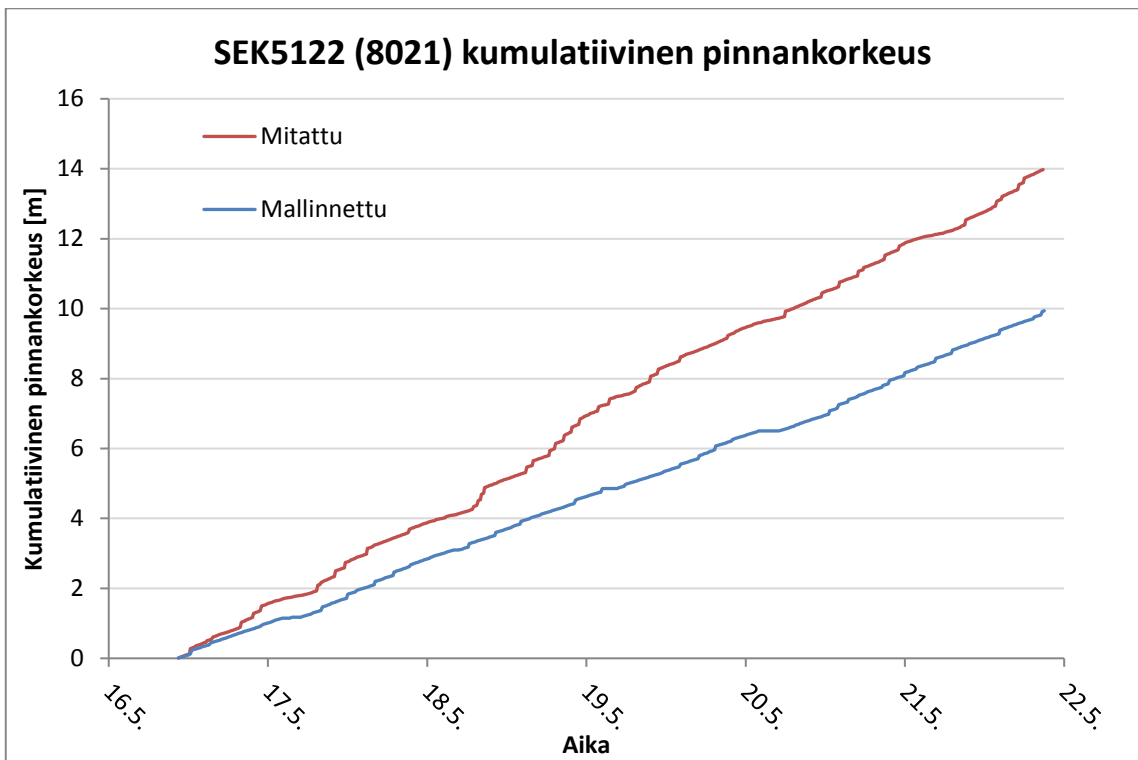
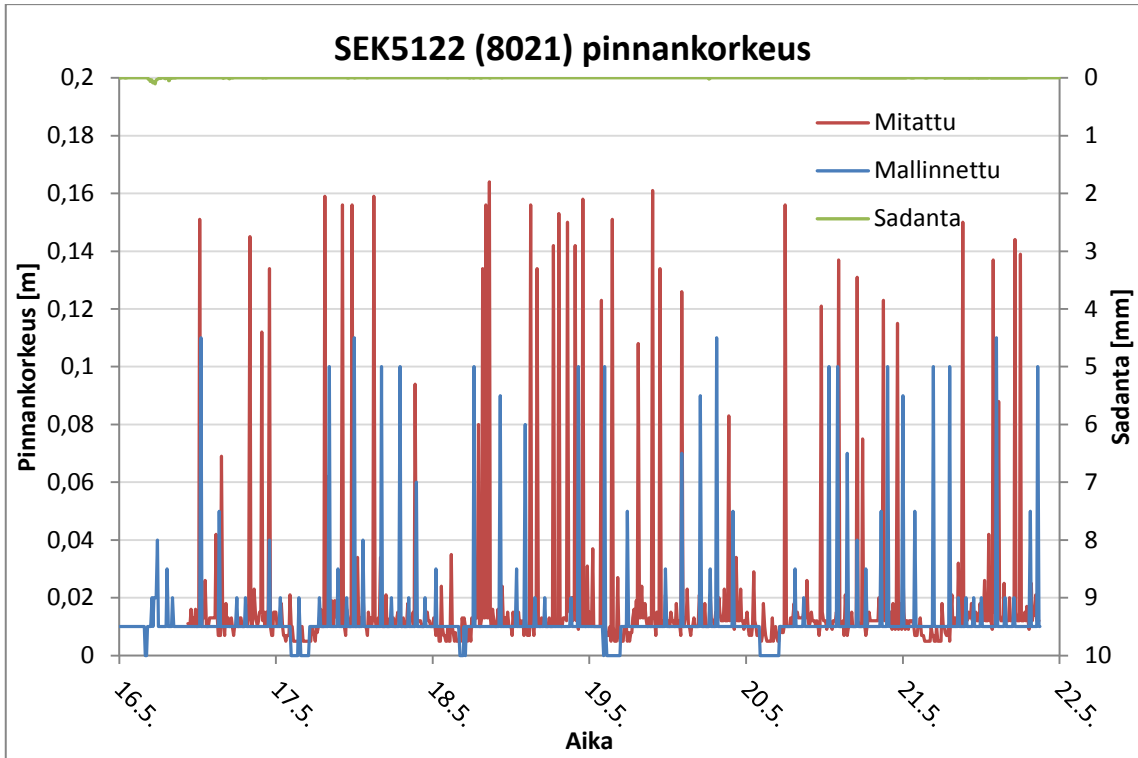


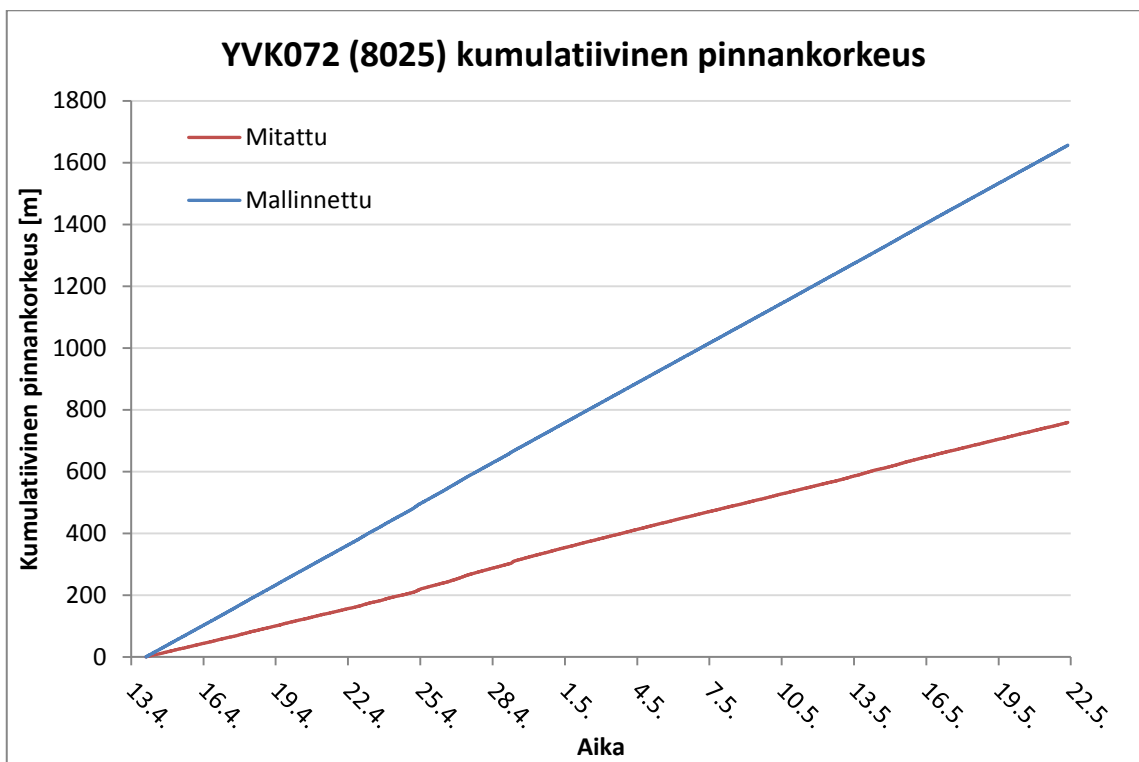
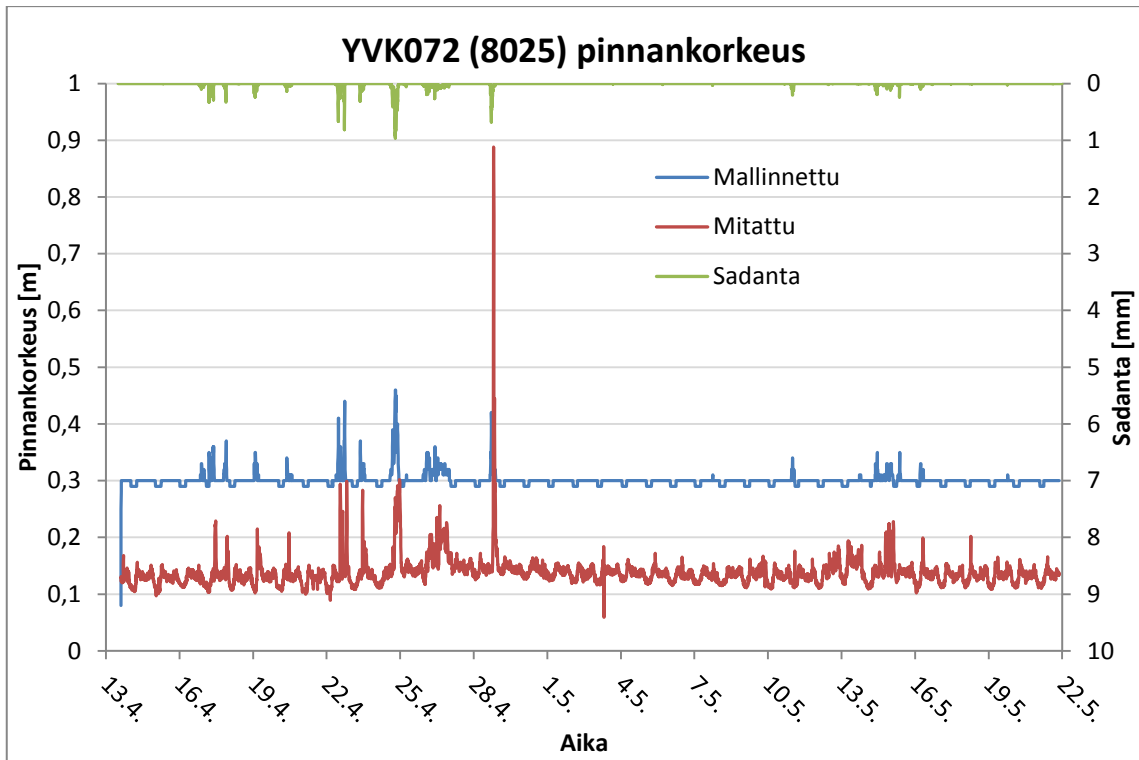


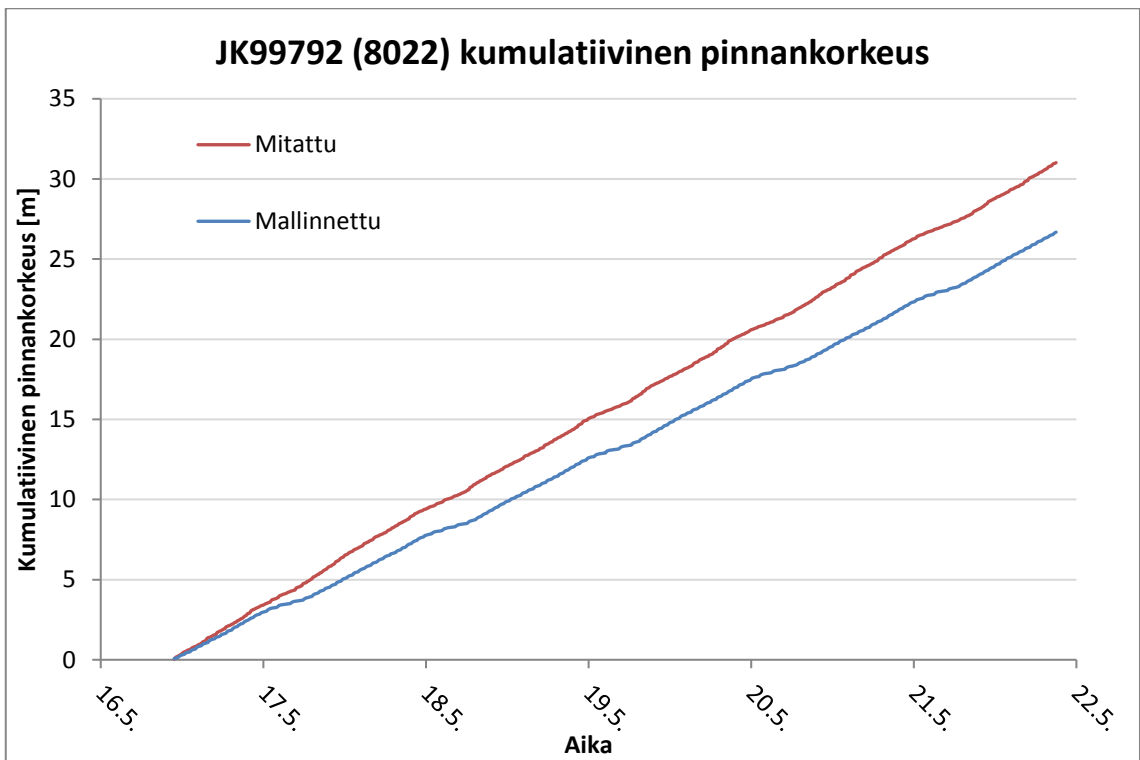
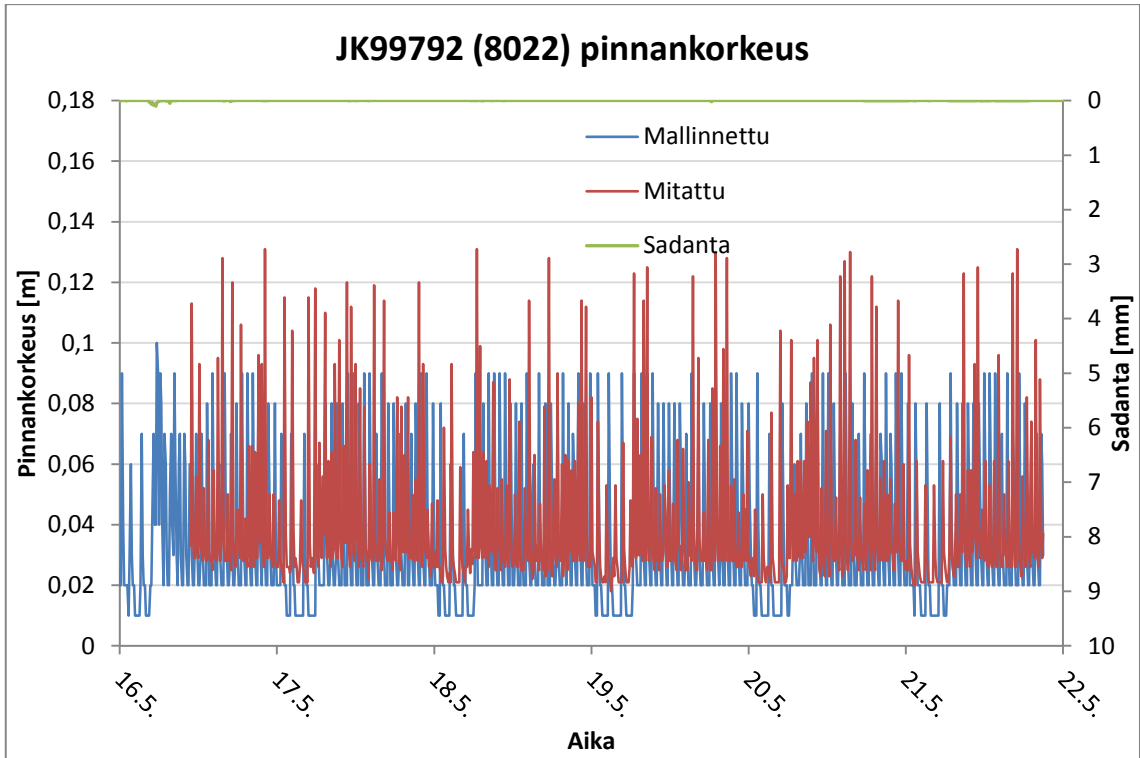
Liite 5. Kalibrointitulokset Munkkiniemen mittauskai-voissa

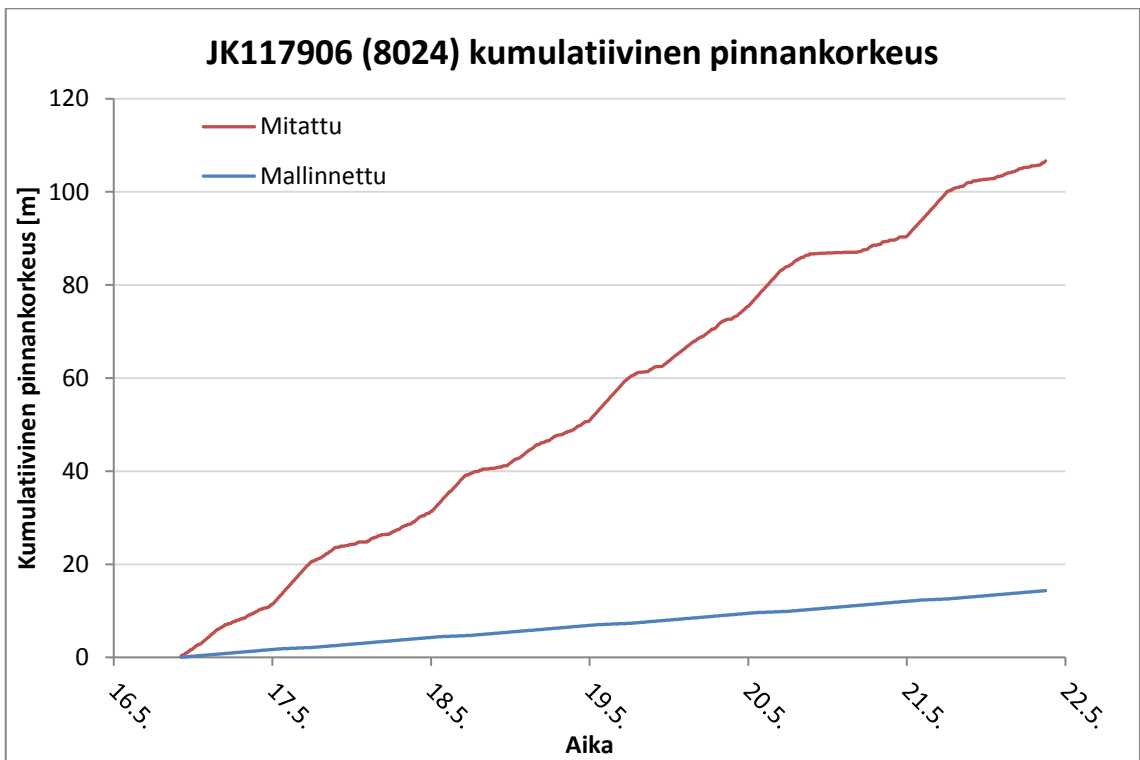
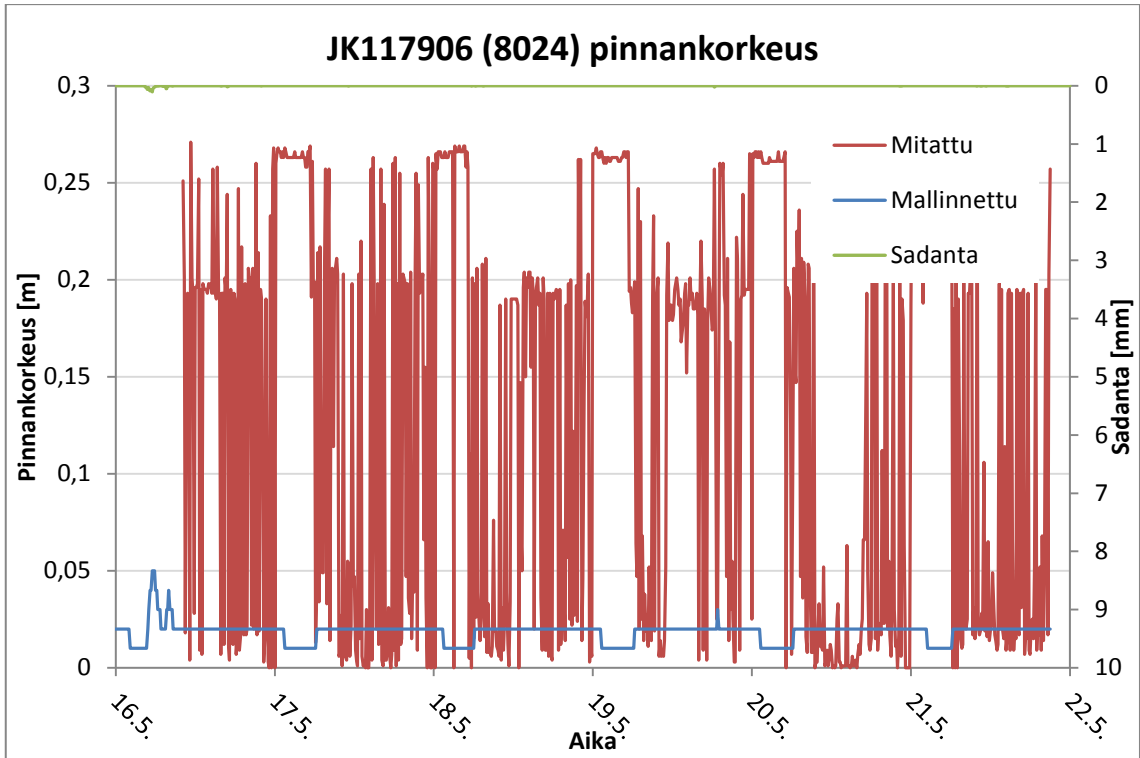












Liite 6. Validointitulokset Munkkiniemen mittauskaivoissa

