

TEKNILLINEN KORKEAKOULU  
Elektroniikan, tietoliikenteen ja automaation tiedekunta

Kimmo Söderholm

JÄRVEN JUOKSUTUKSEN LASKENTA VESISTÖMALLIJÄRJESTEL-  
MÄSSÄ

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin  
tutkintoa varten Espoossa 26.6.2009

Työn valvoja:

Professori Raimo P. Hämmäläinen, TkT

Työn ohjaaja:

Dosentti Bertel Vehviläinen, FT

Julkaisulupa koskien diplomityötä "Järven juoksutuksen laskenta Vesistömallijärjestelmässä".

Työn saa tallentaa ja julkistaa Aalto-yliopiston avoimilla verkkosivuilla. Muilta osin kaikki oikeudet pidätetään.

The document can be stored and made available to the public on the open internet pages of Aalto University. All other rights are reserved.

Helsingissä 11.6.2012  
Kimmo Söderholm



Tekijä: Kimmo Söderholm		
Työn nimi: Järven juoksutuksen laskenta Vesistömallijärjestelmässä		
Päivämäärä: 26.6.2009	Kieli: Suomi	Sivumäärä: 8+47
Tiedekunta: Elektroniikan, tietoliikenteen ja automaation tiedekunta		
Professori: Systeemianalyysi		Koodi: Mat-2
Valvoja: Professori Raimo P. Hämäläinen, TkT		
Ohjaaja: Dosentti Bertel Vehviläinen, FT		
<p>Suomen ympäristökeskuksen Vesistömallijärjestelmällä simuloidaan Suomen vesistöjä. Vesistömalli käyttää syötteinä säähavaintoja ja -ennusteita ja laskee veden kulkeutumisen vesistöissä. Mallissa säännöstelyyn järven juoksutuksen määrää säännöstelyohjeisto, joka on historian perusteella laadittu taulukko, josta juoksutus luetaan päivämäärän ja vedenkorkeuden mukaisesti. Säännöstelyohjeisto ei ota huomioon sää- ja tulovirtaamaennustetta ja järven valuma-alueen tilaa, minkä vuoksi juoksutukset ovat usein epärealistisia.</p> <p>Tässä diplomityössä on kehitetty menetelmä, jolla voidaan laskea säännöstelyyn järven juoksutus siten, että se perustuu sää- ja tulovirtaamaennusteeseen sekä valuma-alueen tilaan. Järven juoksutuslaskentaa varten määritellään päivämäärien mukaiset tavoitealueet vedenkorkeudelle ja juoksutukselle. Juoksutuslaskenta ratkaisee monitavoitteisen, deterministisen, epälineaarisen ja dynaamisen optimointimallin siten, että vedenkorkeus ja juoksutus pysyvät mahdollisuuksien mukaan tavoitealueilla. Optimointimallin sileä kustannusfunktio minimoidaan gradienttiin perustuvalla BFGS-algoritmilla.</p> <p>Poikkeavissa tilanteissa säännöstelyohjeistoa pitää muokata, jotta juoksutus olisi realistista. Juoksutuslaskennan juoksutus on aina tilanteeseen sopivaa, joten muokkaamista ei tarvita. Tämä säästää työaikaa ja parantaa vesistöennusteita. Järven vedenkorkeus ja juoksutus pysyvät säännöstelyrajojen puitteissa paremmin kuin nykyisellä säännöstelyohjeistolla simuloitaessa, ja juoksutus on tasaisempaa. Tässä diplomityössä on saavutettu sille asetetut ensisijaiset tavoitteet.</p>		
Avainsanat: Vesistömallijärjestelmä, vesistömalli, vesistöennusteet, HBV-malli, sadanta-valuntamalli, vesitase, vesistöjen säännöstely, optimointi, juoksutuksen optimointi, BFGS-menetelmä		

Author: Kimmo Söderholm

Title: Computation of lake outflow in WSFS

Date: 26.6.2009

Language: Finnish

Number of pages: 8+47

Faculty: Faculty of Electronics, Communications and Automation

Professorship: System analysis

Code: Mat-2

Supervisor: Professor Raimo P. Hämmäläinen, Dr.Tech.

Instructor: Docent Bertel Vehviläinen, Ph.D.

Watershed Simulation and Forecasting System WSFS simulates the hydrological cycle in watersheds over Finland. WSFS uses weather data as input, and hydrological forecasts are produced using weather forecast input. Outflow of regulated lake in WSFS is defined by regulation rubric, which is a table based on historical data. Regulation rubric contains suitable outflows according to date and water level. The current state of the catchment and weather forecast are not considered in regulation rubric, which often leads to unrealistic outflows.

This thesis focuses on a method to compute the outflow of a regulated lake by considering the current weather and inflow forecast and the state of the catchment. In outflow computation, date-dependent target regions are selected for lake water level and outflow in order to keep them acceptable. A multiobjective, deterministic, nonlinear and dynamic optimization problem is solved so that water level and outflow are kept inside target regions as much as possible. Minimization of the smooth objective function is done with gradient-based BFGS-method.

The regulation rubric needs adjusting at exceptional situations in order to produce realistic outflow. Outflow computation calculates the best suitable outflow for each individual situation, so there is no need for adjusting. This saves human resources and improves watershed forecasts. The water level and outflow violate regulation limits fewer times than with the regulation rubric, and the outflow is more stable. The primary objectives set for this thesis are met.

Keywords: WSFS, watershed model, watershed forecasts, HBV-model, rainfall-runoff-model, water balance, lake regulation, optimization, outflow optimization, BFGS-method

## Esipuhe

Tässä diplomityössä tehtiin Suomen ympäristökeskuksen Vesistömallijärjestelmään menetelmä säännöstellyn järven juoksutuksen laskentaan. Työ tehtiin varsinaisen leipätyön ohessa, enimmäkseen vuosien 2008 ja 2009 lauantai-iltapäivinä.

Haluan kiittää työn valvojaa professori Raimo P. Hämäläistä saamastani arvokkaasta ja opettavaisesta palautteesta, jota ilman työ ei olisi valmistunut tällaisena. Dosentti Bertel Vehviläistä kiitän työn ohjaamisesta ja kannustavasta tuesta läpi matkan.

Koko uljasta työyhteisöäni kiitän siitä, että työpäivät ovat tekemisen arvoisia. Eri-tyiskiitos kaikille, jotka lukivat ja kommentoivat tekstiäni, sekä heille, jotka neuvoivat minua ansiokkaasti. Suuri kiitos kuuluu myös vanhemmilleni, perheelleni ja ystäväilleni. Olette reippaasti suvainneet tätä touhua.

Helsinki, 16.6.2009

Kimmo Söderholm

# Sisältö

Tiivistelmä	ii
Tiivistelmä (englanniksi)	iii
Esipuhe	iv
Sisällysluettelo	v
Suureet ja lyhenteet	vii
<b>1 Johdanto</b>	<b>1</b>
<b>2 Vesistömallijärjestelmä</b>	<b>3</b>
2.1 Vesistömallin yleiskuvaus . . . . .	3
2.2 Vesistöaluejako . . . . .	3
2.3 Vesistömallin rakenne . . . . .	3
2.3.1 Sadantamalli . . . . .	3
2.3.2 Lumimalli . . . . .	4
2.3.3 Maavesimalli . . . . .	5
2.3.4 Pohjavesimalli . . . . .	5
2.3.5 Jokimallit . . . . .	6
2.3.6 Järvimallit . . . . .	6
2.4 Vesistömallin kalibrointi . . . . .	6
2.5 Vesistöennusteet . . . . .	6
2.6 Säännöstelyohjeisto . . . . .	7
<b>3 Järven säännöstelyn optimointi</b>	<b>11</b>
3.1 Säännöstely . . . . .	11
3.2 Yksittäisen säännöstelyaltaan dynamiikka ja rajoitteet . . . . .	12
3.2.1 Järvaltaan dynamiikka . . . . .	12
3.2.2 Ehdottomat ja joustavat rajoitteet . . . . .	13
3.3 Optimointimenetelmiä järven säännöstelyyn . . . . .	13
3.3.1 Lineaarinen ohjelmointi . . . . .	13
3.3.2 Epälineaarinen ohjelmointi . . . . .	14

3.3.3	BFGS-menetelmä . . . . .	15
<b>4</b>	<b>Säännöstelyn järven juoksutuslaskenta ennustesimulaatioissa</b>	<b>17</b>
4.1	Tulovirtaamaennusteet . . . . .	17
4.2	Yksittäisen järven säännöstelyn ohjaus . . . . .	18
4.3	Järviältäan dynamiikka . . . . .	18
4.4	Optimointimalli . . . . .	20
4.4.1	Ensimmäinen optimointimalli . . . . .	20
4.4.2	Paranneltu optimointimalli . . . . .	23
4.4.3	Lopullinen optimointimalli . . . . .	24
4.5	Juoksutuslaskennan kulku . . . . .	25
<b>5</b>	<b>Juoksutuslaskennan käyttö Kalajanjoen valuma-alueella</b>	<b>27</b>
5.1	Tavoitealueet vedenkorkeudelle ja juoksutukselle . . . . .	27
5.2	Tavoitealueiden painokertoimet . . . . .	30
5.3	Säännöstelyohjeistolla ja juoksutuslaskennalla toteutettujen vesistö- ennusteiden vertailu . . . . .	31
5.3.1	Kiljanjärven juoksutus . . . . .	31
5.3.2	Kiljanjärven vedenkorkeus . . . . .	34
5.3.3	Reis-Vuohtajärven tulovirtaama . . . . .	36
5.3.4	Reis-Vuohtajärven juoksutus . . . . .	37
5.3.5	Reis-Vuohtajärven vedenkorkeus . . . . .	38
<b>6</b>	<b>Yhteenveto</b>	<b>39</b>
6.1	Tulosten tarkastelu . . . . .	39
6.2	Juoksutuslaskennan arviointi ja jatkokehitys . . . . .	39
	<b>Viitteet</b>	<b>41</b>
	<b>Liite A</b>	<b>44</b>
	<b>Liite B</b>	<b>47</b>

# Suureet ja lyhenteet

## Suureet

$q$	Virtaama ( $m^3/s$ )
$w$	Vedenkorkeus ( $m$ )
$v$	Tilavuus ( $m^3$ )
$t$	Vuorokauden keskilämpötila ( $^{\circ}C$ )
$p$	Sadanta ( $mm/vrk$ )
$p_l$	Vesisadanta ( $mm/vrk$ )
$p_s$	Lumisadanta ( $mm/vrk$ )
$s$	Lumen vesiarvo ( $mm$ )
$s_s$	Kiinteä lumi ( $mm$ )
$s_l$	Lumen pidättämä sula vesimäärä ( $mm$ )
$v_s$	Painannevarasto ( $mm$ )
$v_m$	Maavesivarasto ( $mm$ )
$v_v$	Välivarasto ( $mm$ )
$v_g$	Pohjavesivarasto ( $mm$ )
$l_y$	Maan pintakerrokseen tuleva sadanta/sulanta ( $mm/vrk$ )
$l_i$	Tihkunta eli maavesivarastosta välivarastoon poistuva vesimäärä ( $mm/vrk$ )
$l_p$	Herunta eli välivarastosta pohjavesivarastoon siirtyvä vesi ( $mm/vrk$ )
$r$	Valunta ( $mm/vrk$ )
$r_v$	Välivarastosta muodostuva valunta ( $mm/vrk$ )
$r_g$	Pohjavesivarastosta muodostuva valunta ( $mm/vrk$ )
$h_m$	Maahaihdunta ( $mm/vrk$ )
$h_p$	Potentiaallinen haihdunta ( $mm/vrk$ )
$h_j$	Järvihaihdunta ( $mm/vrk$ )
$h_s$	Lumihaihdunta ( $mm/vrk$ )



## Lyhenteet

SYKE	Suomen ympäristökeskus
WSFS	Watershed Simulation and Forecasting System - Vesistömallijärjestelmä
IL	Ilmatieteen laitos
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts - Euroopan sääennustekeskus
EPS	Ensemble Prediction System - Euroopan sääennustekeskuksen tuottama parvisääennuste
HBV	Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning - Hydrologisen toimiston vesitaseosasto
LP	Linear Programming - lineaarinen ohjelmointi
NLP	Nonlinear Programming - epälineaarinen ohjelmointi
QP	Quadratic Programming - neliöllinen ohjelmointi
SLP	Sequential Linear Programmin - toistettu lineaarinen ohjelmointi
SQP	Sequential Quadratic Programmin - toistettu neliöllinen ohjelmointi
MOM	Method Of Multipliers - täydennetyt Lagrangen funktion menetelmä
GRG	Generalized Reduced Gradient - yleistetyt redusoidun gradientin menetelmä
KKT	Karush-Kuhn-Tucker
BFGS	Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno
L-BFGS	Limited memory BFGS

# 1 Johdanto

Vesistömallijärjestelmä WSFS [28] on Suomen ympäristökeskuksen operatiivinen, hydrologisia vesistöennusteita automaattisesti tuottava järjestelmä, jolla on monia käyttäjiä, tärkeimpinä säännöstelyn suunnittelijat, alueelliset ympäristökeskukset, voimalaitokset sekä pelastusviranomaiset. Vesistömallijärjestelmä laatii päivittäin hydrologiset ennusteet Suomen alueella oleville vesistöille. Ennustekuvat yli 600 kohteesta ovat julkisesti nähtävillä ympäristöhallinnon www-sivuilla osoitteessa <http://www.ymparisto.fi/vesistoennusteet>. Kaikkien kohteiden päivittäiset ennusteet ovat käyttäjien ja asiakkaiden saatavilla Vesistömallijärjestelmän www-pohjaisessa käyttöliittymässä.

Vesistömallijärjestelmä tuottaa ennusteet simuloimalla vesistömallia käyttäen syöteenä säähavaintoja ja -ennusteita. Simulaatioiden aloitusajanhetki on vuodenajasta riippuen 2-3 vuotta ennusteen alusta taaksepäin, jotta mallin tila ennusteen alkuhetkellä saadaan hydrologisten havaintojen avulla mahdollisimman oikeaksi.

Vesistömalliin on mallinnettu tuhansia järviä, joista useimmat purkavat vettä luonnonmukaisesti, jolloin järven lähtövirtaama määräytyy vedenkorkeuden perusteella. Luonnontilaisten järvien lisäksi vesistömalliin on mallinnettu säännöstellyt järvioltaat, joiden lähtövirtaaman eli juoksutuksen määrää todellisuudessa järven säännöstelyluvan haltija. Säännöstelyluvan haltija käyttää järven juoksutuspäätöksiä tehdessään apunaan kulloinkin käytössä olevia sää- ja vesistöennusteita sekä tietoa alaja yläpuolella olevien järvien ja vesistöalueiden tilasta.

Vesistöennusteita tehtäessä pitäisi tietää etukäteen, miten säännöstelijä aikoo järviä juoksuttaa, sillä juoksutukset vaikuttavat alapuolisten järvien ja jokien virtaamiin ja vedenkorkeuksiin. Säännöstelijät voivat syöttää Vesistömallijärjestelmään oman juoksutusennusteensa, joka kertoo kuinka paljon he aikovat juoksuttaa lähitulevaisuudessa. Jotkut säännöstelijät käyttävät näin Vesistömallijärjestelmää kokeillakseen eri juoksutusvaihtoehtojen mahdollisia skenaarioita. Vesistömalliin pitää määrittää ennustejakson juoksutukset mielekkäällä tavalla myös silloin, kun juoksutusennustetta ei ole syötetty.

Nyky muodossa säännösteltyjen järvien tulevat juoksutukset, eli juoksutukset simulaatioiden ennustejaksolla, määrätään nk. säännöstelyohjeiston perusteella. Säännöstelyohjeistot ovat taulukoita joista kunkin säännöstellyn järven juoksutus luetaan päivämäärän ja vedenkorkeuden perusteella. Säännöstelyohjeistot ovat laadittu historiatietojen perusteella, ja niiden juoksutukset eivät aina ole tilanteisiin sopivia. Usein ohjeistoja joudutaan muokkaamaan, jotta juoksutus olisi tilanteeseen sopivaa. Mitä pidemmälle tulevaisuuteen simuloidaan, sitä huonommin säännöstelyohjeistot sopivat säännösteltyjen järvien juoksutusten määrittämiseen. Ilmastomuutoslaskelmiin, joissa simulointijakso ulottuu 2050-luvulle asti, on pitänyt tehdä erilliset järvikohtaiset säännöstelyohjeistot.

Säännöstelyohjeiston käyttäminen säännöstellyn järven juoksutuksen määrittämiseen on ongelmallista, koska tällöin ei huomioida lainkaan käytössä olevaa järvikohtaista tulovirtaamaennustetta. Tulovirtaamaennuste on parviennuste, joka koostuu 50:stä

yhtä todennäköisestä tulovirtaama-aikasarjasta. Tulovirtaamaennuste pohjautuu käytettävään sääennusteeseen ja mallin tilaan ennusteen alkuhetkellä. Ennustejaksolla mallia siis simuloidaan siten, että kukin ennusteparven 50 jäsenestä simuloidaan erikseen. Näin saadaan ennusteparvi säännöstellyn järven juoksutukselle.

Tämän diplomityön tarkoituksena on kehittää juoksutuksen laskentamenetelmä, jota käyttämällä säännösteltyjen järvien purkautuminen ennustesimulaatioissa olisi tulovirtaamaennusteen mukainen. Menetelmän pitää olla nopea, jottei ennustesimulaatioiden laskenta-aika pitene merkittävästi. Simulaatioiden ennustejakso ulottuu 1,5 vuoden päähän ennusteen alkuhetkestä, jolloin yhden säännöstellyn järven juoksutuslaskennassa ratkaistaan 50 kertaa optimointiongelma, jossa määritetään determinististä tulovirtaamaa vastaavat juoksutukset n. 500 vuorokauden ajalta.

Luvussa 2 tarkastellaan Vesistömallijärjestelmää, vesistömallin rakennetta ja vesistöennusteita. Luvussa 3 käydään läpi säännöstellyn järven optimointiongelman periaatteita ja esitellään aiheeseen liittyviä optimointimenetelmiä. Tässä diplomityössä kehitetty juoksutuslaskenta ja optimointimallit käydään läpi luvussa 4. Luvussa 5 esitellään juoksutuslaskennalla saadut simulointitulokset ja verrataan niitä säännöstelyohjeiston tuloksiin. Luvussa 6 tehdään työn ja tuloksien yhteenveto, arvioidaan juoksutuslaskentaa ja tarkastellaan jatkokehitysmahdollisuuksia.

## 2 Vesistömallijärjestelmä

Vesistömallijärjestelmä WSFS on Suomen ympäristökeskuksen operatiivinen, hydrologisia vesistöennusteita automaattisesti tuottava järjestelmä. Vesistömallijärjestelmän käyttäjiä ovat alueelliset ympäristökeskukset, säännöstelyjen suunnittelijat, vesivoimalaitokset, pelastusviranomaiset sekä vesistöjen virkistyskäyttäjät kuten kesämökkiläiset. Vesistömallijärjestelmä tuottaa automaattisesti reaaliaikaisia ennusteita vesistöjen tilasta n. 1000 ennustepisteelle. Ennusteet ovat julkisesti nähtävillä ympäristöhallinnon internet-sivuilla osoitteessa <http://www.ymparisto.fi/vesistoennusteet>.

### 2.1 Vesistömallin yleiskuvaus

Vesistömalliin on mallinnettu Suomen alueella olevat vesistöt. Malli koostuu n. 6000 itsenäisestä osa-alueesta, jotka uomaverkosto kytkee toisiinsa. Valuntamalli pohjautuu ruotsalaiseen yksinkertaiseen HBV-malliin [3], jossa maan pinnalle tuleva vesi (sadanta) kulkee lumi-, maa- ja pohjavesivarastojen läpi, ja poistuu valuntana. Vain oleellimmat hydrologiset prosessit on mallinnettu, mutta lumen sulamisprosessi on kuvattu HBV-mallia realistisemmin. Valuntamallin lisäksi vesistömalliin on kuvattu suurimmat joet ja järvet.

### 2.2 Vesistöaluejako

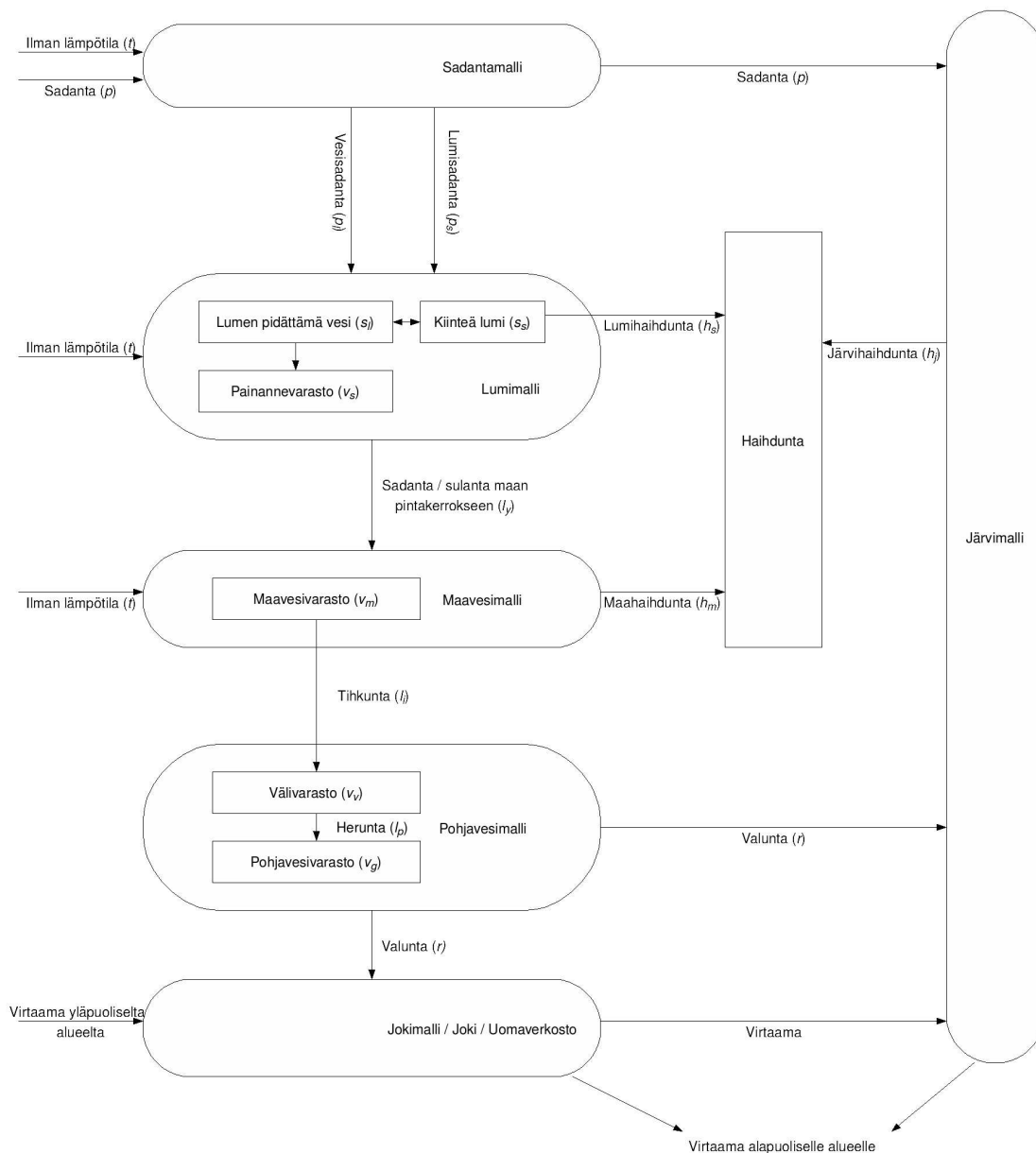
Vesistömallin osa-alueisiin jako pohjautuu Suomen valuma-aluejakoon [5]. Valuma-aluejako jakaa vesistöt 1., 2. ja 3. jakovaiheen valuma-alueisiin. 1. jakovaiheen alueet on jaettu 2. jakovaiheen alueisiin, jotka on jaettu edelleen 3. jakovaiheen alueisiin. Esimerkiksi Kymijoen vesistöalueen 3. jakovaiheen valuma-alue 14.416 (Kolunjoen valuma-alue) kuuluu 2. jakovaiheen alueeseen 14.41 (Keiteleen eteläosan alue), joka kuuluu 1. jakovaiheen alueeseen 14.4 (Viitasaaren reitin vesistöalue). Pienemmillä vesistöillä ei tarvita 1. tai 2. jakovaihetta. Vesistömallin osa-alue on yleensä vesistöjaon 3. jakovaiheen alue.

### 2.3 Vesistömallin rakenne

Vesistömalli kuvaa veden valumisen maan pinnalta maaperän kautta pintavesiin, jokiin ja järviin. Syötteenä toimii sadanta- ja lämpötilatietojen lisäksi yläpuolisilta osa-alueilta virtaava vesi. Malli rakentuu erityyppisistä toisiinsa kytketyistä veden varastoista kuvan 1 mukaisesti.

#### 2.3.1 Sadantamalli

Sadantamalli saa syötteenään vuorokauden keskilämpötilan ja aluesadannan. Sadantamalli jakaa aluesadannan keskilämpötilan perusteella lumi- ja vesisateeksi. Suo-



Kuva 1: Vesistömallin [28] rakenne.

raan järvioltaaseen satava vesi lisätään järvivarastoon, muualle satava vesi lumi- ja vesisateena lumimallille.

### 2.3.2 Lumimalli

Lumimallissa simuloidaan lumen kertymistä ja sulamista yksinkertaisella astepäivämallilla [27]. Lumimalli käsittelee kolmea varastoa: kiinteää lunta  $s_s$ , lumen pidättämää vettä  $s_l$  ja painannevarastoa  $v_s$ . Lumimallin syöte lumisade  $p_s$  lisätään kiinteään lumen varastoon  $s_s$ , vesisade  $p_l$  lumen pidättämään veteen  $s_l$ . Lumen pi-

dättämä vesi on sulaa vettä kiinteään lumen seassa. Lumessa vesi muuttuu muotoaan kiinteään lumen ja lumen pidättämän veden välillä sulamisen ja uudelleenjäätymisen myötä. Lumen vesiarvo  $s = s_s + s_l$  kertoo kuinka paljon vettä lumesta tulisi jos se sulatettaisiin.

Lumi kykenee pidättämään vettä tiettyyn kylläisyysrajaan saakka. Lumen ollessa kylläinen vedestä (eli  $s_l$  on saavuttanut maksimivarastotilavuutensa) kylläisyysrajan ylittävä osa lumessa olevasta vedestä poistuu lumesta. Osa lumesta poistuvasta vedestä varastoituu painannevarastoon  $v_s$ . Painannevarastona voidaan käsittää luonnossa keväisin lumipeitteen alla olevat vesilammikot. Painannevarastoon siirtyy vettä vain lumen sulaessa.

### 2.3.3 Maavesimalli

Maavesivarasto poikkeaa monista muista vesistömallin varastoista siten, että kaikki maavesimalliin tuleva vesi ei kulje maavesivaraston läpi. Maavesimallin syötteestä eli maan pintakerrokseen tulevasta vedestä  $l_y$  osa varastoituu maavesivarastoon, loput valuvat pohjavesimallille tihkuntana  $l_i$ . Kaikki tuleva vesi varastoituu maavesivarastoon, kun se on tyhjä, ja kaikki vesi valuu suoraan maavesimallin läpi, kun varasto on täynnä.

Maavesivarastosta tapahtuu haihduntaa  $h_m$ , joka lasketaan potentiaalisen haihdunnan  $h_p$  avulla. Potentiaalinen haihdunta  $h_p$  kuvaa suurinta mahdollista todellista haihduntaa, eli sitä miten paljon vettä haihtuisi laakeasta vesiastiasta. Potentiaalinen haihdunta  $h_p$  riippuu lähinnä ilman lämpötilasta ja sadannasta. Maahaihdunta  $h_m$  on verrannollinen maavesivaraston kokoon  $v_m$  ja potentiaaliseen haihduntaan  $h_p$ .

### 2.3.4 Pohjavesimalli

Välivarastosta vesi purkautuu sekä valuntana  $r_v$  uomaverkostoon että heruntana  $l_p$  pohjavesivarastoon. Pohjavesivarastosta vesi purkautuu valuntana  $r_g$  uomaverkostoon. Varastojen purkautuminen riippuu varastojen koosta.

Välivaraston täyttyminen ja purkautuminen on hyvin nopeaa, vesi viipyy varastossa yleensä muutamia päiviä. Kuivempina aikoina välivarasto on tyhjänä. Suurin osa välivesivaraston purkautumisesta kohdistuu uomaverkostoon. Välivesivarastosta uomaverkostoon purkautuva vesi on usein merkittävä tekijä tulvahuippujen muodostumisessa.

Pohjavesivaraston tilavuuden muutos on hidasta; sekä herunta että varaston purkautuminen on verrattain pientä. Pohjavesivaraston valunnan voidaan ajatella ylläpitävän uomaverkoston perusvirtaamaa.

### 2.3.5 Jokimallit

Jokimallissa alueen vesireitit kuvataan yhtenä alueen läpi kulkevana jokiuomana, joka on mallinnettu lukuisina perättäisinä pieninä altaina, kynnyksinä, joissa vesi valuu ylemmästä alempaan. Jokimallin tehtävänä on kuvata viive, joka syntyy yläpuoliselta alueelta tulevan veden ja alueen omien valuntavesien kulkiessa alueen halki. Tietyn joen pisteen virtaama saadaan kyseisen pisteen kynnyksen purkamana vesimääränä.

### 2.3.6 Järvimallit

Järvivarastoon tulee vettä jokiuomista sekä järven omalta valuma-alueelta. Järvivarastosta poistuu vettä haihtumalla sekä virtaamalla järven purkautumispisteistä. Järvihaihduntaan vaikuttavat järven pintalämpötila, auringon säteilyenergia ja sadanta. Järven purkautumispisteen virtaama määräytyy vedenkorkeuden perusteella. Tärkeimpien järvien reaaliaikaista vedenkorkeutta havainnoidaan automaattisesti, samoin kuin säännösteltyjen järvien lähtövirtaamaa. Järven tilavuuden, vedenkorkeuden ja pinta-alan vastaavuudet on kirjattu wva-käyrään.

## 2.4 Vesistömallin kalibrointi

Malli sovitetaan havaintoihin kalibroimalla laskentaan vaikuttavat parametrit niin että simuloitujen ja havaitujen vedenkorkeudet, virtaamat ja lumen vesiarvot vastaavat mahdollisimman hyvin toisiaan. Kalibroinnissa minimoidaan havaintojen  $X_{t,obs}$  ja simuloitujen arvojen  $X_{t,sim}$  erotusten neliösummaa

$$F^2 = \sum_t (X_{t,obs} - X_{t,sim})^2. \quad (1)$$

Optimointialgoritmina käytetään suuriulotteiseen ongelmaan soveltuvaa Hooken ja Jeevesin algoritmia [11]. Optimoitavia osa-aluekohtaisia parametrejä on 10-20 kpl. Kalibrointi on optimoinnin helpottamiseksi jaettu osiin: Ensimmäisessä vaiheessa kalibroidaan havaittuja lumen vesiarvoja vastaan sadanta- ja lumimallien parametrit, koska vain ne vaikuttavat lumen vesiarvon laskentaan. Jälkimmäisessä vaiheessa kalibroidaan loput parametrit virtaama- ja vedenkorkeushavaintoja vastaan.

## 2.5 Vesistöennusteet

Ennustesimulaatio aloitetaan keskimääräisestä varastotilanteesta, 2-3 vuotta ennen ennustepäivää, jotta malli ehtii mukautua ja varastotilavuudet ovat ennusteen alkuhetkellä mahdollisimman realistiset. Simulaatio alkaa 1.8, koska tuona päivänä voidaan lumivaraston olettaa olevan tyhjä. Historiajaksolla mallin syötteenä käytetään sade- ja lämpötilahavaintoja, ennustejaksolla Euroopan sääennustekeskiksen ECMWF:n tuottamia parviennusteita (*Ensemble Prediction System, EPS*) [14].

EPS:ssä sadannan ja lämpötilan jakaumaa kuvataan ennusteparvella, jonka kukin vaihtoehtoinen jäsen on yhtä todennäköinen. Jäsenet on luotu häiritsemällä ilmastonmallin alkutilaa ennen simulaatiota. 15 vuorokautta pitkän EPS:n jälkeen käytetään säätietona samankaltaista, ECMWF:n tuottamaa 100 vuorokauden kausisääennustetta, jonka jälkeen käytetään historiasta säähavainnointia vuodesta 1961 alkaen.

Ennustekuvat piirretään 3 eri jaksolta:

- Lyhyen ennustekuvan jakso alkaa 11 vuorokautta ennen ennustepäivää, ja päättyy 11 vuorokauden päähän.
- Keskipitkän ennustekuvan jakso alkaa kuukauden ennen ennustepäivää, ja päättyy 3 kuukauden päähän.
- Pitkän ennustekuvan jakso alkaa vuoden ennen ennustepäivää, ja päättyy vuoden päähän.

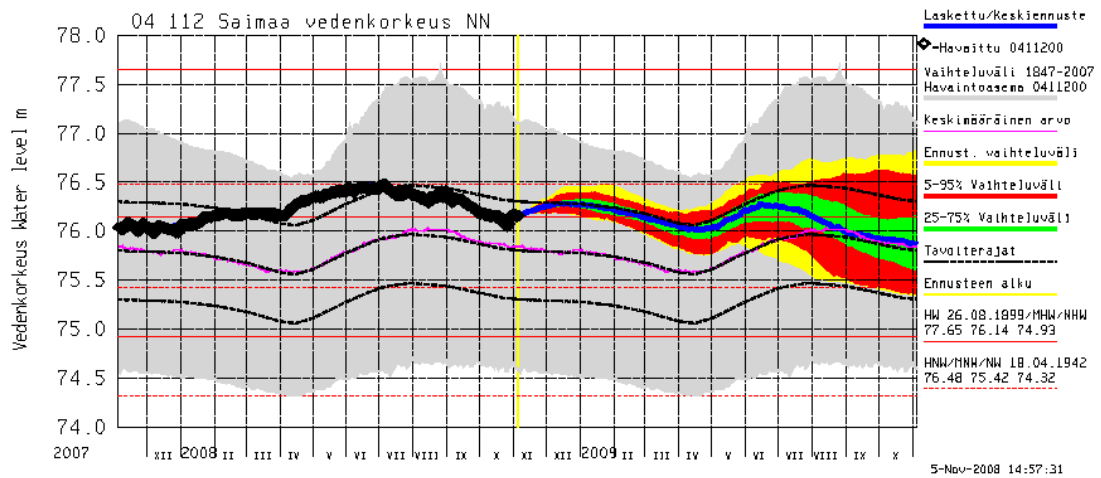
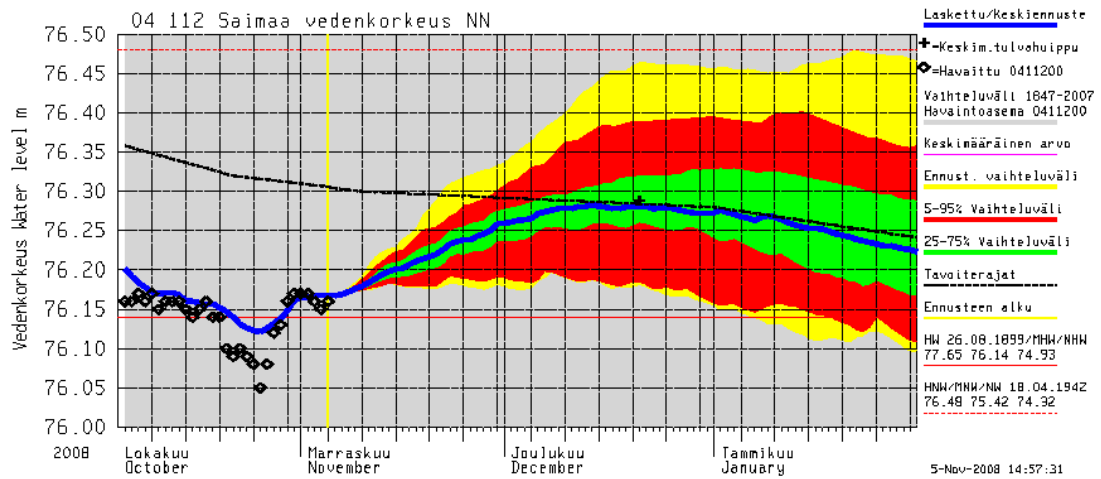
Kuvassa 2 esimerkkinä kaksi Saimaan vedenkorkeusennustetta, joissa ennustepäivä (keltainen pystyviiva) jakaa kuvan historia- ja ennustejaksoon. Jakaumaennustekuviin piirretään päivittäiset 0%, 5%, 25%, 50%, 75%, 95% ja 100% fraktiilit. Kuvassa 3 on jakauman lisäksi keski- ja ääriennusteet.

## 2.6 Säännöstelyohjeisto

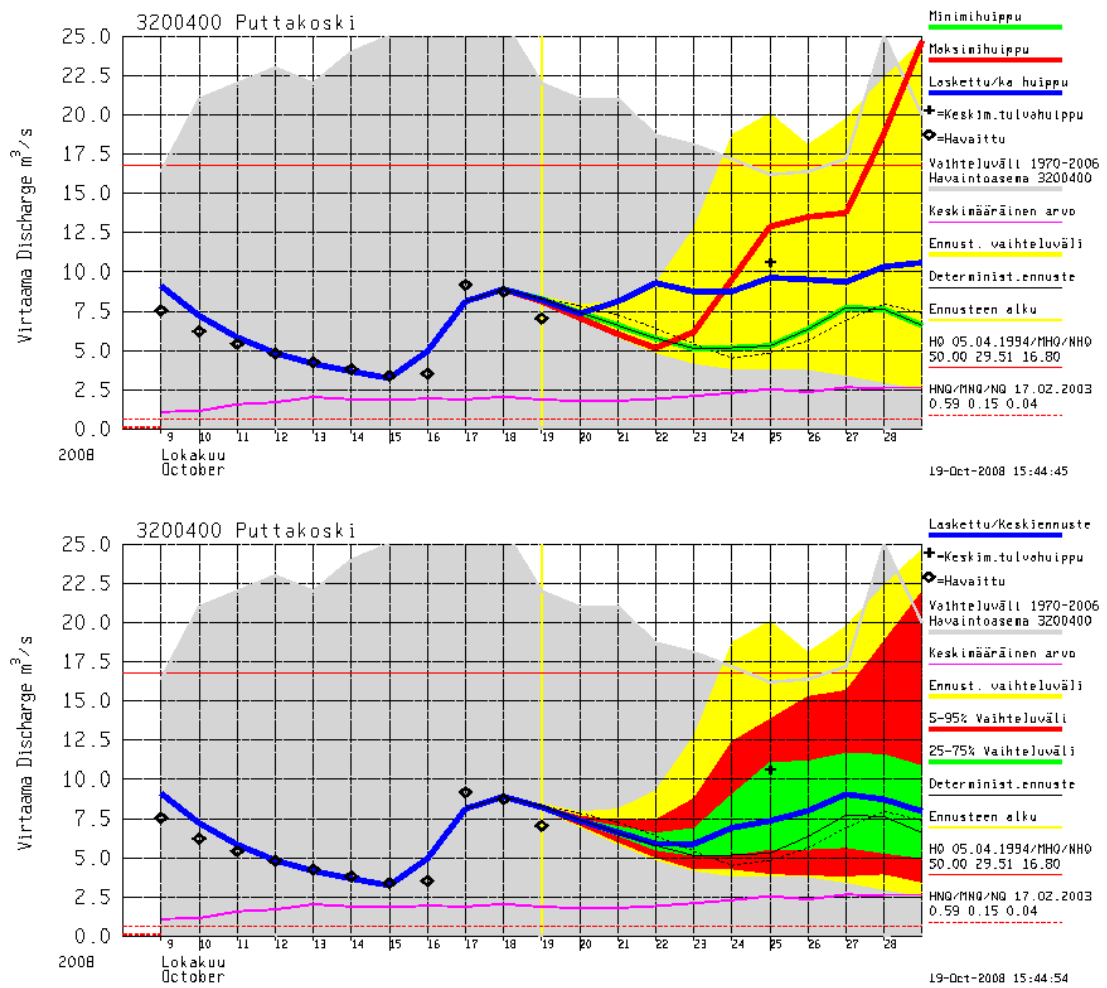
Vesistömallissa säännöstelyjen järvien purkautuminen määräytyy säännöstelyohjeiston mukaisesti. Säännöstelyohjeisto on historian perusteella laadittu taulukko, joka määrää juoksutuksen vedenkorkeuden ja päivämäärän perusteella. Kuvassa 4 on esimerkkinä Päijänteen säännöstelyohjeisto. Juoksutus luetaan päivämäärän ja vedenkorkeuden mukaisesti, juoksutusviivoista interpoloimalla.

Säännöstelyohjeiston mukainen juoksutus on usein epärealistinen. Esimerkiksi poikkeuksellisen runsasvetisenä ajankohtana joudutaan säännöstelyohjeisto muokkaamaan tilapäisesti erilaiseksi, jotta ennuste olisi realistinen. Ilmastonmuutoslaskelmia varten joudutaan laatimaan erilliset, eri ilmastoskenaarioihin sopivat säännöstelyohjeistot.

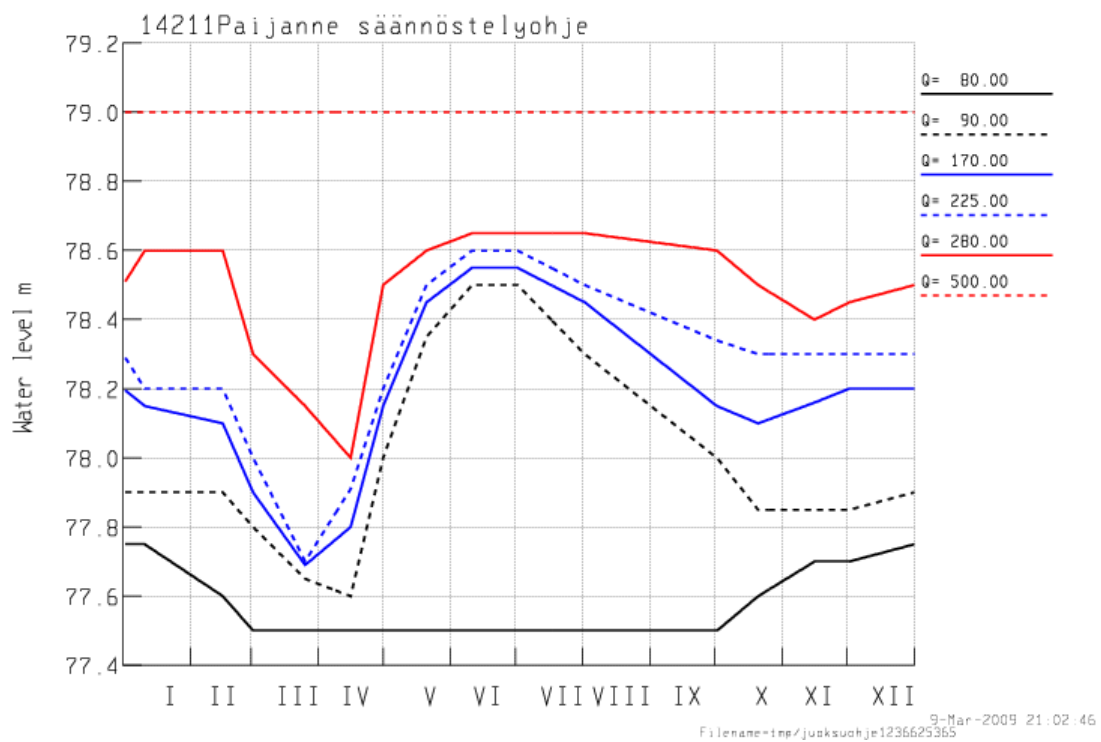




Kuva 2: Saimaan vedenkorkeusennuste 5.11.2008.



Kuva 3: Puttakosken virtaaman keski- ja ääriennusteet sekä jakaumaennuste 19.10.2008.



Kuva 4: Päijänteen säännöstelyohjeisto. Esimerkiksi marraskuun 1. päivänä vedenkorkeuden ollessa 78.4m juoksumäärä on noin  $260\text{m}^3/\text{s}$ .

### 3 Järven säännöstelyn optimointi

Valtaosa säännöstelyn optimoinnin tutkimuksesta kohdistuu järviryhmän säännöstelyn ja sähköntuotannon optimoimiseen, koska se on yksittäisen järven säännöstelyn optimointia mielenkiintoisempi ja oleellisesti haastavampi ongelma. Yksittäisen järven optimointi on haasteellista, jos tulovirtaamaennusteissa on paljon epävarmuutta kun pyritään välttämään järven alapuolisen tulva-alueen vahinkoja. Tässä luvussa esitellään säännöstelyn yleisiä periaatteita ja tarkastellaan muutamaa kirjallisuudessa kuvattua järven säännöstelyyn soveltuvaa optimointimenetelmää.

#### 3.1 Säännöstely

Säännöstelyn tarkoituksena on saada vesistö tai sen osa soveltumaan paremmin moninaisiin käyttötarkoituksiin. Säännöstely toimeenpannaan käytännössä rakentamalla yksi tai useampi pato, joiden avulla veden juokсутusta voidaan jatkuvasti säädellä vaikuttaen näin virtaamiin ja vedenkorkeuksiin [24]. Usein padon yhteydessä on voimalaitos.

Säännöstelyn tavoitteet ovat usein moninaiset, tyypillisesti säännöstelyllä pyritään estämään tulvavahinkoja, lisäämään vesivoimatuotantoa sekä edistämään vesiliikennettä ja uittoa. Myös vesistöjen virkistyskäyttöön, kalatalouteen, vedenlaatuun ja vesistöjen luonnonarvoihin kiinnitetään huomiota [24].

Vesistöjen säännöstelystä vastaavat säännöstelyluvan haltijat. Säännöstelylupa on vesioikeudellinen lupa, jossa annetaan määräyksiä säännöstelyä varten mm. tarvittavista rakenteista ja laitteista. Säännöstelyluvassa annetaan määräykset myös siitä, missä rajoissa vedenkorkeudet saavat vaihdella ja miten veden juokсутus on järjestettävä [24].

Yksittäisen järven hyvässä säännöstelyssä järveä juokсутetaan siten, että säännöstelyluvassa vedenkorkeudelle ja juokсутukselle asetettuja rajoitteita ei rikota. Säännöstelyluvan rajoitteita saa periaatteessa rikkoa vain, jos niiden noudattaminen on mahdotonta. Säännöstelyrajoja saa rikkoa myös ennaltaehkäistäessä ennustetun, poikkeuksellisen tilanteen johdosta syntyviä vahinkoja, joista koitua haitta olisi suurempi kuin niiden ennaltaehkäisystä koitua haitta. Tyypillisessä säännöstelykäytännössä:

- Järven pintaa lasketaan ennen kevättulvaa, jotta vesi mahtuu järvioltaaseen eikä aiheuta tulvavahinkoja.
- Tulvan aikana järven annetaan täyttyä ja ohijuokсутukset aloitetaan vasta, kun järven vedenpinnan taso näyttää nousevan liian korkeaksi.
- Juokсутus pidetään mahdollisimman tasaisena.
- Kesällä järven vedenpintaa pidetään virkistyskäytön vuoksi korkealla, mutta ei kuitenkaan niin korkealla että suuren sateen tapahtuessa olisi suuri riski säännöstelyluvassa asetetun vedenkorkeuden ylärajan ylittämiseksi.

- Ennustetun suuren tulovirtaaman uhatessa järveä tyhjennetään etukäteen, jotta vältytään suurilta juoksutuksilta.

Järvien säännöstelyä Vesistömallijärjestelmän vesistöennustesimulaatioissa ohjataan säännöstelyohjeistoja muokkaamalla. Tämän diplomityön tarkoituksena on luoda vaihtoehto säännöstelyohjeistojen käytölle. Vaihtoehtoa kutsutaan juoksutuslaskennaksi, ja siinä järville asetetaan tavoitealueet joiden mukaisesti järvien juoksutus lasketaan. Tavoitealueista ja niiden asettamisesta kerrotaan tarkemmin kohdassa 4.2.

## 3.2 Yksittäisen säännöstelyaltaan dynamiikka ja rajoitteet

Järven säännöstelyongelma on dynaaminen ja monitavoitteinen optimointiongelma johon sisältyy lukuisia rajoitteita. Optimoinnissa pitää ottaa huomioon tulevan hydrometeorologisen kehityksen epävarmuuksien lisäksi eri sidosryhmien tarpeet ja vaatimukset, jotta säännöstely tyydyttäisi mahdollisimman tasapuolisesta kaikkia osapuolia joka tilanteessa.

### 3.2.1 Järvialtaan dynamiikka

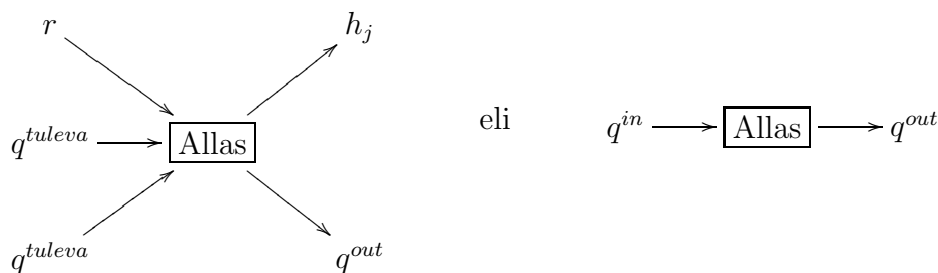
Järvialtaaseen tulee vettä valuntana  $qr$  omalta valuma-alueelta, virtaamana  $q$  yläpuolisilta alueilta sekä sadantana  $p$ . Altaasta poistuu vettä haihduntana  $h_j$  ja lähtövirtaamana  $q^{out}$ . Tulovirtaaman  $q^{in}$  voi ajatella olevan kaikki tuleva vesi siihen järven pisteeseen, josta järvi purkautuu, joten tulovirtaamaan lasketaan kuuluvaksi järveen tulevat virtaamat, valunta sekä haihdunta:

$$q^{in} = \sum q^{tulevat} + r + p - h_j. \quad (2)$$

Järvialtaassa olevan veden tilavuus eli altaan varastotilavuus  $v$  muuttuu altaaseen tulevien ja sieltä poistuvien vesimäärien mukaisesti (kuva 5), ja varastotilavuuden muutos  $\frac{dv}{dt}$  on

$$\frac{dv}{dt} = q^{in} - q^{out} = \sum q^{tulevat} + q + p - h_j - q^{out}. \quad (3)$$

Altaan vedenkorkeus ja vedenpinnan pinta-ala riippuvat altaan varastotilavuudesta ja profiilista. Vedenpinnan korkeus ja pinta-ala onkin syytä määrittää tilavuuden perusteella allaskohtaisesti. Joillakin säännöstelyaltailla saattaa olla käytettävissä valmiiksi laadittuja paloittain lineaarisia taulukoita, joista tilavuuden, vedenkorkeuden ja pinta-alan suhteet käyvät selville. Joillekin altaille puolestaan voi olla valmiiksi määritettyjä funktioita, jotka kertovat tarkasti näiden suureiden vastaavuudet. Jos valmiiksi määritellyjä taulukoita tai funktioita ei ole käytettävissä, pitää muutokset mallintaa jollain muulla tavalla, esimerkiksi olettamalla altaalle jokin parametrinen geometrinen muoto (vesistömallissa oletetaan katkaistu kartio) ja sovittaa se mahdollisiin havaintoihin.



Kuva 5: Altaan varastotilavuuteen vaikuttavat suureet.

### 3.2.2 Ehdottomat ja joustavat rajoitteet

Järviälyiden ja säännöstelypatojen patoluukut rajoittavat juoksutuksia  $q(t)^{out}$  ylä- ja alarajoin:

$$q_{min}^{out} \leq q(t) \leq q_{max}^{out}. \quad (4)$$

Yläraja  $q_{max}^{out}$  on ehdoton sillä patoluukuista on mahdotonta juoksuttaa maksimijuoksutusta enempää. Alaraja on myös ehdoton, tyypillistä alarajaa  $q_{min}^{out} = 0$  vähempää on mahdotonta juoksuttaa. Jos alaraja poikkeaa nolasta, säännöstelyallas purkaa vettä luonnonmukaisen kaltaista reittiä johon säännöstelijä ei pääse vaikuttamaan.

Joustavat rajoitteet määrittelevät muuttujille alueet joiden sisällä arvojen halutaan pysyvän. Joustavia rajoitteita ei kuitenkaan tyypillisesti pystytä aina noudattamaan, jolloin yhtä tai useampaa niistä joudutaan hetkellisesti rikkomaan. Joustavia rajoitteita ovat mm. säännöstelylupaehdoissa asetetut säännöstelyn rajat vedenkorkeuksille  $w_{sraja\_min}(t)$  ja  $w_{sraja\_max}(t)$  sekä juoksutuksille  $q_{min}(t)$  ja  $q_{max}(t)$ .

## 3.3 Optimointimenetelmiä järven säännöstelyyn

Tässä kohdassa tarkastellaan järven säännöstelyn optimointiin soveltuvia menetelmiä. Lineaarinen ohjelmointi on käyttökelpoinen menetelmä optimipisteen löytämiseen, jos ongelma voidaan ilmaista lineaarisesti. Epälineaarinen ohjelmointi soveltuu järven säännöstelyn ongelmaan, jota on vaikea linearisoida. Newtonin menetelmästä johdettu BFGS-menetelmä soveltuu rajoittamattomiin epälineaarisiin ongelmiin.

### 3.3.1 Lineaarinen ohjelmointi

Lineaarinen ohjelmointi (*Linear Programming, LP*) on yksi laaja-alaisimmin käytetyistä menetelmistä järvien säännöstelyn optimoinnissa [30]. Menetelmä soveltuu hyvin suuriulotteisten ongelmien ratkaisemiseen [4]. Lineaarinen ohjelmointi päättyy globaaliin optimiin ja menetelmä ei vaadi alkuarvausta optimista [30, 12]. Valmiita vapaasti käytettäviä työkaluja on runsaasti saatavilla. Lineaarinen ohjelmointiteh-

tävä on muotoa

$$\min \quad \mathbf{c}^T \mathbf{x} \quad (5)$$

$$\text{st.} \quad \mathbf{A}\mathbf{x} = \mathbf{b} \quad (6)$$

$$\mathbf{l} \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{u}. \quad (7)$$

Yhtälöt 6 ja 7 määrittävät monitahokkaan jossa ratkaisu sijaitsee. Jokin monitahokkaan kulmapisteistä on aina mahdollinen optimaalinen ratkaisu. Globaalin optimi-ratkaisun muodostaa monitahokkaan kulmapiste, särmä tai taho.

Tyypillisin lineaarisen ohjelmointitehtävän ratkaisualgoritmi on Simplex-algoritmi [25]. Simplex-algoritmissa oletetaan monitahokkaan olevan konvekksi, ja käydään läpi sen kulmapisteitä siirtyen aina viereiseen kulmapisteeseen, jos kohdefunktion arvo siinä on parempi. Monitahokkaan konveksisuuden vuoksi näin päädytään globaaliin optimiin.

Järven säännöstelyongelmaa ei yleensä voida kirjoittaa suoraan lineaarisena ongelmana, vaan kohdefunktio ja rajoitteet joudutaan linearisoimaan. Yeh kertoo ainakin paloittain linearisointia ja 1. asteen Taylorin sarjakehitelmää voitavan käyttää menestyksekkäästi [30].

Suuriulotteisiin ongelmiin voidaan käyttää menetelmiä, jotka jakavat ongelman pienempiin osiin. Tällaisia menetelmiä ovat yhdistetty DP-LP -menetelmä [8] ja rekursiivinen lineaarinen ohjelmointi [29]. Cai, McKinney ja Lasdon ovat käyttäneet geneettisen algoritmin ja lineaarisen ohjelmoinnin yhdistelmää [4].

### 3.3.2 Epälineaarinen ohjelmointi

Epälineaarilla ohjelmoinnilla (*Nonlinear Programming, NLP*) voidaan ratkaista optimointiongelma, jossa kohdefunktio tai rajoitteet ovat epälineaarisia. Epälineaarinen ohjelmointi on käyttökelpoinen menetelmä, jos kohdefunktiota tai rajoitteita ei kyetä linearisoimaan realistisesti [12]. Usein järvien säännöstelyongelmat ovat juuri tällaisia [13]. Epälineaarista ohjelmointia ei kuitenkaan ole käytetty paljon järvien säännöstelyn optimointiin, osittain koska menetelmä on verrattain hidas löytämään optimiratkaisuja [30].

Epälineaarinen ohjelmointitehtävä on muotoa

$$\min \quad F(\mathbf{x}_k) \quad (8)$$

$$\text{st.} \quad G_i(\mathbf{x}) \leq 0 \quad \forall i = 1, \dots, m \quad (9)$$

$$H_j(\mathbf{x}) = 0 \quad \forall j = 1, \dots, l, \quad (10)$$

missä funktiot  $F$ ,  $G_i$  ja  $H_j$  ovat lähtökohtaisesti epälineaarisia, mutta voivat olla myös lineaarisia.

Tehokkaimpina ja vakaimpina NLP-algoritmeina voidaan pitää toistettua lineaarista ohjelmointia (*Sequential Linear Programming, SLP*), toistettua neliöllistä ohjelmointia (*Sequential Quadratic Programming, SQP*), täydennetyn Lagrangen funk-

tion menetelmää (*Method Of Multipliers, MOM*) sekä yleistetyn redusoidun gradientin menetelmää (*Generalized Reduced Gradient method, GRG*) [12]. Näitä menetelmiä käytettäessä sekä kohdefunktion että rajoitusten pitää olla differentoituvia.

Hiew [10] sekä Grydier ja Stedinger [7] ovat vertailleet näitä NLP-menetelmiä. Molemmilla vertailuissa SLP osoittautui tehokkaimmaksi menetelmäksi. SLP-menetelmä ei välttämättä suppene, mitä voidaan pitää sen suurimpana haittana [2]. SLP-menetelmän suppenemiseen vaikuttaa muita NLP-menetelmiä enemmän optimoinnin aloitusratkaisu [10].

SLP-menetelmässä kaikki epälineaariset funktiot linearisoidaan paikallisesti Taylorin sarja-approksimaation kahdella ensimmäisellä termillä. Näin saatu ongelma ratkaistaan lineaarisella ohjelmoinnilla. Alkuperäiset funktiot linearisoidaan jälleen juuri saadun ratkaisun läheisyydessä ja näin jatketaan kunnes optimi on löytynyt.

SQP-menetelmä on hyvin samankaltainen SLP-menetelmän kanssa. Pääasiallisena erona SQP-menetelmässä kohdefunktiota approksimoidaan neliöllisesti Taylorin sarja-approksimaation kolmella ensimmäisellä termillä. SQP-menetelmä suppenee kohti KKT-pistettä (Karush-Kuhn-Tucker -ehdot määrittelevät optimipisteen välttämättömät ehdot) [2]. Menetelmän vahvuutena on suhteellisen nopea suppeneminen ja heikkoutena mahdolliset ongelmat Hessen matriisin ( $\nabla^2$ ) laskennassa sekä hidas laskenta laajojen, monien aikaintervallien yli menevien QP-ongelmien kanssa. Näihin heikkouksiin on tuotettu erilaisia parannuksia, kuten Hessen matriisin approksimointi 1. asteen derivaatoilla [2], sekä järvisysteemien säännöstelyn erikoispiirteitä hyödyntävä tehokas ratkaisualgoritmi QP-ongelmalle [1].

Täydennetyin Lagrangen funktion menetelmässä osa rajoitteista siirretään Lagrangen funktioon, jolloin optimointitehtävästä tulee yksinkertaisempi. Menetelmän haittapuolena on optimiratkaisun tarkkuushäviöt. Arnoldin, Tatjewskin ja Wolochowiczin vertailussa MOM-menetelmä suppeni SQP-menetelmää nopeammin, mutta ratkaisu oli vähemmän tarkka [1]. GRG-menetelmä ei pärjää järvien säännöstelyn optimoinnissa tehokkuudessa muille edellä mainituille NLP-menetelmille [12]. Unver ja Mays joutuivat käyttämään MOM-menetelmän kaltaista rajoitetermiä soveltaessaan GRG-menetelmää järvien säännöstelyn optimointiin [26].

### 3.3.3 BFGS-menetelmä

Yksinkertainen gradienttipohjainen menetelmä on jyrkimmän muutoksen menetelmä, jossa jokaisella iteraatiokierroksella  $k$  otetaan askel gradientin  $\nabla F(\mathbf{x}_k)$  suuntaan:

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k - \alpha_k \nabla F(\mathbf{x}_k). \quad (11)$$

Jyrkimmän muutoksen menetelmä käyttää hyödykseen pelkästään ensimmäisiä osittaisderivaattoja. Newtonin menetelmä hyödyntää myös toisia osittaisderivaattoja, menetelmässä iteraatioaskeleeseen vaikuttaa gradientin lisäksi myös Hessen matriisi  $H(F(\mathbf{x}_k))$

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k - \alpha_k [H(F(\mathbf{x}_k))]^{-1} \nabla F(\mathbf{x}_k). \quad (12)$$



Hessen matriisin tarkan arvon laskeminen ja etenkin sen kääntäminen voi olla laskennallisesti raskasta, mutta usein Hessen matriisin käänteismatriisin yksinkertainen approksimointi

$$[H(F(\mathbf{x}_k))]^{-1} = H_k^{-1} \approx B_k \quad (13)$$

on riittävää algoritmin nopean suppenemisen kannalta [20]. Hessen matriisin käänteismatriisia approksimoivia menetelmiä kutsutaan kvasi-Newton menetelmiksi. Yksi suosituimmista kvasi-Newton menetelmistä on BFGS(Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) -menetelmä, jossa approksimaatiota  $B_k$  päivitetään iteraation kuluessa optimoitavien muuttujien muutoksien  $\mathbf{s}_k$  ja gradienttien muutoksien  $\mathbf{y}_k$  avulla:

$$B_{k+1} = V_k^T B_k V_k + \rho_k \mathbf{s}_k \mathbf{s}_k^T, \quad (14)$$

jossa

$$V_k = I - \rho_k \mathbf{y}_k \mathbf{s}_k^T \quad (15)$$

$$\mathbf{s}_k = \mathbf{x}_{k+1} - \mathbf{x}_k \quad (16)$$

$$\mathbf{y}_k = \nabla F(\mathbf{x}_{k+1}) - \nabla F(\mathbf{x}_k) \quad (17)$$

$$\rho_k = \frac{1}{\mathbf{y}_k^T \mathbf{s}_k}. \quad (18)$$

$B_{k+1}$ :n muodostamista yhtälön 14 mukaisesti kutsutaan BFGS-päivitykseksi.

Neliömatriisin  $B_k$  vaatima tila  $n^2$  saattaa laajoissa moniulotteisissa ongelmissa käydä liian suureksi. Limited memory BFGS (L-BFGS) -menetelmä [17, 19] on suuriulotteisia ongelmia varten mukautettu versio BFGS-menetelmästä. L-BFGS:ssä pidetään muistissa  $m$  kpl edellisiä vektoreita  $\mathbf{s}_k$  ja  $\mathbf{y}_k$ , ja missään vaiheessa ei varsinaisesti muodosteta matriisia  $B_k$  vaan lasketaan suoraan tulo  $B_k \nabla F(\mathbf{x}_k)$  rekursiivisella kaavalla [16], jossa suoritettavien aritmeettisten operaatioiden määrää on voitu karsia BFGS-päivityksen symmetrian vuoksi. L-BFGS:ssä tilavaatimus on  $n^2$  sijasta  $(12 + 2m)n$ , ja tyypillisesti pienet  $m$ :n arvot kuten  $3 \leq m \leq 20$  ovat suositeltavia [21], tosin parhaat tulokset saadaan Nashin ja Nocedalín kokemuksen mukaan arvoilla  $3 \leq m \leq 7$  [18].

L-BFGS -menetelmän iteraatiokierroksen kulku on seuraavanlainen:

1. Määritetään skaalattu [23] diagonaalimatriisi

$$B_k^0 = \frac{\mathbf{y}_k^T \mathbf{s}_k}{\|\mathbf{y}_k\|_2^2} I. \quad (19)$$

2. Lasketaan tulo  $\mathbf{p}_k = B_k \nabla F(\mathbf{x}_k)$  jossa  $B_k$  muodostetaan suorittamalla  $B_k^0$ :lle BFGS-päivitykset  $m$  edellisellä vektorilla  $\mathbf{s}$  ja  $\mathbf{y}$  [16].
3. Tehdään viivahaku [15] suuntaan  $\mathbf{p}_k$ , askelpituudella  $\alpha_k$ .

Nocedalín tutkimusryhmän kirjoittamat valmiit, ilmaiset ja vapaasti verkosta ladattavissa olevat Fortran 77 -kieliset L-BFGS-rutiinit [21] ovat saatavilla paketissa [22], jossa on kattavat ohjeet rutiinien käyttämiseen. Rutiinit on kirjoitettu huolella ja ne tulostavat ajon aikana selkeää tilannetietoa algoritmien toiminnasta.

## 4 Säännöstelyn järven juoksutuslaskenta ennustesimulaatioissa

Vesistöennusteita laadittaessa luonnontilaisten järvien simulointi ennustejaksolla on yksinkertaista; niiden lähtövirtaama määräytyy suoraan vedenkorkeudesta purkautumiskäyrän perusteella. Säännöstelyjen järvien simulointi on ongelmallisempaa, koska niiden lähtövirtaaman eli juoksutuksen määrää todellisuudessa säännöstelijä eli säännöstelyluvan haltija. Säännöstelijän tekemiä juoksutus päätöksiä ei voida etukäteen tietää, mutta kuitenkin säännöstelyjä järviä pitää simuloida jollain järkevällä tavalla.

Säännöstelijät perustavat juoksutus päätöksensä kulloinkin käytössä oleviin ennusteisiin ja malleihin sekä tietoihin säännöstelyaltaiden ylä- ja alapuolella olevien järvien ja vesistöalueiden tilasta. Monet säännöstelijät käyttävät myös Vesistömallijärjestelmää ja sen ennusteita juoksutus päätöksien tekemiseen. Säännöstelijät voivat syöttää Vesistömallijärjestelmään järvikohtaisen arvionsa tulevasta juoksutuksesta, jolloin vesistömalli simuloi näitä järviä syötetyn juoksutusennusteen mukaisesti.

Järjestelmän nykytilassa säännöstelyjä järviä simuloidaan säännöstelyohjeiston avulla silloin, kun juoksutusennustetta ei ole tai kun simuloitava ajanhetki on juoksutusennusteen ulkopuolella. Säännöstelyohjeiston eduista ja haitoista on kerrottu kohdassa 2.6. Järven simulointi säännöstelyohjeiston mukaisesti tuottaa järkeviä ennusteita keskimääräisessä hydrologisessa tilanteessa. Usein hydrologinen tilanne ei kuitenkaan ole keskimääräinen, ja tällöin säännöstelyohjeistoa joudutaan muokkaamaan tilanteeseen sopivaksi. Säännöstelyohjeisto ei huomioi käytettävissä olevaa järven tulovirtaamaennustetta. Järven simulointi voitaisiin tehdä käyttäen kulloisenkin tulovirtaamaennusteen perusteella määritettäviä juoksutuksia. Näin säännöstelyjen järvien simulointi vastaisi aina kulloistakin hydrologista tilannetta.

Tämän diplomityön tarkoituksena on luoda säännöstelyohjeiston käyttämistä mukautuvampi, tulovirtaamaennusteet huomioiva vaihtoehto, jota kutsutaan juoksutuslaskennaksi. Juoksutuslaskenta laskee optimointitehtävän ratkaisuna tulovirtaamaennusteeseen sopivat juoksutukset. Juoksutuslaskenta on ohjelmoitu kiinteäksi osaksi Vesistömallijärjestelmän Fortran 77 -kielistä vesistömallia.

### 4.1 Tulovirtaamaennusteet

Järvialtaan juoksutuksia optimoitaessa käytössä oleva tulovirtaamaennuste koostuu 50 vaihtoehtoisesta, yhtä todennäköisestä tulovirtaama-aikasarjasta. Tulovirtaamaennuste syntyy, kun vesistömallia simuloidaan käyttäen syötteenä Euroopan sääennustekeskuksen ECMWF:n tuottamaa sääennustetta. Yksittäinen parviennusteen jäsen esittää yhden vaihtoehton tulevasta tilanteesta ja kaikki jäsenet yhdessä

muodostavat tulovirtaamaennusteen

$$\mathbf{q}^{\text{in}}(t) = \begin{pmatrix} q_1^{\text{in}}(t) \\ q_2^{\text{in}}(t) \\ \vdots \\ q_{50}^{\text{in}}(t) \end{pmatrix}. \quad (20)$$

Vesistöennusteissa pitää esittää juoksutusparvi, joten 50 yhtä todennäköistä juoksutusaikasarjaa tarvitaan joka tapauksessa. Tämän vuoksi yksi juoksutusaikasarja optimoidaan yhden deterministisen tulovirtaamaennusteen  $q^{\text{in}}(t)$  perusteella.

## 4.2 Yksittäisen järven säännöstelyn ohjaus

Yksittäisen järven säännöstelyä ohjataan asettamalla järvelle päivämäärään sidotut tavoitepisteet. Kullekin tavoitepisteelle määrätään sekä vedenkorkeudelle että juoksutukselle tavoitealueet. Tavoitepisteiden välissä oleville päivämäärille arvot interpoloidaan lineaarisesti. Tavoitealueet valitaan tavoitepisteiden sopivalla asettelulla siten, että kohdassa 3.1 esitellyt hyvän säännöstelyn edellytykset täyttyvät. Tyypillisesti juoksutuksen tavoitealue pysyy läpi vuoden samana, kun taas vedenkorkeuden tavoitealue vaihtelee paljon etenkin keväällä.

Tavoitealueiden lisäksi määrätään painokertoimet  $p$ , siten että eri tavoitteista aiheutuvat kustannukset ovat keskenään vertailukelpoisia ja järven säännöstely on järkevää. Joillakin järvillä voidaan mahdollisesti asettaa yksi tai useampi painokerroin nolllaksi.

Tavoitealueiden ja kohdefunktion painokertoimien määrittämisen jälkeen voidaan ratkaista dynaaminen, monitavoitteinen optimointiongelma sopivalla optimointialgoritmilla erikseen jokaiselle yksittäiselle tulovirtaamaennusteelle.

## 4.3 Järviältään dynamiikka

Järven vedenkorkeuden, tilavuuden ja pinta-alan suhteet on kirjattu wva-käyrään, josta voidaan määrittää funktio

$$\omega : V \rightarrow W. \quad (21)$$

Optimointimallissa vedenkorkeus  $w$  ilmaistaan funktion  $\omega$  avulla varastotilavuuden  $v$  funktiona

$$w = \omega(v). \quad (22)$$

Esimerkiksi Kallaveden wva-käyrä vedenkorkeustasossa NN on

$W$	$V$	$A$
$m$	$10^6 m^3$	$10^6 m^2$
80.90	0.00	294.36
81.00	29.54	296.43
81.20	89.31	301.25
81.40	150.02	305.73
81.60	211.58	309.86
81.80	273.96	313.99
82.00	337.18	318.12
82.20	401.28	322.94
82.40	466.33	327.42
82.60	532.23	331.55
82.80	599.00	336.02
83.00	666.67	340.50
83.10	700.62	342.56

jolloin funktio  $\omega$  on

$$\omega(v) = \begin{cases} v \cdot 3.385240E-9m^{-2} + 80.900m, & v < 29.54E6m^3 \\ v \cdot 3.346160E-9m^{-2} + 80.901m, & 29.54E6m^3 < v < 89.31E6m^3 \\ v \cdot 3.294350E-9m^{-2} + 80.906m, & 89.31E6m^3 < v < 150.02E6m^3 \\ v \cdot 3.248863E-9m^{-2} + 80.913m, & 150.02E6m^3 < v < 211.58E6m^3 \\ v \cdot 3.206156E-9m^{-2} + 80.922m, & 211.58E6m^3 < v < 273.96E6m^3 \\ v \cdot 3.163556E-9m^{-2} + 80.933m, & 273.96E6m^3 < v < 337.18E6m^3 \\ v \cdot 3.120125E-9m^{-2} + 80.948m, & 337.18E6m^3 < v < 401.28E6m^3 \\ v \cdot 3.074558E-9m^{-2} + 80.966m, & 401.28E6m^3 < v < 466.33E6m^3 \\ v \cdot 3.034901E-9m^{-2} + 80.985m, & 466.33E6m^3 < v < 532.23E6m^3 \\ v \cdot 2.995357E-9m^{-2} + 81.006m, & 532.23E6m^3 < v < 599.00E6m^3 \\ v \cdot 2.955519E-9m^{-2} + 81.030m, & 599.00E6m^3 < v < 666.67E6m^3 \\ v \cdot 2.945508E-9m^{-2} + 81.036m, & 666.67E6m^3 < v. \end{cases}$$

Järven varastotilavuuden  $v_t$  muutos kullakin ajanhetkellä riippuu vain ajanhetken tulovirtaamasta  $q_t^{in}$  ja juoksutuksesta  $q_t$ . Tulovirtaamassa on jo huomioitu valunta  $r$  (järvialtaan valuma-alueelta järvialtaaseen valuva vesi), järvisadanta- ja haihdunta sekä järvialtaaseen yläpuolisilta alueilta virtaava vesi. Tulovirtaamaan on siis kerätty ne järven varastotilavuuteen vaikuttavat suureet, joihin juoksutus päätökset eivät vaikuta.

Järven dynamiikkaa kuvaa yhtälö

$$v_t - v_{t-1} = v_t^{qin} - v_t^q, \quad (23)$$

jossa  $v_t^{qin}$  ja  $v_t^q$  kuvaavat vesimääriä jotka tulovirtaama ja juoksutus yhden aika-askelen kuluessa tuovat ja poistavat altaasta. Vesistömallijärjestelmän vesistömallin aika-askel on yksi vuorokausi (86400 sekuntia), joten

$$v_t^{qin} = 86400q_t^{in} \quad (24)$$

$$v_t^q = 86400q_t, \quad (25)$$

joissa  $q_t$  ja  $q_t^{in}$  kuvaavat tulo- ja lähtövirtaamia ilmaistuna SI-järjestelmän perusyksiköissä eli muodossa  $m^3/s$ .

## 4.4 Optimointimalli

Juoksutuslaskennan optimointimalli muodostetaan vaiheittain. Ensimmäinen malli muodostetaan tämän diplomityön alkuperäisen ongelman perusteella. Seuraavaksi muodostetaan ensimmäisen mallin pohjalta yksinkertaisempi malli, jonka ratkaisuna ei suoraan saada juoksutuksia, vaan tilavuudet, joista juoksutukset pitää laskea. Lopullinen malli muodostetaan parannellusta mallista kirjoittamalla rajoitteet kustannusfunktioon.

### 4.4.1 Ensimmäinen optimointimalli

Ensimmäinen optimointimalli on muodostettu tämän diplomityön alkuperäisen ongelman perusteella: tarkoituksena on etsiä tulovirtaamaennusteen mukaiset, järven säännöstelyyn sopivat juoksutukset. Ongelma voidaan kirjoittaa muodossa

$$\min_{\mathbf{q}} F(\mathbf{w}, \mathbf{q}) = F^{w_{tav}}(\mathbf{w}) + F^{w_{sraja}}(\mathbf{w}) + F^{q_{tav}}(\mathbf{q}) + F^{q_{tasaisuus}}(\mathbf{q}) \quad (26)$$

$$\text{st. } w_t = \omega(v_0 + \sum_{\tau=1}^t v_{\tau}^{qin} - \sum_{\tau=1}^t v_{\tau}^q) \quad \forall t = 1, \dots, T \quad (27)$$

$$q_t \geq q_t^{min} \quad \forall t = 1, \dots, T \quad (28)$$

$$q_t \leq q_t^{max} \quad \forall t = 1, \dots, T, \quad (29)$$

missä päätösmuuttujina toimivat juoksutukset  $\mathbf{q}$ , jotka on rajoitettu yhtälöin 28 ja 29. Järvioltaan varastotilavuus  $v$  päätösmuuttujien avulla ilmaistuna on

$$v_t = v_0 + \sum_{\tau=1}^t v_{\tau}^{qin} - \sum_{\tau=1}^t v_{\tau}^q, \quad (30)$$

jolloin vedenkorkeus  $w_t = \omega(v_t)$  pitää ilmaista yhtälön 27 mukaisesti.

Kustannusfunktio  $F$  on jaettu neljään osaan, koska jokainen osa kuvaa eri asiaa.  $F^{w_{tav}}$  kuvaa vedenkorkeuden ja  $F^{q_{tav}}$  juoksutuksien tavoitealueen rikkomisista aiheutuvia kustannuksia.  $F^{w_{sraja}}$  kuvaa vedenkorkeuden säännöstelyrajojen rikkomisista aiheutuvia kustannuksia.  $F^{q_{tasaisuus}}$  pitää huolen juoksutusten tasaisuudesta lisäämällä kustannusta juoksutusten vaihtelujen mukaisesti. Suurin osa kohdefunk-

tioiden

$$F^{w\_tav} = \sum_{t=1}^T \left( p^{w\_min} f_t^{w\_min} + p^{w\_max} f_t^{w\_max} + p^{w\_tav} f_t^{w\_tav} \right) \quad (31)$$

$$F^{q\_tav} = \sum_{t=1}^T \left( p^{q\_min} f_t^{q\_min} + p^{q\_max} f_t^{q\_max} + p^{q\_tav} f_t^{q\_tav} \right) \quad (32)$$

$$F^{w\_sraja} = \sum_{t=1}^T \left( p^{w\_sraja\_min} f_t^{w\_sraja\_min} + p^{w\_sraja\_max} f_t^{w\_sraja\_max} \right) \quad (33)$$

$$F^{q\_tasaisuus} = \sum_{t=1}^T p^{\Delta q} f_t^{\Delta q} \quad (34)$$

termeistä  $f_t^*$  on joustavia rajoitteita, joiden arvo on 0 normaalitilanteessa, eli aina kun rajoitetta ei rikota. Normaalitilanteessa vain  $f_t^{w\_tav}$ ,  $f_t^{q\_tav}$  ja  $f_t^{\Delta q}$  ovat suurempia kuin 0.

Ajankohtien mukaisella vedenkorkeuden tavoitealuefunktioilla pyritään pitämään vedenpinnan korkeus halutulla alueella. Vedenkorkeuksien  $\mathbf{w}$  funktiona ilmaistuna funktion  $F^{w\_tav}(\mathbf{w})$  termi

$$f_t^{w\_tav}(w_t) = (w_t - w_t^{tav})^2 \quad (35)$$

ohjaa vedenkorkeutta tavoitevedenkorkeuteen ja termit

$$f_t^{w\_min}(w_t) = \begin{cases} (w_t - w_t^{min})^2 & \text{jos } w_t < w_t^{min} \\ 0 & \text{muutoin} \end{cases} \quad (36)$$

$$f_t^{w\_max}(w_t) = \begin{cases} (w_t - w_t^{max})^2 & \text{jos } w_t > w_t^{max} \\ 0 & \text{muutoin} \end{cases} \quad (37)$$

rajoittavat vedenkorkeutta tavoitealueen ala- ja ylärajalla. Kuva 6 havainnollistaa funktion  $F^{w\_tav}$  muodostumista. Vedenkorkeuden säännöstelyrajafunktion  $F^{w\_sraja}$  vedenkorkeuden funktiona ilmaistut termit

$$f_t^{w\_sraja\_min}(w_t) = \begin{cases} (w_t - w_t^{sraja\_min})^2 & \text{jos } w_t < w_t^{sraja\_min} \\ 0 & \text{muutoin} \end{cases} \quad (38)$$

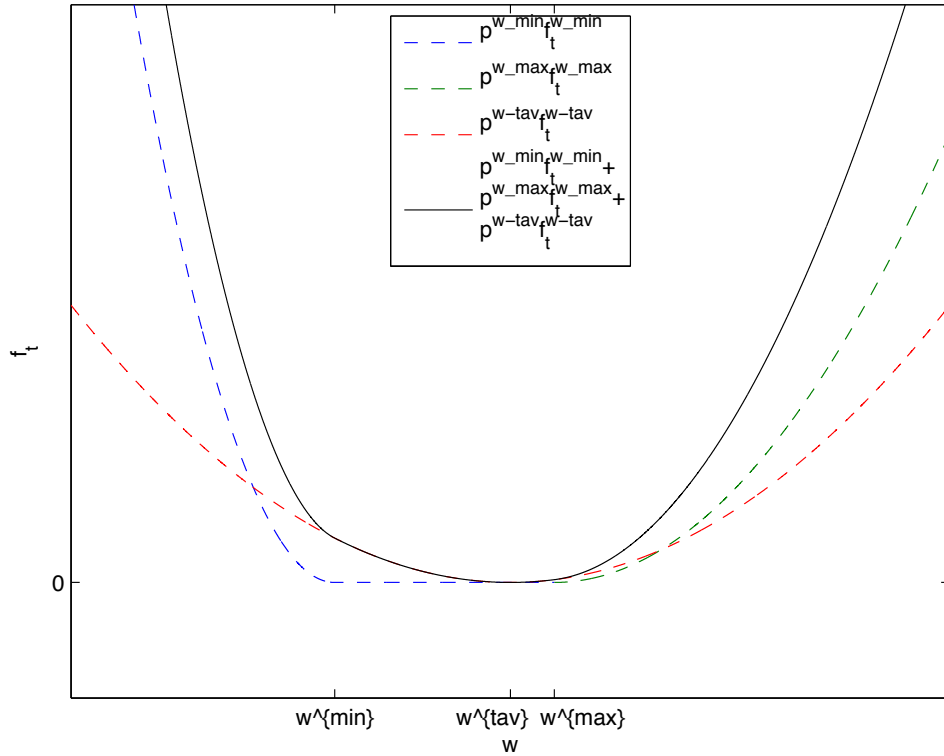
$$f_t^{w\_sraja\_max}(w_t) = \begin{cases} (w_t - w_t^{sraja\_max})^2 & \text{jos } w_t > w_t^{sraja\_max} \\ 0 & \text{muutoin} \end{cases} \quad (39)$$

muodostetaan samoin periaattein kuin tavoitealuetermit  $f_t^{w\_min}$  ja  $f_t^{w\_max}$ . Juoksutuksen tavoitealuefunktioilla  $F^{q\_tav}$  pyritään pitämään juoksutukset ajankohdan mukaisella tavoitealueella. Juoksutusten  $\mathbf{q}$  funktiona ilmaisten termit

$$f_t^{q\_tav}(q_t) = (q_t^{tav} - q_t)^2 \quad (40)$$

$$f_t^{q\_min}(q_t) = \begin{cases} (q_t^{min} - q_t)^2 & \text{jos } q_t < q_t^{min} \\ 0 & \text{muutoin} \end{cases} \quad (41)$$

$$f_t^{q\_max}(q_t) = \begin{cases} (q_t^{max} - q_t)^2 & \text{jos } q_t > q_t^{max} \\ 0 & \text{muutoin} \end{cases} \quad (42)$$



Kuva 6: Kustannusfunktion vedenkorkeusosan muodostuminen.

muodostetaan samoin periaattein kuin vedenkorkeuden säännöstelyrajafunktion ja tavoitealuefunktion termit. Juoksutuksen tasaisuusfunktion  $F^{q-tasaisuus}$  tarkoituksena on minimoida äkilliset juoksutusvaihtelut ja pitää juoksutukset tasaisena. Juoksutusten  $\mathbf{q}$  funktiona ilmaistuna tasaisuusfunktio  $F^{q-tasaisuus}(\mathbf{q})$  muodostuu termeistä

$$f_t^{\Delta q}(q_t, q_{t-1}) = (q_t - q_{t-1})^2. \quad (43)$$

Kohdefunktioiden lopulliset muodot ja keskinäiset painoarvot määrätään sopivilla, järvi- ja tilannekohtaisilla painokertoimilla  $p$ . Ensimmäisessä optimointimallissa vedenkorkeus riippuu koko optimointijakson aikaisempien aika-askelten päätösmuuttujista, joten malli on turhan monimutkainen.

#### 4.4.2 Paranneltu optimointimalli

Ensimmäisen optimointimallin pohjalta voidaan laatia toinen, yksinkertaisempi optimointimalli:

$$\min_{\mathbf{v}} F(\mathbf{w}, \mathbf{q}) = F^{w-tav}(\mathbf{w}) + F^{w-sraja}(\mathbf{w}) + F^{q-tav}(\mathbf{q}) + F^{q-tasaisuus}(\mathbf{q}) + F^{q-rajat}(\mathbf{q}) \quad (44)$$

$$\text{st. } v_t^q = v_{t-1} + v_t^{qin} - v_t \quad \forall t = 1, \dots, T \quad (45)$$

$$w_t = \omega(v_t) \quad \forall t = 1, \dots, T. \quad (46)$$

Paranneltu malli on pääpiirteissään samanlainen ensimmäisen mallin kanssa, mutta päätösmuuttujina ovat altaan tilavuudet  $\mathbf{v}$ . Vedenkorkeus päätösmuuttujan suhteen ilmaistuna on voitu kirjoittaa yhtälön 27 mukaisen monimutkaisen summatermin sijaan yhtälön 46 muodossa, koska päätösmuuttuja on kumulatiivinen suure ja perättäisten aika-askelten vedenkorkeudet vaikuttavat toisiinsa. Juokсутustilavuudet riippuvat deterministisen tulovirtaamaennusteen vuoksi pelkästään peräkkäisten ajanhetkien altaan varastotilavuuksista yhtälön 45 mukaisesti. Ensimmäisen optimointimallin rajoitteet (yhtälöt 28 - 29) on jouduttu kirjoittamaan kustannusfunktioon termiksi

$$F^{q-rajat} = \sum_{t=1}^T \left( p^{q-rajat\_min} f_t^{q-rajat\_min} + p^{q-rajat\_max} f_t^{q-rajat\_max} \right), \quad (47)$$

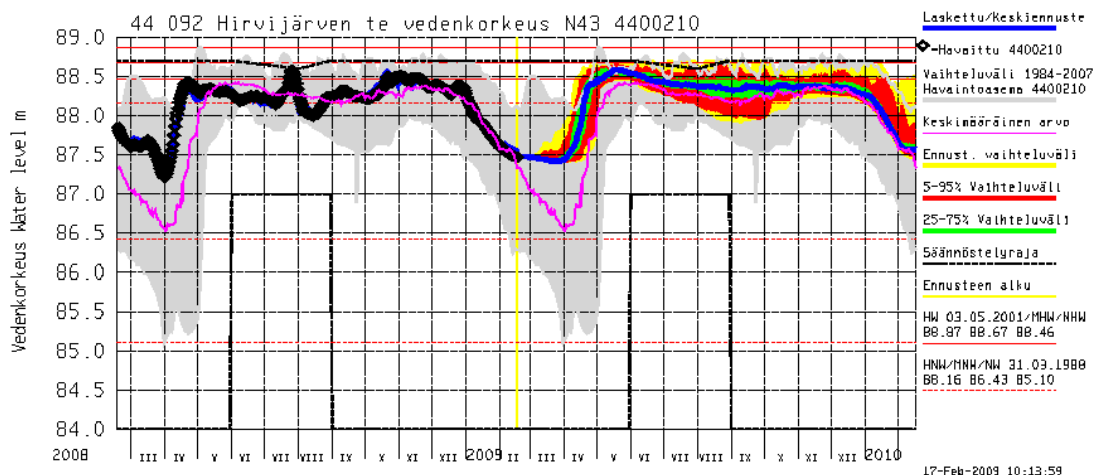
koska rajoitteita ei voida huomioida optimointialgoritmissa yksinkertaisina päätösmuuttujan ylä- ja alarajaehtoina kuten ensimmäisessä optimointimallissa. Juokсутusten rajoiteosa  $F^{q-rajat}$  pyrkii pitämään juokсутukset sallitulla alueella lisäämällä kustannusta termien

$$f_t^{q-rajat\_min}(q_t) = \begin{cases} (q_t^{alaraja} - q_t)^2 & \text{jos } q_t < q^{alaraja} \\ 0 & \text{muutoin} \end{cases} \quad (48)$$

$$f_t^{q-rajat\_max}(q_t) = \begin{cases} (q_t^{ylaraja} - q_t)^2 & \text{jos } q_t > q^{ylaraja} \\ 0 & \text{muutoin} \end{cases} \quad (49)$$

mukaisesti. Funktion rajoiteosa ei täysin kykene pitämään juokсутuksia rajoitteiden mukaisina, joten optimoinnin jälkeen pitää suorittaa juokсутusten tasaus, josta kerrotaan tarkemmin kohdassa 4.5.





Kuva 7: Lapuanjoen Hirvijärven vedenkorkeusennuste 17.2.2009. Kuvassa harmaalla pohjalla vedenkorkeuden vuosien 1984-2007 havaintojen vaihteluväli. Suurin havaittu arvo vedenkorkeustasossa N43 on 88.87m, pienin 85.10m.

#### 4.4.3 Lopullinen optimointimalli

Lopullinen optimointimalli pohjautuu paranneltuun malliin, ja kirjoitetaan muodossa

$$\min_{\mathbf{v}} F(\mathbf{v}) = F^{w\_tav}(\mathbf{v}) + F^{w\_sraja}(\mathbf{v}) + F^{q\_tav}(\mathbf{v}) + F^{q\_tasaisuus}(\mathbf{v}) + F^{q\_rajat}(\mathbf{v}) \quad (50)$$

$$\text{st. } v_t \geq v_t^{min} \quad \forall t = 1, \dots, T \quad (51)$$

$$v_t \leq v_t^{max} \quad \forall t = 1, \dots, T. \quad (52)$$

Lopullisessa optimointimallissa kustannusfunktio on kirjoitettu tilavuuksien funktiona, jolloin huomioidaan yhtälöiden 45 ja 46 mukainen dynamiikka. Päätösmuuttujalle asetetaan yksinkertaiset ylä- ja alarajat (yhtälöt 51 ja 52), jotta optimointialgoritmi etsisi ratkaisua sopivalta alueelta.

Altaan varastotilavuuden ylä- ja alarajat asetetaan siten, että ne vastaavat sellaisia vedenkorkeuksia, joiden välissä altaan vedenpinnan tason tulisi olla kaikissa olosuhteissa. Esimerkiksi Lapuanjoen Hirvijärven (kuva 7) altaan tilavuuden ala- ja ylärajat voisivat olla sellaisia, jotka vastaisivat vedenkorkeuksia 82.00m ja 92.00m vedenkorkeustasossa N43. Kustannusfunktion termit tilavuuksien suhteen ilmaistuna

ovat

$$f_t^{w-tav}(v_t) = (v_t - v_t^{tav})^2 \quad (53)$$

$$f_t^{w-min}(v_t) = \begin{cases} (v_t - v_t^{min})^2 & \text{jos } v_t < v_t^{min} \\ 0 & \text{muutoin} \end{cases} \quad (54)$$

$$f_t^{w-max}(v_t) = \begin{cases} (v_t - v_t^{max})^2 & \text{jos } v_t > v_t^{max} \\ 0 & \text{muutoin} \end{cases} \quad (55)$$

$$f_t^{w-sraja-min}(v_t) = \begin{cases} (v_t - v_t^{sraja-min})^2 & \text{jos } v_t < v_t^{sraja-min} \\ 0 & \text{muutoin} \end{cases} \quad (56)$$

$$f_t^{w-sraja-max}(v_t) = \begin{cases} (v_t - v_t^{sraja-max})^2 & \text{jos } v_t > v_t^{sraja-max} \\ 0 & \text{muutoin} \end{cases} \quad (57)$$

$$f_t^{q-tav}(v_t, v_{t-1}) = (v_t^{qtav} - v_{t-1} + v_t^{qin} - v_t)^2 \quad (58)$$

$$f_t^{q-min}(v_t, v_{t-1}) = \begin{cases} (v_t^{qmin} - v_{t-1} + v_t^{qin} - v_t)^2 & \text{jos } v_{t-1} - v_t < v_t^{qmin} - v_t^{qin} \\ 0 & \text{muutoin} \end{cases} \quad (59)$$

$$f_t^{q-max}(v_t, v_{t-1}) = \begin{cases} (v_t^{qmax} - v_{t-1} + v_t^{qin} - v_t)^2 & \text{jos } v_{t-1} - v_t > v_t^{qmax} - v_t^{qin} \\ 0 & \text{muutoin} \end{cases} \quad (60)$$

$$f_t^{\Delta q}(v_t, v_{t-1}, v_{t-2}) = (-v_{t-2} + 2v_{t-1} - v_t - v_{t-1}^{qin} + v_t^{qin})^2 \quad (61)$$

$$f_t^{q-rajat-min}(v_t, v_{t-1}) = \begin{cases} (v_t^{qalaraja} - v_{t-1} + v_t^{qin} - v_t)^2 & \text{jos } v_{t-1} - v_t < v_t^{qalaraja} - v_t^{qin} \\ 0 & \text{muutoin} \end{cases} \quad (62)$$

$$f_t^{q-rajat-max}(v_t, v_{t-1}) = \begin{cases} (v_t^{qylaraja} - v_{t-1} + v_t^{qin} - v_t)^2 & \text{jos } v_{t-1} - v_t > v_t^{qylaraja} - v_t^{qin} \\ 0 & \text{muutoin} \end{cases} \quad (63)$$

Lopullista optimointimallia voidaan käyttää järvien säännöstelyyn Vesistömallijärjestelmän ennustesimulaatioissa. Kustannusfunktio määrätään erikseen jokaiselle järvelle asettamalla sopivat tavoitealueet ja painokertoimet.

## 4.5 Juoksutuslaskennan kulku

Tulovirtaamaennusteeseen sopivat säännöstelyyn järven juoksutukset lasketaan tilavuuksista, jotka ratkaistaan optimointimallin (yhtälöt 50 - 52) avulla. Minimoitava kustannusfunktio  $F(\mathbf{v})$  voidaan osittaisderivoida tilavuuksien  $\mathbf{v}$  suhteen, jolloin optimointiin voidaan käyttää analyyttiseen gradienttiin perustuvaa optimointialgoritmia. Optimointialgoritmile annetaan mahdollisimman hyvä lähtökohta iteraation aloittamiseen asettamalla alkuarvoiksi tavoitevedenkorkeuksia vastaavat tilavuudet, joilla kohdefunktion  $f^{w-tav}(\mathbf{v})$  arvo on 0.

Juoksutukset lasketaan BFGS-algoritmeilla optimoiduista tilavuuksista yhtälön 45 mukaisesti. Kustannusfunktion (yhtälö 50) termi  $F^{q-rajat}(\mathbf{v})$  rajoittaa juoksutuksia

siten, että absoluuttiset ylä- ja alarajat ylittyvät vain marginaalisesti (ylitys luokkaa  $0.01 - 0.05m^3/s$ , jos juoksutus keskimäärin luokkaa  $10 - 50m^3/s$ ). Ylimenneet osat leikataan ja siirretään seuraavan vuorokauden juoksutukseen

$$q_{t+1} = q_{t+1} + (q_t - q_t^{raja}) \quad \text{ja} \quad q_t = q_t^{raja},$$

jolloin jakson juoksutussumma pysyy samana, ja juoksutus rajoitusten mukaisena.

## 5 Juoksutuslaskennan käyttö Kalajanjoen valuma-alueella

Tässä luvussa esitellään tulokset, jotka on saatu käyttämällä luvussa 4 esiteltyä juoksutuslaskentaa. Tuloksissa verrataan ennustesimulaatioita, jotka on tuotettu laske- malla säännösteltyjen järvien juoksutukset sekä säännöstelyohjeiston (vanha, käy- tössä oleva menetelmä) että juoksutuslaskennan (uusi, tässä työssä kehitetty mene- telmä) mukaisesti. Vertailtavat ennustesimulaatiot on tehty Kalajoen Kalajanjoen valuma-alueella (Suomen vesistöaluejaon 2. jakovaiheen alue 53.05), jossa on 2 sään- nöstettyä järveä, Kiljanjärvi ja Reis-Vuohtajärvi.

Kiljanjärvi on latvajärvi (eli mistään Vesistömallijärjestelmään mallinnetusta jär- vestä ei virtaa vettä Kiljanjärveen), josta vesi virtaa Reis-Vuohtajärveen. Reis- Vuohtajärvi purkaa vettä Myllypadosta, jonka jälkeisen jokiuoman varrella on pel- toja. Kuva 8 havainnollistaa tilannetta. Jokiuoman vesi nousee pelloille, kun Reis- Vuohtajärven lähtövirtaama (Myllypadon virtaama) ylittää  $12m^3/s$ . Reis-Vuohtajärven säännöstelyllä pyritään pitämään Myllypadon virtaama alle  $12m^3/s$ :n, mutta tulva- rajan ylittäminen keväisin on tavanomaista.

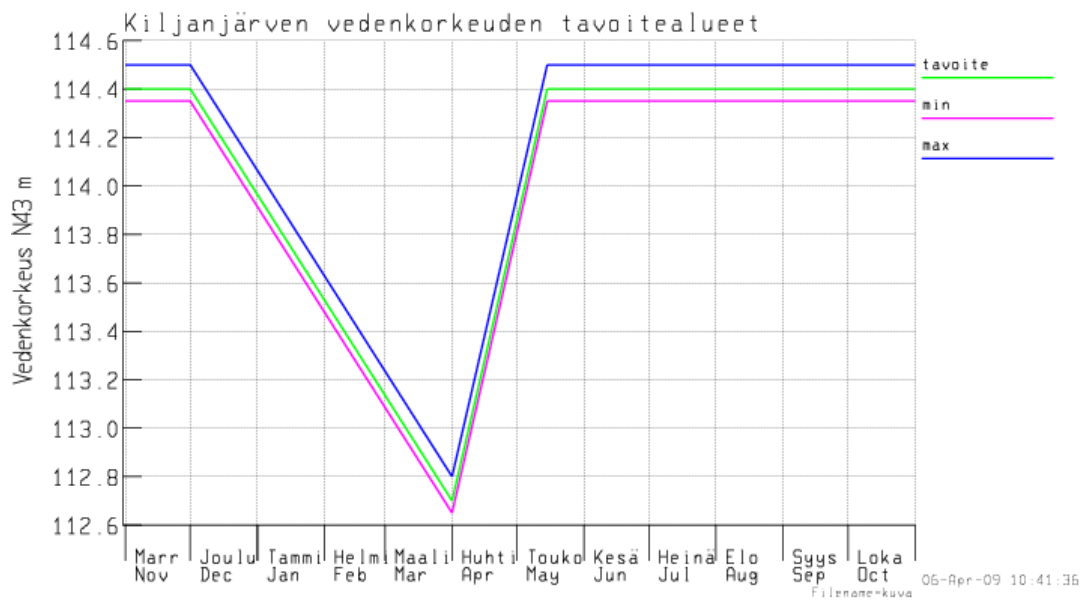


Kuva 8: Kiljanjärvi purkaa vettä Reis-Vuohtajärveen, jonka lähtövirtaaman ylittäessä  $12m^3/s$  tulvarajan alapuolisen jokiuoman vesi nousee pelloille.

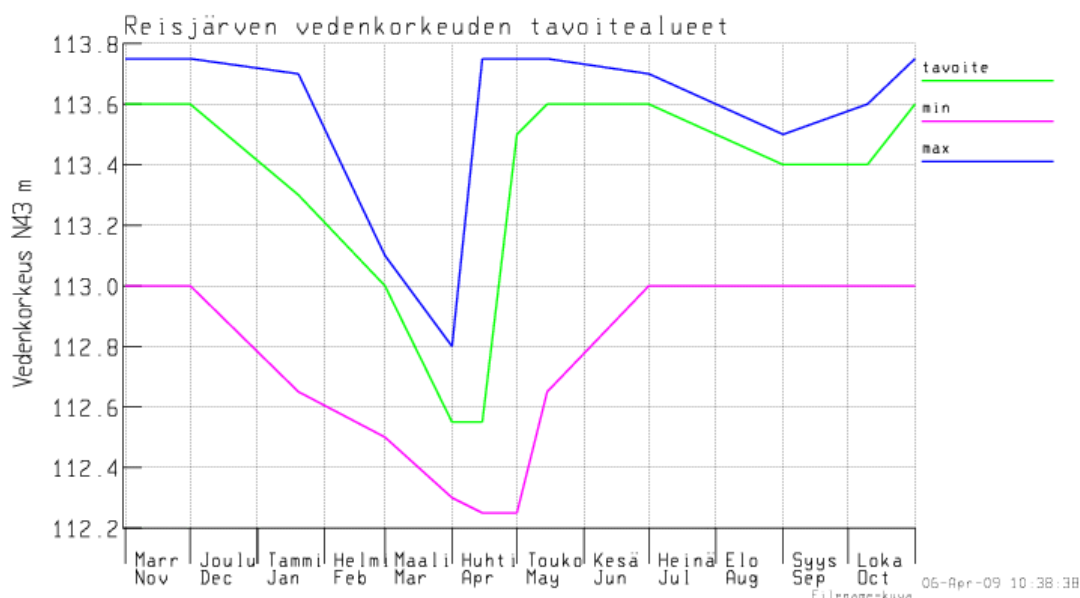
### 5.1 Tavoitealueet vedenkorkeudelle ja juoksutukselle

Reis-Vuohtajärven tulovirtaama ei kasva Kiljanjärven säännöstelyn vuoksi liian suu- reksi, jos Kiljanjärven juoksutus pysyy alle  $3.0m^3/s$ . Tämän vuoksi Kiljanjärven ve- denpinnan tasoa pitää alkaa laskemaan jo kuukausia ennen kevättulvan odotetta- vissa olevaa ajankohtaa. Juoksutus pyritään pitämään mahdollisimman tasaisena Reis-Vuohtajärven säännöstelyn helpottamiseksi.

Kiljanjärven vedenkorkeuden tavoitealueet valitaan kohdassa 3.1 mainittujen hyvän säännöstelyn periaatteiden mukaisesti. Tavoitetaso asetetaan lähelle vuosien 1976- 2007 referenssitietojen vedenkorkeuden keskimääräistä arvoa. Tavoitealueen minimi- ja maksimiarvot asetetaan 5 ja 10 cm päähän tavoitetasosta. Vedenkorkeuden tavoit- ealueet on kirjattu taulukkoon B1, ja piirretty kuvaan 9. Juoksutuksen tavoitealue- een painokertoimet asetetaan nolliksi, joten itse tavoitealuetta ei tarvitsisi asettaa. Sopiva tavoitealue juoksutukselle voisi kuitenkin olla  $\min = 0.0m^3/s$ ,  $\text{tav} = 0.4m^3/s$ , ja  $\max = 3.0m^3/s$ .



Kuva 9: Kiljanjärven vedenkorkeuden tavoitealue.



Kuva 10: Reis-Vuohajärven vedenkorkeuden tavoitealue.

Reis-Vuohajärven vedenkorkeuden tavoitealue asetetaan Kiljanjärven tapaan kohdan 3.1 periaatteiden mukaisesti. Tavoitetaso asetetaan seuraamaan vuosien 1976-2007 referenssitietojen keskimääräistä arvoa. Vedenkorkeuden maksimiarvo asetetaan tavoitearvoa 10 – 120cm korkeammalle, ja minimiarvo 10 – 125cm matalammalle. Keväällä vedenkorkeuden säännöstelyrajan ylittäminen on tavallista, joten säännöstelyrajan painokerroin asetetaan nollassa, jotta juoksutus olisi tavoitealueen mukaan mahdollisimman realistinen. Reis-Vuohajärven vedenkorkeuden tavoitealue on esitetty kuvassa 10, ja taulukossa B2.

Säännöstelylupa asettaa Myllypadon virtaamalle alarajan  $0.95m^3/s$ , minkä vuoksi Reis-Vuohajärven vedenpinnan taso saattaa kuivina vuosina laskea säännöstelyalrajaa alle. Reis-Vuohajärven lähtövirtaamalle asetetaan alaraja  $q^{alajara} = 0.95m^3/s$ , jonka toteutuminen varmistetaan kohdassa 4.5 selostetulla juoksutusten tasauksella.

Myllypadon virtaaman tulvaraja on  $12m^3/s$ , joten juoksutuksen tavoitealueeksi valittiin  $min = 0.0m^3/s$ ,  $tav = 0.4m^3/s$ , ja  $max = 12.0m^3/s$ . Näiden painokertoimista vain maksimi  $p^{q-ax}$  poikkeaa nollassa, joten  $min = 0.0m^3/s$  ja  $tav = 0.4m^3/s$  ovat merkityksettömiä.

$p^* \cdot 10^{-12}$	Kiljanjärvi	Reis-Vuohtajärvi
$p^{w\_tav}$	0	0.000001
$p^{w\_min}$	10	100
$p^{w\_max}$	1	100
$p^{w\_sraja\_min}$	100000	0
$p^{w\_sraja\_max}$	100000	0
$p^{q\_tav}$	0	0
$p^{q\_min}$	0	0
$p^{q\_max}$	0	1000
$p^{\Delta q}$	1000	1000

Taulukko 1: Kiljanjärven ja Reis-Vuohtajärven painokertoimet.

## 5.2 Tavoitealueiden painokertoimet

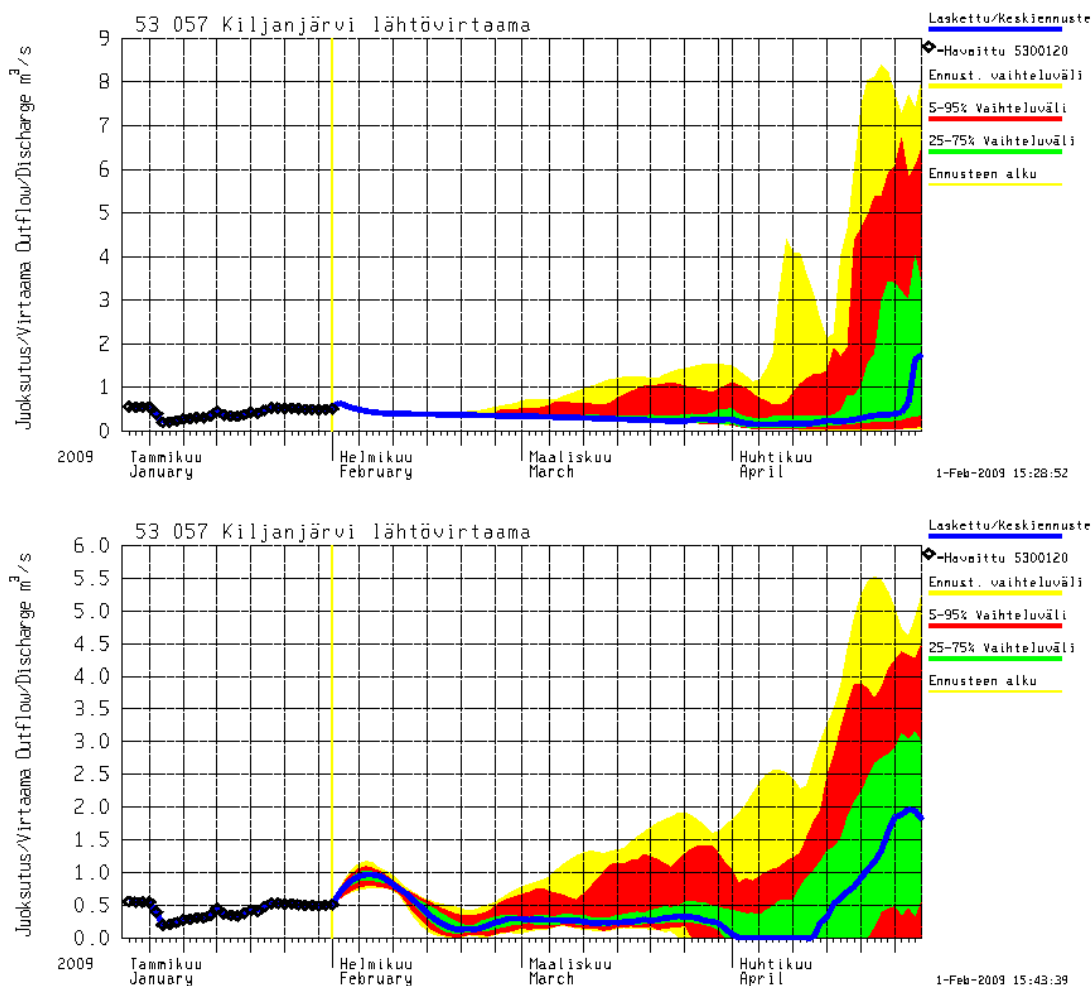
Kaikille painokertoimille annettiin ensiksi arvo 0. Tämän jälkeen painokertoimia ryhdyttiin yksitellen kasvattamaan, kunnes vesistöennusteet olivat realistisia. Jokaisen painokertoimen noston jälkeen ajettiin simulaatio, katsottiin ennustekuvat ja kertyneet kustannukset, ja tehtiin tarkennukset painokertoimiin.

Kiljanjärven lopulliset painokertoimet muodostuivat niin, että ensin  $p^{w\_min}$ :lle ja  $p^{w\_max}$ :lle annettiin arvo 1. Seuraavaksi  $p^{\Delta q}$ :lle annettiin arvo 1000, jotta kohdefunktioiden  $F^{q\_tasaisuus}$  ja  $F^{w\_tav}$  kustannukset olisivat samaa luokkaa. Tämän jälkeen huomattiin että vedenpinnan taso laski paikoitellen liian alas, joten  $p^{w\_min}$  kymmenkertaistettiin. Lopuksi säännöstelyrajapainokertoimille  $p^{w\_sraja\_min}$  ja  $p^{w\_sraja\_max}$  annettiin arvo 100000, jotta säännöstelyrajoja ei rikottaisi. Painokertoimille  $p^{w\_tav}$ ,  $p^{q\_tav}$ ,  $p^{q\_min}$  ja  $p^{q\_max}$  voitiin jättää arvo 0. Kaikki painokertoimet on kerrottu kertoimella  $10^{-12}$ , jotta kokonaiskustannus on sillä sopivalla alueella, jolle optimointialgoritmi iteraation lopetusehtoineen on viritetty. Lopulliset painokertoimet on esitetty taulukossa 1.

Reis-Vuohtajärven lopulliset painokertoimet muodostuivat niin, että ensin  $p^{w\_min}$ :lle ja  $p^{w\_max}$ :lle annettiin arvo 1. Seuraavaksi  $p^{w\_min}$ :n ja  $p^{w\_max}$ :n arvoa kasvatettiin 100:an, jotta kustannus olisi optimointialgoritmille sopivalla lukualueella. Tämän jälkeen  $p^{q\_max}$ :lle annettiin arvo 1000, jotta juoksutus pysyisi tulvarajaa pienempänä.  $p^{\Delta q}$ :lle annettiin myös arvoksi 1000, jotta juoksutus olisi tasaista. Lopuksi  $p^{w\_tav}$ :lle annettiin arvo 0.000001, jotta vedenkorkeus olisi lähellä tavoitealuetta. Painokertoimet  $p^{w\_sraja\_min}$  ja  $p^{w\_sraja\_max}$  jätettiin nolllaksi, koska Reis-Vuohtajärven vedenkorkeuden säännöstelyrajaa ei käytännössä noudateta keväisin. Tämä näkyy hyvin kuvassa 18: violetti käyrä (havaittujen arvojen päivittäinen keskiarvo vuosilta 1976-2007) on säännöstelyn ylärajaa korkeammalla maaliskuun lopusta toukokuun puoliväliin.

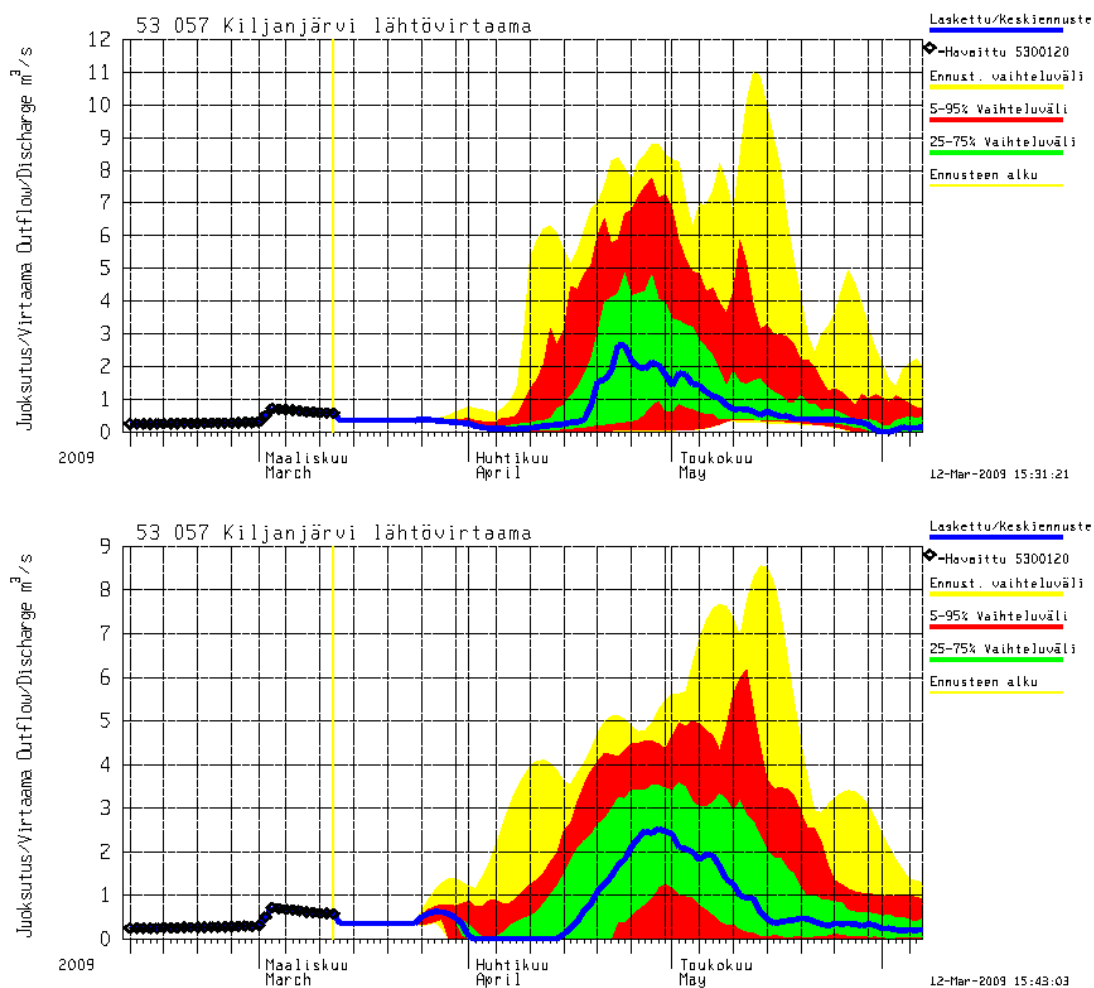
## 5.3 Säännöstelyohjeistolla ja juoksutuslaskennalla toteutettujen vesistöennusteiden vertailu

### 5.3.1 Kiljanjärven juoksutus

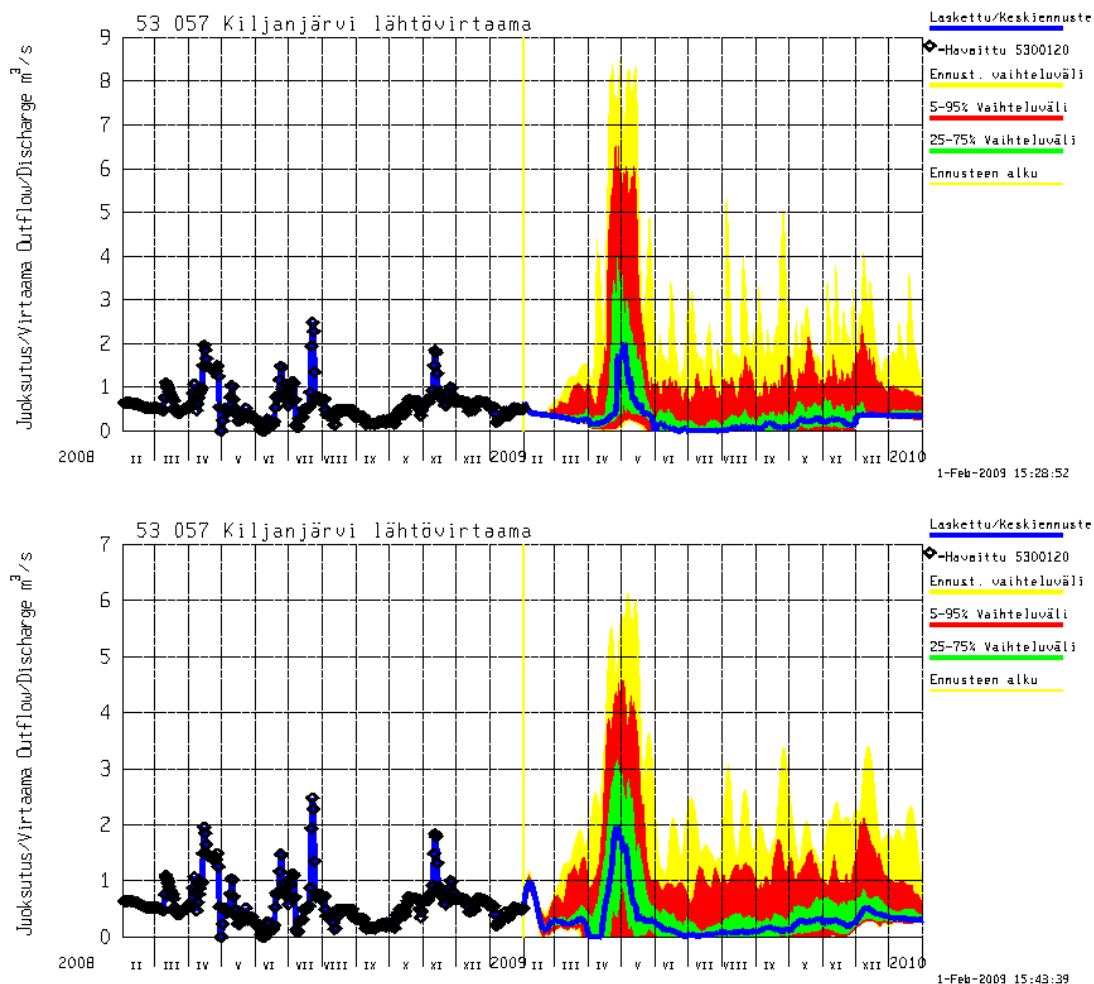


Kuva 11: Helmikuun ensimmäisen päivän ennustekuvat säännöstelyohjeiston ja juoksutuslaskennan mukaisilla juoksutuksilla. Juoksutuksen ennen huhtikuuta ovat  $0\text{m}^3/\text{s}$  ja  $1\text{m}^3/\text{s}$  välillä. Säännöstelyohjeistolla suurin juoksutus on suurempaa, yli  $8\text{m}^3/\text{s}$ , kun se juoksutuslaskennalla on enintään  $5.5\text{m}^3/\text{s}$ . Juoksutuslaskennan pienempi maksimijuoksutus selittyy tulovirtaamien ennakkoinnilla. Keskimääräinen juoksutus on samankaltainen, mutta juoksutuslaskennalla se nousee huhtikuun puolivälissä tasaisesti muutaman viikon, kun säännöstelyohjauksella se nousee jyrkästi huhtikuun loppupuolella.



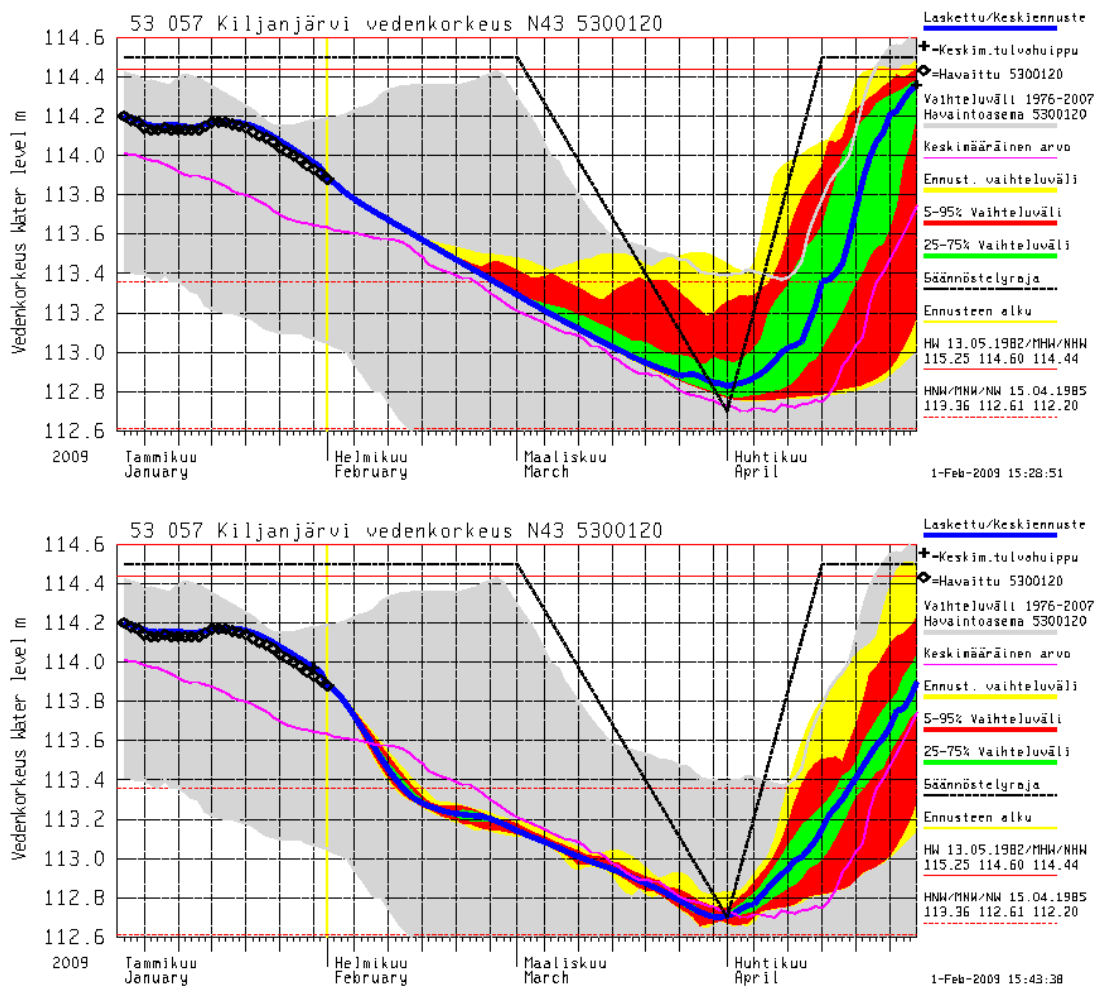


Kuva 12: Säännöstelijän syöttämä juoksutusennuste määrää juoksutuksen ennusteen alussa. Säännöstelyohjeiston mukainen juoksutus on suurimmillaan n.  $11m^3/s$ , kun juoksutuslaskennalla se on n.  $8.5m^3/s$ . Juoksutuslaskenta huomioi tulovirtaamaennusteen, jonka vuoksi juoksutuksen keskiennuste nousee loivemmin kuin säännöstelyohjeistolla.

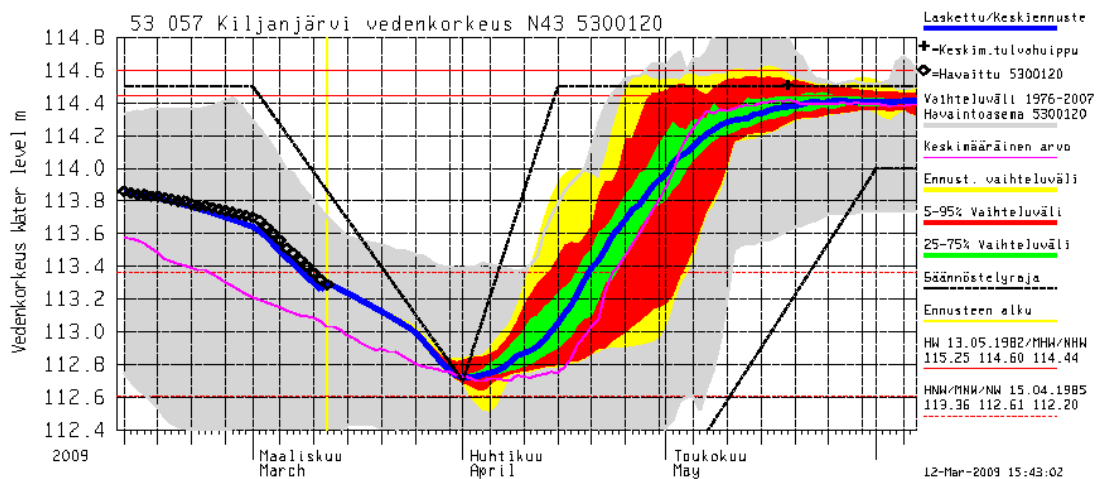
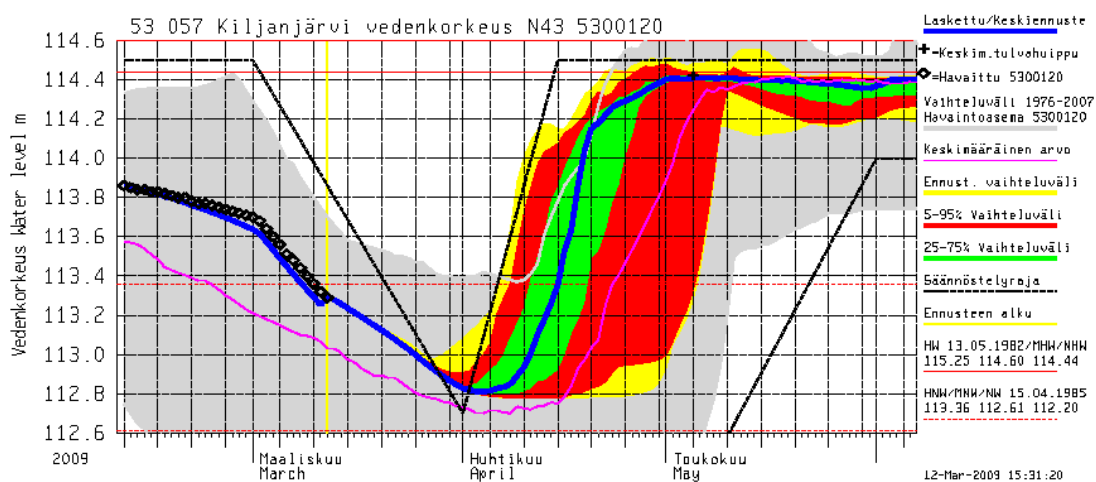


Kuva 13: Kevään jälkeinen juoksutus on sekä säännöstelyohjeistolla että juoksutuslaskennalla hyvin samankaltainen. Juoksutuslaskenta ennakoi tulovirtaamahuippuja, jolloin suurimmat juoksutukset jäivät matalammiksi.

### 5.3.2 Kiljanjärven vedenkorkeus

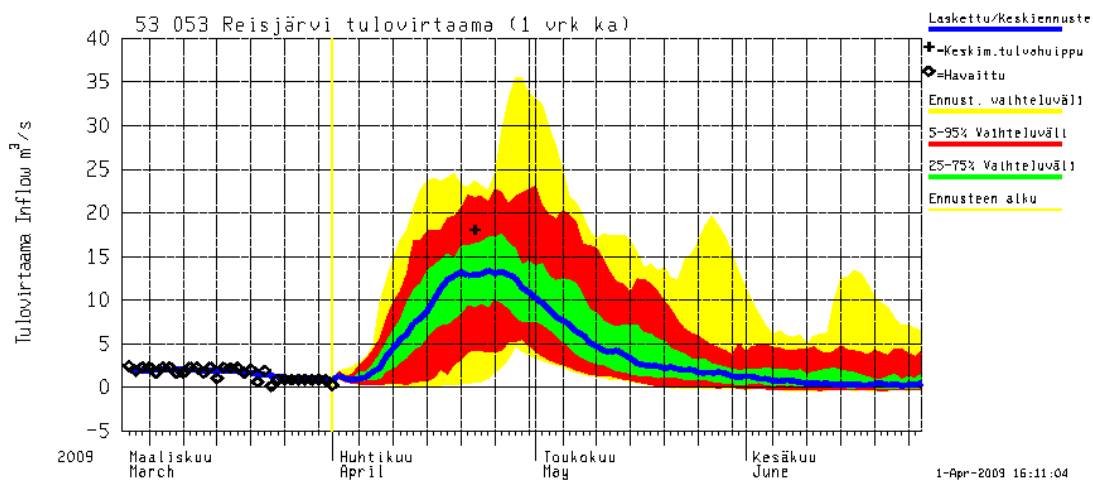
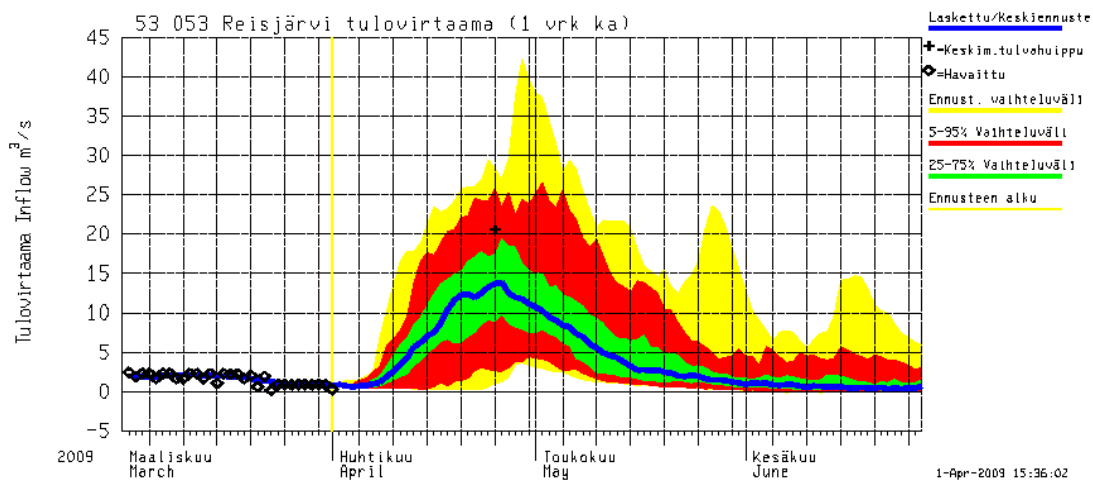


Kuva 14: Juoksutuslaskennalla (alempi kuva) kyetään pitämään vedenkorkeus nk. kevätkuopan aikana säännöstelyn ylärajan alapuolella, toisin kuin säännöstelyohjeistolla tehdyssä ennusteessa.



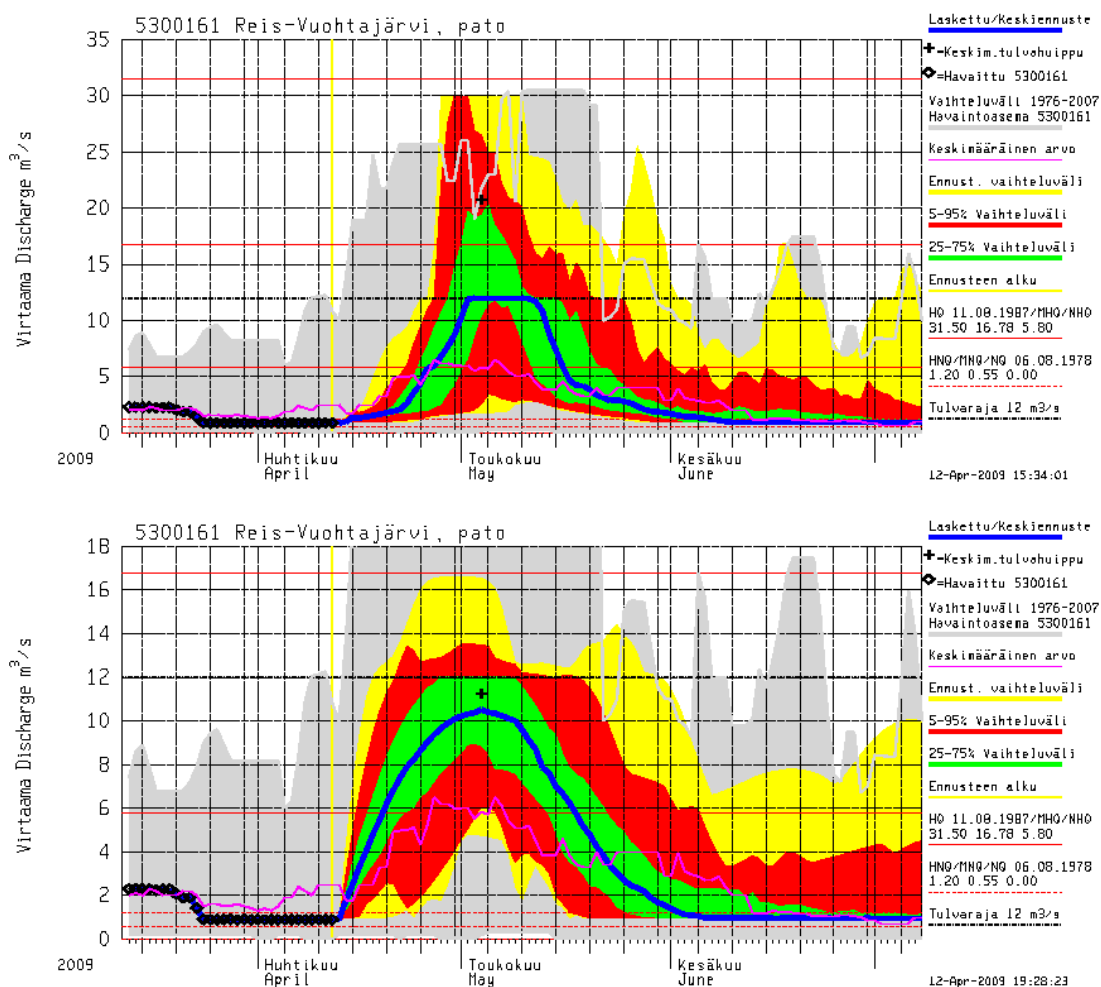
Kuva 15: Kevätkuopan jälkeinen vedenkorkeus on sekä säännöstelyohjeiston että juoksutuslaskennan perusteella tehdyissä ennusteissa säännöstelyn ylä- ja alarajojen välisellä alueella. Juoksutuslaskennalla keskimääräinen vedenkorkeus on lähempänä vuosien 1976-2007 keskimääräistä vedenkorkeutta (violetti käyrä).

### 5.3.3 Reis-Vuohtajärven tulovirtaama



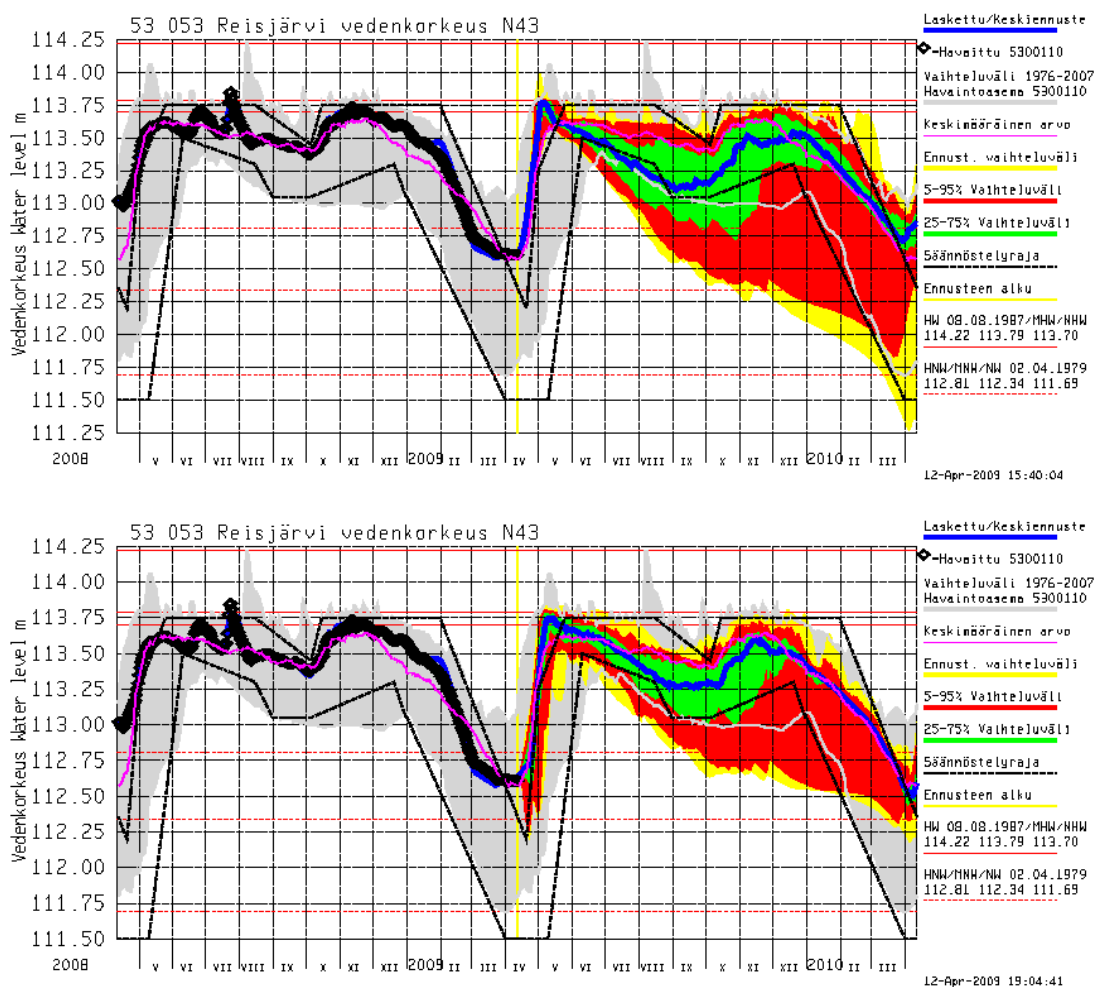
Kuva 16: Ylemmässä kuvassa Kiljanjärven juoksutus määräytyy säännöstelyohjeistolla, alemmassa juoksutuslaskennalla. Merkittävää eroa ei ole, mutta juoksutuslaskennalla suurin tulovirtaama  $35m^3/s$  on  $5m^3/s$  pienempi kuin säännöstelyohjeiston vastaava,  $40m^3/s$ .

### 5.3.4 Reis-Vuohtajärven juoksutus



Kuva 17: Tulvaraja  $12\text{m}^3/\text{s}$  ylitetään juoksutuslaskella huomattavasti harvemmin kuin säännöstelyohjeistolla, ja ylitykset ovat pienempiä. Juoksutuslaskennalla tulvaraja ylitetään keskimäärin joka neljäs vuosi, säännöstelyohjauksella joka toinen. Suurin juoksutus säännöstelyohjeistolla on Myllypadon maksimijuoksutuskapasiteetin verran, eli  $30\text{m}^3/\text{s}$ . Juoksutuslaskennalla suurin juoksutus on pienempi,  $20\text{m}^3/\text{s}$ , jolloin tulvavahingot jäävät vähäisemmiksi.

### 5.3.5 Reis-Vuohtajärven vedenkorkeus



Kuva 18: Sekä säännöstelyohjeistolla että juoksutuslaskennalla vedenkorkeus on paitoitellen säännöstelyn alarajan alapuolelle. Tämä johtuu siitä, että Kalajanjoen valuma-alueen säännöstelyluvassa on asetettu Reis-Vuohtajärven lähtövirtaamalle alaraja  $0.95\text{ m}^3/\text{s}$ , ja jotkin yksittäiset tulovirtaamaennusteet ovat niin pieniä, ettei säännöstelyn alarajaa vedenkorkeudelle kyetä noudattamaan. Juoksutuslaskennalla vedenkorkeus alittaa säännöstelyrajan vähemmän kuin säännöstelyohjeistolla.

## 6 Yhteenveto

Vesistömallijärjestelmän ennustesimulaatioissa säännösteltyjen järvien juoksutukset määräytyvät säännöstelyohjeiston perusteella, eli järven juoksutus luetaan päivämäärän ja vedenkorkeuden perusteella valmiiksi lasketusta taulukosta. Säännöstelyohjeistoja joudutaan muokkaamaan, jotta ne sopisivat kulloiseenkin vesitilanteeseen ja ennusteen juoksutukset olisivat realistisia. Tämä diplomityö syntyi tarpeesta kehittää vaihtoehtoinen menetelmä juoksutusten laskentaan.

### 6.1 Tulosten tarkastelu

Juoksutuslaskentaa vertailtiin säännöstelyohjeistoon ajamalla Kalajoen Kalajanjoen valuma-alueen ennustesimulaatioita. Kohdealueella on kaksi peräkkäistä säännösteltyä järveä, joista jälkimmäisen lähtövirtaamalle on säännöstelyluvassa asetettu tulvaraja.

Juoksutuslaskennalla tehdyissä ennusteissa juoksutus on tasaisempaa kuin säännöstelyohjeistolla tehdyissä ennusteissa, minkä vuoksi peräkkäisten säännösteltyjen järvien alemman järven tulovirtaamakin on tasaisempaa. Vedenkorkeus rikkoo vähemmän säännöstelyrajoja, ja vedenkorkeuden jakauma on luonnollisempi, koska ennusteen keskimääräinen vedenkorkeus on lähempänä historian mukaisten referenssitietojen keskimääräistä vedenkorkeutta.

Säännöstelyohjeistolla tehdyissä ennusteissa vedenpinnan taso nousee nopeasti tulovirtaaman kasvaessa äkillisesti, ja juoksutus suurenee vasta vedenkorkeuden noustua. Tämän vuoksi keskimääräinen vedenkorkeus on paikoitellen historian mukaisien referenssitietojen keskimääräistä vedenkorkeutta huomattavasti korkeammalla. Juoksutuslaskennalla tehdyissä ennusteissa tulovirtaaman kasvuun varaudutaan lisäämällä juoksutusta jo aikaisemmin.

Tulosten tarkastelun yhteenvetona voidaan todeta, että juoksutuslaskennalla tehdyt vesistöennusteet ovat pääsääntöisesti luonnollisempia ja tarkoituksenmukaisempia kuin säännöstelyohjeistolla tehdyt.

### 6.2 Juoksutuslaskennan arviointi ja jatkokehitys

Säännöstelyohjeistoa joudutaan muokkaamaan kulloiseenkin vesitilanteeseen sopivaksi, jotta juoksutus olisi realistista. Tätä muokkaamista ei tarvitse tehdä, kun tulovirtaamaan sopiva tarkoituksenmukainen juoksutus lasketaan automaattisesti juoksutuslaskennalla.

Kahden perättäisen säännöstellyn järven tapauksessa alemman järven tulovirtaamaan vaikuttaa oleellisesti ylemmän järven juoksutus, joka on juoksutuslaskennalla laskettuna tasaisempaa kuin säännöstelyohjeiston määrittelemänä. Tämän vuoksi alemmankin järven juoksutus pysyy tasaisempana, riippumatta siitä ohjataanko alemman järven juoksutusta säännöstelyohjeistolla vai juoksutuslaskennalla.



SQP-menetelmät ovat osoittautuneet tehokkaiksi ratkaisemaan kohdan 4.4 tyypisiä ongelmia, joissa epälineaariset kohde- ja rajoitefunktiot ovat sileitä [6]. Optimointimalli voitaisiin ratkaista BFGS-algoritmin sijaan SQP-algoritmillä, kuten SNOPT:lla [6]. Tästä olisi se etu, että rajoitteet voitaisiin huomioida algoritmissa, ja erillisiä kustannusfunktion rajoiteosia (yhtälöt 47 - 49) ja juokсутusten tasausta (kohta 4.5) ei tarvittaisi.

Juokсутuslaskennassa optimoidaan deterministisen tulovirtaamaennusteen mukainen juokсутus, eli tulovirtaamassa ei ole lainkaan epävarmuutta vaan tuleva sää oletetaan tunnetuksi. Parempi olisi optimoida yksi juokсутus koko tulovirtaamaennustejakauman perusteella, ja laskea vedenkorkeuden jakauma näiden perusteella. Näin optimoitu juokсутus olisi mielenkiintoinen, koska se vastaisi säännöstelijän esittämään kysymykseen “Miten paljon tänään pitäisi juokсутtaa?”. Optimoinnin aikahorisontti ei voisi olla kovinkaan pitkä; lumen sulamiskaudella korkeintaan muutamia kuukausia laajoilla suurijärvisillä vesistöillä, ja nopeilla vähäjärvisillä vesistöillä korkeintaan kuukausi. Lumen sulamiskauden ulkopuolella aikahorisontti voisi olla suurilla järvisillä vesistöillä korkeintaan muutamia viikkoja, nopeilla vähäjärvisillä vesistöillä korkeintaan viikko.

Yksittäisen järven säännöstelyä mielenkiintoisempi optimointiongelma on järviryhmän säännöstelyongelma, kuten Hämäläisellä ja Mäntysaarella [9]. Järviryhmässä vesi kulkee ylemmästä järvestä alempaan, jolloin ylempien järvien juokсутukset vaikuttavat suoraan alempien järvien tulovirtaamiin. Järviryhmän optimointiongelmasa pyritään löytämään sellaiset juokсутukset, joilla järvisysteemin tila kokonaisuudessaan on hyvä kautta optimointijakson, mikä on oleellisesti haastavampaa kuin yksittäisen järven tapauksessa. Tämä diplomityö on rajattu käsittelemään vain yksittäisen järven ongelmaa, mutta järviryhmän säännöstelyn optimointi olisi parannus Vesistömallijärjestelmään.

## Viitteet

- [1] Arnold E., Tatjewski P., Wolochowicz P. (1994) "Two methods for large-scale nonlinear optimization and their comparison on a case study of hydropower optimization", *J. Optim. Theory Appl.*, 81(2), 221-248.
- [2] Bazaraa M., Sherali H., Shetty C. (1993) "Nonlinear programming: theory and algorithms", John Wiley & Sons, New York.
- [3] Bergström S. (1976) "Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian catchments", SMHI, Nr RH7, Norrköping.
- [4] Cai X., McKinney D., Lasdon L. (2001) "Solving nonlinear water management models using a combined genetic algorithm and linear programming approach", *Adv. in Water Resour.*, 24, 667-676.
- [5] Ekholm, M. (1993) "Suomen vesistö-alueet", Vesi- ja ympäristöhallinnon julkaisuja, sarja A 126.
- [6] Gill P.E., Murray W., Saunders M.A. (2002) "SNOPT: An SQP algorithm for large-scale constrained optimization", *SIAM J. Opt.*, 12(4), 979-1006.
- [7] Grydier J., Stedinger J. (1985) "Algorithms for optimizing hydropower system operation", *Water Resour. Res.*, 21(1), 1-10.
- [8] Hall W.A., Shephard R.W. (1967) "Optimum operations for planning of a complex water resources system", *Tech. Rep. 122(UCLA-ENG 67-54)*, Water Resour. Cent., Sch. of Eng. and Appl. Sci., Univ. of Calif., Los Angeles.
- [9] Hämäläinen R.P., Mäntysaari J. (2001) "A dynamic interval goal programming approach to the regulation of a lake-river system", *J. Multi-Crit. Decis. Anal.*, 10, 75-86
- [10] Hiew K. (1987) "Optimization algorithms for large scale multi-reservoir hydropower systems", Ph.D. Dissertation, Department of Civil Engineering, Colorado State University, Ft. Collins, Colorado.
- [11] Hooke R., Jeeves T. (1961) "Direct search solution of numerical and statistical problems", *Journal of the ACM*, 8(2), 212-229.
- [12] Labadie J. (1997) "Reservoir system optimization models", *Water Resources Update*, The Universities Council on Water Resources (UCOWR), Issue 108, Southern Illinois Univ., Carbondale, I11.
- [13] Labadie J. (2004) "Optimal operation of multireservoir systems: State-of-the-art review", *Journal of Water Resour. Planning and Management*, 130(2), 93-111.
- [14] Molteni F., Buizza R., Palmer T.N., Petroliagis T. (1996) "The ECMWF ensemble prediction system: Methology and validation", *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 122, 73-119

- [15] Moré J.J., Thuente D.J. (1990) "On linesearch algorithms with guaranteed sufficient decrease", Mathematics and Computer Science Division Preprint MCS-P153-0590, Argonne National Laboratory, Argonne, IL.
- [16] Nocedal J. (1980) "Updating quasi-Newton matrices with limited storage", *Math. Comp.*, 35(151), 773-782
- [17] Liu D.C., Nocedal J. (1989) "On the limited memory BFGS method for large scale optimization", *Math. Progr.*, 45, 503-528
- [18] Nash S.G., Nocedal J. (1991) "A numerical study of the limited memory BFGS method and the truncated-Newton method for large scale optimization", *SIAM J. Opt.*, 1(3), 358-372
- [19] Byrd R.H., Lu P., Nocedal J. (1995) "A limited memory algorithm for bound constrained optimization", *SIAM Journal on Scientific and Statistical Computing*, 16(5), 1190-1208
- [20] Byrd R.H., Nocedal J., Schnabel R.B. (1996) "Representations of quasi-Newton matrices and their use in limited memory methods", *Tech. Rep. NAM-03*, Northwestern Univ.
- [21] Zhu C., Byrd R.H., Nocedal J. (1997) "L-BFGS-B: Fortran subroutines for large scale bound constrained optimization", *ACM Transactions on Mathematical Software*, 23(4), 550-560
- [22] Jorge Nocedal "L-BFGS: Limited Memory Codes", *verkkolähde*, <http://www.ece.northwestern.edu/~nocedal/lbfgsb.html>, 21.2.2009.
- [23] Oren S., Spedicato E. (1976) "Optimal conditioning of self-scaling variable metric algorithms", *Math. Programming*, 10, 70-90
- [24] Pohjois-Savon ympäristökeskus (2008) "Vesistöjen säännöstely", *verkkolähde*, <http://www.ymparisto.fi/default.asp?contentid=273916&lan=FI>, 1.4.2008.
- [25] Taha H.A. (1982) "Operations Research", MacMillan, New York.
- [26] Unver O., Mays L. (1990) "Model for real-time optimal flood control operation of a reservoir system", *Water Resources Management*, 4, 21-46.
- [27] Vehviläinen B. (1992) "Snow cover models in operational watershed forecasting", Publications of Water and Environment Research Institute 11.
- [28] Vehviläinen B., Huttunen M. (2001) "Hydrological forecasting and real time monitoring in Finland: The Watershed Simulation and Forecasting System (WSFS)".
- [29] Windsor J.S. (1973) "Optimization model for the operation of flood control systems", *Water Resour. Res.*, 9(5), 1219-1226.

- [30] Yeh W. (1985) "Reservoir management and operations models: A state-of-the-art review", *Water Resour. Res.*, 21(12), 1797-1818.

## Liite A

Kustannusfunktion osittaisderivaattoja tarvitaan funktion gradientin määrittämiseen. Kustannusfunktion gradientteja tarvitaan käytettäessä gradienttipohjaista optimointialgoritmia, kuten BFGS-algoritmia (3.3.3).

$$\frac{\partial F}{\partial v_k} = \frac{\partial F^{w\_tav}}{\partial v_k} + \frac{\partial F^{w\_sraja}}{\partial v_k} + \frac{\partial F^{q\_tav}}{\partial v_k} + \frac{\partial F^{q\_tasaisuus}}{\partial v_k} + \frac{\partial F^{q\_rajat}}{\partial v_k}, \quad (\text{A1})$$

missä

$$\begin{aligned} \frac{\partial F^{w\_tav}}{\partial v_k} &= p^{w\_min} \frac{\partial f^{w\_min}}{\partial v_k} + \\ & p^{w\_max} \frac{\partial f^{w\_max}}{\partial v_k} + \\ & p^{w\_tav} \frac{\partial f^{w\_tav}}{\partial v_k} \end{aligned} \quad (\text{A2})$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial F^{w\_sraja}}{\partial v_k} &= p^{w\_sraja\_min} \frac{\partial f^{w\_sraja\_min}}{\partial v_k} + \\ & p^{w\_sraja\_max} \frac{\partial f^{w\_sraja\_max}}{\partial v_k} \end{aligned} \quad (\text{A3})$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial F^{q\_tav}}{\partial v_k} &= p^{q\_min} \frac{\partial f^{q\_min}}{\partial v_k} + \\ & p^{q\_max} \frac{\partial f^{q\_max}}{\partial v_k} + \\ & p^{q\_tav} \frac{\partial f^{q\_tav}}{\partial v_k} \end{aligned} \quad (\text{A4})$$

$$\frac{\partial F^{q\_tasaisuus}}{\partial v_k} = p^{\Delta q} \frac{\partial f^{\Delta q}}{\partial v_k} \quad (\text{A5})$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial F^{q\_rajat}}{\partial v_k} &= p^{q\_rajat\_min} \frac{\partial f^{q\_rajat\_min}}{\partial v_k} + \\ & p^{q\_rajat\_max} \frac{\partial f^{q\_rajat\_max}}{\partial v_k}. \end{aligned} \quad (\text{A6})$$

## Vedenkorkeuden tavoitealueosan osittaisderivaatta

$$\frac{\partial f^{w\_min}}{\partial v_k} = \begin{cases} 2(v_t - v_t^{min}) & \text{jos } v_t < v_t^{min} \\ 0 & \text{muutoin} \end{cases} \quad (\text{A7})$$

$$\frac{\partial f^{w\_max}}{\partial v_k} = \begin{cases} 2(v_t - v_t^{max}) & \text{jos } v_t > v_t^{max} \\ 0 & \text{muutoin} \end{cases} \quad (\text{A8})$$

$$\frac{\partial f^{w\_tav}}{\partial v_k} = 2(v_t - v_t^{tav}). \quad (\text{A9})$$

## Vedenkorkeuden säännöstelyrajaosan osittaisderivaatta

$$\frac{\partial f_{w\_sraja\_min}}{\partial v_k} = \begin{cases} 2(v_t - v_t^{sraja\_min}) & \text{jos } v_t < v_t^{sraja\_min} \\ 0 & \text{muutoin} \end{cases} \quad (\text{A10})$$

$$\frac{\partial f_{w\_sraja\_max}}{\partial v_k} = \begin{cases} 2(v_t - v_t^{sraja\_max}) & \text{jos } v_t > v_t^{sraja\_max} \\ 0 & \text{muutoin} \end{cases} . \quad (\text{A11})$$

## Juoksutuksen tavoitealueosan osittaisderivaatta

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_{q\_tav}}{\partial v_k} &= 2(v_t^{qtav} - v_{t-1} - v_t^{qin} + v_t) - 2(v_{t+1}^{qtav} - v_t - v_{t+1}^{qin} + v_{t+1}) \\ &= 2(v_t^{qtav} - v_{t+1}^{qtav} - v_{t-1} + 2v_t - v_{t+1} - v_t^{qin} + v_{t+1}^{qin}) \end{aligned} \quad (\text{A12})$$

$$\frac{\partial f_{q\_min}}{\partial v_k} = \frac{\partial f_k^{q\_min}}{\partial v_k} + \frac{\partial f_{k+1}^{q\_min}}{\partial v_k} \quad (\text{A13})$$

$$\frac{\partial f_{q\_max}}{\partial v_k} = \frac{\partial f_k^{q\_max}}{\partial v_k} + \frac{\partial f_{k+1}^{q\_max}}{\partial v_k}, \quad (\text{A14})$$

missä

$$\frac{\partial f_k^{q\_min}}{\partial v_k} = \begin{cases} 2(v_k^{qmin} - v_{k-1} - v_k^{qin} + v_k) & \text{jos } v_k < v_k^{qmin} \\ 0 & \text{muutoin} \end{cases} \quad (\text{A15})$$

$$\frac{\partial f_{k+1}^{q\_min}}{\partial v_k} = \begin{cases} -2(v_{k+1}^{qmin} - v_k - v_{k+1}^{qin} + v_{k+1}) & \text{jos } v_{k+1} < v_{k+1}^{qmin} \\ 0 & \text{muutoin} \end{cases} \quad (\text{A16})$$

$$\frac{\partial f_k^{q\_max}}{\partial v_k} = \begin{cases} 2(v_k^{qmax} - v_{k-1} - v_k^{qin} + v_k) & \text{jos } v_k < v_k^{qmax} \\ 0 & \text{muutoin} \end{cases} \quad (\text{A17})$$

$$\frac{\partial f_{k+1}^{q\_max}}{\partial v_k} = \begin{cases} -2(v_{k+1}^{qmax} - v_k - v_{k+1}^{qin} + v_{k+1}) & \text{jos } v_{k+1} < v_{k+1}^{qmax} \\ 0 & \text{muutoin} \end{cases} . \quad (\text{A18})$$

## Juoksutuksen tasaisuusosan osittaisderivaatta

$$\frac{\partial f^{\Delta q}}{\partial v_k} = \frac{\partial f_k^{\Delta q}}{\partial v_k} + \frac{\partial f_{k+1}^{\Delta q}}{\partial v_k} + \frac{\partial f_{k+2}^{\Delta q}}{\partial v_k}, \quad (\text{A19})$$

missä

$$\frac{\partial f_k^{\Delta q}}{\partial v_k} = -2(-v_{k-2} + 2v_{k-1} - v_k - v_{k-1}^{qin} + v_k^{qin}) \quad (\text{A20})$$

$$\frac{\partial f_{k+1}^{\Delta q}}{\partial v_k} = 4(-v_{k-1} + 2v_k - v_{k+1} - v_k^{qin} + v_{k+1}^{qin}) \quad (\text{A21})$$

$$\frac{\partial f_{k+2}^{\Delta q}}{\partial v_k} = -2(-v_k + 2v_{k+1} - v_{k+2} - v_{k+1}^{qin} + v_{k+2}^{qin}). \quad (\text{A22})$$

## Juoksutuksen rajoitusosan osittaisderivaatta

$$\frac{\partial f_{q-rajat\_min}}{\partial v_k} = \frac{\partial f_k^{q-rajat\_min}}{\partial v_k} + \frac{\partial f_{k+1}^{q-rajat\_min}}{\partial v_k} \quad (\text{A23})$$

$$\frac{\partial f_{q-rajat\_max}}{\partial v_k} = \frac{\partial f_k^{q-rajat\_max}}{\partial v_k} + \frac{\partial f_{k+1}^{q-rajat\_max}}{\partial v_k}, \quad (\text{A24})$$

missä

$$\frac{\partial f_k^{q-rajat\_min}}{\partial v_k} = \begin{cases} 2(v_k^{qalaraja} - v_{k-1} - v_k^{qin} + v_k) & \text{jos } v_k < v_k^{qalaraja} \\ 0 & \text{muutoin} \end{cases} \quad (\text{A25})$$

$$\frac{\partial f_{k+1}^{q-rajat\_min}}{\partial v_k} = \begin{cases} -2(v_{k+1}^{qalaraja} - v_k - v_{k+1}^{qin} + v_{k+1}) & \text{jos } v_{k+1} < v_{k+1}^{qalaraja} \\ 0 & \text{muutoin} \end{cases} \quad (\text{A26})$$

$$\frac{\partial f_k^{q-rajat\_max}}{\partial v_k} = \begin{cases} 2(v_k^{qylaraja} - v_{k-1} - v_k^{qin} + v_k) & \text{jos } v_k < v_k^{qylaraja} \\ 0 & \text{muutoin} \end{cases} \quad (\text{A27})$$

$$\frac{\partial f_{k+1}^{q-rajat\_max}}{\partial v_k} = \begin{cases} -2(v_{k+1}^{qylaraja} - v_k - v_{k+1}^{qin} + v_{k+1}) & \text{jos } v_{k+1} < v_{k+1}^{qylaraja} \\ 0 & \text{muutoin} \end{cases} \quad (\text{A28})$$

## Liite B

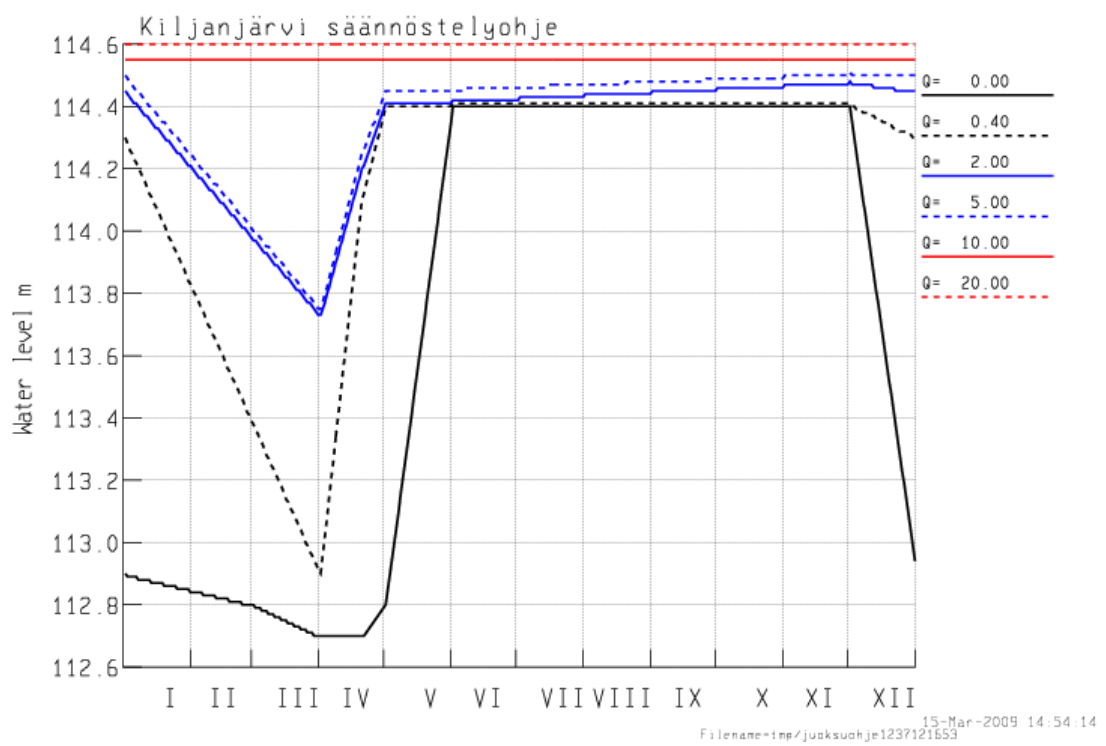
pvm	vedenkorkeus $m$		
	min	tav	max
000401	112.65	112.70	112.80
000515	114.35	114.40	114.50
001201	114.35	114.40	114.50

Taulukko B1: Kiljanjärven vedenkorkeuden tavoitealueet.

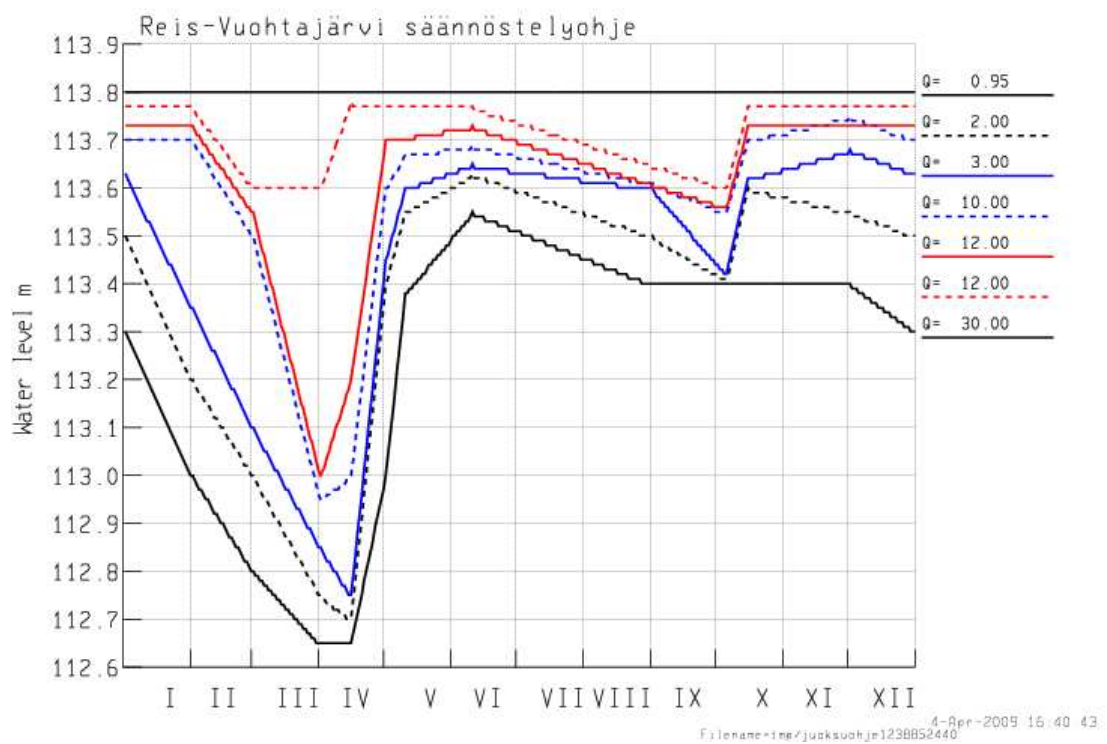
pvm	vedenkorkeus $m$		
	min	tav	max
000120	112.65	113.30	113.70
000301	112.50	113.00	113.10
000401	112.30	112.55	112.80
000415	112.25	112.55	113.75
000501	112.25	113.50	113.75
000515	112.65	113.60	113.75
000701	113.00	113.60	113.70
000801	113.00	113.50	113.60
000901	113.00	113.40	113.50
001010	113.00	113.40	113.60
001101	113.00	113.60	113.75
001201	113.00	113.60	113.75

Taulukko B2: Reis-Vuohtajärven vedenkorkeuden tavoitealueet.





Kuva B1: Kiljanjärven säännöstelyohjeisto.



Kuva B2: Reis-Vuohajärven säännöstelyohjeisto.