

Risto Kirves

Kokemäenjoen alaosan hydraulinen mallinnus

Insinöörیتieteiden korkeakoulu

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten Espoossa 26.8.2011.

Työn valvoja:

Prof. Harri Koivusalo

Työn ohjaaja:

TkT Teemu Kokkonen



Aalto-yliopisto
Insinöörیتieteiden korkeakoulu

Tekijä: Risto Kirves		
Työn nimi: Kokemäenjoen alaosan hydraulinen mallinnus		
Päivämäärä: 26.8.2011	Kieli: Suomi	Sivumäärä:8+73
Insinööritieteiden korkeakoulu		
Yhdyskunta- ja ympäristötekniikan laitos		
Professori: Tekninen vesitalous		Koodi: Yhd-12
Valvoja: Prof. Harri Koivusalo		
Ohjaaja: TkT Teemu Kokkonen		
<p>Jokien aiheuttamat tulvat ovat usein yhdyskunnille ongelmallisia, koska tulvatilanteessa veden alle jää alueita, joille veden ei toivottaisi pääsevän. Pori on Suomen merkittävin tulvariskialue. Tulvan sattuessa Porissa 20 000 ihmisen koti on vaarassa, ja tilanteen aiheuttamat taloudelliset vahingot ovat huomattavan suuret.</p> <p>Tässä diplomityössä muodostettiin yhdistetty yksi- ja kaksiulotteinen hydraulinen virtausmalli Porin läpi kulkevan Kokemäenjoen alaosalta InfoWorks RS -ohjelmistolla. Työssä tutkittiin vedenkorkeuksia mallinnetussa uomaverkostossa sekä tulvan peittävyyttä erilaisissa virtausilanteissa. Tutkittavat tilanteet olivat sulan vuodenaajan suuren virtaaman aiheuttama tulva sekä jääpatoon aiheuttamat tulvatilanteet. Tehdyllä virtausmallilla tutkittiin tulvatilanteita nykyisen mukaisessa uomaverkostossa sekä tilanteessa, jossa osaa uomaverkostosta on muutettu ruoppaamalla.</p> <p>Tulosten perusteella hankalin tulvatilanne syntyy, kun Kokemäenjoen virtaama on suuri ja merivesi on korkealla. Tällöin tulvavesi valtaa joen haarojen välisen luotojen alueen lähes kokonaan. Lisäksi joki tulvii Sunniemeen sekä tärkeille liikenneväylille asti vaikeuttaen liikenteen sujuvuutta. Tutkitulla uomaverkoston ruoppauksella ei voida merkittävästi vaikuttaa tulvatilanteeseen. Ruoppauksesta hyödytään kuitenkin tilanteessa, jossa virtaama on suuri, mutta merivesi on tavanomaisella korkeudella. Tällöin luotojen alueelle syntyvän tulvan laajuus on pienempi.</p> <p>Lähes yhtä vaikea tulvatilanne syntyy, jos joen kahteen haaraan, Raumanjuoppaan ja Luotsinmäenhaaraan, kehittyy jääpato. Myös tällöin tulva peittää suurimmaksi osaksi luotojen alueen ja vesi tulvii Sunniemeen ja hieman Raumanjuovan eteläpuoleisille alueille. Ruoppauksella ei voida merkittävästi vaikuttaa tulvan leviämiseen jääpatotilanteessa.</p>		
Avainsanat: hydraulinen mallinnus, yksiulotteinen virtausmalli, kaksiulotteinen virtausmalli, tulva, Kokemäenjoki, Pori, jääpato		

Author: Risto Kirves		
Title: Hydraulic modelling of the lower Kokemäenjoki River		
Date: 26.8.2011	Language: Finnish	Number of pages:8+73
School of Engineering		
Department of Civil and Environmental Engineering		
Professorship: Water Resources Engineering		Code: Yhd-12
Supervisor: Prof. Harri Koivusalo		
Instructor: D.Sc. (Tech.) Teemu Kokkonen		
<p>Floods caused by rivers are considered to be problematic to communities. When flooding occurs water covers land which should not be submerged. The city of Pori at the delta of the river Kokemäenjoki is the most significant flood risk area in Finland. There are up to 20 000 inhabitants which are in danger to be exposed to floods and resulting damages to their homes. Economical damage would also be remarkably large.</p> <p>In this thesis a coupled numerical 1D/2D hydraulic model was developed using the InfoWorks RS software to the lower part of the Kokemäenjoki River. The model was used to simulate various flow situations to observe water levels and flood inundation. Simulated scenarios included flooding caused by an extremely high flow and flooding caused by ice jams. The model was also used to investigate if dredging part of the channel network would aid in mitigating flood damages.</p> <p>According to the results the most challenging situation occurs when the river has a high flow and the seawater level is high. In that case flood will cover almost completely the area of islets confined by the two branches of the river. Water will flow also to the Sunniemi area and next to important traffic routes. Dredging examined would not aid in mitigating flood damages. However, if seawater is at a conventional level dredging would reduce flood inundation.</p> <p>Almost equally challenging is the condition when ice jams are developed in river branches Luotsinmäenhaara and Raumanjuopa. The area of islets will be covered by water almost completely. Flooding will occur also in the area of Sunniemi and slightly at the southern banks of Raumanjuopa. Dredging examined will not affect flood inundation.</p>		
Keywords: hydraulic modelling, 1D modelling, 2D modelling, flood, The Kokemäenjoki River Basin, The City of Pori, ice jam		

Alkusanat

Tämä diplomityö on tehty Aalto-yliopiston vesitekniikan laboratoriossa. Työ käsittelee Porin kaupungin läpi virtaavan Kokemäenjoen hydraulista mallintamista. Haluan kiittää Porin kaupunkia mahdollisuudesta tehdä diplomityö mielenkiintoisesta ja haastavasta aiheesta, sekä diplomityöni rahoituksesta.

Työn valmistumiseen ovat myötävaikuttaneet useat tahot, joille haluan tässä esittää kiitokseni. Porin tulvasuojelun projektipäällikkö Pekka Vuolan neuvot Porin tulviin vaikuttavista tekijöistä ovat suuresti avustaneet työn edistymisessä. Haluan kiittää häntä myös useista työn sisältöön liittyvistä hyödyllisistä vinkeistä ja huomioista. Työssä keskeisessä osassa oleva maastomalli tehtiin Porin yliopistokeskuksessa, josta kuuluu kiitos Jari Turuselle, Tarmo Lippingille ja Pekka Ruusuvuorelle. Mikko Huokuna Suomen ympäristökeskuksesta antoi hyödyllisiä neuvoja liittyen jääpatojen mallinnukseen, joista oli minulle merkittävää apua. Haluan myös kiittää lämpimästi työni valvojaa Harri Koivusaloa ja ohjaajaa Teemu Kokkosta, joiden tuki on ollut tärkeää työn edistymisen kannalta.

Lopuksi haluan erityisesti kiittää perhettäni, vaimoani Millaa sekä lapsiani Juliaa, Stellaa ja Kasperia, kärsivällisyydestä ja kannustuksesta opintojeni polulla.

Otaniemi, 26.8.2011

Risto Kirves

Sisällysluettelo

Tiivistelmä	ii
Tiivistelmä (englanniksi)	iii
Alkusanat	iv
Sisällysluettelo	v
Symbolit ja lyhenteet	vii
Käsitteet	viii
1 Johdanto	1
2 Tutkimuskohde	3
2.1 Vesistön kuvaus	3
2.2 Vesistön hydrologia ja säännöstely	4
2.3 Tulvantorjunnan tarve	6
3 Tutkimusmenetelmät	8
3.1 Avouomavirtaus ja sen virtaustekijät	8
3.1.1 Avouoman geometria	8
3.1.2 Virtaustyytit	9
3.1.3 Virtaustilat	9
3.1.4 Stationäärinen virtaus	10
3.1.5 Uoman vedenkuljetuskyky	12
3.2 Saint Venantin yhtälöt	13
3.2.1 Massan säilyminen	13
3.2.2 Energian säilyminen	14
3.2.3 Yhtälöiden numeerinen ratkaisu	15
3.3 Joen jäätymisilmiö	16
4 Hydraulinen mallinnus	17
4.1 Yleistä	17
4.2 Virtausmallin rakenne	17
4.2.1 Tulva-alueiden mallinnus	18
4.3 Mallinnetut tulvatilanteet	20
4.3.1 Muutettu nykytilanne	20
4.3.2 Jääpadot	21
4.4 Mallin kalibrointi ja validointi	22
5 Laskentatulokset	27
5.1 Yleistä	27
5.2 Jääpadot virtaamalla 700 m ³ /s	27
5.2.1 Jääpato Luotsinmäenhaarassa	27

5.2.2	Jääpadot Luotsinmäenhaarassa sekä Raumanjuovassa	36
5.3	Virtaama 1100 m ³ /s	44
6	Tulosten tarkastelu	56
7	Johtopäätökset	58
	Lähdeluettelo	60
	Liite A: Paalutus	63
	Liite B: Yksiulotteisen virtauslaskennan tulokset	64

Symbolit ja lyhenteet

Symbolit

A	uoman poikkileikkauksen pinta-ala [m ²]
P	märkäpiiri [m]
T	uoman poikkileikkauksen leveys [m]
y	vesisyvyys, pystysuora etäisyys uoman pohjasta vedenpintaan [m]
z	uoman pohjan korkeus vertailutasoon nähden [m]
h	vedenpinnan korkeus, vedenpinnan korkeus vertailutasoon nähden [m]
H	kokonaiskorkeus [m]
R_h	hydraulinen säde [m]
D	hydraulinen korkeus [m]
R	Reynoldsin luku
V	virtaunopeus [m/s]
L	karakteristinen pituus [m]
ν	veden kinemaattinen viskositeetti [m ² /s]
F	Frouden luku
g	painovoimakiihtyvyys [m/s ²]
S_f	energiaviivan kaltevuus
n	Manningin kerroin

Käsitteet

Jääpato

Jäiden liikkeellelähdön yhteydessä mahdollisesti tapahtuva ilmiö, jossa jäät kasaantuvat esimerkiksi uomien kapeampaan kohtaan ja osittain estävät veden virtaamisen uomassa. Jääpatoja kehittyy yleensä keväällä, mutta myös talvella sään lauhtuminen ja suuri virtaama saattavat aiheuttaa jääpadon muodostumisen.

Hyydepato

Sään pakastumiseen liittyvä ilmiö jokivesistöissä, kun alijäähtyneeseen virtaavaan veteen muodostuu hyydettä, joka kasaantuessaan estää osittain virtaaman uomassa.

Tulvapato

Rannan suuntainen pato, jonka tarkoituksena on estää joen tulviminen maalle. Tulvapadosta käytetään myös nimeä tulvapenger ja suojapato.

1 Johdanto

Tämä diplomityö käsittelee Kokemäenjoen alaosan hydraulista mallintamista. Työssä Kokemäenjoen alaosalle Porin keskustan alueelle on rakennettu numeerinen virtausmalli. Numeerisella virtausmallilla on mahdollista määrittää vedenkorkeuksia, virtaamia ja virtausnopeuksia erilaisissa virtaustilanteissa. Ohjelmistolla on tehty virtausmalli, jota on käytetty vedenkorkeuksien ja tulvan peittävyuden arviointiin. Tulvatilanteista on käsitelty sekä suuresta virtaamasta johtuvia tavanomaisia vesitulvatilanteita että jäästä aiheutuvia tulvatilanteita.

EU:n tulvadirektiivin mukaan tulvalla tarkoitetaan tilannetta, jossa vesimassa esimerkiksi joen vedenpinnan nousun seurauksena siirtyy maa-alueelle jossa tavallisesti ei ole vettä (*Directive 2007/60/EC Chapter 1 Article 2*, 2007). Tulvan sattuessa veden alle jää usein alueita, joille veden ei toivottaisi pääsevän. Tulviminen tapahtuu yleensä keväisin lumien sulaessa, mutta myös pitkäaikaiset sadekaudet voivat kuormittaa jokea siinä määrin, että uoman vedenkuljetuskyky ylittyy ja vedenpinta nousee tulvakorkeuteen. Kylmissä ilmasto-olosuhteissa tulvia voivat aiheuttaa myös veden jäätyessä mahdollisesti kehittyvät hyyde- ja jääpadot, jolloin vedenpinta joesa saattaa nousta paikallisesti huomattavan korkealle.

Tulvimiseen liittyvät riskit voidaan jakaa suoranaisiin vaaroihin ja tulvimisesta johtuviin välillisiin vaikutuksiin. Suoranainen vaara tai vahinko aiheutuu purkautuvien vesimassojen päästessä kosketuksiin ihmisten, eläinten, rakennusten tai muun omaisuuden kanssa. Välillisiä vaikutuksia ovat muun muassa useiden yhteiskunnan oleellisten palveluiden häiriintyminen, terveyshaitat, tulonmenetykset ja omaisuuden arvon aleneminen.

Tulvasuojelun tarkoituksena on estää tai vähentää tulvista aiheutuvia haitallisia vaikutuksia. Tulvan torjumiseksi käytettäviä keinoja ovat pääasiassa vesistön säännöstely sekä rantojen pengerrykset ja joen pohjan ruoppaus. Ruoppauksella voidaan parantaa uoman vedenjohtokykyä ja rantojen pengerryksillä pyritään varmistamaan veden pysyminen uomassa myös tavanomaista suuremmilla virtaamilla.

Porin kaupungin läpi virtaava Kokemäenjoki on aiheuttanut alueella tulvia noin 10–20 vuoden välein. Viime vuosikymmenien vakavin tilanne tapahtui talvella 1974–1975, jolloin kaupungin keskustan alueelle muodostui jääpato. Muita viime aikoina tapahtuneita uhkaavia tilanteita on ollut 1970-luvun lopulla, 1980-luvun alussa ja 2004–2005. Pori on Suomen merkittävin tulvariskialue. Kaupungissa on noin 80 000 asukasta, joista tulvan sattuessa peräti 20 000 ihmisen koti on vaarassa. Pahan tulvatilanteen aiheuttamat taloudelliset vahingot olisivat huomattavan suuret. (*Verta ja Triipponen*, 2011; *Koskinen*, 2006; *Vuola*, 2010)

Kokemäenjoen alajuoksulla tulvien torjumiseksi tehdyistä rakenteista suurin osa on tehty 1950–1970 luvuilla. Maa- ja metsätalousministeriön Suurtulvatyöryhmän suositusten mukaisesti käynnistettiin vuonna 2003 Porin tulvasuojeluhanke tulvariskien hallinnan kehittämiseksi. Hankkeen tavoitteiden saavuttamiseksi tehtyjen osaselvitysten pohjalta laadittiin Lounais-Suomen ympäristökeskuksen yleissuunnitelma (*Koskinen*, 2006). Porin tulvat -hankkeen osana on tehty osaselvityksiä eri toi-

menpiteiden ja virtaustilanteiden vaikutuksesta Kokemäenjoen alaosan tulviin. Näitä ovat muun muassa yksiulotteisilla HEC-RAS (*Brunner et al.*, 2001) ja DYX-.10-virtausmalleilla ja kaksiulotteisella TELEMAC2D-virtausmallilla (*Lang*, 2010) tehdyt tulvalaskelmat ja tulvakartat. Jäiden vaikutusta Kokemäenjoen alaosan tulvatilanteisiin ovat tutkineet *Huokuna ja Aaltonen* (2009) sekä *Huokuna* (2007).

Tietokoneiden laskentatehon kasvu on vaikuttanut hydraulisten mallinnusmenetelmien kehitykseen. Avouomavirtauksen numeeriset ratkaisumenetelmät kehitettiin pääosin 1970–80 -luvulla. Numeerista avouomavirtauksen mallintamista ovat käsitelleet kattavasti muun muassa *Szymkiewicz* (2010) ja *Litrice ja Fromion* (2009). Nykyään on saatavilla useita avouomavirtauksen numeeriseen mallintamiseen tarkoitettuja ohjelmistoja, joista ehkä tunnetuin on vapaasti saatavissa oleva yksiulotteinen virtausmallinnusohjelma HEC-RAS (*Brunner et al.*, 2001). Tässä työssä käytettiin kaupallista InfoWorks RS -ohjelmistoa (www.innovyze.com/products/infoworks_rs/).

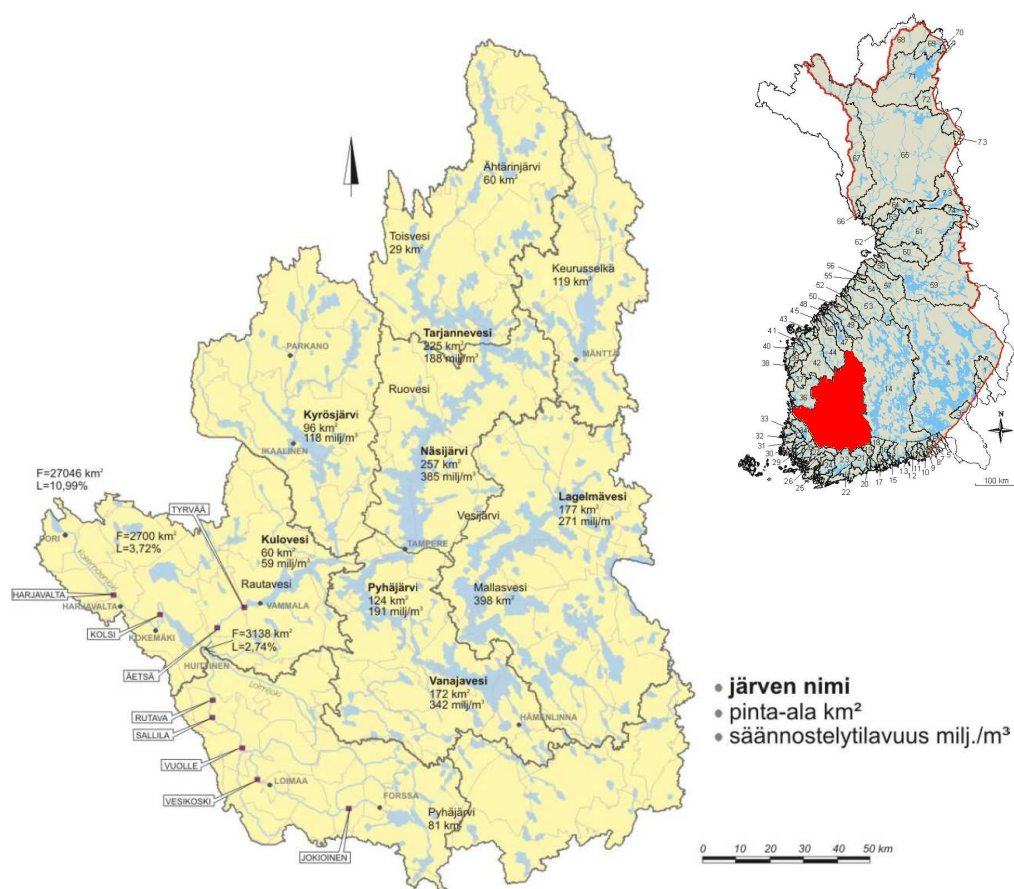
Tämän työn tavoitteina olivat:

1. selvittää InfoWorks RS -ohjelmiston soveltuvuus Kokemäenjoen alajuoksun yleispiirteiseen hydrauliseen mallintamiseen ja erityispiirteiseen mallintamiseen valituissa kohdissa
2. tuottaa lähtöaineistojen ja malliohjelmiston asettamien rajoitusten asettamisessa puitteissa hydrauliset laskelmat Kokemäenjoen vedenkorkeuksista
 - (a) virtauksen tasapainotilan yleispiirteinen mallintaminen Kokemäenjoen alajuoksulla kaupunkialueelta Pihlavanlahdelle
 - (b) virtauksen tasapainotilan erityispiirteinen mallintaminen Kokemäenjoen alaosassa Raumanjuovan ja Luotsinmäenhaaran välisten luotojen alueella
3. soveltaa mallia sen ja lähtöaineiston rajoitukset huomioon ottaen virtaustilanteiden simulointiin olosuhteissa, jossa uoman poikkileikkausta kuvaava lähtöaineisto on muuttunut

2 Tutkimuskohde

2.1 Vesistön kuvaus

Kokemäenjoen vesistö on pinta-alaltaan Suomen neljänneksi suurin. Sen valuma-alueen pinta-ala on 27 000 km², josta järvien osuus on 11 %. Pääasiassa Pirkanmaalla sijaitsevan runsasjärvisen alueen keskusjärvenä on Pyhäjärvi, johon laskee pohjoisesta Näsijärven kautta Keuruselkä ja Iso-Tarjannevesi sekä idästä Vanajaveden kautta Iso-Längelmävesi. Kuvassa 1 on esitetty Kokemäenjoen vesistö osavaluma-alueineen, suurimmat järvet sekä vesistöalueen voimalaitokset.



Kuva 1: Kokemäenjoen vesistö sekä vesistöalueen voimalaitokset, suurimpien järvien pinta-alat ja säännöstelytilavuudet. (Koskinen, 2006)

Kokemäenjoki on vesistöalueen laskujoki. Se saa alkunsa Vammalan Liekovedestä ja virtaa Porin kaupungin halki ennen laskuaan Selkämereen Pihlavanlahdelle. Joen pituus on 110 km ja kokonaisputouskorkeus 57 m. Kokemäenjoen suurin sivujoki on Huittisista Kokemäenjokeen laskeva Loimijoki, jonka valuma-alue on runsaat 3 000 km². Muita merkittäviä sivujokia ovat Kauvatsajoki sekä välittömästi Porin yläpuolella Kokemäenjokeen laskeva Harjunpääjoki.

2.2 Vesistön hydrologia ja säännöstely

Vesistön järvisyydellä on huomattava vaikutus vesistön hydrologiaan. Runsasjärvillä alueella vesi viipyy järvissä pidempään, kun taas vähäjärviseltä vesistöalueelta vesi poistuu nopeasti. Järvien varastointitilavuutta voidaan hyödyntää säännöstelyllä muun muassa tulvasuojelun tarpeisiin.

Virtaama

Kokemäenjoella Porissa esiintyvien virtaamien kannalta tärkeitä virtaaman havaintopaikkoja ovat Harjavallan voimalaitos ja Huittisten kaupungin kohdalla Kokemäenjokeen laskeva Loimijoen Maurialankoski (katso kuva 1 sivulla 3). Näiltä havaintopaikoilta on virtaamatietojen vuorokausikeskiarvoja vuodesta 1931 lähtien. Harjunpäänjoella virtaamahavaintoja on vuodesta 1970 vuoteen 1991. Porin keskustan kohdan virtaamat on laskettu Harjavallan voimalaitoksen virtaamista Porin keskustan yläpuolisen valuma-alueen ja Harjavallan yläpuolisen valuma-alueen pinta-alojen suhteella. Virtaamatietoja Kokemäenjoelta, Loimijoelta ja Harjunpäänjoelta on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1: Virtaaman keski- ja ääriarvoja Kokemäenjoella, Loimijoella ja Harjunpäänjoella. Mukaillen *Koskinen* (2006), lähde: *OIVA - ympäristö- ja paikkatietopalvelu* (2011)

Havaintopaikka	HQ, m ³ /s	MHQ, m ³ /s	MQ, m ³ /s	Ajanjakso
Harjavalta	918	584	219	1931–2011
Pori	946	607	225	
Maurialankoski	513	206	23	1931–2011
Harjunpäänjoki	47	28	4,7	1970–1991

Säännöstely

Säännöstelyllä voidaan vaikuttaa virtaaman ajalliseen vaihteluun. Kokemäenjoen vesistön jokiosa on voimakkaasti säännöstelty ja myös pääjärvet ovat lähes kaikki säännösteltyjä. Säännöstely toteutetaan Kokemäenjoen järvillä useiden eri toimijoiden yhteistyönä. Loimijoen virtaamaan säännöstelyllä ei pystytä merkittävästi vaikuttamaan, koska Loimijoen vesistöalue on lähes järvetön. Sadannan kasvu on jonkin verran lisännyt Kokemäenjoen virtaamaa lähes kaikkina kuukausina, mutta järvien säännöstelyn alettua virtaama Kokemäenjoessa on kasvanut etenkin talvi-kuukausina. Porin kaupungista noin 20 kilometrin päässä sijaitsevan Harjavallan voimalaitoksen juoksutuksen kuukausikeskiarvot ennen yläosan järvien säännöstelyn aloittamista (1931–56) olivat tammi-maaliskuussa noin 175 m³/s. Vanajaveden, Pyhäjärven, Iso-Kuloveden ja Näsijärven säännöstelyn aloittamisen jälkeen juoksutuksen kuukausikeskiarvot tammi-maaliskuussa Harjavallan voimalaitoksella vuosina 1980–2004 ovat olleet noin 250–280 m³/s (*Koskinen*, 2006).

Sadanta ja lumen vesiarvo

Sadanta vaihtelee Kokemäenjoen vesistöalueen eri alueilla kuukausi- ja vuositasolla vain vähän. Taulukossa 2 on esitetty aluesadannan kuukausikeskiarvoja ja vuosikeskiarvot Kokemäenjoen vesistöalueen Vanajaveden Kuokkalankoskelta, Näsijärven Tammerkoskelta, Kokemäenjoen Harjavallasta ja Loimijoelta Maurialankoskelta tarkastelujaksolla 1971–2009.

Taulukko 2: Aluesadannan kuukausikeskiarvot (mm) ja vuosisadannan keskiarvo (mm) Kokemäenjoen vesistöalueen eri osissa vuosijaksolla 1971–2009. (*OIVA - ympäristö- ja paikkatietopalvelu*, 2011)

Kuukausi	Vanajavesi Kuokkalankoski	Näsijärvi Tammerkoski	Kokemäenjoki Harjavalta	Loimijoki Maurialankoski
Tammi	42	43	43	44
Helmi	29	29	29	30
Maalis	31	33	32	30
Huhti	30	32	31	31
Touko	35	37	36	34
Kesä	58	62	59	58
Heinä	77	80	77	71
Elo	75	75	75	75
Syys	56	60	58	55
Loka	61	59	61	61
Marras	52	53	54	56
Joulu	45	45	46	48
Vuosisadanta	590	607	601	590

Lumen keskimääräinen vesiarvo Kokemäenjoen vesistöalueen eri alueilla vuosina 1971–2011 on ollut suurimmallaan maaliskuussa. Taulukossa 3 on esitetty lumen vesiarvon aluearvoja tarkastelujaksolla 1971–2011. Talvella 1983–84 lumen maksimivesiarvo Tammerkoskella oli 193 mm ja Harjavallassa 160 mm.

Ilmastonmuutos

Toteutuessaan ilmastonmuutos vaikuttaa lämpötilan lisäksi myös sadantaan ja haihduntaan ja siten koko hydrologiseen kiertoon. Arvioihin ilmastonmuutoksen suuruudesta liittyy paljon epävarmuutta, ja epävarmuuden määrittämiseksi käytetään useita eri ilmastoskenaarioita (*IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change*, 2011). Eri ilmastoskenaarioilla voidaan tehdä arvioita ilmaston muutoksen ääriarvoista erilaisilla oletuksilla tulevaisuuden kehityksestä.

Ilmastonmuutoksen seurauksena vuosittaisen sadannan ennustetaan lisääntyvän Suomessa 13–26 % 2080–lukuun mennessä (*Ruosteenoja ja Jylhä*, 2007). Ilmastonmuutoksen vaikutukset jokien virtaamiin kuitenkin vaihtelevat alueittain. Virtaamat saattavat lisääntyä tietyillä alueilla, mutta alueilla joilla kokonaissadanta vetenä

Taulukko 3: Lumen vesiarvon aluearvoja (mm) 1971–2011 (*OIVA - ympäristö- ja paikkatietopalvelu*, 2011)

	16.11.	16.12.	16.1.	16.2.	16.3.	16.4.	1.5.
Keskimääräinen vesiarvo							
Kuokkalankoski	5	18	37	60	73	32	7
Tammerkoski	8	26	52	80	94	55	14
Harjavalta	6	19	41	65	79	38	9
Maurialankoski	4	13	29	51	61	18	2
Suurin vesiarvo							
Kuokkalankoski	33	51	102	127	146	95	54
Tammerkoski	43	78	123	173	193	146	117
Harjavalta	31	55	100	143	160	97	75
Maurialankoski	29	44	76	126	137	85	30

ja lumena vähenee voi ilmastonmuutoksen vaikutus virtaamiin olla päinvastainen. (*Booij*, 2005; *Dankers et al.*, 2007)

Veijalainen et al. (2010) ovat tutkineet ilmastonmuutoksen vaikutuksia eri alueilla Suomessa. Tutkimuksen mallilaskelmilla arvioitiin kerran 100 vuodessa toistuvan virtaaman pienenevän keskimäärin 8–22 % jaksoon 2070–2099 mennessä verrattuna vuosiin 1971–2000. Erot tutkittujen alueiden välillä olivat kuitenkin merkittäviä. Arvion mukaan virtaamat kasvavat erityisesti Suomen järviolueella ja alueen laskukojoilla. Syynä virtaamien lisääntymiseen näillä alueilla on kasvanut sadanta sekä lauhemmat syksyt ja talvet. Tutkimuksen mukaan Etelä-Suomessa virtaamat syksyllä ja talvella lisääntyvät huomattavasti. Myös Kokemäenjoen virtaama ilmastonmuutoksen seurauksena todennäköisesti kasvaa. Tehtyjen simulointien perusteella kerran 100 vuodessa toistuvat virtaamat kasvavat Porissa 6–39 %.

2.3 Tulvantorjunnan tarve

Kokemäenjoella on esiintynyt noin 10–20 vuoden välein tulvia, jotka koettelevat usein erityisesti joen suuosaa Porissa. Vuoden 1899 keväällä tapahtui erityisen suuri tulva, jonka on arvioitu vastanneen noin kerran 250 vuodessa esiintyvää tulvaa. Tällöin tulvan alle jäi Kokemäenjoen vesistöalueella 47 500 hehtaaria maata (*Koskinen*, 2006). Porin tulvatilanteeseen vaikuttavat Kokemäenjoen virtaaman lisäksi merivedenkorkeus ja mahdollisesti jään aiheuttama padotus.

Useat suurista tulvatilanteista ovat ajoittuneet joko talveen tai kevääseen, ja monesti tulvan syntymiseen on vaikuttanut Kokemäenjoen jäiden kasautuminen Porin kaupungin kohdalle. 1920-luvulla jäät tukkivat useana talvena Luotsinmäenhaaran alaosan aina Pihlavanlahdelle asti, ja tulvavedet peittivät luotojen alueen ja suiston ranta-alueet kokonaisuudessaan. Vuoden 1936 keväällä runsas sadanta, nopeasti sulanut lumi, ja enimmillään noin neljä metriä korkeiksi röykkiöiksi ka-

saantuneet jäät aiheuttivat merkittävän tulvan Poriin. Samantapainen tilanne tapahtui vuoden 1951 keväällä, jolloin jäät tukkivat Luotsinmäenhaaran ja Raumanjuovan. (Koskinen, 2006)

Viimeaikaisista tilanteista uhkaavin sattui talvella 1974–75, jolloin suuri virtaama ja lauha sää estivät jääkannen muodostumisen Kokemäenjokeen (Kuva 2). Sään pakastumisen seurauksena muodostui hyydepatoja, ja paikoitellen hyydettä oli jokiuomassa pohjaan asti. Hyyde aiheutti myös ongelmia vesivoimalaitoksissa. Pakkasen jatkuessa virtaamaa pienennettiin, jolloin jokeen muodostui ohut jääkansi. Tämän jälkeen sää lauhtui ja satoi, minkä seurauksena jääkansi rikkoontui. Jäät kasaantuivat Harjavallan voimalaitokselta asti Porin keskustaan tukkien Raumanjuovan ja Luotsinmäenhaaran. Porin alavat tulva-alueet olivat tuolloin vielä pääosin haja-asutus- ja maatalousaluetta. Tulvatilanteen taloudelliset vahingot olivat kuitenkin koko Kokemäenjoen vesistöalueella 5,2 milj. mk vuoden 1974 hintatasossa, joista valtaosan muodostivat jokiosan elinkeinotoimintoihin kohdistuneet vahingot. (Koskinen, 2006; Huokuna, 2007)



Kuva 2: Jääpato 1974–75 Porin keskustassa. Kuva: Kari Syrjälä

Olosuhteiden ollessa epäsuotuisat Poriin on mahdollista syntyä talvitulvaa 1974–75 vielä huomattavasti vakavampi tulvatilanne. Vaikein tilanne syntyy, kun merivesi on korkealla ja Kokemäenjoen virtaama on suuri jäiden lähtiessä tai joen jäätymisvaiheessa. Vuoteen 1975 verrattuna tulvavaara on Porissa kasvanut, koska alavat entiset tulvaniityt on nykyisin rakennettu lähes täyteen keskustan lähellä olevilla alueilla. Pahan tulvatilanteen aiheuttama taloudellinen vahingonvaara on Porissa Suomen suurin, ja tulvan sattuessa noin 5000 asuntoa olisi vaarassa vahingoittua ja noin 20 000 asukasta olisi evakuoitava. Lisäksi tulvan aiheuttamat vahingot teollisuudelle ja ympäristölle olisivat merkittävät.

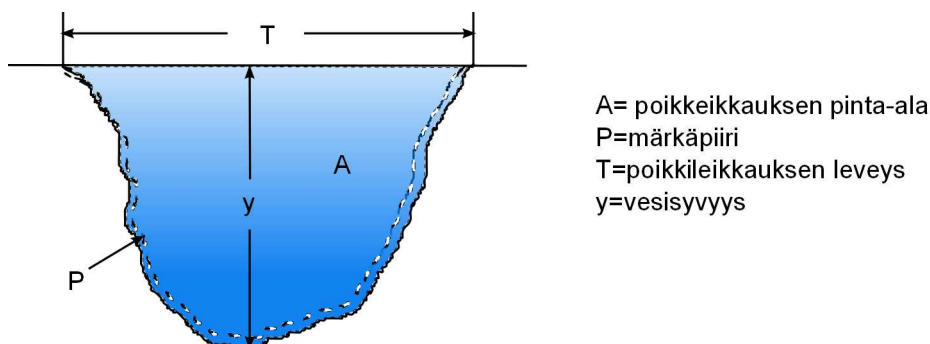
3 Tutkimusmenetelmät

3.1 Avouomavirtaus ja sen virtaustekijät

Luonnon uomaverkostoissa tapahtuva virtaus on käytännössä miltei aina avouomavirtausta. Tunnusomainen piirre avouomavirtaukselle on avoin vedenpinta, jolla vallitsee ilmanpaine. Avouomavirtauksen käsittelyssä huomioitavia tekijöitä ovat muun muassa uoman geometria, vaihteleva vedenpinnan korkeus, pohjan karkeus sekä uoman pohjankaltevuus. Avouomavirtauksen luonnetta ja ominaisuuksia kuvaavien virtaustyyppien ja -tilojen usein käytetty luokittelu perustuu vedenpinnan korkeuden muutokseen ajan ja paikan suhteen. Tässä luvussa esitetyjä avouomavirtauksen perusteita on tarkasteltu laajasti esimerkiksi teoksessa *Chow (1959)*.

3.1.1 Avouoman geometria

Uoman geometriaan liittyvät tekijät ovat olennaisia avouomavirtauksen tarkastelussa. Luonnollisten uomien profiili vaihtelee uoman pituussuunnassa, ja siten uoman geometriset tiedot liittyvät aina tiettyyn poikkileikkaukseen. Kuvan 3 mukaisen uoman poikkileikkauksen geometriset määritelmät ovat:



Kuva 3: Avouoman geometriset tekijät

- vesisyvyys (y) on kohtisuora etäisyys poikkileikkauksen alimmasta pisteestä vedenpintaan
- leveys (T) on poikkileikkauksen leveys vedenpinnan tasosta mitattuna
- pinta-ala (A) on poikkileikkauksen pinta-ala virtaussuuntaa vastaan kohtisuorassa tasossa mitattuna
- märkäpiiri (P) on veden ja poikkileikkauksen seinämän kosketuspinnan pituus
- hydraulinen säde (R_h) on pinta-alan ja märkäpiirin suhde, eli $R_h = A/P$
- hydraulinen korkeus (D) on pinta-alan ja leveyden suhde, eli $D = A/T$

3.1.2 Virtaustyypit

Tasainen ja epätasainen virtaus

Tasaisessa virtauksessa virtaustekijät pysyvät muuttumattomina tarkasteltavan joki-
kijakson pituussuunnassa. Tällöin vesisyvyys, virtausnopeus ja uoman poikkileik-
kausala eivät muutu, ja virtauksen sanotaan olevan *tasainen (uniform)*. Luonno-
nuomien muuttuvien virtaustekijöiden takia virtaus luonnossa on kuitenkin käytän-
nössä aina *epätasaista (varied)*. Tasaista virtausta voi havaita vain ihmisen tekemissä
kanavissa.

Pysyvä ja muuttuva virtaus

Vedenpinnan korkeuden ajallinen vaihtelu määrittelee, onko kyseessä pysyvä vai
muuttuva virtaus. Virtaus on *stationäärinen* eli *pysyvä (steady)*, jos vedenpinnan
korkeus uomassa ei muutu tarkasteltavan ajanjakson aikana. Luonnossa virtausteki-
jät vaihtelevat ajan suhteen, ja virtaus avouomissa on useimmiten *epästationääristä*
eli *muuttuvaa (unsteady)*.

3.1.3 Virtaustilat

Laminaarinen ja turbulenttinen virtaus

Virtaustilan sanotaan olevan *laminaarinen*, jos vesipartikkelit liikkuvat yhdensuun-
taisia ja tasaisia ratoja pitkin eikä nestekerrosten välillä tapahdu sekoittumista.
Turbulenssivirtauksessa vesipartikkelit liikkuvat epäsäännöllisiä ratoja pitkin, jot-
ka kuitenkin yhdessä kuvaavat virtauksen suuntaa eteenpäin. Laminaarinen virtaus
muuttuu turbulenttiseksi ns. välitilan kautta.

Laminaarisen ja turbulenttisen virtauksen luokittelu voidaan tehdä käyttämällä
Reynoldsin lukua R , joka määritellään

$$R = \frac{VL}{\nu} \quad (1)$$

jossa

V on veden virtausnopeus [m/s]

L on karakteristinen pituus, luonnonuomissa sama kuin hydraulinen säde R_h [m]

ν on veden kinemaattinen viskositeetti [m²/s]

Luonnonuomissa virtaus on useimmiten turbulenttista, jolloin näin määritelty Rey-
noldsin luku on suurempi kuin 2000.

Verkas- ja kiitovirtaus

Virtaustila voidaan luokitella myös käyttäen kriteerinä suhteellista virtausnopeutta, jolloin verrataan vedenpintaan kohdistuvan häiriöaallon nopeutta veden virtausnopeuteen. *Verkasvirtauksessa (subcritical flow)* veden virtausnopeus on pienempi kuin uomassa etenevän häiriöaallon nopeus, jolloin häiriöaalto etenee sekä myötäettä vastavirtaan. *Kiitovirtauksessa (supercritical flow)* veden virtausnopeus on häiriöaallon nopeutta suurempi, jolloin häiriöaalto etenee ainoastaan myötävirtaan.

Frouden luku kuvaa painovoiman vaikutusta virtaustilaan, ja se määritellään

$$F = \frac{V}{\sqrt{gL}} \quad (2)$$

jossa

V on veden virtausnopeus [m/s]

g on painovoimakiihtyvyys [m/s²]

L on karakteristinen pituus, tässä sama kuin hydraulinen korkeus D [m]

Frouden luvun F perusteella voidaan erottaa kolme virtaustilaa sen perusteella, onko Frouden luku suurempi vai pienempi kuin yksi:

1. verkasvirtaus, kun $F < 1$
2. kriittinen virtaus, kun $F = 1$
3. kiitovirtaus, kun $F > 1$

3.1.4 Stationäärinen virtaus

Veden virtauksen avouomassa saa aikaan painovoima, joka kohdistuu vesimassaan virtauksen suunnassa. Virtausta vastustaa kitkavoima, jonka suuruuteen vaikuttaa muun muassa uoman pohjan muoto ja materiaali, kasvillisuus, vesisyvyys, ja virtausnopeus. Veden virtausnopeuden kasvaessa siihen vaikuttavan kitkavoiman suuruus kasvaa, kunnes painovoima ja kitkavoima ovat tasapainossa. (*Chow, 1959*)

Tarkastellaan kuvan 4 mukaista avouomavirtauksen kaavamaista esitystä. Poikkileikkauksen 1 kohdalla uoman pohjan korkeus vertailutasoon nähden on z_1 . Vastaa- vasti vesisyvyys poikkileikkauksen 1 kohdalla on $d_1 \cos \theta$ ja nopeuskorkeus $\alpha_1 V_1^2 / 2g$. Jos uoman pohjan kaltevuus on pieni, $\theta \approx 0$, on vesisyvyys d_1 . Määritellään stationäärisen virtauksen kokonaiskorkeus valittuun vertailutasoon nähden uoman pohjan korkeuden z , vesisyvyyden y ja nopeuskorkeuden $\alpha V^2 / 2g$ summana. Nopeuskorkeuden termissä α on virtauksen epätasaisesta jakaantumisesta johtuva korjauskerroin. Kokonaiskorkeus kuvastaa virtaavan veden sisältämän kokonaisenergian määrää tietyssä kohdassa. Kuvan 4 mukaisen stationäärisen virtauksen kokonaiskorkeus H poikkileikkauksen 1 kohdalla on

$$H = z_1 + d_1 + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} \quad (3)$$

jossa

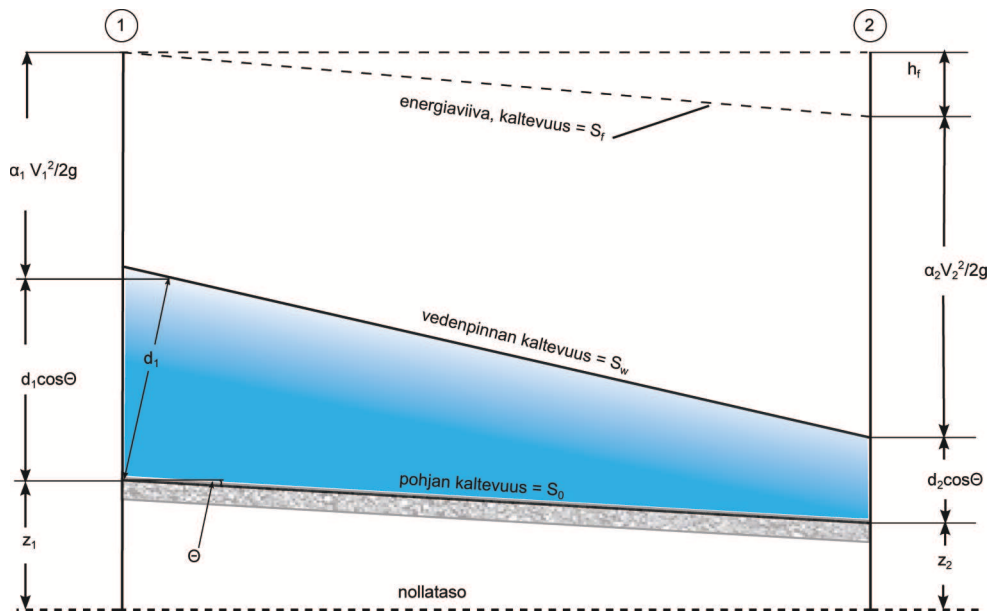
- z_1 on pisteen 1 asemakorkeus nollatasoon nähden [m]
- d_1 on vedenpinnan korkeus kohtisuoraan vedenpinnasta pohjaan mitattuna [m]
- α on virtauksen epätasaisesta jakautumisesta johtuva korjauskerroin
- $\frac{V_1^2}{2g}$ on nopeuskorkeus [m].

Poikkileikkausten 1 ja 2 välille voidaan kirjoittaa energian säilymistä kuvaava Bernoulin yhtälö

$$z_1 + d_1 + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} = z_2 + d_2 + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + h_f \quad (4)$$

jossa

- h_f on poikkileikkausten 1 ja 2 välillä tapahtuvia energiahäviöitä kuvaava termi [m]



Kuva 4: Stationäärisen virtauksen kaavamainen esitys

Oletetaan kuvan 4 edustavan stationääristä virtaustilaa. Tällöin vesipinnan kaltevuus poikkileikkausten 1 ja 2 välillä on S_w ja poikkileikkausten välisen kokonaiskorkeuksien muutosta kuvaa energiaviivan kaltevuus S_f . Termi h_f kuvaa poikkileikkausten 1 ja 2 välillä tapahtuvia energiahäviöitä.

Keskimääräinen virtausnopeus voidaan laskea Manningin yhtälöllä, jonka mukaan

$$V = \frac{1}{n} R_h^{2/3} S_f^{1/2} \quad (5)$$

jossa

- V on keskimääräinen virtausnopeus [m/s]
- R_h on hydraulinen säde [m]
- n on Manningin kerroin
- S_f on energiaviivan kaltevuus

3.1.5 Uoman vedenkuljetuskyky

Uoman vedenkuljetuskyky voidaan määritellä tietyn uoman poikkileikkausalan kykynä läpäistä tietty vesimäärä tietyssä ajassa. *Helmiö* (2004) on tutkinut geometristen ominaisuuksien ja kasvillisuuden vaikutusta luonnonuomien virtausvastukseen ja vedenkuljetuskykyyn. Luonnonuomien vaihtelevat geometriset ominaisuudet, vaihteleva karkeus sekä uomien pituussuuntainen mutkittelu vaikeuttavat kokonaisvirtausvastuksen ja vedenkuljetuskyvyn arviointia. Kokonaisvirtausvastuksen arviointiin on käytetty yleisesti muun muassa *Cowanin* (1956) kehittämää menetelmää, joka perustuu erilaisten virtausvastukseen vaikuttavien tekijöiden tunnistamiseen. Menetelmää on kuvattu tarkemmin useissa avouomahydrauliikkaa käsittelevissä kirjoissa (esim. *Chow*, 1959).

Luonnonuomat ovat usein muodostuneet kaksitasoisiksi, jolloin virtaaman ollessa vähäinen vesi kulkee vain uoman matalampaa ja kapeampaa pääuomaa pitkin. Virtaaman noustessa riittävän suureksi vedenpinta nousee myös uoman ylemmälle tulvatasanteelle, jonka karkeus ja vedenkuljetuskyky monesti poikkeavat merkittävästi varsinaiseen pääuomaan verrattuna muun muassa erilaisen kasvillisuuden ja geometrian takia. Yhdistelmäuoman (*compound channel*) vedenkuljetuskyvyn arviointi on hankalaa. Virtaamaan vaikuttaa tällöin vedenkuljetukseen osallistuvan uoman kokonaisvirtausvastus sekä veden liike pääuoman ja tulvatasanteen välillä (*Helmiö*, 2004). Veden liikkeessa tulvatasanteelle pääuoman virtaama vähenee tulvatasanteen virtaaman lisääntyessä. Uoman geometristen ominaisuuksien vaihtelu pituussuunnassa hankaloittaa entisestään vedenkuljetuskyvyn arviointia.

Uoman vedenkuljetuskyky tasaisella virtaamalla säännöllisessä poikkileikkauksessa voidaan johtaa tasaisen virtaaman keskinopeuden yleisestä määritelmästä

$$V = CR_h^a S_f^b \quad (6)$$

jossa

- V on keskimääräinen virtausnopeus [m/s]
- R_h on hydraulinen säde [m]
- a ja b eksponentteja
- S_f on energiaviivan kaltevuus [m/m]
- C on virtausvastuskerroin

Tasainen virtaama uomassa voidaan lausua

$$Q = VA = CAR_h^a S_f^b = KS_f^b \quad (7)$$

jossa

$$K = CA R_h^a \quad (8)$$

Termi K kuvaa uoman vedenkuljetuskykyä. Jos yhtälö (5) sijoitetaan yhtälöön (6) jolloin $b = 1/2$, voidaan virtaama lausua muodossa

$$Q = K\sqrt{S_f} \quad (9)$$

jolloin vedenkuljetuskyky on

$$K = \frac{Q}{\sqrt{S_f}} \quad (10)$$

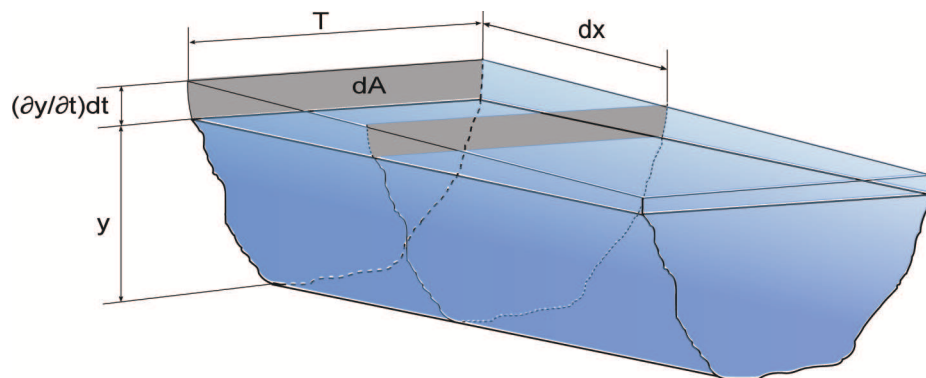
Käytettäessä Manningin yhtälöä (5)

$$K = \frac{1}{n} AR_h^{2/3} \quad (11)$$

3.2 Saint Venantin yhtälöt

Avouomassa tapahtuva virtaus voidaan mallintaa Saint Venantin yhtälöillä, jotka perustuvat massan ja energian säilymiseen. Massan säilyminen edellyttää, että malliin tuleva vesimäärä on yhtäsuuri kuin siitä poistuva ja siihen mahdollisesti varastoituva vesimäärä. Energian säilymislain mukaan taas malliin tulevan kokonaisenergian määrä tulee olla yhtäsuuri kuin siitä poistuvan kokonaisenergian ja tapahtuneiden energiahäviöiden summa. Seuraavassa on johdettu Saint Venantin yhtälöt. Johto perustuu pitkälti teoksen *Chow* (1959) esitykseen.

3.2.1 Massan säilyminen



Kuva 5: Aikariippuvan avouomavirtauksen massan säilyminen

Massan säilyminen voidaan kuvata tarkastelemalla kuvan 5 mukaista kahta uoman poikkileikkausta. Muuttuvassa virtauksessa virtaaman muutosnopeus paikan suhteen on $\partial Q/\partial x$, ja vedenpinnan korkeuden muutosnopeus ajan suhteen on $\partial y/\partial t$. Tästä seuraava vesimäärän muutos uomajaksolla dx aikavälillä dt on $(\partial Q/\partial x)dxdt$. Kun uoman poikkileikkauksen leveys on T , varastotilan muutos uomajaksolla dx on $Tdx(\partial y/\partial t)dt = dx(\partial A/\partial t)dt$. Tästä seuraa

$$\left(\frac{\partial Q}{\partial x}\right) dxdt + dx \left(\frac{\partial A}{\partial t}\right) dt = 0 \quad (12)$$

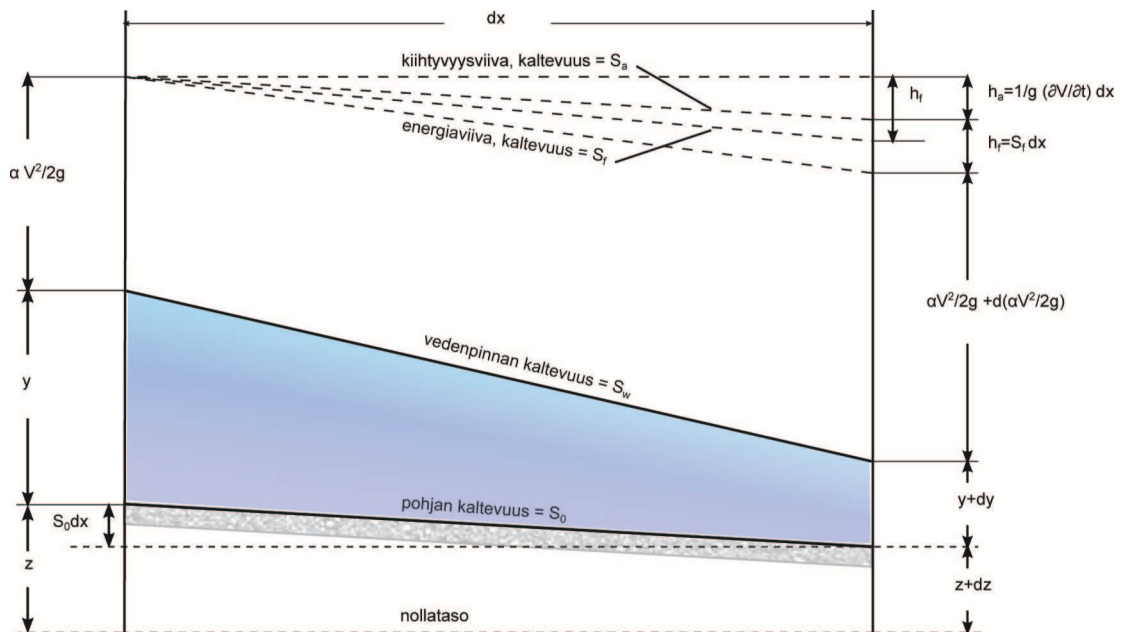
josta saadaan

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + T \frac{\partial y}{\partial t} = 0 \quad (13)$$

Yhtälö (13) on muuttuvan avouomavirtauksen jatkuvuusyhtälö.

3.2.2 Energian säilyminen

Newtonin toisen lain mukaan kiihtyvyydestä $\partial V/\partial t$ aiheutuva voima veden yksikköpainoon w on $(w/g)\partial V/\partial t$. Oletetaan, että uoman pohjan kaltevuus on pieni, kiihtyvyys vaikuttaa vaakasuoraan ja sen pystysuora komponentti on häviävän pieni. Tällöin voiman tekemä työ kuvan 6 uoman kahden poikkileikkauksen välisellä matkalla dx on $(w/g)(\partial V/\partial t)dx$. Voiman tekemä työ on yhtäsuuri kuin kiihtyvyydestä aiheutuva energiahäviö. Jakamalla tämä veden yksikköpainolla w saadaan kiihtyvyydestä aiheutuvaksi energiahäviöksi yksikköpainoa kohden $h_f = (1/g)(\partial V/\partial t)dx$.



Kuva 6: Aikariippuvan avouomavirtauksen energian säilyminen

Kokonaisenergian häviö koostuu kitkan aiheuttamasta häviöstä $h_f = S_f dx$ sekä kiihtyvyyden aiheuttamasta häviöstä $h_a = (1/g)(\partial V/\partial t)dx$. Kuvan 6 kiihtyvyyksiiviä kuvaa kiihtyvyydestä aiheutuvaa energiahäviötä, ja sen kaltevuus on $S_a = (1/g)(\partial V/\partial t)$.

Energiaperiaatteen mukaan voidaan kirjoittaa:

$$z + y + \frac{\alpha V^2}{2g} = z + dz + y + dy + \frac{\alpha V^2}{2g} + d\left(\frac{\alpha V^2}{2g}\right) + \frac{1}{g}\frac{\partial V}{\partial t}dx + S_f dx \quad (14)$$

Sievennettynä

$$d\left(z + y + \frac{\alpha V^2}{2g}\right) = -S_f dx - \frac{1}{g}\frac{\partial V}{\partial t}dx \quad (15)$$

Jaetaan yhtälö (15) puolittain termillä dx , ja käyttäen osittaisdifferentiaaleja saadaan

$$\frac{\partial(z + y)}{\partial x} + S_f + \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\alpha V^2}{2g}\right) + \frac{1}{g}\frac{\partial V}{\partial t} = 0 \quad (16)$$

tai

$$\frac{\partial y}{\partial x} + \frac{\alpha V}{g}\frac{\partial V}{\partial x} + \frac{1}{g}\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial z}{\partial x} + S_f = 0 \quad (17)$$

Yhtälön (17) energiaviivan kaltevuus S_f voidaan ratkaista esimerkiksi käyttäen Manningin yhtälöä (5).

3.2.3 Yhtälöiden numeerinen ratkaisu

Saint Venantin yhtälöt voidaan käytännössä ratkaista vain numeerisesti. Yleisesti käytettyjä menetelmiä yhtälöiden ratkaisuun ovat differenssimenetelmä (*finite difference method*), FE-menetelmä (*finite element method*), ja FV-menetelmä (*finite volume method*) (Szymkiewicz, 2010). InfoWorks RS käyttää yksiulotteisen avouomavirtauksen laskennassa differenssimenetelmää (www.innovyze.com/products/infoworks_rs/). Differenssimenetelmän eri ratkaisutavoista ohjelmistossa on sovellettu Preissmannin menetelmää, jota ovat käsitelleet tarkemmin muun muassa Abbot ja Basco (1989). Menetelmällä on mahdollista muuttaa Saint Venantin yhtälöt lineaariseen muotoon ja ratkaista virtaama Q ja vedenpinnan korkeus h valituissa kohdissa uomajaksoa. Kaksiulotteisessa laskennassa InfoWorks RS käyttää FV-menetelmään perustuvaa MULFLOOD-sovellusta (Alcrudo ja Mulet-Marti, 2005).

3.3 Joen jäätymisilmiö

Joen jäätymisilmiö koostuu monimutkaisesti toisiinsa vaikuttavista hydrodynaamisista, mekaanisista ja termisistä prosesseista. Jäätymisilmiöön kuuluu jään muodostuminen, kulkeutuminen, kasaantuminen sekä poiskulkeutuminen ja sulaminen (*Shen, 2010*). Joen tulvimisen kannalta merkittävimmät virtausolosuhteisiin vaikuttavat ilmiöt ovat joen jäätymisvaihe, jolloin uomaan saattaa muodostua hyydepatoja, sekä jäiden lähtö suuren virtaaman tai lauhtuneen sään takia.

Virtaavan veden lämpötilan laskiessa alle veden jäätympisteen alkaa veteen muodostua hyydettä ja vesi alijäähtyy. Veden virtausnopeudesta riippuen joki voi jäättyä eri tavoin. Paikoissa, joissa veden virtausnopeus on alhainen, veden pinnalle alkaa muodostua ohut jääkerros. Jos olosuhteet jään muodostumiselle säilyvät, jäätä muodostuu yhä enemmän ja jääkerros kasvaa sivuttaissuuntaisen laajenemisen ja jo muodostuneiden jääkerrosten kulkeutuessa yhteen. Lopulta jokeen muodostuu yhtenäinen jääkansi. (*Shen, 2010*)

Kohdissa, joissa veden virtausnopeus on suuri, jääkansi ei muodostu yhtä helposti. Alijäähtyneeseen veteen muodostunut hyyde voi tällöin kerääntyä suuremmiksi flokeiksi, jotka liikkuvat virtaaman mukana tai kasaantuvat uoman pohjaan ja muodostavat pohjajäätä. Pohjajään vaikutuksesta veden virtausvastus saattaa kasvaa, mikä vaikuttaa vedenpinnan korkeuteen ja virtaamaan. Toisaalta alijäähtyneessä vedessä muodostuneen hyhmän kohdatessa jääkannen reunan se voi virtausnopeuden ollessa suuri painua jääkannen alle. Jääkannen alle painunut hyhmä voi kiinnittyä ja kerääntyä jääkannen alapuolelle ja muodostaa hyydepadon, jolloin veden- ja jäänpinta nousevat. (*Shen, 2010*)

Keväällä jääkansi alkaa ohentua ja haurastua auringon säteilyn ja veden lämpenemisen vaikutuksesta. Jäät lähtevät liikkeelle, kun jääkanta paikallaan pitävät voimat pienenevät ja virtaama joessa lisääntyy. Lauhtunut sää ja lisääntynyt joen virtaama saattavat saada jäät liikkeelle myös keskitalvella. Jäänlähdon yhteydessä voi erityisesti uoman ahtaisiin kohtiin muodostua jääpatoja jään kasaantuessa röykkiöiksi. Jääpadoista aiheutuvat vedenkorkeudet voivat olla erittäin korkeita. (*Shen, 2010*).

Hyyde- ja jääpatojen muodostumiseen vaikuttavien monimutkaisten ilmiöiden vuoksi niiden mallintaminen on edelleen haastavaa (*Beltaos, 2008*). Joen jäätymisilmiötä ovat tutkineet muun muassa *Beltaos (1995, 2001)*; *Beltaos ja Prowse (2001)* sekä matemaattista mallintamista muun muassa *Beltaos (1993)* ja *Shen (2010)*.

4 Hydraulinen mallinnus

4.1 Yleistä

InfoWorks RS on ohjelmisto, jolla voidaan numeerisesti mallintaa avouomavirtausta, tulvavesialueita, tulvapatoja ja useanlaisia vesirakenteita. Numeerisella virtausmallilla voidaan määrittää muun muassa vedenkorkeuksia, virtaamia ja virtausnopeuksia erilaisissa virtaustilanteissa. Hydraulinen mallinnus on yleisesti ollut pääasiallinen keino tulva-alueiden arviointiin (*Horritt ja Bates, 2002; Hunter et al., 2007*). Tässä työssä on käytetty erilaisissa virtaustilanteissa yksiulotteista virtausmallia vedenkorkeuksien määrittämiseen jokiuomissa sekä kaksiulotteista virtausmallia tulvan leviämisen arviointiin luotojen alueella. Seuraavassa kuvataan tässä työssä käytetyt menetelmät Kokemäenjoen virtausmallin rakentamiseksi InfoWorks RS -ohjelmiston versiolla 11.5.

Virtausmalli on tehty hyödyntämällä digitaalista maastomallia (*digital elevation model, DEM*). Digitaalisessa maastomallissa käytetään ulottuvuuksina x-, y- ja z-koordinaatteja, ja muodostamalla pisteistä kolmioverkko (*triangulated irregular network, TIN*) voidaan tarvittava uomageometria kuvata mallinnusohjelmalle kolmioverkon avulla tuotettujen poikkileikkausten avulla. Poikkileikkaukset yhdistämällä voidaan rakentaa yksiulotteinen laskentamalli, joka perustuu Saint Venantin yhtälöiden (katso kappale 3.2) ratkaisuun.

Käyttämällä optista kaukokartoituslaitetta (*Light Detection and Ranging, LIDAR*) topografiasta voidaan tehdä tarkka digitaalinen maastomalli (*Lane ja Chandler, 2003*). Vaikka optinen kaukokartoitus helpottaa huomattavasti tiedon keräämistä uoman geometriasta, menetelmässä on myös omat haasteensa. LIDAR:in avulla on mahdollista saada suuri määrä tietoa maaston ja uoman korkeusasemista, ja laitteisto havaitsee maaperän lisäksi myös muun muassa vesikasvillisuuden. Hydraulisen mallinnuksen kannalta on kuitenkin tärkeää muodostaa varsinaista uomageometriaa mahdollisimman tarkasti kuvaava maastomalli, ja tämän tuottamiseksi LIDAR:in keräämästä raakadatasta on eroteltava esimerkiksi ylimääräiset rakenteet ja vesikasvillisuus. Optisella kaukokartoituslaitteella kerätyn datan muokkaamisesta paremmin hydraulisessa mallinnuksessa hyödynnettäväksi ovat kirjoittaneet muun muassa *Aggett ja Wilson (2009)* ja *Bates et al. (2003)*.

Muokatusta digitaalisesta datasta voidaan tämän jälkeen muodostaa kolmioverkko. Tässä työssä käytetyllä virtausmallinnusohjelmistolla käytetyn kolmioverkon ominaisuuksiin, muun muassa verkon tiheyteen, voidaan edelleen vaikuttaa erilaisilla parametreilla.

4.2 Virtausmallin rakenne

Laskelmissa on käytetty yksi- ja kaksiulotteisia virtausmalleja. Yksiulotteisella virtausmallilla mallinnetun uomaverkoston kokonaispituus on noin 32 kilometriä. Uomaverkoston mallintamiseen käytettiin 260 poikkileikkausta, jotka sijoitettiin maas-

ton ja uomageometrian vaihtelun kannalta merkittäviin kohtiin. Uomaverkosto on jaettu viiteen eri uomaosuuteen, jotka on nimetty päähaaransa mukaan. Lisäksi uomaosuuksiin on sidottu paalutus (katso Liite A ja taulukko 4). Kaksiulotteinen virtausmalli rakennettiin luotojen alueelle. Malli koostuu kolmesta osasta, ja sen yhteenlaskettu pinta-ala on 670 hehtaaria.

Virtausmalli rakennettiin hyödyntäen vuonna 2010 tehtyjen uomien viistokaikuluotausten ja vuonna 2008 tehtyjen maaston laserkeilausten perusteella Porin yliopistokeskuksessa tuotettua digitaalista maastomallia. Tehdyn virtausmallin uomarakenne on esitetty kuvassa 7, johon on merkitty myös virtausmallin kalibroinnissa käytetyt vedenkorkeuden mittauspisteet. Virtausmalli alkaa Kokemäenjoen yksiuomaiselta osuudelta noin seitsemän kilometriä ennen joen haarautumiskohtaa ja päättyy Pihlavanlahdelle. Joen yksiuomainen osuus jakaantuu Kirjurinluodon kärjessä neljään haaraan, jotka jälleen yhtyvät ennen Pihlavanlahtea. Näistä vedenkuljetuskyvyn kannalta merkittävimmät ovat pohjoisimpana kulkeva Luotsinmäenhaara sekä eteläisimpänä Raumanjuopa. Luotoja halkovat kooltaan edellisiä pienemmät Huvilajuopa ja Lanajuopa, joista Huvilajuopa on pohjoisempi.

InfoWorks RS -ohjelmassa uoman vaihteleva poikkileikkauksen profiili on mahdollista jakaa pystysuoriin osiin, jotka kuvaavat tiettyä yksittäistä poikkileikkauksen osan muotoa. Pystysuorille osille voidaan määrittellä niitä kuvaava karkeuskerroin. Uomien poikkileikkauksissa on käytetty kalibroinnissa määriteltäviä karkeuskertoimia. Paikoissa, joissa uoma on muodostunut kaksitasoiseksi, eli pääuomaan liittyy välittömästi sivuttainen tulvatasanne, on tulvatasanteen karkeutena käytetty Manningin karkeuskertoimen arvoa $n = 0,04$. Ohjelma laskee poikkileikkauksen vedenkuljetuskyvyn eri vedenkorkeuksilla hyödyntämällä käyttäjän määrittelemää poikkileikkauksen ositusta. Poikkileikkauksen vedenkuljetuskyky lasketaan osapoikkileikkausten summana.

4.2.1 Tulva-alueiden mallinnus

Tulva-alueiden mallinnus tehtiin liittämällä yksiulotteisesti mallinnetut jokiuomat kaksiulotteiseen virtausmalliin. Kaksiulotteinen virtausmalli on tehty Luotsinmäenhaaran ja Raumanjuovan väliselle luotojen alueelle, ja sillä on tutkittu tulvan leviämistä mallinnetulla alueella sekä tulva-alueiden vaikutusta jokiuomien vedenkorkeuksiin.

Käytetyssä virtausmallinnusohjelmistossa yksi- ja kaksiulotteiset virtausmallit voidaan yhdistää työkalulla, joka laskee tulvapadon yli tapahtuvan virtaaman tietyllä vedenkorkeudella. Yhdistetyssä virtausmallissa virtaama jokiuomasta tulva-alueelle lasketaan jokaisen yksiulotteisen mallin poikkileikkausten välisellä matkalla. Kaksiulotteinen virtausmallinnus perustuu Saint Venantin yhtälöiden kaksiulotteiseen ratkaisuun.

Verrattuna muihin virtausmallinnuksissa käytettäviin kalibrointiparametreihin, kuten pinnan karkeuteen, optimaalisen kolmioverkon parametreille ei ole olemassa selkeitä ohjeita tai raja-arvoja. Tiheämmän verkon on oletettu parantavan mallinnet-



Kuva 7: Virtausmallin uomarakenne ja vedenkorkeuden mittauspisteet 1-6.

tujen tulosten luotettavuutta, koska tällä tavoin maasto kuvautuu virtausmallille tarkemmin (*Farajalla ja Vieux, 1995*). Verkon tihentäminen kuitenkin kasvattaa käsiteltävän datan määrää ja simulointiin tarvittavaa aikaa. Eräänä kriteerinä kolmioverkon vähimmäistiheydelle on ollut ratkaisun numeerisen konvergenssin saavuttaminen (*Lardner ja Song, 1992*). *Hardy et al. (1999)* ovat tutkineet virtausmallinuksessa käytettävän kolmioverkon ominaisuuksien vaikutuksia mallinnustuloksiin, ja huomasivat kolmioverkon ominaisuuksien vaikuttavan vähintään yhtä merkittävästi mallinnustuloksiin kuin tyypilliset kalibrointiparametrit. Virtausmallia rakennettaessa kolmioverkon ominaisuuksien vaikutus mallinnustuloksiin tulisikin tutkia vertaamalla erilaisten kolmioverkkojen tuloksia optimaalisten parametrien löytämiseksi. Tässä työssä laskennan ja käytettävissä olleiden laskentaelementtien kannalta parhaiten toimivaksi huomattiin kolmioverkko, jossa kolmioiden pinta-alat olivat

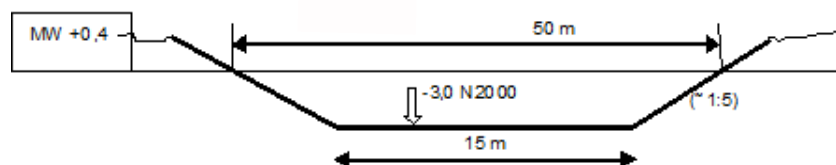
300 m² – 1200 m². Kolmioiden särmien pienin kulma kolmioverkossa on 25°. Kaksiulotteisen virtausmallin alue on pääosin peltoa, ja karkeuskertoimena on käytetty Manningin arvoa $n = 0,040$ (Chow, 1959).

4.3 Mallinnetut tulvatilanteet

Kokemäenjoen keskiylivirtaama (MHQ) Harjavallan voimalaitoksen kohdalla on 622 m³/s, ja kerran sadassa vuodessa toistuva ylivirtaama (HQ 1/100) on 1081 m³/s. Ylivirtaama HQ 1/100 vastaa likimain Harjavallan voimalaitoksen tulvaluukkujen purkauskykyä, koska padon suurin juoksutuskapasiteetti tulva-aukoista hätäylivedenkorkeudella N2000 +30,34 m on 1095 m³/s (Koskinen, 2008). Laskelmissa mallinnettiin 700 m³/s ja 1100 m³/s virtaamia nykytilannetta vastaavaan sekä muutettuun uomaverkostoon. Muutetussa uomaverkostossa Lanajuopa sekä osa Huvilajuovasta on ruopattu, ja virtausmallilla on tutkittu ruoppauksen vaikutuksia vedenpinnan korkeuksiin eri kohdissa uomaverkostoa. Jääpadon vaikutuksia on selvitetty 700 m³/s virtaamalla tilanteissa, joissa noin kilometrin pituinen jääpato syntyy vain Luotsinmäenhaaraan tai sekä Luotsinmäenhaaraan että Raumanjuopaan. Yksiulotteisissa virtauslaskelmissa penkereiden on oletettu olevan niin korkeat, että vesi ei poistu uomasta. Mallin yläpuolisena reunaehtona on käytetty tunnettua virtaamaa ja alapuolisena reunaehtona tunnettua vedenkorkeutta Kivinin kohdalla.

4.3.1 Muutettu nykytilanne

Muutetun nykytilanteen virtausmallilla oli tavoitteena selvittää Huvilajuovan ja Lanajuovan ruoppauksen sekä uomien yläpään silta-aukkojen suurentamisen vaikutusta Kokemäenjoen alaosan vedenkorkeuksiin. Mallissa Raumanjuovasta erkanevat Huvilajuopa ja Lanajuopa on kumpikin ruopattu ylävirralla. Huvila- ja Lanajuovan välisen luodon kärjestä alavirtaan vain Lanajuopa on ruopattu. Kohdasta jossa Huvilajuopa ja Lanajuopa jälleen yhtyvät Luotsinmäenhaaraan yhtyvä uoma on ruopattu. Huvilajuovan ja Lanajuovan ruoppaukset on mallinnettu suurentamalla uomia niin, että uomien poikkipinta-ala vedenkorkeudella MWN2000 $\approx +0,4$ m on vähintään 110 m². Ruopatun uoman poikkileikkaus on esitetty kuvassa 8.



Kuva 8: Kaavakuva Huvila- ja Lanajuovan ruopattujen osuuksien poikkileikkauksesta.

4.3.2 Jääpadot

Jääpatolaskelmista tehtiin kaksi toisistaan eroavaa versiota. Ensimmäisessä jääpato on muodostunut Luotsinmäenhaaraan Kirjurinluodon kärjestä alavirtaan. On kuitenkin todennäköistä, että tämänkaltaisissa olosuhteissa jääpato muodostuisi myös Raumanjuopaan. Tämän vuoksi on tutkittu myös tilanne, jossa jääpato on kehittynyt Luotsinmäenhaaran lisäksi myös Raumanjuopaan. Kumpikin jääpadoista oletettiin pituudeltaan noin kilometrin mittaiseksi. Jääpatojen paikat on esitetty kuvassa 9. Talvella 1974–75 tapahtuneessa tulvatilanteessa jäät kasaantuivat Luotsinmäenhaaraan ja Raumanjuopaan, jolloin vedenkorkeudet kaupungin kohdalla nousivat huomattavasti.



Kuva 9: Luotsinmäenhaaraan ja Raumanjuopaan kehittyneiden jääpatojen sijainti. Jääpadot on merkitty sinisellä.

Jääpadon syntyessä liikkeelle lähteneet jäät kasaantuvat tiettyyn uoman kohtaan muodostaen veden virtaamista haittaavan tulpan, jolloin uoman vedenkuljetuskyky pienenee. Jääpato on usein kärjestään paksumpi, ja jääkansi ohenee joen ylävirtaa kohti. Kuvan 10 viivoitettu alue kuvaa uomaan kerääntyneen jään määrää jääpadon eri kohdissa. Jääpadon paksuuteen vaikuttaa virtaaman lisäksi myös jään määrä. Jäätä voi kertyä kaupungin kohdalle Harjavallan voimalaitokselta saakka, noin 28 kilometrin matkalta. Jos jäätyneen uoman keskileveydeksi oletetaan 100 metriä ja jääkannen paksuudeksi 0,2 metriä, voi jäätä kertyä kaupungin kohdalle noin 560 000 m³. Jos jäiden sulamisen ja rannoille ajautumisen oletetaan aiheuttavan 50 % hävikin, voi jääpadossa olla jäätä noin 280 000 m³.

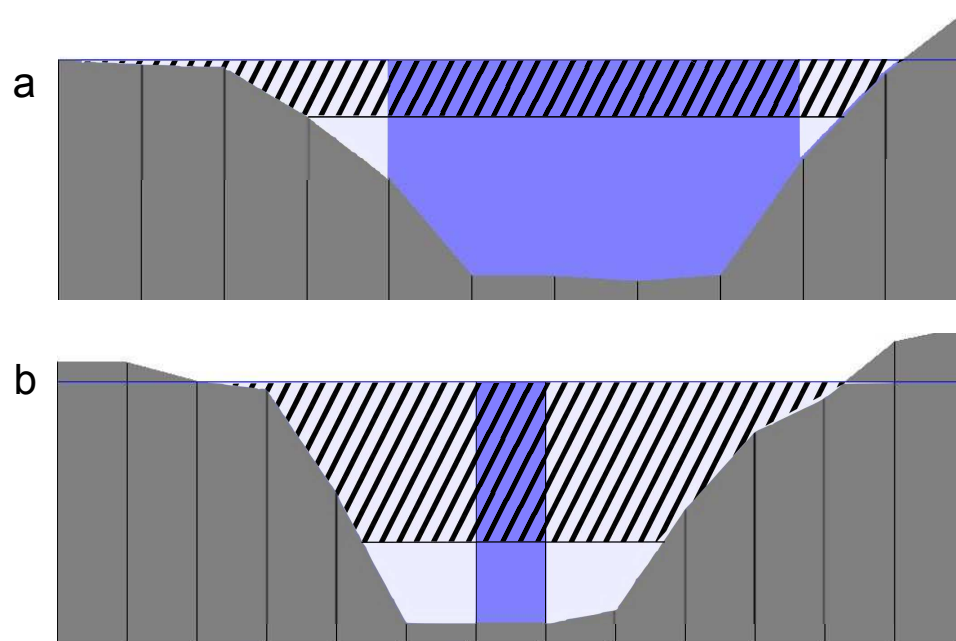
Kokemäenjoen keskiylivirtaama (MHQ) Harjavallan voimalaitoksen kohdalla on 622 m³/s. Jääpatolaskelmissa on käytetty virtaamana 700 m³/s ja vedenkorkeutena N2000 +0,77 m Kivinin kohdalla. Käytetty vedenkorkeus vastaa tavanomaista tulvaajan vedenkorkeutta. Laskelmissa tilanteessa, jossa jääpato kehittyy vain Luotsinmäenhaaraan, jääpadon suuruutena on käytetty arvoa 135 000 m³. Kun jääpato on kehittynyt sekä Luotsinmäenhaaraan että Raumanjuopaan, on laskelmissa jääpatoihin kertyneen jään kokonaistilavuutena käytetty arvoa 282 000 m³.

Tässä työssä jääpato mallinnettiin uomaan muodostuneena ahtaumana muuttamalla uoman poikkileikkausten karkeuskerrointa jääpadon kohdalla. Karkeuskerrointa suurentamalla uoman vedenkuljetuskyky pienenee, ja mallilla voidaan näin jäljitellä jääpadon vaikutusta muun muassa veden korkeuden muutokseen. Poikkileikkausten karkeuskertoimena uoman reunoilla käytettiin Manningin arvoa $n = 50$, jolloin kyseisen osan vedenkuljetuskyky on erittäin vähäinen. Tämän lisäksi kasvatettiin vedenkuljetukseen osallistuvan uoman osan poikkipinta-alan karkeuskerrointa Manningin arvoon $n = 0,1$ kuvastamaan jääkannen aiheuttamaa virtausvastusta.

4.4 Mallin kalibrointi ja validointi

Mallin kalibroinnissa käytettiin 26.5.2010 tehtyjä mittauksia vedenkorkeuksista eri kohdissa mallinnettavaa jokiverkostoa, Harjavallan voimalaitoksen keskimääräisen juoksutuksen arvoa kyseisenä ajankohtana sekä vedenkorkeutta Kivinin kohdalla. Porin keskustan virtaaman suhde Harjavallan voimalaitoksen juoksutukseen on noin 1/0,95. Harjavallan voimalaitoksen juoksutus mittausajankohtana oli keskimäärin 440 m³/s, joten virtaama Q kaupungin kohdalla oli noin 465 m³/s. Alapuoliseksi reunaehdoksi valittiin mitattu vedenkorkeus Kivinin kohdalla, joka oli +0,55 m N2000-korkeusjärjestelmässä.

Vedenkorkeuden mittaustuloksia oli käytettävissä joen yksiuomaiselta osuudelta, Luotsinmäenhaaralta, Raumanjuovalta, Huvilajuovalta sekä mallinnetun uomaverkoston alavirralla Kivinin kohdalla. Mittauspaikat on esitetty kuvassa 7. Mallia kalibroimalla haettiin eri uomaosuuksille sellaiset karkeuskertoimet, että mallinnetut vedenkorkeuden arvot vastaisivat mahdollisimman hyvin mittauksissa havaittuja arvoja. Virtauslaskennassa käytetyt uomaosuudet, niiden pituus, poikkileikkausten lukumäärä sekä määritetyt karkeuskertoimet on esitetty taulukossa 4.



Kuva 10: Mallinnettu jääpato, valkoinen alue; veden virtausalue, sininen alue; todellinen jääpato, viivoitettu alue. Jääpato ylävirralla (a, ylempi kuva) ja jääpadon kärki alavirralla (b, alempi kuva).

Taulukko 4: Virtauslaskennassa käytetyt uomat, niiden pituus, poikkileikkausten lukumäärä sekä määritetyt karkeuskertoimet

Uoman nimi	Paalu	Pituus [km]	Poikkileikkausten lkm	Karkeuskerroin
Pääuoma	295-230	7	63	0,024
Luotsinmäenhaara	225-150	8	48	0,024
Raumanjuopa	100-10	9,3	71	0,024
Huvilajuopa	H_55-H_5	5,2	47	0,028-0,040
Lanajuopa	L_35-L_10	2,8	31	0,050

Kalibroinnin jälkeen malli validoitiin 20.5.2010 tehtyjen vedenkorkeuden havaintojen kanssa. Validoinnissa verrataan mallin antamia tuloksia havaintoihin ja tutkitaan, toimiiko malli kalibroinnissa ja validoinnissa samalla tavoin. Virtaama Q Kokenmäenjoessa Porin kaupungin kohdalla 20.5.2010 oli noin $240 \text{ m}^3/\text{s}$. Alapuolisena reunaehtona validoinnissa käytettiin vedenkorkeutta W Kivinin kohdalla, joka oli $+0,2 \text{ m}$ N2000-korkeusjärjestelmässä. Laskettujen arvojen keskimääräinen poikkeama havaituista arvoista oli kalibroinnissa 11 cm ja vastaavasti validoinnissa 13 cm . Kalibroinnin ja validoinnin tulokset on esitetty kuvissa 11-14 ja taulukossa 5.

Taulukko 5: Kalibrointi- ja validointitulokset

Paalu	Kalibrointi, $Q=465 \text{ m}^3/\text{s}$		Validointi, $Q=240 \text{ m}^3/\text{s}$	
	Havaittu vedenkorkeus (W)	Laskettu vedenkorkeus(W)	Havaittu vedenkorkeus(W)	Laskettu vedenkorkeus(W)
287	+1,24	+1,29	+0,42	+0,54
230	+0,89	+0,85	-	+0,31
H_14	+0,57	+0,22	+0,17	+0,09
222	+0,84	+0,91	+0,29	+0,47
44	+0,58	+0,62	+0,18	+0,32

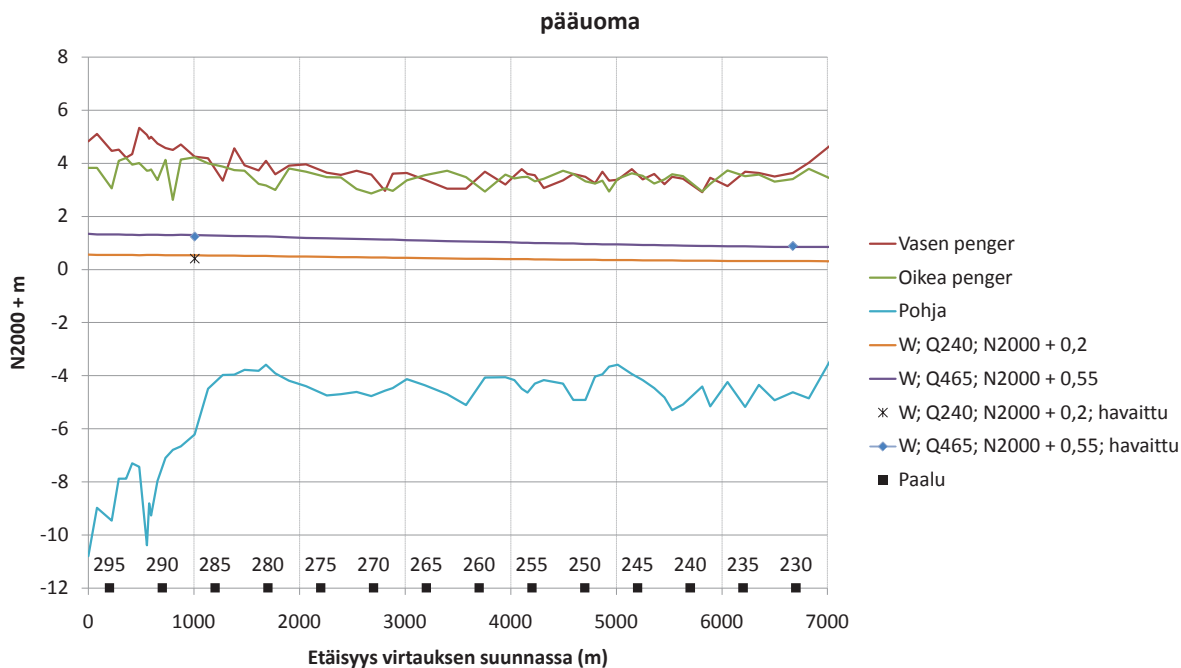
Validointi suurempiin virtaamiin

Validointi kalibrointia pienempään virtaamaan ei välttämättä anna oikeaa kuvaa mallin toiminnasta kalibrointia suuremmilla virtaamilla. Tämän takia malli on validoitu myös Porin tulvat –hankkeen (*Koskinen, 2006*) osaselvityksessä vuoden 1995 keväällä tehtyihin suurempien virtaamien vedenkorkeushavaintoihin. Porin tulvat –hankkeen osaselvityksessä havaitut N60-tason Mäntyluodon merivedenkorkeudet on laskelmissa muutettu N2000-tason Kivinin vedenkorkeuksiksi. Muunnos on tehty lisäämällä Mäntyluodon havaintoarvoihin 0,15 m johtuen vedenkorkeuksien erosta ja 0,37 m johtuen korkeustasojen erosta. Validointipisteenä vertailussa on käytetty Seikun sahan vedenkorkeusaseman havaintoja.

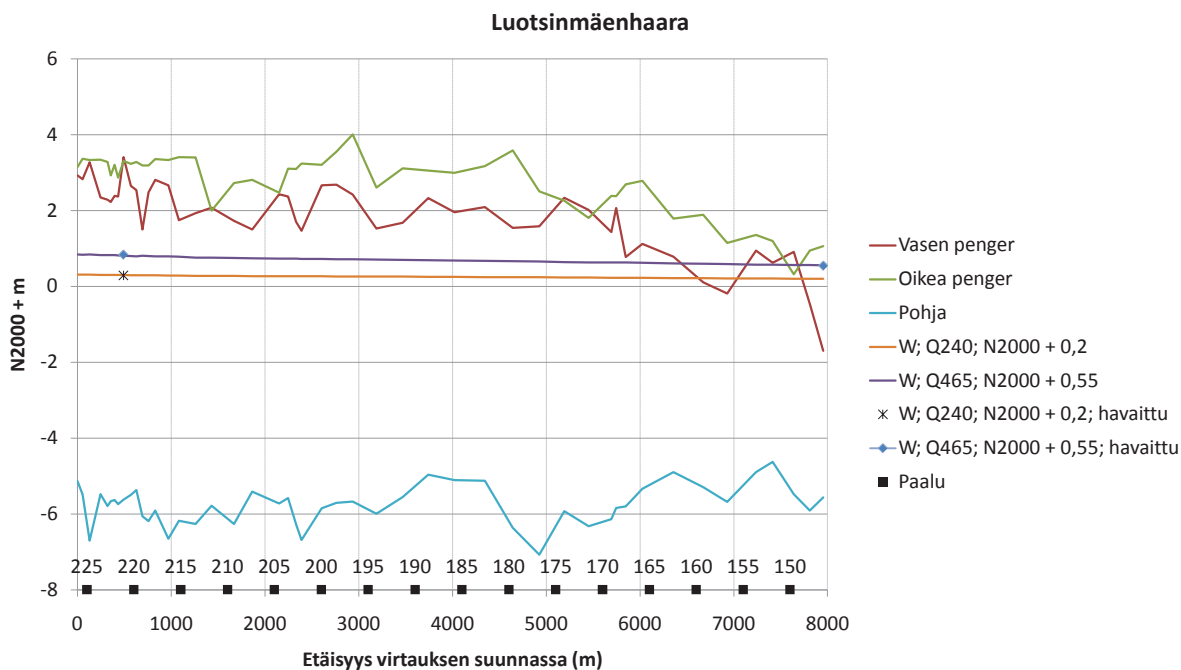
Suurempien virtaamien validointitulosten keskimääräinen poikkeama havaituista arvoista oli 6 cm. Validointitulokset on esitetty taulukossa 6. Validointitulosten keskimääräinen poikkeama havaituista arvoista on samalla tasolla vastaavien kalibrointitulosten kanssa, ja siten mallin voidaan päätellä toimivan samalla tavoin kalibrointi- ja validointitilanteissa.

Taulukko 6: Validointitulokset kalibrointia suurempiin virtaamiin

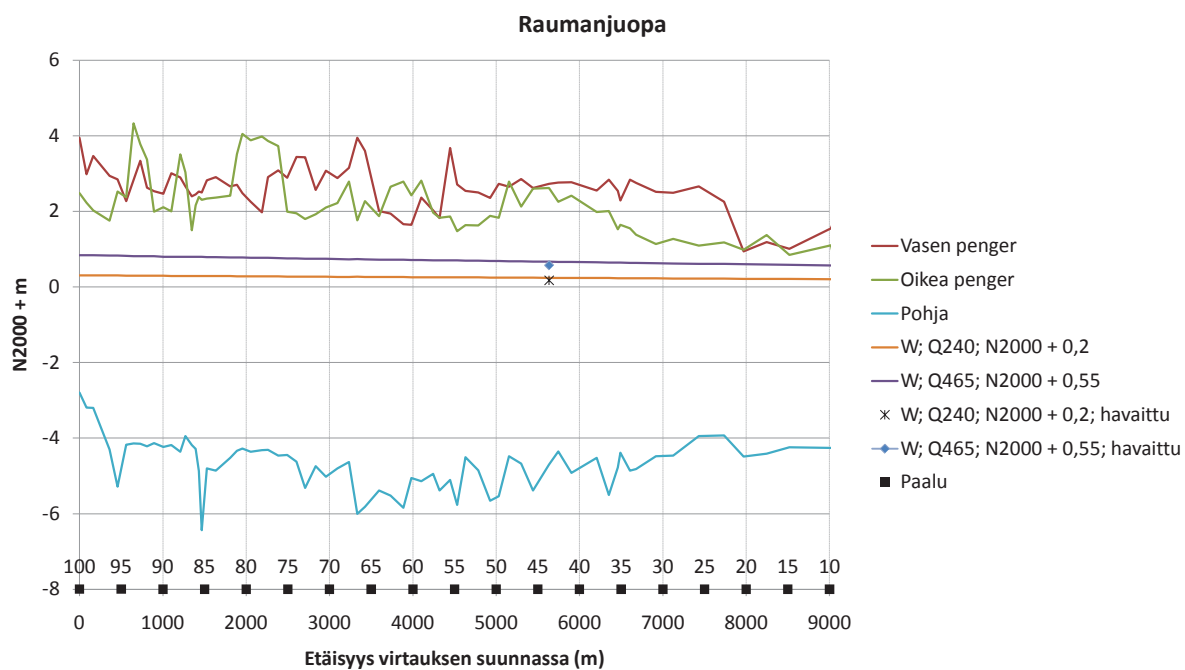
Havainto pvm	Virtaama Q	Vedenkorkeus W havaittu	Vedenkorkeus W laskettu
24.5.	724	+1,24	+1,21
28.5.	720	+1,18	+1,17
20.5.	600	+0,90	+1,00
17.5.	570	+0,94	+0,94
18.5.	500	+0,65	+0,82



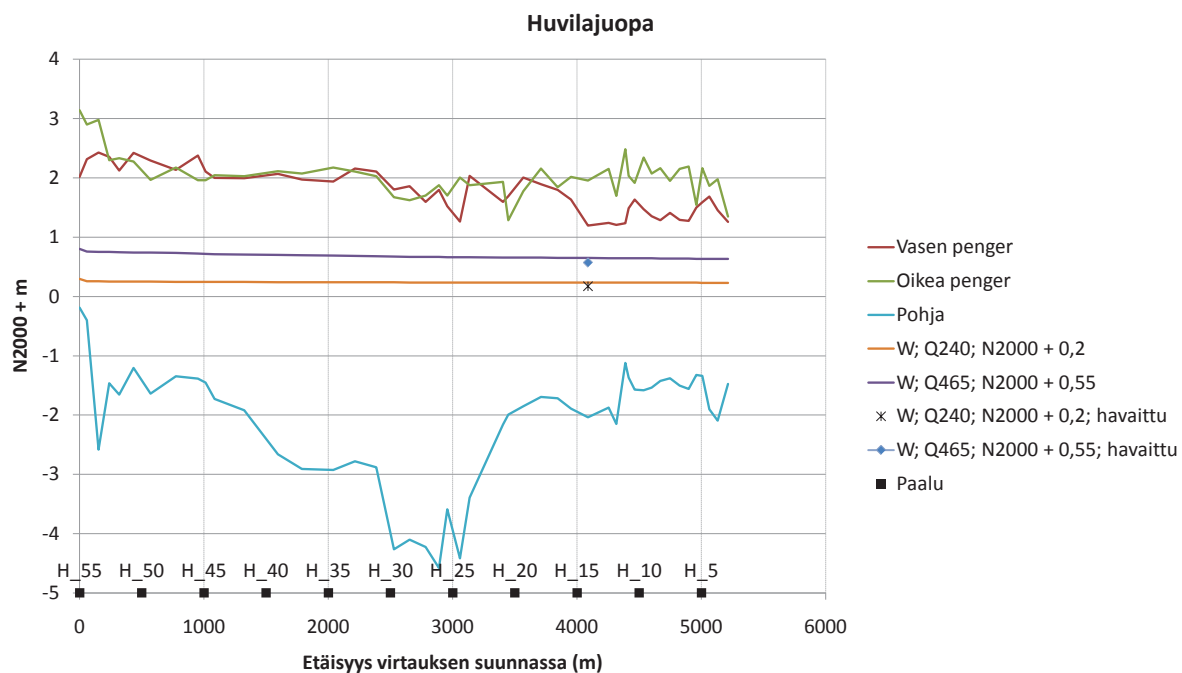
Kuva 11: Pääuoman Kalibrointi- ja validointitulosten pituusleikkaus. Virtaamalla $Q=240 \text{ m}^3/\text{s}$ reunaehtona käytetty vedenkorkeus W Kivinissä on $N2000 + 0,2 \text{ m}$ ja virtaamalla $Q=465 \text{ m}^3/\text{s}$ vastaavasti vedenkorkeus W Kivinissä $N2000 + 0,55 \text{ m}$. Penkereiden oikea ja vasen puoli on määritetty veden virtaussuuntaan katsoen.



Kuva 12: Luotsinmäenhaaran kalibrointi- ja validointitulosten pituusleikkaus.



Kuva 13: Raumanjuovan kalibrointi- ja validointitulosten pituusleikkaus.



Kuva 14: Huvilajuovan kalibrointi- ja validointitulosten pituusleikkaus.

5 Laskentatulokset

5.1 Yleistä

Seuraavassa on esitetty yhdistetyllä yksi- ja kaksiulotteisella virtausmallilla lasketut tulokset uomien vedenkorkeuksista ja tulvan leviämisen laajuus uomien ulkopuolelle luotojen alueella. Yksiulotteista virtausmallia on käytetty uomaverkoston mallintamiseen, johon on yhdistetty tulvan leviämisen mallintamiseen käytetty kaksiulotteinen virtausmalli.

Tuloksista on koottu luotojen alueen käsittävät tulvakartat sekä pituusprofiilikuvat tutkituille uomille. Tulvakartat kuvaavat veden syvyyttä ja havainnollistavat, kuinka suuri osa alueesta kullakin virtaamatilanteella ja Kivinin vedenkorkeudella jää veden alle. Uomien pituusprofiilikuvissa on esitetty vedenpinnan korkeudet, pengerialinjat sekä uoman pohjan korkeus. Penkereiden korkeusasema on määritelty virtausmallissa käytetyn maastomallin määrittelemien poikkileikkausten korkeuspisteistä, ja pisteiden välinen pengerialinjan korkeus on muodostettu interpoloimalla. Näin olle kuvien pengerialinja ei välttämättä vastaa joka kohdassa todellista tilannetta. Pituusprofiilikuvista voidaan tehdä päätelmiä pengerkorkeuden riittävydestä eri virtaustilanteilla. Lasketun vedenpinnan ylittäessä kuvien pengerialinjan, syntyvän tulvan laajuuteen vaikuttaa kuitenkin merkittävästi maaston korkeus ja mahdollisten tulvapatojen sijainti poikkileikkausten ulkopuolella. Pituusprofiilikuvista vedenkorkeuksia tulvimisen kannalta on tarkasteltu lähemmin pääuoman, Luotsinmäenhaarain itäisen ja Raumanjuovan läntisen rannan osalta.

Tässä luvussa esitetään yhdistetyllä yksi- ja kaksiulotteisella virtausmallilla lasketut tulokset, ja liitteessä B on esitetty yksiulotteisella virtausmallilla lasketut uomien vedenkorkeudet. Liitteen B yksiulotteisessa virtausmallissa on oletettu, että vesi ei virtaa tulvapatojen yli, jolloin lasketut vedenkorkeuden arvot ovat jonkin verran todellisia suuremmat. Mallin avulla voidaan määrittää tarvittavat tulvapatojen korkeudet tutkituissa virtaustilanteissa, jos veden virtaus tulvapatojen yli haluttaisiin kokonaan estää.

5.2 Jääpadot virtaamalla $700 \text{ m}^3/\text{s}$

5.2.1 Jääpato Luotsinmäenhaarassa

Luotsinmäenhaaraan on kehittynyt noin kilometrin pituinen jääpato Kirjurinluodon kärjestä alavirtaan. Jään määrä jääpadossa on noin $135\,000 \text{ m}^3$. Mallilla on tutkittu syntyvän tulvan laajuutta luotojen alueelle sekä uomien vedenpinnan korkeuksia nykytilanteen ja muutetun tilanteen mukaisessa uomaverkostoissa.

On todennäköistä, että olosuhteissa joissa Luotsinmäenhaaraan ajautuneet jäät muodostavat uomaan jääpadon, osa jäistä kulkeutuu myös Raumanjuopaan, jonne kehittyy vastaavanlainen jääpato. Luvussa 5.2.2 on esitetty laskentatulokset, kun jääpato on kehittynyt sekä Luotsinmäenhaaraan että Raumanjuopaan.

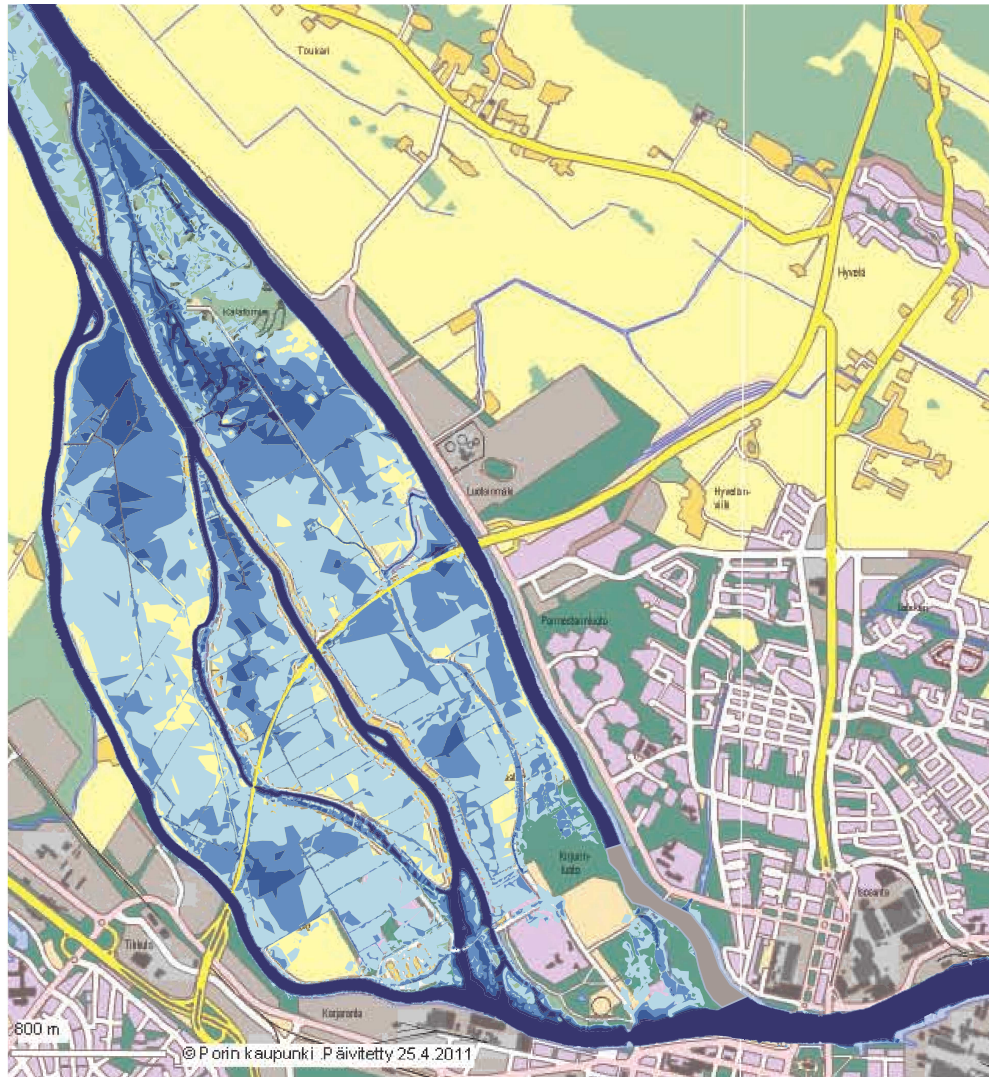
Luotojen alue

Kuvassa 15 on esitetty luotojen alueen nykytilanteen mukainen tulvakartta. Veden alle jäävä pinta-ala Raumanjuovan ja Lanajuovan välisellä alueella on 74 %, Lanajuovan ja Huvilajuovan välillä 85 % sekä Luotsinmäenhaaran ja Huvilajuovan välillä 87 %.

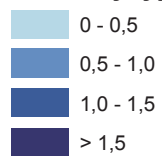
Kuvassa 16 on esitetty luotojen alueen muutetun tulevaisuuden tilanteen mukainen tulvakartta. Veden alle jäävä pinta-ala Raumanjuovan ja Lanajuovan välisellä alueella on 58 %, Lanajuovan ja Huvilajuovan välillä 79 % sekä Luotsinmäenhaaran ja Huvilajuovan välillä 76 %.

Kuvista 15 ja 16 havaitaan, että kyseisissä virtaustilanteissa vesi ei tulvi Kirjurinluodon yli juuri lainkaan. Muutetun tilanteen mukainen Lanajuovan ruoppaus pienentää jonkin verran Raumanjuovan ja Lanajuovan sekä Huvilajuovan ja Luotsinmäenhaaran välisten luotojen alueelle syntyvän tulvan laajuutta. Veden tulvimiseen Lanajuovan ja Huvilajuovan väliselle alueelle ruoppauksella on vähäisempi vaikutus.

Tulvakartta
 $Q=700 \text{ m}^3/\text{s}$, vedenkorkeus Kivinissä N2000 + 0,77 m
 Jääpato Luotsinmäenhaarassa



Veden syvyys [m]

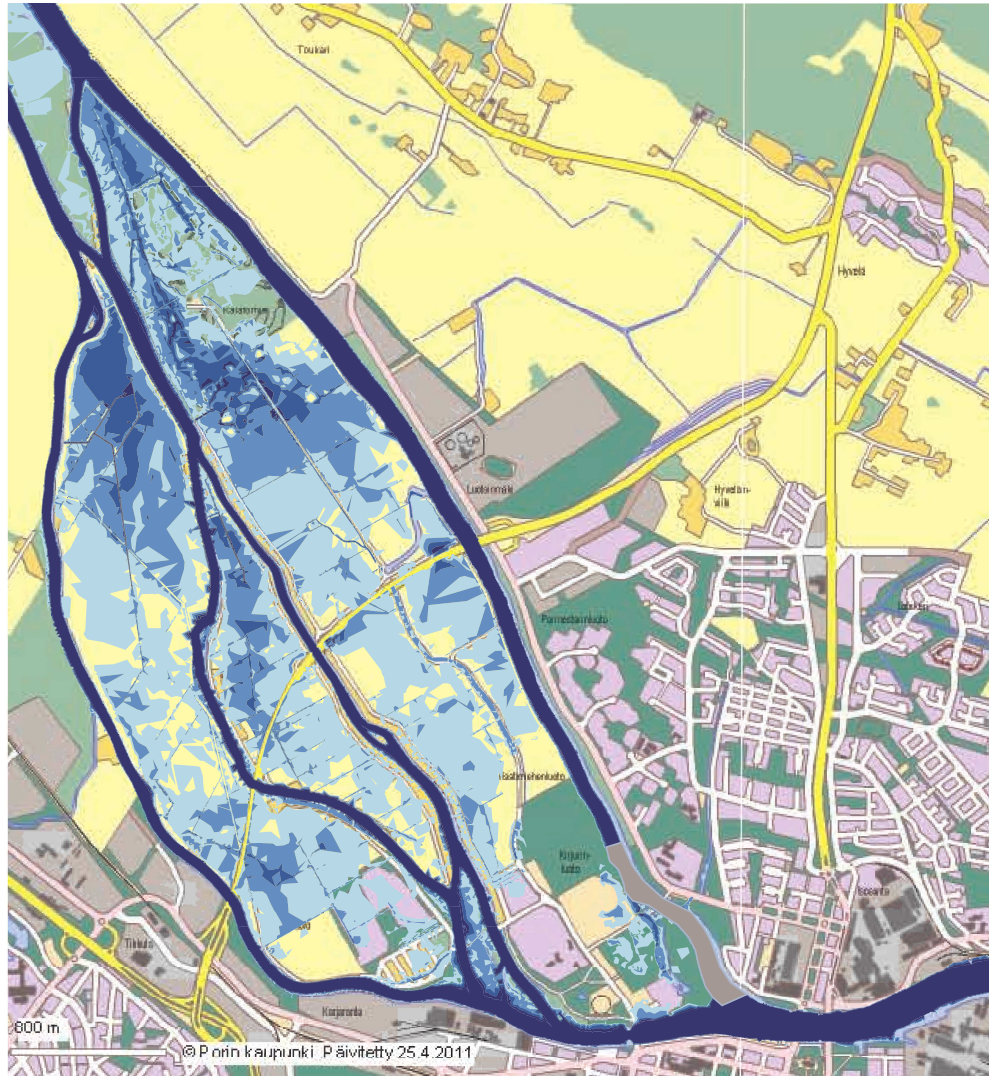


0 0,5 1 km

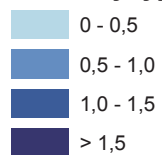


Kuva 15: Luotojen alueen nykytilanteen mukainen tulvakartta, kun jääpato on kehittynyt Luotsinmäenhaaraan. Jääpadon sijainti uomassa on merkitty harmaalla.

Tulvakartta
 $Q=700 \text{ m}^3/\text{s}$, vedenkorkeus Kivinissä N2000 + 0,77 m
 Ruopatut uomat, jääpato Luotsinmäenhaarassa



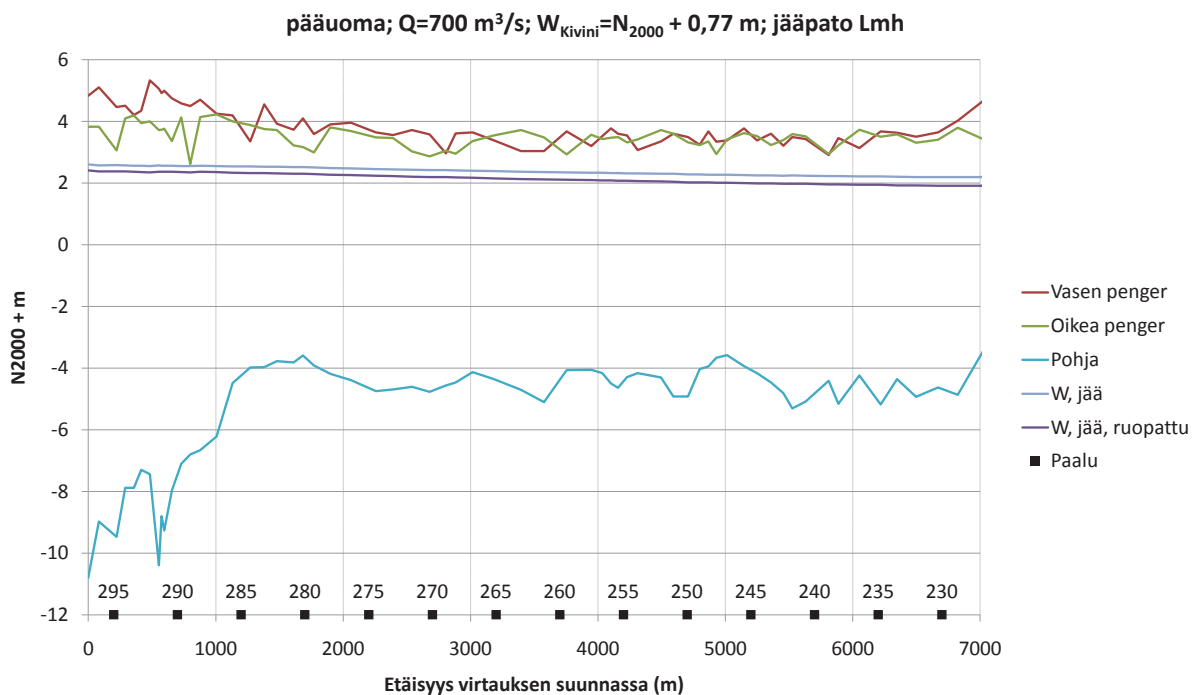
Veden syvyys [m]



Kuva 16: Luotojen alueen muutetun tulevaisuuden tilanteen mukainen tulvakartta, kun jääpato on kehittynyt Luotsinmäenhaarassa. Jääpadon sijainti uomassa on merkitty harmaalla.

Pääuoma

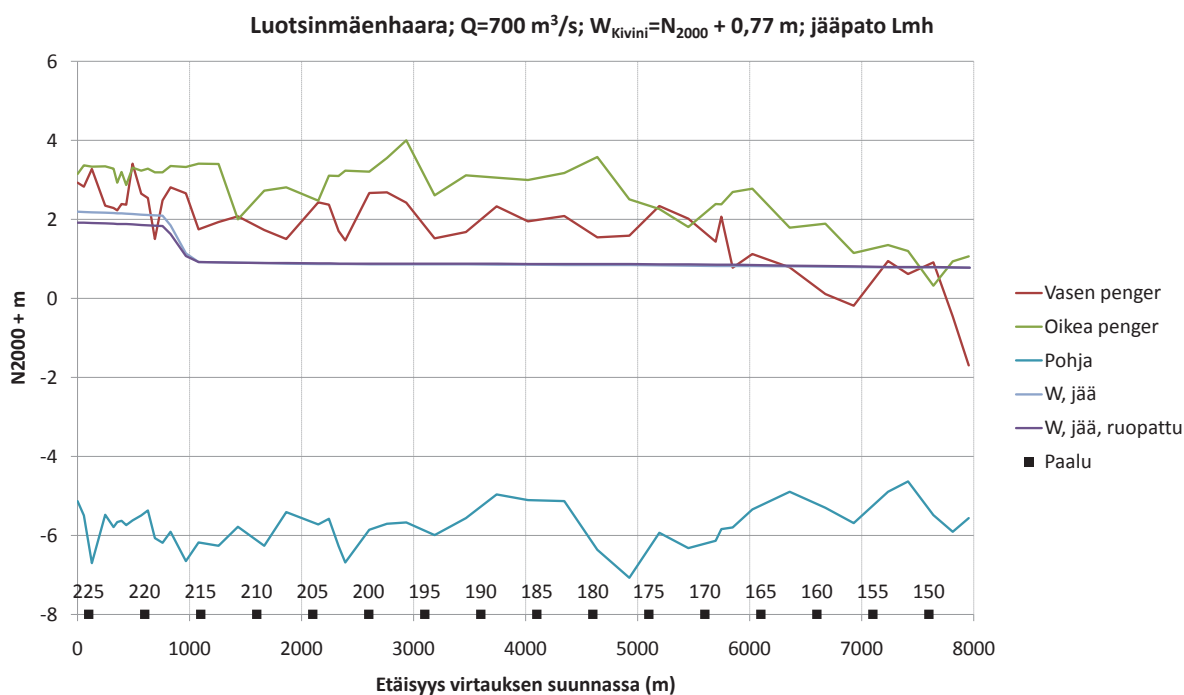
Kuvassa 17 on esitetty pääuoman pituusprofiilikuva. Nykytilanteen mukaisessa uomaverkostossa vedenkorkeus pääuoman yläpäässä on N2000 +2,58 m ja pääuoman alapäässä N2000 +2,20 m. Muutetun tilanteen eli Lanajuovan ruoppauksen mukaisessa uomaverkostossa vedenkorkeudet ovat pääuoman yläpäässä N2000 +2,41 m ja alapäässä N2000 +1,92 m. Ruoppauksen vaikutuksesta uoman vedenkorkeus alenee siis 0,17–0,28 m. Vesi ei tulvi uomasta mantereelle.



Kuva 17: Pituusleikkaus pääuomasta virtaamalla $Q=700 \text{ m}^3/\text{s}$. Jääpato on kehittynyt Luotsinmäenhaaraan. Virtausmallin alapuolisena reunaehtona on vedenpinnan korkeus W Kiviniissä N2000 +0,77 m. Penkereiden oikea ja vasen puoli on määritetty veden virtaussuuntaan katsoen.

Luotsinmäenhaara

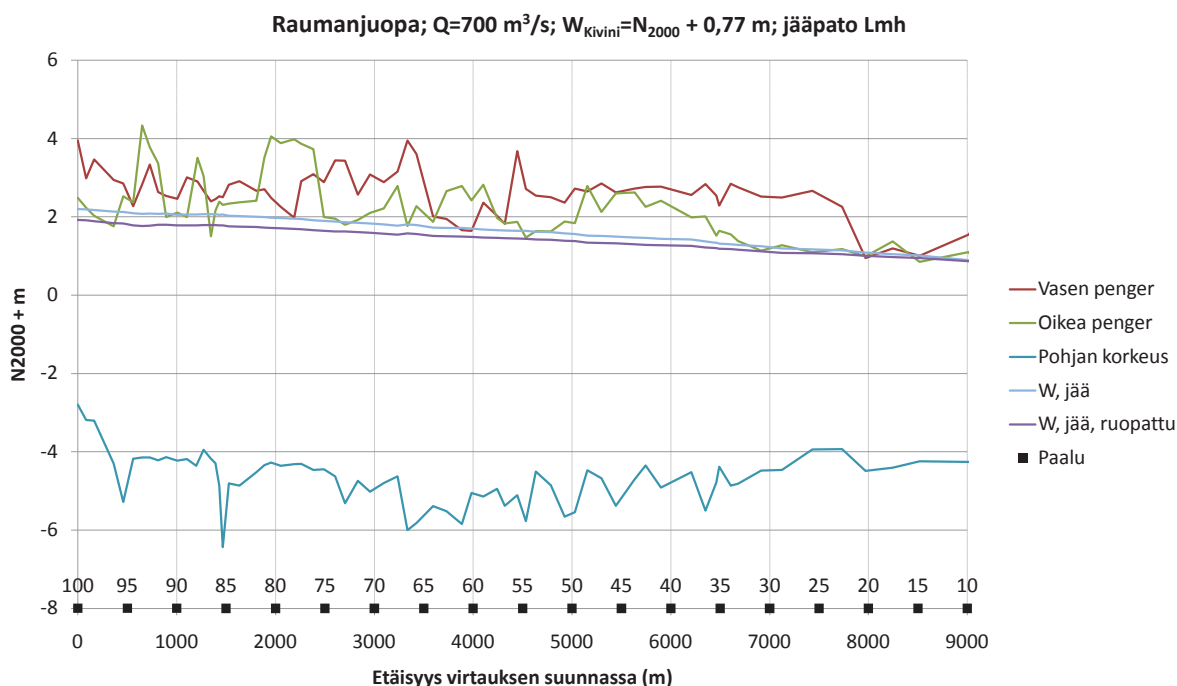
Kuvassa 18 on esitetty Luotsinmäenhaaran pituusprofilikuva. Jos Luotsinmäenhaaraan kehittyä jäänpato, nousee vedenpinnan korkeus Kirjurinluodon kärjessä tasolle N2000 +2,19 m. Muutetun tulevaisuuden tilanteen eli Lanajuovan ruoppauksen mukainen vedenkorkeus Kirjurinluodon kärjessä on N2000 +1,92 m. Kuvasta havaitaan, että ruoppauksen vaikutuksesta vedenpinta laskee uoman yläpäässä. Paalun 216 kohdalla sijaitsevasta jäänpadon kärjestä alavirtaan ruoppauksella ei kuitenkaan ole vaikutusta uoman vedenkorkeuteen. Ruoppauksen vaikutuksesta uoman vedenkorkeus alenee 0–0,27 m. Tutkittu virtaustilanne ei aiheuta veden tulvimista mantereelle.



Kuva 18: Pituusleikkaus Luotsinmäenhaarasta virtaamalla $Q=700 \text{ m}^3/\text{s}$. Jäänpato on kehittynyt Luotsinmäenhaaraan. Virtausmallin alapuolisena reunaehtona on vedenpinnan korkeus W Kivinessä $N_{2000} + 0,77 \text{ m}$. Penkereiden oikea ja vasen puoli on määritetty veden virtaussuuntaan katsoen.

Raumanjuopa

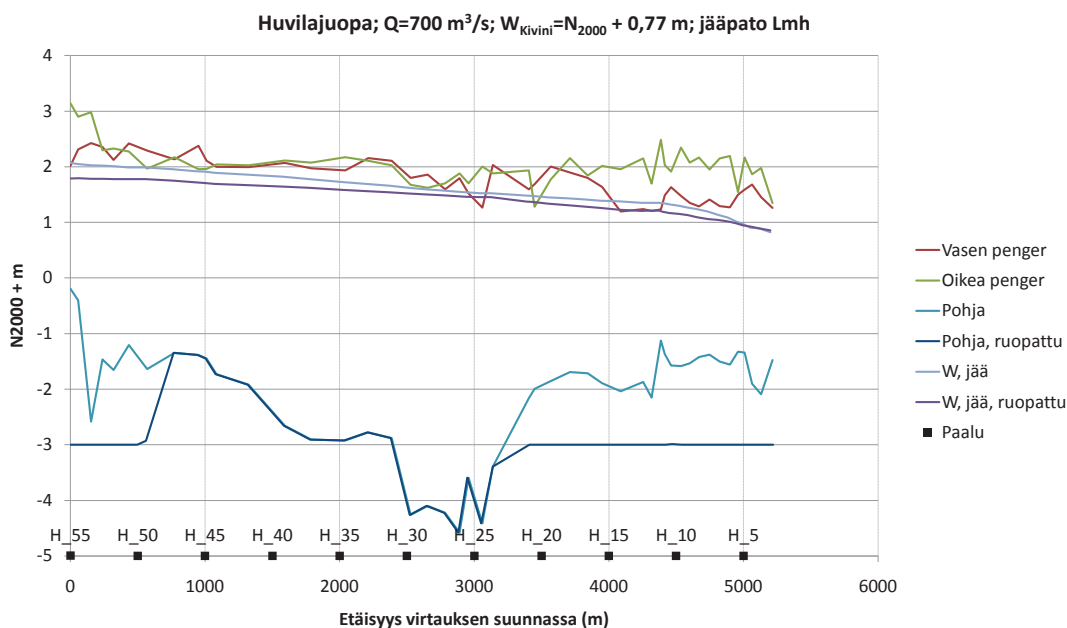
Kuvassa 19 on esitetty Raumanjuovan pituusprofilikuva. Luotsinmäenhaaraan syntyvän jääpadon vaikutuksesta vedenpinta nousee Kirjurinluodon kärjessä tasolle N2000 +2,19 m. Muutetun tulevaisuuden tilanteen eli Lanajuovan ruoppauksen mukainen vedenkorkeus Kirjurinluodon kärjessä on N2000 +1,92 m. Ruoppauksella saatutettava hyöty uoman vedenkorkeuden alenemana on 0–0,27 m. Jääpadon vaikutuksesta vedenpinnan korkeus Raumanjuovassa nousee niin, että nykytilanteen mukaisessa uomaverkostossa joki tulvii paalun 60 kohdalta rannalle ja siitä radalle sekä mahdollisesti itään Valtatie 8:lle asti. Muutetun tilanteen mukaisessa ruopatussa uomaverkostossa vesi tulvii Suntinojan kautta radalle. Tulva ei leviä erityisen laajalle mutta ulottuu kuitenkin tärkeille liikenneväylille asti.



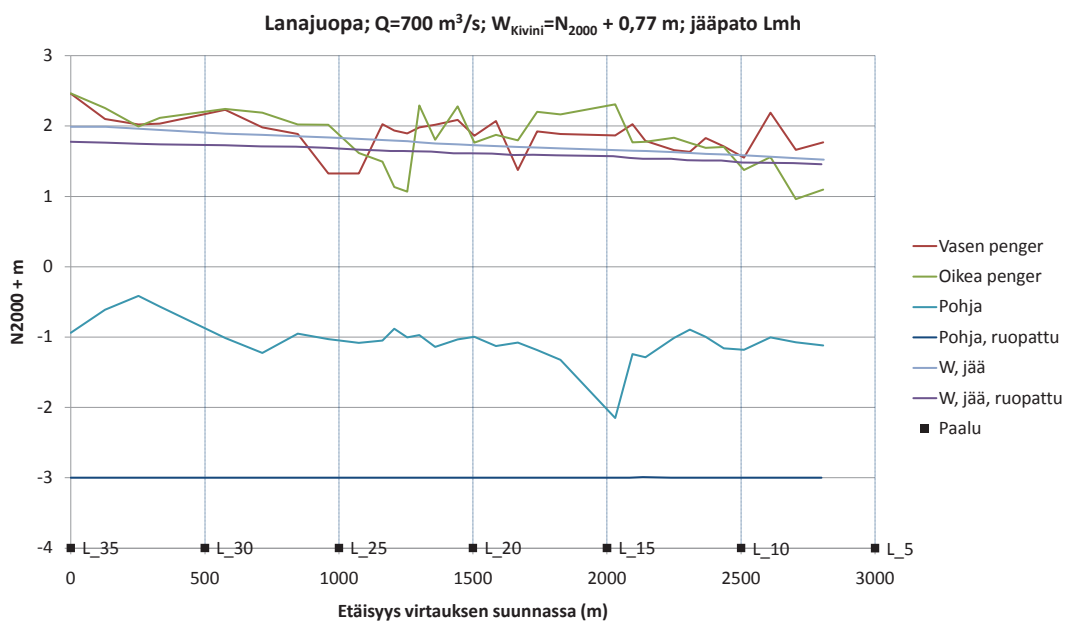
Kuva 19: Pituusleikkaus Raumanjuovasta virtaamalla $Q=700 \text{ m}^3/\text{s}$. Jääpato on kehittynyt Luotsinmäenhaaraan. Virtausmallin alapuolisena reunaehtona on vedenpinnan korkeus W Kiviniissä N2000 +0,77 m. Penkereiden oikea ja vasen puoli on määritetty veden virtaussuuntaan katsoen.

Huvilajuopa ja Lanajuopa

Kuvissa 20 ja 21 on esitetty Huvilajuovan ja Lanajuovan pituusprofiilikuvat tutkitussa virtaustilanteessa. Muutetun tilanteen mukainen Lanajuovan ruoppaus alentaa vedenpinnan korkeutta Huvilajuovassa 0–0,28 m ja vastaavasti Lanajuovassa 0,06–0,22 m. Vedenpinnan korkeus ylittää pengerkorkeuden mallinnetuissa virtaustilanteissa useassa kohdin erityisesti Lanajuovassa. Veden tulviminen luotojen alueelle käy ilmi luotojen alueen tulvakartoista kuvista 15 ja 16.



Kuva 20: Pituusleikkaus Huvilajuovasta virtaamalla $Q=700 \text{ m}^3/\text{s}$. Jääpato on kehittynyt Luotsinmäenhaaraan. Virtausmallin alapuolisena reunaehtona on vedenpinnan korkeus W Kiviniissä $N_{2000} + 0,77 \text{ m}$. Pengereiden oikea ja vasen puoli on määritetty veden virtaussuuntaan katsoen.



Kuva 21: Pituusleikkaus Lanajuovasta virtaamalla $Q=700 \text{ m}^3/\text{s}$. Jääpato on kehittynyt Luotsinmäenhaaraan. Virtausmallin alapuolisena reunaehtona on vedenpinnan korkeus W Kiviniissä $N_{2000} + 0,77 \text{ m}$. Penkereiden oikea ja vasen puoli on määritetty veden virtaussuuntaan katsoen.

5.2.2 Jääpadot Luotsinmäenhaarassa sekä Raumanjuovassa

Luotsinmäenhaaraan ja Raumanjuopaan on kehittynyt noin kilometrin pituinen jääpato. Jään määrä Luotsinmäenhaaran jääpadossa on noin 165 000 m³ ja Raumanjuovan jääpadossa noin 117 000 m³. Mallilla on tutkittu syntyvän tulvan laajuutta luotojen alueelle sekä uomien vedenpinnan korkeuksia nykytilanteen ja muutetun tilanteen mukaisissa uomaverkostoissa.

Luotojen alue

Kuvassa 22 on esitetty luotojen alueen nykytilanteen mukainen tulvakartta. Veden alle jäävä pinta-ala Raumanjuovan ja Lanajuovan välisellä alueella on 89%, Lanajuovan ja Huvilajuovan välillä 96 % sekä Luotsinmäenhaaran ja Huvilajuovan välillä 96 %.

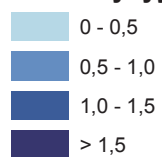
Kuvassa 23 on esitetty luotojen alueen muutetun tulevaisuuden tilanteen mukainen tulvakartta. Veden alle jäävä pinta-ala Raumanjuovan ja Lanajuovan välisellä alueella on 84 %, Lanajuovan ja Huvilajuovan välillä 96 % sekä Luotsinmäenhaaran ja Huvilajuovan välillä 93 %.

Kuvista 22 ja 23 havaitaan, että kyseisessä virtaustilanteessa vesi tulvii luotojen alueelle lähes koko alueen pinta-alan laajuudelta lukuun ottamatta Kirjurinluodon aluetta. Muutetun tilanteen mukainen Lanajuovan ruoppaus pienentää hieman Raumanjuovan ja Lanajuovan sekä Huvilajuovan ja Luotsinmäenhaaran välisten luotojen alueelle syntyvän tulvan laajuutta.

Tulvakartta
 $Q=700 \text{ m}^3/\text{s}$, vedenkorkeus Kivinissä N2000 + 0,77 m
 Jääpato Luotsinmäenhaarassa ja Raumanjuovassa



Veden syvyys [m]

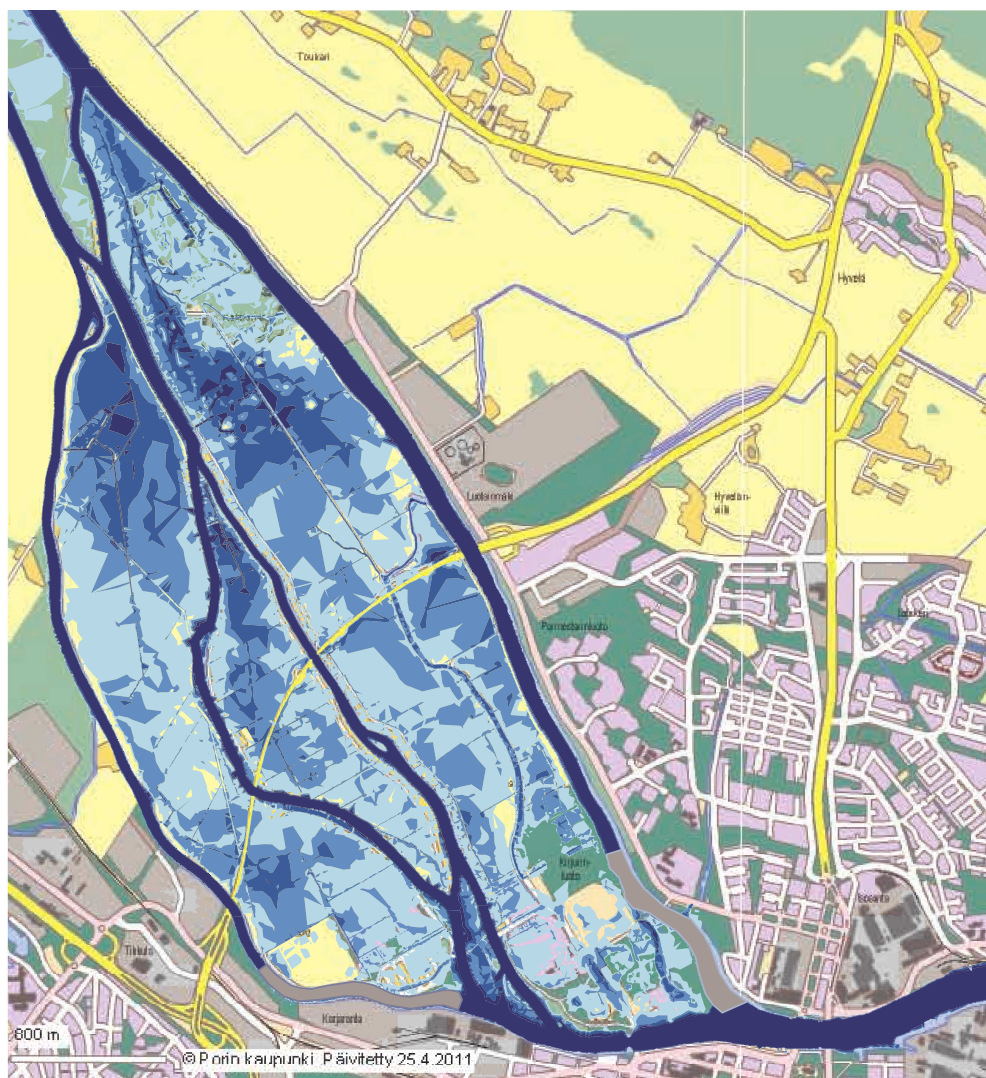


Kuva 22: Luotojen alueen nykytilanteen mukainen tulvakartta, kun jääpato on kehittynyt Luotsinmäenhaarassa ja Raumanjuopaan. Jääpatojen sijainti uomissa on merkitty harmaalla.

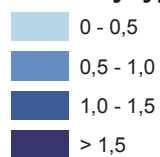
Tulvakartta

$Q=700 \text{ m}^3/\text{s}$, vedenkorkeus Kivinissä N2000 + 0,77 m

Ruopatut uomat, jääpato Luotsinmäenhaarassa ja Raumanjuovassa



Veden syvyys [m]

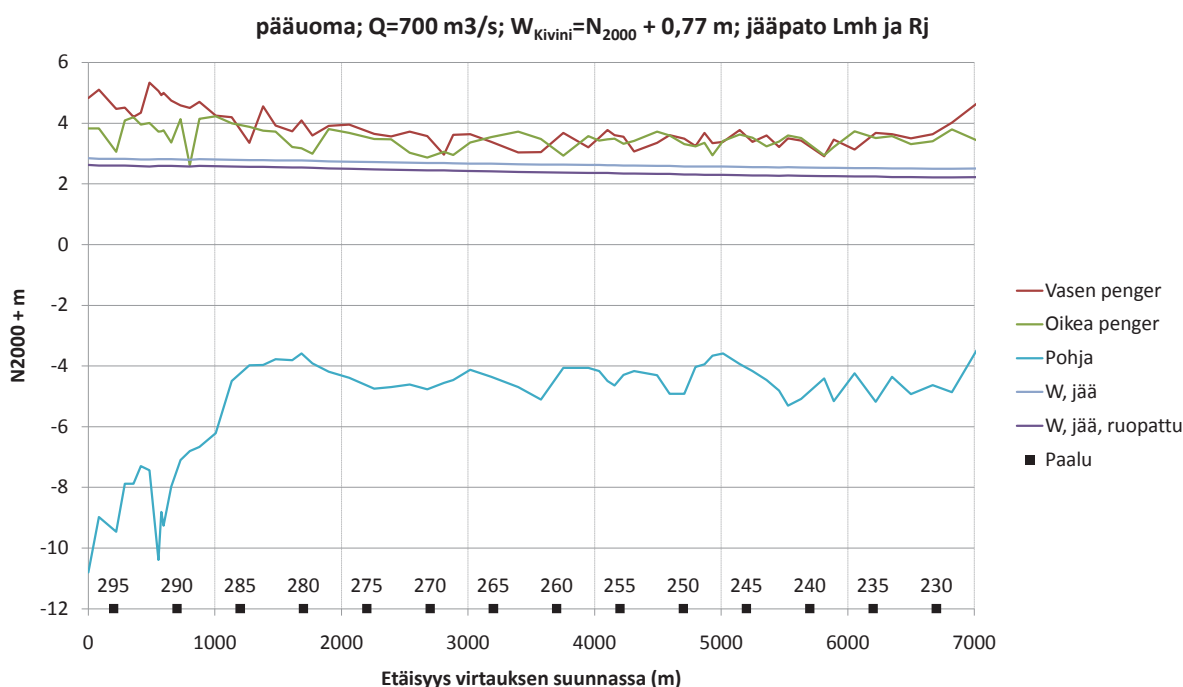


Kuva 23: Luotojen alueen muutetun tulevaisuuden tilanteen mukainen tulvakartta, kun jääpato on kehittynyt Luotsinmäenhaarassa ja Raumanjuopaan. Jääpatojen sijainti uomissa on merkitty harmaalla.

Pääuoma

Kuvassa 24 on esitetty pääuoman pituusprofiili tutkitussa tilanteessa. Nykytilanteen mukaisessa uomaverkostossa vedenkorkeus pääuoman yläpäässä on N2000 +2,82 m ja pääuoman alaosalla N2000 +2,50m. Muutetun tilanteen eli Lanajuovan ruoppauksen mukaisessa uomaverkostossa vedenkorkeudet ovat vastaavasti pääuoman yläpäässä N2000 +2,60 m ja alapäässä N2000 +2,22 m. Ruoppauksen vaikutuksesta vedenkorkeus uomassa alenee siis 0,22–0,28 m.

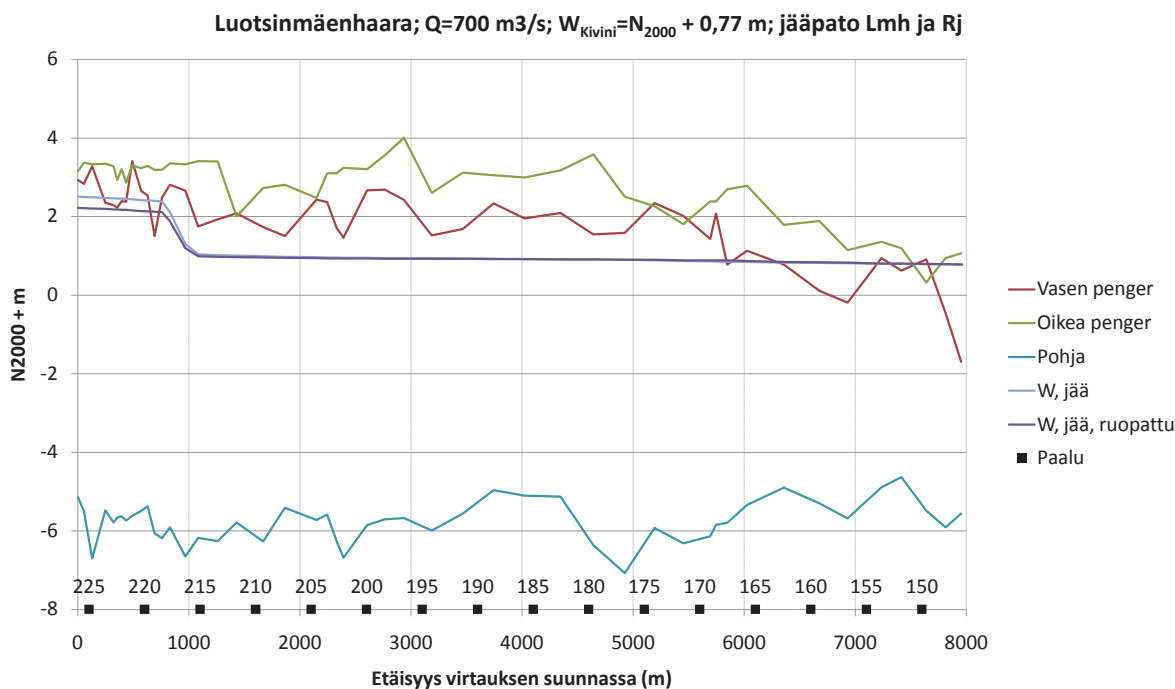
Nykytilanteen mukaisessa uomaverkostossa vedenpinta Kokemäenjoen ja Harjunpäänjoen yhtymäkohdalla nousee korkeuteen N2000 +2,65. Paikoittain maaston korkeus uoman itäpuolella kyseisellä kohdalla on noin N2000 +2,4...2,8 m, eikä rannalla ole patoa taikka luonnon tekemään hiekkavallia. Joki tulvii tällöin Sunniemeen Harjunpäänjoen kautta. Muutetun tilanteen eli Lanajuovan ruoppauksen mukaisessa uomaverkostossa vedenkorkeus uomassa on matalampi, ja joki tulvii hieman Sunniemeen.



Kuva 24: Pituusleikkaus uoman pohjasta ja vedenpinnan korkeuksista pääuomas-
sa virtaamalla $Q=700 \text{ m}^3/\text{s}$. Jääpato on kehittynyt Luotsinmäenhaaraan ja Rau-
manjuopaan. Virtausmallin alapuolisena reunaehtona on vedenpinnan korkeus W
Kivinissä N2000 +0,77 m. Penkereiden oikea ja vasen puoli on määritetty veden
virtaussuuntaan katsoen.

Luotsinmäenhaara

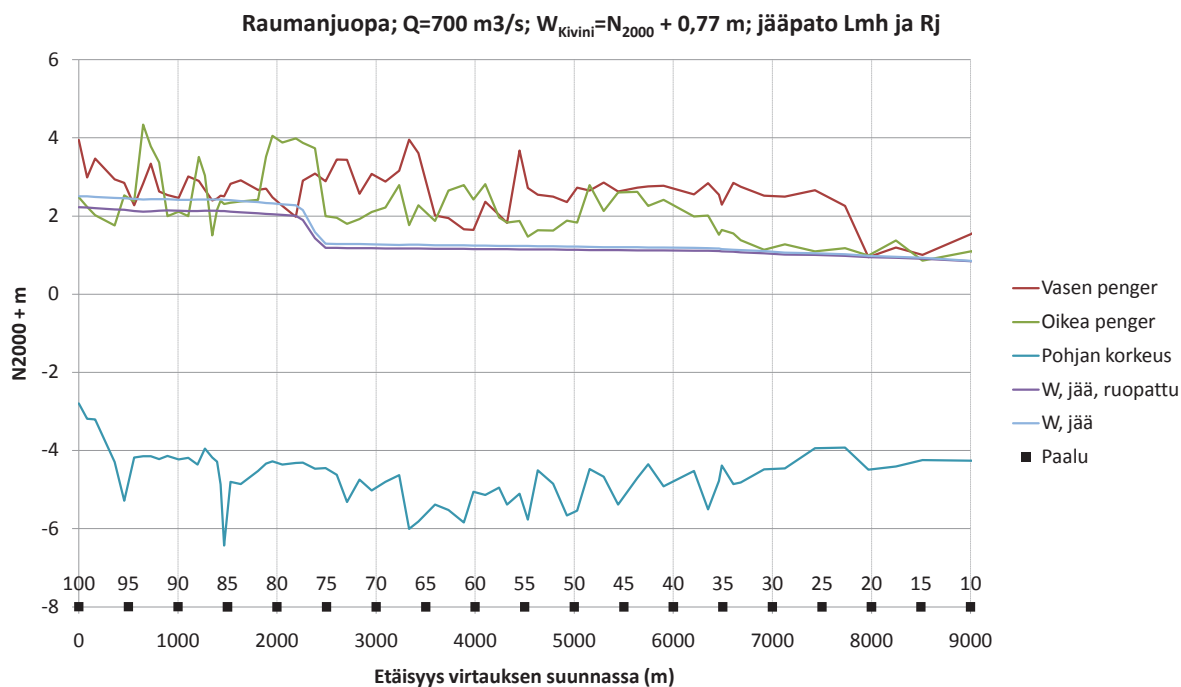
Kuvassa 25 on esitetty Luotsinmäenhaaran pituusprofiili tutkitussa tilanteessa. Nykytilanteen mukaisessa uomaverkostossa vedenkorkeus Luotsinmäenhaaraassa Kirjurinluodon kärjessä on N2000 +2,50 m ja vastaavasti muutetun tilanteen mukaisessa uomaverkostossa N2000 +2,21 m. Kuvasta havaitaan, että ruoppauksen vaikutuksesta vedenpinta laskee uoman yläpäässä. Paalun 216 kohdalla sijaitsevasta jääpadon kärjestä alavirtaan ruoppauksella ei kuitenkaan ole vaikutusta uoman vedenkorkeuteen. Ruoppauksen vaikutuksesta uoman vedenkorkeus alenee 0–0,29 m. Tutkittu virtaustilanne ei aiheuta veden tulvimista mantereelle.



Kuva 25: Pituusleikkaus Luotsinmäenhaarassa virtaamalla $Q=700 \text{ m}^3/\text{s}$. Jääpato on kehittynyt Luotsinmäenhaaraan ja Raumanjuopaan. Virtausmallin alapuolisena reunaehtona on vedenpinnan korkeus W Kivinissä N2000 +0,77 m. Penkereiden oikea ja vasen puoli on määritetty veden virtaussuuntaan katsoen.

Raumanjuopa

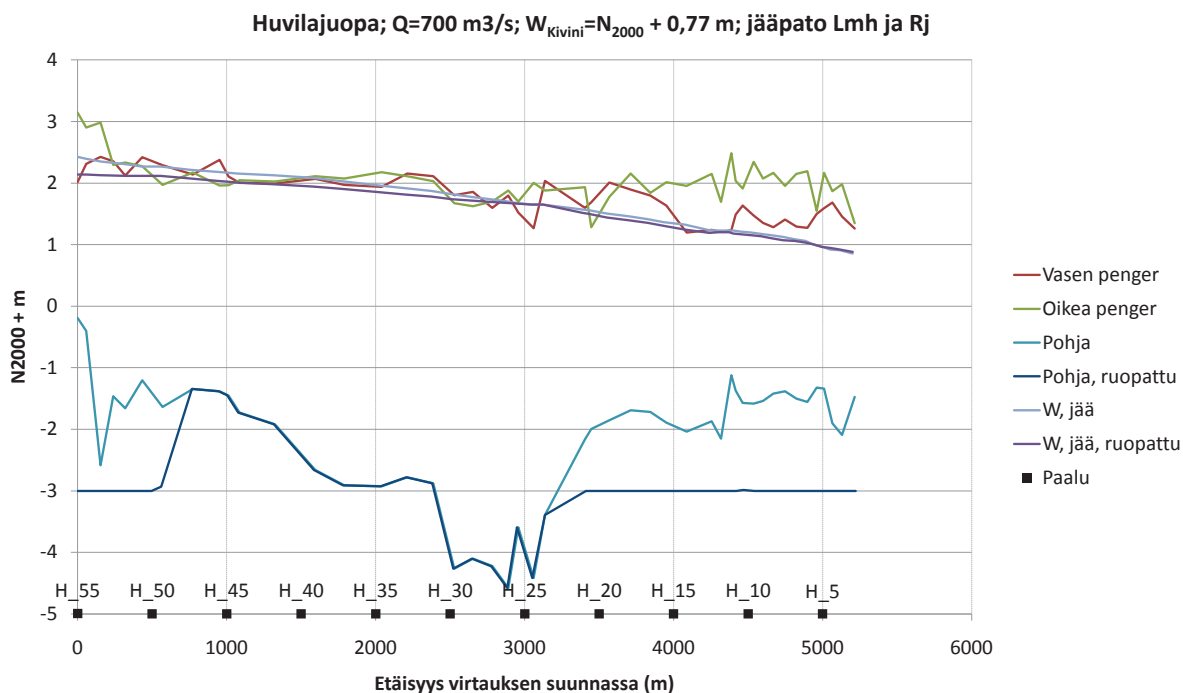
Kuvassa 26 on esitetty Raumanjuovan pituusprofiilikuva. Vedenpinnan korkeus nykytilanteen mukaisessa uomaverkostossa Raumanjuovan yläpäässä on tällöin N2000 +2,50 m, ja vastaavasti muutetun tilanteen mukaisessa uomaverkostossa N2000 +2,22 m. Kuvasta havaitaan, että ruoppauksen vaikutuksesta vedenpinta laskee uoman yläpäässä. Paalun 77 kohdalla sijaitsevasta jääpadon kärjestä alavirtaan ruoppauksella ei kuitenkaan ole merkittävää vaikutusta uoman vedenkorkeuteen. Ruoppauksen vaikutuksesta uoman vedenkorkeus alenee 0–0,28 m. Laskettu vedenkorkeus nykytilanteen mukaisessa uomaverkostossa uoman yläpäässä ylittää hieman vasemman pengerkorkeuden ja joki tulvii rannalle. Maasto kuitenkin nousee jokirannasta etelään päin, joten tulva ei leviä laajalle. Muutetun tilanteen eli Lanajuovan ruoppauksen mukaisessa uomaverkostossa joki ei tulvi vasemman penkereen yli manteelelle.



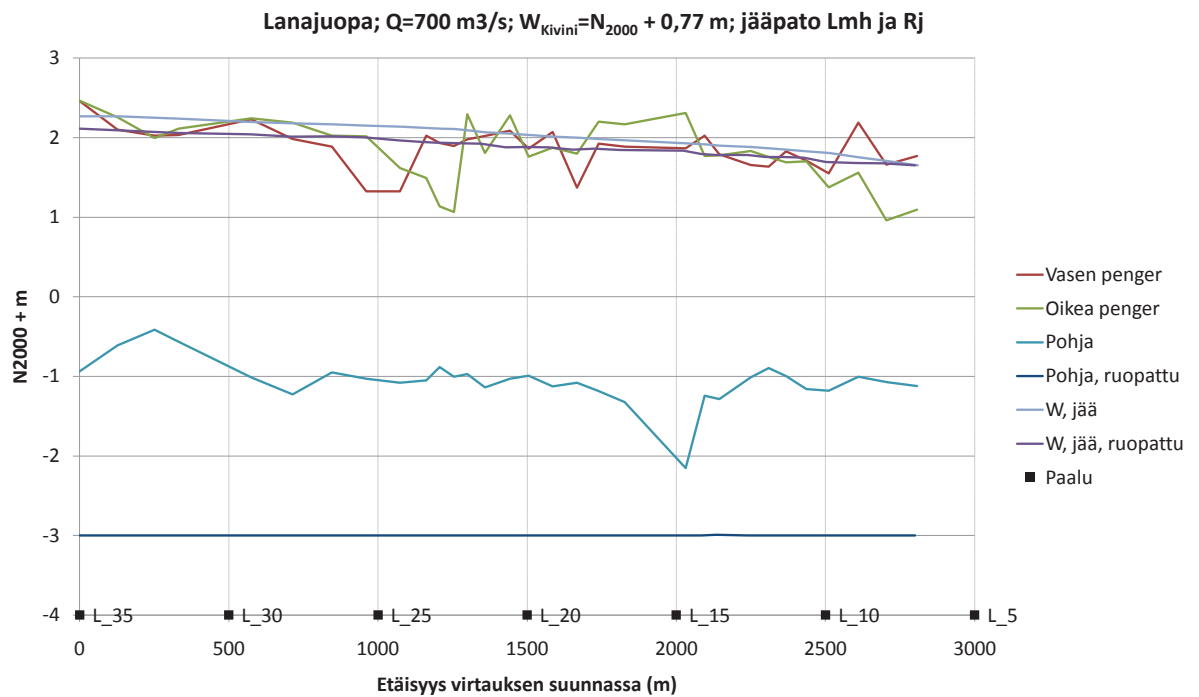
Kuva 26: Pituusleikkaus Raumanjuovasta virtaamalla $Q=700 \text{ m}^3/\text{s}$. Jääpato on kehittynyt Luotsinmäenhaaraan ja Raumanjuopaan. Virtausmallin alapuolisena reunaehtona on vedenpinnan korkeus W Kiviniissä N2000 +0,77 m. Penkereiden oikea ja vasen puoli on määritetty veden virtaussuuntaan katsoen.

Huvilajuopa ja Raumanjuopa

Kuvissa 27 ja 28 on esitetty Huvilajuovan ja Lanajuovan pituusprofiilikuvat tutkitussa virtaustilanteessa. Muutetun tilanteen mukainen Lanajuovan ruoppaus alentaa vedenpinnan korkeutta Huvilajuovassa 0–0,29 m ja vastaavasti Lanajuovassa 0–0,15 m. Ruoppauksen vaikutus uomissa pienenee alavirtaa kohti. Vedenpinnan korkeus ylittää pengerkorkeuden mallinnetuissa virtaustilanteissa useassa kohdin sekä Lanajuovassa että Huvilajuovassa. Veden tulviminen luotojen alueelle käy ilmi luotojen alueen tulvakartoista kuvista 22 ja 23.



Kuva 27: Pituusleikkaus Huvilajuovasta virtaamalla $Q=700 \text{ m}^3/\text{s}$. Jääpato on kehittynyt Luotsinmäenhaaraan ja Raumanjuopaan. Virtausmallin alapuolisena reunaehtona on vedenpinnan korkeus W Kivinissä $N_{2000} + 0,77 \text{ m}$. Penkereiden oikea ja vasen puoli on määritetty veden virtaussuuntaan katsoen.



Kuva 28: Pituusleikkaus uoman pohjasta ja vedenpinnan korkeuksista Lanajuovassa virtaamalla $Q=700 \text{ m}^3/\text{s}$. Jääpato on kehittynyt Luotsinmäenhaaraan ja Rautanjuopaan. Virtausmallin alapuolisena reunaehtona on vedenpinnan korkeus W_{Kivini} $N_{2000} + 0,77 \text{ m}$. Penkereiden oikea ja vasen puoli on määritetty veden virtaussuuntaan katsoen.

5.3 Virtaama 1100 m³/s

Laskelmat on tehty 1100 m³/s virtaamalla kahdella eri alapuolisella reunaehdolla nykytilannetta vastaavaan sekä muutettuun uomaverkoston. Näillä on pyritty havainnollistamaan merivedenkorkeuden vaikutusta ja toisaalta muutetun tilanteen mukaisten Lanajuovan ruoppausten vaikutusta uomaverkoston vedenkorkeuksiin. Alapuolisina reunaehtoina on käytetty vedenkorkeutta Kivinissä tasoilla N2000 +0,77 m ja N2000 +1,6 m. Porissa meren ylivedenkorkeus (HW) on suurin piirtein N2000 +1,60 m ja vedenkorkeus Kivinissä alimmalla mitatulla vuotuisella ylivedenkorkeudella (NHW) noin N2000 +0,77 m.

Tuloksista on koottu kaksiulotteisella virtausmallilla lasketut luotojen alueelle syntyvän tulvan laajuutta kuvaavat tulvakartat sekä uomien vedenkorkeutta kuvaavat pituusprofiilikuvat. Kuvista huomataan, että Kivinin vedenkorkeudella on merkittävä vaikutus uomaverkoston vedenpinnan korkeuksiin ja luotojen alueen tulvimiseen. Kun vedenkorkeus Kivinissä on tasolla N2000 +0,77 m, vedenpinnan korkeudet eivät suurimmalta osin ylitä laskettujen pengerlinjojen korkeutta. Vedenkorkeuden noustessa Kivinissä tasolle N2000 +1,6 m vesi tulvii luotojen alueelle useista kohdin sekä Luotsinmäenhaaran ja Raumanjuovan luotojen puoleisista penkereistä että Huvilajuovan ja Lanajuovan rantojen yli. Muutetun tilanteen mukaisella Lanajuovan ruoppauksella on tulvimiseen vain vähäinen vaikutus, jos vedenkorkeus Kivinissä on tasolla N2000 +1,60 m. Sen sijaan vedenkorkeuden ollessa alempana Lanajuovan ruoppaus laskee merkittävämmiin uomien vedenkorkeuksiin ja vähentää tulvimista luotojen alueella.

Luotojen alue

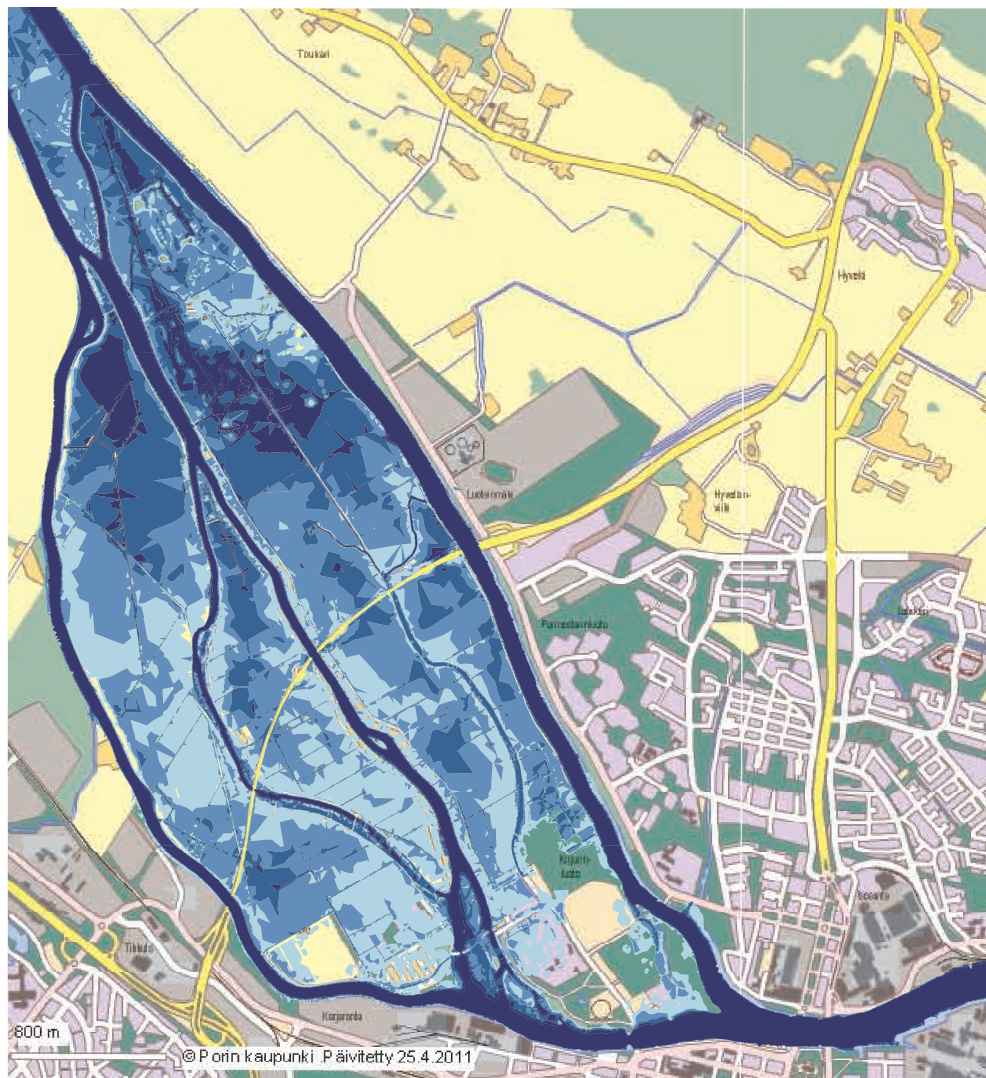
Kuvassa 29 on esitetty luotojen alueen nykytilanteen mukainen tulvakartta virtaamalla 1100 m³/s vedenkorkeuden ollessa Kivinissä N2000 +1,60 m. Veden alle jäävä pinta-ala Raumanjuovan ja Lanajuovan välisellä alueella on 94 %, Lanajuovan ja Huvilajuovan välillä 96 % sekä Huvilajuovan ja Luotsinmäenhaaran välillä 85 %.

Kuvassa 30 on esitetty luotojen alueen muutetun tulevaisuuden tilanteen mukainen tulvakartta virtaamalla 1100 m³/s vedenkorkeuden ollessa Kivinissä N2000 +1,60 m. Veden alle jäävä pinta-ala Raumanjuovan ja Lanajuovan välisellä alueella on 91 %, Lanajuovan ja Huvilajuovan välillä 96 % sekä Huvilajuovan ja Luotsinmäenhaaran välillä 83 %.

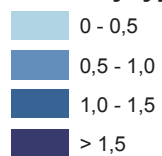
Kuvassa 31 on esitetty luotojen alueen nykytilanteen mukainen tulvakartta virtaamalla 1100 m³/s vedenkorkeuden ollessa Kivinissä N2000 +0,77 m. Veden alle jäävä pinta-ala Raumanjuovan ja Lanajuovan välisellä alueella on 62 %, Lanajuovan ja Huvilajuovan välillä 47 % sekä Huvilajuovan ja Luotsinmäenhaaran välillä 68 %.

Kuvassa 32 on esitetty luotojen alueen muutetun tilanteen mukainen tulvakartta virtaamalla 1100 m³/s vedenkorkeuden ollessa Kivinissä N2000 +0,77 m. Veden alle jäävä pinta-ala Raumanjuovan ja Lanajuovan välisellä alueella on 32 %, Lanajuovan ja Huvilajuovan välillä 53 % sekä Huvilajuovan ja Luotsinmäenhaaran välillä 61 %.

Tulvakartta
 $Q=1100 \text{ m}^3/\text{s}$, vedenkorkeus Kivinissä $N2000 + 1,60 \text{ m}$



Veden syvyys [m]

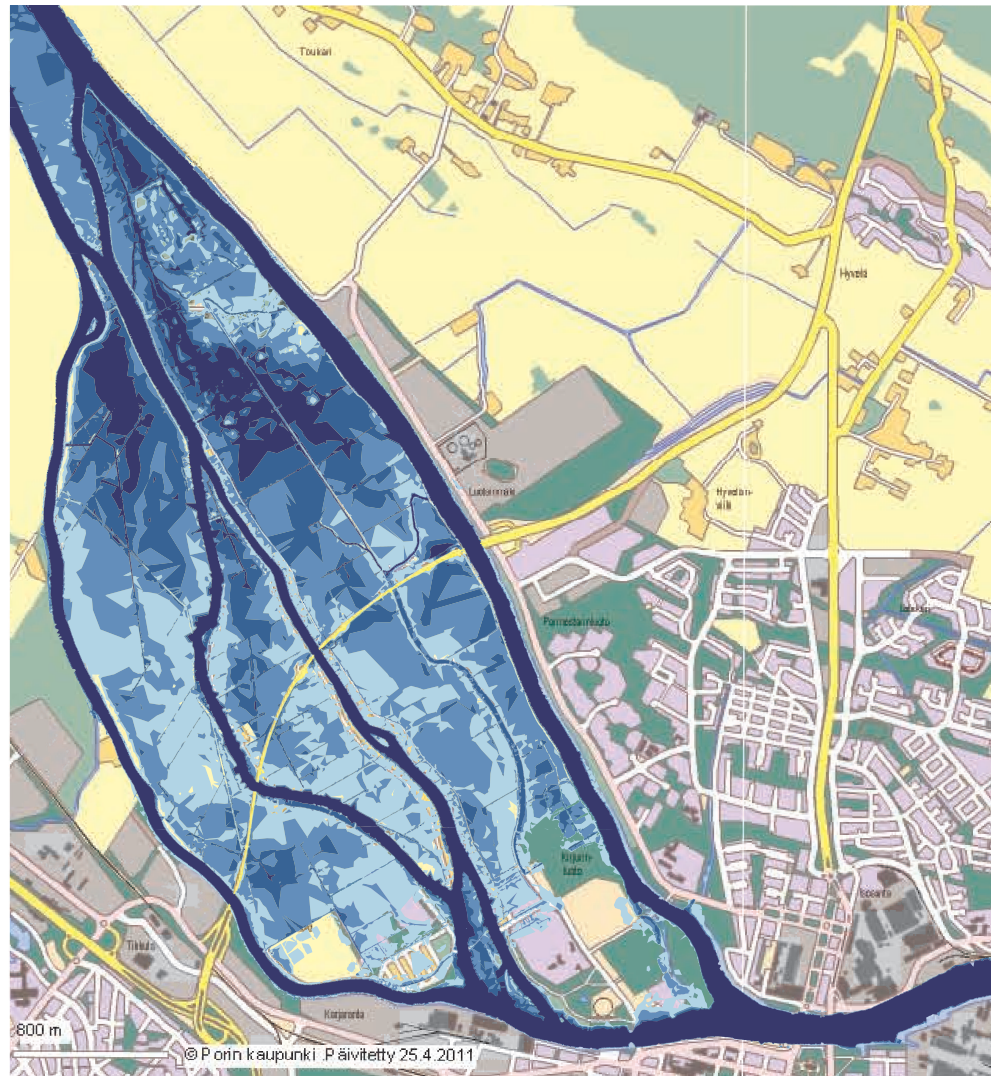


0 0,5 1 km







Kuva 29: Luotojen alueen nykytilanteen mukainen tulvakartta virtaamalla $Q=1100 \text{ m}^3/\text{s}$ vedenkorkeuden W ollessa Kivinissä tasolla $N2000 + 1,60 \text{ m}$

Tulvakartta
 $Q=1100 \text{ m}^3/\text{s}$, vedenkorkeus Kivinissä $N2000 + 1,60 \text{ m}$
 Ruopatut uomat



Veden syvyys [m]

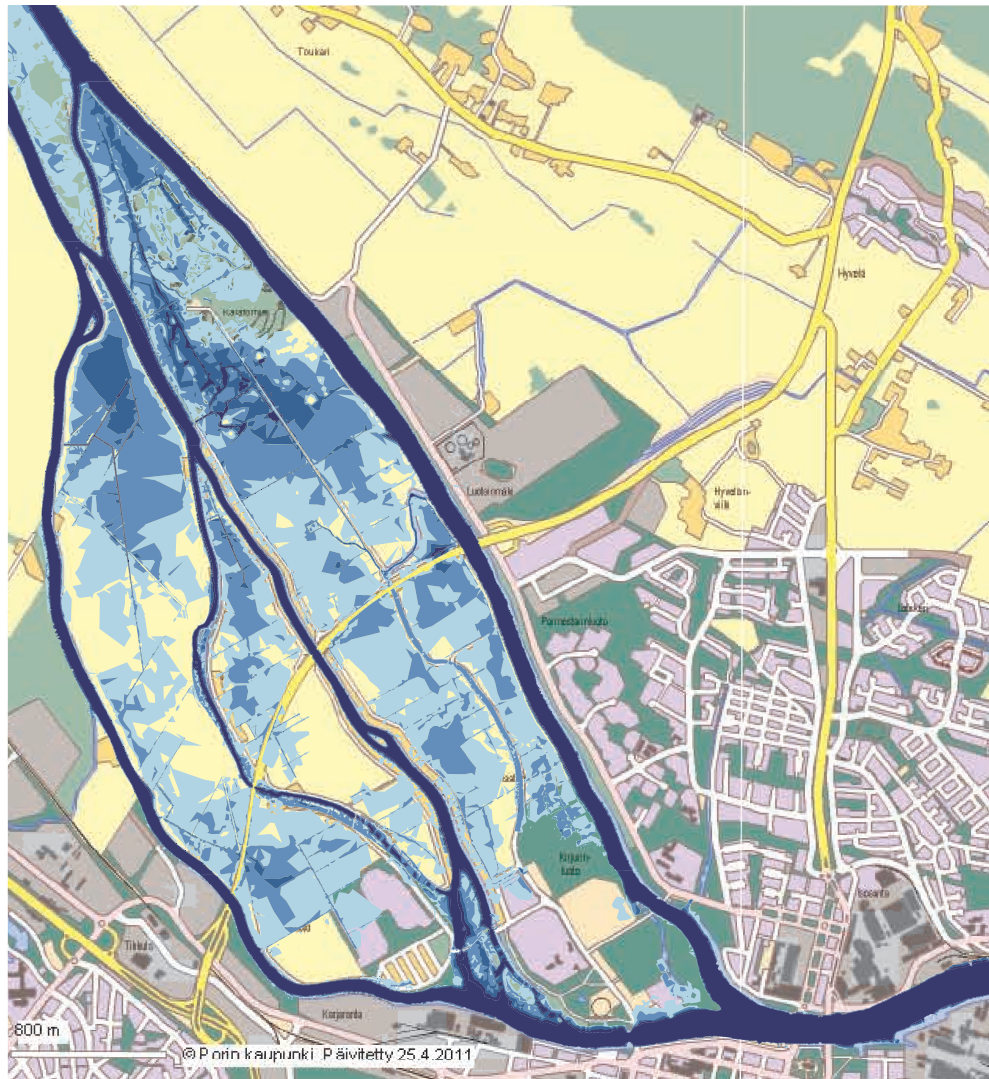
	0 - 0,5
	0,5 - 1,0
	1,0 - 1,5
	> 1,5

0 0,5 1 km



Kuva 30: Luotojen alueen muutetun tulevaisuuden tilanteen mukainen tulvakartta virtaamalla $Q=1100 \text{ m}^3/\text{s}$ vedenkorkeuden W ollessa Kivinissä tasossa $N2000 + 1,60 \text{ m}$.

Tulvakartta
 $Q=1100 \text{ m}^3/\text{s}$, vedenkorkeus Kivinissä $N2000 + 0,77 \text{ m}$



Veden syvyys [m]

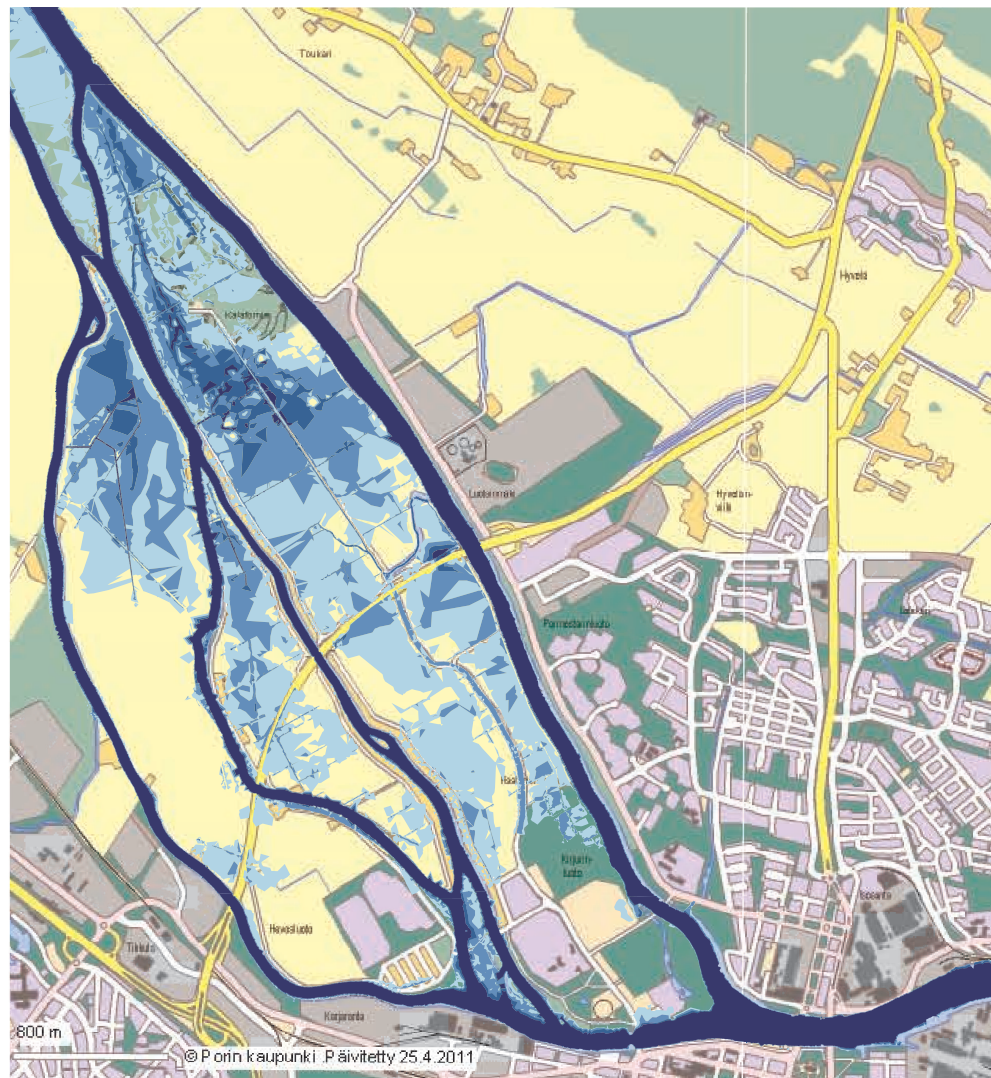
	0 - 0,5
	0,5 - 1,0
	1,0 - 1,5
	> 1,5

0 0,5 1 km

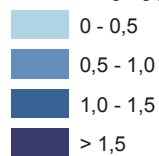


Kuva 31: Luotojen alueen nykytilanteen mukainen tulvakartta virtaamalla $Q=1100 \text{ m}^3/\text{s}$ vedenkorkeuden W ollessa Kivinissä tasossa $N2000 + 0,77 \text{ m}$.

Tulvakartta
 $Q=1100 \text{ m}^3/\text{s}$, vedenkorkeus Kivinissä $N2000 + 0,77 \text{ m}$
Ruopatut uomat



Veden syvyys [m]

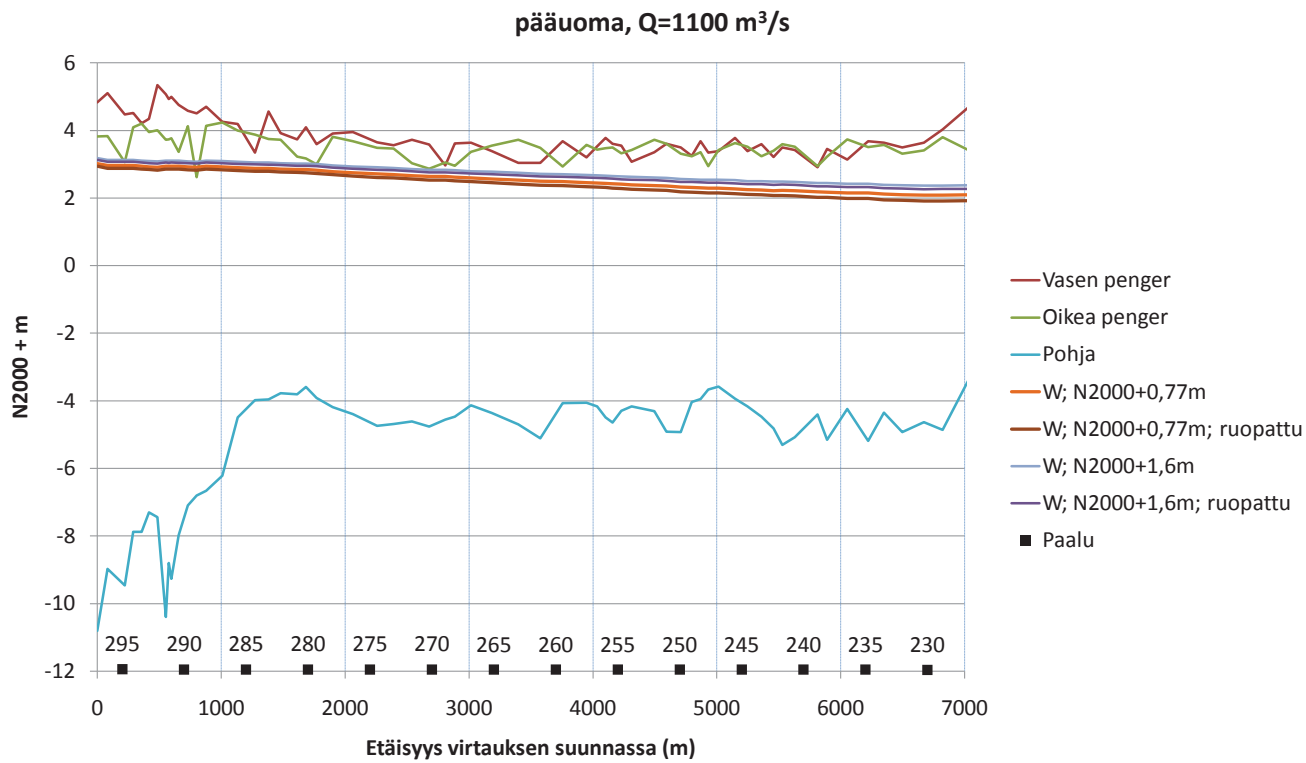


Kuva 32: Luotojen alueen muutetun tulevaisuuden tilanteen mukainen tulvakartta virtaamalla $Q=1100 \text{ m}^3/\text{s}$ vedenkorkeuden W ollessa Kivinissä tasossa $N2000 + 0,77 \text{ m}$.

Pääuoma

Kuvassa 33 on esitetty pääuoman pituusprofiilikuva virtaaman ollessa $1100 \text{ m}^3/\text{s}$. Kivinin vedenkorkeuden ollessa tasolla N2000 +1,60 m nykytilanteen mukaisessa uomaverkostossa vedenkorkeus pääuoman yläpäässä on N2000 +3,18 m ja pääuoman alaosalla N2000 +2,37 m. Muutetun tilanteen eli Lanajuovan ruoppauksen mukaisessa uomaverkostossa vastaavat arvot ovat pääuoman yläpäässä N2000 +3,13 m ja uoman alaosalla N2000 +2,27 m. Ruoppauksen vaikutuksesta vedenkorkeus laskee uomassa 0,05–0,10 m kyseisessä virtaustilanteessa. Kuvasta huomataan, että ruoppauksella ei ole merkittävää vaikutusta pääuoman vedenkorkeuksiin. Joki tulvii Sunniemeen Harjunpäänjoen kautta sekä nykyisen että muutetun tilanteen mukaisessa uomaverkostossa.

Kun Kivinin vedenkorkeus on tasolla N2000 +0,77 m, vedenkorkeus pääuoman yläpäässä on N2000 +3,02 m ja alaosalla N2000 +2,08 m nykytilanteen mukaisessa uomaverkostossa. Nykytilanteen mukaisessa uomaverkostossa joki tulvii hyvin vähäisesti Sunniemeen Harjunpäänjoen kautta. Muutetun tilanteen mukaisessa uomaverkostossa vedenkorkeuden arvot ovat pääuoman yläpäässä N2000 +2,94 m ja uoman alaosalla N2000 +1,92 m. Ruoppauksen vaikutuksesta vedenkorkeus laskee uomassa 0,08–0,16 m kyseisessä virtaustilanteessa eikä joki tulvi mantereelle.



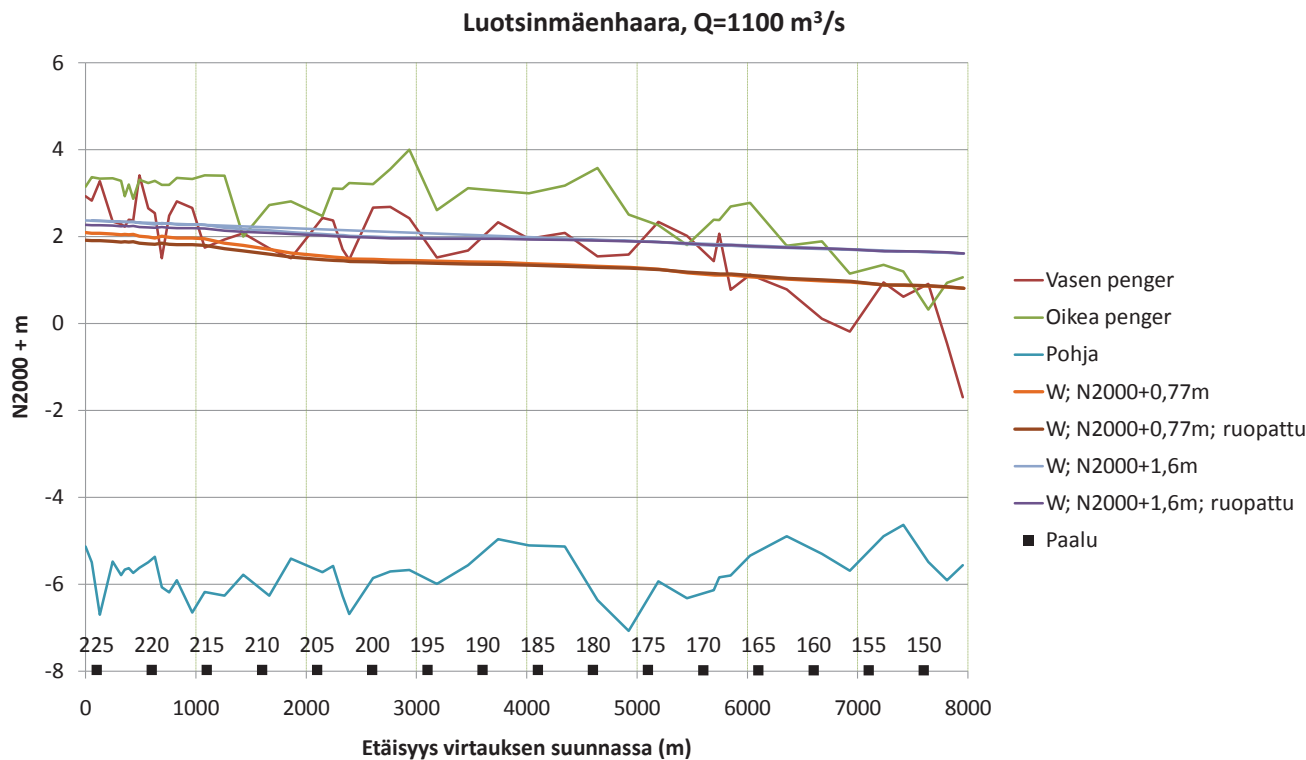
Kuva 33: Pituusleikkaus pääuomasta virtaamalla $Q=1100 \text{ m}^3/\text{s}$. Tulokset on esitetty kahdella erilaisella vedenpinnan korkeuden W reunaehdolla Kivinissä: $N2000 + 0,77 \text{ m}$ ja $N2000 + 1,6 \text{ m}$. Penkereiden oikea ja vasen puoli on määritetty veden virtaussuuntaan katsoen.

Luotsinmäenhaara

Kuvassa 34 on esitetty Luotsinmäenhaaran pituusprofiilikuva virtaaman ollessa 1100 m³/s. Kivinin vedenkorkeuden ollessa tasolla N2000 +1,60 m nykytilanteen mukaisessa uomaverkostossa vedenkorkeus Luotsinmäenhaaran yläpäässä on N2000 +2,38 m ja uoman alaosalla N2000 +1,62 m. Muutetun tilanteen eli Lanajuovan ruoppauksen mukaisessa uomaverkostossa vastaavat arvot ovat Luotsinmäenhaaran yläpäässä N2000 +2,27 m ja uoman alaosalla N2000 +1,62 m. Ruoppauksen vaikutuksesta vedenkorkeus laskee uomassa 0–0,11 m. Kuvasta huomataan, että ruoppauksella ei ole merkittävää vaikutusta uoman vedenkorkeuteen kyseisessä virtaustilanteessa.

Kivinin vedenkorkeuden ollessa tasolla N2000 +0,77 m nykytilanteen mukaisessa uomaverkostossa vedenkorkeus Luotsinmäenhaaran yläpäässä on N2000 +2,09 m ja uoman alaosalla N2000 +0,81 m. Muutetun tilanteen eli Lanajuovan ruoppauksen mukaisessa uomaverkostossa vastaavat arvot ovat Luotsinmäenhaaran yläpäässä N2000 +1,92 m ja uoman alaosalla N2000 +0,81 m. Ruoppauksen vaikutuksesta vedenkorkeus laskee uomassa 0–0,17 m. Kuvasta huomataan, että ruoppauksella ei ole merkittävää vaikutusta uoman vedenkorkeuteen kyseisessä virtaustilanteessa.

Luotsinmäenhaarassa joki ei tulvi mantereelle oikean penkereen yli tutkituissa virtaustilanteissa.



Kuva 34: Pituusleikkaus Luotsinmäenhaaran uoman pohjasta ja vedenpinnan korkeuksista virtaamalla $Q=1100 \text{ m}^3/\text{s}$. Tulokset on esitetty kahdella erilaisella vedenpinnan korkeuden W reunaehdolla Kivinissä: N2000 +0,77 m ja N2000 +1,6 m. Penkereiden oikea ja vasen puoli on määritetty veden virtaussuuntaan katsoen.

Raumanjuopa

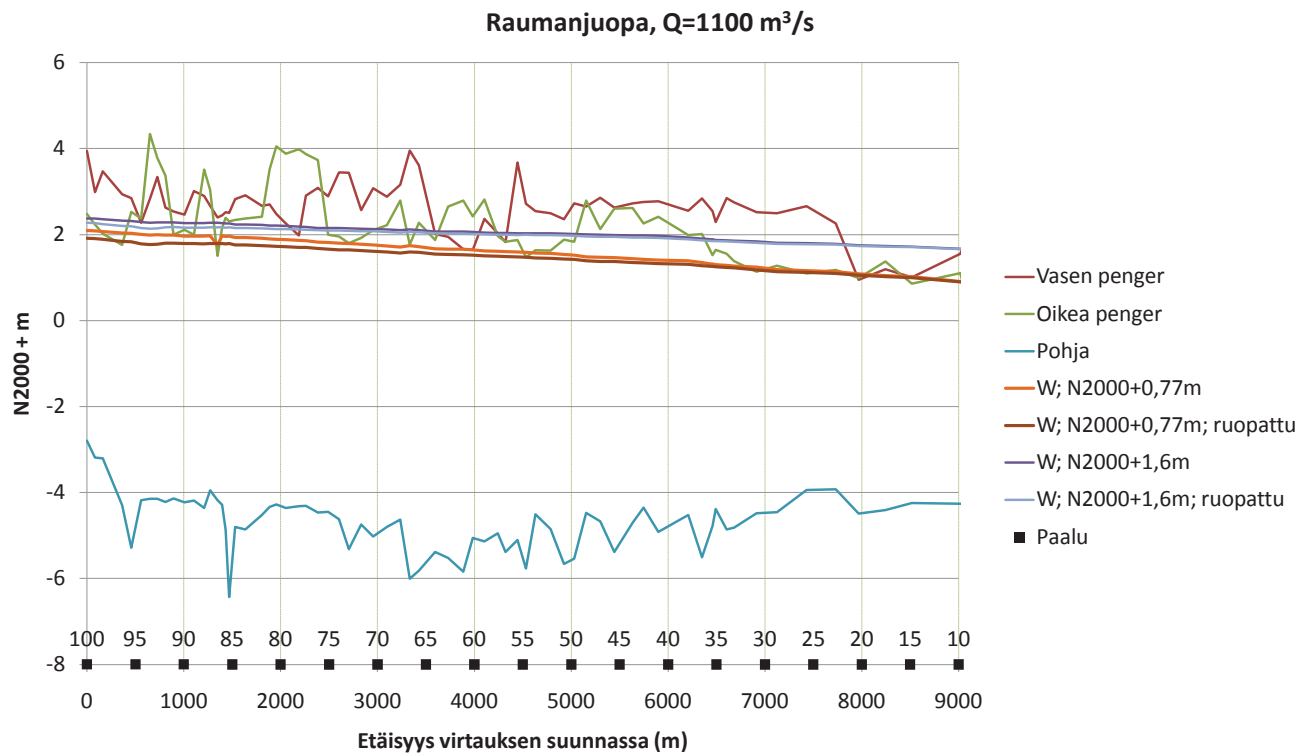
Kuvassa 35 on esitetty Raumanjuovan pituusprofilikuva kokonaisvirtaaman ollessa $1100 \text{ m}^3/\text{s}$. Kivinin vedenkorkeuden ollessa N2000 +1,60 m nykytilanteen mukaisessa uomaverkostossa vedenkorkeus Raumanjuovan yläpäässä on N2000 +2,38 m ja uoman alaosalla N2000 +1,62 m. Muutetun tilanteen eli Lanajuovan ruoppauksen mukaisessa uomaverkostossa vastaavat arvot ovat Raumanjuovan yläpäässä N2000 +2,27 m ja uoman alaosalla N2000 +1,62 m.

Kivinin vedenkorkeuden ollessa N2000 +1,60 m nykytilanteen mukaisessa uomaverkostossa vesi tulvii hieman vasemman penkereen yli mantereelle paalulukemien 94 ja 78 kohdilta, mutta tulva ei leviä laajalle. Paalulukemien 60–65 välillä vesi tulvii Suntinojaa ja maastoa pitkin radalle asti mutta ei leviä tästä luoteeseen. Tulva nousee kuitenkin maanpintaa pitkin itään Länsitielle eli Valtatie 8:lle asti. Vesi ei nouse väylille, mutta saattaa aiheuttaa häiriöitä muun muassa rataliikenteelle, koska vesi on ratapengertä vasten ja vaarantaa radan vakavuuden. Ruoppauksen vaikutuksesta vedenkorkeus laskee uomassa 0–0,11 m eikä merkittävästi vaikuta tulvimiseen verrattuna nykytilanteeseen.

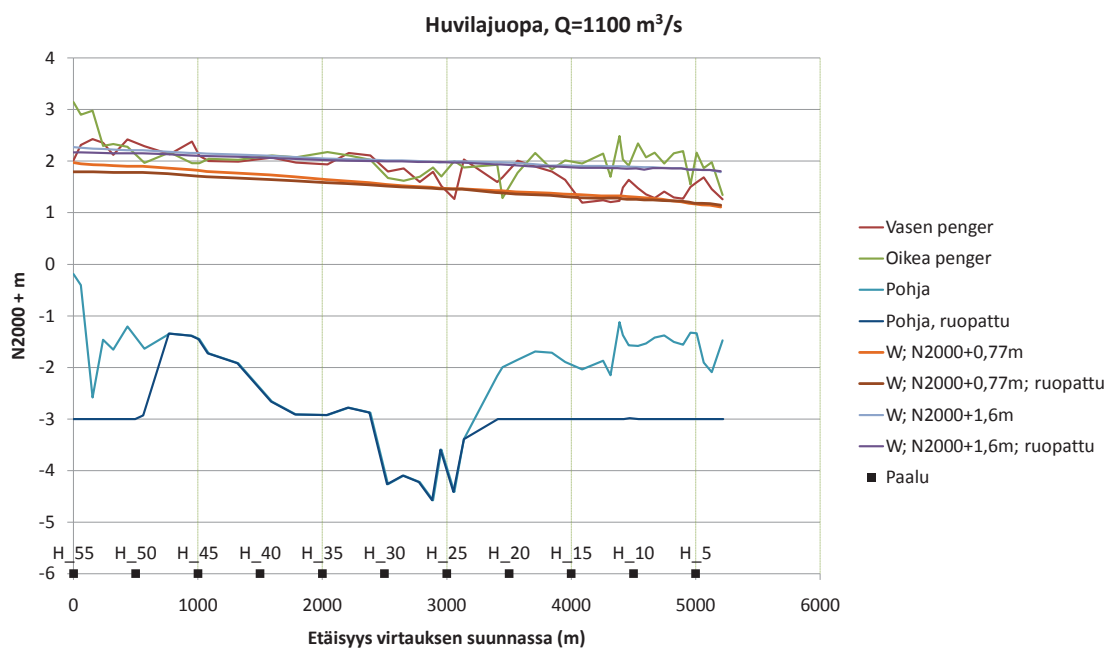
Kivinin vedenkorkeuden ollessa N2000 +0,77 m nykytilanteen mukaisessa uomaverkostossa vedenkorkeus Raumanjuovan yläpäässä on N2000 +2,09 m ja uoman alaosalla N2000 +0,81 m. Muutetun tilanteen eli Lanajuovan ruoppauksen mukaisessa uomaverkostossa vastaavat arvot ovat Raumanjuovan yläpäässä N2000 +1,92 m ja uoman alaosalla N2000 +0,81 m. Joki tulvii Suntinojan kautta radalle asti mutta ei Valtatie 8:lle saakka. Ruoppauksen vaikutuksesta vedenkorkeus laskee uomassa 0–0,17 m eikä merkittävästi vaikuta tulvimiseen verrattuna nykytilanteeseen.

Huvilajuopa ja Lanajuopa

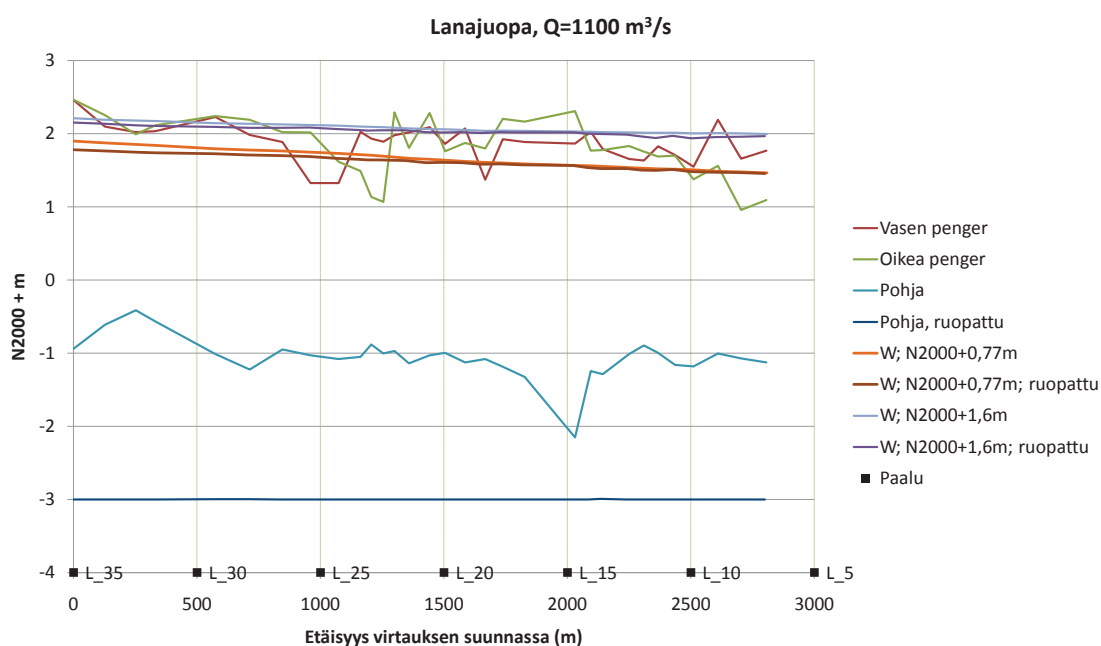
Kuvissa 36 ja 37 on esitetty Huvilajuovan ja Lanajuovan pituusprofilikuvat virtaaman ollessa $1100 \text{ m}^3/\text{s}$. Vedenkorkeuden ollessa Kivinissä N2000 +1,60 m muutetun tilanteen mukainen Lanajuovan ruoppaus alentaa vedenpinnan korkeutta Huvilajuovassa 0–0,10 m ja vastaavasti Lanajuovassa 0,03–0,06 m. Vedenkorkeuden ollessa Kivinissä N2000 +0,77 m ruoppaus alentaa vedenpinnan korkeutta Huvilajuovassa 0–0,17 m ja Lanajuovassa 0–0,12 m. Veden tulviminen luotojen alueelle käy ilmi luotojen alueen tulvakartoista kuvista 29–32.



Kuva 35: Pituusleikkaus Raumanjuovasta virtaamalla $Q=1100 \text{ m}^3/\text{s}$. Tulokset on esitetty kahdella erilaisella vedenpinnan korkeuden W reunaehdolla Kivinissä: N2000 +0,77 m ja N2000 +1,6 m. Penkereiden oikea ja vasen puoli on määritetty veden virtaussuuntaan katsoen.



Kuva 36: Pituusleikkaus Huvilajuovasta virtaamalla $Q=1100 \text{ m}^3/\text{s}$. Tulokset on esitetty kahdella erilaisella vedenpinnan korkeuden W reunaehdolla Kivinissä: $N2000 +0,77 \text{ m}$ ja $N2000 +1,6 \text{ m}$. Penkereiden oikea ja vasen puoli on määritetty veden virtaussuuntaan katsoen.



Kuva 37: Pituusleikkaus Lanajuovasta virtaamalla $Q=1100 \text{ m}^3/\text{s}$. Tulokset on esitetty kahdella erilaisella vedenpinnan korkeuden W reunaehdolla Kivinissä: $N2000 +0,77 \text{ m}$ ja $N2000 +1,6 \text{ m}$. Penkereiden oikea ja vasen puoli on määritetty veden virtaussuuntaan katsoen.

6 Tulosten tarkastelu

Hydraulinen malli koostuu useista yksittäisistä toisiinsa vaikuttavista parametreista. Tässä työssä yksiulotteisessa virtausmallissa uomaverkoston kuvaamiseen on käytetty 260 poikkileikkausta, joille on kullekin määritelty karkeuskerroin riippuen sijainnista uomaverkostossa ja kyseisen kohdan uomageometriasta. Mallin kalibroinnissa eri parametreja joudutaan useasti muuttamaan, jotta mallin tulokset ovat mahdollisimman hyvin sopusoinnussa havaitun datan kanssa. Mallin muodostamisessa ja parametrissa systemaattisia virhelähteitä ovat esimerkiksi karkeuskertoimen arvioiminen epätarkasti tietyllä uomaosuudella tai poikkileikkausten määrittely niin, etteivät ne edusta tarkoituksenmukaisesti mallinnettua uoman kohtaa.

Jokien virtausmallinnuksen tarkoituksena on monesti pyrkiä arvioimaan joen käyttäytymistä harvoin, esimerkiksi kerran sadassa vuodessa toistuvilla suurilla virtaamilla. Eräs mallinnuksen ongelmista on kuitenkin se, että kaikkia virtaukseen vaikuttavia hydraulisia ominaisuuksia suurella virtaamalla ei tarkkaan tunneta. Tällainen on esimerkiksi virtauksen karkeuskerroin. Uomaverkoston karkeuskertoimet voidaan määrittää tarkasteltavalle tilanteelle, jos virtaama ja vedenpinnan korkeudet tunnetaan tietyissä kohdissa mallinnettavaa uomaverkostoa. Suuremmalla virtaamalla ja vedenpinnan korkeuden noustessa kyseinen karkeuskerroin voi kuitenkin muuttua esimerkiksi uoman sivuilla oleva kasvillisuuden tai uomageometriian takia (*Horritt ja Bates, 2002; Helmiö, 2004*).

Yksiulotteisen hydraulisen mallinnuksen keskeinen ja ehkä vaativin tehtävä on uomajaksojen karkeuskertoimen määrittäminen. Mallinnetut uomajakset eroavat merkittävästi toisistaan muun muassa kokonsa ja uomageometriansa suhteen. Oikeiden karkeuskertoimien määrittäminen uomaverkostolle tapahtuu osittain yrityksen ja erehdyksen kautta, koska verkoston osan ominaisuuksien muuttaminen vaikuttaa verkoston muiden osien toimintaan. Kokemäenjoen alajuoksulle muodostettu virtausmalli kalibroidiin ja validoitiin keväällä 2010 uomaverkoston viidestä eri kohdasta tehtyihin vedenkorkeushavaintoihin tunnetuissa virtaamatilanteissa. Kalibrointi- ja validointituloksista havaitaan, että validointitulosten vedenkorkeuden arvot ovat havaittuja arvoja suuremmat. Kalibrointivirtaaman karkeuskertoimen arvoon saattaa vaikuttaa esimerkiksi uoman sivuilla kasvava pensaikko joka lisää veden virtausvastusta. Tällöin kalibrointivirtaamaa pienemmällä virtaamalla todellinen karkeuskerroin saattaa olla kalibroinnissa määritettyä kerrointa pienempi. Kalibrointivirtaamaa suuremmilla virtaamilla eron todellisiin arvoihin voi olettaa olevan toiseen suuntaan, jolloin lasketut vedenkorkeudet ovat mahdollisesti jonkin verran todellisia pienemmät. Verrattaessa mallin toimintaa aiemmin tehtyihin kalibrointiä suurempien virtaamien havaintoihin (*Koskinen, 2006*) havaittiin validointitulosten poikkeavan havaituista arvoista keskimäärin 6 cm. Koska validointitulosten keskimääräinen poikkeama havaituista arvoista oli samalla tasolla kalibrointitulosten kanssa, mallin voitiin päätellä toimivan samalla tavoin kalibrointi- ja validointitulanteissa.

Kaksiulotteisessa mallinnuksessa tuloksiin vaikuttavat merkittävimmin käytetty karkeuskerroin, topografiaa kuvaavan maastomallin tarkkuus ja paikkansapitävyys sekä maastomallista muodostetun kaksiulotteisessa mallinnuksessa käytettävän kol-

mioverkon ominaisuudet. Eri maastotyypeille on saatavilla karkeuskertoimia alan kirjallisuudesta (esim. *Chow*, 1959). Alkuperäinen käytettävissä ollut maastomalli oli datamäärältään erittäin suuri ja koostui noin 1 870 000 pisteestä. Laskennassa käytettiin maastomallia, jossa puolet alkuperäisen mallin pisteistä oli poistettu. Tulva-alueiden kaksiulotteisessa virtausmallinnuksessa käytettävissä olleiden laskentaelementtien lukumäärän ja laskennan konvergenssin kannalta parhaiten toimivaksi huomattiin kolmioverkko, jossa kolmioiden pinta-alat olivat välillä $300 \text{ m}^2 - 2000 \text{ m}^2$. Kolmioverkon ominaisuuksilla on merkittävä vaikutus mallinnustuloksiin (*Horritt et al.*, 2006), ja tiheämmän kolmioverkon käyttö saattaisi pienentää mallinnettujen tulva-alueiden laajuutta (*Hardy et al.*, 1999). Kolmioverkon muodostamisessa ei eroteltu tulva-alueiden eri maaperä- ja kasvillisuusalueita, koska alue on pääosin peltoa ja Kirjurinluodon alueella nurmikkoa. Kaikilla kaksiulotteisesti mallinnetuilla tulva-alueilla on siten käytetty yksittäistä Manningin karkeuskertoimen arvoa $n = 0,04$, joka edustanee hyvin valtaosaa mallinnetusta alueesta. Verrattaessa tuloksia Porin tulvat -hankkeessa tehtyihin tulvakarttoihin, huomataan tulokset vastaavissa tilanteissa hyvin samansuuntaisiksi, joskin tässä lasketut tulvien laajuudet ovat hieman pienemmät. Kaksiulotteista virtausmallia ei voitu kalibroida, koska uomien ulkopuolelta ei ollut saatavilla tulvatilanteen vedenkorkeushavaintoja.

Tässä työssä käytetty ohjelmisto ei suoraan sisällä jääpatojen mallinnusta. Jääpato kuvattiin virtausmallissa uomaan syntyneenä kapeikkona. Tehdyllä jääpatomallilla voidaan kuvata tietyn tyyppisen jääpadon vaikutuksia uomien vedenkorkeuksiin. Tehdyssä mallissa jääpadon kannen on oletettu olevan niin paksu ja yhtenäinen, ettei vesi tällä matkalla siirry uomasta tulva-alueelle. *Huokuna ja Aaltonen* (2009) ovat tutkineet jääpatojen vaikutuksia Kokemäenjoen alaosan vedenkorkeuksiin tilanteissa, joissa jääpadon muodostumispaikka on Kirjurinluodon kärjen kohdalta ylävirtaan. Tässä tutkimuksessa jääpatojen muodostumispaikaksi valittiin Luotsinmäenhaara ja Raumanjuopa Kirjurinluodon alapuolella. Aiempaan tehtyyn tutkimukseen (*Huokuna ja Aaltonen*, 2009) verrattuna vastaavilla jäämäärillä vedenkorkeudet pääuomassa jäävät alemmiksi, koska osa vedestä pääsee virtaamaan Huvilajuovan ja Lanajuovan kautta. Jääpatomallia ei voitu kalibroida, koska vedenkorkeuden mittauksia ei ollut saatavilla jääpatojen aiheuttamassa tulvatilanteessa.

7 Johtopäätökset

Tässä työssä rakennettiin Kokemäenjoen alaosalle numeerinen virtausmalli, jolla tutkittiin vedenkorkeuksia jokiuomissa sekä tulvan peittävyyttä erilaisissa virtaustilanteissa. Tutkittavat tilanteet olivat sulan vuodenajan suuren virtaaman aiheuttama tulva sekä jääpadon aiheuttamat tulvatilanteet, joissa jääpato kehittyi joko Luotsinmäenhaaraan tai Luotsinmäenhaaraan ja Raumanjuopaan. Työn tavoitteena oli yllämainittujen hydraulisten laskelmien lisäksi selvittää InfoWorks RS -ohjelmiston soveltuvuus kyseiseen tehtävään. Käytetty ohjelmisto soveltuu hyvin työssä tutkitun jokiverkoston yleispiirteiseen mallintamiseen. Ohjelmisto tarjoaa mahdollisuuden mallintaa muun muassa avouomavirtausta, tulva-alueita ja erilaisia vesirakenteita. Työssä tehdyllä virtausmallilla tutkittiin tulvatilanteita nykyisen mukaisessa uomaverkossa sekä tilanteessa, jossa uomaverkosta on muutettu Lanajuopaa ja Huvilajuopaa ruoppaamalla. Työssä mallinnettu uomaverkosto sekä tulvimisen kannalta merkittävimmät alueet on esitetty kuvassa 38.



Kuva 38: Mallinnettu uomaverkosto sekä tulvimisen kannalta merkittävimmät alueet.

Vakavimmat tulvatilanteet Porin kannalta ovat joen suuri virtaama meriveden ollessa korkealla sekä jääpatojen aiheuttamat tulvat. Porissa meren ylivedenkorkeus (HW) on suurin piirtein N2000 +1,60 m. Nykytilanteen mukaisessa uomaverkostossa virtaaman ollessa 1100 m³/s ja meriveden pinnan ollessa ylivedenkorkeudella vesi tulvii Raumanjuovan ja Luotsinmäenhaaran rajaamalle luotojen alueelle peittäen alueen lähes kokonaan. Lisäksi joki tulvii Harjunpäänjoen kautta Sunniemeen sekä Suntinojaa pitkin radalle ja Valtatie 8:lle asti. Lanajuovan ruoppaus ei merkittävästi vaikuta tulvimiseen. Ainoa ratkaiseva keino tulvan leviämisen estämiseen tilanteessa, jossa joessa on suuri virtaama ja merivesi on ylhäällä, on riittävän korkeat tulvapadot. Jos meriveden pinta nousee ylivedenkorkeuteen, on tilanne kuitenkin todennäköisesti kestoltaan lyhytaikainen. Tällöin tulvatilanteen kehitykseen voitaisiin mahdollisesti vaikuttaa vesistön säännöstelyn keinoin.

Ruoppauksesta on kuitenkin hyötyä suurella virtaamalla, jos merivedenkorkeus pysyy tavanomaisissa lukemissa. Virtaaman ollessa 1100 m³/s ja vedenpinnan Kiviniellä alimmalla mitatulla vuotuisella ylivedenkorkeudella (NHW) noin N2000 +0,77 m tulva peittää luotojen alueesta keskimäärin 60 %. Lanajuovan ruoppaus pienentää luotojen alueelle syntyvän tulvan laajuutta. Erityisesti Luotsinmäenhaaran ja Lanajuovan väliselle alueelle syntyvän tulvan peittävyys pienenee noin puoleen. Jos Lanajuopa ruopataan, joki ei tulvi Sunniemeen. Muuten Lanajuovan ruoppaus ei vaikuta tulvimiseen luotojen alueen ulkopuolelle merkittävästi. Nykytilanteen mukaisessa uomaverkostossa joki tulvii hyvin vähäisesti Sunniemeen ja Suntinojan kautta radalle asti mutta ei Valtatie 8:lle saakka.

Jääpatojen aiheuttamat tulvatilanteet ovat toistuneet Porissa usein ja ovat aiheuttamansa tulvimisen huomioon ottaen lähes yhtä merkittävä haitta kuin joen suuri virtaama ja korkea merivedenkorkeus. Jääpadot saattavat aiheuttaa paikallisesti uomissa erittäin suuria vedenkorkeuksia. Muutetun tulevaisuuden tilanteen mukainen Lanajuovan ruoppaus pienentää uomien vedenkorkeuksia jääpadon vaikutusalueelta ylävirtaan, koska osa vedestä ja jäästä pääsee virtaamaan syntyneiden jääpatojen ohi paremmin. Jääpatojen kehittyessä Luotsinmäenhaaraan ja Raumanjuopaan tulva peittää luotojen alueen noin 90 % laajuudelta. Lanajuovan ruoppauksella on vain marginaalisen pieni vaikutus luotojen alueen tulvan laajuuteen. Luotojen alueen ulkopuolelle vesi tulvii Harjunpäänjoen kautta Sunniemeen sekä hieman Raumanjuovan eteläisen penkereen yli, josta tulva ei kuitenkaan leviä laajalle.

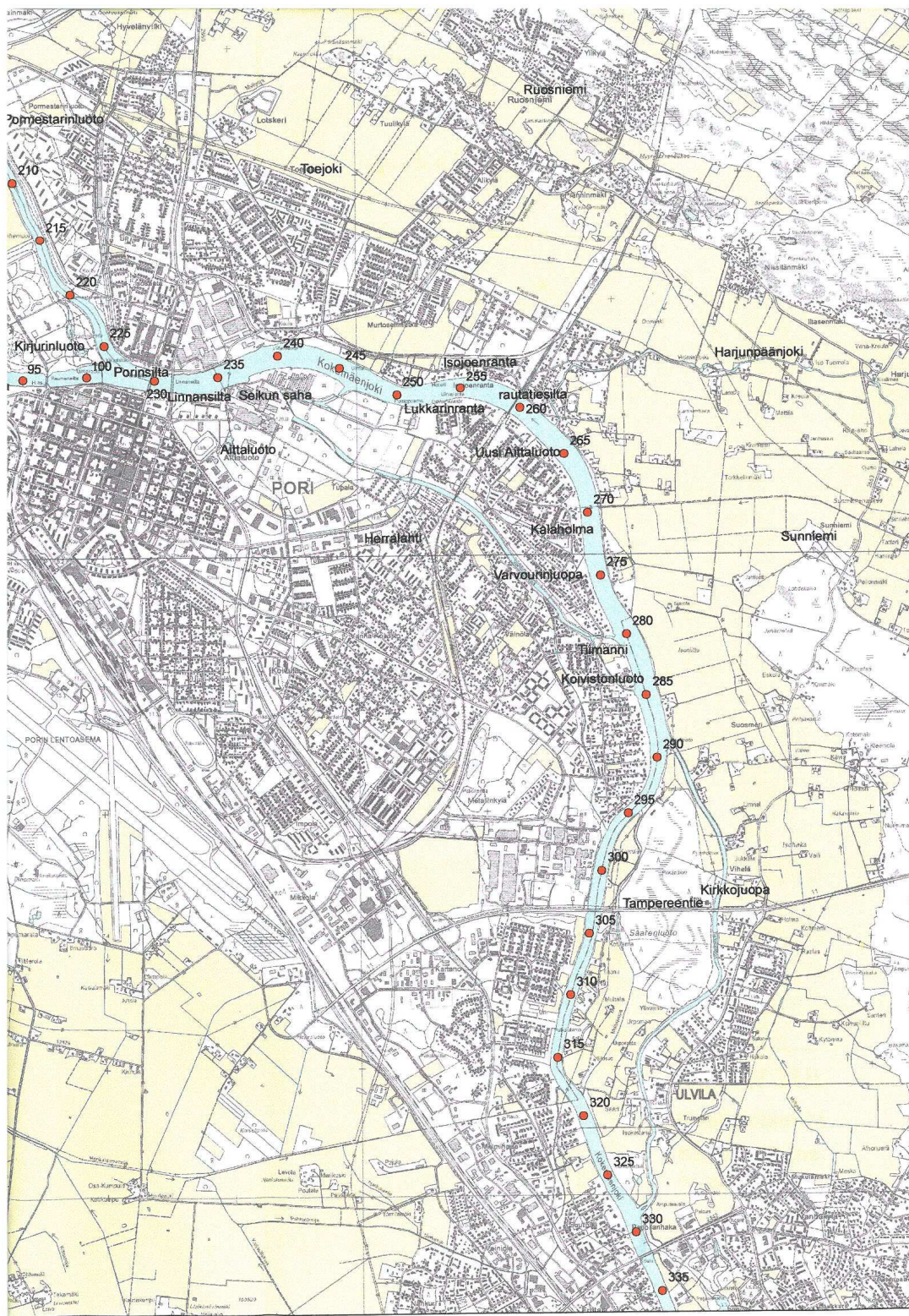
Lähdeluettelo

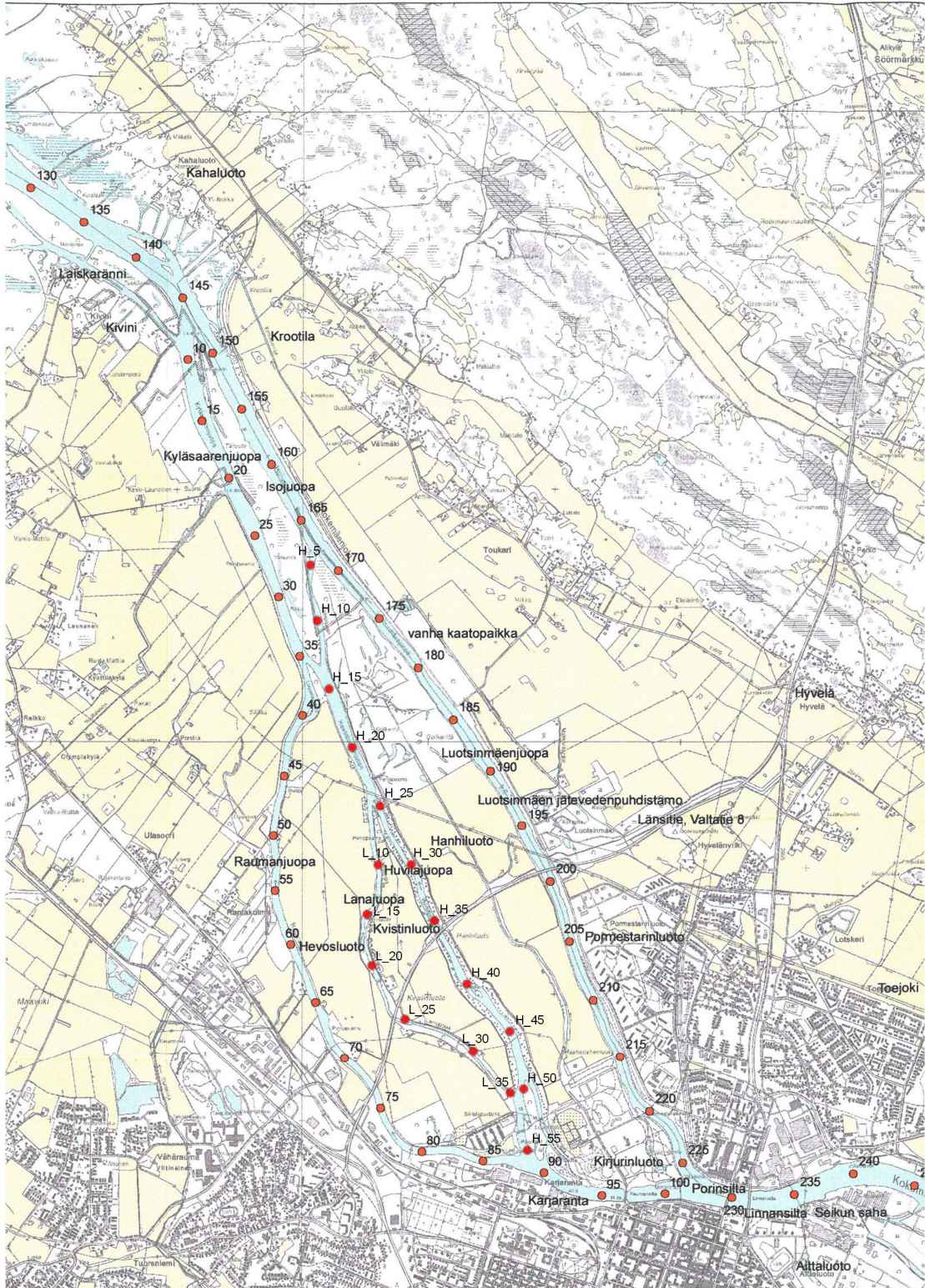
- Abbot, M. ja Basco, R. (1989). *Computational Fluid Mechanics, An Introduction for Engineering*.
- Aggett, G. ja Wilson, J. (2009). *Creating and coupling a high-resolution DTM with a 1-D hydraulic model in a GIS for scenario-based assessment of avulsion hazard in a gravel-bed river*. *Geomorphology*, osa 113(1-2):21–34.
- Alcrudo, F. ja Mulet-Marti, J. (2005). *Urban inundation models based upon the shallow water equations. Numerical and practical issues. Proceedings of finite volumes for complex applications IV. Problems and perspectives. London, UK: Hermes Science, sivut 1–2*.
- Bates, P., Marks, K., ja Horritt, M. (2003). *Optimal use of high-resolution topographic data in flood inundation models*. *Hydrological Processes*, osa 17(3):537–557.
- Beltaos, S. (1993). *Numerical computation of river ice jams*. *Canadian Journal of Civil Engineering*, osa 20:88–88.
- Beltaos, S. (1995). *River ice jams*. Water Resources Publication.
- Beltaos, S. (2001). *Hydraulic roughness of breakup ice jams*. *Journal of Hydraulic Engineering*, osa 127:650.
- Beltaos, S. (2008). *Progress in the study and management of river ice jams*. *Cold Regions Science and Technology*, osa 51(1):2–19.
- Beltaos, S. ja Prowse, T. (2001). *Climate impacts on extreme ice-jam events in Canadian rivers/Impacts climatiques sur les embâcles extrêmes des cours d'eau du Canada*. *Hydrological Sciences Journal*, osa 46(1):157–181.
- Booij, M. (2005). *Impact of climate change on river flooding assessed with different spatial model resolutions*. *Journal of Hydrology*, osa 303(1-4):176–198.
- Brunner, G., of Engineers, U.S.A.C., for Water Resources (US), I., ja (US), H.E.C. (2001). *HEC-RAS River Analysis System: Hydraulic Reference Manual*. US Army Corps of Engineers, Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center.
- Chow, V. (1959). *Open-channel hydraulics*. McGraw-Hill.
- Cowan, W. (1956). *Estimating hydraulic roughness coefficients*. *Agricultural Engineering*, osa 37(7):473–475.
- Dankers, R., Christensen, O., Feyen, L., Kalas, M., ja de Roo, A. (2007). *Evaluation of very high-resolution climate model data for simulating flood hazards in the Upper Danube Basin*. *Journal of Hydrology*, osa 347(3-4):319–331.

- Directive 2007/60/EC Chapter 1 Article 2 (2007). *DIRECTIVE 2007/60/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 23 October 2007 on the assessment and management of flood risks.*
- Farajalla, N. ja Vieux, B. (1995). *Capturing the essential spatial variability in distributed hydrological modelling: infiltration parameters. Hydrological processes*, osa 9(1):55–68.
- Hardy, R., Bates, P., ja Anderson, M. (1999). *The importance of spatial resolution in hydraulic models for floodplain environments. Journal of Hydrology*, osa 216(1-2):124–136.
- Helmiö, T. (2004). *Effects of Cross-Sectional Geometry, Vegetation and Ice on Flow Resistance and Conveyance of Natural Rivers.* väitöskirja.
- Horritt, M. ja Bates, P. (2002). *Evaluation of 1D and 2D numerical models for predicting river flood inundation. Journal of Hydrology*, osa 268(1-4):87–99.
- Horritt, M., Bates, P., ja Mattinson, M. (2006). *Effects of mesh resolution and topographic representation in 2D finite volume models of shallow water fluvial flow. Journal of Hydrology*, osa 329(1-2):306–314.
- Hunter, N., Bates, P., Horritt, M., ja Wilson, M. (2007). *Simple spatially-distributed models for predicting flood inundation: A review. Geomorphology*, osa 90(3-4):208–225.
- Huokuna, M. (2007). *Ice Jams in Pori.* CRIPE - Committee on River Ice Processes and the Environment. 14th Workshop on the Hydraulics of Ice Covered Rivers.
- Huokuna, M. ja Aaltonen, J. (2009). *Selvitys suunnitteluvaihtoehtojen vaikutuksista jää- ja hyydepatojen aiheuttamiin vedenkorkeuksiin Kokemäenjoen alaosalla.*
- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change (2011). <http://www.ipcc.ch/>.
- Koskinen, M., toimittaja (2006). *Porin tulvat-hallittuja riskejä.* Lounais-Suomen ympäristökeskus, vesistösuunnitteluosasto. ISBN 9521122862.
- Koskinen, M., toimittaja (2008). *Eriyissuunnitelma Kokemäen tulviin varautumisesta Porissa.* Lounais-Suomen ympäristökeskus, vesistösuunnitteluosasto. ISBN 978-952-11-3069-4.
- Lane, S. ja Chandler, J. (2003). *Editorial: the generation of high quality topographic data for hydrology and geomorphology: new data sources, new applications and new problems. Earth Surface Processes and Landforms*, osa 28(3):229–230.
- Lang, P. (2010). *Telemac Modelling System: Telemac-2D Software Reference Manual.*

- Lardner, R. ja Song, Y. (1992). *A comparison of spatial grids for numerical modelling of flows in near-coastal seas. International journal for numerical methods in fluids*, osa 14(1):109–124.
- Litrico, X. ja Fromion, V. (2009). *Modeling and control of hydrosystems*. Springer Verlag.
- OIVA - ympäristö- ja paikkatietopalvelu (2011). <http://www.ymparisto.fi/oiva>.
- Ruosteenoja, K. ja Jylhä, K. (2007). *Temperature and precipitation projections for Finland based on climate models employed in the IPCC 4th Assessment Report. Teoksessa Third International Conference on Climate and Water, Helsinki, Finland*, sivut 3–6.
- Shen, H. (2010). *Mathematical modeling of river ice processes. Cold Regions Science and Technology*, osa 62(1):3–13.
- Szymkiewicz, R. (2010). *Numerical Modeling in Open Channel Hydraulics*, osa 83. Springer Verlag.
- Veijalainen, N., Lotsari, E., Alho, P., Vehviläinen, B., ja Käyhkö, J. (2010). *National scale assessment of climate change impacts on flooding in Finland. Journal of Hydrology*, osa 391:333–350.
- Verta, O. ja Triipponen, J. (2011). *THE KOKEMÄENJOKI RIVER BASIN FLOOD RISK MANAGEMENT PLAN—A NATIONAL PILOT FROM FINLAND ACCORDING TO EU FLOODS DIRECTIVE*.
- Vuola, P. (2010). *Porin tulvasuojelupadot, Vahingonvaaraselvitys, päivitys 12.2.2010*.

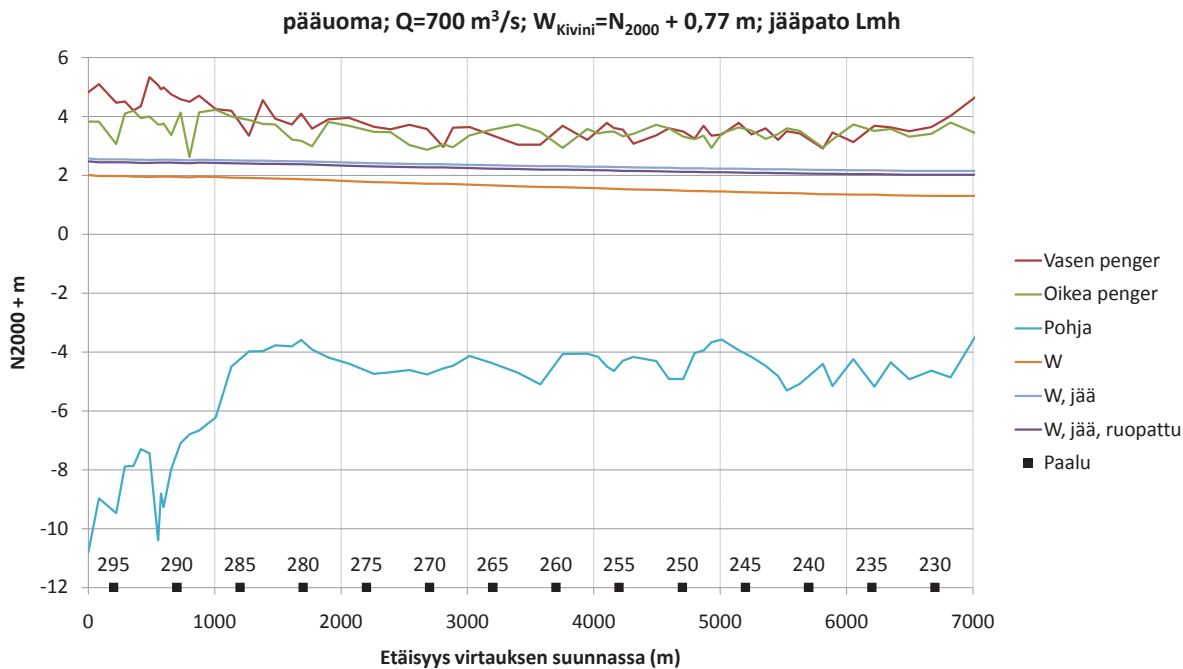
Paalutus





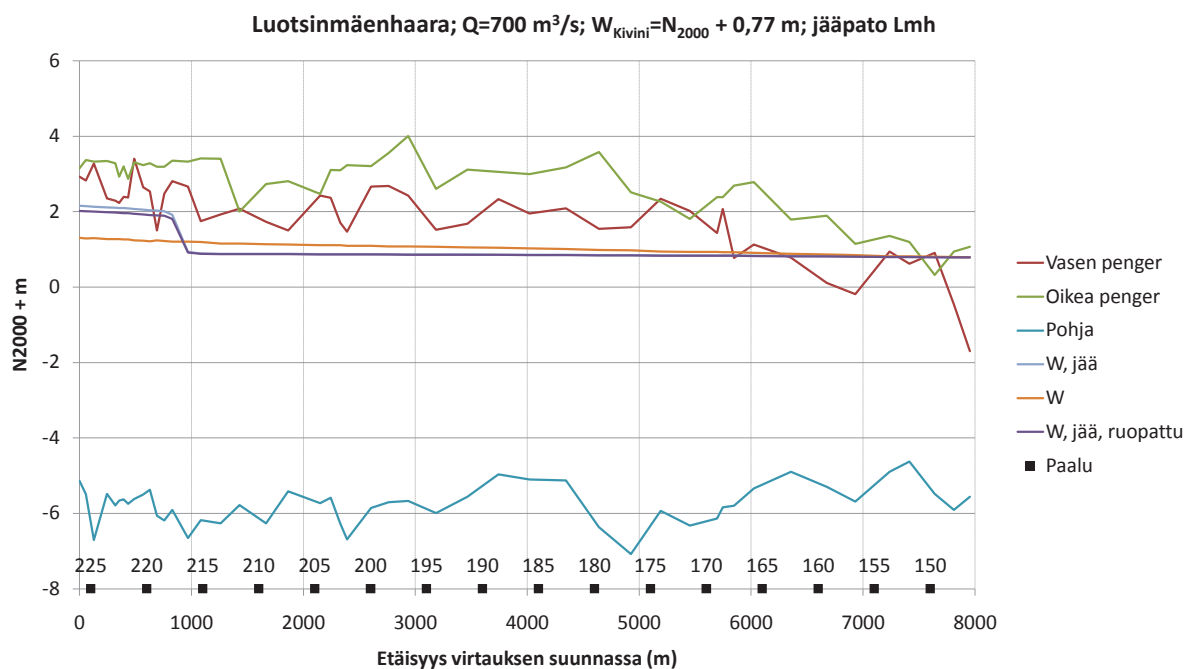
Yksiulotteisen virtauslaskennan tulokset

Jääpato Luotsinmäenhaarassa



Kuva B1: Pituusleikkaus pääuomasta virtaamalla $Q=700 \text{ m}^3/\text{s}$. Virtausmallin alapuolisena reunaehtona on vedenpinnan korkeus W Kiviniissä $N_{2000} + 0,77 \text{ m}$. Penkereiden oikea ja vasen puoli on määritetty veden virtaussuuntaan katsoen.

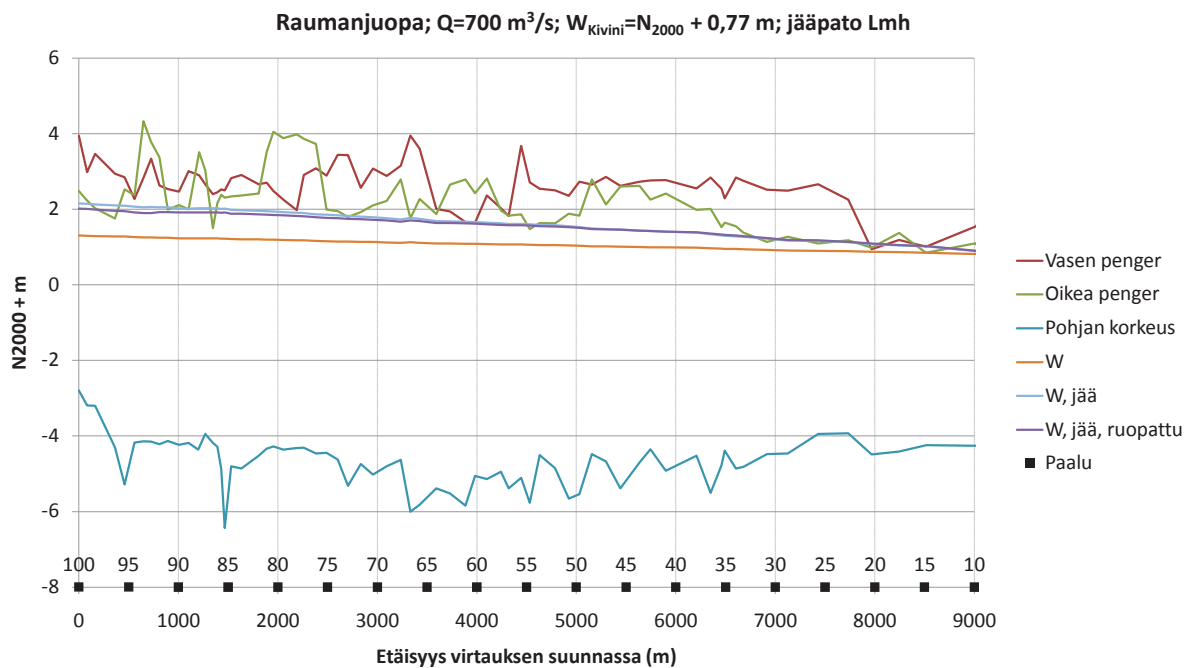
Taulukossa B1 on esitetty laskettuja vedenkorkeuden arvoja valituilla kohdilla uoma-verkosta, kun kokonaisvirtaama Q joessa on $700 \text{ m}^3/\text{s}$ ja vedenkorkeus W Kiviniissä on tasossa $N_{2000} + 0,77 \text{ m}$.



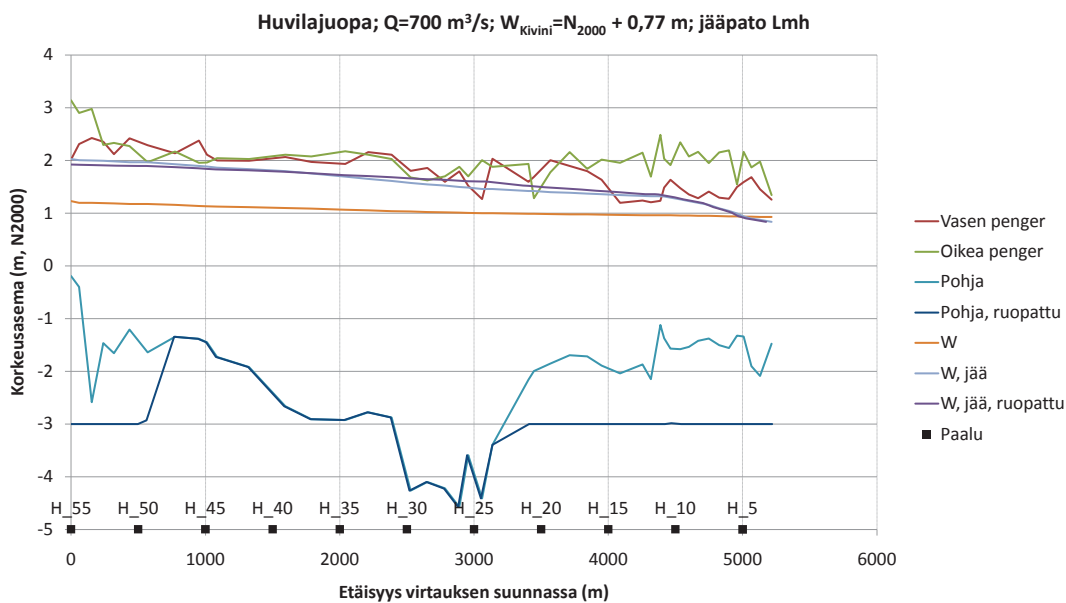
Kuva B2: Pituusleikkaus Luotsinmäenhaarasta virtaamalla $Q=700 \text{ m}^3/\text{s}$. Virtausmallin alapuolisena reunaehtona on vedenpinnan korkeus W Kivinissä $N_{2000} + 0,77 \text{ m}$. Penkereiden oikea ja vasen puoli on määritetty veden virtaussuuntaan katsoen.

Taulukko B1: Tulvalaskentojen vedenkorkeuksia kun jääpato on kehittynyt Luotsinmäenhaaraan, kokonaisvirtaaman Q ollessa $700 \text{ m}^3/\text{s}$ ja vedenkorkeus W Kivinissä tasolla $N_{2000} + 0,77 \text{ m}$.

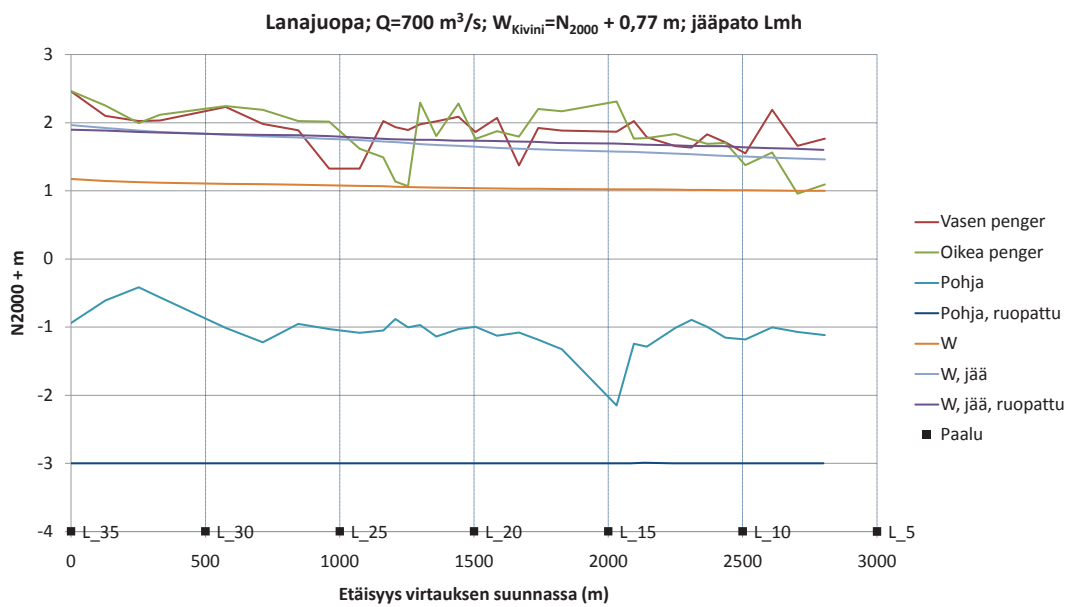
Paalu	Vedenkorkeus nykytila $N_{2000}+$	Vedenkorkeus nykytila, jää $N_{2000}+$	Vedenkorkeus ruopattu, jää $N_{2000}+$
295	1,98	2,55	2,45
230	1,31	2,15	2,02
220	1,24	0,43	0,41
195	1,07	0,87	0,86
160	0,86	0,81	0,81
95	1,27	2,07	1,92
80	1,19	1,93	1,84
55	1,06	1,61	1,57
20	0,88	1,08	1,09
H_35	1,07	1,70	1,72
H_20	0,99	1,40	1,49
L_20	1,04	1,65	1,74



Kuva B3: Pituusleikkaus Raumanjuovasta virtaamalla $Q=700 \text{ m}^3/\text{s}$. Virtausmallin alapuolisena reunaehtona on vedenpinnan korkeus W Kivinessä $N_{2000} + 0,77 \text{ m}$. Penkereiden oikea ja vasen puoli on määritetty veden virtaussuuntaan katsoen.

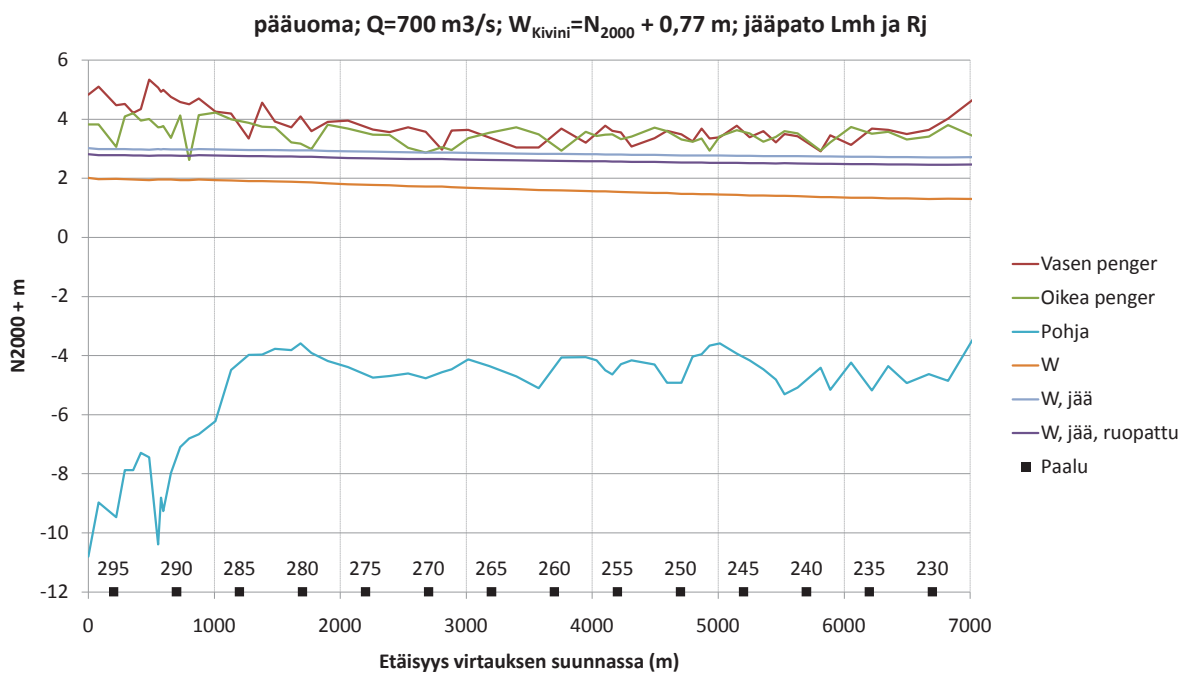


Kuva B4: Pituusleikkaus uoman pohjasta ja vedenpinnan korkeuksista Huvilajuovassa virtaamalla $Q=700 \text{ m}^3/\text{s}$. Virtausmallin alapuolisena reunaehtona on vedenpinnan korkeus W Kivinessä $N_{2000} + 0,77 \text{ m}$. Penkereiden oikea ja vasen puoli on määritetty veden virtaussuuntaan katsoen.

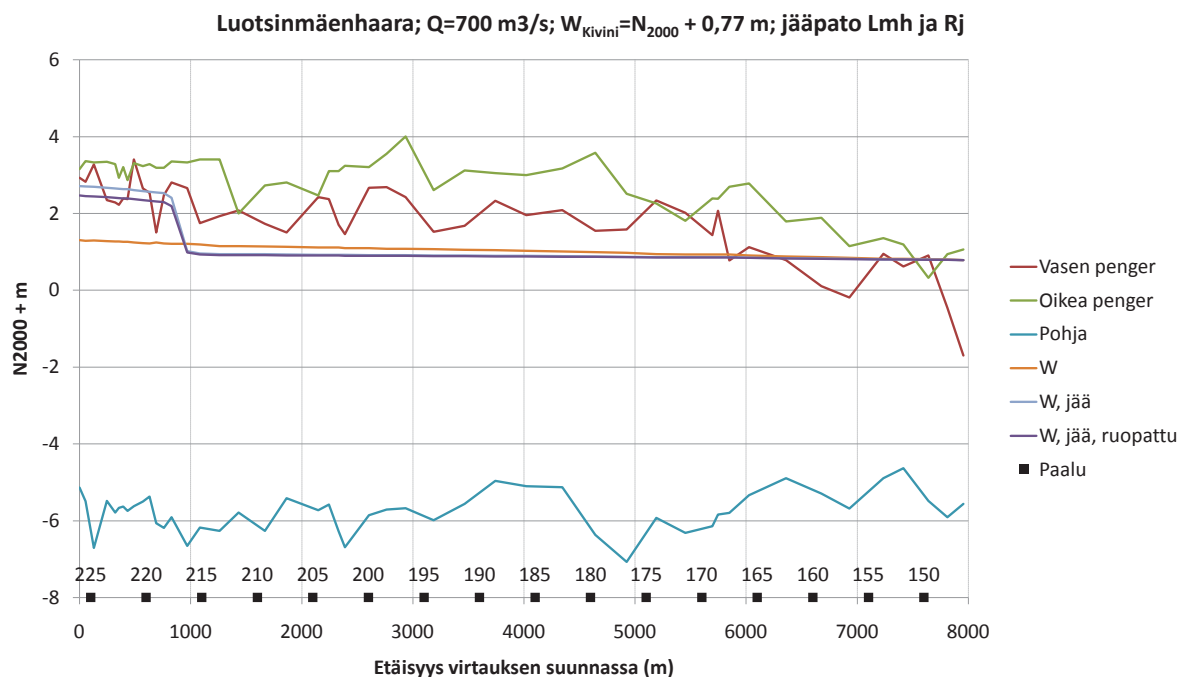


Kuva B5: Pituusleikkaus Lanajuovasta virtaamalla $Q=700 \text{ m}^3/\text{s}$. Virtausmallin alapuolisena reunaehtona on vedenpinnan korkeus W Kiviniissä $N_{2000} + 0,77 \text{ m}$. Penkereiden oikea ja vasen puoli on määritetty veden virtaussuuntaan katsoen.

Jääpato Luotsinmäenhaarassa ja Raumanjuovassa



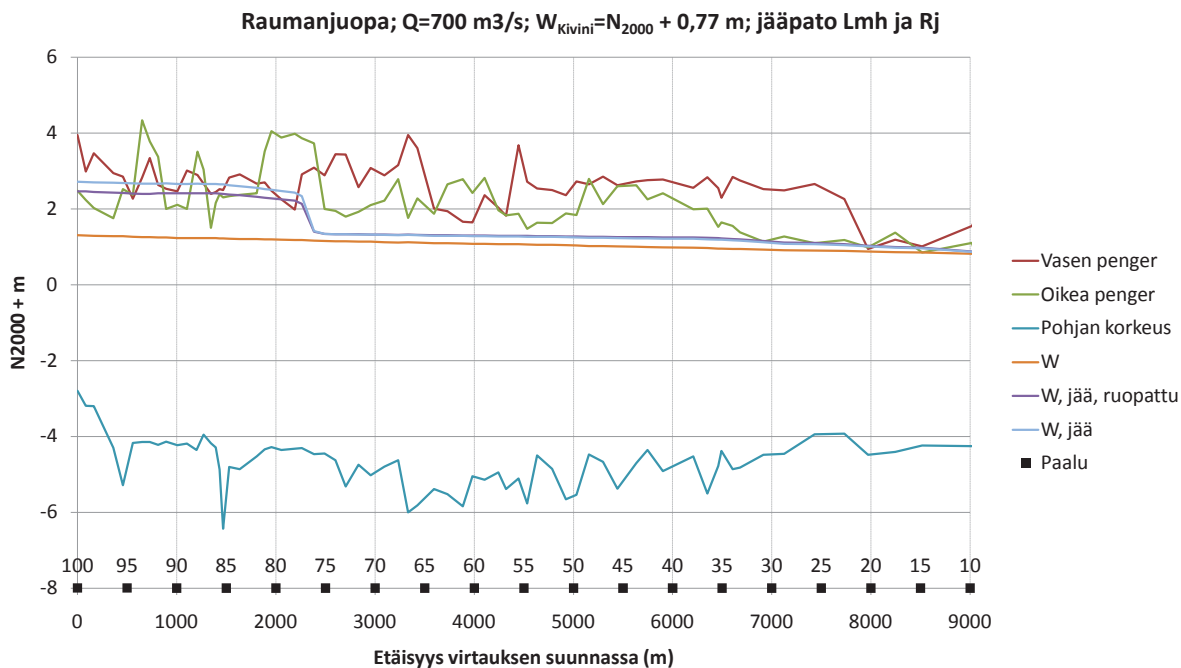
Kuva B6: Pituusleikkaus uoman pohjasta ja vedenpinnan korkeuksista pääuomassa virtaamalla $Q=700 \text{ m}^3/\text{s}$. Jääpato on kehittynyt Luotsinmäenhaaraan ja Raumanjuopaan. Virtausmallin alapuolisena reunaehtona on vedenpinnan korkeus W Kiviniissä $N_{2000} + 0,77 \text{ m}$. Penkereiden oikea ja vasen puoli on määritetty veden virtaussuuntaan katsoen.



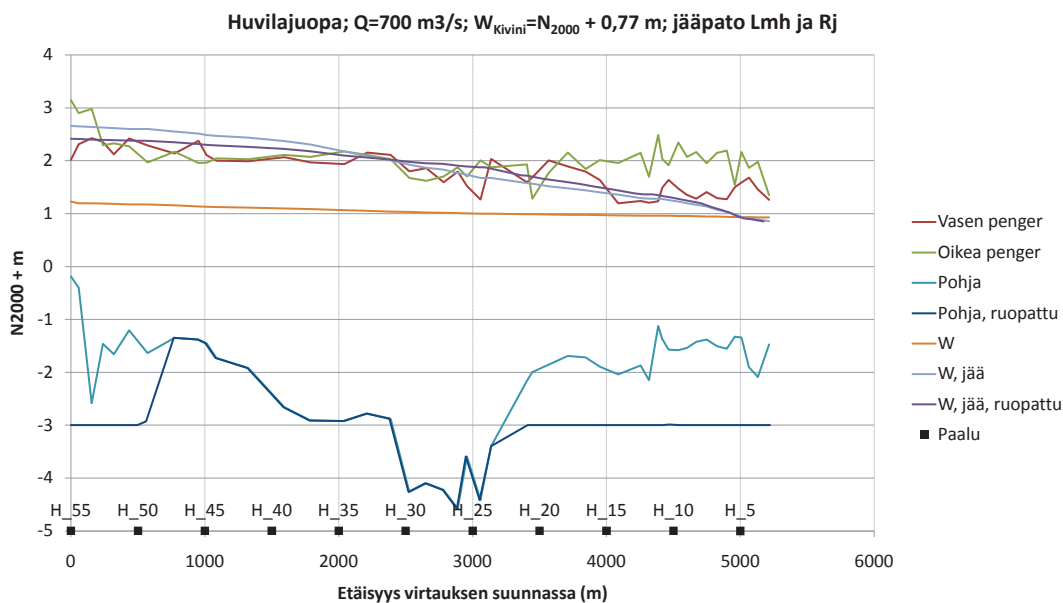
Kuva B7: Pituusleikkaus Luotsinmäenhaarassa virtaamalla $Q=700 \text{ m}^3/\text{s}$. Jääpato on kehittynyt Luotsinmäenhaaraan ja Raumanjuopaan. Virtausmallin alapuoliseen reunaehtona on vedenpinnan korkeus W Kivinissä $N_{2000} + 0,77 \text{ m}$. Penkereiden oikea ja vasen puoli on määritetty veden virtaussuuntaan katsoen.

Taulukko B2: Tulvalaskentojen vedenkorkeuksia kun jääpato on kehittynyt Luotsinmäenhaaraan ja Raumanjuopaan. Kokonaisvirtaama Q on $700 \text{ m}^3/\text{s}$ ja vedenkorkeus W Kivinissä on tasossa $N_{2000} + 0,77 \text{ m}$.

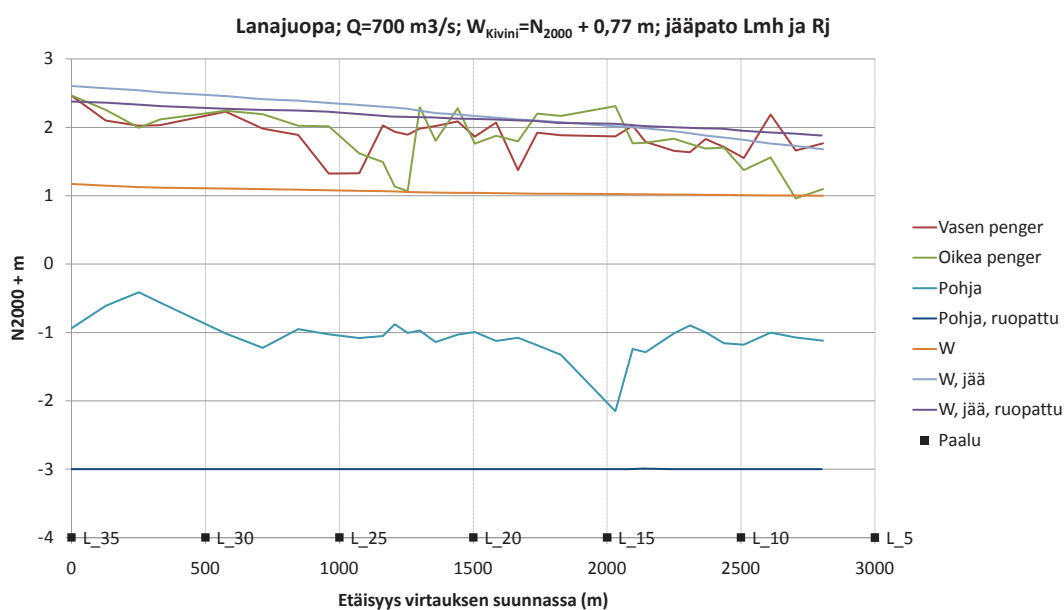
Paalu	Vedenkorkeus nykytila $N_{2000}+$	Vedenkorkeus nykytila, jää $N_{2000}+$	Vedenkorkeus ruopattu, jää $N_{2000}+$
295	1,98	3,00	2,79
230	1,31	2,71	2,46
220	1,24	2,61	2,37
195	1,07	0,91	0,89
160	0,86	0,83	0,82
95	1,27	2,67	2,41
80	1,19	2,47	2,25
55	1,06	1,27	1,29
20	0,88	1,01	1,03
H_35	1,07	2,17	2,10
H_20	0,99	1,52	1,66
L_20	1,04	2,17	2,12



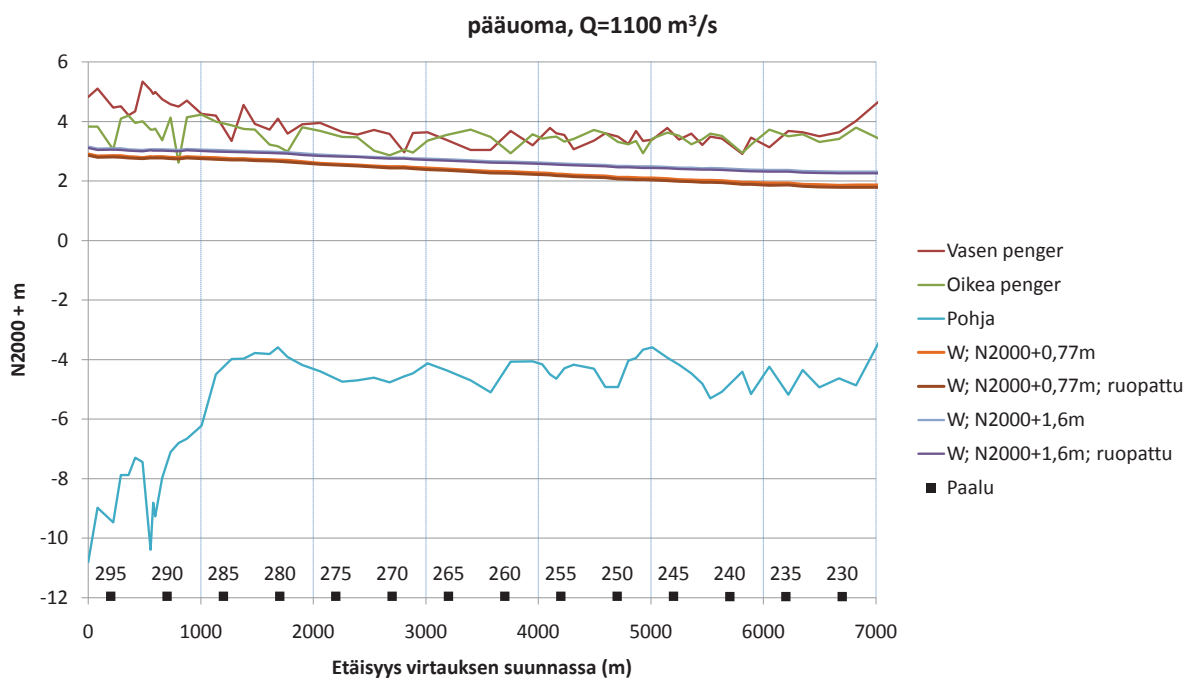
Kuva B8: Pituusleikkaus Raumanjuovasta virtaamalla $Q=700 \text{ m}^3/\text{s}$. Jääpato on kehittynyt Luotsinmäenhaaraan ja Raumanjuopaan. Virtausmallin alapuolisena reunaehtona on vedenpinnan korkeus W Kivinessä $N_{2000} + 0,77 \text{ m}$. Penkereiden oikea ja vasen puoli on määritetty veden virtaussuuntaan katsoen.



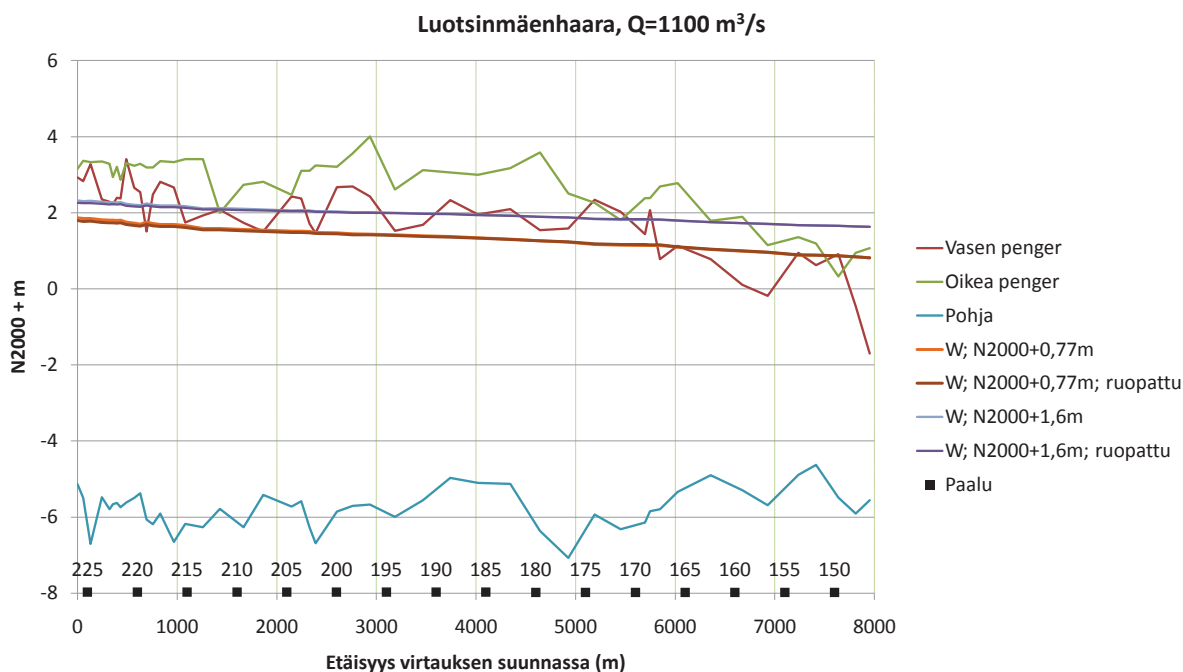
Kuva B9: Pituusleikkaus Huvilajuovasta virtaamalla $Q=700 \text{ m}^3/\text{s}$. Jääpato on kehittynyt Luotsinmäenhaaraan ja Raumanjuopaan. Virtausmallin alapuolisena reunaehtona on vedenpinnan korkeus W Kivinessä $N_{2000} + 0,77 \text{ m}$. Penkereiden oikea ja vasen puoli on määritetty veden virtaussuuntaan katsoen.



Kuva B10: Pituusleikkaus uoman pohjasta ja vedenpinnan korkeuksista Lanajuovassa virtaamalla $Q=700 \text{ m}^3/\text{s}$. Jääpato on kehittynyt Luotsinmäenhaaraan ja Raumanjuopaan. Virtausmallin alapuolisena reunaehtona on vedenpinnan korkeus W Kivinessä $N_{2000} + 0,77 \text{ m}$. Penkereiden oikea ja vasen puoli on määritetty veden virtaussuuntaan katsoen.

Virtaama 1100 m³/s

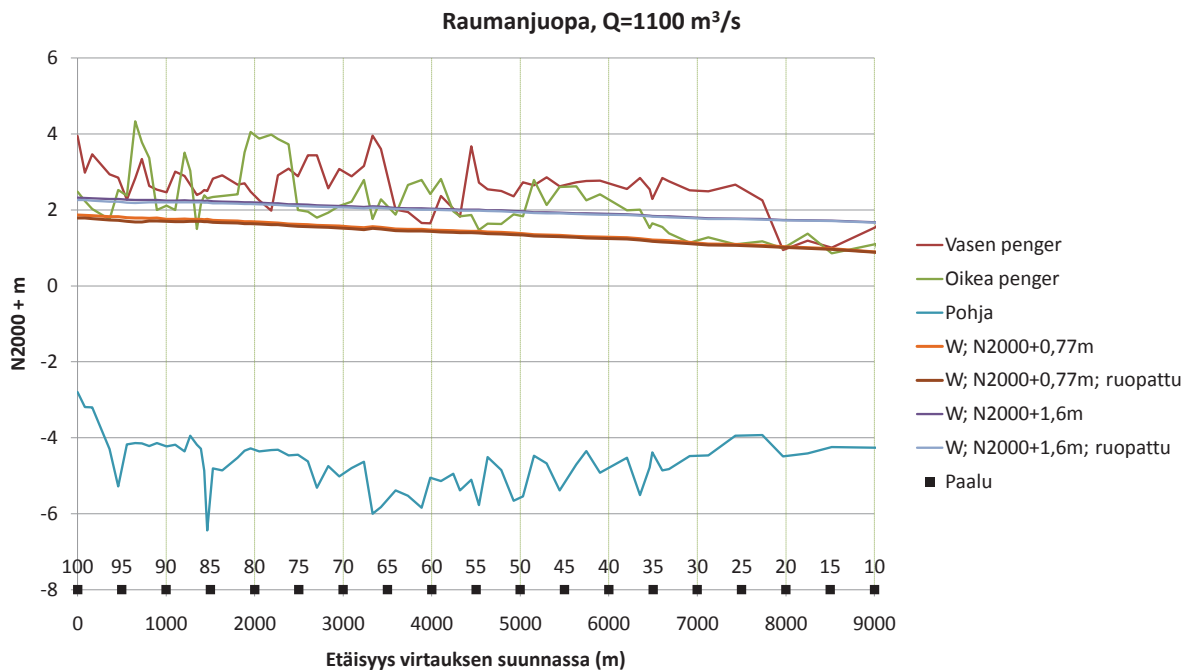
Kuva B11: Pituusleikkaus pääuomasta virtaamalla $Q=1100 \text{ m}^3/\text{s}$. Vedenpinnan korkeus W Kivinissä on N2000 +0,77 m ja N2000 +1,6 m. Penkereiden oikea ja vasen puoli on määritetty veden virtaussuuntaan katsoen.



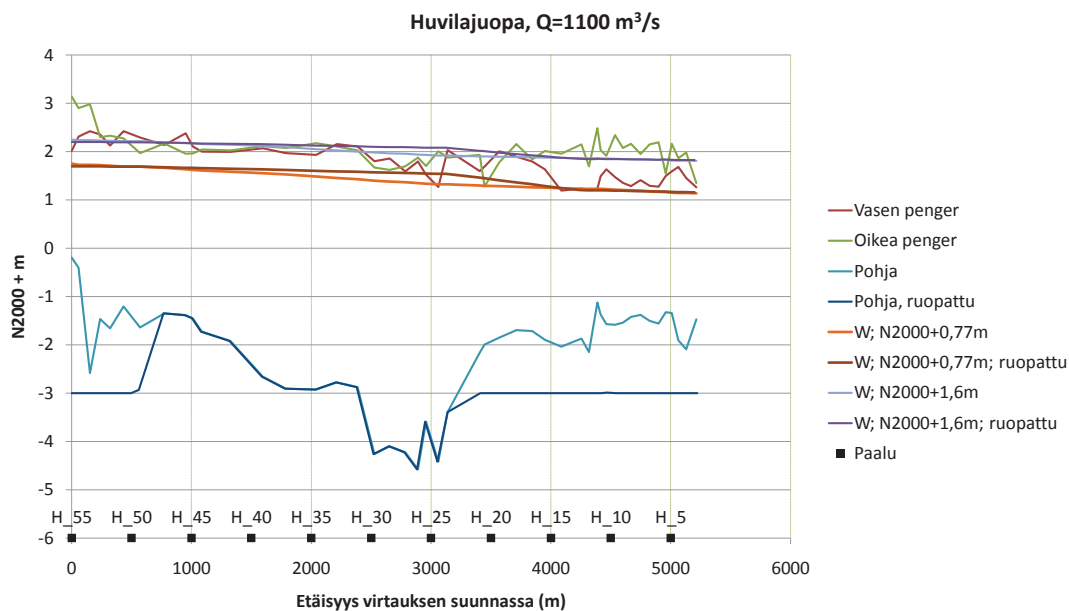
Kuva B12: Pituusleikkaus Luotsinmäenhaaran uoman pohjasta ja vedenpinnan korkeuksista virtaamalla $Q=1100 \text{ m}^3/\text{s}$. Vedenpinnan korkeus W Kivinissä on N2000 +0,77 m ja N2000 +1,6 m. Penkereiden oikea ja vasen puoli on määritetty veden virtaussuuntaan katsoen.

Taulukko B3: Tulvalaskentojen vedenkorkeuksia kokonaisvirtaamalla $Q=1100 \text{ m}^3/\text{s}$, kun vedenkorkeus W Kivinissä on tasolla N2000 +0,77 m ja N2000 +1,6 m.

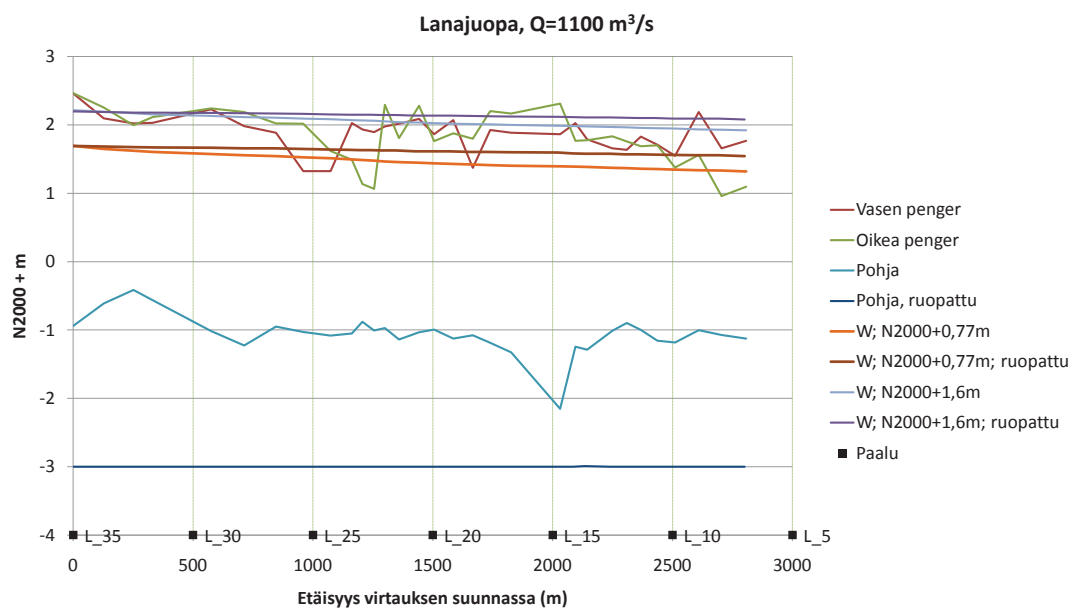
Paalu	N2000 +0,77 m		N2000 +1,6 m	
	Vedenkorkeus nykytila	Vedenkorkeus ruopattu	Vedenkorkeus nykytila	Vedenkorkeus ruopattu
295	2,85	2,81	3,1	3,07
230	1,86	1,79	2,31	2,26
220	1,75	1,69	2,23	2,19
195	1,42	1,40	2,00	1,98
160	0,99	0,99	1,72	1,72
95	1,80	1,70	2,27	2,21
80	1,68	1,63	2,19	2,16
55	1,43	1,39	2,01	2,00
20	1,04	1,01	1,74	1,75
H_35	1,49	1,60	2,05	2,09
H_20	1,28	1,41	1,89	1,95
L_20	1,44	1,62	2,03	2,09



Kuva B13: Pituusleikkaus Raumanjuovasta virtaamalla $Q=1100 \text{ m}^3/\text{s}$. Vedenpinnan korkeus W Kivinissä on $N2000 +0,77 \text{ m}$ ja $N2000 +1,6 \text{ m}$. Penkereiden oikea ja vasen puoli on määritetty veden virtaussuuntaan katsoen.



Kuva B14: Pituusleikkaus Huvilajuovasta virtaamalla $Q=1100 \text{ m}^3/\text{s}$. Vedenpinnan korkeus W Kivinissä on $N2000 +0,77 \text{ m}$ ja $N2000 +1,6 \text{ m}$. Penkereiden oikea ja vasen puoli on määritetty veden virtaussuuntaan katsoen.



Kuva B15: Pituusleikkaus Lanajuovasta virtaamalla $Q=1100 \text{ m}^3/\text{s}$. Vedenpinnan korkeus W Kivinissä on N2000 +0,77 m ja N2000 +1,6 m. Penkereiden oikea ja vasen puoli on määritetty veden virtaussuuntaan katsoen.