



SAVONIA

■ OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO
TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN ALA

TULVA-ALUEEN MÄÄRITYS AVOUMAMALLINTAMISEN AVULLA

Opinnäytetyö

TEKIJÄ/T: Antti Harju

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala			
Koulutusohjelma Ympäristötekniikan koulutusohjelma			
Työn tekijä(t) Antti Harju			
Työn nimi Tulva-alueen määrittäminen avouomamallintamisen avulla			
Päiväys	15.12.2013	Sivumäärä/Liitteet	42/9
Ohjaaja(t) Yliopettaja Pasi Pajula			
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Ramboll Finland Oy			
<p>Tiivistelmä</p> <p>Tässä opinnäytetyössä tutkittiin Perniössä sijaitsevan Asteljoen virtausoloja ja tulvimisen laajuutta avouomamallintamisen avulla. Työn tarkoituksena oli selvittää Asteljoen poikki kulkevan Kirkkonummi–Turku rautatien varrella sijaitsevan putkisillan vaikutusta sen yläpuoleisilla alueilla tapahtuviin tulviin. Putkisilta korvasi vanhan ratasillan vuonna 2010.</p> <p>Virtausmallin tulosten perusteella arvioitiin putkisillan aiheuttamaa lisäystä tulva-alueeseen verrattuna vanhaan ratasillan. Samalla arvioitiin mahdollisia muita syitä alueen herkkään tulvimiseen. Virtausmallissa ei tarkasteltu koko Asteljokea eikä siihen laskevia sivuojia. Malli rajattiin siten, että putkisillan ylä- ja alapuolilta uomaa mallinnettiin noin 4 km, jolloin mallin kokonaispituudeksi saatiin noin 8,2 km. Asteljokeen laskevan Kuuttasojan osalta kuitenkin luotiin arvio sen tulva-alueesta ja se lisättiin kokonaisarvioon. Työn tuloksia hyödynnetään putkisillan rakentamisesta aiheutuneiden satohävikkien korvaamisen arvioinnissa, sekä putkisillalle haettavassa vesilainmukaisessa hakemuksessa.</p> <p>Lopputuloksena saatiin arvio tulva-alueen laajuudesta virtaaman eri toistuvuuksilla. Mallin avulla arvioitu tulva-alueen koko siirryttäessä vanhasta ratasillasta nykyiseen putkisillan, kasvoi keskiylivirtaamalla (MHQ) n. 0,4 ha (n. 7 %) ja kerran 8 vuodessa toistuvalla ylivirtaamalla (HQ_{1/8}) 46 ha (+33 %). Mallinnus tehtiin myös kerran 100 vuodessa toistuvalla ylivirtaamalla, mutta tulva-alueen määrittämisen todettiin olevan hyvin epätarkkaa, eikä sitä siksi tehty. Mallin ja tulosten perusteella havaittiin, että Asteljoki tulvii herkästi lähinnä sen huonon vedenjohtokyvyn takia. Nykyisellä putkisillalla havaittiin myös selvä padottava vaikutus normaalissa ylivirtaustilanteessa. Padotusta kasvattavat lisäksi putken päähän kasaantuvat jääpadot, joita ei huomioitu mallinnuksessa.</p>			
Avainsanat Virtausmallinnus, tulva-alue, virtaama, padotus			

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Degree Programme in Environmental Technology			
Author(s) Antti Harju			
Title of Thesis Determination of Flood-Zone by Using a Hydraulic Model			
Date	15 December 2013	Pages/Appendices	42/9
Supervisor(s) Mr Pasi Pajula. Principal Lecturer			
Client Organisation /Partners Ramboll Finland Ltd			
<p>Abstract</p> <p>The purpose of this thesis was to study waterflow in the easily flooding Asteljoki river by using a hydraulic model. The purpose was to find out whether the newly installed culvert has an affect on the upstream floodzone. The culvert is located by the side of Kirkkonummi–Turku railroad near the village of Perniö. The old railroad bridge was replaced with new culvert in 2010.</p> <p>The effect of the culvert was determined by comparing the water levels between the old railway bridge and the new culvert. The hydraulic model was also used to find other reasons for flooding. The model was made from only one part of the main river and the side channels were not taken into account at all. The modelled area was approximately four kilometers downstream and four kilometers upstream from the culvert that was studied. The total length of the model was approximately 8.2 kilometers. The side channels were not included in the model. The flood area was determined for the Kuuttasojä stream and it was taken into account in the total amount of the flooding area. The results were used to determine the compensation price for farmers for their lost of crops. The results were also used to get a legalized authorization for the culvert.</p> <p>As a result of this thesis were the sizes of floodzones in different flows and the amount of damming in the studied culvert. When the old railway bridge was replaced by the new culvert the area of floodzone increased by 0.4 hectares in case of mean high flow. In case when high flow repeats once in eight years the area of floodzone increased by 46 hectares (+ 33 %). The simulations were also made in the case when high flow repeats once in a hundred years. In that case the floodzone was not determined because it was found out that it would be too inaccurate. The results of the modeling showed that the main reason for flooding in the Asteljoki river is its poor water conductivity. The results also showed that the new culvert is not capable of leading less common flows and it raises water levels in high flow conditions. The damming effect of the culvert was also raised by the ice that makes ice jams in front of the culvert. However, ice jams were not taken into account in this study.</p>			
<p>Keywords</p> <p>Flow hydraulic modeling, flood-zone, discharge, damming</p>			

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	6
2	VIRTAAMAMALLINNUS.....	7
2.1	Avouomavirtauksen virtaustilan määrittäminen	7
2.2	Avouoman virtausolojen tarkastelu taulukkolaskennalla sekä mallintamalla.....	9
2.2.1	Virtausolojen tarkastelu taulukkolaskennalla	10
2.2.2	Lasketun pinnankorkeuden vertaaminen HEC-RAS mallin antamaan pinnankorkeuteen....	11
3	HEC-RAS.....	13
3.1	Virtausmallinnuksen periaatteet ja tarvittavat lähtötiedot.....	13
3.2	Virtausmallintamiseen tarvittava lähtöaineisto.....	14
4	TULVA-ALUEEN MÄÄRITTÄMINEN ASTELJOELLA.....	15
4.1	Kohteen kuvaus.....	15
4.2	Asteljoella havaittu tulva	16
4.3	Mallintamisen lähtökohdat	16
4.3.1	Valuma-alue	16
4.3.2	Valunta ja virtaama	18
4.4	Asteljoen uoman topografia	21
4.5	Poikkileikkausten luonti	23
4.5.1	Uomapoikkileikkaukset	23
4.5.2	Siltojen poikkileikkaukset	24
4.6	Pituusleikkaus.....	29
4.7	Mallin reunaehdot	30
4.8	Mallin kalibrointi.....	30
4.9	Uoman ympäristön topografia.....	31
5	TULOKSET	33
5.1	Putkisillan vaikutus vedenpinnan korkeuteen	33
5.2	Kerran 8 vuodessa toistuvan virtaaman vaikutus muilla alueilla	34
5.3	Asteljoen tulva-alueet.....	35
6	JOHTOPÄÄTÖKSET	38

LÄHTEET

LIITTEET

Liite 1. Manningin kertoimia avouomalle

Liite 2. Asteljoen mallinnetun alueen pituusleikkaukset

Liite 3. Tulva-aluekartta

1 JOHDANTO

Rankkasateiden ja kevätsulannan aiheuttamat tulvat ovat lähes jokavuotinen ongelma Suomessa. Lumen sulamisesta aiheutuva virtaaman kasvu keväisin nostaa vesipintoja uomissa, joissa ilmiötä korostaa vielä niin sanotut jääpadot, jotka kerääntyvät siltojen ja rumpujen suulle. Runsaslumisten talvien jälkeen virtaamahuiput ylittävät uomien ja niissä olevien rakenteiden, kuten siltojen ja rumpujen kapasiteetin, jolloin tapahtuu tulvintaa. Tulviminen tuottaa usein haittaa muun muassa taloille, pelloille ja liikenteelle. Tulvinnan ehkäisemiseksi on luotu suunnitteluohjeita uomien ja rakenteiden mitoittamiseen, jotta yhä harvemmin toistuvat ylivirtaamat saadaan johdettua tulvaa aiheuttamatta. Lisäksi alueiden tulvaherkkyyteen on alettu kiinnittää enemmän huomiota havainnoimalla mahdollisia riskejä etukäteen mallintamalla uomien ja rakenteiden virtausoloja suurten virtaamien tilanteissa.

Tämän opinnäytetyön tilaajana toimii Ramboll Finland Oy, joka on saanut toimeksiannon Liikennevirastolta. Työn tarkoituksena on selvittää avouomamallintamisen avulla nykyisen Perniön kylän itäpuolella virtaavan Asteljoen varrella sijaitsevan uuden rautatien allittavan putkisillan toimintaa tulvatilanteessa. Putkisilta on rakennettu vuonna 2010 Kirkkonummi–Turku rautatien parantamisen yhteydessä ja sen epäillään olevan osasyynä keväällä 2011 tapahtuneeseen laajaan tulvaan. Mallinnus tehdään Yhdysvaltain armeijan kehittämällä HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center – River Analysis System) mallinnusohjelmalla, joka on kehitetty avouomien ja sen varrella sijaitsevien rakenteiden virtausolojen mallintamiseen.

Työn tuloksena saatiin mallinnukseen perustuvia vedenkorkeuksia, joiden pohjalta arvioitiin syntyvän tulvan laajuutta. Uoman virtaamaoloja tarkasteltiin muutamassa eri tilanteessa, joista yksi oli arvio keväällä 2011 tapahtuneesta tulvatilanteesta. Tapahtuneesta tulvasta luotiin malli tilanteesta uudella putkisillalla sekä vanhalla ratasillalla. Simulointien perusteella saatiin arvio putkisillan osuudesta vuoden 2011 tulvasta.

Opinnäytetyön tuloksia voidaan hyödyntää mahdollisten myöhemmin tapahtuvien jatkotoimenpiteiden arvioinnissa. Työn avulla voidaan arvioida mahdollisten korvauksien suuruutta alueen maanviljelijöiden sadonmenetyksistä. Tulokset toimivat lisäksi pohjana arvioitaessa tarvittavia toimenpiteitä ratasillan kohdalla.

2 VIRTAAAMAMALLINNUS

2.1 Avouomavirtauksen virtaustilan määrittäminen

Avouomavirtauksella tarkoitetaan yleensä veden virtausta avoimessa uomassa tai tutummin ojassa, purossa, joessa tai vastaavassa. Avouomavirtausta tutkittaessa hyödynnetään alla esitettyjä peruskaavoja. (Helsinki University of Technology - Department of Civil and Environmental Engineering 2009, 11; kaavat 1 ja 2.)

$$Q = vA \quad (1)$$

$$R = A/P \quad (2)$$

, joissa

Q = virtaama (m^3/s)

v = keskimääräinen nopeus (m/s)

A = poikkileikkauksen virtauspinta-ala (m^2)

R = hydraulinen säde (m)

P = märkäpiiri (m)

Veden virtaus avouomassa tapahtuu pääasiassa painovoiman avulla. Kulkeutumista hidastaa virtaavan veden eri vesikerrosten välinen kitka, sekä veden ja uoman pohjan välinen kitka. Tällöin osa energiasta muuttuu lähinnä lämpöenergiaksi. Tapahtuvaa ilmiötä kutsutaan yleisesti energiahäviöksi, vaikka todellisuudessa energia muuttaa vain muotoaan. Kun virtaus avouomassa on kitkallista ja stationääristä, voidaan kahden poikkileikkauksen välillä tapahtuvan virtauksen energiamuotoja kuvata niin sanotulla Bernoullin energiayhtälöllä, johon on lisätty energiahäviötä kuvaava termi (kaava 3). Bernoullin yhtälöllä voidaan kuvata virtauksen energiamuotoja ja energiatasetta. Virtausenergia jakautuu kuitenkin uomassa epätasaisesti ja tästä syystä Bernoullin yhtälöä ei voida käyttää sellaisenaan. Virtauksen tapahtuessa avouomassa, siihen vaikuttava paine pysyy koko ajan vakiona, eikä sitä tällöin tarvitse huomioida. Kohdassa 2.2.1 on käsitelty avouomavirtaukseen paremmin sopivaa Bernoullin yhtälöä. (Leiviskä 2012, 1.)

$$h_1 + \frac{p_1}{\gamma_1} + \frac{v_1^2}{2g} = h_2 + \frac{p_2}{\gamma_2} + \frac{v_2^2}{2g} + h_f \quad (3)$$

Todellisen virtaustilan laskemiseen on esitetty niin sanotut Navier-Stokesin yhtälöt. Yhtälöiden käyttämiseksi laskenta tulisi toteuttaa 3d-avaruudessa, jonka lisäksi laskenta tulisi tehdä ajan suhteen muuttuvana erittäin lyhyellä aika-askeleella. Laskenta ei kuitenkaan ole mahdollista lähtötietojen riittämättömyyden ja tietokoneiden laskentakapasiteetin riittämättömyyden takia. (National aeronautics and space administration, 2012)

Avouomavirtauksen laskentaan on kuitenkin kehitetty yksinkertaistettuja laskentamenetelmiä, joiden avulla pystytään yleensä tarkastelemaan käytännön sovelluksia riittävällä tarkkuudella. Avouomassa tapahtuvalle tasaiselle virtaukselle käytetään pohjana yleensä Chezy'n määrittämää kaavaa, joka on esitetty kaavassa 4 (Helsinki University of Technology - Department of Civil and Environmental Engineering 2009; Leiviskä 2012, 2).

$$v = C\sqrt{R * S_f} \quad (4)$$

, jossa

R = hydraulinen säde = A/P

S_f = uoman pituuskaltevuus

Kaavassa määritellylle Chezyn kertoimen C määrittämiselle on esitetty useita kaavoja, joista tunnetuin ja käytetyin on kokeellisesti määritetty Manningin kaava (kaava 5) (Leiviskä 2012, 2.).

$$C = \frac{1}{n} R^{1/6} \quad (5)$$

, jossa n = uoman karkeudesta aiheutuva kerroin

Manningin kaava ottaa huomioon uoman karkeuskertoimen n , jolle on määritetty kokeellisesti useita eri arvoja. Näistä ehkä yleisimpänä tunnetaan Ven Te Chown esittämät kertoimet (ODOT Hydraulics Manual, 6-17.). Kun kaavat yhdistetään, voidaan virtausnopeuden yhtälöä kuvata kaavan 6 mukaisesti. (Helsinki University of Technology - Department of Civil and Environmental Engineering 2009, 21; Leiviskä 2012, 2.)

$$v = \frac{1}{n} R^{2/3} S_f^{1/2} \quad (6)$$

, jossa S_f = energiaviivan kaltevuus

Karkeuskertoimen määrittämiseen tulee perehtyä tarkasti, sillä se vaikuttaa suuresti painehäviön suuruuteen. Kertoimen määrittämisessä tulee huomioida useita seikkoja, joita ovat muun muassa (Leiviskä 2012, 2.):

- kasvillisuus
- poikkileikkauksen epäsäännöllisyys
- pinnan karkeus
- veden korkeus sekä virtaama
- vuodenaika.

Edellä esitetyillä kaavoilla pystytään jo pitkälti tarkastelemaan virtaamaoloja säännöllisissä avouomissa, joissa veden virtausolot eivät muutu. Tällainen uoma voi olla käytännössä vain ihmisen rakentamana. Säännöllisessä uomassa, jossa virtaama Q pysyy vakiona ja pohjan kaltevuus S_o vastaa uoman energiaviivan kaltevuutta S_f , myös vedenpinnan korkeus h_n pysyy vakiona. Mikäli vedenkorkeus tunnetaan, voidaan virtaama Q määrittää kaavan 7 mukaan. (Helsinki University of Technology - Department of Civil and Environmental Engineering 2009, 23.)

$$Q = \frac{1}{n} A R^{2/3} \sqrt{S_o} \quad (7)$$

Kaavasta 7 ei suoraan pystytä ratkaisemaan vedenpinnan korkeutta, vaikka Q , n , S_o ja uoman muoto olisivat tiedossa. Vedenpinnan korkeus voidaan ratkaista esimerkiksi yrityksen ja erehdyksen menetelmällä järjestämällä tunnetut ja tuntemattomat arvot yhtälön eri puolille. (Helsinki University of Technology - Department of Civil and Environmental Engineering 2009, 23–24; kaava 8.)

$$A R^{2/3} = \frac{nQ}{\sqrt{S_o}} \quad (8)$$

, jossa $A R^{2/3}$ vastaa vedenpinnan korkeutta h .

Virtausolojen ja vedenkorkeuksien määrittäminen laskennallisesti luonnollisesta uomasta, joka muuttuu muotoaan ja kaltevuuttaan, on aina suuntaa antavaa, eikä koskaan vastaa täysin todellisuutta. Seuraavassa tarkastellaan tilannetta, jossa virtaama pysyy vakiona, mutta vedenpinnan korkeus ja nopeus voivat muuttua. Tällöin voidaan käyttää korjattua Bernoullin yhtälöä, joka on esitetty kaavassa 9. (Helsinki University of Technology - Department of Civil and Environmental Engineering 2009, 34; Leiviskä 2012, 2.)

$$h_2 + \alpha \frac{v_2^2}{2g} + S_o L = h_1 + \alpha \frac{v_1^2}{2g} + h_f \quad (9)$$

, jossa

h_2 = vedenkorkeus yläpäässä

h_1 = vedenkorkeus alapäässä

α = virtausnopeuden muutoksesta riippuva kerroin.

v_2 = virtausnopeus yläpäässä

v_1 = virtausnopeus alapäässä

S_o = uoman pohjan kaltevuus

L = Poikkileikkausten välinen etäisyys

h_f = energiahäviö

Mikäli virtausnopeus kasvaa alaspäin mentäessä, käytetään virtausnopeuden muutoksesta riippuvan kertoimen arvona yleensä arvoa 1,1. Jos taas virtausnopeus hidastuu, käytetään arvoa 0 (Helsinki University of Technology - Department of Civil and Environmental Engineering 2009, 35).

Virtausmallinnuksessa halutaan monesti selvittää vedenpinnan korkeus jonkin rakenteen yläpuolelle jäävästä uomasta, kun kyseessä on tasainen virtaus. Tällöin Bernoullin yhtälöstä pyritään ratkaisemaan kahden poikkileikkauksen avulla ylemmän poikkileikkauksen kohdalla oleva vedenkorkeus h_2 . Tällaisissa tapauksissa joudutaan nopeus v_2 sekä energiahäviö h_f selvittämään iteroimalla. Energiahäviön laskennassa virtauspinta-alana A sekä hydraulisena säteenä R käytetään uoman alku- ja loppupäässä olevien arvojen keskiarvoa. Energiahäviö h_f saadaan alla olevan kaavan mukaisesti (kaava 10). (Helsinki University of Technology - Department of Civil and Environmental Engineering 2009, 34–35.)

$$h_f = L \frac{n^2 Q^2}{A_m^2 R_m^{4/3}} \quad (10)$$

, jossa

A_m = alku- ja loppupään virtauspinta-alojen keskiarvo

R_m = alku- ja loppupään hydraulisten säteiden keskiarvo

2.2 Avouoman virtausolojen tarkastelu taulukkolaskennalla sekä mallintamalla

Seuraavassa osiossa verrataan taulukkolaskennan ja HEC-RAS-mallinnusohjelman antamia tuloksia. Pyrkimyksenä on saada sama lopputulema molemmilla tavoilla, jolloin voidaan todeta laskentaperusteiden oikeellisuudesta ja oikeasta käytötavasta.

2.2.1 Virtausolojen tarkastelu taulukkolaskennalla

Taulukkolaskennan ja mallinnusohjelman vertailemiseksi keksittiin kuvitteellinen uoma, josta haluttiin selvittää vedenpinnan korkeus tietyn poikkileikkauksen kohdalla, kun virtaama tunnetaan. Uomalle annettiin seuraavat arvot:

- Uoman pituus L	100 m
- Uoman pohjan leveys B_b	1 m
- Luiskan kaltevuus SI	1:1
- Virtaama Q	1 m ³ /s
- Manningin kerroin n	0,025
- Uoman pituuskaltevuus So	0,002 m/m
- Vedenkorkeus alapäässä h_1	0,8 m
- Vedenpinnan leveys alapäässä B_1	2,6 m
- Vedenkorkeus yläpäässä h_2	?

Uoman poikkileikkauksen oletetaan olevan sama molemmissa poikkileikkauksissa. Tarkastellaan vedenkorkeutta yläpäässä ratkaisemalla h_2 korjatusta Bernoullin yhtälöstä (kaava 9).

Annettujen lähtöarvojen perusteella alapuoleisen uoman poikkileikkausprofiilin ja tunnetun vedenkorkeuden avulla virtauspinta-alaksi A_1 saadaan 1,44 m². Tällöin, kaavan 1. mukaisesti saadaan virtausnopeudeksi $v_1=0,6944$ m/s. Kun alapuoleisen poikkileikkauksen vedenkorkeus tunnetaan, voidaan sen laskea sen märkäpiiri, joka on $P_1 = 3,26$ m. Tällöin hydraulisen säteen arvoksi arvoksi saadaan kaavan 2. mukaan $R_1=0,44135$ m.

Yläpuoleisen poikkileikkauksen vedenkorkeuden ratkaisemiseksi tehtiin laskentataulukko (taulukko 1), jonka avulla suoritettiin iterointi ja näin ratkaistiin vedenkorkeus yläpäässä.

taulukko 1. Vedenkorkeuden määrittäminen tasaisessa avouomassa epätasaisella virtaamalla

h_1	h_2	B_2	A_2	A_m	P_2	P_m	R_2	R_m	v_2	h_f	h_2'	erotus	h_2 korkotaso
0,8	1	3	2	1,72	3,83	3,55	0,56	0,50	0,50				
0,8	1	3	2	1,72	3,83	3,55	0,56	0,50	0,50	0,0529	0,6529	0,3472	0,853
0,8	0,8	2,6	1,44	1,44	3,26	3,26	0,44	0,44	0,69	0,0897	0,6897	0,1103	0,890
0,8	0,707	2,41	1,21	1,32	3,00	3,13	0,39	0,41	0,83	0,1159	0,7159	-0,0089	0,916
0,8	0,7138	2,43	1,22	1,33	3,02	3,14	0,39	0,42	0,82	0,1137	0,7137	0,0001	0,914

Taulukossa 1. on esitetty vedenpinnan korkeuden määrittämiseksi tarvittavat tiedot. Alapään korkeus h_1 on annettu lähtötiedoissa. Yläpään pinnankorkeus h_2 arvataan siten, että erotus-sarakkeessa oleva arvo saadaan mahdollisimman pieneksi. Erotus kuvaa yläpään arvatun (h_2) ja lasketun (h_2') vedenpinnan korkeuden erotusta. Mitä pienempi erotus, sen lähempänä oikeaa korkeutta on arvattu korkeus. B_2 kuvaa yläpäässä olevaa vedenpinnanleveyttä ja se vaihtelee arvatun vedenkorkeuden mukaan, koska uoman luiskat ovat kaltevat.

Kuten aiemmin mainittiin, virtauspinta-alana A_m sekä hydraulisena säteenä R_m käytettiin ylä- ja alapään keskiarvoa. Keskiarvoa voidaan käyttää, kun lasketaan kahden leikkauksen välillä tapahtuvaa muutosta. Hydraulinen säde on virtauspinta-alan ja märkäpiirin P suhde, joten myös märkäpiiri laskettiin ylä- ja alapään keskiarvona. Keskimääräinen virtauspinta-ala A_m sekä keskimääräinen märkäpiiri P_m saatiin alla olevien kaavojen mukaisesti (kaava 11 ja 12).

$$A_m = \frac{A_1 + A_2}{2} \quad (11)$$

$$P_m = \frac{P_1 + P_2}{2} \quad (12)$$

Virtausnopeus v_2 kuvaa virtausnopeutta uoman yläpäässä ja se saadaan Q :n ja A_2 :n suhteesta. Taulukosta 1. huomataan, että virtausnopeus on suurempi uoman yläpäässä. Tästä syystä energiahäviön h_f laskennassa on käytetty virtausnopeuden muutoksesta riippuvana kertoimena $\alpha = 0$.

Nyt kaikki tarvittavat arvot on saatu, jolloin voidaan laskea energiahäviö h_f kaavan 10. mukaisesti. Kun energiahäviö on laskettu, saadaan vedenkorkeus h_2' laskettua muokkaamalla Bernoullin yhtälö sopivaan muotoon kaavan 13 mukaisesti (kaava 13).

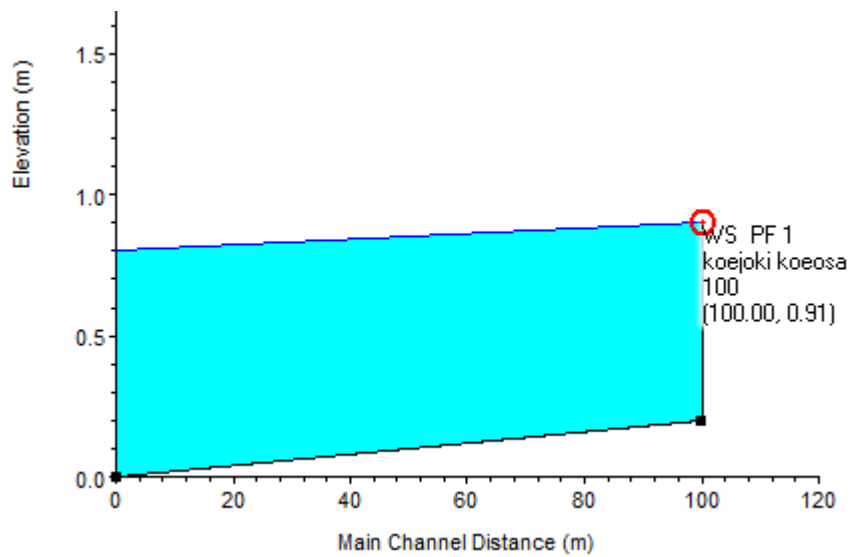
$$h_2' = h_1 + \alpha \left(\frac{v_1^2}{2g} - \frac{v_2^2}{2g} \right) - S_o * L + h_f \quad (13)$$

Nyt tunnetaan kaikki tarvittavat tekijät, joiden perusteella voidaan etsiä riittävän tarkasti yläpään vedenkorkeus h_2 . Kun h_2 :lle arvataan luku, nähdään sen oikeellisuus h_2 :n ja h_2' :n erotuksesta. Laskenta toteutetaan niin usein, että päästään riittävään tarkkuuteen. Riittävänä tarkkuutena voidaan pitää 1 mm eroavaisuutta (Helsinki University of Technology - Department of Civil and Environmental Engineering 2009, 35). Laskennan tuloksena saadaan vedenkorkeudeksi $h_2' = 0,714$ m. Näin ollen vedenpinta ylemmässä tarkastelupisteessä on tasolla +0,914.

2.2.2 Lasketun pinnankorkeuden vertaaminen HEC-RAS mallin antamaan pinnankorkeuteen

HEC-RAS -ohjelmaan syötettiin samanlainen uoma sekä virtaustilanne kuin edellä esitetyssä kappalessa. Uoman pohja asetettiin alapäässä tasolle +0 ja yläpäässä tasolle +0,2. Yläpään pohjan korkeus saatiin uoman pituuskaltevuuden ja poikkileikkausten välisen etäisyyden kautta. Mallinnusohjelmasta otetussa kuvakaappauksessa (kuva 1) näkyy vedenpinnan taso 100 metrin päässä uoman alimmasta pisteestä 0. Kuvasta huomataan, että mallin antama pinnantaso on sama kuin aiemmin lasketussa taulukkolaskennassa, eli +0,91. Kun pohjan taso yläpäässä on +0,2 saadaan vedenkorkeudeksi 0,71 m, joka vastaa myös taulukkolaskennan tulosta.

Malli antaa tulokset kahden desimaalin tarkkuudella, joten samaan tarkkuuteen sillä ei päästä, kuin taulukkolaskennassa. Toisaalta niin taulukkolaskennassa, kuin mallintamisessakin käytetään oletuksia sekä kokeellisesti määritettyjä kertoimia, joten tulos on aina viitteellinen molemmilla laskentatavoilla.



Kuva 1. Pituusleikkaus tarkasteluun mallinnetusta uomasta

Koska pinnankorkeuden määrittäminen perustuu kahden poikkileikkauksen välillä tapahtuvan muutoksen laskentaan, on selvää, että mitä suurempi määrä uomapoikkileikkauksia on tiedossa, sitä tarkempi mallista saadaan. Varsinkin luonnonuomien poikkileikkaukset saattavat vaihdella suuresti ja sen varrella voi lisäksi olla esimerkiksi kaventavia rakenteita kuten siltoja.

3 HEC-RAS

Virtaavien vesien hallinnan suunnitteluun on käytössä useita eri ohjelmia. Ohjelmien perusajatus on yleensä sama, eli niiden avulla pyritään mallintamaan veden käyttäytymistä tarkasteltavassa ympäristössä. Mallinnusohjelmat toimivat joko 1D, 2D tai 3D avaruudessa. USA:n armeijan kehittämä HEC-RAS ohjelma on yksiulotteinen mallinnusohjelma, jolloin sillä pystytään laskemaan uomassa esiintyviä vedenpinnan korkeuksia uoman pituuden suhteen. 1D mallit ovat yksinkertaisimpia tuloksiltaan, mutta niitä on myös huomattavasti helpompi ja nopeampi käyttää. Mallintamiseen tarvittavien lähtötietojen määrä on myös pienempi kuin kaksi- ja kolmiulotteisissa malleissa. (Us Army Corps of Engineers; Hydrologic Engineering Center 2010, 1-2; Talvinen 2012, 38.)

HEC-RAS on ilmaisohjelma, joka on kehitetty avouomavirtauksen mallintamiseen. Ohjelmalla voidaan mallintaa virtausta niin pienissä puroissa, kuin suurissa joissa. Malliin on mahdollista lisätä monenlaisia virtauksen kulkuun vaikuttavia tekijöitä, kuten siltoja, rumpuja, pohjapatoja tai jääpeitteitä, jolloin sitä voidaan hyödyntää esimerkiksi sopivan virtausaukon tai tulva-alueiden määrittämisessä. (Us Army Corps of Engineers; Hydrologic Engineering Center 2010, 1-2.)

3.1 Virtausmallinnuksen periaatteet ja tarvittavat lähtötiedot

Virtausmallin luominen koostuu muutamasta pääseikasta, jotka tuottavat perustan mallille. Ensimmäisenä perustekijänä toimii uoman geometria, joka yksinkertaisimmillaan käsittää mittalinjan ja uomapoikkileikkaukset. Aluksi luodaan mittalinja, joka toimii mallin runkona. Mittalinja voidaan luoda esimerkiksi hyödyntymällä taustakarttaa tai taustalle tuotua CAD-ohjelmistolla luotua mittalinjaa. Seuraavaksi luodaan uomapoikkileikkaukset, joita malli tarvitsee vähintään kaksi. Mikäli mallinnettavaa uomaa suunnitellaan rakennettavaksi uutena uomana, voidaan poikkileikkaukset suunnitella halutuiksi. Yleensä tavoitteena on kuitenkin mallintaa jo olemassa olevaa uomaa, jolloin poikkileikkaukset syötetään mitatun uomapoikkileikkauksen muotoon. Jotta ohjelma osaa laskea virtaustilan, tulee poikkileikkauksen pinnoille määrittää virtausta vastustava karkeuskerroin, sekä etäisyys seuraavaan alajuoksulla olevaan poikkileikkaukseen. Karkeuskerroin voidaan määrittää erikseen pääuomalle sekä sen törmille, joissa virtausvastus voi olla suurempi esimerkiksi kasvillisuuden takia.

Toinen perustekijä on virtaama, jota ohjelman halutaan käyttävän mallintamisessa. Ohjelma osaa laskea tasaista ja epätasaista virtaamaa. Tasaisen virtaaman laskennassa poikkileikkausten ohi virtaa tietty ajan suhteen muuttumaton virtaus. Epätasaisen virtaaman laskennassa taas virtaama vaihtelee ajan suhteen. Näistä helpompi ja samalla yksinkertaisempi malli on tasaisen virtauksen malli, joka usein kuitenkin antaa tarvittavat tulokset riittävällä tarkkuudella. Suurimpana erona mallien välillä on se, että tasaisen virtauksen malli ei ota huomioon virtaaman vaihtelua ajan suhteen, joka voi olla hyvinkin suurta etenkin pienillä valuma-alueilla. Tasaisen virtauksen malli soveltuu hyvin esimerkiksi tulva-alueiden määrittämiseen, jos niiden varastotilavuus ei edusta merkittävää osaa kokonaisvesimäärästä. Epätasaisen virtaaman mallilla voidaan taas mallintaa esimerkiksi varastotilavuuden täyttymistä ja purkautumista. (Us Army Corps of Engineers; Hydrologic Engineering Center 2010, 1-2-1-3.)

3.2 Virtausmallintamiseen tarvittava lähtöaineisto

Olemassa olevaa uomaa mallinnettaessa tulee poikkileikkausten syvyysuhdemittauksissa kiinnittää erityisesti huomiota muutamiin seikkoihin. Uomasta ja sen penkereiltä tulee mitata riittävästi pisteitä, jotta uoman muoto ja virtauspoikkileikkausten pinta-ala saadaan riittävän tarkasti määritettyä. Mittauksen tulisi itse uoman lisäksi ulottua riittävän pitkälle uoman molemmille puolille, jotta mahdollisen tulvimisen sattuessa myös tulvivalta alueelta olisi mitattua tietoa. Tällöin malli ottaa paremmin huomioon veden leviämisen tulva-alueelle. Mikäli HEC-RAS mallin laskema vedenpinta nousee malliin syötetyn poikkileikkauksen reunimmaisesta mitatun pisteen yli, se olettaa vedenpinnan nousevan pystysuoraan ylöspäin. (Us Army Corps of Engineers; Hydrologic Engineering Center 2010, 3-2-3-7.)

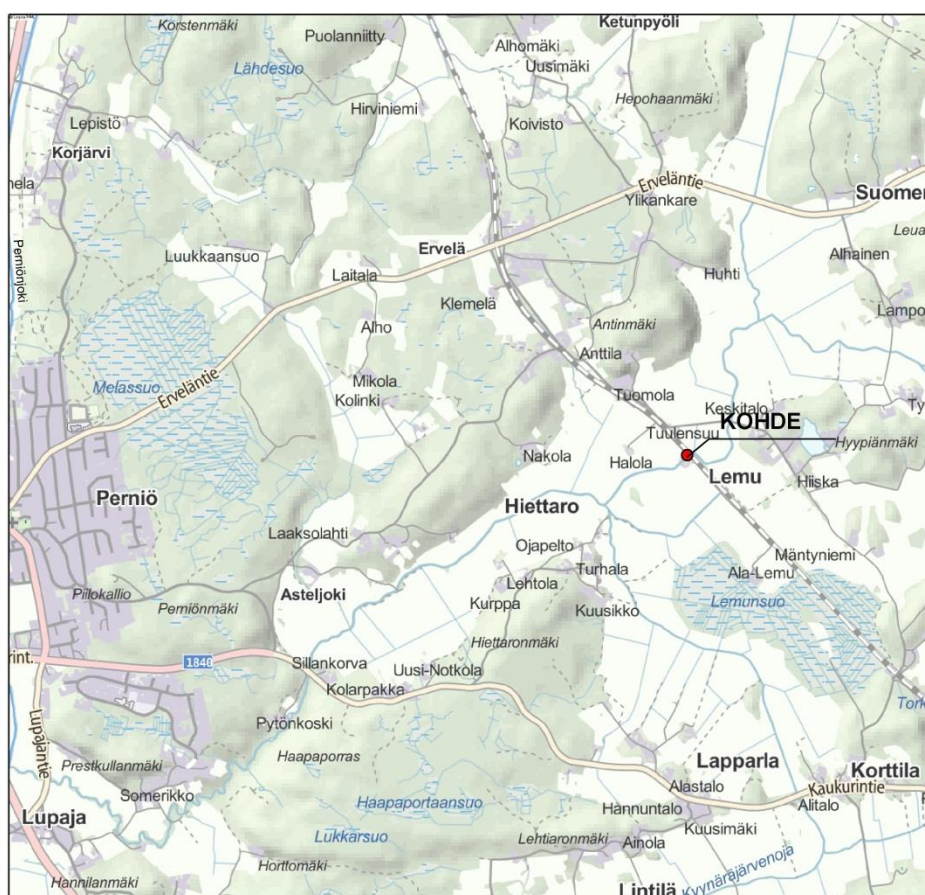
Poikkileikkauksia olisi hyvä mitata lisäksi uoman jokaisesta kohdasta, jossa tapahtuu virtaukseen vaikuttava merkittävä muutos. Tällaisia ovat esimerkiksi kohdat, joissa virtaama, uoman muoto, pituuskaltevuus tai karkeus muuttuu. Myös erillaiset rakenteet kuten sillat ja pohjapadot vaikuttavat virtaukseen ja ne tulisi näin ollen kartottaa. Muutoskohdan ylä- ja alapuolelta tulisi myös mitata muutama poikkileikkaus, jotta muutoksen sijainti voidaan todentaa ja virtaus saadaan tasaantumaan oikeilla väleillä. (Us Army Corps of Engineers; Hydrologic Engineering Center 2010, 3-2-3-7.)

4 TULVA-ALUEEN MÄÄRITTÄMINEN ASTELJOELLA

4.1 Kohteen kuvaus

Tämän opinnäytetyön tarkastelun kohteena toimii Salon kaupungille kuuluvan Perniön kylän itäpuolella virtaava Asteljoki (vesistöalue 24.05), joka kuuluu Kiskonjoen-Perniönjoen vesistöalueeseen (vesistöalue 24, 1047 km²). Asteljoen valuma-alue on kooltaan yhteensä noin 120 km², joka koostuu kuudesta 3. jakovaiheen vesistöalueesta (vesistöalueet 24.051...24.056). Asteljoki laskee Perniönjokeen Perniön kylän eteläpuolella, josta vedet virtaavat Kiskonjokeen ja sitä kautta mereen.

Asteljoen yli kulkee Kirkkonummi–Turku välinen rautatie, jota on uudistettu rakentamalla junien kohtauspaikka. Uusi ratasilta on rakennettu vanhan ratasillan viereen ja samalla Asteljoen uomaa on siirretty maan stabiiliteetin parantamiseksi noin 20 metriä kohti koillista. Uuden radan rakentamisen yhteydessä rakennettiin noin 35 metriä pitkä matalarakenteinen putkisilta, joka korvasi vanhan silta-aukon sekä toimii uuden sillan virtausaukkona. Siltaapaikan alapuolella sijaitsee toinen silta, joka on yksityistien käytössä. Siltaapaikka on esitetty alla olevassa kuvassa (kuva 2).



Kuva 2. Tarkasteltavan siltaapaikan sijainti. Pohjakartta © Maanmittaustoimisto lupa nro 3/MML/13.

Uuden putkisillan rakentamisen jälkeen alueella on havaittu merkittävä tulva vuonna 2011, jolloin rummun virtausaukon laen mitattiin olleen noin puoli metriä vedenpinnan alapuolella ja sen suulle todettiin muodostuneen jääpatoja, joiden arvioitiin nostavan vedenpintaa entisestään (Ruotsalainen 2013). Uoman kunnostamiseksi perustetun Asteljoen järjestely-yhtiön mukaan alueella ei ole aiem-

min tapahtunut näin laajaa tulvimista ja syyksi epäilläänkin uuden putkisillan virtausaukon olevan liian ahdas johtamaan suuria kevätvirtaamia ja siihen ajautuneita jäälauttoja. Putkisilta on aiemmin mitoitettu johtamaan kerran 20 vuodessa toistuva kevätylivirtaama (noin $17 \text{ m}^3/\text{s}$) (Lounais-Suomen ympäristökeskus 2009). Nykyisen silta- ja rumpuaukkoluonnoksen mukaan rautatien alittava rumpu tulisi mitoittaa kerran 100 vuodessa toistuvalla ylivirtaamalle (Suomen ympäristökeskus 2010. 9).

HEC-RAS-mallilla pyritään selvittämään uuden putkisillan vaikutuksia Asteljoen ylittävän rautatien yläpuolella olevien alueiden tulvimiseen. Tulosten perusteella luodaan varovainen arvio jatkotoimien piteistä, joilla tulvaongelmaa voitaisiin helpottaa.

4.2 Asteljoella havaittu tulva

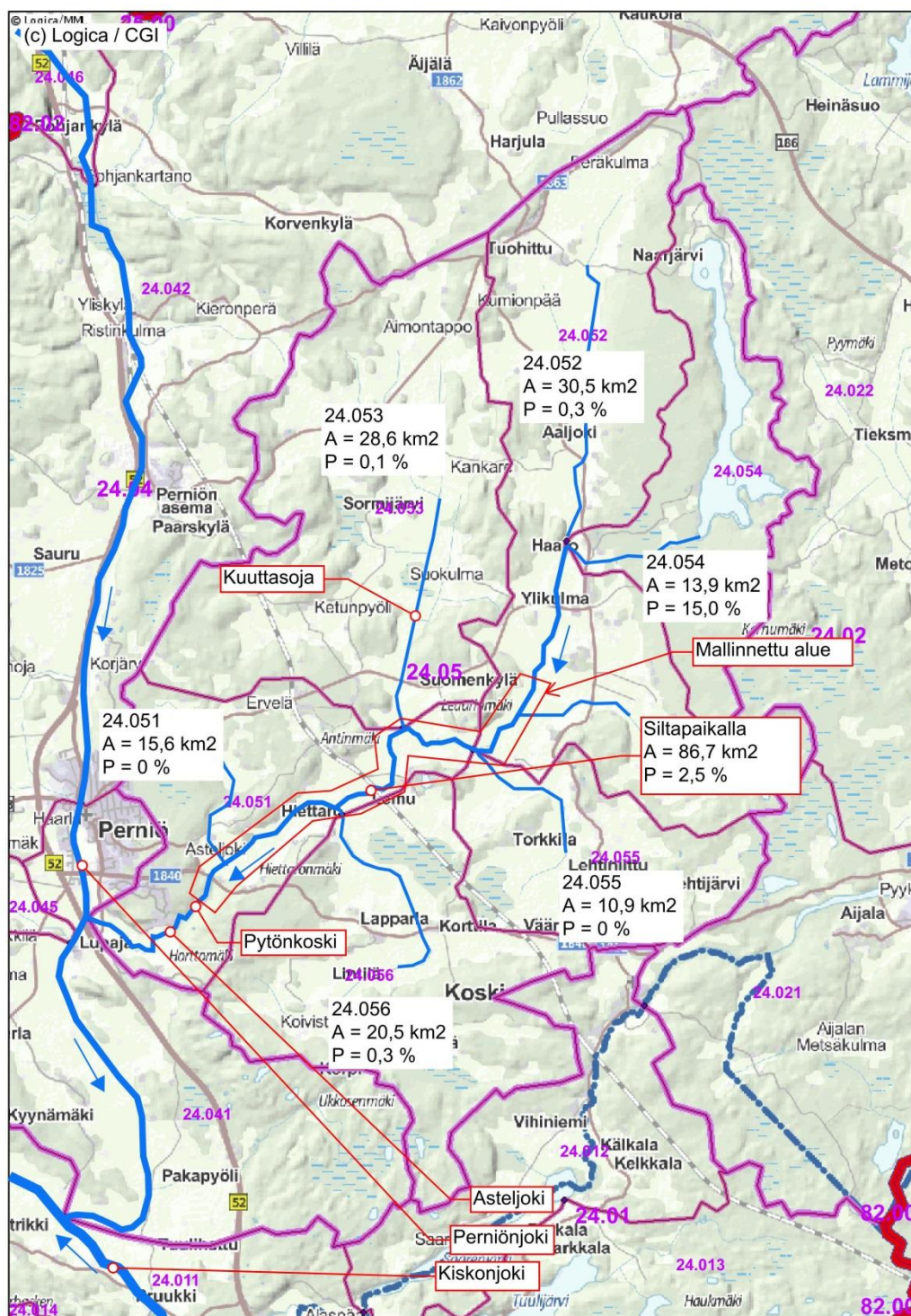
9. huhtikuuta 2011 tapahtui merkittävä tulva, joka levisi laajalti ratasillan yläpuolisille pelloille. Lisäksi noin 600 metrin päässä ylävirralla sijaitsevalle Lemuntien kaarisillalle johtava Lemuntie oli osittain veden peitossa. Asteljoen järjestely-yhtiön toimesta ratasillan kohdalla tehdyissä mittauksissa 11.4.2011 todettiin vedenpinnan olleen jopa puoli metriä rautatien alittavan putkisillan laen yläpuolella. Tulvan yhteydessä havaittiin putkisillalle kerääntyneen jäitä, joiden arvioitiin lisäävän tulvan korkeutta. Varsinais-Suomen ELY-keskus suoritti pinnankorkeusmittauksia 12.4.2011, jolloin vedenpinta oli laskenut edellisenä päivänä mitatusta korkeudesta noin 1,6 metriä (+12,30) (Myllyoja 2013-03-11). Asteljoen järjestely-yhtiön mukaan tulva oli korkeimmillaan 9.4.2011 (Ruotsalainen 2013.).

Tulvan toistuvuuden selvittämiseksi pyydettiin ELY-keskusta tuottamaan toistuvuusanalyysi Kaukolankosken virtaamamittausaseman tiedoista. Tulvan aiheuttaneen virtaaman toistuvuuden todettiin olleen noin kerran 8 vuodessa toistuvaa virtaamaa vastaava (Nieminen 2013-01-28). Tulvan laajuutta on arvioitu tulosten perusteella myöhemmin tässä työssä. (Varsinais-Suomen ELY-keskus 2013.)

4.3 Mallintamisen lähtökohdat

4.3.1 Valuma-alue

Mallinnettavalle alueelle tuli määrittää valuma-alue, jonka avulla arvioitiin uoman virtaamia. Asteljoen koko valuma-alue on noin 120 km^2 . Mallinnuksessa alimpana kohtana oli Myllyn ylivirtauspato, johon laskettiin kohdistuvan noin 116 km^2 valuma-alue. Tarkasteltavana kohteena toimivaan putkisillan arvioitiin kohdistuvan noin $86,7 \text{ km}^2$ valuma-alue. Valuma-alueiden määrittämisessä käytettiin Maanmittauslaitoksen tarjoamaa maastotietokanta-aineistoa, josta valuma-alueille saatiin niiden vesistöalueen numero, pinta-ala, järvisyys sekä peltoisuus. Asteljoen koko valuma-alue, 3. jakovaiheen valuma-alueet ja mallinnettu alue on esitetty alla olevassa kuvassa (kuva 3).



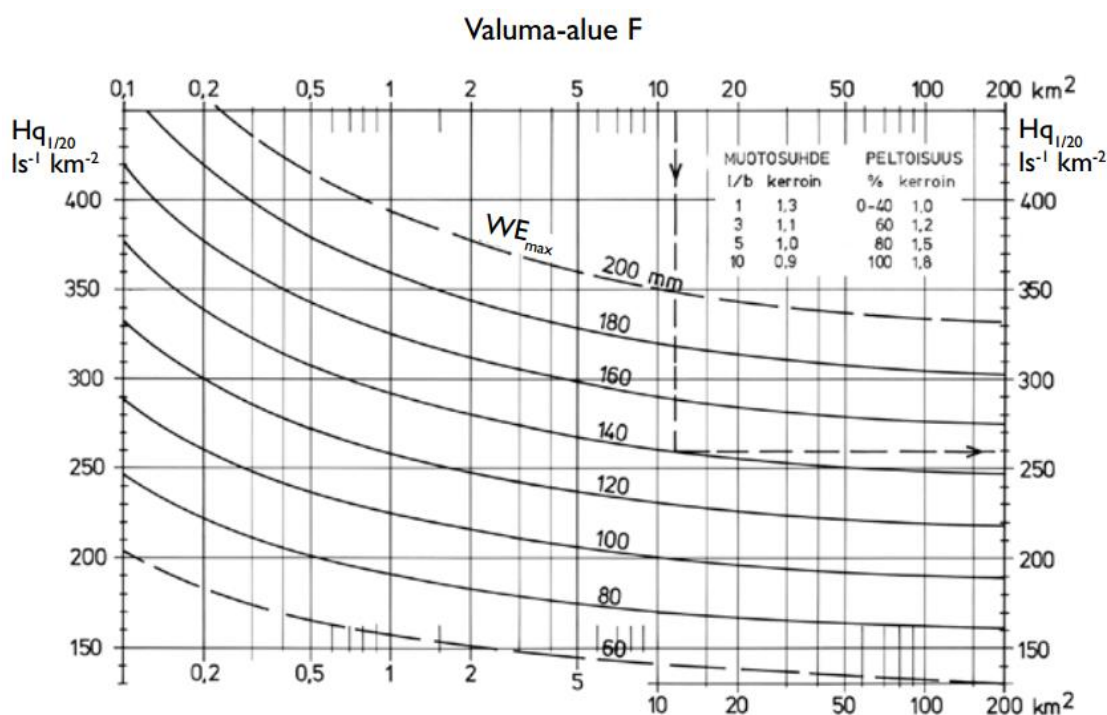
Kuva 3. Asteljoen Valuma-alue (24.05) sekä 3. jakovaiheen valuma-alueet ja niiden pinta-alat (A) sekä järvisyysprosentit (P). Pohjakartta © Maanmittaustoimisto lupa nro 3/MML/13.

Valtaosa alueesta on metsää ja peltoa. Alueen peltoisuus on noin 40 % ja järvisyys noin 3 %. Valuma-alueella sijaitsevat rakennukset koostuvat lähinnä maatiloista ja satunnaisista omakotitaloista, eikä niiden aiheuttamaa valunnan muutosta ole otettu huomioon tarkastelussa. Joen ylittävän rata-sillan kohdalla valuma-alue on noin 86,7 km², peltoisuus noin 45 % ja järvisyys noin 2,5 %.

4.3.2 Valunta ja virtaama

Virtaaman määrittäminen on yksi mallinnuksen tärkeimmistä tehtävistä. Käytettävä virtaama vaikuttaa suoraan mallin antamiin vedenkorkeuksiin ja vaikutus korostuu etenkin ahtaiden rumpujen kohdalla.

Virtaaman määrittämisessä käytettiin Suomen ympäristökeskuksen laatimaa Silta- ja rumpulausunnot – Luonnos oppaaksi –teosta, jossa on esitetty muutamia suurille valuma-alueille sopivia määrittämenetelmiä. Tässä työssä käytettiin järvettömille alueille soveltuvaa Nissisen nomogrammia (kuvio 1. julkaisematon) joka antaa kerran 20 vuodessa toistuvan ylivaluman valuma-alueen koon ja lumen maksimivesiarvon perusteella. Valuma-alueen suuruuden lisäksi määrittämisessä on huomioitu alueen peltoisuus ja muotosuhde (taulukko 2), sekä järvellisellä alueella järvisyyserroin (kuvio 2, julkaisematon). Määrittämenetelmän valitsemiseksi tehtiin vertailu menetelmistä muutamalla valuma-alueella. Vertailussa oli mukana Silta- ja rumpulausunnot –oppaasta löytyvä Kaiteran nomogrammi sekä Tielaitoksen vuonna 1993 julkaisema Teiden suunnittelu IV -ohje. Eri menetelmistä valittiin se, joka antoi suurimmat virtaamat. Tällöin oltiin niin sanotulla varmalla puolella, jolloin määritettiin määrittämenetelmistä johtuva tulva-alueen koon aliarvioiminen.



Kuvio 1. Järvettömän valuma-alueen ylivaluman $Hq_{1/20}$ nomogrammi (Nissinen 1984, julkaisematon).

Taulukko 2. Valuma-alueen peltoisuuden ja muotosuhteen vaikutus ylivalumaan. l = alueen pituus, b = alueen leveys.

Peltoisuus %	Kerroin	Muotosuhde l/b	Kerroin
0...40	1,0	1	1,3
60	1,2	3	1,1
80	1,5	5	1,0
100	1,8	10	0,9

Eri virtauspisteisiin kohdistuvat virtaamat laskettiin seuraavasti:

$$Q = q * A$$

, jossa

q = valuma (l/s/km²)

A = valuma-alueen pinta-ala (km²)

Valuma q määritettiin Nissisen nomogramilla selvittämällä taulukosta kerran 20 vuodessa toistuva ylivaluma $Hq_{1/20}$ ja kertomalla se peltoisuus- ja muotosuhdekertoimella. Keskiylivaluma MHq saatiin kertomalla $Hq_{1/20}$ Nissisen määrittämällä kertoimella 0,55. Kerran sadassa vuodessa toistuva ylivaluma $Hq_{1/100}$ taas saatiin kertomalla keskiylivaluma MHq Silta- ja rumpalausunnot -oppaassa olevalla kertoimella 2,35, joka pohjautuu Sovellettu hydrologia –kirjan taulukoihin (Mustonen 1986). Koska valuma-alueen järvisyys on noin 3 %, kerroin määritettiin interpoloimalla järvettömän (kerroin 2,5, kun järvisyys 0 %) ja järvellisen kertoimen (kerroin 2,0, kun järvisyys ≥ 10 %) väliltä. (Suomen ympäristökeskus 2010)

Kerran 8 vuodessa toistuva virtaama määritettiin vertailuvesistön avulla ja tarkistettiin Nissisen menetelmällä. Määrittämisessä hyödynnettiin Kaukolankosken virtausmittauspistettä (Kaukolankoski, 2500400), josta Ely-keskus tuotti toistuvuusanalyysin. 10.4.2011 mitattu virtaamahuippu kaukolankoskella oli 82,7 m³/s. Kun Kaukolankosken mittauspisteessä valuma-alue on 481 km², saadaan valumaksi 0,172 m³/s/km², joka on 172 l/s/km². Kun otetaan huomioon, että Asteljoen tarkasteltavan putkisillan kohdalla valuma-alueen pinta-ala on noin 86,7 km², on Asteljoen valuma todennäköisesti suurempi, kun valuma-alueiden maankäyttö on samankaltaista. Silta- ja rumpalausunnot -oppaasta löytyvän Kaiteran nomogrammin avulla, verrattiin valuma-alueen koosta ja järvisyydestä johtuvaa eroa valuntaan Kaukolankosken ja Asteljoen kohdalla. Kun valuma-alueen koon lisäksi huomioidaan järvisyys, joka Kaukolankoskella on noin 0,7 % ja Asteljoella noin 2,5 %, Asteljoen valuman arvioidaan olevan noin 13 % suurempi Putkisillan kohdalla. Tällöin valuman määräksi saadaan 194 l/s/km². Näin ollen kerran 8 vuodessa toistuvaksi virtaamaksi saadaan 16,8 m³/s. Huomioitavaa on, että aiemmin (2009) tehdyssä aukkolausunnossa kerran 20 vuodessa toistuvan ylivirtaaman suuruudeksi on arvioitu 17 m³/s. (Lounais-Suomen ympäristökeskus 2009)

Taulukko 3. Virtaama-arviot (m^3/s) eri virtaamanmuutoskohdissa ja eri toistuvuuksilla

Etäisyys alim- masta pisteestä (m)	MHQ	HQ _{1/8} (Arvio 9.4.2011)	HQ _{1/100}	Arvio 9.1.2013	Arvio 25.2.2013
8209	3,4	5,2	8,3	0,4	0,1
7479*	4,6	7	11,3	0,5	0,1
6457	6,4	9,7	15,8	0,7	0,1
5168	10,6	16,2	26,4	0,9	0,2
3827	11,1	16,8	27,5	1,1	0,2
2965	14,7	22,3	36,5	1,4	0,3
980	16,1	25,4	40	1,5	0,3

* poikkileikkausta ei ole luotu mitattujen pisteiden perusteella, vaan se on interpoloitu kahden mitattun poikkileikkauksen väliltä.

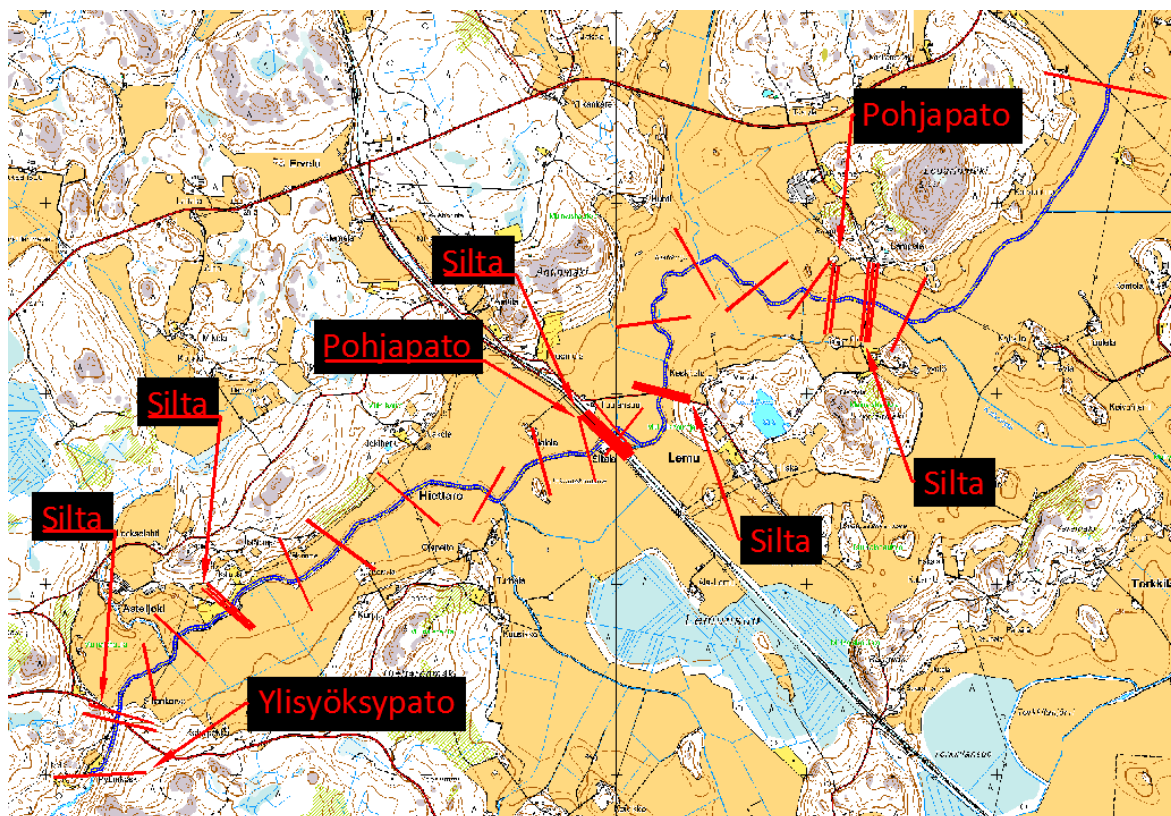
Kerran 8 vuodessa toistuvan virtaaman tarkistamiseksi laskettiin Nissisen menetelmän antamasta keskiylivalumasta kerran 5 ja kerran 10 vuodessa toistuvat valunnat, jotka määritettiin Pertti Seunan määrittämien kerrointen perusteella (Seuna 1983). Seunan mukaan kerran viidessä vuodessa toistuva ylivaluma vastaa 1,4 kertaa ja kerran 10 vuodessa toistuva ylivaluma 1,6 kertaa keskiylivirtaamaa. Kun edellä mainittujen toistuvuuksien virtaamiksi ratasillalla saadaan $15,5 \text{ m}^3/\text{s}$ ja $17,8 \text{ m}^3/\text{s}$, saadaan interpoloimalla likimääräisesti määritettyä kerran 8 vuodessa toistuva virtaama. Ylivirtaaman arvoksi saadaan $16,9 \text{ m}^3/\text{s}$, joka on hyvin lähellä vertailuvesistön avulla määritettyä virtaamaa.

Virtaama-arviot 9.1.2013 ja 25.2.2013 oleville tilanteille tehtiin vertailuvesistömenetelmällä hyödyntäen Kaukolankosken virtausmittauspistettä.

4.4 Asteljoen uoman topografia

Uoman poikkileikkauksia varten tehtiin useita syvyysuhdemittauksia tarkkuus-GPS –laitteistolla. Ramboll suoritti syvyysuhdemittauksia 9.-13.1.2013 sekä 25.-28.2.2013. Poikkileikkauksia mitattiin ratasillalta noin 4,5 km ylävirran ja 3,7 km alavirran suuntaan.

Syvyysuhdemittauksia varten tehtiin mittaussuunnitelma. Mittaussuunnitelmassa määritettiin poikkileikkausten sijainnit, pisteiden määrä jokaista poikkileikkausta kohden ja mahdolliset muut kohteet, kuten siltojen pohjat ja kannet sekä pohjapadot. Poikkileikkausten sijainnit valittiin siten, että ne mahdollistivat hyvät edellytykset mallin toimivuudelle, mutta olivat kuitenkin toteutettavissa kohtuullisilla resursseilla. Mallin tarkkuuden kannalta on aina parempi, mitä enemmän on mitattuja poikkileikkauksia. Asteljoen kohdalla ei kuitenkaan ollut järkevää suorittaa mittauksia liian tiheään, sillä uoma pysyy melko säännöllisenä jopa pitkiä matkoja, jolloin mittaussuunnitelmaa voitiin keventää. Alla olevassa kuvassa (kuva 5) on esitetty mittauspisteet, joista uomapoikkileikkauksia mitattiin.



Kuva 5. Uomapoikkileikkausten sekä siltojen ja pohjapatojen mittauskohdat

Mallia varten mitattiin yhteensä 36 uomapoikkileikkausta, joissa kussakin oli keskimäärin 15 mitattua pistettä. Poikkileikkauksen pisteistä viidellä mitattiin pohjan korkeusasemaa ja 10:llä uoman törmää ja niitä ympäröivää maanpintaa noin 10-15 metrin pituudelta törmien takaa. Poikkileikkaukset otettiin myös Asteljokeen laskevien suurempien uomien kohdilta, jotta sivu-uomista tulevat virtaukset voitiin lisätä oikeissa kohdissa. Peltojen pienten kuivatusojien laskukohtia ei huomioitu erikseen, vaan niistä tulevat virtaamat huomioitiin vasta seuraavassa kohdassa, jossa virtaus muuttuu merkittävästi.

Mallinnettavia siltapaikkoja oli yhteensä viisi. Silta-aukkojen kohdalla uomapoikkileikkaukset mitattiin sillan kaiteen kohdalta, noin 5 metrin päästä sillan ylä- ja alapuolelta sekä noin 200 metrin päästä sillan ylä- ja alapuolelta. Siltapaikoilta mitattiin mallia varten lisäksi siltakannen alapinnan korkeusasema, tien alataitteen taso ja silta-aukon yläpinnan leveys. Sillat ja niiden etäisyys tarkasteltavalta ratasillalta on esitetty alla olevassa taulukossa (taulukko 4). Mallinnettavalla alueella sijaitseva Kiskonkien silta kartoitettiin osittain, mutta sitä ei mallinnettu lainkaan. Tämä johtui siitä, että silta on niin suuri, että sen korkeusaseman mittaaminen olisi erityisen työlästä. Kiskonjoen silta-aukon virtauspinta-ala on myös todella suuri, joten sen padottava vaikutus voidaan todeta olevan hyvin pieni.

Taulukko 4. Mallinnettavalla osuudella sijaitsevat sillat ja niiden etäisyys tarkastelun kohteena olevalta ratasillalta

	Kiskontien silta	Kainulan silta	Yksityistien silta	Ratasilta	Lemuntien kaarisilta	Lemuntien silta
Sijainti kohteesta (m) (+/-, yläpuolella/alapuolella)	- 3360	- 2440	- 30	0	+ 540	+ 2490

Mallinnettavalla alueella olevia pohjapatoja mitattiin kahdesta paikasta. Kolmas alueella ollut pato oli vanhan myllyn yhteydessä oleva ylivirtauspato. Patojen tarkoituksena on estää uoman kuivuminen säilyttämällä uomassa vettä myös alivirtaaman aikaan. Patojen etäisyys ratasillasta sekä laen ja uoman pohjan korkeudet padon ylä- ja alapuolella on esitetty alla olevassa taulukossa (taulukko 5). Mallinnetulla alueella olevat rakenteet on esitetty pituusleikkauksessa kappaleessa 4.5.2 (kuva 14).

Taulukko 5. Syvyyssuhtemittausten yhteydessä kartoitetut pohjapadot, niiden korkeustasot ja niiden sijainti ratasillan suhteen

Pohjapato	Sijainti kohteesta (+/-, yläpuolella/alapuolella)	Uoman pohja, yläpuoli	Laen korko	Uoman pohja, alapuoli
1	+ 2300 m	+11,65	+12,93	+11,1
2	- 50 m	+10,8	+11,17	+10,3
3	- 3700 m	+9,8	+10,85	+8,9

Mitatulla alueella Asteljoen uoman keskimääräinen pituuskaltevuus on noin -0,3 ‰ (0,3 m/km), joka on hyvin pieni. Suurimmalta osin uoma on laskeva noin -0,5 ‰. Kuitenkin noin kilometri ennen Pytönskoskella sijaitsevaa Myllyn ylivuotopatoa, pohjan kaltevuus kääntyy loppumatkaksi noin +0,8 ‰ nousuun. Tätä voidaan pitää hankalana tilanteena niin virtauksen kuin kuivatuksenkin kannalta, sillä suositeltuna minimikaltevuutena maatalouden kuivatusojille pidetään -0,5 ‰ (Suomen ympäristökeskus 2007).

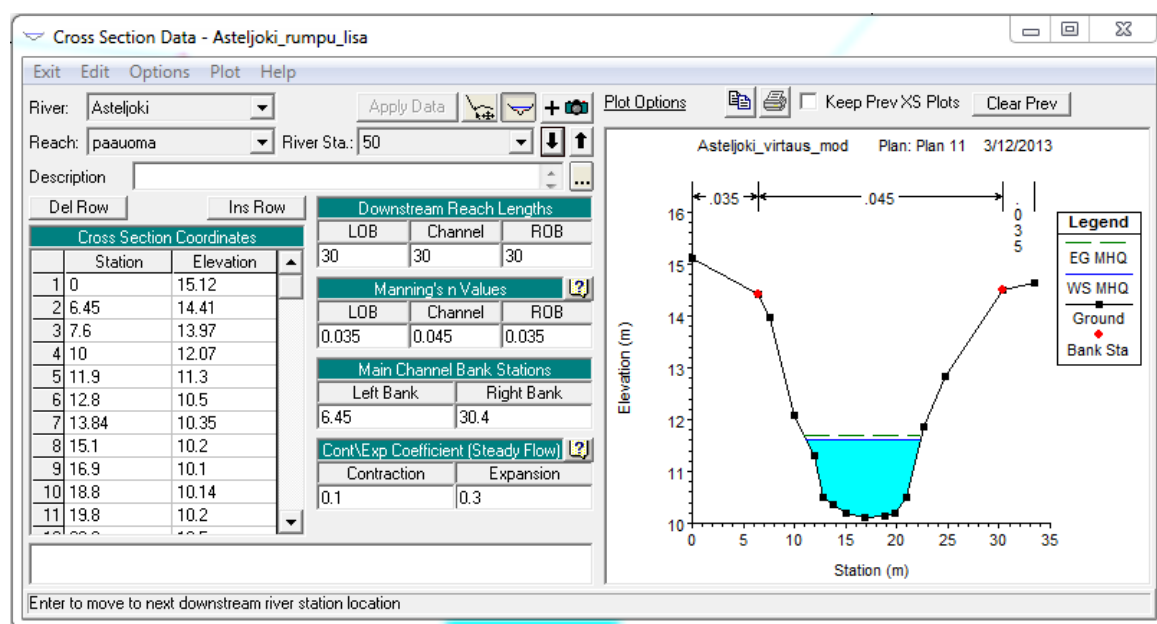
4.5 Poikkileikkausten luonti

4.5.1 Uomapoikkileikkaukset

Uomapoikkileikkausten luonnissa käytettiin mitattuja pisteitä, joita otettiin noin 15 jokaista poikkileikkausta kohden. Poikkileikkausten asemointi malliin uoman pituussunnassa määritettiin etäisyydellä alimpaan poikkileikkaukseen (River Station). Etäisyyden määrittämiseksi uomalle luotiin mittalinja, joka mukaili uoman muotoa. Itse poikkileikkausprofiili luotiin syöttämällä mitatut pisteet aloittaen uoman vasemmasta laidasta. Pisteille annettiin etäisyys (Station) vasemmanpuoleisesta pisteestä sekä niiden korkeusasema (Elevation). Poikkileikkausten syöttämiseen käytetty näkymä on esitetty kuvassa 6.

Vähintään yhtä tärkeässä asemassa poikkileikkausprofiilin kanssa on uoman muut ominaisuudet kuten uoman virtausvastuksen suuruutta kuvaava Manningin kerroin sekä uoman supistumis- ja laajentumiskerroin. Manningin kertoimelle voidaan määrittää erilliset arvot uoman päävirtausalueelle sekä pengeralueille. Mallin käyttämät alueet voidaan määrittää kuvan 8 poikkileikkauksessa näkyvien punaisten pisteiden (Bank Station) avulla, jolloin malli käyttää virtausvastuksen laskennassa pääuoman vastusta pisteiden sisäpuolella ja penkköjen vastusta pisteen yli menevältä osalta. Uoman supistumis ja laajentumiskertoimet vaikuttavat myös virtaukseen. Niiden arvot pidettiin mallin antamina oletusarvoina (0,1 supistuesssa ja 0,3 laajentuessa) pääosissa uomaa. Siltapaikkojen läheisyydessä käytettiin suurempia kertoimia (0,3 supistuesssa ja 0,5 laajentuessa) voimakkaammasta muutoksesta johtuvan energiahäviön lisääntymisen takia (Us Army Corps of Engineers; Hydrologic Engineering Center 2010).

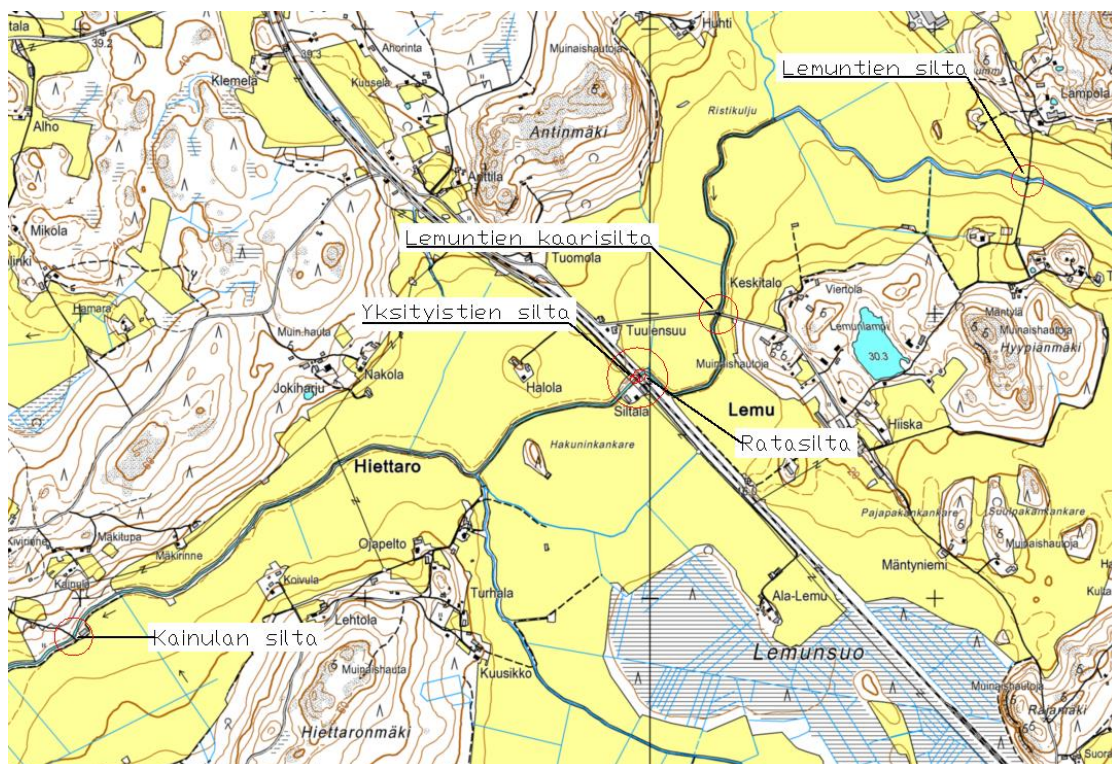
Asteljoen uoman arveltiin kuvien perusteella olevan kohtalaisen puhdas uoma, jossa kuitenkin on jonkin verran kasvillisuutta. Mallissa uomapoikkileikkauksille käytettävät Manningin kertoimet valittiin aluksi Ven Te Chown esittämien kerrointen perusteella. Tämän jälkeen uoman kerroin hienosäädettiin kalibrointien avulla vastaamaan havaittuja virtaamatilanteita. Mallissa käytettiin uoman vastuskertoimena 0,045 ja penkköjen kertoimena 0,035, joka vastaa viljeltyä peltoa.



Kuva 6. Uomapoikkileikkausten syöttämistyökalun näkymä HEC-RAS:ssa

4.5.2 Siltojen poikkileikkaukset

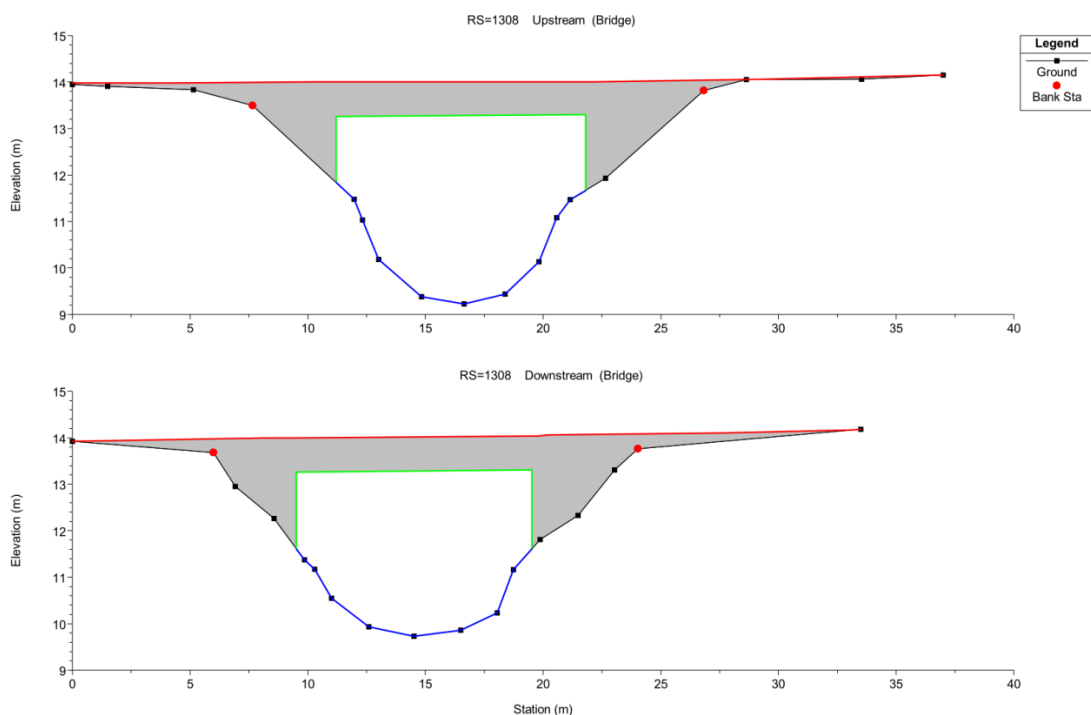
Mallinnettavalla alueella olevia siltoja oli yhteensä kuusi. Näistä mallissa huomioitiin viisi. Mallista jätettiin pois Kiskontien silta, jonka arvioitiin olevan niin suuri, että sen mallintamista ei pidetty tarpeellisenä. Lisäksi sen virtausaukon mittaaminen oli hankalaa suuren koon takia. Nykyisten siltojen lisäksi, malliin luotiin siltapoikkileikkaus myös vanhasta ratasillasta. Vanhan ratasillan poikkileikkauksista käytettiin vertailukohtana tarkasteltaessa uuden putkisillan padottavaa vaikutusta. Vanhan siltauaukon mitat saatiin osin mitatuista tiedoista ja osin vanhoista suunnitelmista. Alla olevassa kuvassa (kuva 7) on esitetty mallinnetut siltapaikat.



Kuva 7. Virtausmallissa huomioitujen siltapaikkojen sijainnit. Taustakartta © Maanmittauslaitos.

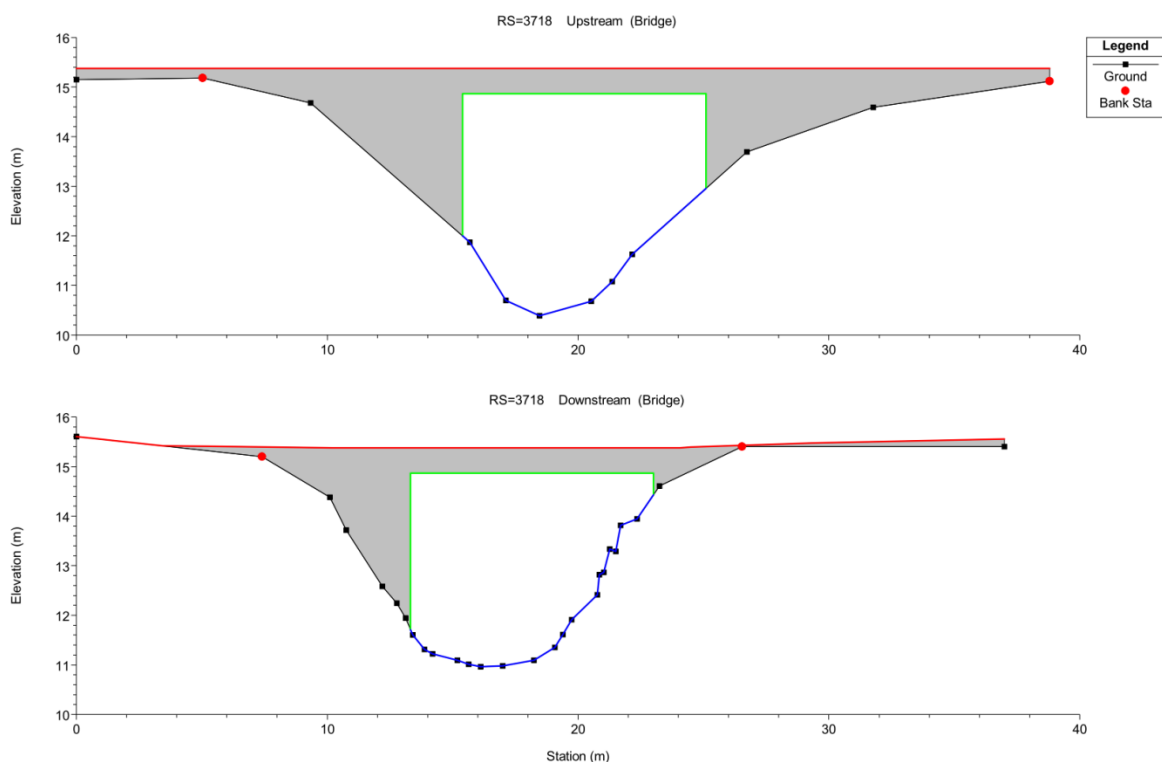
Seuraavaksi on esitelty mallinnettujen siltapaikkojen poikkileikkauksia alajuoksulta alkaen. Siltojen ja rumpujen mallintaminen on erittäin tärkeää, kun pyritään selvittämään tulvimista aiheuttavia mahdollisia pullonkauloja.

Alla (kuva 8) on esitetty Kainulan sillan poikkileikkaukset ylä- ja alavirtaan päin. Silta-aukon virtauspinta-ala on noin 30 m². Silta sijaitsee mittalinjalla noin 2,4 km päässä ratasillalta alavirtaan päin. Yläpuolen (Upstream) poikkileikkaus on mitattu noin 10 metrin päästä sillan keskikohdasta ylävirtaan ja alapuolen (Downstream) poikkileikkaus sillan välittömästä läheisyydestä sen alavirran puolelta.



Kuva 8. Kainulan sillan poikkileikkaukset ylä- ja alavirtaan päin.

Alla (kuva 9) on esitetty ratasillan läheisyydessä, noin 15 metrin päässä sen alapuolella olevan yksityistien sillan poikkileikkaukset ylä- ja alavirtaan päin. Silta-aukon virtauspinta-ala on noin 29 m^2 . Yläpuolen poikkileikkaus on mitattu noin 8 metrin päästä sillan keskikohdasta ylävirtaan ja alapuolen poikkileikkaus sillan välittömästä läheisyydestä sen alavirran puolelta.

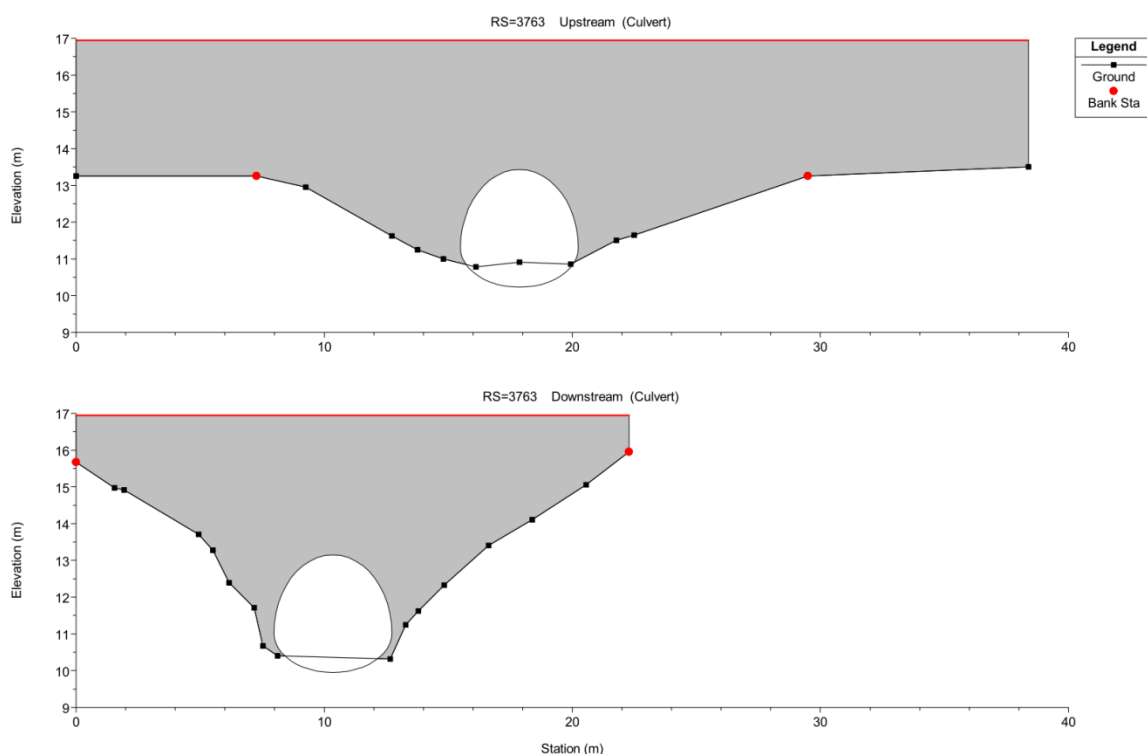


Kuva 9. Ratasillan alapuolella sijaitsevan yksityistien sillan poikkileikkaukset ylä- ja alavirtaan päin.

Seuraavassa kuvassa (kuva 10) on esitetty poikkileikkaukset rautatien putkisillalta ylä- ja alavirran puolelle. Silta paikalla nykyisin oleva putkisilta on asennettaessa ollut matalarakenteinen 5,2 m leveä

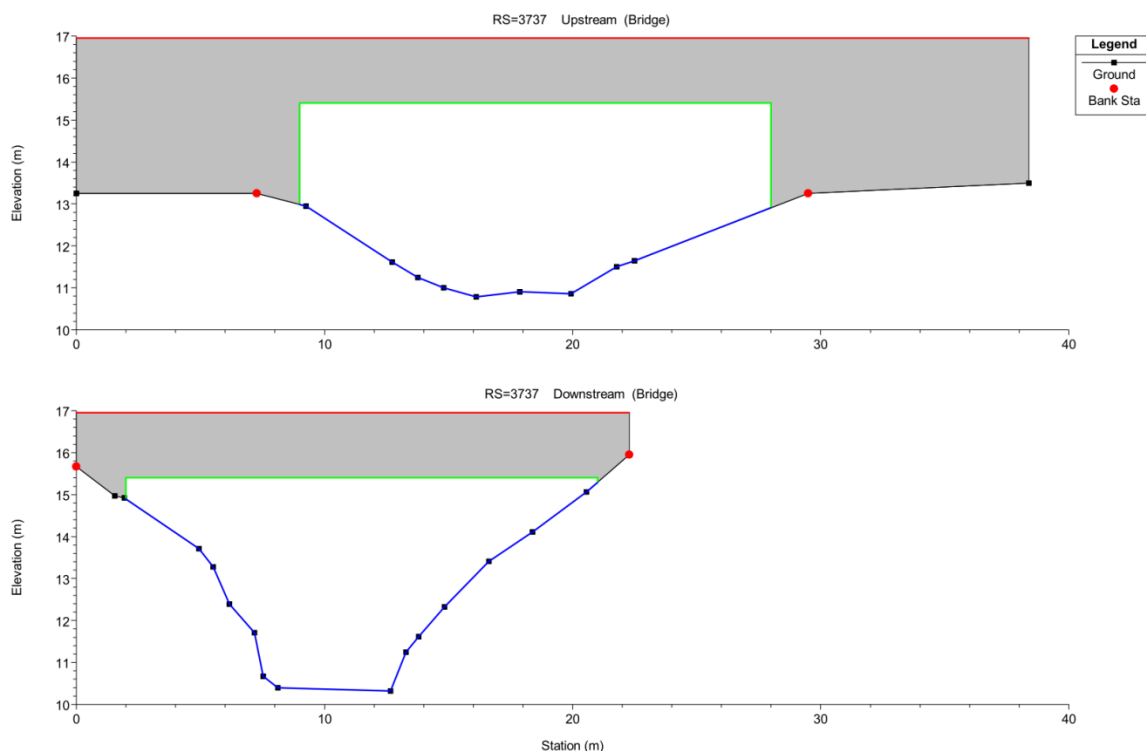
ja 3,2 m korkea putkisilta, jonka virtausaukon pinta-ala on noin 13 m². Mallinnuksessa jouduttiin käyttämään kuitenkin hieman kapeampaa putkisiltaa, koska se oli suurin HEC-RAS:ssa käytettävä putkikoko matalarakenteiselle putkelle. Käytetyn putken leveys mallissa on 4,75 m, korkeus 3,2 m ja virtausaukon pinta-ala noin 12 m².

Yläpuolen poikkileikkaus on mitattu noin 10 metrin päästä rummun yläpäästä ylävirtaan ja alapuolen poikkileikkaus rummun alapään suun välittömästä läheisyydestä. Putkisillan korkeusasema on asetettu mittausten perusteella, jotka tehtiin samaan aikaan uoman syvyyssuhdemittausten kanssa. Putkisilta on asennettaessa upotettu hieman uoman pohjaa alemmaksi virtauksen optimoimiseksi. Uoman pohjan tasoon asennettu putki nostaisi vesipintaa varsinkin pienemmillä ja keskisuurilla virtaamilla.



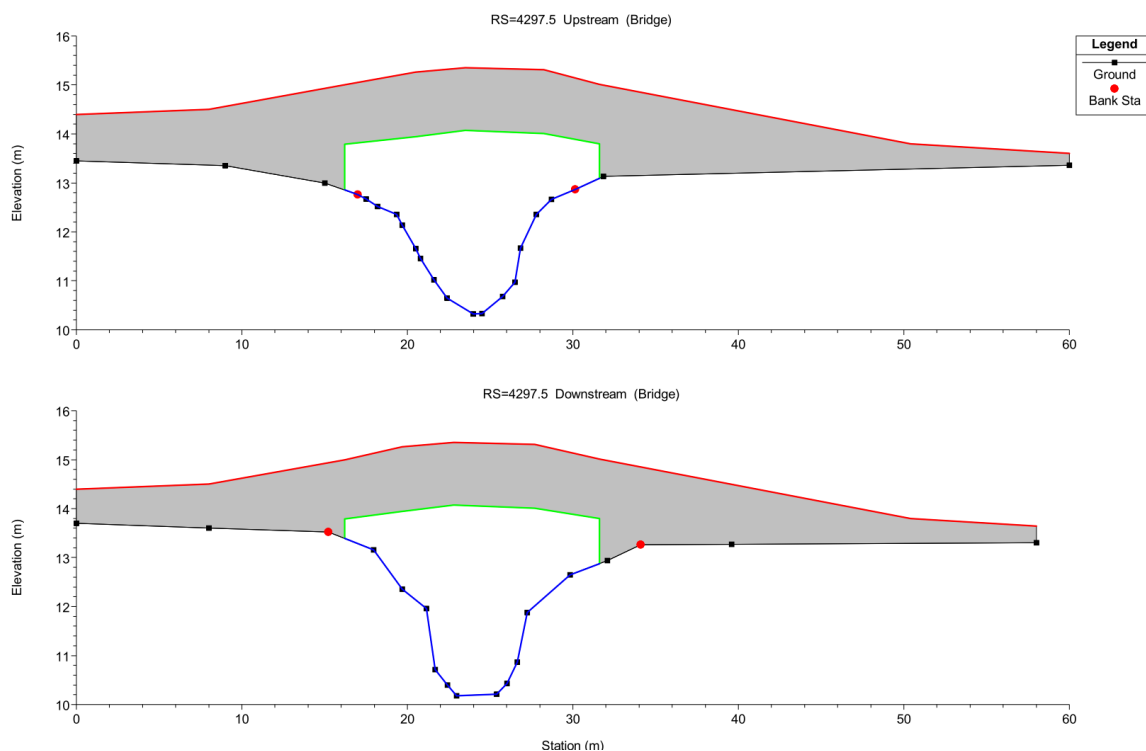
Kuva 10. Rautatien putkisillan poikkileikkaukset ylä- ja alavirtaan päin.

Alla (kuva 11) on esitetty poikkileikkaukset entisestä rautatiesillasta, jonka tilalla on nykyisin aiemmin mainittu putkisilta. Entisen silta-aukon virtausaukon pinta-ala on ollut noin 54 m² ja sitä on käytetty mallissa kuvaamaan entistä tilannetta ratasillan kohdalla. Entinen silta on jätetty uomaan paikalleen ja nykyinen putkisilta on sujutettu sen sisään ja aukko on täytetty putken ympäriltä.



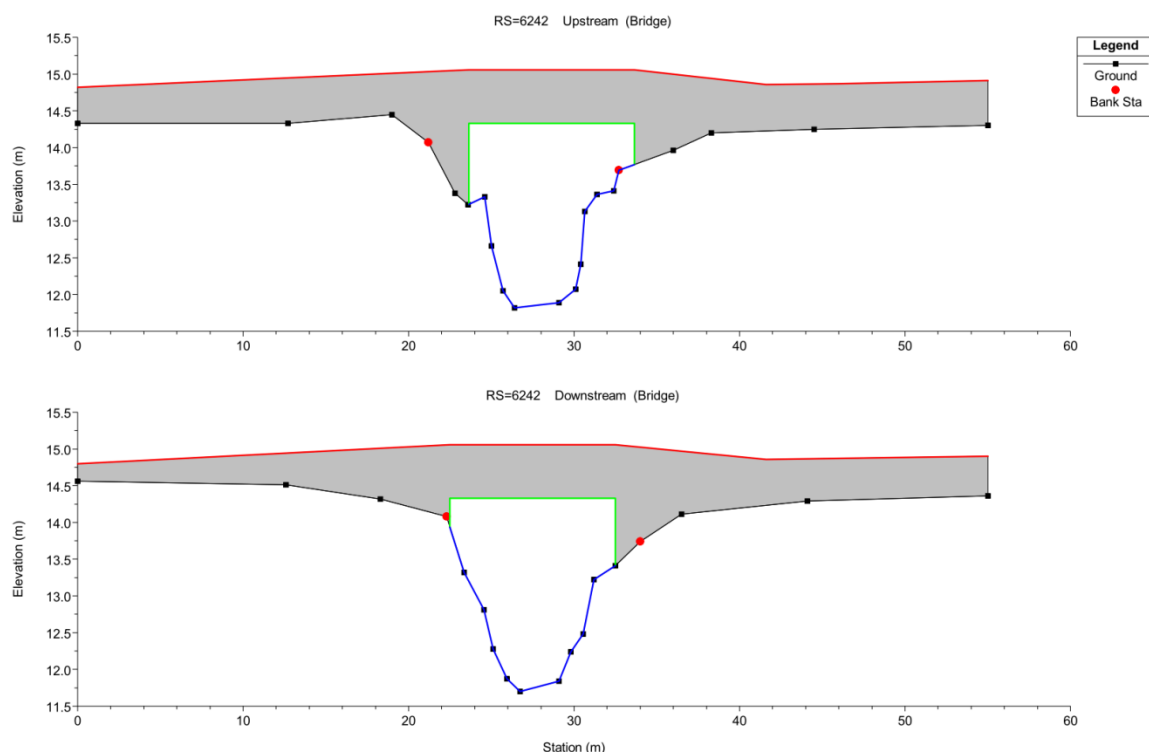
Kuva 11. Entisen rautatiesillan poikkileikkaukset ylä- ja alavirtaan päin.

Alla (kuva 12) on esitetty ratasillalta noin 550 metrin päässä sen yläpuolella olevan Lemuntien kaarisillan poikkileikkaukset ylä- ja alavirtaan päin. Silta-aukon virtauspinta-ala on noin 33 m². Yläpuolen poikkileikkaus on mitattu sillan välittömästä läheisyydestä ja alapuolen noin 10 metrin päästä sillan keskikohdasta alavirtaan. Lemuntien kaarisillalta pyrittiin myös mittaamaan tien alin kohta, sillä vuonna 2011 tapahtuneessa tulvassa havaittiin vedenpinnan nousevan tien alataitteen ylitse ja katkaisevan kulkuyhteydet.



Kuva 12. Lemuntien kaarisillan poikkileikkaukset ylä- ja alavirtaan päin

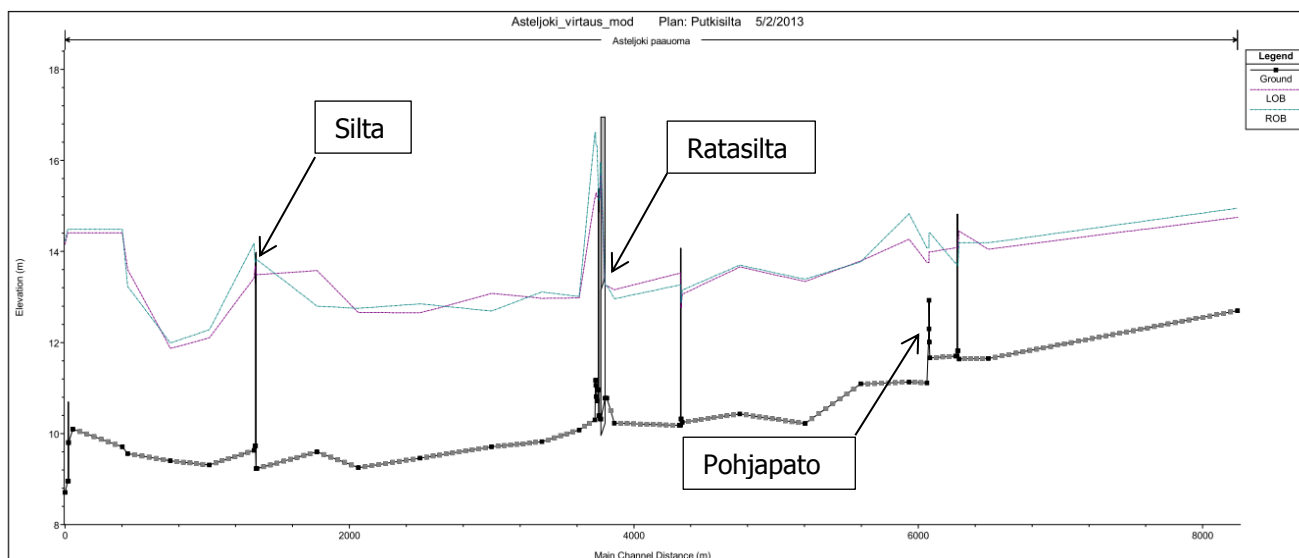
Seuraavaksi on esitetty ratasillalta noin 2,5 km päässä sen yläpuolella olevan Lemuntien sillan poikkileikkaukset ylä- ja alavirtaan päin (kuva 13). Silta-aukon virtauspinta-ala on noin 17,2 m². Yläpuolen poikkileikkaus on mitattu sillan välittömästä läheisyydestä ja alapuolen noin 13 metrin päästä sillan keskikohdasta alavirtaan. Myös ylemmän Lemuntien sillalle johtavaa tietä mitattiin mahdollisten virtausreittien selvittämiseksi.



Kuva 13. Lemuntien sillan poikkileikkaukset ylä- ja alavirtaan päin

4.6 Pituusleikkaus

Syötettyjen uomapoikkileikkausten, muiden rakenteiden sekä näiden keskenäisten etäisyyksien perusteella saadaan uomalle pituusleikkaus, joka on esitty alla olevassa kuvassa (kuva 14). Pituusleikkaus on esitetty tarkemmin liitteessä 2.



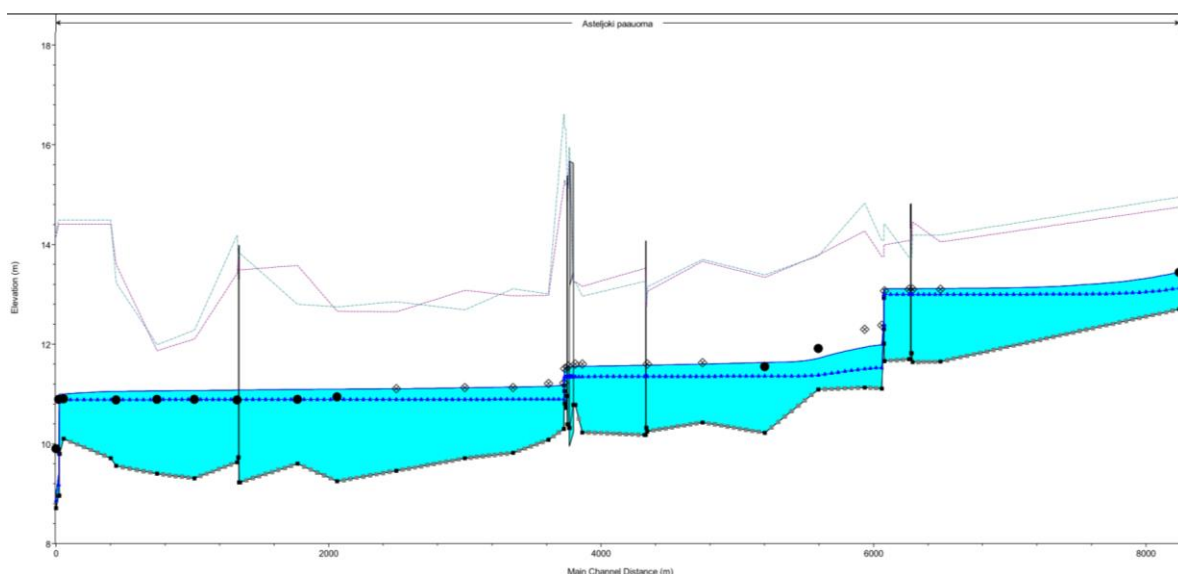
Kuva 14. Uoman pituusleikkaus, jossa esitettynä uoman pohja, penkereet sekä varrella sijaitsevat sillat ja padot.

4.7 Mallin reunaehdot

Malli kattaa vain osan joen pituudesta. Tästä syystä mallinnetun uoman päihin täytyy antaa jokin reunaehto, joka kuvaa, mitä tapahtuu mallinnetun uoman alkaessa tai loppuessa. Reunaehdoksi voidaan asettaa esimerkiksi tunnettu vedenkorkeus, jolloin se kuvastaisi joen alkamista tai loppumista järveen tai mereen. Koska mallinnus tehdään keskeltä uomaa, asetettiin rajaksi arvioitu uoman kaltevuus siinä pisteessä. Virtausmallin yläpään kaltevuudeksi arvioitiin maastonmuotojen perusteella 0,5 ‰ ja alapään kaltevuudeksi 4 ‰. Alapään kaltevuus on huomattavasti suurempi, sillä viimeistä mitattua poikkileikkausta eli myllyn ylivirtauspatoa seuraa Pytönkosken koski.

4.8 Mallin kalibrointi

Virtausmallin luotettavuuden parantamiseksi tehtiin kaksi kalibrointiajoa. Mallin kalibroinnissa käytettiin syvyys-suhtemittausten yhteydessä mitattuja vedenpinnan korkeuksia, joiden avulla säädettiin mm. uoman karkeuskerrointa. Uoman säädöt asetettiin siten, että tietty virtaama, jonka arvioitiin vallitsevan mittausajankohtana, antaa mallissa mahdollisimman samat arvot kuin todelliset mitatut arvot. Kalibroinneissa käytetyt arvot (ARVIO 9.1.2013 ja ARVIO 25.2.2013) on esitetty luvussa 4.2.2 olevassa taulukossa (taulukko 3). Alla (kuva 15) on esitetty kalibroidun uoman pituusleikkaus.

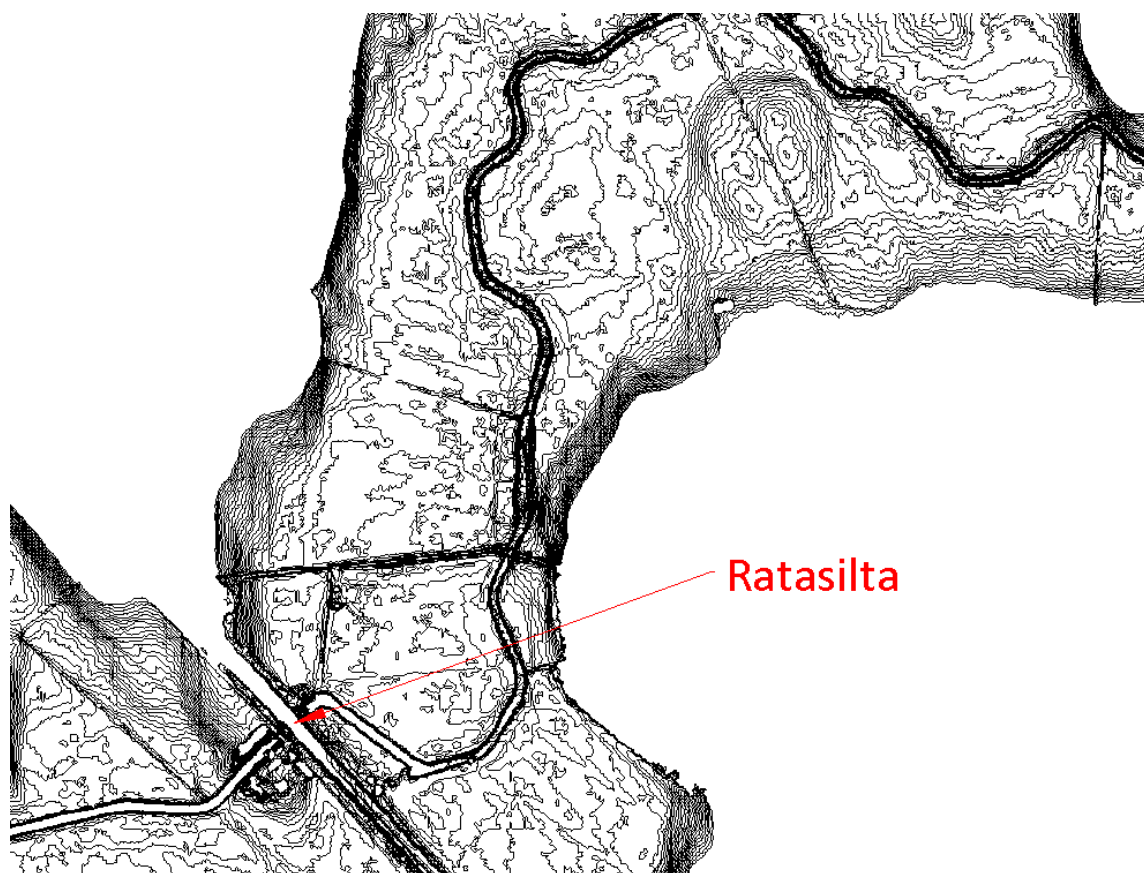


Kuva 15. Pituusleikkaus, jossa mallin kalibrointiin käytetyt mitatut veden pinnankorkeudet (9.1.2013 avoin neliö, 25.2.2013 pallo) sekä mittausten aikaisten arvioitujen virtaamien perusteella suoritettut mallit

4.9 Uoman ympäristön topografia

Syvyysuhdemittausten lisäksi Asteljoen ympäristöstä luotiin korkeusmalli tulva-alue tarkastelua varten. Korkeusmallin luomisessa käytettiin Maanmittauslaitoksen internetpalvelusta vapaasti ladattavissa olevaa laserkeilausaineistoa. Aineisto sisältää muun muassa kasvillisuuden, rakenteiden sekä maanpinnan korkeustietoa, mutta tässä työssä hyödynnettiin vain maanpinnan korkeustietoa. Aineisto harvennettiin ja käännettiin oikeaan koordinaatistoon 3D-win ohjelmistolla, jonka jälkeen pisteistä luotiin neliöverkko Novapoint-sovelluksen avulla. Harvennus tehtiin siten, että pisteiden väliseksi minimietäisyydeksi tuli 2 metriä. Neliöverkko muodostuu neliöistä, jotka rakentuvat neljästä pisteestä. Neliöiden jokaisella kulmalla on pisteen mukainen korkeustaso.

Neliöverkosta tuotettiin tämän jälkeen korkeuskäyrät. Käyrät piirrettiin 10 ja 20 cm välein mallinnetun uoman osuudelta sekä Kuuttasojan ympäriltä. 10 cm välein tehtyjä käyriä hyödynnettiin putkisillan yläpuoleisilla alueilla, joiden perusteella tehtiin arvio satohävikistä. 20 cm välein tehtyjä käyriä taas käytettiin putkisillan alapuoleisilla osuuksilla, jotka eivät sisällyneet korvaushakemuksen piiriin. Korkeuskäyrät luotiin riittävän laajalti, jotta tulva-alue saatiin määritettyä halutulta alueelta. Alla olevassa kuvassa (kuva 16) on esitetty 10 cm välein luodut korkeuskäyrät.

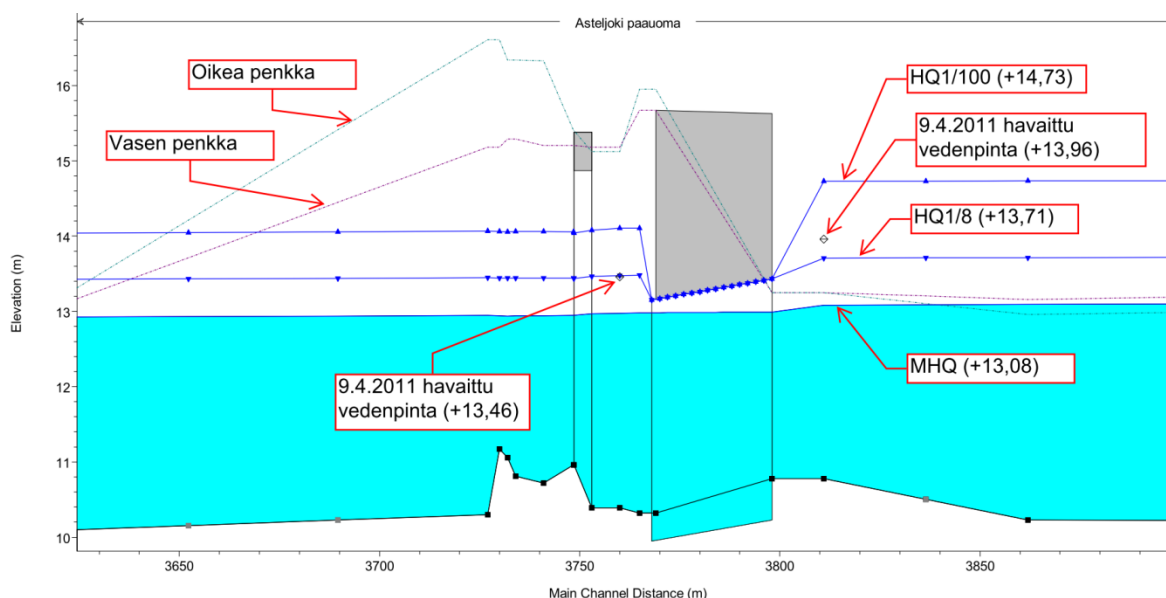


Kuva 16. Havainnekuva luoduista korkeuskäyristä ratasillan yläpuoleisella alueella

5 TULOKSET

5.1 Putkisillan vaikutus vedenpinnan korkeuteen

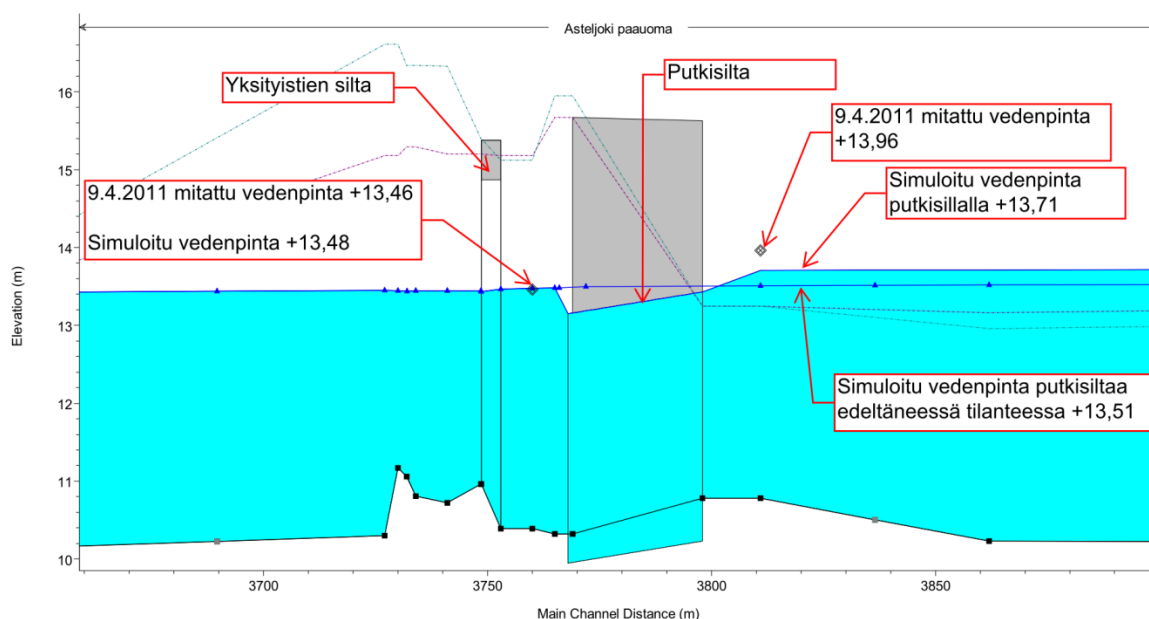
Alla (kuva 17) on kuvattu putkisillan kohdalla tapahtuvaa vedenpinnan vaihtelua eri virtaaman toistuvuuksilla. Putkisillan aiheuttaman padotuksen vaikutus vedenkorkeuteen kasvaa selvästi virtaaman lisääntyessä.



Kuva 17. Mallin antama pituusleikkaus uomasta ratasillan kohdalla

Mallintamisen yhtenä lähtökohta on toiminut Asteljoen järjestely-yhtiön kertoma siitä, että ennen putkisillan rakentamista alueella ei ole havaittu merkittävää tulvintaa, eikä vanhan siltarakenteen yläpuolella ole havaittu juurikaan padotusta. Tästä syystä tuloksia tulee verrata myös putkisillan ja vanhan sillan välillä. Tuloksissa on tarkasteltu lähinnä kerran 8 vuodessa toistuvaa virtaamatilannetta, sillä sen pohjalta tehdään jatkotoimenpiteet.

Kuvassa 18 on esitetty pituusleikkaus ratasillan kohdalta arvioidulla kerran 8 vuodessa toistuvalla virtaamalla $16,8 \text{ m}^3/\text{s}$, jonka pitäisi vastata 9.4.2011 tulvavirtaamaa. Kuvassa on esitettyä myös 9.4.2011 mitatut vedenpinnan korkeudet. Tarkasteltavan siltapaikan alapuolella simuloitu vedenkorkeus on 2 cm korkeammalla, kuin 9.4.2011 mitatussa tilanteessa. Siltapaikan yläpuolella simuloitujen vedenpinnat jäivät selvästi alle 9.4.2011 mitatun korkeuden (+13,96), ollen putkisillalla +13,71 ja vanhalla sillalla +13,51.



Kuva 18. Pituusleikkaus putkisillalta kerran 8 vuodessa toistuvalla ylivirtaamalla, jonka arvioitiin olleen 9.4.2011 tapahtuneen tulvan toistuvuus.

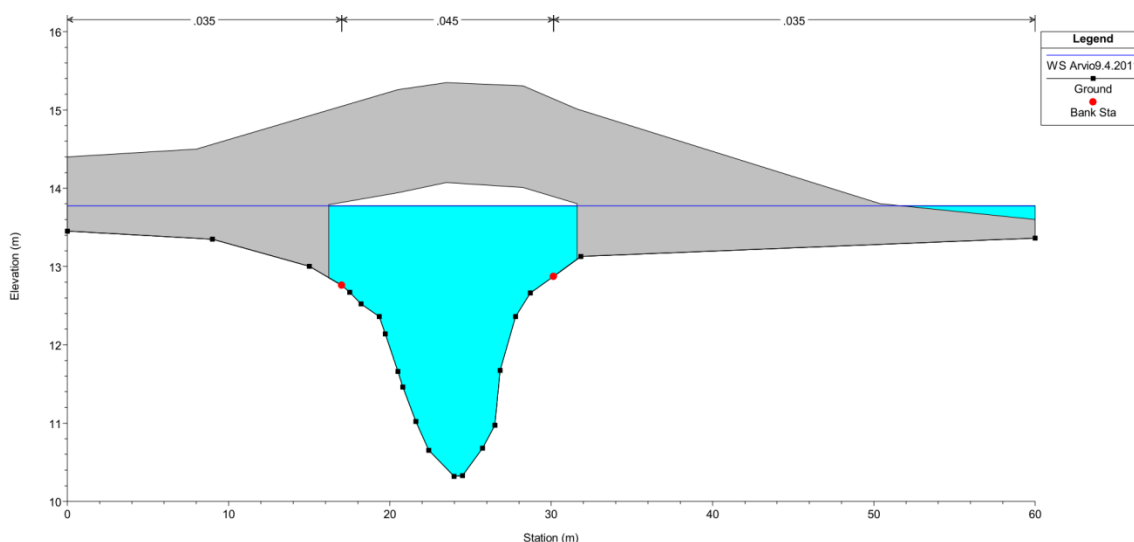
Simulointien tulosten perusteella putkisillan aiheuttama padotus keskiylivirtaamalla MHQ on 7 cm, kerran 8 vuodessa toistuvalla ylivirtaamalla ($HQ_{1/8}$) 20 cm ja kerran 100 vuodessa toistuvalla ylivirtaamalla ($HQ_{1/100}$) 60 cm. Simuloinnin tuloksista tarkasteltava padotus on laskettu putkisillan ja vanhan sillan tilanteissa ilmenevien vedenpintojen erotuksesta putkisillan yläpuoleisessa poikkileikkauksessa. Tulokset putkisillan padotuksista on esitetty alla olevassa taulukossa (taulukko 6).

Taulukko 6. Simuloinnin antama padotuksen määrä eri virtaaman toistuvuuksilla. Padotus on laskettu uuden putkisillan ja vanhan sillan välillä niitä edeltäneen poikkileikkauksen kohdalla. Putkisillan aiheuttamaa padotusta verrattiin lisäksi sillattomaan tilanteeseen eli luonnontilaan.

	MHQ	$HQ_{1/8}$	$HQ_{1/100}$
Padotus vs. luonnontila (cm)	+7	+20	+60
Padotus vs. vanha silta (cm)	+7	+20	+58

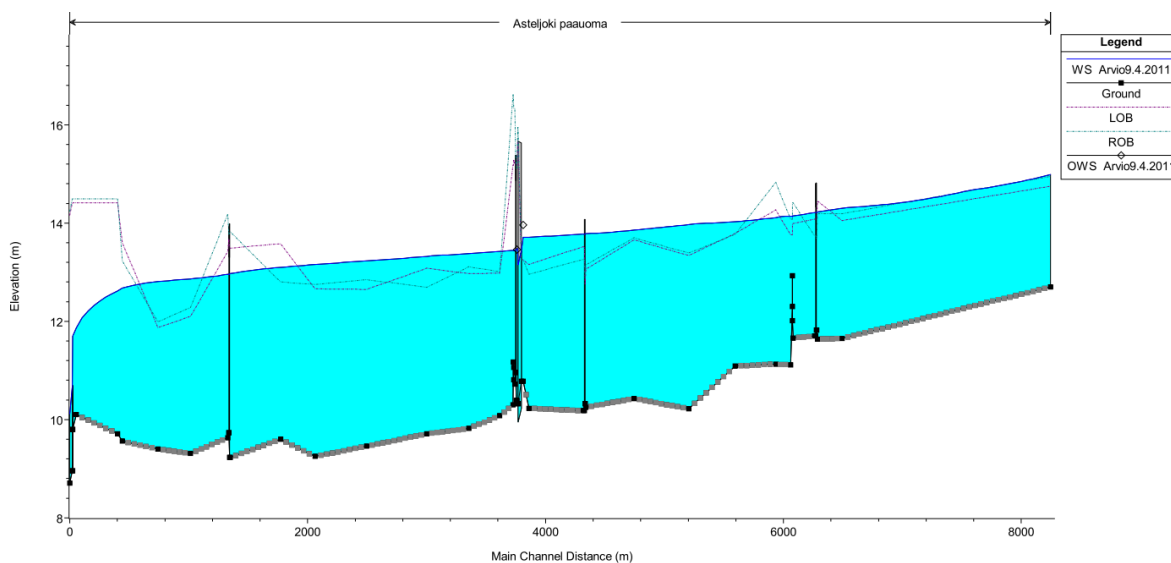
5.2 Kerran 8 vuodessa toistuvan virtaaman vaikutus muilla alueilla

Kuten aiemmin todettiin, oli 9.4.2011 tapahtuneen tulvan aikana Lemuntie osin veden alla. Tämä havaittiin myös mallin perusteella. Seuraavassa kuvassa (kuva 19) on esitettynä Lemuntien kaarisillan poikkileikkaus, josta havaitaan tulvaveden ylittäneen tien alataitteen. Lemuntien kaarisillan kohdalla tien alimman kohdan korkeudeksi mitattiin +13,60 ja kerran 8 vuodessa toistuvan virtaaman vedenkorkeudeksi +13,77. Simuloinnin perusteella tie on ollut siis noin 17 cm vedenpinnan alapuolella.



Kuva 19. Simuloitu virtaustilanne Lemuntien kaarisillalla kerran 8 vuodessa toistuvalla ylivirtaamalla

Muiden kuin putkisillan kohdalla ei havaittu merkittävää padotusta. Alla olevasta pituusleikkauskuvasta (kuva 20) voidaan kuitenkin havaita kerran 8 vuodessa toistuvan virtaaman aiheuttaman vedenpinnan ylittävän uoman penkereet (punainen ja vihreä pisteiviiva) monin paikoin niin putkisillan ylä- kuin alapuolellakin. Ylittävää osuutta (tulviva kohta) on yhteensä jopa muutamia kilometrejä.



Kuva 20. Mallinnetun osuuden pituusleikkaus ja kerran 8 vuodessa toistuvan virtaaman aiheuttama vedenkorkeus

5.3 Asteljoen tulva-alueet

Simuloinnista saatuja tuloksia käytettiin putkisillan padotuksen tutkimisen lisäksi Asteljoen tulva-alueen määrittämiseen. Luotujen korkeuskäyrien sekä mallista saatujen vedenpinnan korkeuksien avulla luotiin arvio 9.4.2011 tapahtuneesta tulvasta. Tulva-alue luotiin korkeuskäyrien mukaisesti, valitsemalla saman korkeuden omaava käyrä, minkä mallinnus antoi vedenpinnan korkeudeksi. Putkisillan yläpuolella korkeuskäyrää vaihdettiin seuraavaan (+ 10 cm) siinä kohtaa, missä mallin vesipinta oli lisääntynyt 10 cm. Kerran 100 vuodessa toistuvan tulvan laajuutta ei arvioitu, sillä tulva-alue ulottuisi merkittävästi yli mallinnetun alueen. Kerran 100 vuodessa toistuvan tulvan arviota ei

voisi pitää myöskään kovin luotettavana, sillä tulvan laajuus vaatisi epätasaisen virtaaman mallia, joka huomioisi säiliötilavuuden täyttymisen.

Putkisillan vaikutusta 9.4.2011 tapahtuneeseen tulvaan arvioitiin vertaamalla simuloinnin antamaa tulosta entisessä sekä nykyisessä tilanteessa. Putkisillan aiheuttamaa tulva-alueen lisäystä tarkasteltiin lisäksi huomioiden tulvanaikainen mittaus sekä maanomistajien huomioidut. Alla olevassa taulukossa (taulukko 7) on esitetty tulva-alueiden laajuudet eri tilanteissa. Koska varsinainen mallinnettu osuus tehtiin vain Asteljoelle, erotettiin Asteljoen ja Kuuttasojan arvioidut tulva-alueet toisistaan. Kuuttasojan tulva-alue perustuu mitattuun vedenkorkeuteen, arvioituun vedenpinnan nousuun Kuuttasojassa sekä asukashavaintoihin.

Taulukko 7. Arvioidut tulva-alueen laajuudet hehtaareina Asteljoessa sekä Kuuttasojassa vanhalla ratasillalla sekä uudella putkisillalla.

	Asteljoki	Kuuttasoja	Yhteensä	
Entinen ratasilta	79	59	138	ha
Nykyinen putkisilta	97	87	184	ha
Putkisilta + tulvanaikaiset havainnot	101	87	188	ha

Vuoden 2011 keväällä tapahtuneen tulvan laajuudeksi ratasillan yläpuoleisilla osilla arvioitiin mallin ja havaintojen perusteella yhteensä 188 ha, josta 101 ha sijoittui Asteljoen varrelle ja 87 ha Kuuttasojan varrelle. Pelkän simuloinnin perusteella Asteljoen tulva-alueeksi arvioitiin 97 ha ja Kuuttasojan 87 ha, eli yhteensä 184 ha. Pelkän simuloinnin mukainen tulva-alue kuvaa jäätöntä tilannetta, sillä simuloinnissa ei huomioitu jäiden vaikutusta.

Jos keväällä 2011 tapahtuneen tulvan aikaan nykyisen putkisillan tilalla olisi ollut sitä edeltävä silta, olisi tulva-alueen laajuus ollut simuloinnin mukaan Asteljoessa 79 ha, Kuuttasojassa 59 ha ja yhteensä 138 ha. Kun putkisillan vaikutusta tulva-alueeseen arvioidaan mitatun vedenkorkeuden, simuloinnin ja asukashavaintojen avulla, voidaan todeta putkisillan lisänneen tulva-aluetta noin 50 ha eli noin 36 %. Jos vanhaa tilannetta ja nykytilannetta verrataan pelkän simuloinnin avulla, saadaan tulva-alueen lisääntymiseksi putkisillalla 46 ha, eli noin 33 %. Alla olevassa kuvassa (kuva 21) on esitetty arvioidut tulva-alueet putkisillan läheisyydessä. Koko mallinnetulle osuudelle tehty tulva-aluekartta on esitetty liitteessä 3.



Kuva 21. Arvioidut tulva-alueet ratasillan läheisyydessä.

Mallin antamien vedenkorkeuksien avulla tarkasteltiin lisäksi putkisillan alapuoleisen osan tulvimista. Putkisillan alapuoleisen osan tulva-alueen laajuudeksi saatiin molemmissa tilanteissa 122 ha.

Tulvimista tapahtui jonkin verran myös keskiylivirtaamalla (MHQ). Putkisillan yläpuolella tulva-alueen kooksi arvioitiin entisellä sillalla noin 6 ha ja putkisillalla noin 6,4 ha. Alapuoleisella osuudella tulva-alueen laajuudeksi arvioitiin molemmissa tilanteissa 5,4 ha.

6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää virtausmallintamisen avulla Asteljoen tulvaherkkyttä sekä Asteljoen ylittävän Kirkkonummi–Turku rautatien yhteyteen rakennetun putkisillan vaikutusta sen yläpuoleisiin tulva-alueisiin. Suoritettujen simulointien ja paikallisten asukkaiden tekemien havaintojen perusteella, voidaan Asteljoen uoman todeta olevan tulvaherkkä. Kuten aiemmin todettiin, maatalousalueella kuivatuksessa hyödynnetty uoma tulisi olla mitoitettu kerran 20 vuodessa toistuvalla ylivirtaamalle. Asteljoen pituuskaltevuus on maatalouden kuivatuksessa suositeltua minimikaltevuutta pienempi, joka vaikuttaa oleellisesti uoman vedenjohtokykyyn. Uoman vedenjohtokyky ylittyikin paikoin jo keskiylivirtaamalla, jolloin alueella tulvii niin putkisillan ylä- kuin alapuolella. Voidaan siis todeta, että Asteljoella on hyvin todennäköisesti tapahtunut tulvimista myös putkisiltaa edeltäneessä tilanteessa.

Mallinnuksen perusteella voidaan todeta putkisillan vaikuttavan sen yläpuoleisen vedenpinnan korkeuteen suurilla virtaamilla. Lähtökohtaisestikin voidaan uutta putkisiltaa pitää vedenjohtokyvyltään heikompana kuin vanhaa ratasiltaa, sillä sen virtauspinta-ala (13 m^2) on noin 24 % vanhasta silta-aukosta (54 m^2) ja sen pituuskaltevuudessa ei ole merkittävää eroa entiseen. Huomioitavaa on kuitenkin myös se, että entisessä tilanteessa virtaamaa rajoittavaksi kohdaksi on muodostunut hieman alempana oleva yksityistien silta, jonka virtausaukon pinta-ala on noin 29 m^2 .

Vuonna 2011 tapahtuneen tulvan yhteydessä mitattu noin 50 cm padotus on lähes tuplasti suurempi (26 cm), kuin mallin antama padotus. Tätä voi selittää esimerkiksi tulvan aikaisten havaintojen epätarkkuus sekä mallin puutteet ja yksinkertaistukset. Todennäköisesti suurin mallinnettujen ja havaintujen vedenpinnankorkeuksien eroja selittävä tekijä on 11.4.2011 tulvan yhteydessä esiintyneet jääpadot, joita ei mallinnuksessa otettu huomioon. Jäätilannetta ei ollut järkevää lähteä mallintamaan, sillä alueen jääoloista ei ole riittävää tietoa.

Rautateiden alituksiin käytettävien rumpujen aukkolausuntojen mitoituksessa on yleisesti käytetty Seunan k-menetelmää, jolla pystytään karkeasti arvioimaan rummun aiheuttamaa padotusta (Suomen ympäristökeskus 2010, 24-26). Putkisillalle tehdyssä tarkastelussa Seunan k-menetelmällä saatiin padotuksen suuruudeksi noin 10 cm, kun virtausaukon kokona käytettiin 13 m^2 . Tämä jää 16 cm pienemmäksi, kuin mallin antama padotus. Rummun mitoitusta tarkasteltiin lisäksi Tolkmittin, sekä Morris & Wiggertin äkillisen muutoksen menetelmillä (Suomen ympäristökeskus 2010, 26-30). Näillä menetelmillä selvitettiin kerran 8 vuodessa toistuvalla virtaamalle ($16,8 \text{ m}^3$) soveltuva rumpuaukon koko. Tolkmittin menetelmä antoi riittäväksi vesiaukon pinta-alaksi $10,6 \text{ m}^2$ ja äkillisen muutoksen menetelmä $13,4 \text{ m}^2$. Laskennassa sallittiin Seunan k-menetelmän antama 10 cm padotus. Näin ollen nykyisen putkisillan pitäisi periaatteessa olla riittävä johtamaan tarkastellun virtaaman, kun padotusta sallitaan 10 cm.

Kun 11.4.2011 mitatun vedenpinnan korkeutta ja mallin antamaa sen aikaisen virtaama-arvion aiheuttamaa vedenkorkeutta putkisiltaa edeltäneessä tilanteessa verrataan, todetaan putkisillan lisäneen tulva-aluetta noin 38 %. Kun tulva-aluetta verrataan mallin antamien tulosten, eli putkisillan ja

entisen tilanteen välillä (jääjän tilanne), todetaan tulva-alueen lisääntyvän putkisillan asentamisen seurauksena noin 33 %. Putkisillan yläpuolella tapahtuvan tulvinnan lisäksi, tulvintaa tapahtuu myös sen alapuolella. Kerran 8 vuodessa toistuvalla ylivirtaamalla arviotiin putkisillan alapuoleisen osan tulvan laajuuden olevan noin 122 ha. Tällöin arvioitu tulvan laajuus koko mallinnetun alueen sekä Kuuttasojan osalta on noin 310 ha. Putkisillalla ei todettu olevan vaikutusta sen alapuoleisiin tulviin.

Kun virtausmallin lisäksi huomioitiin 9.4.2011 mitattu tulvakorkeus, sekä maanomistajien kommentit, saatiin tulva-alueen kokonaispinta-alaksi 188 ha, josta Kuuttasojan osuus oli 87 ha (n. 46 %). Kuuttasojan osalta tuloksessa tulee huomioida se, että arvioidut vedenpinnan korkeudet perustuvat mallin avulla arvioituun tulvakorkeuteen Asteljoen kohdalla, Asteljoen vedenpinnan muutokseen mentäessä kohti ylivirtaa sekä maanomistajien havaintoihin. Tulvaan vaikuttavia tekijöitä joita ei otettu huomioon, ovat Kuuttasojan pituuskaltevuus sekä sen varrella olevat rakenteet, kuten Erveläntien silta.

Mallin perusteella luotuja tulva-aluearvioita tulee pitää lähinnä suuntaa antavina. Mallissa käytettyjen uomapoikkileikkausten leveydet eivät ole riittäviä kuvaamaan veden leviämistä pelloille. Poikkileikkausten lisäksi leviämisen huomioon ottaminen olisi vaatinut epätasaisen virtaaman mallia. Pellot täyttyvät hitaasti, joten hyvin laajojen alueiden täyttyminen vaatii pitkään kestävä kertymää. Keskiylivirtaamalla tapahtuvaan tulvintaan putkisilta ei juuri vaikuttanut.

Pohjapadoilla ei ole juurikaan merkitystä tulvan aikaisilla virtaamilla. Ne saattavat jopa hieman alentaa paikallisesti vedenpintaa kasvavan virtausnopeuden vuoksi. Putkisillan alapuolella sijaitsevalla pohjapadolla voi kuitenkin olla pieni merkitys yläpuoleiseen vedenpinnankorkeuteen tulvatilanteissa. Mahdollinen vaikutus voisi johtua siitä, että pohjapato säilyttää alivirtaaman aikaan putkisillan kohdalla tasaisen vesipinnan, jolloin sinne pääsee kertymään tasainen jääpeite, joka paksuntuu talven edetessä. Jääpeite voisi teoriassa estää kevättulvien alkaessa veden virtaamista.

Kalibrointiajojen pituusleikkauksessa (kuva 15) noin 5200 metrin kohdalla voidaan mitattujen pisteiden kohdalla huomata, ettei mallinnettu vedenpinta vastaa mitattua. Tämä johtuu siitä, että kyseisellä kohdalla uoman pengeri oli eroosion johdosta sortunut ja muodostanut padottavan kummun. Tämä havaittiin vasta syvyysuhdemittausten jälkeen, joten se jäi huomioimatta mallissa. Lisäksi uoman korkein piste (noin 8200 m kohdalla) poikkeaa mallinnetusta vedenkorkeudesta. Tämä saattaa johtua siitä, että viimeisen ja sitä edeltävän mitatun poikkileikkauksen kohdalla on jokin vedenpintaa korkealla pidättävä rakenne, jota ei havaittu. Viimeisen ja sitä edeltävän poikkileikkauksen etäisyys toisistaan on noin 1700 m. Muilta osin vertailuvesistön avulla määritetyt virtaamat tuottivat mallin kalibroinnin jälkeen mitattuja vedenkorkeuksia vastaavat vedenpinnan korkeudet.

Tulvaongelmien vähentäminen on tarkastellulla alueella haastavaa. Nykyisen putkisillan kapasiteetin lisääminen helpottaisi sen yläpuoleisten osien tulviin, mutta ei poistaisi sitä. Kapasiteetin kasvattaminen esimerkiksi rakentamalla uusi silta, tai poraamalla uusi putki radan ali, olisi todennäköisesti myös hyvin kallis hanke. Uoman säännöllinen kunnostaminen niittämällä voisi helpottaa hieman, mutta sekään ei todennäköisesti poistaisi tulvimisongelmaa. Suurimman helpotuksen tulviin saisi to-

dennäköisesti laskemalla mallinnetun osuuden loppuun sijoittuvaa osuutta, jossa nykyinen uoman pohja nousee virtaussuuntaan mentäessä. Liitteen 2 sivulla 7, on esitetty tilanne, jossa uoman loppuosa on laskettu laskevaan virtaussuuntaan mentäessä. Tilanteessa Myllyn ylisyoösyypato on säilytetty, jolloin myös alivirtaamalla uomassa riittäisi vettä nykyiseen tapaan. Tällöin putkisillan yläpuolella oleva vedenpinta laskisi kerran 8 vuodessa toistuvalla ylivirtaamalla noin 13 cm. Ongelmana voisi kuitenkin olla kasvava virtausnopeus, joka lisäisi uoman eroosiota. Edellä mainitussa tilanteessa veden virtausnopeus kasvaisi mallin mukaan juuri ennen Myllyn ylisyoösyypatoa 1,5 – 2,0 m/s.

Vedenkorkeuksien ja tulva-alueiden määrittäminen mallintamalla on tehty helpoksi ja toimivaksi, verrattuna taulukkolaskentamenetelmään. Mitä pidempi ja monimuotoisempi uoma, sitä enemmän mallintaminen helpottaa ja nopeuttaa määrittäystä. Taulukkolaskenta soveltuu hyvin muutaman poikkeuksen perusteella laskettavan virtaustilan määrittämiseen, mutta jokainen huomioon otettava muutos lisää työmäärää merkittävästi. Lisäksi erilaisten rakenteiden huomioon ottaminen taulukkolaskennassa on haastavaa.

LÄHTEET

- HELSINKI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY - DEPARTMENT OF CIVIL AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING. 2009. Hydraulics – Computational aspect of flow in open channels. [Verkkojulkaisu] [Viitattu: 2013-11-2] Saatavissa: http://civil.aalto.fi/fi/tutkimus/vesi/www_oppikirjat/yhd_122010/
- LEIVISKÄ, P. 2012. Avouomavirtaus, perusteita [sähköpostikeskustelu]. Vastaanottaja Päivi Paavilainen. [Viitattu 2013-05-24]
- MYLLYOJA, I. 2013-03-11. Asteljoen mitatut vedenkorkeudet [sähköpostiviesti]. Vastaanottaja Päivi Paavilainen. [Viitattu 2013-03-11]. Saatavissa: Ely-keskus, Myllyoja Ilkka.
- NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION, 2012. Navier-Stokes Equations [Viitattu 2013-12-2] Saatavissa: <http://www.grc.nasa.gov/WWW/k-12/airplane/nseqs.html>
- NIEMINEN, K 2013-01-28. Kevättulvan 2011 toistuvuus Kiskonjoen vesistöalueella [sähköpostiviesti]. Vastaanottaja Päivi Paavilainen. [Viitattu 2013-02-12]. Saatavissa: Ely-keskus, Nieminen Kari
- LOUNAI-SUOMEN YMPÄRISTÖKESKUS, 2009-09-28. Asteljoen uoman siirtäminen Perniön Ervelän liikennepaikan ratasillan kohdassa, Salo [Lausunto Dnro 2066/6062/2009].
- ODOT HYDRAULICS MANUAL. Appendix A – Hydraulic roughness (Manning's n) Values of Conduits and Channels. [verkkojulkaisu]. [viitattu 2013-11-27]. Saatavissa: ftp://ftp.odot.state.or.us/techserv/Geo-Environmental/Hydraulics/Hydraulics%20Manual/Chapter_08/Chapter_08_Appendix_A/
- PERÄLÄ, J. & REUNA, M. 1990. Lumen vesiaron alueellinen ja ajallinen vaihtelu Suomessa. Vesi- ja ympäristöhallinnon julkaisuja A 56. Vesi- ja ympäristöhallitus, Helsinki.
- RUOTSALAINEN, K. Tulvakuvia [sähköpostiviesti]. Vastaanottaja Päivi Paavilainen. Viitattu [2013-04-01].
- MUSTONEN, S. (toim.). 1986. Sovellettu hydrologia. Helsinki. Vesiyhdistys ry.
- SEUNA, P. 1983. Influence of physiographic factors on maximum runoff. Vesientutkimuslaitoksen julkaisuja 50. Helsinki. Vesihallitus.
- SUOMEN YMPÄRISTÖKESKUS, 2010. Lähtötiedot vesiaukon mitoituksesta [Verkkomateriaali]. Teoksessa Syrjälä, K. & Järvenpää, L. (toim.) Silta- ja rumpulausuntojen valmistelu – ilmastonmuutoksen huomioonottaminen. [Viitattu 2013-04-04] Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=116919&lan=fi>

SUOMEN YMPÄRISTÖKESKUS, 2007. [Verkkomateriaali]. Pajula, H. & Järvenpää, L. (toim.) Maan-
kuivatuksen ja kastelun suunnittelu – Työryhmän mietintö. [Viitattu 2013-04-15] Saatavissa:

<http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=74287&lan=fi>

TALVINEN, T. 2012. Vantaan Kylmäojan itäisen haaran mallinnus: Kaupungistumisen ja ilmaston-
muutoksen vaikutukset puron virtaamaan. Aalto yliopisto. Insinööritieteiden korkeakoulu. Diplomi-
työ. [Viitattu 2013-11-27]. Saatavissa: <http://civil.aalto.fi/fi/tutkimus/vesi/opinnaytteet/diplomityot/>

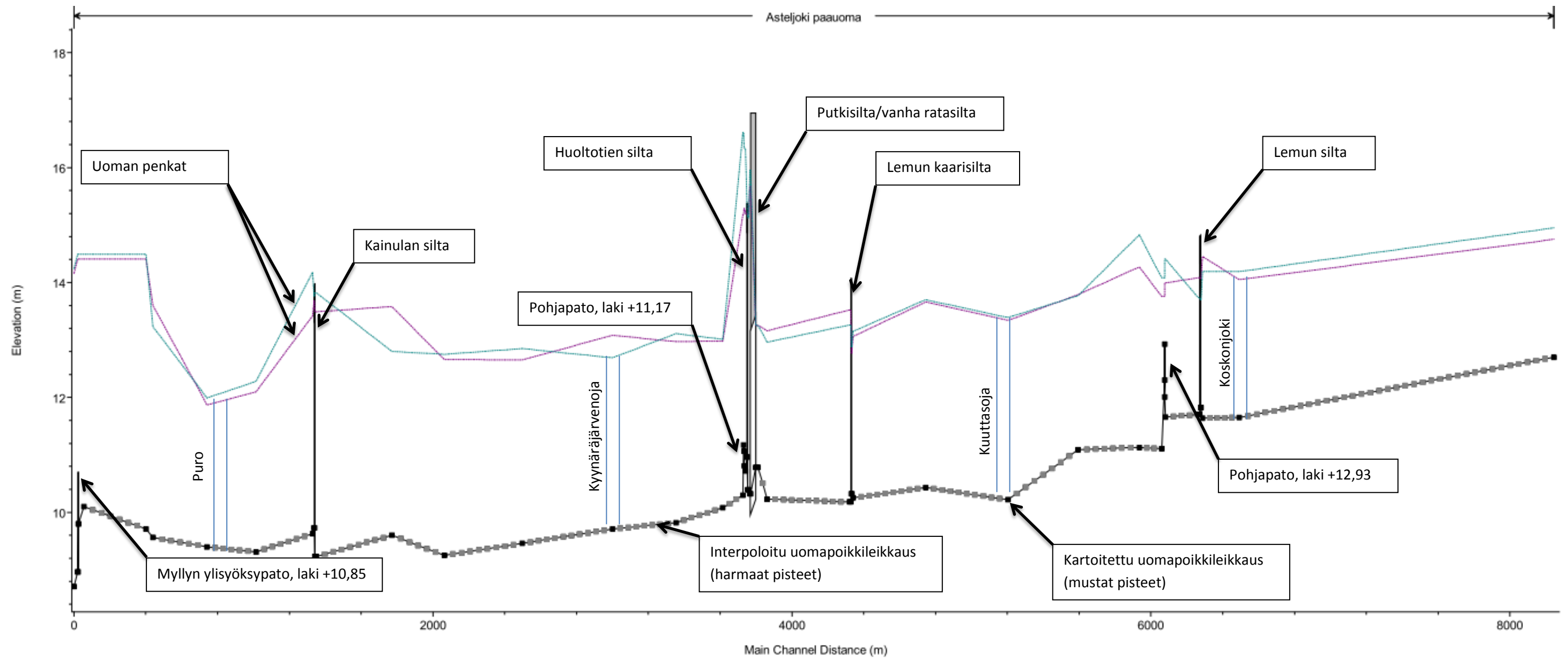
US ARMY CORPS OF ENGINEERS; HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER, 2010. HEC-RAS River
Analysis System; Hydraulic References Manual. [Viitattu 2013-04-08] Saatavissa:

[http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-
RAS_4.1_Reference_Manual.pdf](http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS_4.1_Reference_Manual.pdf)

**TABLE 7: HYDRAULIC ROUGHNESS (MANNING'S n)
VALUES OF NATURAL CHANNELS AND FLOODPLAINS**

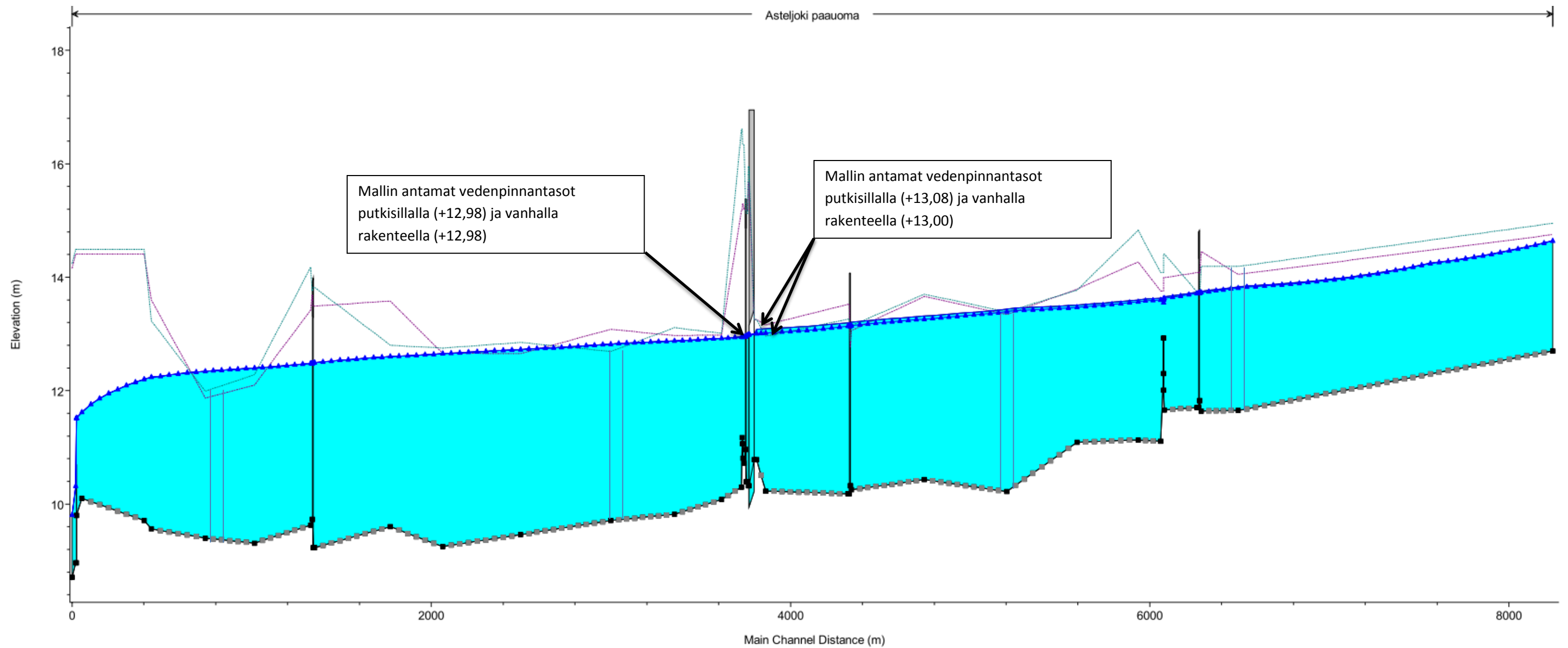
Channel	Minimum	Normal	Maximum
Natural channels and floodplains, continued.			
2. Mountain streams, no vegetation in channel, banks usually steep, trees and brush along banks submerged at high stages			
a. Bottom: gravels, cobbles, and few boulders	0.030	0.040	0.050
b. Bottom: cobbles with large boulders	0.040	0.050	0.070
B. Floodplains			
1. Pasture, no brush			
a. Short grass	0.025	0.030	0.035
b. High grass	0.030	0.035	0.050
2. Cultivated areas			
a. No crop	0.020	0.030	0.040
b. Mature row crops	0.025	0.035	0.045
c. Mature field crops	0.030	0.040	0.050
A. Minor streams (top width at flood stage less than 100 feet)			
1. Streams on plain			
a. Clean, straight, full stage, no rifts or deep pools	0.025	0.030	0.033
b. Same as above, but more stones and weeds	0.030	0.035	0.040
c. Clean, winding, some pools and shoals	0.033	0.040	0.045
d. Same as above, but some weeds and stones	0.035	0.045	0.050
e. Same as above, lower stages, irregular slopes and sections with more ineffective flow area	0.040	0.048	0.055
f. Same as d, but more stones	0.045	0.050	0.060
g. Sluggish reaches, weedy, deep pools	0.050	0.070	0.080
h. Very weedy reaches, deep pools, or floodways with heavy stand of timber and underbrush	0.075	0.100	0.150

Kartoitetun uoman pituusleikkaus

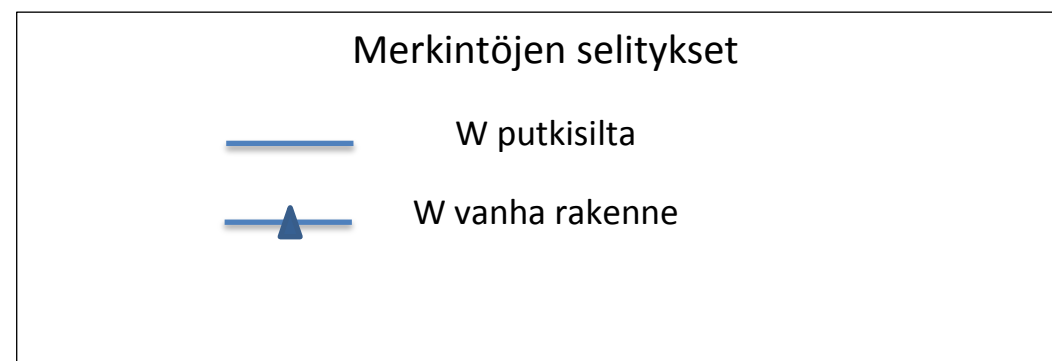


Asteljoen kartoitetun uoman pituusleikkaus

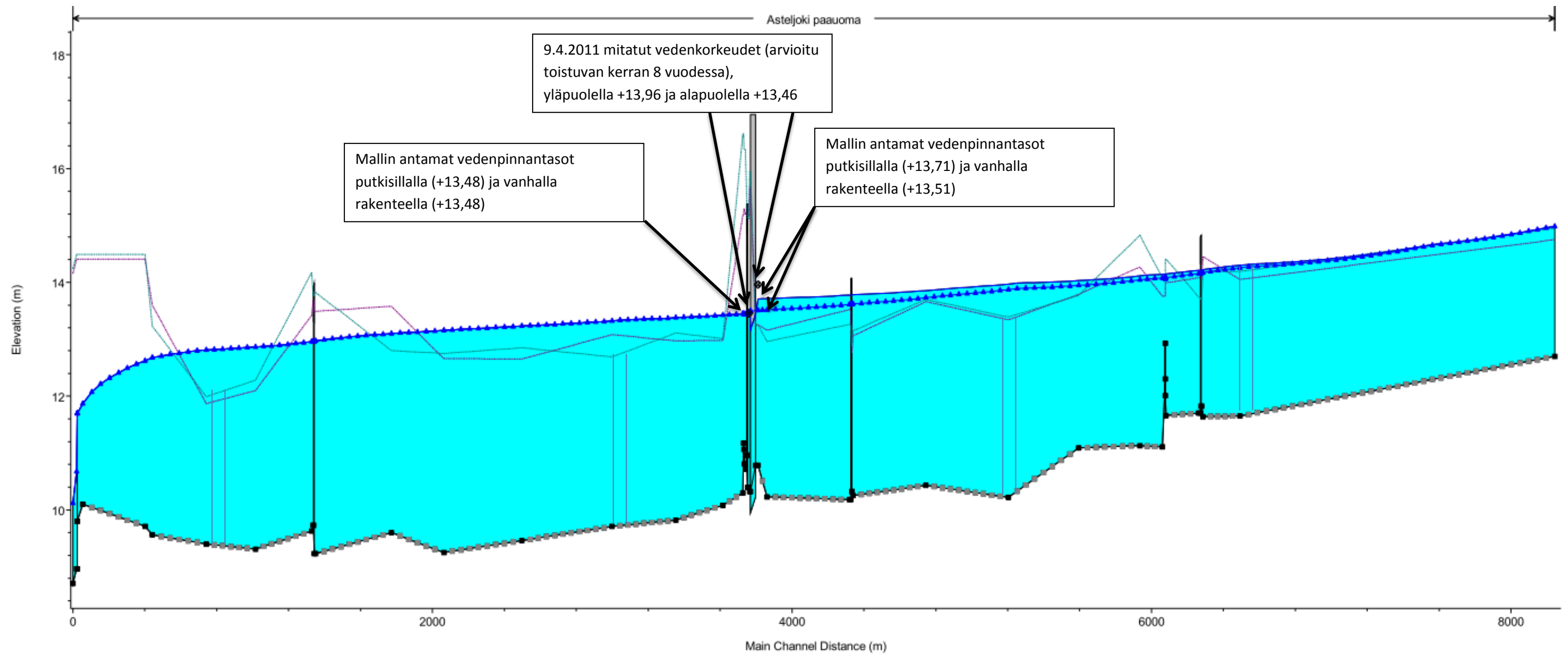
Pituusleikkaus arvioidun kevään keskiylivirtaaman (MHQ, 11,1 m³/s) tilanteessa



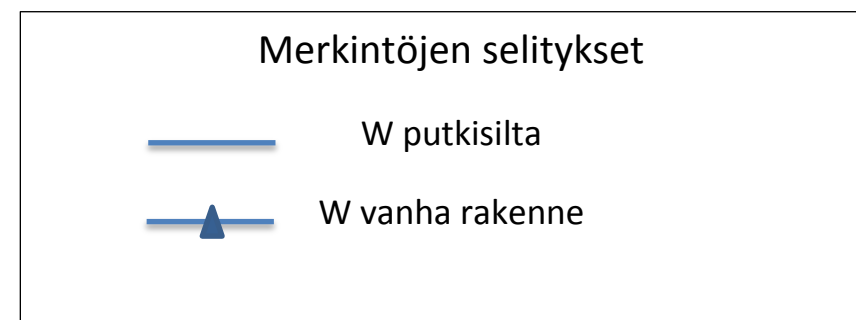
Pituusleikkaus kevään keskiylivirtaamalla MHQ



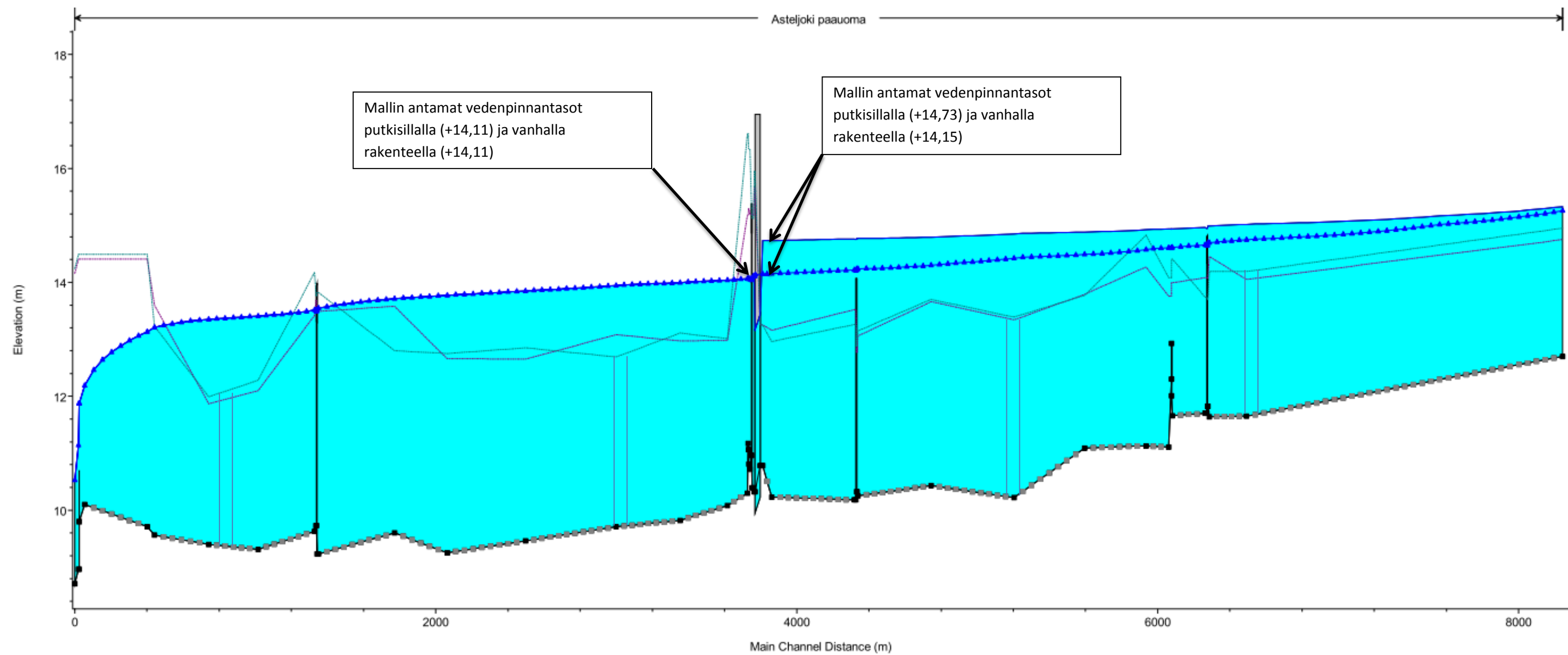
Pituusleikkaus arvioidun kerran 8 vuodessa toistuvan kevätylivirtaaman ($HQ_{1/8}$, $16,8 \text{ m}^3/\text{s}$) tilanteessa



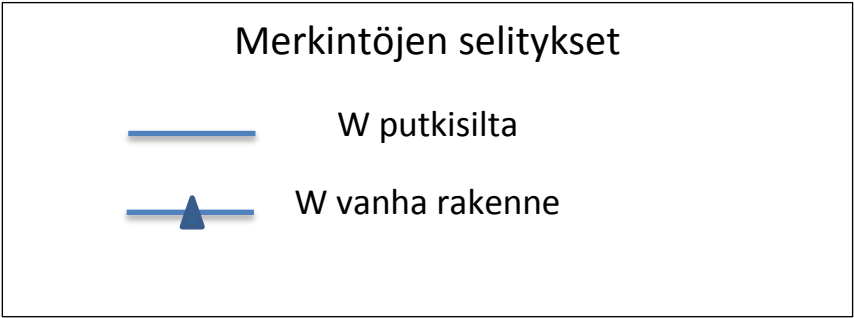
Pituusleikkaus kerran 8 vuodessa toistuvalla kevätylivirtaamalla



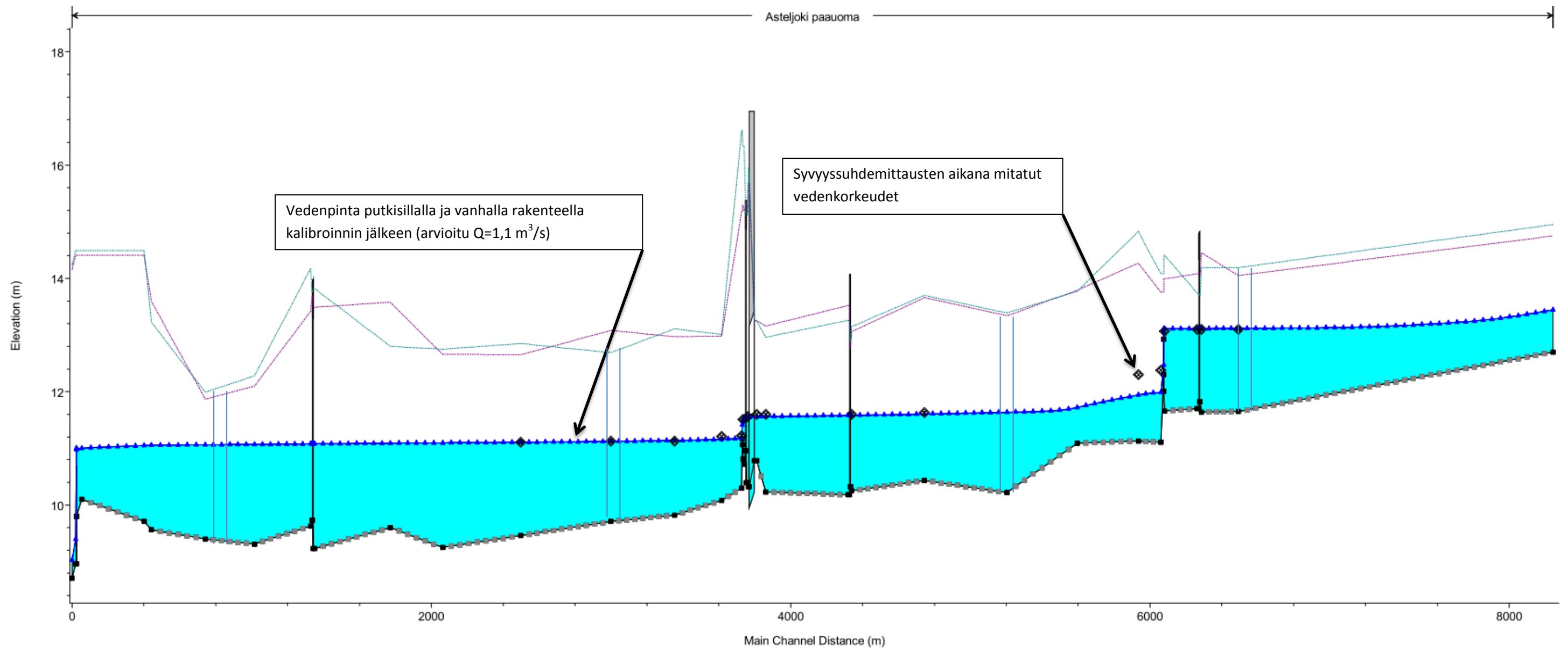
Pituusleikkaus arvioidun kerran 100 vuodessa toistuvan kevätylivirtaaman ($HQ_{1/100}$, $27,5 \text{ m}^3/\text{s}$) tilanteessa



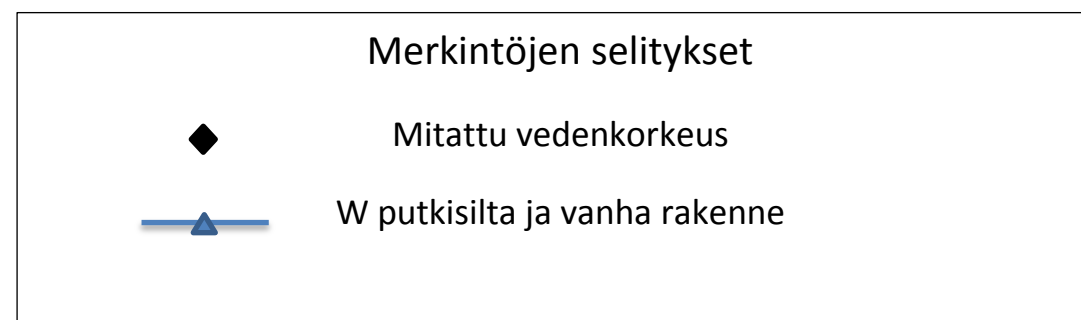
Pituusleikkaus kerran 100 vuodessa toistuvalla kevätylivirtaamalla



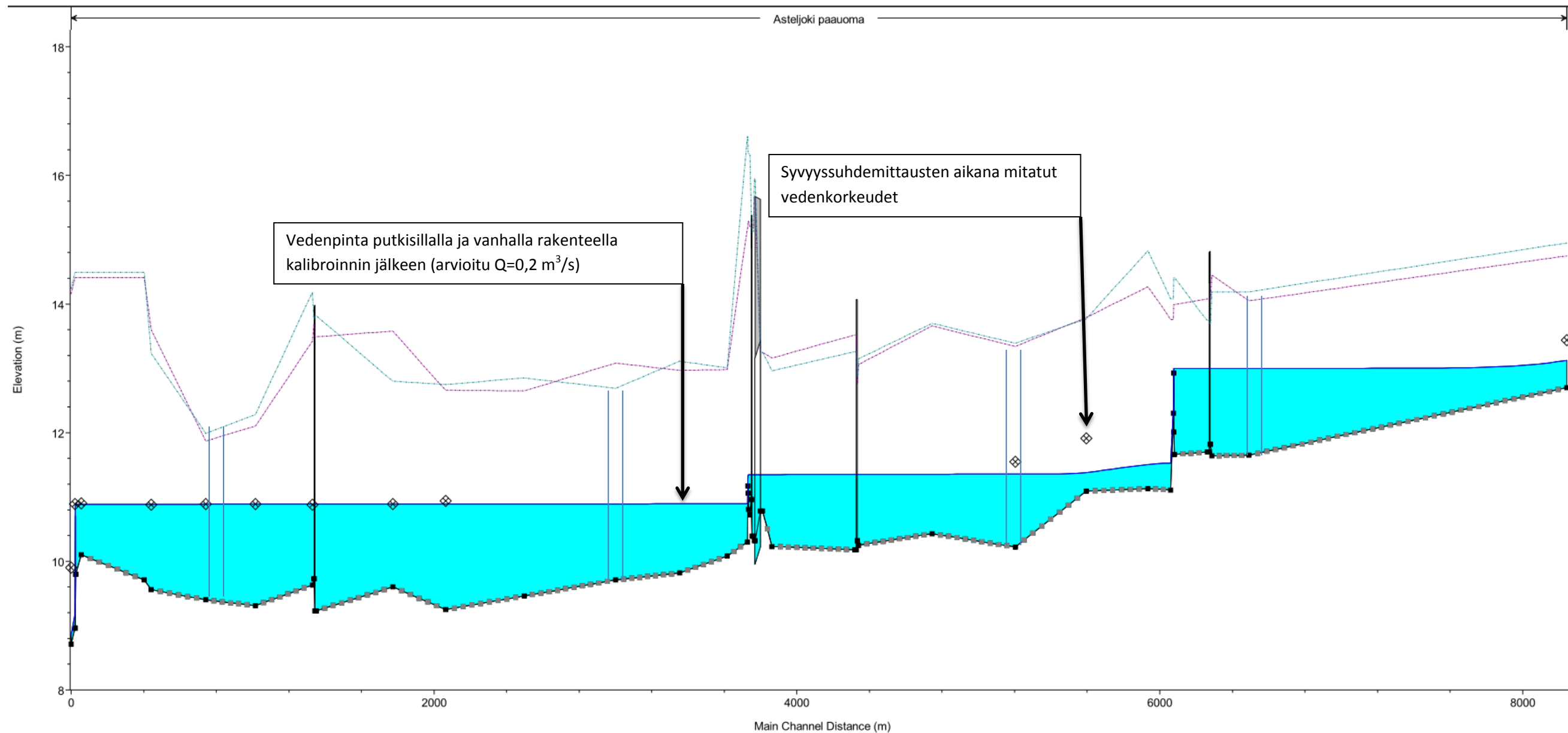
Pituusleikkaus virtaamamallin kalibrointitilanteesta. Havaitut vedenpinnankorkeudet mitattu 9.1.2013 (arvioitu $Q = 1,1 \text{ m}^3/\text{s}$)



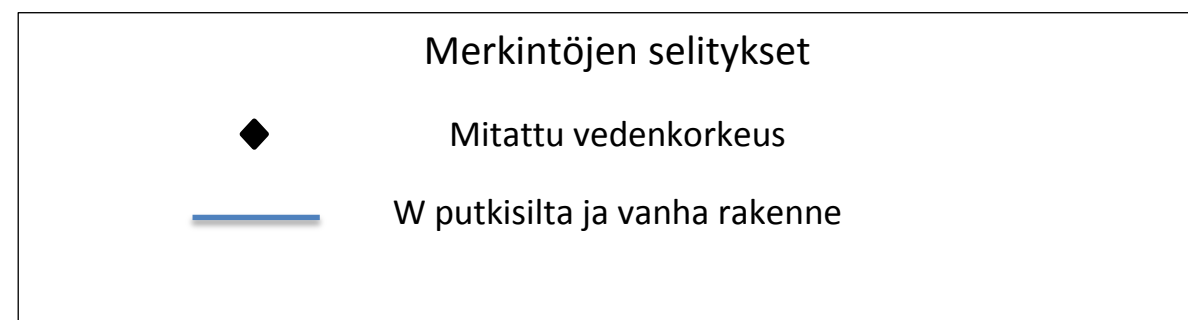
Pituusleikkaus 9.1.2013 mittausten pohjalta tehdystä kalibrointiajasta



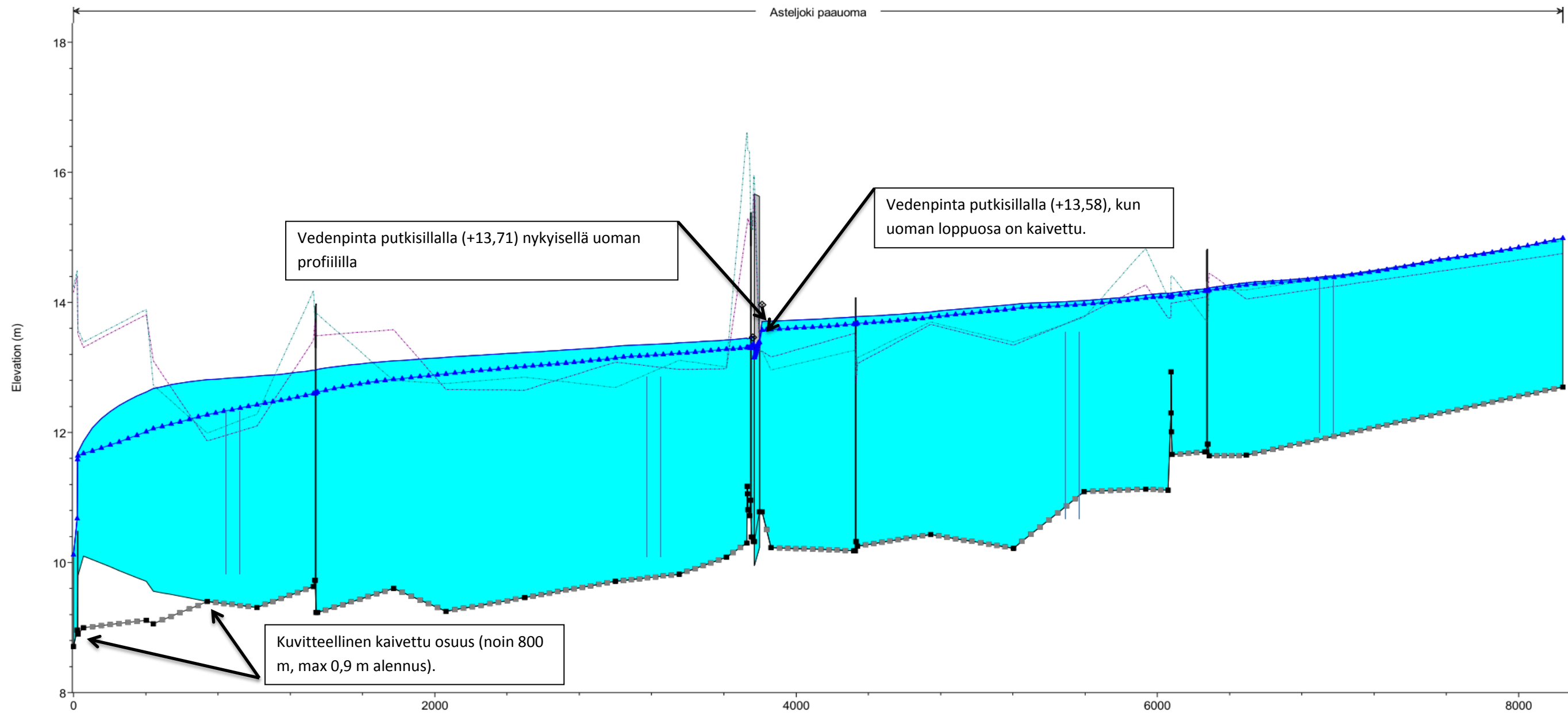
Pituusleikkaus virtaamamallin kalibrointitilanteesta. Havaitut vedenpinnankorkeudet mitattu 25.2.2013 (arvioitu $Q = 0,2 \text{ m}^3/\text{s}$)



Pituusleikkaus 25.2.2013 mittauksen pohjalta tehdystä kalibrointiajasta



Pituusleikkaus arvioidun kerran 8 vuodessa toistuvan kevätylivirtaaman ($HQ_{1/100}$, $16,8 \text{ m}^3/\text{s}$) tilanteessa nykytilassa ja jos uoman loppuosa olisi kaivettu virtaussuuntaan nähden laskevaksi.



Pituusleikkaus tilanteesta, jossa uoman loppuosa on kaivettu virtaussuuntaan nähden laskevaksi.

