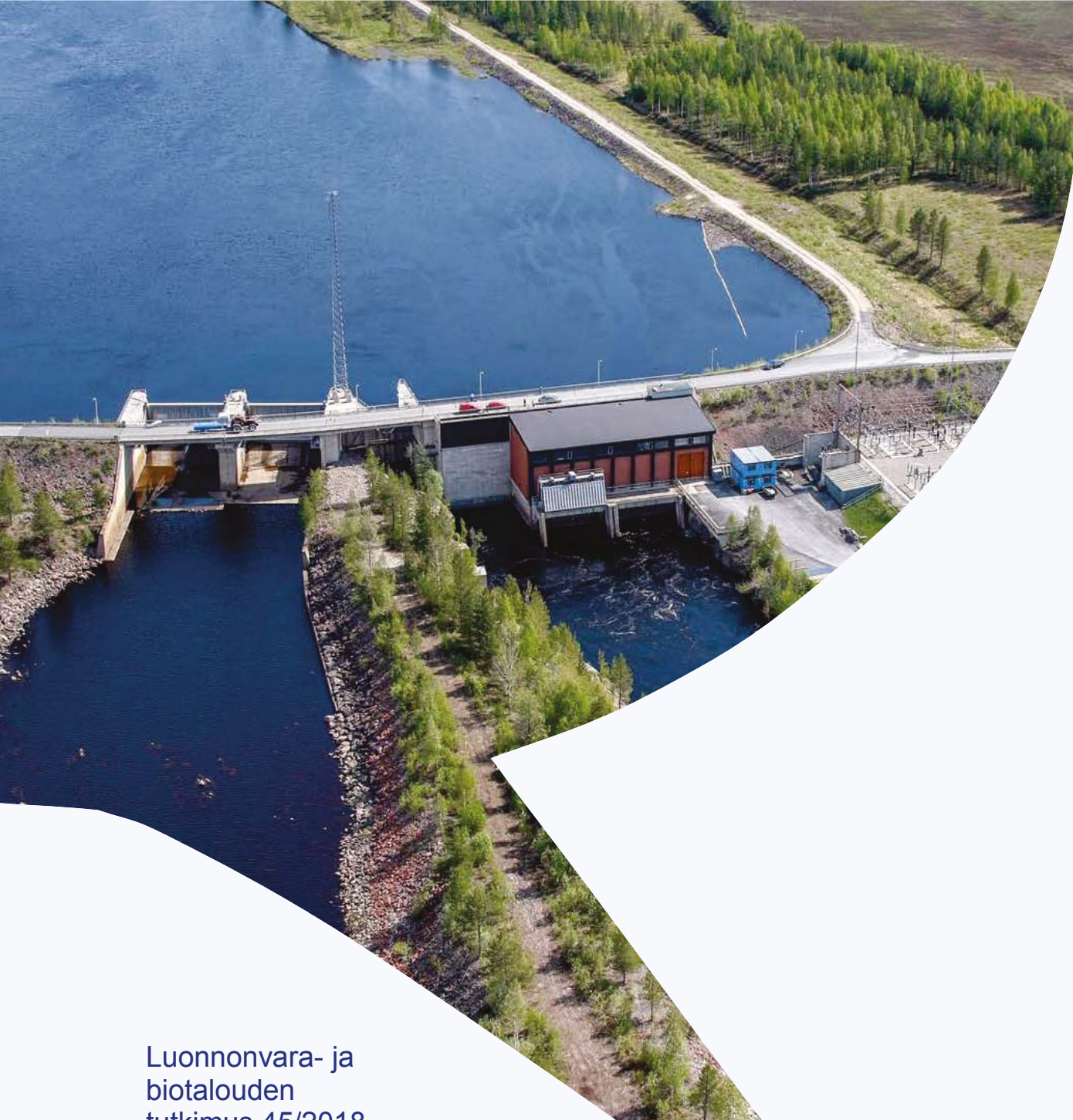




Luonnonvara- ja
biotalouden
tutkimus 45/2018

Lohikalojen alasvaellus lijoessa: Tutkimustuloksia ja alasvaellusreittien yleissuunnitelma

Riina Huusko, Panu Orell, Mikko Jaukkuri, Tapio Sutela, Olli van der Meer,
Markku Lahti, Jaakko Erkinaro ja Aki Mäki-Petäys

Lohikalojen alasvaellus lijoessa: Tutkimustuloksia ja alasvaellus- reittien yleissuunnitelma

Riina Huusko, Panu Orell, Mikko Jaukkuri, Tapio Sutela, Olli van der Meer,
Markku Lahti, Jaakko Erkinaro ja Aki Mäki-Petäys



Vipuvoimaa
EU:lta
2014–2020



Tämä raportti on osa Iijoen otva hanketta, jota Luonnonvarakeskus toteutti vuosina 2016–2018. Hanketta rahoitti Euroopan aluekehitysrahasto (EAKR).



Huusko, R., Orell, P., Jaukkuri, M., Sutela, T., van der Meer, O., Erkinaro, J. ja Mäki-Petäys, A. 2018. Lohikalajien alasvaellus Iijoen: Tutkimustuloksia ja alasvaellus-reittien yleissuunnitelma. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 45/2018. Luonnonvarakeskus, Helsinki. 43 s.

ISBN 978-952-326-623-0 (Painettu)

ISBN 978-952-326-624-7 (Verkkajulkaisu)

ISSN 2342-7647 (Painettu)

ISSN 2342-7639 (Verkkajulkaisu)

URN <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-326-624-7>

Copyright: Luonnonvarakeskus (Luke)

Kirjoittajat: Riina Huusko, Panu Orell, Mikko Jaukkuri, Tapio Sutela, Olli van der Meer, Jaakko Erkinaro ja Aki Mäki-Petäys

Julkaisija ja kustantaja: Luonnonvarakeskus (Luke), Helsinki 2018

Kannen kuva: PVO-Vesivoima Oy

Painopaikka ja julkaisumyynti: Juvenes Print, <http://luke.juvenesprint.fi>

Tiivistelmä

Riina Huusko¹⁾, Panu Orell¹⁾, Mikko Jaukkuri¹⁾, Tapio Sutela¹⁾, Olli van der Meer²⁾, Markku Lahti^{3*)}, Jaakko Erkinaro¹⁾ & Aki Mäki-Petäys¹⁾

*Kirjoittajista Markku Lahti osallistui vain yläkanavien mallinnustyöhön ja siitä kertovan raportinosan laadintaan (ks. kappale 3).

¹⁾ Luonnonvarakeskus, PL 413, 90014 Oulun yliopisto

²⁾ Tmi Olli van der Meer, Hiomontie 14, 90850 Martinniemi

³⁾ Fortum Generation, Renewable Energy

Pohjois-Pohjanmaan liiton johdolla toteutetun Lijoen otva -hankkeen tavoitteena oli yhteen sovittaa Lijoen eri käyttömuotoja sekä elvyttää vesistön vaelluskalakantoja. Hankkeen yhtenä tärkeänä osana ja erityiskysymyksenä oli lohen vaelluspoikasten alasvaellusreittien yleissuunnitelmien laadinta Lijoen pääuoman viidelle voimalaitokselle. Yleissuunnittelussa alasvaellusreitit katsottiin koostuvan kahdesta osasta: yläkanavaan sijoitettavasta ohjausrakenteesta sekä sen jatkeeksi tulevasta alasvaellusväylästä.

Tässä raportissa esitellään lohen vaelluspoikasten alasvaellusreittien yleissuunnitelmat kaikille viidelle Lijoen pääuoman voimalaitokselle, perustuen voimalaitosten yläkanavien 3D-virtausmallinnuksiin, Haapakosken yläkanavassa toteutetun lohen vaelluspoikasten akustisen telemetriaseurantatutkimuksen tuloksiin sekä maailmalta saatavissa olevaan kirjallisuuteen alasvaellusratkaisusta.

Alasvaellusreittien yleissuunnitelmien taustaksi selvitettiin lohen vaelluspoikasten käyttäytymistä keväällä 2016 Haapakosken voimalaitoksen yläkanavassa noin 55–100 metriä voimalaitospadosta ylävirtaan sijainneella seuranta-alueella. Akustisilla merkeillä merkittyjen vaelluspoikasten sijaintitieto voitiin tällä alueella laskea muutaman metrin tarkkuudella, jolloin kalayksilöille saatiin muodostettua uintireitit niiden lähestyessä voimalaitosta. Havaitut uintireitit siirrettiin kulloinkin vallinnutta virtaamatilannetta kuvaavaan 3D-virtausmalliin. 3D-virtausmallilaskenta suoritettiin erityisesti vesistöjä varten suunnitellulla Mike3D-mallilla ja se tehtiin viidelle eri virtaamatilanteelle.

Virtaamilla havaittiin olevan selvä vaikutus vaelluspoikasten käyttäytymiseen Haapakosken seuranta-alueella: virtaaman laskiessa ja virrannopeuden hidastuessa seuranta-alueella vaelluspoikasten käyttäytyminen muuttui suoraviivaisesta etenemisestä edestakaiseksi liikehinnäksi. Kaikissa virtaamatilanteissa vaelluspoikasten havaittiin välttelevän hitaimman virrannopeuden alueita ja reagoivan virrannopeuden muutoksiin. Tulosten perusteella arvioitiin, että kalojen ohjaamiseen on löydettävissä ratkaisuja.

Tutkimustulosten ja ulkomailta saatujen kokemusten perusteella Lijoen voimalaitosten yläkanaviin sijoitettavaksi vaelluspoikasten ohjausrakenteeksi suositeltiin kelluvaa ohjausaitaa, joka koostuu varsinaisesta ohjausaidasta sekä sen jatkeena olevasta, patovalliin kiinnittyvästä vaijerista. Alasvaellusväyläksi suositeltiin putkirakennetta, jota pitkin kalat siirtyisivät yläkanavasta voimalaitoksen alapuolelle. Putkirakenteen yhteyteen on tarvittaessa mahdollista suunnitella myös kalojen kiinniottoallas.

Asiasanat: Lijoki, alasvaellus, vaelluspoikanen, telemetria, 3D-mallinnus, alasvaellusreitti, ohjausrakenne, alasvaellusväylä

Sisällys

1. Selvityksen tausta.....	5
1.1. Selvityksen tavoitteet	5
2. Iijoki.....	7
2.1. Iijoen vesivoimalaitokset	8
3. Voimalaitosten yläkanavien 3D-virtausmallinnus	10
3.1. Haapakoski.....	10
3.2. Pahkakoski	11
3.3. Kierikki.....	12
3.4. Maalismaa.....	13
3.5. Raasakka	14
4. Vaelluspoikasten käyttäytymistutkimus Haapakosken voimalan yläkanavassa.....	16
4.1. Menetelmät	16
4.1.1. Kalojen kuljetus, merkintä ja vapautus	16
4.1.2. Kalojen paikannus	17
4.2. Tulokset.....	18
5. 3D-virtausmallinnusten ja kalojen käyttäytymistietojen yhdistäminen.....	19
5.1. Menetelmät	19
5.2. Tulokset.....	19
5.2.1. Vapautuserä 11.6.2018	19
5.2.2. Vapautuserä 16.6.2018	20
5.2.3. Vapautuserä 21.6.2017	22
5.3. Yhteenveto vaelluspoikasten käyttäytymisestä.....	24
6. Alasvaellusratkaisujen yleissuunnitelmat Iijoen yläkanavassa	25
6.1. Alasvaelluksen ohjausrakenne.....	25
6.2. Alasvaellusväylä	26
6.3. Haapakosken alasvaellusratkaisu.....	27
6.4. Pahkakoski	30
6.5. Kierikki.....	32
6.6. Maalismaa.....	34
6.7. Raasakka	36
7. Yhteenveto.....	39
Viitteet	40
Liitteet	41

1. Selvityksen tausta

Pohjois-Suomessa sijaitseva Iijoki on yksi tärkeimmistä vesivoimantuotantoon rakennetuista joista Suomessa. Iijoki on myös entinen merkittävä vaelluskalavesistö ja se kuuluu kansallisen kalatiestrategian kärkikohteisiin (MMM 2012). Vesistöalue on lisäksi varsin suosittu kalastus- ja virkistyskohde.

Iijoen kaltaisten monikäyttövesistöjen kehittämisessä on välttämätöntä etsiä kokonaisratkaisuja, jotka sovittelevat yhteen erilaisia tavoitteita mm. energian tuotannossa ja vesienhoidossa, kalojen vaellusyhteyksissä ja elinympäristöissä sekä virkistyskäytössä.

Iijoella eri käyttömuotojen yhteensovittamista ja vesistön vaelluskalakantojen kehittämistä lähdettiin v. 2016 toteuttamaan kolmivuotisella Iijoen otva -hankkeella. Hankkeella on kolme päätavoitetta: (1) laatia yhteinen vesistövisio (2) edistää vesistön vaelluskalakantojen palauttamista ja Itämeren lohikannan turvaamista ja (3) edistää joen arvoa nostavien pienempien kehittämistoimenpiteiden toteutumista. Hankkeen päätoteuttajana toimii Pohjois-Pohjanmaan liitto ja osatoteuttajana Luonnonvarakeskus (Luke). Hanketta rahoittaa Euroopan aluekehitysrahasto (EAKR), alueen kunnat, PVO-Vesivoima Oy, Pohjois-Pohjanmaan liitto ja Luonnonvarakeskus.

Iijoen otva -hankkeeseen sisältyi tärkeänä osana ja omana erityiskysymyksenään lohien vaelluspoikasten eli smolttien alasvaelluskäyttäytymisen selvittäminen ja vaelluspoikasille soveltuvien alasvaellusreittien yleissuunnittelu Iijoen pääuoman viidelle vesivoimalaitokselle (kuva 1). Tämän osakokonaisuuden toteuttamisvastuu oli Luonnonvarakeskuksella.

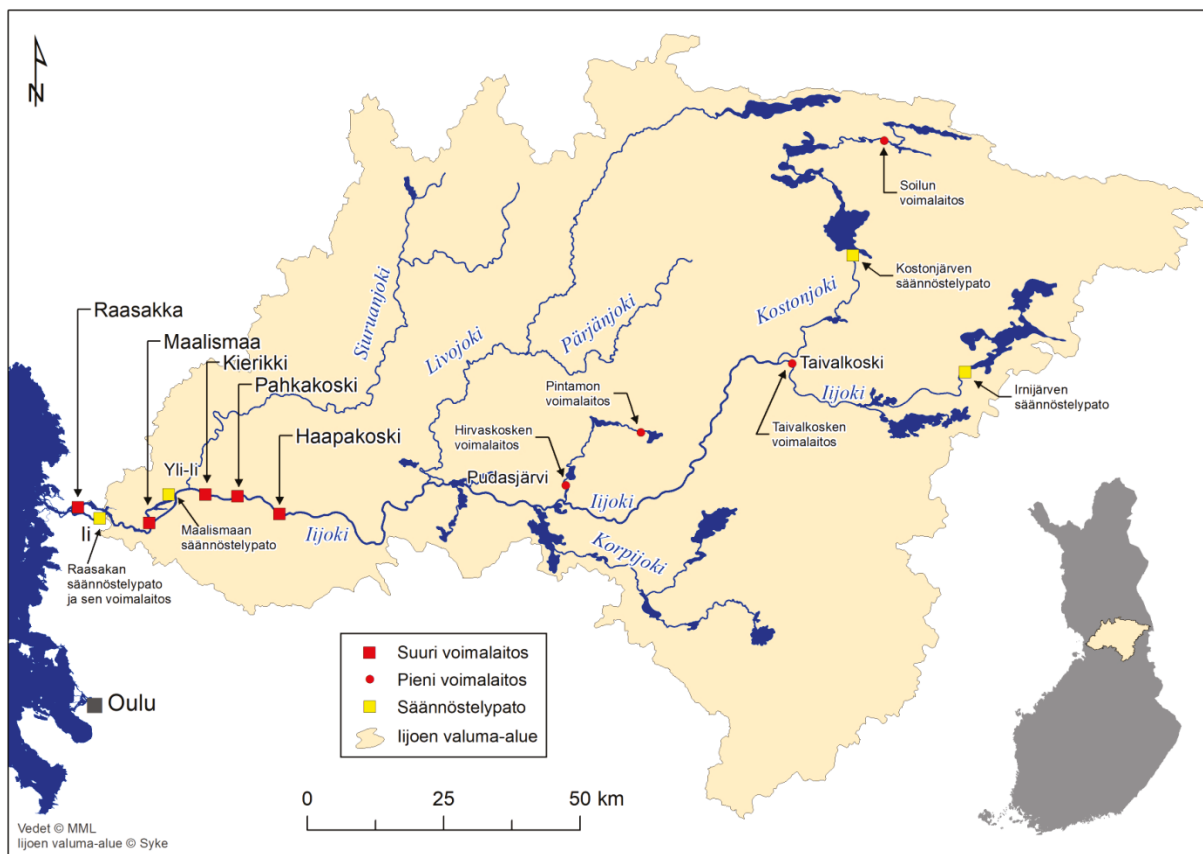
Lohikantojen palauttaminen rakennettuihin jokiin edellyttää kahteen suuntaan toimivia vaellusyhteyksiä: kutuvaeltajien on päästävä voimalaitosten ohi ylävirtaan lisääntymisalueilleen ja vaelluspoikasten puolestaan voimalaitosten ohi alavirtaan kohti syönnösalueitaan. Viime vuosina tehdyissä tutkimuksissa ja selvityksissä on vesivoimantuotantoon rakennetuissa vesistöissä (ml. Iijoki) tunnistettu merkittäviä ongelmia lohikalojen alasvaelluksessa (Huusko ym. 2012, 2014a, 2017). Voimalaitokset hidastavat ja jopa pysäyttävät poikasten alasvaellusta ja aiheuttavat voimakasta kuolleisuuden kasvua (Huusko ym. 2017).

Lohi- ja muiden vaelluskalakantojen palauttaminen Iijokeen edellyttää siten merkittäviä vaelluspoikasten alasvaelluskuolleisuuden vähentämiseen tähtääviä toimenpiteitä ja teknisiä ratkaisuja. Poikasten on pystyttävä ohittamaan voimalaitokset turvallisesti ja nopeasti, ilman merkittävää kuolleisuutta. Käytännössä tämä edellyttää alasvaellusreittien suunnittelua ja rakentamista. Tavallisimmin alasvaellusreitti koostuu kahdesta osasta: yläkanavaan sijoitettavasta ohjausrakenteesta ja varsinaisesta alasvaellusväylästä (USFWS 2017, kuva 2). Toinen vaihtoehto on ohjausrakenteen ja kiinniottolaitteen yhdistelmä, josta kalat aktiivisesti kuljetetaan esim. jokisuulle. Suomessa ei toistaiseksi ole käytössä yhtään alasvaellusreittiä tai kiinniottolaitetta. Alasvaellusreittien ja kiinniottolaitteiden suunnittelu on kuitenkin nyt ottamassa ensimmäisiä askeleitaan (mm. tämä selvitys ja Iijoen vaelluskalakärkihankkeessa suunniteltava/rakennettava smolttien ohjausrakenne).

1.1. Selvityksen tavoitteet

Tämän selvitystyön päätavoitteena oli laatia alustavat yleissuunnitelmat lohien vaelluspoikasten potentiaalisista alasvaellusreiteistä Iijoen pääuoman viidelle vesivoimalaitokselle Haapakoskelta Raasakkaan (kuva 1).

Alasvaellusreittien suunnittelun taustatueksi toteutettiin lohien vaelluspoikasten akustinen telemetriaseuranta Haapakosken voimalaitoksen yläkanavassa sekä laadittiin 3D-virtausmallit Iijoen pääuoman voimalaitosten yläkanaviin. Näiden taustaselvitysten keskeiset tulokset esitellään tässä raportissa. Suunnittelutyössä hyödynnettiin lisäksi laajasti muualla maailmassa tehtyjen alasvaellusratkaisujen tietoja ja kokemuksia. 3D-virtausmalleista vastasi Fortum Oyj (Markku Lahti) ja vaelluspoikasten telemetriatutkimuksesta ja yleissuunnitelmasta Luonnonvarakeskus.



Kuva 1. Iijoen valuma-alue, keskeiset sivujoet ja vesistön voimalaitokset. Vaelluskalojen potentiaaliset tuotantoalueet sijaitsevat Haapakosken yläpuolisessa Iijoen pääuomassa sekä siihen laskevissa sivujoissa.



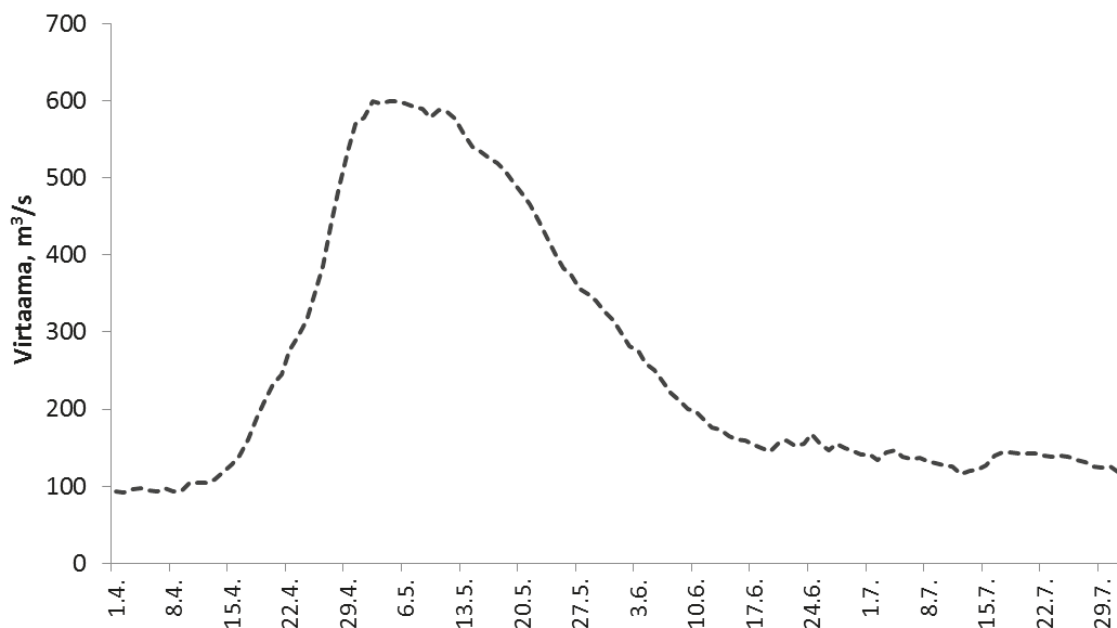
Kuva 2. Alasvaellusreitti koostuu tavallisesti yläkanavaan sijoitettavasta ohjausrakenteesta (vasemmalla) ja varsinaisesta alasvaellusväylästä (oikealla). Kuvat: Panu Orell.

2. Iijoki

Iijoen vesistöalue (valuma-alue 14 191 km²) on Suomen kuudenneksi suurin ja joki laskee Perämereen lissä 40 km Oulusta pohjoiseen. Iijoen pääuoman pituus on 370 km ja korkeuseroa latvavesiltä jokisuulle kertyy noin 250 metriä. Iijoen alaosalla voimalaitosrakentaminen alkoi vuonna 1959 ja ensimmäinen viidestä pääuoman voimalaitoksesta (kuva 1) valmistui Pahkakoskelle vuonna 1961.

Nykyisin Iijoen keskivirtaama Raasakassa on 170 m³/s. Pääuoman viiden voimalaitoksen lupiin sisältyy määräys, että laitosten juoksuttaman vesimäärän vuorokausikeskiarvo on vähintään 25 m³/s. Tämä mahdollistaa voimalaitosten vuorokausisäännöstelyn, jolloin juoksutusta voidaan vähentää tai jopa kokonaan sulkea yöllä, kun sähköntarve on vähäinen.

Säännöstelystä huolimatta Iijoen kevättulvat ovat edelleen suuria (kuva 3). Tulva-aikana vettä juoksutetaan voimalaitoksista tasaisesti ympäri vuorokauden. Kevättulvan huippu ajoittuu keskimäärin ajanjaksolle huhtikuun puolivälistä toukokuun loppuun (kuva 3). Iijoen jokivesi lämpenee lohenvaelluspoikasille optimaaliseen noin 10 °C:een keskimäärin toukokuun loppupuolella, jolloin kevättulvan huippu on jo useimmiten ohitettu (Orell ym. 2016, kuva 3). Iijoen virtaama on ollut keskimäärin 445 m³/s päivänä, jolloin veden lämpötila on saavuttanut 10 °C, mutta virtaaman vaihtelu on ollut vuosien välillä kyseisenä ajankohtana erittäin suurta (180–769 m³/s).



Kuva 3. Iijoen päivittaiset virtaamakeskiarvot aikavälillä 1.4.–31.7. Keskiarvot on laskettu vuosien 2000–2014 virtaamatiedoista.

Luonnontilainen Iijoki oli yksi Suomen tunnetuimmista lohi- ja taimenjoista, ja vuosittaiset lohisaaaliit joesta olivat keskimäärin noin 16 000 kg (Sormunen ym. 1963). Kalojen vaellusyhteydet joen latvaosille kuitenkin katkesivat, kun Iijoen alaosa rakennettiin vesivoimatuotantoon 1960-luvulla. Lohia siirrettiin voimalaitospatojen yläpuolelle muutaman vuoden ajan (1961–1965), mutta yliiirroista luovuttiin kalamäärän vähentyessä. Voimalaitosrakentamisen seurauksena menetetyt luonnontuotannon kompensointina Iijoen lohi- ja taimenkantoja on hoidettu viimeiset vuosikymmenet laajamittaisilla velvoiteistutuksilla. Velvoitteen mukaisesti Iijoen jokisuuhun istutetaan vuosittain 310 000 lohien ja 28 000 meritaimenen vaelluspoikasta. Myös Iijoen sisävesialueelle tehdään vuosittaisia velvoiteistutuksia eri kalalajeilla.

Vesivoimarakentamisesta huolimatta Iijoen vesistössä on kartoitusten perusteella edelleen jäljellä noin 1 000 hehtaaria koskialueita, joista suurimman osan arvioidaan soveltuvan lohikalajien poikas-

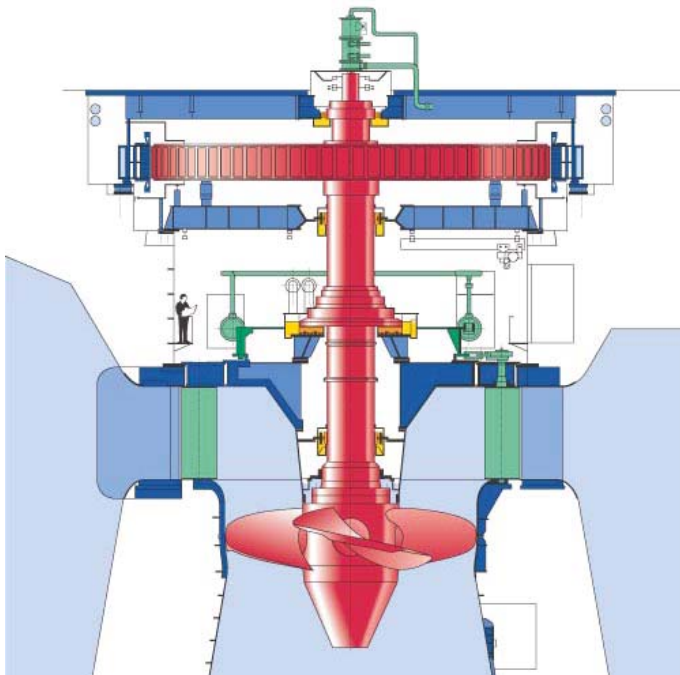
tuotantoon (van der Meer ym. 2010, kuva 1). Iijoki onkin yksi kansallisen kalatiestrategian kärkikoh-teista, ja tavoitteena on palauttaa vaelluskalakanta vesistön vapaana virtaaville alueille. Vaelluskalo-jen palauttamisen edellytyksiä ja toimenpidetarpeita on selvitetty sekä vaellusyhteyksien suunnitte-lua on tehty vuodesta 2008 alkaen. Alueellinen kalatalousviranomaisen on lisäksi käynnistänyt Iijoen velvoitteiden muutoshakemusprosessin, joka tähtää aiempaa monipuolisempien toimenpiteiden (mm. vaellusyhteydet) käyttöönottoon vesistön vaelluskalakantojen hoidossa. Konkreettiset laajan mittakaavan elvyttämistoimenpiteet eivät kuitenkaan vielä ole Iijoella käynnistyneet.

2.1. Iijoen vesivoimalaitokset

Iijoen pääuoman viisi vesivoimalaitosta (Raasakka, Maalismaa, Kierikki, Pahkakoski ja Haapakoski) rakennettiin vuosina 1961–1971 ja vanhimmilla neljällä voimalaitoksella on tehty perusparannukset vuosina 2005–2013 (taulukko 1). Voimalaitokset sijaitsevat Iijoen alaosalla 60 km:n matkalla jokisuus-ta ja näiden voimalaitosten putouskorkeus on yhteensä 94 m (kuva 1).

Voimalaitoksista alimmat, Raasakka ja Maalismaa, rakennettiin kuivalle maalle kaivettuihin ka-naviin ja vanhat jokiuomat (Maalismaalla 10 km; Raasakassa 7 km) toimivat näiden voimalaitosten ohijuoksutusuosina ja ovat muulloin vähävetisiä. Raasakan säännöstelypadolla on lisäksi pieni Paja-rin voimalaitos (rakennettu 1988; putouskorkeus 8,3 m; rakennusvirtaama 1,5 m³/s; vuosituotanto 0,8 GWh/a). Kolmella ylimmällä padolla voimalaitos on rakennettu vanhaan jokiuomaan, mutta voi-malaitoksen alapuolinen jokiuoma on jaettu 1,5–3,0 kilometrin pituisella maapadolla voimalan ala-kanavaan ja ohijuoksutusuosinaan (kuvat 5, 7, 9). Kaikkien säännöstelypatojen luukut ovat pohjasta ylöspäin aukeavia segmenttiluukkuja. Kaikissa voimalaitospadoissa on laitoksen välittömässä lähei-syydessä olleet käytössä uittorännit, mutta niiden läpiviennit on betonoitu ja metalliset rampit puret-tu pois lukuun ottamatta Kierikin uittoränniä, joka on museoitu.

Iijoen pääuoman voimalaitoksilla on käytössä pystysuorat Kaplan-turbiinit (kuva 4). Vanhimmissa neljässä voimalaitoksessa turbiinien juoksupyörät ovat 5-siipisiä, mutta Raasakan voimalaitoksella juoksupyörissä on 4 siipeä. Raasakan voimalaitoksella on myös muista voimalaitoksista poiketen kol-me koneistoa, joista kaksi on rakennettu vuonna 1971 ja kolmas vuonna 1997 (taulukko 1).



Kuva 4. Pystysuora Kaplan turbiini. Lähde: Voith Hydro, Saksa.

Taulukko 1. Iijoen vesivoimalaitosten perustietoja. Lähde: PVO-Vesivoima Oy.

	Raasakka	Maalismaa	Kierikki	Pahkakoski	Haapakoski
Teho (MW)	64,3	38,6	37,5	42,4	32,5
Vuosituotanto (GWh/a)	230	180	160	180	130
Putouskorkeus (m)	21,0	18,6	18,0	20,5	16,0
Turbiinien lkm	3	2	2	2	2
Turbiinityyppi	Kaplan	Kaplan	Kaplan	Kaplan	Kaplan
Kierrosluku (r/min)	167	167	167	167	150
Rakennusvirtaama (m³/s)	375	250	250	250	250
Keskivirtaama (m³/s)	170	135	135	135	135
Vedenoton lähtösyvyys (m)	9–11	5–6	5–6	9–10	1–4
Rakennusvuosi	1971 (1997)	1967	1965	1961	1963
Korjausvuosi	-	2009–2011	2005–2007	2011–2013	2007–2009
Ohijuoksutusluukkujen lkm	4	4	2	2	2
Ohijuoksutusluukkujen avautumissuunta	alhaalta ylöspäin	alhaalta ylöspäin	alhaalta ylöspäin	alhaalta ylöspäin	alhaalta ylöspäin
Ohijuoksutusluukkujen sijainti	säännöstelypato	säännöstelypato	voimalapato	voimalapato	voimalapato

3. Voimalaitosten yläkanavien 3D-virtausmallinnus

lijoen voimalaitosten yläkanavien 3D-virtausmallien taustalle tarvittavat maastomittaukset suoritettiin kaikuluotaamalla, ADCP-laitteella ja laserskannauksella lentokoneesta. Lisäksi hyödynnettiin karttoja ja voimalaitospäädustuksia. Maastomittaukset toteutti Luode Consulting Oy. Varsinainen virtausmallilaskenta suoritettiin erityisesti vesistöjä varten suunnitellulla kolmiulotteisella Mike3D-mallilla. Malli perustuu kolmiulotteisiin yleisiin malleihin, mutta sitä on mukautettu erityisesti vesistöihin sopivaksi mm. poistamalla pystysuuntainen kiihtyvyys.

Voimalaitosten yläpuoliset laskenta-alueet jaettiin vaaka- ja pystysuunnassa elementteihin, joiden määrä määräytyi syvyyden perusteella. Elementtien koko asetettiin pienemmäksi tärkeämmillä alueilla voimalaitospäädön lähellä ja niiden kokoa kasvatettiin siirryttäessä kauemmas voimalasta. Mallinnusalueita jatkettiin kunkin voimalan yläpuolella niin pitkälle ylävirtaan päin, kuin on ollut tarpeen virtauksen mallintamiseksi. Laskelmat suoritettiin Haapakosken, Pahkakosken ja Kierikin voimaloiden yläkanavissa viidelle virtaamatilanteelle 100, 150, 200, 250 ja 450 m³/s. Näiden voimaloiden rakennusvirtaama on 250 m³/s, jolloin mallinnetussa virtaamatilanteessa 450 m³/s vedestä 250 m³/s ohjautui päädön läpi turbiinien kautta ja molempien säännöstelyluukkujen kautta kulki tällöin 100 m³/s eli yhteensä 200 m³/s. Maalismaan ja Raasakan voimaloiden yläkanavissa laskelmat tehtiin virtaamatilanteilla 100, 150, 200 ja 250 m³/s, sillä ohijuoksutusluukut sijaitsevat erillisellä päädolla. Raasakan voimalan yläkanavassa laskelmat tehtiin lisäksi myös voimalan rakennusvirtaamatilanteelle 375 m³/s.

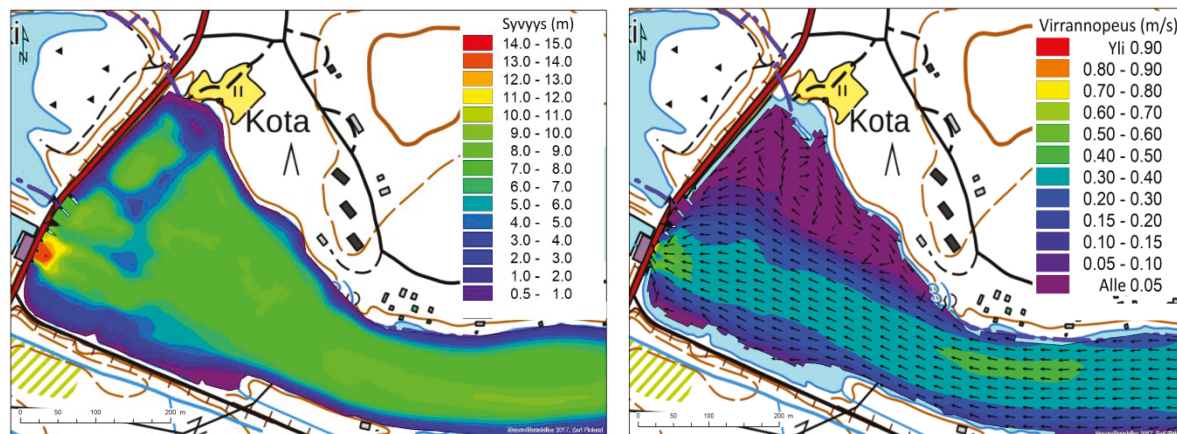
3.1. Haapakoski

Haapakosken vesivoimalaitos sijaitsee yläkanavan etelärannan puolella ja ohijuoksutusluukut ovat voimalaitosrakennuksesta pohjoiseen (kuvat 5–6). Voimalaitosrakennuksen ja ohijuoksutusluukkujen välissä sijaitsee vanhan tukinuittorännin sisäänkäynti (kuvat 5–6). Haapakoskella päädön yläkanava levenee viimeisten 350 metrin matkalla noin 100 metristä noin 300 metriin. Syvyyttä voimalaitospäädön välittömässä läheisyydessä on yli 10 m, mutta syvyys vaihtelee voimalan yläpuolisella leveämmällä alueella huomattavasti (kuva 6).

Haapakosken yläkanavassa 3D-virtausmallin elementtien koko on n. 3,5 x 5,0 m voimalapäädön yläpuolella turbiinien lähialueella ja muualla suurempi. Haapakoskelle yläkanavan päävirtauksen virrannopeus (2 m syvyydessä) on 0,30–0,50 m/s, kun joen virtaama on 250 m³/s.



Kuva 5. Haapakosken voimalaitos ja säännöstelypato alavirrasta päin kuvattuna. Kuva: PVO-Vesivoima Oy.



Kuva 6. Haapakosken yläkanavan syvyyskartta (vas.) ja virrannopeuskartta 2 m vedenpinnan alapuolella virtaamatilanteessa 250 m³/s (oik.).

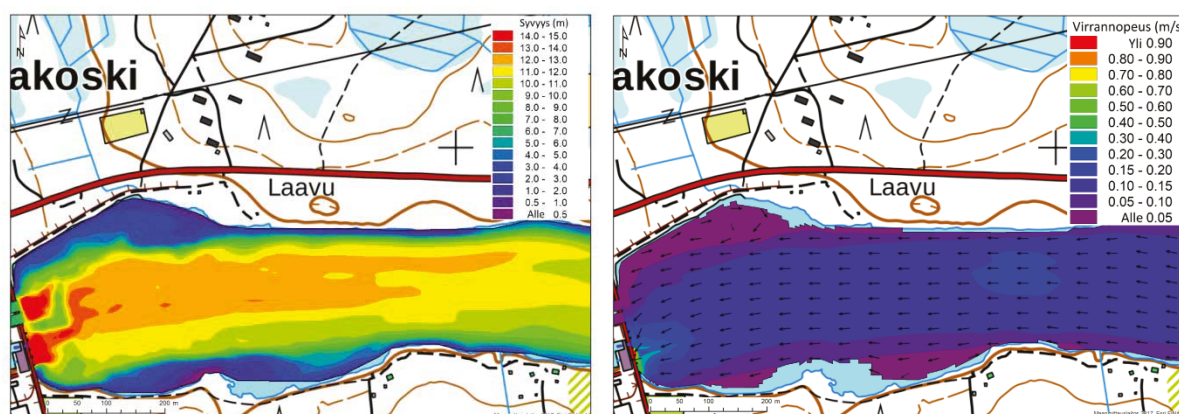
3.2. Pahkakoski

Pahkakoskella voimalaitos sijaitsee joen etelärannan puolella, tukinuittokourun sisäänkäynti on voimalan vieressä pohjoisen suuntaan ja ohijuoksuusluukut ovat noin 30 metriä voimalasta pohjoiseen (kuvat 7–8). Pahkakosken yläpuoli on 200–300 metriä leveä ja suurimmaksi osaksi yli 10 metriä syvä jyrkkärantainen kanava.

Pahkakosken 3D-virtausmallin elementtien koko oli n. 3,0 x 4,0 m voimalapadon yläpuolella turbiinien lähialueella ja niiden koko kasvoi siirryttäessä kauemmas voimalaitoksesta. Pahkakoskella yläkanavan päävirtauksen virrannopeus (2 m syvyydessä) on 0,10–0,15 m/s, kun voimalan virtaama on 250 m³/s (kuva 8). Pahkakosken yläkanavan virrannopeus heikkenee voimalan virtaaman laskiessa ja virtaamalla 100 m³/s päävirtauksen nopeus on enää 0,05–0,10 m/s.



Kuva 7. Pahkakosken voimalaitos ja säännöstelypato alavirrasta päin kuvattuna. Kuva: PVO-Vesivoima Oy.



Kuva 8. Pahkakosken yläkanavan syvyyskartta (vas.) ja virrannopeuskartta 2 m vedenpinnan alapuolella virtaamatilanteessa 250 m³/s (oik.).

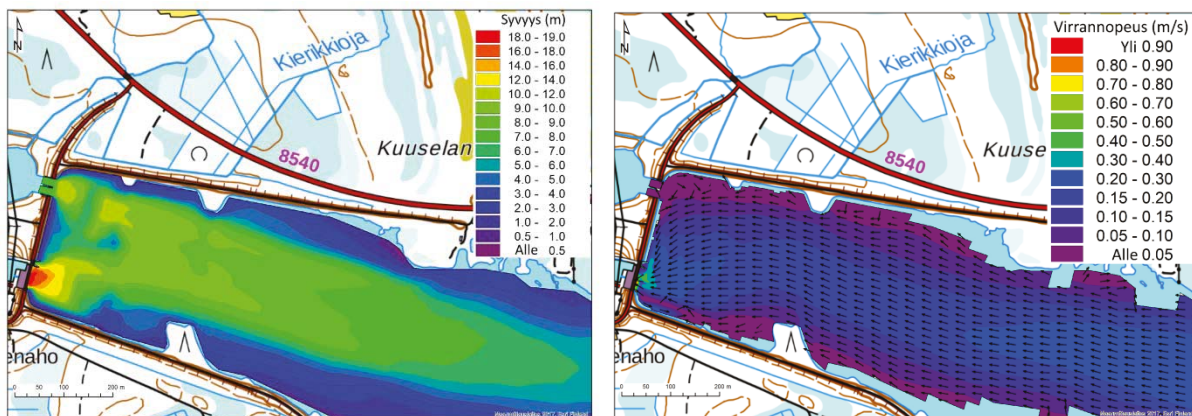
3.3. Kierikki

Kierikin vesivoimalaitos sijaitsee joen etelärannalla ja ohijuoksutusluukut pohjoisrannalla (kuvat 9–10). Kierikin yläkanava on n. 300 m leveä ja sen syvyys keskellä uomaa on vajaa 10 m.

Kierikin voimalaitoksen turbiinien lähialueella 3D-virtausmallin elementit olivat n. 2,5 x 2,5 m ja muualla suurempia. Yläkanavan päävirtauksen virrannopeus (2 m syvyydessä) vaihtelee välillä 0,15–0,30 m/s virtaamatilanteessa 250 m³/s (kuva 10). Joen virtaaman laskiessa tasolle 100 m³/s myös päävirtauksen virrannopeus heikkenee ollen 0,05–0,15 m/s.



Kuva 9. Kierikin voimalaitos ja säännöstelypato alavirrasta päin kuvattuna. Kuva: PVO-Vesivoima Oy.



Kuva 10. Kierikin yläkanavan syvyyskartta (vas.) ja virrannopeuskartta 2 m vedenpinnan alapuolella virtaamati-lanteessa 250 m³/s (oik.).

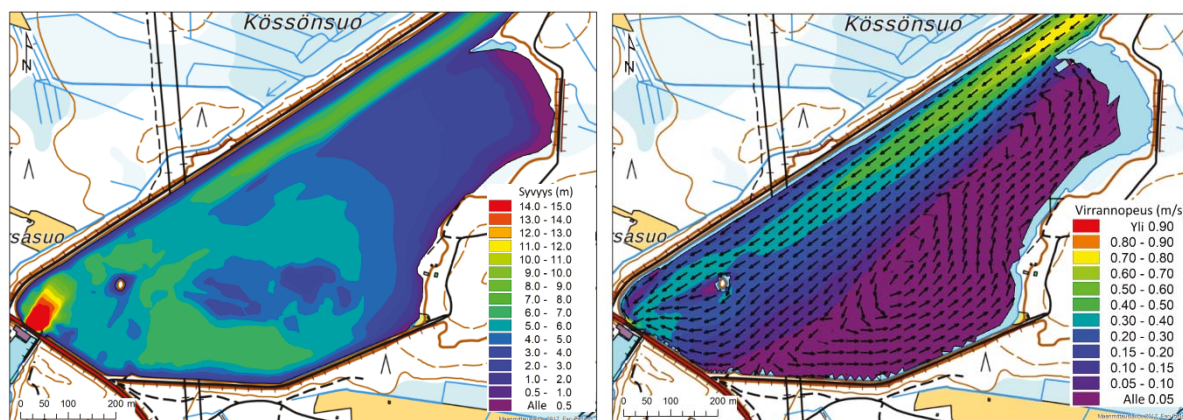
3.4. Maalismaa

Maalismaan voimalaitokselle vesi virtaa pitkin kapeaa (alle 100 m), pitkää (4 km) ja syvää (8–10 m) yläkanavaa, joka levenee viimeisen kilometrin matkalla laajaksi ”yläaltaaksi” (leveys n. 350–500 m; kuvat 11–12). Maalismaan vesivoimalaitos sijoittuu yläaltaan pohjoisrannalle, minkä seurauksena myös veden virtaus suuntautuu voimakkaasti voimalaitosta kohti ja yläaltaan etelärannan matalam-malla alueella virrannopeus on kaikilla virtaamati-lanteilla hyvin heikko (kuva 12). Maalismaan ohi-juoksupato tulvaluukkuineen sijaitsee yläkanavan lähtöpaikassa, noin 7 km voimalaitokselta ylävir-taan (kuva 1). Maalismaan voimalaitoksen yläkanavassa virtaama on siten maksimissaan 250 m³/s.

Maalismaalla 3D-virtausmallin elementtikoko oli turbiinien lähialueella 3,5 x 5,0 m ja elementti-en koko kasvoi siirryttäessä kauemmas. Päävirtauksen virrannopeus (2 m syvyydellä) Maalismaan kapeassa yläkanavassa on virtaamalla 250 m³/s jopa 0,70–0,80 m/s, mutta virrannopeus laskee tasol-le 0,30–0,50 m/s kanavan leventyessä yläaltaaksi (kuva 12).



Kuva 11. Maalismaan voimalaitos alavirrasta päin kuvattuna. Kuva: PVO-Vesivoima Oy.



Kuva 12. Maalismaan ylakanavan alueen syvyyskartta (vas.) ja virrannopeuskartta 2 m vedenpinnan alapuolella virtaamatilanteessa 250 m³/s (oik.).

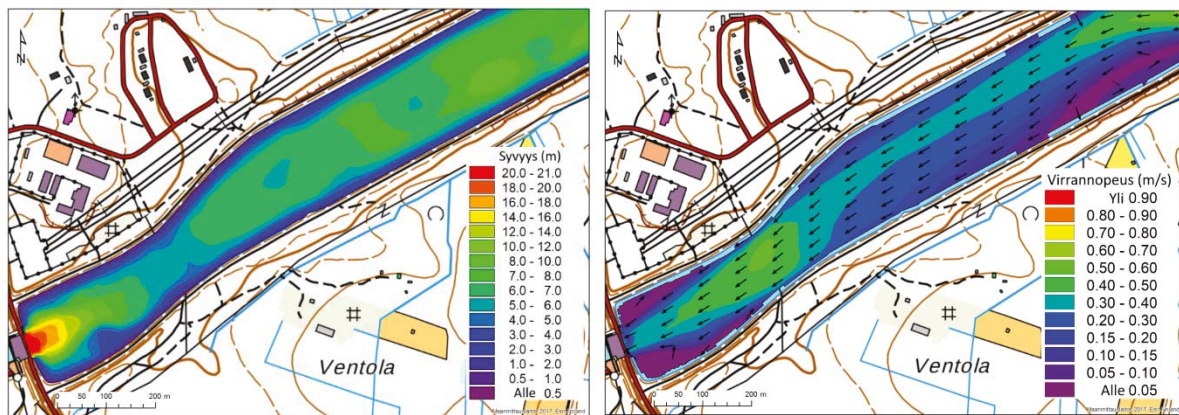
3.5. Raasakka

Raasakan ylakanavan pituus on noin 6 km ja leveys voimalan lähialueella vajaat 200 m (kuva 13). Ylakanavan syvyys on voimalaitoksen läheisyydessä jopa yli 20 m (kuva 14). Raasakan ohijuoksutus-pato sijaitsee noin 6 km voimalaitokselta ylävirtaan (kuva 1). Raasakan voimalan rakennusvirtaama on 375 m³/s, mitä käytettiin maksimivirtaamana myös 3D-virtausmallinnuksessa.

Raasakan voimalaitoksen lähialueella 3D-virtausmallin elementtikoko oli n. 5,0 x 5,0 m suurentu-en kauemmas voimalasta siirryttäessä. Raasakan ylakanavassa päävirtauksen virrannopeus (2 m sy-vyydellä) vaihtelee välillä 0,30–0,70 m/s virtaaman ollessa 250 m³/s (kuva 14).



Kuva 13. Raasakan voimalaitos alavirrasta päin kuvattuna. Kuva: PVO-Vesivoima Oy.



Kuva 14. Raasakan yläkanavan syvyyskartta (vas.) ja virrannopeuskartta 2 m vedenpinnan alapuolella virtaamatilanteessa 250 m³/s (oik.).

4. Vaelluspoikasten käyttäytymistutkimus Haapakosken voimalan ylakanavassa

Lohen vaelluspoikasten käyttäytymistutkimus Haapakosken voimalaitoksen ylakanavassa toteutettiin lijoen voimalaitosten alasvaellusreittien, erityisesti ylakanavan ohjausrakenteiden, suunnittelun taustatueksi. Tutkimuskohteeksi valikoitui joen ylimmäinen voimalaitos, minkä alasvaeltavat kalat kohtaavat ensimmäisenä esteenään.

Tutkimuksen päätavoitteena oli selvittää lohen vaelluspoikasten liikkumista ja uintireittejä niiden lähestyessä Haapakosken voimalaitosta. Varsinainen tutkimusalue sijoittui noin 100 metrin alueelle voimalaitoksen yläpuolelle (kuva 15), josta alasvaeltavia poikasia voidaan tulevaisuudessa ohjata erilaisilla ohjausrakenteilla haluttuun suuntaan alasvaellusväylälle.

4.1. Menetelmät

4.1.1. Kalojen kuljetus, merkintä ja vapautus

Tutkimuksessa käytettiin kaksivuotiaita lijoen kantaa olevia lohen vaelluspoikasia, jotka oli kasvatettu Raasakan kalanviljelylaitoksella (Voimalohi Oy). Tutkimusta varten 120 vaelluspoikasta merkittiin akustisilla lähettimillä (Vemco V5, pituus 12,7 mm, Ø 4,3 mm, paino 0,65 g).

Kalat kuljettiin autolla (1 m³ hapetettu kuljetussäiliö) ja veneellä (3-6 x 50 l saavi) Raasakan kalanviljelylaitokselta vapautuserittäin sumppeihin, jotka sijaittivat noin 6 km Haapakosken voimalaitospadosta ylävirtaan (kuljetusaika yhteensä n. 50 min). Kalojen annettiin toipua kaksi vuorokautta kuljetuksen jälkeen, minkä jälkeen kahdesta sumpusta haavittiin satunnaisesti kaloja merkittäväksi. Merkintää varten kalat nukutettiin (MS-222, pitoisuus n. 100 mg/l), mitattiin (paino ja pituus) ja eväkulumat sekä smolttiutumisaste määritettiin visuaalisesti. Välittömästi tämän jälkeen akustinen lähettin sijoitettiin kalan ruumiinonteloon noin 15 mm viiltohaavasta, ja haava suljettiin yhdellä tikillä. Yksittäisen kalan merkintä, mittaus ja visuaalinen arviointi kestivät yhteensä noin 3 minuuttia.

Merkinnän jälkeen kalojen annettiin toipua kaksi vuorokautta sumpuissa ennen vapautusta. Vaelluspoikaset vapautettiin kolmessa erässä (taulukko 2) ja jokaisen merkintäerän kanssa vapautettiin myös n. 300 merkitsemättömän kalan suojararvi. Kalojen vapautukset tehtiin veneestä virtaavaan veteen alkuillasta (kello 17:40–17:45) noin 7 km Haapakosken voimalasta ylävirtaan (kuva 15). Vapautuspaikan sijoittamisella reilusti tutkimusalueen yläpuolelle pyrittiin varmistamaan tutkimusaloille sopeutuminen uusiin olosuhteisiin sekä vaelluksen aktiivinen käynnistyminen ennen varsinaista tutkimusaluetta.

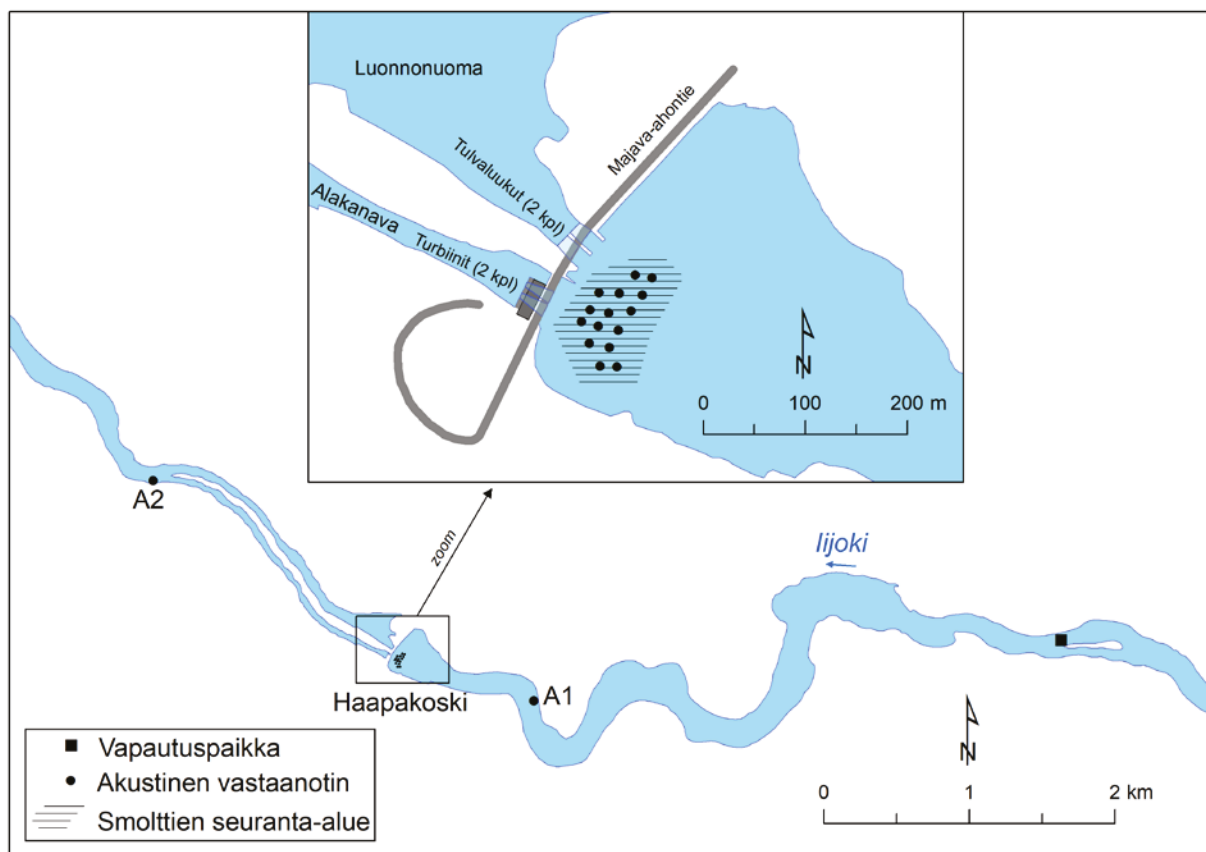
Taulukko 2. Tutkimuksessa vapautettujen vaelluspoikasten keskipituus ja -paino (vaihteluväli) sekä selviytyminen (yksilömäärä) ja vaellusaika (mediaani ja vaihteluväli) Haapakosken voimalan yläpuoliselle tutkimusalueelle eri vapautuspäivinä.

Vapautuspäivä	n	Pituus (mm)	Paino (g)	Haapakoskelle selviytyneet	Vaellusaika Haapakoskelle (h)
11.6.2017	40	196 (171–248)	61 (40–115)	38	2,4 (2,0–6,6)
16.6.2017	40	201 (169–239)	66 (36–119)	36	2,5 (2,1–15,7)
22.6.2017	39	201 (180–244)	65 (44–125)	35	5,4 (3,1–55,7)
Yhteensä	119	199 (169–248)	64 (36–125)	109	2,7 (2,0–55,7)

4.1.2. Kalojen paikannus

Merkittyjen kalojen liikkumista seurattiin tutkimusjakson (11.6.–5.7.2017) aikana Haapakosken voimalan yläkanavassa, noin 55–100 m voimalaitoksesta ylävirtaan, 15 akustisella vastaanottimella (HR2, Vemco). Vastaanottimet sijoitettiin noin 20 m etäisyydelle toisistaan (kuva 15), jolloin kalojen tarkat uintireitit tutkimusalueella pystyttiin selvittämään kolmiopaikannusmenetelmään perustuen (VPS, Vemco). Vastaanottimet sijaitsivat 2,5–5,8 metriä vedenpinnan alapuolella. Paikannustarkkuuden tehostamiseksi seuranta-alueelle sijoitettiin lisäksi neljä referenssilähetintä. Kalojen varsinaiset paikannuslaskelmat tehtiin ostopalveluna Vemco:n toimesta Kanadassa ja tulokset saatiin käyttöön koordinaattitietoina sisältäen tiedon jokaisen yksittäisen paikannuksen tarkkuudesta. Kalahavaintoja saatiin myös varsinaisen tarkan seuranta-alueen ulkopuolelta (kuva 15), mutta alueen ulkopuolisten paikannusten tarkkuus oli heikompi.

Yläkanavan vastaanotinverkoston lisäksi akustiset kuuntelulaitteet (VR2W, Vemco) asennettiin noin 1 km Haapakosken voimalaitoksen yläpuolelle (A1) ja Haapakosken alakanavan suulle (A2) (kuva 15). Näiden kuunteluasemien avulla saatiin tieto tutkimusalueelle yläkanavaan saapuneiden ja takaisin ylävirtaan liikkuneiden yksilöiden määrästä sekä tieto Haapakosken voimalaitoksen ohittaneiden kalojen määrästä. Kuunteluasema A1 sijaitsi rauhallisesti virtaavalla alueella ja havaitsi lähettimen signaalin yli kahdensadan metrin etäisyydeltä. Alakanavan suulla sijaitsevan kuunteluaseman havaintoalue oli pienempi, noin 100 metriä, voimakkaan virtauksen aiheuttaman taustamelun vuoksi.



Kuva 15. Akustisella lähettimellä merkittyjen lohien vaelluspoikasten tutkimusalue lijoella. Karttaan on merkitty smolttien vapautuspaikka (n. 7 km Haapakosken voimalaitospadolta ylävirtaan), voimalan ylä- ja alapuolelle sijoitettujen kuunteluasemien sijainti (A1 ja A2) sekä varsinaisen smolttien seuranta-alue vastaanottimineen Haapakosken voimalan yläkanavassa.

4.2. Tulokset

Vaelluspoikaset lähtivät vaeltamaan pian vapautuksen jälkeen ja selviytyivät hyvin Haapakosken yläpuoliselle seuranta-alueelle (taulukko 2, kuva 15). Vaelluspoikasten keskimääräinen vaellusnopeus hidastui joen virtaaman vähentyessä (taulukko 2).

Akustisille vastaanottimille tallentuneiden havaintojen perusteella vain 25 vaelluspoikasta (23 %) vaelsi alas Haapakosken voimalaitoksen läpi. Vapautuserien välillä oli suurta vaihtelua alasvaelluksissa: eniten vaelluspoikasia ($14/36 = 39\%$) läpäisi voimalan toisesta vapautuserästä, mutta muiden vapautuserien (1.erä 13 %; 3.erä 17 %) läpäisyprosentit jäivät selvästi alhaisemmaksi. Kaikki padon alapuolelle päätyneet poikaset vaelsivat turbiinien läpi, lukuun ottamatta kahta ensimmäisen vapautuserän poikasta, jotka vaelsivat padon alapuolelle ohijuokсутusten aikana todennäköisesti tulvaluuksista. Voimalaitoksen läpi vaelluspoikaset menivät keskimäärin virtaamatilanteella $198 \text{ m}^3/\text{s}$ (mediानी $237 \text{ m}^3/\text{s}$; vaihteluväli $31\text{--}326 \text{ m}^3/\text{s}$) ja voimalan läpäisy tapahtui useimmiten yöaikaan (klo 20–08 välillä, 22/25 yksilöä).

Haapakosken yläpuolen seuranta-alueelta (kuva 15) tallentui enemmän havaintoja silloin kun virtaama oli heikempi. Kalat liikkuvat todennäköisesti alueella tällöin hitaammin ja siten niistä saatiin enemmän paikannuksia seuranta-alueelta.

Haapakosken yläpuoliselta seuranta-alueelta ja Haapakosken yläpuolen A1 kuunteluasemalta saatujen havaintojen perusteella Haapakoskelta alasvaeltamattomat yksilöt lähtivät tai päätyivät useimmiten ylävirran suuntaan voimalaitokselta (72 vaelluspoikasesta viimeinen havainto noin 1 km voimalasta ylävirtaan olevalta kuunteluasemalta), mutta muutama yksilö liikkui vielä seurannan päättyessä voimalan yläpuolisella seuranta-alueella.

Haapakosken yläpuolelle jääneet vaelluspoikaset olivat ilmeisesti haluttomia käyttämään turbiineja vaellusreittinä voimalan ohi, sillä smoltit lähestyivät voimalaitosta useita kertoja ja viettivät pitkiäkin aikoja voimalan edustan seuranta-alueella. Suurin osa näistä vaelluspoikasista myös kävi voimalaitoksen lähestymiskertojen välillä ylävirrassa perustuen seuranta-alueelta ja Haapakosken yläpuolisen A1 kuunteluasemalta tallentuneisiin havaintoihin (ks. kuva 15).

5. 3D-virtausmallinnusten ja kalojen käyttäytymistietojen yhdistäminen

Haapakosken voimalaitoksen yläkanavasta saatujen kalojen käyttäytymistietojen sekä yläkanavan 3D-virtausmallinnustulosten yhdistämisellä selvitettiin erilaisten virtaamaolosuhteiden mahdollista vaikutusta kalojen liikkumiseen voimalaitoksen lähialueilla. Havaintojen yhdistämisen keskeisenä tavoitteena oli saada sovelluskelpoista tietoa suunniteltavien alasvaelluksen ohjausrakenteiden sijoittamiseen yläkanavassa. Haapakosken yläkanavasta saatuja havaintoja ja tietoja hyödynnettiin vaelluspoikasten liikkumisen arvioinnissa muiden lijojen voimalaitosten yläkanavissa.

5.1. Menetelmät

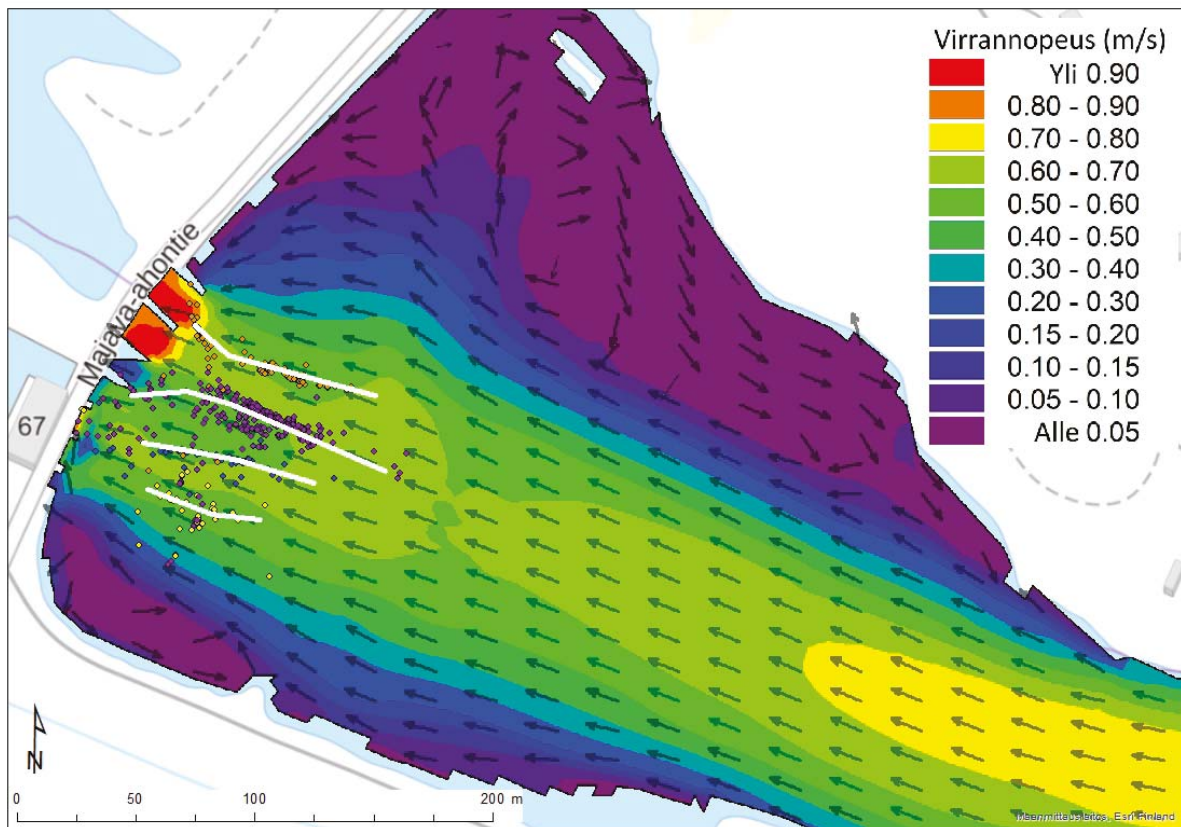
Akustisen vastaanotinverkoston alueelle (kuva 15) tallentuneiden vaelluspoikasten ensimmäiset lähestymiset määritettiin ja havaintosarja yhdistettiin saapumisajan mukaiseen 3D-virtausmallipohjaan. Ensimmäiseksi lähestymiseksi määritettiin sijaintipistetiedot ensimmäisestä havainnosta havaintoon, jolloin kala saavutti voimalaitospadon tai poistui seuranta-alueelta yli 20 min ajaksi. Sijaintipisteet sijoitettiin tarkastelua varten erikseen pinnan virtausmallitasolle sekä mallitasoille metrin välein pinnan alapuolella syvyyksillä 1–4 m. Tässä raportissa kalojen käyttäytymistarkastelut esitetään pääosin virtausmallitasolla metrin syvyydellä pinnan alapuolella, sillä aikaisemman tutkimustiedon perusteella vaelluspoikaset vaeltavat yläkanavissa lähellä veden pintaa (Rivinoja 2005, Goodwin ym. 2006, Karppinen ym. 2017). Virtausmallia juoksuutilanteelle 450 m³/s käytettiin ensimmäisen vapautuserän kalojen (taulukko 2) saapumisen tarkastelussa, sillä se oli ainoa tilanne, jolloin Haapakoskella oli käytössä ohijuoksuksia. Muiden vapautuserien (taulukko 2) tarkasteluissa virtaamat olivat alle 250 m³/s.

5.2. Tulokset

Vaelluspoikaset lähestyivät ensimmäisen kerran Haapakosken voimalaitosta päävirrassa, mutta käyttäytymisessä voimalaitoksen lähialueella (alle 100 m voimalaitospadolta ylävirtaan) oli selviä eroja virtaamatilanteiden välillä (kuvat 16–19).

5.2.1. Vapautuserä 11.6.2018

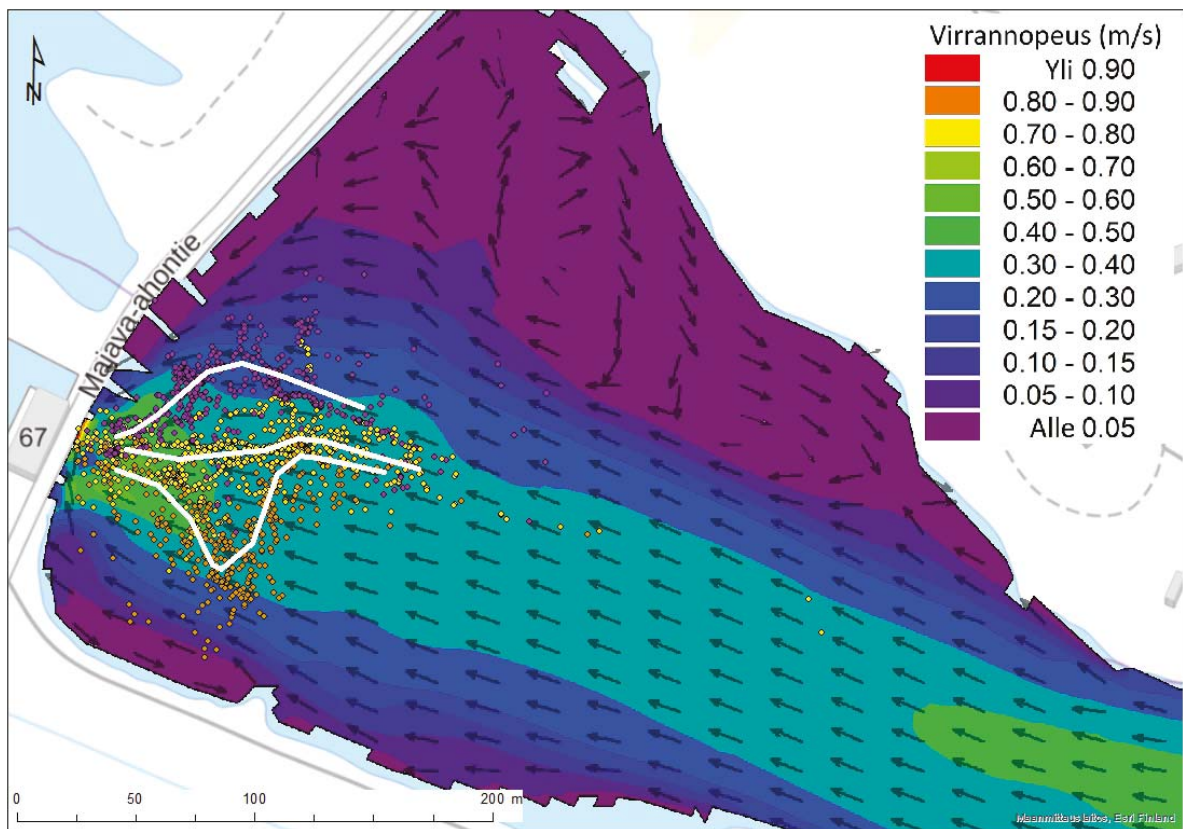
Ensimmäisen smolttierän vapautuksen aikaan joen kokonaisvirtaama oli 333 m³/s (ohijuoksutusta 83 m³/s). Vaelluspoikaset liikkuivat nopeasti (ensimmäisen lähestymisen kesto keskimäärin 3 min, vaihteluväli 1–18 min) ja suoraviivaisesti kohti Haapakosken voimalaitosta tai tulvaluukkuja. Vaelluspoikasten havaittiin lähestyvän voimalaa lähinnä neljää vaihtoehtoista uintireittiä pitkin (kuva 16), joista yleisin oli keskellä uomaa kohti voimalaitosturbiineja kääntyvä reitti (18/37 kalaa, kuva 16 violetit pisteet). Toiseksi suosituin oli tulvaluukkuja kohti menevä reitti (10/37 smolttia, kuva 16 oranssit pisteet) ja kaksi etelärannan puoleista reittiä olivat keskenään yhtä suosittuja (lähimpänä rantaa 3/37, kuva 16 keltaiset pisteet ja keskemällä 5/37, kuva 16 siniset pisteet). Ensimmäisen vapautuserän havaintojen tarkastelussa käytettiin virtausmallia 450 m³/s, sillä se oli ainoa mallinnettu ohijuoksuutilanne Haapakoskella.



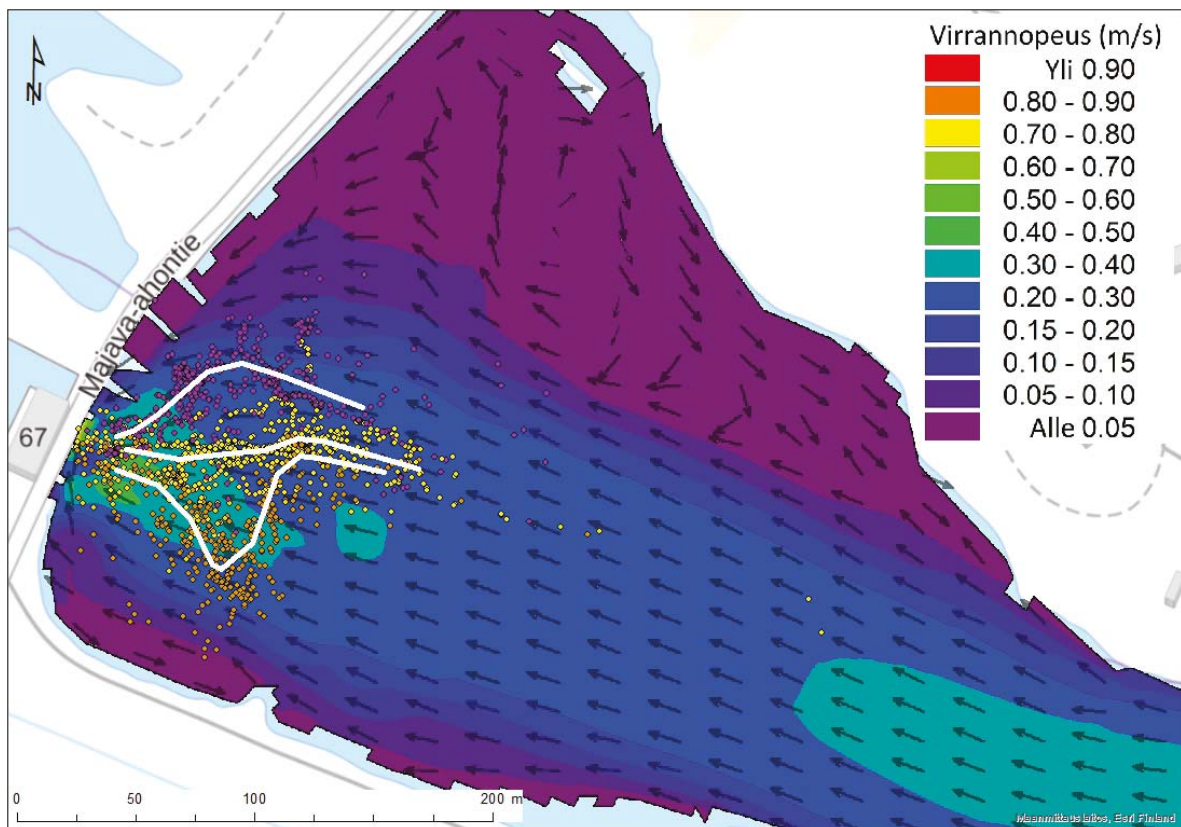
Kuva 16. Ensimmäisen vapautuserän vaelluspoikasten (n=37) uintireitit ensimmäisellä voimalan lähestymiskerralla 11.6.2017 klo 19:00 – 11.6.2017 klo 23:59 virtaamatilanteessa 333–339 m³/s. Lohen vaelluspoikasten uintireitit on kuvattu havaintopisteillä, jotka on jaettu silmämääräisesti kuuluvaksi neljään pääuintireittiin (kuvattu eri väreillä) ja neljä pääuintireittiä on merkitty myös valkoisilla viivoilla. Uintireitit on esitetty virtausmallilla, joka kuvaa tilannetta metrin syvyydellä pinnan alapuolella virtaamatilanteessa 450 m³/s.

5.2.2. Vapautuserä 16.6.2018

Toisen vapautuserän aikaan joen virtaama oli n. 240 m³/s ja havaintopisteiden tarkasteluissa käytettiin virtausmallitasoja virtaamalla 200 ja 250 m³/s. Toisen vapautuserän vaelluspoikaset lähestyivät yleensä voimalaitosta ensimmäisen kerran uoman keskiosassa päävirran suuntaisesti, mutta n. 100 m voimalaitoksen yläpuolella uintireitit jakautuivat kolmeen eri vaihtoehtoon (kuvat 17–18). Suurin osa vaelluspoikasista (16/34, kuva 17 keltaiset pisteet) kääntyi kyseisessä kohdassa loivasti, virransuuntaisesti kohti voimalaitosta, mutta osa poikasista (7/34, kuva 17 oranssit pisteet) kääntyi samassa kohdassa miltei kohtisuorasti etelärantaa kohti ja myöhemmin etelärannan lähistöllä virtausnopeuden vaihtumiskohdassa kohti voimalaitosturbiineja (kuvat 17–18). Etelärannan puoleisen reitin valinneiden smolttien käyttäytymisessä havaittiin usein pieni liike ylävirtaan vielä saavuttaessa turbiinien edustan voimakkaan virtauksen alueelle. Kolmas uintireitti (11/34 smoltia, kuva 17 violetit pisteet) kulki suoraan kohti ohijuoksuosuuksia, joiden edustalla kalat kääntyivät virtauksen hidastuessa kohti voimalaitosta (kuva 17). Vaelluspoikasten ensimmäinen lähestyminen kesti keskimäärin 9 min (vaihteluväli 2–30 min).



Kuva 17. Toisen vapautuserän vaelluspoikasten (n=34) uintireitit ensimmäisellä voimalan lähestymiskerralla 16.6.2017 klo. 19:30 – 16.6.2017 klo. 23:59 virtaamatilanteessa 237–243 m³/s. Lohen vaelluspoikasten uintireitit on kuvattu havaintopisteillä, jotka on jaettu silmämääräisesti kuuluvaksi kolmeen pääuintireittiin (kuvattu eri väreillä) ja nämä kolme pääuintireittiä on merkitty myös valkoisilla viivoilla. Uintireitit on esitetty virtausmallitasolla metrin syvyydellä pinnan alapuolella virtaamatilanteessa 250 m³/s.

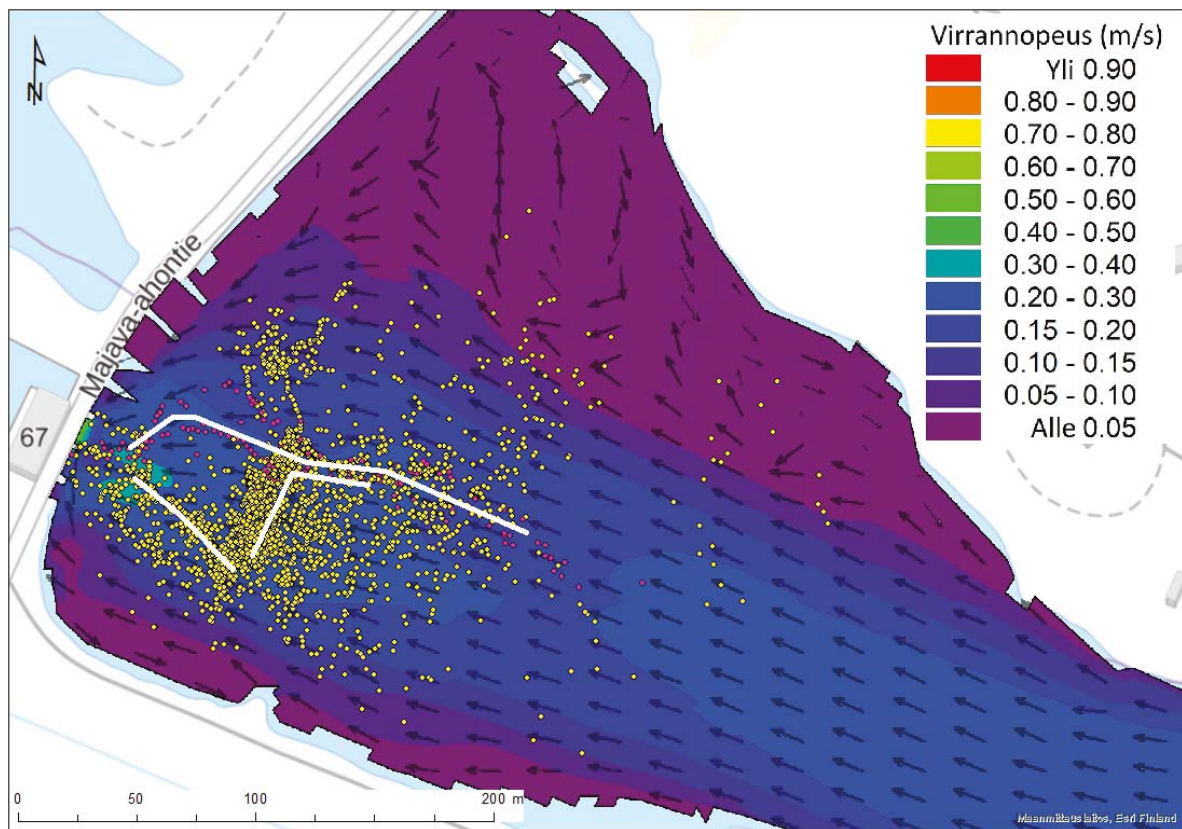


Kuva 18. Toisen vapautuserän vaelluspoikasten ($n=34$) uintireitit ensimmäisellä voimalan lähestymiskerralla 16.6.2017 klo. 19:30 – 16.6.2017 klo. 23:59 virtaamatilanteessa 237–243 m^3/s . Lohen vaelluspoikasten uintireitit on kuvattu havaintopisteillä, jotka on jaettu silmämääräisesti kuuluvaksi kolmeen pääuintireittiin (kuvattu eri väreillä) ja nämä kolme pääuintireittiä on merkitty myös valkoisilla viivoilla. Uintireitit on esitetty virtausmallitasolla metrin syvyydellä pinnan alapuolella virtaamatilanteessa 200 m^3/s .

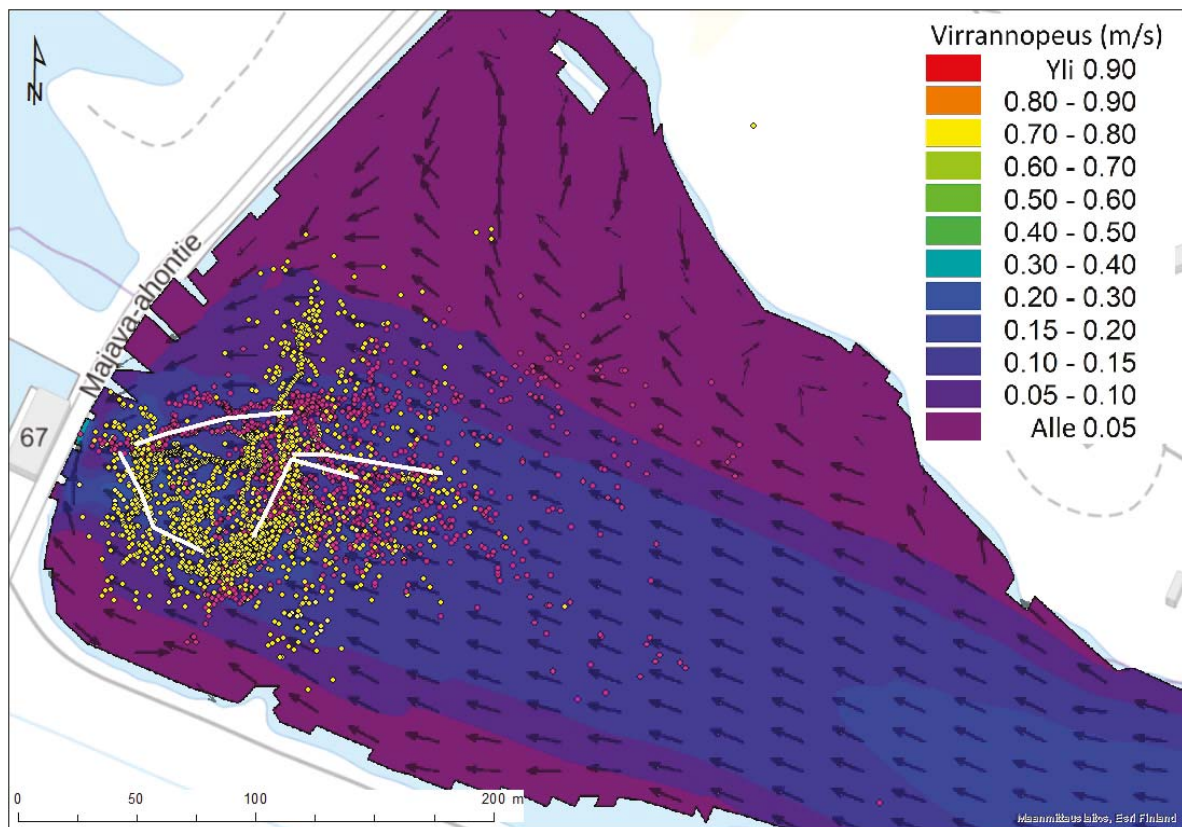
5.2.3. Vapautuserä 21.6.2017

Kolmannen vapautuserän vaelluspoikaset saapuivat voimalaitoksen yläpuoliselle seuranta-alueelle pääasiassa kahdessa eri virtaamatilanteessa. Vapautusiltana tai sen jälkeisenä yönä 15 vaelluspoikasta saapui seuranta-alueelle virtaaman ollessa n. 150 m^3/s ja yhdeksän vaelluspoikasta, kun virtaama oli n. 100 m^3/s . Molemmissa virtaamatilanteissa smoltit jäivät pyörimään voimalaitoksen yläkanavan alueelle ennen kuin saapuivat voimalan läheisyyteen (kuvat 19–20). Suoraan kohti voimalaitosta liikkui vain kaksi vaelluspoikasta virtaamatilanteessa 150 m^3/s (kuva 19).

Vaelluspoikaset, jotka saapuivat voimalaitospadolle ensimmäisen kerran virtaamatilanteessa n. 150 m^3/s , lähestyivät voimalaitosta useimmiten päävirran reunalla vastaavalla tavalla kuin smoltit virtaamatilanteessa 250 m^3/s , mutta lähes kaikki smoltit kääntyivät kohti etelärantaa n. 90 m ennen voimalaitosta (kuva 19). Käännöksen jälkeen smoltit liikkuivat edestakaisin sekä pohjois-eteläsuunnassa että itä-länsisuunnassa voimakkaimman virtauksen alueella (kuvat 19–20). Edestakaisen liikkumisen jälkeen voimalan lähestyminen tapahtui useimmiten etelärannan puolelta (150 m^3/s : 11/15 smoltia, kuva 19 keltaiset pisteet, 100 m^3/s : 6/9 smoltia, kuva 20 keltaiset pisteet). Virtaamatilanteessa n. 150 m^3/s ensimmäinen lähestyminen vie keskimäärin 31 min (vaihteluväli 6–102 min) ja 100 m^3/s virtaamalla vaelluspoikaset käyttivät entistä enemmän aikaa voimalaitoksen lähestymiseen (45 min, vaihteluväli 10–127 min).



Kuva 19. Kolmannen vapautuserän vaelluspoikasten (n=13) uintireitit ensimmäisellä voimalan lähestymiskerralla 21.6.2017 klo 22:00 – 21.6.2017 klo 23:00 virtaamatilanteessa 167 m³/s. Lohen vaelluspoikasten havaintopisteet on jaettu silmämääräisesti kuuluvaksi kahteen uintireittiin (kuvattu eri väreillä) ja nämä kaksi uintireittiä on merkitty myös valkoisilla viivoilla. Etelärannan puoleisessa viivassa kuvattu uintireitin alku- ja loppuosa ja katkoksen kohdalla kalat ovat liikkuneet edestakaisin pisteiden osoittamalla alueella ennen siirtymistään loppuosalle. Uintireitit on esitetty virtausmallipohjalla metrin syvyydellä pinnan alapuolella virtaamatilanteessa 150 m³/s.



Kuva 20. Kolmannen vapautuserän vaelluspoikasten (n=9) uintireitit ensimmäisellä voimalan lähestymiskerralla 21.6.2017 klo 23:00 – 22.6.2017 klo 01:00 virtaamatilanteessa 72–87 m³/s. Lohen vaelluspoikasten havaintopisteet on jaettu silmämääräisesti kuuluvaksi kahteen uintireittiin (kuvattu eri väreillä) ja näiden uintireittien alku- ja loppuosa on kuvattu valkoisella viivalla ja viivojen katkoksen kohdalla kalat ovat liikkuneet edestakaisin pisteiden osoittamalla alueella ennen siirtymistään loppuosalle. Uintireitit on esitetty virtausmallipohjalla metrin syvyydessä pinnan alapuolella virtaamatilanteessa 100 m³/s.

5.3. Yhteenveto vaelluspoikasten käyttäytymisestä

Veden virtausolosuhteiden havaittiin vaikuttavan vaelluspoikasten liikkumiseen voimalaitoksen yläkanavassa. Smoltit lähestyivät voimalaitosta päävirrassa, mutta virrannopeuden muutokset näyttivät vaikuttavan smolttien liikkumissuuntiin. Smoltit etenevät hyvin suoraviivaisesti virtausnopeuden ollessa yli 0,5 m/s ja välttelivät alle 0,2 m/s virtaavia alueita. Virrannopeuden laskiessa alle 0,3 m/s smolttien liikkuminen muuttui suoraviivaisesta etenemisestä satunnaisemmaksi reitin hakemiseksi.

Haapakosken voimalan yläkanavaan suunniteltavan ohjausrakenteen ei todennäköisesti tarvitse ulottua voimalaitoksen etelärannan puolelle alueelle, missä virrannopeus on alle 0,2 m/s, sillä smoltit kääntyivät viimeistään tämän virrannopeuden vaihtumisvyöhykkeellä takaisin päävirran suuntaan. Tätä havaintoa voidaan hyödyntää myös muiden lijojen voimaloiden alasvaelluksen ohjausrakenteen suunnittelussa.

6. Alasvaellusratkaisujen yleissuunnitelmat lijoella

lijoella alasvaellusratkaisujen yleissuunnitelmat sisältävät esityksen alasvaelluksen ohjausrakenteesta sekä potentiaalisesta alasvaellusväylästä. Lisäksi lijoen Haapakosken voimalalle tehdyssä yleissuunnitelmassa huomioitiin vaihtoehtona vaelluspoikasten kiinniotto- ja kuljetusjärjestelmä alasvaellusväylän yhteyteen. Yleissuunnitelmien lähtökohtana käytettiin Haapakosken yläpuolelta saatuja vaelluspoikasten käyttäytymistietoja eri virtaamatilanteissa ja tietoja lohen vaelluspoikasten käyttäytymisestä aiemmin maailmalla tehdyissä tutkimuksissa. Lisäksi suunnitelmissa huomioitiin patokohtaisesti tiedot mahdollisista padon läpäisykohdista, voimalaitosten yläpuolelle kertyvien virran mukana kulkeutuvien roskien keräys sekä nousulohia varten tehtyt kalatiesuunnitelmat.

lijoella tulvaluukkujen ei arvioida toimivan merkittävänä alasvaellusratkaisuna, sillä tulvahuippu ja ohijuoksutukset ajoittuvat usein keväällä ajankohtaan, jolloin veden lämpötila on smolttivaelluksen kannalta alhainen (ks. luku 2. Iijoki, Orell ym. 2016). Lisäksi lijoen tulvaluukut aukeavat alhaalta ylöspäin (luukkujen kynnykset 4,5–9,1 metrin syvyydessä), jolloin pinnan lähellä vaeltavat poikaset eivät helposti ohjaudu/kulje luukuista kulkeutuvan veden mukana. Smolttien ohjautumista tulvaluukkujen kautta alavirtaan ei tarvitse kuitenkaan estää, sillä ohijuoksutuspatojen alapuolelta ovat vapaita rakenteista, joihin smoltit saattaisivat törmätä.

6.1. Alasvaelluksen ohjausrakenne

Padon yläpuolella tapahtuvaan kalojen ohjaamisen voidaan käyttää pinnasta pohjaan ulottuvia kiinteitä rakenteita (yleensä muutettuja välppärakenteita), joiden läpi kalat eivät pysty uimaan, tai veden pintakerroksessa kelluvia rakenteita, joiden toiminta perustuu kalojen käyttäytymiseen (Huusko ym. 2014a ja viitteet siinä). Vaellusohjausrakenteiden valinta tapahtuu kohdekohtaisesti riippuen mm. ohjattavista kalalajeista, joen kokoluokasta sekä yläkanavan ja voimalaitoksen rakenteesta. Esimerkiksi kiinteät ohjausrakenteet sopivat tavallisesti paremmin pienemmän kokoluokan joille, sillä niiden huoltotoimet ja puhtaanapito vaikeutuvat joen kokoluokan kasvaessa. Lisäksi kiinteiden rakenteiden asentaminen on helpompaa toteuttaa jo voimalan rakentamisen yhteydessä, sillä jälkiasennuksena tehtäessä niiden asennus vaatii voimalan pysäyttämisen ja suojapatojen rakentamisen. Ohjausrakenteen valinnassa on tärkeä huomioida myös kohdelajin käyttäytymispiirteet, sillä esimerkiksi kelluvat rakenteet eivät toimi pohjan lähellä vaeltavien lajeilla, vaikka niiden on havaittu toimivan veden pintakerroksessa vaeltavilla lohen vaelluspoikasilla (Larinier & Travade 2002, Scruton ym. 2007, Huusko ym. 2014a).

lijoen pääuoman koko, yläkanavien olosuhteet (leveys, syvyys ja virtaamat) ja ohjausrakenteen asentaminen jälkiasennuksena puoltavat kelluvaa aitarakennetta vaelluspoikasten ohjaukseen. Kelluvan ohjausaidan toimintaan vaikuttavat erityisesti virtausolosuhteet sen lähialueella. Lohen vaelluspoikasille on suositeltu aidan läheisyydessä (aitaa kohti tuleva ja aidan suuntaisesti liikkuva) suurimaksi virtausnopeudeksi 0,5–0,6 m/s, mutta virtauksen ohjatessa kaloja selvästi kohti alasvaellusväylän sisäänkäyntiä voi virrannopeus olla huomattavasti korkeampikin (Larinier & Travade 2002). Aidan alittava veden virtausnopeus ei kuitenkaan saisi nousta suuremmaksi kuin aidan suuntainen virtausnopeus. Kelluvan ohjausaidan korkeus määräytyy ohjattavan lajin/lajien mukaan. Lohen vaelluspoikaset vaeltavat käytettävissä olevien tietojen ja havaintojen mukaan pääosin veden pintakerroksessa ja maailmalla lohen poikasia ohjaavien kelluvien rakenteiden korkeudet ovat vaihdelleet välillä 2–4 m (Scruton ym. 2007, Jääskeläinen 2014, Vikström 2016, Maveplan Oy 2017). Näihin tietoihin perustuen myös lijoella ohjausrakenteen korkeudeksi riittäisi todennäköisesti 2–4 m.

6.2. Alasvaellusväylä

Padon yläpuolelle sijoitettu ohjausrakenne ohjaa kalat alasvaellusväylän sisäänkäynnille ja alasvaellusväylän kautta turvallisesti ja nopeasti padon alapuolelle. Alasvaellusväylän sisäänkäynnin virtausolosuhteet ovat hyvin tärkeitä väylän toimivuuden kannalta. Virtauksen tulee kiihtyä tasaisesti kohti sisäänkäyntiä (kuva 21) kasvaen vähitellen niin suureksi, ettei reittiä käyttävä kala pysty lopulta enää uimaan virtaa vastaan vaan siirtyy alasvaellusväylää pitkin padon alapuolelle (Larinier & Travade 2002, USFWS 2017). Alasvaellusväylän sisäänkäynnin kokosuosituksen minimi on 0,4–0,5 m sekä korkeus- että leveyssuunnassa (Larinier & Travade 2002). Alasvaellusväylän sisäänkäyntiä suositellaan sijoitettavaksi mahdollisimman lähelle turbiineille vievää virtaa ja mahdollisuuksien mukaan paikkaan, mihin kalat kerääntyvät (Larinier & Travade 2002, USFWS 2017).



Kuva 21. Alasvaellusväylän sisäänkäynnin virtausolosuhteet ovat keskeisiä koko ratkaisun toimivuuden kannalta. Virtauksen pitää houkutella kala sisäänkäynnille ja lopulta estää kalan paluu takaisin ylävirtaan. Kuva: Panu Orell.

Alasvaellusväylän rakenteena voidaan käyttää putkea tai kourua (kuva 22). Tärkeintä molemmissa ratkaisuissa on, että alasvaellusväylällä ei ole teräviä kulmia tai liitoskohtia, joihin kalat voisivat osua liikkueensa veden mukana väylää alas. Lisäksi on tärkeää ehkäistä roskien päätymistä alasvaellusväylään tai sen sisäänkäynnin edustalle (USFWS 2017). Alasvaellusväylässä tulisi välttää vapaita pudotuksia eikä kaloja suositella pumpattavaksi väylässä (USFWS 2017). Putkirakenteita käytettäessä väylän olosuhteiden olisi hyvä vastata vapaasti virtaavan kourun olosuhteita (mm. paineistamaton) ja veden syvyydeksi on esitetty 40 % putken halkaisijasta koko matkalla. Alasvaellusväylän putkirakenteen halkaisija suositellaankin mitoitettavaksi käytettävän vesimäärän mukaan niin, että $1 \text{ m}^3/\text{s}$ virtaamalla putken halkaisija on n. 60 cm (USFWS 2017). Lisäksi pitkiin (yli 40 m) putkirakenteisiin tarvitaan usein luokkuja, jotka muun muassa mahdollistavat roskien poiston väylästä (USFWS 2017). Alasvaellusväylän uloskäynti on suositeltavaa sijoittaa vedenpinnan yläpuolella, jolloin ylävirtaan vaelta- massa olevat kalat eivät voi erehtyä luulemaan sitä vaellusreitintä sisäänkäynniksi. Lisäksi uloskäynti tulisi sijoittaa alueelle, missä virtausolosuhteet (suositus suuntautuneeseen virtaan, virrannopeus

noin 1,2 m/s) auttavat kaloja jatkamaan vaellustaan alavirran suuntaan, jotta vaellus jatkuu sujuvasti ja predaatoririski väylän ulostulon jälkeen pienenee (USFWS 2017). Ulostulon yhteydessä tulisi huomioda, että kalojen putoamisnopeus vedenpintaan pysyisi alle 7,5 m/s ja alastulon kohdalla vesisyvyyden tulisi olla vähintään 25 % putouskorkeudesta (USFWS 2017).



Kuva 22. Kaksi erilaista alasvaellusväyläratkaisua. Vasemmalla voimalaitoksen kylkeen rakennettu betonikouru ja oikealla putkirakenne (valkoinen putki). Kuvat: Panu Orell.

Nousukaloja varten rakennetun kalatien toimiminen alasvaellusväylänä on haastavaa toteuttaa, sillä kalatien uloskäynnin virtausolosuhteiden muuttaminen alasvaellusväylän sisäänkäynnille sopiviksi on vaikeaa (Huusko ym. 2014a). Lisäksi kalatiessä smolttien vaelluksen alavirtaan on havaittu olevan verraten hidasta ja kalatien kautta kulkeminen voi aiheuttaa myös lisääntyvää kuolevuutta (Gustafsson 2010, Huusko ym. 2014b).

Iijoella alasvaellusväylän sisäänkäynnin sijainniksi on kaikilla voimalaitoksilla suunniteltu entisten tukinuittorännien kohtia (myöhemmin "uittoaukko"), joiden sijainti voimaloiden läheisyydessä on suositusten mukainen. Uittoaukkojen käyttö on myös teknisesti käytännöllisin vaihtoehto, sillä läpivienti maapadosta on patoturvallisuuden kannalta erittäin haastavaa. Ijoen neljällä ylimmällä padolla myös kalateiden uloskäynti on suunniteltu uittoaukkojen kohdalta. Uittoaukon leveys riittänee kuitenkin tarvittaessa molempien läpivientien sijoittamiseen vierekkäin. Tällöin voisi lisäksi etsiä ratkaisua, missä alasvaellusväylän sisäänkäyntiin ohjattavasta vedestä osan voisi hyödyntää kalatien vetenä, sillä sisäänkäynnin jälkeisellä alasvaellusväylällä vesitystarve riippuu alasvaellusväylänä käytettävän putken/kourun halkaisijasta. Ijoen voimalaitoksilla alasvaellusväylänä voidaan käyttää putkea, jonka uloskäynti sijoittuisi alakanavissa turbiinipyörteiden alavirran puolelle (n. 40–45 m voimalasta alavirtaan).

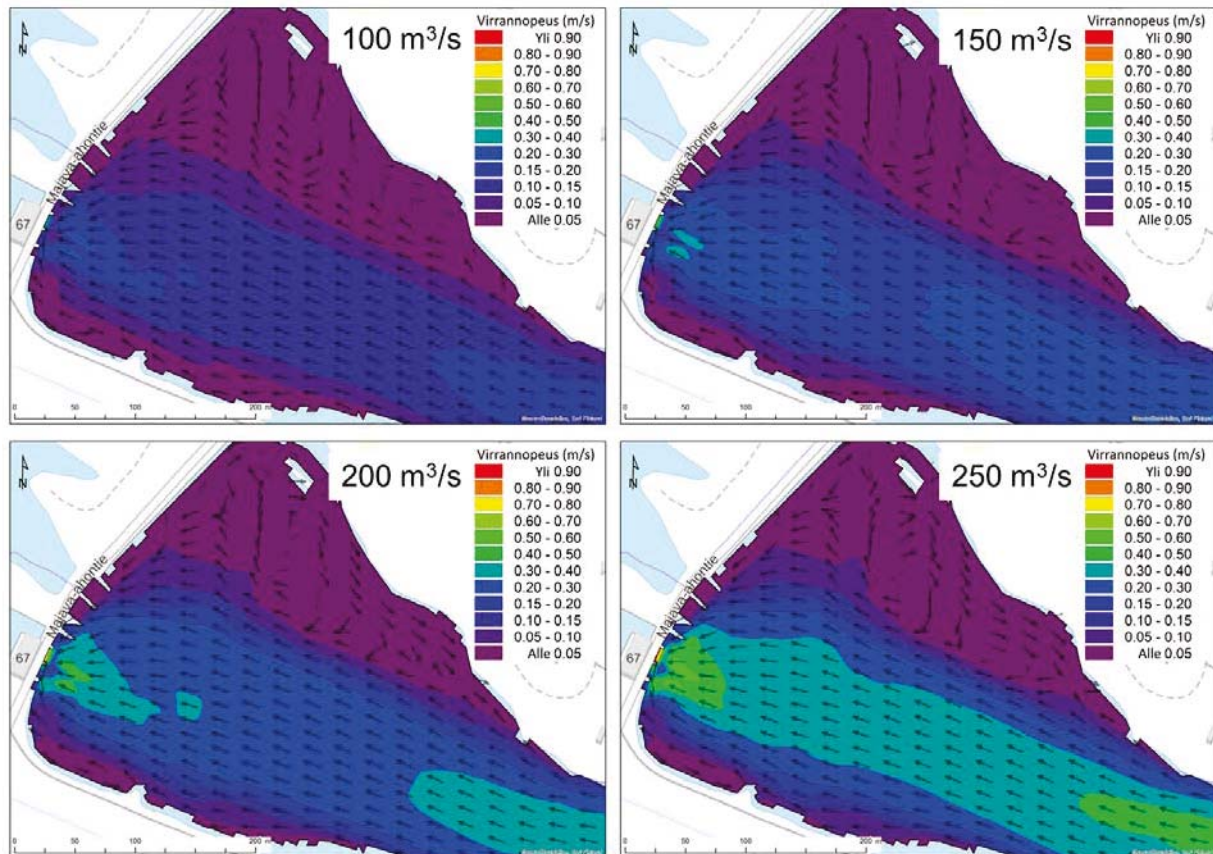
Alasvaellusväylän yhteyteen voidaan rakentaa kalojen kiinniotto- ja kuljetusjärjestelmä, jos kalat halutaan siirtää useampien patojen ohi. Tätä tarkoitusta varten voidaan vaellusväylään rakentaa säilytysaltaita, mistä kalat saadaan siirrettyä tarvittaessa suoraan kuljetusautoon.

6.3. Haapakosken alasvaellusratkaisu

Haapakosken yläaltaan veden virtaus pysyy virtaamavälillä 100–250 m³/s samansuuntaisena (kuva 23). Jokileventymän pohjoisosaan jää kaikissa tarkastelluissa virtaamavaihtoehdoissa laaja heikkojen virtausten alue. Voimalaitoksen rakennusvirtaamalla, 250 m³/s, virtausnopeudet nousevat vain aivan voimalan välittömässä läheisyydessä yli 0,6 m/s, muilla virtaamilla virrannopeudet jäävät alle 0,6 m/s (kuva 23).

Mallinnetussa ohijuoksutustilanteessa (liite 1, ohijuoksutus 200 m³/s) virtausolosuhteet muuttuvat selvästi verrattuna tilanteisiin, jolloin vettä kulkee vain turbiinien kautta. Virrannopeus nousee koko voimalan yläkanavan matkalla päävirrassa ja päävirta haarautuu turbiineille ja ohijuoksutusluukuille noin 65 metriä voimalan yläpuolella. Mallinnetussa ohijuoksutustilanteessa virrannopeus tulva-

luukkujen lähialueella nousee jopa yli 0,9 metriin sekunnissa. Kevättulvan aikaan smoltteja ohjautuu todennäköisesti voimalaitoksen ohi alavirtaan myös tulvaluukkujen kautta. Tätä vaihtoehtoa tukee myös havainto Haapakosken käyttäytymistutkimuksesta, sillä kahden smoltin todennäköinen vaellusreitti voimalan alapuolelle oli tulvaluukku ajankohtana, jolloin ohijuoksutuksen määrä oli 60–80 m³/s.



Kuva 23. 3D-virtausmallin mukaiset virtauskentät neljällä virtaamavaihtoehdolla metrin syvyydessä pinnan alapuolella Haapakosken voimalan yläkanavassa.

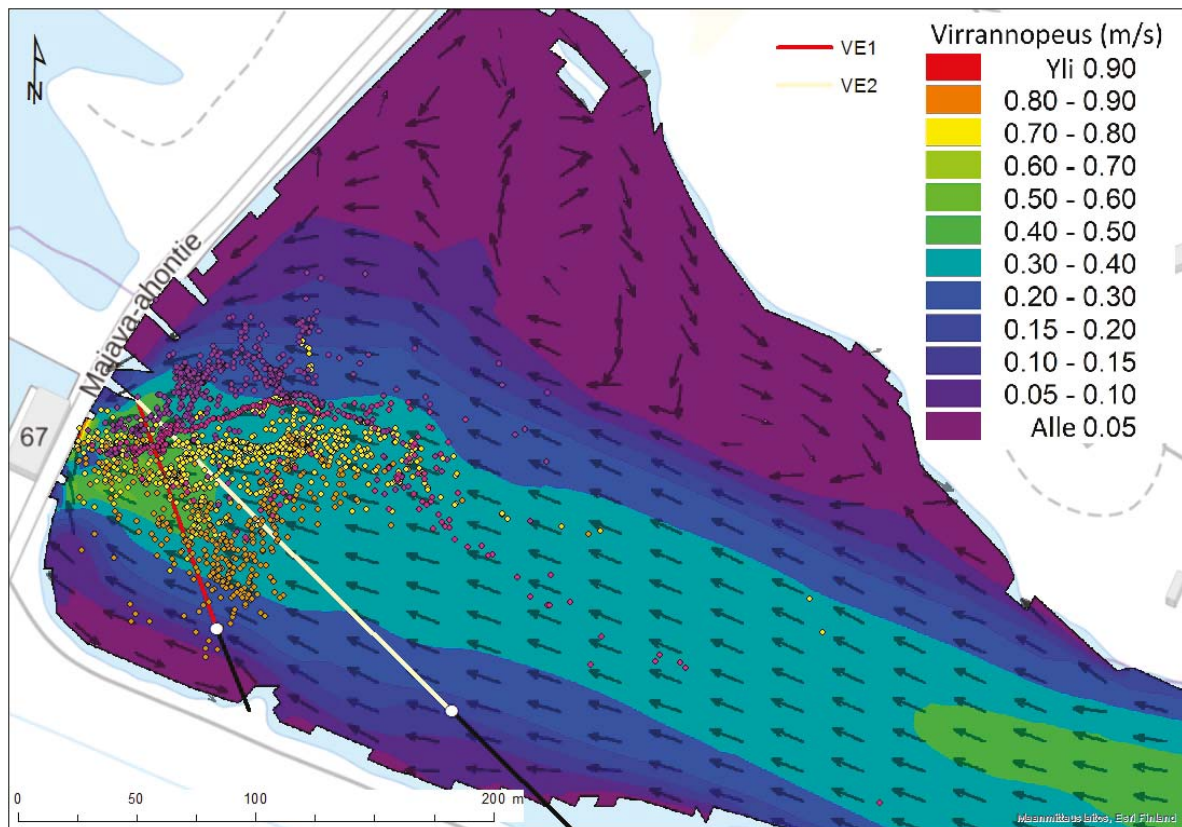
Haapakoskelle suunnitellun ohjausrakenteen on tarkoitus ohjata smoltit uittoaukon kohdalle (kuva 24), mihin rakennetaan alasvaellusväylän sisäänkäynti tai kalojen keräilylaite. Haapakosken yläpuolelle ehdotetut kaksi ohjausrakenteen sijoittamisvaihtoehtoa (kuva 24) perustuvat käyttäytymistutkimuksessa saatuihin kalahavaintoihin, kirjallisuustietoihin ohjausaidan lähialueelle soveltuvista virtausolosuhteista sekä käytettävissä oleviin tukinuiton perustusrakenteisiin.

Molemmissa vaihtoehdoissa (VE1 ja VE2) ohjausrakenteen molemmat päät voidaan mahdollisesti kiinnittää tukinuiton perustusrakenteisiin patovallilla ja uittoaukon edustalle. Molemmat esitetyt ohjausrakenteet sijoittuvat nykyisen, padon etelärannalla sijaitsevan roskapuomin (kuva 25) ylävirran puolelle, jolloin roskien ohjaaminen ja keräys tulisi huomioida ja järjestää siten, etteivät erityisesti tulva-aikana virran mukana kulkeutuvat roskat keräänny alasvaellusväylän sisäänkäynnin edustalle tai alasvaellusväylälle.

Esitetyissä ohjausrakenteissa patovallin puoleisessa päässä vedenpinnan alapuolelle tulevaa aitarakennetta ei tarvitse asentaa rantaan saakka, sillä käyttäytymistutkimuksesta saatujen havaintojen perusteella vaelluspoikaset käyttivät pääasiallisena vaellusreittinään voimakkaan virran alueita eivätkä ne hakeutuneet heikkojen virtausten alueelle rantojen läheisyyteen (kuvat 16–20). Virtausmallista saatujen eri virtaamatilanteiden virrannopeusvyöhykkeiden (kuva 23) ja kalojen havaintopisteet yhdistämällä (kuvat 16–20) voidaan arvioida VE1-vaihtoehdon aitarakenteen tarpeeksi n. 95 m ja vastaavasti VE2 vaihtoehdossa aitarakenteen pituudeksi n. 165 m. Molemmissa vaihtoehdoissa yläkana-

van puoleisen loppuosa (VE1: n. 50 m, VE2: n. 90 m) voitaisiin toteuttaa pelkällä kiinnitysvaijerilla tai -kettingillä (kuva 24).

Haapakosken yläpuolen ohjausrakenteista ensisijaiseksi vaihtoehdoksi arvioidaan VE2, sillä ohjausrakenne leikkaa vain pieneltä alueella voimakkainta virtausaluetta voimalaitoksen lähellä ja virtausnopeus pysynee tällöin alle 0,5 m/s koko ohjausrakenteen pituudella.



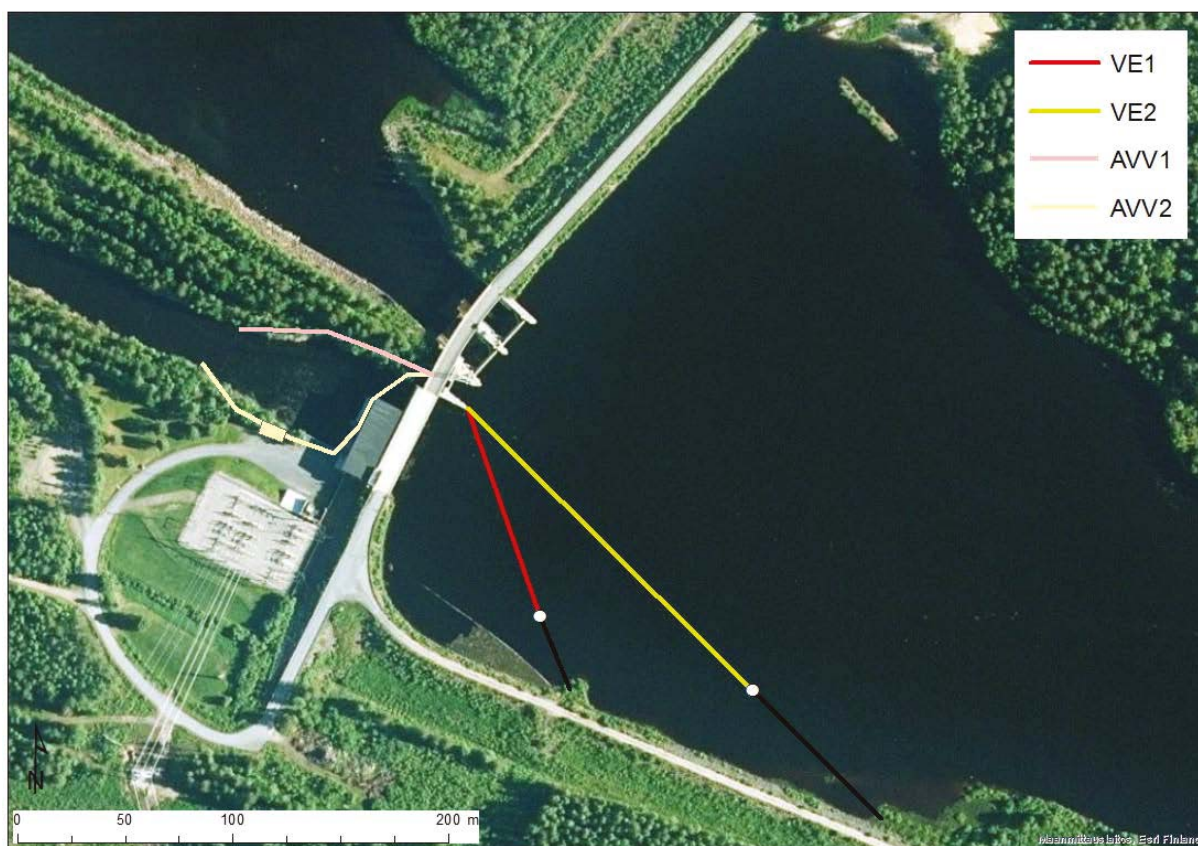
Kuva 24. Kaksi sijoitusvaihtoehtoa (VE1 ja VE2) lohien vaelluspoikasten ohjausaidalle Haapakoskella. Taustakartta on virtaamatilanne 250 m³/s metrin syvyydellä pinnan alapuolella. Valkoisilla pisteillä on merkitty kohta, jonka voimalaitoksen puoleinen osuus on veden alapuolella olevaa ohjausaitaa (värilliset viivat) ja patovallin puoleinen osuus (mustat viivat) pelkkää kiinnitysrakennetta. Kartassa on myös esitetty smolttien ensimmäisen lähestymisen uintireitit Haapakosken yläpuolella 16.6.2017.

Haapakoskelle alasvaellusratkaisun yhteyteen kannattaa varata mahdollisuus pyydystää smoltit kiinniottolaitteella ja kuljettaa ne viiden voimalaitoksen ohi lijoen alajuoksulle. Tämä voisi toimia väliaikaisratkaisuna tilanteessa, jolloin alasvaellusratkaisujen rakentaminen alajuoksun voimaloilla on kesken.

Kiinnioton järjestäminen on mahdollista toteuttaa alasvaellusväylässä rakentamalla väylän yhteyteen allas, joka voidaan tarvittaessa sulkea ja kalat siirtää kuljetusautoon suoraan altaasta. Kalojen lastauksen ja kuljettamisen helpottamiseksi alasvaellusväylä voitaisiin linjata uittoaukolta joen yli voimalan etelärannan puolelle, sillä Haapakoskella uittoaukon takana sijaitsevalle maapadolle ei ole tällä hetkellä kulkuyhteyksiä (kuva 24). Alasvaellusväylän linjaus voimalaitoksen eteläpuolelle olisi suhteellisen yksinkertaista toteuttaa, sillä alasvaellusväylänä toimiva putkirakenne ei tarvitse massiivisia tukirakenteita. Tämän alasvaellusväylävaihtoehdon (AVV2) kokonaispituus olisi noin 120 m (kuva 25).

Toinen vaihtoehto on järjestää kalojen kiinniotto voimalaitospadon yläpuolelta ennen alasvaellusväylän sisäänkäyntiä, jolloin alasvaellusväylä voi sijaita maapadolla, missä myös tukinuittokouru on aikaisemmin sijainnut ja mihin tekninen kalatiekin on suunniteltu. Maapadolla sijaitsevan alasvaellus-

väylän tuennassa voisi selvittää mahdollisuutta käyttää uittokourun tukirakenteita tai kalatienrakenteita. Maapadolla sijaitsevan alasvaellusväylävaihtoehdon (AVV1) kokonaispituus on noin 95 m (kuva 25). Voimalaitoksen yläpuolelle sijoitettava kiinniottorakenne sijaitsisi ohjausaidan voimalaitoksen puoleisessa päässä tukinuittoaukon edustalla, mihin voisi rakentaa kiinniottoa varten keräysaltaan, joka voitaisiin nostaa ylös ja kalat siirtää sillalla olevaan kuljetusautoon. Kiinniottorakenteen suunnittelussa tulee huomioida erityisesti roskan kertymisen estäminen. Sisäänkäynti tulee lisäksi suunnitella ja toteuttaa siten, etteivät kalat välttele rakennetta (ks. 6.2. Alasvaellusväylä).

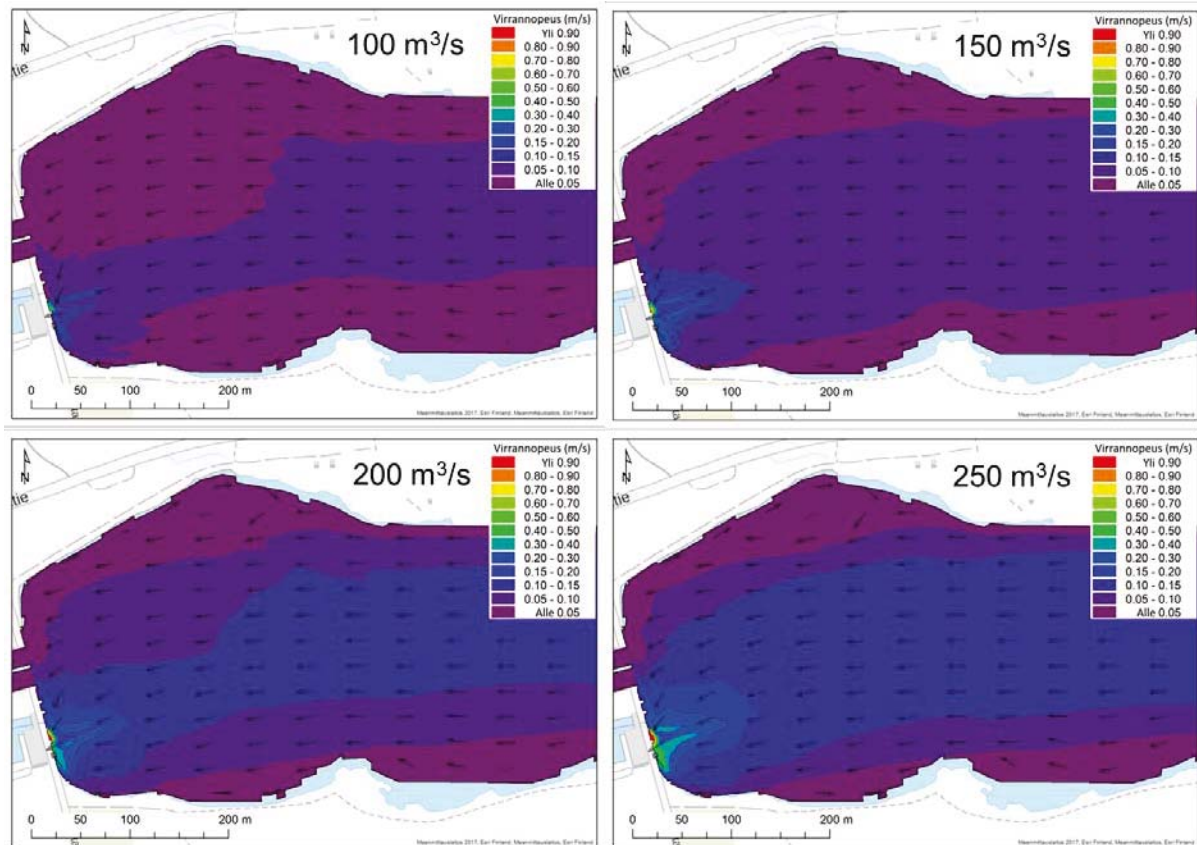


Kuva 25. Ilmakuva Haapakosken voimalaitosalueesta, mihin on merkitty kaksi ohjausaidan sijoitusvaihtoehtoa VE1 ja VE2 (valkoisilla pisteillä on merkitty kohta, jonka voimalaitoksen puoleinen osuus on veden alapuolella olevaa ohjausaitaa (värilliset viivat) ja patovallin puoleinen osuus (mustat viivat) pelkkää kiinnitysrakennetta) sekä kaksi alasvaellusväylän sijoitusvaihtoehtoa AVV1 ja AVV2. Vaihtoehdossa AVV2 on keltaisella suorakulmilla merkitty kalojen kiinniottoaltaan sijainti alasvaellusväylässä.

6.4. Pahkakoski

Pahkakoskella virran suuntaukset säilyvät samanlaisena virtaamavälillä 100–250 m³/s ylimmässä vesikerroksessa (kuva 26). Virtaaman lisääntyminen näkyy kasvaneina virrannopeuksina varsinkin lähellä voimalaitosta sekä akanvirtojen voimistumisena (kuva 26). Virrannopeudet kaikissa mallinnetuissa virtaamavaihtoehdoissa, missä vettä juoksutetaan vain turbiinien kautta, ovat voimalaitoksen yläpuolella alle 0,4 m/s jääden alle smolttien ohjausrakenteille suositellun maksimivirtausnopeuden (0,6 m/s).

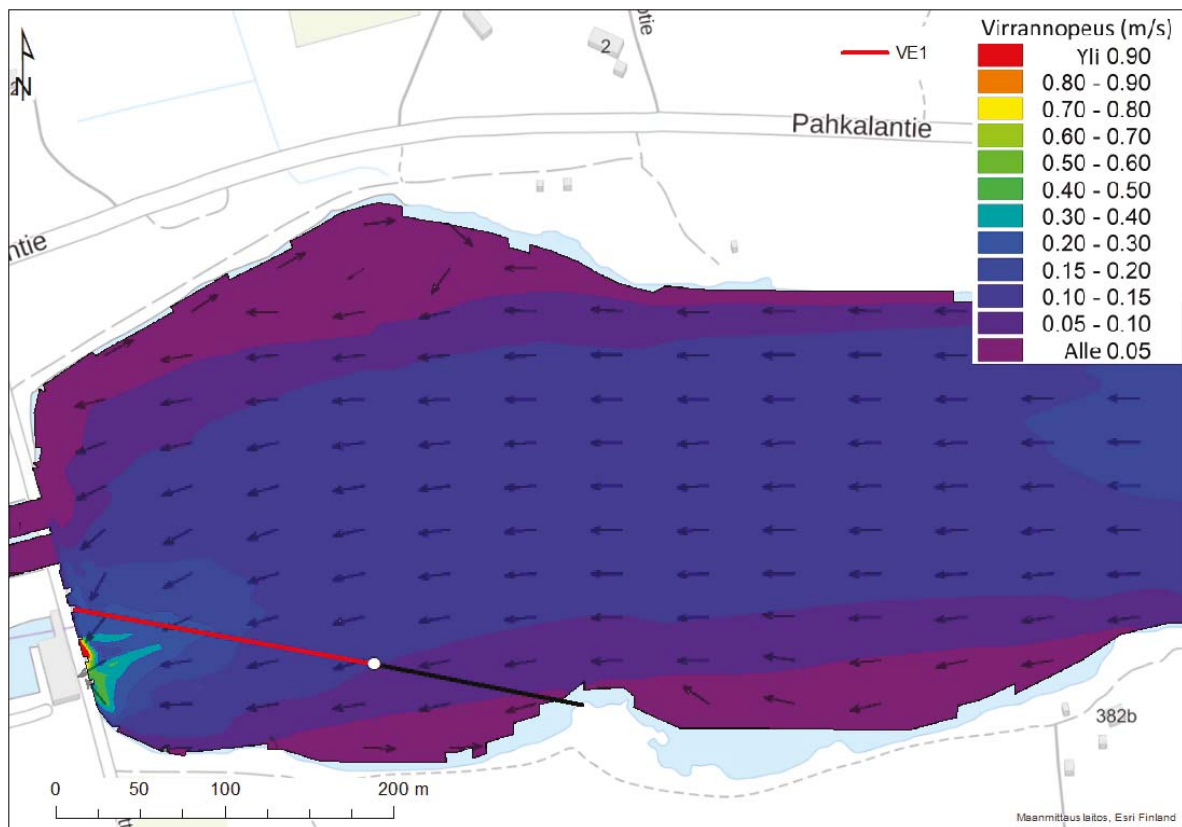
Veden ohijuoksutus tulvaluukkujen kautta muuttaa virtausolosuhteita Pahkakoskella (liite 2). Virtaus voimistuu ja suuntautuu kohti voimalaitosta ja tulvaluukkuja tasaisesti. Ohijuoksutustilanteessa osa smolteista voi ohjautua padon ohi tulvaluukkujen kautta.



Kuva 26. 3D-virtausmallin mukaiset virtauskentät neljällä virtaamavaihtoehdolla metrin syvyydessä pinnan alapuolella Pahkakosken voimalan yläkanavassa.

Pahkakoskelle suunnitellun ohjausrakenteen on tarkoitus ohjata smoltit voimalaitoksen vieressä sijaitsevan uittoaukon kohdalle (kuva 27). Ohjausaidan sijoittamisessa käytettiin Haapakoskelta saatuja tuloksia smolttien käyttäytymisestä suhteessa virtannopeuden muutoksiin. Pahkakoskelle suunniteltu ohjausaita (VE1) lähtee patovallin niemestä, sillä silloin saadaan aidan kulma suhteessa virtaussuuntaan sopivan pieneksi ja samalla vältetään lähellä voimalaitosta oleva voimakkaimman virtauksen alue. Ohjausaita voidaan mahdollisesti kiinnittää voimalan puoleisesta päästä uittoaukon edustalla olevaan perustusrakenteeseen, mutta ohjausaidan patovallin puoleiselle päälle tulee tehdä riittävän vahva perustusrakenne. Pahkakosken ohjausrakenteen (VE1) kokonaispituudesta vedenalaista ohjausaitaa olisi n. 180 m ja pelkkää kiinnitysrakennetta n. 130 m (kuva 27).

Pahkakoskella alasvaellusväylä kulkisi alakanavan pohjoisrannan puolella uittoaukolta turbiinipyörteiden alapuolelle (väylän pituus n. 100 m). Alasvaellusväylän rakenteiden tuennassa voisi selvittää mahdollisuuden käyttää entisen uittorännin tukirakenteita tai samalle rannalle mahdollisesti rakennettavan kalatien rakenteita.

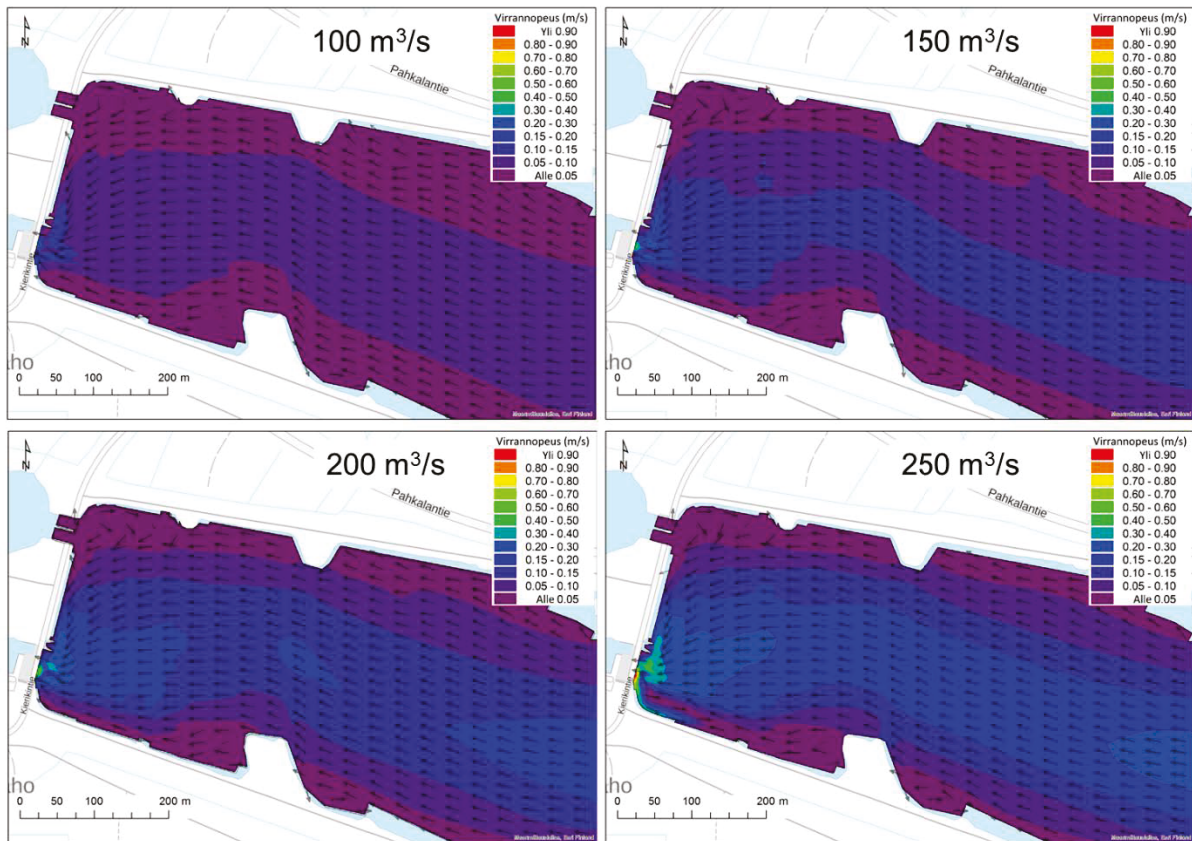


Kuva 27. Sijaintiehdotus (VE1) lohen vaelluspoikasten ohjausaidalle Pahkakosken yläaltaalla. Valkoisella pisteellä on merkitty kohta, jonka voimalaitoksen puoleinen osuus on varsinaista ohjausaitaa (punainen viiva) ja patovallin puoleinen osuus pelkkää kiinnitysrakennetta (musta viiva). Kuvassa sijaintiehdotus on esitetty mallitasolle metri pinnan alapuolella virtaamatilanteella $250 \text{ m}^3/\text{s}$.

6.5. Kierikki

Kierikissä virtaukset säilyvät kutakuinkin samansuuntaisena virtaamatilanteilla $100\text{--}250 \text{ m}^3/\text{s}$ ylimässä vesikerroksessa (kuva 28). Virtaaman lisääntyminen näkyy virrannopeuden kasvuna päävirran alueella uoman keskiosassa (kuva 28). Virrannopeudet ovat kaikilla mallinnetuilla virtaamatilanteilla sopivia (alle $0,6 \text{ m/s}$) smolttien ohjausrakenteille.

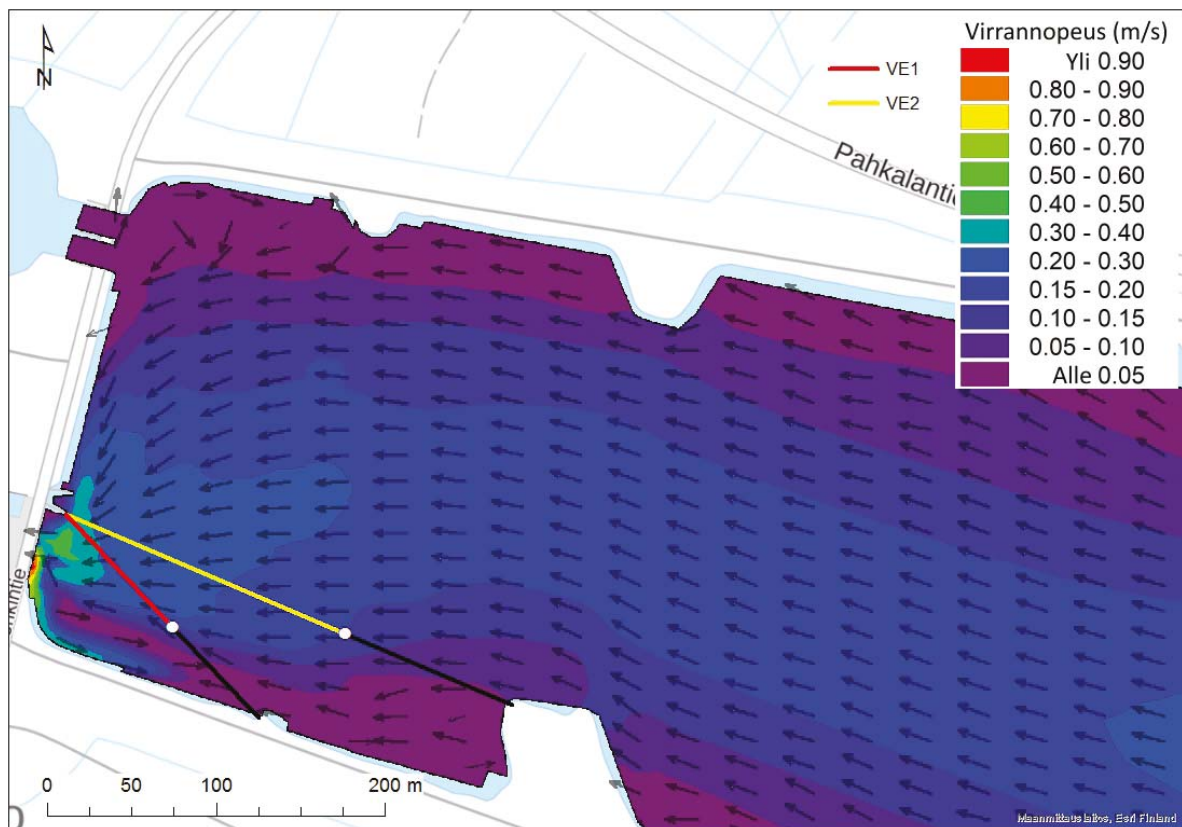
Kierikin voimalaitospadolla tulvaluukut sijaitsevat verrattain kaukana, noin 160 m etäisyydellä voimalaitoksesta. Ohjuksutustilanteessa vesi jakautuu selvästi kahteen suuntaan jo noin 80 metriä padosta ylävirtaan ja virrannopeus lähellä tulvaluukkuja nousee kutakuinkin samalle tasolle kuin voimalaitoksen edustalla (liite 3). Tällaisessa tilanteessa osa smolteista voi ohjautua ohjuksutusluukujen kautta alavirtaan.



Kuva 28. 3D-virtausmallin mukaiset virtauskentät neljällä virtaamavaihtoehdolla metrin syvyydessä pinnan alapuolella Kierikin voimalan yläkanavassa.

Kierikkiin suunnitellun ohjausrakenteen on tarkoitus ohjata smoltit voimalaitoksen vieressä sijaitsevan uittoaukon kohdalle. Kahdesta esitetystä ohjausaidan sijaintivaihtoehdosta (VE1 ja VE2) patovallin niemekkeestä lähtevä VE2-vaihtoehto voisi olla toimivampi (kuva 29), sillä tässä vaihtoehdossa saadaan ohjausaidan kulma suhteessa virtaussuuntaan loivemmaksi. Haapakosken yläpuolelta saatuihin smolttien käyttäytymishavaintoihin perustuen molemmissa esitetyissä ohjausaitavaihtoehdoissa aidan patovallin puoleinen osuus voisi olla pelkkää kiinnitysrakennetta, sillä smoltit käyttänevät voimakkaasti virtaavaa yläkanavan keskiosaa pääasiallisena reittinä jokea alaspäin. Kierikin yläpuolen ohjausrakenteen vedenalaisen aitarakenteen pituus olisi VE1:ssä n. 95 m ja VE2:ssä n. 180 m (kuva 29).

Kierikin voimalaitoksella alasvaellusväylänä toimiva putkirakenne (n. 100–130 m) sijoittuisi voimalaitoksen alakanavan pohjoisrannalle padolta turbiinipyörteiden alavirran puolella kohtaan, missä alakanavan virtaus alkaa muuttua laminaariseksi. Alasvaellusväylänä toimivan putken tuennassa olisi hyödyllistä selvittää mahdollisuus käyttää vanhan uittorännin tukirakenteita tai samalle rannalle suunnitellun kalatien rakenteita.

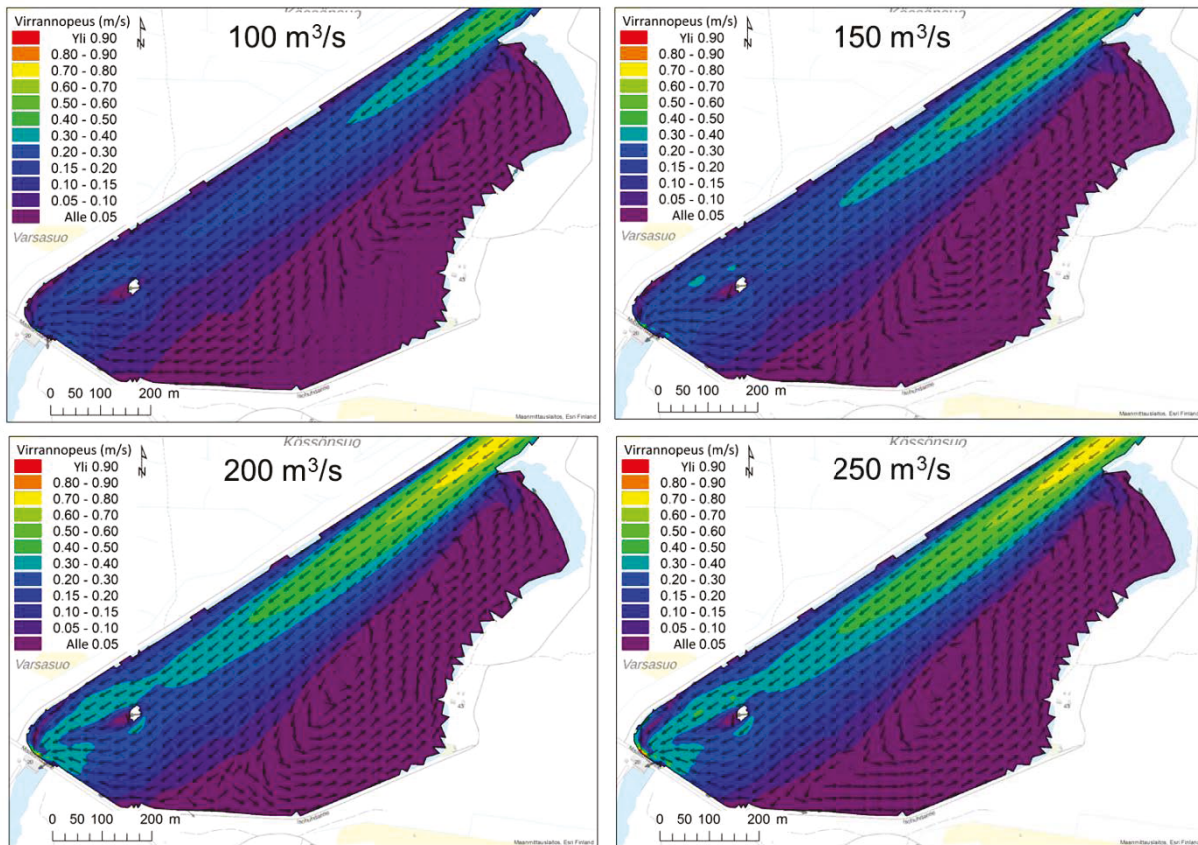


Kuva 29. Kaksi sijainti vaihtoehtoa (VE1 ja VE2) lohien vaelluspoikasten ohjausaidalle Kierikin yläaltaalla. Val-koisten pisteiden voimalan puoleinen osuus on varsinaista ohjausaitaa (värilliset viivat) ja patovallin puoleinen osuus pelkkää kiinnitysrakennetta (mustat viivat) molemmissa ohjausrakennevaihtoehtoissa. Kuvassa sijain-
tiehdotukset on esitetty mallitasolle metri pinnan alapuolella virtaamatilanteella $250 \text{ m}^3/\text{s}$.

6.6. Maalismaa

Maalismaalla virtauskentän perusrakenne ylimmässä vesikerroksessa säilyy pääosin samanlaisena mallinnetuilla virtaamavaihtoehtoilla (kuva 30). Virtaaman kasvaessa akanvirta levittäytyy yhtenäisenä uomalaajentuman koko eteläosaan. Uomassa n. 200 m ylävirtaan voimalaitokselta on pieni virtausta jakava saari. Virrannopeudet lähellä voimalaitosta jäävät kaikissa mallinnetuissa virtaamavaihtoehtoissa alle $0,6 \text{ m/s}$, mikä on sopiva vaelluspoikasten ohjausrakenteille.

Poikkeuksena Maalismaan yläpuolisiin voimalaitoksiin Maalismaalla ohijuoksutuspadon sijaitsee noin 7 kilometriä voimalaitoksesta ylävirran suuntaan ja ohijuoksutusuomana toimiva vanha jokiuoma yhtyy takaisin lijoen pääuomaan Maalismaan alakanavan suulla (liite 4). 3D-virtausmallinnusta ei tehty ulottumaan Maalismaan ohijuoksutuspadolle, mutta voimakkaan ohijuoksutuksen tilanteessa virrannopeus lähellä tulvaluukkuja kasvaa ja osa smolteista voi ohjautua tulvaluukkujen kautta padon ohi. Ohijuoksutuspadolle ei ole välttämätöntä erikseen rakentaa vaelluspoikasille ohjausrakennetta.

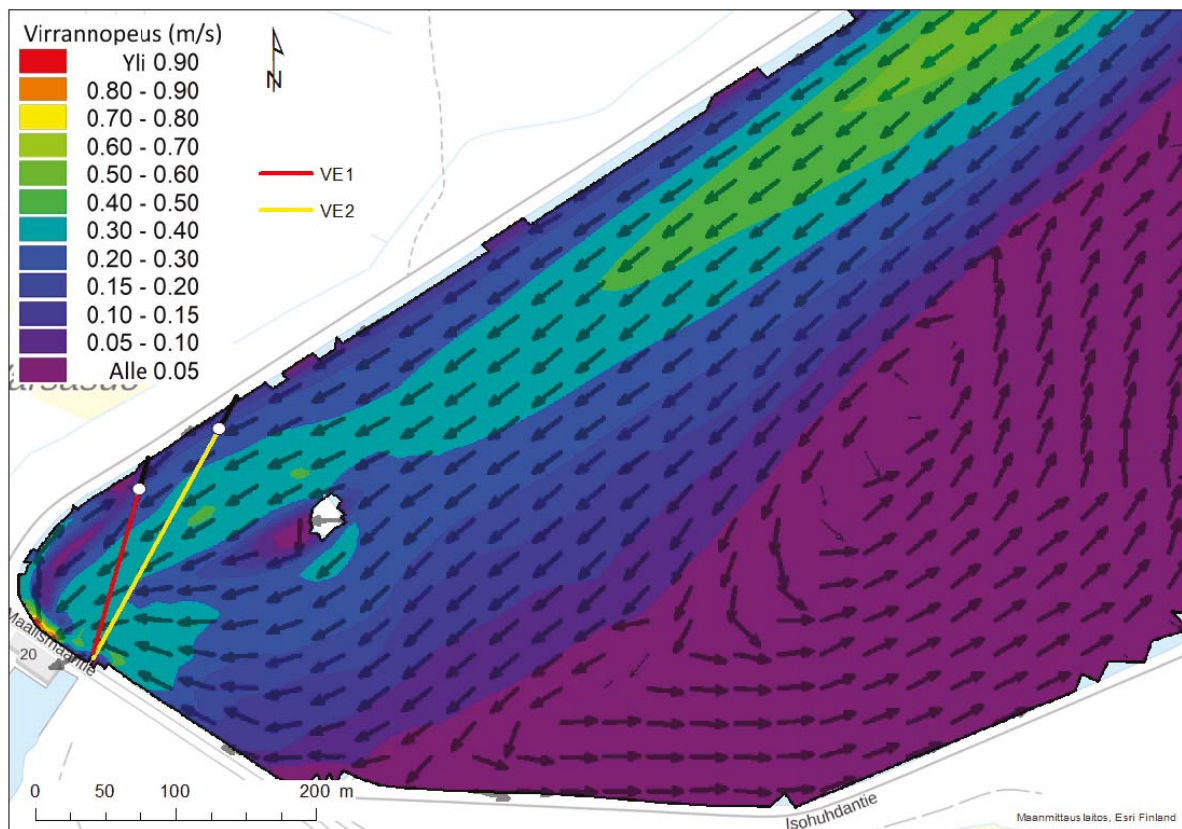


Kuva 30. 3D-virtausmallin mukaiset virtauskentät neljällä virtaamavaihtoehdolla metrin syvyydessä pinnan alapuolella Maalismaan voimalan yläkanavassa.

Maalismaalla tukinuittorännin läpivienti sijaitsee muista lijoen voimalaitoksista poiketen voimalan eteläreunalla (kuva 31). Uittoaukkoa on suunniteltu käytettäväksi myös kalatien uloskäynnin läpivientikohtana, joten Maalismaan uittoaukon rakenteet ja kalatien sekä alasvaellusväylän vesitysratkaisut voivat olla soveltuvilta osin samanlaisia kuin ylemmillä voimaloilla.

Maalismaan yläkanavassa ohjausaidalle on esitetty kaksi vaihtoehtoa (kuva 31). Kahdesta ohjausaidan sijaintivaihtoehdosta VE2 voisi olla parempi, sillä siinä ohjausaita sijaitsee virtaa vasten loivemmassa kulmassa. Maalismaalla virtausnopeudet ovat yläkanavan pohjoisrannalla yli 0,15 m/s rannan lähelle saakka, jolloin Haapakoskelta saatujen käyttäytymishavaintojen perusteella ohjausrakenteesta vedenalaista aitarakennetta voi olla tarpeen vetää suhteellisen lähelle rantaa molemmissa esitetyissä vaihtoehdoissa. Vedenalaisen aitarakenteen pituus olisi lyhyemmässä ohjausrakenteessa (VE1) n. 120 m ja pidemmässä (VE2) n. 190 m. Molemmissa vaihtoehdoissa pelkkää kiinnitysrakennetta voitaisi käyttää n. 30 m (kuva 31). Ohjausaidan kiinnittämisessä kannattaa hyödyntää tukinuittorännin aikaisia rakenteita soveltuvilta osin.

Alasvaellusväylänä Maalismaalla voitaisiin käyttää n. 80 m putkirakennetta, jonka tuennassa on hyödyllistä selvittää mahdollisuus käyttää vanhan uittorännin tukirakenteita kuten muillakin voimalaitoksilla.



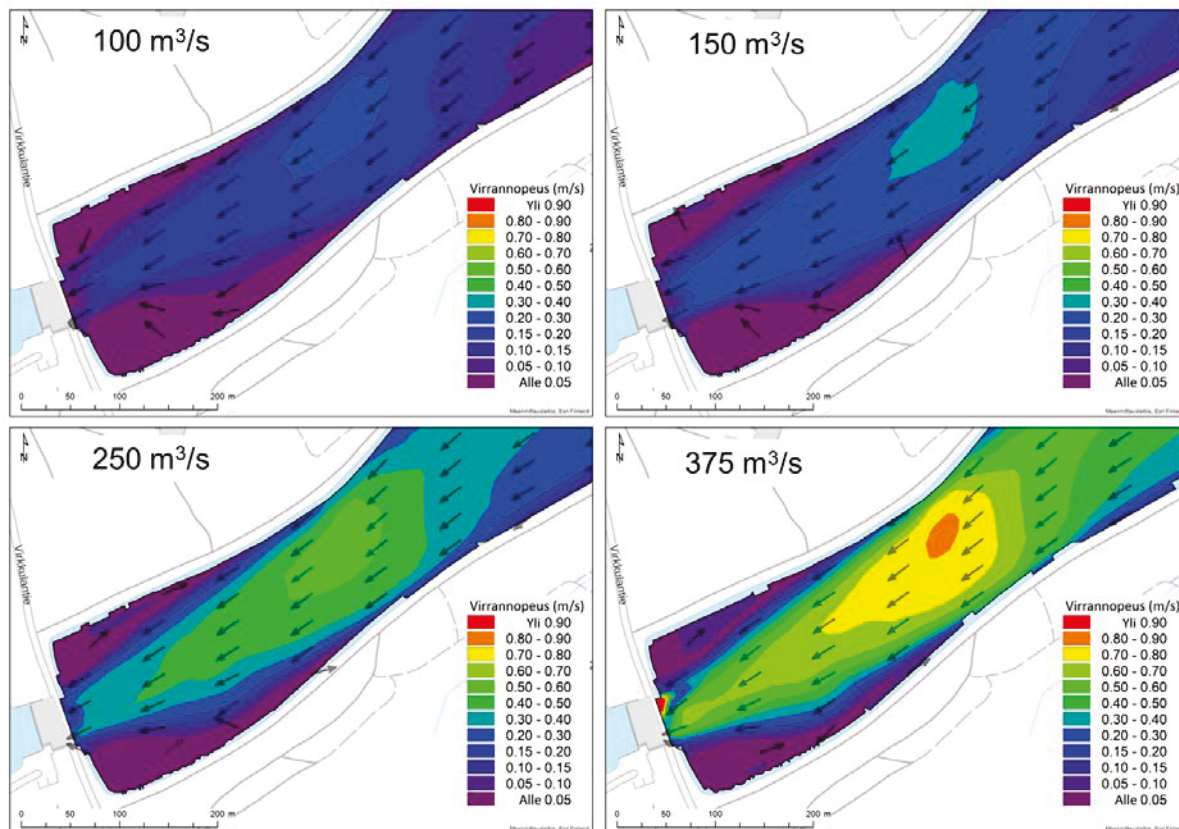
Kuva 31. Kaksi sijaintivaihtoehtoa (VE1 ja VE2) lohien vaelluspoikasten ohjausaidalle Maaliskallion yläaltaalla. Valkoisten pisteiden voimalan puoleinen osuus on ohjausaitaa (värilliset viivat) ja patovallin puoleinen osuus on pelkkää kiinnitysrakennetta (mustat viivat) molemmissa ohjausrakennevaihtoehdoissa. Kuvassa sijaintiehdotukset on esitetty mallitasolle metri pinnan alapuolella virtaamatilanteella $250 \text{ m}^3/\text{s}$.

6.7. Raasakka

Raasakan yläkanavan virtauskenttä poikkeaa muiden voimalaitosten virtauskentistä siinä, että laaja kovien virrannopeuksien alue ulottuu usean sadan metrin päähän voimalaitoksesta kaikilla mallinnetuilla virtaamatilanteilla (kuva 32, liite 5). Yläkanavan suuri syvyys voimalaitoksen lähellä, muita voimalaitoksia suurempi rakennusvirtaama ja turbiinien lukumäärä vaikuttavat voimalaitoksen lähialueen virtaamiin. Raasakassa virtauksen suunta metrin syvyydellä pinnan alapuolella säilyy kutakuinkin samanlaisena virtaamavaihtoehdoilla $100\text{--}375 \text{ m}^3/\text{s}$ (kuva 32). Virrannopeudet voimalaitoksen lähialueella jäävät kaikissa virtaamavaihtoehdoissa alle $0,6 \text{ m/s}$, lukuun ottamatta pientä aluetta voimalaitoksen lähellä, jossa virrannopeus nousee yli $0,9 \text{ m/s}$ rakennusvirtaamalla $375 \text{ m}^3/\text{s}$.

Raasakassa ohijuoksutuspato sijaitsee noin kuusi kilometriä ylävirtaan voimalaitoksesta, minne tässä hankkeessa tehty 3D-virtausmalli ei ulotu. Ohijuoksutuspadon kautta vaeltaessaan smoltit käyttävät reittinään lijoen vanhaa jokiuomaa (liite 5). Ohijuoksutuspato sijaitsee jokileventymän reunalla (liite 5) ja ohijuoksutuspadon kautta juoksutettava vesi jakautuu selvästi sivuun varsinaisesta voimalan suuntaan menevästä päävirrasta. Vanhaan uomaan juoksutetaan vettä kesäaikaan ($1,6\text{--}31,8$) viikkokeskiarvona $3,5 \text{ m}^3/\text{s}$ (hetkellisesti $1,0 \text{ m}^3/\text{s}$ ja $2,0 \text{ m}^3/\text{s}$ vuorokausikeskiarvona) ohijuoksutuspadon yhteydessä olevan pienen voimalaitoksen läpi. Tulva-aikaan vettä lasketaan uomaan tulvaluukujen kautta enimmillään useita satoja kuutiometrejä sekunnissa. Smolteilla on siten mahdollisuus ohjautua ohijuoksutuspadon kautta vanhaan uomaan koko vaelluskauden ajan. Lijoella 2010–2011 tehtyjen radiotelemetriatutkimusten perusteella vaelluspoikaset eivät kuitenkaan käytä ohijuoksutuspatoa vaellusreittinään tilanteessa, missä isoja ohijuoksutuksia ei ole. Tutkimuksissa vain yhden smoltin havaittiin vaeltaneen jokisuulle vanhan uoman kautta. Molempina tutkimusvuosina merkit-

tävät ohjuoksutukset oli lopetettu ennen vaelluspoikasten saapumista alueelle, jolloin kunnollista houkutusvirtausta vanhaan uomaan ei enää ollut. Erillistä ohjausrakennetta ohjuoksutuspadolle ei ole välttämätöntä rakentaa, jos alasvaellusratkaisu sijoitetaan voimalaitoksen yhteyteen.



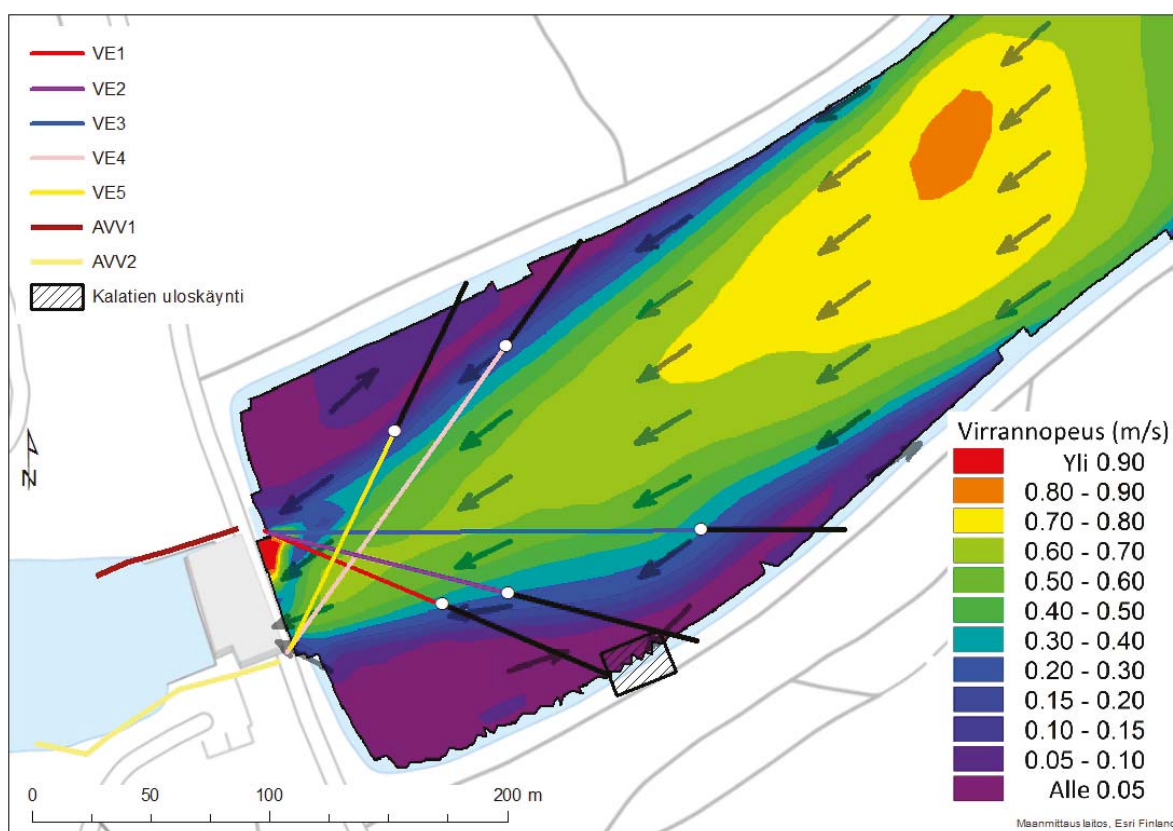
Kuva 32. 3D-virtausmallin mukaiset virtauskentät neljällä virtaamavaihtoehdolla metrin syvyydessä pinnan alapuolella Raasakan voimalan yläkanavassa.

Muista lijoen voimalaitoksista poiketen Raasakkaan suunnitellun ja mahdollisesti rakennusvaiheeseen vuoden 2019 aikana siirtyvän kalatien uloskäynti tulee yläkanavan etelärannalle maapatoon noin 135 metrin etäisyydelle voimalaitospadosta. Raasakassa puretun tukinuittokourun aukko sijaitsee voimalan pohjoispuolella turbiinien vieressä (kuva 33) ja aukon edustalle on rakennettu Raasakan kalanviljelylaitoksen (Voimalohi Oy) vedenottojärjestelmä. Vedenottoa varten koko uittoaukon edusta on padottu 4 metrin syvyydelle pinnasta, minkä alapuolelta vedenottojärjestelmälle lähtevä vesi (ka. virtaama 700 l/s, maksimi 1 m³/s) menee tiheään välppärakenteen (välit 10 mm) kautta vedensiirtoputkistoon. Alasvaellusratkaisun suunnittelussa padon läpäisy voisi Raasakassa edellä kuvattujen alueella olemassa olevat ja tulevat rakenteet huomioiden sijoittua tukinuittokourun edustalle tehtyyn patorakenteeseen tai betonirakenteisiin voimalaitoksen eteläpuolella (kuva 33). Vaelluspoikasten ohjaus voimalaitoksen eteläpuolelle voisi olla voimalan yläkanavan virtausolosuhteisiin sopivampi vaihtoehto, sillä ohjausrakennetta vasten tulevan virtauksen kulma olisi silloin loivempi.

Kaikissa ohjausrakennevaihtoehdoissa (VE1-VE5) patovallin puoleisessa päässä ohjausaitarakenteen ei tarvitse ulottua rantaan saakka (kuva 33), sillä Haapakosken yläkanavasta tehdyt havainnot osoittivat smolttien liikkuvan voimakkaimman päävirran alueella lähestyessään voimalaitosta ja lisäksi Raasakan yläkanavassa tehdyissä radiotelemetriapaikannuksissa lohen vaelluspoikaset löydettiin veneellä tehdyissä manuaalipaikannuksissa useimmiten kanavan keskiosasta. Yläkanavan eteläiselle patovallille kiinnittyvien ohjausrakennevaihtoehtojen VE1 ja VE2 varsinainen vedenalainen ohjausaitarakenne jää kalatien uloskäynnin alavirran puolelle, mutta vaihtoehdossa VE3 se ulottuu kalatien uloskäynnin ylävirranpuolelle (kuva 33), jolloin aitarakenteen vaikutus nousukalojen käyttäytymiseen yläkanavassa on arvioitava. Ohjausrakennevaihtoehtojen aitarakenteen pituudet vaihtelevat 80–155

m välillä (kuva 33). Kokonaispituudeltaan lyhimmän vaihtoehdon (VE1, n. 160 m) aitarakenteen osuus olisi 80 m ja kiinnitysrakenteen 80 m. Toiseksi lyhin ohjausrakenne (VE5, kokonaispituus noin 175 m) jakautuisi 100 m aitarakenteeseen ja 75 m kiinnitysrakenteeseen. Seuraavaksi kokonaispituudeltaan sijoittuu VE2 (noin 190 m), josta aitarakennetta olisi 110 m ja kiinnitysrakennetta 80 m. Toiseksi pisimmän (VE4) vaihtoehdon kokonaispituus on noin 210 m, jonka aitarakenne olisi 155 m ja kiinnitysrakenne 55 m. Pisimmän vaihtoehdon (VE3, kokonaispituus noin 245 m) aitarakenteen osuus olisi 185 m ja kiinnitysrakenteen 60 m.

Raasakan voimalan ohittavan alasvaellusväylän sijainti määräytyy valittavan ohjausrakenteen mukaan alakanavan etelä- tai pohjoisrannalle (kuva 33). Etelärannan vaihtoehto (AVV2) on pidempi (noin 115 m) ja sen tarkempi linjaus tulee suunnitella kalatien rakenteiden kanssa sopivaksi. Pohjoisrannalla sijaitseva vaihtoehto (AVV1) on pituudeltaan noin 65 m ja sen tuennassa voidaan selvittää mahdollisuutta käyttää jäljellä olevia tukinuittokourun rakenteita.



Kuva 33. Viisi sijaintiehdotusta (VE1-VE5) lohien vaelluspoikasten ohjausaidalle Raasakan yläaltaalla. Valkoisten pisteiden voimalan puoleinen osuus on ohjausaitaa (värilliset viivat) ja patovallin puoleinen osuus on pelkkää kiinnitysrakennetta (mustat viivat) kaikissa ohjausrakennevaihtoehdoissa. Kuvassa on esitetty myös alasvaellusväylien linjausvaihtoehdot (AVV1 ja AVV2) sekä Raasakkaan suunnitellun kalatien uloskäynnin sijoittuminen yläkanavassa. Kuvassa sijaintiehdotus on esitetty mallitasolle metri pinnan alapuolella virtaamatilanteella 375 m³/s.

7. Yhteenveto

Alavaelluksen onnistuminen on tärkeä osa vaelluskalakantojen palauttamisessa vesivoimatuotantoon rakennetuille joille. Toimivien alasvaellusratkaisujen suunnittelun tueksi Iijoen ylimmän, voimalaitospadon (Haapakoski) yläkanavassa toteutettiin lohien vaelluspoikasten telemetriaseuranta. Telemetriaseurannassa havaittiin poikasten lähestyvän voimalaitosta päävirran alueella ja reagoivan virtausmuutoksiin mm. vaihtamalla uintisuuntaa virrannopeuden vaihtumisalueilla. Lisäksi päävirrannopeuden aleneminen virtaaman vähentyessä muutti vaelluspoikasten käyttäytymisen nopeasta ja suoraviivaisesta etenemisestä hitaammaksi ja enemmän satunnaiseksi reitin etsimiseksi.

Telemetriatutkimuksessa kerätyt vaelluspoikasten liikkumishavainnot yhdistettynä yläkanavan 3D-virtausmalleihin toimivat apuna alasvaellusratkaisuun kuuluvan ohjausaitarakenteen suunnittelussa. Saatujen tulosten perusteella voitiin antaa suosituksia ohjausrakenteen sijoittamiseen sekä optimoida aitarakenteen pituutta Haapakoskella. Haapakoskelta kerättyjä havaintoja lohien vaelluspoikasten käyttäytymisestä hyödynnettiin ohjausaitarakenteiden suunnittelun apuna myös muilla Iijoen vesivoimalaitoksilla, joilta käytössä oli vain yläkanavien 3D-virtausmallit.

Iijoen yläkanaviin sijoitettavaksi ohjausaitarakaisuksi suositeltiin kelluvaa ohjausaitaa, joka koostuu varsinaisesta ohjausaitarakenteesta (korkeus 2,0–2,5 m) sekä sen jatkeena olevasta, patovalliin kiinnittyvästä rakenteesta (vaijeri tms.). Ohjausaitarakenteen ja kiinnitysrakenteen vaihtumiskohta sijoitettiin virrannopeuden vaihtumisvyöhykkeelle perustuen vaelluspoikasten uintireitteihin Haapakosken yläkanavassa. Voimalaitoskohtaisesti potentiaalisesti toimivimman ohjausaitarakaisun valinnassa hyödynnettiin kirjallisuudesta saatuja tietoja ohjausaidan sopivasta kulmasta suhteessa yläkanavan virtaukseen.

Yläkanaviin sijoitettavien ohjausaitarakenteiden lisäksi suunniteltiin alustavia vaihtoehtoja ohjausrakennetta seuraaviksi alasvaellusväyliksi ja niiden sijoittamiseksi. Iijoella alasvaellusväylän sisäänkäyntien sijainniksi sopisivat sijaintinsa ja käytännön toteuttamisen kannalta vanhat uittokourujen aukkokohdat kaikilla voimalaitospadoilla. Varsinaisena alasvaellusväylänä toimisi aukolta lähtevä putkirakenne, jota pitkin kalat siirtyisivät voimalaitoksen turbiinipyörteiden alapuolelle. Putkirakenteen yhteyteen olisi esimerkiksi Haapakoskella tarvittaessa mahdollista suunnitella myös kalojen kiinniottoallas.

3D-virtausmallin ja kalojen käyttäytymistietojen yhdistämisen avulla suunnitellun ja tehtävän ohjausrakenteen toimivuus tulisi selvittää uusintatutkimuksella Haapakoskella tilanteessa, missä ohjausaita on toiminnassa. Jos ohjausaita todetaan tällaisella tutkimuksessa riittävän toimivaksi, voitaisiin jatkossa Haapakoskelta kerättyä kalojen käyttäytymisaineistoa hyödyntää laajemminkin alasvaellusratkaisujen suunnittelun tukena yhdessä yläkanavien 3D-virtausmallien kanssa. Suunnittelun tueksi tarvitaan kuitenkin jatkossa lisää voimalaitosten yläkanavien alueelle keskittyviä vaelluspoikasten seurantatutkimuksia, joiden perusteella saadaan lisätietoa vaelluspoikasten käyttäytymisestä erilaisissa virtausolosuhteissa sekä erityyppisissä ja erikokoisissa yläkanavissa.

Kiitokset

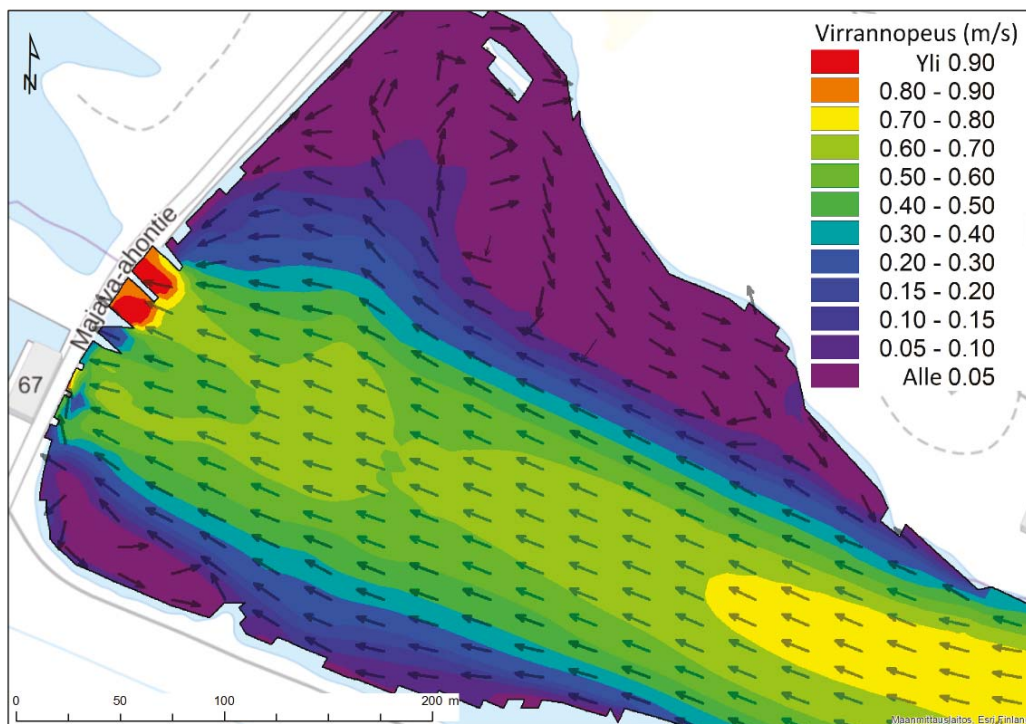
Kiitämme tasapuolisesti kaikkia tämän selvitystyön eri vaiheisiin osallistuneita henkilöitä ja yhteistyötahoja. Hanketta rahoittivat Euroopan aluekehitysrahasto (EAKR), alueen kunnat, PVO-Vesivoima Oy, Pohjois-Pohjanmaan liitto ja Luonnonvarakeskus.

Viitteet

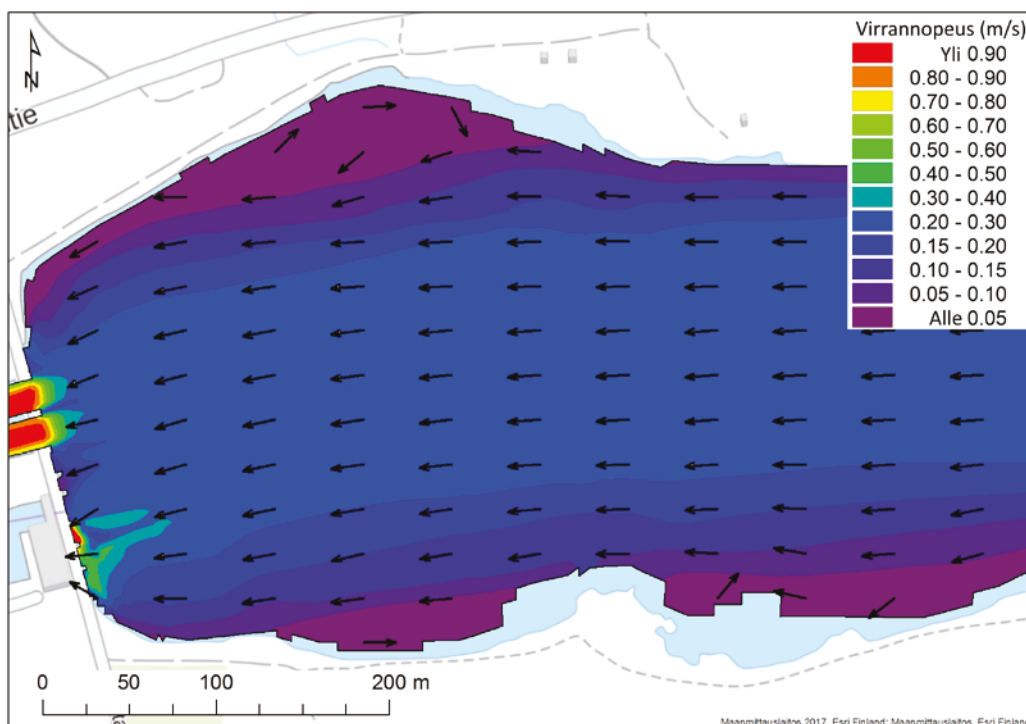
- Goodwin, R. A., Nestler, J. M., Anderson, J. J., Weber, L. J. & Loucks, D. P. 2006. Forecasting 3-D fish movement behavior using a Eulerian-Lagrangian-agent method (ELAM). *Ecological Modelling* 192: 197–223.
- Gustafsson, S. 2010. Migration losses of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) smolts at a hydropower station area in River Åbyälven, Northern Sweden. Examensarbete i ämnet biologi 2010: 02, Swedish University of Agricultural Sciences, Umeå, Sweden.
- Huusko, R., Orell, P., Jaukkuri, M., Mäki-Petäys, A. & Erkinaro, J. 2014a. Lohen vaelluspoikasten alasvaellus rakennetuissa joissa – ongelmat ja ratkaisumahdollisuudet. RKTL:n työraportteja 8/2014. 41 s.
- Huusko, R., Orell, P., Kanninen, T., Jaukkuri, M., Keränen, M. & Mäki-Petäys, A. 2014b. Lohen vaelluspoikasten alasvaelluskokeet Merikosken ja Isohaaran kalateissä. RKTL:n työraportteja 287/2014. 19 s.
- Huusko, R., Orell, P., van der Meer, O., Jaukkuri, M. & Mäki-Petäys, A. 2012. Lohen vaelluspoikasten radiotelemetriaseuranta lijoella vuosina 2010–2011. RKTL:n työraportteja 22/2012. 30 s.
- Huusko, R., Orell, P., Hyvärinen, P., Jaukkuri, M., Laaksonen, T., van der Meer, O., Mäki-Petäys, A. & Erkinaro, J. 2016. Lohen vaelluspoikasten alasvaellus rakennetussa ja luonnontilaisessa joessa. Vertailututkimus Kemi-Ounasjoessa ja Tornion-Muonionjoessa. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus, Luonnonvarakeskus, 38/2016.
- Jääskeläinen, J. 2014. Lohen (*Salmo salar*) smolttien vaelluskäyttäytyminen Ruotsin Vindel/Uumaja-joella. Pro gradu-tutkielma, Oulun yliopisto.
- Karpinen, P., Vähä, V.-P. & Vehanen, T. 2017. Lohen vaelluspoikasten käyttäytyminen ja kuolleisuus Mustionjoen voimalaitoksilla. Länsi-Uudenmaan vesi ja ympäristö ry, julkaisu 281/2017.
- Laine, A. 2010. Vaelluskalojen kulun toteuttamismahdollisuudet lijoella. Pohjois-Pohjanmaan ELY-keskus: Ympäristö ja luonnonvarat. Vaelluskalat palaavat lijokeen -projekti. Raportti. 42 s.
- Larinier, M., & Travade, F. 2002. Downstream migration: problems and facilities. *BFPP-Connaissance et Gestion du Patrimoine Aquatique*, 364.
- Maa- ja metsätalousministeriö 2012. Kansallinen kalatiestrategia. Valtioneuvoston periaatepäättös 8.3.2012. 30 s.
- Maveplan Oy. 2017. Esiselvitys smolttien ohjausrakenteesta lijoen Haapakoskella, lijoen vaelluskalakärkihanke. Raportti 29.12.2017.
- van der Meer, O., Louhi, P., Marttila, M., Jaukkuri, M., Erkinaro, J., Mäki-Petäys, A., Laine, A., Orell, P. & Karjalainen, T.P. 2010: Vaelluskalojen palauttamisen edellytykset lijoen vesistöalueella - Esiselvitys. Vaelluskalat palaavat lijokeen -hanke, Riista- ja kalatalouden tutkimuslaitos. Julkaisematon käsikirjoitus 24.11.2010.
<http://www.ymparisto.fi/download/noname/%7BD41575B2-B197-4902-BBF0-019587A27EF2%7D/94672>
- Orell, P., Vehanen, T., Mäki-Petäys, A., Jaukkuri, M., Huusko, R., van der Meer, O., Huusko, A., Lahti M., Erkinaro J. & Sutela, T. 2016. Kollaja-hankkeen vaikutukset lijoen vaelluskalakantojen elvyttämiseen. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 25/2016, Luonnonvarakeskus (Luke), Helsinki.
- Rivinoja, P. 2005. Migration problems of Atlantic salmon (*Salmo salar*) in flow regulated rivers. *Acta Universitatis Agriculturae Sueciae*. Doctoral thesis No. 2005: 114.
- Scruton, D. A., Pennell, C. J., Bourgeois, C. E., Goosney, R. F., Porter, T. R., & Clarke, K. D. 2007. Assessment of a retrofitted downstream fish bypass system for wild Atlantic salmon (*Salmo salar*) smolts and kelts at hydroelectric facility on the Exploits River, Newfoundland, Canada. *Hydrobiologia*, 582(1), 155–169.
- Sormunen, T., Dahlström, H. & Korhonen, M. 1963. Iijokilausunto I. Ijoen Pahkakosken, Haapakosken ja Kierikkikosken voimalaitosten vaikutuksesta lijoen ja sen merellisen vaikutusalueen kalatalouteen ja ehdotus kompensatiotoimiksi. *Kalataloussäätiön monistettuja julkaisuja* 7: 1–37.
- USFWS (U.S. Fish and Wildlife Service). 2017. Fish Passage Engineering Design Criteria. USFWS, Northeast Region R5, Hadley, Massachusetts.
- Vikström, L. 2016. Effectiveness of a fish-guiding device for downstream migrating smolts of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) in the River Piteälven, northern Sweden. Examensarbete i ämnet biologi, 2016:10, Swedish University of Agricultural Sciences, Umeå. <http://stud.epsilon.slu.se>

Liitteet

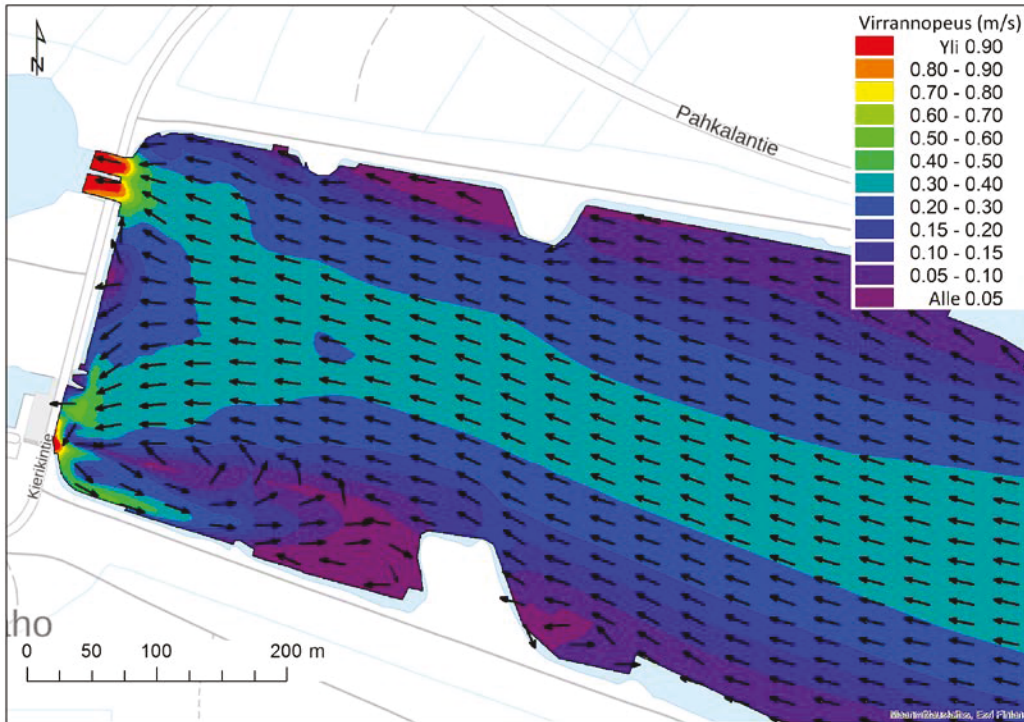
Liite 1. 3D-virtausmallin mukaiset virtauskentät virtaamatilanteella, missä voimalan virtaama on 250 m³/s ja ohijuoksutus 200 m³/s metrin syvyydessä pinnan alapuolella Haapakosken voimalan yläkanavassa.



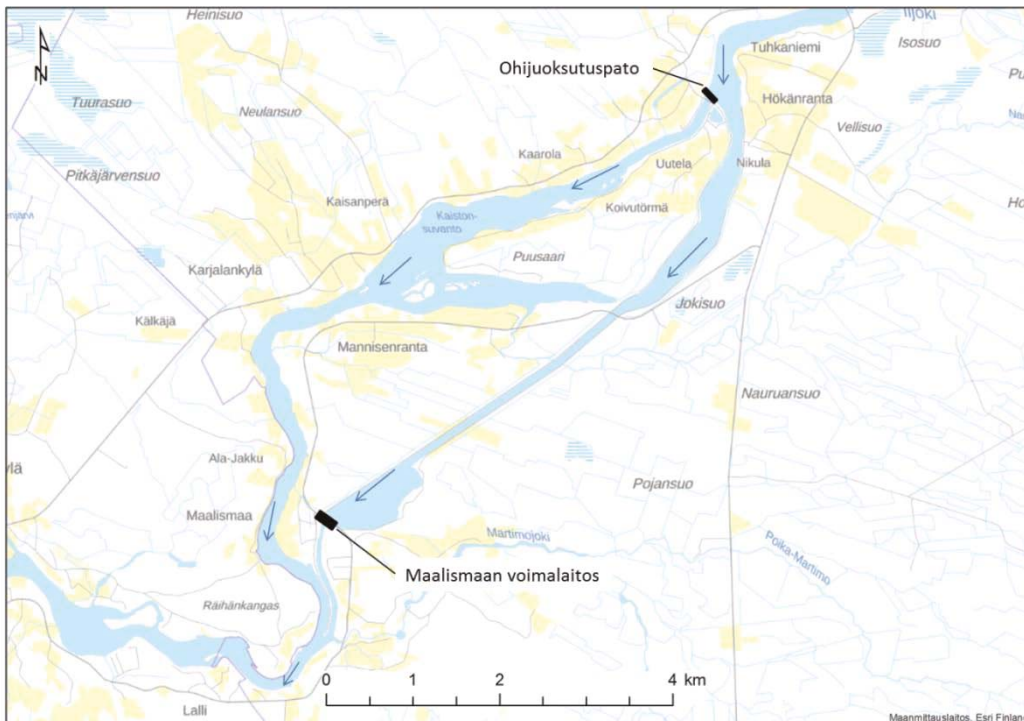
Liite 2. 3D-virtausmallin mukaiset virtauskentät virtaamatilanteella, missä voimalan virtaama on 250 m³/s ja ohijuoksutus 200 m³/s metrin syvyydessä pinnan alapuolella Puhkukosken voimalan yläkanavassa.



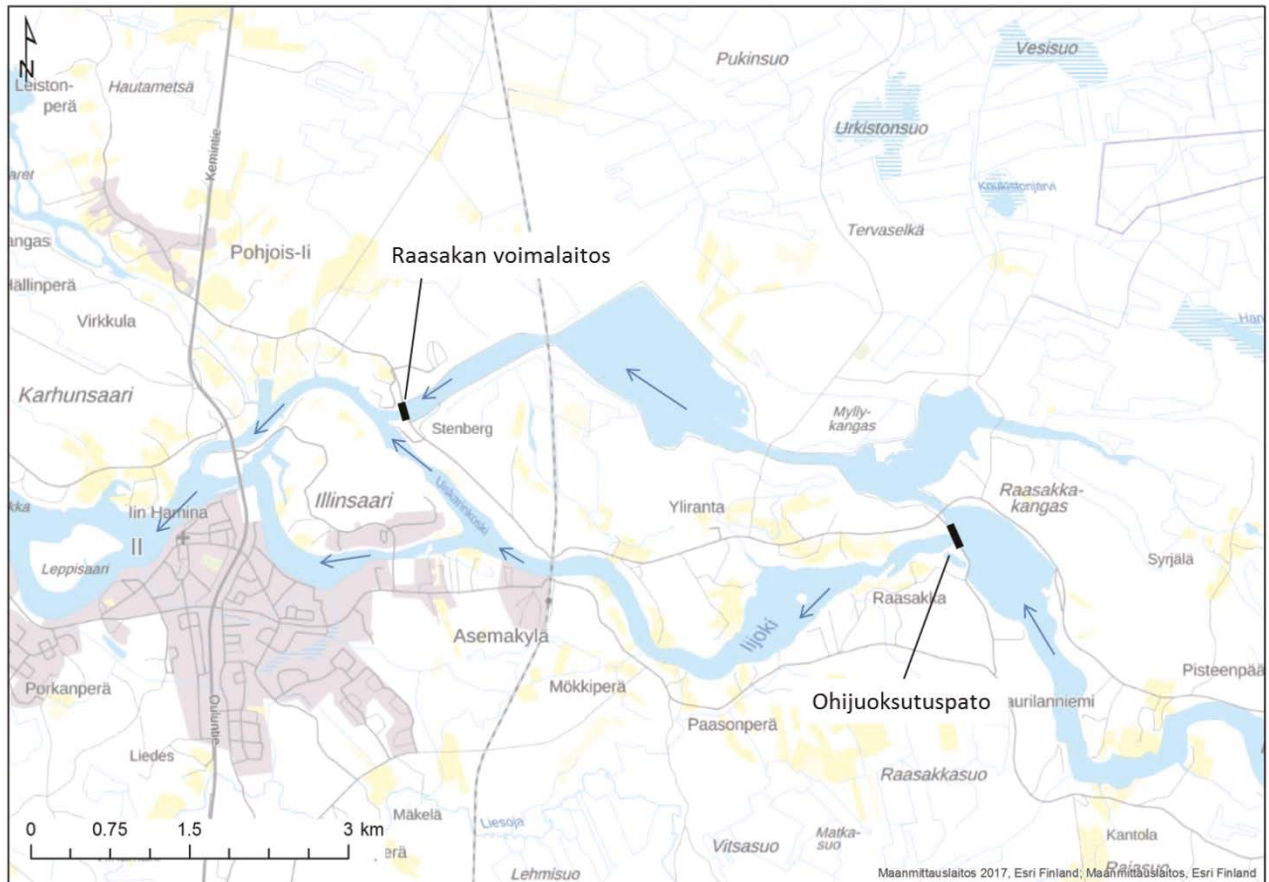
Liite 3. 3D-virtausmallin mukaiset virtauskentät virtaamatilanteella, missä voimalan virtaama on 250 m³/s ja ohijuoksutus 200 m³/s metrin syvyydessä pinnan alapuolella Kierikin voimalan yläkanavassa.



Liite 4. Karttakuva lijoelta Maalismaan voimalaitoksen yläpuolen vaikutusalueelta. Karttaan merkitty Maalismaan voimalaitos ja ohijuoksutuspato. Veden virtaussuunta esitetty sinisillä nuolilla.



Liite 5. Karttakuva Ijoen Raasakan voimalaitoksen yläpuolen vaikutusalueelta. Karttaan merkitty Raasakan voimalaitos ja ohijuoksupato. Veden virtaussuunta esitetty sinisillä nuolilla.





Luonnonvarakeskus
Latokartanonkaari 9
00790 Helsinki
puh. 029 532 6000