

Lohen vaelluspoikasten käyttäytyminen ja kuolleisuus Mustionjoen voimalaitoksilla



Petri Karppinen
Juha-Pekka Vähä
Teppo Vehanen



Länsi-Uudenmaan
VESI ja YMPÄRISTÖ ry
Västra Nylands vatten och miljö rf

Julkaisu
281/2017

LÄNSI-UUDENMAAN VESI JA YMPÄRISTÖ RY
JULKAISU 281/2017

Lohen vaelluspoikasten käyttäytyminen ja kuolleisuus Mustionjoen voimalaitoksilla

Petri Karppinen (Kala- ja vesitutkimus Oy)
Juha-Pekka Vähä (Länsi-Uudenmaan vesi ja ympäristö ry)
Teppo Vehanen (Luonnonvarakeskus)

Julkaisu on osa FRESHABIT LIFE IP – hanketta (LIFE14 IPE/FI/023)



Tutkimus on saanut rahoitusta myös Varsinais-Suomen ELY-keskuksen myöntämistä kalastonhoitomaksuvaroista.



Elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus
Centre for Economic Development, Transport and the Environment

Hanke on saanut rahoitusta Euroopan unionin LIFE-ohjelmasta. Aineiston sisältö heijastelee sen tekijöiden näkemyksiä, eikä Euroopan komissio tai EASME ole vastuussa aineiston sisältämien tietojen käytöstä.

Laatija: Petri Karppinen (Kala- ja Vesitutkimus Oy), Juha-Pekka Vähä (Länsi-Uudenmaan vesi ja ympäristö ry), Teppo Vehanen (Luonnonvarakeskus)
Tarkastaja: Jaana Pönni
Hyväksyjä: Jaana Pönni

LÄNSI-UUDENMAAN VESI JA YMPÄRISTÖ RY, JULKAISU 281/2017

Valokuva: LUVY ry (Juha-Pekka Vähä, kansikuva Mustionkosken voimalaitos, padon alapuolelta kuvattuna)

Taitto: Sirpa Heikkinen

Harriprint Tmi Karkkila 2017

ISBN 978-952-250-182-0 (nid.)
ISBN 978-952-250-183-7 (PDF)
ISSN-L 0789-9084
ISSN 0789-9084 (painettu)
ISSN 1798-2677 (verkkojulkaisu)

Julkaisu on saatavana myös internetistä: www.luvy.fi/julkaisut

Kuvailulehti

<i>Julkaisija</i>	Länsi-Uudenmaan vesi ja ympäristö ry PL 51, 08101 LOHJA	<i>Julkaisuaika</i> 12/2017
	Puh. 019 323 623 Sähköposti: vesi.ymparisto@vesiensuojelu.fi www.luvy.fi	<i>Julkaisun kieli</i> Suomi
		<i>Sivuja</i> 37
<i>Tekijä(t)</i>	Petri Karppinen (Kala- ja vesitutkimus Oy), Juha-Pekka Vähä (Länsi-Uudenmaan vesi ja ympäristö ry), Teppo Vehanen (Luonnonvarakeskus)	
<i>Julkaisun nimi</i>	Lohen vaelluspoikasten käyttäytyminen ja kuolleisuus Mustionjoen voimalaitoksilla	
<i>Julkaisusarjan nimi ja numero</i>	Julkaisu 281/2017	
<i>Tiivistelmä</i>	<p>Mustionjoella merkittiin sisäisillä radiolähettimillä 100 lohen vaelluspoikasta eli smolttia toukokuussa 2017. Lähetinkalat vapautettiin Mustionjoen vesivoimalaitosten (Mustionkoski, Peltokoski, Billnäs, Åminnefors) yläpuolelle 25 kalan erissä. Tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää vaelluspoikasten käyttäytymistä voimalaitoksilla sekä arvioida niiden selviytymistä patoaltailla, voimalaitoksissa ja jokivaelluksen aikana. Smolttien vaelluksen etenemistä ja käyttäytymistä seurattiin voimalaitospadoille asennetuilla vastaanotin-antennijärjestelmillä sekä käsivastaanottimilla tehdyillä paikannuksilla.</p> <p>Smoltit aloittivat alasvaelluksensa vapautuspaikalta nopeasti ja ne saapuivat alapuoliselle voimalaitokselle keskimäärin 0,6–5,8 tunnin kuluessa vapauttamisen jälkeen. Kalat saapuivat padolle yleensä hyvin suoraviivaisesti voimalaitokselle johtavaa päävirtausta myötäillen ja niiden liikehdintä keskittyi aluksi voimalaitoksen turbiinikanavan väljän edustalle. Smolttien saapuminen Åminneforsin voimalaitokselle oli kuitenkin hitaampaa ja käyttäytyminen poikkeavaa muihin laitoksiin verrattuna. Åminneforsin patoa lähestyvät kalat pysähtyivät ensin jokimutkassa voimalaitoksen yläpuolella parin tunnin ajaksi. Voimalaitokselle smoltit saapuivat päävirtausta myötäillen padon oikeaan kulmaan ohijuoksutuskanavan edustalle, mistä ne alkoivat hakeutua turbiinikanavan suulle vasta useita tunteja myöhemmin.</p> <p>Kalat laskeutuivat alavirtaan voimalaitoksen läpi keskimäärin 14–24 tunnin kulluttua laitokselle saapumisesta, mutta Peltokoskella kalat viipyivät patoaltaalla huomattavasti pitempään kuin muilla voimalaitoksilla (keskimäärin 4 päivää). Viimeiset kaksi kalaa laskeutuivat alas padosta ohijuoksutuksen yhteydessä vasta kahden viikon kuluttua vapauttamisesta. Alasmenon viivästymisen seurauksena smoltit alkoivat liikkua laajemmalla alueella patoaltaalla, ja predatiokuoletuus nousi Peltokosken voimalaitoksella selvästi korkeammaksi (51 %) kuin muilla padoilla (0–10 %). Turbiinikuolleisuus oli korkea (46–53 %) kolmella ylimmällä voimalaitoksella, mutta alimmalla Åminneforsin voimalaitoksella kuolleisuus oli selvästi muita laitoksia vähäisempää (6 %). Voimalaitosten alapuolisella jokiosuudella kuolleisuus oli Mustionkosken ja Peltokosken voimalaitosten alapuolisella jokiosuudella (42–43 %), alemmilla jokiosuoksilla 7–9 %.</p> <p>Voimalaitoksen, patoaltan ja alapuolisen jokiosuuden yhteisvaikutus eli laitokohtainen kokonaiskuolleisuus oli Mustionkoskella 72 %, Peltokoskella 87 %, Billnäsissä 55 % ja Åminneforsissa 21 %. Voimalaitoksiin liittyvät syyt aiheuttivat suurimman osan kalakuolemista etenkin kolmen ylimmän voimalaitoksen</p>	

	<p>kohdalla. Tulosten perusteella kokonaiskuolleisuus on suurta ja koko jokivaelluksesta Mustionkosken yläpuolelta jokisuulle selviytyy nykyolosuhteissa vain noin 1,3 % kaloista.</p> <p>Vaelluskuolleisuuden vähentämiseksi tarvitaan alasvaellusratkaisuja, joilla turbiini- ja patoallaskuolleisuutta voidaan vähentää. Mustionjoelle rakennettavat kalatiet voivat osaltaan toimia alasvaellusreitteinä, mutta nopeamman ja turvallisemman alasvaelluksen takaamiseksi tarvitaan vähintään ohjausrakenteita ja myös erillisiä alasvaellusrakenteita. Vaelluspoikasten käyttäytymisestä patoaltailla ja voimalaitoksilla saatujen havaintojen perusteella Mustionjoella on hyvät edellytykset onnistuneiden alasvaellusratkaisujen kehittelylle. Jokaiselle voimalaitokselle tarvitaan kuitenkin omanlaisensa ratkaisut kalojen alasvaelluksen turvaamiseksi. Rakennettavien kalateiden ja alasvaellusrakenteiden vaikutukset vaelluspoikasten käyttäytymiseen ja selviytymiseen, sekä tarvittavat muutos- ja kehittämistarpeet tulee selvittää huolellisesti suunnitelluilla seurantatutkimuksilla.</p> <p>Tutkimus tehtiin osana FRESHABIT LIFE IP -hanketta ja se sai lisärahoitusta myös Varsinais-Suomen ELY-keskuksen myöntämistä kalastonhoitomaksuvaroista.</p>
<i>Asiasanat</i>	Vesivoimalaitos, lohi, smoltti, alasvaellus, vaellusnopeus, kuolleisuus, selviytyminen, käyttäytyminen, patoallas, predaatiokuolleisuus, turbiinikuolleisuus, radiotelemetria, Mustionjoki
<i>Toimeksiantaja</i>	FRESHABIT (LIFE IP -hanke) ja Varsinais-Suomen ELY-keskus kalastonhoitomaksuvaroista.

Documentation page

<i>Publisher</i>	Association for Water and Environment of Western Uusimaa P.O. Box 51, 08101 LOHJA Tel. +358 19 323 623 email: vesi.ymparisto@vesiensuojelu.fi www.luvy.fi	<i>Date</i> 12/2017
		<i>Language</i> Finnish
		<i>Pages</i> 37
<i>Author(s)</i>	Petri Karppinen (Fish and Water Research Ltd), Juha-Pekka Vähä (Association for Water and Environment of Western Uusimaa), Teppo Vehanen (Natural Resources Institute Finland)	
<i>Title of publication</i>	Survival and behavior of radio-tagged Atlantic salmon smolts during downstream migration in the River Mustionjoki	
<i>Publication series and number</i>	Julkaisu 281/2017	
<i>Summary</i>	<p>Downstream migration of 100 radio-tagged salmon smolts was studied in the River Mustionjoki in May 2017. The salmon were released upstream of the four hydropower dams (named from upstream to downstream: Mustionkoski, Peltokoski, Billnäs, Åminnefors) in batches of 25 radio-tagged fish and ca. 300 untagged fish. The primary goals of the study were 1) to investigate the migration routes and behavior of the salmon in the vicinity of these dams, and 2) to estimate their survival at the reservoirs above the dams, at passage through the turbines, and during the river migration. The progress of migration and the fish behavior at the dams were monitored by recording individually identifiable tag signals with stationary multiple antenna-receiver systems, supplemented with locations of tagged fish by hand-held receivers and visual observation of released smolts in front of the power stations.</p> <p>After their release, the smolts quickly started their migration and reached the dam 150–450 m downstream in 0.6–5.8 hours on average. In general, the fish followed the main water current directly to the dam where their movements were concentrated in front of the intake channel before entering the turbines. Downstream migration behavior above the Åminnefors dam was different from the general pattern observed at the other dams: on the way to the Åminnefors dam, the fish stopped for a few hours above a bridge crossing the river in the vicinity of the dam. Later on, the fish approached the dam following the main current of the river, and stopped in the other end of the dam in front of the spillway gates. Only after several hours, they started to move towards the turbine channel on the opposite side of the reservoir.</p> <p>The fish entered the turbine channel to pass through the dam on average between 14 and 24 hours after reaching the dam. However, at the Peltokoski dam the fish lingered around much longer (4 days on average) before continuing downstream. The last two fish passed the Peltokoski dam through opened spillway gates two weeks since their arrival to the dam. As a result of the delayed passage, the smolts roamed around above the dam and in the reservoir. This resulted in significantly higher predator-induced mortality (51 %) than recorded at the other three dams (0–10 %).</p> <p>While passing through the dams, turbine mortality was high (46–53 %) at the three upper dams, but significantly lower at the lowermost Åminnefors power station (6 %). Similarly, mortality during the downstream migration between the dams was high at the upper river sections below the Mustionkoski (43 %)</p>	

	<p>and Peltokoski (42 %) dams, but low at the river sections below Billnäs dam (7–9 %).</p> <p>Hydropower dam specific total mortality (combined dam, turbine, and river mortality) was 72 % for Mustionkoski, 87 % for Peltokoski, 55 % for Billnäs and 21 % for Åminnefors. The majority of the mortality was related to the hydropower dams, at the three upper dams in particular. The results indicate very high cumulative mortality, and currently, only 1.3 % of the downstream migrating salmonid smolts are expected to survive the entire 26 km long journey through River Mustionjoki.</p> <p>The results of this study call for urgent actions and solutions to decrease the observed high mortality caused by the hydropower dams. Fishways which will be constructed soon at Åminnefors and Billnäs may to a degree serve as a bypass for downstream migrating smolts, but additional structures are needed to guide smolts to fishways and pass the power stations in order to enhance the downstream migration success. Results of this study however indicate a good potential for mitigating the high migration mortality by constructing site-specific tailored guidance solutions. The effects of the new fishways and other structures on the behavior and survival of the smolts, and the need for required modifications and further developments, are to be investigated by carefully planned monitoring studies.</p>
<i>Keywords</i>	hydropower, salmon, migration speed, mortality, reservoir, turbine, predation, telemetry
<i>Financier of publication</i>	FRESHABIT (LIFE14IPE/FI/023), Centre for Economic Development, Transport and the Environment of Varsinais-Suomi region.

Sisältö

1	Johdanto	9
2	Aineisto ja menetelmät	10
2.1	Vaelluseuranta	13
3	Tulokset	14
3.1	Mustionkoski	14
3.2	Peltokoski	17
3.3	Billnäs	19
3.4	Åminnefors	22
3.5	Voimalaitosten ja jokiosuuksien välinen tarkastelu	23
4	Tulosten tarkastelu ja johtopäätökset	29
5	Kiitokset	35
	Kirjallisuus	35

1 Johdanto

Vaelluskalakantojen elvyttäminen ja palauttaminen ovat nousseet viime vuosina valtakunnallisesti ja poliittisestikin tärkeiksi tavoitteiksi. Valtiojohdon käynnistämät kärkihankkeet ja tavoiteohjelmat, kuten muun muassa *Vaeltavien ja uhanalaisten kalakantojen elvyttäminen* -kärkihanke, kansallinen kalatiestrategia, sekä lohi- ja meritaimenstrategia, pyrkivät kaikki osaltaan edistämään vaelluskalakantojen palauttamista. Vaellusyhteyksien avaaminen ja kalojen luontaisen lisääntymisen edistäminen ovat keskeisessä asemassa vaelluskalakantojen palauttamisessa rakennettuihin jokiin. Nousuvaelluksen järjestämisen lisäksi tavoitteeksi on asetettu myös kalojen alasvaelluksen turvaaminen ja alasvaelluskuolleisuutta vähentävien rakenteiden kehittäminen.

Tehtyjen tutkimusten mukaan alasvaelluskuolleisuus vaihtelee suuresti erilaisten voimalaitosten välillä. Suomessa voimalaitosten aiheuttamaa lohen vaelluspoikasten kuolleisuutta on tutkittu toistaiseksi lähinnä suurissa joissa, kuten Kemijoessa ja Iijoessa. Pienemmissä joissa voimalaitospatojen aiheuttamaa alasvaelluskuolleisuutta ei Suomessa ole juurikaan tutkittu, vaikka juuri pieniä voimalaitospatoja on määrällisesti eniten. Suomessa ei myöskään ole vielä toistaiseksi tehty vaelluskalojen alasvaellusta helpottavia ja kuolleisuutta vähentäviä rakenteita voimalaitospatojen yhteyteen. Vaikka vaelluskalojen kuolleisuutta aiheuttavat tekijät ovat pääpiirteissään samanlaisia, hydrauliset olosuhteet ja kuolleisuuteen vaikuttavat mekanismit voivat olla hyvinkin erilaisia erikokoisten jokien ja patojen välillä. Vaelluspoikasten käyttäytymisestä ja kuolleisuudesta voimalaitospadoilla tarvitaankin kattavaa tutkimustietoa toimivien alasvaellusrakenteiden suunnittelemiseksi.

Suomessa on toteutettu tai suunnitteilla useita kalatiehankkeita niin suuriin kuin pieniinkin jokiin. Myös Mustionjoen neljän voimalaitospadon ohittamiseksi on suunniteltu kalatiet, joista kaksi alimmaista, Åminnefors ja Billnäs, ovat saaneet vesilain mukaisen toteutusluvan. Kalateiden rakentaminen Åminneforsin ja Billnäsien patoihin on suunniteltu alkavaksi vuoden 2018 aikana. Mustionjoelle rakenteilla olevien kalateiden suunnittelun yhteydessä on laadittu myös alustavat suunnitelmat toteutettavista alasvaellusrakenteista.

Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää lohen vaelluspoikasten käyttäytymistä ja kuolleisuutta Mustionjoen voimalaitoksilla nykytilanteessa ennen kalateiden rakentamista. Tutkimuksesta saatua tietoa on jo hyödynnetty alasvaellusratkaisujen suunnittelussa Mustionjoella, ja saatuja tuloksia voidaan soveltaa myös muualla Suomessa. Tutkimuksen tulokset toimivat myös vertailukohtana myöhemmin rakennettavien kalateiden ja alasvaellusratkaisujen vaikutusten arvioimiseksi tehtävissä jatkotutkimuksissa.

Tämä tutkimus on osa FRESHABIT LIFE IP -hanketta. Tutkimus sai rahoitusta myös Varsinais-Suomen ELY-keskuksen myöntämistä kalastonhoitomaksuvaroista (Dnro 1055/3172/2017). Tutkimuksen toteutuksesta vastasi Kala- ja vesitutkimus Oy yhteistyössä Länsi-Uudenmaan vesi ja ympäristö ry:n ja Luonnonvarakeskuksen kanssa.

FRESHABIT LIFE IP -hanke

Vuoden 2016 alussa alkanut valtakunnallinen, lähes seitsemän vuotta kestävä hanke on Suomen kaikkien aikojen suurin LIFE-hanke. Sen kokonaisbudjetti on noin 20 miljoonaa euroa, mistä EU:n rahoitusosuus on noin 12 miljoonaa euroa. Hankkeessa on mukana 31 kumppania ja sitä koordinoi Metsähallitus Luontopalvelut.

Hankkeen tärkeimpänä tavoitteena on parantaa sisävesien N2000-alueiden ekologista tilaa ja monimuotoisuutta. Työtä tehdään kunnostamalla vesistöjä ja niiden valuma-alueita, uusia pysyviä menetelmiä ja käytäntöjä kehittämällä, lisäämällä tietoa ja kiinnostusta sisävesistä sekä innostamalla niiden hoitoon. Sisävesiluonnon lisäksi hankkeesta hyötyvät paikalliset yrittäjät, vesistöjen virkistyskäyttäjät sekä tulevat sukupolvet, jotka saavat nauttia puhtaammista sisävesistä.

FRESHABIT-hankkeen Karjaanjoen kohdealueen keskeisenä tavoitteena on Suomen eteläisimmän, Mustionjoen jokihelmisimpukkapopulaation (*Margaritifera margaritifera*) pelastaminen sukupuutolta, sen elinolojen parantaminen ja elinkierron mahdollistaminen. Jokihelmisimpukan elinkierto kuuluu keskeisenä vaiheena vuoden mittainen toukkavaihe loisena lohikalan kiduslehdellä. Siten lohikalat, niiden elinkierron mahdollistaminen vaellusyhteyksiä parantamalla ja elinalueita kunnostamalla kuuluvat oleellisesti hankkeen toimenpideohjelmaan.

Karjaanjoen alueella tehtäviä Freshabit-hanketoimia koordinoi ja toteuttaa Länsi-uudenmaan vesi ja ympäristö ry. yhteistyössä Raaseporin kaupungin, Lohjan kaupungin, Koskienergia Oy:n ja Jyväskylän yliopiston kanssa.

2 Aineisto ja menetelmät

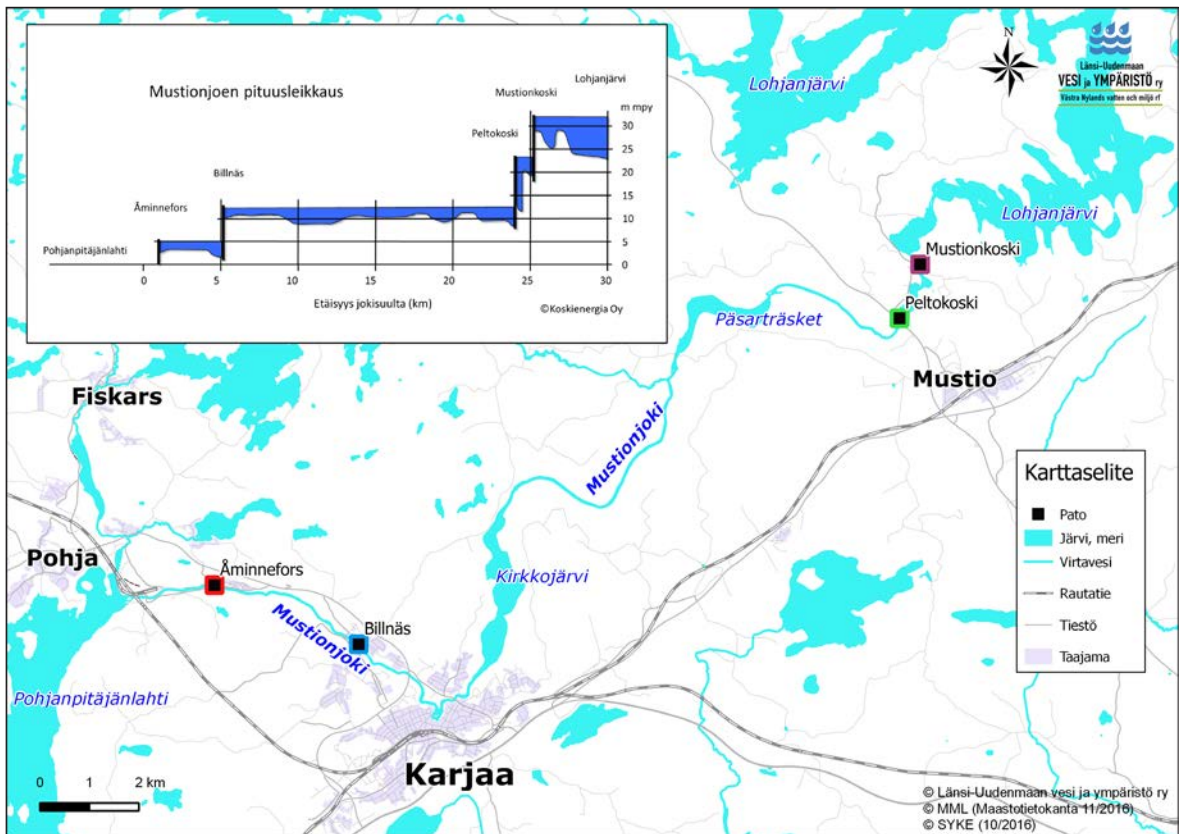
Tutkimusalue ja olosuhteet

Karjaanjoen vesistö on Uudenmaan suurin ja kalataloudellisesti merkittävin vesistöalue (Kuva 1). Mustionjoki, joksi kutsutaan vesistön Lohjanjärven alapuolista osaa, on pituudeltaan noin 26 kilometriä (Kuva 2).



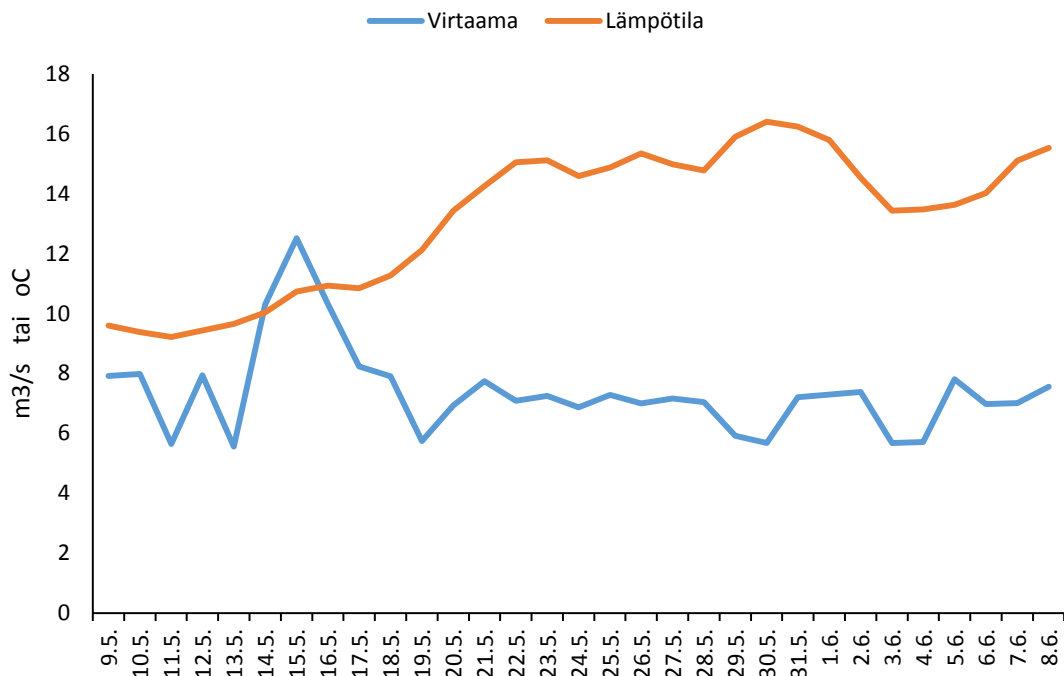
Kuva 1. Tutkimusalueen eli Mustionjoen sijainti ja Karjaanjoen valuma-alue.

Mustionjoki oli aikoinaan myös merkittävä vaelluskalajoki: se oli Suomenlahteen laskevista lohijoista toiseksi suurin Kymijoen jälkeen. Mustionjoen kautta merilohet ja taimenet pääsivät tuolloin nousemaan Lohjanjärveen, Hiidenvedelle ja niiden yläpuolisiin vesistöihin kunnes vaelluskalojen nousu estyi voimallisen vesistörakentamisen seurauksena 1900-luvun alkupuoliskolla. Nykytilanteessa vaelluskalat pääsevät nousemaan vain aivan joen alaosalle. Joen sulkee neljä putoukorkuudeltaan 5–11 m patoa, joiden yhteenlaskettu korkeusero on noin 30 metriä (Kuva 2).



Kuva 2. Mustionjoki lähialueineen, vesivoimalaitokset ja Mustionjoen pituusleikkaus Lohjanjärveltä jokisuulle.

Mustionjoen vuotuinen keskivirtaama on noin $19 \text{ m}^3/\text{s}$. Tutkimuksen aikana Mustionjoen vuorokausikohtainen keskivirtaama vaihteli välillä $5,5\text{--}12,5 \text{ m}^3/\text{s}$ ja lämpötila välillä $9,6\text{--}16,4 \text{ }^\circ\text{C}$ (Kuva 3).



Kuva 3. Mustionjoen virtaama ja lämpötila Peltokoskella vaellus seurannan aikana vuorokauden keskiarvoina. Virtaamatiidot: Koskienergia Oy.

Voimalaitokset

Mustionjoella on neljä varsin erityyppistä vesivoimalaitosta. Näistä ylin on Mustionkosken voimalaitos. Sen yläkanava on hyvin kapea (noin 10 m). Yläkanava on jaettu betonisella väliseinämällä kahteen osaan voimalaitoksen edessä, ja tämä osuus on pääosin katettu betonikannella (ks. Kuva 4). Turbiinikanavan välppien edustalla kanava on kuitenkin avoin. Ohijuoksutusluukut sijaitsevat voimalaitoksen yläpuolella patoseinämän yläpäässä, ylävirran suunnasta katsottuna kanavan vasemmassa laidassa. Laitoksen putouskorkeus on noin 8 metriä. Vesi virtaa neljän kallistetun tuloputken kautta potkuriturbiineille, joita on kaksi kummassakin kanavassa. Turbiinipotkurille menevä virtaus on noin neljän metrin syvyydessä (Taulukko 1). Mustionkosken padolla tehdyn vaellusseurannan aikana oli käytössä ainoastaan ylävirran suunnasta katsottuna vasemmanpuoleinen turbiinikanava (ks. Kuva 4).

Noin 1,4 kilometriä alempana sijaitsee Peltokosken voimalaitos. Peltokosken patoallas on voimalaitoksen edustalla noin 40 metriä leveä ja altaan toinen reuna rajautuu noin 65 metriä pitkään betoniseen patoseinämään (ks. Kuva 6). Ohijuoksutusluukut sijaitsevat ylävirran suunnasta katsottuna padon oikeassa laidassa. Laitoksen putouskorkeus on noin 11 metriä, ja vesi virtaa laitoksen Kaplan-turbiinille noin 10 metrin syvyydessä (Taulukko 1).

Billnäsin voimalaitospato sijaitsee noin 19 kilometriä Peltokosken alapuolella. Voimalaitospato on noin 55 metriä leveä. Voimalaitos sijaitsee ylävirran suunnasta katsottuna padon oikeassa laidassa, ohijuoksutusluukut puolestaan padon vasemmassa laidassa (ks. Kuva 8). Laitoksen putouskorkeus on noin 7 metriä ja turbiinille menevä virtaus noin 3,5 metrin syvyydessä (Taulukko 1). Voimalaitoksella on kolme Francis-turbiinia, joista ainoastaan vasemmanpuoleinen oli käytössä Billnäsin padolla tehdyn vaellusseurannan aikana (ks. Kuva 8).

Åminneforsin voimalaitoksen patoallas (3,3 km Billnäsiästä) on varsin pienimuotoinen; pato on leveydeltään noin 30 metriä (ks. Kuva 10). Voimalaitoksen turbiinikanava sijaitsee padon vasemmassa laidassa ja ohijuoksutuskanava padon oikeassa laidassa. Laitoksen putouskorkeus on noin 5 metriä ja turbiinille menevä virtaus on noin 3,5 metrin syvyydessä (Taulukko 1).

Taulukko 1. Mustionjoen voimalaitosten turbiinityypit, tulokanavan yläreunan ja turbiinille menevän virtauksen syvydet sekä putouskorkeudet.

	Turbiinityyppi	Tulokanavan yläreuna	Turbiinille menevä virtaus	Putouskorkeus
Mustionkoski	potkuri	1 m	4 m	8 m
Peltokoski	Kaplan	1 m	10 m	11 m
Billnäs	Francis	1 m	3,5 m	7 m
Åminnefors	Kaplan	2,5 m	3,5 m	5 m

Tutkimuskalat

Tutkimuksessa käytettiin Laatokasta Suomenlahden pohjukkaan laskevan Nevajoen alkuperää olevia lohia (*Salmo salar*). Kalat olivat Venekosken kalanviljelylaitoksella Hankasalmella kasvatettuja 2-vuotiaita vaelluspoikasia eli smoltteja. Kalat kuljetettiin Hankasalmelta tankkiautolla hapetetuissa 2,5 kuutiometrin altaissa Mustionjoelle 2.5.2017. Altaista kalat (n. 10 000 kpl) laskettiin jokeen noin 150 metriä Billnäsin voimalaitoksen yläpuolelle asennettuun 3 m x 3 m x 1,5 m kokoiseen verkkokassiin odottamaan jatkokäsittelyä. Kaloja vastaanotettaessa niillä havaittiin olevan runsaasti eväkulumia ja etenkin selkäevä oli kaikilta pahasti syöppynyt. Kalat käyttäytyivät kuitenkin eloisasti ja niiden kuolleisuus oli verkkokassissa säilytyksen aikana varsin vähäistä. Lohenpoikaset olivat ulkoisen habituksen perusteella jo pitkälle smolttiutuneita. Tutkimukseen tarvittavat kalat otettiin verkkokassista pienissä erissä, ja loput kalat (noin 8 000 kpl) vapautettiin jokeen Billnäsiä lähinmerkkintöjen päätyttyä 20. toukokuuta.

Kalojen merkintä ja kuljetus vapautuspaikalle

Verkkokassista otettiin muutaman kymmenen kalan erä erilliseen häkkiin (100 cm x 50 cm x 50 cm) 1–2 päivää ennen kunkin erän merkintää. Häkistä otettiin satunnaisesti yksi kala kerrallaan lähettimen asentamista varten, kuitenkin niin, että merkittäväksi hyväksyttiin vain hyväkuntoisia ja mahdollisimman ehjäeväisiä yksilöitä. Tutkimukseen käytetyt kalat olivat keskimäärin 21,6 cm pitkiä (kokonaispituus) ja ne painoivat keskimäärin 105 g (Taulukko 2).

Kalat nukutettiin ennen käsittelyä yksi kerrallaan hapetetussa nukutusaineliuoksessa (puskuroitu MS-222, < 100 mg/l) 30 litran astiassa. Lähettimen asentamista varten kala asetettiin merkintäkouruun ja rinta- ja vatsaevien välille tehtiin noin 15–18 mm:n mittainen viilto, jonka kautta lähetin työnnettiin kalan vatsaonteloon. Viilto suljettiin yhdellä tikillä. Lähettimen asentamiseen kului keskimäärin noin kaksi minuuttia. Lähettimen asentamisen jälkeen kala laitettiin toiseen häkkiin toipumaan operaatiosta. Kalat heräsivät nopeasti nukutuksesta ja niiden käyttäytyminen oli normaalia jo muutaman minuutin kuluttua. Kalat jätettiin toipumaan häkkiin 3–4 päivän ajaksi ennen kuljetusta vapautuspaikalle. Merkinnän aiheuttamaa kuolleisuutta ei esiintynyt ja kaikki kalat olivat vapautushetkellä hyväkuntoisia ja virkeitä. Jokiveden lämpötila oli merkintäpäivinä 9,5–12 °C.

Käytetyt kirurgiset neulat olivat kertakäyttöisiä. Leikkausveitset desinfioidiin 99,5 %:lla alkoholilla jokaisen operaation jälkeen ja vaihdettiin 3–4 kalan jälkeen uuteen. Myös lähettimet (ATS malli F1020, paino 1,5 g, toiminta-aika 21–45 päivää) desinfioidiin alkoholilla ennen lähettimen asentamista vatsaonteloon. Kunkin vapautuserän kalat kuljetettiin vapautuspaikalle 600 litran hapetetussa altaassa. Jokaisen erän mukana vapautettiin noin 300:n merkitsemättömän kalan suojaparvi lieventämään lähetinkaloihin kohdistuvaa predaatiopainetta. Kalojen kuljetus vapautuspaikalle kesti pisimmillään noin puoli tuntia. Erän 3 (Billnäs) kalat vapautettiin merkintäpaikalta.

Taulukko 2. Radiolähettimellä merkittyjen lohen vaelluspoikasten merkintäeräkohtaiset tiedot.

Merkintä-päivämäärä	Vapautus-ajankohta	Vapautuserä, yksilömäärä	Pituus, keskiarvo (cm)	Pituus, keskihajonta (cm)	Pituus, min (cm)	Pituus, max (cm)
5.5.2017	9.5. klo 15	Mustionkoski, 25	21,2	1,7	19,0	27,5
12.5.2017	15.5. klo 10	Peltokoski, 25	21,3	1,1	19,0	23,5
16.5.2017	19.5. klo 11	Billnäs, 25	22,3	1,6	20,0	25,5
17.5.2017	20.5. klo 11	Åminnefors, 25	21,5	1,1	20,0	24,5
KAIKKI, 100			21,6	1,5	19,0	27,5

Punnittujen kalojen (n=31) keskipaino: 105 g

2.1 Vaellusseuranta

Vastaanottimet ja antennijärjestelmät

Voimalaitosten ylä- ja alapuolelle asennettiin kuuntelujärjestelmät lähettimellä varustettujen vaelluspoikasten jatkuva seuranta varten (ks. kuvat 4, 6, 8 ja 10). Voimalaitoksen yläpuolelle asennettiin 4–5 vedenalaisantennia, joiden kautta automaattivastaanottimet (ATS, Advanced Telemetry Systems Inc., USA, malli R4500) tallensivat voimalaitoksen edustalla ja padolla liikkuvista lähettimillä varustetuista kaloista kantautuvat signaalit maksimissaan noin 30 metrin etäisyydeltä. Kuuntelujärjestelmän toiminta tarkistettiin ja antennien kuuluvuusetaisyys arvioitiin alustavasti uittamalla radiolähetintä voimalaitoksen edustalla. Voimalaitoksen alapuolelle asennettiin puolestaan vastaanottimet ja ilma-antennit tallentamaan voimalaitoksesta alas tulevien kalojen lähetinsignaalit. Ilma-antennien signaalinhavaintoetaisyys oli vähintään 50 metriä ja enimmäislään noin 100 metriä, ja se vaihteli antennin koosta ja asennuspaikasta riippuen.

Vastaanottimien määrä laitosten alapuolella vaihteli seurannan edetessä tilanteen mukaan, mutta kuitenkin niin, että padon alapuolta kuunteli aina vähintään yksi vastaanotin-antenni yhdistelmä koko seurannan ajan. Kolmella alimmalla voimalaitoksella alapuolta kuunteli laitoskohtaisen kalaerän vapautuksesta alkaen aina kaksi antennijärjestelmää. Toukokuun 23. päivästä alkaen Åminneforsin padon alapuolta kuunteli kolme antennijärjestelmää. Kuuntelujärjestelmät purettiin ylimmältä Mustionkosken laitoksesta ilmapäivällä 14. toukokuuta, kun kaikki laitoksen yläpuolelle vapautetut kalat olivat jo tulleet alas laitoksesta. Peltokosken

vedenalaisantennit padon yläpuolella purettiin 19. toukokuuta ja ne siirrettiin alemmille laitoksille. Kaikki vedenalaisantennit purettiin 31. toukokuuta. Ilma-antennit kuuntelivat laitosten alakanavaa 9. kesäkuuta saakka (Peltokoski 1 antenni, Billnäs 2, Åminnefors 3), jolloin seuranta lopetettiin.

Käsipaikannukset

Kiinteillä antennijärjestelmillä tehdyn jatkuvan seurannan lisäksi lähetinkaloja paikannettiin käsivastaanottimen (ATS R4000) ja antennin avulla voimalaitospadoilla ja jokivarressa sekä rannalta että veneestä. Lähetinkaloja paikannettiin vapautuspaikalla ja alapuolisella voimalaitoksella heti vapautushetkestä alkaen. Ne paikannettiin vapautuspäivänä ja sitä seuraavana päivänä vähintään kahdesti. Myöhemmin paikannuksia tehtiin voimalaitosten ylä- ja alapuolella satunnaisemmin vielä useita kertoja. Jokaisen voimalaitoksen alapuolinen jokiosuus tutkittiin käsivastaanottimen ja antennin avulla veneellä liikkuen muutaman päivän kuluessa laitospaikoittain kalaerän vapautuksesta. Jokiosuus Peltokoskelta Billnäsiin käytiin läpi kahdesti veneellä ja tämän lisäksi signaaleja etsittiin jokivarressa kävellen Päsärträsketin yläpäässä ja Junkarsborgin koskialueella kahdesti.

Aineiston käsittely

Voimalaitospatojen päällä kertyneet vastaanottimille tallentuneet signaalit tarkistettiin kalakohtaisesti ja aineistosta poistettiin häiriösignaalit. Vastaanottimelle tallentuneiden signaalien ja samanaikaisesti tehtyjen käsipaikannusten perusteella tarkennettiin signaalien tallentumisetaisyudet ja antennien pääasialliset kattavuusalueet laitospaikoittain. Vedenalaisantennien pääasialliseksi kattavuusalueeksi määrittyi useimmissa tapauksissa noin kymmenen metrin etäisyys antennista. Signaaleja tallentui vastaanottimille myös kauempaa, mutta antennien välisistä lyhyistä etäisyyksistä johtuen kauempana liikkuvista kaloista saadut signaalit tallentuivat usein useammalle antennille samanaikaisesti. Laitospaikoittain aineistosta karsittiin keskimääräistä heikommat signaalit ja voimalaitospatojen päällä tapahtuneiden liikkeiden analysoimiseksi hyödynnettiin vain sellaiset signaalit, jotka olivat voimakkuuden perusteella tallentuneet kunkin antennin lähietäisyydeltä (< 10 m). Näin kalojen kulloinkin sijainti rajautui täsmällisemmin tietyn antennin kohdalle sen kuuluvuusalueen sisäpuolella.

3 Tulokset

3.1 Mustionkoski

Kalojen käyttäytyminen padolla

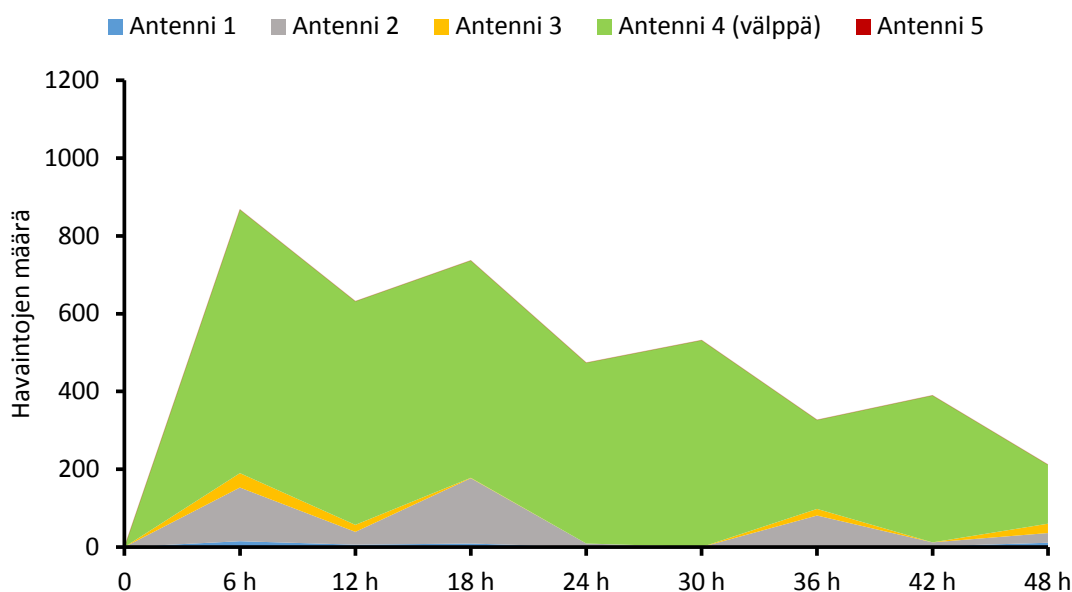
Noin 250 metriä Mustionkosken voimalaitoksen yläpuolelle vapautetut vaelluspoikaset uivat vapautuspaikalta voimalaitospadolle keskimäärin 1,1 tunnin kuluessa (vaihteluväli: 0,4–7,1 h). Valtaosa (87 %) kaikista Mustionkosken yläkanavassa kertyneistä kalojen liikkeiden ja käyttäytymisen analysointiin käytetyistä havainnoista (4 709 kpl) kertyi vasemmanpuoleisen turbiinkanavan väljän edestä (Antenni 4, Kuva 4). Havainnot painoutuivat selvästi väljän edustalle koko seurannan ajan. Kalat jäivät uiskentelemaan turbiinkanavan väljän eteen, jossa niistä saatiin runsaasti myös näköhavaintoja parin päivän aikana.



Kuva 4. Mustionkosken voimalaitospadolle asennettujen antennien sijoittuminen ja niiden arvioidut pääasialliset kattavuusalueet (sisältää Maanmittauslaitoksen Ilmakuvatietokannan 06/2017 aineistoa).

Ensimmäisen kuuden tunnin aikana havaintoja tallentui jonkin verran myös yläkanavan yläpäästä ja patoluukkujen edustalta (antennit 1, 2 ja 3; Kuva 4 ja Kuva 5). Seuraavan kuuden tunnin (6–12 h) aikana tallentuneet havainnot keskittyivät aiempaakin selvemmin väljän kohdalle (Kuva 5). Myöhemmin (12–18 h) laajempi liikehdintä yläkanavassa lisääntyi jälleen. Ensimmäisen vuorokauden lähestyessä loppuaan jäljellä olevien kalojen (6 yksilöä) liikkeet keskittyivät yhä enemmän turbiinikanavan kohdalle, ja jaksolla 24–30 h kaikki havainnot saatiin väljän edustalta. Toisen vuorokauden aikana vielä jäljellä olleet viisi kalaa pysyivät pääasiassa edelleen väljän edustalla, mutta ne liikkuivat jonkin verran myös ylempänä yläkanavassa. Kahden vuorokauden jälkeen vielä voimalaitoksen päällä olleet yksilöt (4 kpl) pysyivät väljän kohdalla; kaikki loput tallentuneet lähetinsignaalit olivat peräisin väljän kohdalla olleesta antennista (Antenni 4). Toisessa tulokanavassa olevat turbiinit eivät olleet käytössä seurannan aikana, eikä tästä kanavasta (Antenni 5) saatu myöskään yhtään smolttihavaintoa.

Mustionkoski



Kuva 5. Havaintojen kertyminen ja vaihtelu antennien välillä kuuden tunnin jaksoissa ensimmäisen kahden vuorokauden aikana voimalaitokselle saapumisesta (n=4172).

Suurin osa kaloista (72 %) ui padolle saavuttuaan hyvin suoraviivaisesti käytössä olleen turbiinikanavan puoleisen väljän eteen (Antenni 4, Kuva 4). Kaikkiaan seitsemän kalaa pysähtyi kuitenkin ohijuoksutusluukkujen edustalle (antennien 1, 2 ja 3 alue) ennen siirtymistään turbiinikanavan suulle (ka. 5,5 h; vaihteluväli 0,2–21,2 h). Näistä kahden yksilön havaittiin pysähtyvän jo ennen patoa voimalaitoksen yläkanavan ylittävän maantiesillan yläpuolelle. Toinen näistä siirtyi turbiinikanavaan väljän eteen 4,5 tuntia myöhemmin. Puolen tunnin kuluessa se meni läpi väljästä, laskeutui voimalaitoksen läpi ja menehtyi. Toinen kala jäi liikuskelemaan ohijuoksutusluukkujen eteen lähes vuorokauden ajaksi ennen kuin se siirtyi voimalan turbiiniväljän edustalle. Kyseinen kala palasi kahdesti myöhemmin vielä uudelleen ohijuoksutusluukkujen luokse. Se saatoi lopulta myös laskeutua padosta alas vuotavan ohijuoksutusluukun kautta, mutta tämä ei ole kuitenkaan täysin varmaa. Kyseinen kala jatkoi Mustionkosken alakanavasta matkaa Peltokoskelle saakka.

Kuolleisuus

Mustionkosken yläpuolelle vapautetut smoltit selvisivät kaikki voimalaitospadolle ja laskeutuivat voimalaitoksen läpi. Patoallaskuolevuus oli näin ollen 0 %.

Kalat uivat läpi väljästä ja laskeutuivat turbiinitunneliin keskimäärin 13,8 tunnin kuluttua Mustionkosken voimalaitokselle saapumisesta (vaihteluväli 0,5–54,9 h; Taulukko 3). Laskeuduttuaan voimalaitokseen ne tulivat ulos laitoksesta yleensä parin kolmen minuutin kuluessa. Osa kaloista ja lähettimistä jäi voimalaitoksen alle. Voimalaitoksesta läpi tulleista kuolleista smolteista saatiin myös useita näköhavaintoja voimalaitoksen alapuolisesta virtapaikasta. Ainakin yhden pinnalla kelluneen smoltin nähtiin päätyvän tiiran saaliiksi. Voimalaitoksen alapuolelle (0–150 m) jäi 13 kalaa. Näistä 8 yksilöä kuoli välittömästi voimalaitoksen läpiuinnin seurauksena, loput läpiuinnin ja/tai predaation seurauksena. Mustionkosken voimalaitoksen aiheuttamaksi kuolleisuudeksi määrittyi näin ollen 52 %.

Mustionkosken voimalaitoksen alapuolelta jatkoi matkaa 12 kalaa, joista seitsemän selviytyi Peltokosken voimalaitokselle saakka. Ne saapuivat Peltokoskelle keskimäärin 23,7 tunnin kuluessa Mustionkosken voimalaitoksen läpiuinnin jälkeen (vaihteluväli: 1,7–54,8 h). Viisi smoltia tuli syödyksi ennen Peltokosken voimalaitosta eli kuolevuus Mustionkosken alapuolisella jokiosuudella oli noin 42 %. Mustionkosken patoallas, voimalaitos ja alapuolinen jokiosuus aiheuttivat yhteensä noin 72 %:n vaellustappiot.

3.2 Peltokoski

Kalojen käyttäytyminen padolla

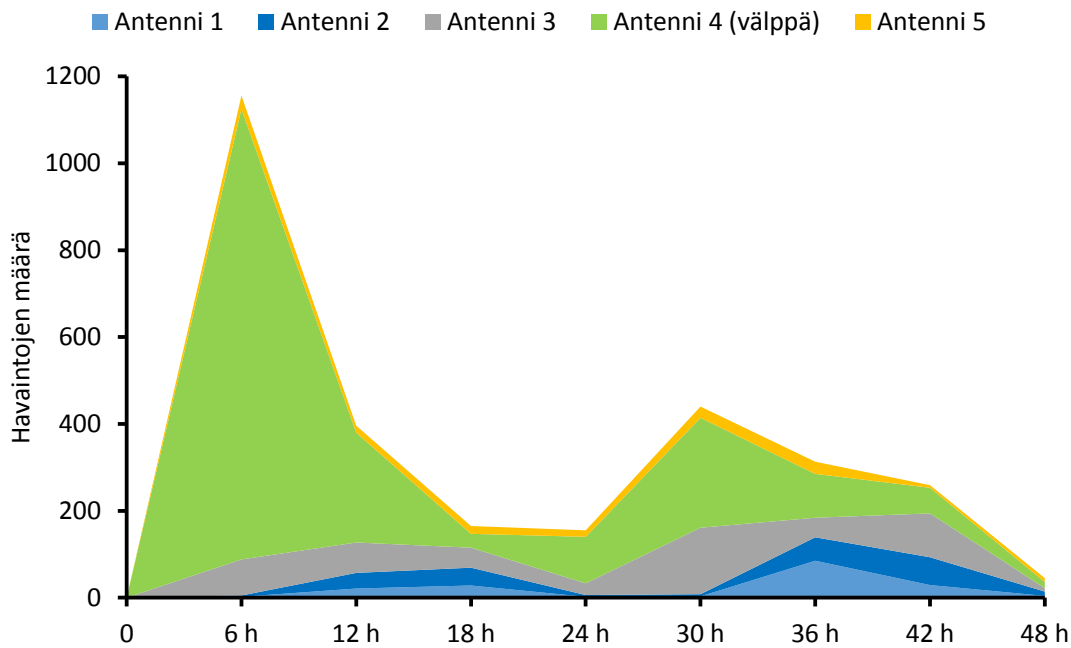
Noin 400 metrin päässä Peltokosken yläpuolella vapautetut vaelluspoikaset uivat voimalaitokselle keskimäärin 2,0 tunnissa (vaihteluväli 1,2–3,9 h). Kalat lähestyivät voimalaitosta patoaltaan keskellä ja ne hakeutuivat lähes poikkeuksetta tulokanavaan menevän virtauksen johdattelimina suoraan voimalaitoksen välpän eteen (Antenni 4), missä aivan pinnassa liikkuneita kaloja voitiin tarkkailla myös padon päältä. Suurin osa (88 %) kaikista Peltokosken yläpuolelle vapautetuista kaloista hakeutui suoraan välpän edustalle. Kolme kalaa lähestyi voimalaitosta patoseinämän puolelta (Antennit 1 ja 2, Kuva 6).



Kuva 6. Peltokosken voimalaitospadolle asennettujen antennien sijoittuminen ja niiden arvioidut pääasialliset kattavuusalueet (sisältää Maanmittauslaitoksen Ilmakuvatietokannan 06/2017 aineistoa).

Valtaosa (82 %) koko seurannan aikana kertyneistä kalojen käyttäytymisen analysointiin käytetyistä havainnoista (3236 kpl) tallentui turbiinikanavan välpän kohdalla olleilta antenneilta (Antenni 3: 18 % ja Antenni 4: 63 %). Ensimmäisen kuuden tunnin aikana kalat pysyivät tiiviisti Peltokosken voimalaitoksen välpän edustalla ja lähes kaikki havainnot (90 %) kertyivät turbiinikanavaan johtavan virtauksen kohdalta (Antenni 4; Kuva 7).

Peltokoski



Kuva 7. Havaintojen kertyminen ja vaihtelu antennien välillä kuuden tunnin jaksoissa ensimmäisen kahden vuorokauden aikana voimalaitokselle saapumisesta (n=2929).

Myöhemmin kalat alkoivat liikkua laajemmalla alueella ja myös kauempaa padosta: ajanjaksolla 12–18 h havaintoja kertyi melko tasaisesti joka puolelta voimalaitoksen edustalla. Seuraavan kuuden tunnin aikana (18–24 h) havainnot painoutuivat jälleen välppän lähistölle (antennit 3 ja 4). Toisen vuorokauden aikana smolttien liikehdintä padolla lisääntyi uudelleen ja havaintoja kertyi melko tasaisesti sekä välppän edustalta että aiempaa enemmän myös patomuurin luota (antennit 1 ja 2; Kuva 7).

Kahden ensimmäisen vuorokauden jälkeen vain neljä yksilöä oli laskeutunut voimalaitoksesta alas. Seurannan loppuajan havaintoja kertyi satunnaisesti kaikilta antenneilta padon päällä, mutta tallentuneiden signaalien määrät jäivät suuresta lähetikalamäärästä huolimatta varsin vähäisiksi. Tämä heijastelee sitä, että padon yläpuolelle jääneiden kalojen liikkeitä ulottuivat kauemmas padosta ja ne viettivät enemmän aikaa patoaltaan keskellä myös käsiantennilla tehtyjen paikannusten perusteella. Lisäksi tässä vaiheessa petokalat olivat jo syöneet osan smolteista, ja seurannan edetessä yhä useampi lähetin lakkasi liikkumasta tai katosi patoaltaasta.

Mustionkoskelta saapuneiden kalojen (7 yksilöä) käyttäytyminen vaikutti poikkeavan jonkin verran Peltokosken vapautuserän kaloista. Osa näistä saapui padolle uiden suoraan välppän eteen, mutta monet liikkuivat padolle saavuttuaan nopeasti voimalan edessä padon laidalta toiselle eivätkä jääneet välppän edustalle. Onkin todennäköistä, että osa näistä lähettimistä oli petokalan sisällä jo padolle tultaessa, sillä myöhemmin neljän lähettimen todettiin pysähtyneen rantaruovikkoon tai syvänteeseen keskellä patoallasta todennäköisesti petokalan ulostamana. Näistä yksilöistä kertyikin varsin vähän havaintoja voimalaitoksen edustalla ja ne on jätetty pois liikehdinnän analysointiin käytetystä havaintoaineistosta.

Kuolleisuus

Peltokosken vapautuserän kaloilla kului aikaa padon päällä keskimäärin 101 tuntia (4,2 päivää) ennen kuin ne pääsivät voimalaitoksen alapuolelle (vaihteluväli: 1,4–333,7 h; Taulukko 3). Kalat, jotka menivät voimalaitoksen läpi turbiinikanavan kautta, viipyivät padon päällä keskimäärin 62,3 tuntia (2,6 päivää) ennen alasmenoa. Voimalaitoksen läpi menneistä kaloista ensimmäinen laskeutui alas voimalaitoksesta uiskenneltuaan 1,4 tuntia välppän edustalla ja viimeinen 6,6 päivän kuluttua. Kaksi viimeistä vielä jäljellä ollutta kalaa laskeutui padolta alas ohijuoksutuksen yhteydessä vasta 14 vuorokautta vapautuksen jälkeen. Pitkän viipymisen seurauksena kalojen kuolleisuus Peltokosken patoaltaalla nousi varsin korkeaksi ollen noin 52 %.

Kolmetoista Peltokosken yläpuolelle vapautettua ja kaksi Mustionkoskelta saapunutta kalaa laskeutui voimalaitoksen läpi Peltokosken alapuolelle. Neljä yksilöä kuoli välittömästi voimalaitoksen läpiuinnin seurauksena. Neljästä kalasta ei saatu havaintoja myöhemmin, ja nämä kalat ovat todennäköisesti tulleet lintujen syömiksi padon alapuolella voimalaitoksen läpimenoa jälkeen. Kalat ovat saattaneet myös jatkaa vaellusta ja tulla syödyiksi jossakin matkalla kohti seuraavaa voimalaitosta. Koko jokiosuus Peltokoski–Billnäs tutkittiin veneellä edeten käsivastaanottimen ja antennin avulla kertaalleen, sekä väli Peltokoski–Päsarträsket ja molemmat järviaaltaat kahdesti. Etenkin Kirkkojärvestä on järviaalueen laajuuden vuoksi saattanut kuitenkin jäädä lähettämiä löytymättä. Tällöin Peltokosken voimalaitoskuolleisuus olisi ollut nyt arvioitua pienempi ja alapuolisen jokiosuuden aiheuttama kuolleisuus vastaavasti suurempi. Koska Peltokosken alta kadonneiden smolttien vaelluksen jatkumisesta ei kuitenkaan ole minkäänlaista näyttöä, ne laskettiin mukaan voimalaitoskuolleisuuteen, ja Peltokosken voimalaitoksen aiheuttaman kuolleisuuden tasoksi arvioitiin noin 53 %.

Kolmen kalan havaittiin tulleen syödyksi matkalla kohti seuraavaa voimalaitosta. Neljä kalaa jatkoi vaellustaan seuraavalle voimalaitokselle saakka. Näin ollen smolttien kuolleisuus Peltokosken voimalaitoksen alapuolisella jokiosuudella oli noin 43 %. Vaellusta jatkaneiden joukossa olivat aiemmin mainitut kaksi kalaa, jotka laskeutuivat Peltokoskelta alas poikkeuksellisesti ohijuoksutusluukkujen kautta. Näistä toinen jäi Billnäsin padon päälle ja tuli todennäköisesti syödyksi, ja toinen jatkoi Billnäsin Äminneforsin ja edelleen jokisuulle saakka. Tämä kala onnistui pääsemään lävitse kaikista näistä kolmesta laitoksesta ohijuoksutusten yhteydessä touko-kesäkuun vaihteessa. Muita kalojen käyttäytymiseen vaikuttaneita ohijuoksutuksia ei tapahtunut laitospaikkojen seurantojen aikana. Kolmas Peltokosken voimalaitoksesta laskeutunut kala sekä yksi Mustionkoskelta tullut kala jatkoivat niin ikään Billnäsiin saakka, missä niiden vaellus kuitenkin pysähtyi voimalaitoksen alapuolelle.

Vaikka joidenkin yksittäisten kalojen kuolleisuuden syihin liittyy jonkin verran epävarmuutta, on kuitenkin selvää, että Peltokosken patoallas, voimalaitos ja alapuolinen jokiosuus ennen seuraavaa voimalaitosta aiheuttivat yhdessä vaelluspoikasille noin 87 %:n tappiot. Vaelluspoikaset etenivät noin 19 kilometrin matkan Peltokoskelta Billnäsin voimalaitokselle keskimäärin 59,3 tunnissa (vaihteluväli: 21,7–94,1 h) ja vaellusnopeus vaihteli välillä 0,2–0,9 km/h.

3.3 Billnäs

Kalojen käyttäytyminen padolla

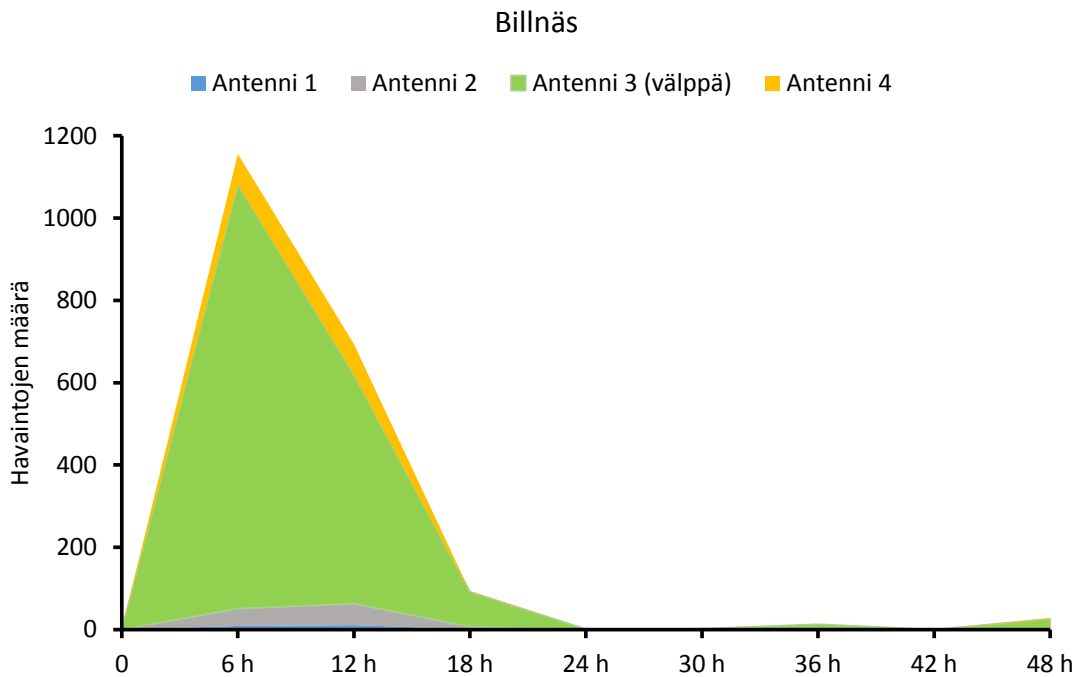
Billnäsin voimalaitoksen yläpuolella noin 150 metrin päässä vapautetut smoltit etenivät vapautuspaikalta voimalaitospadolle keskimäärin 0,6 tunnissa (vaihteluväli: 0,3–1,0 h). Suurin osa lähetinkaloista (64 %) tuli voimalaitokselle johtavaa virtausta seuraten suoraan turbiinikanavan väljän edustalle (Antenni 3, Kuva 8). Smoltit liikkuvat padon edustalla hyvin lähellä pintaa ja niiden liikkeitä ja käyttäytymistä voitiin tarkkailla myös padon päältä käsivastaanottimella tehtyjen paikannusten lisäksi. Ne hakeutuivat nopeasti voimalaitoksen väljälle ja jäivät uiskentelemaan turbiinikanavaan johtavan virtauksen kohdalle. Padon yläpuolella olevalla kelluvalla roskapuomilla saattoi olla jossakin määrin kalojen liikkeitä ohjaava vaikutus, sillä 36 % lähetinkaloista saapui padolle ensimmäisenä puomin alapäässä olleen Antenni 1:n kautta (Kuva 8). Nämäkin yksilöt siirtyivät kuitenkin nopeasti voimalaitoksen väljän eteen.



Kuva 8. Billnäsin voimalaitospadolle asennettujen antennien sijoittuminen ja niiden arvioidut pääasialliset kattavuusalueet (sisältää Maanmittauslaitoksen Ilmakuvatietokannan 06/2017 aineistoa).

Ensimmäisen kuuden tunnin aikana smoltit liikkui lähes yksinomaan välppän edustalla (89 % havainnoista) (Kuva 9). Vähitellen liikehdintä lisääntyi hieman ja satunnaisia havaintoja saatiin myös muualta padon edustalla, kuitenkin edelleen pääasiassa välppän edustalta (jakso 6–12 h). Kahdentoista tunnin jälkeen yli puolet kaloista (60 %) oli jo mennyt alas voimalaitoksesta, ja jäljellä olevien kalojen liikkeet keskittyivät aiempaakin tiiviimmin välppän eteen. Havaintomäärät vähenivät nopeasti kalojen vähetessä ja niiden pysytellessä tiukasti välppän edessä ja takana, mistä lähetinsignaalit eivät enää tallentuneet täysimääräisesti.

Smoltit laskeutuivat alavirtaan voimalaitoksen läpi keskimäärin 24,1 tunnin kuluttua voimalaitokselle saapumisesta (vaihteluväli: 1,2–131,6 h; Taulukko 3). Kahden vuorokauden jälkeen vielä padon päällä jäljellä olleista kolmesta kalasta saatiin havaintoja lähes ainoastaan välppän kohdalta. Valtaosa (88 %) koko seurannan aikana kertyneistä kalojen käyttäytymisen analysointiin käytetyistä havainnoista (2 643 kpl) tallentui turbiinikanavan välppän edustalle asennetulta antennilta (Antenni 3). Laitoksen kaksi muuta turbiinia eivät olleet käytössä Billnäsin voimalaitoksella tehdyn seurannan aikana.



Kuva 9. Havaintojen kertyminen ja vaihtelu antennien välillä kuuden tunnin jaksoissa ensimmäisen kahden vuorokauden aikana voimalaitokselle saapumisesta (n=1987).

Loput Mustionjoelle istutettavaksi tarkoitetusta istukaserästä vapautettiin jokeen noin vuorokausi lähetikalojen vapautuksen jälkeen samassa paikassa. Myös nämä verkkokassissa olleet noin 8 000 smoltia haikutuivat nopeasti padolle. Kaloja pakkautui väljän edustalle ja niitä liikuskeloi runsain joukoin roskapuomin molemmin puolin koko padon leveydellä. Seuraavana päivänä smoltit olivat pääosin kadonneet padon päältä alavirtaan ja niitä näkyi enää liikuskelemassa lähinnä voimalaitoksen edustalla turbiinikanavan kohdalla ja väljän edessä.

Kuolleisuus

Yksi kala joutui petokalan syömäksi jo vapautuspaikalla, toinen syötiin myöhemmin voimalaitoksen edustalla. Lisäksi aiemmin mainituista ohijuoksutuksen yhteydessä Peltokoskelta lähteneistä kaloista toinen tuli syödyksi Billnäsin patoaltaalla. Patoallaskuolleisuus oli näin ollen noin 10 %.

Voimalaitoksen läpi laskeutui 26 yksilöä, joista 12 jäi voimalaitoksen alapuolelle (0–200 m). Näistä vähintään kolme menehtyi heti voimalaitoksessa, neljä läpiuinnin ja/tai predaation seurauksena. Viidestä kalasta ei saatu havaintoja myöhemmin, vaikka väli Billnäs–Åminnefors haravoitiin antennin ja vastaanottimen avulla soutuveneellä edeten ja voimalaitoksen alapuolella tehtiin useita käsipaikannuskertoja. Tämän perusteella kadonneet yksilöt ovat todennäköisesti joutuneet lintujen syömäksi padon alapuolella pian voimalaitoksen läpimenon jälkeen. Billnäsin voimalaitoksen alla nähtiin runsaasti kuolleita ja taintuneita smoltteja edellä mainitun istukaserän (8 000 kpl) vapautuksen jälkeen. Näköhavaintojen perusteella ainakin lokit, tiirat ja jopa varikset nappasivat virran mukana ajelehtivia smoltteja padon alapuolella. Rannalta löytyi myöhemmin myös yksi puoliksi syöty smoltti. Billnäsin voimalaitoksen aiheuttaman kuolleisuuden tasoksi määrittyi näin ollen noin 46 %.

Neljätoista kalaa jatkoi matkaansa Billnäsiä eteenpäin. Näistä yksi joutui todennäköisesti petokalan syömäksi 1,7 kilometrin päässä padolta. Kuolleisuus Billnäsin alapuolisella jokiosuudella oli noin 7 %. Kolmetoista kalaa jatkoi matkaansa Åminneforsin voimalaitokselle saakka, minne ne saapuivat keskimäärin 18,8 tuntia myöhemmin (vaihteluväli: 3,4–54,6 h). Uintinopeus vaihteli välillä 0,06–1 km/h.

Billnäsin voimalaitoksen patoallas, voimalaitos ja alapuolinen jokiosuus aiheuttivat yhteensä noin 55 %:n vaellustappiot.

3.4 Åminnefors

Kalojen käyttäytyminen padolla

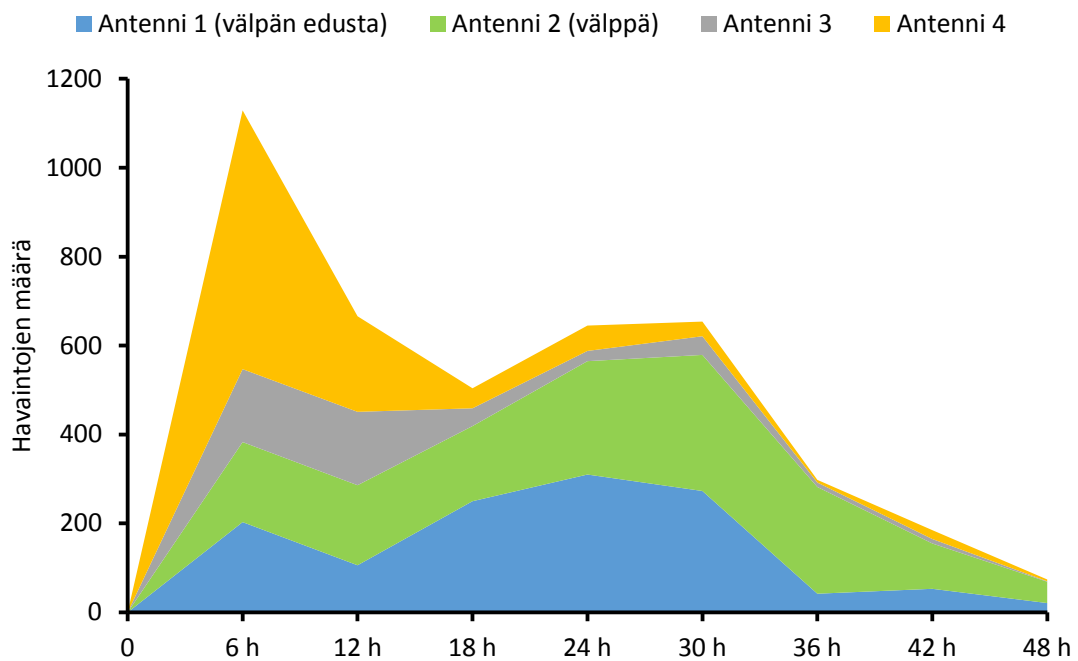
Åminneforsin lähetinkalaerä vapautettiin 450 metriä padon yläpuolella. Vapautuserän kalat saapuivat padolle keskimäärin 5,8 tuntia vapautuksen jälkeen (vaihteluväli: 2,1–7,3 h). Lähes kaikki kalat (92 %) kuitenkin pysähtyivät voimalaitoksen yläpuolisen maantiesillan yläpuolella keskimäärin 2,3 tunnin ajaksi ennen kuin ne siirtyivät voimalaitoskanavaan padon edustalle (Kuva 10). Smoltit liikkuivat hyvin lähellä pintaa ja niitä voitiin tarkkailla käsivastaanottimella tehtyjen paikannusten lisäksi maantiesillalta ja voimalaitospadon päältä.



Kuva 10. Åminneforsin voimalaitospadolle asennettujen antennien sijoittuminen ja niiden arvioitut pääasialliset kattavuusalueet. Lisäksi karttaan on merkitty alue, jossa lähes kaikki padolle saapuvista kaloista pysähtyivät ennen voimalaitokselle saapumista (vaakaviivoitettu alue) (sisältää Maanmittauslaitoksen Ilmakuvatietokannan 06/2017 aineistoa).

Valtaosa (89 %) Åminneforsin padolle saapuneista smolteista lähestyi voimalaitospatoa ylävirran suunnasta katsottuna kanavan oikeaa laitaa pitkin. Kaloista tallentuneet havainnot keskittyivät aluksi patoaltaan oikealle laidalle ja ensimmäisen kuuden tunnin aikana 52 % havainnoista tuli Antennin 4 kohdalta ohijuokutusluukun edustalta (Kuva 10, Kuva 11). Tämän jälkeen kalat alkoivat liikkua laajemmalla alueella ja havaintoja alkoi kertyä enemmän myös altaan vasemmalta laidalta turbiinikanavan edustalta. Ajanjaksolla 6–12 h havaintoja kertyi melko tasaisesti joka puolelta padon edustalla, ja ajanjaksolla 12–18 h kalojen liikkeet painoutuivat jo selvästi välpän edustalle (antennit 1 ja 2). Tässä vaiheessa yli puolet kaloista oli jo mennyt alas voimalaitoksesta ja jäljellä olevat kalat liikkuivat yhä selvemmin välpän edustalla ja myöhemmin lähes yksinomaan välpän kohdalla. Kahden vuorokauden jälkeen padon päällä oli jäljellä enää kaksi yksilöä, ja niistä tallentuneet havainnot olivat lähes kokonaan (90 %) peräisin välpän kohdalta (Antenni 1: 24,5 % ja Antenni 2: 65,5 %). Joidenkin yksilöiden havaittiin myös välillä poistuvan voimalaitoksesta muutamaksi tunniksi maantiesillan yläpuolelle.

Åminnefors



Kuva 11. Havaintojen kertyminen ja vaihtelu antennien välillä kuuden tunnin jaksoissa ensimmäisen kahden vuorokauden aikana voimalaitokselle saapumisesta (n=4155).

Yksi Åminneforsin vapautuserän kala ja kaksi Billnäsistä padolta tullutta kalaa käyttäytyivät padon edustalla muista poikkeavalla tavalla. Ne tulivat ensin suoraan turbiinikanavan välpän edustalle. Nämä Billnäsistä tulleet kalat laskeutuivat alavirtaan Åminneforsin voimalaitoksen läpi keskimääräistä nopeammin, kun taas Åminneforsin vapautuserän kala viipyi padolla pitempään kuin muut.

Kuolleisuus

Padon päällä joutui predaation kohteeksi kolme Billnäsistä tullutta kalaa, joten patoallaskuolleisuus Åminneforsin padolla oli noin 8 %. Voimalaitoksen läpi laskeutui kaikkiaan 35 smolttia. Ne kalat, joista on olemassa tarkkaa seurantatietoa padon päältä (27 yksilöä), menivät laitoksen läpi keskimäärin 22,6 tuntia padolle saapumisen jälkeen (vaihteluväli: 0,2–122,5 h; Taulukko 3). Voimalaitoksen alapuolelle jäi kaksi kalaa. Näistä toinen kuoli välittömästi voimalaitoksen läpiuinnin seurauksena, ja toinen läpiuinnin ja/tai predaation seurauksena 150 metrin päässä voimalaitokselta. Voimalaitoskuolleisuus oli näin ollen noin 6 %.

Kolme petokalan syömää smolttia paikannettiin voimalaitoksen alapuoliselta jokiosuudelta (ks. Kuva 14). Näistä syödyistä kaloista yksi paikannettiin jokisuulla 6,6 tuntia voimalaitoksen läpimenon jälkeen. Lisäksi yksi liikkeellä ollut smoltti paikannettiin lähellä jokisuuta yhden tunnin kuluttua voimalaitoksen läpimenon jälkeen (uintinopeus 1,4 km/h). Kuolleisuus tällä 1,7 km:n mittaisella jokiosuudella Åminneforsin voimalaitoksen alapuolella oli noin 9 %.

Åminneforsin voimalaitoksen patoallas, voimalaitos ja alapuolinen jokiosuus aiheuttivat yhteensä noin 21 %:n vaellustappiot.

3.5 Voimalaitosten ja jokiosuuksien välinen tarkastelu

Kuolleisuus

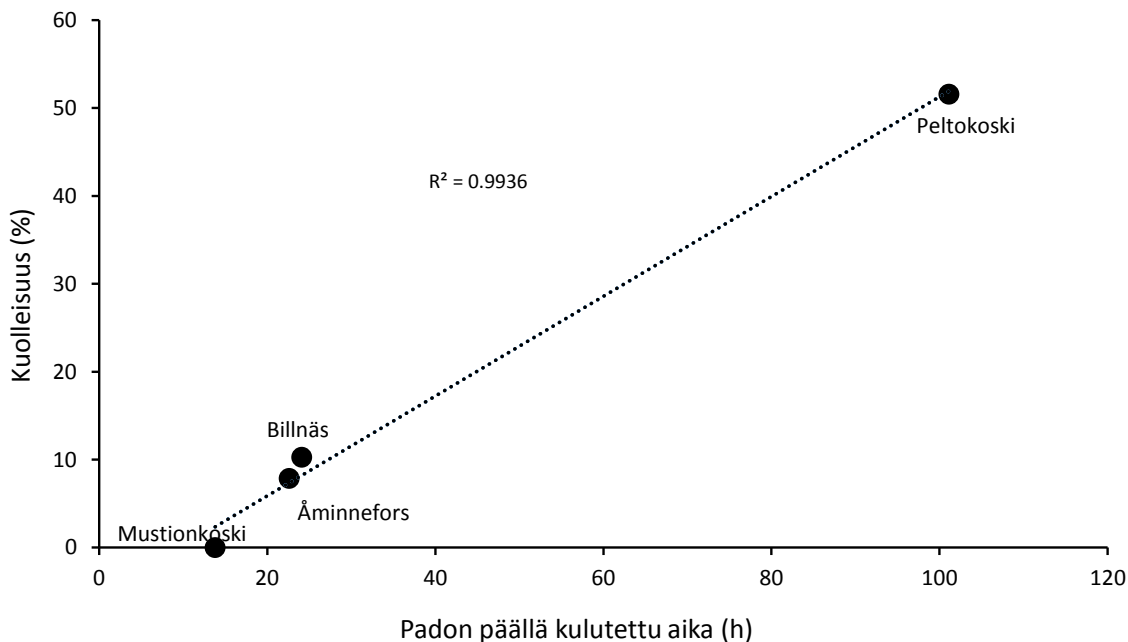
Vaelluspoikasten kuolleisuus oli Peltokosken patoaltaalla selvästi suurempaa kuin muilla voimalaitoksilla. Tämä oli suurella todennäköisyydellä seurausta pitkästä viipymisestä padon päällä. Viimeiset kalat tulivat alas Peltokosken voimalaitoksesta vasta kahden viikon kuluttua ja silloinkin voimalaitoksen huoltotöiden yhteydessä avattujen ohijuokutusluukkujen kautta. Vaelluspoikaset käyttivät Peltokosken päällä huomatta-

vasti enemmän aikaa ennen alasmenoa kuin muilla laitoksilla (Taulukko 3). Tämä ero oli myös tilastollisesti erittäin merkitsevä (Kruskall-Wallis; $H=23,2$; $P=0,000$). Padon päällä kulutettu aika oli selvästi lyhin Mustionkoskella, jossa vastaavasti kaikki yksilöt välttyivät predaatiolta.

Taulukko 3. Radiolähettimellä varustettujen vaelluspoikasten padon yläpuolella viettämä aika ennen laskeutumista alavirtaan padon alapuolelle.

Voimalaitos	Kalojen määrä	Aika padon yläpuolella (h)				
		Keskiarvo	Mediaani	Minimi	Maksimi	Keskihajonta
Mustionkoski	25	13,8	1,7	0,5	54,9	20,5
Peltokoski	14	101,1	61,3	1,4	333,7	108,5
Billnäs	25	24,1	12,0	1,2	131,6	34,5
Åminnefors	27	22,6	11,4	0,2	122,5	24,9

Padon päällä kulutetun ajan ja kuolleisuuden määrän välinen suhde näyttäisi ilmeiseltä myös muiden voimalaitosten osalta (Kuva 12). Mitä enemmän aikaa kuluu voimalaitoksesta läpi pääsemiseen, sitä suuremmalla todennäköisyydellä smoltti tulee syödyksi patoaltaassa voimalaitoksen yläpuolella.



Kuva 12. Vaelluspoikasten padon päällä kuluttama aika (ka.) ennen laskeutumista alavirtaan ja vastaava kuolleisuus voimalaitoksen yläpuolisessa patoaltaassa.

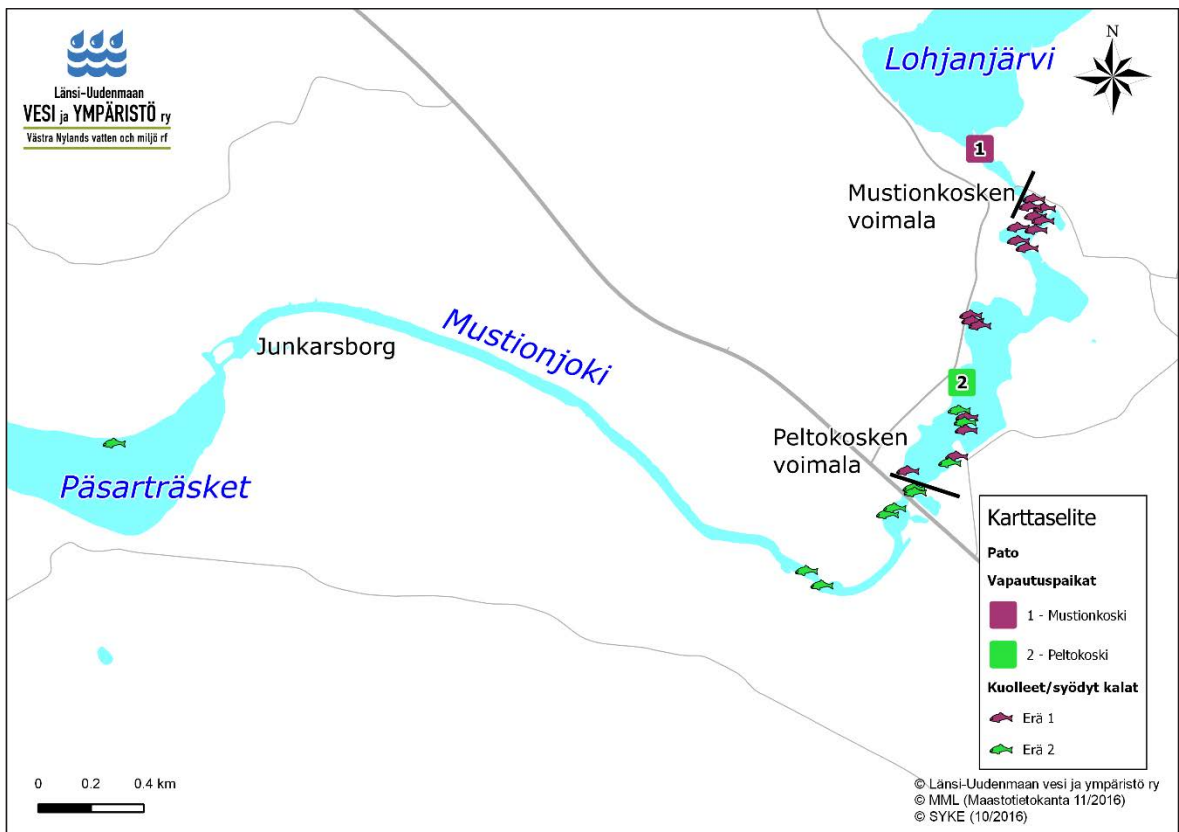
Peltokosken voimalaitos osoittautui suurimmaksi kuolleisuuden aiheuttajaksi kaikilla tavoilla tarkasteltuna (Taulukko 4). Poikkeuksellisen suuren patoallaskuolevuuden lisäksi myös voimalaitoksen turbiinikuolleisuus oli korkea. Tämän lisäksi kuolleisuus oli suurta myös alapuolisella jokiosuudella, mikä ei ole yllättävää huomioon ottaen ko. jokiosuuden pituuden (yli 19 km) ja matkalla olevat kaksi ruovikkoista järvilaajentumaa (Kuva 2).

Taulukko 4. Lähetinkalojen lukumäärät, kuolleiden kalojen lukumäärät (pieni fontti) ja vastaavat kuolleisuudet prosentteina (**lihavoitu**) Mustionjoen voimalaitoksilla eri osatekijöihin ryhmiteltynä.

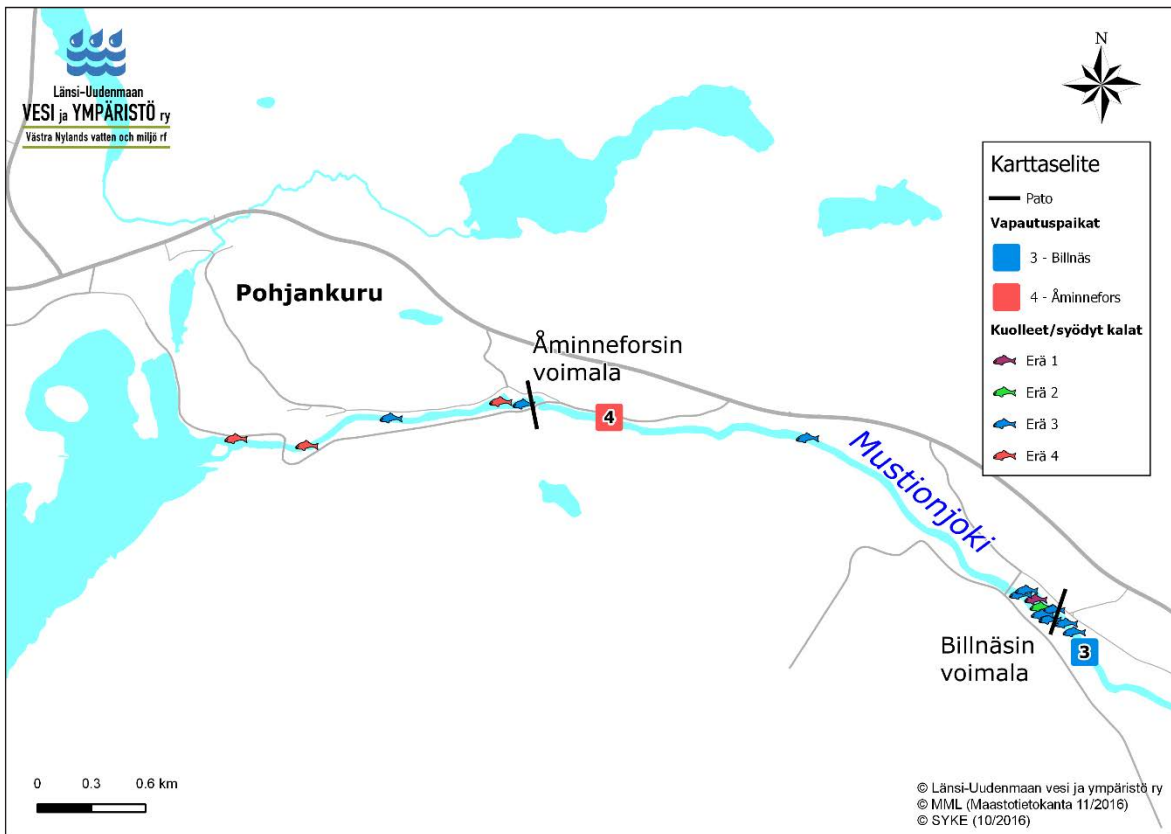
Lähetinkalojen määrä	Yläpuolinen patoallas (predaatio)	Voimalaitos (turbiini + välitön predaatio)	Alapuolinen jokiosuus seuraavalle kohteelle (predaatio)	Patokuolleisuus (patoallas + voimala)	Kokonaiskuolleisuus (pato + voimala + jokiosuus)
Mustionkoski					
25	0	13	5	13	18
	0	52,0	41,7	52,0	72,0
Peltokoski					
31	16	8	3	24	27
(24* + 7)	51,6	53,3	42,9	77,4	87,1
Billnäs					
29	3	12	1	15	16
(25 + 4)	10,3	46,2	7,1	51,7	55,2
Äminnefors					
38	3	2	3	5	8
(25 + 13)	7,9	5,7	9,1	13,2	21,1

* Peltokosken vapautuserästä yhden kalan lähetin oli lakannut toimimasta ennen vapautushetkeä. Ko. yksilö on jätetty pois kaikista laskelmista.

Jokiosuuden merkitys kuolleisuuden aiheuttajana oli hyvin korkea myös Mustionkosken ja Peltokosken välisellä jokiosuudella lyhyestä välimatkasta huolimatta (noin 1,4 km). Tällä hitaasti virtaavalla jokiosuudella monet vaelluspoikaset tulivat petokalan syömäksi Peltokosken patoaltaan yläpuolella ennen voimalaitokselle saapumista (Kuva 13). Joen alaosan jokiosuuksilla predaation aiheuttama kuolleisuus oli selvästi vähäisempää (Taulukko 3, Kuva 14).



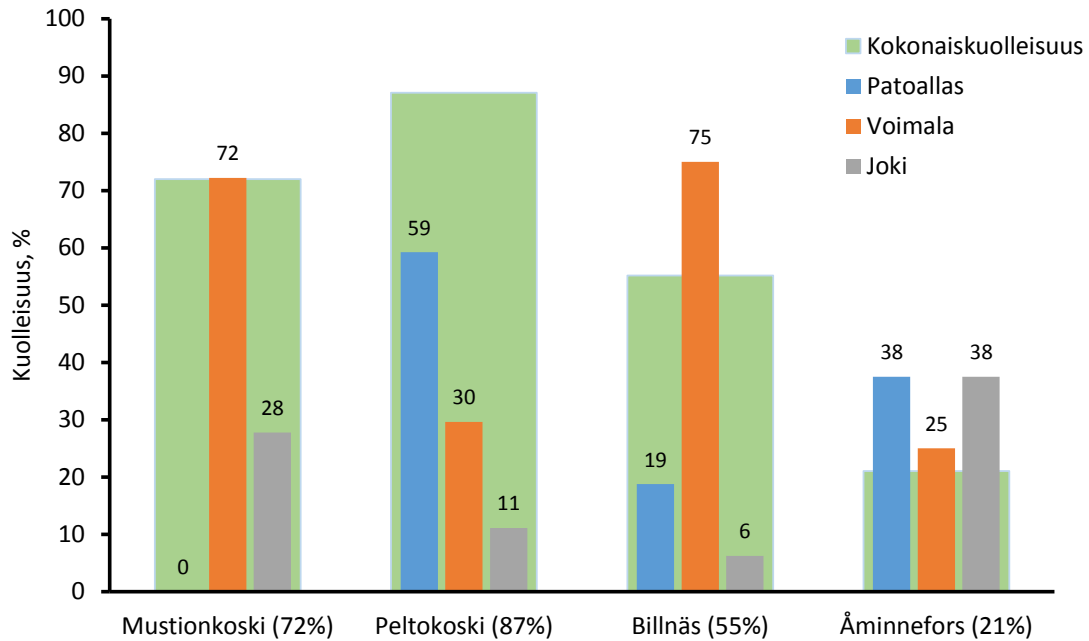
Kuva 13. Mustionjoen yläosa ja alueelta paikannetut kuolleet/syödyt lähetinkalat.



Kuva 14. Mustionjoen alaosaa ja alueelta paikannetut kuolleet/syödyt lähetinkalat.

Voimalaitoskuolleisuus (turbiini + välitön predaatio) oli suurta kaikilla voimalaitoksilla paitsi Åminneforsissa, jossa kuolleisuudet jäivät verrattain alhaisiksi muidenkin osatekijöiden kohdalla (Taulukko 4). Kokonaiskuolleisuus olikin Åminneforsissa selvästi pienempi kuin muilla voimalaitoksilla.

Voimalaitoskuolleisuuden merkitys tulee esille erityisesti Mustionkosken ja Billnäsin kohdalla, kun tarkastellaan eri osatekijöiden osuutta laitoskohtaisesta kokonaiskuolleisuudesta (Kuva 15). Näillä laitoksilla onkin kalojen kannalta hankalimmat turbiinityypit (Mustionkoski: potkuriturbiini; Billnäs: Francis-turbiini). Vaikka Peltokoskella on oletetusti vähemmän kuolleisuutta aiheuttava Kaplan-turbiini, niin laitoksen suuri putouskorkeus saattoi lisätä kuolevuutta. Voimalaitoskuolleisuus (turbiini + välitön predaatio) olikin kaikista neljästä voimalaitoksesta korkein Peltokoskella (Taulukko 4), vaikka Peltokosken voimalaitoskuolleisuutta alensikin osaltaan kaksi ohijuokutusluukkujen kautta laskeutunutta kalaa. Turbiinin merkitys kuolleisuuden aiheuttajana oli kuitenkin selvintä Mustionkoskella, missä kaloja havaittiin kuolleina heti voimalaitoksen alla enemmän kuin muilla laitoksilla. Patoaltaan osuus kuolleisuuden aiheuttajana nousi laitoskohtaisesti suurimmaksi Peltokoskella, jossa se oli myös selvästi suurempi kuin muilla laitoksilla (Kuva 15; Taulukko 4).



Kuva 15. Laitoskohtainen kokonaiskuolleisuus (%) ja eri osatekijöiden osuudet kokonaiskuolleisuudesta prosentteina.

Käyttäytyminen patojen päällä

Vaelluspoikaset etenivät vapautuspaikalta voimalaitospadolle yleensä melko nopeasti ja suoraviivaisesti. Padolle saavuttiin voimalaitokselle johtavaa päävirtausta seuraten ja padon edustalla kalat liikkui aivan pinnan tuntumassa. Kalat hakeutuivat pääsääntöisesti suoraan voimalaitoksen turbiinikanavaan johtavan virtauksen kohdalle tuloputken väljän edustalle. Pääosa kaikista lähetinkaloista saaduista havainnoista tallentui voimalaitoksen turbiinikanavan suulta. Smolttien liikehdintä keskittyi väljän edustalle etenkin ensimmäisten tuntien aikana voimalaitokselle saapumisen jälkeen. Peltokoskella kalojen liikkeet ulottuivat myöhemmin laajemmalle alueelle padon edustalla ja patoaltaalla, kun taas Billnäsin voimalaitoksella liikehdintä muualla kuin väljän edustalla oli varsin vähäistä koko seurannan aikana.

Smolttien saapuminen Åminneforsin padolle ja niiden käyttäytyminen voimalaitoksella poikkesi kuitenkin muista laitoksista. Padolle saapuvat kalat pysähtyivät ensin tuntien ajaksi joen yli johtavan maantiesillan yläpuolella noin 60 metrin päässä voimalaitokselta, paikassa jossa vanha jokiuoma on suljettu ja padottu, ja joki käännetty kulkemaan kohti voimalaitospatoa (Kuva 10). Maantiesillan alapuolella joen päävirtaus kulkee kohti voimalaitosta ylävirran suunnasta katsottuna uoman oikeaa laitaa myötäillen, ja padon edustalla virtaus kääntyy kulkemaan oikealta vasemmalle kohti turbiinikanavaa. Voimalaitokselle saavuttaessa päävirtausta seuraavat smoltit päätyivät ensin padon oikealle laidalle ohijouksutuskanavan edustalle, ja ne alkoivat hakeutua turbiinikanavan suulle vasta useita tunteja myöhemmin.

Kaikilla voimalaitoksilla smoltit uiskentelivat välppäkalterin läpi johtavassa virtauksessa pää ylävirtaan päin usein pitkiäkin aikoja. Välillä ne siirtyivät kauemmaksi välpistä ja liikkui muualla padon edustalla. Kaloilla ei ollut vaikeuksia pysytellä väljän edessä menemättä virtauksen mukana läpi kalterista. Välppäkalterin väleihin ajaututtuaan smoltit kuitenkin tempautuivat virran mukana kalterin lävitse, mutta ainakin Peltokoskella ja Billnäsinissä kalojen havaittiin toisinaan palaavan takaisin kalterin yläpuolelle. Billnäsin voimalaitoksella tehtyjen mittausten perusteella virtausnopeus välpällä oli suurimmillaan noin 0,6 m/s.

Vaellustappiot

Vaellusseurannan tulosten perusteella lasketuilla kuolleisuusarvoilla voidaan arvioida kuinka suuri määrä joen eri osista vaellukselle lähtevistä smolteista selviytyy jokisuulle saakka. Jos esimerkiksi Mustionkosken yläpuolelle vapautetaan 1000 vaelluspoikasta, tämän tutkimuksen tulosten perusteella niistä selviytyy jokisuulle 13 yksilöä (Taulukko 5) ja kokonaisselviytyminen on noin 1,3 %. Vastaavasti esimerkiksi Billnäsin voimalaitoksen yläpuolelle vapautetusta tuhannesta vaelluspoikasesta selviää jokisuulle arviolta 353 kalaa. Peltokosken voimalaitoksen yläpuolelle vapautetusta tuhannesta kalasta selviäisi jokisuulle 46 kalaa, mutta jos kalat vapautetaan heti Peltokosken voimalaitoksen alle, jolloin vältytään Peltokosken patoaltaan ja

voimalan aiheuttamalta kuolleisuudelta (ks. Taulukko 4), on jokisuulle selviytyvien kalojen määrä 202 kappaletta (20,2 %). Mustionjoen vaelluspoikasistukkaat onkin usein vapautettu juuri tälle paikalle Peltokosken voimalaitoksen alapuolelle.

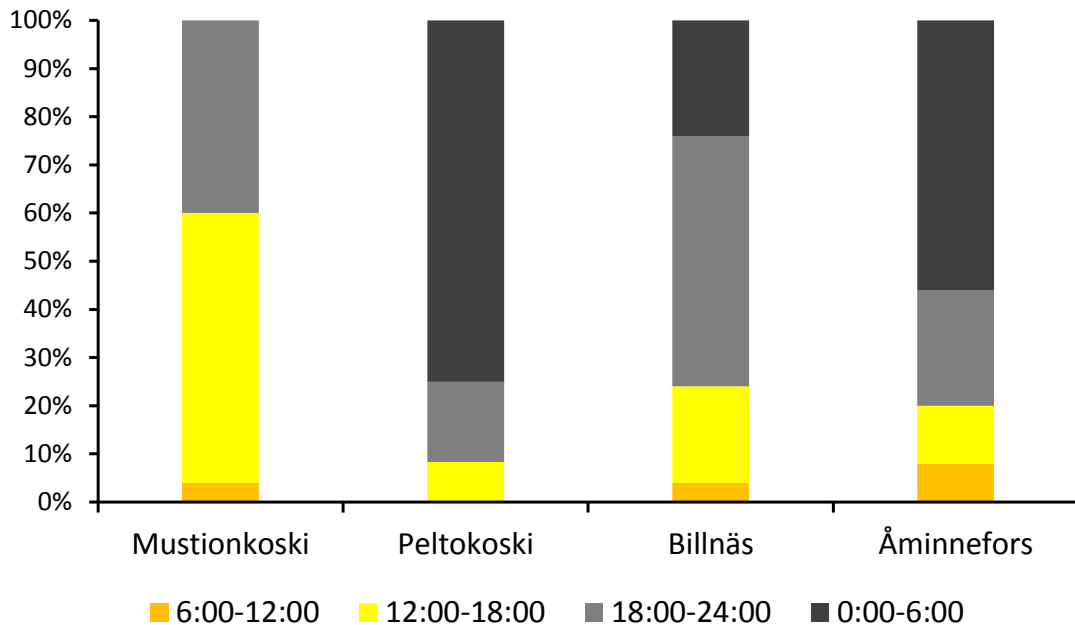
Taulukko 5. Mustionjoen voimalaitosten yläpuolelle vapautetuista tuhannen kalan eristä selviytyvien yksilöiden arvoidut määrät.

Selviytymis-%	Selviytyminen (yksilöä)			
	Mustionkosken päältä	Peltokosken päältä	Billnäsän päältä	Åminneforsin päältä
Mustionkoski 28,0%	1000 280			
Peltokoski 12,9%	36	1000 129		
Billnäs 44,8%	16	58	1000 448	
Åminnefors 78,9%	13	46	353	1000 789

Vaelluspoikasten kuolleisuus predaation seurauksena oli suurimmillaan Mustionkosken ja Peltokosken välisellä jokiosuudella. Etenkin Peltokosken patoaltaan yläpuolella oli kaksi useamman pysähtyneen lähettimen keskittymää (Kuva 13). Lähettimet ovat lakanneet liikkumasta ja jääneet joen pohjalle mahdollisesti petokalan ulostamina. Muilla jokiosuuksilla kuolleisuus oli vähäisempää. Noin 17 % kaikista Mustionjoen vaelluspoikasten kuolemista voidaan tulkita voimalaitosten välillä tapahtuneen luonnollisen predaation aiheuttamaksi. Suurin osa pysähtyneistä lähettimistä paikannettiin kasvillisuuden seasta läheltä rantaa. Osa paikannetuista lähettimistä oli selvästi vielä petokalan sisällä, ja ne lähtivät kovalla vauhdilla liikkeelle veneellä lähestyttäessä.

Voimalaitosten läpäisyajankohdat

Suurin osa (69 %) kaikista lähettimellä varustetuista vaelluspoikasista tuli alas voimalaitoksesta illalla tai yöllä klo 18–06 välisenä aikana (Kuva 16). Mustionkoskella lähettimikalat tulivat alas voimalaitoksesta muita laitoksia nopeammin ja puolet kaloista olikin läpäissyt voimalaitoksen iltapäivän aikana jo muutaman tunnin kuluessa vapautuksesta. Mustionkoskella kaikkiaan 60 % kaloista tuli alas voimalasta aamu- ja iltapäivän aikana. Tämä oli poikkeavaa verrattuna muihin laitoksiin, joissa 76–92 % kaloista meni voimalaitoksen läpi illan ja yön aikana. Aamupäivällä (klo 6–12) alas menneiden kalojen määrä oli hyvin vähäinen kaikilla voimalaitoksilla. Poikkeuksellisesti ohijuoksutuksen yhteydessä Peltokoskesta (aamu) laskeutuneet kaksi yksilöä, joista toinen meni alas ohijuoksutuksen myötä myös Billnäsissä (aamupäivä) sekä Åminneforsissa (aamu), eivät ole mukana tässä tarkastelussa.



Kuva 16. Vaelluspoikasten läpimenoajankohtien jakautuminen eri vuorokaudenjaksoille laitoskohtaisina osuuksina (N=87)

4 Tulosten tarkastelu ja johtopäätökset

Käyttäytyminen

Radiolähettimillä varustetut Mustionjoen voimalaitosten yläpuolelle vapautetut laitosalkuperää olevat lohen vaelluspoikaset aloittivat vaelluksen alavirtaan heti vapautuksen jälkeen. Lohen vaelluspoikasten käyttäytyminen ja vaelluksen alkaminen on riippuvaista niiden smolttiutumisasasteesta (esim. McCormick ym. 1998; Zydlewski ym. 2005). Smolttiutumisen aikana kaloissa tapahtuu fysiologisia muutoksia, jotka valmistavat ne vaellukselle ja siirtymiseen makeasta jokivedestä meriveteen. Jokipoikasesta smolteiksi muuntuneet kalat aloittavat alasvaelluksensa yleensä vasta kun jokiveden lämpötila on noussut riittävän korkeaksi, ja alasvaellus huipentuu tyypillisesti lämpötilan noustua 10 °C:een ja sen yli (mm. Ruggles 1980; Lundqvist ym. 2010). Vastaava lämpötilariippuvuus tulee esille myös jokeen istutetuilla laitoskasvatetuilla smolteilla (esim. Karpinen ym. 2014) ja jopa laitosolosuhteissa (Husko ym. 2016).

Mustionjoelle vapautetut vaelluspoikaset olivat ulkoisen olemuksen ja käyttäytymisen perusteella pitkälle smolttiutuneita, ja veden lämpötila oli jo ensimmäisen erän vapautuksen aikana kohonnut vaellukselle sopivalle tasolle. Smoltit etenivät vapautuspaikalta nopeasti kohti voimalaitosta ja ne saapuivat voimalaitospadolle laitoksen tuloputkelle johtavan päävirtauksen mukana aivan pinnan tuntumassa. Päävirtausta myötäilevä, pinnan läheisyydessä tapahtuva eteneminen on tyypillinen käyttäytymispiirre alasvaelluksella oleville lohenpoikasille (mm. Coutant & Whitney 2000; Svendsen ym. 2007). Mustionjoella smoltit pysähtyivät aluksi turbiinikanavan edustalle ja jäivät uiskentelemaan kanavan väljän kohdalle. Vaelluspoikasten käyttäytyminen Åminneforsin padolla oli tältä osin muista laitoksista poikkeavaa; padolle saapumassa olevat kalat pysähtyivät joen yli johtavan maantiesillan yläpuolella ennen laskeutumistaan voimalaitokselle, missä niiden liikkeet painottuivat aluksi padon oikeassa kulmassa sijaitsevan ohijuoksutuskanavan edustalle. Maantiesillan yläpuolelle pysähtymisen syynä on voinut olla se, että kalat pyrkivät etenemään alavirtaa kohti ensisijaisesti vanhaa joki-uomaa seuraten. Kyseinen uoma toimi voimalaitoksen rakentamisesta alkaen tulvakanavana ja se suljettiin kokonaan 1950-luvulla. Myös maantiesillan varjostava vaikutus on saattanut aiheuttaa epäröintiä ja omalta osaltaan vaikuttaa smolttien käyttäytymiseen. Sillan alituksen jälkeen smoltit hakeutuivat voimalaitoksen edustalla aluksi padon oikeaan laitaan ohijuoksutuskanavan kohdalle. Voimalaitoksen edustalla kelluvan roskapuomin ohjaava vaikutus ei vaikuta todennäköiseltä puomin sijoittumisen, pohjan topografian ja virtausolosuhteiden perusteella. Kalojen uintia ohjasi todennäköisimmin padon oikeaan kulmaan johtava päävirtaus. Sen sijaan roskapuomi saattoi kylläkin hidastaa kalojen hakeutumista padon oikeasta kulmasta turbiinikanavan edustalle. Edellä kuvattu smolttien poikkeuksellinen käyttäytyminen aiheutti useiden tuntien viivästymisen väljälle hakeutumisessa, vaikka kalat laskeutuivat lopulta turbiinikanavaan ja läpi voimalaitok-

sesta verrattain sujuvasti. Muilla laitoksilla smoltit etenivät turbiinikanavan kohdalle päävirtauksen mukana suoraviivaisemmin, ja vaikuttaakin siltä, että vesistörakentamisen seurauksena muuttunut jokiuoma ja jyrkät virransuunnan muutokset sillan kohdalla ja voimalaitoksen edessä aiheuttivat alasvaelluksen viivästymistä Åminneforsin voimalaitoksella.

Smoltit pysähtyvät tyyppillisesti voimalaitokselle tultaessa ja ne pyrkivät jatkamaan vaellustaan kohti alavirtaa päävirtauksen mukana (mm. Coutant & Whitney 2000). Tulokanavan suulla kiihtyvä virtaus ja välppäkalteri aiheuttivat kaloissa epäröintiä ja ne liikkuivat edestakaisin virtauksessa kalterin kohdalla ja sen edessä. Kalojen havaittiin toisinaan menevän myös kalterista läpi ja palaavan hetken päästä takaisin kalterin yläpuolelle ainakin Peltokoskella ja Billnäissä. Alaslaskeutumisen viivästyessä kalat poistuivat voimalaitoksen edustalta hieman kauemmaksi ylävirtaan, palatakseen jälleen turbiinikanavan edustalle myöhemmin. Vastaavanlaista edestakaista liikehdintää, alasvaellusreitit etsimistä, ja vaelluksen viivästymistä voimalaitospadolla on havaittu muissakin tutkimuksissa (mm. Nyqvist ym. 2017). Edellä mainitussa tutkimuksessa todetaan myös, että lisääntynyt virtaama joudutti alavirtaan hakeutumista ja padolta alas laskeutumista. Peltokosken voimalaitoksen virtaama oli seurantajakson aikana keskimääräistä suurempi Peltokosken lähetinkalaerän vapautuspäivänä. Myöhään illalla virtaama kääntyi jyrkkään laskuun ja väheni selvästi yön ajaksi. Virtaaman vähennyttyä suuri osa lähetinkaloista siirtyi parin tunnin ajaksi kauemmaksi padolta. Tämä viittaa siihen, että voimalaitoksen virtaamalla oli mahdollisesti vaikutusta smolttien liikkeisiin Peltokoskella. Toisaalta suurin osa Peltokosken voimalasta alastulleista kaloista läpäisi turbiinin yöaikaan, jolloin voimalaitoksen virtaamat olivat pienempiä kuin päivällä. On myös mahdollista, että smoltit siirtyivät kauemmaksi padosta petokalojen aktiivisuuden lisääntyttyä padon edustalla. Samanlaista kollektiivista käyttäytymistä ei havaittu muilla laitoksilla eikä Peltokoskellakaan enää myöhemmin laitoskohtaisista virtaamavaihteluista huolimatta.

Turbiinitunneliin sukeltaminen näytti epäilyttävän smoltteja etenkin Peltokoskella, jossa smoltit viipyivät patoaltaassa huomattavasti pitempään kuin muilla laitoksilla ennen alaslaskeutumista. Tämä johtuu todennäköisesti Peltokosken voimalaitoksen muihin Mustionjoen laitoksiin verrattuna suuremmasta vedenotto- syvyydestä. Laitoksen tulokanavan yläreuna aukeaa reilun metrin verran pinnan alapuolella, mutta turbiinille menevä virtaus on noin kymmenen metrin syvyydessä. Tyyppillisesti pinnan tuntumassa vaeltaville lohikalojen smolteille syvälle pimeään turbiinikanavaan sukeltaminen on poikkeuksellista käyttäytymistä ja aiheuttaa epäröintiä. Peltokoskella runsas välppä kasaantunut roskien määrä saattoi myös osaltaan vaikeuttaa kalojen hakeutumista välppän lävitse. Smolttien haluttomuudesta uida syvälle turbiinitunneliin kertoo osaltaan myös se, että padolla vielä kahden viikon jälkeen jäljellä olleet yksilöt laskeutuivat nopeasti alas padosta ohijuok- sutusluukkujen kautta noin puoli tuntia luukkujen avaamisen jälkeen. Peltokosken alhaalta ylös aukeavien patoluukkujen alareuna on alle kolmen metrin syvyydessä. Toinen tässä yhteydessä Peltokosken padolta las- keutunut smoltti oli Billnäsin voimalaitospadolle saavuttuaan voimalaitoksen välppän edessä ohijuoksutuksen alkaessa, mistä se siirtyi nopeasti ohijuoksutusluukulle ja meni alas padosta luukun kautta. Myöhemmin se meni alas myös Åminneforsin padosta ohijuoksutuksen yhteydessä noin 15 minuuttia luukkujen avaamisen jälkeen. Myös toinen Billnäsin padolla ohijuoksutuksen yhteydessä ollut yksilö reagoi ohijuoksutukseen siir- tymällä turbiinikanavan välppältä ohijuoksutusluukun edustalle. Se ei kuitenkaan laskeutunut padolta ohi- juoksutuksen yhteydessä, vaan palasi takaisin voimalaitokselle ja jäi turbiinikanavan välppän kohdalle.

Lohen vaelluspoikaset liikkuvat alavirtaa kohti kaikkina vuorokaudenaikoina, mutta vaellus painottuu tyy- pillisesti yöaikaan (mm. Hvidsten ym. 1995; Olsén ym. 2004). Lohikalojen poikaset myös uivat syvemmällä ja menevät suuremmassa määrin ja nopeammin läpi voimalaitoksista yöllä (mm. Johnson ym. 2006; Scru- ton ym. 2007; Li ym. 2015). Myös Mustionjoella lohen vaelluspoikaset laskeutuivat alas voimalaitoksista pääasiassa pimeään vuorokaudenaikaan. Poikkeuksena tästä oli kuitenkin Mustionkoski, jossa suurin osa smolteista läpäisi voimalaitoksen jo muutaman tunnin kuluttua vapautuksesta ennen pimeän tuloa. Toisin kuin muilla Mustionjoen voimalaitoksilla, joissa turbiinikanavan välppäkalteri on useita metrejä tulokanavan etupuolella, Mustionkoskella turbiinien tuloputki alkaa heti välppäkalterin takana. Välppän läpi mentyään ka- lat tempautuvat nopeasti kiihtyvän tuloputken imuvirtauksen mukana turbiinille. Muilla laitoksilla kaloilla on enemmän mahdollisuuksia pysytellä laitoksen tulokanavan yläpäässä ja haeskella alasmenevää. Lisäksi Mustionkosken yläkanavassa kalat ovat kahden betoniseinämän välisessä kapeassa väliköissä, eikä turbiinille johtavan virtauksen lisäksi muita houkuttelevia tekijöitä ole. Nämä seikat todennäköisesti selittävät muita laitoksia nopeamman läpimenon poikkeuksellisesti valoisaan vuorokaudenaikaan Mustionkosken voimalai- toksella.

Kuolleisuus

Lähes kaikki yksilöt selvisivät vapautuspaikalta alapuoliselle voimalaitospadolle. Vain yksi kala tuli syödyksi ennen saapumistaan voimalaitokselle. Padon yläpuolella saaliiksi joutuneet kalat tulivat yleensä syödyksi hieman kauempana padosta kun ne liikkuivat voimalaitoksen edestä takaisin ylävirtaan. Vaelluksen pysähtyminen voimalaitoksen väljän edustalle kalat alkoivat myöhemmin liikkua laajemmalla alueella etenkin Peltokosken patoaltaalla. Viivästymisen seurauksena smolttien kuolleisuus nousi Peltokoskella huomattavan suureksi ja pieni osa kaloista oli edelleen padon päällä kaksi viikkoa vapautuksen jälkeen. Patoaltaan osuus kuolleisuuden aiheuttajana korostuikin erityisesti juuri Peltokoskella ja Äminneforsissa, joissa smolttien liikehdintä patoaltaalla oli laaja-alaisempaa kuin muilla laitoksilla. Petokalojen (pääasiassa hauki) ja lintujen on todettu aiheuttavan huomattavan suurta kuolleisuutta patoaltailla (esim. Jepsen ym. 1998; Aarestrup ym. 1999).

Vaelluksen pysähtyminen voimalaitoksilla aiheuttaa kohonneen predaatoriskin lisäksi energiahukkaa, merivaelluksen aloituksen viivästymistä, vaellusmotivaation heikentymistä, ja lopulta koko vaelluksen peruuntumisen vaellusajanjakson mentyä ohitse ja smolttiutumiseen liittyvien fysiologisten muutosten palautuessa (mm. Ruggles 1980; McCormick ym. 1998).

Voimalaitoksen läpiuinnin seurauksena kaloille aiheutuu muun muassa vedenottokanavan rakenteiden ja turbiinisiipien aiheuttamia mekaanisia vaurioita sekä suurista paineenvaihteluista johtuvia sisäisiä vammoja. Vaurioituneista kaloista osa kuolee välittömästi ja osa kuolee hieman myöhemmin saamiinsa vammoihin yleensä noin vuorokauden kuluessa (mm. Mathur ym. 1996; Dedual 2007). Taintuneet, vaurioituneet ja kuolleet kalat ovat helppoa saalista petokaloille ja linnuille voimalaitoksen alapuolella. Mustionjoella useat lähetinkalat tulivat syödyiksi heti patojen alapuolella ja saalistuksesta saatiin myös suoria näköhavaintoja Mustionkosken ja Billnäsän voimalaitoksilla.

Lohikalojen vaelluspoikasten kuolleisuus voimalaitoksissa vaihtelee suuresti. Vaelluspoikasten kuolleisuuden vaikuttavat hyvin monet tekijät, eikä mikään yksittäinen tekijä selitä suurta vaihtelua (mm. Ruggles 1980; Pracheil ym. 2016). Yleisesti ottaen vaikuttaa siltä, että keskeisin vaihtelun aiheuttaja on voimalaitoksen turbiinityyppi. Suomessakin yleisimmin käytössä olevilla turbiinityypeillä ovat eri maissa tehdyissä tutkimuksissa arvioidut lohikalojen vaelluspoikasten kuolleisuusmäärät vaihdelleet Francis-turbiineilla välillä 0–100 % ja Kaplan-turbiineilla välillä 1–46 % (Ruggles 1980; Larinier 2008). Vaelluspoikasten kuolleisuus on ollut suurempaa ja vaihtelevampaa Francis-turbiineissa, ja joissakin laajoihin tutkimusaineistoihin perustuvissa selvityksissä on saatu keskimääräiseksi kuolleisuusarvoksi Francis-turbiineille 27–30 % ja Kaplan-turbiineille 9–14 % (Ruggles 1980; Pracheil ym. 2016). Francis-turbiineissa havaittuihin suurempiin kuolleisuustasoihin vaikuttavat muun muassa niiden erilainen rakenne, suurempi pyörintänopeus ja suurempi juoksupyörän siipien määrä (mm. Cook et al. 1997; Ferguson ym. 2008). Francis-turbiineja käytetään tyypillisesti korkeammilla padoilla kuin Kaplan-turbiineja, ja osittain Francis-turbiinien aiheuttama keskimäärin suurempi kuolleisuus on seurausta suurempaan putouskorkeuteen liittyvistä voimalaitoksen ja turbiinin rakenteellisista eroista sekä suuremmasta pyörintänopeudesta (mm. Ruggles 1980; Eicher ym. 1987).

Turbiinkanavan suuret paineenvaihtelut ja virtausnopeudet aiheuttavat kohonnutta kuolleisuutta (mm. EPRI 2011). Turbiinkanavan paineenvaihtelut ja virtausnopeudet ovat osittain riippuvaisia muun muassa putouskorkeudesta, mutta vastoin yleistä oletusta putouskorkeuden ja kuolleisuuden välinen riippuvuus näyttäisi olevan kuitenkin varsin vähäistä ainakin Kaplan-turbiineilla (Ruggles 1980; Eicher ym. 1987). Sen sijaan Francis-turbiineilla putouskorkeuden ja pyörintänopeuden välillä on selvä positiivinen korrelaatio, ja pyörintänopeuden kasvaessa lisääntyy myös kalojen kuolleisuus. Vastaavanlaista yhteyttä ei näyttäisi olevan Kaplan-turbiineilla (Eicher ym. 1987).

Paineenvaihteluista aiheutuvia vammoja ilmenee harvemmin matalilla laitoksilla, joiden putouskorkeus on vähemmän kuin 18–20 metriä (Larinier & Dartiguelongue 1989; Franke ym. 1997). Matalilla voimalaitoksilla todennäköisimpänä kuolleisuuden aiheuttajana ovat törmäyksistä johtuvat mekaaniset vauriot ja etenkin turbiinisiipien aiheuttamat iskut (mm. Turnpenny 1998; Dedual 2007; Ferguson ym. 2008). Pienillä padoilla on yleensä myös pienemmät ja ahtaammat turbiinit, ja suurinta kuolleisuutta näyttävätkin aiheuttavan laitokset, joissa on pienikokoiset ja suurella nopeudella pyörivät turbiinit (Montén 1985; Larinier & Dartiguelongue 1989; Larinier 2008; Ferguson ym. 2008).

Mustionkosken potkuriturbiineja vastaavien turbiinien aiheuttamasta kuolleisuuden tasosta ei ole saatavissa tutkittua tietoa, mutta Mustionkosken turbiinikuolleisuus (52 %) oli kuitenkin samalla tasolla kuin esimerkiksi

joissakin Francis-turbiineissa tehdyissä tutkimuksissa. Esimerkiksi Ruotsissa Testeboån-joella Mustionjoen vaellustutkimusta vastaavissa olosuhteissa (virtaama, lämpötila, leveyspiiri) ja vastaavilla kaloilla (lohen laitospoikaset, kalojen koko) tehdyssä lähetinseurannassa (Serrano ym. 2009) oli Francis-turbiinin aiheuttama kuolleisuus jopa suurempaa (60–75 %) kuin Mustionkosken potkuriturbiinilla. Mustionkosken turbiinikuolleisuutta lisäsi oletettavasti korkea pyörintänopeus ja turbiinin pieni koko (läpimitta noin 1 m).

Billnäsin voimalaitoksella havaittu kuolleisuuden määrä (46 %) oli korkea, mutta ei kuitenkaan poikkeavan suuri Francis-turbiinille. Edellä mainitun Testeboån-joen esimerkin lisäksi Ruotsin Emån-joella taimensmolteilla tehdyssä tutkimuksessa kuolleisuus Francis-turbiinissa oli 33–38 % (Calles & Greenberg 2009). Näissä molemmissa edellä mainituissa ruotsalaisissa esimerkkivoimaloissa oli hieman suurempi putouskorkeus (9–11 m) kuin Billnäsisä (7 m). Ruotsista löytyy toisaalta esimerkki myös hyvin alhaisesta kuolleisuudesta Francis-turbiinilla: Sävarån-joen voimalaitoksella (putouskorkeus 6 m) radiolähettimellä varustettujen lohismolttien kuolleisuus oli 0 % (Palm ym. 2009).

Peltokosken Kaplan-turbiinin aiheuttama kuolleisuus (53 %) vaikuttaa tavanomaista suuremmalta verrattuna muualla tehtyihin tutkimuksiin, joissa kuolleisuus Kaplan-turbiineissa on yleensä ollut alle 20 %:n luokkaa. Peltokosken kuolleisuusarvioon sisältyy kuitenkin jossakin määrin epävarmuutta pienen yksilömäärän ja Peltokosken alapuolisen jokiosuuden laajuuden takia. Peltokosken turbiinissa voitiin todeta kuolleen välittömästi neljä yksilöä, kun neljän muun yksilön osalta kuolleisuuden syynä voi olla myös predaatio voimalaitoksen alapuolisella jokiosuudella. Näin ollen Peltokosken turbiinin aiheuttama kuolleisuus on voinut olla arvioitua vähäisempää, mutta se oli kuitenkin vähintään 26 %. Toisaalta Peltokosken voimalaitoksen huollon yhteydessä ohijuoksutuskanavasta alas tulleet kaksi yksilöä alentavat Peltokosken kuolleisuusarviota. Åbyälven-joella Ruotsissa hieman suuremman putouskorkeuden (16 m) omaavalla Hednäsin voimalaitoksella tehdyssä lohen vaelluspoikasten lähetinseurannassa oli välitön kuolleisuus Kaplan-turbiinilla 35 % (Gustafsson 2010). Åminneforsin voimalaitoksella kuolleisuus (6 %) oli Kaplan-turbiineille tyyppillisesti varsin alhainen. Mahdollisia syitä Åminneforsin ja Peltokosken väliselle erolle vaelluspoikasten kuolleisuudessa ovat Peltokosken voimalaitoksen suurempi putouskorkeus (suuremmat virtausnopeudet), suurempi pyörintänopeus (T. Juvani, suullinen tiedonanto) ja voimalaitosten väliset muut rakenteelliset erot.

Voimalaitoksilta vaellusta jatkaneiden yksilöiden kuolleisuus oli suurta voimalaitosten alapuolisella jokiosuudella Mustionkoskella (42 %) ja Peltokoskella (43 %). Mustionkosken vapautuserän suuri kuolleisuus matkalla Peltokoskelle oli pääasiassa seurausta petokalojen saalistuksesta Peltokosken patoaltaalla, jossa muun muassa kolme Mustionkosken vapautuserän kalaa joutui oletettavasti yhden ja saman petokalan saaliiksi patoaltaan yläosalla (Kuva 13). Peltokosken voimalaitoksen alapuolisen jokiosuuden suuri kuolleisuusarvo selittyy pitkällä vaellusmatkalla (19 km). Kuten edellä on mainittu, Peltokosken voimalaitoksen kuolleisuuden arviointiin liittyy epävarmuustekijöitä turbiinikuolleisuuden ja predaation välisiin osuuksiin liittyen. Siksi kuolleisuus Peltokosken alapuolisella jokiosuudella on voinut olla tässä arvioitua suurempaa ja turbiinikuolleisuus vastaavasti vähäisempää. Sama pätee vähäisemmässä määrin kuolleisuusarvioihin myös muilla Mustionjoen voimalaitoksilla. Muilla laitoksilla laitoksen läpi menneiden yksilöiden lukumäärä oli kuitenkin suurempi ja alapuolisen jokiosuuden hallittavuus lähettimien paikantamisen suhteen olennaisesti parempi, ja siten arviotkin ovat huomattavasti täsmällisempiä.

Mustionkosken alapuolinen kuolleisuus oli vaellusmatkaan suhteutettuna huomattavan korkea, noin 30 % jokikilometriä kohden. Peltokosken, Billnäsin ja Åminneforsin alapuolisten jokiosuuksien vastaavat luvut olivat alhaiset, 2 %, 2 % ja 5 %. Alemmat luvut vastaavat hyvin muissa tutkimuksissa havaittuja kuolleisuusmääriä, joissa jokivaiheen luontainen, pääosin predaation aiheuttama vaelluskuolleisuus on ollut keskimäärin noin 2 % /km (Thorstad ym. 2012). Oulujoella tehdyssä laitossmolttien seurantatutkimuksessa vaelluskuolleisuus vaihteli välillä 1–3 % /km (Karppinen ym. 2014).

Seurannan epävarmuustekijät ja virhelähteet

Vatsaonteloon kirurgisesti asennetun lähettimen vaikutusta lohikalojen poikasiin on selvitetty lukuisissa tutkimuksissa. Tutkimuksissa on tarkasteltu sisäisen lähetinmerkinnän vaikutuksia muun muassa selviytymiseen, uintisuoritukseen, kasvuun, vaellukseen ja kykyyn vältellä petoja (ks. Jepsen ym. 2002; Bridger & Booth 2003). Joissakin tutkimuksissa on havaittu vähäisiä vaikutuksia joihinkin edellä mainittuihin seikkoihin, mutta vielä useammin on uusimmissa tutkimuksissa päädytty siihen, että sisäisellä lähettimellä ei ole osoitettavissa merkittäviä vaikutuksia kaloihin (esim. Brown ym. 2006; Newton ym. 2016). Vatsaonteloon asennettava lähetin on joka tapauksessa muihin yleisesti käytettyihin lähetinmerkintätapoihin verrattuna vähiten haitallinen kaloille etenkin pitkäkestoisissa (yli 20 päivää) seurannoissa (Bridger & Booth 2003).

Luonnossa syntyneiden ja laitosalkuperää olevien lohismolttien välillä ei näyttäisi olevan eroja vaellusnopeudessa, selviytymisessä, eikä käyttäytymisessä jokivaelluksella tai voimalaitospadoilla (mm. Stich ym. 2015; Nyqvist ym. 2017). Sisäisellä lähettimellä kirurgisesti merkittyjen (viilto ja 1–2 ommelta vatsassa) ja huomattavasti pienemmällä PIT-merkillä merkittyjen (asennus vatsaonteloon injektioneulalla tai pienen viillon kautta) vaelluspoikasten välillä ei niin ikään ole havaittu eroa selviytymisessä kahdessa suuressa pohjois-amerikkalaisessa jokisysteemissä, joista toisessa smoltit joutuvat uimaan useiden voimalaitosten läpi päästäkseen jokisuulle (Welch ym. 2008). Edellä mainitut tutkimukset (Welch ym. 2008; Stich ym. 2015) perustuvat useiden vuosien mittaisiin laajoihin merkintä- ja seuranta-aineistoihin.

Sisäisellä lähettimellä merkittyjen ja merkitsemättömien lohenpoikasten välillä ei myöskään havaittu kuolleisuuseroja koejärjestelyssä, jossa kalat altistettiin olosuhteille, jotka vastaavat haitallisinta mahdollista paineenvaihtelua Kaplan-turbiinissa 22 metrin putouskorkeudella (Brown ym. 2007).

Lähettimen vaikutusten minimoimiseksi suositellaan mahdollisimman pienen lähettimen käyttöä suhteessa kalan kokoon. Lähettimen painon suositusrajana on usein käytetty 2 %:a kalan painosta (Winter 1996). Tätä suuremmilla lähettimillä on kuitenkin tehty sittemmin kokeita ja onnistuneita tutkimuksia, joiden perusteella kyseinen 2 %:n sääntö vaikuttaa heikosti perustellulta (mm. Brown et al. 2006; Newton ym. 2016). Suurempi lähettimen koko voi kuitenkin lisätä turbiinikuolleisuutta ja siksi mahdollisimman pieni lähetin on edelleen suositeltava etenkin voimalaitoksilla tapahtuvissa tutkimuksissa (Carlson ym. 2012). Sisäisen lähettimen kuolleisuutta lisäävät vaikutukset liittyvät erityisesti suuriin paineenvaihteluihin turbiinin läpiuinnin aikana. Mustionjoen voimalaitoksilla paineenvaihtelut ovat kuitenkin oletettavasti verrattain vähäisiä pienestä putouskorkeudesta johtuen.

Mustionjoella tehdyssä tutkimuksessa lähettimen paino oli keskimäärin 1,5 % (1,1–2,1 %) kalan painosta. Kalojen annettiin toipua merkinnästä tavanomaista pitempään (3–4 päivää), merkinnän jälkeinen kuolleisuus oli 0 %, ja käytössä oli radiolähetinmalli, jossa ei ollut kalan ulkopuolelle roikkumaan jäävää antennilankaa.

Kaiken tämän edellä kerrotun perusteella on syytä olettaa, että lähetin ei ole vaikuttanut smolttien käyttäytymiseen, ja vaikutus turbiini- tai predaatiokuolleisuuteen on ollut varsin vähäinen tai olematon. Tästä huolimatta lähettimen mahdollisia kuolleisuutta lisääviä vaikutuksia ei voida poissulkea, ja seurannan perusteella arvioituja kuolleisuusmääriä voidaan pitää yliarvioituina. Toisaalta useamman turbiinin läpiuinnin seurauksena mahdollisesti lisääntyvää kuolleisuutta jokivaelluksella (esim. Stich ym. 2015) tai viivästynyttä kuolleisuutta jokisuistossa ja merivaelluksen alkuvaiheessa ei voida tämän seurannan perusteella arvioida.

Kuolleisuuden vähentäminen ja alasvaelluksen järjestämismahdollisuudet

Mustionjoen yläpäästä alasvaellukselle lähtevät vaelluspoikaset joutuvat uimaan neljän voimalaitoksen lävitse päästäkseen jokisuulle. Turbiinien, patoaltaiden ja niiden välisten jokiosuuksien kuolleisuudet kumuloituvat niin, että 26 kilometrin matkasta jokisuulle saakka selviytyy tämän seurannan tulosten perusteella vain 1,3 % kaloista. Voimalaitoksiin liittyvät syyt aiheuttivat suurimman osan kalakuolemista etenkin kolmen ylimmän voimalaitoksen kohdalla.

Mustionjoen voimalaitoksille suunnitellut kalatiet, joista kahden alimmaisen rakentaminen on pian alkamassa, tulevat omalta osaltaan helpottamaan tilannetta jossakin määrin. Alasvaelluksen turvaamiseksi ja riittävän selviytymistason saavuttamiseksi tarvitaan yleensä kuitenkin myös ohjausrakenteita ja erillisiä alasvaellusrakenteita. Mustionjoella on hyvät edellytykset alasvaelluksen järjestämiselle patojen pienimuotoisuuden ja verrattain vähäisen virtaaman ansiosta. Alasvaellusrakenteiden toteuttaminen ja kalojen ohjaaminen oikeisiin paikkoihin on helpompaa, ja kalateihin ja alasvaellusrakenteisiin menevät virtaamat ovat smolteille helpompia löytää. Onnistuneilla alasvaellusratkaisuilla voidaan todennäköisesti vähentää huomattavassa määrin turbiineille menevien kalojen määrää ja nopeuttaa vaelluspoikasten pääsyä padon alapuolelle. Eri-laisten alasvaellusratkaisujen toimivuus on ollut vaihtelevaa ja usein tyydyttävän selviytymistason saavuttamiseksi tarvitaan pitkäaikaista seuranta- ja alasvaellusrakenteiden kehittelyä tapauskohtaisesti. Monilla voimalaitospadoilla on kuitenkin onnistuttu vähentämään smolttikuolleisuutta huomattavasti. Esimerkiksi Columbia-joella on erilaisilla alasvaellusratkaisuilla onnistuttu vähentämään alasvaelluskuolleisuutta jopa niin, että tässä raskaasti rakennetussa jokivesistössä (8 patoa) vaelluspoikasten selviytyminen (25–60 %) on nykyisin samalla tasolla kuin lähialueen vapaana virtaavassa jokivesistössä (Welch ym. 2008).

Alasvaellusrakenteet on suunniteltava tapauskohtaisesti paikalliset virtausolosuhteet ja kalojen käyttäytymisen huomioon ottaen. Toteutettujen ohjausrakenteiden toimivuus on selvitetävä seurannoilla, ja tarvittaessa rakenteisiin tulee tehdä korjauksia ja parannuksia optimaalisen ohjautuvuuden saavuttamiseksi.

Lohismolttien luontaisen vaelluskuolevuuden ollessa noin 2 % jokikilometriä kohti (ks. Thorstad ym. 2012), saattaisi smolttien alusvaelluskuolleisuus luonnontilaisessakin Mustionjoessa olla noin 40 %, ja selviytyminen vastaavasti 60 % Mustionkosken ja jokisuun välillä. Selviytymisen tavoitetason asettaminen näin korkeaksi ei ole realistista rakennetussa Mustionjoessa, ja se edellyttäisikin lähes 100 %:n selviytymistasoa jokaisella neljällä voimalaitoksella.

Vaelluksen viivästyminen merkitys tuli selvästi esille Peltokosken voimalaitoksella, jossa voimalaturbiinien ja padon yhteisvaikutus kuolleisuuden aiheuttajana oli huomattavan suuri (ks. Taulukko 3, patokuolevuus). Jos esimerkiksi pelkää Peltokosken patokuolevuutta onnistuttaisiin vähentämään edes puolella, olisi jokisuulle saakka selviytyvien vaelluspoikasten määrä nelinkertainen (5 %). Jos patokuolevuus saataisiin puolitettua kaikilla Mustionjoen voimalaitoksilla, olisi selviytyminen noin 17 % eli noin kolmetoistakertainen nykytilanteeseen verrattuna. Tällaista tavoitetasoa voidaan pitää varsin maltillisena ja realistisena Mustionjoella, ja parhaimmillaan tämä taso saatetaan jopa ylittää selvästi.

Vaelluskuolleisuutta voimalaitosten välisillä jokiosuuksilla ja patoaltaissa voitaisiin mahdollisesti vähentää käyttämällä niin sanottuja virikekasvatettuja istukkaita, joiden selviytyminen jokivaelluksella on ollut tavanomaisia laitosmolttia parempaa (Hyvärinen & Rodewald 2013). Vaelluspoikasten kuolleisuus Mustionjoella painottuu kuitenkin selvästi voimalaitosten läpiuintiin liittyviin ongelmiin. Virikekasvatettujen smolttien selviytyminen turbiineissa ei oletettavasti ole tavanomaisia laitoskaloja parempi, ja virikekasvatettujen poikasten istutuksilla saavutettava kokonaisuus saattaisi jäädä vähäiseksi. Virikekasvatettujen smolttien oletettu parempi kyky vältellä predaattoreita voisi kuitenkin vähentää kuolleisuutta voimalaitosten välisillä jokiosuuksilla sekä etenkin jokisuulla ja Pohjanpitäjänlahdella, jossa smolttien kuolleisuus ennen merelle pääsyä on todennäköisesti suurta juuri predaation takia (ks. Thorstad ym. 2012).

Mustionkoskella smoltit liikkuvat kapeassa yläkanavassa ja hakeutuvat hyvin kapeaan välikköön turbiinikanavan eteen. Suunnitellun kalatien (yleissuunnitelma, Maveplan Oy) yläpää avautuisi yläkanavaan noin 30 metriä turbiinikanavan välpän yläpuolella. Kohti turbiinikanavaa suuntautuvien smolttien hakeutuminen kalatiehen ei ole itsestään selvää, mutta kalatiehen virtaava vesi muodostaa uuden houkutusmekanismiä tässä muutoin varsin pienimuotoisessa ja teknisessä ympäristössä. Huomioon ottaen seurannan aikana havaitun satunnaisen hakukäyttäytymisen ylempänä voimalaitoksen yläkanavassa, osa smolteista varmasti hakeutuisi virtauksen houkuttelemana kalatiehen. Kalatiehen ohjautumista voitaisiin edelleen parantaa soveliailla ohjauksrakenteilla, ja kalatien käyttäminen alusvaellusreitillä vaikuttaakin mahdolliselta ja todennäköisesti toimivalta vaihtoehdolta Mustionkoskella. Myös ohjuuskusutusluukkujen kohdalta alkava erillinen alusvaelluskouru saattaisi toimia kohtuullisen hyvin, mutta lähempänä turbiinikanavaa avautuva alusvaelluskouru olisi todennäköisesti parempi vaihtoehto. Mustionkosken kalatiesuunnitelmaa voitaisiin myös parantaa pienillä muutoksilla alusvaellukseen liittyvät vaatimukset huomioiden.

Peltokoskelle suunnitellun luonnonmukaisen kalatien (Maveplan Oy, yleissuunnitelma) yläpää tulee sijoittumaan vähintään sadan metrin päähän voimalaitokselta, eikä smolttien ohjaamiselle onnistuneesti kalatiehen ole juurikaan edellytyksiä. Alusvaellusrakenteet tulisikin suunnitella Peltokosken voimalaitoksen yhteyteen.

Billnäsin voimalaitokselle rakennettava kalatie sijoittuu kalojen alusvaellusta ja sen ohjaamista ajatellen varsin optimaaliseen paikkaan. Kalatien yläpää avautuu padon keskelle aivan turbiinikanavan vieressä. Turbiinikanavan eteen on suunniteltu myös alusvaellusta ohjaava rakenne (Kala- ja vesitutkimus Oy; Billnäsin voimalaitoksen rakennuslupahakemus/Raaseporin kaupunki), jolla kalat johdetaan suoraan kalatiehen menevään virtaukseen. Billnäsin padolla tehtyjen käyttäytymishavaintojen perusteella smolttien hakeutuminen ja niiden ohjaaminen kalatiehen tulevat todennäköisesti onnistumaan hyvin.

Äminneforsissa smolttien ohjautuminen padon ylävirran suunnasta katsottuna vasempaan reunaan avautuvaan kalatiehen ei padon edustan virtausolosuhteiden ja smolttien käyttäytymisen perusteella vaikuta kovin todennäköiseltä. Virtausolosuhteiden vuoksi smolttien ohjaamiselle rakenteiden avulla kalatiehen ei myöskään ole edellytyksiä. Äminneforsin patoallas on erittäin pieni, ja kalatiehen menevä virtaus muuttaa tilannetta turbiinikanavan edustalla nykyiseen verrattuna. Smoltit saattavat siten hakeutua myös kalatiehen menevään virtaukseen pienellä viiveellä, mutta nopeamman ja turvallisemman alusvaelluksen takaamiseksi erillinen alusvaellusratkaisu on kuitenkin tarpeellinen. Äminneforsin padolle on ennen tämän smolttiseurannan toteutusta laadittu suunnitelmat useasta vaihtoehdoisesta alusvaellusratkaisusta (Kala- ja vesitutkimus Oy, julkaisematon). Näitä vaihtoehtoja ja mahdollisia uusia ratkaisuja on tarkoitus tarkastella tämän seurannan perusteella saadun käyttäytymistiedon pohjalta perusteellisemmin. Uutena vaihtoehtona tulisi harkita esimerkiksi alusvaelluskourun rakentamista entisen tulvauoman kohdalle.

Seurannasta saatujen havaintojen perusteella ohijuoksutuksista voisi olla smolteille suuri hyöty Mustionjoen voimalaitoksilla. Vaelluskuolleisuuden vähentämiseksi tulisi tarkastella mahdollisuuksia järjestää ylimääräisiä ohijuoksutuksia tai pyrkiä ainakin ajoittamaan mahdolliset voimalaitosten huoltoseisokit smolttien vaellusajanjaksolle.

Rakennettujen kalateiden ja alasvaellusratkaisujen vaikutukset vaelluspoikasten käyttäytymiseen ja selviytymiseen sekä tarvittavat muutos- ja kehittämistarpeet tulee selvittää huolellisesti suunnitelluilla seuranta-tutkimuksilla.

5 Kiitokset

Erityiskiitos kenttätöopulaisena toimineelle Sami Soosalulle (Aalto-yliopisto). Kiitokset myös: Tiina Asp ja Jorma Valjus (Luvy ry) sekä Timo Juvani ja Hannu Ruotsalainen (Koskienergia Oy).

Kirjallisuus

- Aarestrup, K., Jepsen, N., Rasmussen, G. & Økland, F. 1999. Movements of two strains of radio tagged Atlantic salmon, *Salmo salar* L., smolts through a reservoir. *Fisheries Management and Ecology* 6: 97-107.
- Bridger, C. J. & Booth, R. K. 2003. The Effects of Biotelemetry Transmitter Presence and Attachment Procedures on Fish Physiology and Behavior. *Reviews in Fisheries Science* 11(1): 13–34.
- Brown R. S., Geist, D. R., Deters, K. A. & Grassell, A. 2006. Effects of surgically implanted acoustic transmitters >2% of body mass on the swimming performance, survival and growth of juvenile sockeye and Chinook salmon
- Brown, R. S., Carlson T.J., Welch A.E., Stephenson J.R., Abernethy C.S., McKinstry C.A. & Theriault M.H. 2007. Assessment of Barotrauma Resulting from Rapid Decompression of Depth-Acclimated Juvenile Chinook Salmon Bearing Radio Telemetry Transmitters. Report prepared for the U.S. Army Corps of Engineers. Pacific Northwest National Laboratory.
- Calles, O. & Greenberg, L. 2009. Connectivity is a two-way street – the need for a holistic approach to fish passage problems in regulated rivers. *River Res. Appl.* 25(10): 1268–1286.
- Carlson, T. J., Brown, R. S., Stephenson, J. R., Pflugrath, B. D., Colotelo, A. H., Gingerich, A. J. & Piper, L. J. 2012. The influence of tag presence on the mortality of juvenile Chinook salmon exposed to simulated hydroturbine passage: Implications for survival estimates and management of hydroelectric facilities. *N. Am. J. Fish. Manag.* 32:249–261.
- Cook, T. C., Hecker, G. E., Faulkner, H. B. & Jansen, W. 1997. Development of a More Fish-Tolerant Turbine Runner Advanced Hydropower Turbine Project. Prepared for the U.S. Department of Energy. 172 p.
- Coutant, C. C., & Whitney, R. R. 2000. Fish behavior in relation to passage through hydropower turbines: a review. *Trans. Am. Fish. Soc.* 129: 351–380.
- Dedual, M. 2007. Survival of juvenile rainbow trout passing through a Francis turbine. *North American Journal of Fisheries Management* 27: 181–186.
- Eicher, G. J., Bell, M. C., Cambell, C. J., Craven, R. E. & Wert, M. A. 1987. Turbine-related fish mortality: review and evaluation of studies. Final report prepared for Electric Power Research Institute (EPRI). Research Project 2694-4. 89 p.
- EPRI 2011. Fish Passage Through Turbines: Applicability of Conventional Hydropower Data to Hydrokinetic Technologies. EPRI, Palo Alto, CA.
- Franke, G. F., Webb, D. R., Fisher, R. K., Mathur, D., Hopping, P. N., March, P. A., Headrick, M. R., Laczó, I. T., Ventikos, Y. & Sotiropoulos, F. 1997. Development of environmentally advanced hydropower turbine system design concepts. Voith Hydro, Inc. Report No. 2677-0141. Prepared for the U.S. Department of Energy, Idaho Operations Office, Idaho Falls, Idaho.
- Ferguson, J. W., Ploskey, G. R., Leonardsson, K., Zabel, R. W. & Lundqvist, H. 2008. Combining turbine blade-strike and life cycle models to assess mitigation strategies for fish passing dams. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 65: 1568–1585.
- Gustafsson, S. 2010. Migration losses of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) smolts at a hydropower station area in River Åbyälven, Northern Sweden. *Wildlife, Fish, and Environmental Studies*, Swedish University of Agricultural Sciences, SLU, Umeå, Sweden, 17s.
- Huusko, R., Huusko, A., Mäki-Petäys, A., Orell, P. & Erkinaro, J. 2016. Effects of tagging on migration behaviour, survival and growth of hatchery-reared Atlantic salmon smolts. *Fish. Manag. Ecol.* 28: 267–375.

- Hvidsten, N. A., Jensen, A. J., Vivås, H., Bakke, Ø. & Heggberget, T. G. 1995. Downstream migration of Atlantic salmon smolts in relation to water flow, water temperature, moon phase and social interaction. *Nordic Journal of Freshwater Research* 70, 38–48.
- Hyvärinen, P. & Rodewald, P. 2013. Enriched rearing improves survival of hatchery-reared Atlantic salmon smolts during migration in the River Tornionjoki. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 70: 1386-1395.
- Jepsen, N., Aarestrup, K., Økland, F., & Rasmussen, G. 1998. Survival of radio-tagged Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) and trout (*Salmo trutta* L.) smolts passing a reservoir during seaward migration. *Hydrobiologia*, 371/372: 347–353.
- Jepsen, N., Koed A., Thorstad E. B. & Baras E. 2002. Surgical implantation of telemetry transmitters in fish: how much have we learned? *Hydrobiologia* 483, 239–248.
- Johnson, G. E., Khan, F., Hedgepeth, J. B., Mueller, R. P., Rakowski, C. L., Richmond, M. C., Serkowski, J. A., Richmond, M. C., Serkowski, J. A. & Skalski, J. R. 2006. Hydroacoustic Evaluation of Juvenile Salmonid Passage at The Dalles Dam Sluiceway, 2005. Pacific Northwest National Laboratory, Richland, Washington.
- Karppinen, P., Jounela, P., Huusko, R., & Erkinaro, J. 2014. Effects of release timing on migration behaviour and survival of hatchery-reared Atlantic salmon smolts in a regulated river. *Ecol. Fresh. Fish* 23(3): 438–452.
- Larinier, M. 2008. Fish passage experience at small-scale hydro-electric power plants in France. *Hydrobiologia* 609, 97–108.
- Larinier, M. & Dartiguelongue, J. 1989. La circulation de poissons migrateurs: le transit à travers les turbines des installations hydroélectriques (The movements of migratory fish: passage through hydro-electric turbines). *Bull. Fr. Pisc.*, 312-313,1-90.
- Li, X, Deng Z. D., Brown, R. S., Fu, T., Martinez, J. J., McMichael, G. A., Skalski, J. R., Townsend, R. L., Trumbo, B. A., Ahmann, M. L., Renholds, J. F. 2015. Migration depth and residence time of juvenile salmonids in the forebays of hydro-power dams prior to passage through turbines or juvenile bypass systems: implications for turbine-passage survival. *Conserv Physiol* 3: doi:10.1093/conphys/cou064.
- Lundqvist, H., Leonardsson, K., Carlsson, U., Larsson, S., Nilsson, J., Östergren, J., Karlsson, L., Rivinoja, P., Serrano, I., Palm, D. & Ferguson, J. 2010. Monitoring juvenile Atlantic salmon and sea trout in the River SÄavarån, northern Sweden. *Teoksessa: Hurford, C., Schneider, M. & Cowx, I., toim. Conservation monitoring in freshwater habitats. Netherlands: Springer, ss. 207–218.*
- Mathur, D., Heisey, P. G., Euston, T., Skalski, J. R. & Hays, S. 1996. Turbine passage survival estimation for chinook salmon smolts (*Onchorhynchus tshawytscha*) at a large dam on the Columbia River. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 53: 542–549.
- McCormick, S. D., Hansen, L. P., Quinn, T. P. & Saunders, R. L. 1998. Movement, migration, and smolting of Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 55(Suppl. 1): 77–92.
- Montén, E. 1985. Fisk och turbiner. Om fiskars möjligheter att oskadda passera genom kraftverksturbiner. Stockholm: Vattenfall.
- Nyqvist, D., Greenberg, L. A., Goerig, E., Calles, O., Bergman, E., Ardren, W. R., & Castro-Santos, T. 2017. Migratory delay leads to reduced passage success of Atlantic salmon smolts at a hydroelectric dam. *Ecol. Freshw. Fish* 26: 707–718.
- Newton, M., Barry, J., Dodd, J. A., Lucas, M. C., Boylan, P. & Adams, C. E. 2016. Does size matter? A test of size-specific mortality in Atlantic salmon *Salmo salar* smolts tagged with acoustic transmitters.
- Olsén K. H., Petersson E., Ragnarsson B., Lundqvist H., Järvi T. 2004. Downstream migration in Atlantic salmon (*Salmo salar*) smolt sibling groups. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 61, 328–331.
- Palm, D., Lund, J., Rivinoja, P., Molin, J., Leonardsson, K. & Lundqvist, H. 2009. Laxens och havsöringens upp- och nedströmsvandring i Sävarån: Vilka problem utgör mindre vattenkraftverk i skogsälvar? Rapport till Naturvårdsverket och Fiskeriverket, Institutionen för Vilt, Fisk och Miljö, SLU, 901 83 Umeå.
- Pracheil, B. M., DeRolph, C. R., Schramm, M. P. & Bevelhimer, M. S. 2016. A fish-eye view of riverine hydropower systems: the current understanding of the biological response to turbine passage. – *Reviews in Fish Biology and Fisheries* 26: 153–167.
- Ruggles, C. P. 1980. A review of the downstream migration of Atlantic salmon. *Canadian Technical Report on Fisheries and Aquatic Sciences* 952, 1–39.
- 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 a hydroelectric facility on the Exploits River, Newfoundland, Canada. *Hydrobiologia* 582, 155–169.
- Serrano, I., Rivinoja, P., Karlsson, L. & Larsson, S. 2009. Riverine and early marine survival of stocked salmon smolts, *Salmo salar* L., descending the Testebo River, Sweden. *Fisheries Management and Ecology* 16: 386–394.
- Stich, D. S., Kocik, J. F., Zydlewski, G. B., & Zydlewski, J. Z. 2015. Linking behavior, physiology, and survival of Atlantic salmon smolts during estuary migration. *Mar. Coast. Fish. Dyn. Manage. Ecosyst. Sci.* 7: 68–86.
- Svensden, J. C., Eskesen, A. O., Aarestrup, K., Koed, A. & Jordan, A. D. 2007. Evidence for non-random spatial positioning of migrating smolts (Salmonidae) in a small lowland stream. *Freshwater Biology* 52, 1147–1158.

- Thorstad, E. B., Whoriskey, F., Uglem, I., Moore, A., Rikardsen, A. H., & Finstad, B. 2012. A critical life stage of the Atlantic salmon *Salmo salar*: behaviour and survival during the smolt and initial post-smolt migration. *J. Fish Biol.* 81: 500–542.
- Turnpenny, A. W. H. 1998. Mechanisms of fish damage in low-head turbines—an experimental appraisal. Teoksessa: Fish migration and fish bypasses. *Fishing News Books*, Blackwell Scientific Publications, Oxford. ss. 300-314.
- Welch, D. W., Rechisky, E. L., Melnychuk, M. C., Porter, A. D., Walters, C. J., Clements, S., Clements, B. J., McKinley, R. S. & Schreck, C. 2008. Survival of migrating salmon smolts in large rivers with and without dams. *PLoS Biology*, 6:e265. doi:10.1371/journal.pbio.0060265
- Winter, J. D. 1996. Advances in underwater biotelemetry. Teoksessa: Fisheries Techniques, 2nd Edition. (Murphy, B. R. & Willis, D. W. toim.). ss. 555–590. American Fisheries Society, Bethesda, Maryland.
- Zydlewski, G. B., Haro, A. & McCormick, S. D. 2005. Evidence for cumulative temperature as an initiating and terminating factor in downstream migratory behaviour of Atlantic salmon (*Salmo salar*) smolts. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 62: 68–78.



Länsi-Uudenmaan vesi ja ympäristö ry
Västra Nylands vatten och miljö rf

PL 51, 08101 Lohja
Puh. 019 323 623
vesi.ymparisto@vesiensuojelu.fi
www.luvy.fi

ISBN 978-952-250-182-0 (nid.)
ISBN 978-952-250-183-7 (PDF)
ISSN-L 0789-9084
ISSN 0789-9084 (painettu)
ISSN 1798-2677 (verkkajulkaisu)