



Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 19/2022

Taimenen vaelluspoikasten kuolleisuus ja käyttäytyminen Hietaman- ja Leuhunkosken voimalaitoksilla

FRESHABIT -projektin Saarijärven reitin
alasvaellustutkimus

Petri Karppinen, Jani Helminen, Mikko Hynninen,
Tapio Keskinen ja Teppo Vehanen

Taimenen poikasten alasvaellus Hietaman- ja Leuhunkosken voimalaitoksilla

FRESHABIT -projektin Saarijärven reitin alasvaellustutkimus

Petri Karppinen, Jani Helminen, Mikko Hynninen,
Tapio Keskinen ja Teppo Vehanen



Viittausohje:

Karppinen, P., Helminen, J., Hynninen, M., Keskinen, T. & Vehanen, T. 2022. Taimenen poikasten alasvaellus Hietaman- ja Leuhunkosken voimalaitoksilla : FRESHABIT -projektin Saarijärven reitin alasvaellustutkimus. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 19/2022. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 31 s.

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.

Petri Karppinen, ORCID ID, <https://orcid.org/0000-0003-4405-3481>

ISBN 978-952-380-383-1 (Painettu)

ISBN 978-952-380-384-8 (Verkojulkaisu)

ISSN 2342-7647 (Painettu)

ISSN 2342-7639 (Verkojulkaisu)

URN <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-380-384-8>

Copyright: Luonnonvarakeskus (Luke)

Kirjoittajat: Petri Karppinen, Jani Helminen, Mikko Hynninen, Tapio Keskinen ja Teppo Vehanen

Julkaisija ja kustantaja: Luonnonvarakeskus (Luke), Helsinki 2022

Julkaisuvuosi: 2022

Kannen kuva: Kalojen seuranta Hietamankosken ohijuoksutuskanavassa 20.5.2021. Vasemmalla reunassa kalatien nousu-osuutta. Kuva: Teppo Vehanen

Painopaikka ja julkaisumyynti: PunaMusta Oy, <http://luke.juvenesprint.fi>

Tiivistelmä

Petri Karppinen¹⁾, Jani Helminen¹⁾, Mikko Hynninen^{1,2)}, Tapio Keskinen²⁾ ja Teppo Vehanen²⁾

¹⁾Kala- ja vesitutkimus Oy, Yrittäjäntie 26, 01800 Klaukkala, petri.karppinen@kalajavesitutkimus.fi
jani.helminen@kalajavesitutkimus.fi

²⁾Luonnonvarakeskus, Luonnonvarat, Latokartanonkaari 9, 00790 Helsinki,
etunimi.sukunimi@luke.fi

Taimenen poikasten alasvaellusta tutkittiin Saarijärven reitin voimalaitoksilla toukokuussa 2021. Kaikkiaan 60 taimenta merkittiin radiolähettimellä ja 398 kalaa PIT-merkillä. Kalat vapautettiin neljässä erässä Leuhunkosken ja Hietamankosken voimalaitosten yläpuolelle. Tavoitteena oli selvittää taimenen poikasten käyttäytymistä, reitinvalintaa ja kuolleisuutta alasvaelluksen yhteydessä.

Kalat etenivät vapautuspaikalta voimalaitokselle ja padon alapuolelle pääosin alle vuorokaudessa (keskiarvo: Leuhu 7,2 tuntia, Hietama 8,4 tuntia). Leuhun voimalaitoksella 93 % kaloista laskeutui alakanavaan voimalaitoksen ja ohijuoksutuskanavan kautta. Kalatien kautta meni 7 % lähettimellä merkityistä kaloista, ja 2,5–5,0 % PIT-merkityistä kaloista. Hietaman voimalaitoksella 74 % kaloista meni alas voimalaitoksesta ja 26 % ohijuoksutusluukkujen kautta. Hietaman kalatiehen ei mennyt yhtään lähettimellä merkittyä kalaa. PIT-merkeistä vain yksi havaittiin kalatiessä.

Leuhun voimalaitoksen ja ohijuoksutuskanavan kautta alakanavaan laskeutuneiden kalojen kuolleisuus oli 35 %. Alakanavassa petokalojen syömäksi joutui 33 % kaloista. Hietaman voimalaitoksella alasmenneistä kaloista alle 10 % kuoli voimalaitoksen läpimenon yhteydessä. Alakanavassa predaation kohteeksi joutui 11–37 % kaloista. Hietaman ohijuoksutuskanavaan menneet kalat selvisivät alasmenosta, mutta osa kaloista jäi alakanavaan loukkuun ohijuoksutuksen päätyttyä. Näin ohijuoksutuskanavaan laskeutuneiden kalojen kuolleisuus oli 71 %. Patoaltaalle jäi molemmilla voimalaitoksilla noin 10 % kaloista. Kalojen kokonaiskuolleisuus oli näin ollen melko korkealla tasolla: Leuhussa 60 % ja Hietamassa 39–55 %.

Kalojen alasvaellukseen liittyvä kuolleisuus oli ennakoitua suurempaa Leuhun voimalaitoksessa ja Hietaman ohijuoksutuskanavassa. Alasvaelluskuolleisuuden vähentämiselle on eniten tarvetta ja toisaalta myös parhaat mahdollisuudet juuri näihin asioihin liittyen. Leuhussa tulisi kehittää kalojen ohjaamista alavirtaan kalatien kautta, ja Hietamalla parantaa kalojen kulkumahdollisuuksia ohijuoksutuskanavassa.

Asiasanat: järvitaimen, lohikalat, telemetria, PIT-merkit, alasvaellus, Saarijärven reitti

Sisällys

1. Johdanto	5
2. Aineisto ja menetelmät	6
2.1. Tutkimusalue ja olosuhteet.....	6
2.2. Voimalaitokset	7
2.2.1. Leuhunkosken voimalaitos	7
2.2.2. Hietamankosken voimalaitos.....	9
2.3. Tutkimuskalat	11
2.4. Kalojen merkintä ja vapautus	11
2.4.1. Radiolähetinmerkintä.....	11
2.4.2. PIT-merkintä	12
2.5. Vaellusseuranta.....	13
2.5.1. Vastaanottimet ja antennijärjestelmät	13
2.5.2. Käsipaikannukset.....	14
2.5.3. PIT-merkinnät.....	14
3. Tulokset.....	15
3.1. Leuhunkoski	15
3.1.1. Kalojen käyttäytyminen ja kuolleisuus	15
3.2. Hietamankoski.....	16
3.2.1. Kalojen käyttäytyminen ja kuolleisuus	16
3.3. PIT-seurannan tulokset.....	18
4. Tulosten tarkastelu	20
4.1. Leuhunkoski	20
4.2. Hietamankoski.....	23
4.3. Seurannan epävarmuustekijät ja virhelähteet.....	25
4.4. Vertailu laskennallisella mallilla saatuihin tuloksiin	26
4.5. Ehdotuksia alasvaelluskuolleisuuden vähentämiseksi	27
5. Kiitokset	29
6. Viitteet.....	30

1. Johdanto

FRESHABIT LIFE IP on Suomen suurin sisävesien suojeluprojekti. Projektissa rakennetaan kalateitä, elvytetään jokihelmisimpukan kantoja sekä kunnostetaan puroja, jokia, järviä, kosteikkoja ja soita. Työn tavoitteena on parantaa sisävesien tilaa ja niistä riippuvaisen luonnon monimuotoisuutta. Freshabit -hankkeessa poistetaan yksi pato ja rakennetaan kuusi kalatietä kalatiestrategian linjaamissa kärkikohteissa, jotka avaavat yli 200 km vaellusreittiä lohikaloille.

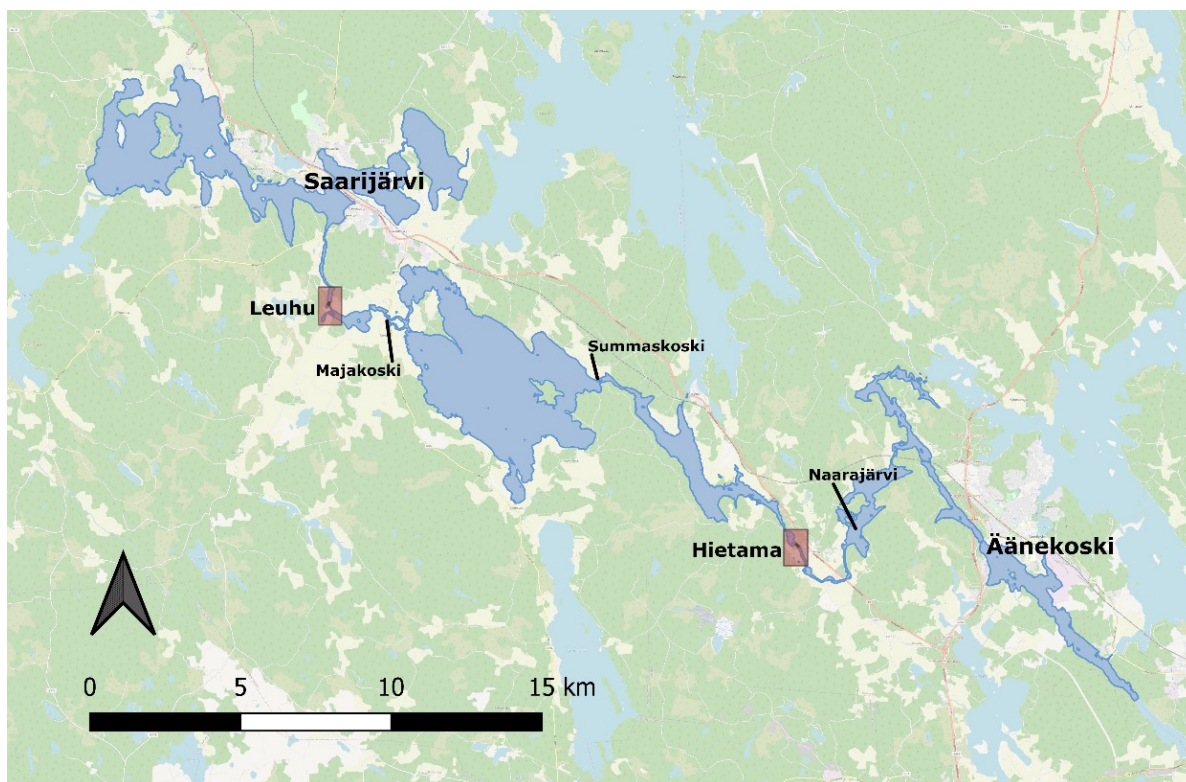
Saarijärven reitti on yksi Keski-Suomen merkittävistä järvitaimenen vaellusväylistä. Vesivoimalaitosten rakentaminen 1960-luvulla katkaisi taimenen luontaisen vaellusyhteyden reitillä. Saarijärven pääreitillä on harva, luontaisesti lisääntyvä taimenkanta, joka perimältään muistuttaa istutuksissa pitkään käytettyä Rautalammin reitin taimenta (Laitinen ja Honkanen 2017). Perimältään sekoittumatonta, eriytynyttä taimenkantaa on jäljellä enää joissain sivuvesissä (Laitinen ja Honkanen 2017). Leuhunkoski ja Hietamankoski ovat olleet viimeisiä reitillä jäljellä olevia nousuesteitä. Kalateiden valmistuminen avasi taimenille jälleen kulkuyhteyden yhteen Keski-Suomen päävesireiteistä. Ongelmana reitillä on edelleen vedenlaatu, sillä voimakkaasta ihmistoiminnasta johtuen humusta on runsaasti. Valuma-alueella on runsaasti metsäojituksia ja turvesoita.

Hietamankosken kalatie valmistui toukokuussa vuonna 2020, ja Leuhunkosken kalatie toukokuussa 2021. Kalateiden rakentamisesta vastasi Vattenfall ja ne toteutettiin osana Freshabit-hanketta. Alasvaellustutkimus tehtiin Kala- ja vesitutkimus Oy:n (Kavetu) ja Luonnonvarakeskuksen (Luke) yhteistyönä: Kavetu teki radiolähetin -seurannan ja Luke toimitti kalat sekä vastasi PIT-merkittyjen taimenten seurannasta. Tutkimus toteutettiin Freshabit Life IP -hankkeessa. Tässä raportissa esitetään alasvaellustutkimuksen keskeiset tulokset. Tarkoituksena oli selvittää taimenen poikasten alasvaelluskäyttäytymistä ja kuolleisuutta Hietamankosken ja Leuhunkosken voimalaitoksilla. Työssä myös arvioitiin kalateiden merkitystä alasvaellusreitteinä. Tulosten perusteella voidaan arvioida alasvaelluksen ohjaus- ja turvaamisrakenteiden tarpeellisuutta ja niiden mahdollisuuksia tarkastelluissa kohteissa.

2. Aineisto ja menetelmät

2.1. Tutkimusalue ja olosuhteet

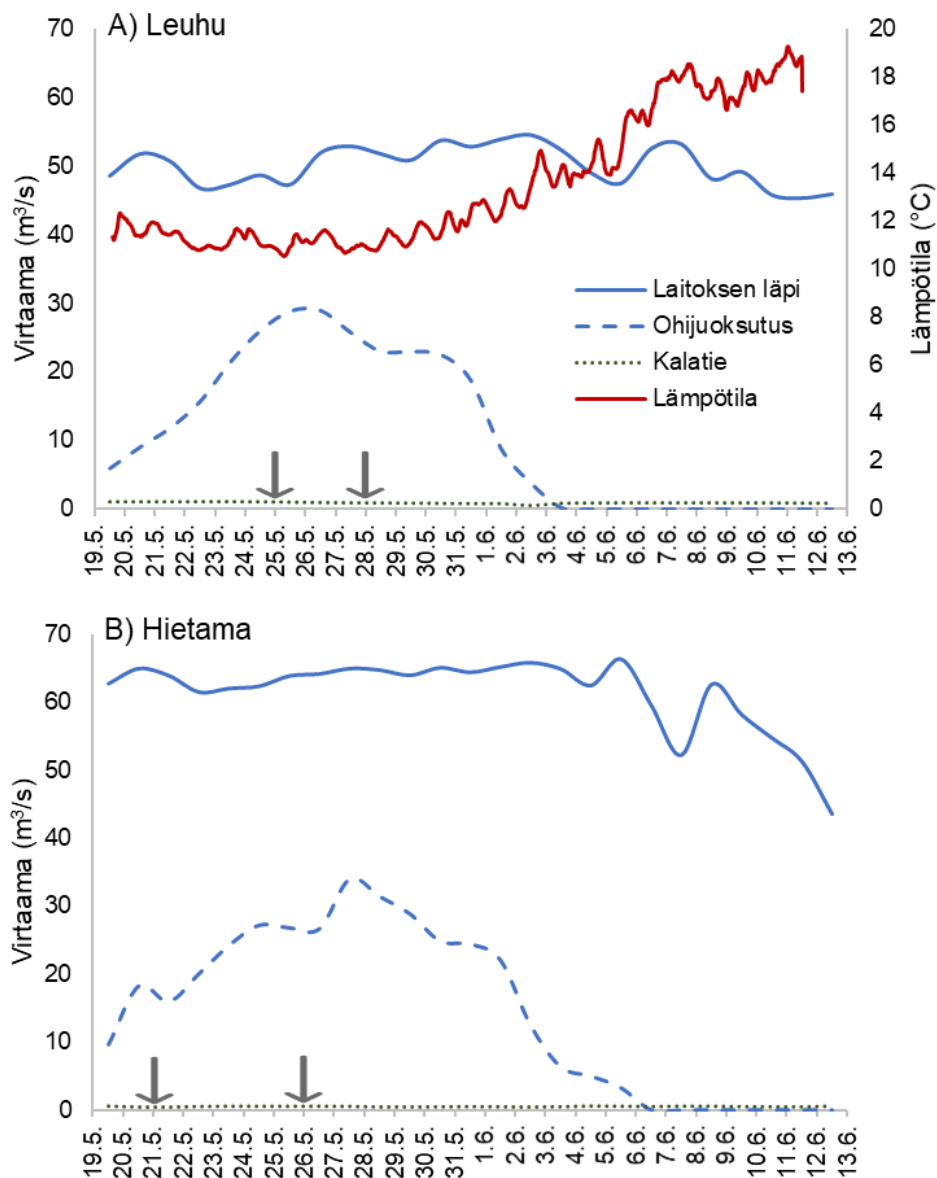
Saarijärven vesireitti on pituudeltaan noin 80 kilometriä. Reittiin kuuluu useita joki- ja järvi-osuuksia. Reitillä lasketaan olevan 22 koskea, joiden pituus on yhteensä noin 6,7 kilometriä. Reitillä on kolme vesivoimalaitosta: Leuhunkoski ja Hietamankoski ja Parantalan voimala. Leuhunkoski ja Hietamankoski sulkevat reitin pääuoman, Parantalan voimala vaikuttaa ainoastaan Pyhäjärven vedenkorkeuksiin. Leuhunkosken ja Hietamankosken voimalaitosten välinen etäisyys pääuomassa on noin 18 kilometriä (Kuva 1).



Kuva 1. Leuhunkosken ja Hietamankosken tutkimusalueiden sijainti Saarijärven ja Äänekosken välisellä vesialueella. (Kuva sisältää Maanmittauslaitoksen (Maastotietokanta 10/2021), SYKE:n (Uomaverkosto sekä Järvet ja joet 10/2021) sekä OpenStreetMap contributors (CC-BY-SA) aineistoa.)

Veden lämpötila vaihteli alasvaellusseurannan aikana välillä 10,5–19,3 °C (Kuva 2). Veden vuorokauden keskilämpötila nousi ensimmäisen kerran yli 15 °C seurannan loppupuolella kesäkuun 5. päivänä.

Saarijärven reitin kokonaisvirtaama oli keväälle tyypilliseen tapaan korkealla tasolla ja nousussa seurannan aikana. Voimalaitosten turbiinivirtaama pysyi seurannan ajan melko samana, mutta kokonaisvirtaaman vaihtelu näkyi voimalaitosten suurissa ohijuoksutusvirtaamissa (Kuva 2). Ohijuoksutusvirtaamat kääntyivät laskuun seurannan aikana, ja ohijuoksutus loppui molemmilla laitoksilla kesäkuun alkupäivinä.



Kuva 2. Päiväkohtaiset keskivirtaamat Leuhunkoskella (A) ja Hietamankoskella (B), sekä veden lämpötila (automaattitallennus puolen tunnin välein) mitattuna Leuhunkosken patoaltaalla (Kuva A). Nuolet osoittavat kalojen vapautusajankohdat. (Virtaamatiedot: Vattenfall).

Silmämääräisen tarkastelun lisäksi virtaaman jakautumista ja virran liikkeitä voimalaitosten päällä kartoitettiin ns. mandariinitestillä, jossa 50 kpl mandariineja laskettiin keskelle uomaa kalojen vapautuspaikan kohdalla. Niiden saapumista voimalaitoksen yläpuolelle vapautuspaikalta ja jakautumista virtaaman mukaisesti tarkasteltiin silmämääräisesti.

2.2. Voimalaitokset

2.2.1. Leuhunkosken voimalaitos

Leuhunkosken voimalaitos on otettu käyttöön vuonna 1961, ja se on myöhemmin peruskunnostettu vuosina 1990 ja 2017. Leuhunkosken voimalaitoksen putouskorkeus on noin 9 metriä

ja maksimivirtaama $45 \text{ m}^3/\text{s}$. Laitoksen tulokanava on noin 5–6 metriä leveä. Patoaltaan leveys on noin 100 metriä voimalaitoksen kohdalla (Kuva 3 ja Kuva 7). Ohijuoksutuskanava on tulokanavan vieressä, ja ohijuoksutus tapahtuu läheltä pohjaa nousevan luukun kautta alakana-vaan.



Kuva 3. Leuhunkosken voimalaitos patoaltaalta kuvattuna. Voimalaitoksen kaksiosainen tulokanava erottuu punaisen katkoviivan vasemmalla puolella. Ohijuoksutuskanava ja kalatien suuaukko sijaitsevat tulokanavan vieressä oikealla. Kuva: Petri Karppinen

Ohijuoksutusvedet purkautuvat kapeaan (alle 5 m), betonipohjaiseen kanavaan voimalaitoksen seinän ja alakanavan seinämän välissä (Kuva 4). Ohijuoksutus muodostaa voimakkaan ja pitkälle syöksyvän turbulenttisen virtauksen alakanavan toiselle laidalle. Alakanava on voimalaitoksen kohdalla noin 10 m leveä ja alempana noin 25 m. Alakanavan voimakas pyörteisyys näkyy selvästi myös ilmakuvissa (Kuva 7).



Kuva 4. Leuhun voimalaitoksen ohjuoksutusvedet purkautuvat voimalaitoksen (vasemmalla) ja alakanavan seinämän (oikealla alhaalla) väliin alakanavassa. Ohjuoksutusluukku sijaitsee suunnilleen suoraan kuvaajan alapuolella. Oikealla ylhäällä näkyy kalatien yläosaa. Kuva: Petri Karppinen.

2.2.2. Hietamankosken voimalaitos

Hietamankosken voimalaitos on otettu käyttöön vuonna 1966, ja se on peruskunnostettu 1994. Voimalaitoksen putouskorkeus on 13,5 m ja maksimivirtaama $64 \text{ m}^3/\text{s}$. Laitoksen tulokanavan leveys on noin 10 m. Patoaltaan leveys on noin 70 metriä voimalaitoksen kohdalla. Yläkanavan keskikohdan ja ohjuoksutuskanavan keskikohdan välinen etäisyys on noin 25 m, ja kalatien yläpää sijaitsee näiden puolivälissä (Kuva 5 ja Kuva 8).



Kuva 5. Hietamankosken voimalaitospato (A) ylävirran suunnasta katsottuna. Kalatien yläpää (B) sijaitsee suunnilleen padon keskellä, ohjuksutusluukut yläkanavan oikealla laidalla (C) ja tulokanava vasemmalla laidalla. Kuva: Petri Karppinen.

Ohjuksutuskanavaan avautuu kaksi leveydeltään noin 5 m juoksutusluukku (Kuva 5 C). Luukut aukeavat alhaalta ylöspäin. Luukkujen ollessa kiinni Hietaman ohjuksutuskanava on kuivillaan. Ohjuksutuskanavan pohja on pääosin rikkonaista kalliota ja suurista lohkarista muodostuvaa louhikkoa (Kuva 6). Hietaman alakanava on leveydeltään noin 15 metriä voimalaitoksen alapuolella.

Molemmissa laitoksissa on vertikaalinen Kaplan-turbiini, joissa on läpimitaltaan suunnilleen samankokoinen (Hietama 2,6 m; Leuhu 2,7 m), nelisiipinen juoksupyörä. Leuhun juoksupyörän keskiö on kuitenkin selvästi pienempi (0,87 m) kuin Hietamassa (1,35 m), joten Leuhussa on vastaavasti suuremmat siivet. Molempien turbiinien pyörintänopeus on 187 kierrosta minuutissa. Tulokanavan väljän kaltereiden väli on 18 cm molemmilla laitoksilla.



Kuva 6. Hietaman voimalaitospadon ohijuoksutuskanava 11.6.2021 padon päältä kuvattuna. Vasemmalla Hietaman kalatien yläosan nousuosuutta. Kuva: Petri Karppinen

2.3. Tutkimuskalat

Tutkimuksessa käytetyt taimenen (*Salmo trutta*) 2-vuotiaat poikaset tuotiin Leuhunkoskelle säiliöautolla Luonnonvarakeskuksen Laukaan kalanviljelylaitokselta 12. toukokuuta. Kalat olivat Rautalammin reitin kantaa. Kaloja oli kaikkiaan noin 500 kpl, ja ne jaettiin aluksi kahteen noin 90 x 70 x 70 cm kokoiseen häkkiin odottamaan merkintää noin 150 m Leuhunkosken voimalaitoksen yläpuolella. Myöhemmin merkintöjen edistyessä kalat jaettiin vapautuseräkohtaisesti neljään häkkiin. Kalat olivat keskipituudeltaan 23,0 cm, ja keskipainoltaan 144,6 g (Luke tiedonanto). Kalat olivat hyväkuntoisia, ja niissä oli jossakin määrin havaittavissa smolttiutumisen merkkejä.

2.4. Kalojen merkintä ja vapautus

2.4.1. Radiolähetinmerkintä

Kaloihin asennettiin radiolähettimet neljässä erässä (Taulukko 1). Häkeistä otettiin satunnaisesti yksi kala kerrallaan nukutettavaksi lähettimen asentamista varten. Kalat nukutettiin hapetetussa nukutusaineliuoksessa (puskuroitu MS-222, 80 mg/l) 50 litran astiassa. Lähetin (ATS, Advanced Telemetry Systems Inc., USA, malli F1020, paino 1,5 g) asennettiin kirurgisesti kalan vatsaonteloon (ks. Karppinen ym. 2013). Lähettimen asentamisen jälkeen kalat pidettiin häkissä

toipumassa 2–3 päivää ennen vapauttamista. Merkinnän jälkeistä kuolleisuutta ei esiintynyt. Lähettimellä merkityt kalat olivat keskimäärin 22,4 cm pitkiä (kokonaispituus). Veden lämpötila vaihteli merkintä- ja vapautuspäivinä välillä 10,9–11,9 °C.

Taulukko 1. Lähetinkalojen eräkohtainen yksilömäärä, merkintä- ja vapautus ajankohta, veden lämpötilat (°C) vapautuspäivinä (vrk:n ka.), sekä keskipituus ja -hajonta (cm).

Kalaerän tunnus n)	Merkintä-pvm	Veden lämpötila	Vapautus pvm ja aika	Veden lämpötila	Keskipituus ja -hajonta
Leuhu 2 (15)	22.5.	10,9	25.5. klo 14	11,0	22,8 ± 2,1
Leuhu 4 (15)	26.5.	11,3	28.5. klo 11	11,1	22,4 ± 1,9
Hietama 1 (14)	19.5.	11,9	21.5. klo 17	11,5	22,0 ± 1,8
Hietama 3 (16)	23.5.	11,2	26.5. klo 15	11,3	22,6 ± 3,1

Leuhun kalat (erät 2 ja 4) vapautettiin merkintäpaikalla noin 150 metriä Leuhun voimalaitoksen yläpuolella (Kuva 7). Hietaman kalat (erät 1 ja 3) kuljetettiin Leuhun merkintäpaikalta Hietaman vapautuspaikalle hapetetussa 600 litran säiliössä. Kalat vapautettiin jokeen noin 200 metriä Hietaman voimalaitoksen yläpuolella (Kuva 8). Jokaisen lähetinkalaerän mukana vapautettiin myös 99–100 kpl PIT-merkillä varustettua kalaa (ks. seuraava kappale).

2.4.2. PIT-merkintä

Leuhunkoskelle tuotuja kaloja merkittiin PIT-merkeillä (Passive Integrated Transponders) 17.–18. toukokuuta. PIT-merkittyjä kaloja oli 398 kpl (Taulukko 2). Kalat nukutettiin samalla tavalla kuin radiomerkinnässä viiden kalan erissä. Kalan vatsapuolelle tehtiin pieni viilto, josta merkki työnnettiin kalan vatsaonteloon. Veden lämpötila oli merkintäpaikalla käsimitarilla mitattuna 11–12 astetta. Merkinnän yhteydessä kalat jaettiin neljään erilliseen häkkiin, 99–100 yksilöä kuhunkin. Merkinnän jälkeistä kuolleisuutta ei esiintynyt. PIT-merkeillä varustetut kalat olivat keskimäärin 23,2 cm:n mittaisia.

Kukin PIT-kalaerä vapautettiin yhdessä lähetinkalaerän kanssa Leuhunkosken ja Hietamankosken yläpuolelle (vrt. Taulukko 1).

Taulukko 2. PIT-merkittyjen kalojen eräkohtainen yksilömäärä, merkintä- ja vapautus ajankohta, veden lämpötilat (°C) vapautuspäivinä (vrk:n ka.), sekä keskipituus ja -hajonta (cm).

Kalaerän tunnus (n)	Merkintä-pvm	Veden lämpötila	Vapautus pvm	Veden lämpötila	Keskipituus ja -hajonta
Leuhu 2 PIT (99)	18.5.	12	25.5. klo 14	11,0	23,8 ± 2,4
Leuhu 4 PIT (100)	18.5.	12	28.5. klo 11	11,1	22,8 ± 2,5
Hietama 1 PIT (99)	17.5.	11	21.5. klo 17	11,5	23,2 ± 2,9
Hietama 3 PIT (100)	17.5.	11	26.5. kol 15	11,3	23,1 ± 2,4

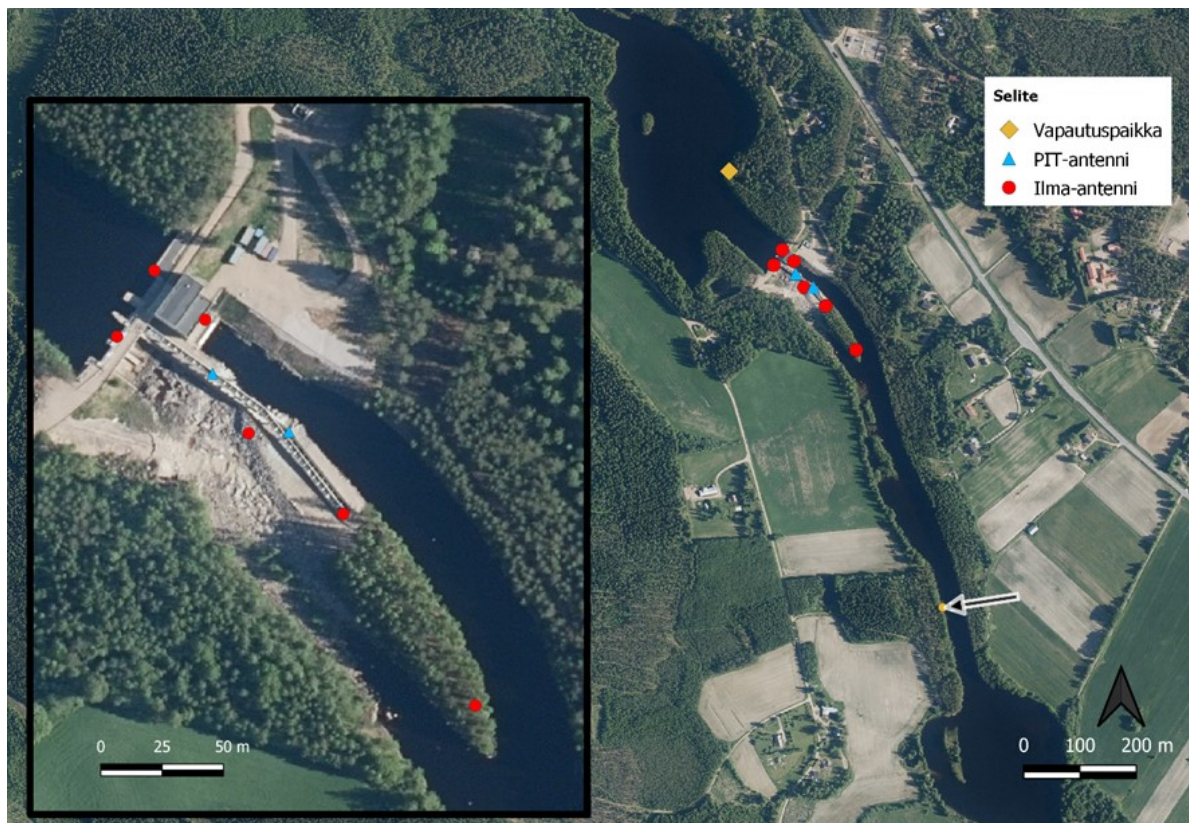
2.5. Vaellusseuranta

2.5.1. Vastaanottimet ja antennijärjestelmät

Voimalaitosten ylä- ja alapuolelle asennettiin antenni-vastaanotin -järjestelmät lähettimellä varustettujen kalojen jatkuvaa seurantaan varten (Kuvat 7 ja 8). Voimalaitosten yläpuolelle asennetut järjestelmät tallensivat tulokanavan edustalla ja padolla liikkuvista kaloista kantautuvat signaalit. Voimalaitoksen alapuolelle asennetut vastaanotinjärjestelmät seurasivat voimalaitoksesta, ohijuoksutuskanavasta ja kalatiestä alas tulevien kalojen liikkeitä. Voimalaitoksen alakanavasta poistuvien kalojen havainnointi varmistettiin alakanavan alapäähän sijoitettujen vastaanottimien avulla. Käytetyt vastaanottimet olivat mallia ATS R4500. Seuranta lopetettiin 11. kesäkuuta, jolloin voimalaitosten yläpuolelta ei ollut enää odotettavissa alasvaeltavia kaloja.



Kuva 7. Tutkimusalue Leuhunkosken voimalaitospadolla ja alueelle asennettujen seuranta-antennien sijoittuminen ja kalojen vapautuspaikka. Kalatien alapäähän sijoitettu antenni jouduttiin häiriöiden takia siirtämään ylemmäs (numerot 1 ja 2). Sisältää Maanmittauslaitoksen (10/2021) aineistoa.



Kuva 8. Tutkimusalue Hietamankosken voimalaitospadolla ja alueelle asennettujen seuranta-antennien sijoittuminen ja kalojen vapautuspaikka. Nuoli osoittaa rantavyöhykkeestä 4. kesäkuuta paikannetun lähettimen (ks. Tulokset). Sisältää Maanmittauslaitoksen (10/2021) aineistoa.

2.5.2. Käsinpaikannukset

Kiinteillä antennijärjestelmillä tehdyn jatkuvan seurannan lisäksi lähetinkaloja paikannettiin käsisivastanottimen (ATS R4000) ja antennin avulla voimalaitospatojen ja alakanavan alueella. Lähetinkaloja paikannettiin vapautuspaikalla ja voimalaitosten läheisyydessä heti vapautushetkestä alkaen ja myöhemmin satunnaisemmin useiden päivien ajan. Kaloja paikannettiin rannalta myös kauempaa alavirrasta (mm. Majakoskelta useita kertoja, sekä Summaskoskelta ja Naarajärven yläosalta 1. kesäkuuta). Kaloja etsittiin veneellä 3. kesäkuuta Leuhunkosken alapuolisella Kallinjärvellä noin 1,5 km:n etäisyydellä voimalaitokselta, ja 4. kesäkuuta Hietamankosken alapuolisella jokiosuudella noin 2,7 km:n etäisyydellä voimalaitoksesta.

2.5.3. PIT-merkinnät

PIT-merkittyjen (Passive Integrated Transponder) kalojen alasvaellusta kalateiden kautta seurattiin Leuhun ja Hietaman kalateissa. Käytetyt merkit (Oregon RFID) olivat 23 mm pitkiä, halkaisijaltaan 3,65 mm ja massa 0,6 g. Luonnonvarakeskus asensi molempiin kalateihin kaksi antennia (Texas Instruments S2000 / Protag): yksi kalatien yläosalle ja toinen alaosalle (Kuvat 7 ja 8). Hietaman antennit olivat toiminnassa 20.5.–27.5. sekä 2.6.–21.6. välisinä aikoina (toimintahäiriö 28.5–1.6.). Leuhunkosken antennit olivat toiminnassa 20.5.–2.6.

3. Tulokset

3.1. Leuhunkoski

3.1.1. Kalojen käyttäytyminen ja kuolleisuus

Noin 150 metriä Leuhunkosken voimalaitoksen yläpuolelle vapautetut taimenet poikaset etenivät vapautuspaikalta padolle keskimäärin 5,7 tunnissa (mediaani: 0,8 h, vaihteluväli: 0,4–96 h). Suurin osa kaloista (77 %) saapui padolle kuitenkin noin tunnin kuluessa vapautuksesta etenkin Leuhun ensimmäisen vapautuserän kohdalla, jossa kaikki kalat tulivat padolle 1,2 tunnin kuluessa vapautuksesta. Toisen vapautuserän kohdalla esiintyi enemmän hajontaa, ja 53 % kaloista tuli padolle alle tunnissa, kun erän muut kalat viipyivät kauempana padolta 2,3 tunnista neljään päivään.

Kalat, jotka hakeutuivat Leuhun padolta alas noin vuorokauden kuluessa vapautuksesta, ja joiden käyttäytyminen voitiin arvioida normaaliksi alasvaelluskäyttäytymiseksi, laskeutuivat padolta alas keskimäärin 7,2 tuntia vapautuksen jälkeen (Taulukko 3). Poikkeavasti käyttäytyvät kalat liikkuvat laaja-alaisesti patoaltaalla ja viipyvät padon yläpuolella keskimäärin 81 tuntia eli 3,4 päivää ennen alasmenoa.

Taulukko 3. Lähettimellä merkittyjen **kalojen padon yläpuolella käyttämä aika** ennen alasmenoa Leuhunkoskella. Kalat on jaettu kahteen ryhmään (nopeat, hitaat) niiden käyttäytymisen perusteella.

Leuhu (n)	keskiarvo	mediaani	minimi	maksimi	alle tunnissa
Nopeat (22)	7,2 h	2,7 h	0,6 h	20,4 h	27,3 %
Hitaat (5)	81 h (3,4 d)	32 h (1,3 d)	24 h (1 d)	232 h (9,7 d)	0,0 %
Kaikki (27)	20,9 h	5,6 h	0,6 h	232 h (9,7 d)	22,2 %

Kalat uivat Leuhun voimalaitokselle pääosin uoman keskellä. Joitakin yksittäisiä kaloja havaittiin lähestymässä laitosta patoaltaan voimalaitoksen puoleista rantaa pitkin. Käsivastaanottimella tehtyjen paikannusten ja automaattisille vastaanottimille tallentuneiden lähetsignaalien perusteella 67 %:lla kaloista ensimmäinen havainto padon päällä saatiin voimalaitoksen puolelta.

Kalat uivat väljän edessä lähellä pintaa ja niiden liikkeistä saatiin myös suoria näköhavaintoja. Ne liikuskelivat turbiinikanavan, ohijuoksuuskanavan, ja kalatien edustalla aktiivisesti. Kalat siirtyivät ajoittain voimalaitoksen päältä kauemmaksi ylävirtaan ja palasivat takaisin väljän eteen. Monet kaloista jäivät ajoittain pyörimään turbiinikanavan väljän edessä olleen pyörteen sisään.

Leuhunkoskella kaikkiaan 93 % kaloista laskeutui padon alapuolelle. Näistä 35,7 % arvioitiin menneen voimalaitoksen läpi ja 57,1 % ohijuoksuuskanavan kautta. Kaksi kalaa (7,1 %) pyrki alaspäin kalatien kautta, mutta toinen niistä jäi kalatien yläpäähän ja kuoli ilmeisesti juututtuaan kiinni, tai jäi jo kuolleen kiinni, kalatien seurantakameran kehikkoon tarttuneiden roskien sekaan. Kyseinen kala on laskettu mukaan patoallaskuolleisuuteen. Toinen kalatietä pitkin alas mennyt kala jatkoi matkaa Majakoskelle saakka. Kyseinen kala on laskettu mukaan selviytyneisiin, ja huomioitu myös Leuhunkosken alakanava- ja kokonaisuuskuolleisuuden määrittelyssä.

Molemmat kalatiehen menneet lähetinkalat kuuluivat Leuhunkosken ensimmäiseen vapautuserään (Leuhu 2), ja ne menivät kalatiehen 1 ja 2,5 tunnin kuluttua vapautuksesta. Kalatietä pitkin alas jatkanut kala ohitti radioantennin kalatien keskivaiheilla (ks. Kuva 7) noin neljä tuntia myöhemmin (6,5 tuntia vapautuksesta) ja eteni parissa tunnissa kalatien alaosalle. Kala poistui alakanavasta ja jatkoi matkaa kohti alavirtaa seuraavana päivänä.

Patoaltaalle jäi kaksi kalaa (7 %), ja ne laskettiin menetetyiksi. Kun mukaan laskettiin myös em. kalatien yläpäässä kuollut kala, patoallaskuolleisuudeksi Leuhussa tuli 10 % (Taulukko 4).

Voimalaitoksen läpi menneiden kalojen kuolleisuus oli 50 % ja ohijuoksutuskanavaan menneiden kuolleisuus 25 %. Leuhun voimalaitoksen alakanavan erittäin turbulenttien olosuhteiden ja voimakkaiden radiohäiriöiden takia lähetinkalojen alasmeneille oli joidenkin yksilöiden kohdalla vaikeasti tulkittavissa. Tämän epävarmuuden takia myös kalojen reittikohtaiset osuudet ja kuolleisuusarvot ovat jossakin määrin epävarmoja. Voimalaitospadolta alakanavaan laskeutuneiden kalojen yhteenlaskettu kuolleisuus oli joka tapauksessa 34,6 % (Taulukko 4). Näihin kaloihin lukeutuu myös kaksi yksilöä, jotka molemmat petokala söi alasmeneen yhteydessä ja havaittiin myöhemmin liikkuvan saman kalan sisässä Leuhun kalatien alaosalta.

Leuhun voimalaitoksen alakanavaan jäi liikehtimään alasmeneen jälkeen kuusi kalaa, jotka kaikki tulkittiin joutuneen vasta myöhemmin petokalan syömäksi. Alakanavakuolleisuudeksi arvioitiin näin ollen 33,3 %.

Kokonaiskuolleisuus nousi Leuhunkosken voimalaitoksella varsin korkeaksi (60 %) ja vain 12 kalaa (40 %) jatkoi vaellusta kohti alavirtaa. Yksi kala Leuhunkosken ensimmäisestä vapautuserästä (Leuhu 2) saavutti Hietamankosken voimalaitoksen 3. kesäkuuta, mistä se jatkoi nopeasti matkaa edelleen kohti alavirtaa. Leuhunkoskelta matkaa jatkaneista kaloista seitsemän paikannettiin kesäkuun alkupäivinä Majakoskelta, noin 2,5 kilometrin päässä Leuhun voimalaitokselta. Näistä kuusi oli edelleen Majakoskella seurannan viimeisenä päivänä 11. kesäkuuta.

Taulukko 4. Lähetinkalojen lukumäärät ja kuolleiden kalojen osuudet (suluissa) sekä niitä vastaavat prosenttiluvut Leuhunkosken voimalaitoksella eri osa-alueisiin ryhmiteltynä.

Kalaerän tunnus (n)	Patoallas	Turbiini	Ohijuoksutuskanava	Voimalaitos (Turbiini + ohijuoksutuskanava)	Alakanava	Kokonaiskuolleisuus
Leuhu 2 (15)	20 % (3*/15)	50 % (2/4)	29 % (2/7)	36 % (4/11)	13 % (1/8)	53 % (8/15)
Leuhu 4 (15)	0 % (0/0)5	50 % (3/6)	22 % (2/9)	33 % (5/15)	50 % (5/10)	67 % (10/15)
Yhteensä (30)	10,0 % (3/30)	50,0 % (5/10)	25,0 % (4/16)	34,6 % (9/26)	33,3 % (6/18)	60,0 % (18/30)

*luvussa on mukana yksi kalatien yläpäässä kuollut kala

3.2. Hietamankoski

3.2.1. Kalojen käyttäytyminen ja kuolleisuus

Noin 200 metriä Hietamankosken voimalaitoksen yläpuolelle vapautetut taimenen poikaset etenivät vapautuspaikalta padolle keskimäärin 28,2 tunnissa (mediaani: 2,0 h, vaihteluväli: 0,1–

237 h). Padolle saapuneista kaloista 36 % havaittiin padon päällä ensimmäisen tunnin aikana, ja 71 % ensimmäisen vuorokauden kuluessa.

Kalat, jotka hakeutuivat Hietaman padolta alas noin vuorokauden kuluessa vapautuksesta, ja joiden käyttäytyminen voitiin arvioida normaaliksi alasvaelluskäyttäytymiseksi, laskeutuivat padolta alas keskimäärin 8,4 tuntia vapautuksen jälkeen (Taulukko 5). Poikkeavasti käyttäytyvät kalat liikkuvat laaja-alaisesti patoaltaalla ja viipyvät padon yläpuolella keskimäärin 188 tuntia eli 7,8 päivää ennen alasmenoa.

Taulukko 5. Lähettimellä merkittyjen kalojen padon yläpuolella käyttämä aika ennen alasmenoa Hietamankoskella. Kalat on jaettu kahteen ryhmään (nopeat, hitaat) niiden käyttäytymisen perusteella.

Hietama (n)	keskiarvo	mediaani	minimi	maksimi	alle tunnissa
Nopeat (20)t	8,4 h	5,2 h	0,4 h	22,7 h	25,0 %
Hitaat (7)	188 h (7,8 d)	222 h (9,3 d)	33 h (1,4 d)	381 h (15,9 d)	0,0 %
Kaikki (27)	54 h (2,3 d)	11,4 h	0,4 h	381 h (15,9 d)	18,5 %

Kalat lähestyivät Hietamankosken voimalaitosta pääosin uoman keskellä, mutta padolle tultaessa kalojen liikkeet painoutuivat kuitenkin voimalaitoksen edustalle. Muutamat yksilöt liikkuvat padolle saavuttuaan yläkanavan voimalan puoleisella reunalla. Käsivastaanottimella tehtyjen paikannusten ja automaattisille vastaanottimille tallentuneiden lähetinsignaalien perusteella 52 %:lla kaloista ensimmäinen havainto padon päällä saatiin voimalaitoksen puolelta. Vapautuserien välillä oli tässä suhteessa kuitenkin eroja, sillä ensimmäisen erän kohdalla ensimmäiset yksilöhavainnot padon päällä painoutuivat voimalaitoksen puolelle (voimalaitos 77 %; ohijuoksutuskanava 23 %), toisen erän kohdalla ensihavainnot painoutuivat toisin päin (voimalaitos 25 %; ohijuoksutuskanava 75 %).

Hietamalla kaikkiaan 90,3 % kaloista meni alas padosta. Kolme kalaa jäi Hietaman voimalaitoksen yläpuolelle ja laskettiin menetetyiksi. Näin ollen patoallaskuolleisuudeksi tuli Hietamassa 9,7 % (Taulukko 6).

Alas menneistä kaloista 74,1 % meni läpi voimalaitoksesta, ja 25,9 % ohijuoksutuskanavan kautta. Kalatiehen ei mennyt kaloja. Laskelmissa on mukana myös yksi Leuhun voimalaitokselta Hietamaan edennyt kala. Kyseinen kala meni alas voimalaitoksesta ja jatkoi matkaa kohti alavirtaa myös Hietamassa.

Hietaman voimalaitoksen läpi menneiden kalojen kuolleisuus oli 9,5 %. Alakanavaan jäi alasmenon jälkeen 7 kalaa, joista kaksi voitiin luokitella alakanavassa myöhemmin alasmenon jälkeen syödyiksi. Toinen näistä tuli syödyksi mahdollisesti heti alakanavan alapäässä, ja sen lähetin löytyi myöhemmin rantavyöhykkeestä noin 500 metrin päässä alakanavasta alavirtaan (ks. Kuva 8). Loput viisi edellä mainituista kaloista olivat seurannan päättyessä mahdollisesti vielä hengissä tai joutuneet syödyiksi ja liikkuvat alakanavassa petokalan sisässä. Tämän epävarmuuden takia alakanavakuolleisuudelle on määritetty vaihteluväli: alakanavakuolleisuus oli Hietamassa vähintään 10,5 % ja korkeintaan 36,8 %.

Kaikki ohijuoksutuskanavaan menneet kalat selvisivät hengissä alasmenosta, ja kolme niistä poistui kanavasta ja jatkoi matkaa kohti alavirtaa. Näistä kolmesta kalasta yksi liikkui myöhemmin laajalti mm. alakanavassa, ja on tulkittu todennäköisesti syödyksi jossakin ohijuoksutus-

kanavan alapäässä. Neljä kalaa jäi pitemmäksi aikaa ohijuoksutuskanavaan, ja ne jäivät lopulta loukkuun ohijuoksutuskanavan louhikkoon ohijuoksutuksen päätyttyä. Kyseiset lähetinkalat olivat kertyneet kesäkuun alussa noin 40 metriä padon alapuolella olleeseen altaaseen. Kalat liikkuvat altaassa ja niistä saatiin myös näköhavaintoja. Altaaseen oli jäänyt muitakin pienempiä kaloja ja ainakin yksi noin 30 cm:n mittainen harjus. Näillä kaloilla ei ollut juurikaan mahdollisuuksia selvittää hengissä matalassa altaassa lämpötilan noustessa hellelukemiin. Tämän takia kyseiset lähetinkalat ja edellä mainittu ohijuoksutuskanavan alapäässä syöty kala laskettiin menetetyiksi. Näin ollen ohijuoksutuskanavan kautta menneiden kalojen kuolleisuus nousi lopulta varsin suureksi (71,4 %) (Taulukko 6).

Kokonaiskuolleisuus oli Hietamassa varsin suurta (38,7–54,8 %), ja lopulta vain 14 kalaa (45,2 %) jatkoi matkaansa Hietamankoskelta kohti alavirtaa.

Taulukko 6. Lähetinkalojen lukumäärät ja kuolleiden kalojen osuudet (suluissa) sekä niitä vastaavat prosenttiluvut Hietamankosken voimalaitoksella eri osa-alueisiin ryhmiteltynä.

Kalaerän tunnus (n)	Patoallas	Turbiini	Ohijuoksutuskanava	Alakanava	Kokonaiskuolleisuus
Hietama 1 (15*)	0 % (0/15)	8 % (1/12)	100 % (3/3)	18–46 % (2–5/11)	40–60 % (6–9 /15)
Hietama 3 (16)	19 % (3/16)	11 % (1/9)	50 % (2/4)	0–25 % (0–2/8)	38–50 % (6–8 /16)
Yhteensä (31)	9,7 % (3/31)	9,5 % (2/21)	71,4 % (5/7)	10,5–36,8 % (2–7 /19)	38,7–54,8 % (12–17/31)

* luvussa on mukana yksi Leuhusta tullut kala

3.3. PIT-seurannan tulokset

PIT-merkeistä saatiin havaintoja sekä Leuhun (14 kpl) että Hietaman kalatiestä (1 kpl) (Taulukko 7). Näistä alaspäin vaeltaviksi kaloiksi luokiteltavia havaintoja, joissa PIT-merkki kirjautui sekä ylä- että ala-antennille, oli Leuhun kalatiessä viisi kappaletta ja Hietamassa yksi. Hietamassa havaittu merkki kirjautui ylemmälle antennille kuitenkin vasta 20 päivää vapautuksen jälkeen, ja ala-antennille 19 tuntia tämän jälkeen. Jos kyseinen lähetin on ollut edelleen elävänä taime-nessa, sen käyttäytyminen poikkeaa merkittävästi muista tässä tutkimuksessa käytetyistä kaloista.

Neljä kalaa Leuhun toisesta vapautuserästä (Leuhu 4) havaittiin Leuhun kalatiessä 4–27 tunnin kuluttua vapautuksesta, ja ne uivat kalatien alaosalta 1,2–2,4 tunnissa. Nämä neljä em. tapausta voidaan olettaa normaalisti käyttäytyneiksi, kalatien kautta alas menneiksi taimenen poikasiksi (Taulukko 7). Yksi näistä merkeistä havaittiin alasmenon jälkeen alemmalla antennilla uudelleen vielä kolmesti 3–6 päivää myöhemmin. Tämä voi tarkoittaa sitä, että tämä kala tuli syödyksi alempana ja merkki palasi kalatiehen petokalan sisässä.

Taulukko 7. Voimalaitoksille vapautetuista PIT-merkityistä kaloista saadut havainnot kalateiden ylä- ja ala-antenneilta sekä havaittujen merkkien osuus (%) merkityistä kaloista. Hietaman antennit eivät olleet toiminnassa 28.5.–1.6. välisenä aikana. Hietaman kolmas erä vapautettiin 26.5.

Vapautuserä	ylä + ala	vain ylä	vain ala	Yhteensä (%)
Leuhu 2	1	3	6	10 (10,1)
Leuhu 4	4			4 (4,0)
Hietama 1	1			1 (1,0)
Hietama 3				
Yhteensä (%)	6 (1,5)	3 (0,8)	6 (1,5)	15 (3,8)

Viides näistä molemmilla kalatien antenneilla havaituista kaloista käytti 32 tuntia vapautuksesta kalatien yläosalle ja kalatiessä yli 50 tuntia alemmalle antennille etenemiseen. Tämän PIT-merkin kantaja saattoi olla taimen tai mahdollisesti predaation kohteeksi jo patoaltaalla joutunut kala, jonka merkki liikkui kalatiessä petokalan sisässä.

Kolme kalaa havaittiin Leuhun kalatiessä ainoastaan alemmalla PIT-antennilla jo 3,3–6,0 tunnin kuluttua vapautuksesta. Nopea alasmeno viittaa mahdollisesti siihen, että ko. kalat ovat tulleet kalatietä pitkin alas, mutta syystä tai toisesta ne eivät ole tallentuneet ylemmälle antennille. Näistä kolmesta kalasta kaksi havaittiin ala-antennilla uudelleen 1–3 kertaa. On myös mahdollista, että ko. taimenet ovat tulleet alas voimalaitoksesta, joutuneet syödyiksi alakanavassa, ja nousseet sitten petokalassa kalatiehen. Tämä oletamus voi päteä myös kahden 18,5–24,6 tunnin ja yhden 4,5 päivän kuluttua ainoastaan ala-antennille tallentuneen merkin kohdalla. Myös ainoastaan Leuhun ylä-antennilla 1,8–4,2 päivän kuluttua havaitut kolme merkkiä ovat todennäköisesti olleet kalatien yläosalla liikkuvissa petokaloissa. Yksi näistä tallentui yläantennille kahdesti, mikä viittaa todennäköiseen edestakaiseen liikkeeseen kalatien yläosalla.

Leuhun kalatien kautta alasmenneiden kalojen osuus on näin ollen ollut todennäköisesti ainakin 2,5 % (5 molemmissa antenneissa havaittua kalaa), ja mahdollisesti jopa 5 % (mukaan lukien 5 noin vuorokauden sisällä vain ala-antennilla havaittua kalaa).

4. Tulosten tarkastelu

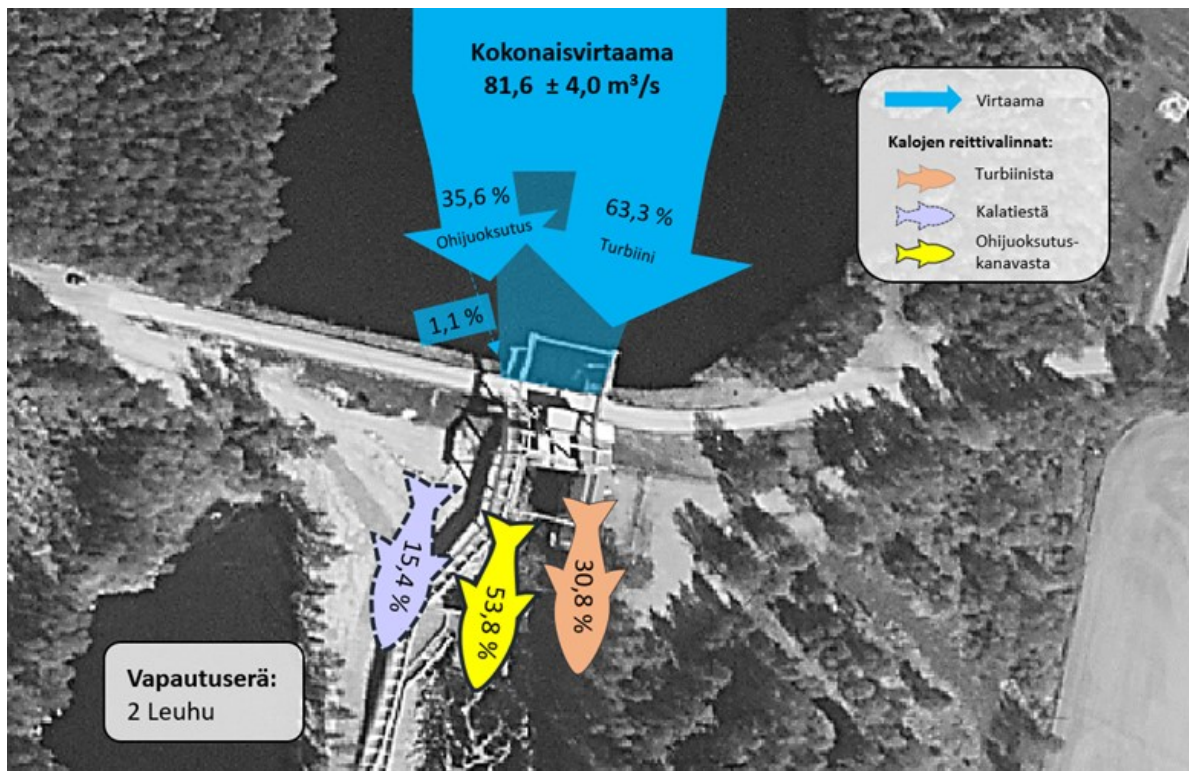
Alasvaelluksella olevat lohikalojen poikaset etenevät jokiuomassa tyypillisesti päävirtauksen mukana ja päätyvät yleensä suoraan voimalaitoksen turbiinikanavan edustalle (esim. Coutant & Whitney 2000; Svendsen ym. 2007). Alasvaeltavien kalojen liikkeisiin padon päällä vaikuttavat mm. virran liikkeet patoaltaalla, virtaaman jakautuminen eri kanaviin, patoaltaan koko ja voimalaitospadon rakenteet (esim. Karppinen ym. 2021).

Turbiinikanavan suulla kiihtyvä virtaus ja välppärakenteet aiheuttavat kaloissa epäröintiä ja kalat jäävät usein voimalaitoksen edustalle uiskentelemaan useiden tuntien, joskus jopa useiden päivien ajaksi (esim. Karppinen 2021). Kalat ovat tällöin alttiina saalistukselle ja patoallaskuolleisuus voi nousta korkeaksi vaelluksen viivästyessä.

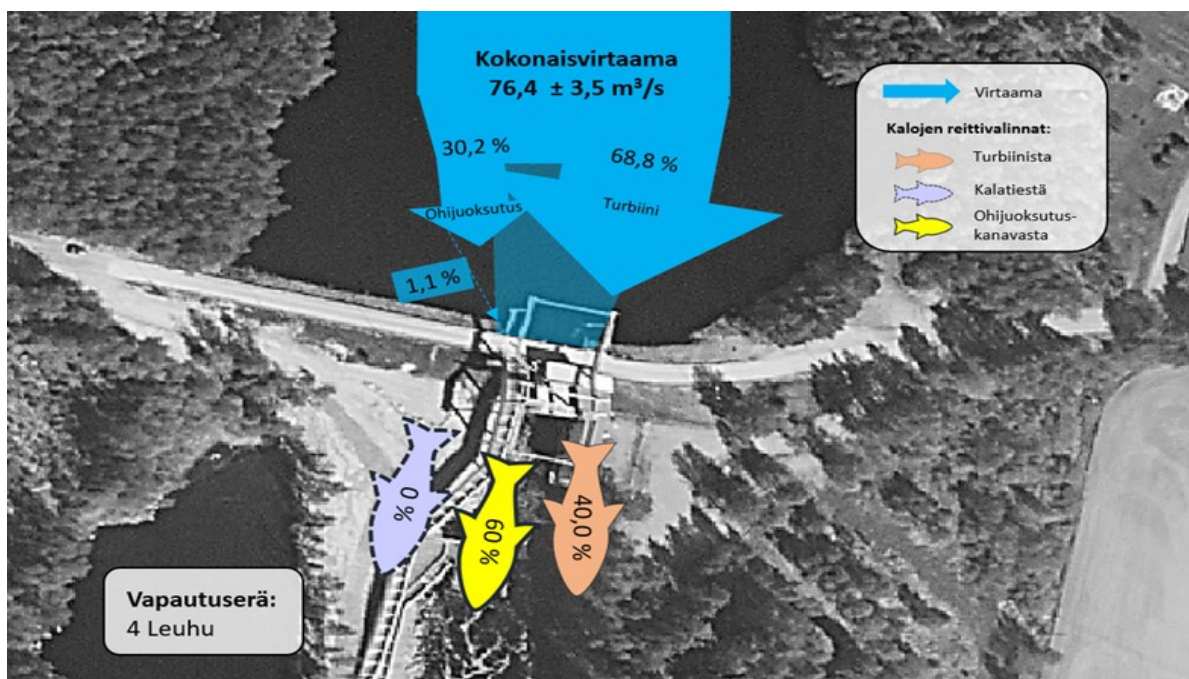
Saarijärven reitin voimalaitoksilla suurin osa kaloista eteni vapautuspaikalta padolle melko nopeasti (mediaani: 0,8 ja 2,0 h vapautuksesta). Suurin osa kaloista myös laskeutui padolta alas suhteellisen nopeasti (mediaani: 2,7 ja 5,2 h vapautuksesta). Patoallaskuolleisuus ei noussut kovin suureksi (noin 10 %). Tulokset ovat varsin samansuuntaisia kuin esimerkiksi vastaavalla tavalla ja olosuhteiltaan lähes vastaavanlaisilla voimalaitoksilla toteutetuissa seurannoissa Mustionjoella (Karppinen ym. 2017, 2021). Mustionjoen Billnäsän ja Åminneforsin voimalaitoksilla kalojen saapuminen vapautuspaikalta voimalaitokselle kesti 0,6–6 tuntia (mediaani), alasmeno noin 11–12 tuntia (mediaani), ja patoallaskuolleisuus oli noin 8–10 % (Karppinen ym. 2017).

4.1. Leuhunkoski

Leuhun voimalaitoksella tulokanava ja ohijuoksutuskanava sijaitsevat vierekkäin ja koko joki-virtaama keskittyy voimalaitoksen kohdalle leveydeltään noin 15 metrin alueelle. Havaintojen perusteella Leuhun voimalaitoksen päällä virtaus kulki suoraan voimalaitoksen edustalle, eikä syvällä pinnan alla ohijuoksutuskanavaan menevää virtaamaa voinut erottaa turbiinikanavaan menevästä virtauksesta. Kalatiehen kulki selvä, mutta hitaampi virtaus ohijuoksutuskanavan vieressä. Kalatiehen menikin Leuhussa sekä lähettimellä että PIT-merkillä merkittyjä kaloja. Ensimmäisestä erästä (Leuhu 2) meni kalatiehen kaksi lähetinkalaa ja mahdollisesti 3–6 PIT-merkittyä kalaa. Toisesta Leuhun vapautuserästä (Leuhu 4) meni kalatiehen 4 tai 5 PIT-merkittyä kalaa, mutta ei yhtään lähetinkalaa. Kalatiehen on siis mahdollisesti mennyt hie-man enemmän kaloja ensimmäisen vapautuserän kohdalla. Ohijuoksutuskanavaan meni suurempi osuus virtaamasta ensimmäisen vapautuserän aikana (Kuva 9 ja Kuva 10), mikä on saat-tanut ohjata kaloja liikkumaan enemmän kalatien suulle.



Kuva 9. Kaavamainen, pelkistetty esitys virtaaman jakautumisesta Leuhun padolla kalojen vapautusta seuraavan 24-tunnin aikana (keskiarvo) sekä vastaavat alas menneiden lähetinkalojen osuudet (erä Leuhu 2). Kalatiehen meni 1,1 % virtaamasta. Sisältää Maanmittauslaitoksen (10/2021) aineistoa.



Kuva 10. Kaavamainen, pelkistetty esitys virtaaman jakautumisesta Leuhun padolla kalojen vapautusta seuraavan 24-tunnin aikana (keskiarvo) sekä vastaavat alas menneiden lähetinkalojen osuudet (erä Leuhu 4). Kalatiehen meni 1,1 % virtaamasta. Sisältää Maanmittauslaitoksen (10/2021) aieistoa.

Leuhunkoskella alasvaellusreitin (voimalaitos vs. ohijuoksutuskanava) määrittämiseen liittyi epävarmuutta, minkä takia laitoksen turbiinikuolleisuuden määrä on vaikeasti arvioitavissa. Sekä voimalaitoksen että ohijuoksutuskanavan kuolleisuusmäärät vaikuttavat olosuhteisiin nähdessä suurilta. On kuitenkin selvää, että alasmenokuolleisuus oli verrattain suurta Leuhun voimalaitoksella. Lohikalojen vaelluspoikaset yleensä välttelevät syvälle sukeltamista eivätkä siksi mene helposti alas syvällä pohjan tuntumassa olevista patoluukuista. Tämän takia Leuhun ohijuoksutuskanavaan menneiksi arvioitujen kalojen osuus vaikuttaa yllättävän suurelta. Ohijuoksutusluukkujen ollessa auki niiden yläreunasta pääsee vuotamaan läpi jonkin verran vettä, joka purkautuu kapeassa väliköössä kovalla paineella suoraan ylhäältä alakanavaan (Kuva 11). Jos kalat ovat menneet alakanavaan tämän raon kautta, niin silloin niiden suuri kuolleisuus vaikuttaa mahdolliselta.



Kuva 11. Leuhun voimalaitoksen ohijuoksutuskanavaan purkautuu kovalla paineella pystysuora vesiputous patoluukun ollessa auki. Kuva: Petri Karppinen.

Leuhun alakanavan osalta suuri kuolleisuus vaikuttaa alakanavan olosuhteiden perusteella ymmärrettävältä. Virtausolosuhteet ovat kapeassa alakanavassa etenkin pienille kaloille varsin haastavat. Liikkuminen ja petokalojen välttely on alakanavassa erittäin vaikeaa. Alakanavassa liikkuu paljon kuhia ja haukia, joita nähdään liikkumassa myös kalatiessä (Kuva 12). Esimerkiksi kaksi alasmenon yhteydessä kuollutta lähietäkalaa joutui selvästi saman petokalan syömäksi – nämä lähettimet liikkui kalatien alaosalla ja ne paikannettiin toistuvasti samasta pisteestä kalatien alaosan altaissa. Viitteitä petokalojen syömistä kaloista saatiin myös PIT-merkkien liikkeistä kalatiessä.



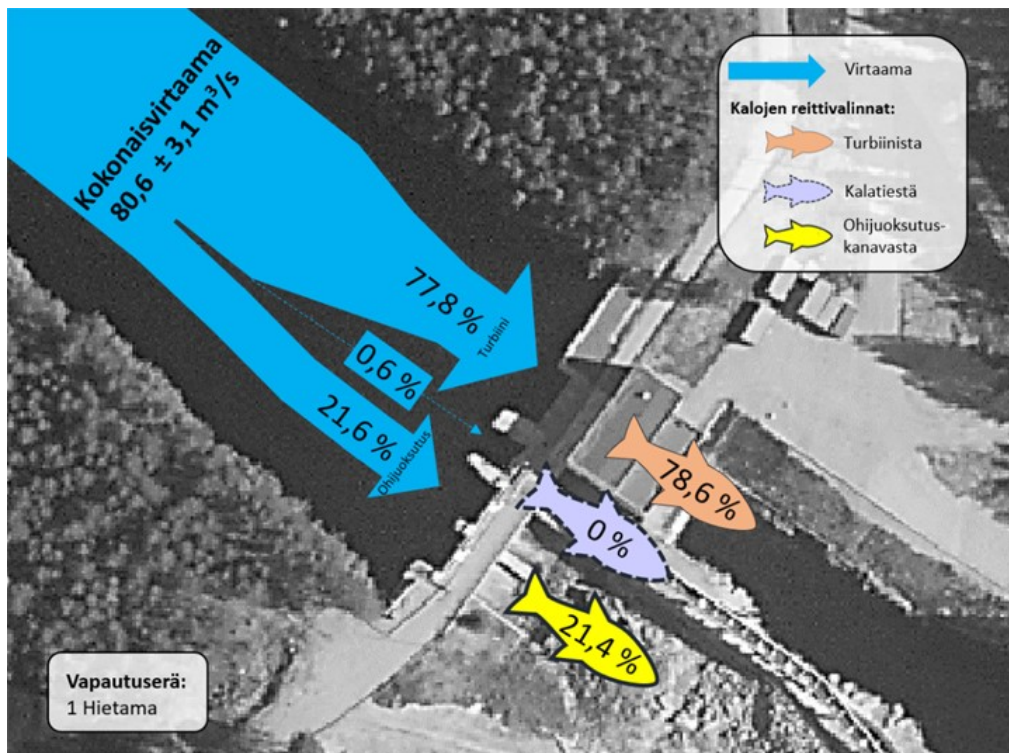
Kuva 12. Leuhun kalatie tyhjennettiin 22.6. PIT-antennien purkamisen ajaksi. Kalatiestä löytyi useita isokokoisia kuhia. Kuva: Tapio Keskinen.

4.2. Hietamankoski

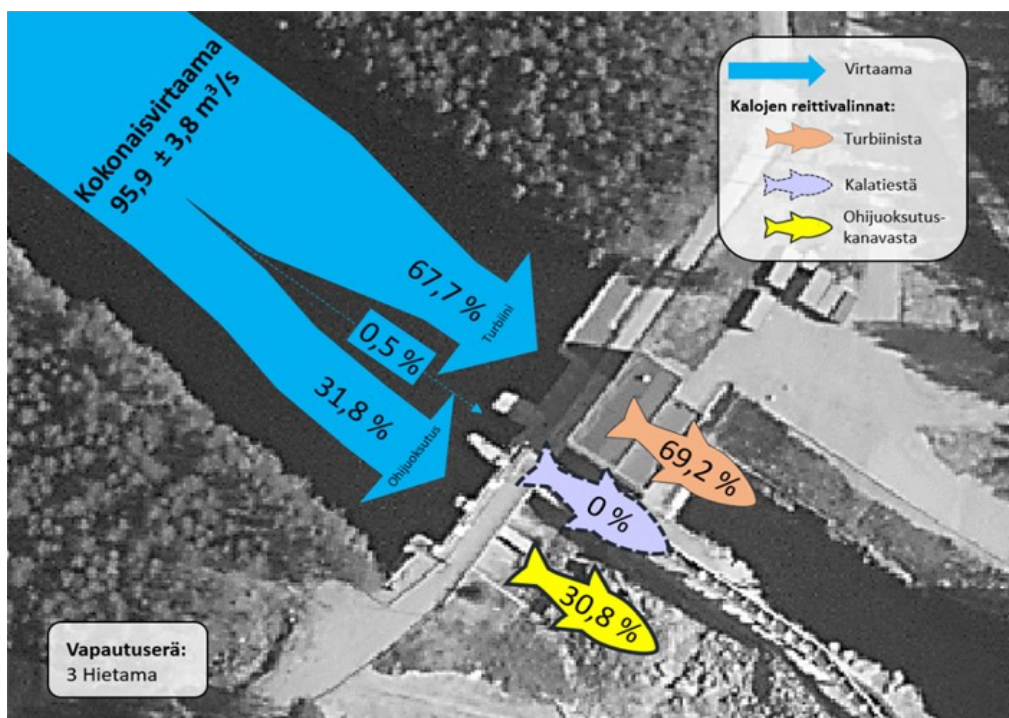
Hietamankoskella jokivirtaama jakautui padolle tultaessa selvästi kahteen osaan turbiinkanavan ja ohijuoksutuskanavan välillä (Kuva 13 ja Kuva 14). Havaintojen perusteella näiden päävirtaus-ten välissä kalatien suuaukon edustalla veden virtaus pysähtyi lähes kokonaan ja kiihtyi uudelleen vasta aivan kalatien suulla. Päästäkseen kalatiehen kalojen olisi pitänyt irtaantua päävirtauksista ja hakeutua tämän pysähtyneen virran kautta virtapilareiden väliin ja kalatien suulle. Hietaman kalatiehen ei hakeutunutkaan ilmeisesti yhtään merkattua taimenen poikasta.

Hietamankoskella kalat laskeutuivat alavirtaan pääosin voimalaitoksen kautta (74 %). Virtaaman selkeä jakautuminen näyttäisi jakaneen myös alavirtaan menneet kalat virtauksien osuuksia vastaavassa suhteessa (Kuva 13 ja Kuva 14). Tämä saattaa heijastella kalojen taipumusta seurata päävirtauksia. Kaloja myös hakeutui enemmän ohijuoksutuskanavaan silloin, kun ohijuoksutuskanavaan meni enemmän vettä. Tämä tuli esiin myös laitosta lähestyvien kalojen liikkeissä: ensimmäisen erän kohdalla suurin osa kaloista havaittiin ensin voimalaitoksen puolella, toisen erän kohdalla taas ensimmäiset havainnot painottuivat selvästi ohijuoksutusuoman puolelle.

Hietaman ohijuoksutuskanavaan menneet kalat selviytyivät alasmenosta, mutta osa kaloista jäi louhikkoiseen ohijuoksutuskanavaan. Kaloilla on voinut olla vaikeuksia päästä pois kivenlohkareiden alta koloista ja onkaloista voimakkaan ohijuoksutusvirtauksen vyöryessä ylitse (ks. kansikuva ja Kuva 6). Ohijuoksutuksen päätyttyä kuivillaan olevassa kanavassa olleet kalat kertyivät kaikki samaan altaaseen, josta niillä ei ollut poispääsyä.



Kuva 13. Kaavamainen, pelkistetty esitys virtaaman jakautumisesta Hietaman padolla kalojen vapautusta seuraavan 24-tunnin aikana (keskiarvo) sekä vastaavat alas menneiden lähetinkalojen osuudet (erä Hietama 1). Kalatiehen meni 0,6 % virtaamasta. Sisältää Maanmittauslaitoksen (10/2021) aineistoa.



Kuva 14. Kaavamainen, pelkistetty esitys virtaaman jakautumisesta Hietaman padolla kalojen vapautusta seuraavan 24-tunnin aikana (keskiarvo) sekä vastaavat alas menneiden lähetinkalojen osuudet (erä Hietama 3). Kalatiehen meni 0,5 % virtaamasta. Sisältää Maanmittauslaitoksen (10/2021) aineistoa.

Turbiinikuolleisuudeksi arvioitiin Hietamassa noin 10 %. Tätä voidaan pitää melko tyypillisenä kuolleisuutena Kaplan-tyyppisissä turbiineissa, joissa kuolleisuudet vaihtelevat yleensä välillä 1–46 % ollen keskimäärin 9–14 % (Ruggles 1980; Larinier 2008; Pracheil ym. 2016). Esimerkiksi vastaavalla tavalla toteutetussa lohien poikasten alasvaellusseurannassa Kymijoella Ahvenkosken voimalaitoksen turbiinikuolleisuudeksi arvioitiin 12 % (Karppinen & Hynninen 2019).

4.3. 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 osaan edellä mainituista seikoista, mutta vielä useammin uusimmissa tutkimuksissa on päädytty siihen, että sisäisellä lähettimellä ei ole osoitettavissa merkittäviä vaikutuksia kaloihin (esim. Brown ym. 2006; Newton ym. 2016).

Luonnossa syntyneiden ja laitosalkuperää olevien lohien (*Salmo salar*) vaelluspoikasten 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 pienemmällä PIT-merkillä merkittyjen (asennus vatsaonteloon injektioneulalla tai pienen viillon kautta) vaelluspoikasten välillä ei niin ikään ole havaittu eroa selviytymisessä (Welch ym. 2008).

Lähettimen vaikutusten minimoimiseksi suositellaan mahdollisimman pienen lähettimen käyttöä suhteessa kalan kokoon. Lähettimen painon suositusrajana on usein käytetty 2 % kalan painosta (Winter 1996). Tätä suuremmilla lähettimillä on kuitenkin tehty sittemmin kokeita ja onnistuneita tutkimuksia, joiden perusteella kyseinen 2 %:n sääntö vaikuttaa heikosti perustelulta (mm. Brown ym. 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 korkeilla padoilla, joissa on suuri putouskorkeus.

Tässä tutkimuksessa lähettimen paino oli keskimäärin 1 % kalan painosta. Kalojen annettiin toipua merkinnästä tavanomaista pitempään (2–3 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 tässä tutkimuksessa käytettyjen kalojen käyttäytymiseen, ja että lähettimen 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 jossakin määrin yliarvioituina.

Lähettimellä varustetuista vaelluspoikasista saadaan pääasiassa vain epäsuoria sijainti- ja liikehavaintoja, eikä seurattavana olevaa kohdetta voida yleensä varmistaa näköhavainnoilla. Poikkeuksellinen käyttäytyminen tai sijainti viittaa yleensä siihen, että vaelluspoikanen on tullut petokalan syömäksi. Esimerkiksi liikkeen pysähtyminen ja kääntyminen kohti ylävirtaa tai lähettimen liikkuminen kaislikossa kertovat, että lähetin on todennäköisesti petokalan sisällä.

Tämä päättely toimii hyvin seurattaessa lohien vaelluspoikasia, jotka pyrkivät alasvaelluksen ollessa käynnissä aktiivisesti kohti alavirtaa. Tässä Saarijärven reitillä toteutetussa seurannassa kohdelajina oli kuitenkin taimen ja erityisesti vielä sen ns. sisävesimuoto. Taimen on elintavoiltaan selvästi monimuotoisempi laji kuin lohi, eikä sen smolttiutuminen ja alasvaellusvietin aktivoituminen ole yhtä selvää kuin lohella. Lohien poikaset pyrkivät alasvaelluksen käynnistyttyä aktiivisesti kohti merta. Taimenella puolestaan poikaset joko vaeltavat kohti merta (sisävesissä kohti suurempia järvi-altaita) tai jäävät paikalliseksi kalaksi virtaavaan veteen ja järvi-altaitiin. Tämä aiheuttaa omat haasteensa taimenpoikasista saatavien liikehavaintojen tulkinnalle. Esimerkiksi laaja-alaiset liikkeet ylävirtaan, jotka lohismolteilla tulkittaisiin syödyn smoltin liikkeiksi petokalan sisällä, voivat olla normaalia käyttäytymistä taimenelle. Tämän takia joidenkin yksilöiden todellinen kohtalo patoaltaalla vapautuspaikan yläpuolella on jossakin määrin epävarma. Näitä yksilöitä oli kuitenkin varsin vähän (3 yks.), ja varsinaisesti epävarmuus liittyykin voimalaitoksen alakanavaan jääneisiin kaloihin lähinnä Hietamassa. Epävarmuus vaikuttaa kuitenkin molempiin suuntiin eli kuolleisuusarviot voivat olla joko liian suuria tai liian pieniä alakanavapredaation osalta. Tämä on pyritty ottamaan huomioon siten, että epävarmoiksi arvioitujen predaatiotapaukset (kala on joko hengissä tai liikkuu petokalan sisässä) ovat omana ryhmänään alakanavan kuolleisuusarvioissa. Molempien voimalaitosten alakanavissa tapahtuvan kuolleisuuden määrää voitaisiin täsmentää toistamalla seuranta radiotelemetrian sijasta akustisella laitteistolla ja tähän tarkoitukseen paremmin sopivilla ns. predaatiolähettimillä.

Leuhun voimalaitoksen alakanavassa kalatien puolella olleille vastaanottimille tallentuneet signaalit olivat joidenkin kalojen kohdalla vaikeasti tulkittavia voimakkaiden radiohäiriöiden takia. Häiriön lähteeksi paikannettiin alakanavaan kalatien sisäänkäynnin edustalle asennettu kala-luotain. Kalatien suulle alakanavaa kuuntelemaan asennettu vastaanotin jouduttiin häiriöiden takia siirtämään ylemmäs kalatielle ensimmäisen erän vapauttamisen jälkeen. Myös voimakas turbulenssi ja pystyvirtaukset sekä turbiini- ja ohijuoksutusvirtaamien sekoittuminen toisiinsa heti padon alla vaikeuttivat kalojen liikkeiden arvioimista alakanavassa. Alasmenoreitin (turbiini vs. ohijuoksutuskanava) määrittämiseen liittyy edellä mainittujen asioiden takia melko suurta epävarmuutta. Leuhun voimalaitoksen läpi menneissä kaloissa on myös yksilöitä, jotka näyttäsivät jääneen ja kuolleen voimalaitoksen rakenteisiin turbiinikanavassa jo ennen alasmenoaa. Kyseiset yksilöt on kirjattu mukaan turbiinikuolleisuuteen, vaikka ne eivät ole välttämättä kuolleet juuri turbiinissa. Edellä mainituista syistä johtuen Leuhunkosken kaloille on laskettu myös yhdistetty voimalakuolleisuus (turbiini + ohijuoksutuskanava), jossa reittiä ja kuolleisuuden aiheuttajaa ei ole eritelty (ks. Taulukko 4). Havaintojen perusteella on kuitenkin ilmeistä, että kaloja kuoli sekä voimalaitoksessa että ohijuoksutuskanavassa. Leuhun voimalaitoksen turbiinikuolleisuuden määrittämiseksi alasvaellusseuranta tulisi toistaa ohijuoksutusluukkujen ollessa suljettuna.

Myös pienet yksilömäärät vaikuttavat tulosten luotettavuuteen. Kalojen kokonaismäärä jakautuu useisiin pienempiin ryhmiin, joissa jo 1–2 yksilön muutokset vaikuttavat prosenttiosuuksiin paljon.

Epävarmuustekijöistä huolimatta seurannan perusteella saatiin hyvä kuva kalojen käyttäytymisestä ja kokonaiskuolleisuudesta voimalaitoksilla sekä eri tekijöiden merkityksestä kuolleisuuden aiheuttajana. PIT-seurannan ja radiolähetinseurannan tulokset tukevat toisiaan.

4.4. Vertailu laskennallisella mallilla saatuihin tuloksiin

Aalto-yliopistossa tehdyssä opinnäytetyössä (Andersson 2015) arvioitiin taimensmolttien alasvaelluskuolleisuutta Leuhussa ja Hietamassa Ruotsissa kehitellyn mallin (Leonardsson 2012,

2014) perusteella. Mallissa huomioidaan mm. voimalaitoksen virtaama ja putouskorkeus, turbiinin ominaisuuksia ja alas vaeltavien kalojen pituus. Anderssonin (2015) laskelmien mukaan Leuhun kuolleisuusarvot ovat yleisesti ottaen suuremmat kuin Hietamassa. Esimerkiksi alle 30 cm pitkille taimenille malli ennustaa 15–25 % kuolleisuuden Leuhussa ja alle 15 % kuolleisuuden Hietamassa.

Anderssonin opinnäytetyössä esitettyjen kaavioiden perusteella taimenen poikasten turbiinikuolleisuuden olisi pitänyt olla tässä tutkimuksessa alle 15 % Leuhussa, ja alle 10 % Hietamassa, kun otetaan huomioon käytettyjen kalojen keskipituus ja voimalaitosten turbiinivirtaama (keskivirtaama vapautusajankohtaa seuraavan vuorokauden aikana: Hietama 63–65 m³/s, Leuhu 52–53 m³/s).

Kalojen lähetinseurannan perusteella arvioitu turbiinikuolleisuus Hietamassa (9,5 %) on yhteneväinen mallintamalla saadun tuloksen kanssa.

Leuhun voimalaitoksen alakanavaan voimalan tai ohijouksutuskanavan kautta laskeutuneiden kalojen kuolleisuus oli 34,6 %, joista voimalaitoksen läpi menneiden kalojen kuolleisuus saattoi olla jopa 50 % (ks. Taulukko 4). Leuhun voimalaitoksen läpi menneissä kaloissa on myös yksilöitä, jotka näyttäisivät jääneen ja kuolleen voimalaitoksen rakenteisiin turbiinkanavassa jo ennen alasmenoa. Kyseiset yksilöt on kirjattu mukaan turbiinikuolleisuuteen vaikka ne eivät ole välttämättä kuolleet juuri turbiinissa. Vaikka kuolleisuuden varsinainen syy ja alasmenoreitti on monen kalan kohdalla epävarma, oli kuolleisuuden taso Leuhussa joka tapauksessa selvästi suurempi (todennäköisesti myös turbiinikuolleisuuden osalta) kuin em. opinnäytetyössä laskeutu arvio.

Voimalaitokset ovat rakenteeltaan muutoin varsin samanlaiset, mutta Hietamassa sekä putouskorkeus että turbiinivirtaama ovat suuremmat kuin Leuhussa. Suuren putouskorkeuden on yleensä ajateltu lisäävän kuolleisuutta. Hietaman ja Leuhun voimalaitokset ovat kuitenkin varsin matalia ja niiden välinen korkeusero on suhteellisen pieni.

Suurempi laitospvirtaama puolestaan oletettavasti vähentää kuolleisuutta. Leuhun voimalaitoksen pienempi virtaama onkin mahdollinen kuolleisuutta lisäävä tekijä. Pienempi virtaama tarkoittaa ahtaampaa vesitietä voimalaitoksessa ja suurempaa todennäköisyyttä esim. törmäyksistä aiheutuville mekaanisille vaurioille.

Voimalaitosten turbiinit ovat muutoin samanlaiset, mutta turbiinin juoksupyörän keskiö on Leuhussa selvästi pienempi. Myös Andersson (2015) arvelee tämän olevan mahdollinen syy kuolleisuuseroihin voimalaitosten välillä. Keskiön koko vaikuttaa juoksupyörän siipien mitta-suhteisiin ja sitä kautta veden läpivirtaukseen turbiinissa, ja tällä voikin olla jossakin määrin vaikutusta kuolleisuuteen.

4.5. Ehdotuksia alasvaelluskuolleisuuden vähentämiseksi

Leuhunkoskella voimalaitoksen ja ohitusjuoksutuksen kautta kulkeneiden kalojen kuolleisuus oli korkea. Kumpikaan em. reiteistä ei siksi ole kelvollinen kalojen alasvaellusreitiksi. Ainoaksi turvallisemmaksi vaihtoehdoksi alasvaellukselle jää nykyisessä tilanteessa kalatie. Kalatien kautta kulkeminen ei kuitenkaan sekään vaikuta kovin turvalliselta vaihtoehdolta. Predaatoriski alakanavassa ja myös kalatien alaosalla on tämän seurannan perusteella varsin suuri. Muitakaan alasmenovaihtoehtoja ei nykytilanteessa kuitenkaan ole, ja kalojen ohjaamiselle patoaltaalta kalatiehen voisi toisaalta olla hyvät mahdollisuudet. Kaloja hakeutui jo nyt jossakin määrin kalatiehen, ja sinne menevien kalojen osuutta voitaisiin todennäköisesti lisätä sopivalla

ohjausrakenteella. Virtaan nähden viistosti voimalaitoksen puolelta kalatien suuta kohti viritetty kelluva ohjainpuomi voisi olla toimiva ratkaisu. Varmempi ratkaisu olisi todennäköisesti kuitenkin joko ns. α - tai β -kalteri (Calles ym. 2013), joilla kaloja saadaan ohjattua tehokkaammin. Tämä vaihtoehto on toisaalta huomattavasti raskaampi ja kalliimpi toteuttaa kuin kelluvat puomi- tai säleikkörakenteet. Toisaalta etenkin α -kalterilla saataisiin kalatiehen ohjattua myös syvemmällä kulkevia kalalajeja pintaan ja keräilykourun kautta edelleen kalatiehen.

Hietaman voimalaitospadolla voimalaitoksen läpi menneiden kalojen kuolleisuus oli alhainen, eikä kalojen ohjaaminen toisaalle ole ehkä välttämätöntä. Ohijuoksutusvirtaamat olivat seuranan aikana suuria, ja kaloja ohjautui nykyisissäkin olosuhteissa ohijuoksutuskanavaan. Voimalaitoksen yläpuolelle asennettavalla ohjausrakenteella (ks. edellinen kappale) ohijuoksutuksen kautta alas menevien kalojen osuutta voitaisiin mahdollisesti lisätä. Tämä edellyttäisi kuitenkin kalojen vapaan kulun turvaamista ohijuoksutuskanavassa. Padon alta voisi raivata pahimmat lohkareet pois kalojen törmäämisen estämiseksi, ja uoman keskelle tulisi raivata avoin uoma kalojen kulkuväyläksi.

Kalatien hyödyntäminen alaskulkuväylänä voisi olla myös mahdollinen vaihtoehto. Kalojen ohjaaminen kalatiehen on kuitenkin todennäköisesti vaikeaa, koska vaikuttaa siltä, että Hietaman kalatien sisäänkäynti ja sinne johtava virtaus eivät nykyisellään houkuttele kaloja.

5. Kiitokset

Kiitokset avusta: Heikki Kuha (JAMK), Veli Tarvainen, Juhana Kulo ja Mikko Tuomi (Empower Oy). Tapio Laaksonen rakensi PIT-antennit ja vastaanottimet molempiin kalateihin, tästä suuri kiitos.

6. Viitteet

- Andersson, A. 2015. Fiskvägar vid småskaliga vattenkraftverk – lösningar för fiskars uppvandring och nedvandring vid kraftverk i Saarijärvileden. Diplomarbete. Aalto Universitetet. Samhälls- och miljöteknik, vatten och miljöteknik.
- 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. *Journal of Fish Biology*, 69: 1626–1638.
- Calles, O., Karlsson, S., Vezza, P., Comoglio, C. & Tielman, J. 2013. Success of low-sloping rack for improving downstream passage of silver eels at a hydroelectric plant. *Freshwater Biology* 58: 2168–2179.
- 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. *North American Journal of Fisheries Management* 32: 249–261.
- Coutant, C. C. & Whitney, R. R. 2000. Fish behavior in relation to passage through hydropower turbines: a review. *Transactions of the American Fisheries Society* 129: 351–380.
- 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.
- Karppinen, P. & Hynninen, M. 2019. Lohen nousuvaellus ja käyttäytyminen Kymijoen länsihaaran voimalaitoksilla syksyllä 2018. Kala- ja vesijulkaisuja 262. Kala- ja vesitutkimus Oy.
- Karppinen, P., Jounela, P., Huusko, R. & Erkinaro, J. 2013. Effects of release timing on migration behaviour and survival of hatchery-reared Atlantic salmon smolts in a regulated river. *Ecology of Freshwater Fish* 23(3): 438–452.
- Karppinen, P., Vähä, J-P. & Vehanen, T. 2017. Lohen vaelluspoikasten käyttäytyminen ja kuolleisuus Mustionjoen voimalaitoksilla. Julkaisu 281/2017. Länsi-Uudenmaan vesi- ja ympäristö ry.
- Karppinen, P., Hynninen, M., Vehanen, T. & Vähä, J-P. 2021. Variations in migration behavior and mortality of Atlantic salmon smolts in four different hydroelectric facilities. *Fisheries Management and Ecology* 28: 253–267.
- Laitinen, K. & Honkanen, V. 2017. Järvitaimenkantojen tila ja elvyttäminen Saarijärven reitillä. Loppuraportti. Saarijärven kaupunki. Moniste 16 s. + liitteet 7 kpl.
- Larinier, M. 2008. Fish passage experience at small-scale hydro-electric power plants in France. *Hydrobiologia*, 609: 97–108.
- Leonardsson, K. 2012. Modellverktyg för beräkning av ålförluster vid vattenkraftverk. Elforsk rapport 12:36. Havs- och vattenmyndigheten.

- Leonardsson, K. 2014. Modellverktyg för beräkning av passageförluster av lax vid kraftverk. Vattenfall Oy:lle käytettäväksi luovutettu ohjelma.
- 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. *Journal of Fish Biology* 89(3): 1641–50.
- 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. *Ecology of Freshwater Fish* 26: 707–718.
- 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.
- 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. *Marine and Coastal Fisheries: Dynamics, Management, and Ecosystem Science* 7: 68–86.
- Svendsen, 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.
- 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. In: Murphy, B. R. & Willis, D. W. eds.). *Fisheries Techniques*, 2nd Edition. American Fisheries Society, Bethesda, Maryland. ss. 555–590.



luke.fi

Luonnonvarakeskus
Latokartanonkaari 9
00790 Helsinki
puh. 029 532 6000