
RKTL:n työraportteja 8/2014

Lohen vaelluspoikasten alasvaellus rakennetuissa joissa – ongelmat ja ratkaisumahdollisuudet

Riina Huusko, Panu Orell, Mikko Jaukkuri, Aki Mäki-Petäys ja Jaakko Erkinaro



Riista- ja kalatalouden tutkimuslaitos, Helsinki
2014



Euroopan unioni
Euroopan aluekehitysrahasto

Vipuvoimaa
EU:lta
2007–2013

Tämä kirjallisuuskatsaus on osa Euroopan aluekehitysrahaston rahoittamaa ”Innovatiivinen verkostoituminen ja modernit työkalut kalatiestrategian toteutukseen” -hanketta, jota Riista- ja kalatalouden tutkimuslaitos (RKTL) toteuttaa vuosina 2012–2014. Kirjallisuuskatsauksen laadinnassa hyödynnettiin lisäksi aineistoja ja tietoja, joita koottiin ”Rakennettujen jokien vaelluskalakantojen hoitotoimenpiteet: menetelmäkirjon arviointi ja kehittäminen” -hankkeessa vuosina 2010–2013. Tämän hankkeen päärahoittajina toimivat Energiateollisuus ry, Fortum Oy, Suomen luonnonsuojeluliiton ekoenergiamerkki (Ekoenergia) sekä maa- ja metsätalousministeriö.



Julkaisija:
Riista- ja kalatalouden tutkimuslaitos
Helsinki 2014

ISBN 978-952-303-105-0 (Verkkojulkaisu)

ISSN 1799-4756 (Verkkojulkaisu)

RKTL 2014

Kuvailulehti

Tekijät Riina Huusko, Panu Orell, Mikko Jaukkuri, Aki Mäki-Petäys ja Jaakko Erkinaro			
Nimeke Lohen vaelluspoikasten alasvaellus rakennetuissa joissa - ongelmat ja ratkaisumahdollisuudet			
Vuosi 2014	Sivumäärä 41	ISBN 978-952-303-105-0	ISSN ISSN 1799-4756 (PDF)
Yksikkö/tutkimusohjelma Tutkimus- ja asiantuntijapalvelut/Rakennettujen jokien tutkimusohjelma			
Hyväksynyt Nina Peuhkuri			
Tiivistelmä <p>Tähän kirjallisuuskatsaukseen on kerätty keskeinen tutkimustieto lohen alasvaellusongelmista ja niiden ratkaisu- vaihtoehtoista rakennetuissa joissa. Kirjallisuuskatsauksen painopiste on lohen vaelluspoikasissa, sillä aikuisten kudulta palaavien talvikoiden alasvaellusta on tutkittu huomattavasti vähemmän. Raportissa käsitellään lisäksi lyhyesti erilaisten tutkimusmenetelmien vaikutusta ja toisaalta lohen vaelluspoikasten alkuperän (villi/viljelty) merkitystä saatuihin tutkimustuloksiin.</p> <p>Tutkimusten perusteella lohen vaelluspoikasten ja talvikoiden alasvaelluksessa esiintyy rakennetuilla joilla suuria ongelmia. Ongelmat korostuvat useiden voimalaitospatojen tapauksissa, joissa kuolleisuus voi nousta erittäin korkeaksi. Rakennetuissa joissa lohen vaelluspoikasten alasvaelluksen keskeisiä ongelmia ovat: vaelluksen hidastuminen, predaatio, turbiinikuolleisuus sekä kalojen vahingoittuminen ja stressaantuminen.</p> <p>Ongelmien vähentämiseksi vaelluspoikaset pitäisi pystyä ohjaamaan nopeasti ja tehokkaasti turbiinit kiertävää reittiä pitkin voimalaitoksen alapuolelle. Vaelluspoikasten ohjaaminen toteutetaan tavallisesti voimalaitosten yläkanaviin asennettujen ohjausrakenteiden ja voimalaitosten turbiinit ohittavan alasvaellusreitit yhdistelmillä. Käytössä olevat ohjausmenetelmät voidaan jakaa karkeasti kahteen eri tyyppiin: rakenteellisiin ohjausmenetelmiin (esim. aitarakenteet) ja käyttäytymiseen (esim. säleikkösuuntaajat ja juoksutusmuutokset) perustuviin ohjausmenetelmiin. Varsinaisena alasvaellusreitteinä ohjausrakenteen yhteydessä voivat toimia mm. putkirakenteet, rännit, nousukaloja varten tehdyt kalatiet sekä säännöstelypadot.</p> <p>Ohjausrakenteiden kehittämisessä ja asentamisessa on aina huomioitava virtausolosuhteiden sopivuus ja houkuttelevuus vaelluspoikasille. Alasvaellusrakenteiden suunnittelu on tehtävä jokaiselle kohteelle erikseen, sillä yleispätevää ratkaisua ei ole onnistuttu kehittämään.</p>			
Asiasanat Lohi, voimalaitos, vaelluksen hidastuminen, turbiinikuolleisuus, predaatio, stressi, ohjausrakenteet, alasvaellusreitti, kuljetus			
Julkaisun verkko-osoite http://www.rktl.fi/www/uploads/pdf/uudet%20julkaisut/tyoraportit/vaelluspoikasten_alasvaellus.pdf			
Yhteydenotot Riina Huusko, riina.huusko@rktl.fi ja Panu Orell, panu.orell@rktl.fi			
Muita tietoja			

Sisällys

Kuvailulehti	3
1. Johdanto	5
2. Lohen smolttivaellus	6
2.1. Viljelykasvatuksen vaikutus vaelluspoikasten ominaisuuksiin	8
2.2. Merkinnän vaikutus vaelluspoikasten käyttäytymiseen	9
3. Smolttivaelluksen ongelmat rakennetuissa joissa	10
3.1. Alasvaelluksen hidastuminen	11
3.2. Predaatio ja predaation merkitys	12
3.3. Turbiinikuolleisuus	14
3.4. Vaellusongelmat säännöstelypadoilla	16
3.5. Stressi ja viivästynyt kuolleisuus	17
4. Alasvaellusongelmien ratkaisumahdollisuudet	17
4.1. Vaelluspoikasten ohjausmenetelmät	18
4.1.1. Rakenteelliset ohjausmenetelmät	18
4.1.2. Käyttäytymiseen perustuvat ohjausmenetelmät	21
4.2. Alasvaellusväylät voimalaitospadoilla	26
4.3. Turbiinikuolleisuuden vähentäminen ja voimalaitosten käyttö	28
4.4. Vaelluspoikasten kuljetus	29
5. Talvikoiden alasvaellus	30
6. Yhteenveto ja johtopäätökset	31
Kiitokset	32
Viitteet	32

1. Johdanto

Atlantin lohi (*Salmo salar* L.) on anadrominen vaelluskala, jonka elinkiertoon kuuluvat lisääntyminen ja poikasvaihe makeassa vedessä ja kasvuvaihe meressä (Klemetsen ym. 2003). Näiden kahden elinympäristön väliset vaellukset ovat siten ensisijaisen tärkeitä lohen elinkierrossa.

Uuden lohisukupolven elinkierto alkaa syksyllä hedelmöittyneiden mätimunien hautoutumisella jokien pohjasora-ajoissa. Poikaset kuoriutuvat mätimunista kevätkesällä (Klemetsen ym. 2003) ja ne kasvavat joessa 1–8-vuotta, jonka jälkeen ne käyvät läpi muodonmuutoksen vaelluspoikasiksi eli smolteiksi. Smoltit vaeltavat kevätkesällä mereisille syönnösalueille suotuisampiin kasvuolosuhteisiin (Metcalf & Thorpe 1990). Vaelluspoikasvaiheen saavuttaminen kestää pohjoisessa kauemmin kuin etelässä, sillä jokipoikasten kasvuun vaikuttavat mm. veden lämpötila ja päivän pituus (Metcalf & Thorpe 1990, Økland ym. 1993).

Lohien kasvuvaihe meressä kestää tavallisesti yhdestä kolmeen vuotta, minkä jälkeen lohet sukukypsyvät ja vaeltavat mereltä takaisin syntymäjokiinsa. Lohien kutuvaelluksen ajoittuminen vaihtelee jokien välillä, mutta yleisesti vaellus ajoittuu alkukesän ja alkusyksyn väliselle ajalle (Klemetsen ym. 2003, Niemelä ym. 2006a). Kudun rasiuksista selviytyneet lohet palaavat takaisin merelle joko pian kudun päätyttyä tai vasta kutua seuraavana keväänä (Scruton ym. 2008). Merelle palaavat kuteeet yksilöt voivat myöhemmin palata uudelleen kudulle ja ne ovat monissa joissa tärkeä ja merkittävä lohikantojen osa (Ruggles 1980, Arnekleiv ym. 2007, Niemelä ym. 2006b).

Rakennetuissa joissa lohen elinkierrossa on usein merkittäviä ongelmia, sillä kalojen vaellusyhteydet lisääntymis- ja kasvualueiden välillä ovat tavallisesti heikentyneet tai jopa kokonaan katkenneet (kuva 1). Vaellusyhteyksien heikentyminen vaikuttaa negatiivisesti sekä lohen alasvaelluksiin (smoltit, talvikot) että nousuvaellukseen (kutuvaellus) (Calles & Greenberg 2009).

Nousuvaelluksen osalta vaellusyhteyksiä on rakennetuissa joissa avattu ja ylläpidetty kalateiden avulla (Ferguson ym. 2005, Larinier 2008, Muir & Williams 2012). Kalateiden suunnitteluun, rakentamiseen ja säätämiseen on maailmalla käytetty paljon resursseja, ja verraten hyvin toimivia ratkaisuja on onnistuttu kehittämään (Clay 1995, FAO/DVWK 2002). Lohen alasvaellusmahdollisuuksiin ei sitä vastoin ole kiinnitetty yhtä paljon huomioita, vaikkakin viime aikoina asian merkityksellisyys on ymmärretty laajemmin (kuva 1). Useiden tutkimusten ja selvitysten perusteella on selvää, että rakennetuissa joissa lohen vaelluspoikasten ja talvikoiden alasvaelluksissa voi olla suuria ongelmia ja vaihtoehtoisille vaellusmahdollisuuksille ja -reiteille on tarvetta (Coutant & Whitney 2000, Scruton ym. 2002, Calles & Greenberg 2009, Huusko ym. 2012).

Lohen vaelluspoikasten alasvaellusongelmat ovat Suomessa erittäin ajankohtaisia, sillä useisiin rakennettuihin jokiimme pyritään palauttamaan luonnonvaraisesti lisääntyviä lohikantoja. Luonnonvaraisesti lisääntyvien lohikantojen kestävä elvyttäminen edellyttää kalateiden ohella lohen alasvaellusyhteyksien parantamista (Huusko ym. 2012). Mikäli smolttien ja talvikoiden alasvaelluskuolleisuutta ei saada riittävän alhaiseksi, ei pelkällä kalateiden rakentamisella ole saavutettavissa merkittäviä tuloksia lohikantojen elvyttämishankkeissa (Mäki-Petäys ym. 2012, 2013).

Tähän kirjallisuuskatsaukseen on kerätty keskeinen tutkimustieto lohen alasvaellusongelmista ja niiden ratkaisuvaihtoehdoista rakennetuissa joissa. Kirjallisuuskatsauksen painopiste on vaelluspoikasissa, sillä aikuisten kudulta palaavien talvikoiden alasvaellusta on tutkittu huomattavasti vähemmän. Kirjallisuuskatsauksessa on hyödynnetty tutkimustietoa myös muilta vaelluskalalajeilta, mm. taime-nelta (*Salmo trutta* L.) sekä *Oncorhynchus*-suvun lohikaloilta, joiden elinkierto on pääosin samankal-

tainen kuin lohella. Raportissa käsitellään lisäksi erilaisten tutkimusmenetelmien vaikutusta ja toisaalta lohen vaelluspoikasten alkuperän (villi/viljelty) merkitystä saatuihin tutkimustuloksiin.



Kuva 1. Vesivoimalaitosten rakentaminen on heikentänyt tai katkaissut kalojen vaellusyhteyksiä. Viime vuosina on havaittu, että voimalaitokset ovat vaikuttaneet merkittävästi myös vaelluskalojen alasvaelluksen onnistumiseen. Kuva: Kemijoki Oy

2. Lohen smolttivaellus

Lohenpoikasten vaellus jokiympäristöstä mereen on lohikalojen elinkierron suurimpia muutoksia. Smolttivaellukselle lähtevien poikasten morfologiassa, fysiologiassa ja käyttäytymisessä tapahtuu muutoksia jo vaellusta edeltävän talven aikana sekä vielä keväällä-kesällä vaelluksen alkamisen jälkeen (Hoar 1976, Virtanen 1988, Thorpe 1994, McCormick ym. 1998). Smolttivaellus ajoittuu kevätkesälle suhteellisen lyhyelle ajanjaksolle (Lundqvist ym. 1988, Metcalfe & Thorpe 1990). Vaelluksen ajoittumisessa on kuitenkin merkittäviä eroja jokien välillä (Metcalfe & Thorpe 1990, Otero ym. 2013).

Valojakson (=päivän pituus) muutokset ja veden lämpötila vaikuttavat smolttivaelluksen käynnistymiseen keväällä (Hoar 1976, Jonsson 1991, McCormick ym. 1998, Byrne ym. 2003, Otero ym. 2013). Päivän piteneminen käynnistää lohen poikasissa fysiologiset muutokset, jotka johtavat suolansietokyvyn kehittymiseen (McCormick ym. 1998). Suolansietokyvyn kehittyminen on tärkeimpiä smolttiutumiseen liittyvistä muutoksista, sillä smolttivaelluksen lopussa vaelluspoikasten on pärjättävä merivedessä (McCormick ym. 1998). Vaellukselle lähtevillä poikasilla vararavinnon käyttö tehostuu (McCormick ym. 1998) ja niiden kylkien väriytyy muuttuu kauttaaltaan hopeanhoitoiseksi (Metcalfe &

Thorpe 1990). Kaikki saman vuosiluokan poikaset eivät kuitenkaan lähde vaellukselle samanikäisinä, vaan smolttituminen on yksilöllistä ja siihen vaikuttavat poikasvaiheen ympäristöolosuhteet ja yksilön ominaisuudet (Metcalf & Thorpe 1990).

Byrne ym. (2003) havaitsivat päivän pituuden ja veden lämpötilan selittävän yhdessä parhaiten smolttivaelluksen ajoittumista Länsi-Irlannin Burrishoole-joella. Päivän pituuden lisäksi useissa tutkimuksissa veden lämpötilan on todettu olevan vahvasti sidoksissa smolttivaelluksen käynnistymiseen ja ajoittumiseen (Solomon 1978, Jonsson & Ruud-Hansen 1985, Hvidsten ym. 1995, Erkinaro ym. 1998, Antonsson & Gudjonsson 2002, Jutila ym. 2005, Otero ym. 2013). Smolttivaellus alkaa tavallisesti, kun veden lämpötila saavuttaa noin 10 °C tason (Solomon 1978, Jutila ym. 2005, Orell ym. 2007, Otero ym. 2013). Joissakin tutkimuksissa smolttien on toisaalta havaittu vaeltaneen jo alhaisemmissa (alle 5 °C) veden lämpötiloissa (Hesthagen & Garnås 1986, Hvidsten ym. 1995, Byrne ym. 2003, Carlsen ym. 2004). Vaelluksen alkamisen ajankohdan on myös esitetty määräytyvän keväällä veden lämpötilan kumulatiivisen lämpösumman mukaan, jolloin yksittäisten päivien lämpötiloilla ei ole niin suurta merkitystä vaelluksen ajoittumisessa (Zydlewski ym. 2005). Lämpösummaan perustuva vaelluksen ajoittumista tukee myös Whalenin ym. (1999) havainto siitä, että kylmempien sivujoien smolttien vaellushuippu ajoittuu keväällä myöhemmäksi.

Joissakin tutkimuksissa smolttivaelluksen käynnistyminen ja ajoittuminen on liitetty myös virtaaman kasvuun (Hesthagen & Garnås 1986, Jonsson 1991, Erkinaro ym. 1998), mutta kokonaisuudessaan virtaaman muutoksilla ei kuitenkaan ole niin selvää vaikutusta smolttivaelluksen käynnistymiseen ja ajoittumiseen kuin veden lämpötilalla. Esimerkiksi Jutila ym. (2005) eivät havainneet yhteyttä vaelluksen ajoittumisen ja joen virtaaman välillä. Kuitenkin Whalen ym. (1999) havaitsivat virtaaman kasvun lisäävän vaellusaktiivisuutta, kun vaelluspoikasten fysiologiset ominaisuudet olivat vaelluksen kannalta optimaaliset. Virtaamamuutos ennen tai jälkeen tämän ajankohdan ei vaikuttanut smolttien vaellukseen (Whalen ym. 1999).

Vaellukselle lähtevät poikaset luopuvat reviirikäyttäytymisestään ja vaeltavat alavirtaan tavallisesti yksittäin ja pienissä parvissa (Wootton 1990, Davidsen ym. 2005, Orell ym. 2007). Parveutumisen on esitetty tarjoavan yksilöille suojaa predaatiolta ja vähentävän eksymisriskiä vaelluksen aikana (Wootton 1990). Aikaisemmin smolttien vaelluksen ajateltiin olevan passiivista kulkeutumista virran mukana (esim. Thorpe ym. 1988). Uudemmissa tutkimuksissa smolttien on kuitenkin havaittu reagoivan virtausolosuhteisiin ja liikkuvan aktiivisesti haluamaansa suuntaan virtausolosuhteiden muuttuessa (Peake & McKinley 1998, Castro-Santos 2005, Goodwin ym. 2006, Kraabøl ym. 2008, Pedersen ym. 2008). Useissa tutkimuksissa smolttivaelluksen on havaittu painottuvan yöaikaan (Hvidsten ym. 1995, Carlsen ym. 2004, Riley ym. 2007, Fjeldstad ym. 2012), mutta korkeissa veden lämpötiloissa (Moore ym. 1995, Ibbotson ym. 2006) tai alueilla, missä on valoisaa öisinkin (Davidsen ym. 2005, Orell ym. 2007), smolttien vaellus on aktiivista ympäri vuorokauden.

Lohen vaelluspoikasten oikea-aikainen alasvaellus on niiden selviytymisen kannalta ensiarvoisen tärkeää, sillä ensimmäiset meriviikot ovat selviytymisen kannalta kriittisiä (Dieperink ym. 2001, Otero ym. 2013 ja viitteet siinä). Vaeltavien smolttien tulisi saapua merialueelle ajankohtana, jolloin meren lämpötila- ja ravinto-olosuhteet (riittävästi sopivaa ravintoa) ovat poikasille optimaaliset. Tällöin vaelluspoikasten selviytyminen on korkeimmillaan (Hoar 1976, McCormick ym. 1998, Scheuerell ym. 2009).

2.1. Viljelykasvatuksen vaikutus vaelluspoikasten ominaisuuksiin

Lohikantojen palauttamishankkeissa ja niihin liittyvissä tutkimuksissa käytetään usein viljelyalkuperää olevia istutuskaloja, koska luonnonvaraisia yksilöitä ei yksinkertaisesti ole käytettävissä.

Kalanviljelylaitosten ja luonnon elinympäristöjen välillä on merkittäviä eroja mm. fyysikaalisissa muuttujissa (esim. virtaama- ja lämpöolot) sekä lajin sisäisten (esim. kilpailu) ja lajien välisten (esim. loisinta ja predaatio) vuorovaikutusten suhteissa (Youngston & Verspoor 1998). Lisäksi viljeltyjen ja luonnossa kasvaneiden vaelluspoikasten morfologia, fysiologia ja käyttäytyminen voivat poiketa toisistaan elinympäristöerojen seurauksena (Gross 1998, Poole ym. 2003, Weber & Fausch 2003, Jonsson & Jonsson 2006).

Viljeltyjen lohen poikasten kasvu on nopeampaa kuin luonnossa (Jonsson & Jonsson 2006), ja poikasten ruokinnassa käytetyn rehun sisältämä energiapitoisuus on noin 5-kertainen luonnonravintoon verrattuna (Eriksson ym. 2008). Tämän seurauksena viljeltyt vaelluspoikaset ovat smolttiutessaan kooltaan merkittävästi luonnonpoikasia suurempia (Poole ym. 2003, Pasternack ym. 2008) ja niiden rasvapitoisuus voi olla jopa 2–3-kertainen luonnossa kasvaneisiin vaelluspoikasiin verrattuna (Eriksson ym. 2008, Pasternack ym. 2008). Toisaalta viljeltyjen vaelluspoikasten evävauriot ovat huomattavasti yleisempiä kuin luonnollisessa elinympäristössä kasvaneiden (Pasternack ym. 2008). Evävaurioiden ensisijaista aiheuttajaa ei täysin tunneta, mutta vaurioiden syntyyn vaikuttavat muun muassa kalatiheys (Winfree ym. 1998) ja poikasten aggressiivinen käyttäytyminen (MacLean ym. 2000, Ellis ym. 2002). Viljeltyjen poikasten evävauriot syntyvät ja pahenevat pääasiassa smolttivaellusta edeltävänä talvena (Vehanen ym. 1993).

Suuremmasta koostaan huolimatta viljeltyjen vaelluspoikasten selviytyminen on usein selvästi heikompaa kuin luonnossa kasvaneiden vaelluspoikasten, minkä on esitetty olevan seurausta luonnollisen elinympäristön ja luonnonvalinnan puutteesta (Youngston & Verspoor 1998, Huntingford 2004, Jonsson & Jonsson 2006). Luonnossa vaelluspoikasikään selviää tavallisesti vain 1–2 % kuoriutuneista poikasista, kun laitospoikasikään selviää joko 60–90 % (Eriksson ym. 2008). Laitospoikasiksi selviää siis myös yksilöitä, jotka olisivat luonnossa karsiutuneet luonnonvalinnan seurauksena jo ennen vaelluspoikasvaihetta.

Viljeltyjen vaelluspoikasten heikomman menestymisen varsinaisia syitä on useita. Tutkimuksissa on havaittu, että viljeltyt poikaset ovat esimerkiksi luonnonvaraisia poikasia huonompia petojen välttelijöitä (Einum & Fleming 1997) ja heikompia uimareita (Anttila 2009). Lisäksi smolttivaelluksesta selviytymiseen vaikuttaa kalojen vaellusaktiivisuus. Tutkimusten mukaan laihemmat smoltit lähtevät aktiivisemmin alasvaellukselle ja selviävät siten myös paremmin merelle (Olsson & Greenberg 2004, Olsson ym. 2006). Syynä tähän voivat olla laihempien smolttien nopeampi vaellusvauhti ja suurempi motivaatio päästä merelle parempiin ravinto-olosuhteisiin (Olsson ym. 2006, Eriksson ym. 2008).

Viljeltyjen vaelluspoikasten käyttäminen lohikantojen kotiuttamisessa ja siihen liittyvässä tutkimuksessa vaikuttaa tuloksiin ja niistä tehtäviin johtopäätöksiin. Luonnonkaloja käytettäessä tutkimusten tulokset ja johtopäätökset saattaisivat olla huomattavasti parempia ja positiivisempia kuin viljelykaloihin perustuvissa tutkimuksissa (Plumb ym. 2006, Hyvärinen & Rodewald 2013). Toisaalta on myös huomioitava, että monissa lohikantojen palautus- ja elvytyshankkeissa joudutaan joka tapauksessa istuttamaan kaloja, jolloin viljelyalkuperää olevat kalat muodostavat pitkän aikaa ainakin osan lohipopulaatiosta.

2.2. Merkinnän vaikutus vaelluspoikasten käyttäytymiseen

Lohen vaelluspoikasten selviytymis- ja käyttäytymistutkimukset rakennetuilla joilla perustuvat pääosin kalojen merkintöihin, mm. radiotelemetriaan (kuva 2). Merkittyjen yksilöiden seurannasta saatuja tuloksia voidaan yleistää koko populaatioon kuitenkin vain, jos merkinnällä ei ole huomattavaa vaikutusta tutkittavan yksilön käyttäytymiseen (Baras & Lagardère 1995, Jepsen ym. 2002). Kalojen telemetriamerkinnöissä on yleisesti ollut käytössä ns. 2 % -sääntö, jonka mukaan merkinnän ei oleteta vaikuttavan merkittyyn yksilöön, jos käytetyn merkin paino on alle 2 % yksilön omasta painosta (Winter 1996). Viimeaikoina tätä sääntöä on kuitenkin kritisoitu, sillä merkinnän vaikutus voi vaihdella lajin, kalan koon tai alkuperän mukaan (Peake ym. 1997, Jepsen ym. 2005). Lacroixin ym. (2004) tutkimuksen perusteella esimerkiksi lohen vaelluspoikasilla radiolähettimen pituus saisi olla enintään 16 % kalan pituudesta ja paino alle 8 % kalan painosta.

Kokeellisissa tutkimuksissa kirurgisella kalamerkinnällä ei ole havaittu pitkäaikaisvaikutusta viljeltyjen lohikalojen vaelluspoikasten uintikykyyn (Moore ym. 1990, Peake ym. 1997, Adams ym. 1998, Brown ym. 1999), mutta merkintä voi alentaa poikasten uintikykyä vuorokauden (Adams ym. 1998) tai vielä noin viikon ajan (Lacroix ym. 2004) merkinnän jälkeen. Myös luonnossa kasvaneilla vaelluspoikasilla merkintä heikensi poikasten uintikykyä noin vuorokauden ajan merkinnän jälkeen (Peake ym. 1997).

Radiotelemetriamerkintä voi lisätä vaelluspoikasten predaatioherkkyyttä. Adams ym. (1998) havaitsivat radiolähettimellä merkittyjen kuningaslohen poikasten jäävän jopa kolme kertaa todennäköisemmin saaliiksi kuin merkitsemättömien poikasten. Heidän tutkimuksessaan kalan ulkopuolelle tuleva antennikaapeli oli 2-3-kertaa kalanmittainen. Kalan ulkopuolisen antennikaapelin pituus voi osaltaan vaikuttaa yksilön predaatioalttiuteen, sillä lohen vaelluspoikasilla tehdyssä tutkimuksessa yksilöiden havaittiin käyttäytyvän aggressiivisesti sekä omaa että toisen yksilön antennikaapelia kohtaan, ja yhden merkitsemättömän poikasen havaittiin jopa raahaavan merkittyä poikasta antennikaapelista lyhyen matkan (Connors ym. 2002). Lisäksi pitkän (300 mm) antennikaapelin on havaittu heikentävän kirjolohen poikasten uintikykyä, mutta tätä lyhyemmällä antennikaapelin pituuksilla vaikutusta ei havaittu (Murchie ym. 2004). Toisaalta kaikissa tutkimuksissa ei ole havaittu eroa predaatioalttiudessa telemetriamerkittyjen ja merkitsemättömien yksilöiden välillä (Brown ym. 1999, Anglea ym. 2004, Jepsen ym. 2008).

Luonnonolosuhteissa tehdyissä tutkimuksissa radiotelemetriamerkittyjen ja merkitsemättömien *Oncorhynchus*-suvun vaelluspoikasten selviytyminen noin 100 km vaellusmatkalla on ollut samansuuruisia (Skalski ym. 2001, Hockersmith ym. 2003, Johnson ym. 2010). Vastaavasti Jepsen ym. (1998) eivät havainneet tutkimuksessaan eroa selviytymisessä lohen ja taimenen vaelluspoikasilla radiolähettimellä merkittyjen ja merkitsemättömien välillä.

Hockersmith ym. (2003) ja Brown ym. (2013) havaitsivat akustisella radiolähettimellä merkittyjen vaelluspoikasten selviytymisen olevan heikompaa kuin merkitsemättömillä pitkällä, yli 200 km:n, vaellusmatkalla (neljä patoa ja patoallasta) Kolumbiajoella. Useamman padon ohitus turbiinien kautta voi heikentää kirurgisesti merkittyjen poikasten selviytymistä, sillä turbiinin läpäisyn aikana tapahtuvat nopeat paineen muutokset vahingoittavat merkittyjä poikasia useammin kuin merkitsemättömiä (Carlson ym. 2012). Lisäksi vahingoittumisriski turbiinin läpäisyssä kasvoi, kun merkin koon suhde kalan kokoon kasvoi (Carlson ym. 2012).

Merkittyjen vaelluspoikasten seurannoissa onkin huomioitava, että kuolleisuus voidaan arvioida korkeammaksi, kuin se olisi merkitsemättömien poikasten kohdalla (kuva 2). Seurantojen tuloksia

voidaankin pitää kuolleisuuden maksimitasona, johon sisältyy ainakin jonkun verran merkinnästä johtuvaa epäsuoraa kuolleisuutta. Lisäksi rakennettujen jokien vaelluspoikastutkimuksissa käytetään usein merkittäviä laitoskasvatettuja yksilöitä, jolloin saadut tulokset edustanevat kaikkien huonointa selviytymistä. Selviytyminen luonnonvaraisilla ja merkitsemättömillä vaelluspoikasilla on todennäköisesti huomattavasti parempaa.



Kuva 2. Lohen vaelluspoikasten selviytymis- ja käyttäytymistutkimukset toteutetaan usein radiotelemetriaseurannoin. Radiolähetinmerkintä ja kalojen käsittely vaikuttavat osaltaan saatuihin tuloksiin. Kuva: RKTL

3. Smolttivaelluksen ongelmat rakennetuissa joissa

Vesivoimalaitoksen rakentaminen muuttaa suuresti joen virtausolosuhteita ja morfologiaa, mm. syvyyttä, virrannopeutta, kaltevuutta ja uomarakennetta. Näillä elinympäristömuutoksilla on huomattavia vaikutuksia rakennettujen jokien ekosysteemeihin ja vaelluskalat ovat yksi jokien rakentamisesta eniten kärsivistä eläinryhmistä (kuva 3).

Alasvaeltavien lohen vaelluspoikasten kannalta yksi rakennettujen jokien keskeinen ongelma on voimalaitosten turbiinit, joiden läpi smolttien on monissa tapauksissa uitava päästäkseen mereisille syönnösalueilleen. Ongelma korostuu kohteissa, joissa smolttien vaellusaikana vesi juoksutetaan kokonaisuudessaan turbiinien läpi, eikä ohijuoksutuksia säännöstelypatojen kautta ole. Voimalaitosturbiinien läpäisy lisää tavallisesti vaelluspoikasten kuolleisuutta (Ferguson 2008) ja voimalaitospadot sekä patojen väliset jokiosuudet, ns. patoaltaat, hidastavat vaellusta (Coutant & Whitney 2000, Scruton ym. 2007). Hitaan virtauksen patoaltaat ovat myös sopivia elinympäristöjä monille petokaloille, mikä lisää smolttien predaatiokuolleisuutta vaelluksen aikana (Jepsen ym. 1998, Schilt 2007). Lisäksi voimalaitospatojen läpäisy (mm. painevaikutus) ja voimalan alapuoliset pyörteiset virtaukset stressaavat vaelluspoikasiasia, mikä voi vaikuttaa smolttien selviytymiseen jokivaelluksen aikana (Čada 2001)

tai vasta myöhemmissä elinkierron vaiheissa (Budy ym. 2002, McCormick ym. 2009), vaikka suoraa kuolleisuutta ei esiintyisikään.

Alasvaelluksen ongelmat jokivaelluksella voivat vaikuttaa poikasten selviytymiseen post-smolttivaiheessa merellä. Merelle saapumisen ajoittuminen on selviytymisen kannalta hyvin tärkeää: vaelluspoikasten tulisi saapua merelle silloin, kun niiden fysiologinen valmius sopeutua suolaiseen meriveteen on parhaimmillaan ja meren ympäristöolosuhteet, mm. lämpötila ja ravintovarot, ovat vaelluspoikasten kannalta optimaaliset (McCormick ym. 1998). Liian aikaisin tai liian myöhään merelle saapuvien vaelluspoikasten selviytyminen on heikompaa, koska vaelluspoikasten suolansietokyky on heikempi (McCormick ym. 1998), predaatio merellä voimakkaampaa (McCormick ym. 1998, Mäntyniemi ym. 2012, Thorstad ym. 2012) ja/tai sopivaa ravintoa ei ole tarpeeksi (Salminen ym. 2001, Hvidsten ym. 2009, Rikardsen & Denpson 2011).



Kuva 3. Vesivoimalaitosten rakentaminen on muuttanut suuresti jokien virtausolosuhteita ja uomamorfologiaa. Kuva: Panu Orell

3.1. Alasvaelluksen hidastuminen

Voimalaitosten väliset patoaltaat sisältävät usein järvimäisiä, hitaasti virtaavia osuuksia. Smolttien vaellusnopeus hidastuu virtausnopeuden laskiessa ja toisaalta järvimäisillä altailla myös voimakkaat vastavirtaan puhaltavat tuulet voivat sekoittaa veden pintakerroksessa vaeltavien smolttien suuntautumista (Olsson ym. 2001). Smolttien vaellusnopeuden on havaittu hidastuvan selvästi myös patoa lähestyessä (Venditti ym. 2000, Johnson & Moursund 2000, Svendsen ym. 2011) ja smoltit voivat pysytellä pitkiäkin aikoja voimalaitoksen yläkanavassa ennen laskeutumista padon ohitse (Nettles & Gloss 1987, Venditti ym. 2000, Rivinoja 2005, Scruton ym. 2007, Huusko ym. 2012). Esimerkiksi Kanadan Exploits-joella vaelluspoikaset viipyivät Bishops Falls'n voimalaitospadon yläpuolella keskimää-

rin yli vuorokauden ajan (Scruton ym. 2007). Voimalaitospatojen vaellusta hidastavan vaikutuksen on esitetty johtuvan vaelluspoikasten vaikeuksista löytää reittiä padon alapuolelle, mikä on seurausta sekä virtaaman muutoksista patojen yläpuolella että voimalaitosten rakenteesta (Venditti ym. 2000, Schilt 2007, Huusko ym. 2012).

Tutkimuksissa smolttien on todettu vaeltavan voimalaitosten syvissä yläkanavissa vesimassan yläosassa (ks. Whitney ym. 1997, Coutant & Whitney 2000, Rivinoja 2005), jolloin alasvaellusreitit sisäänkäynnin sijoittuminen vesipatsaassa vaikuttaa siihen, miten hyvin vaelluspoikaset hakeutuvat sen kautta alavirtaan. Voimalaitosten turbiinien vedenottoaukot sijaitsevat usein verraten syvällä, mistä syystä alasvaellusreittiä etsivät vaelluspoikaset eivät välttämättä löydä niitä (Coutant & Whitney 2000). Esimerkiksi Iijolla tehdyissä smolttien radiotelemetriatutkimuksissa havaittiin vaelluspoikasten pysähtyvän useammin ja pidemmäksi aikaa voimalaitoksen yläpuolelle, jonka vedenotto tapahtui syvämmältä (11 m) kuin muissa voimalaitoksissa (Huusko ym. 2012). Snake- ja Kolumbijajoilla tehdyissä tutkimuksissa *Oncorhynchus*-suvun lohikalojen vaelluspoikasilla on havaittu selvä vuorokausirytmäisyys eri syvyydellä sijaitsevien reittien valinnassa: valoisaan aikaan vaelluspoikaset suosivat alasvaellusreittejä, joiden sisäänkäynti sijaitsee vesipatsaan yläosassa ja hämärän tultua vaelluspoikaset alkavat hakeutua voimalan ohi myös sellaisten reittien kautta, joiden sisäänkäynti on syvemmällä vesipatsaassa (Thorne & Johnson 1993, Whitney ym. 1997, Venditti ym. 2000, Beeman & Mayle 2001).

Varsinaisen voimalaitoksen läpäisyn jälkeen voimalaitoksen alapuolen turbiinin imuputken ja alakanavan pyörteiset virtausolosuhteet voivat sekoittaa vaelluspoikasten suuntautumista ja siten osaltaan aiheuttaa vaelluksen väliaikaista pysähtymistä tai hidastumista (Coutant & Whitney 2000).

Kokonaisuutena tarkasteltuna voimalaitossysteemin (patoallas-voimalaitos-alakanava-patoallas) aiheuttama vaelluksen hidastuminen pidentää vaelluspoikasten predaatiolle altistumisen aikaa ja lisää siten predaatiotappioita vaelluksen aikana (Jepsen ym. 1998, Aarestrup ym. 2002, Huusko ym. 2012). Smolttien vaelluksen hidastumista tulisikin tästä syystä vähentää mahdollisimman tehokkaasti (Castro-Santos & Haro 2003).

3.2. Predaatio ja predaation merkitys

Smolttien alasvaelluksen aikana suurin haaste on elossa säilyminen, sillä vaeltavat smoltit ovat erityisen alttiita predaatiolle (Larsson 1985, Kekäläinen 2005). Yleisesti predaation voimakkuuteen vaikuttavat useat tekijät, kuten saaliin ja saalistajan tiheydet alueella, saaliin ja saalistajan koko, yhteisön rakenne sekä abioottiset tekijät (Mather 1998 ja viitteet siinä). Esimerkiksi yksilön koon vaikutus perustuu uintinopeuteen: suuremmalla saaliskalalla on paremmat mahdollisuudet päästä karkuun, koska sen uintinopeus on yleensä pienikokoista saaliskalaa parempi (Christensen 1996, Lundvall ym. 1999, Kekäläinen 2005).

Jokien patoaminen ja istutettujen smolttien sopeutumattomuus paikallisiin olosuhteisiin lisäävät entisestään vaelluspoikasten predaatoriskiä (Mather 1998, Koed ym. 2002). Patojen rakentamisen jälkeen predaation merkitys kasvaa, sillä padot hidastavat vaellusta, lisäävät stressiä ja sekoittavat vaelluspoikasten suuntautumista (Rieman ym. 1991, Coutant & Whitney 2000). Lisäksi hitaasti virtaavilla, järvimäisillä, patoaltailla on runsaasti petokaloille sopivia elinympäristöjä ja virtauksen heikkenemisen myötä myös smolttien vaellusnopeus näillä alueilla hidastuu, mikä lisää predaatoriskiä (Ward ym. 1995, Jepsen ym. 1998, Olsson ym. 2001). Virtaaman heikentyessä vaelluspoikaset voivat

myös harhautua lähelle rantaa, jolloin predaation todennäköisyys kasvaa entisestään (Jepsen ym. 1998).

Predaatio on voimakasta myös voimalaitosten läheisyydessä (Petersen 1994, Ward ym. 1995, Huusko ym. 2012). Vaelluspoikaset pysähtyvät toisinaan padon yläpuolelle, jolloin niiden predaatoriksi kasvaa (Venditti ym. 2000, Larinier & Travade 2002, Rivinoja 2005, Huusko ym. 2012). Voimalaitosten yläpuolisen predaation lisäksi vaelluspoikaset ovat erittäin alttiita predaatiolle myös alakanavassa turbiinien imuputkien suulla, missä pyörteiset virtausolosuhteet sekoittavat vaelluspoikasten suuntautumista ja vaikuttavat siten smolttien käyttäytymiseen ja kykyyn välttää predaatiota (Rieman ym. 1991, Coutant & Whitney 2000).

Vaelluspoikasia saalistavat sekä petokalat että linnut. Petokalojen aiheuttama hävikki riippuu sekä petokalojen runsaudesta että patoaltaan olosuhteista. Esimerkiksi Tanskan Gudenå-joella predaation havaittiin olevan lohen vaelluspoikasilla jopa 81–85 % matalassa patoaltaassa (Jepsen ym. 1998). Kolumbiajoella, syvemmissä patoaltaassa, predaatiokuolleisuus *Oncorhynchus*-suvun vaelluspoikasilla oli huomattavasti pienempää, keskimäärin 14 % (Rieman ym. 1991). Petokalojen on havaittu suosivan vaelluspoikasia ravintonaan, jos niitä on alueella runsaasti (Larsson 1985, Poe ym. 1991, Kekäläinen ym. 2008).

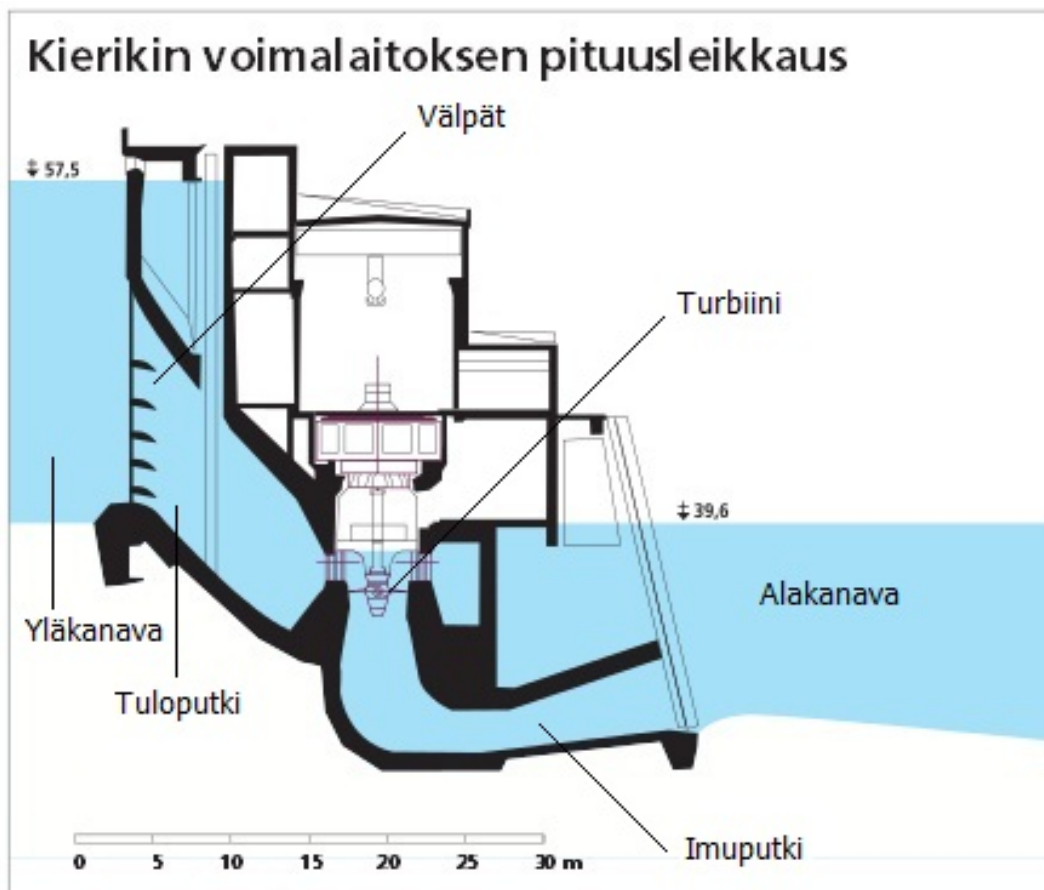
Hauki (*Esox lucius*) on merkittävä lohikalojen vaelluspoikasia saalistava laji pohjoisilla joilla (Jepsen ym. 1998, Aarestrup ym. 1999, Kekäläinen ym. 2008). Muita vaelluspoikasia saalistavia petojakaloja ovat mm. made (*Lota lota*), kuha (*Sander lucioperca*) ja aikuiset taimenet (Jepsen ym. 2000, Koed ym. 2002). Smolttien seurantatutkimusten yhteydessä pyydystettyjen haukien on havaittu saalistavan aktiivisesti vaelluspoikasia (Jepsen ym. 1998, Olsson ym. 2001, Kekäläinen ym. 2008) ja esimerkiksi Etelä-Ruotsin Höjeån-joen sivujoella yhden hauen mahasta löydettiin 14 smolttia (Olsson ym. 2001). Pyhäjoella haukien arvioitiin saalistaneen ensimmäisen viikon aikana 29 % vapautetuista vaelluspoikasista (Kekäläinen ym. 2008). Myös Oulujoen alaosalla tehdyssä lohen vaelluspoikasten radiotelemetriatutkimuksessa haukien havaittiin saalistaneen smoltteja, sillä osa lähettimistä paikannettiin liikkuvaan haukeen tai löydettiin matalasta rantavedestä vesikasvillisuuden seasta (Karppinen ym. 2013). Kokonaisuudessaan predaatio jokivaelluksen aikana voi olla huomattavaa ja esimerkiksi Koed ym. (2002) löysivät tanskalaisella Gudenå-joella tutkimuksensa aikana 70 % lohen vaelluspoikasiin laitetuista radiolähettimistä petokalojen (kuha ja hauki) mahasta tai harmaalokin (*Ardea cinerea*) pesästä.

Lintujen aiheuttaman predaation arviointi on usein petokalapredaatiota vaikeampaa, sillä pitkiäkin matkoja liikkuvien lintujen saaliiksi jääneiden vaelluspoikasten kohtalosta on vaikea saada tietoa (Jepsen ym. 1998). Muutamissa tutkimuksissa on kuitenkin selvitetty myös lintujen aiheuttaman predaation määrää. Jepsen ym. (1998) arvioivat lintujen aiheuttaman predaation olleen 27 % radiotelemetriaseurannassa tanskalaisella Gudenå-joen patoaltaalla ja Ruggerone (1986) arvioi lokkien saalistavan 2 % Wanapum-padon ohittaneista vaelluspoikasista Kolumbiajoella. Myös Oulujoen edustan (n. 40 km rannikolta) lokkien, tiirojen ja räyskien pesimispaikoilta on löydetty runsaasti Oulujoelle vapautettujen lohen vaelluspoikasten carlin- ja t-merkkejä, mikä on osoitus lintupredaatiosta jokisuulla (RKTL, julkaisematon). Vastaavia havaintoja on myös Ruotsin puoleiselta rannikkoalueelta (Lars Hedman, suullinen tiedonanto).

3.3. Turbiinikuolleisuus

Vesivoimalaitosten turbiinien veden kulkureitit on suunniteltu siten, että ne muuttavat padon yläpuoliseen vesimassan potentiaalienergian mahdollisimman tehokkaasti liike-energiaksi. Kalat päätyvät turbiineihin päävirran mukana tuloputken kautta, mistä ne ohjautuvat turbiinikammioon ja sieltä edelleen imuputken kautta voimalan alapuolelle (kuva 4). Yleisimmin turbiinien läpäisyyn liittyvät ongelmat voidaan jakaa syntyvän mukaan:

- mekaanisiin, jotka aiheutuvat kalojen törmäämisestä kiinteisiin veden ohjausrakenteisiin tai turbiinin pyöriviin siipiin (Mathur ym. 1996, Ferguson ym. 2006)
- paineen aiheuttamiin, kun kalat altistuvat turbiinin läpi kulkiessaan nopeille paineen muutoksille, mikä voi vahingoittaa esimerkiksi uimarakkoa (Cramer & Oligher 1964, Stepheson ym. 2010, Carlson ym. 2012)
- kavitaation aiheuttamiin, kun turbiinien siivet aikaan saavat alipaineen, jonka seurauksena syntyy kaloille haitallisia kavitaatiokuplia- ja ääniä (Popper 2003).



Kuva 4. Iijoen Kierikin vesivoimalaitoksen pituusleikkaus. Alkuperäinen kuva: PVO-vesivoima Oy:n Kierikin voimalaitos-esitys

Vesivoimalaitosten turbiinien läpäisystä voi aiheutua kaloille suoraa tai epäsuoraa kuolleisuutta (Schoeneman ym. 1961, Ferguson ym. 2006, Carlson ym. 2012). Suoralla kuolleisuudella tarkoitetaan välittömästi turbiinien läpäisyssä aiheutuvaa kuolleisuutta, mikä on useimmiten seurausta esimerkiksi kalojen ja turbiinin siipien yhteentörmäyksistä (Čada 2001). Epäsuora turbiinikuolleisuus on puoles-

taan seurausta turbiinien läpäisystä aiheutuneesta stressistä tai vahingoittumisesta, minkä seurauksena predaatio- tai sairastumisriski voimalaitoksen läpäisyn jälkeen kasvaa (ks. Čada 2001, Ferguson ym. 2006).

Turbiinikuolleisuuden määrään voi vaikuttaa voimalaitoksen turbiinityyppi. Turbiinityypeistä yleisimmin käytössä ovat reaktioturbiinit, joita on kahta perustyyppiä: hitaammat Francis-turbiinit ja nopeammat Kaplan-turbiinit. Francis-turbiinin jouksupyrörässä on enemmän siipiä (10–30) kuin Kaplan-turbiinissa (4–8), ja Francis-turbiinin läpäisyn on esitetty siksi aiheuttavan enemmän kuolleisuutta kuin Kaplan-turbiinin (Ruggles 1980). Yleisesti Francis-turbiinien onkin havaittu aiheuttavan enemmän suoraa kuolleisuutta kuin Kaplan-turbiinien (Larinier & Travade 2002). Suurempi kuolleisuus johtunee kuitenkin osittain siitä, että Francis-turbiineja käytetään usein putouskorkeudeltaan suuremmilla padoilla, sillä tutkimuksissa samalla putouskorkeudella ja virtaamalla kuolevuus on molemmilla turbiinityypeillä ollut samaa suuruusluokkaa (Cramer & Olighter 1964, Ferguson ym. 2008).

Turbiinikohtainen kuolleisuus on vaelluspoikasilla tehdyissä tutkimuksissa vaihdellut yleisesti 0–35 % Kaplan-turbiineilla ja 2,5–75 % Francis-turbiineilla (taulukko 1). Kolumbia- ja Snake-joilla 25-vuoden selviytymistutkimusten yhteenvedossa vaelluspoikasten (*Oncorhynchus* spp.) suora turbiinikuolleisuus vaihteli voimalaitoskohtaisesti 7–13 % (Bickford & Skalski 2000). Vaikka turbiinikuolleisuus ei voimalaitosta kohti ole suuri, on vaelluspoikasten joskus selviydyttävä merelle useiden voimalaitosten läpi, jolloin kertautuva turbiinikuolleisuus muodostuu huomattavaksi (Coutant & Whitney 2000, Larinier 2008, Huusko ym. 2012). Mitä useamman voimalaitoksen läpi kalojen on uita-va vaelluksensa aikana, sitä suuremmaksi kertautuva kuolleisuus nousee. Esimerkiksi 10 voimalaitoksen ohituksesta aiheutuu jo 40 % kokonaiskuolleisuus, vaikka kuolleisuus yksittäisellä voimalaitoksella olisi vain 5 % (Larinier 2008).

Taulukko 1. Vaelluspoikasten turbiinikohtaisen kuolleisuuden arvioita eri tutkimuksissa.

Turbiini- tyyppi	Joki	Suora kuolleisuus,		Kirjallisuusviite
		%	Laji	
Kaplan	Connecticut River	12–14	<i>Salmo salar</i>	Stier & Kynard 1986
Kaplan	Piteälven	12	<i>Salmo salar</i> , <i>Salmo trutta</i>	Rivinoja 2005
Kaplan	Emån	11	<i>Salmo trutta</i>	Calles & Greenberg 2009
Kaplan	Åbyälven	35	<i>Salmo salar</i>	Gustafsson 2010
Kaplan	Oulujoki	0–11	<i>Salmo salar</i>	RKTL 2007–2010, julkaisematon
Kaplan	Iijoki	0–17	<i>Salmo salar</i>	Huusko ym. 2012
Kaplan	Columbia River	5–7	<i>Oncorhynchus tshawytscha</i>	Mathur ym. 1996
Kaplan	Columbia River	11	<i>Oncorhynchus tshawytscha</i>	Schoeneman ym. 1961
Kaplan	Columbia & Snake River	4–7	<i>Oncorhynchus</i> spp.	Coutant & Whitney 2000*
Kaplan	Columbia & Snake River	7–13	<i>Oncorhynchus</i> spp.	Bickford & Skalski 2000*
Francis	Umeälven	2,5–28	<i>Salmo salar</i>	Montén 1985
Francis	Umeälven	17	<i>Salmo salar</i>	RKTL 2013, julkaisematon
Francis	Testeboån	60–75	<i>Salmo salar</i>	Serrano ym. 2009
Francis	Emån	38	<i>Salmo trutta</i>	Calles & Greenberg 2009

*review

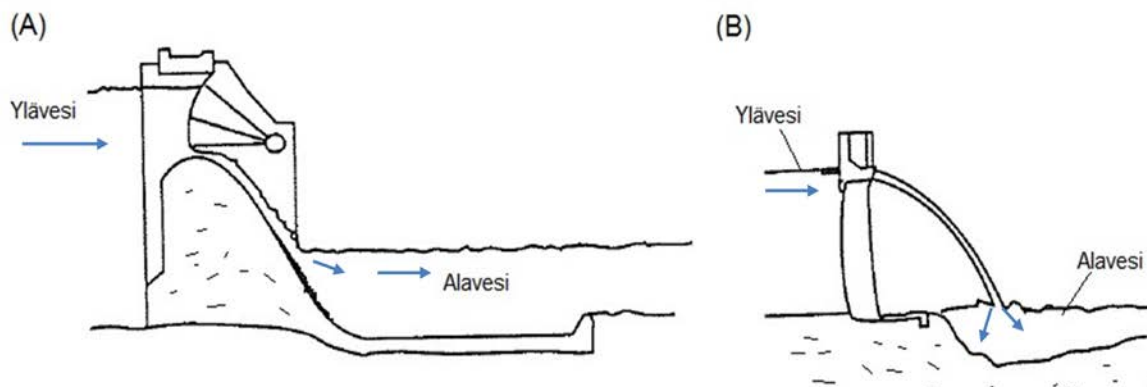
Kalojen koolla (Coutant & Whitney 2000, Rivinoja 2005) ja käyttäytymisellä (Mathur ym. 1996) voi olla vaikutusta selviytymiseen turbiinin läpi. Suurikokoisten kalojen selviytyminen voimalaitosten läpi on heikompaa kuin pienikokoisten, koska suurempien kalojen riski saada vammoja voimalaitosrakenteista on pienempiä yksilöitä suurempi (Clay 1995, Coutant & Whitney 2000, Rivinoja 2005). Lisäksi Mathurin ym. (1996) tutkimuksen perusteella myös kalojen uintisyvyydellä voimalaitosrakenteissa voi olla vaikutusta kalojen selviytymiseen turbiinin läpi: puolesta välistä vedenottoaukkoa (9,3 m) vapautettujen vaelluspoikasten kuolleisuus turbiinissa oli hieman pienempää (5,3 %) kuin vedenottoaukon yläreunaan (3,1 m) vapautetuilla (7,0 %). Vastaavasti näkyviä vammoja havaittiin vähemmän syvemältä vapautetuilla smolteilla (4,1 %), kuin lähempää pintaa vapautetuilla (5,7 %). Havaitut erot eivät kuitenkaan olleet tilastollisesti merkitseviä.

3.4. Vaellusongelmat säännöstelypadoilla

Vaelluspoikaset voivat laskeutua voimalaitosten ohi säännöstelypatojen kautta, jos niistä juoksetaan vettä smolttien vaellusaikana. Säännöstelypadon tulva-aukkojen sijainti vesipatsaassa ja säännöstelypadon kautta juoksetettavan veden määrä vaikuttavat siihen, kuinka nopeasti ja todennäköisesti vaelluspoikaset vaeltavat sen kautta alas (Whitney ym. 1997, Coutant & Whitney 2000). Tyypillisellä säännöstelypadolla juoksetettava vesi purkautuu läheltä pohjaa (Coutant & Whitney 2000, kuva 5), jolloin vaelluspoikaset voivat olla haluttomia käyttämään sitä vaellusreitteinä (Whitney ym. 1997). Joillakin padoilla vesi voidaan myös juoksettaa varsinaisten tulva-aukkojen sijaan säännöstelypadon yli ns. vapaapudotuksena (Ruggles & Murray 1983, kuva 5).

Säännöstelypatojen rakenne, korkeus, materiaali ja veden juoksetustapa vaikuttavat niiden kautta kulkevien vaelluspoikasten selviytymiseen (Ruggles 1980, Ruggles & Murray 1983). Säännöstelypadoilla smoltit voivat vahingoittua mm. raapiutumalla patorakenteisiin tai iskeytyessään kovalla voimalla veteen pudotuksen jälkeen (Ruggles 1980, Ruggles & Murray 1983). Säännöstelypadoilla saadut vauriot aiheuttavat harvoin suoraa kuolleisuutta, mutta ne vaikuttavat vaelluspoikasten selviytymiseen myöhemmin vaelluksen aikana. Lisäksi säännöstelypadon alapuolisessa uomassa predaattoririski voi kasvaa, jos turbulenssi padon alapuolella on voimakasta (Schilt 2007).

Whitney ym. (1997) kokosivat 13 tutkimuksen tulokset kuolleisuudesta säännöstelypadolla Kolumbiajoella ja yleisesti näissä tutkimuksissa (10/13) kuolleisuus oli pientä (0–2 %). Suurin havaittu kuolleisuus oli 27,5 %, jonka syyksi arvioitiin voimakas predaatio sekä huonot ympäristöolosuhteet padon alapuolisessa tulvavesiuomassa.



Kuva 5. Erilaisia säännöstelypatotyyppejä: A) tyypillinen säännöstelypato, jossa vesi juoksetetaan pohjakerroksesta B) säännöstelypato, jossa vesi virtaa padon yli pintajuoksuksena. Veden virtaussuunta on esitetty kuvissa sinisellä nuolella. Lähde: Ruggles & Murray 1983

3.5. Stressi ja viivästynyt kuolleisuus

Smolttiutumisen aikana tapahtuvat fysiologiset muutokset tekevät vaelluspoikasista herkkiä ympäristökijöiden aiheuttamalle stressille (McCormick ym. 1998). Stressi ei yleensä aiheuta vaelluspoikasille välitöntä kuolleisuutta, mutta se voi heikentää vaelluksesta selviytymistä tai se voi vaikuttaa kalaan myöhemmissä elinkierron vaiheissa (Budy ym. 2002, McCormick ym. 2009).

Rakennetuilla joilla alasvaeltavat kalat voivat kokea sekä akuuttia (nopea, voimakas reaktio) että kroonista (hitaasti kehittyvä, pysyvä tila) stressiä. Akuuttia stressiä kalat kokevat esimerkiksi voimailoksen ohitustilanteessa (Mathews ym. 1986). Krooninen stressi voi puolestaan kehittyä, kun ympäristöolosuhteet muuttuvat pidempiaikaisesti epäsoviksi, kuten veden lämpötilan noustessa hitaasti virtaavissa patoaltaissa lähelle kalojen sietokyvyn ylärajaa (Budy ym. 2002) tai veteen liuenneen typen määrän noustessa useasti lyhyen ajan sisällä korkeaksi (Ebel 1969). Lisäksi erilaiset saasteet ja myrkyt voivat toimia stressin aiheuttajina (McCormick ym. 1998).

4. Alasvaellusongelmien ratkaisumahdollisuudet

Voimalaitosrakentamisen aiheuttamia alasvaellusongelmia voidaan vähentää ohjaamalla vaelluspoikaset voimalaitosturbiinien ohi vaihtoehtoisten reittien, kuten säännöstelypatojen tai tarkoitusta varten rakennettujen alasvaellusväylien kautta (Schoeneman ym. 1961, Coutant & Whitney 2000, Muir ym. 2001, Skalski ym. 2002, Scruton ym. 2003). Vaelluspoikasten ohjaamisessa voidaan käyttää useita erilaisia ohjausrakenteita ja -menetelmiä (Taft 2000, Larinier & Travade 2002). Ohjausmenetelmän valinnassa on huomioitava sekä voimalaitospadon rakenne että vaeltavien kalojen käyttäytyminen (Coutant & Whitney 2000, Johnson & Dauble 2006, Nestler ym. 2008, Williams ym. 2012). Ohjausmenetelmän lisäksi on syytä kiinnittää huomiota myös alasvaellusväylän sijoittamiseen ja virtaamaan (Clay 1995, Johnson & Dauble 2006). Toimivat alasvaellusohjurit ja -väylät nopeuttavat vaelluspoikasten alasvaellusta, minkä seurauksena predaatiokuolleisuutta jokivaelluksen aikana saadaan vähennettyä (Jepsen ym. 1998) ja smoltit saapuvat jokisuulle myöhemmän selviytymisen kannalta

parempana ajankohtana (McCormick ym. 1998). Predaatiokuolleisuutta jokivaelluksen aikana voidaan osaltaan pyrkiä vähentämään myös aktiivisella petokalojen pyynnillä (Ward ym. 1995).

Kalojen selviytymistä voimalaitosturbiinien läpi voidaan yrittää parantaa huomioimalla kalat sekä turbiinin käytössä että rakenteen suunnittelussa (Odeh 1999, Čada 2001). Maailmalla onkin kehitetty ns. kalaystävällisiä turbiineja (esim. Odeh 1999).

Usean voimalaitospadon joessa vaelluspoikasten kerääminen ylimpien patojen yläpuolelta ja kuljettaminen jokisuulle voi olla ratkaisukeino kuolleisuuden vähentämiseksi (Norrgård ym. 2013).

4.1. Vaelluspoikasten ohjausmenetelmät

Vaelluspoikasten ohjaukseen on kehitetty paljon erilaisia menetelmiä ja rakenteita. Tässä kirjallisuuskatsauksessa nämä jaetaan karkeasti kahteen luokkaan: (1) rakenteellisiin ohjausmenetelmiin ja (2) käyttäytymiseen perustuviin ohjausmenetelmiin.

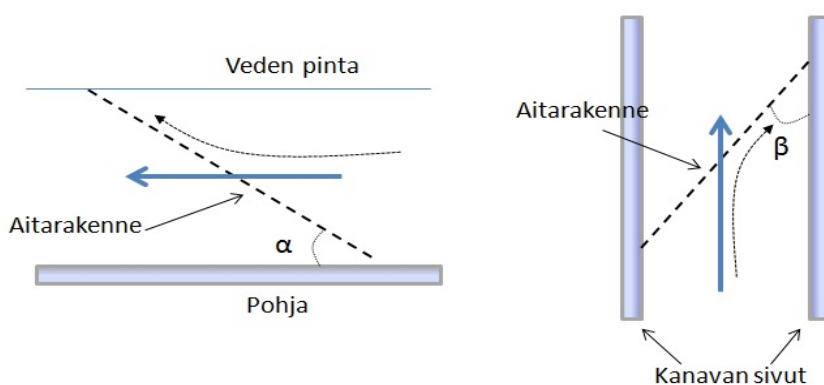
4.1.1. Rakenteelliset ohjausmenetelmät

Kalojen pääsy vesivoimalaitoksen turbiineihin voidaan estää käyttämällä kiinteitä aitarakenteita (screens), jotka fyysisesti estävät kalojen etenemisen (Taft 2000, Larinier & Travade 2002). Lohikalojen vaelluspoikasten ohjauksessa on kokeiltu monia erityyppisiä aitarakenteita (taulukko 2). Aitarakenteet voivat olla esimerkiksi rei'itettyjä levyjä, metallisia kaltereita tai muovisia/metallisia verkkorakenteita (Larinier & Marmulla 2004) ja ne asetetaan useimmiten voimalan vedenoton etupuolelle tai vedenottorakenteiden sisälle. Ohjausrakenteen avulla kalat pyritään ohjaamaan kohti alasvaellusväylää tai keräysallasta. Kalojen ohjauksessa voidaan käyttää kahdentyyppisiä aitarakenteita (Larinier & Travade 2002, kuva 6):

- α -rakenteessa ohjausaita sijoitetaan loivassa kulmassa pohjaan nähden, jolloin alasvaellusväylän sisäänkäynti sijoitetaan useimmiten rakenteen yläosaan (kuva 6A)
- β -rakenteessa ohjausaita on loivassa kulmassa virran suuntaa vastaan, jolloin se ohjaa kalat alavirran suunnassa olevan alasvaellusväylän sisäänkäyntiä kohti (kuva 6B).

(A) α -rakenne, sivulta kuvattuna

(B) β -rakenne, ylhäältä kuvattuna

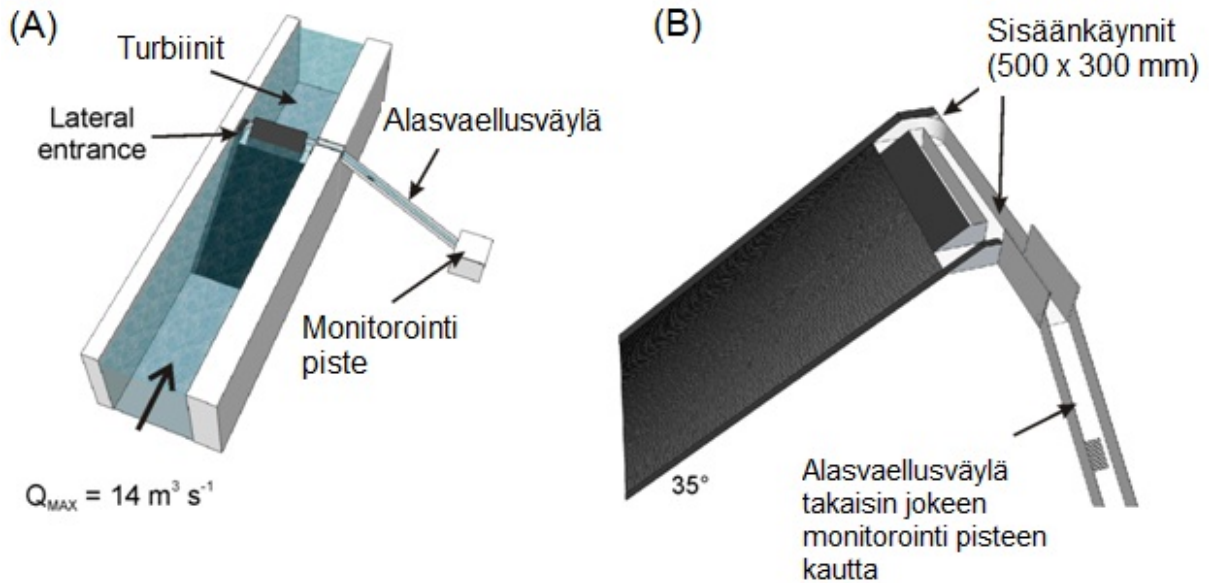


Kuva 6. Vaelluspoikasten ohjaukseen käytettävien aitarakenteiden sijoitustavat. (A) α -rakenteen kaavakuva sivultapäin kuvattuna ja (B) β -rakenteen kaavakuva ylhäältäpäin kuvattuna. Kuvissa veden virtaussuunta on esitetty sinisellä nuolella ja kalojen ohjautumissuunta mustalla nuolella. Lähde: Calles ym. 2013

Taulukko 2. Vaelluspoikasten rakenteellisia ohjausmenetelmiä ja niiden havaittuja ohjaustehokkuuksia (FGE) eri tutkimuksissa.

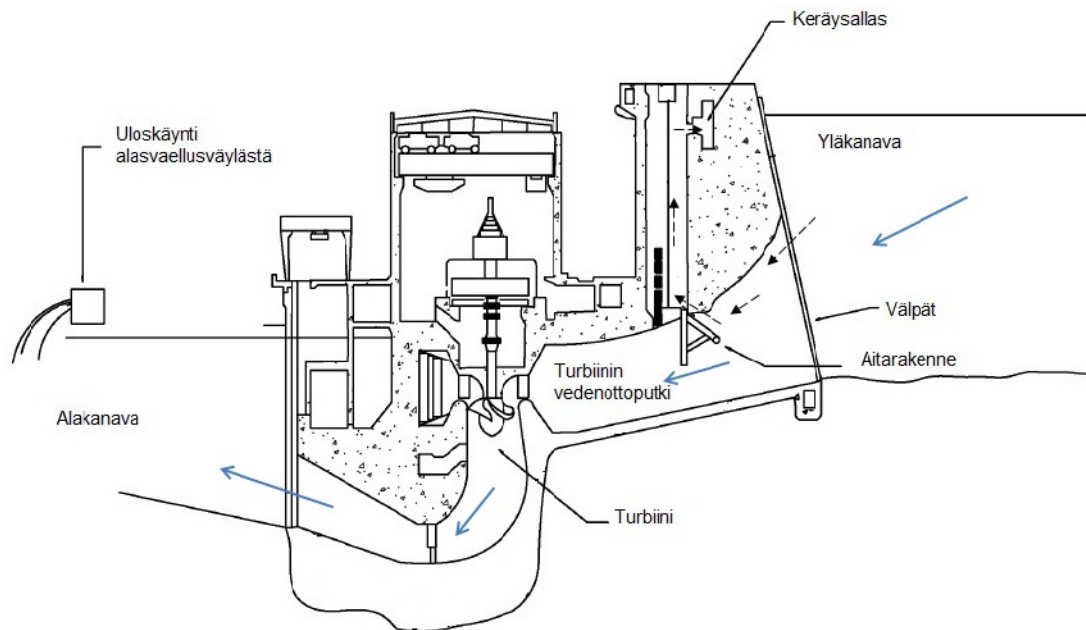
Ohjausrakenne	Joki/Maa	FGE, %	Laji	Kirjallisuusviite
Viisto välppärakenne	Ätran/ Ruotsi	17	<i>Salmo salar</i>	Calles ym. 2012
Viisto välppärakenne	Ätran/ Ruotsi	0	<i>Salmo trutta</i>	Calles ym. 2012
Viistot välppärakenteet	-/ Ranska	55–90	<i>Salmo salar</i>	Travade & Larinier 2006
Submerged travelling screen	Columbia River/ USA	35–75	<i>Oncorhynchus</i> spp.	Skalski ym. 1996
Submerged travelling screen	Columbia River / USA	25–78	<i>Oncorhynchus</i> spp.	Gessel ym. 1991
Submerged travelling screen	Columbia River/ USA	60–90	<i>Oncorhynchus</i> spp.	Ferguson ym. 2005
Eicher screen	Columbia River/ USA	yli 90	<i>Oncorhynchus</i> spp.	Taft 2000
Rotation screen	Elbbach/ Saksa	8–39	<i>Salmo salar</i>	Hartvich ym. 2008
Fish Guidance system	Snake River/ USA	61–92	<i>Oncorhynchus</i> spp.	Scott 2012
Fish Guidance system	Columbia River/ USA	63–85	<i>Oncorhynchus</i> spp.	Scott 2012
Fish Guidance system	Cowlitz River/ USA	55–66	<i>Oncorhynchus</i> spp.	Scott 2012
Fish Guidance System	Kennebec River/ USA	75–83	<i>Salmo salar</i>	Scott 2012

Rakenteellisten ohjausmenetelmien suunnittelu, asentaminen ja ylläpitäminen vaativat yleensä suuren työpanoksen, minkä vuoksi ne ovat usein kalliita ratkaisuja. Taloudelliset seikat rajoittavatkin niiden käyttöönoton mahdollisuuksia monessa paikassa (Larinier & Travade 2002, Scruton ym. 2002). Lisäksi osa rakenteellisista ohjausmenetelmistä soveltuu parhaiten pienemmille joille, sillä niiden rakentaminen suuriin ja syviin ylakanaviin on käytännössä erittäin vaikeaa (Johnson & Dauble 2006). Pienillä joilla toimivia rakenteellisia ohjausmenetelmiä ovat esimerkiksi voimalan vedenoton etupuolella olevan välppärakenteen muutokset kaloja ohjaaviksi (kuva 7). Välppärakenteiden muutosten on havaittu olevan toimiva ratkaisu suhteellisen pienillä voimalaitospadoilla (Nettles & Gloss 1987, Travade & Larinier 2006, Greenberg et al. 2012, Calles ym. 2013).



Kuva 7. Kaavakuva ruotsalaisen Emån-joen voimalaitoksella α -rakenteen mukaiseksi muutetusta välppärakenteesta, jonka avulla estetään kalojen pääsy turbiineihin. Välppärakenteen leveys on 4,8 m ja pituus 7,7 m. (A) Yleiskuva 18 mm välppärakenteen ja alasvaellusväylän sijoittumisesta voimalaitoksella. (B) Tarkempi kuva välppärakenteesta ja sen alasvaellusväylän kahden sisäänkäynnin sijoittumisesta. Alkuperäinen kuva: Calles ym. 2013.

Rakenteellisia ohjausmenetelmiä on kehitetty ja käytetty varsin laajasti Tyyneenmereen laskevalla Kolumbiajoella, missä lähes jokaisella voimalaitoksella on turbiinin tulovesiputken yläreunaan asennettu aitarakenne (submerged travelling screen, kuva 8), joka ohjaa kalat aitarakenteen yläreunassa olevan alasvaellusväylän tai keräysaltaan sisäänkäyntiä kohti. Voimalaitosturbiinien vedenotto tapahtuu kuitenkin usein syvemmillä vesimassasta, jolloin voimalan tulovesiputkissa olevat rakenteet eivät välttämättä nopeuta smolttien vaellusta voimaloiden ohi (Liscom 1971, Beeman & Mayle 2001). Esimerkiksi Beeman ja Mayle (2001) raportoivat tutkimuksessaan, että tulovesiputkien aitarakenteet eivät nopeuttaneet smolttien alasvaellusta, sillä *Oncorhynchus*-suvun vaelluspoikaset hakeutuivat turbiinin vedenottorakenteisiin vasta pimeään aikaan, jolloin vuorokauden ympäri liikkuvien smolttien vaellus viivästyí voimalan yläpuolella useita tunteja. Kolumbiajoella onkin tulovesiputkissa sijaitsevien rakenteellisten aitarakenteiden lisäksi kehitetty ja otettu käyttöön myös veden pintakerrokseen sijoitettavia ohjausrakenteita ja -menetelmiä (Johnson ym. 2000, Johnson & Dauble 2006, Evans ym. 2008).



Kuva 8. Vesivoimalaitoksen poikkileikkaus, missä näkyy turbiinin vedenottoputkessa sijaitsevan aitarakenteen sijainti. Veden virtaussuunta on merkitty sinisillä nuolilla ja vaelluspoikasten kulkureitti mustalla katkoviivanuolella. Lähde: Larinier & Travade 2002.

4.1.2. Käyttäytymiseen perustuvat ohjausmenetelmät

Käyttäytymiseen perustuvissa vaelluspoikasten ohjausmenetelmissä kalan ohjaaminen tapahtuu hyödyntämällä kalan reagoitua tiettyyn aistiärsykkeeseen (Larinier & Travade 2002). Tehokkaimmiksi menetelmiksi vaelluspoikasten ohjauksessa ovat osoittautuneet säleikkösuuntaajat (louver/louvre), kelluvat ohjausrakenteet (guiding wall) sekä virtaaman lisääminen säännöstelypadon kautta (taulukko 3).

Taulukko 3. Vaelluspoikasten käyttäytymiseen perustuvia ohjausmenetelmiä ja niiden havaittuja ohjaustehokkuuksia (FGE) eri tutkimuksissa.

Ohjausmenetelmä	Joki/Maa	FGE, %	Laji	Kirjallisuusviite
Säleikkösuuntaaja	Exploits River/ Kanada	25–73	<i>Salmo salar</i>	Scruton ym. 2002, 2003
Säleikkösuuntaaja	Connecticut River/ USA	50–100	<i>Salmo salar</i>	Ruggles ym. 1993
Säleikkösuuntaaja	San Joaquin River/ USA	93–97	<i>Salmo salar</i>	Bates & Vinsonhaler 1957
Säleikkösuuntaaja	Connecticut River/ USA	97	<i>Salmo salar</i>	Odeh & Orvis 1998
Kelluva ohjausaita	Connecticut River/ USA	84	<i>Salmo salar</i>	Odeh & Orvis 1998
Kelluva ohjausaita	Umeå/ Ruotsi	alle 4	<i>Salmo salar</i>	RKTL 2013, julkaisematon
Alasvaellusväylä säännöstelypadosta	Exploits River/ Kanada	62–72	<i>Salmo salar</i>	Scruton ym. 2008
Muutokset	Columbia River/ USA	84–95	<i>Oncorhynchus</i> spp.	Skalski ym. 1996

säännöstelypadossa	USA			
Houkutusvalo (jatkuva)	-/ Ranska	99 *	<i>Salmo salar</i>	Travade & Larinier 2006
Veden juoksutus säännöstelypadosta + välkkyvä pelotevalo turbiinilla	Mandal/ Norja	11–64	<i>Salmo salar</i>	Fjeldstad ym. 2012
Surface bypass	Snake River/ USA	63–90	<i>Oncorhynchus</i> spp.	Johnson ym. 2000
Ääniaallot + kupla-aita	Frome/ Iso-Britannia	20–74**	<i>Salmo salar</i>	Welton ym. 2002
Ääniaallot + kupla-aita	Nive/ Ranska	alle 1	<i>Salmo salar</i>	Travade & Larinier 2006
Ääniaallot	Gave d'Ossau/ Ranska	alle 1	<i>Salmo salar</i>	Travade & Larinier 2006
Sähkö	-/ Ranska	8–28	<i>Salmo salar</i>	Larinier & Travade 2002
Sähkö	Yakima River/ USA	50–84	<i>Oncorhynchus tshawytscha</i>	Pugh ym. 1970
Sähkö	Yakima River/ USA	40–70	<i>Oncorhynchus mykiss</i>	Pugh ym. 1970

*99 % smolteista vaelsi alas, kun valo oli päällä

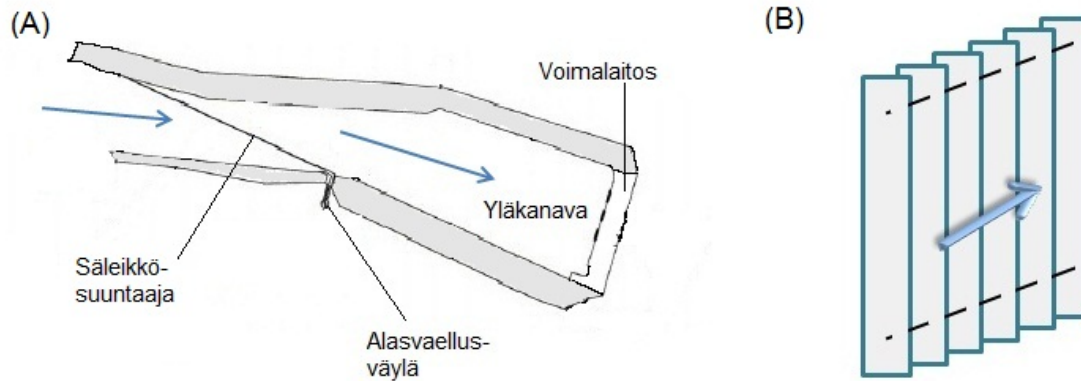
**ohjaustehokkuudessa eroja valoisan (20–44 %) ja pimeän (73–74 %) aikaan

Säleikkösuuntaajat ovat pystysuorista metallisista tai muovisista sälesarjoista muodostuvia vaellusohjureita, joiden toiminta perustuu veden virtauksen muutokseen niiden läheisyydessä (Bates & Vinsonhaler 1957, kuva 9). Säleikkösuuntaaja asetetaan horisontaalisesti viistoon vaelluspoikasten reitille, useimmiten 10–16 °:n kulmassa kalojen kulkusuuntaan nähden (Bates & Vinsonhaler 1957, Ruggles 1980, Larinier & Travade 2002). Säleikkösuuntaajat ulottuivat aluksi pinnasta pohjaan, mutta myöhemmin vaelluspoikasten ohjaukseen on kehitetty kelluvia säleikkösuuntaajia (Larinier & Travade 2002). Säleikkösuuntaajan korkeus on vaihdellut tapauskohtaisesti: Exploits-joella käytettävä säleikkö on ulottunut 2 m veden pinnasta alaspäin (Scruton ym. 2002) ja vastaavasti Connecticut-joella säleikkösuuntaajan korkeus veden pinnasta on ollut 2,75 m (Odeh & Orvis 1998) sekä aikaisemmassa tutkimuksessa 1,2–2,2 m (Ruggles ym. 1993).

Säleikkösuuntaajan ohjaustehokkuus riippuu vallitsevasta virtausmallista ja voimalaitoksen virtaaman muutoksista (Scruton ym. 2002, Larinier & Travade 2002). Veden virtausnopeudella säleikkösuuntaajan läheisyydessä on suuri vaikutus sen toimintaan, sillä esimerkiksi liian kovassa virtauksessa kalat painautuvat säleikköä vasten (Shepherd ym. 2007). Lohen vaelluspoikasten osalta veden virtausnopeuden tulisi olla säleikkösuuntaajan läheisyydessä 0,6–1,0 m/s ja säleikkösuuntaajan päässä olevan alasvaellusväylän sisäänkäynnillä virtausnopeuden tulisi olla tätä 1,5–2,0-kertaa suurempi (Ruggles 1980, Larinier & Travade 2002).

Esimerkiksi Scruton ym. (2002) selvittivät Exploits-joen Grand Falls-padolla säleikkösuuntaajan ohjaustehokkuutta lohen vaelluspoikasille 12° ja 18° kulmilla. Tutkimuksessa käytettiin kelluvaa 2 m syvyyteen ulottuvaa säleikkösuuntaajaa, joka oli 170–200 m pitkä (riippuen kiinnityskulmasta) ja koostui sälesarjoista, joiden muovista tehdyt säleet (leveys 65 mm, paksuus 10 mm) olivat 50 cm välein. (Scruton ym. 2002). Tulosten perusteella säleikkösuuntaaja toimi paremmin 18°:een kulmalla.

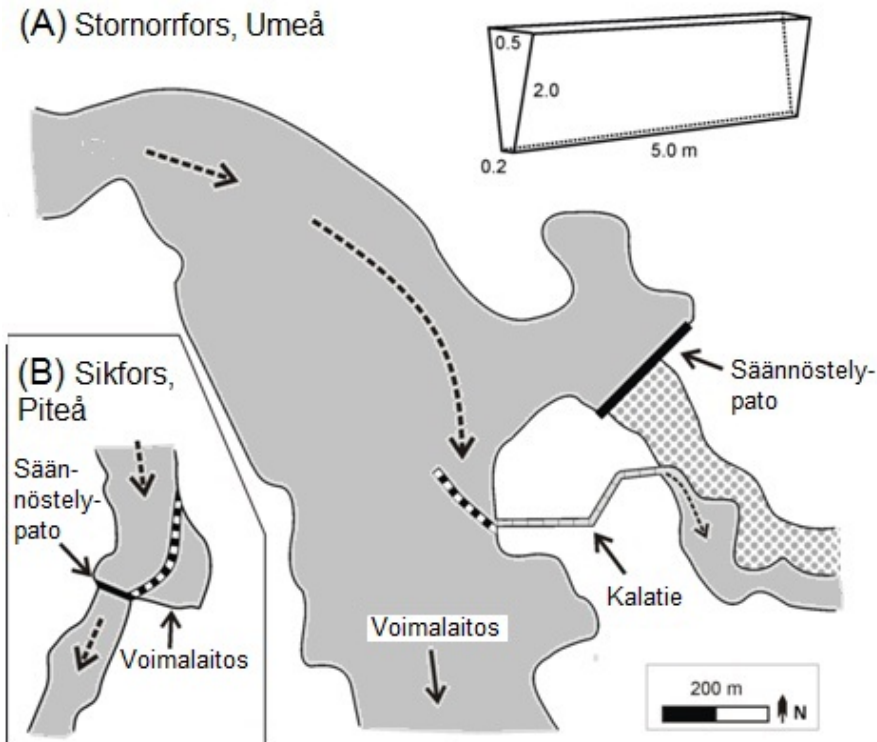
Lisäksi poistamalla suuri betonirakenne voimalaitospadon yläkanavasta saatiin virtausolosuhteet säleikkösuuntaajan lähellä ja alasvaellusväylän sisäänkäynnillä pysymään tasaisempina voimalaitoksen juoksutuksista riippumatta. Näillä toimenpiteillä Grand Falls-padolla säleikkösuuntaajan ohjauksen tehokkuutta parannettiin huomattavasti (25 %:sta 65 %:iin).



Kuva 9. A) Esimerkkikuva säleikkösuuntaajan sijoittamisesta voimalaitoksen yläkanavassa ja B) kaavakuva säleikkösuuntaajasta. Veden virtaussuunta on esitetty kuvissa sinisellä nuolella. Lähteet: Scruton ym. 2002, Anonyymi 2010

Kelluvien ohjausaitarakenteiden toimintaperiaate on hyvin samanlainen kuin säleikkösuuntaajien, mutta ne koostuvat yhtenäisemmistä pinnoista (kuvat 9-10). Kelluvien ohjausaitojen toimivuutta on tutkittu esimerkiksi Connecticut-joella, Bellows Falls-voimalaitoksella, missä niiden ohjaustehokkuuden on arvioitu olevan jopa 84 % (Odeh & Orvis 1998).

Myös Ruotsissa, Umeå- ja Piteå-joilla, on viime vuosien aikana kehitetty lohen vaelluspoikasten ohjaamiseen kelluvia ohjausaitarakenteita, jotka koostuvat n. 2 m korkeista ja 5 m pitkistä, puisista kiilamaisista elementeistä (kuvat 10–11). Elementtejä voidaan kiinnittää toisiinsa tarvittava määrä, jotta ohjausaidasta saadaan riittävän pitkä. Esimerkiksi Umeå-joella näitä rakenteita on kiinnitetty toisiinsa 26 kappaletta, joilloin ne muodostavat 130 metriä pitkän ohjausrakenteen (P. Rivinoja, suullinen tiedonanto). Umeå-joella tehdyssä radiotelemetriatutkimuksessa rakenteen ohjaustehokkuus havaittiin kuitenkin heikoksi (alle 4 %, RKTL, julkaisematon). Rakenteen toimivuudesta ei ole luotettavaa tietoa myöskään Piteå-joelta, sillä rakenne upposi sen toimivuutta selvittävän tutkimuksen aikana (Rivinoja & Lundqvist, julkaisematon).



Kuva 10. Kelluvien ohjausaitarakenteiden sijainti A) Umeå-joen Stornorrfors-voimalaitoksella ja B) Piteå-joen Sikfors-voimalaitoksella. Oikeassa yläreunassa on kaavakuva yksittäisen aitaelementin rakenteesta. Kelluvien ohjusrakenteiden sijainti on esitetty kuvissa musta-valkoisina elementteinä. Alkuperäinen kuva: Calles ym. 2013



Kuva 11. Umeå-joen Stornorrfors-voimalaitoksen kelluva alasvaellusohjuri. Kuva: Panu Orell

Säännöstelypatojen virtaamia (ohjuksutuksia) lisäämällä on mahdollista saada ohjattua vaelluspoikasia niiden kautta alavirtaan (Muir ym. 2001, Fjeldstad ym. 2012, kuva 12). Ohjuksutettavan veden määrä suhteessa koko joen virtaamaan vaikuttaa siihen, kuinka hyvin kalat löytävät säännöstelypadolle (Lundström ym. 2010, Fjeldstad ym. 2012). Pelkkä ohjuksutuksien lisääminen ei välttämättä ole riittävä keino ohjaamaan smoltteja (Rivinoja 2005, Lundström ym. 2010). Esimerkiksi Piteå-joella vain yksittäiset vaelluspoikaset vaelsivat alas säännöstelypadon kautta, vaikka ohjuksutuksia jatkettiin koko smolttivaellusajan (Rivinoja 2005). Ohjuksutettavan veden määrän tulisivin vaikuttaa selvästi voimalaitospadon yläpuolen virtausolosuhteisiin, jotta houkutusvaikutus olisi riittävä (Lundström ym. 2010). Ohjuksutusten tehokkuutta smoltteja ohjaavana menetelmänä voidaan parantaa vähentämällä turbiinien kautta juoksutettavan veden määrää samalla kun ohjuksutuksia lisätään (Fjeldstad ym. 2012). Hyviä kokemuksia tästä on saatu esimerkiksi etelä-norjalaisella Mandal-joella, missä suurin osa lohen vaelluspoikasista käytti juoksutusmäärien muutoksen jälkeen säännöstelypatoa alasvaellusreitintään (Fjeldstad ym. 2012). Usein voimalaitosyhtiöt ovat kuitenkin haluttomia juoksuttamaan tarpeeksi vettä säännöstelypatojen kautta smolttivaelluksen aikana (Kraabøl ym. 2008).

Säännöstelypadot sopivat yleisesti hyvin alasvaellusreiteiksi, sillä smolttien selviytyminen niiden kautta alavirtaan on hyvä (Muir ym. 2001, Whitney ym. 1997, Fjeldstad ym. 2012). Tästä johtuen säännöstelypadot voisivat olla toimiva ratkaisu myös voimakkaasti rakennetuissa joissa, missä smolttien tulee kulkea useamman padon ohi alasvaelluksensa aikana (Norrgård ym. 2013). Viime aikoina, paremman ohjaustehokkuuden saavuttamiseksi, on alettu yhdistämään myös erilaisia ohjausmenetelmiä samalla padolla (Fjeldstad ym. 2012, Greenberg ym. 2012, Vowles & Kemp 2012).



Kuva 12. Vaelluspoikasia voidaan ohjata voimalaitosten ohitse säännöstelypatojen kautta. Useimmiten tämä edellyttää kuitenkin säännöstelypadolta juoksutettavan vesimäärän lisäämistä. Kuva: Panu Orell

4.2. Alasvaellusväylät voimalaitospadoilla

Vaelluspoikaset voidaan ohjata voimalaitoksen alapuolelle voimalaitospadon yhteyteen rakennetun alasvaellusväylän (bypass) kautta. Alasvaellusväylänä voivat toimia erilaiset putkirakenteet, rännit (sluiceway) tai lohien nousuvaellusta varten rakennetut kalatiet (Ferguson ym. 2007, kuva 13).

Useimmiten alasvaellusreitit toimivat yhdessä jonkin ohjausrakenteen tai -menetelmän kanssa, minkä avulla kalat ohjataan kohti alasvaellusväylän sisäänkäyntiä. Alasvaellusväylää pitkin kalat siirtyvät joko voimalan alakanavaan tai erilliseen keräysaltaaseen, josta kalat kuljetetaan padon/patojen alapuolelle. Alasvaellusväylien suunnittelussa olisi syytä kiinnittää huomiota erityisesti sisäänkäynnin sijaintiin, virtausnopeuteen ja virtamaan (Clay 1995).

Alasvaellusväylän sisäänkäynnin sijainnilla on keskeinen rooli siinä kuinka hyvin vaelluspoikaset löytävät sen (Clay 1995). Sisäänkäynnin tulisi sijaita ohjausrakenteessa tai sen välittömässä läheisyydessä, jotta kalat löytäisivät alasvaellusväylään viiveettä. Sisäänkäyntejä voidaan tarvittaessa rakentaa useampia saman ohjausrakenteen yhteyteen; esimerkiksi viiston α -välppärakenteen kummallekin sivulle (kuva 7). Lisäksi lohien vaelluspoikasia ohjattaessa vaellusväylän sisäänkäynnin suositellaan sijoittuvan veden pintakerrokseen (Clay 1995, Johnson & Dauble 2006), sillä lohikalojen vaelluspoikasten on havaittu uivan voimalaitospatojen läheisyydessä usein vesimassan ylimmässä kolmanneksessa (Coutant & Whitney 2000, Rivinoja 2005, Goodwin ym. 2006). Vaelluspoikasten onkin havaittu ohjautuvan voimalaitoksen ohi samaa vesimäärää käytettäessä jopa kaksi kertaa tehokkaammin veden pintakerroksessa olevan ohitusväylän kautta kuin tyyppillisen säännöstelypadon kautta (Evans ym. 2008).



Kuva 13. Yksinkertaisimmillaan vaelluspoikasten alasvaellusväylä voi olla voimalan rakenteisiin tehty putkirakenne. Kuvassa lohien vaelluspoikasia hakeutumassa alasvaellusväylään. Kuva: Anders Lamberg

Alasvaellusväylän sisäänkäynti tulisi suunnitella myös sellaiseksi, että vaelluspoikaset pystyvät vaeltamaan sen kautta pienissä parvissa (Haro ym. 1998, Kemp ym. 2006). Ruggles ja Ryan (1964) suosittelivatkin parvissa liikkuvien kalojen alasvaellusväylän sisäänkäynnin leveydeksi vähintään 45 cm. Myös sisäänkäynnin muotoon tulisi kiinnittää huomiota, sillä esimerkiksi lohismolttiparvien on havaittu kokeellisessa tutkimuksessa uivan loivakulmaisesta esteen ohi mieluummin kuin teräväkulmaisesta esteen ohi (Haro ym. 1998). Uudessa amerikkalaisessa yhteenvedossa suositellaankin alasvaellusväylän sisäänkäynnin kulmien loiventamista ja sen halkaisijaksi yli 60 cm (Anonyymi 2010).

Alasvaellusväylän suunnittelussa tulee myös huomioida sisäänkäynnin virtausnopeus, sillä lohikalojen vaelluspoikasten on havaittu välttelevän alueita, joissa virtausnopeus muuttuu nopeasti (Haro ym. 1998, Goodwin ym. 2006, Enders ym. 2012). Epäsuotuisat virtausolosuhteet alasvaellusreitillä voivat siksi jopa estää vaelluspoikasia käyttämästä sitä (Scruton ym. 2002, Kemp ym. 2008, Enders ym. 2012). Sisäänkäynnin lähellä virtauksen tulisi olla pyörteetön, virtausnopeuden tulisi kasvaa tasaisesti sisäänkäyntiä kohti ja sisäänkäynnissä virtausnopeuden olisi suositeltavaa olla noin 2 m/s (Haro ym. 1998, Johnson & Dauble 2006, Evans ym. 2008). Tavallisesti alasvaellusreitillä sisäänkäynnin virtausnopeus on ollut luokkaa 0,4–1,9 m/s (Skalski ym. 1996, Johnson ym. 2000, Evans ym. 2008).

Alasvaellusväylään ohjattava virtaama olisi suositeltavaa suhteuttaa turbiinivirtaamaan (Clay 1995, Odeh & Orvis 1998, Travade & Larinier 2006) tai joen keskivirtaamaan (Johnson & Dauble 2006). Yleisesti tutkimuksissa suuremman virtaaman on havaittu parantavan smolttien ohjautumista alasvaellusväylälle (Larinier & Boyer-Bernard 1991, Croze 2008, Greenberg ym. 2012). Esimerkiksi Travade ja Larinier (2006) suosittelivat alasvaellusväylälle ohjattavan virtaaman suuruudeksi 2–10 % turbiinivirtaamasta. Odeh ja Orvis (1998) esittivät alasvaellusväylän virtaamaksi vähintään 2 % turbiinivirtaamasta, kun käytössä on myös vaellusta ohjaava menetelmä, ja ilman ohjaavaa rakennetta virtaaman tulisi olla 5 % turbiinivirtaamasta. Esimerkiksi Croze (2008) havaitsi ranskalaisella Ariège-joella lohen vaelluspoikasten ohjaustehokkuuden olevan paras voimallaitoksilla, joilla virtaama alasvaellusväylällä oli keskimäärin 5,8–7,1 % turbiinivirtaamasta. Johnson ja Dauble suosittelivat alasvaellusväylän sisäänvirtaamaksi vähintään 4 % joen keskivirtaamasta. Veden pintakerroksessa sijaitsevien alasvaellusväyliä virtaama on vaihdellut yleisesti 1–13 % joen keskivirtaamasta (Johnson & Dauble 2006). Toisaalta, jos alasvaellusreitillä sisäänkäynti on sijoitettu lähelle ohjausrakennetta ja virtausolosuhteet ohjausrakenteen läheisyydessä ovat sopivat, siihen johdettavan virtaaman ei tarvitse olla erityisen suuri (Clay 1995, Travade & Larinier 2006). Clay (1995) esittikin 1 % joen virtaamasta riittävän tilanteessa, jossa alasvaellusväylä toimii ohjausrakenteen kanssa. Myös pienillä alasvaellusväylän virtaamilla on saatu hyviä tuloksia, sillä esimerkiksi kanadalaisella Exploits-joella alasvaellusväylän 0,6–1,3 m³/s virtaamalla (joen virtaama 173–201 m³/s) vaelluspoikasten ohjaustehokkuus oli keskimäärin 72 % (Scruton ym. 2007).

Jokeen kutuvaellukselle nousevia kaloja varten rakennetut kalatiet voivat myös toimia mm. lohen vaelluspoikasten alasvaellusreitteinä, mutta aiheesta on varsin vähän julkaistua tutkimustietoa. Yleisesti ottaen nousevia kaloja varten rakennetut kalatiet eivät toimi alasvaellusreitteinä ilman ohjausrakennetta (Rainey 1997, Whitney ym. 1997, Arnekleiv ym. 2007), sillä niiden virtaama on usein hyvin pieni (Whitney ym. 1997) ja/tai niiden sisäänkäyntiä on vaikea löytää (Arnekleiv ym. 2007).

Vaelluspoikasten selviytymisessä nousulohia varten rakennettuja kalatietoja pitkin alas voi olla vaihtelua erityyppisten kalatiedien välillä. Esimerkiksi Oulu- ja Kemijoella kalateihin vapautetut lohen vaelluspoikaset selviytyivät verraten hyvin kalatietoja pitkin alas (RKTL, julkaisematon), mutta ruotsa-

laisella Åbyälven-joella kalatiehen vapautetuista smolteista 38 %:n arvioitiin kuolleen kalatiessä saattuihin vammoihin (Gustafsson 2010).

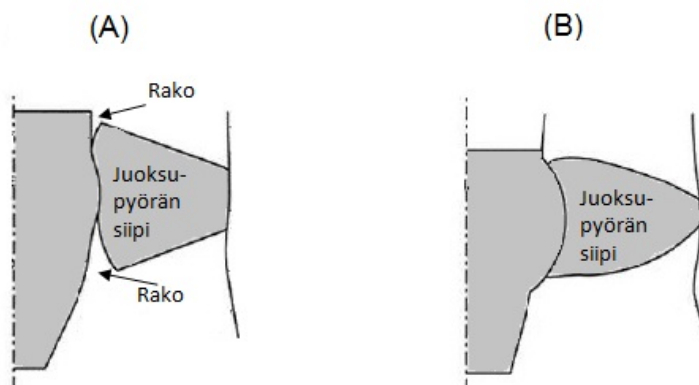
Alasvaellusväylän sisäänkäynnin lisäksi sen uloskäynnin sijaintiin tulisi kiinnittää huomiota. Uloskäynti tulisi sijoittaa alueelle, joka ei ole pedoille optimaalinen saalistusympäristö (Ferguson ym. 2007, Anonyymi 2010). Alasvaellusväylän uloskäynnin olisi hyvä sijaita keskemällä joki-uomaa, jossa virtaama on niin voimakas, etteivät petokalat voi siinä jatkuvasti oleskella (Ferguson ym. 2007).

4.3. Turbiinikuolleisuuden vähentäminen ja voimalaitosten käyttö

Turbiinin rakenteella ja toiminnalla voi olla vaikutusta vaelluspoikasten selviytymiseen sen läpi. Yleisemmällä turbiinityypeillä (Kaplan- ja Francis-turbiini) voidaan vähentää kaloille aiheutuvia vammoja, kun (Clay 1995, Odeh 1999, Čada 2001):

- turbiinin siipien välinen etäisyys on mahdollisimman suuri
- poistetaan raot turbiinin rakenteista (kuva 14) ja tasoitetaan rakenteiden pinnat
- turbiini asennetaan mahdollisimman syvälle suhteessa alakanavan tasoon
- turbiinia käytetään maksimiteholla.

Viime aikoina on myös suunniteltu uusia ”kalaystävällisiä”-turbiinityyppejä. Esimerkiksi Odeh (1999) esitteli uuden ARL/NREC (Alden Research Laboratory, Inc. and Northern Research and Engineering Corporation) turbiinin, jonka suunnittelussa on huomioitu kalojen selviytyminen sen läpi. Uuden turbiinin juoksupyörän rakenteet ja käyttöominaisuudet sekä paineen vaihtelut turbiinin läpi kuljettaessa suunniteltiin siten, etteivät ne vahingoita kaloja läpäisyn aikana. Turbiinin toimintaa testattiin 3D-mallinnuksessa, jossa havaittiin sen toimivan hyvin (Odeh 1999). Kehitetyn turbiinin hyötysuhde on mahdollisesti heikompi kuin nykyisin käytössä olevissa turbiineissa, jolloin uusi turbiinityppi voisikin toimia yhtenä turbiinina usean turbiinin voimalaitoksilla tai se voisi olla käytössä rakennetuissa alasvaellusväylässä hyödyntämässä sinne ohjatun veden potentiaalienergiaa (Odeh 1999).



Kuva 14. Kaavakuvat A) tyypillisestä Kaplan-turbiinista ja B) ”kalaystävällisestä” Kaplan-turbiinista, jossa rakenteiden välit on minimoitu. Kuvissa juoksupyörän siipikulma on säädetty mahdollisimman pieneksi. Lähde: Čada 2001

Vesivoimalaitosten toiminnan vuorokausirytmiksi on usein sellainen, että vettä juoksetetaan päivällä paljon ja yöllä vähemmän. Vuorokausirytmiksi seuraa sähkönkulutuksen rytmikkaa vuorokauden sisällä. Smolttivaelluksen kannalta tällainen voimalaitosten vuorokausirytmiksi voi olla ongelmallinen, sillä tutkimusten mukaan smoltit etsivät aktiivisemmin alasvaellusreittiä syvemmältä vesimassasta yöaikaan (Whitney ym. 1997, Beeman & Mayle 2001). Juoksetusten väheneminen yöllä voi näin ollen vaikeuttaa turbiinien läpi kulkevien smolttien vaellusta. Toisaalta juoksetusten vähenemisen seurauksena myös vaelluspoikasten vaellusnopeus voimalaitoksen yläpuolella hidastuu ja ylävirtaan liikkuminen lisääntyy (Plumb ym. 2006). Tämä taas nostaa vaelluspoikasten kuolleisuutta esim. predaation vaikutuksesta (ks. aiemmat luvut).

Voimalaitoksilla, joilla on enemmän kuin yksi turbiini, voi eri turbiinien juoksetusten välisillä eroilla olla vaikutusta alasvaellusväylän toimintaan. Croze (2008) havaitsi ranskalaisella Ariège-joella lohen vaelluspoikasia varten rakennetun alasvaellusväylän toimivan paremmin, kun vettä juoksetettiin eniten alasvaellusväylän sisäänkäynnin puoleisesta turbiinista.

4.4. Vaelluspoikasten kuljetus

Vaelluspoikastappioita jokivaelluksen aikana voidaan vähentää keräämällä ja kuljettamalla poikaset patojen alapuolelle (Ruggles 1980, Muir ym. 2006, Norrgård ym. 2013). Vaelluspoikasten pyydystäminen voidaan toteuttaa joko voimalaitospatojen yläpuolelta tai jo ennen ylimmän padon yläkanavaa. Esimerkiksi Snake- ja Kolumbiajokisysteemissä on pyydystetty ja siirretty kuningaslohen (*Oncorhynchus tshawytscha*) ja kirjolohen (*Oncorhynchus mykiss*) vaelluspoikasia seitsemän voimalaitospadon ohi, minkä avulla on parannettu poikasten selviytymistä jokivaelluksen aikana (Ruggles 1980). Norrgård ym. (2013) arvioivat kuljetuksen olevan toimiva vaihtoehto, kun halutaan parantaa vaelluspoikasten selviytymistä joissa, missä vaelluspoikasten on uitava useiden voimalaitosten läpi vaelluksensa aikana.

Kuljetusten ongelmana on kuitenkin poikasten suuri kuolleisuus vapautuksen jälkeen (Ruggles 1980, Muir ym. 2006). Kuolleisuuden on esitetty johtuvan kuljetuksen aiheuttamasta stressistä (Budy ym. 2002). Kuljetuksessa onkin useita stressaavia tekijöitä: kiinniotto, lastaus, kuljetus, lastin purku ja istutus uuteen paikkaan (Iversen ym. 2005). Kuljetuksesta aiheutuva stressi voi vaikuttaa poikasten käyttäytymiseen ja selviytymiseen useita päiviä vapautuksen jälkeen (Iversen ym. 1998). Iversen ym. (1998) havaitsivat kuljetuksen lohen vaelluspoikasille aiheuttaman stressitason olevan suurimmillaan tunti siirron jälkeen ja suolansietokyky oli normaalia heikompaa vielä kaksi vuorokautta kuljetuksen jälkeen.

Muir ym. (2006) esittivät kuljetusten jälkeisen kuolleisuuden kasvun johtuvan nopeasta ympäristön muutoksesta joesta jokisuulle siirretyillä vaelluspoikasilla. Kolumbiajoella voimalaitospatojen yläpuolelta kerätyt ja siirretyt poikaset saapuivat merelle 2–4 viikkoa aikaisemmin kuin jokea alasvaltaneet poikaset (Muir ym. 2006). Smolttien selviytymiseen jokisuulla vaikuttavat sekä ympäristötekijät että vaelluspoikasen fysiologinen valmius sopeutua suolaiseen meriveteen (McCormick ym. 1998, Muir ym. 2006). Jokisuun olosuhteet voivat olla ravinnon hankinnan ja predaation suhteen silloin hyvinkin erilaiset. Vastaavasti poikasten fysiologiset ominaisuudet, kuten suolansietokyky, voivat olla vasta kehittymässä täyteen mittaansa. Siten jokisuulle normaalia vaellusajankohtaa aikaisemmin kuljetettujen poikasten selviytyminen merellä voi olla heikompaa kuin itsenäisen jokivaelluksen läpikäyneillä vaelluspoikasilla (Muir ym. 2006).

5. Talvikoiden alasvaellus

Talvikoiden alasvaelluksesta rakennetuissa joissa on vielä verraten vähän tutkimustietoa (Arnekleiv ym. 2007). Merelle vaeltavien talvikoiden on selviydyttävä padotuissa joissa vastaavista esteistä kuin vaelluspoikasten, ja talvikoiden vaellustutkimuksissa onkin havaittu samanlaisia vaellusongelmia kuin smolteilla.

Talvikoiden turbiinikuolleisuus on tavallisesti suurempaa kuin vaelluspoikasten, johtuen niiden suuremmasta koosta (Ruggles 1980, Clay 1995, Ferguson ym. 2008). Esimerkiksi Exploits-joella lohitalvikoiden turbiinikuolleisuuden arvioitiin olevan 100 % (Scruton ym. 2008), kun puolestaan pohjoisruotsalaisilla Piteå- ja Umeå-joilla taimentalvikoiden kuolleisuus voimalaitosturbiinien läpäisyssä oli 25–60 % (Östergren & Rivinoja 2008). Toisaalta pohjois-suomalaisella Kemijoella lohien kuolleisuus Valajaskosken voimalaitoksen läpäisyssä arvioitiin olleen vain noin 7 % (Jaukkuri ym. 2012), ja Kemi-joen alimman voimalaitoksen läpäisistä lohista osa nousi kalatien kautta vielä uudelleen voimalaitoksen yläpuolelle, mikä osoittaa kalojen selviävän hyväkuntoisena voimalaitosturbiinien läpi (Jokikokko & Viitala 1995). Lisäksi Iijoella tehdyissä radiotelemetriatutkimuksissa lohitalvikoiden havaittiin selviytyvän alasvaelluksellaan viiden voimalaitoksen läpi jokisuulle (Orell ym. 2010).

Voimalaitospatojen on havaittu hidastavan talvikoiden vaellusta (Scruton ym. 2007). Talvikoiden tulisi kuitenkin päästä takaisin merelle mahdollisimman sujuvasti, sillä niiden vararavintovarastot on jo käytetty aikaisemmin kudun ja talvehtimisen aikana. Talvikot ovat smoltteja parempia uimareita ja ne löytävät siten alasvaellusväylän sisäänkäynnille tai säännöstelypadolle smoltteja tehokkaammin (Scruton ym. 2007). Esimerkiksi Exploits-joella lohitalvikot viettivät keskimäärin alle 2 tuntia Bishops Falls-voimalaitoksen yläpuolella, kun samassa paikassa vaelluspoikaset viipyivät padon yläpuolella 26–40 tuntia ennen alasvaellustaan (Scruton ym. 2007). Toisaalta, jos talvikoiden täytyy vaeltaa voimalan alapuolelle turbiinien kautta, voi viive voimalan yläpuolella olla myös vaelluspoikasten viivettä pidempi. Umeå-joella taimentalvikot pysyttelivät voimalan yläpuolella 11–29 vuorokautta ja Piteå-joellakin 2–9 vuorokautta ennen laskeutumistaan alavirtaan (Östergren & Rivinoja 2008).

Talvikoiden ohjaaminen voimalaitosten alapuolelle on onnistunut hyvin sekä säännöstelypatojen että smoltteja varten rakennettujen alasvaellusväylien kautta (kuva 15), kun sisäänkäynti on ollut vesimassan pintakerroksessa (Wertheimer & Evans 2005, Arnekleiv ym. 2007, Kraabøl ym. 2008, Scruton ym. 2008). Esimerkiksi Arnekleiv ym. (2007) ja Kraabøl ym. (2008) havaitsivat talvikkotaimenien laskeutuvan voimalaitospadon alapuolelle säännöstelypadon kautta, kun sen kautta juoksutettiin vettä vesimassan pintakerroksesta Gudbrandsdalen-joella Norjassa. Samalla joella Arnekleiv ym. (2007) havaitsivat selvän eron talvikoiden käyttäytymisessä pinnan ja pohjan läheltä tapahtuvien ohijuoksutusten suhteen: taimenet vaelsivat nopeasti alas pinnan läheisien ohijuoksutusten alkaessa, mutta pohjan läheisien ohijuoksutusten aikaan taimenet uivat pitkään edestakaisin etsien alasvaellusreittiä.

Snake- ja Kolumbia-joilla tehdyissä tutkimuksissa steelhead-talvikot (*Oncorhynchus mykiss*) selviytyivät parhaiten voimalaitosten ohi säännöstelypatojen kautta, mutta osa kaloista vaelsi onnistuneesti alas myös vaelluspoikasia varten rakennettujen ohjausrakenteiden ja alasvaellusväylien kautta (Wertheimer & Evans 2005).



Kuva 15. Talvikoiita voidaan onnistuneesta ohjata alavirtaan vaelluspoikasille kehitettyjä alasvaellusväyliä pitkin. Kuva: Anders Lamberg

6. Yhteenveto ja johtopäätökset

Tutkimusten perusteella lohen vaelluspoikasten ja talvikoiden alasvaelluksessa esiintyy rakennetuilla joilla suuria ongelmia. Ongelmat korostuvat useiden voimalaitospatojen tapauksissa, joissa kuolleisuus voi nousta erittäin korkeaksi. Rakennetuissa joissa lohen vaelluspoikasten alasvaelluksen keskeisiä ongelmia ovat:

- Vaelluksen hidastuminen
- Turbiinikuolleisuus
- Predaatio
- Stressi ja vahingoittuminen

Vaelluspoikasten alasvaellusongelmien vähentämiseksi on kehitetty erilaisia ratkaisuja. Yleinen ratkaisukeino on ohjata vaelluspoikaset nopeasti ja tehokkaasti turbiinit kiertävää reittiä pitkin voimalaitoksen alapuolelle. Vaelluspoikasten ohjaaminen halutulle reitille toteutetaan yleensä voimalaitosten yläkanaviin asennettujen ohjausrakenteiden ja voimalaitosten turbiinit ohittavan alasvaellusreitit yhdistelmillä. Käytössä olevat ohjausmenetelmät voidaan jakaa karkeasti kahteen eri tyyppiin:

- Rakenteelliset ohjausmenetelmät
- Käyttäytymiseen perustuvat ohjausmenetelmät

Molemmilla menetelmillä on ohjattu onnistuneesti vaelluspoikasia turbiinin kiertävälle reitille. Suurimpia haasteita kummallakin ohjausrakennetyypillä on saada virtausolosuhteet lähellä rakennetta

vaelluspoikasille sopiviksi. Koska virtausolosuhteet ovat jokaisen padon yläpuolella yksilölliset, ei yhtä aina toimivaa ohjausrakennetta ole pystytty kehittämään. Viime aikoina alasvaelluksen paremman ohjaustehokkuuden saavuttamiseksi on myös yhdistelty erilaisia ohjausmenetelmiä samalla padolla. Lisäksi on alettu kiinnittää enemmän huomioita virtausolosuhteisiin alasvaellusrakenteiden lähellä ja selvitetty näiden vaikutusta vaelluspoikasten käyttäytymiseen myös laboratoriolokoin. Tällaista tutkimusta tarvitaan kuitenkin vielä lisää, sillä sen avulla voidaan kehittää alasvaellusrakenteiden tehokkuutta. Tulevaisuudessa huomiota tulisi kiinnittää erityisesti niihin kohteisiin, joissa on havaittu huomattavaa vaelluksen hidastumista tai turbiinikuolleisuutta.

Varsinaisena alasvaellusreitteinä ohjausrakenteen yhteydessä voivat toimia:

- Putkirakenteet
- Rännit
- Nousukaloja varten tehdyt kalatiet
- Säännöstelypadot

Varsinaisen alasvaellusväylän toimivuutta ja vaelluspoikasten selviytymistä sen kautta alavirtaan tulisi myös tutkia, sillä myös alasvaellusväylät voivat hidastaa poikasten vaellusta. Vastaavasti alasvaellusväylän uloskäynnin sijoittaminen petokaloille sopivaan saalistusympäristöön voi lisätä kuolleisuutta.

Ohjausrakenteiden ja alasvaellusväylien avulla on onnistuttu parantamaan vaelluspoikasten selviytymistä poikaselinympäristöstä merelle. Hyvänä esimerkkinä toimii amerikkalainen Kolumbia-joki, jossa smolttien selviytymisen jokivaelluksesta on arvioitu olevan samaa tasoa kuin vapaalla Fraserjoella (Welch ym. 2008).

Kiitokset

Kiitämme tasapuolisesti kaikkia tähän kirjallisuuskatsaukseen kommentteja ja parannusehdotuksia tehneitä tahoja. Tämä kirjallisuuskatsaus laadittiin ”Innovatiivinen verkostoiminen ja modernit työkalut kalatiestrategian toteutukseen”-hankeessa, jonka rahoittajana toimi mm. Euroopan aluekehitysrahasto. Lisäksi kirjallisuuskatsauksen laadinnassa hyödynnettiin aineistoja ja tietoja, joita koottiin ”Rakennettujen jokien vaelluskalakanavien hoitotoimenpiteet: menetelmäkirjon arviointi ja kehittäminen”-hankkeessa vuosina 2010–2013. Suuret kiitokset kaikille rahoittajille.

Viitteet

- Aarestrup, K., Nielsen, C. & Koed A. 2002. Net ground speed of downstream migrating radio-tagged Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) and brown trout (*Salmo trutta* L.) smolts in relation to environmental factors. *Hydrobiologia* 483: 95–102.
- 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.
- Adams, N.S., Rondorf, D.W., Evans, S.D., Kelly, J.E. & Perry, R.W. 1998. Effects of surgically and gastrically implanted radio transmitters on swimming performance and predator avoidance of juvenile Chinook salmon (*Oncorhynchus tshawytscha*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science* 55: 781–787.

- Anglea, S.M., Geist, D.R., Brown, R.S., Deters, K.A. & McDonald, R.D. 2004. Effects of acoustic transmitters on the swimming performance and predator avoidance of juvenile Chinook salmon. *North American Journal of Fisheries Management* 24: 162–170.
- Antonsson, T. & Gudjonsson, S. 2002. Variability in timing and characteristics of Atlantic salmon smolt in Icelandic rivers. *Transactions of the American Fisheries Society* 131: 643–655.
- Anttila, K. 2009. Swimming muscles of wild, trained and reared fish: aspects of contraction machinery and energy metabolism. Doctoral thesis, Acta Universitatis Ouluensis. A Scientiae rerum naturalium 526.
- Anonymi 2010. Diadromous fish passage: A primer on technology, planning, and design for the Atlantic and Gulf Coasts. NOAA, National Marine Fisheries Service. Luettavissa 24.9.2013 osoitteessa: <http://www.nero.noaa.gov/hcd/docs/FishPassagePrimer.pdf>.
- Arnekleiv, J.V., Kraabøl, M. & Museth, J. 2007. Efforts to aid downstream migrating brown trout (*Salmo trutta* L.) kelts and smolts passing a hydroelectric dam and a spillway. *Hydrobiologia* 582: 5–15.
- Baras, E. & Lagardère, J.-P. 1995. Fish telemetry in aquaculture: review and perspectives. *Aquaculture International* 3: 1–6.
- Bates, D.W. & Vinsonhaler, R. 1957. Use of louvers guiding fish. *Transactions of the American Fisheries Society* 86: 38–57.
- Beeman, J.W. & Maule, A.G. 2001. Residence times and diel passage distributions of radio-tagged juvenile spring Chinook salmon and steelhead in a gatewell and fish collection channel of a Columbia River dam. *North American Journal of Fisheries Management* 21: 455–463.
- Bickford, S.A. & Skalski, J.R. 2000. Reanalysis and interpretation of 25 years of Snake-Columbia River juvenile salmonid survival studies. *North American Journal of Fisheries Management* 20: 53–68.
- Brown, R.S., Steven, J., Cooke, W., Anderson, W.G. & McKinley, R.S. 1999. Evidence to challenge the "2% rule" for biotelemetry. *North American Journal of Fisheries Management* 19: 867–871.
- Brown, R.S., Oldenburg, E.W., Seaburg, A.G., Cook, K.V., Skalski, J.R., Eppart, M.B. & Deters, K.A. 2013. Survival of seaward-migrating PIT and acoustic-tagged juvenile Chinook salmon in the Snake and Columbia Rivers: an evaluation of length-specific tagging effects. *Animal Biotelemetry* 1.
- Budy, P., Thiede, G.P., Bouwes, N., Petrosky, C.E. & Schaller, H. 2002. Evidence linking delayed mortality of Snake River salmon to their earlier hydrosystem experience. *North American Journal of Fisheries Management* 22: 35–51.
- Byrne, C.J., Poole, R., Rogan, G., Dillane, M. & Whelan, K.F. 2003. Temporal and environmental influences on the variation in Atlantic salmon smolt migration in the Burrishoole system 1970-2000. *Journal of Fish Biology* 63: 1552–1564.
- Čada, G.F. 2001. The development of advanced hydroelectric turbines to improve fish passage survival. *Fisheries* 26: 14–23.
- 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 Research and Applications* 25: 1268–1286.
- Calles, O., Karlsson, S., Hebrand, M. & Comoglio, C. 2012. Evaluating technical improvements for downstream migrating diadromous fish at a hydroelectric plant. *Ecological Engineering* 48: 30–37.
- Calles, O., Rivinoja, P. & Greenberg, L. 2013. A historical perspective on downstream passage at hydroelectric plants in Swedish rivers. Teoksessa Maddock, I., Harby, A., Kemp, P. & Wood, P. (Edit), *Ecohydraulics: an integrated approach*. West Sussex, UK: John Wiley & Sons Ltd, 309–322.
- Carlsen, K.T., Berg, O.K., Finstad, B. & Heggberget, T.G. 2004. Diel periodicity and environmental influence on the smolt migration of Arctic charr, *Salvelinus alpinus*, Atlantic salmon, *Salmo salar*, and brown trout, *Salmo trutta*, in northern Norway. *Environmental Biology of Fishes* 70: 403–413.
- Carlson, T.J., Brown, R.S., Stephenson, J.R., Pflugrath, B.D., Colotelo, A.H., Gingerich, A.J., Piper, B.L., Langeslay, M.J., Ahmann, M.L., Johnson, R.L., Skalski, J.R., Seaburg, A.G. & Townsend, R.L. 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.
- Castro-Santos, T. 2005. Optimal swim speeds for traversing velocity barriers: an analysis of volitional high-speed swimming behavior of migratory fishes. *Journal of Experimental Biology* 208: 421–432.
- Castro-Santos, T. & Haro, A. 2003. Quantifying migratory delay: A new application of survival analysis methods. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 60: 986–996.
- Christensen, B. 1996. Predator foraging capabilities and prey antipredator behaviours: Pre-versus postcapture constrains on size-dependent predator-prey interactions. *Oikos* 76: 368–380.

- Clay, C.H. 1995. Design of fishways and other fish facilities. Second edition. Lewis Publishers, CRC Press, Inc., Boca Raton, Florida.
- Connors, K.B., Scruton, D., Brown, J.A. & McKinley, R.S. 2002. The effects of surgically-implanted dummy radio transmitters on the behaviour of wild Atlantic salmon smolts. *Hydrobiologia* 483: 231–237.
- 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.
- Cramer, F.K. & Oligher, R.C. 1964. Passing fish through hydraulic turbines. *Transactions of the American Fisheries Society* 93: 243–259.
- Croze, O. 2008. Assessment of downstream fish bypasses for Atlantic salmon smolts at four hydroelectric facilities on the Ariège River (France). *American Fisheries Society Symposium* 61: 123–140.
- Davidson, J., Svenning, M.A., Orell, P., Yoccoz, N., Dempson, J.B., Niemelä, E., Klemetsen, A., Lamberg, A. & Erkinaro, J. 2005. Spatial and temporal migration of wild Atlantic salmon smolts determined from a video camera array in the sub-Arctic River Tana. *Fisheries Research* 74: 210–222.
- Dieperink, C., Pedersen, S. & Pedersen M.I. 2001. Estuarine predation on radiotagged wild and domesticated sea trout (*Salmo trutta* L.) smolts. *Ecology of Freshwater Fish* 10: 177–183.
- Ebel, W.J. 1969. Supersaturation of nitrogen in the Columbia River and its effect on salmon and steelhead trout. *Fishery Bulletin* 68: 1–11.
- Einum, S. & Fleming, I.A. 1997. Genetic divergence and interactions in the wild among native, farmed and hybrid Atlantic salmon. *Journal of Fish Biology* 50: 634–651.
- Ellis, T., North, B., Scott, A.P., Bromage, N.R., Porter, M. & Gadd, D. 2002. The relationship between stocking density and welfare in farmed rainbow trout. *Journal of Fish Biology* 61: 493–531.
- Enders, E.C., Gessel, M.H., Anderson, J.J. & Williams, J.G. 2012. Effects of decelerating and accelerating flows on juvenile salmonids behavior. *Transactions of the American Fisheries Society* 141: 357–364.
- Eriksson, L.-O., Rivinoja, P., Östergren, J., Serrano, I. & Larsson, S. 2008. Smolt quality and survival of compensatory stocked Atlantic salmon and brown trout in the Baltic Sea. SLU, Report 62.
- Erkinaro, J., Julkunen, M. & Niemelä, E. 1998: Migration of juvenile Atlantic salmon *Salmo salar* in small tributaries of the subarctic River Teno, northern Finland. *Aquaculture* 168: 105–119.
- Evans, S.D., Adam, N.S., Rondorf, D.W., Plumb, J.M. & Ebberts, B.D. 2008. Performance of a prototype surface collector for juvenile salmonids at Bonneville Dam's first powerhouse on the Columbia River, Oregon. *River Research and Applications* 24: 960–974.
- Ferguson, J.W. 2008. Behavior and survival of fish migrating downstream in regulated rivers. Doctoral thesis, Swedish University of Agricultural Sciences, Umeå 2008.
- Ferguson, J.W., Matthews, G.M., Eppart, M.B., McCormas, R.L., Absolon, R.F., Brege, D.A., Gessel, M.H. & Gilbreath, L.G. 2005. Passage of adult and juvenile salmonids through federal Columbia River power system dams. U.S. Department of Commerce, NOAA Technical Memorandum Memorandum NMFS-NWFSC-64. 160s.
- Ferguson, J.W., Absolon, R.F., Carlson, T.J. & Sandford, B.P. 2006. Evidence of delayed mortality on juvenile Pacific salmon passing through turbines at Columbia River dams. *Transactions of the American Fisheries Society* 135: 139–150.
- Ferguson, J.W., Sandford, B.P., Reagan, R.E., Gilbreath, L.G., Meyer, E.B., Ledgerwood, R.D. & Adams, N.S. 2007. Bypass system modification at Bonneville Dam on the Columbia River improved the survival of juvenile salmon. *Transactions of the American Fisheries Society* 136: 1487–1510.
- Ferguson, J., Ploskey, G., Leonardsson, K., Zabel R. & Lundqvist, H. 2008. Combining turbine blade-strike and life cycle models to assess migrating strategies for fish passing dams. *Canadian Journal of Fisheries & Aquatic Sciences* 65: 1568–1585.
- Fjeldstad, H.P., Uglem, I., Diserud, O.H., Fiske, P., Forseth, T., Kvingedal, E., Hvidsten, N.A., Økland, F. & Järnegren, J. 2012. A concept for improving Atlantic salmon *Salmo salar* smolt migration past hydro power intakes. *Journal of Fish Biology* 81: 642–663.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations and Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V (FAO/DVWK). 2002. Fish passage – design, dimensions, and monitoring. FAO, Rome.
- Gessel, M.H., Williams, J.G., Brege, D.A., Krcma, R.F. & Chambers, D.R. 1991. Juvenile salmonid guidance at the Bonneville Dam second powerhouse, Columbia River, 1983–1989. *North American Journal of Fisheries Management* 11: 400–412.
- Goodwin, R.A., Nestler, J.M., Anderson, J.J., Weber, L.J. & Loucks, D.P. 2006. Forecasting 3-D fish movement behavior using a Eulerian-Lagrangian-agent method (ELAM). *Ecological Modelling* 192: 197–223.

- Greenberg, L., Calles, O., Andersson, J. & Engqvist, T. 2012. Effect of trash diverters and overhead cover on downstream migrating brown trout smolts. *Ecological Engineering* 48: 25–29.
- Gross, M.R. 1998. One species with two biologies: Atlantic salmon (*Salmo salar*) in the wild and aquaculture. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 55: 131–144.
- Gustafsson, S. 2010. Migration losses of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) smolts at a hydropower station area in River Åbyälven, Northern Sweden. Pro gradu, Wildlife, Fish, and Environmental Studies, Swedish University of Agricultural Sciences, SLU, Umeå, Sweden, 17s.
- Haro, A., Odeh, M., Noreika, J. & Castro-Santos, T. 1998. Effect of water acceleration on downstream migratory behavior and passage of Atlantic salmon smolts and juvenile American shad at surface bypasses. *Transactions of the American Fisheries Society* 127:118–127.
- Hartvich, P., Dvořák, P., Tlustý, P. & Vrána, P. 2008. Rotation screen prevents fish damage in hydroelectric power stations. *Hydrobiologia* 609: 163–176.
- Hesthagen, T. & Garnås, E. 1986. Migration of Atlantic salmon smolts in River Orkla of Central Norway in relation to management of a hydroelectric station. *North American Journal of Fisheries Management* 6: 376–382.
- Hoar, W.S. 1976. Smolt transformation: evolution, behavior, and physiology. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada* 33: 1233–1252.
- Hockersmith, E.E., Muir, W.D., Smith, S.G., Sandford, B.P., Perry, R.W., Adams, N.S. & Rondorf, D.W. 2003. Comparison of migration rate and survival between radio-tagged and PIT-tagged migrant yearling Chinook salmon in the Snake and Columbia rivers. *North American Journal of Fisheries Management* 23: 404–413.
- Huntingford, F.A. 2004. Implications of domestication and rearing conditions for the behaviour of cultivated fishes. *Journal of Fish Biology* 65: 122–142.
- Huusko, R., Orell, P., van der Meer, O., Jaukkuri, M. & Mäki-Petäys, A. 2012. Lohen vaelluspoikasten radiotelemetriaseuranta Iijoella vuosina 2010–2011. Työraportti. Riista- ja kalatalouden tutkimuslaitos, 30s.
- Hvidsten, N.A. & Johnson B.O. 1997. Screening of descending Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) smolts from hydropower intake in the River Okla, Norway. *Nordic Journal of Freshwater Research* 73: 44–49.
- Hvidsten, N.A., Jensen, A., Vivås, H., Bakke, Ö. & 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.
- Hvidsten, N.A., Jensen, A.J., Rikardsen, A.H., Finstad, B., Aure, J., Stefansson, S., Fiske, P. & Johnsen, B.O. 2009. Influence of sea temperature and initial marine feeding on survival of Atlantic salmon post-smolts from the Rivers Orkla and Hals, Norway. *Journal of Fish Biology* 74: 1532–1548.
- 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.
- Ibbotson, A.T., Beaumont, W.R.C., Pinder, A., Welton, S. & Ladle, M. 2006. Diel migration patterns of Atlantic salmon smolts with particular reference to the absence of crepuscular migration. *Ecology of Freshwater Fish* 15: 544–551.
- Iversen, M., Finstad, B. & Nilssen, K.J. 1998. Recovery from loading and transport stress in Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) smolts. *Aquaculture* 168: 387–394.
- Iversen, M., Finstad, B., McKinley, R.S., Eliassen, R.A., Carlsen, K.T. & Evjen, T. 2005. Stress responses in Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) smolts during commercial well boat transport and effects on survival after transfer to sea. *Aquaculture* 243: 373–382.
- Jaukkuri, M., Orell, P., Kanninen, T., Vierelä, M., Huusko, R., Mäki-Petäys, A. & Erkinaro, J. 2012. Ylisiiretetyjen lohien radiotelemetriatutkimus Kemi-Ounasjoella v. 2010–2011. RKTL:n työraportteja 11/2012. Riista- ja kalatalouden tutkimuslaitos, 46s.
- 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., Pedersen, S. & Thorstad, E. 2000. Behavioural interactions between prey (trout smolts) and predators (pike and pikeperch) in an impounded river. *Regulated Rivers: Research & Management* 16: 189–198.
- Jepsen, N., Koed, A., Thorstad, E. & Baras, E. 2002. Surgical implantation of telemetry transmitters in fish: how much have we learned? *Hydrobiologia* 483: 239–248.

- Jepsen, N., Schreck, C., Clemets, S. & Thorstad, E.B. 2005. A brief discussion on the 2% tag/bodymass rule of thumb. *Aquatic telemetry: advances and applications*. Proceedings of the Fifth Conference on Fish Telemetry held in Europe. Ustica, Italy, 9-13 June 2003. Rome, FAO/COISPA.
- Jepsen, N., Christoffersen, M. & Munksgaard, T. 2008. The level of predation used as an indicator of tagging/handling effects. *Fisheries Management and Ecology* 15: 365–368.
- Johnson, G.E., Adams, N.S., Johnson, R.L., Rondorf, D.W., Dauble, D.D. & Barila, T.Y. 2000. Evaluation of the prototype surface bypass for salmonids smolts in spring 1996 and 1997 at Lower Granite Dam on the Snake River, Washington. *Transactions of the American Fisheries Society* 129: 381–397.
- Johnson, G.E. & Dauble, D.D. 2006. Surface flow outlets to protect juvenile salmonids passing through hydro-power dams. *Reviews in Fisheries Science* 14: 213–244.
- Johnson, R.L. & Moursund, R.A. 2000. Evaluation of juvenile salmon behavior at Bonneville Dam, Columbia River, using a multibeam technique. *Aquatic Living Resources* 13: 313–318.
- Johnson, G.E., Adams, N.S., Johnson, R.L., Rondorf, D.W., Dauble, D.D. & Barila, T.Y. 2000. Evaluation of the prototype surface bypass for salmonids smolts in spring 1996 and 1997 at Lower Granite Dam on the Snake River, Washington. *Transactions of the American Fisheries Society* 129: 381–397.
- Johnson, S.L., Power, J.H., Wilson, D.R. & Ray, J. 2010. A comparison of the survival and migratory behavior of the hatchery-reared and naturally reared steelhead smolts in the Alsea River and estuary, Oregon, using acoustic telemetry. *North American Journal of Fisheries Management* 30: 55–71.
- Jokikokko, E. & Viitala, J. 1995. Lohien telemetriaseurantaa Kemijokisuulla ja Isohaaran yläpuolisessa patoaltaassa vuonna 1995. *Kala- ja riistaraportteja* nro 43, Riista- ja kalatalouden tutkimuslaitos.
- Jonsson, N. 1991. Influence of water flow, water temperature and light on fish migration in rivers. *Nordic Journal of Freshwater Research* 66: 20–35.
- Jonsson, B. & Jonsson, N. 2006. Cultured Atlantic salmon in nature: a review of their ecology and interaction with wild fish. *ICES Journal of Marine Sciences* 63: 1162–1181.
- Jonsson, B. & Ruud-Hansen, J. 1985. Water temperature as the primary influence on timing of seaward migrations of Atlantic salmon *Salmo salar* smolt. *Canadian Journal Fisheries and Aquatic Sciences* 42: 593–595.
- Jutila, E., Jokikokko, E. & Julkunen, M. 2005. The smolt run and postsmolt survival of Atlantic salmon, *Salmo salar* L., in relation to early summer water temperatures in the northern Baltic Sea. *Ecology of Freshwater Fish* 14: 69–78.
- Karppinen, P., Jounela, P., Erkinaro, J., Huusko, R. & van der Meer, O. 2013. Effects of release timing on migration behaviour and survival of hatchery-reared Atlantic salmon smolts in a regulated river. *Ecology of Freshwater Fish* doi: 10.1111/eff.12097.
- Kemp, P.S., Gessel, M.H., Sandford, B.P. & Williams, J.G. 2006. The behaviour of Pacific salmonid smolts during passage over two experimental weirs under light and dark conditions. *River Research and Applications* 22: 429–440.
- Kemp, P.S., Gessel, M.H. & Williams, J.G. 2008. Response of downstream migrant juvenile Pacific salmonids to accelerating flow and overhead cover. *Hydrobiologia* 609: 205–217.
- Kekäläinen, J. 2005. Haukien (*Esox lucius* L.) saalistuksen vaikutus istutettujen lohen (*Salmo salar* L.) vaelluspoikasten kuolleisuuteen Pyhäjoella. Riista- ja kalatalouden tutkimuslaitos. Kalantutkimuksia – Fiskundersökningar 194, 34s.
- Kekäläinen, J., Niva, T. & Huuskonen, H. 2008. Pike predation on hatchery-reared Atlantic salmon smolts in a northern Baltic river. *Ecology of Freshwater Fish* 17: 100–109.
- Klemetsen A., Amundsen, P.-A., Dempson, J.B., Jonsson, N., O’Connell, M.F. & Mortensen, E. 2003: Atlantic salmon *Salmo salar* L., brown trout *Salmo trutta* L. and Baltic charr *Salvelinus alpinus* (L.): a review of their life histories. *Ecology of Freshwater Fish* 12:1–59.
- Koed, A., Jepsen, N., Aarestrup, K. & Nielsen, C. 2002. Initial mortality of radio-tagged Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) smolts following release downstream of a hydropower station. *Hydrobiologia* 438: 31–37.
- Kraabøl, M., Arnekleiv, J.V. & Museth, J. 2008. Emigration patterns among trout, *Salmo trutta* (L.), kelts and smolts through spillways in a hydroelectric dam. *Fisheries Management and Ecology* 15:417–423.
- Lacroix, G.L., Knox, D. & McCurdy, P. 2004. Effects of implanted dummy acoustic transmitters on juvenile Atlantic salmon. *Transactions of the American Fisheries Society* 133: 211–220.
- Larinier, M. 2008 Fish passage experience at small-scale hydro-electric power plants in France. *Hydrobiologia* 609: 97–108.

- Larinier, M. & Boyer-Bernard, S. 1991. Downstream migration of smolts and effectiveness of a fish bypass structure at Halsou hydroelectric powerhouse on the Nive River. *Bulletin Francais De La Peche Et De La Pisciculture* 321: 72–92.
- Larinier, M. & Marmulla, G. 2004. Fish passes: types, principles and geographical distribution-an overview. Teoksessa: Welcomme, R.L. & Petr, T. (Edit.) Proceedings of the Second International Symposium on the Management of Large Rivers for Fisheries Volume II. FAO Regional Office for Asia and the Pacific, Bangkok, Thailand.
- Larinier, M. & Travade, F. 2002. Downstream migration: problems and facilities. BFP-Connnaissance et Gestion du Patrimoine Aquatique, 364 supplément.
- Larsson, P.-O. 1985. Predation on migrating smolt as a regulating factor in Baltic salmon, *Salmo salar* L., populations. *Journal of Fish Biology* 26: 391–397.
- Liscom, K.L. 1971. Orifice placement in gatewells of turbines for bypassing juvenile fish around dams. *Transactions of the American Fisheries Society* 2: 319–324.
- Lundqvist, H., Clarke, W.C. & Johansson, H. 1988. The influence of precocious sexual maturation on the survival to adulthood of river stocked Baltic salmon, *Salmo salar*, smolts. *Ecography* 11: 60–69.
- Lundvall, D., Svanbäck, R., Persson, L. & Byström, P. 1999. Size-dependent predation in piscivores: Interactions between predator foraging and prey avoidance abilities. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 56: 1285–1292.
- Lundström, T.S., Gunnar, J., Hellström, I. & Lindmark, E.M. 2010. Flow desing of guiding device for downstream fish migration. *River research and Applications* 26: 166–182.
- MacLean, A., Metcalfe, N.B. & Mitchell, D. 2000. Alternative competitive strategies in juvenile Atlantic salmon (*Salmo salar*): evidence from fin damage. *Aquaculture* 184: 291–302.
- Mather, M.E. 1998. The role of context-specific predation in understanding patters exhibited by anadromous salmon. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 55: 232–246.
- Mathews, G.M., Parks, D.L., Achord, S. & Ruehle, T.E. 1986. Static seawater challenge test to measure relative stress levels in spring Chinook salmon smolts. *Transactions of the American Fisheries Society* 115: 236–244.
- Mathur, D., Heisey, P.G., Euston, E.T., Skalski, J.R. & Hays, S. 1996. Turbine passage survival estimation for Chinook salmon smolts (*Oncorhynchus tshawytscha*) at a large dam on the Columbia River. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science* 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 Science* 55: 77–92.
- McCormick, S.D., Lerner, D.T., Monette, M.Y., Nieves-Puigdoller, K., Kelly, J.T. & Björnsson, B.T. 2009. Taking it with you when you go: How perturbations to the freshwater environment, including temperature, dams, and contaminants, affect marine survival of salmon. *American Fisheries Society Symposium* 69: 195–214.
- Metcalfe, N.B. & Thorpe, J.E. 1990. Determinants of geographical variation in the age of seaward-migration salmon, *Salmo salar*. *Journal of Animal Ecology* 59: 135–145.
- Montén, E. 1985. Fish and turbines: fish injuries during passage through power station turbines. Vattenfall AB, Stockholm, Sweden.
- Moore, A., Russell, I.C. & Potter, E.C.E. 1990. The effects of intraperitoneally implanted dummy acoustic transmitters on the behavior and physiology of juvenile Atlantic salmon, *Salmo salar* L. *Journal of Fish Biology* 37:713–721.
- Moore, A., Potter, E.C.E., Milner, N.J. & Bamber, S. 1995. The migratory behaviour of migration wild Atlantic salmon (*Salmo salar*) smolt in the estuary of the River Conwy, North Wales. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 52: 1923–1935.
- Muir, W.D., Smith, S.G., Williams, J.G. & Sandford, B.P. 2001. Survival of juvenile salmonids passing through bypass systems, turbines, and spillways with and without flow deflectors at Snake River dams. *North American Journal of Fisheries Management* 21: 135–146.
- Muir, W.D., Marsh, D.M., Sandford, B.P., Smith, S. G. & Williams, J.G.. 2006. Post-hydropower system delayed mortality of transported Snake River stream-type Chinook salmon: Unraveling the mystery. *Transactions of the American Fisheries Society* 135: 1523–1534.
- Muir, W.D. & Williams, J.G. 2012. Improving connectivity between freshwater and marine environments for salmon migrating through the lower Snake and Columbia River hydropower system. *Ecological Engineering* 48: 19–24.

- Murchie, K.J., Cooke, S.J. & Schreer, J.F. 2004. Effects of radiotransmitter antenna length on swimming performance of juvenile rainbow trout. *Ecology of Freshwater Fish* 13: 312–316.
- Mäki-Petäys, A., van der Meer, O., Romakkaniemi, A., Orell, P., Rivinoja, P. & Erkinaro, J. 2012. Lohikantojen palauttaminen rakennetuille joille – mallinnustyökalu tuki- ja sääätelytoimien biologiseen arviointiin. Työraportti. Riista- ja kalatalouden tutkimuslaitos. 42s.
- Mäki-Petäys, A., van der Meer, O., Romakkaniemi, A., Orell, P. & Erkinaro, J. 2013. Kymijoen lohikannan elvyttäminen – populaatiomallinnus tuki- ja sääätelytoimien vaikutuksesta. Työraportti. Riista- ja kalatalouden tutkimuslaitos, 25s.
- Mäntyniemi, S., Romakkaniemi, A., Dannewitz, J., Palm, S., Pakarinen, T., Pulkkinen, H., Gårdmark, A. & Karlsson, O. 2012. Both predation and feeding opportunities may explain changes in survival of Baltic salmon post-smolts. *ICES Journal of Marine Sciences* 69: 1574–1579.
- Nettles, D.C. & Gloss, S.P. 1987. Migration of landlocked Atlantic salmon smolts and effectiveness of a fish bypass structure at a small-scale hydroelectric facility. *North American Journal of Fisheries Management* 7: 562–568.
- Nestler, J.M., Goodwin, R.A., Smith, D.L, Anderson, J.J. & Li, S. 2008. Optimum fish passage and guidance designs are based in the hydrogeomorphology of natural rivers. *River Research and Applications* 24: 148–168.
- Niemelä, E., Orell, P., Erkinaro, J., Dempson, J.B., Brørs, S, Svenning, M. & Hassinen, E. 2006a. Previously spawned Atlantic salmon ascend a large subarctic river earlier than their maiden counterparts. *Journal of Fish Biology* 69: 1151–1163.
- Niemelä, E., Erkinaro, J., Julkunen, M., Hassinen, E., Länsman, M. & Brørs, S. 2006b. Temporal variation in abundance, return rate and life histories of previously spawned Atlantic salmon in a large subarctic river. *Journal of Fish Biology* 68: 1222–1240.
- Norrgård, J.R., Greenberg, L.A., Piccolo, C.C., Schmitz, M. & Bergman, E. 2013. Multiplicative loss of landlocked Atlantic salmon *Salmo salar* L. smolts during downstream migration through multiple dams. *River Research and Applications* 29: 1306–1317.
- Odeh, M. 1999. A summary of environmentally friendly turbine design concepts. U.S. Department of Energy Idaho Operations Office, DOE/ID/13741. 39s.
- Odeh, M. & Orvis, C. 1998. Downstream fish passage design considerations and developments at hydroelectric projects in the North-east USA. Teoksessa: Jungwirth, M., Schmutz, S. & Weiss, S. (Edit.) Fish migration and fish bypasses, Fishing News Books, 267–280.
- Økland, F., Jonsson, B., Jensen, A.J. & Hensen, L.P. 1993: Is there a threshold size regulating seawater migration of brown trout and Atlantic salmon? *Journal of Fish Biology* 42: 541–550.
- Olsson, I.C., Greenberg, L.A. & Eklöv, A.G. 2001. Effect of an artificial pond on migrating brown trout smolts. *North American Journal of Fisheries Management* 21: 498–506.
- Olsson, I.C. & Greenberg, L.A. 2004: Partial migration in a landlocked brown trout population. *Journal of Fish Biology* 65: 106–121.
- Olsson, I.C., Greenberg, L.A., Bergman, E. & Wysujack, K. 2006: Environmentally induced migration: the importance of food. *Ecology Letters* 9: 645–651.
- Orell, P., Erkinaro, J., Svenning, M.A., Davidsen, J.G. & Niemelä, E. 2007. Synchrony in the downstream migration of smolts and upstream migration of adult Atlantic salmon in the subarctic River Utsjoki. *Journal of Fish Biology* 71: 1735–1750.
- Orell, P., Jaukkuri, M., Kannianen, T., van der Meer, O., Mäki-Petäys, A., Huusko, R., Karppinen, P. & Marttila, M. 2010. Ylisiirrettyjen lohien radiotelemetriaseuranta lijoella v. 2009–2010. Työraportti 30.10.2010. Vaelluskalat palaavat lijokeen –hanke. Riista- ja kalatalouden tutkimuslaitos.
- Otero, J., L’abée-Lund, J.H., Castro-Santos, T., Leonardsson, K., Storvik, G.O., Jonsson, B., Dempson, B., Russell, I.C., Jensen, A.J., Baglinière, J.-L., Dionne, M., Armstrong, J.D., Romakkaniemi, A., Letcher, B.H., Kocik, J.F., Erkinaro, J., Poole, R., Rogan, G., Lundqvists, H., MacLean, J.C., Jokikokko, E., Arnekleiv, J.V., Kennedy, R.J., Niemelä, E., Caballero, P., Music, P.A., Antonsson, T., Gudjonsson, S., Veselov, A.E., Lambert, A., Groom, S., Taylor, B.H., Taberner, M., Dillane, M., Arnason, F., Horton, G., Hvidsten, N.A., Jonsson, I.R., Jonsson, N., McKelvey, S., Næsje, T.F., Skaala, Ø., Smith, G.W., Sægvog, H., Stenseth, N.C. & Vøllestad, L.A. 2013. Basin-scale phenology and effects of climate variability on global timing of initial seaward migration of Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Global Change Biology* doi: 10.1111/gcb.12363.
- Pasternack, M., Salminen, M. & Heinimaa, P. 2008: Kasvatettujen lohien poikasten kunto ja vaellusvalmius vuosina 2004–2006. Riista- ja kalatalous – selvityksiä 14/2008. Riista- ja kalatalouden tutkimuslaitos, 30s.

- Peake, S., McKinley, R.S., Scruton, D.A & Moccia, R. 1997. Influence of transmitter attachment procedures on swimming performance of wild and hatchery-reared Atlantic salmon smolts. *Transactions of the American Fisheries Society* 126: 707–714.
- Peake, S. & McKinley, R.S. 1998. A re-evaluation of swimming performance in juvenile salmonids relative to downstream migration. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 55: 682–687.
- Pedersen, L.F., Koed, A. & Malte, H. 2008. Swimming performance of wild and F1-hatchery-reared Atlantic salmon (*Salmo salar*) and brown trout (*Salmo trutta*) smolts. *Ecology of Freshwater Fish* 17: 425–431.
- Petersen, J. 1994. Importance of spatial pattern in estimating predation on juvenile salmonids in the Columbia River. *Transactions of the American Fisheries Society* 123: 924–930.
- Plumb, J.M., Perry, R.W., Adams, N.S. & Rondorf, D.W. 2006. The effects of river impoundment and hatchery rearing on the migration behavior of juvenile steelhead in the lower Snake River, Washington. *North American Journal of Fisheries Management* 26: 438–452.
- Poe, T.P., Hansel, H.C., Vigg, S., Palmer, D.E. & Prendergast, L.A. 1991. Feeding of predatory fishes on out-migrating juvenile salmonids in John Day Reservoir, Columbia River. *Transactions of the American Fisheries Society* 120: 405–420.
- Poole, W.R., Nolan, D.T., Wevers, T., Dillane, M., Cotter, D. & Tully, O. 2003. An ecophysiological comparison of wild and hatchery-raised Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) smolts from the Burrishoole system, western Ireland. *Aquaculture* 222: 301–314.
- Popper, A.N. 2003. Effects of anthropogenic sound on fishes. *Fisheries* 28: 24–31.
- Pugh, J.R., Monan, G.E. & Smith, J.R. 1970. Effect of water velocity on the fish-guiding efficiency of an electrical guiding system. *Fishery Bulletin* 68: 307–324.
- Rainey, W. 1997. Fish ladders. *Scientific American* 277: 156.
- Rieman, B.E., Beamesderfer R.C., Vigg, S. & Poe, T.P. 1991. Estimated loss of juvenile salmonids to predation by northern squawfish, walleyes, and smallmouth bass in John Day reservoir, Columbia River. *Transactions of American Fisheries Society* 120:448–458.
- Rikardsen, A.H. & Dempson, J.B. 2012. Dietary life-support: the marine feeding of Atlantic salmon. Teoksessa: Aas, Ø., Einum, S., Klemetsen, A. & Skurdal, J. (Edit.), *Atlantic salmon*. Oxford: Wiley-Blackwell, 115–144.
- Riley, W.D., Moore, A., Russell, I.C., Davidson, I.C., Cove, R.J. & Ives, M.J. 2007. Impact of trapping and tagging on the timing of continued seaward migration of wild Atlantic salmon, *Salmo salar*, smolts. *Fisheries Management and Ecology* 14: 287–290.
- Rivinoja, P. 2005. Migration problems of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) in flow regulated rivers. Acta Universitatis Agriculturae Sueciae. Doctoral thesis No. 2005: 114.
- Ruggerone, G.T. 1986. Consumption of migrating juvenile salmonids by gulls foraging below a Columbia River dam. *Transactions of the American Fisheries Society* 115: 736–742.
- Ruggles, C.P. & Ryan, P. 1964. An investigation of louvers as a method of guiding juvenile Pacific salmon. *Canadian Fish Culturalist* 33: 3–67.
- Ruggles, C.P. 1980. A review of downstream migration of Atlantic salmon. *Canadian Technical Report of Fisheries and Aquatic Society* 952: 1–27.
- Ruggles, C.P. & Murray, D.G. 1983. A review of fish response to spillways. *Canadian Technical Report of Fisheries and Aquatic Society* 1172: 1–29.
- Ruggles, C.P., Robinson, D.A. & Stira, R.J. 1993. The use of floating louvers for guiding Atlantic salmon (*Salmo salar*) smolts from hydroelectric turbine intakes. Teoksessa: Williams, U.P., Scruton, D.A., Goosney, R.F., Bourgeois, C.E., Orr, D.C. & Ruggles, C.P. (Edit.) *Proceedings of the Workshop on Fish Passage at Hydroelectric Developments. Canadian Technical Report of Fisheries and Aquatic Sciences* 1905: 87–94.
- Salminen, M., Erkamo, E. & Salmi, J. 2001. Diet of post-smolt and one-sea-winter Atlantic salmon on the Bothnian Sea Northern Baltic. *Journal of Fish Biology* 58: 16–35.
- Scheuerell, M.D., Zabel, R.W. & Sandford B.P. 2009. Relating juvenile migration timing and survival to adulthood in two species of threatened Pacific salmon (*Oncorhynchus* spp.). *Journal of Applied Ecology* 46: 983–990.
- Schilt, C.R. 2007. Developing fish passage and protection at hydropower dams. *Applied Animal Behaviour Science* 104: 295–325.
- Schoeneman, D.E., Pressey, R.T. & Junge, C.O.Jr. 1961. Mortalities of downstream migrant salmon at McNary Dam. *Transactions of the American Fisheries Society* 90: 58–72.
- Scott, S. 2012. A positive barrier fish guidance system designed to improve safe downstream passage of anadromous fish. 9th ISE 2012, Vienna.

- Scruton, D.A., McKinley, R.S., Kouwen, N., Eddy, W. & Booth, R.K. 2002. Use of telemetry and hydraulic modeling to evaluate and improve fish guidance efficiency at a louver and bypass system for downstream-migrating Atlantic salmon (*Salmo salar*) smolts and kelts. *Hydrobiologia* 483: 83–94.
- Scruton, D.A., McKinley, R.S., Kouwen, N., Eddy, W. & Booth, R.K. 2003. Improvement and optimization of fish guidance efficiency (FGE) at a behavioural fish protection system for downstream migrating Atlantic salmon (*Salmo salar*) smolts. *River Research and Applications* 19: 605–617.
- 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.
- Scruton, D.A., Pennell, C.J., Bourgeois, C.E., Goosney, R.F., King, L., Booth, R.K., Eddy, W., Porter, T.R., Ollerhead, L.M.N. & Clarke, K.D. 2008. Hydroelectricity and fish: a synopsis of comprehensive studies of upstream and downstream passage of anadromous wild Atlantic salmon, *Salmo salar*, on the Exploits River, Canada. *Hydrobiologia* 609: 225–239.
- 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.
- Shepherd, D., Katopodis, C. & Rajaratnam, N. 2007. An experimental study of louvers for fish diversion. *Canadian Journal of Civil Engineering* 34: 770–776.
- Skalski, J.R., Johnson, G.E., Sullivan, C.M., Kudera, E. & Erho, M.W. 1996. Statistical evaluation of turbine bypass efficiency at Wells Dam on the Columbia River, Washington. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 53: 2188–2198.
- Skalski, J.R., Lady, R., Townsend, R., Giorgi, A.E., Stevenson, J.R., Peven, C.M. & McDonald, R.M. 2001. Estimating in-river survival of migrating salmonid smolts using radiotelemetry. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 58: 1987–1997.
- Skalski, J.R., Townsend, R., Lady, J., Giorgi, A.E., Stevenson, J.R. & McDonald, R.D. 2002. Estimating route-specific passage and survival probabilities at a hydroelectric project from smolt radiotelemetry studies. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 59: 1385–1393.
- Solomon, D.J. 1978. Some observations on smolt migration in a chalkstream. *Journal of Fish Biology* 12: 571–574.
- Stephenson, J.R., Gingerich, A.J., Brown, R.S., Pflugrath, B.D., Deng, Z., Carlson, T.J., Langeslay, M.J., Ahmann, M.L., Johnson, R.L. & Seaburg, A.G. 2010. Assessing barotrauma in neutrally and negatively buoyant juvenile salmonids exposed to simulated hydro-turbine passage using a mobile aquatic barotrauma laboratory. *Fisheries Research* 106: 271–278.
- Stier, D.J. & Kynard, B. 1986. Use of radio telemetry to determine the mortality of Atlantic salmon smolts passed through a 17-MW Kaplan turbine at a low-head hydroelectric dam. *Transactions of the American Fisheries Society* 115: 771–775.
- Svendsen, J.C., Aarestrup, K., Malte, H., Thygesen, U.H., Baktoft, H., Koed, A., Deacon, M.G., Cubitt, K.F. & McKinley, R.S. 2011. Linking individual behaviour and migration success in *Salmo salar* smolts approaching a water withdrawal site: implications for management. *Aquatic Living Resources* 24: 201–209.
- Taft, E.P. 2000. Fish protection technologies. A status report. *Environmental Science & Policy* 3: 349–359.
- 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. *Journal of Fish Biology* 81: 500–542.
- Thorne, R.E. & Johnson, G.E. 1993. A review of hydroacoustic studies for estimation of salmonid downriver migration past hydroelectric facilities on the Columbia and Snake River in the 1980s. *Reviews in Fisheries Science* 1: 27–56.
- Thorpe, J.E. 1994. Reproductive strategies in Atlantic salmon, *Salmo salar* L. *Aquaculture and Fisheries Management* 25: 77–87.
- Thorpe, J.E., Morgan, R.I.G., Pretswell, D. & Higgings, P.J. 1988. Movement rhythms in juvenile Atlantic salmon, *Salmo salar* L. *Journal of Fish Biology* 33: 931–940.
- Travade, F. & Larinier, M. 2006. French experience in downstream migration devices. Free Passage for Aquatic Fauna in Rivers and other Water Bodies, International DWA Symposium of Water Resources Management, Berlin.
- Vehanen, T., Aspi, J. & Pasanen, P. 1993. The effect of size, fin erosion, body silvering and precocious maturation on recaptures in Carling-tagged Baltic salmon (*Salmo salar* L.). *Annales Zoologici Fennici* 30: 277–285.

- Venditti, D.A., Rondorf, D.W. & Kraut, J.M. 2000. Migratory behavior and forebay delay of radio-tagged juvenile fall Chinook salmon in a lower Snake River impoundment. *North American Journal of Fisheries Management* 20: 41–52.
- Virtanen, E. 1988: Smolting and osmoregulation of Baltic salmon, *Salmo salar* L. in fresh and brackish water. – Finnish Fisheries Research 7, 38–65.
- Vowles, A.S. & Kemp, P.S. 2012. Effects of light on the behaviour of brown trout (*Salmo trutta*) encountering accelerating flow: Application to downstream fish passage. *Ecological Engineering* 47: 247–253.
- Ward, D.L., Petersen, J.H. & Loch, J.J. 1995. Index of predation on juvenile salmonids by northern squawfish in the Lower and Middle Columbia River and in the Lower Sanke River. *Transactions of the American Fisheries Society* 124: 321–334.
- Weber, E.D. & Fausch, K.D. 2003. Interactions between hatchery and wild salmonids in streams: differences in biology and evidence for competition. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science* 60: 1018–1036.
- Welch, D.W., Rechisky, E.L., Melnychuk, M.C., Porter, A.D., Walters, C.J., Clemens, S., Clemens, B.J., McKinley, R.S. & Schreck, C. 2008. Survival of migrating salmon smolts in large rivers with and without dams. *PLoS Biology* 6: e265.
- Welton, J.S., Beaumont, W.R.C. & Clarke, R.T. 2002. The efficacy of air, sound and acoustic bubble screens in deflecting Atlantic salmon, *Salmo salar* L., smolts in the River Frome, UK. *Fisheries Management and Ecology* 9: 11–18.
- Wertheimer, R.H. & Evans, A.F. 2005. Downstream passage of steelhead kelts through hydroelectric dams on the lower Snake and Columbia Rivers. *Transactions of the American Fisheries Society* 134: 853–865.
- Whalen, K.G., Parrish, D.L. & McCormick, S.D. 1999. Migration timing of Atlantic salmon smolts relative to environmental and physiological factors. *Transactions of the American Fisheries Society* 128: 289–301.
- Whitney, R.R., Calvin, L.D., Erho, Jr.M.W. & Coutant, C.C. 1997. Downstream passage for salmon at hydroelectric projects in the Columbia River basin: development, installation, and evaluation. *Northwest Power Planning Council* 1997.
- Williams, J.G., Armstrong, G., Katopodis, C., Larinier, M. & Travade, F. 2012. Thinking like a fish: a key ingredient for development of effective fish passage facilities at river obstructions. *River Research and Applications* 28: 407–417.
- Winfree, R.A., Kindschi, G.A. & Shaw, H.T. 1998. Elevated water temperature, crowding, and food deprivation accelerate fin erosion in juvenile steelhead. *Progressive Fish-Culturalist* 60: 192–199.
- Winter, J.D. 1996. Advances in underwater biotelemetry. Teoksessa: Murphy, B.R. & Willis, D.W. (Edit.) *Fisheries Techniques*, Second edition, 555-590. Bethesda, Maryland, American Fisheries Society.
- Wootton, R.J. 1990: *Ecology of Teleost Fishes* (Fish and Fisheries Series 1). Chapman and Hall, London, 404s.
- Youngston, A. F. & Verspoor, E. 1998. Interactions between wild and introduced Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 55: 153–160.
- Zydlewski, G.B., Haro, A. & McCormick, S.D. 2005. Evidence for cumulative temperature as an initiating and terminating factor in downstream migratory behavior of Atlantic salmon (*Salmo salar*) smolts. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 62: 68–78.
- Östergren, J. & Rivinoja, P. 2008. Overwintering and downstream migration of sea trout (*Salmo trutta* L.) kelts under regulated flows - northern Sweden. *River Research and Applications* 24: 551–563.