

Kiintoaineen eroosio ja sedimentaatio virtavesissä - luonnollisesta prosessista virtavesien ongelmaksi

**Jarno Turunen, Hannu Marttila, Maria Kämäri, Markus Saari,
Kaisa Heikkinen, Heini Postila, Saija Koljonen**



SUOMEN YMPÄRISTÖKESKUKSEN RAPORTTEJA
46 | 2019

Kiintoaineen eroosio ja sedimentaatio virtavesissä - luonnollisesta prosessista virtavesien ongelmaksi

**Jarno Turunen, Hannu Marttila, Maria Kämäri, Markus Saari,
Kaisa Heikkinen, Heini Postila, Saija Koljonen**

Helsinki 2019

SUOMEN YMPÄRISTÖKESKUS



SUOMEN YMPÄRISTÖKESKUKSEN RAPORTTEJA 46 | 2019
Suomen ympäristökeskus SYKE
Vesikeskus

Kiintoaineen eroosio ja sedimentaatio virtavesissä - luonnollisesta prosessista
virtavesien ongelmaksi

Kirjoittajat: Jarno Turunen¹, Hannu Marttila², Maria Kämäri¹, Markus Saari², Kaisa Heikkinen¹,
Heini Postila², Saija Koljonen¹

1) Suomen ympäristökeskus
2) Oulun yliopisto

Vastaava erikoistoimittaja: Ahti Lepistö

Rahoittaja: Euroopan meri- ja kalatalousrahasto (EMKR, kalatalouden ympäristöohjelma).

Julkaisija ja kustantaja: Suomen ympäristökeskus SYKE
Latokartanonkaari 11, 00790 Helsinki, puh. 0295 251 000, syke.fi

Kansikuva: Maria Rajakallio
Piiroskuvat: Marja Vierimaa
Taitto: Pirjo Lehtovaara

Julkaisu on saatavana internetistä: syke.fi/julkaisut | helda.helsinki.fi/syke
sekä ostettavissa painettuna SYKEN verkkokaupasta: syke.juvenesprint.fi

ISBN 978-952-11-5095-1 (nid.)
ISBN 978-952-11-5096-8 (PDF)
ISSN 1796-1718 (pain.)
ISSN 1796-1726 (verkkokoj.)

Julkaisuvuosi: 2019

ESIPUHE

Maankäytöllä on merkittävä vaikutus virtavesiemme tilaan. Maankäyttö muuttaa valuma-alueiden hydrologisia ominaisuuksia ja lisää eroosiota, mikä kasvattaa virtavesien ravinne- ja kiintoainepitoisuuksia. Metsäojitusten vilkkaimpina vuosikymmeninä 1960-90-luvuilla valtaosa turvemaistamme ojitettiin metsän kasvuolosuhteiden parantamista varten, mikä on lisännyt vesiemme kiintoaineen, humuksen ja ravinteiden määriä luontaiseen taustatasoon verrattuna. Maatalouden maankäytön voimistuminen on vaikuttanut etenkin etelä- ja länsirannikkojen virtavesiin. Vesien tilan arvioinnissa on usein keskitytty pääravinteiden - fosforin ja typen - vesistöjä rehevöittävään vaikutukseen ja erityisesti vaikutuksiin vastaanottavissa järvissä tai merialueilla. Virtavesiin, varsinkin puroihin, kohdistuvat kiintoaineen ympäristövaikutukset ovat yleensä jääneet pienemmälle huomiolle. Etenkin kiintoaine- ja lietty-mishaitat on nähty enemmän vesistön käyttöä ja virkistysarvoja rajoittavana tekijänä kuin merkittävänä ongelmana virtavesiluonnolle. Vasta viime vuosina kiintoaineen eroosion ja sen sedimentaation haitat virtavesissä on Suomessa ymmärretty laajemmin, kun tutkimustieto aiheesta on lisääntynyt ja virtavesien kunnostustoiminta on laajentunut nykyiselle tasolle.

Tämän työn tarkoituksena oli koota tietoa ja kuvata yleistajuisesti kuinka kiintoainekuormitus ja sedimentaatio vaikuttavat virtavesien elinympäristöihin ja eliöyhteisöihin mikrobeista aina kaloihin asti. Lisäksi kokosimme tietoa kiintoainekuormituksen ja sedimentaation seurannasta ja mallintamisesta sekä vesiensuojelu- ja kunnostusmenetelmistä. Toivomme, että tämä työ toimii hyvänä tietopakettina kaikille kiinnostuneille ja palvelee tietolähteenä virtavesien parissa työskenteleville.

Tämä työ on rahoitettu Euroopan meri- ja kalatalousrahaston (EMKR) Suomen toimintaohjelmasta ja on osa Kalatalouden ympäristöohjelmaa. Kiitämme Marja Vierimaata työn kuvituksesta.

Kirjoittajat

TIIVISTELMÄ

Kiintoaineen eroosio ja sedimentaatio virtavesissä - luonnollisesta prosessista virtavesien ongelmaksi

Valuma-alueiden eroosio ja vedessä kulkeutuvan kiintoaineen sedimentaatio ovat luonnollisia prosesseja virtavesissä. Ne ylläpitävät virtavesien elinympäristöjen monimuotoisuutta. Ihmistoiminta, erityisesti maankäyttö, on kuitenkin merkittävästi lisännyt eroosiota ja hienon kiintoaineen määrää virtavesissä, millä on lukuisia haitallisia vaikutuksia virtavesien ekosysteemeihin. Tässä kirjallisuuskatsauksessa kuvataan virtavesien luontaisen sekä ihmistoiminnan muuttaman kiintoaineen eroosion ja sedimentaation merkitystä virtavesissä. Katsauksessa käsitellään liiallisen kiintoainekuormituksen ja sedimentaation vaikutuksia virtavesien perustuotantoon ja vesikasvillisuuteen, pohjaeläimiin, kaloihin sekä mikrobeihin ja hajotusprosesseihin. Lisäksi käsitellään kiintoainekuormituksen ja sedimentaation arvioinnin ja vesienhoidon kannalta keskeisiä seuranta-, vesiensuojelu- ja kunnostusmenetelmiä sekä tutkimustarpeita.

Avainsanat: eroosio, joet, kiintoaine, liettyminen, sedimentaatio, purot, virtavedet, kunnostus, valuma-alue, vesienhoito

SAMMANDRAG

Erosion och sedimentation av fast material i vattendrag - från naturlig process till ett problem för vattendragen

Erosion i avrinningsområdena och sedimentation av fast material som transporteras med vattnet är naturliga processer i strömmande vatten. Dessa processer upprätthåller vattendragens variationsrika livsmiljöer. Mänskliga aktiviteter, i synnerhet markanvändning, har emellertid avsevärt ökat erosionen och mängden finkornigt material i vattendragen. Det här ger många negativa effekter på vattendragens ekosystem. Denna litteraturöversikt beskriver vattendragens naturliga erosion samt vilken betydelse erosion och sedimentation av fast substans till följd av mänskliga aktiviteter har på vattendragen. Översikten behandlar effekterna av en alltför stor fastsubstansbelastning och sedimentation med tanke på vattendragens grundproduktion och vegetation, bottenfauna, fiskar, mikrober och nedbrytningsprocesser. Dessutom behandlas forskningsbehov och sådana metoder för uppföljning, vattenskydd och restaurering som är viktiga när det gäller vattenvård och för att bedöma fastsubstansbelastning och sedimentation.

Nyckelord: erosion, floder, älvar, fast material, fast substans, igenslamning, sedimentation, bäckar, vattendrag, strömmande vatten, restaurering, avrinningsområde, vattenvård

ABSTRACT

Erosion and sedimentation in streams - from a natural process to problems

Erosion in catchment, sediment transport processes and sedimentation of eroded particles are natural processes in stream ecosystems which create and maintain habitat variability. However, anthropogenic disturbances, especially land use, has increased erosion and sedimentation rates with several negative effects on stream ecosystems. In this literature review, we describe the natural erosion and sedimentation processes and the influence of land use on them. The impacts of excessive erosion and sedimentation on primary production, aquatic plants, periphytic algae, benthic macroinvertebrates, fish and leaf decomposition and microbial decomposers are described. In addition, we review the state of the art monitoring, water protection and restoration measures to mitigate excessive erosion and sedimentation and we suggest some areas for future research needs.

Keywords: erosion, rivers, suspended solids, siltation, sedimentation, streams, flowing waters, restoration, catchment area, water protection

SISÄLLYS

ESIPUHE.....	3
TIIVISTELMÄ	4
SAMMANDRAG.....	5
ABSTRACT	6
TERMISELITYKSET	9
I Sedimentaatio luonnollisena prosessina virtavesissä.....	11
1.1 Kiintoaineen eroosio, kulkeutuminen ja kertyminen.....	12
1.2 Luontaiset sedimentaatioprosessit uoman rakenteen ja elinympäristöjen muokkaajina.....	14
2 Merkittävimmät kiintoaineen kulkeutumiseen vaikuttavat tekijät valuma-alueella ja uomassa.....	19
2.1 Maatalous	19
2.2 Metsätalous ja turvetuotanto	21
2.3 Kaupunkien ja taajamien maankäyttö.....	25
2.4 Kaivokset ja maanotto	26
2.5 Vesistörakentaminen ja säännöstely	26
2.6 Muuttuva kylmä ilmasto.....	27
3 Kiintoainekuormituksen ja sedimentaation merkitys luonnossa	29
3.1 Vesiuoman rakenne ja toiminta.....	29
3.2 Raudan kulkeutumisen vaikutus pohjan liettymiseen	30
3.3 Päällysleviin, vesikasveihin ja perustuotantoon kohdistuvat vaikutukset	31
3.4 Pohjaeläimiin kohdistuvat vaikutukset virtavesissä.....	34
3.5 Virtavesien kaloihin ja niiden lisääntymiseen liittyvät vaikutukset.....	37
3.6 Vaikutukset virtavesien hajotusprosesseihin ja hajottajamikrobeihin ..	41
4 Valuma-alueen vesienpuhdistuslaitteiden vaikutukset kiintoainekuormituksen hillitsemiseksi	44
4.1 Eroosion hillintä maa- ja metsätaloudessa.....	45
4.2 Vesienpuhdistuslaitteita eroosion ja sen vaikutusten ehkäisemiseksi....	47
4.3 Sedimentaatiosta kärsivien virtavesien uomakunnostukset.....	48
5 Kiintoainekuormituksen ja sedimentaation mittaus	50
5.1 Suspendoituneen kiintoaineen pitoisuuden mittaus ja kulkeuman määrittäminen	50
5.2 Pohjakulkeuman mittaus.....	52
5.3 Sedimenttinäytteenotto pohjasta	53
5.4 Silmämääräinen tarkastelu.....	53
5.5 Jatkuvat mittalaitteet kiintoaineen pitoisuuden ja kuormituksen määrittämisessä	54

6 Kiintoaineprosessien mallintaminen	56
6.1 Prosessipohjainen ja kokonaisvaltainen valuma-alue mallinnus.....	57
6.2 Havaintoaineistoihin perustuvat kuormitusmallit	58
6.3 Hydrauliset mallit.....	60
7 Tutkimustarpeita	62
Kirjallisuus	64

TERMISELITYKSET

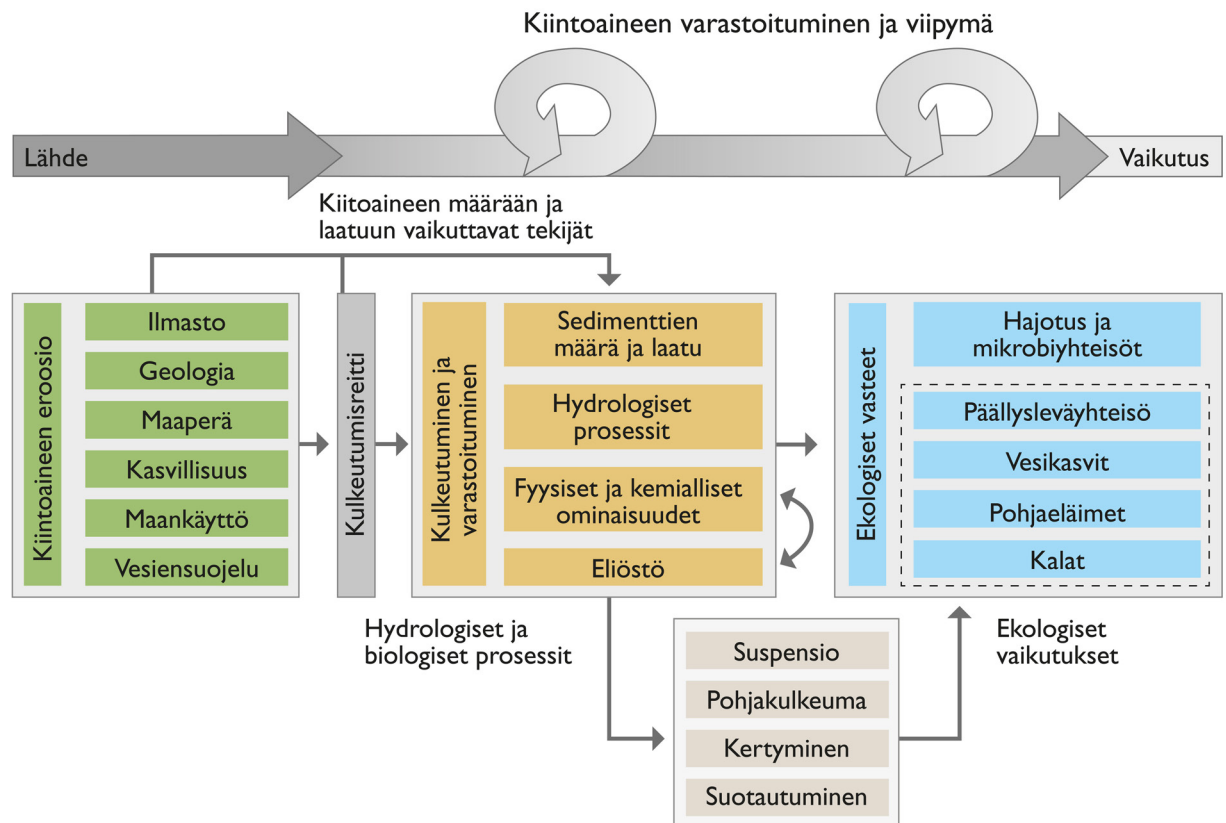
Biomassa	elävän aineksen tai jonkun tietyllä alueella elävän lajin kokonaismäärä (tuore- tai kuivapainona) tietyllä hetkellä
Dynamiikka	ilmiön luonne ajassa (esim. kiintoaineen eroosion, kulkeutumisen ja sedimentoitumisen määrän vaihtelu virtaaman suhteen)
Ekologiset prosessit	eliöiden ja niiden elollisen ja elottoman ympäristön väliset vuorovaikutussuhteet
Ekosysteemi	alueen eliöyhteisön ja sen elottoman ympäristön toiminnallinen kokonaisuus
Empiirinen	kokemusperäinen, perustuu tutkimuskohteen havainnointiin ja mittaamiseen
Eroditua	kiven, maaperän tai muun pinnan kuluminen
Erosio	veden, tuulen tai jonkin muun tekijän aiheuttamaa maaperän tai kallioperän kulumista ja irronneen aineksen kulkeutumista veden tai tuulen mukana
Geomorfologiset prosessit	maanpinnanmuotoihin ja maanpinnan rakenteeseen liittyvät prosessit, jotka voivat mm. kerrosta sedimenttejä
Fluviaaliset prosessit	veden aiheuttamaa maa-aineksen liikettä kuten eroosiota ja sedimentaatiota
Hapettumis-pelkistymisreaktio	kemiallinen reaktio, jossa elektronit siirtyvät atomilta toiselle. Pelkistyvä atomi ottaa elektroneja vastaan ja hapettava luovuttaa niitä.
Hydrogeokemialliset prosessit	Pinta- ja pohjaveden kemialliset reaktiot mukaanlukien veden laadun ja määrän yhteys tarkasteltavaan alueeseen
Hydrologiset prosessit	veden kiertokulun prosessit, kuten sadanta, haihdunta ja valunta
Interpolaatio	numeerisen matematiikan menetelmä, jonka avulla voidaan arvioida tuntemattomia arvoja tunnettujen mitattujen havaintojen väliltä.
Interseptio	Sadeveden jääminen rakennetuille pinnoille tai kasvillisuuden siten, että se haihtuu eikä päädy maaperään
Juolua: Makkarajärvi	uudesta uomasta erilleen jäänyt joenmutka
Kaivukatko	ojalinjaston ojittamaton osuus, minkä tarkoituksena on pidättää huuhtoutuvaa kiintoainetta ja ravinteita
Kiintoaine	eloperäistä tai mineraalista hiukkasmaista ainetta (yli 0,45 µm), joka voidaan pidättää vedestä suodattamalla
Kivennäisaines	epäorgaaninen kiintoaine ja maa-aines kuten hiekka tai sora
Kolloidi	liuos, jossa suuret molekyylit tai pienempien muodostamat molekyyliryhmittymät, joita voidaan pitää yhtenä suurena molekyylinä, ovat liunneena. Homogeenisen ja heterogeenisen liuksen välimuoto.
Kosteikko	matala ja usein runsaskasvustoinen vesialue tai kostea maa-alue. Kosteikkoja voidaan käyttää vesiensuojelussa siten, että sinne johdetaan vettä, jolloin kosteikko toimii laskeutusaltaana ja pidättää kiintoainetta
Kutusoraikko	sorapohjainen alue, jota kalat käyttävät kutupaikkana
Laserkeilaus	lasersäteiden avulla kohteesta mitataan mittatarkkaa kolmiulotteista tietoa ilman että kosketaan kohteeseen
Laskeutusallas	kuivatusojien yhteyteen kaivettu allas, jossa veden virtausnopeus pienenee ja kiintoainetta ja siihen sitoutunutta ravinetta laskeutuu altaan pohjalle
Lietekuoppa	ojaan rakennettava syvennys (pienempi kuin laskeutusallas), jonka tarkoituksena on pidättää karkeampaa kiintoainetta pohjan täyttyminen hienolla sedimentillä
Liettyminen	fluviaalisiin prosesseihin lukeutuvan meandroinnin takia muuttuneesta uomasta erilleen jäänyt vanha joenmutka, jossa kuitenkin on edelleen vettä ainakin osan vuodesta.
Makkarajärvi: Juolua	

Meandoroiva	mutkittelleva
Morfologia	eliöiden muodon ja niiden rakenteiden säännönmukaisuuden selvitystä (biologinen), voi myös tarkoittaa uoman rakenteen ja muodon selvitystä
Nettovaikutus	voimien yhteisvaikutus
Ojakatko	hidastaa veden virtausta ja jakaa veden laajemmalle alueelle, jolloin kiintoaineen kulkeutuminen alapuoliseen vesistöön vähenee. Salaojien tai avo-ojien vesi voidaan ojakatkojen avulla johtaa kasvillisuuden käyttöön
Orgaaninen aines	eloperäinen aines kuten kasviaines ja muu eloperäinen aines
Pellon P-lukuluokka	peltojen jaottelu luokkiin maaperän fosforipitoisuuden mukaan
Periodi	Ajanjakso
Perustuottaja	kasvi, joka valmistaa auringon valon avulla epäorgaanisesta aineesta yhteyttämällä orgaanista (eloperäistä) ainetta kuten sokereita.
Pintavalutuskenttä	maapohjainen (Suomessa yleensä turvepohjainen) alue, jonne vedet johdetaan käsiteltäväksi. Käsiteltävä vesi virtaa turpeen sisällä ja osittain sen pinnalla, jolloin turpeeseen pidättyy vedessä kulkevaa kiintoainesta ja ravinteita.
Populaatio	yhden lajin tietyllä alueella elävät yksilöt, jotka voivat lisääntyä keskenään
Pudasuomasto	haarautuva uomasto
Rantapoukama	Uomassa oleva pienimuotoinen leventymä tai lahti, johon kiintoainetta sedimentoituu
Reviiri	eläimen elinpiiri
Ruskuaispussi	alkion (eliön kehityksen varhaisvaihe) ulkopuolinen rakenne, joka tarjoaa ravintoa sikiön kehityksen ajan
Sedimentaatio	vedessä liikkuvan hiukkasmaisena aineksen laskeutuminen kerroksittain pohjalle
Simuloida	mallintaa, jäljitellä
Suksessio	eliöyhteisön tietyllä paikalla tapahtuvaa luontaista muuttamista ajan myötä
Suppopato	Joen vedenpintaa nostava patouma, joka on muodostunut suposta tai supporyhmästä. Suppo on ohuita jääneulasia tai -levyisiä, joita muodostuu alijäähdytyneeseen veteen
Suspendoitunut kiintoaine	vesipatsaassa kulkevia eloperäisiä tai mineraalisia hiukkasia (yli 0,45 µm)
Suvanto	jokiosuus, yleensä laajentuma, missä veden virtaus on hidasta
Särkkä	matalikko, joka voi matalan vedenkorkeuden aikana nousta pinnan alta näkyviin
Trofiataso	ravinnon käyttötavan perusteella määräytyvä ravintoketjun taso. Tasoihin lukeutuvat primaari- eli tuottajat (vihreät kasvit), ensimmäisen tason kuluttajat (kasvinsyöjät), toisen, kolmannen jne. tason kuluttajat (ensimmäisen, toisen jne. tason lihansyöjät) ja hajottajat.
Tulvatasanne	tasainen maa-alue virtaveden rantavyöhykkeellä, jonne vesi nousee tulvatilanteissa
Vesikiikari	laite, jolla voidaan katsoa veden pinnan alle, ja joka estää veden pinnan aiheuttamat valon ja ympäristön heijastukset. Yksikertaisimmillaan sen voi rakentaa esim. ämpäristä.
Virtavedet	joki, reittikoski, puro, noro, oja
Äärevöityminen	muuttuminen ääriarvojen suuntaan eli kauemmas keskimääräisestä tilanteesta

1 Sedimentaatio luonnollisena prosessina virtavesissä

Jarno Turunen, Hannu Marttila, Maria Kämäri, Kaisa Heikkinen

Virtavedet muokkautuvat hydrologisissa, fluviaalisissa ja geomorfologisissa prosesseissa, jotka vaikuttavat vahvasti myös vedenlaatuun sekä virtavesiekosysteemien rakenteeseen ja toimintaan. Virtavesien ja tulvatasanteiden ekologia on riippuvainen virtaaman, kiintoaineen kulkeuman sekä uoman muutoksista, erityisesti orgaanisen aineksen kulkeutumisesta valuma-alueelta, rantavyöhykkeeltä sekä ravinteiden ja mineraalien kulkeutumisesta virran yläjuoksulta. Kiintoaineen kulkeutuminen vaikuttaa merkittävästi uoman olosuhteisiin ja elinympäristöjen syntymiseen. Kiintoaineella tarkoitetaan vedessä hiukkasmaisessa muodossa (koko yli 0,45 µm) olevaa ainetta, joka voi koostua orgaanisesta tai epäorgaanisesta materiaalista. Tätä määritelmää käytetään myös tässä kirjallisuuskatsauksessa, ellei toisin erikseen täsmennetä. Tässä kirjallisuuskatsauksessa sedimentillä tarkoitetaan yleisesti kaikkea virtaveden pohjamateriaalia (esim. hiekka, siltti/savi, karkeat kivet, orgaaninen liete yms.).



Kuva 1. Kiintoaineen eroosioon ja kulkeutumiseen vaikuttavat tekijät sekä vaikutukset virtavesien eliöihin (Wilkens ym. 2018).

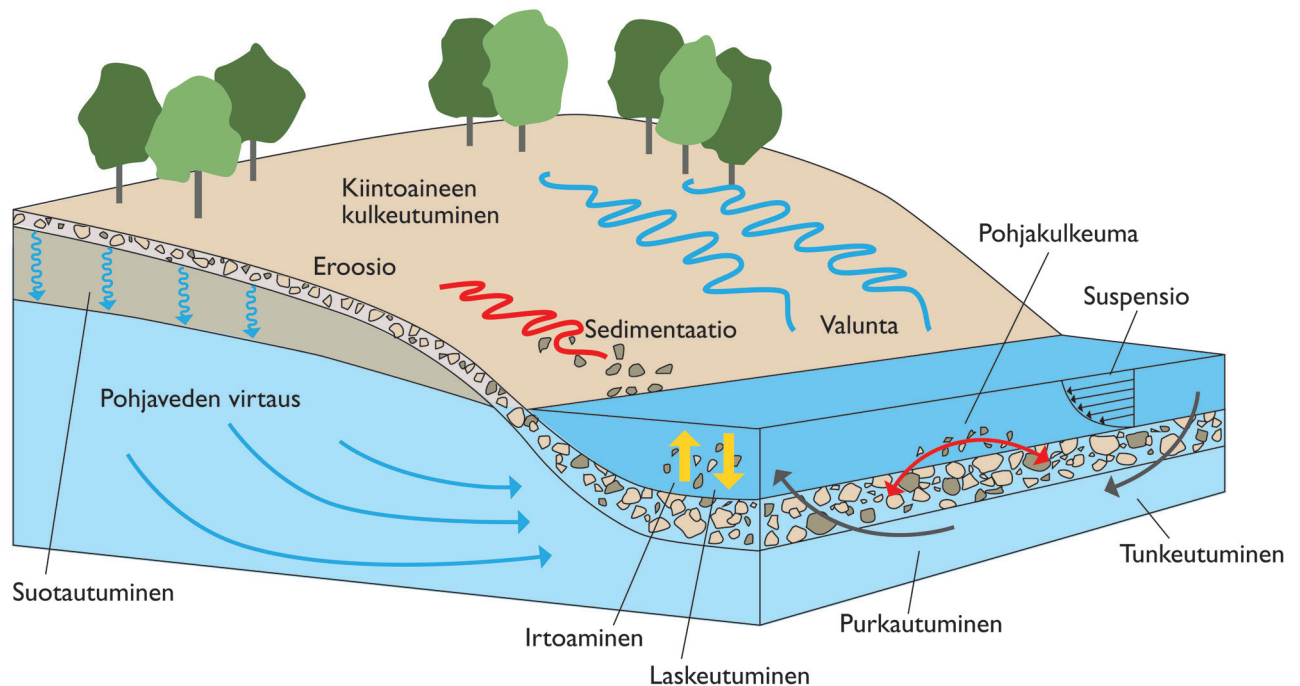
I.1 Kiintoaineen eroosio, kulkeutuminen ja kertyminen

Eroosio ja kiintoaineen kulkeutuminen valuma-alueelta ylläpitävät osaltaan virtavesien monimuotoisuutta. Suomessa eroosio ja kiintoaineen kulkeutuminen ovat luontaisesti vähäisiä, sillä korkeuserot ovat pieniä ja eroosiolta suojaavaa kasvillisuutta, erityisesti metsää, on runsaasti. Luonnontilaisilta alueilta huuhtoutuvaa vesistökuormitusta kutsutaan luonnonhuuhtoumaksi (Mattsson ym. 2003; Kortelainen ym. 2006). Suomessa keskimääräinen kiintoaineen luonnonhuuhtouma on 5,1 kg/ha/vuosi (vaihteluväli 0,92–47,5 kg/ha/vuosi) (Finér ym. 2010). Ihmistoiminta, kuten maankäyttö tai uomaverkoston muokkaus, ovat monin paikoin lisänneet eroosiota luonnonhuuhtoumaa suuremmaksi. Tällöin virtavesien luontainen kuljetuskapasiteetti eli puhdistautumiskyky voi ylittyä. Seurauksena voi olla pohjan ja törmien eroosion lisääntyminen tai kiintoaineen kasautuminen uoman pohjille, mitkä osaltaan häiritsevät kiintoaineen luonnollista kulkeutumista.

Kiintoaineen kulkeutuminen alkaa valuma-alueella tapahtuvasta eroosiosta ja kulkeutumisesta valunnan mukana latvavesistöihin (Kuvat 1 ja 2). Sedimentoitumis- ja kulkeutumisprosessien myötä kiintoaine päätyy alavirtaan ja voi päätyä vastaanotetaan vesistöön asti. Kulkeutumisaika voi vaihdella päivistä vuosisatoihin, koska kiintoaine- ja sedimenttipartikkelit varastoituvat suvantoihin tai tulvatasanteille ja lähtevät uudelleen liikkeelle, kun virtausolosuhteet kasvavat partikkelien kriittistä liikkeellelähönopeutta suuremmiksi. Kulkeutumisaika sekä prosessit ovat vahvasti riippuvaisia kiintoaineen partikkelikoosta, koostumuksesta ja veden virtausolosuhteista. Virtaavan veden määrä ja virtausnopeus määrittävät uoman kyvyn kuljettaa kiintoainetta. Kuljetuskapasiteetti on suurimmillaan virtaamatilanteissa, jolloin vesi täyttää koko uoman, eli yleisesti kevättulvan tai rankkasateiden yhteydessä. Virtaveden uomaa voidaan pitää vakaana, kun virtaus ja sedimentin kulkeutuminen ovat keskenään tasapainossa. Jos virtauksen voimakkuus ja kiintoaineen määrä tai laatu muuttuvat, niin myös uoman kaltevuus, syvyys, leveys, pohjan koostumus ja kasvillisuus voivat muuttua. Paikallisesti vaihtelevat olosuhteet ja elinympäristöt uomassa muodostuvat suurelta osin juuri virtauksen ja veden mukana kulkevan kiintoainekulkeuman vaihtelusta.

Kiintoaine kulkeutuu virtavesissä joko suspensiona vesipatsaassa (*suspended load*) tai pohjakulkeumana (*bed load*) (Kuva 2). Suspensiona kulkeutuvaa kaikkein hienojakoisinta ainesta, joka kulkeutuu uomaverkoston lävitse laskeutumatta, voidaan nimittää läpikulkeumaksi(-aineeksi) (*wash load*). Pohjakulkeuma tapahtuu tyypillisesti niin, että aines vierii pohjaa pitkin. Kulkeumaprosessit eivät ole toisistaan riippumattomia, sillä yhdessä uoman kohdassa suspensiona kulkeutuva aines saattaa toisessa uoman kohdassa liikkua pohjakulkeumana. Virtauksen mukana suspensiona kulkeutuu tyypillisesti hienompi aines (savi, siltti, orgaaninen aines), joka voi kulkeutua pitkiäkin matkoja ennen laskeutumista uoman pohjalle. Vastaavasti pohjakulkeumana vierii karkeampi aines, kuten hiekka ja sora, jota virtaus ei jaksa nostaa kokonaan irti pohjasta. Osa kulkeutuvasta kiintoaineesta ja sedimentistä voi kasaantua pidemmäksikin aikaa uoman pohjalle, reunoille tai tulvatasanteille. Kulkeumaprosesseihin vaikuttavat kulkeutuvan aineksen partikkelikoko ja tiheys, paikallinen kaltevuus, virtausnopeus sekä virtauksen pyörteisyys. Pohjakulkeuman aines vierii pohjan tuntumassa vaikuttaen näin etenkin virtavesien uoman pohjan ominaisuuksiin ja muotoon (morfologia). Hienompi, suspensiona kulkeutuva kiintoaine vaikuttaa enemmän veden laatuun. Suurimmat suspendoituneen kiintoaineen pitoisuudet ja sameusarvot mitataan tyypillisesti nousevan virtaaman aikana, eli ennen (suurinta) tulvahuippua (Kämäri ym. 2018). Pohjalle kerääntynyt aines siis lähtee liikkeelle virtausnopeuden noustessa ja voi saavuttaa suurimman pitoisuuden ennen virtaamahuippua. Suurimmat pohjakulkeuman määrät havaitaan yleensä

täyden uoman virtaamaolosuhteissa, jolloin pohjan läheinen virtausnopeus ja noste ovat suurimmillaan.



Kuva 2. Kiintoaineen kulkeutuminen valuma-alueelta alkaa sadannan ja siitä seuraavan valunnan aiheuttamasta eroosiosta. Uomaan päädyttyään kiintoaine kulkeutuu pohjalla pohjakulkeuma tai vesipatsaassa suspensiona. Virtaavan veden tunkeutuminen sedimenttiin ja purkautuminen takaisin uomaan ovat tärkeitä prosesseja virtavesien kemiallisten ja biologisten vaikutusten kannalta.

Uomissa kulkeutuvan kiintoaineen kokoluokka voi vaihdella savipartikkeleista aina pieniin lohkareisiin. Tyypillisesti sedimentti luokitellaan seuraavasti: savi (hal-kaisija <0,004 mm), siltti (0,004-0,062 mm), hiekka (0,062-1,000 mm), sora (1-64 mm), mukulakivi (64-250 mm) ja lohkareet (>250 mm). Lisäksi jokainen luokka voidaan jakaa hienoon ja karkeaan osaan. Hienojakoisimmat kiintoainepartikkelit (savi, orgaaninen aines) muodostavat keskinäisen vetovoiman vaikutuksesta herkästi isompia hiukkasia ja voivat siten kulkeutua myös yksittäisiä partikkeleja suurempina hiukkasina. Kiintoaine voi sisältää selä kivennäisainesta että orgaanista ainesta. Suomessa valuma-alueilla, joissa suot ja turvemaaperä muodostavat merkittävän osuuden kokonaispinta-alasta, voi orgaanisen aineksen kulkeutuminen olla merkittävää (Heikkinen 1989, 1992 ja 1994). Maaperän eroosio tyypillisesti lisää orgaanisen aineen määrää vesistöissä. Orgaanisen aineksen tilavuuspaino on pieni, mutta se voi muodostaa huomattavan osan kulkeutuvan aineksen kokonaistilavuudesta. Vesistöissä hajoava, runsas orgaaninen aines voi heikentää vesistön happiolosuhteita, koska hajotusprosessit kuluttavat happea.

Myös eliöstö vaikuttaa kiintoaineen kulkeutumiseen virtavesissä. Vesikasvillisuus luo hitaamman virtauksen alueita, jotka keräävät hienoa kiintoainetta. Suodat-tajavesiperhoset (erityisesti siiviläsirvikkäät, *Hydropsychidae*- heimo) puolestaan lu-jittavat pyyntiverkoillaan hienoa sedimenttiä niin, että tarvitaan jopa 30 % suurempi virran voima liikuttamaan tätä sedimenttiä verrattuna tilanteeseen, jossa verkkoja ei ole (Cardinale ym. 2004). Siiviläsirvikkäät vaikuttavat myös kiintoaineen luontaiseen kulkeutumiseen, koska niitä on monissa virtavesissä (erityisesti järivialtaan luusuan koskissa) valtavina massoina. Virtavesien eliöt voivat myös lisätä kiintoaineen liik-

keelle lähtöä tai kulkeutumista. Tästä esimerkkejä ovat lohikalat, jotka kaivavat kuttuoppia tai pohjaeläimet, kuten ravut, jotka kaivavat kuoppia etsiessään ravintoa ja suojapaikkoja. Tällainen kaivaminen (ns. bioturbaatio) voi paikoin vaikuttaa merkittävästi kiintoaineen kulkeutumiseen ja sedimentin liikkeisiin (Wilkes ym. 2018). Suomen olosuhteissa eliöstön kokonaismerkityksestä kiintoaineen kulkeutumisesta ei kuitenkaan vielä ole juurikaan tietoa.



Kuva 3. Virtavesisemme koskien pääpohjamateriaali muodostuu usein hyvin karkeista kivistä.
Kuva: Jarno Turunen

I.2 Luontaiset sedimentaatioprosessit uoman rakenteen ja elinympäristöjen muokkaajina

Virtavesien uomarakenne ja pohjasedimentin koostumus ovat seurausta eroosio- ja sedimentaatioprosesseista. Uoman rakennetta ja sen sedimentin laatua säätelevät useat paikalliset hydrometeorologiset (esim. sadanta, virtaama) ja geologiset (esim. jääkausien vaikutus, kallioperä, maastonmuodot) ominaisuudet sekä rannan kasvillisuus (Leopold ym. 1964) (Kuva 3). Valuma-alueella tapahtuvalla luontaisella eroosiol- la ja kiintoaineen kulkeutumisella ja kertymisellä on keskeinen merkitys virtavesien elinympäristöjen monimuotoisuuden rakentumisessa ja säilymisessä.

Virtavesiuomien rakenne vaihtelee luontaisesti paljon riippuen uoman koosta, pohjan materiaalista, kasvillisuudesta ja virtaamasta. Karkeasti uomat voidaan jakaa suoraan ja meanderoivaan uomaan, tai ns. pudasuomastoon (haarautuva uomasto). Uomaan päätyvä kiintoaineen laatu ja määrä sekä virtaaman ja uoman kiintoaineen kuljetuskyky luovat paikoitellen elinympäristöjen vaihtelevuutta kuten sivu-uomia ja monihaaraisia uomia (Beechie ym. 2006; Church 2006). Virtavesien sedimentin kuljetuskyky on heikko alavilla mailla, missä joki virtaa rauhallisesti. Meanderoiva uomarakenne on tyypillinen alavilla hiekka- ja savimailla, jolloin virran eroosio kuluttaa rantatörmää ulkokaarteista ja sedimenttiä kertyy sisäkaarteisiin (Kuva 4). Maaston kaltevuus, virtaama ja kulkeutuvan sedimentin määrä ja laatu määräävät



Kuva 4. Kevättulvan aikaan matala särkkä on jäänyt veden alle ja puita on kaatunut jokeen erityisesti jokimeanderin ulkokaarteessa, jossa vesi syövyttää maata. Menderoiva Koitajoki Ilomantsissa on kuvattu hankkeessa, jossa tutkitaan Yläkoitajoen muuttuvaa hydrogeografiaa. Dronekuva: Timo Kumpula/Historian ja Maantieteiden laitos, Itä-Suomen yliopisto

mutkien koon. Meanderikaarteet ovat laajempia loivassa maastossa ja suurissa joissa. Vähitellen eroosio voi kuluttaa mutkan poikki ja vanhoista jokikaarteista syntyy ns. makkarakärviä tai juoluoita, mitkä ovat tärkeitä elinympäristöjä lukuisille eliöille. Meanderoinnin lisäksi runsaasti soraa tai hienompaa kiintoainetta kuljettaviin jokiin voi muodostua sorasärkkien ja saarekkeiden muodostama pudasuomasto (Kuva 5). Tällainen särkkien muodostama uomamosaiikki ylläpitää korkeampaa lajistollista monimuotoisuutta kuin yksipuoliset uomat (Wyzga ym. 2012). Särkkien paikka ja muoto muuttuvat etenkin tulvatilanteissa. Sedimentin kulkeutumisesta ja kasautumisesta syntyvät uudet, kasvillisuudesta paljaat, särkät ovat tärkeitä elinympäristöjä niistä riippuvaisille kasvi- ja eläinlajeille (Jähnig ym. 2009). Tulvakausina hienojakoista sedimenttiä pidättyy jokien tulvatasangoille tuoden ravinteita tulvatasangon kasveille (Kuva 6). Tulvatasangot ovatkin merkittäviä elinympäristöjä monille linnuille ja hyönteisille, sekä tärkeitä kalojen kutu- ja poikasalueita (Robinson ym. 2002).

Suurille uomille on tyypillistä koski-suvanto -vaihtelu, johon sedimentin kulkeutuminen vaikuttaa. Kosket muodostuvat jyrkemmän pudotuskorkeuden ja karkeamman pohjan alueille. Koskissa sedimentti ja pohja ovat tyypillisesti joko peruskalliota, karkeaa kiveä tai soraa, jotka vastustavat tehokkaasti virtauksen voimaa ja kulutusta (Kuva 3). Maalajien suhteelliseen osuuteen vaikuttavat paikallinen geologia, valuma-alueen kaltevuus ja virtaama. Koskialueen eroosioherkkyyteen vaikuttavat kallio- tai maaperän sedimentin koostumuksen lisäksi virtausnopeuden ja kasvillisuuden vaihtelu. Hitaamman virtauksen alueet, kuten koskikynnykset ja suvannot ovat edellytys soraikkojen pysyvyydelle jyrkissä ja vuolaissa koskissa. Soraikot ovat monien virtakutuisten kalojen, kuten lohen ja taimenen lisääntymisalueita. Hienojakoista sedimenttiä, kuten hiekkaa, kertyy koskissa myös suurempien kivien tai kaatuneiden puiden luomiin hitaan virtaukseen alueisiin ja rantapoukamisiin. Kivirykelmät tai omaan kaatuneet puun rungot muodostavat lisäksi kynnyksiä, jotka hidastavat virtausta ja luovat paikallisia hienon sedimentin kertymisalueita (Mont-



Kuva 5. Sorasärkkiä esiintyy luontaisesti paljon soraa ja hienoa kiintoainetta kuljettavissa jokivesistöissä. Kuva: Maria Kämäri.



Kuva 6. Tulvissa kiintoainetta ja ravinteita pidättyy virtavesien rantavyöhykkeelle. Tulviminen lisää virtavesien rantavyöhykkeen eliöstön monimuotoisuutta. Kuva: Hannu Marttila.

gomery ym. 1996; Hassan ym. 2005). Tästä hyötyvät monet virtavesien vesihyönteiset ja simpukat, jotka suosivat hienojakoista sedimenttiä elinympäristönään esimerkiksi kaivautumalla siihen. Lisäksi sedimentaatioalueisiin kerääntyvä orgaaninen aines on mikrobien ja pohjaeläinten ravintoa. Hyvinkin paikallinen virtausten vaihtelu lisää virtavesien pieneliöympäristöjen ja luonnon monimuotoisuutta (Kuva 7).



Kuva 7. Uomien isot kivet hidastavat virtausta ja luovat sedimentin kertymisalueita, joihin hienojakoista sedimenttiä suosivat eliöt, kuten kuvan ulpukka, voivat levittäytyä. Kuva: Minna Kuoppala

Rantavyöhykkeen puusto ja kasvillisuus antavat eroosiosuojaa veden kulutusvoimia vastaan. Uomaan levittäytyvä ranta- ja vesikasvillisuus tai uomaan kaatuvat puut voivat luoda ympäristöjä hienojakoisen kiintoaineen sedimentaatiolle (Kuva 8). Sedimentaatio synnyttää uomaan särkkiä tai saarekkeita, joille maakasvillisuus voi levittäytyä. Juurtuessaan kasvillisuus puolestaan vakauttaa syntyneen uuden uomarakenteen (Abbe & Montgomery 1996; Gurnell ym. 2005).

Sedimentin liikkuminen ja uudelleenlajittuminen ovat tärkeitä prosesseja virtavesien monimuotoisuudelle. Eliöbiomassat ovat runsaita sedimenttien liikkumisen osalta vakaimmissa ympäristöissä, joissa kiintoainetta liikkuu vähän, mutta yhteisöä hallitsee usein vain muutama kilpailullisesti vahva laji. Luontaiset häiriöt sedimenttien liikkeellelähdössä lisäävätkin yleensä virtavesien lajistollista monimuotoisuutta tiettyyn rajaan asti. Jatkuvasti voimakkaassa häiriötilassa olevat alueet - esimerkiksi voimakkaan sedimentaation ja sedimentin liikkumisen takia - ovat useimmiten lajistollisesti hyvin köyhiä, sillä vain harvoilla lajeilla on sopeumia tällaisiin olosuhteisiin. Kivien pinoilla kasvavat levät ja mikrobiyhteisö (perifyton tai ns. biofilmi) muuttuvat ajan myötä ns. sukkessio -kehityksessä paljaan kiven pinnalle kasvavasta pioneerilajien yhteisöstä vakaaksi loppuyhteisöksi. Sedimentin liikkuminen ja eroosio luovat vaihtelua näille kehitysvaiheille, ja siten ylläpitävät suurempaa lajien monimuotoisuutta. Vastaavasti myös virtavesien sammalet ovat runsaimpia vakaisissa elinympäristöissä ja vakailta kivillä, mutta tietyin väliajoin toistuvat häiriöt, kuten sedimentin liikkuminen, lisäävät niiden lajistollista monimuotoisuutta (Muotka & Virtanen 1995).



Kuva 8. Kuollut puuaines lisää virtavesielinympäristön monimuotoisuutta sekä pidättää kiintoainetta ja karkeaa orgaanista ainesta ja ravinteita vedestä. Kuva: Jarno Turunen

2 Merkittävimmät kiintoaineen kulkeutumiseen vaikuttavat tekijät valuma-alueella ja uomassa

Jarno Turunen, Hannu Marttila, Maria Kämäri, Kaisa Heikkinen, Heini Postila

Kiintoaine ja sen sedimentoituminen muodostuu virtavesissä ongelmaksi, kun valuma-alueen eroosio ylittää merkittävästi luontaisen taustatason, ja sedimenttiä kertyy uomiin enemmän kuin ne sitä pystyvät kuljettamaan. Maankäyttö voi myös nopeuttaa uoman paikallista eroosiota ja aiheuttaa törmien romahtamista. Ihmistoiminta on monilla alueilla valtavasti lisännyt valuma-alueiden eroosiota ja virtavesien hienon kiintoaineen määriä luontaiseen taustatasoon nähden (Waters 1995; Montgomery 2007). Liiallisesta hienon kiintoaineen sedimentaatiosta onkin muodostunut merkittävä ongelma virtavesien ekosysteemien toiminnalle ja luonnon monimuotoisuudelle. Keskeisesti valuma-alueelta uomiin tulevaan hienojakoisen kiintoaineen määrään vaikuttaa maankäyttö, maatalous, metsätalous ja kaupungistuminen.

2.1 Maatalous

Maatalous on yksi merkittävimmistä kiintoainekuormitusta ja sedimentaatio-ongelmia aiheuttavista maankäyttömuodoista (Allan 2004, Kuva 9). Maatalouden kiintoainekuormitus koostuu valtaosin hienojakoisesta siltistä, savesta ja maaperän orgaanisesta aineksesta, mikä samentaa veden ja liettää pohjan. Hienojakoinen kiintoaine sedimentoituu suvantoihin ja muihin hitaan virtauksen alueisiin. Koskissa soraikkojen välit tukkivalla hienolla kiintoaineella on monia haitallisia vaikutuksia (Kappale 3). Peltoviljelyalueilta peräisin olevan kiintoainekuormituksen määrään vaikuttavat merkittävästi valuma-alueen peltojen osuus ja niiden kaltevuus (Ekholm ym. 2000), maaperä sekä viljelykäytännöt. Eroosio ja huuhtoutuminen ovat yleensä voimakkaampia jyrkemmiltä kuin tasaisilta pelloilta.

Kynnetyt pellot ovat erityisen herkkiä pintaeroosiolle ja kiintoaineen huuhtoutumiselle (Waters 1995). Ne ovat alttiita myös tuulen aiheuttamalle maanpinnan eroosiolle, erityisesti kuivana kautena. Kiintoainetta kulkeutuu virtavesiin myös peltojen kuivatusojia pitkin. Lisäksi pelto-ojien eroosio itsessään voi aiheuttaa merkittävää kiintoainekuormitusta (Sharpley ym. 2007). Maatalouden kiintoainekuormitus sekä valunta on voimakkainta kasvukauden ulkopuolella, kevään sulamisvesien ja syksyn sateiden aikana, jolloin haihdunta on pientä, eikä kasvillisuus sido vettä ja huuhtoutuvia maapartikkeleita (Kuva 10). Leudot talvet, jolloin peltojen jäätyminen ja sulaminen vuorottelevat ja sadanta tulee vetenä, lisäävät merkittävästi peltojen eroosiota ja kiintoainehuuhtoutumaa (Puustinen ym. 2007). Myös tulvat voivat huuhtoa kiintoainetta alavilta pelloilta ja laidunmailta (Yu & Rhoads 2018).

Viljelyalueiden hydrologia on yleensä keskeisesti muuttunut luonnontilasta, mikä aiheuttaa ylivirtaamien ja kuivien kausien äärevöitymistä. Äärevöitynyt virtaama lisää uomaeroosiota, mikä voi virtavesissä paikoin olla merkittävämpi kiintoainekuormituksen ja liettymisongelmien lisäksi kuin valuma-alueelta huuhtoutuva kiintoaine

(Lambda ym. 2015; Neal & Anders 2015). Karjan laidunnus voi myös lisätä kiintoainehuuhtoumaa jos kasvillisuuden peittävyys vähenee ja maanpinta tiivistyy, mikä vähentää veden suotautumista ja lisää pintavaluntaa (Waters 1995). Mikäli karjalla on pääsy virtaveden rantaan asti, voi rantatörmän maanpinta rikkoontua pahoin, lisäten kiintoaineen huuhtoutumista virtavesiin (Trimble & Mendel 1995; Braccia & Voshell 2007).



Kuva 9. Maatalous on merkittävästi muuttanut virtavesiluontoamme ja aiheuttaa haitallista kiintoainekuormitusta. Kuva: Riku Lumiaro/YHA kuvapankki



Kuva 10. Valtaosa maatalouden kiintoainehuuhtoumasta syntyy syksyn sateiden, kevättulvien ja lumen sulannan aikana, jolloin pellot ovat usein kynnetyjä ja suojavöhykkeiden kasvillisuus ei sido huuhtoutuvaa maa-ainesta. Kuva: Riku Lumiaro/YHA kuvapankki

2.2 Metsätalous ja turvetuotanto

Metsätaloudesta syntyy maanlaajuisesti merkittävää virtavesien kiintoainekuormitusta. Avohakkuut ja metsänhoidon yhteydessä mahdollinen maanpinnan rikkoutuminen tai maanmuokkaus lisäävät pintaeroosiota ja kiintoaineen huuhtoutumisriskiä vesistöihin. Lisäksi märkien kasvupaikkojen kuivatus vaikuttaa huomattavasti paikalliseen kiintoainekuormitukseen. Suomessa 55 % turvemaista on ojitettu maaperän kuivatuksen ja metsänkasvun edistämiseksi (Turunen 2008, Kuva 11). Ojitus oli kiivaimmillaan 1960-80 luvuilla ja väheni merkittävästi 90-luvulla (Paavilainen & Päivänen 1995). Nykyisin ojituksia tehdään pääsääntöisesti vain, kun vanhoja taloudellisesti kannattavia metsiä kunnostusojitetaan. Uudisojitukset ovat harvinaisia, mutta täydentäviä ojituksia tehdään kunnostusojitusten yhteydessä. Ojitukset on



Kuva 11. Suomessa on ojitettu valtavasti turvemaata (noin 55 % koko pinta-alasta). Metsäojien eroosio onkin maanlaajuisesti merkittävin virtavesien kiintoainekuormituksen lähde. Kuva: Hannu Marttila.

usein kaivettu lähimpään latvavesistöön asti, millä on ollut lukuisia haitallisia vaikutuksia. Ojitus kuivattaa turvemaat, jolloin maaperän orgaaninen aines hapettuu ja alkaa hajota. Tämän seurauksena orgaanisen kiintoaineen ja humuksen huuhtoutuminen ojiin on lisääntynyt, mikä on aiheuttanut vesistöjen tummumista ja pohjien liettymistä. Ojitukset, jotka on kaivettu turvemaiden kivennäismaahan asti tai tehty kivennäismaille, ovat lisänneet myös epäorgaanisen kiintoaineen, kuten hiekan huuhtoutumista virtavesiin (Stenberg ym. 2015; Marttila & Kløve 2010). Hiekoittuminen on ongelma erityisesti latvapuroissa, joiden virtaama ei usein riitä niiden itsepuhdistumiseen sedimentoituneesta kiintoaineesta (Kuvat 12 ja 13).

Metsähakkuista voi syntyä paikallisesti merkittävää kiintoainekuormitusta. Hakkuissa rikkoontuva maaperä ja taimi-istutuksissa tehtävä maanmuokkaus (esim. laikkumätästys, äestys) lisää maaperän eroosioherkkyyttä, erityisesti silloin kun hakkuissa poistetaan myös kannot energiapuiksi (Mlambo ym. 2015). Sateen vai-



Kuva 12. Kuvan keskellä olevasta metsäojasta huuhtoutuu hiekkaa, joka peittää uoman pitkälle matkalle alajuoksulla. Kuva: Jarno Turunen.



Kuva 13. Yksi pienikin eroosiolle altis oja voi aiheuttaa vakavia liettymisongelmia erityisesti latvapuroissa. Kuva: Hannu Marttila

kutuksesta maaperän eroosio lisääntyy hakkualueilla osaltaan myös sen takia, että oksisto ei enää pidätä ja hidasta maahan päätyvää sadetta (ns. interseptiovaikutus), eivätkä puut haihduta vettä takaisin ilmakehään. Uudishakkuualueilta lähtevä kiintoainekuormitus on peräisin pääosin maanmuokkausjäljistä, sekä vesistöjen läheisyydessä olevista korjuujäljistä joissa maanpinta on rikkoutunut. Erityisen ongelmallisia eroosio ja kiintoainehuuhtouma ovat jyrkästi viettävillä hakkuualoilla, jos riittävät suojavyöhykkeet puuttuvat tai metsäkoneella on ajettu puron yli niin, että maanpinta rikkoontuu ja koneura toimii väylänä kiintoaineen huuhtoutumiselle puroon.

Suomessa on arviolta noin 270 000 km metsäautoteitä (Matilainen ym. 2000). Metsäautoteiden ja niitä reunustavien raviojien eroosio lisäävät erityisesti hiekan kulkeutumista ja kiintoainekuormitusta puroihin (Kuva 14). Jyrkemmissä notkoissa sijaitsevilla puroissa, joihin raviojat viettävät suoraan ilman suojakaistoja, on olemassa riski merkittäväälle purojen hiekkoutumiselle.



Kuva 14. Täysin hiekkoutunut puro, jossa keskeinen syy on metsäautotien ja raviojan syöpyminen ja hiekan huuhtoutuminen puroon.
Kuva: Jarno Turunen.

Turpeen nosto energiantuotantoon on yleistä erityisesti Keski-Suomessa ja Pohjanmaalla (Kuvat 15 ja 16). Turvetuotanto aloitetaan kuivattamalla suo ojituksin ja poistamalla suon kasvillisuus. Tämä ns. kuntoonpanovaihe kestää noin 1-3 vuotta (Pöyry Environment Oy 2009). Jyrsinturpeen tuotannossa turpeesta jyrsitään vuosittain pintakerros, joka kuivataan tuotantokentällä välillä kääntäen. Palaturpeen tuotannossa taas suosta irrotetaan turvepaloja ja niiden annetaan kuivua kentällä. Niitäkin käännettään muutaman kerran, minkä jälkeen kuivuneet palat kerätään aumoihin. Näiden toimenpiteiden seurauksena suoalueelta huuhtoutuu kiintoainetta, ravinteita, humusta ja rautaa. Huuhtoutuvan kiintoaineen määrä on suurimmillaan tulva- ja rankkasadekausien suurten virtaamien aikana. Jyrsinturvekentillä syntyy usein enemmän kiintoainekuormitusta kuin palaturvekentillä.

Yksi keskeinen syy tulva- ja rankkasadekausien suuriin kiintoainehuuhtoumiin on turvesuon valuntaolojen äärevöityminen. Pääasiallinen syy tähän on kasvillisuuden poisto ja suon kuivatus, jotka voimistavat turpeen tiivistymistä ja hajoamista, mikä heikentää suon pintakerrosten veden läpäisevyyttä. Suolla alkaa esiintyä sekä voimakkaita ja äkillisiä tulvahuippuja että pitkittyneitä alivirtaamakausia. Suuria hetkellisiä ylivalumia voi esiintyä erityisesti kesän rankkasateiden aikana.



Kuva 15. Turvetuotanto on alueellisesti merkittävä maankäyttömuoto, josta syntyy erityisesti orgaanista kiintoainekuormitusta vesistöihin. Kuva: Aarno Torvinen/YHA kuvapankki



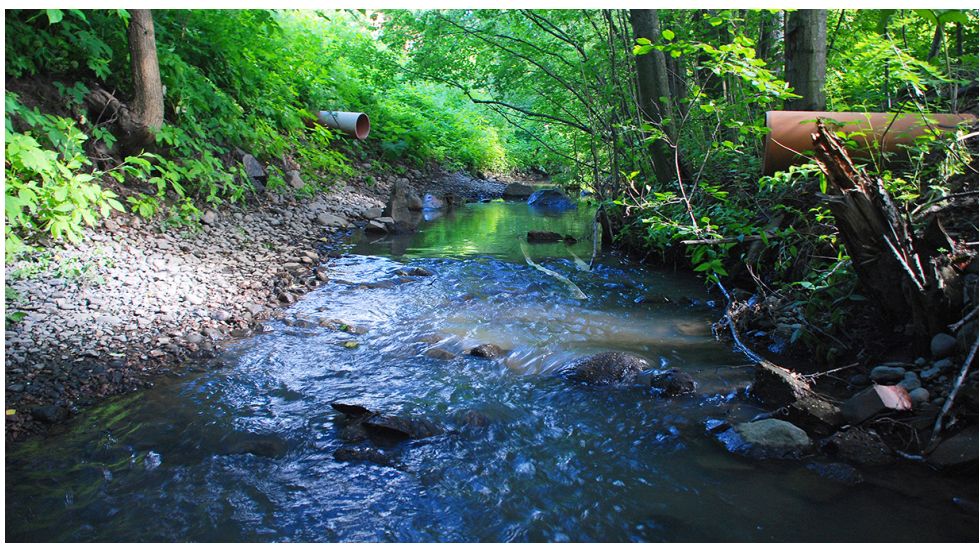
Kuva 16. Kuivan turpeen kerääminen tuotantokentältä voi lisätä tuulieroosion ja ilman kautta kulkeutuvan orgaanisen aineksen määrää. Kuva: Eero Saarela/YHA kuvapankki.

2.3 Kaupunkien ja taajamien maankäyttö

Kiintoainekuormitus ja sedimentaatiohaitat ovat keskeisiä ongelmia kaupunkien ja taajamien virtavesissä (Paul & Meyer 2001; Walsh ym. 2005). Asuinalueilta, kaduilta, kaatopaikoilta ja rakennustyömailta huuhtoutuvat ns. hulevedet kuljettavat usein kiintoainetta korkeina pitoisuuksina, mikä heikentää kaupunkipurojen ekologista tilaa (Roy ym. 2003a, Sillanpää & Koivusalo 2015, Kuvat 17 ja 18). Kaupunkipurojen valuma-alueilla asfaltti ja muut vettä läpäisemättömät pinnat ja rakenteet äärevöittävät virtaamia, mikä lisää uomaeroosiota (Trimble 1997). Kaavoittajat ja rakentajat ovatkin alkaneet ottaa käyttöön erilaisia ratkaisuja, joilla sadevettä voidaan pidättää taajamissa ja kaupunkialueilla ja imeyttää sitä maahan. Hulevesien vähentämisen tai niiden laadun parantamisen keinoja ovat muun muassa vettä läpäisevät päällysteet, hulevesikosteikat ja viherkatot (Kuntaliitto 2012).



Kuva 17. Rakennetuilta alueilta ja muokatuilta joutomailta huuhtoutuva kiintoaine on usein ongelma kaupunkipuroissa. Kuva: Jarno Turunen



Kuva 18. Hulevesiputkia kaupunkipurossa. Käsittlemättömänä puroihin päätyvissä hulevesissä on usein korkeita pitoisuuksia hienoa kiintoainetta ja raskasmetalleja. Kuva: Milla Popova/YHA kuvapankki.

2.4 Kaivokset ja maanotto

Kaivostoiminta kuten avolouhokset tai kullanhuuhdonta, sekä soranotto voivat alueellisesti aiheuttaa ongelmallista kiintoainekuormitusta, mikäli vesien käsittelyssä on puutteita, tai eroosioriskiä ei ole tarpeeksi huomioitu. Kullanhuuhdonta koneellisesti tai käsin, ja kullan erottaminen maaperästä huuhtomisrännissä vaatii vettä, minkä takia toimintaa harjoitetaan yleensä vesistöjen, kuten purojen ja jokien läheisyydessä (Kuva 19). Kaivamisessa rikkoontuva maaperä ja kullan erotuksessa huuhteltava maa-aines ovat alttiina eroosiolle ja vesistöön huuhtoutumiselle. Tällä voi olla vakavia seurauksia näiden purojen elinympäristön tilaan.



Kuva 19. Koneellista kullanhuuhdonta Lapissa. Kaivostoiminnan maanmuokkaus ja louhinta lisää maaperän eroosiota ja voi aiheuttaa haitallista kiintoainekuormitusta vesistöihin, mikäli vesien käsittely on puutteellista. Kuva: Tarmo Oikarinen/YHA kuvapankki.

2.5 Vesistörakentaminen ja säännöstely

Vesistöjen rakentaminen sähköntuotannon tai tulvasuojelun tarpeisiin muuttaa virtaveden kiintoaineen kulkeutumisen dynamiikkaa ja eroosiota. Erityisesti karkeaa kiintoainetta pidättyy patoaltaisiin ja tekojärviin, mikä voi vähentää kiintoainetta luontaiseen tasoon verrattuna alapuolisessa vesistössä. Globaalisti monien suurjokien kiintoainehuuhtouma mereen on vähentynyt patojen seurauksena niin paljon, että kiintoaineen vähyys on ongelma jokisuistojen ekosysteemien toiminnalle, vaikka jokiin päätyy ihmistoimien takia enemmän kiintoainetta kuin luontaisesti (Syvitski ym. 2005). Maailman suurimpien jokien suistot ovat aikojen alusta asti olleet merkittäviä ruoantuotanto- ja riisinviljelyalueita. Jokien patoaminen ja säännöstely on pienentänyt jokisuistojen tulvimista ja siten hedelmällisen lietteen leviämistä viljelyksille, minkä seurauksena kalliiden väkilannoitteiden käyttö on lisääntynyt (Chapman & Darby 2016). Patojen rakentamiseen liittyyvillä sedimentaatiodynamiikan

muutoksilla on täten moninaisia taloudellisia, yhteiskunnallisia sekä ympäristövai-
kutuksia, joiden syy-seuraussuhteiden ymmärrys on haastavaa.

Tekojärven kehittymisen alkuvaiheissa, altaan hakiessa lopullista muotoaan, syntyy eroosion takia merkittävää, usein orgaanista kiintoainekuormitusta. Lisäksi sähköntuotannossa veden juoksutuksen säätely sähkön kulutushuippujen mukaan, eli niin sanottu lyhytaikaissäätely, voi lisätä esimerkiksi patoaltaisiin kertyneen kiintoaineen äkillistä huuhtoumaa ja uomaeroosiota. Säätelyyn liittyvän lyhytkestoisen virtaamavaihtelun ekosysteemivaikutukset ja vaikutukset kaloihin tai muihin eliöihin ovat alueellisesti ja paikallisesti vaihtelevia ja huonosti tunnettuja (Vehanen ym. 2000), joskin aihetta on tutkittu lisää viime vuosina. Tiedon lisääntyessä on esitetty keinoja sääntelykäytäntöihin siten, että ekosysteemivaikutukset voidaan ottaa huomioon vesivoiman tuotannossa (Bruder ym. 2016).

2.6 Muuttuva kylmä ilmasto

Viimeaikaisissa ilmastomuutostutkimuksissa on pyritty huomioimaan veden aiheuttama eroosio ja vesistöjen kiintoainekuormituksen eri tekijät yhä kattavammin. Vuotuinen sadanta, sadannan intensiteetti, sekä lumi- ja kasvipeite muuttuvat ilmaston lämmitessä (Hoegh-Guldberg ym. 2018). Muutoksen vaikutus kiintoainekuormitukseen on monimutkainen kokonaisuus, ja arviot siitä on tehtävä alueittain.

Suomi sijaitsee ilmastomuutosalueella, jossa lämpötilan nousu on suhteellisesti suurempaa kuin monilla muilla alueilla (Hoegh-Guldberg ym. 2018). Suomen oloissa se, että osa sadannasta tulee lumena, on hydrologisesti ja veden laadun kannalta oleellista, sillä kertyvä lumipeite ja toisaalta lumen sulanta vaikuttavat veden hydrologiseen kiertoon ja maa-aineksen huuhtoutumiseen. Lumipeite luo talvisen ja kylmän kauden eroosiosuojan, joka on jokisysteemien ekologialle merkittävä. Toisaalta lumen voimakas kevät sulanta voi huuhtoa runsaasti maa-ainesta valuma-alueelta. Lämpötilan noustessa, lumensulamiset ja sadevedet voivat lisätä eroosiota kasvukauden ulkopuolella ainakin rannikkoalueilla ja Etelä-Suomessa, jos maa ei ole rouhdassa ja joessa ei ole suojaavaa jääkantta. Tällöin vesistöön kohdistuvaa kiintoainekuormitusta syntyy myös talvikuukausina, jolloin sitä ei ole aiemmin merkittävästi esiintynyt. Toisaalta kevät sulannan aikana syntyvä eroosio ja kiintoainekuormitus todennäköisesti laskee, kun tulvahuiput jäävät pois ja suurimmat virtaamat ajoittuvat syksyyn. Virtavesien vedenlaadun jatkuvatoimisella seurannalla on havaittu, että runsaslumisen talven jälkeen kevät sulanta aiheuttaa virtaamaan suhteutettuna enemmän kiintoainekuormitusta kuin vähälumisen talven jälkeinen kevät sulanta (Kämäri ym. 2018). Seuranta on osoittanut lisäksi, että vähälumisena talvi- ja kevätjaksona virtaamaan suhteutettu kiintoainepitoisuus ei noussut jokivedessä suuremmaksi verrattuna vuosiin, jolloin lunta oli hyvin paljon (Kämäri ym. 2018). Valunnan määrä tulee jatkossakin hyvin pitkälle säätämään vuotuista kiintoainekuormitusta, sillä virtaama korreloi voimakkaasti kuormituksen kanssa. Lumen määrä, lumitalven kesto, maan routautuminen sekä valunnan ajoittumisen vaihtelu tuo kiintoainekuormituksen kokonaismäärään vaihtelua, mutta vaihtelun suuruutta ja merkittävyttä ei vielä tunneta riittävän hyvin. Jatkuvatoimisia sameusantureita on maassamme jo monissa virtavesikohteissa. Sameuden, kiintoainepitoisuuden ja virtaaman tiheä seuranta erityyppisinä vesivuosina tuo arvokasta tietoa vuotuisen ja vuoden sisäisen kiintoainekuormituksen vaihtelusta. Se auttaa myös arvioimaan paremmin muuttuvan ilmaston vaikutuksia kiintoainekuormaan, joka kulkeutuu uomista järviin ja mereen.

Jokien ajoittainen jäätyminen vaikuttaa monin tavoin niiden ekosysteemeihin kylmän ilmaston alueilla. Jääkannen muodostuminen, jääkansi ja jäänlähtö vaikuttavat virtausolosuhteisiin ja sedimenttien liikkeisiin virtavesissä (Kämäri 2018; Lotsari

ym. 2015). Savisameissa jokivesistöissä vesi on tyypillisesti kirkkaampaa jääkannen alla kuin jäättömässä joessa vastaavilla pienillä virtaamilla (Kämäri ym. 2015 ja 2018). Ilmiötä selittää ainakin se, että sopivissa olosuhteissa jääkansi pienentää veden virtauksen aiheuttamaa leikkausvoimaa uoman pohjaan, jolloin pohjamateriaali ei lähde niin herkästi liikkeelle ja veden sameus vähenee (Kämäri ym. 2015). Keväinen jäänlähtö muokkaa uomaa ja voi lisätä uoman pohjan ja penkereiden eroosiota verrattuna jäättömään virtaan (Lotsari ym. 2015). Jokien jäänlähtöön voi liittyä myös jäiden pakkaantumista ja jääpatoja, jotka padottavat vettä, tukkivat uomaa ja muuttavat virtausnopeuksia. Jää- tai suppopadon kohdalta uoman pohja voi paikallisesti erodoitua hyvin voimakkaasti, jos vesi ohjautuu virtaamaan uomaan kasaantuneen jään alitse. Ajan myötä jääpatojen kohdalle pohjaan muodostuneet eroosiokuopat täyttyvät veden kuljettamasta aineksesta. Ilmastomuutos on jo lyhentänyt jäätalvien kestoja ja vaikuttanut jokien jäätilanteeseen. Vaihtelevien jääolosuhteiden nettovaikutusta erilaisten jokien sedimenttiprosesseihin ei tunneta kovin hyvin.

Sääilmiöistä etenkin sadannan mahdollinen äärevöityminen lisää eroosioriskiä ja siten kiintoainepitoisuuksien kasvua virtavesissä. Isot sademäärät aiheuttavat paitsi maaperän voimakasta eroosiota, myös virtaaman nopeaa vaihtelua ja sen myötä uoman pohjasedimentin huuhtoutumista.

3 Kiintoainekuormituksen ja sedimentaation merkitys luonnossa

Jarno Turunen, Markus Saari, Saija Koljonen, Hannu Marttila, Kaisa Heikkinen

3.1 Vesiuoman rakenne ja toiminta

Ylimääräinen sedimentti ja kiintoaine ovat vahingollisia virtavesien ekosysteemeissä. Kiintoaineen sedimentaatio virtavesissä on luonnollista, mutta muuttuu haitalliseksi, jos sitä esiintyy liikaa luonnolliseen taustatasoon nähden. Vedessä runsas kiintoainemäärä värjää veden sameaksi (epäorgaaninen kiintoaine) tai hyvin tumman ruskeaksi (orgaaninen kiintoaine, rauta). Tällä on vaikutuksia paitsi vesistöjen virkistyskäyttöarvoon, niin myös virtavesien eliöyhteisöihin ja ekosysteemin toimintaan. Liiallinen kiintoainekuormitus voi täyttää virtavesien kivien väliköt, soraikot, suvannot ja muut hitaamman virtauksen alueet hienolla sedimentillä. Mikäli sedimentaatio on erittäin voimakasta, lopputuloksena voi olla kauttaaltaan hienolla sedimentillä peittynyt uoma, jonka syvyysvaihtelu on merkittävästi vähentynyt ja pohjan partikkelikokojakauma yksipuolistunut. Erityisesti pienet latvapurot ovat herkkiä sedimentoitumiselle, koska niiden itsepuhdistumiskyky on rajallinen. Lisäksi runsas hieno sedimentti tekee pohjasta epävakaan, koska pohjamateriaali on jatkuvassa liikkeessä. Tämä tarkoittaa, että uoma on biologisesti jatkuvassa häiriötilassa (kappaleet 3.3-3.6), sillä epävakaalla pohjalla vaikeuttaa pohjaeläinten elinolosuhteita sekä päällysvien ja muun kasvillisuuden kasvua ja levittäytymistä.

Kiintoaineen sedimentaatio vaikuttaa myös veden virtauksiin purojen ja jokien pohjasedimentissä (Marttila ym. 2018, 2019). Veden virtaus pohjasedimenttiin (ns. hyporheic zone) ja sen kumpuaminen sedimentistä viileämpänä takaisin yläpuoliseen veteen, säätelee virtavesien lämpötilaolosuhteita ja vaikuttaa ravinteiden kiertoon sekä pohjaeläinten elinympäristöön ja esimerkiksi lohikalojen mädin kehitykseen (Jones ym. 2015; Sear ym. 2016). Kiintoaineen iskostuessa pohjaan, ja täyttyessä huokoiset pohjaväliköt, veden virtaus pohjasedimenttiin heikentyy merkittävästi (Jones ym. 2015). Tämä tekee pohjasta vähähappisia erityisesti silloin, kun kiintoaine on orgaanista ainesta, minkä hajoaminen lisää hapenkulutusta. Heikentynyt virtaus ja happitilanne vaikuttavat orgaanisen aineen hajotusprosesseihin (hapellinen ja hapeton hajoaminen), mikrobien ravinteiden sidontaan, raudan hapettumis- ja pelkistymisreaktioihin (kappale 3.2) ja typen kiertoon, kuten nitrifikaatioon ja denitrifikaatioon pohjasedimentissä (Baker ym. 1999; Crenshaw ym. 2002). Denitrifikaatiota tapahtuu vähähappisissa olosuhteissa, jolloin orgaanista ainesta hajottavat ja nitriittiä (NO_2) sekä nitraattia (NO_3) pelkistävät anaerobiset bakteerit muuntavat näitä typen muotoja typpikaasuksi (N_2). Pohjasedimentin prosesseihin vaikuttaa merkittävästi myös paikallinen pohjaveden purkautuminen uomaan. Purkaumakohtat ovat tärkeitä elinympäristöjä uomaverkostossa, tarjoten tasaiset lämpötilaolosuhteet vuoden ympäri. Paikallinen maankäyttö ja kuivatustoimenpiteet voivat vaikuttaa pohjaveden kulkeutumisreitteihin, tai uoman pohjalle kasaantunut sedimentti voi tukkia paikallisia purkautumiskohtia vaikuttaen paikallisiin pohjaveden purkaumiin uomassa.

3.2 Raudan kulkeutumisen vaikutus pohjan liettymiseen

Raudan kulkeutuminen ja saostuminen virtavesissä voi vaikuttaa huomattavasti paikalliseen kiintoainekuormitukseen ja pohjan liettymiseen (Vuori 1995). Viimeaikaiset tutkimukset osoittavat, että pohjoisen havumetsävyöhykkeen virtavesien rautapitoisuudet ovat nousussa (Björnerås ym. 2017; Ekström ym. 2016; Sarkkola ym. 2013). Valuma-alueen ominaisuudet, maaperän pelkistysolosuhteet ja mikrobitoiminta vaikuttavat raudan kulkeumaan. Maankäyttö on yhteydessä vesistöjen rautapitoisuuksiin, sillä korkeita pitoisuuksia on havaittu eniten maatalous- ja turvevaltaisilla valuma-alueilla (Palviainen ym. 2015). Pitkäaikaisesta vedenlaatuaineistosta nähdään, että maatalousvaltaisilla valuma-alueilla raudan liikkeellelähtö on kytköksissä eroosioon, jos rauta on kiinnittynyt pääosin maaperän savipartikkeleihin (Markus Saari ym. julkaisematon). Tämä näkyy näillä valuma-alueilla myös siten, että runsasvetisiin ajanjaksoina, jolloin pintavaluntaa ja eroosiota esiintyy, myös rautapitoisuudet ovat koholla.

Turvevaltaisilla valuma-alueilla taas raudan lähteenä pidetään yleisesti turpeeseen kertynyttä rautaa. Niiden happipitoisissa valumavesissä rauta huuhtoutuu pääosin humusaineisiin (Heikkinen 1990b) ja osin myös kiintoaineeseen sitoutuneena. Näillä alueilla rautapitoisuudet ovat koholla pääosin alivirtaamien aikaan. Tällöin vesistöissä virtaava vesi on suurelta osin peräisin soiden syvistä, rautapitoisista kerroksista. Mielenkiintoisia tuloksia veden rautapitoisuuden vuodenaikaisvaihtelusta on saatu Kiihiminkijoen runsassoiselta valuma-alueelta Pohjois-Suomessa (Heikkinen 1990c). Sekä raudan kokonaispitoisuus että humukseen sitoutuneen raudan määrä lisääntyivät jokivedessä vähitellen koko avovesikauden 1984 ajan, mutta pitoisuudet vähenivät jyrkästi ja nopeasti heti syystulvan 1984 alussa. Yksi syy tähän vähenemiseen voi olla rautapitoisen humuksen saostuminen veden lisääntyneen virtauksen ja turbulenssin, mutta myös happamoitumisen seurauksena. Voi siis olla mahdollista, että rautapitoisissa humusjoissa syntyy pohjille sedimentoituvaa rautapitoista kiintoainetta myös luontaisten hydrogeokemiallisten prosessien tuloksena, ja että näiden vesien eliöstö on ainakin jossakin määrin sopeutunut tähän humuksen saostumiseen. Saostunut rautapitoinen humus voi tällöin jopa toimia yhtenä eliöstön orgaanisen ravinnon lähteenä. Humuksen saostumista ja sen syitä sekä saostuneen humuksen ekologista merkitystä jokivesissämme tulisikin vielä tarkemmin selvittää.

Rauta esiintyy luonnonvesissä hapetusasteissa Fe(II) (ferrorauta) ja Fe(III) (ferrirauta). Näistä Fe(III) on vaikealiukoista, ja näyttäytyy ympäristössä usein kolloideina, sakkautumina ja pohjan liettymisenä. Hapetusasteista Fe(III) on yleisempi muoto, ja kaloille myrkyllistä Fe(II) eli ferrorautaa esiintyy pintavesissä vain poikkeuksellisissa olosuhteissa, kuten happamissa ja vähähappisissa vesissä.

Raudan roolia kokonaiskiintoaineen kuormituksessa on haastavaa arvioida. Vesistöissä, joissa veden rautapitoisuus on suuri, voi pohjia liettää myös okra. Okra koostuu saostuneesta raudasta ja sitä aineenvaihdunnassaan hyödyntävien bakteerien muodostamasta punertavasta hyytelömäisestä lietteestä (Vuori 1995, Kuva 20). Tällaista liettymistä on havaittavissa etenkin ojitetuilla turvevaltaisilla valuma-alueilla, joilla rauta siirtyy kuivatusojiin pohjaveden mukana. Tällöin sen aiheuttama kiintoainekuormitus ei dynamiikaltaan noudata perinteisempää, eroosiosta aiheutuvaa kuormitusta. Siksi onkin tärkeää, että raudan aiheuttama sedimentaatio tiedostetaan, sekä tarkastellaan tällaisilla alueilla omana kokonaisuutenaan. Liettymisen vaikuttaa etenkin pohjaeläinten ja kalojen elinolosuhteisiin, ja vaikutukset ovat verrattavissa hienojakoisen kiintoaineen aiheuttamiin haittoihin (tarkemmin kappaleissa 3.5 ja 3.6).



Kuva 20. Rautapitoista okraa metsäojassa. Hapettoman Fe(II) -pitoisen pohjaveden purkautuessa ojaan rauta hapettuu ja sakkautuu Fe(III) -muotoon. Kuva: Jarno Turunen.

3.3 Päälyysleviin, vesikasveihin ja perustuotantoon kohdistuvat vaikutukset

Virtavesien perustuottajat muodostuvat putkilokasveista, sammalista, sekä päälyyslevistä, jotka kasvavat kivien, puun tai vesikasvien pinnalla ns. epifyytteinä. Virtavesien kasviplanktonin tuotannolla on yleensä vähän merkitystä perustuotantoon, sillä kasviplanktonin tuotanto on merkittävää lähinnä vain suurten jokien suistoissa tai suvantoalueilla (Allan & Flecker 1993). Päälyyslevät (piilevät, sinilevät, viherlevät, punalevät) ovat runsas ja monimuotoinen perustuottajaryhmä, joita esiintyy kaikissa virtavesissä. Sammalten ja putkilokasvien suhteellinen merkitys vaihtelee jokisysteemin eri osissa ja ilmastovyöhykkeittäin. Sammalet ovat tyypillisesti runsaampia latvavesissä viileillä ilmastovyöhykkeillä, kun taas putkilokasvien merkitys on suurempi isommissa jokiuomissa ja lauhkeilla alueilla (Allan & Flecker 1993, Kuva 21). Virtaaman vakaus, veden laatu ja sedimentin kokojakauma aiheuttavat kuitenkin huomattavaa luontaista vaihtelua kasvillisuuteen, joten putkilokasvit (mm. järvisätkin, ärviät, vesikuusi, puro- ja lehtivita) voivat olla vallitsevia lajeja myös latvapuroissa ja -joissa.

Kiintoainekuormituksesta lisääntyvä sameus tai veden tummuminen vähentävät valon määrää vedessä, mikä voi vähentää vesikasvien määrää ja tuotannon tasoa (Wood & Armitage 1997; Jones ym. 2012a). Erityisen herkkiä valon määrälle ovat uposkasvit, joilla ei ole kelluvia tai pinnan yläpuolelle ulottuvia lehtiä (Parkhill & Gulliver 2002; Jones ym. 2012a). Vedessä kulkeutuva kiintoaine voi myös aiheuttaa fyysistä vahinkoa vesikasveille, sillä kasvien uposlehdistä puuttuu usein lehden pintaa suojaava kalvo (ns. kutikula) (Jones ym. 2012a).



Kuva 21. Runsas sammalkasvusto on tyypillistä monissa boreaalisen havumetsävyöhykkeen virtavesissä. Liiallinen hienon kiintoaineen sedimentaatio vähentää kivien sammalkasvustoja, millä on haitallisia vaikutuksia virtavesien eliöyhteisöille ja ekosysteemin toiminnalle. Kuva: Hannu Marttila.

Vesikasvit hidastavat virtausta ja näin ollen kasvustot usein pidättävät ja lisäävät luontaisesti hienon kiintoaineen, kuten hiekan, sedimentaatiota (Sand-Jensen 1998; Sand-Jensen & Pedersen 1999). Tämä on myös edellytys monien hienoa sedimenttiä suosivien vesikasvien juurtumiselle. Runsas hienon kiintoaineen sedimentaatio muuttaa kuitenkin merkittävästi virtavesien pohjan rakennetta. Hieno- ja tasaraeisella pohjalla kaikki kasvit eivät välttämättä juurru syväälle tiiviin sedimentin ja heikon happitilanteen vuoksi (Boeger 1992; Pretty ym. 2006). Heikosti juurtuneet kasvit ovat myös herkkiä irtoamaan sedimentistä esim. tulvatilanteissa (Jones ym. 2012a). Kiintoaineen sedimentaatio ja muutokset pohjan partikkelijakaumissa voivat heijastua kasviyhteisössä. Hienon orgaanisen tai epäorgaanisen kiintoaineen kertyminen suosii monia pehmeää ja ravinteikasta sedimenttiä tarvitsevia putkilokasveja, kun taas sammalet kärsivät näistä vaikutuksista (Jones ym. 2012a). Metsäojituksista aiheutuva purojen hiekottuminen vähentää sammalten määrää metsäpuroissa (Vuori & Joensuu 1996; Turunen ym. 2017), sillä sammalet joko hautautuvat hiekkaan tai hiekka aiheuttaa fyysistä kulutusta sammalkasvustoille, jolloin ne irtoavat pohjakivistä. Sammalet ovat monissa virtavesien ekosysteemeissä keskeisessä roolissa. Ne muun muassa pidättävät virrassa kulkevaa orgaanista ainesta eliöyhteisöiden käyttöön, jonka merkitys energialähteenä korostuu erityisesti latvapurojen ravin-

toverkoissa. Näin ollen, sammalten katoamisella voi olla merkittäviä seurauksia virtavesien ekosysteemin toimintaan (Muotka & Laasonen 2002; Turunen ym. 2018).

Hienojakoisen kiintoaineen runsas sedimentaatio vaikuttaa myös päällysluviin (Kuva 22). Se hautaa karkeammat kivipinnat ja muuttaa pohjan epävakaaksi monille leville. Lisäksi pohjalla kulkeva hiekka kuluttaa leväkasvustoja mekaanisesti (Biggs 1995). Kiintoaineen sedimentaatio vähentää usein päällysluviä biomassaa (Mustonen ym. 2016; Turunen ym. 2018) ja heikentää tuotantoa (Yamada & Nakamura 2002; Izagirre ym. 2009). Tosin joissakin tutkimuksissa leväbiomassa ja monien levälajien määrä on kasvanut kiintoaineen sedimentaation seurauksena (Piggott ym. 2015a). Eri-tyisen haitallista leväbiomassan vähentyminen on virtavesissä, joiden ekosysteemin toiminta riippuu voimakkaasti uoman sisäisestä perustuotannosta, eikä esimerkiksi valuma-alueelta huuhtoutuvasta kuolleesta orgaanisesta aineksesta (Ryan 1991). Sedimentaatio muuttaa päällysluviä yhteisökoostumusta. Esimerkiksi rihmamaiset viher- ja piilevät, sekä tiukasti pintoihin kiinnittyvät pienisoluiset levät usein vähentyvät, kun taas liikkumaan kykenevät ja pystyrakenteiset piilevät runsastuvat, koska ne voivat liikkumiskyvyllä tai kasvulla hakeutua sedimentin pinnalle parempiin kasvuolosuhteisiin (Wagenhoff ym. 2013; Piggott ym. 2015a).



Kuva 22. Piilevät ovat yksisoluisia piikuoren rakentavia leviä, jotka ovat runsaslukuisia ja -lajisia päällysluviä virtavesissämme. Piilevien yhteisökoostumus muuttuu ja reagoi herkästi veden happamuuteen tai ravinnekuormitukseen, minkä takia niitä hyödynnetään vesistöjen ekologisen tilan arvioinnissa. Osa piilevälajeista tai niiden kasvumuodoista on herkkiä myös kiintoainekuormitukselle ja sedimentaatiolle. Kuvassa *Nitzschia* -suvun piilevä. Kuva: Annika Vilmi.

3.4 Pohjaeläimiin kohdistuvat vaikutukset virtavesissä

Pohjaeläimet ovat vesistöjen pohjasedimentissä tai sen välittömässä läheisyydessä eläviä selkärangattomia eläimiä. Pohjaeläimiin kuuluu mm. vesihyönteisiä (esim. vesiperhoset, päivänkorennot, vesikovakuoriaiset, surviaissääsket), äyriäisiä (esim. katkat, ravut, siirat), nilviäisiä (esim. simpukat ja kotilot) ja matoja (moni- ja harvasukasmadot). Pohjaeläimiksi luokitellaan yleensä vain makroskooppiset selkärangattomat (pituus yli 0,5 mm), mutta ei sedimentissä tai sen pinnalla elävää ns. meiofaunaa (alkueläimet, raakkuäyriäiset, hankajalkaiset, vesikirput). Pohjaeläimet muuntavat merkittävän osan virtavesien perustuotannosta ja valuma-alueelta huuhtoutuvasta orgaanisesta aineksesta eläinbiomassaksi, mikä ruokkii ylempänä ravintoketjussa olevia kaloja ja rantavyöhykkeen eliöitä kuten lintuja, lepakoita ja muita rantavyöhykkeen nisäkkäitä.

Pohjasedimentin liettyminen ja iskostuminen hienolla kiintoaineksella on yksi keskeisimpiä ongelmia virtavesien pohjaeläimille. Lukuisten makeanveden suur-simpukoiden, muun muassa jokihelmisimpukan (*Margaritifera margaritifera*), tila on maailmanlaajuisesti hälyttävä (Kuva 23). Tähän yksi keskeinen syy on maankäytön muutokset ja siitä seuranneet elinympäristöjen kiintoaine- ja liettymisongelmat (Lopes-Lima ym. 2017). Erityisen herkkiä sedimentaatiolle ovat raakun poikaset, jotka elävät sorapohjien sisällä ja vaativat riittävää veden virtausta ja korkeaa happipitoisuutta soran sisällä (Geist & Auerswald 2007).

Useissa tutkimuksissa on havaittu, että pohjan liettyminen tai hiekoittuminen heikentää tai muuttaa pohjaeläinyhteisön tilaa enemmän kuin esimerkiksi veden ravinnepitoisuuden kasvu (Townsend ym. 2008, Piggot ym. 2015b). Pelkästään sedimentaation haittoja esiintyy virtavesissä vain harvoin. Virtavesiä kuormittaa usein samanaikaisesti maankäytöstä aiheutuvat muutokset virtaamissa, ravinne-, raskasmetalli- ja torjunta-ainepitoisuuksissa, sekä muutokset veden lämpötilassa (Buck ym. 2004). Näillä tekijöillä voi olla arvaamattomia yhdysvaikutuksia pohjaeläinyhteisiin. Esimerkiksi lisääntynyt kiintoaine- ja ravinnekuormitus, heikentynyt virtaama ja kohonnut lämpötila voivat yhdessä aiheuttaa suhteellisesti suuremman haitan pohjaeläimille kuin kukin tekijä aiheuttaisi yksistään (Matthaie ym. 2010; Piggot ym. 2012; Everall ym. 2018).



Kuva 23. Jokihelmisimpukka eli raakku (*Margaritifera margaritifera*) on yksi herkimpiä lajeja kiintoaineen liialliselle sedimentaatiolle. Erityisesti soran sisään kaivautuvat raakun poikaset ovat herkkiä sedimentaation aiheuttamille muutoksille virtavesissä. Kuva: Jarno Turunen.

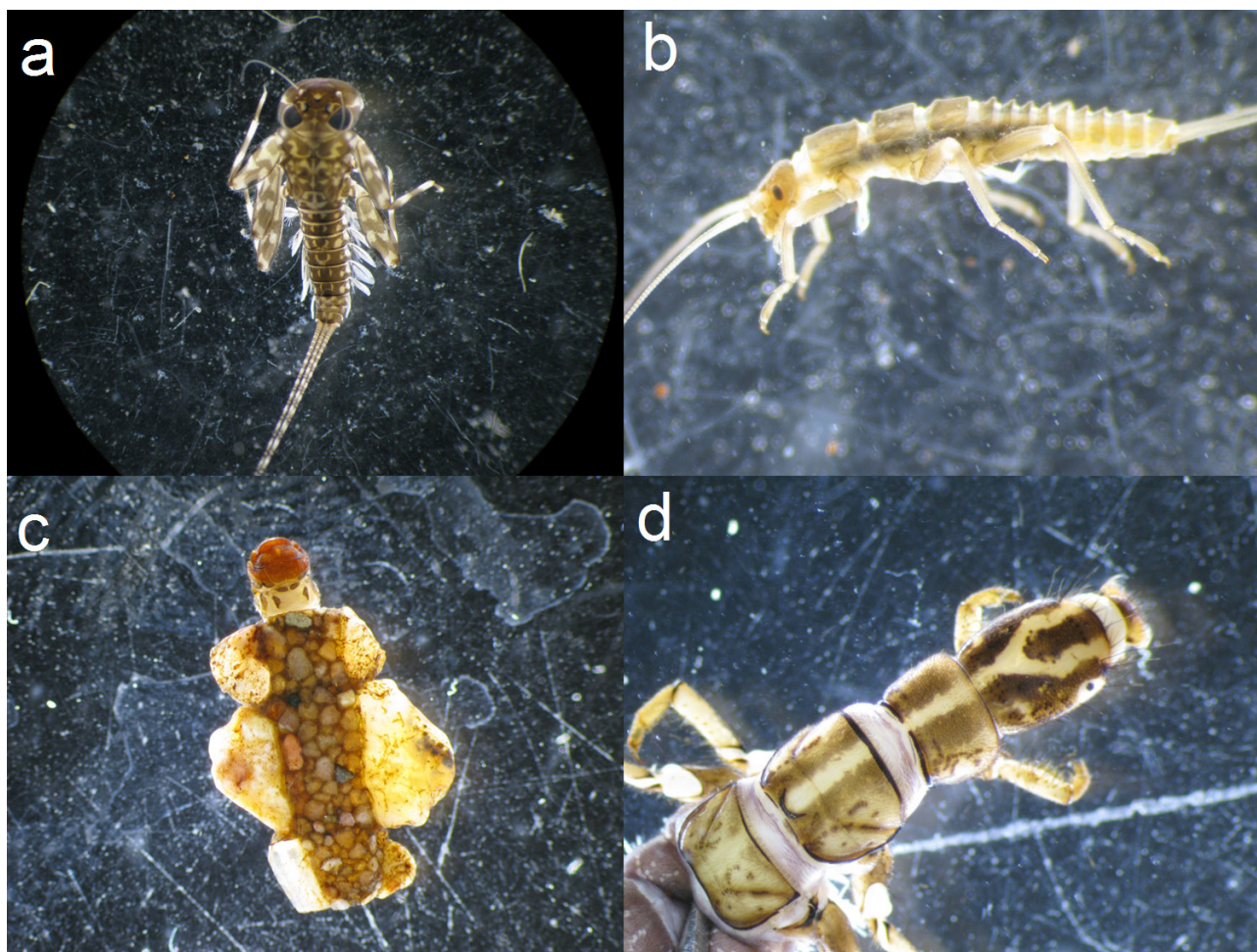
Suora hautautuminen hiekkaan voi olla ongelma äkillisissä kiintoainepulsseissa pohjaeläimille, jotka ovat pääsääntöisesti aloillaan pysyviä ja heikkoja kaivautumaan hiekasta (Wood ym. 2005). Hieno kiintoainekas lisää herkempien vesihyönteisten munien kuolleisuutta: se tukkii munien pintakalvon ja estää veden ja munan välisen kaasujen vaihdon (Everall ym. 2018). Virtavesien sammalkasvustot ovat tärkeitä elinympäristöjä virtavesien pohjaeläimille, sillä ne pidättävät virrasta orgaanista ainesta niiden ravinnoksi, sekä tarjoavat suojaa pedoilta ja ääriolosuhteilta, kuten tulvilta ja kuivumiselta (Huttunen ym. 2017; Turunen ym. 2018). Hiekottuminen aiheuttaa virtavesien sammalkasvustojen katoamista ja hautautumista sedimenttiin (Turunen ym. 2017), mikä voi olla jopa merkittävämpi ongelma pohjaeläinten elinympäristön heikkenemisen kannalta (Turunen ym. 2018).

Vedessä tai pohjalla kulkeutuva kiintoaine voi vahingoittaa pohjaeläinten hienoja ja herkkiä rakenteita, kuten ravinnonottoraajoja, fyysisesti hankaamalla tai tukkimalla kiduksia (Jones ym. 2012b). Rysä- (*Polycentropodidae*) ja siiviläsirvikäs (*Hydropsychidae*)-vesiperhosten toukat rakentavat ravinnon hankkimiseksi pyyntiverkkoja, jotka voivat hajota kiintoaineen kulutuksesta (Freeman & Schorr 2004; Buendia ym. 2013). Tämä vaikeuttaa näiden lajien esiintymistä ja ravinnon hankintaa kiintoaineen kuormittamissa virtavesissä. Orgaanisen aineen huuhtoutumisen kasvu voi toisaalta suosia suodattamalla ravintoa hankkivia pohjaeläimiä, kuten mäkärän (*Simuliidae*) toukkia (Ciborowski ym. 1997), tai sedimentoitunutta orgaanista ainesta käyttäviä ns. keräilijäpohjaeläimiä, esim. monia surviaissääsken toukkia.

Lisääntynyt kiintoaineen sedimentaatio heikentää kivien pinnoilta levää laiduntavien ns. kaapijapohjaeläinten ravinnon laatua. Levän pinnalla kertyvä epäorgaaninen aine aiheuttaa ravinnonkäyttöongelmia, varsinkin päivänkorennon toukille, kuten keltalaakasurviaiselle (*Heptagenia sulphurea*) (Broekhuizen ym. 2001; Peeters ym. 2006). Usein on raportoitu, että pohjaeläinten ajelehtiminen virrassa lisääntyy, jos kiintoaineen sedimentaatio kasvaa (Shaw & Richardson 2001; Piggot ym. 2015b). Tämän on arveltu olevan käyttäytymisreaktio heikentyneeseen elinympäristöön ja ravinnon laatuun sekä lajien väliseen lisääntyvään resurssikilpailuun ravinnosta ja reviereistä (Suren & Jowett 2001; Larsen & Ormerod 2010).

Tyypillinen pohjaeläinten yhteisötason vaste lisääntyneeseen sedimentaatioon on ympäristömuutoksille herkempien päivänkorento-, koskikorento- ja vesiperhoslajien (Kuva 24) yksilötiheyksien lasku ja lajimäärän köyhtyminen sekä kiintoaineen sedimentaatiota suosivien lajien kuten surviaissääsken ja harvasukasmatojen määrän kasvu (Zweig & Rabeni 2001; Turunen ym. 2017). Toisaalta eräissä tutkimuksissa on havaittu myös surviaissääsken tiheyden alenemista, kun hiekan sedimentaatio lisääntyy (Elbrecht ym. 2016; Turunen ym. 2018). Vaikka monia surviaissääskiä pidetään usein kuormitusta sietävinä tai jopa suosivina lajeina, on ryhmä kuitenkin erittäin monimuotoinen (yli 600 lajia Suomessa), ja lajit eroavat toisistaan elinympäristön vaatimusten osalta valtavasti. Niinpä osa lajeista ennemmin kärsii kuin hyöttyy kiintoainekuormituksesta. Koskielinympäristön pohjaeläimet ovat myös herkempiä kuin suvantojen ja muiden hitaasti virtaavien alueiden lajit, koska suvantojen lajit ovat sopeutuneet luonnostaan runsaaseen hienon sedimentin määrään (Roy ym. 2003b; Connolly & Pearson 2007).

Useissa tutkimuksissa on arvioitu, milloin kiintoaineen sedimentaatio ylittää tason, joka aiheuttaa selvän haitan ja muutoksen pohjaeläinyhteisöissä. Kynnystasoksi koskielinympäristön pohjalla on arvioitu 5 % (Wagenhoff ym. 2012), 3-10 % (Bryce ym. 2010), 20 % (Burdon ym. 2013) ja noin 30 % (Turunen ym., julkaisematon) hienon kiintoaineen peittävyttä. Kynnystaso todennäköisesti vaihtelee paikallisten ympäristöolosuhteiden ja paikan luontaisen pohjaeläinyhteisön herkkyyden mukaan. Koilismaan (Pudasjärvi, Taivalkoski) metsäpuroissa havaittua noin 30 % tasoa (Turunen ym., julkaisematon) voidaan kuitenkin pitää suunta-antavana arviona kynnystasosta Suomen olosuhteissa.



Kuva 24. Päivänkorennot (Ephemeroptera), koskikorennot (Plecoptera) ja vesiperhoset (Trichoptera) (ns. EPT-lajit) ovat tyypillisesti herkimpiä vesihyönteisryhmiä kiintoaineen liialliselle sedimentaatiolle. a) Päivänkorento, keltalaakasurviainen (*Heptagenia sulphurea*), b) Koskikorento, hankikorri (*Taeniopteryx nebulosa*), c) Vesiperhonen, puroriippasirvikäs (*Silo pallipes*), d) Vesiperhonen, pohjansirvikäs (*Arctopsyche ladogensis*). Kuvat: Janne Markkula.

Turvetuotannon vaikutusta koskipaikkojen pohjan laatuun ja pohjaeläimistöön on tutkittu jonkin verran (Heikkinen & Laine 1997; Laine 2001; Laine ym. 1996; Laine & Heikkinen 1991; Laine & Heikkinen 2000). Turvetuotanto lisää hiukkasmaisen orgaanisen aineen ja raudan määrää koskien pohjilla (Laine ja Heikkinen 2000). Pohjaeläinten kokonaistiheydet kasvoivat jonkin verran turvetuotannon alapuolisissa virtavesissä. Erityisesti lehtimateriaalia hajottavien pohjaeläinten (ns. pilkkajat) ja päällykslevää laiduntavien kovakuoriaisten ja Hydroptilidae-heimon vesiperhostoukkien tiheydet kasvoivat turvetuotantoalueiden alapuolisissa virtavesissä. Vedestä suodattamalla ravintonsa hankkivista pohjaeläimistä mäkärän toukat näyttivät lisääntyvän. Tutkimukset tehtiin lijoen suurimman sivujoen, Siuruanjoen, ja Kiiminkijoen valuma-alueilla, joilla oli turvetuotantoalueiden lisäksi myös metsäojitusalueita. Näin ollen turvetuotannon lisäksi myös metsäojituksilla on todennäköisesti ollut vaikutusta havaittuihin muutoksiin. Iso-Britanniassa tehdyissä tutkimuksissa on havaittu turvemaiden ojitusten lisäävän hienon orgaanisen lietteen määrää ojituksen vaikuttamissa puroissa, mikä on vähentänyt liettymiselle herkkien päivänkorento-, koskikorento- ja vesiperhoslajien määriä vesistöissä (Ramchunder ym. 2012; Brown ym. 2019). Soiden kunnostuksella ja ojitusten tukkimisella on kuitenkin onnistuttu vähentämään lietteen määrää puroissa ja parantamaan näiden purojen pohjaeläinyhteisöjen tilaa (Ramchunder ym. 2012).

3.5 Virtavesien kaloihin ja niiden lisääntymiseen liittyvät vaikutukset

Yleisellä tasolla kiintoainekuormituksella on laajat ja moninaiset vaikutukset virtavesikalaille, sillä se voi aiheuttaa suoraa kuolleisuutta, vähentää sopivien kutualueiden määrää, pienentää lajien lisääntymismenestystä, aiheuttaa kidusvaurioita ja muutoksia veren fysiologiaan, tai vaikuttaa liikkumiseen ja muuttaa käyttäytymistä. Virtavesien kiintoainekuormituksen ja sedimentaation kalastovaikutusten tutkimus on painottunut lohikaloihin ja niiden lisääntymiseen, sillä lohikaloilla on suuri merkitys kalataloudessa (Kemp ym. 2011; Kuva 25). Hienojakoisen kiintoaineen kuormitus lisää useiden pohjaan ja soran sisään kutevien kalalajien varhaisvaiheiden kuolleisuutta (Mol & Outbater 2004; Sutherland & Meyer 2007; Sear ym. 2008). Haitat kohdistuvat kaikkiin elämänvaiheisiin, mutta etenkin lohikaloilla merkittävimmin juuri lisääntymiseen. Vaikutusten laajuus ja merkitys vaihtelee sedimentin määrän, kuormituksen keston ja ajoittumisen, kemiallisen koostumuksen ja kokojakauman perusteella, joten yleistä ja yksiselitteistä merkitystä kiintoainekuormitukselle ja sedimentaatiolle on vaikea arvioida. Lisäksi vaikutukset eri vesistöissä ovat usein tapauskohtaisia. Kaloille aiheutuvat haitat riippuvat myös elinkierron vaiheesta, vuodenajasta, kalan koosta ja mahdollisista suojapaikoista esimerkiksi sivupuroissa.



Kuva 25. Kiintoaineen sedimentaatio vaikuttaa negatiivisesti erityisesti soran sisään kutevien kalojen, kuten taimenen, lisääntymiseen. Kuva: Jarno Turunen.

Lohikalat, kuten harjus, taimen ja lohi, lisääntyvät laskemalla mätimunat virtausolosuhteiltaan suotuisten sorapohjien sisälle. Taimenen ja lohien naaraat kaivavat soraikkoon kuopan johon ne laskevat mädin, minkä jälkeen koiras hedelmöittää sen. Lopuksi naaras kaivaa kuopan edestä soraa pyrstöllään ja löyhästi peittelee hedelmöityneet mätimunat kutupesään (Kuva 26). Sedimentaation haitat soran sisällä kehittyvälle mädille johtuvat heikentyneestä soraikon sisäisestä vedenvirtauksesta (Lisle 1992; Greig ym. 2005a), mikä vähentää soraikon sisäisen veden määrää ja happipitoisuutta (Greig ym. 2007). Lisäksi orgaaninen kiintoaine, ja sen hajoaminen kutusoraikossa, lisää hapen kulutusta kutupesissä (Rubin 1998; Soulsby ym. 2001).



Kuva 26. Taimenen kutupesä kuvan etualalla. Kutupesä erottuu kohoumana ja vaaleampana alueena ympäristön muusta soraikosta. Kutupesä on tyypillisesti kiihtyvän virtauksen alueella, jossa veden virtaus pitää soraikon puhtaana hienosta kiintoaineesta. Kuva: Jukka Syrjänen.

Tämä lisää mätimunien kuolleisuutta (Sear ym. 2016). Hyvin hieno kiintoaine (kokuokaltaan savea) muodostaa ohuen kalvon lohikalojen mätimunien ympärille, mikä heikentää mätimunien kaasujen vaihtoa, eli hapen saantia ja hiilidioksidin poistumista mätimunista (Greig ym. 2005b). Kutupesien hiekoittuminen lisää siltin ja saven haitallista vaikutusta mädin kehitykselle, sillä sen takia hyvin hieno kiintoaine ei enää huuhtoudu soraikon läpi, vaan alkaa kertyä hiekanjyvien väleihin tukkien kutupesät veden virtaukselta (Lapointe ym. 2005; Sear ym. 2016).

Koeolosuhteissa kiintoaineen on havaittu hidastavan taimenen poikasten kehitystä soraikossa. Runsaalle kiintoainekuormitukselle altistuneesta soraikosta nousseilla poikasilla oli jäljellä enemmän ruskuaispussia, jolloin ne ovat todennäköisesti heikompia uimareita kuin ilmapussa soraikossa kehittyneet poikaset. Siten niillä on suurempi riski joutua pedon saaliiksi tai huuhtoutua pois virran mukana (Louhi ym. 2011). Samankaltaista käyttäytymistä on todettu muissakin tutkimuksissa. Karkea kiintoaine ja hiekka saattavat iskostaa soraikon tiukaksi, jolloin poikaset eivät pääse nousemaan soraikosta tai ne nousevat liian aikaisin (Tappel & Bjorn 1983; Witzelin & MacCrimmon 1983; Avery 1996; Kondolf 2000). Liian aikaisen sorasta nousun on todettu myös aiheuttavan pitkälle aikuisikään näkyvää heikentynyttä kuntoa (Bowerman ym. 2014). Toisaalta korkean kiintoainekuorman on havaittu aiheuttavan kasvun hidastumista (lyhyempiä ja kevyempiä kuoriutuneita poikasia, joilla on pienempi ruskuaispussi), joka voi johtua poikasten aktiivisuuden lisääntymisestä niiden etsiessä happipitoisempaa ympäristöä (Sear ym. 2016).

Tutkimusten perusteella kutusoraikoissa haitallisen kiintoaineksen kokojakauma on 0,1 – 15 mm (Taulukko 1). Lohi (*Salmo salar*) valitsee soraikkoja, joissa alle 1 mm kokoista kiintoainetta on alle 5,4 % (Moir ym. 1998). Hienojakoisin (alle 0,063 mm) sedimentti on haitallista pienissäkin pitoisuuksissa (0,4 %) lohikalojen mädille (Julien & Bergeron 2006). Levasseur (2006) havaitsi, että lohien mätimunien kuolleisuus kutupesissä kasvoi jopa yli 50 %, kun kutupesän hienon siltin ja saven pitoisuus oli

noin 0,2 %. Taimenen mädinkehitys ja selviytyminen heikkenevät merkittävästi, kun soraikossa on 3,2 % hienoa sedimenttiä (halkaisija alle 0,074 mm; Louhi ym. 2011).

Taulukko 1. Kutasoraikon haitallisen kiintoaineen koko (mm) ja osuus (%) soraikon koostumuksesta. Taulukko Louhi ym. (2008) julkaisusta, josta löytyy mainitut lähdeviitteet.

Haitallinen kiintoaine (mm)	(%)	Laji	Lähde
<2,2		Lohi	Peterson (1978)
<2,0	>10	Taimen	Ottaway ym. (1981)
<9,2		Taimen	Witzel & MacCrimmon (1983)
<4,8		Taimen	Olsson ja Persson (1986)
<15,0		Taimen	Rubin ja Glimsäter (1996)
<1,0	>15	Lohikalat	Crisp (1996)
<15,0		Taimen	Rubin (1998)
<1,0	>10	Lohi	O'Connor & Andrew (1998)
<10,0		Lohikalat	Kondolf (2000)
<1,0	>14	Taimen	Milan ym. (2000)
<2,0	>23	Lohikalat	Soulsby ym. (2001)
<0,063	>1,5	Taimen	Lapointe ym. (2004)
<0,125	>0,2	Taimen	Levasseur ym. (2006)
<0,063	>0,4	Taimen	Julien & Bergeron (2006)

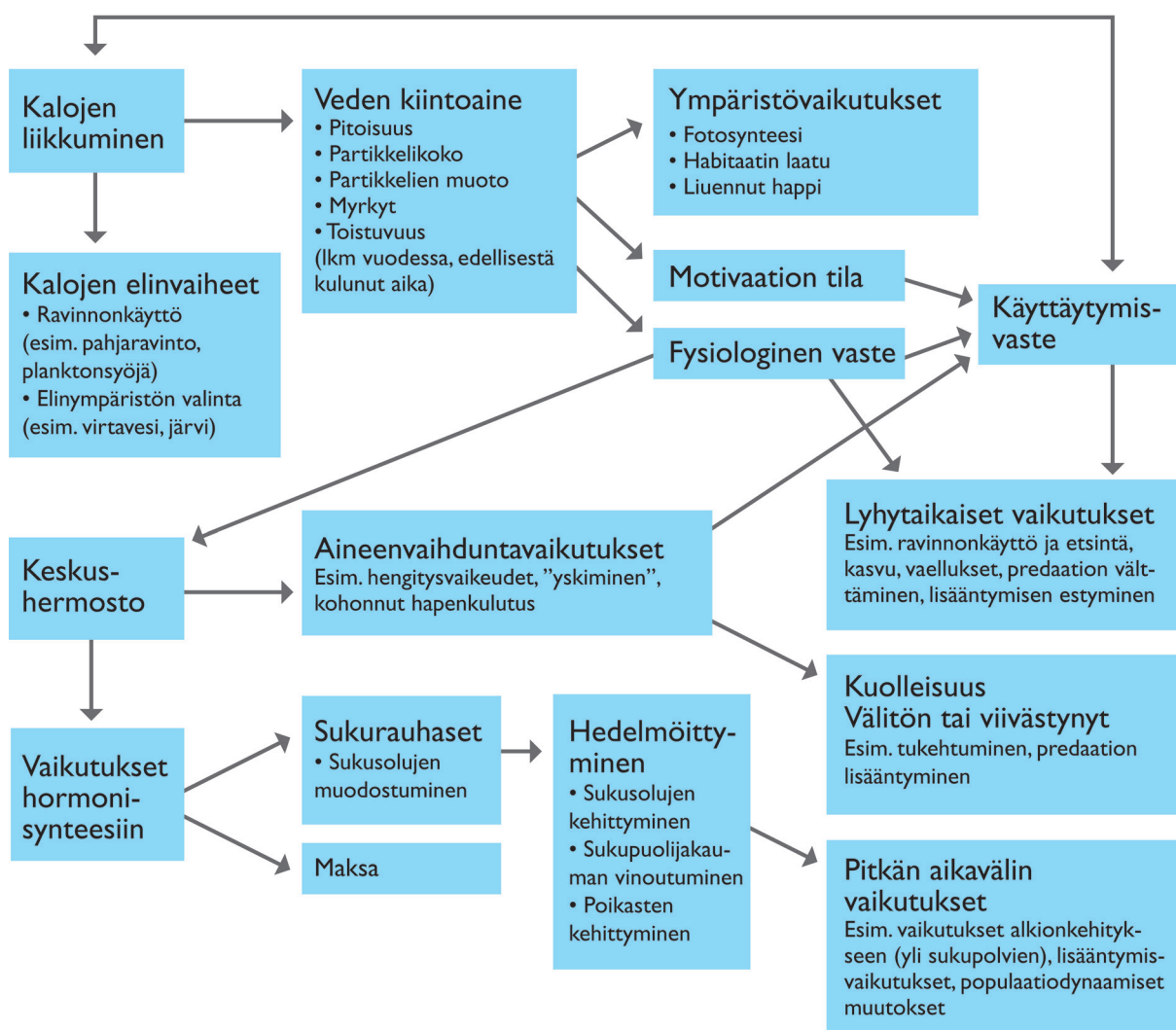
Kiintoainekuorman sietämisessä on lajikohtaisia eroja (Sear ym. 2015). Kokeellisen tutkimuksen perusteella lohi on taimenta herkempi valuma-alueelta tulevalle (orgaanisen aineksen) kuormitukselle, mikä saattaa johtua lohien mätimunien suuremmasta koosta ja siten korkeammasta haudonta-ajan happitarpeesta (Sear ym. 2015). Mätimunien hapen tarve ei kuitenkaan kasva suoraan suhteessa munien kokoon, sillä isojen mätimunien suurempi pinta-ala voi mahdollistaa suuremman hapen saannin suhteessa kulutuksen kasvuun (Einum ym. 2002). Näin ollen kalalajien välisten kuolleisuuserojen taustalla voi olla myös muita tekijöitä kuin ero mätimunien koossa.

Sedimentaatio muuttaa ja heikentää elinympäristön laatua erityisesti pohjan lähellä elävien kalojen ja pienpoikasten kannalta, tehden pohjasta yksitoikkoisemman (Diplas & Parker 1992). Tämä ei pelkästään vähennä elinympäristöjen monimuotoisuutta ja määrää, vaan samalla lisää virtausnopeutta ja tarvetta suojapaikoille (Richardson & Jowett 2002). Yksipuolistuva elinympäristö tarjoaa lohikalajien poikasille vähemmän reviiirejä, mikä lisää niiden kilpailua reviiireistä ja voi siten heikentää kalojen kasvua resurssien kuluessa enemmän reviiiriaggressioon (Suttle ym. 2004).

Fysiologisesti kalojen kidukset ovat herkäät. Kalat joutuvat ”yskimään”, jos kiintoainetta joutuu kiduksiin. Kiduksissa on todettu myös kiintoaineen aiheuttamia verenpurkaumia. Lisäksi on havaittu epämuodostumia, evien kulumia, ihovammoja ja kasvaimia (Berg 1982, Schleiger 2000, Sutherland & Meyer 2007). Kiintoainetäytöksessä kalojen veren glukoosi- ja kortisolipitoisuus nousee, mikä kertoo stressireaktiosta (Servizi & Martenz 1987, Servizi & Martenz 1992). Myös uintikyky heikkenee, jos vedessä on ylimääräistä kiintoainetta (Berli ym. 2014). Lisäksi veden sameus haittaa ravinnonkäyttöä etenkin lajeilla, jotka saalistavat näkönsä avulla, esimerkkinä lohikalat (Berg 1982). Kiintoaineen ja veden samentumisen aiheuttama fysiologinen stressi ja näkökyvyn heikkeneminen heikentävät esimerkiksi kirjolohen (*Oncorhynchus mykiss*) saalistusta ja kasvua virtavesissä (Shaw & Richardson 2001). Kiintoaineen sedimentaatio voi muuttaa virtavesien pohjaeläinyhteisöä niin, että pohjaeläinlajisto muuttuu lohikalajien kannalta vaikeammin saalistettavaksi, mikä heikentää kalojen kasvua (Suttle ym. 2004). Kiintoaineen määrän on tosin myös todettu aktivoivan kalojen ravinnonkäyttöä, koska se mahdollisesti tarjoaa samaan

aikaan suojaa saalistusta vastaan (Robertson ym. 2007). Kiintoainekuormituksen pitkän aikavälin vaikutuksista kaloihin on hyvin vähän raportoitua tietoa, mutta se todennäköisesti aiheuttaa muutoksia kalapopulaatiossa ja niiden geneettisessä rakenteessa (Kjelland ym. 2015, Kuva 27).

Turvetuotannon kiintoaine- ja humuskuormituksella on myös havaittu haitallisia vaikutuksia virtavesien lohikalojen lisääntymiseen ja kasvuun (Laine 2001; Laine ym. 1996; Laine ja Heikkinen 1991; Laine ja Heikkinen 2000). Kuormitus heikentää kesänvanhojen lohien poikasten kasvua ja niiden säilyvyyttä. Lisäksi turvetuotannon ja metsätalouden vaikutuksesta kasvavan orgaanisen aineksen ja raudan määrän on havaittu lisäävän taimenen mädin kuolleisuutta kutusoraikoissa (Laine ym. 2001), mitä voidaan ehkäistä tehokkailla vesiensuojelutoimenpiteillä (Louhi ym. 2010).



Kuva 27. Kiintoainekuormituksen vaikutusmekanismeja virtavesien kaloille lyhyellä ja pitkällä aikavälillä (Lähde: Kjelland ym. 2015).

3.6 Vaikutukset virtavesien hajotusprosesseihin ja hajottajamikrobeihin

Monien virtavesien ekosysteemien toiminta on keskeisesti riippuvainen valuma-alueelta huuhtoutuvasta kuolleesta orgaanisesta aineksesta ja rantavyöhykkeen metsistä omaan päätyvästä lehtikarikkeesta (Wallace ym. 2015, Kuva 28). Virtavesien mikrobit (hajottajasienet ja -bakteerit), suodattajapohjaeläimet ja lehtikariketta ravintonaan käyttävät ns pilkkojapohjaeläimet hajottavat tämän ravintoresurssin ja muuntavat sen eliöbiomassaksi, joka ruokkii näin myös ravintoketjun huipulla olevia eliöitä, kuten kaloja tai kalaa syöviä lintuja ja nisäkkäitä. Tämän ns. *alloktonisen* (systeemin ulkopuolinen) energian merkitys virtavesien ekosysteemeille korostuu erityisesti pienissä joissa ja puroissa, joiden rantametsä varjostaa uomaan voimakkaasti ja heikentää näin uoman sisäistä perustuotantoa (*autoktoninen* perustuotanto) ja sen merkitystä ravintoresurssina (Vannote ym. 1980). Valuma-alueelta huuhtoutuvan orgaanisen aineksen merkitys jokiekosysteemien energiavirroissa on siis usein suuri (Hynes 1963; Heikkinen 1986). Tästä yleisesti hyväksytyistä käsityksestä poiketen, viimeaikaisissa tutkimuksissa on saatu viitteitä, että valtaosa virtavesien ylemmän trofiatason eliöiden (esim. pohjaeläimet ja kalat) rasvahapoista ja energiasta voi olla peräisin uoman omasta perustuotannosta, erityisesti levistä (Brett ym. 2017). Merkittävä osa valuma-alueelta huuhtoutuvasta orgaanisesta aineksesta on leviin verrattuna ravintoarvoltaan hyvin heikkolaatuista ja hajottajien vaikeasti käytettävissä, eikä siten välttämättä ole merkittävin ravinnonlähde edes runsaasti orgaanista ainesta kuljettavissa joissa.



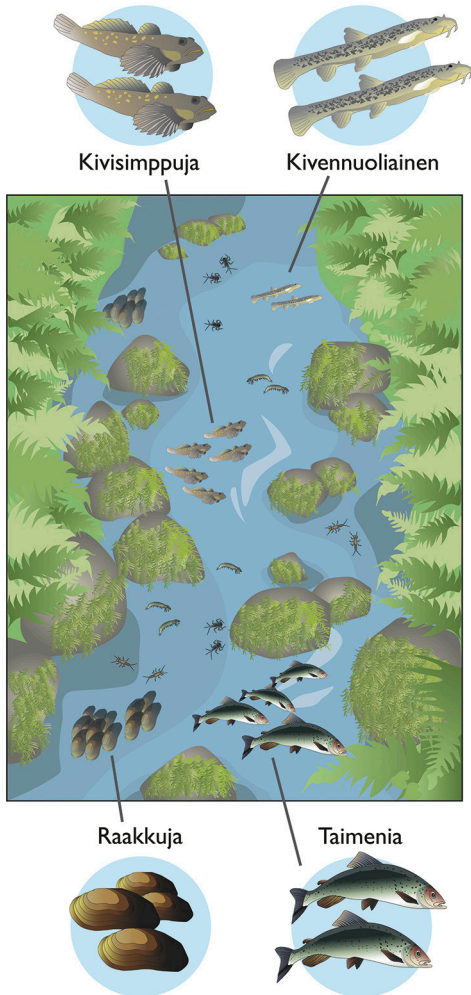
Kuva 28. Syksyisin puista varisevat lehdet ovat tärkeä energian lähde erityisesti purojen ekosysteemeille. Virtavesien sammalet pidättävät lehtikariketta tehokkaasti, jolloin osa lehtibiomassasta pidättyy virtaveden eliöyhteisöjen energialähteeksi eikä huuhtoudu virran mukana pois.
Kuva: Jukka Aroviita.

Sedimentaation ja varsinkin vedessä kulkevan kiintoaineksen vaikutusta virtavesissä tapahtuvaan orgaanisen aineksen hajotukseen ja hajottajamikrobeihin on suhteellisen vähän tutkittua tietoa. Joissakin tutkimuksissa on kuitenkin selvitetty epäorgaanisen kiintoaineen sedimentaation vaikutusta lehtikarikkeen hajotuksen määrään tai sen nopeuteen. Tulokset ovat olleet hyvin vaihtelevia. Uudessa-Seelannissa tehdyissä tutkimuksissa sedimentaatio on usein kasvattanut lehtikarikkeen hajotusta (Matthaei ym. 2010; Piggott ym. 2015c), kun taas Pohjois-Amerikassa tehdyissä tutkimuksissa hajotus on usein selvästi heikentynyt (Lecerf & Richardson 2010; Louhi ym. 2017). Suomessa hiekkasedimentaatiolla ei ole havaittu merkittävää vaikutusta hajotukseen tai vaikutukset ovat olleet lievästi negatiivisia (Mustonen ym. 2016; Turunen ym. 2017; Turunen ym. 2018). Tulokset osoittavat, että paikalliset ekologiset erot hajotusprosesseissa ja niiden herkkyys kiintoainekuormitukselle ovat keskeisiä tekijöitä sille, aiheuttaako kiintoainekuormitus muutoksia orgaanisen aineen hajotuksessa. Kiintoaineen sedimentaatio voi aiheuttaa lehtien hautautumisesta sedimenttiin sekä pilkkojapohjäläinten vähentymistä, mikä heikentää niiden pääsyä lehtiin ja vähentää sedimentin happipitoisuutta (Cornut ym. 2010; Danger ym. 2012; Louhi ym. 2017). Kiintoaineen hajotusta kiihdyttävä vaikutus lehtikarikkeen hajotukseen voi johtua kiintoaineen aiheuttamasta lehtien kulumisesta tai voimakkaasta anaerobisesta (hapettomasta) hajotuksesta sedimentin sisällä (Matthaei ym. 2010; Piggott ym. 2015c).

Lehtien hautautuminen sedimenttiin vaikuttaa myös lehtiä hajottavan mikrobilajiston koostumukseen ja toimintaan (Cornut ym. 2010; Danger ym. 2012) ja hajottajasienien monimuotoisuus pienenee (Sanpera-Calpet ym. 2012). Danger ym. (2012) havaitsivat, että lehtien sedimenttiin hautautuminen vähentää hajottajasienien biomassaa ja itiöiden tuotantoa sekä muuttaa hajottajasienien yhteisökoostumusta. Sedimenttiin hautautuneet lehdet olivat myös ravintoarvoltaan heikompia eivätkä ne samassa määrin kelvanneet pilkkojapohjäläinten ravinnoksi kuin sedimentin pinnalla olleet lehdet (Danger ym. 2012).

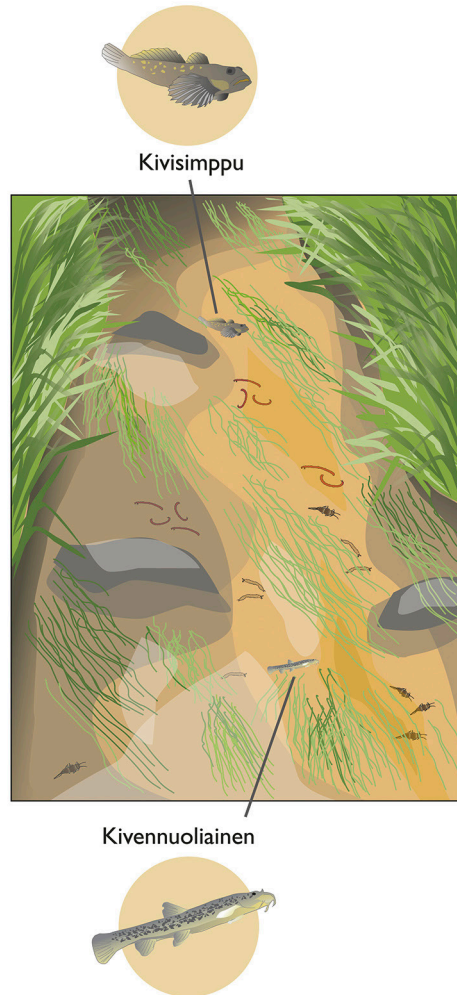
Luonnontilainen uoma

- Uomassa hieman hiekkaa, vaihtelevan kokoista karkeaa kiveä ja soraa
- Fontinalis-sammalta, joka kasvaa kivissä kiinni pitkinä mattoina
- Suuri syvyys- ja virtausvaihtelu
- Kalasto runsas
- Elinympäristön suhteen vaateliaita pohjaeläinlajeja runsaasti



Hiekoittunut uoma

- Suurempien lohkkareiden lisäksi uomassa valtaosin hiekkaa, vain paikoin hieman soraa
- Sammalten määrä vähentynyt ja putkilokasvien lisääntynyt
- Syvyys- ja virtausvaihtelu vähentynyt
- Kalasto köyhtynyt
- Pohjaeläinlajisto köyhtynyt ja lajikoostumus muuttunut hienoa sedimenttiä suosivaksi



Kuva 29. Liiallinen hiekan sedimentaatio aiheuttaa kokonaisvaltaisen muutoksen virtavesien elinympäristöissä ja eliöyhteisöjen rakenteessa.

4 Valuma-alueen vesiensuojelutoimenpiteet kiintoainekuormituksen hillitsemiseksi

Jarno Turunen, Maria Kämäri, Kaisa Heikkinen

Vesistön kiintoainekuormituksen estämisessä ja vähentämisessä valuma-alueella tehtävällä vesiensuojelun suunnittelulla on keskeinen asema. Tähän suunnitteluun sisältyy kokonaisvaltainen valuma-alueen kuormituksen ja sen vesistövaikutusten tarkastelu. Tavoitteena on tunnistaa riskikohteet ja suunnitella toimenpiteet, joilla valuma-alueelta huuhtoutuvan kuormituksen määrää voidaan rajoittaa. Suunnittelulla saadaan parhaat tulokset, kun siihen osallistuvat kaikki valuma-alueen toimijat ja suunnittelussa huomioidaan vesistön käyttäjien tarpeet. Vesienhoidon kansallinen toimeenpano EU:n vesipuitedirektiivin mukaisesti vaatii kokonaisvaltaisen valuma-alue-suunnittelun huomattavaa lisäämistä. TASO-hankkeessa on laadittu opas metsätalouden vesiensuojelun suunnitteluun valuma-alueella (Hiltunen ym. 2014).

Kokonaisvaltaisessa valuma-alue-suunnitelmassa arvioidaan valuma-alueen maankäytön aiheuttamaa kokonaiskuormitusta. Tämä tietopohja auttaa eri sektoreiden toimijoita sopeuttamaan toimintaa vesienhoidolle asetettujen vesistöaluekohtaisten tavoitteiden mukaiseksi. Yksittäisten hankkeiden vesiensuojelusuunnittelu ei myöskään aina mahdollista kaikkein kustannustehokkaimpien vesiensuojelukeinojen käyttöä. Yhteisvoimin se voi kuitenkin onnistua. Kokonaisvaltainen suunnittelu lisää esimerkiksi mahdollisuuksia vesiensuojelurakenteiden, kuten kosteikkojen ja pintavalutuskenttien, yhteistoteutukseen ja -ylläpitoon. Vesiensuojelun suunnittelussa tarvitaan uusia käytännön suunnittelutyökaluja. Luvussa 6 on lyhyesti esitelty käytettävissä olevia mallityökaluja ja niiden toimintaperiaatteita. Erityisesti tarpeen olisivat välineet, joilla voitaisiin huomioida eliöstön ja kalojen elinympäristövaatimukset aiempaa monipuolisemmin ja tehokkaammin.

Kiintoainekuormituksen ja erityisesti sedimentaation haitat korostuvat valuma-alueen latvavesissä, joissa on pieni vesimäärä ja heikko itsepuhdistuskyky. Vesiensuojelussa tulee kiinnittää erityistä huomiota myös latvavesiin. Purojen ja pienten sivujokien valuma-alueet muodostavat valtaosan jokisysteemin koko valuma-alueen pinta-alasta, joiden maankäytön tarkastelu ja vesiensuojelutoimenpiteet ovat ratkaisevia myös pääuomien kiintoainekuormituksen hillitsemisessä. Ensisijainen tavoite on suosia ja ottaa käyttöön toimintatapoja ja vesiensuojelua edesauttavia menetelmiä, joilla ehkäistään maan eroosiota valuma-alueella. Toissijaisesti tulee suunnitella vesiensuojelurakenteita, jotka pidättävät erodoitunutta kiintoainetta ennen sen päätymistä virtavesiin. Valuma-alueen vesiensuojelutoimenpiteet ovat siis keskeisessä roolissa kiintoainekuormituksen estämisessä ja vähentämisessä.

4.1 Eroosion hillintä maa- ja metsätaloudessa

Maanviljely

Eroosiota voidaan torjua ja vähentää maan muokkauskäytännöillä, peltojen talviaikaisella kasvipeitteellä sekä suojakaistoilla ja –vyöhykkeillä. Lisäksi nurmi- ja kerääjäkasvit lisäävät maan orgaanista ainesta sekä parantavat maarakennetta ja vähentävät maan eroosiota verrattuna viljan viljelyyn. Peltojen kipsikäsittely parantaa pellon mururakennetta, mikä on osoittautunut tehokkaaksi keinoksi vähentää viljelyalueilta huuhtoutuvaa kiintoaine- ja fosforikuormaa (Ekholm ym. 2011). Kipsi ei kuitenkaan sovellu kaikille maalajeille, eikä järviolta sisältäville vesistöalueille, missä kipsin levityksestä lisääntyvä sulfaatti voi rajoittaa raudan kykyä sitoa fosforia ja täten pahentaa järvien rehevöitymiskehitystä. Pientareet, suojakaistat ja -vyöhykkeet pidättävät kiintoainetta pelloilla, jotka rajoittuvat vesistöön tai valtaojiin.

Valtaosa peltoviljelyssä syntyvästä eroosiosta ja kiintoainehuuhtoumasta tapahtuu keväällä lumen sulamisen ja kevättulvien aikaan sekä sateisina loppusyksyn kuukausina ja leutoina talvina. Kasvukauden ulkopuolella kasvien ravinteiden otto pysähtyy, ja peltojen kasvipeitteisyys on pienimmillään. Pellon kyntäminen lisää eroosiota. Talviaikaisella peltojen kasvipeitteellä ja kynnön välttämällä tai suorakylvöllä (viljan kylväminen muokkaamattomaan maahan) voidaan tehokkaasti ehkäistä eroosion syntymistä pelloilta (Valkama 2018). Suorakylvö vähentää kiintoainehuuhtouman pienentyessä myös kokonaisfosforikuormitusta vesistöihin. Menetelmän haittapuolena on pidetty liukaisen, perustuottajille suoraan käyttökelpoisen, fosfaatin huuhtoutumisen lisääntymistä (Christianson ym. 2016), mutta on myös alueita, joissa talviaikainen kasvipeitteisyys ei ole lisännyt liukaisen fosforin huuhtoumaa (Valkama, 2018). Eroosion vähentämiseksi tarpeetonta ojitusta viljelyalueilla tulisi myös välttää. Valtaojien kunnostuksessa uomien luonnonmukaisuuden lisäämisellä, kosteikoilla, pohjapadoilla ja altailla voidaan pidättää ja vähentää valumavesien mukana kulkeutuvaa kiintoainetta. Luonnonmukaisessa peruskuivatuksessa ojiin voidaan rakentaa tulvatasanteita (ns. kaksitasouoma) ja meanderoivia alueita, joihin ylivirtaama-aikoina pidättyy ojassa kulkevaa kiintoainesta ja ravinteita. Tulvatasanne ja sen kasvillisuuden kehittyminen lisäävät myös maatalousympäristön monimuotoisuutta.

Metsätalous

Metsätaloudessa oikein mitoitettut suojavyöhykkeet ja pintavalutuskentät estävät tehokkaasti hakkuista ja maanmuokkauksesta lisääntyvän kiintoainehuuhtouman päätymistä vesistöihin. Jyrkillä hakkuualoilla, tavallista suuremmilla valunnoilla ja helposti erodoituvassa maaperässä suojavyöhykkeiden tulee olla suosittelua viiden metrin minimileveyttä leveämpiä. Kapeat suojavyöhykkeet voivat olla riittämättömiä suojaamaan puroa veden lämpenemiseltä, valon määrän kasvulta ja pienilmaston muutoksilta. Jokien ja varsinkin metsäpurojen rantavyöhykkeet ovat usein hyvin omaleimaisia ja lajirikkaita elinympäristöjä, joiden luontoarvojen kokonaisvaltaiseksi suojelemiseksi suojavyöhykkeiden tulisi olla noin 30 metriä leveitä (Oldén ym. 2019). Viimeisimmät tutkimukset painottavat maaston muotojen tai luonnon monimuotoisuuden kannalta tärkeiden kohteiden perusteella mukautuvia suojavyöhykkeitä, jolloin maanmuokkaukselle herkimmillä kohdilla tai luontoarvoiltaan merkittävillä alueilla voitaisiin käyttää leveämpää suojavyöhykettä (Kuglerová ym. 2014). Nykyisillä tarkoilla ja avoimilla paikkatietoaineistoilla näiden alueiden tunnistaminen onnistuu tehokkaasti.

Metsätyössä hakkuu- ja metsäkoneiden reittien suunnittelulla voi välttää liiallista maan eroosiota. Purojen ylitystä tulisi välttää, jotta niiden rantatörmät eivät rikkoonnu. Työkoneen rikkoma rantatörmä ja metsäkoneen luomat urat varsinkin viettävässä maastossa ovat väyliä, joista kiintoainetta huuhtoutuu herkästi puroihin. Metsäkoneen kuljettajan ammattitaidolla ja tietämyksellä on tärkeä rooli, jotta metsämaan vauriot jäävät pieniksi. Muun muassa havuja käytetään työkoneiden ajoalustana. Vaihtoehtoiset reitit, joilla vältetään purojen yliajo ja niiden rantatörmien rikkoutuminen, tai väliaikaisten siltojen rakentaminen purojen ylityksiin ovat nekin hyviä vesiensuojelukeinoja.

Jo kaivettujen, mutta tarpeettomaksi jääneiden ojien täyttö ja soiden kunnostus voi vähentää valuma-alueelta tulevaa kiintoainekuormitusta ja parantaa valuma-alueen vesitaloutta (Kuva 30). Monet metsäojat ovat ajan myötä täyttyneet sedimentillä ja sammaloituneet, mikäli niitä ei ole aktiivisesti kunnostettu kuivatustarpeisiin. Tällöin niistä ei myöskään enää synny merkittävää kiintoainekuormitusta. Tällaisten ojien muokkausta vesiensuojelutarkoituksessa on syytä harkita tarkkaan tai jättää kokonaan tekemättä, sillä ojan maanmuokkaus voi lisätä eroosiota ja kiintoainehuuhtoumaa.

Metsänkasvatusalueen kunnostusojitustarpeen arvioinnissa tulisi ottaa huomioon myös puuston vettä haihduttava vaikutus. Suomen oloissa 100–150 m³/ha puusto riittää ylläpitämään metsän kasvun kannalta hyvää vesitaloutta alueella, vaikka ojat olisivatkin osin kasvaneet umpeen (Vanhatalo ym. 2015). Erityisesti lehtipuut haihduttavat vettä tehokkaasti kasvukaudella ja niitä on suositeltavaa jättää metsään harvennuksissa ja ylläpitohakkuissa. Jatkuvapeitteisessä metsän kasvatuksessa hyväkuntoinen puusto ylläpitää kuivatusta niin, että vedenpinnan syvyys metsämaassa on yli 30 cm loppukesällä, jolloin juuriston kasvu on parhaimmillaan (Laiho 2019).



Kuva 30. Metsäojien tukkimisella voidaan vähentää virtavesiin päätyvän orgaanisen ja epäorgaanisen kiintoaineen määrää.
Kuva: Jukka Aroviita.

Tällöin on mahdollista vähentää vanhojen ojien perkausta sekä täydennysojien tekemistä ja syntyvää kiintoainekuormitusta. Toteutettavissa kunnostusojituksissa taas työsuunnitelmaan sisällytetään kaivuukatkoja, saostusaltaita ja lietekuoppia vähentämään kiintoaineen kulkeutumista. Laskeutusaltaat ja lietekuopat ovat osoittautuneet tehottomiksi pidättämään hienojakoista maa-ainesta (Nieminen ym. 2018), mutta ne pidättävät kaivuun aikaista pohjalla kulkevaa karkeaa hiekkaa (Vanhatalo ym. 2015). Metsänhoidon suositusten mukaan kunnostusojituksen ulkopuolelle tulee jättää monia alueita kuten eroosioherkät alueet, jäkäläturvekankaat, kitumaaksi luokitellut suot ja arvokkaat luontokohteet. Lisäksi happamilla sulfaattimaillo ojituksissa ja maan kaivuissa tulee olla erittäin huolellinen, jotta pohjavedenpinnan taso ei laske liian alas eikä sulfaattimaa pääse hapettumaan (Vanhatalo ym. 2015).

4.2 Vesiensuojelurakenteita eroosion ja sen vaikutusten ehkäisemiseksi

Haitalliselle eroosiolle alttiita rantatörmä voi suojata kiveämisellä (Kuva 31), kasvillisuuden pistokasistutuksilla tai pajuista tehdyllä risunkisuojuuksella. Uomaeroosion torjunnassa on kuitenkin hyvä pyrkiä tunnistamaan, milloin eroosio aiheutuu ihmistoiminnasta (esim. muutokset rannan kasvillisuudessa tai virtaaman äärevöitymisessä) ja välttää torjumasta eroosiota, joka on osa virtaveden luontaista uomadynamiikkaa (Kappale 1).

Laskeutusaltaat, ojakatkot, pintavalutuskentät ja muut kosteikot ovat erodoituneen kiintoaineen pidättämiseen tähtäviä vesiensuojelumenetelmiä. Erityisesti laskeutusaltaat ja kosteikot, toimivat kuitenkin heikommin suurilla virtaamilla ja voivat ajoittain jopa lisätä kiintoainehuuhtoumaa, mikäli sedimentoitunutta kiintoainetta lähtee niistä liikkeelle (Koskiaho ym. 2003). Menetelmien toimivuus vaatii säännöllistä altaiden tyhjentämistä kiintoaineesta ja kertyneen aineen asianmukaista käsittelyä.



Kuva 31. Uomaeroosion hillitsemiseksi kivettyä puron rantatörmää. Kuva: Milla Popova/YHA kuvapankki.

4.3 Sedimentaatiosta kärsivien virtavesien uomakunnostukset

Virtavesikunnostuksissa valuma-alueen mahdolliset eroosio-ongelmat pitäisi saada ensisijaisesti hallintaan ennen uoman rakenteen ennallistamista. Uoman rakenteellisen kunnostuksen tai ennallistamisen positiiviset vaikutukset voivat jäädä lyhytkestoiseksi tai vaativat jatkuvaa ylläpitotyötä, jos kiintoainekuormitus valuma-alueelta jatkuu ja on voimakasta. Käytännössä monissa kunnostusprojekteissa, joihin liittyy sedimentaatio-ongelmia, ei aina ole mahdollista tehdä kaikenkattavaa valuma-alueen kunnostusta kiintoainekuormituksen hillitsemiseksi.

Uomaan kertynyttä hienoa sedimenttiä voidaan poistaa imuruoppauksella, mutta menetelmä on kustannuksiltaan varsin kallista ja hidasta (Hartikainen ym. 2008). Menetelmä soveltuukin lähinnä pienimuotoisten alueiden täsmäpuhdistukseen lietteestä ja hiekasta, tai vesiensuojelurakenteiden kuten laskeutusaltaiden ja pienien kosteikoiden, tyhjentämiseen. Ongelmaksi voi muodostua pumpatun sedimentin jatkokäsittely ja läjittäminen.

Sedimentoituneen tai peratun uoman kiveäminen ja sorastaminen ovat keinoja palauttaa pohjan luontainen karkeampi rakenne (Kuva 32). Riskinä on pohjan ja soraikoiden uudelleen hautautuminen sedimenttiin, mikäli uomassa liikkuu edelleen paljon kiintoainetta. Monissa kunnostuskohteissa lohikalojen kutusoraikoita hoidetaan ja ylläpidetään talkoovoimin kuohkeuttamalla niitä lapiolla tai haravomalla. Tällöin soraan kertynyt hienempi kiintoaine, kuten hiekka, lähtee soraikosta liikkeelle ja sora puhdistuu hienosta kiintoaineesta. Karkeamman kivimateriaalin lisääminen edesauttaa myös sammalkasvustojen palautumista, mikä parantaa virtavesien kalojen ja pohjaeläinten elinympäristöä (Turunen ym. 2017, Turunen ym. 2018, Kuva 33). Soraikoiden puhdistus ajoitetaan alkusyksyyn ennen syyskutuisten lohikalojen lisääntymistä, jotta soraikot ovat puhtaita ennen kutua, mutta toisaalta mätti ei ole vielä kehitymässä.



Kuva 32. Kutusoraikoiden luominen kunnostuksissa voi parantaa lohikalojen lisääntymistä, mikäli niiden puute on merkittävä pullonkaula vesistön lohikalojen elinkierrossa. Soraikot ovat hyvä elinympäristö myös monille virtavesien pohjaeläimille. Kuva: Jukka Syrjänen.



Kuva 33. Kunnostuksissa uomaan lisätyt kivet ja oksaiset puurungot tarjoavat alustan sammalien kasvulle ja kehitykselle, mikä parantaa virtavesien pohjaeläinten ja kalojen elinympäristön laatua. Kuva: Jukka Aroviita.

Puun lisäyksellä uomaan on mahdollista ohjata kiintoaineen liikkumista ja kertymistä uomassa (Tammela ym. 2010). Sopivasti uomaan asetetut rungot pienentävät uoman poikkileikkauksen pinta-alaa ja ohjaavat veden kulkemaan rungon sivuitse tai alitse suuremmalla virtausnopeudella. Virtausnopeuden kasvu ohjaa virtausta pohjasedimenttiin ja estää kiintoaineen laskeutumista pohjalle. Näin virtausnopeuden muutokset puhdistavat paikallisesti pohjaa hienostaa kiintoaineesta ja saavat aikaan pohjasedimentin luontaisen lajittumisen (Kuva 34). Puuta voidaan siis käyttää virtausta ohjaavana rakenteena, joka edesauttaa kutusoraikoiden puhtaana pysymistä. Puulla voidaan myös lisätä uoman padotusta, mikä edesauttaa veden tulvimista ja kiintoaineen sedimentoitumista rantavyöhykkeelle.



Kuva 34. Puurakenteilla voi vaikuttaa virran ohjautumiseen, soraikoiden puhtaana pysymiseen ja hienon sedimentin kertymiseen ja lajittumiseen uomassa. Kuva: Jukka Aroviita.

5 Kiintoainekuormituksen ja sedimentaation mittaus

Hannu Marttila, Maria Kämäri, Markus Saari, Jarno Turunen

Kiintoainekuormituksen ja paikallisen sedimentaation mittaaminen ja seuranta ovat haasteellisia, koska kiintoaineen kulkeutuminen suspensiossa ja pohjakulkeumana vaihtelee paikallisesti ja ajallisesti. Virtavesissä sedimentin kokonaiskulkeuman määrittämiseksi tulisi mitata sekä suspendoitunutta kiintoainetta että pohjakulkeumaa. Kulkeutuvan kiintoaineen laatu ja määrä vaikuttavat mittaussuunnitelmien valintaan ja toimivuuteen. Etenkin orgaanisen partikkelimaisen aineksen mittaaminen on haasteellista, koska käytettävissä olevat menetelmät soveltuvat huonosti kevyen orgaanisen aineksen kulkeutumisen seurantaan.

Kiintoaineen ja sedimentaation mittaamiseen ja seurantaan on kehitetty lukuisia menetelmiä (Taulukko 2). Yleisesti nämä voidaan jaotella i) kertonäytteenottomenetelmiin suspendoituneesta kiintoaineesta ja pohjasedimentistä, ii) keräimiin, joilla kerätään kulkeutuvaa kiintoainetta tai pohjakulkeumasedimenttiä, iii) silmämääräisiin tarkasteluihin ja iv) jatkuvatoimisiin antureihin. Luotettavien tulosten saamiseen vaikuttavat muun muassa virtaaman, ainepitoisuuksien ja kulkeutuvan aineksen ajalliset vaihtelut, sekä mittaussuunnitelman soveltuvuus (Taulukko 2). Lisäksi laserkeilauksella on saatu hyviä tuloksia joen rantatörmien eroosion sekä särkkien eroosiota ja sedimentaation tutkimuksissa (Vaaja ym. 2011).

5.1 Suspendoituneen kiintoaineen pitoisuuden mittaus ja kulkeuman määrittäminen

Suspendoitunut kiintoaine on veteen sekoittunutta hienoa ainesta, joka kulkeutuu virrassa veden mukana, kun taas pohjakulkeuma kulkee pohjaa pitkin vierimällä, liukumalla ja pomppimalla. Virtavesien suspendoituneen kiintoaineen kulkeuma määritetään veden kiintoainepitoisuuden ja virtaaman tulona. Kiintoaineen pitoisuus, virtaama ja virtausnopeus vaihtelevat ajallisesti ja paikallisesti, mikä tulee ottaa huomioon kiintoaineen kulkeuman määrittämisessä. Kohteesta ja maaperän laadusta riippuen pitoisuudet voivat vaihdella uoman varrella eri kohdissa tai jopa yhdessä uoman poikkileikkauksessa. Tästä saa käsityksen ottamalla vesinäytteitä useammasta kuin yhdestä poikkileikkauksesta eri syvyyksiltä. Käytännössä kiintoainepitoisuus mitataan useimmiten kuitenkin vain yhdestä paikasta otetusta vesinäytteestä, ja siksi paikan edustavuuteen kannattaa kiinnittää huomiota. Pistekuormittajien läheisyydestä näytteenotto ei ole suositeltavaa, jos tavoitteena on saada käsitys keskimääräisestä pitoisuudesta. Näyte otetaan uoman päävirran alueelta ja syvyydestä, jolloin se edustaa hetkellistä keskimääräistä suspendoituneen kiintoaineen pitoisuutta. Näytettä ei tulisi ottaa rantavyöhykkeeltä eikä aivan läheltä pintaa, ellei päävirtaus kulje juuri sen kautta (Kettunen ym. 2008). Näytteenotossa apuna voidaan käyttää myös vertikaalimittauslaitetta, jolla saadaan jokaisesta kerroksesta virtausnopeuden suhteen painotettu vesinäyte. Savisameat jokivedet ovat usein hyvin sekoittuneita, ja edustavasta mittaussuunnitelmasta otettu vesinäyte kuvastaa riittävän hyvin näytteenotto-

Taulukko 2. Yleisimpien virtavesiin soveltuvien kiintoaine ja sedimentti mittausten hyödyt ja haasteet

Menetelmä	Sopivuus eri olosuhteisiin	
	Hyödyt	Haasteet
Kertanäytteenotto: laboratoriossa analysoidaan vesinäytteestä esim. kiintoainepitoisuus tai orgaanisen aineksen määrä, sedimenttinäytteestä määritetään partikkelien koko	Saadaan tarkka hetkellinen pitoisuus ja kiintoaineen ominaisuudet. Standardoidut menetelmät.	Näytteenoton ajankohta ja sijainti uomassa, laboratoriossa käytettävä menetelmä esim. suodattimen koko vaikuttavat merkittävästi pitoisuuteen. Yksittäisten tulosten yleistäminen hankalaa ja vaatii tiivistä näytteenottoa kokonaiskuormituksen määrittämiseksi. Kallis ja aikaavievä. Ei kerro pohjakulkeuman määrästä.
Kiintoaine- ja sedimenttikeräimet	Laadullinen näyte suspensiossa tai pohjakulkeumana kulkeutuvalla kiintoaineelle. Ajansuhteen mitattuna voidaan käyttää arvioimaan kokonaiskuormitusta.	Paikalliset virtaamaolosuhteet vaikuttavat kertyvän kiintoaineen kokonaismäärään. Yksittäisten tulosten yleistäminen hankalaa, ja siksi vaatii tiivistä näytteenottoa. Eri näytteenottomenetelmät soveltuvat vain joko suspensiossa tai pohjassa kulkeutuvalla kiintoaineelle.
Sedimenttinäytteenotto pohjasta	Helppoja ja nopeita menetelmiä. Eri menetelmät hienojakoisten ja karkeiden sedimenttien näytteenottoon.	Näyte usein häiriintynyt. Vaatii jatkokäsittelyä laboratorio-olosuhteissa. Eri menetelmät eri tyyppisille virtavesipohjille esim. pehmeälle ja karkealle sedimentille ja toisaalta kiviselle pohjalle.
Silmämääräinen tarkastelu	Nopeasti tehty määrittäminen perustuen luokittelujärjestelmiin. Voidaan tehdä laajoille alueille kerralla.	Tulosten tulkinnessa voi olla arvioijasta riippuvia eroja, mikä aiheuttaa virhettä tuloksiin. Eri luokittelujärjestelmät voivat antaa eri tuloksia.
Jatkuvatoimiset anturit	Saadaan tiheiden sameusmittausten (esim. 30 min) perusteella arvio suspensiossa kulkeutuvasta kiintoainepitoisuudesta. Saadaan mittauksia myös epäsäännöllisten ylivirtaamatilanteiden sameuden ja kiintoainepitoisuuden vaihtelusta.	Vaatii rinnalle vesinäytteenoton, jotta sameuslukema saadaan kalibroitua paikallisesti. Jokainen mittauspiste vaatii oman kalibrointikäyrän. Turvevaltaisilla alueilla runsas rauta- ja humuspitoisuus vaikuttavat värin kautta sameusanturin kalibrointiin. Laitteisto vaatii säännöllistä ylläpitoa ja huoltoa.

ajankohdan keskimääräistä kiintoainepitoisuutta. Hyvän kiintoainemittauspaikan ominaisuudet (Sovellettu hydrologia 1986):

- virtaveden uoma on säännöllinen ja mieluiten jyrkkärantainen
- mittauspaikalla tai sen yläpuolella ei esiinny uomaeroosiota tai uomaan yhdy sivu-uomaa
- veden virtausnopeuden ja kiintoainepitoisuuden vaihtelu virtaveden poikku-suunnassa on mahdollisimman pieni
- mittauspaikan lähellä on virtaaman mittauspaikka, jotta tuloksista voidaan laskea kiintoaineen kokonaiskulkeuma

Vesinäytteenotto eri virtaamatilanteissa takaa kattavan kuvan virtaamavaihtelun vaikutuksesta kiintoainepitoisuuksiin. Talvella ja kesällä näytteenottoja voi olla harvemmin, koska suspendoituneen kiintoaineen pitoisuudet ovat pieniä ja alivirtaaman aikana kuormitus on vähäistä. Vastaavasti ylivirtaamien aikaan näytteenottoa tulisi olla useammin. Tällöin näytteenottoa tulisi olla sekä virtaaman noustessa että laskiessa. Tyypillisesti suurimmat kiintoainepitoisuudet esiintyvät nousevan ylivirtaaman aikaan, eli ennen suurinta virtaamahuippua. Suomen oloissa ylivirtaamien mukana keväällä ja syksyllä kulkeutuu huomattavan suuri osa kiintoaineesta (Kämäri ym. 2015). Esimerkiksi Kokemäenjoella kevättulvat ovat ajoittuneet huhtikuuhun, jolloin mereen valuu keskimäärin yli 20 % vuotuisesta kiintoainekuormasta (Kämäri ym. 2015).

Laskettu kiintoainekuormitus on aina kuormitusarvio. Kuormitusarvioihin sisältyy virhelähteitä ja epävarmuutta, jotka aiheutuvat näytteenotosta sekä virtaaman määrittämiseen että pitoisuuden mittaamiseen liittyvistä mittausepävarmuuksista.

Myös valittu ainevirtaaman laskentamenetelmä aiheuttaa epävarmuutta laskettuun kuormitukseen. Yleisesti käytettyjä ainevirtaamien laskentamenetelmiä ovat mm. periodi-, kuukausikeskiarvo- ja interpolaatio -menetelmät (Tattari ym. 2014). Vesinäytteiden otossa, kuljetuksessa, säilytyksessä ja analysoinnissa standardien ja suositusten mukainen toiminta mahdollistaa laadukkaat kiintoainepitoisuuden analyysitulokset. Suositus laboratoriossa analysoidun kiintoainepitoisuuden hyväksyttäväksi mittausepävarmuudeksi on $\pm 20\%$ (Näykki ym. 2013).

Erilaisia keräimiä voidaan käyttää suspendoituneen kiintoaineen laadun ja ajallisen vaihtelun seuraamiseen. Tyypillisesti niiden toiminta perustuu kiintoaineen laskeutukseen keräimen sisälle. Keräimien etu on, että ne keräävät kulkeutuvaa kiintoainetta myös lyhytkestoisten ylivirtaamahuippujen aikana. Tämä mahdollistaa edustavan laadullisen näytteen kulkeutuvasta aineksestä.



Kuva 35. Joen vedenpinta on jo laskussa keväisen tulvahuipun jälkeen. Erodoituvassa rantatörmässä erottuu taso, johon kevättulva nousi ja vei mennessään maa-ainesta. Kuva: Maria Kämäri.

5.2 Pohjakulkeuman mittaus

Pohjan tuntumassa kulkeutuvan kiintoaineen mittaus on hankalampaa kuin suspendoituneen kiintoaineen mittaus. Mittausta vaikeuttaa pohjakulkeuman voimakas ajallinen vaihtelu ja mittausmenetelmät. Pohjakulkeuman mittauksen pitäisi olla lähes jatkuvaa luotettavien tulosten saamiseksi. Suurimmat pohjakulkeumat esiintyvät ylivirtaamisen aikaan, jolloin mittauksista voi kuitenkin olla hankala toteuttaa, koska kovassa virtaamassa mittalaitteiden käyttö voi olla mahdotonta.

Tyypillisimmät pohjakulkeuman mittauslaitteet ovat keräimiä, jotka lasketaan uoman pohjalle keräämään pohjan läheisyydessä kulkeutuvaa kiintoainetta verkkoon tai erilliseen sulkijalaitteeseen. Näiden keräimien keräystehokkuudet ovat kuitenkin huonoja ja niillä saadaan kiinni alle 50 % todellisesta kokonaiskulkeumasta. Käytännössä pohjakulkeuman mittaus jää usein vähäiseksi ja joudutaan turvautumaan

tilastollisiin tai sedimentin partikkelikokoon perustuviin laskukaavoihin. Näitä varten tarvitaan kuitenkin uoman pohjalta sedimenttinäyte, jotta voidaan arvioida sen kulkeuman herkkyyttä.



Kuva 36. Talvista jäänalaisen pohjakulkeuman ja virtausnopeuden mittausta hiekkapohjaisessa uomassa. Käytössä on Helley-Smith -tyyppinen pohjakulkeuman mittalaite. Kuva: Eliisa Lotsari. Historian ja Maantieteiden laitos, Itä-Suomen yliopisto.

5.3 Sedimenttinäytteenotto pohjasta

Pohjasedimentin näytteenotto mahdollistaa arviot pohjasedimentin ominaisuuksista ja paikallisista kiintoaineen kertymistä. Näytteenottomenetelmiä on useita ja niitä voidaan soveltaa eri tilanteisiin, paikalliset olosuhteet huomioon ottaen. Menetelmän valintaan vaikuttaa myös se, tuleeko näytteen olla häiriintymätön vai saako se olla häiriintynyt. Häiriintymättömässä näytteessä sedimenttiä ei päädy näytteeseen muualta kuin halutusta kohdasta tai syvyydestä. Karkea hiekka- tai sorasedimenttinäyte voidaan ottaa tavallisella lapiolla tai vastaavalla. Jos halutaan häiriintymätön näyte sedimenttikerroksista, niin voidaan käyttää kairaa tai kerroksien jäädyttämistä. Hienojakoisille ja pehmeille pohjille soveltuvat erilaiset kairat, imupumppaus tai noutimet.

5.4 Silmämääräinen tarkastelu

Silmämääräinen arvio sedimentin koostumuksesta ja hienon sedimentin määrästä tehdään kartoittamalla eri kiviokoluokkien peittävyys uoman pohjalla. Menetelmässä voidaan käyttää apuna ruutukehikkoa (esim. 50*50 cm), jonka rajaaman alueen sisällä eri partikkelikokoluokkien prosenttiosuus arvioidaan. Kivipartikkelien luokittelussa käytetään usein Wentworthin –asteikkoa (Wentworth 1922). Edustavan arvion saamiseksi ruutuja joudutaan tekemään useita (vähintään 10, mutta mieluummin 15-20) arvioitavalta alueelta. Menetelmä on tehokas vain kahlattavissa uomissa, joissa näkösyvyys yltää pohjaan asti tai pohjan rakenteen tunnustelu on mahdollista käsin.

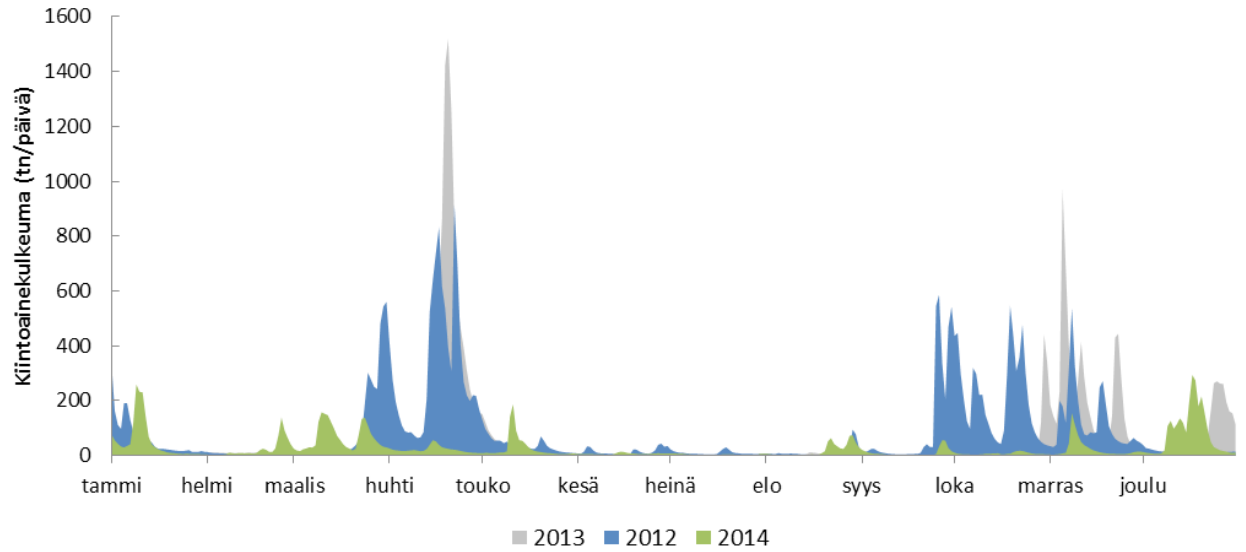
Vesikiikareiden avulla pohjan näkyvyys paranee oleellisesti, erityisesti syvemmissä uomissa. Silmämääräinen sedimenttikoostumuksen arviointi on standardimenetelmä virtavesien biologiaan liittyvissä tutkimuksissa ja antaa yleensä riittävän tarkan arvion sedimentin laadusta biologisiin tutkimuksiin ja selvityksiin.

5.5 Jatkuvatoimiset mittalaitteet kiintoaineen pitoisuuden ja kuormituksen määrittämisessä

Optisilla, uomaan sijoitettavilla mittalaitteilla voidaan mitata luonnonvesien sameutta jatkuvatoimisesti. Optisten sameusantureiden mittaustulos perustuu joko valon sironnaan tai valon läpäisykyvyn heikkenemiseen vedessä olevien partikkelien vaikutuksesta. Mitatut sameusarvot on mahdollista muuntaa kiintoaineen pitoisuuksiksi, jos vesinäytteistä laboratoriossa määritetyt kiintoainepitoisuudet ja vesinäytteen ottohetkellä jatkuvatoimisen mittarin mittaamat sameusarvot korreloivat keskenään (Tattari ym. 2015). Menetelmän etuna on, että näin saadaan hyvin tiheällä aikavälillä mitattua sekä sameuden että kiintoainepitoisuuden vaihtelua, joita ei perinteisellä, harvoin tapahtuvalla vesinäytteenotolla havaita. Veden sameuden ja laboratoriossa suodattamalla määritetyn kiintoainepitoisuuden välille löytyy usein lineaarinen korrelaatio (esim. Jones ym. 2011; Kämäri ym. 2018). Kaikissa vesistöissä sameus ja kiintoainepitoisuus eivät kuitenkaan korreloi riittävän hyvin (Lloyd ym. 2016), jolloin kiintoainekulkeumaa ja kuormitusta ei voida määrittää jatkuvatoimisen sameusmittauksen ja virtaaman perusteella. Ongelmallisia ovat etenkin humuspitoiset vedet, joissa veden värin muutokset peittävät sameusmuutokset, jolloin sameuden ja kiintoainepitoisuuden välille ei synny selkeää yhteyttä.

Jatkuvatoimiset vedenlaadun mittalaitteet edellyttävät huoltoa ja ylläpitoa, jotta mittausten laatu säilyy hyvänä. Laitteissa on mallista ja valmistajasta riippuen mittaustantureiden ilmanpainepuhdistus tai mekaaninen antureiden puhdistus. Suositeltavaa on kuitenkin tarkastaa mittarin toiminta säännöllisin huoltokäynnin. Huoltoväli riippuu mittausta paikasta, kuten vesistön koosta, vedenlaadusta sekä vuodenajasta (Tattari ym. 2019). Talvella huoltoväliä voi mahdollisesti pidentää, koska laitteen likaantuminen on yleensä vähäisempää kuin kasvukaudella. Huoltopäiväkirjan muistiinpanot, mukaan lukien merkinnät poikkeavista mittaustuloksista, helpottavat mittausten laadunvarmistusta joka kannattaa suunnitella osaksi jatkuvatoimisen mittarin ylläpitoa. Jatkuvatoiminen sameuden mittaustulos tarvitsee rinnalle myös perinteistä vesinäytteenottoa, jolla voidaan kalibroida paikallinen sameuden ja kiintoainepitoisuuden yhteys. Jos valuma-alueella tehdään voimakkaita muutoksia maankäytössä, voi sameuden ja kiintoainepitoisuuden välinen yhteys muuttua. Jatkuvatoimisten antureiden kalibrointi suositellaan tarkastettavaksi muutaman vuoden välein, ja erityisesti silloin, jos maankäyttö on muuttunut.

Kiintoainekuorman laskemiseksi tarvitaan pitoisuusmäärittämisen rinnalle myös tiedot virtaamasta (kuva 37). Virtaama saadaan määritettyä kätevästi tiheällä aikaresoluutiolla mittaamalla vedenpinnankorkeuden vaihtelua jatkuvatoimisesti. Vedenpinnankorkeudet muunnetaan tämän jälkeen virtaamiksi ns. purkautumiskäyrän perusteella. Tavanomaisesti purkautumiskäyrä määritetään tekemällä virtaaman mittaus 5-10 eri virtaamatilanteessa, jolloin saadaan yhteys vedenkorkeuden vaihtelun ja virtaaman välille (kuva 37). Suomessa jokien jäätyminen ja jään aiheuttama padotus talvisin voi aiheuttaa sen, että purkautumiskäyrästä ei saada talviajalta oikeita virtaamalukemia. Tällöin havaintoja korjataan talviajan virtaamamittausten, sää- ja jäähavaintojen perusteella ja tehdään virtaamaan ns. jääreduktio.



Kuva 37. Päivittäinen kiintoainekuorma Vantaanjoen Pitkäkoscilla on määritetty jatkuvatoimisen sameus- ja vedenkorkeusmittauksen perusteella. Sameusarvot muunnettiin kiintoainepitoisuuksiksi, sillä mitattujen arvojen ja vesinäytteistä analysoidun kiintoainepitoisuuden välillä oli lineaarinen yhteys. Mitattu vedenkorkeus muunnettiin virtaamaksi purkautumiskäyrän avulla. Vuosien väliset erot kulkeutuvassa kiintoainemäärässä ovat suuria. Vuodet 2012 ja 2013 olivat Etelä-Suomessa runsaslumisia, joten kevätulantaan ajoittui yli 30 % vuotuisesta kiintoainekuormasta. Vuonna 2014 lunta kertyi vähän ja sadanta oli syksyllä vähäisempää verrattuna syksyihin 2012 ja 2013. Talven ja kesän alivesikautena kiintoaineen kulkeutuminen on vähäistä.



Kuva 38. Virtausnopeuksien ja virtaaman mittausta kauko-ohjattavaan veneeseen integroidulla virtausnopeusmittarilla. Veneen pohjasta suuntautuu alaspäin akustinen pulssi, joka mittaa vedessä olevien partikkelien liikkeeseen perustuen virtausnopeutta. Veneeseen on kytketty myös GPS-paikannin. Kuva: Leena Laamanen. Turun yliopisto, virtavesien tutkimusryhmä.

6 Kiintoaineprosessien mallintaminen

Markus Saari, Maria Kämäri, Hannu Marttila

Mallinnuksen tarkoituksena on tuoda monimutkaiset prosessit, tässä tapauksessa valuma-alueen ja uomien kiintoaineprosessit kuten kiintoaineen liikkeellelähtö, kulkeutuminen, sedimentaatio tai kuormitus sellaiseen yksinkertaistettuun muotoon, että niitä voidaan arvioida. Malleihin sisältyy oletuksia ja yleistyksiä, koska luonnossa kiintoaineen liikkeisiin vaikuttavat monet tekijät, joita kaikkia ei voida mitata tai kuvata malleissa yleispätevillä kaavoilla. Mallit ja arviointityökalut ovatkin siten yksinkertaistettuja kuvauksia luonnon toiminnasta. Hyvässä mallissa epäoleelliset ja lopputuloksen kannalta vähämerkitykselliset asiat on riisuttu pois, mutta toisaalta aikaan ja paikkaan liittyvä vaihtelu on kuvattu riittävän hyvin.

Usein mallintamalla halutaan saada käsitys jonkun olosuhteen muutoksesta tai toimenpiteen vaikutuksesta kiintoaineprosesseihin. Parhaimmillaan kokonaisvaltaiset arviot niin tulevaisuuden kuin menneisyyden olosuhteista ja kiintoaineen kulkeutumisesta ovat mahdollisia. Tarkastelu voi liittyä esimerkiksi sään ääri-ilmiöihin, ilmastonmuutokseen, maankäyttöön tai kunnostustoimenpiteisiin. Mallinnus tulee kyseeseen, kun halutaan tarkastella jotakin muutosta ennakolta ja sitä ei voida mitata. Kiintoaineen liikkeitä kuvaavissa malleissa on tyypillisesti osioita, jotka on määritetty empiiristen mittausten perusteella.

Valuma-alueen maaperä, maankäyttö, kasvillisuus ja hydrologia kokonaisuudessaan säätelevät valuma-alueen ja uoman kiintoaineprosesseja. Näin ollen on syytä tuntea mallinnettavan alueen olosuhteet ja valita malli, joka soveltuu valitseviin oloihin. Peltojen ja metsien maankäyttö, ja sen myötä myös kiintoaineen huuhtoutuminen, on tyypillisesti erilaista. Lisäksi maalaji ja raekoko vaikuttavat kiintoaineen huuhtoutumisen ominaisuuksiin ja kulkeutumiseen. Maatalousvaltaisilla alueilla pintavalunta ja maan pintaeroosio voivat vaikuttaa merkittävästi kiintoaineen kulkeutumiseen vesistöihin. Erityishuomiota tuleekin kiinnittää mallinnetun pintavalunnan oikeellisuuteen, jos käytettävä malli sitä laskee. Pintavalunnan osuus sadannasta vaihtelee muun muassa vuodenajan, roudan, maan rakenteen ja kasvipeitteisyyden vaikutuksesta. Sadannasta osa imeytyy maahan ja osa valuu pintavaluntana vesistöihin. Sopivan mallinnustyökalun valintaan vaikuttavat lisäksi, tarkastelujakson pituus, alueen koko sekä käytettävissä olevat resurssit.

Mallin toimivuuden arvioiminen, eli mallin toiminnan validointi on osa mallinnusta. Siinä tarkoituksena on mallintaa kohteessa vallitsevia olosuhteita, ja verrata mallituloksia mitattuihin arvoihin. Mallin toimivuuden arvioimiseksi on olemassa monia keinoja, mutta yleinen käytäntö on laskea erilaisia mallin hyvyttä kuvaavia tunnuslukuja. Yleisimpiä hyvyyslukuja ovat nk. *Nash–Sutcliffe efficiency index* (NSE) (erityisesti hydrologisille malleille) tai selitysaste (r^2), jotka ilmaisevat lukuarvolla 0 – 1 mallin hyvyttä verrattaessa mallinnettua ja mitattua tulosta. Kyseisten hyvyyslukujen tapauksessa 0 tarkoittaa olematonta ja 1 täydellistä vastaavuutta. Prosentuaalinen ero mitatun ja mallinnetun arvon välillä on myös havainnollinen hyvyysmittari. Mallien hyväksyttävälle toimivuudelle asetettavat reunaehdot ovat tapauskohtaisia (Moriassi ym. 2015). Esimerkiksi vedenlaadun mallinnuksessa hyvyys-

den ei voida olettaa olevan yhtä hyvällä tasolla kuin hydrologisessa mallinnuksessa. Kun mittaus- ja mallinnustulosten vertailu tai käytettävissä olevat tiedot muuten osoittavat, että haluttua asiaa pystytään kuvaamaan mallilla riittävän hyvin, voidaan laatia ennusteita ja skenaarioita. Tavanomaisesti tarkastellaan muuttuvan ympäristön vaikutuksia tai käytetään malleja apuna toimenpidevaihtoehtojen vertailussa. Mallien toimintaan ja tuloksiin vaikuttavien tekijöiden ymmärtäminen ja epävarmuuksien sisäistämien on oleellinen osa tulosten tulkintaa. Tuloksia arvioidessa onkin tärkeä muistaa arvioida epävarmuuksia ja tuottaa tuloksiin myös luottamusrajat.

Mallinnuksen edellyttämää mittaus- ja havaintoaineistoa ei kaikilla vesistöalueilla ole riittävässä määrin saatavilla, joten mallinnustyön yhteyteen on usein mielekästä liittää kohdealueella tehtäviä mittauksia. Virtausmallinnuksessa suurin puute on yleisesti syvyysmittauksen aineistoista. Mallien kalibroinnin ja validoinnin mahdollisuuksia ovat kuitenkin lisänneet avoimen tiedon palvelut ja nykyään käytettävissä olevat uudehkot havaintomenetelmät, kuten esimerkiksi jatkuvatoimiset mittalaitteet (ks. kappale 5.5) tai kaukokartoitusaineistot ja digitaaliset maastomallit (Snellman & Sane 2016).

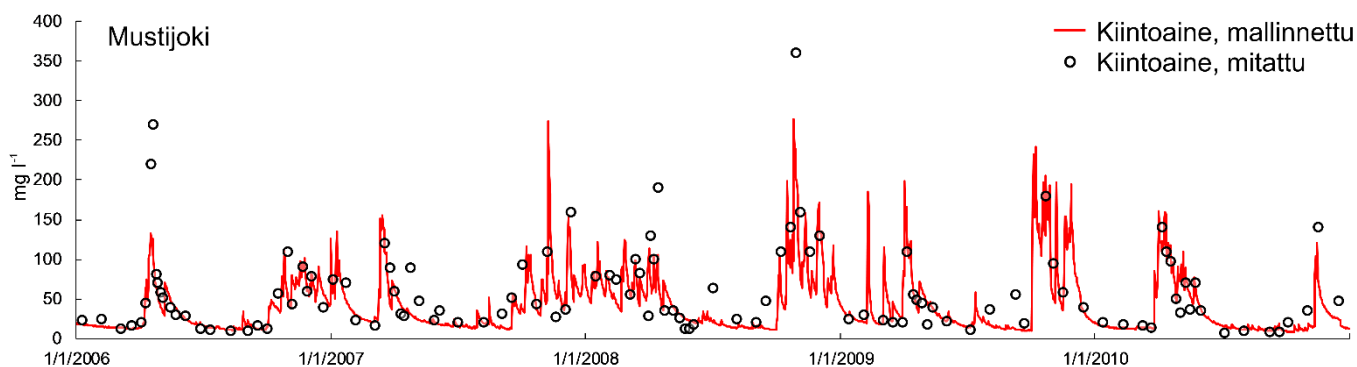
Kiintoainemallit koostuvat valuma-alueen kuormitusmalleista, uomamalleista tai näiden yhdistelmistä. Niiden kaikkien yleinen toimintaperiaate on, että annetun aineiston avulla malli tuottaa vasteen tarkasteltavasta asiasta, mikä voi olla esimerkiksi kiintoainepitoisuuden ajallinen vaihtelu (Kuva 39). Kuormitusmalleilla lasketaan valuma-alueen maa-alueilta tulevaa hajakuormitusta vesistöön. Uomamalleilla eli hydrodynaamisilla malleilla voidaan tarkastella kiintoaineen liikettä virtaavan veden mukana ja mahdollisesti uoman pohjan ja penkereiden eroosiota ja sedimentaatiota. Kun mallinnukseen yhdistetään sekä maa-alueella että uomassa tapahtuvien prosessien laskentaa, voidaan puhua valuma-alueen malleista. Tällöin kuormitusmallilla pyritään ensin arvioimaan pintavalun ja mahdollisesti maaperän kautta suotautuvan veden mukana kulkeutuvan kiintoaineen määrää vesistöön ja sen jälkeen hydrodynaamisilla malleilla aineen etenemistä ja sedimentaatiota vesistöissä.

6.1 Prosessipohjainen ja kokonaisvaltainen valuma-alue mallinnus

Prosessipohjaisten ja kokonaisvaltaisten valuma-alue mallien vahvuutena on luonnonlakeihin perustuva laskenta. Niiden avulla pystytään ottamaan huomioon kiintoaineen kulkeumaan vaikuttavia tekijöitä sekä valuma-alueella että uomassa. Malleja on käytetty muun muassa vesiensuojelutoimenpiteiden tai ilmastonmuutoksen kokonaisvaikutusten arviointiin. Etenkin fysikaalipohjaiset prosessimallit, jotka kylläkin sisältävät myös empiirisiin havaintoihin perustuvaa laskentaa, soveltuvat pitkäjänteiseen työhön mallinnuksen parissa, sillä mallien käyttöönotto saattaa olla työlästä. Ne ovat usein tutkimusryhmien tai konsulttien käyttämiä joustavia työkaluja, joita voidaan projektikohtaisesti ja hyvin monipuolisesti soveltaa erilaisiin kohteisiin. Suomen ympäristökeskuksen ylläpitämä vedenlaadun ja ravinnekuormituksen mallinnus- ja arviointijärjestelmä (VEMALA) on operatiivisessa käytössä, jolloin siihen liitetään säännöllisesti hydrologisia havaintoja laskennan tueksi (Huttunen ym. 2013, 2016). VEMALA -malli laskee kiintoaineen ja humuksen kulkeutumista Suomen vesistöissä. Mallin laskentatulokset ovat saatavilla erillisestä käyttöliittymästä noin 150 000 uomalle Suomessa, sisältäen suuren osan alkaen 2 m levyisistä uomista. Mallilla voidaan myös arvioida valuma-alueella ja vesistöissä tehtävien toimenpiteiden vaikutusta kuormitukseen.

Hydrologian ja kiintoaineen prosessien mallinnuksessa syötteenä toimii useimmiten mitattu tai ennustettu säädata (sadanta, lämpötila, kosteus jne.) ja valuma-alueen ominaisuudet (maankäyttö, geologia, kaltevuus, jne.), joiden avulla mallinnetaan

vaste esimerkiksi joen virtaamassa ja vedenlaadussa. SWAT-mallilla (Arnold ym. 1998) on simuloitu kiintoainepitoisuus Mustijoessa Porvoon lähistöltä (Kuva 39). Valuma-aluemalli SWAT on esimerkkikuvassa tuottanut silmämääräisesti arvioiden Mustijoen vedenlaadun vaihtelun erittäin hyvin jaksolla 2006-2011. Tällaisella mallilla on mahdollista tuottaa kuormitusarvioita tai laatia skenaarioita miten muuttuva maankäyttö tai ilmasto, uoman rakenteen muutokset, tai vesiensuojelutoimet vaikuttavat kiintoaineen kulkeutumiseen. Kuvassa 39 ilmenee myös mallinnuksen epävarmuutta. Kevään 2006 lumensulannan yhteydessä on mitattu hetkellisesti korkeita kiintoainepitoisuuksia, joita malli ei ole kuvannut yhtäläisesti. Tämä voi johtua esimerkiksi eroista mallinnetussa ja todellisessa pintavalunnassa ja maan routatilanteesta. Myös alueellinen sadannan vaihtelu, jota ei pystytä edes mittaamalla havaitsemaan, voi jo lähtötiedoissa tuottaa epävarmuutta mallituloksiin. Pitoisuudet voivat vaihdella virtavesissä nopeasti ja voimakkaasti. On tyypillistä, että mallinnettu pitoisuus yli- tai aliarvioi mitattua pitoisuutta erityisesti ääritilanteissa. Mustijoen esimerkkitapauksessa eroja mittauksen ja mallinnetun pitoisuuden välillä syntyy myös siitä, että mittaus edustaa hetkellistä pitoisuutta, kun taas malli tuottaa pitoisuudesta vuorokauden keskiarvoja. Mitä pienempi uoma niin sitä suurempia voivat olla lyhyessä ajassa tapahtuvat pitoisuusvaihtelut.



Kuva 39. Valuma-aluemallilla simuloitu keskimääräinen päivittäinen kiintoainepitoisuus Mustijoen suulta Porvoosta sekä hetkelliset mitatut arvot. Käytetty malli: Soil and Water Assessment Tool, SWAT (Arnold ym. 1998). Mallin hyvyysluku, $r^2 = 0,69$. Tekijä: Markus Saari.

6.2 Havaintoaineistoihin perustuvat kuormitusmallit

Kiintoainekuormituksen arviointiin soveltuvia kuormitusmalleja on kehitetty muun muassa pelloilta tai metsistä vesistöihin tulevan kuormituksen ja siihen vaikuttavien toimenpiteiden vaikutusten arvioimiseksi. Ne soveltuvat pitkäaikaisen, keskimääräisen kuormituksen ja siinä tapahtuvien muutosten arvioimiseen. Empiiristen ominaiskuormitusmallien perustana ovat monivuotiset mitatut kuormitusaikasarjat.

Tilastollinen ominaiskuormitusmalli on mahdollista rakentaa perustuen vedenlaatu- ja virtaamahavainnoista laskettuihin kuormituksiin sekä valuma-alueen keskeisiin ominaisuuksiin. Tilastollisissa regressiomallissa kiintoainekuormitusta selittäviä tekijöitä voivat olla esimerkiksi valuma-alueen peltoisuus, järvisyys, metsäisyys, savipeltojen osuus ja sadanta. Ne sopivat sovellettavaksi, kun halutaan ymmärtää valuma-alueella tehtävien muutosten tai säätyypin vaikutuksia kiintoaineen kulkeumaan tai arvioida keskimääräistä kokonaiskulkeumaa.

Kansainvälisesti tunnetuin empiirinen viljelyalueiden eroosion mallinnustyökalu on Yhdysvalloissa kehitetty USLE-malli (*The Universal Soil Loss Equation*), joka on

tarkoitettu pitkänajan keskimääräisen vuotuisen kiintoainekuorman arvioimiseen viljelyalueilta. Vuonna 1965 julkaistua USLE-mallia varten havaintoaineiston keräys alkoi jo 1930-luvulla. Vuonna 1978 mallista julkaistiin päivitetty versio RUSLE (*The Revised Universal Soil Loss Equation*) (Renard ym. 1997). Yleiseen käyttöön malli tuli vuonna 1992 ja mallin Windows -versiota kutsutaan nimellä RUSLE2. Malli simuloi pitkänajan keskimääräisen vuotuisen kiintoainekuorman (kg/ha/vuosi). Mallin parametrit ovat sadanta, valunta, maan eroosioherkkyys, pellon kaltevuus ja peltolohkon pituus suhteessa vertailuaineistoon, viljelykäytännöt, ja toimet eroosion hillitsemiseksi. RUSLE-mallia on sovellettu myös Suomen oloihin (Lilja ym. 2017).

Viljelyalueilta tulevan kiintoaine- ja ravinnekuormituksen arviointiin on Suomessa kehitetty viljelyalueiden valumavesien hallintamalli VIHMA, joka on luonteeltaan ominaiskuormitusmalli (Puustinen ym. 2010). Se perustuu pitkäaikaisiin koekenttämittauksiin. VIHMAN mukaan keskimääräinen peltoeroosio vuoden aikana on 520 kg/ha. Viljelyalueiden ominaisuudet ja hydrologisten vuosien erot aiheuttavat kuitenkin ajallista ja paikallista vaihtelua keskimääräisen arvon ympärillä. VIHMAan sisältyy myös kuormittavien ja vähän kuormittavien vuosien ominaiskuormitusluvut, joten sillä voidaan arvioida eroosion keskimääräistä vaihteluväliä. Työkalu on kehitetty ensisijaisesti kuormitusmuutosten arviointiin, joita on odotettavissa, kun viljelykäytäntöjä muutetaan ja toteutetaan maatalouden ympäristötoimenpiteitä. Toisaalta sillä saadaan esille myös käsitys ilmastonmuutoksen vaikutuksen suuruusluokasta kiintoainekuormaan. VIHMAssa ominaiskuormitusluvut ovat peltoluokittain kuvattuja kiinteitä lukuarvoja maalajiryhmittäin, kaltevuusluokan, peltojen P-lukualueen ja maan muokkausmenetelmien mukaan. Mallin syöttötiedot ovat suhteellisia osuuksia siitä, miten valuma-alueen peltoala jakaantuu em. peltoluokkiin.

Maalajiryhmät ovat savimaat (savipitoisuus > 30 %), hiesumaat, karkeat kivennäismaat ja turvemaat. Kaltevuusluokkia mallissa on yhteensä viisi. Vertailtavia viljely- ja maanmuokkausmenetelmiä ovat syyskyntö, kevennetyt muokkausmenetelmät, talviaikainen sänki, suorakylvö sekä pysyvät nurmet. VIHMA sisältää mahdollisuuden tarkastella muuttuvan säätyypin vaikutusta kuormitukseen, sillä laskennan voi tehdä kolmenlaiselle talvityypille, joissa eroa on talviajan valunnassa riippuen talven sadannan määrästä, lämpötilasta ja lumipeitteestä.

Metsätalousmaalta tulevan luonnonhuuhtouman ja eri metsätaloustoimenpiteiden aiheuttaman kiintoainekuormituksen lisäyksen arviointiin on Suomessa kehitetty KALLE-työkalu (Finér ym. 2010). Eri metsätaloustoimenpiteille tuotetut ominaiskuormitusluvut sisältävät KALLEssa oletuksen, että vesiensuojelusta on huolehdittu uudistamishakkuiden yhteydessä jättämällä suojakaistoja vesistöjen varteen ja että kunnostusojituksissa on tehty laskeutusaltaita, kun ne ovat tarpeellisia (Hiltunen ym. 2014). KALLE soveltuu verrattain laajojen alueiden kuormitusarviointiin, sillä se on kehitetty vesistöalueryhmien tai vesipuidedirektiivin mukaisesti määriteltyjen vesienhoitoalueiden kuormitusarviointiin.

KUSTAA on ominaiskuormitusmenetelmään perustuva valuma-alueelta vesistöön lähtevän kiintoaine-, typi- ja fosforikuormituksen laskentaohjelma, joka kattaa metsätalouden lisäksi myös muun maankäytön aiheuttaman kuormituksen (Lau-niainen ym. 2014). Sillä voi laskea arvion valuma-alueen kokonaiskuormituksesta ja sen jakautumisesta. Metsätalouden osalta laskenta perustuu KALLE-työkaluun. Lähtötiedoiksi tarvitaan valuma-alueen ja sen vesistöjen pinta-alat, metsä- ja maataloustoimenpiteiden pinta-alat ja muut haja- ja pistekuormituslähteiden määrät vuositasolla. Ohjelma on vapaasti saatavilla sekä julkisen että yksityisen sektorin käyttöön (Luke, 2014).

Käytännön vesiensuojelua varten kehitetty KUHA-malli (<http://www.ymparisto.fi/fi-FI/TASOhanke/Julkaisut>) on tarkoitettu metsätalouden vesistökuormituksen vaihtoehtolaskelmien laatimiseen varsinkin pienillä osavaluma-alueilla. KUHAa voidaan soveltaa myös laajemmille alueille tai koko maan kattavasti.

6.3 Hydrauliset mallit

Hydrauliset mallit eli virtausmallit, joilla simuloidaan veden liikettä uomassa, ovat pääsääntöisesti fysikaalispohjaisia. Käytännön sovelluksiin lukeutuvat esimerkiksi vedenkorkeuksien ja virtausolosuhteiden määrittäminen tulva- tai alivirtaamatilanteissa. Veden liikkeen mallinnus on edellytyksenä tarkalle kiintoaineen liikkeen mallinnukselle.

Hydraulisten mallien soveltaminen tiettyyn uomaan edellyttää mittatietoja uoman poikkileikkauksista, uoman kaltevuudesta ja rakenteista kuten silta-aukoista eli uoman geometriatietoja. Lisäksi virtausmallit tarvitsevat hydrologisia tietoja. Virtaaman ja vedenkorkeuden päiväkeskiarvoja onkin saatavilla ympäristöhallinnon Avoin tieto -palvelussa (syke.fi/avoindata). Useimmiten mallinnettavaksi valikoituu jokin uoman osa, sillä tarvittavan lähtöaineiston kuten syvyysmittausaineiston kerääminen koko joen pituudelta on usein mahdotonta. Mallinnus voidaan hyvin toteuttaa jokiosuudelle, jonka alapuolinen ja yläpuolinen reunaehto tunnetaan tai pystytään arvioimaan mahdollisimman hyvin. Mallin yläpuoliseksi reunaehdoksi annetaan tieto virtaaman vaihtelusta ajan suhteen. Säännöstellyissä jokivesistöissä voimalaitos voi olla sopiva kohta, josta mallinnusalue rajataan, sillä voimalaitosten yhteydessä virtaaman vaihtelu yleensä tunnetaan (Kämäri ym. 2015). Mallin alapuolisena reunaehtona voi olla esimerkiksi vedenkorkeuden vaihtelu järvessä tai meressä, jonne mallinnettava uoma laskee.

Hydrauliset mallit jaotellaan yksi- (1D), kaksi- (2D) ja kolmiulotteisiin (3D) malleihin. Valinta niiden välillä riippuu käyttökohteesta, saatavilla olevasta lähtöaineistosta sekä resursseista. 1D- mallit kykenevät simuloimaan virtaamaa ja keskimääräistä virtausnopeutta malliin sisältyvissä uoman poikkileikkauksissa. 1D-malleilla voidaan laskea vedenkorkeudet eri virtaamatilanteissa ja arvioida virtaavan veden kykyä kuljettaa kiintoainetta eri virtaamilla. Todellisuudessa virtausnopeus vaihtelee uoman poikkileikkauksen eri osissa. Suorassa joki-uomassa suurin virtausnopeus on uoman keskivaiheilla veden pinnassa. Joen mutkittelu, kasvillisuus, pohjan laatu ja uomassa olevat rakenteet vaikuttavat virtauskenttään. Talvella jääkansi aiheuttaa kitkaa jään ja veden rajapinnassa, jolloin suurin virtausnopeus siirtyy pinnasta syvemmälle. 1D - ja 2D-malleja voidaan käyttää suurehkojen jokien tai niiden osien mallintamiseen sen mukaan, miten mallinnuksessa tarvittavia lähtötietoja on saatavilla. 2D- malleilla virtausprofiilia pystytään simuloimaan vaihtelevammin ottaen huomioon uoman geometriaa. Niillä voidaan laskea virtausnopeuden vaihtelu uoman poikki, syvyyden suhteen keskiarvoistettuna. Näin saadaan simuloitua nopeamman ja hitaamman virtauksen alueita poikkileikkauksessa. 3D-mallinnus tarjoaa mahdollisuuden hyvinkin paikallisten uoman virtausolosuhteiden, kuten jokien mutkien tai hydraulisten esteiden vaikutusten arviointiin. 3D-malli simuloi virtausnopeuksien vaihtelua sekä horisontaalisesti että pystysuunnassa. Ne ovat usein täysin fysikaalispohjaisia, ja siten vaativat laskentatehokkuutta tietokoneelta. Hydraulisia tekijöitä kuten virtausnopeutta, virtaamaa ja turbulenssia ja niiden vaihtelua voi simuloida kolmiulotteisella virtausmallilla eri syvyyksissä.

Kiintoaineen eroosion, sedimentaation ja kulkeutumisen laskentaa on mahdollista sisällyttää hydraulisiin uomamalleihin. Tällöin mallinnuksen lähtötietoaineistojen tarve kasvaa, sillä tiedot vesistöön tulevasta kiintoaineesta ja pohjan laadusta ovat tarpeen. Käytettävissä on malleja kuten HEC-RAS (Brunner 2016), jolla voi laskea uomassa kiintoaineen pääasiallisia eroosio- ja sedimentaatioalueita ja pohjan tason muutoksia pitkällä aikavälillä tai virtaaman muutosten vaikutuksesta. Laskennassa simuloidaan erikokoisten maa-ainespartikkelien kulkeutumista virrassa sekä maa-aineksen laskeutumisenopeutta ja liikkeellelähtöä virtauksen voimasta. Laskentaan on kehitetty monia eri algoritmeja, joista osa soveltuu esimerkiksi paremmin hiekan ja osa savipitoisen kiintoaineen liikkeiden simuloimiseen. Laskentatulokset

ovat hyvin herkkiä sen suhteen, mitä kiintoaineen kulkeutumisen, eroosion tai laskeutumisnopeuden algoritmia laskennassa käytetään (Brunner 2016).

Virtausmalleja on yhdistetty myös habitaattimalleihin, jolloin simuloidaan ja arvioidaan fysikaalisten tekijöiden ekologisia vaikutuksia (Mouton ym. 2007). Habitaattimalleissa virtavesikalaille merkittävimmät muuttujat ovat virrannopeus, syvyys ja pohjanlaatu. Näillä tekijöillä on myös suurin merkitys hydrodynamiikassa, joten linkitys on virtavesisysteemeissä selkeä. Hydraulisten tekijöiden vaikutusta esimerkiksi kalojen käyttäytymiseen on tutkittu, mutta tuloksissa on vaihtelua, mikä lisää haasteita sovellettaessa malleja esimerkiksi kalateiden ja kunnostusten suunnitteluun. Laskenta-alueen mittakaavaan, valittuun malliin, perustiedon oikeellisuuteen ja tarkkuuteen liittyy epävarmuutta. Luotettava, pienen mittakaavan 3D habitaattimallinnus esimerkiksi koskikohteessa ei vielä nykytiedolla ole mahdollista, koska tarpeeksi tarkkaa ja kattavaa tietoa kalojen käyttämisestä ja suosimasta habitaatista ei ole (Koljonen 2011). Habitaattimallinnusta voisi soveltaa esimerkiksi siten, että arvioidaan miten mallinnettu sedimentaatio ja eroosio vaikuttavat kalojen lisääntymisalueiden laatuun. Sedimentin kertymisen ja kasautumisen mallinnus antaisi erityyppisissä kohteissa arvokasta lisätietoa kunnostusten suunnitteluun.

7 Tutkimustarpeita

**Jarno Turunen, Hannu Marttila, Maria Kämäri, Markus Saari,
Kaisa Heikkinen, Heini Postila, Saija Koljonen**

Ennustekyvyn parantaminen

Ilmastonmuutos vaikuttaa sääolosuhteisiin sekä valuma-alueen kiintoaineprosesseihin, mikä heijastuu muutoksina vesistöjen ekosysteemeissä. Muutoksen suuruus on riippuvaista ilmastonmuutoksen hillintätoimenpiteiden tehokkuudesta ja tulevasta ilmastokehityksestä. Kiintoainekuormituksen ja sedimentaatio-ongelmien kannalta tulee pyrkiä ennustamaan, kuinka valuma-alueiden eroosio muuttuu ja miten ilmastonmuutos ja maankäyttötavat maa- ja metsätaloudessa tai kaupunkirakentamisessa vaikuttavat siihen. Tärkeää olisi kehittää maankäytön vesiensuojelumenetelmiä ja ohjauskeinoja, jotta ilmastonmuutoksen negatiivisia vesistövaikutuksia minimoidaan. Myös mahdollisuuksia maankäyttötapojen muutoksiin tulisi selvittää nykyistä tehokkaammin. Parhaita keinoja esimerkiksi maan hiilensidontakyvyn tehostamiseksi pitkällä aikavälillä ei vielä tunneta riittävän hyvin. Mikäli eroosio ja sedimentaatiohaitat tulevaisuudessa lisääntyvät, olisi tärkeä lisätä tutkimusta lisääntyvän kiintoaineen määrän ja muiden tekijöiden vaikutuksesta virtavesiin. Tällaisia tekijöitä ovat esimerkiksi virtaamien äärevöityminen (kuivuus, tulvat) ja virtaamien perinteisen vuodenaikaisrytmin muutokset, lämpötilan muutokset sekä ravinteiden, raudan ja liuenneen orgaanisen hiilen (humus) huuhtoutumisen lisääntyminen vesistöissä (Lepistö ym. 2014). Näiden tekijöiden yhteisvaikutuksia on maailmalla jo jonkin verran tutkittu (esim. Piggot ym. 2015a, b), mutta toistaiseksi tutkimukset Suomessa ovat olleet vähäisiä (Mustonen ym. 2016). Tärkeää olisi myös informoida maankäytön toimijoita tulevista muutoksista ja kertoa heidän mahdollisuuksista tehdä toimenpiteitä omilla maa-alueillaan.

Uudet mittaustekniikat

Kiintoaine ja muu vedenlaadun seuranta toteutetaan edelleen pääasiassa manuaalisesti vesinäytteitä keräämällä. Koska valtaosa kiintoainekuormituksesta ja sedimentin liikkumisesta tapahtuu tulvien ja lyhytkestoisten virtaamapiikkien aikana, ei yleensä tiheinkään käsin tehtävä näytteenotto anna tarkkaa kuvaa kiintoainekuormituksesta ja sedimentin kulkeutumisesta. Jatkuvatoimisilla mittausjärjestelmillä voidaan veden laatua seurata reaaliajassa, jolloin kuormituksesta saadaan parempi kokonaiskuva. Luotettavan jatkuvatoimisen mittauksen lisäämisellä on mahdollista tuottaa tarkempaa tietoa kiintoainekuormituksen ja sedimentin määrästä virtavesissä ja siitä, kuinka virtaama, sääolosuhteet tai valuma-alueiden ominaispiirteet, maankäyttö ja vesiensuojelutoimenpiteet vaikuttavat kuormiin. Tällaisen tiedon merkitys vaikutusten ennakoimisessa ja toimenpiteiden toteutuksessa, esimerkiksi maankäytön suunnittelun ja ilmastonmuutoksen kannalta, on keskeistä vesiensuojelussa (Lepistö ym. 2014). Tarvitaan valtakunnallinen jatkuvatoimisten mittausten verkosto, jolla parannetaan tietoa kiintoainekuormituksesta ja sen ajoittumisesta eri

jokityypeillä ja alueilla. Virtausmallinnuksessa taasen tarpeellisia uoman syvyystietoja on vähän saatavilla. Tekniikan kehittyessä niin sanottu vihreä laserkeilaus voisi yleistyessään tuoda matalien uomien syvyystietoaineistoja lisää saataville (Snellman & Sane 2016).

Virtavesikunnostukset

Uomaan kunnostusmenetelmien toimivuudesta, erityisesti pitkällä aikavälillä, tarvitaan lisää tutkimustietoa liettymis- tai hiekottumishaitoista kärsivissä virtavesissä. Kunnostustoimenpiteiden vaikuttavuus voi jäädä lyhytkestoiseksi, mikäli liettymisongelmia ei saada hallintaan. Kunnostusrakenteiden, kuten kutusoraikkojen tai kalojen talvehtimismonttujen optimaalisen sijoittamisen ja toimivuuden tutkimusta tarvitaan, jotta liettymisongelmat jäisivät mahdollisimman vähäisiksi. Kiintoaineen ja sedimentin kulkeutumismallien kehittäminen ja yhdistäminen elinympäristömalteihin auttaisi arvioimaan ja ennakoimaan liettymisen vaikutuksia elinympäristöissä ja suunnittelemaan kunnostuksia niin, että liettymishaitat jäisivät mahdollisimman pieniksi.

Biologiset vaikutukset

Virtavesien ekosysteemien vahva riippuvuus valuma-alueelta ja rantavyöhykkeeltä uomaan päätyvästä orgaanisesta aineksestä on tunnettu jo kauan (Hynes 1975; Vannote ym. 1980). Viime vuosina virtavesiekologit ovat tutkineet yhä enemmän virtavedestä rantavyöhykkeelle päätyvän ravinnon ja energian merkitystä. Jopa 25-100 % rantavyöhykkeen eläinten (linnut, lepakot, liskot, hämähäkit, petokovakuoriaiset) ravinnosta on peräisin virtavedestä kuoritutuvista hyönteisistä (Baxter ym. 2005). Koska kiintoainekuormitus ja uomien liettyminen voivat vähentää vesihyönteisten määrää tai muuttaa lajistollista koostumusta, on mahdollista, että kiintoainekuormitus uomassa heijastuu negatiivisina vaikutuksina myös rantavyöhykkeen ekosysteemeihin. Asiaa ei kuitenkaan ole toistaiseksi tutkittu.

Liiallinen hienon kiintoaineen sedimentaatio vaikuttaa negatiivisesti lohikalojen mädin kehitykseen kutupesissä. Kuten kappaleessa 3.6 mainittiin, on hienon sedimentin vaikutusta lohikalojen mädin kuolleisuuteen ja poikasten kehitykseen tutkittu varsin paljon. Vähemmälle huomiolle on kuitenkin jäänyt eri populaatioiden geneettiset erot herkkyydessä kiintoainekuormitukselle. Lohi ja taimen ovat tunnettuja kyvystään vaeltaa synnyinjokeensa kutemaan. Kalojen kotipaikkauskollisuus on hyvin tarkkaa, sillä eri uomissa tai koskissa on tyypillisesti oma geneettisesti erilaistunut populaationsa (Carlson & Nilson 2000; Vähä ym. 2007). Populaatioille voi kehittyä omia geneettisiä sopeumia kotijoen tai -puron paikallisiin ympäristöolosuhteisiin, kun populaatioiden välinen geenien vaihto on rajoittunut (Jensen ym. 2008; Pritchard ym. 2018). On mahdollista, että luonnostaan runsaammin hienoa kiintoainetta, kuten hiekkaa kuljettavissa virtavesissä on juuri niihin olosuhteisiin syntyneitä sopeumia, mikä ilmenee esimerkiksi kalojen kutupaikan valinnassa, kutukuopan kaivamisessa tai mätimunien koossa, fysiologiassa ja poikasten kehityksessä. Tällaisten geneettisten ominaisuuksien tuntemus edesauttaisi esimerkiksi taimenen palautusistutusten onnistumista erityyppisissä virtavesissä sekä populaatioiden suojelun/viljelyn priorisointia.

KIRJALLISUUS

- Abbe, T. B., & Montgomery, D. R. (1996). Large woody debris jams, channel hydraulics and habitat formation in large rivers. *Regulated Rivers: Research and Management*, 12, 201–221.
- Allan, J. D. (2004). Landscapes and riverscapes: The influence of land use on stream ecosystems. *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics*, 35, 257–284.
- Allan, J. D., & Flecker, A. S. (1993). Biodiversity conservation in running waters: Identifying the major factors that threaten destruction of riverine species and ecosystems. *BioScience*, 43, 32–43.
- Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., & Williams, J. R. (1998). Large area hydrologic modeling and assessment part I: Model development. *Journal of the American Water Resources Association*, 34(1), 73–89.
- Avery, E. L. (1996). Evaluations of sediment traps and artificial gravel riffles constructed to improve reproduction of trout in three wisconsin streams. *North American Journal of Fisheries Management*, 16, 282–293.
- Baker, M. A., Dahm, C. M., & Valett, H. M. (1999). Acetate retention and metabolism in the hyporheic zone of a mountain stream. *Limnology and Oceanography*, 44, 1530–1539.
- Baxter, C. V., Fausch, K. D., & Saunders, W. C. (2005). Tangled webs: reciprocal flow of invertebrate prey link streams and riparian zones. *Freshwater Biology*, 50, 201–220.
- Beechie, T. J., Lierman, M., Pollock, M. M., Baker, S., & Davies, J. (2006). Channel pattern and river-floodplain dynamics in forested mountain river systems. *Geomorphology*, 78, 124–141.
- Berg, L. (1982). The effect of exposure to short-term pulses of suspended sediment on the behaviour of juvenile salmonids. Hartman, G. F. (Ed). *Proceedings of the Carnation Creek workshop: a ten-year review*. Department of Fisheries and Oceans, Pacific Biological Station, Nanaimo, Canada.
- Berli, B. I., Gilbert, M. J., Ralph, A. L., Tierney, K. B., & Burkhardt-Holm, P. (2014). Acute exposure to a common suspended sediment affects the swimming performance and physiology of juvenile salmonids. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 176, 1–10.
- Biggs, B. J. F. (1995). The contribution of flood disturbance, catchment geology and land use to the habitat template of periphyton in stream ecosystems. *Freshwater Biology*, 33, 419–438.
- Björnerås, C., Weyhenmeyer, G. A., Evans, C. D., Gessner, M. O., Grossart, H. P., Kangur, K., Kokorite, I., Kortelainen, P., Laudon, H., Lehtoranta, J., Lottig, N., Monteith, D. T., Nöges, P., Nöges, T., Oulehle, F., Riise, G., Rusak, J. A., Räike, A., Sire, J., Sterling, S., & Kritzberg, E. S. (2017). Widespread Increases in iron concentration in European and North American freshwaters. *Global Biogeochemical Cycles*, 31, 1488–1500.
- Boeger, R. T. (1992). The influence of substratum and water velocity on growth of *Ranunculus aquatilis* L. (Ranunculaceae). *Aquatic Botany*, 42, 351–359.
- Bowerman, T., Neilson, B., & Budy, P. (2014). Effects of fine sediment, hyporheic flow, and spawning site characteristics on survival and development of bull trout embryos. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 71, 1059–1071.
- Braccia, A., & Voshell, J. R. (2007). Benthic macroinvertebrate responses to increasing levels of cattle grazing in Blue Ridge mountain streams, Virginia, USA. *Environmental Monitoring and Assessment*, 131, 185–200.
- Brett, M. T., Bunn, S. E., Chandra, S., Galloway, A. W. E., Guo, F., Kainz, M. J., Kankaala, P. ym. (2017). How important are terrestrial organic carbon inputs for secondary production in freshwater ecosystems. *Freshwater Biology*, 62, 833–853.
- Broekhuizen, N., Parkyn, S., & Miller, D. (2001). Fine sediment effects on feeding and growth in the invertebrate grazers *Potamopyrgus antipodarum* (Gastropoda, Hydrobiidae) and *Deleatidium* sp. (Ephemeroptera, Leptophlebiidae). *Hydrobiologia*, 457, 125–132.
- Brown, L. E., Aspray, K. L., Ledger, M. E., Mainstone, C., Palmer, S. A., Wilkes, M., & Holden J. (2019). Sediment deposition from eroding peatlands alters headwater invertebrate biodiversity. *Global Change Biology*, 25, 602–619.
- Bruder, A., Tonolla, D., Schweizer, S. P., Vollenweider, S., Langhans, S. D., & Wüest, A. (2016). A conceptual framework for hydropeaking mitigation. *Science of The Total Environment*, 568, 1204–1212.
- Brunner, G. W. (2016). HEC-RAS River Analysis System, Users Manual. Version 5.0. U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Centre.
- Bryce, S. A., Lomnický, G. A., & Kaufmann, P. R. (2010). Protecting sediment-sensitive aquatic species in mountain streams through the application of biologically based streambed sediment criteria. *Journal of the North American Benthological Society*, 29, 657–672.
- Buck, O., Niyogi, D. K., & Townsend, C. R. (2004). Scale-dependence of land use effects on water quality of streams in agricultural catchments. *Environmental Pollution*, 130, 287–299.
- Buendia, C., Gibbins, C. N., Vericat, D., Batalla, R. J., & Douglas, A. (2013). Detecting the structural and functional impacts of fine sediment on stream invertebrates. *Ecological Indicators*, 25, 184–196.
- Burdon, F. J., McIntosh, A. R., & Harding, J. S. (2013). Habitat loss drives threshold response of benthic invertebrate communities to deposited sediment in agricultural streams. *Ecological Applications*, 23, 1036–1047.
- Carlsson, J., & Nilsson, J. (2000). Population genetic structure of brown trout (*Salmo trutta* L.) within a northern boreal forest stream. *Hereditas*, 132, 173–181.

- Chapman, A. & Darby, S. (2016). Evaluating sustainable adaptation strategies for vulnerable mega-deltas using system dynamics modelling: Rice agriculture in the Mekong Delta's An Giang Province, Vietnam. *Science of the Total Environment*, 559, 326–338.
- Christianson, L. E., Harmel, R. D., Smith, D., Williams, M. R. & King, K. (2016). Assessment and synthesis of 50 Years of published drainage phosphorus losses. *Journal of Environmental Quality*, 45, 1467–1477.
- Church, M. (2006). Bed material transport and the morphology of alluvial river channels. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 34, 325–354.
- Ciborowski, J. J. H., Craig, D. A., & Fry, K. M. (1997). Dissolved organic matter as food for black fly larvae (Diptera:Simuliidae). *Journal of the North American Benthological Society*, 16, 771–780.
- Connolly, N. M., & Pearson, R. G. (2007). The effect of fine sedimentation on tropical stream macroinvertebrate assemblages: a comparison using flow-through artificial stream channels and recirculating mesocosms. *Hydrobiologia*, 592, 423–438.
- Cornut, J., Elger, A., Lambrigot, D., Marmonier, P., & Chauvet, E. (2010). Early stages of leaf decomposition are mediated by aquatic fungi in the hyporheic zone of woodland streams. *Freshwater Biology*, 55, 2541–2556.
- Crenshaw, C. L., Valett, H. M., & Webster, J. R. (2002). Effect of augmentation of coarse particulate organic matter on metabolism and nutrient retention in hyporheic sediments. *Freshwater Biology*, 47, 1820–1831.
- Danger, M., Cornut, J., Elger, A., & Chauvet, E. (2012). Effects of burial on leaf litter quality, microbial conditioning and palatability to three shredder taxa. *Freshwater Biology*, 57, 1017–1030.
- Diplas, P., & Parker, G. (1992). Deposition and removal of fines in gravel-bed streams. Teoksessa: Billi, P. Hey, R.D., Thorne, C.R. and Tacconi, R. (Toim.). Dynamics of gravel-bed rivers. London. John Wiley and Sons.
- Einum, S., Hendry, A. P., & Fleming, I. A. (2002). Egg-size evolution in aquatic environments: does oxygen availability constrain size? *Proceedings of the Royal Society B*, 269, 2325–2330
- Ekholm, P., Kallio, K., Salo, S., Pietiläinen, O.-P., Rekolainen, S., Laine, Y., & Joukola, M. (2000). Relationship between catchment characteristics and nutrient concentrations in an agricultural river system. *Water Research*, 34, 3709–3716.
- Ekholm, P., Jaakkola, E., Kiiirikki, M., Lahti, K., Lehtoranta, J., Mäkelä, V., Näykki, T., Pietola, L., Tattari, S., Valkama, P., Vesikko, L., & Väisänen, S. (2011). The effect of gypsum on phosphorus losses at the catchment scale. *The Finnish Environment* 33/2011.
- Ekström, S. M., Regnell, O., Reader, H. E., Nilsson, P. A., Löfgren, S., & Kritzberg, E. S. (2016). Increasing concentrations of iron in surface waters as a consequence of reducing conditions in the catchment area. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 121, 479–493.
- Elbrecht, V., Beermann, A. J., Goessler, G., Naumann, J., Tollrian, R., Wagner, R., Wlecklik, A., Piggott, J. J., Matthaei, C. D. & Leese, F. (2016). Multiple-stressor effects on stream invertebrates: a mesocosm experiment manipulating nutrients, fine sediment and flow velocity. *Freshwater Biology*, 64, 362–375.
- Everall, N. C., Johnson, M. F., Wood, P., & Mattingley, L. (2018). Sensitivity of the early life stages of a mayfly to fine sediment and orthophosphate levels. *Environmental Pollution*, 237, 792–802.
- Finér, L., Mattsson, T., Joensuu, S., Koivusalo, H., Lauren, A., Makkonen, T., Nieminen, M., Tattari, S., Ahti, E., Kortelainen, P., Koskiaho, J., Leinonen, A., Nevalainen, R., Piirainen, S., Saarelainen, J., Sarkkola, S., & Vuollekoski, M. (2010). Metsäisten valuma-alueiden vesistökuormituksen laskenta. *Suomen Ympäristö*, 10/2010. ISBN 978-952-11-3756-3 (pdf)
- Geist, J. & Auerswald, K. (2007). Physicochemical stream bed characteristics and recruitment of the freshwater pearl mussel (*Margaritifera margaritifera*). *Freshwater Biology*, 52, 2299–2316.
- Greig, S.M., Sear, D.A., & Carling, P.A. (2005a). The impact of fine sediment accumulation on the survival of incubating salmon progeny: Implications for sediment management. *Science of the Total Environment*, 344, 241–258.
- Greig, S.M., Sear D.A., Smallman D., & Carling P.A. (2005b). Impact of clay particles on the cutaneous exchange of oxygen across the chorion of Atlantic salmon eggs. *Journal of Fish Biology*, 66, 1681–1691.
- Greig, S., Sear, D., & Carling, P. (2007). A field-based assessment of oxygen supply to incubating Atlantic salmon (*Salmo salar*) embryos. *Hydrological Processes*, 21, 3087–3100.
- Gurnell, A., Tockner, K., Edwards, P., & Petts, G. (2005). Effects of deposited wood on biocomplexity of river corridors. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 3, 377–382.
- Hassan, M. A., Church, M., Lisle, T. E., Brardinoni, F., Benda, L. & Grant, G. E. (2005). Sediment transport and channel morphology of small, forested streams. *Journal of the American Water Resources Association*, 41, 853–876.
- Heikkinen, K. (1986). Orgaaninen aine jokivesissä. *Luonnon Tutkija*, 90, 198–201.
- Heikkinen, K. (1989). Organic carbon transport in an undisturbed boreal humic river in northern Finland. *Archiv für Hydrobiologie*, 117, 1–19.
- Heikkinen, K. (1990a). Transport of organic and inorganic matter in river, brook and peat mining water in the drainage basin of the River Kiiminkijoki. *Aqua Fennica*, 20, 143–155.
- Heikkinen, K. (1990b). Nature of dissolved organic matter in the drainage basin of a boreal humic river in northern Finland. *Journal of Environmental Quality*, 19, 649–657.
- Heikkinen, K. (1990c). Seasonal changes in iron transport and nature of dissolved organic matter in a humic river in northern Finland. *Earth Surface Processes and Landforms*, 15, 583–596.

- Heikkinen, K. (1992). Organic matter, iron and nutrient transport, nature of dissolved organic matter and bacterioplankton densities in a humic river in northern Finland. *Acta Universitatis Ouluensis, Series A, Scientiae Rerum Naturalium* 231, University of Oulu Printing Center 1992.
- Heikkinen, K. (1994). Organic matter, iron and nutrient transport and nature of dissolved organic matter in the drainage basin of a boreal humic river in northern Finland. *The Science of the Total Environment*, 152, 81–89.
- Heikkinen, K., & Laine, A. (1997). Turvetuotanto muuttaa koskien pohjia kalojen elinympäristönä. *Suomen Kalastuslehti*, 6, 26–27.
- Heinimaa, S., Kähkönen, P., Heikkinen, K., & Ylitolonen, A. (1998). Virtaavien vesien tila soiden käyttöä ohjaavana tekijänä Pohjois-Pohjanmaalla. Alueelliset ympäristöjulkaisut 99, Pohjois-Pohjanmaan ympäristökeskus.
- Hiltunen, T., Jämsén, J., Joensuu, S., Heikkinen, K., & Vuollekoski, M. (2014). Opas metsätalouden vesiensuojelun suunnitteluun valuma-alueetasolla, Kopijyvä, Jyväskylä 2014, 43 s.
- Hoegh-Guldberg, O., Jacob, D., & Taylor, M. (2018). Special Report on Global Warming of 1.5 °C - Chapter 3: Impacts of 1.5° C global warming on natural and human systems. 243.
- Huttunen, M., Vehviläinen, B., & Huttunen, I. (2013) Typen, fosforin ja kiintoaineksen pidättyminen vesistöissä – WSFS- Vemala-mallin arvio. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 5/2013.
- Huttunen, I., Huttunen, M., Piirainen, V., Korppoo, M., Lepistö, A., Räike, A., Tattari, S., & Vehviläinen, B. (2016). A National-Scale Nutrient Loading Model for Finnish Watersheds—VEMALA. *Environmental Modeling & Assessment*, 21, 83–109.
- Hynes, H. B. N. (1963). Imported organic matter and secondary productivity in streams. – *Proc. 16th Int. Congr. Zool. Washington*, 4, 324–329.
- Hynes, H. B. N. (1975). The stream and its valley. *Internationale Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie: Verhandlungen*, 19, 1–15.
- Izaguirre, O., Serra, A., Guasch, H., & Elosegi, A. (2009). Effects of sediment deposition on periphytic biomass, photosynthetic activity and algal community structure. *Science of the Total Environment*, 407, 5694–5700.
- Jensen, L. F., Hansen, M. M., Pertoldi, C., Holdensgaard, G., Dons Mensberg, K.-L., & Loeschcke, V. (2008). Local adaptation in brown trout early life-history traits: implications for climate change adaptability. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Studies*, 275, 2859–2868.
- Joensuu, S., Kauppila, M., Lindén, M., & Tenhola, T. (2012). Hyvän metsänhoidon suositukset - Vesiensuojelu. Metsätalouden kehittämiskeskus Tapion julkaisuja. <https://tapio.fi/metsatietoa/julkaisut-ja-raportit/hyvan-metsanhoidon-suositukset-vesiensuojelu/>
- Jones, A. S., Stevens, D. K., Horsburgh, J. S., & Mesner, N. O. (2011). Surrogate Measures for Providing High Frequency Estimates of Total Suspended Solids and Total Phosphorus Concentrations. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 47, 239–253.
- Jones, J. I., Collins, A. L., Naden, P. S., & Sear, D. A. (2012a). The relationship between fine sediment and macrophytes in rivers. *River Research and Applications*, 28, 1006–1018.
- Jones, J. I., Murphy, J. F., Collins, A. L., Sear, D. A., Naden, P. S., & Armitage, P. D. (2012b). The impact of fine sediment on macro-invertebrates. *River Research and Applications*, 28, 1055–1071.
- Julien, H.P., & Bergeron, N.E. (2006). Effect of fine sediment infiltration during the incubation period on Atlantic Salmon (*Salmo salar*) embryo survival. *Hydrobiologia*, 563, 61–71.
- Jähniq, S. C., Brunzel, S., Gacek, S., Lorenz, A. W., & Hering, D. (2009). Effects of re-braiding measures on hydromorphology, floodplain vegetation, ground beetles and benthic invertebrates in mountain rivers. *Journal of Applied Ecology*, 46, 406–416.
- Kemp, P., Sear, D., Collins, A., Naden, P., & Jones, I. (2011). The impacts of fine sediment on riverine fish. *Hydrological Processes*, 25, 1800–1821.
- Kettunen, I., Mäkelä, A., & Heinonen, P. (2008). Vesistötietoa näytteenottajille. Suomen ympäristökeskus, Ympäristöopas 2008, Edita Prima Oy, Helsinki
- Kjelland, M.E., Woodley, C.M., Swannack, T.M., & Smith, D.L. (2015). A review of the potential effects of suspended sediment on fishes: potential dredging-related physiological, behavioral, and trans-generational implications. *Environmental Systems and Decisions*, 35, 334–350.
- Koljonen, S. (2011). Ecological impacts of in-stream restoration in salmonid rivers - The role of enhanced structural complexity. *Acta Universitatis Ouluensis, serie A* 580. Oulun yliopisto.
- Kondolf, G.M. (2000). Assessing salmonid spawning gravel quality. *Transactions of The American Fisheries Society*, 129, 262–281.
- Kortelainen, P., Mattsson, T., Finér, L., Ahtiainen, M., Saukkonen, S., & Sallantausta, T. (2006). Controls on the export of C, N, P and Fe from undisturbed boreal catchments, Finland. *Aquatic Sciences*, 68, 453–468.
- Koskiaho, J., Ekholm, P., Rätty, M., Riihimäki, J., & Puustinen, M. (2003). Retaining agricultural nutrients in constructed wetlands – experiences under boreal conditions. *Ecological Engineering*, 20, 89–103.
- Kuglerová, L., Ågren, A., Jansson, R., & Laudon, H. (2014). Towards optimizing riparian buffer zones: Ecological and biogeochemical implications for forest management. *Forest Ecology and Management*, 334, 74–84.
- Kuntaliitto, (2012). *Hulevesiopas*. Suomen Kuntaliitto, Helsinki, ISBN 978-952-213-896-5.
- Kämäri, M., Alho, P., Veijalainen, N., Aaltonen, J., Huokuna, M., & Lotsari, E. (2015). River ice cover influence on sediment transportation at present and under projected hydroclimatic conditions. *Hydrological Processes*, 29, 4738–4755.

- Kämäri, M. (2018). Spatiotemporal variation of sediment and nutrient dynamics in seasonally ice-covered rivers. Publications of the University of Eastern Finland. Dissertations in Social Sciences and Business Studies, 184 Joensuu. University of Eastern Finland.
- Kämäri, M., Tattari, S., Lotsari, E., Koskiaho, J., & Lloyd, C. E. M. (2018). High-frequency monitoring reveals seasonal and event-scale water quality variation in a temporally frozen river. *Journal of Hydrology*, 564, 619–639.
- Laiho, R. (2019). Jatkuvapitteisen metsänkasvatuksen mahdollisuudet ja riskit suometsissä, Lastuja Metsäteollisuus ry:n blogi.15.1.2019, www.lastuja.fi
- Laine, A. (2001). Effects of peatland drainage on the size and diet of yearling salmon in a humic northern river. *Archiv für Hydrobiologie*, 151, 83–99.
- Laine, A., & Heikkinen, K. (1991). Turvetuotannon kalastovaikutukset. Kirjallisuusselvitys. Vesi- ja ympäristöhallinnon julkaisuja -sarja A. 82. 63 s.
- Laine, A., & Heikkinen, K. (2000). Peat mining increasing fine-grained organic matter on the riffle beds of boreal streams. *Archiv für Hydrobiologie*, 148, 9–24.
- Laine, A., Heikkinen, K., & Sutela, T. (2001). Incubation success of brown trout (*Salmo trutta*) eggs in boreal humic rivers affected by peatland drainage *Archiv für Hydrobiologie*, 150, 289–305.
- Laine, A., Sutela, T., Heikkinen, K., Karvonen, K., Huhta, A., Muotka, T., & Lappalainen, A. (1996). Turvetuotannon vaikutukset koskikaloihin ja niiden elinympäristöön. *Suomen Ympäristö* 34, 135 s., Pohjois-Pohjanmaan ympäristökeskus.
- Laine, A., Sutela, T., & Heikkinen, K. (1997). Lohikalojen poikasten kasvu heikentynyt turvetuotantoalueiden alapuolisissa koskissa. *Suomen Kalastuslehti*, 6(1997), 28–29.
- Lambda, J., Karthikeyan, K. G., & Thompson, A. M. (2015). Apportionment of suspended sediment sources in an agricultural watershed using sediment fingerprinting. *Geoderma*, 239–240, 25–33.
- Lepistö, A., Futter, M., & Kortelainen P. (2014). Almost 50 years of monitoring shows that climate, not forestry, controls long-term organic carbon fluxes in a large boreal watershed. *Global Change Biology*, 20, 1225–1237.
- Lapointe, M.F., Bergeron, N.E., Berube, F., Pouliot, M.-A., & Johnstone, P. (2005). Interactive effects of substrate sand and silt contents on redd scale hydraulic gradients and interstitial velocities on egg to emergence survival of Atlantic Salmon (*Salmo salar*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 61, 2271–2277.
- Larsen, S., & Ormerod, J. (2010). Low-level effects of inert sediments on temperate stream invertebrates. *Freshwater Biology*, 55, 476–486.
- Launiainen, S., Sarkkola, S., Laurén, A., Puustinen, M., Tattari, S., Mattsson, T., Piirainen, S. Heinonen, J., Alakukku L., & Finér, L. (2014). KUSTAA -työkalu valuma-alueen vesistökuormituksen laskentaan. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 33/2014. Suomen ympäristökeskus (SYKE), 55 s.
- Levasseur, M., Bergeron, N. E., Lapointe, M. F., & Bérubé, F. (2006). Effects of silt and very fine sand dynamics in Atlantic salmon (*Salmo salar*) redds on embryo hatching success. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 63, 1450–1459.
- Lecerf, A. & Richardson, J. S. (2010). Litter decomposition can detect effects of high and moderate levels of forest disturbance on stream condition. *Forest Ecology and Management*, 259, 2433–2443.
- Leopold, L. B., Wolman, M. G. & Miller, J. P. (1964). *Fluvial Processes in Geomorphology*. W. H. Freeman & Company, San Francisco.
- Lilja, H., Hyväluoma, J., Puustinen, M., Uusi-Kämpä, J., & Turtola, E. (2017). Evaluation of RUSLE2015 erosion model for boreal conditions. *Geoderma Regional*, 10, 77–84.
- Lisle, T. E., & Lewis, J. (1992). Effects of sediment transport on survival of salmonids embryos in a natural stream: a simulation approach. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 49, 2337–2344.
- Lopes-Lima, M., Sousa, R., Geist, J., Aldridge, D. C., Araujo, R., Bergengren, J., Bepalaya, Y., Bódis, E., Burlakova, L. ym. (2017). Conservation status of freshwater mussels in Europe: state of the art and future challenges. *Biological Reviews*, 92, 572–607.
- Lotsari, E., Wang, Y., Kaartinen, H., Jaakkola, A., Kukko, A., Vaaja, M., Hyyppä, H., Hyyppä, J., & Alho, P. (2015). Gravel transport by ice in a subarctic river from accurate laser scanning. *Geomorphology*, 246, 113–122.
- Louhi, P., Mäki-Petäys, A., & Erkinaro, J. (2008). Spawning habitat of Atlantic Salmon and brown trout: General criteria and intragravel factors. *River Research and Applications*, 24, 330–229.
- Louhi, P. (2010). Responses of brown trout and benthic invertebrates to catchment-scale disturbance and in-stream restoration measures in boreal river systems. *Acta Universitatis Ouluensis, serie A* 565. Oulun yliopisto.
- Louhi, P., Mäki-Petäys, A., Erkinaro, J., Paasivaara, A., & Muotka, T. (2010). Impacts of forest drainage improvement on stream biota: A multisite BACI-experiment. *Forest Ecology & Management*, 260, 1315–1323.
- Louhi, P., Ovaska, M., Mäki-Petäys, A., Erkinaro, J., & Muotka, T. (2011). Does fine sediment constrain salmonid alevin development and survival? *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 68, 1819–1826.
- Louhi, P., Richardson, J. S., & Muotka, T. (2017). Sediment addition reduces the importance of predation on ecosystem functions in experimental stream channels. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 74, 32–40.

- Lloyd, C. E. M., Freer, J. E., Johnes, P. J., & Collins, A. L. (2016). Using hysteresis analysis of high-resolution water quality monitoring data, including uncertainty, to infer controls on nutrient and sediment transfer in catchments. *Science of The Total Environment*, 543, Part A: 388–404.
- Luke (2014). KUSTAA – työkalu valuma-alueen vesistökuormituksen laskentaan <http://www.metla.fi/metinfo/kustaa/index.htm> (sivulla käyty 6.5.2019).
- Matthaei, C. D., Piggot, J. J., & Townsend, C. R. (2010). Multiple stressors in agricultural streams: interactions among sediment addition, nutrient enrichment and water abstraction. *Journal of Applied Ecology*, 47, 639–649.
- Matthaei, C. D., Weller, F., Kelly, D. W., & Townsend, C. R. (2006). Impacts of fine sediment addition to tussock, pasture, dairy and deer farming streams in New Zealand. *Freshwater biology*, 51, 2154–2172.
- Mattsson, T., Finér, L., Kortelainen, P., & Sallantausta, T. (2003). Brook water quality and background leaching from unmanaged forested catchments in Finland. *Water, Air, and Soil Pollution*, 147, 275–297.
- Marttila, H. & Kløve B. (2010). Dynamics of erosion and suspended sediment transport from drained peatland forestry. *Journal of Hydrology*, 344, 414–425.
- Marttila, H., Turunen, J., Aroviita, J., Tammela, S., Luhta, P.-L., Muotka, T., & Kløve, B. (2018). Restoration increases transient storages in boreal headwater streams. *River Research and Applications*, 34, 1278–1285.
- Marttila, H., Tammela, S., Mustonen, K.-R., Louhi, P., Muotka, T., Mykrä, H., & Kløve, B. (2019). Contribution of flow conditions and sand addition on hyporheic zone exchange in gravel beds. *Hyväksyty julkaisuun, Hydrology Research*, 50, 878–885.
- Matilainen, J., Kuusela, M., Weckroth, T., Silver, T., Suonpää, S., & Erikslund G. (2000). Metsäteiden tarpeellisuus ja niiden merkitys. *Metsätieteen Aikakauskirja*, 3/2000, 479–482
- Mlambo, M. C., Paavola, R., Louhi, P., Soininen, J., Virtanen, R., & Muotka, T. (2015). Bioenergy vs biodiversity: effects of intensive forest biomass removal on stream and riparian communities. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 88, 368–375.
- Mol, J. H., & Ouboter, P. E. (2004). Downstream effects of erosion from small-scale gold mining on the instream habitat and fish community of a small neotropical rainforest stream. *Conservation Biology*, 18, 201–214.
- Montgomery, D. R. (2007). Soil erosion and agriculture sustainability. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of the America*, 104, 13268–13272.
- Montgomery, D. R., Abbe, T. B., Buffington, J. M., Peterson, N. P., Schmidt, K. M., & Stock, J. D. (1996). Distribution of bedrock and alluvial channels in forested mountain drainage basins. *Nature*, 381, 587–589.
- Moriasi, D. N., Gitau, M. W., Pai, N., & Daggupati, P. (2015). Hydrologic and Water Quality Models: Performance Measures and Evaluation Criteria. *Transactions of the ASABE*, 58, 1763–1783.
- Mouton, A.M., Schneider, M., Depestele, J., Goethals, P.L., & De Pauw, N. (2007). Fish habitat modelling as a tool for river management. *Ecological engineering*, 29, 305–315.
- Muotka, T., & Virtanen, R. (1995). The stream as a habitat templet for bryophytes: species' distributions along gradients in disturbance and substratum heterogeneity. *Freshwater Biology*, 33, 141–160.
- Muotka, T., & Laasonen, P. (2002). Ecosystem recovery in restored headwater streams: the role of enhanced leaf retention. *Journal of Applied Ecology*, 39, 145–156.
- Mustonen, K. R., Mykrä, H., Louhi, P., Markkola, A., Tolkkinen, M., Huusko, A., Alioravainen, N., Lehtinen, S., & Muotka, T. (2016). Sediments and flow have mainly independent effects on multitrophic stream communities and ecosystem functions. *Ecological Applications*, 26, 2116–2129.
- Neal, C. W. M., & Anders, A. M. (2015). Suspended sediment supply dominated by bank erosion in a low-gradient agricultural watershed, Wildcat Slough, Fisher, Illinois, United States. *Journal of Soil and Water Conservation*, 70, 145–155.
- Nieminen, M., Piirainen, S., Sikström, U., Sarkkola, S., Löfgren, S., Marttila, H., Lauren, A., & Leena, F. (2018). Ditch network maintenance in boreal peatland forests – review and analysis of water quality management options. *Ambio*, 47, 535–545.
- Näykki, T., Kyröläinen, H., Witick, A., Mäkinen, I., Pehkonen, R., Väisänen, T., Sainio, P. & Luotola, M. (2013) Laatusuosituksen ympäristöhallinnon vedenlaaturekistereihin vietävälle tiedolle: vesistö tehtävien analyyttien määritysrajat, mittausepävarmuudet sekä säilytysajat ja -tavat. Suomen ympäristökeskus, Ympäristöhallinnon ohjeita 4/2013.
- Palviainen, M., Lehtoranta, J., Ekholm, P., Ruoho-Airola, T., & Kortelainen, P. (2015). Land cover controls the export of terminal electron acceptors from boreal catchments. *Ecosystems*, 18, 343–358.
- Parkhill, K. L., & Gulliver, J. S. (2002). Effect of inorganic sediment on whole-stream productivity. *Hydrobiologia*, 472, 5–17.
- Paul, M. J., & Meyer, J. L. (2001). Streams in the urban landscape. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 32, 333–365.
- Piggott, J. J., Salis, R. K., Lear, G., Townsend, C. R., & Matthaei, C. D. (2015a). Climate warming and agricultural stressors interact to determine stream periphyton community composition. *Global Change Biology*, 21, 206–222.
- Piggott, J. J., Townsend, C. R., & Matthaei, C. D. (2015b). Climate warming and agricultural stressors interact to determine stream macroinvertebrate community dynamics. *Global Change Biology*, 21, 1887–1906.

- Piggott, J. J., Niyogi, D. K., Townsend, C. R., & Matthaei, C. D. (2015c). Multiple stressors and stream ecosystem functioning: climate warming and agricultural stressors interact to affect processing of organic matter. *Journal of Applied Ecology*, 52, 1126–1134.
- Pretty, J. L., Hildrew, A. G., & Trimmer, M. (2006). Nutrient dynamics in relation to surface-subsurface hydrological exchange in a groundwater fed chalk stream. *Journal of Hydrology*, 330, 84–100.
- Pritchard, V. L., Mäkinen, H., Vähä, J.-P., Erkinaro, J., Orell, P., & Primmer, C. R. (2018). Genomic signatures of fine-scale local selection in Atlantic salmon suggest involvement of sexual maturation, energy homeostasis and immune defence-related genes. *Molecular Ecology*, 27, 2560–2575.
- Puustinen, M., Tattari, S., Koskiaho, J., & Linjama, J. (2007). Influence of seasonal and annual hydrological variations on erosion and phosphorus transport from arable areas in Finland. *Soil & Tillage Research*, 93, 44–55.
- Puustinen, M., Turtola, E., Kukkonen, M., Koskiaho, J., Linjama, J., Niinioja, R., & Tattari, S. (2010). VIHMA - A tool for allocation of measures to control erosion and nutrient loading from Finnish agricultural catchments. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 138, 306–317.
- Pöyry Environment Oy (2009). Vapo Oy, Turvetuotantoalueiden vesistökuormituksen arviointi YVA-hankkeissa ja ympäristölupahakemuksissa, Yhteenveto tutkimusten ja kuormitustarkkailujen tuloksista. https://www.vapo.com/filebank/661-Poyryn_tutkimus.pdf
- Ramchunder, S. J., Brown, L. E., & Holden, J. (2012). Catchment-scale peatland restoration benefits stream ecosystem biodiversity. *Journal of Applied Ecology*, 49, 182–191.
- Renard, K. G. (1997). Predicting soil erosion by water; a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation. *Agriculture Handbook*. United States, Department of Agriculture, 703.
- Richardson, J., & Jowett, I.G. (2002). Effects of sediment on fish communities in East Cape streams, North Island, New Zealand. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 36, 431–442.
- Robertson, M. J., Scruton, D. A., & Clarke, K. D. (2007). Seasonal effects of suspended sediment on the behavior of juvenile Atlantic salmon. *Transactions of the American Fisheries Society*, 136, 822–828.
- Robinson, C. T., Tockner, K., & Ward, J. V. (2002). The fauna of dynamic riverine landscapes. *Freshwater Biology*, 47, 661–667.
- Roy A. H., Rosemond A. D., Paul M. J., Leigh D. S., & Wallace J. B. (2003a). Stream macroinvertebrate response to catchment urbanization (Georgia, U.S.A.). *Freshwater Biology*, 48, 329–346.
- Roy, A. H., Rosemond, A. D., Leigh, D. S., Paul, M. J., & Wallace J. B. (2003b). Habitat-specific responses of stream insects to land cover disturbance: biological consequences and monitoring implications. *Journal of the North American Benthological Society*, 22, 292–307.
- Rubin, J.F. (1998). Survival and emergence of sea trout fry in substrata of different compositions. *Journal of Fish Biology*, 53, 84–92.
- Ryan, P. A. (1991). Environmental effects of sediment on New Zealand streams: A review. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 25, 207–221.
- Sand-Jensen, K. (1998). Influence of submerged macrophytes on sediment composition and near-bed flow in lowland streams. *Freshwater Biology*, 39, 663–679.
- Sand-Jensen, K., & Pedersen, O. (1999). Velocity gradients and turbulence around macrophyte stands in streams. *Freshwater Biology*, 42, 315–328.
- Sanpera-Calpet, I., Chauvet, E., & Richardson, J. S. (2012). Fine sediment on leaves: shredder removal of sediment does not enhance fungal colonization. *Aquatic Sciences*, 74, 527–538.
- Sarkkola, S., Nieminen, M., Koivusalo, H., Laurén, A., Kortelainen, P., Mattsson, T., Palviainen, M., Piirainen, S., Starr, M., & Finér, L. (2013). Iron concentrations are increasing in surface waters from forested headwater catchments in eastern Finland. *Science of the Total Environment*, 463–464, 683–689.
- Schleiger, S.L. (2000). Use of an index of biotic integrity to detect effects of land use on stream fish communities in wet-central Georgia. *Transaction of American Fisheries Society*, 129, 1118–1183.
- Sear, D.A., Jones, J.I., Collins, A.L., Hulin, A., Burke, N., Bateman, S., Pattison, I. & Naden, P.S. (2016). Does fine sediment source as well as quantity affect salmonid embryo mortality and development? *Science of the Total Environment*, 541, 957–968.
- Servizi, J.A. & Martens, D.W. (1992). Sub lethal responses of coho salmon (*Oncorhynchus kisutch*) to suspended sediments. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 49, 1389–1395.
- Servizi, J.A. & Martens, D.W. (1987). Some effects of suspended Fraser River sediments on sockeye salmon (*Oncorhynchus nerka*). In: Smith, H.D., Margolis, L. and Wood, L.L. (eds). Sockeye salmon (*Oncorhynchus nerka*) population biology and future management. *Canadian Special Publication on Fisheries and Aquatic Sciences*, 96, 254–264.
- Sharpley, A. N., Krogstad, T., Kleinman, P. J. A., Haggard, B., Shigaki, F. & Saporito, L. S. (2007). Managing natural processes in drainage ditches for nonpoint source phosphorus control. *Journal of Soil and Water Conservation*, 62, 197–206.
- Shaw, E. L. & Richardson, J. S. (2001). Direct and indirect effects of pulse duration on stream invertebrate assemblages and rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) growth and survival. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 58, 2213–2221.
- Sillanpää, N. & Koivusalo, H. (2015). Stormwater quality during residential construction activities: influential variables. *Hydrological Processes*, 29, 4238–4251.
- Snellman, S. & Sane M. (2016). Avoin data tuo 2D-virtausmallit käden ulottuville. *Vesitalous* 57:2, 36–39

- Soulsby, C., Youngson, A. F., Moir, H. J., & Malcom, I. A. (2001). Fine sediment influence on salmonid spawning habitat in a lowland agricultural stream: a preliminary assessment. *Science of the Total Environment*, 265, 295–307.
- Stenberg, L., Tuukkanen, T., Finér, L., Marttila, H., Piirainen, S., Kløve, B., & Koivusalo, H. (2015). Ditch erosion processes and sediment transport in a drained peatland forest. *Ecological Engineering*, 75, 421–433.
- Suren, A. M., & Jowett, I. A. (2001). Effects of deposited sediment on invertebrate drift: an experimental study. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 35, 725–737.
- Sutherland, A. B., & Meyer J. L. (2007). Effects of increased suspended sediment on growth rate and gill condition of two southern Appalachian minnows. *Environmental Biology of Fishes*, 80, 389–403.
- Suttle, K. B., Power, M. E., Levin, J. M., & McNeely, C. (2004). How fine sediment in riverbeds impairs growth and survival of juvenile salmonids. *Ecological Applications*, 14, 969–974.
- Syvitski, J. P., Vörösmarty, C. J., Kettner, A. J., & Green, P. (2005). Impact of humans on the flux of terrestrial sediment to the global coastal ocean. *Science*, 308, 376–380.
- Tammela, S., Marttila, H., Dey, S., & Kløve, B. (2010). Effect and design of underminer structure. *Journal of Hydraulic Research*, 48, 188–196.
- Tappel, P. D., & Bjorn, T. C. (1983). A new method of relating size of spawning gravel to salmonid embryo survival. *North American Journal of Fisheries Management*, 3, 123–135.
- Tattari, S., Koskiaho, J., & Kosunen M. (2014). Turvetuotannon kuormituslaskentasuositus ja perustelut sen käyttönotolle, Suomen ympäristökeskus, Helsinki, 45 s.
- Tattari, S., Koskiaho, J., & Tarvainen, M. (2015). Virtavesien vedenlaadun jatkuvatoiminen mittaaminen. Käytännön opas. Varsinais-Suomen elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus, Opas 5/2015, <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-314-365-4>
- Tattari, S., Tarvainen, M., Kallio, K., Lepistö, A., Näykki, T., Raateoja, M., & Seppälä, J. (2019). Laatuksi-kirja jatkuvatoimisille vedenlaadun mittauksille - Opas hyväksi käytännöiksi. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 4/2019. <http://hdl.handle.net/10138/299105>
- Trimble, S. W. (1997). Contribution of stream channel erosion to sediment yield from an urbanizing watershed. *Science*, 278, 1442–1444.
- Trimble, S. W., & Mendel, A. C. (1995). The cow as a geomorphic agent – a critical review. *Geomorphology*, 13, 233–253.
- Turunen, J., Aroviita, J., Marttila, H., Louhi, P., Laamanen, T., Tolkkinen, M., Luhta, P.-L., Kløve, B., & Muotka, T. (2017). Differential responses by stream and riparian biodiversity to in-stream restoration of forestry-impacted streams. *Journal of Applied Ecology*, 54, 1505–1514.
- Turunen, J., Louhi, P., Mykrä, H., Aroviita, J., Putkonen, E., Huusko, A., & Muotka, T. (2018). Combined effects of local habitat, anthropogenic stress, and dispersal on stream ecosystems: a mesocosm experiment. *Ecological Applications*, 28, 1606–1615.
- Vaaja, M., Hyyppä, J., Kukko, A., Kaartinen, H., Hyyppä, H., & Alho, P. (2011). Mapping Topography Changes and Elevation Accuracies Using a Mobile Laser Scanner. *Remote Sensing*, 3, 587–600.
- Valkama, P. (2018). Impacts of agricultural water protection measures on erosion, phosphorus and nitrogen loading based on high-frequency on-line water quality monitoring. Doctoral dissertation. Publications of University of Helsinki, Department of Geosciences and Geography A64.
- Vanhatalo, K., Väisänen, P., Joensuu, S., Sved, J., Koistinen, A., & Äijälä, O. (toim.) 2015. Metsänhoidon suositukset suometsien hoitoon, työopas. Tapion julkaisuja.
- Vannote, R. L., Minshall, G. W., Cummins, K. W., Sedell, J. R., & Cushing, C. E. (1980). The river continuum concept. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic sciences*, 37, 130–137.
- Vehanen, T., Bjerke, P.L., Heggenes, J., Huusko, A., & Mäki-Petäys, A. (2000). Effect of fluctuating flow and temperature on cover type selection and behaviour by juvenile brown trout in artificial flumes. *Journal of Fish Biology*, 56, 923–937.
- Vuori, K.-M. (1995). Direct and indirect effects of iron on river ecosystems. *Annales Zoologici Fennici*, 32, 317–329.
- Vuori, K.-M., & Joensuu, I. (1996). Impact of forest drainage on the macroinvertebrates of small boreal headwater stream: Do buffer zones protect lotic biodiversity. *Biological Conservation*, 77, 87–95.
- Vähä, J.-P., Erkinaro, J., Niemelä, E., & Primmer, C.R. (2007). Life-history and habitat features influence the within-river genetic structure of Atlantic salmon. *Molecular Ecology*, 16, 2638–2654.
- Wagenhoff, A., Townsend, C. R., & Matthaei, C. D. (2012). Macroinvertebrate responses along broad stressor gradients of deposited fine sediment and dissolved nutrients: a stream mesocosm experiment. *Journal of Applied Ecology*, 49, 892–902.
- Wagenhoff, A., Lange, K., Townsend, C. R., & Matthaei, C. D. (2013). Patterns of benthic algae and cyanobacteria along twin-stressor gradients of nutrients and fine sediment: a stream mesocosm experiment. *Freshwater Biology*, 58, 1849–1863.
- Walsh, C. J., Roy, A. H., Feminella, J. W., Cottingham, P. D., Groffman, P. M., & Morgan II, R. P. (2005). The urban stream syndrome: current knowledge and search for a cure. *Journal of North American Benthological Society*, 24, 706–723.
- Waters, T. F. (1995). *Sediment in Streams: Sources, Biological Effects and Control*, the American Fisheries Society, Bethesda, Maryland.
- Wentworth, C. K. (1922). A scale of grade and class terms for clastic sediments. *The Journal of Geology*, 30, 377–392.

- Witzel, L. D., & MacCrimmon, H.R. (1983). Embryo survival and alevin emergence of brook char, *Salvelinus fontinalis*, and brown trout, *Salmo trutta*, relative to red gravel composition. *Canadian Journal of Zoology*, 61, 1783–1792.
- Wood, P. J., & Armitage P. D. (1997). Biological effects of fine sediment in the lotic environment. *Environmental Management*, 21, 203–217.
- Wood, P.J., Toone, J., Greenwood, M. T., & Armitage, P. D. (2005). The response of four lotic macroinvertebrate taxa to burial by sediments. *Archiv für Hydrobiologie*, 163, 145–162.
- Wyzga, B., Oglecki, P., Radecki-Pawlik, A., Skalski, T. & Zawiejska, J. (2012). Hydromorphological complexity as a driver of the diversity of benthic invertebrate communities in the Czarny Dunajec River, Polish Carpathians. *Hydrobiologia*, 696, 29–46.
- Yamada, H., & Nakamura, F. (2002). Effect of fine sediment deposition and channel works on periphyton biomass in the Makomanai river, northern Japan. *River Research and Applications*, 18, 481–493.
- Yu, M., & Rhoads, B. L. (2018). Floodplains as a source of fine sediment in grazed landscapes: Tracing the source of suspended sediment in the headwaters of an intensively managed agricultural landscape. *Geomorphology*, 308, 278–292.
- Zweig, L. D., & Rabení, C. F. (2001). Biomonitoring for deposited sediment using benthic invertebrates: a test on 4 Missouri streams. *Journal of the North American Benthological Society*, 20, 643–657.



ISBN 978-952-11-5095-1 (nid.)

ISBN 978-952-11-5096-8 (PDF)

ISSN 1796-1718 (pain.)

ISSN 1796-1726 (verkkoj.)