



Jutta Porkka

KAUTTUANKOSKEN VIRTAUSOLOSUHTEIDEN JA
FLUVIAALIGEOMORFOLOGIAN VAIKUTUKSET TAIMENEN
ELINOLOSUHTEISIIN

Maantieteen pro gradu -tutkielma

Turku 2022

Turun yliopiston laatujaarjestelmän mukaisesti tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck-järjestelmällä.

Pääaine: Maantiede

Tekijä: Jutta Porkka

Otsikko: Kauttuankosken virtausolosuhteiden ja fluviaaligeomorfologian vaikutukset taimenen elinolosuhteisiin

Ohjaaja: Petteri Alho

Sivumäärä: 81 sivua + liitteet 17 sivua

Päivämäärä: 22.2.2022

Virtavesiympäristöissä vallitsevat olosuhteet ovat moniulotteinen kokonaisuus, jossa virtauskäyttäytyminen sekä uoman geometria ovat jatkuvassa muutoksessa ja vuorovaikutuksessa keskenään. Virtavesien ekosysteemeille luonteenomaista on veden liike sekä siihen sidoksissa oleva alueellinen heterogeenisyys. Kaikilla eliölajeilla on elinympäristönsä olosuhteisiin liittyviä vaatimuksia, jotka määrittelevät niiden levinneisyyttä. Taimenen (*Salmo trutta*) eri kehitysvaiheille sopivaa elinympäristöä rajaavat erityisesti virtausnopeus, vesisyvyys, raekoko sekä lämpötila.

Tässä tutkimuksessa tarkasteltiin Eurajoessa sijaitsevan Kauttuankosken fluviaaligeomorfologiasta nykytilaa. Erityinen huomio keskitettiin Kauttuankosken alueella elävän ja lisääntyvän taimenen elinolosuhteisiin ja selviytymiseen tutkimusalueella. Aineistonkeruumenetelminä tutkimuksessa käytettiin akustista virtaamaprofiilimittausta, pohjanäytteenottoa sekä vedenalaisen lämpötilan jatkuvaa mittausta. Lisäksi hyödynnettiin takymetrimittaukseen ja lentokonelaserkeilaukseen perustuvaa yhdistettyä digitaalista korkeusmallia. Geometria- ja virtaama-aineistoa sekä tietoa pohjan substraattikoostumuksesta käytettiin rakennettaessa hydraulista mallia, jolla mallinnettiin neljä erilaista virtaamaskenaariota.

Mittausten pohjalta tarkasteltiin lämpötilan alueellista, vuodenaikaista ja virtaamaan sidoksissa olevaa vaihtelua verraten tuloksia taimenen elinympäristövaatimuksiin. Mallin tulosten ja pohjasedimentin raekokoja kuvaavan aineiston pohjalta luotiin pohjamateriaalin kulutus- ja kasautumisalueita kuvaavat karttatason. Lisäksi mallinnuksen avulla tuotettuja virtausnopeus- ja syvyystietoja sekä raekokoja kuvaavaa aineistoa hyödyntäen mallinnettiin taimenen kutemiselle sekä eri kokoluokille elinympäristön suhteellista soveltuvuutta kuvaavat mallit.

Kauttuankoskelta paikannettiin taimenen eri ikäluokille soveltuvia elinympäristöjä. Helteillä ja matalan virtaaman aikaan alueelliset erot lämpötilassa olivat voimakkaimmillaan. Tutkimusalueella nuorimmat taimenen ikäluokat kärsivät lämpötilan noususta sekä korkeista virtaamista johtuvasta soveltuvuuden heikkenemisestä eniten. Virtaaman muuttuessa isokokoiset kalat taas voivat löytää sopivia elinympäristöjä tutkimusalueen eri osista. Korkeat virtaamat saattavat kuluttaa pois taimenen elinympäristöksi soveltuvaa raekokoja laajoilla alueilla, kun taas matalissa virtaamissa hienosedimenttiä kertyy pienelle alueelle. Ilmastomuutoksen myötä vuodenaikaisesti lisääntyvä tulviminen saattaa hankaloittaa taimenen kutemista ja mädin kehittymistä.

Avainsanat: virtausdynamikka, fluviaaligeomorfologia, taimen, HEC-RAS, hydraulinen mallinnus, habitaattimallinnus

Master's thesis

Subject: Geography

Author: Jutta Porkka

Title: The Effect of Flow Conditions and Fluvial Geomorphology on Brown Trout Habitats in Kauttuankoski

Supervisor: Petteri Alho

Number of pages: 81 pages + attachments 17 pages

Date: 22.2.2022

Fluvial systems are characterized by constant change and the interaction between flow dynamics and stream geometry. Continuous flow of water and spatial heterogeneity define the fluvial ecosystems. Unique habitat requirements control the distribution of each species. In the context of this study, main factors governing the habitat of brown trout (*Salmo trutta*) are flow velocity, water column depth, particle size and temperature.

This study surveyed the current fluvial geomorphologic situation of Kauttuankoski aiming the focus on brown trout habitat requirements and survival. Data was collected using acoustic discharge measurements, sediment sampling and continuous water temperature logging. A digital terrain model based on total station measurements and airborne laser scanning was created and used in building a 2D hydraulic model. The hydraulic conditions in Kauttuankoski were simulated in four discharge scenarios.

The temperature data was used to study spatial, seasonal and discharge-bound patterns which then were compared with the habitat requirements of brown trout. Results of the hydraulic modelling were used to create maps portraying the erosion and deposition of particles and to create a habitat model based on velocity, depth and particle size.

Suitable environments for different life-stages of brown trout were detected from the study area. The biggest spatial differences in temperature were detected during summer and low discharge periods. In the study area's conditions juvenile fish were found to be the most vulnerable to high temperatures and strong discharge. Instead, big fish are able to find suitable spots around the area as the discharge changes. Strong discharges might erode suitable sediments for brown trout around the study area as fine sediment deposition from low discharge only occurs on a small area. Irregular flooding due to climate change might risk the success of spawning and the survival of the spawn during winter.

Key words: flow dynamics, fluvial geomorphology, brown trout, HEC-RAS, hydraulic modelling, habitat modelling

Sisällysluettelo

1. Johdanto	7
2. Teoreettinen viitekehys.....	9
2.1 Virtavesiympäristöt.....	9
2.1.1 Virtausdynamiikka	9
2.1.2 Virtaavan veden muokkaava vaikutus.....	13
2.1.3 Virtavesiekologia	16
2.2 Taimen.....	18
2.2.1 Lajipiirteet ja elinkierto	18
2.2.2 Käyttäytyminen ja elinympäristövaatimukset	20
2.3 Virtavesiympäristöjen mittausmenetelmät	23
2.3.1 Virtausolosuhteiden mittaaminen	23
2.3.3 Uoman geometrian mittaaminen	27
2.3.4 Uoman substraattikoostumuksen mittaaminen.....	29
2.4 Virtavesiympäristöjen hydraulinen mallinnus	30
3. Tutkimusalue.....	34
3.1 Eurajoki	34
3.2 Kauttuankoski	36
4. Aineistot ja menetelmät	42
4.1 Tutkimusasetelma, kenttämittaukset ja valmiit aineistot	42
4.1.1 Tutkimusasetelma	42
4.1.2 Geometria	42
4.1.3 Virtausolosuhteet.....	43
4.1.4 Lämpötila	44
4.1.5 Substraattikoostumus	46
4.2 Kauttuankosken hydraulinen mallinnus	49
4.2.1 HEC-RAS ja mallinnuksen lähtökohdat	49
4.2.2 Mallin rakentamisen vaiheet	49
4.3. Mallin tulosten analyysi	52
4.3.1 Sedimentin liikkeellelähtö- ja kasautumisalueiden määrittäminen	52
4.3.1 Elinympäristön soveltuvuuden määrittäminen	53
5. Tulokset	55
5.1 Lämpötilaolosuhteet.....	55

5.2 Pohjan substraattikoostumus	61
5.3 Mallinnetut virtaamatilanteet	62
5.3.1 Virtausolosuhteet	62
5.3.2 Sedimentin liikkeellelähtö ja kasautuminen	67
5.4. Elinympäristön soveltuvuusindeksi	73
6. Tulosten tarkastelu	74
6.1 Lämpötilaolosuhteet	74
6.2 Pohjan substraattikoostumus	75
6.3 Virtausolosuhteet sekä sedimentin liikkeellelähtö ja kasautuminen	76
6.4 Kauttuankosken soveltuminen taimenen elinympäristöksi	78
7. Johtopäätökset	80
Kiitokset	82
Lähdeluettelo	83
Liitteet	90

1. Johdanto

Joet ovat luonnonympäristöjä, joissa vesi virtaa painovoiman vaikutuksesta uomassa kohti alajuoksua (Chow 1959). Jokiympäristöt ovat monimutkaisia kokonaisuuksia ja niiden prosesseihin vaikuttavat useat tekijät. Uomassa virtaavaan veden määrään eli virtaamaan vaikuttavat vuodenajat, alueellinen ilmasto sekä valuma-alueen koko ja tyyppi. Lisäksi uoman muoto, pohjan materiaali ja sen koostumus sekä kasvillisuus vaikuttavat virtauskäyttäytymiseen (Charlton 2008). Virtaava vesi muokkaa ympäristöään kuluttamalla uomaa, ja kuljettamalla sekä kasaamalla sedimenttipartikkeleita. Virtavesiympäristöt ovat jatkuvassa muutoksessa, jossa virtaavan veden määrä, uoman geometria ja karkeus säätelevät virtausolosuhteita. Vastaavasti virtausolosuhteet muotoilevat uoman substraattikoostumusta sekä geometriaa.

Virtaama, vesisyvyys ja virtausnopeus dynaamisine muutoksineen sekä vaihteleva geometria muodostavat hallitsevat erikoispiirteet virtavesiekologialle luoden erilaisia mikroympäristöjä jokiympäristöissä eläville eliöille (Allan & Castillo 2007). Ominainen piirre virtavesiekosysteemille on yläjuoksulta alajuoksulle virtaava vesi, joka kuljettaa mukanaan materiaalia kuten sedimenttiä ja ravinteita. Virtavesieliöt elävät ympäristönsä olosuhteiden alituisessa vaikutuksessa ja asettuvat olosuhteiltaan sopivimpiin mikroympäristöihin. Eliöiden esiintymistä sääteleviä tärkeimpiä abioottisia tekijöitä virtavesiekosysteemeissä ovat virtausolosuhteet, pohjan geomorfologia ja substraattikoostumus sekä veden lämpötila.

Taimen on eurooppalainen lohikalalaji. Suomessa meritaimen ja eteläiset taimenkannat (*Salmo trutta*) on luokiteltu erittäin uhanalaisiksi (Hyvärinen ym. 2018). Lajin uhanalaisuuden taustalla ovat useat ihmistoiminnan vaikutukset, kuten elinympäristöjä pirstaloiva patoaminen, jokien perkaukset ja muu vesirakentaminen sekä vesistökuormitus (Jonsson & Jonsson 2011). Vaelluskalana taimenen luontaiseen elinkiertoonsa kuuluu vaellus mereen tai järveen, jossa se viettää aikuisvaiheensa. Lisääntymisaikanaan taimenet palaavat kutemaan synnyinseuduilleen virtavesiin, joissa poikaset kehittyvät pari vuotta ennen lähtemistään ensimmäiselle vaellukselle. Kaloja, jotka eivät jostain syystä pääse tekemään vaellusta, vaan elävät koko elinikänsä lähellä synnyinpuroaan, voidaan nimittää tarkemmin purotaimeniksi (*Salmo trutta fario*).

Selviytyäkseen elinympäristössään on taimenella olosuhteisiin liittyviä vaatimuksia, jotka vaihtelevat kalan eri ikävaiheiden aikana (Jonsson & Jonsson 2011). Selviytymisen kannalta erityisen herkkiä ikävaiheita ovat mäti ja pienet poikaset (Louhi & Mäki-Petäys 2003). Taimenen elin- ja lisääntymisalueilla sedimentin raekoon tulee olla karkeaa soraa ja lämpötilan on säilyttävä alle noin 25 celsiusasteen (Huusko ym. 2003; Elliot & Elliot 2010). Vesisyvyydeltään erilaisia ympäristöjä on oltava tarjolla eri ikäisille yksilöille vaihdellen noin 20 senttimetristä yli puoleen metriin (Louhi ym. 2008). Ikäluokat suosivat myös keskenään erilaisia virtausnopeuksia vaihdellen kymmenestä viiteenkymmeneen senttimetriin sekunnissa.

Kauttuankoski on Lounais-Suomessa sijaitsevan Eurajoen yläosassa oleva koskialue. Joessa elää kosken alueella lisääntyvä geneettisesti eriytynyt ja siten arvokas taimenkanta, jonka elinaluetta rajaa alajuoksulla Eurakosken voimalaitospato ja yläjuoksulla Kauttuan säännöstelypato (Aaltonen

2014). Koskialue aiotaan kunnostaa tähdäten parantamaan taimenkannan lisääntymis- ja selviytymismahdollisuuksia.

Eurajoen yläjuoksulta ja etenkin Kauttuankosken lämpötilaolosuhteista ei ole olemassa kattavaa aineistoa, josta selviäisi lämpötilan alueellinen jakautuminen koskialueen erilaisissa ympäristöissä. Lisäksi ei tiedetä, muuttuuko Pyhäjärvestä laskevan veden lämpötila mahdollisesti kosken läpi kulkiessaan esimerkiksi tietyssä vuodenaikana tai virtaamatilanteessa. Aluetta ei olla toistaiseksi hydraulisesti mallinnettu, minkä pohjalta voitaisiin selvittää alueen olosuhteita siellä elävien lajien kannalta. Tulevan virtavesikunnostuksen kannalta on lisäksi oleellista selvittää mahdollisten taimenen lisääntymisalueiden pohjan substraattikoostumus sekä verrata sitä sedimentinkuljetuksen kannalta olennaisiin virtaamiin ja virtausnopeuksiin koskessa.

Tutkimuksen päätavoitteena on selvittää Eurajoen Kauttuankosken fluviaaligeomorfologinen nykytilanne taimenen elinolosuhteiden kannalta. Huomio keskitetään taimenen selviytymisen ja lisääntymisen kannalta olennaisten virtaus- ja lämpötilaolosuhteiden sekä pohjan geometrian ja substraattikoostumuksen tarkasteluun.

Osatavoitteina on tutkia koskialueella:

- alueellisesti ja eri vuodenaikoina muuttuvaa veden lämpötilaa
- pohjan substraattien koostumusta ja jakautumista
- geometrian, vuodenaikojen sekä juoksutuksen vaikutusta virtausolosuhteisiin sekä sedimentin liikkeellelähtoon ja kasautumiseen

Tutkimuksen tavoitteista on johdettu seuraavat tutkimuskysymykset:

1. Millainen fluviaaliympäristö Kauttuankoski on erityisesti taimenen elinolosuhteiden kannalta?
2. Millaiset ovat kosken lämpötilaolosuhteet?
3. Millainen on kosken pohjan substraattikoostumus?
4. Millaiset virtausolosuhteet sekä sedimentin liikkeellelähdon ja kasautumisen olosuhteet ovat koskessa eri virtaamatilanteissa?

2. Teoreettinen viitekehys

2.1 Virtavesiympäristöt

2.1.1 Virtausdynamiikka

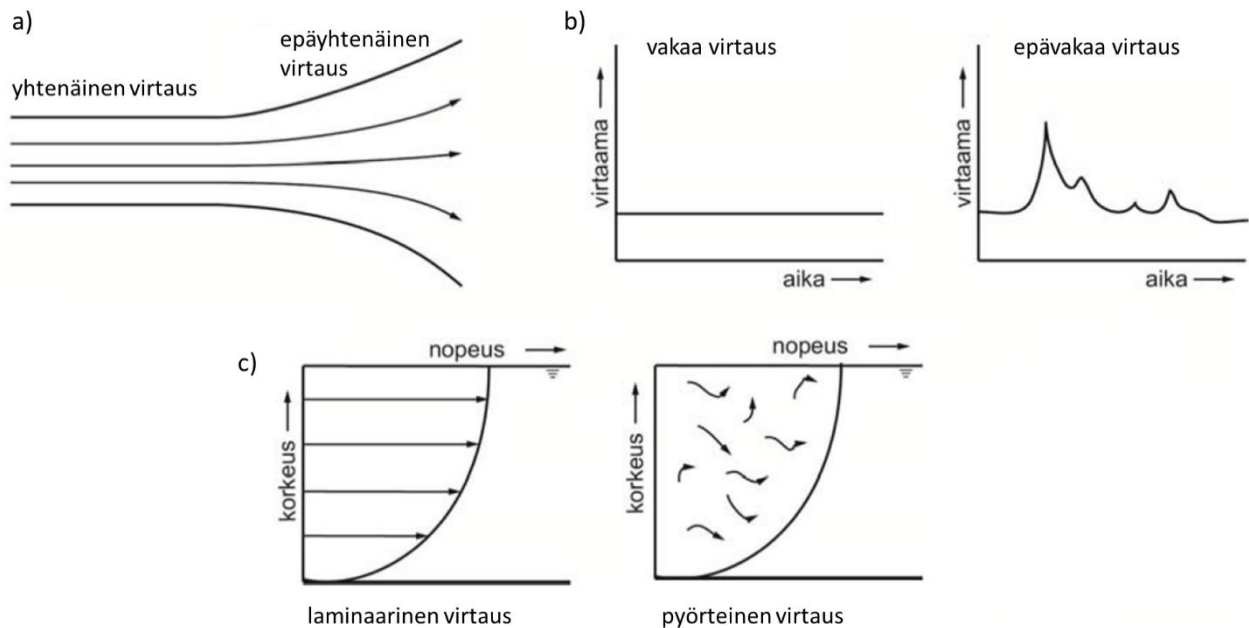
Veden virtauksen aiheuttaa painovoima, jonka vaikutuksesta vesi liikkuu kaltevassa uomassa, kuten joessa, alaspäin yläjuoksulta kohti alajuoksua (Chow 1959). Virtausta vastustaa uoman reunojen ja pohjan materiaalista aiheutuva kitka (Knighton 1984). Näiden muuttujien suhde toisiinsa määrittelee, millä tapaa virtaava vesi käyttäytyy ja muokkaa uomaansa. Virtauksen nopeuteen vaikuttavat uoman poikkileikkauksen koko ja sen läpi kulkevan veden määrä, kun taas suuntaan vaikuttaa uoman muoto eli geometria (Akan 2006). Luonnon virtavesiympäristöissä virtausolosuhteet ovat monimutkaisia kokonaisuuksia, joihin vaikuttavat yhtäaikaaisesti monet tekijät, kuten uoman pohjan muoto ja materiaali sekä kasvillisuus. Teoreettisesti veden virtaus avoimessa uomassa voidaan luokitella neljään kriteeriin perustuen kahdeksaan virtaustyyppiin (taulukko 1).

Taulukko 1. Virtausta avoimessa uomassa luokitellaan sen ominaisuuksien perusteella (Knighton 1984: 48, mukaillen).

Virtaustyyppi	Kriteeri
yhtenäinen/ epäyhtenäinen	paikassa tasainen/ muuttuva virtausnopeus
vakaa/ epävakaa	ajassa tasainen/ muuttuva virtausnopeus
laminaarinen/ pyörteinen	yhdensuuntainen/ sekoittuva virtaus Reynoldsin luku < 500 / > 2500
verkasvirtaus/ kiitovirtaus	"häiriövirtaus" voi/ ei voi edetä vastavirtaan Frouden luku < 1 / > 1

Virtauksen pysyvyys tai muuttuvuus paikan ja ajan suhteen jakavat virtauksen yhtenäiseen ja epäyhtenäiseen sekä vakaaseen ja epävakaaseen virtaustyyppiin (Knighton 1984: 48). Virtaus on yhtenäistä (*engl. uniform*), jos tietyssä paikassa virtausnopeus ei muutu ja epäyhtenäistä (*engl. non-uniform*) silloin, kun virtausnopeus tietyssä paikassa muuttuu. Virtaus voi olla yhtenäistä vain, kun painovoima ja kitka ovat tasapainossa (Knighton 1998: 96). Luonnonuomille ominainen epäyhtenäinen virtaus saattaa muuttua asteittain tai nopeasti uoman geometrian muuttuessa.

Vakaata ja epävakaata virtaustyyppiä erottaa, muuttuuko virtausnopeus tietyssä paikassa ajan suhteen (Knighton 1984: 48). Vakaan (*engl. steady*) virtauksen nopeuden pysyessä samana ajasta riippumatta on epävakaan (*engl. unsteady*) virtauksen nopeudessa ajallisia muutoksia (kuva 1). Esimerkkinä epävakaasta virtauksesta tulvatilanteessa kasvava vesimäärä aiheuttaa kasvun virtaamassa ja virtausnopeudessa. Luonnonuomille on yleistä virtauksen epäyhtenäisyys ja epävakaasus, ja siksi niitä on haastavaa kuvata yksinkertaisilla teoreettisilla malleilla, niiden usein perustuessa yhtenäiseen ja vakaaseen virtaukseen (Knighton 1998).



Kuva 1. Virtaustyyppit. a) yhtenäinen ja epäyhtenäinen virtaus b) vakaa ja epävaka virtaus ja c) laminaarinen ja pyörteinen virtaus (Knighton 1998: 98; Charlton 2008: 77, mukaillen).

Virtauksen etenemistä kuvataan luokittelupareilla laminaarinen-pyörteinen ja verkasvirtaus-kiitovirtaus. Laminaarisessa (*engl. laminar*) virtauksessa veden liike etenee koko vesipatsaan mitalta tiettyä liikerataa noudattaen ilman, että vesikerrokset sekoittuisivat keskenään (Knighton 1984: 48). Eri kerroksien virtausnopeuksissa on kuitenkin eroa uoman pohjan ja reunojen kitkan hidastaessa virtausta niiden läheisyydessä. Virtausnopeuden kasvaessa muuttuu virtauksen tyyppi pyörteiseksi eli turbulenteiksi (*engl. turbulent*), jolloin virtauksen monimutkainen ja epätasainen liikerata mahdollistaa eri vesikerrosten sekoittumisen (Charlton 2008: 81).

Laminaarisen ja pyörteisen virtaustyyppin määrittämiseksi käytetään Reynoldsin lukua (Knighton 1984: 48). Yksikötön luku määrittää virtauksen inertiaivoimien, joita ovat virtausnopeus, hydraulinen säde ja tiheys, sekä molekulaarisen viskositeetin välisestä suhteesta. Reynoldsin luku (Re) määritellään seuraavasti:

$$Re = \frac{vR\rho}{\mu}$$

kaava 1

, jossa v = virtausnopeus

R = hydraulinen säde

ρ = tiheys

μ = molekulaarinen viskositeetti (Knighton 1984: 48)

Reynoldsin luvun ollessa alle 500 on virtaus laminaarista, ja luvun ollessa yli 2500 on virtaus pyörteistä. Edellä mainittujen lukujen välisellä alueella virtaus on epävakaata muttei täysin laminaarista tai turbulenttista. Luonnollisissa virtavesiympäristöissä pyörteisyyttä aiheuttavat uoman muodot ja luonnolliset esteet, kuten lohkareet tai uomassa oleva kasvillisuus. Pyörteisiä, muusta virtauksesta poikkeavia, virtauksia syntyy esteiden läheisiin vesikerroksiin (*engl. flow separation*) (Charlton 2008: 81). Esteen alavirran puolelle muodostuvaa takaisinvirtauspyörrettä kutsutaan yleisesti akanvirraksi (*engl. recirculation eddy*).

Onko virtaus verkkavirtausta (*engl. subcritical*) vai kiitovirtausta (*engl. supercritical*) riippuu siitä, voiko virtaus edetä vastavirran suuntaan. Ero verkkavirtauksen ja kiitovirtauksen välille määritellään Frouden luvulla, joka kuvaa inertian ja putoamiskiihtyvyyden välistä suhdetta. Luku kuvaa painovoiman vaikutusta virtaukseen ja sen luonteeseen (Chanson 2004; Knighton 1984: 48). Frouden luku (*Fr*) määritellään seuraavasti:

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gL}}$$

kaava 2

, jossa *v* = virtausnopeus

g = painovoiman kiihtyvyyys

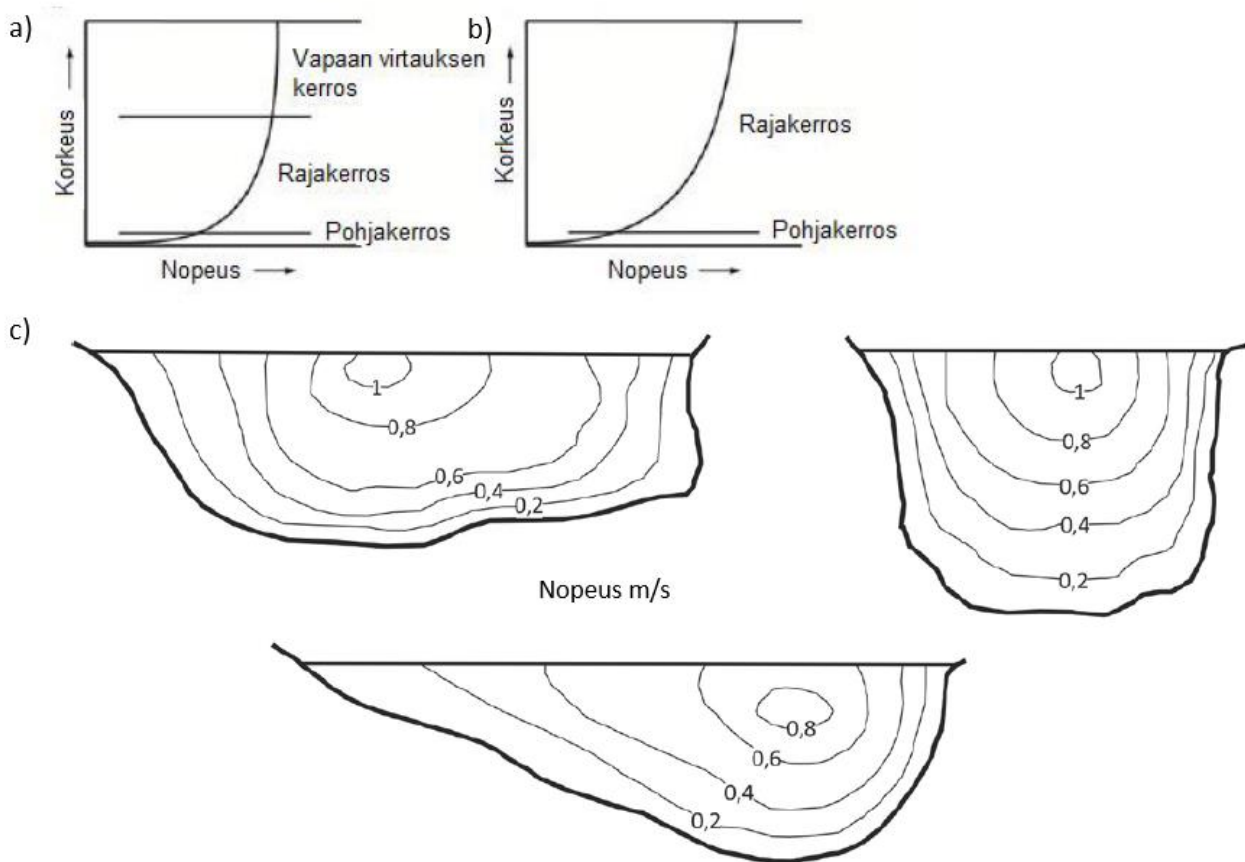
L = karakteristinen pituus, eli hydraulinen säde (Knighton 1984: 48)

Frouden luvun ollessa pienempi kuin 1 on kyseessä verkkavirtaus ja luvun ollessa suurempi kuin 1 on kyseessä kiitovirtaus. Toisin sanoen virtaus on verkasta silloin, kun painovoima vaikuttaa virtaukseen inertiaivoimia enemmän. Kiitovirtauksessa inertian vaikutus on taas painovoiman vaikutusta suurempi ja vesi virtaa uomassa voimakkaalla nopeudella. Kiitovirtaus on luonnossa verkkavirtausta huomattavasti harvinaisempaa, sillä sen edellyttämät ehdot toteutuvat vain uoman ollessa huomattavan kalteva. Charltonin (2008: 81) mukaan virtaus voi muuttua verkkaasta kiitovirtaukseen esimerkiksi äkillisen uoman jyrkkenemisen myötä, jolloin virtausnopeus kasvaa ja kaltevuuden muutoskohdassa veden syvyys pienenee aiheuttaen hydraulisen pudotuksen (*engl. hydraulic drop*). Hydraulinen nousu (*engl. hydraulic jump*) muodostuu kun kiitovirtaus kaltevuuden pientymisen takia muuttuu verkkavirtaukseksi ja virtauksen hidastuessa veden syvyys kasvaa.

Jokiuomassa vesi virtaa pääsääntöisesti uoman suuntaisesti, mitä kutsutaan primäärivirtaukseksi (*engl. primary flow*) (Charlton 2008). Sekundääriseksi virtaukseksi (*engl. secondary flow*) kutsutaan primäärivirtaukseen nähden pysty- ja poikkisuuntaista virtausta, joka on tavallista luonnonuomissa. Kitkan vaikutuksesta uomaan muodostuu virtausnopeudeltaan erilaisia kerroksia. Veden liike on tavallisesti hitainta lähellä uoman pohjaa ja reunoja, kun taas lähellä pintaa uoman keskiosassa vesi virtaa yleensä nopeimmin. Virtausnopeus vaihtelee mittakaavan mukaan neljässä eri ulottuvuudessa (Knighton 1984: 49):

1. Etäisyytenä uoman pohjasta, pohjanläheisimmän virtauskerroksen virtausnopeuden ollessa nolla, mutta kasvaen pystysuoraan pohjan etäisyyden kasvaessa (kuva 2). Virtausnopeuden kasvu tapahtuu rajakerroksessa, jossa pohjan kitkan vaikutus hidastaa virtausta. Rajakerroksen yläpuolella vesi virtaa vapaasti, ilman kitkan hidastavaa vaikutusta.
2. Uoman poikkileikkauksessa, jossa uoman reunojen aiheuttama kitka vaikuttaa virtaukseen, virtausnopeuden kasvaessa teoreettisesti kohti poikkileikkauksen keskipistettä. Nopeimman virtauksen piste poikkileikkauksessa on riippuvainen uoman geometriasta ja virtauksen suunnasta uomassa. Matalissa uomissa suuri osa vedestä on kosketuksissa uoman reunoihin, minkä takia kitkan vaikutus on niissä voimakasta.
3. Alavirran suuntaan, uoman pohjan sedimentin karkeuden ja siten virtaavan veden liikettä vastustavan voiman, vastuksen, pienentyessä sekä veden hydraulisen tehokkuuden (*engl. hydraulic efficiency*) kasvaessa kohti alajuoksua. Seurauksena alajuoksulla virtausnopeus saattaa kasvaa yläjuoksun virtausnopeutta suuremmaksi

Ajassa, seurauksena hetkittäisistä vaihteluista pyörteisyydessä. Lyhytkestoisten vaihteluiden lisäksi luonnonuomien virtausnopeudessa tapahtuu virtaaman vaihteluista johtuvia jaksoittaisia, kuten päivittäisiä tai vuosittaisia, vaihteluita.



Kuva 2. Virtausnopeuden jakautuminen a) etäisyytenä pohjasta syvässä uomassa, jossa pohjan kitka ei hidasta pinnan virtausnopeutta, b) matalassa uomassa, jossa kitka hidastaa virtausta koko vesipatsaan mitalta, ja c) geometrialtaan erilaisissa poikkileikkauksissa (Knighton 1998; Charlton 2008, mukailten).

Uoman pohjan ja reunojen kitkan vaikutuksesta niitä lähellä olevien vesimolekyylien liike hidastuu ja uoman keskelle lähelle pintaa muodostuu nopean virtauksen keskus (*engl. high velocity core*). Kitkan voima on sitä heikompi, mitä pienempi määrä uoman vedestä on reunoihin tai pohjaan kosketuksessa (Kolev 2015). Ilmiötä kuvataan hydraulisella tehokkuudella, jota käytetään osoittamaan, miten paljon uoma kykenee kuljettamaan vettä eteenpäin.

Virtauksen jatkuvuus -teoria (*engl. flow continuity*) kuvaa jatkuvan tasaisen virtaaman käyttäytymistä poikkileikkausaltaan erilaisissa uoman kodissa (Charlton 2008: 76–77). Sen mukaisesti virtaaman pysyessä samana, suurempi virtausnopeus esiintyy siinä kohdassa uomaa, jossa poikkileikkausala on suurempi (kuva 3). Uoman virtaama voidaan laskea virtausnopeuden ja poikkileikkausalan perusteella seuraavasti:

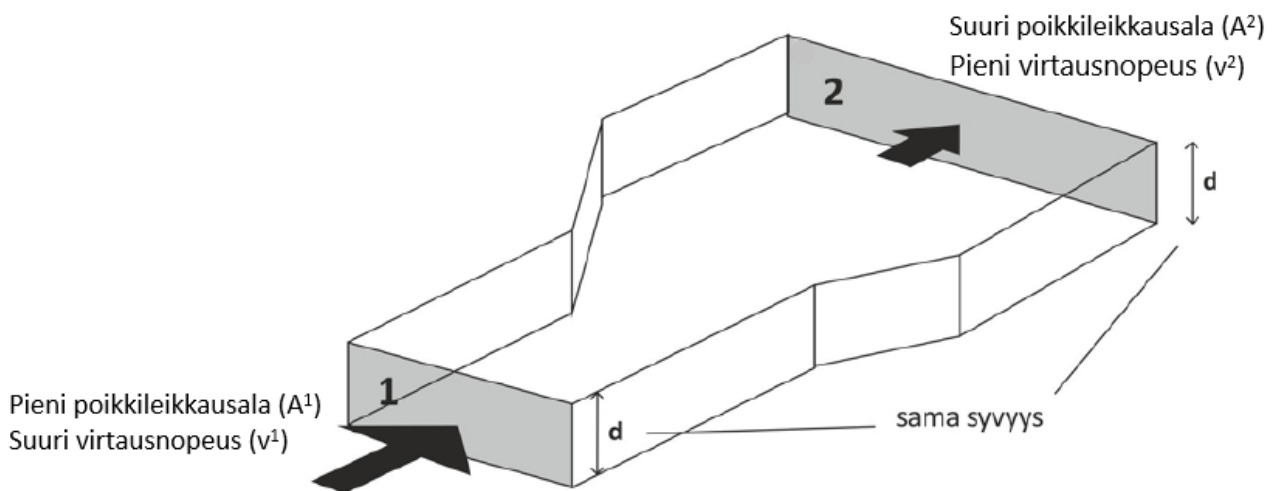
$$Q = v^1 A^1 = v^2 A^2$$

kaava 3

, jossa Q = virtaama

v^1 ja v^2 = keskiarvotetut virtausnopeudet poikkileikkauksissa 1 ja 2

A^1 ja A^2 = poikkileikkauksien 1 ja 2 pinta-alat (Charlton 2008: 76–77) (kuva 3).



Virtaama kohdassa 1 = virtaama kohdassa 2

Kuva 3. Virtauksen jatkuvuus -teorian mukaan virtaaman ollessa sama eri kohdissa uomaa (1 ja 2), suurempi virtausnopeus esiintyy kodassa, jossa on pienempi poikkileikkausala (Charlton 2008, mukaillen).

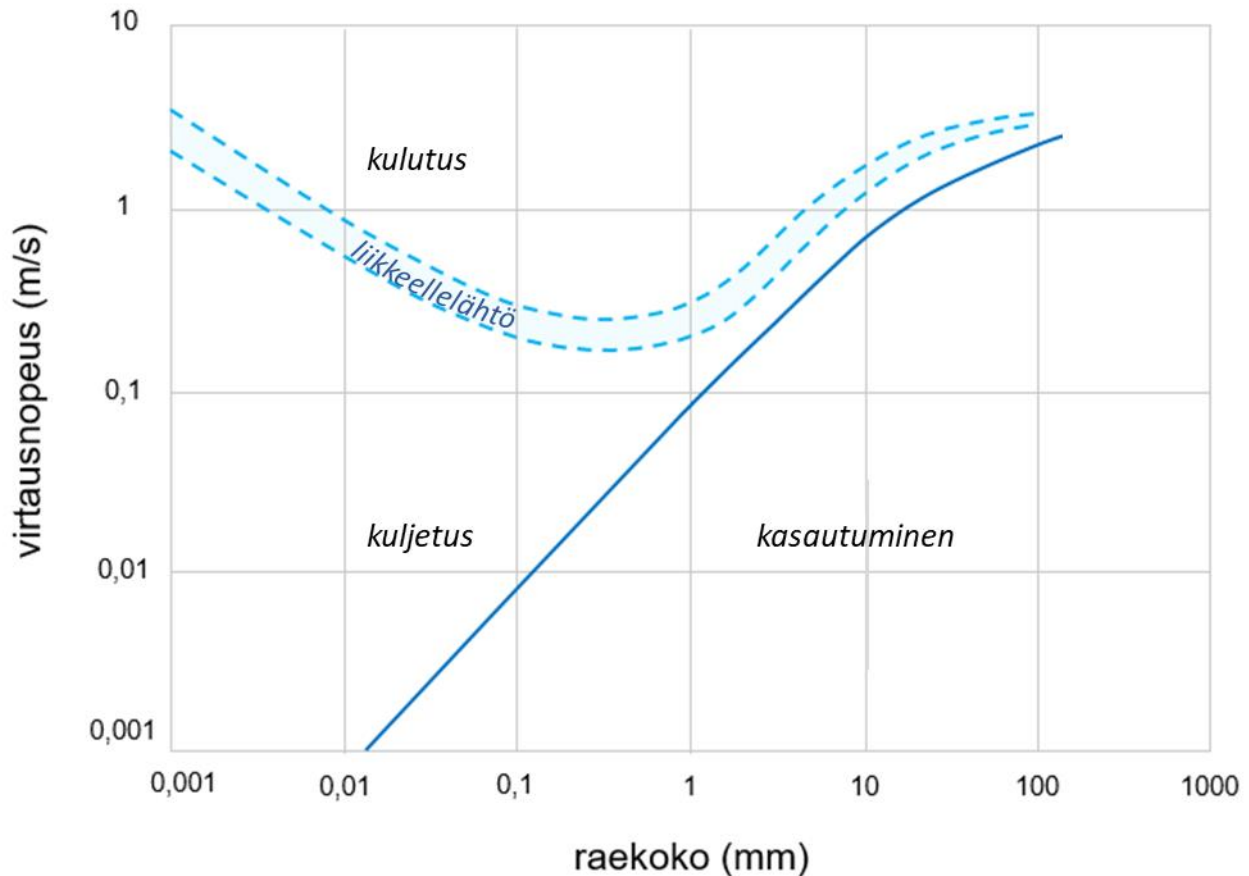
2.1.2 Virtaavan veden muokkaava vaikutus

Jokiuoma on jatkuvassa muutoksessa virtaavan veden muokatessa sen muotoa (Knighton 1998). Veden liike kuluttaa, kuljettaa ja kasaa uoman pohjan sekä reunojen sedimenttiainesta. Muutoksen nopeus ja laatu määräytyvät pääosin sedimentin raekoon ja määrän sekä uomassa virtaavan veden määrän ja nopeuden mukaan (Charlton 2008). Virtaavan veden muokkaavaa vaikutusta voidaan

tarkastella eri mittakaavoilla ajallisesti ja alueellisesti mittakaavan vaihdellessa yhden partikkelin liikkumisesta koko uomaa koskeviin suuriin muutoksiin. Paikallisia virtausta ohjailevia ja täten uoman muutokseen vaikuttavia ominaisuuksia ovat uoman syvyys, leveys, kaltevuus ja virtauksen nopeus (Leopold & Wolman 1983). Topografian vaihtelevuus tai esteet uomassa vaikuttavat virtauksen rakenteeseen ohjailemalla uoman sisäisiä virtauksen kulkureittejä, jotka jälleen ohjaavat muutosta.

Virtaava vesi liikuttaa sedimenttipartikkeleita perustuen kahteen voimaan (Knighton 1998). Partikkelia virtauksen suuntaan liikuttava vetovoima muodostuu partikkelin ja sen ohi virtaavan veden välille muodostuvasta kitkasta. Vetovoiman suuruus on suoraan verrannollinen virtausnopeuteen. Vesipatsaan vertikaalisten kerrosten nopeuseroista muodostuu partikkeliin kohdistuva likimäärin ylöspäin suuntautuva nostovoima. Nostovoima on seurausta vesipatsaiden välille muodostuvasta painegradientista, joka on sitä suurempi, mitä voimakkaampi ero on eri vesikerrosten virtausnopeudessa (Bernoulli 1738). Painegradientin pyrkimys tasapainottua aiheuttaa uoman pohjalle noston.

Partikkelit liikkuvat virtaveden mukana vierien, saltaatiassa tai suspensiossa (Taylor 2012: 247). Vierivät partikkelit liikkuvat virtaavan veden työntäminä, kun taas saltaatiassa partikkelit liikkuvat hyppäyksittäin osuen välillä pohjaan. Suspendoituneet partikkelit liikkuvat vesipatsaassa osumatta pohjaan. Sedimentin irtoamista uoman pohjasta, kulkeutumista virran mukana ja laskeutumista takaisin pohjaan kuvataan Hjulströmin diagrammilla (kuva 4) (Hjulström 1935). Diagrammissa kullekin partikkelikoolle on määritelty ominaiset kulumis- ja kasautumisnopeudet. Hjulström (1935) käyttää kaaviossaan syvyyskeskiarvotettua virtausnopeutta, jonka on arvioitu olevan noin 40 % suurempi kuin pohjanläheinen virtausnopeus. Aines liikkuu silloin kun sitä liikuttamaan pyrkivä virtauksen voima on suurempi kuin aineesta paikallaan pitävät voimat (Charlton 2008). Noin 0,2–0,7 mm raekokoiset partikkelit vaativat pohjasta irrotukseen matalimman virtauksen. Tätä suurempien partikkelien kuluminen edellyttää suuremman massan takia korkeampaa virtausnopeutta. Pienemmän raekoon partikkelit ovat puolestaan kevyempiä, mutta niiden välille muodostuva partikkeleja yhteen sitova koheesio lisää kulutusta vastustavia voimia.



Kuva 4. Hjulströmin diagrammi kuvaa sedimentin kulutusta, liikkeellelähtöä, kuljetusta ja kasautumista veden keskiarvoitetun virtausnopeuden ja raekoon suhteena. Virtausnopeus, jolla tietyn kokoinen partikkeli irtaapohjasta, esitetään nopeuksien välisenä alueena, sillä irtaamista monimutkaistavat vaihtelevat virtausolosuhteet. Virtausnopeuden pienentyessä vesi ei enää kykene tietyn kokoinen partikkelin kuljettamiseen, jolloin partikkeli kasautuu uoman pohjalle (Hjulström 1935, mukailen).

Vedessä vaikuttavia virtausvoimia ovat leikkausjännitys (*engl. shear stress*) ja kulutusvoima (*engl. stream power*), joista kulutusvoiman määritelmä ottaa huomioon myös virtausnopeuden (Knighton 1998). Leikkausjännityksellä kuvataan veden syvyyden ja kaltevuuden aiheuttamaa uomaan kohdistuvaa jännitystä (Charlton 2008: 69). Pohjaan kohdistuu sen ylitse virtaavaan virtauksen suuntainen jännitys, joka saa aikaan sedimentin irtaamisen ja liikkumisen sekä muutoksen uoman geometriassa. Pohjan ominaisleikkausjännitys (*engl. specific shear stress*) (τ) määritellään seuraavasti:

$$\tau = \rho g D S$$

kaava 4

, jossa ρ = veden ominaistiheys 1000 kg/m^3

g = maan vetovoiman aiheuttama putoamiskiihtyvyys $9,81 \text{ m/s}^2$

D = veden syvyys

S = vedenpinnan kaltevuus (Charlton 2008: 70)

Kulutusvoima kuvaa energiaa, joka häviää uoman pohjan vesimassasta sedimentinkuljetukseen (Yang 1977). Energiahäviötä pinta-alan suhteen mitataan ominaiskulutusvoimalla (*engl. specific stream power*) (ω), joka määritellään seuraavasti:

$$\omega = \rho g D S u$$

kaava 5

, jossa ρ = veden ominaistiheys 1000 kg/m^3

g = maan vetovoiman aiheuttama putoamiskiihtyvyys $9,81 \text{ m/s}^2$

D = veden syvyys

S = vedenpinnan kaltevuus

u = veden virtausnopeus m/s (Bagnold 1966)

Kaavalla voidaan laskea sedimentin kuljetukseen käytettävä kulutusvoima eri virtausnopeuksissa ja syvyyksissä ja näin määritellä virtaavan veden kyky kuluttaa uoman pohjaa. Pohjan raekoko ja uoman morfologian ja vedenpinnan kaltevuuden määrittelemät kulutusvoimat jakautuvat uomassa epätasaisesti, mistä johtuen uoman sisäinen muutoskaan ei ole tasaista. Lisäksi paikallisen eroosion voimakkuuteen vaikuttaa kulutusvoiman ajallinen kesto, joka on riippuvainen virtaaman vaihteluista (Larsen ym. 2007).

2.1.3 Virtavesiekologia

Ekosysteemillä tarkoitetaan maapallolla esiintyvää biologista yksikköä tai yhteisöä, kattaen kaikki sen rajojen sisällä esiintyvät organismit ja elottomat eli abioottiset tekijät (Rowe 1961). Ekosysteemiajattelussa maapallo koostuu toisiinsa linkittyneiden ekosysteemien verkosta (Bailey 2009). Ekosysteemin sisällä eliöryhmät elävät keskinäisessä vuorovaikutuksessa ja ovat alttiita elottoman luonnon vaikutuksille. Virtavesien ekologialle on ominaista virtaavasta vedestä ja jokisysteemien muodoista aiheutuva heterogeenisyys sekä alueelliset erityispiirteet, joista leimallisimpia ovat jatkuva veden liike sekä materiaalin kulutus, kuljetus ja kasautuminen (Lovett ym. 2005). Virtavesisysteemi voidaan nähdä kokonaisuutena, joka on jaettavissa hierarkkisiin yksikköihin (Frissell ym. 1986). Tällöin hierarkkisesti ylin yksikkö on uomaverkosto ja alimpana on pienikokoinen, esimerkiksi yhden sammaloituneen lohikareen tai hienosedimenttialueen ympärille muodostunut uniikki mikrohabitaattisysteemi.

Erilaisia virtavesiekosysteemejä on runsaasti seurauksena systeemin prosesseihin vaikuttavien tekijöiden vaihtelusta (Allan & Castillo 2007). Abioottiset tekijät, kuten uoman geometria ja virtauskäyttäytyminen aiheuttavat alueellista vaihtelua luoden myös erilaisia mikroympäristöjä niille ominaisine piirteineen. Kussakin ympäristössä pärjäävät sen olosuhteita parhaiten sietävät

lajit. Virtavesiekosysteemeissä elävien eliöiden ollessa välittömässä vuorovaikutuksessa ympäristön fyysisten ja kemiallisten prosessien kanssa ovat ne myös alttiita niissä tapahtuville ajallisille muutoksille (Lovett ym. 2005). Ajalliset muutokset esimerkiksi virtaamassa ovat usein säännöllisiä (esim. vuodenajoittaiset ja vuorokausittaiset vaihtelut), mutta saattavat olla myös epäsäännöllisiä. Lisäksi ekosysteemien toimintaa määrittelee virtausolosuhteisiin vuorovaikutuksessa ja dynaamisessa muutoksessa oleva uoman geometria.

Virtavesiympäristöissä pohjan substraattien eli partikkelien koostumus tietyssä ekosysteemissä voi olla homogeeninen, mutta tavallisempaa on niiden heterogeenisyys esimerkiksi koon puolesta (Allan & Castillo 2007). Partikkelit voivat olla paikallaan uoman pohjassa tai seinämissä tai virtauksen vaikutuksesta ne voivat irrota, kulkeutua virran mukana ja kasautua muokaten uoman geometrista muotoa. Ekologian näkökulmasta on kiinnostavaa, millä tavoin partikkelien koko sekä sedimentin koostumus ja tekstuuri uoman pohjalla ja reunoissa vaikuttavat habitaattien muodostumiseen. Tekijät määrittelevät esimerkiksi sen, pystyykö eliö kiinnittymään tai kaivautumaan uoman pohjaan ja seinämiin. Sedimentin tekstuuri usein myös määrittelee ravinteiden varastoitumista sekä veden liikkeitä uoman läheisissä maakerroksissa (Lovett ym. 2005). Lisäksi partikkelien väliset raot materiaalisissa muodostavat elinympäristöjä joillekin organismeille. Raoissa kulkevan veden sekä sen kuljettaman hapen ja ravinteiden määrä ovat usein kriittisiä tekijöitä lajien esiintymisen kannalta.

Lämpötila on monelle eliölle selviytymisen kannalta kriittinen aineenvaihduntaa säätelevä tekijä, joka määrittelee, voiko eliö elää kussakin ympäristössä (Hugget 2004). Lämpötilan ollessa usean organismin toimintaan ja selviämiseen vaikuttava kriittinen tekijä aiheuttavat sen muutokset runsaasti epäsuoria vaikutuksia ekosysteemin prosesseihin ja niiden ketjuihin, kuten ravinteiden liikkeisiin (Allan & Castillo 2007). Lämpötilan muutokset ja niiden vaikutukset ovat usein ajallisesti melko säännöllisiä, kuten vuorokausittaisia tai vuodenajoittaisia. Poikkeuksena pohjavesivaikutuksen alaisissa uomissa lämpötila saattaa säilyä melko tasaisesti matalana. Ajallisten muutosten lisäksi lämpötilassa esiintyy kuitenkin myös alueellista vaihtelua seurauksena ympäristöjen ominaisuuksista ja piirteistä, joita virtavesiympäristöissä ovat esimerkiksi uoman geometria, virtauskäyttäytyminen ja kasvillisuuden varjostava vaikutus.

Virtavesiekosysteemeille on ominaista niiden voimakas ekologinen ja hydraulinen kytkeytyvyys sekä hierarkkisten yksiköiden välinen vuorovaikutus (Frissell ym. 1986; Ward & Stanford 1995). Vuorovaikutusta yksiköiden välillä tapahtuu sekä ylä- että alavirran suuntaan. Virtavesiympäristöissä sedimenttipartikkelit ja orgaaninen aines kulkeutuvat yläjuoksulta kohti alajuoksua, ja esimerkiksi ravinteiden liikkeet ovat pitkälti virtauksen säätelemiä (Allan & Castillo 2007). Toisaalta yhdessä kohtaa virtavesisysteemiä tapahtuva prosessi, kuten uoman patoaminen, vaikuttaa hierarkkisesti myös ylöspäin. Virtavesieliöt ovat sopeutuneet voimakkaasta kytkeytyvyydestä johtuviin olosuhteisiin sekä hyötyvät siitä esimerkiksi valitessaan elinympäristöjään sekä liikkuaan eri ympäristöjen välillä elinkaarensa aikana. Esimerkiksi ihmisen toiminnasta seurannut heikko hydraulinen kytkeytyvyys on yleensä yhteydessä virtavesiympäristöjen ekologisen tilan huonontumiseen, ja kytkeytyvyyden astetta voidaankin pitää eräänlaisena ekologisen tilan indikaattorina.

Ihmisen vaikutukset ovat muokanneet virtavesien ekologiaa muuttamalla niiden kemiallisia ja fysikaalisia piirteitä sekä eliöstön rakennetta (Allan & Castillo 2007). Tätä ekosysteemien toimintaan muuttujia lisännyttä ilmiötä voidaan kutsua antropogeeniseksi heterogeenisyydeksi (Lovett ym. 2005). Ihmisten toiminnan vaikutuksesta virtavesiekosysteemeihin vaikuttavat esimerkiksi maataloudesta ja teollisuudesta aiheutuvat päästöt sekä rakennusprojekteista seuraava elinympäristöjen muutos ja pirstaloituminen.

Vesirakentaminen, kuten joen patoaminen, katkaisee usein jokisysteemin luonnollisen kytkeytyvyyden (Wang ym. 2018). Esimerkiksi virtaamien säätely ja sen puolesta tasoittuminen voivat vähentää fluviaaligeomorfologisten ilmiöiden, kuten eroosion, voimakkuutta padon alapuolella (Smokorowski ym. 2011). Ylhäältä purkavat padot tavallisesti kasaavat sedimenttiä yläpuolelleen pienentäen sedimenttivuota (*engl. sediment flux*) huomattavasti alavirran puolella. Vähentynyt määrä kasvillisuuden elinympäristöksi soveltuvaa sedimenttiä saattaa johtaa kasvillisuuden puutteesta johtuvaan eroosion voimistumiseen. Pato vaikuttaa myös veden lämpötilaan sen alapuolisessa uomassa. Yläosastaan vettä purkavien patojen on huomattu nostavan veden lämpötilaa alajuoksun puolella (Zaidel ym. 2021). Ilmiö johtuu siitä, että padon läpi kulkeva vesi otetaan vesipatsaan pintakerroksesta, joka on tavallisesti patsaan lämpimin osa. Pienen padon lämmittävä vaikutus ulottuu keskimäärin 1,3 kilometrin matkalle ollen voimakkainta kesällä ja matalan virtaaman aikaan.

2.2 Taimen

2.2.1 Lajipiirteet ja elinkierto

Taimen (*Salmo Trutta*) on alkuperäisesti eurooppalainen lohikalalaji, jota esiintyy kuitenkin laajasti istutettuna myös muissa maanosissa (kuva 5) (Elliot 2019). Taimenpopulaatioiden käyttäytyminen ja geneettiset sekä fysiologiset piirteet vaihtelevat populaatioiden välillä johtuen niiden erilaistumisesta erilaisiin elinympäristöihin. Elinympäristön perusteella laji voidaan jakaa erillisiin ekologisiin muotoihin. Taimenta pidetään haitallisena vieraslajina monin paikoin sen luonnollisen levinneisyysalueen ulkopuolella. Alkuperäisillä esiintymisalueilla taimenen elinvoimaisuutta kuitenkin uhkaavat useat ihmistoiminnan vaikutukset kuten liikakalastus, elinympäristöjä pirstaloiva patoaminen, jokien perkaukset sekä valuma-alueilta tuleva vesistökuormitus. Suomessa meritaimen ja eteläiset taimenkannat ovat luokiteltu erittäin uhanalaisiksi (Hyvärinen ym. 2019: 555).



Kuva 5. Taimen on alun perin Euroopasta lähtöisin oleva lohikalalaji (Kuva: Jussi Murtosaari).

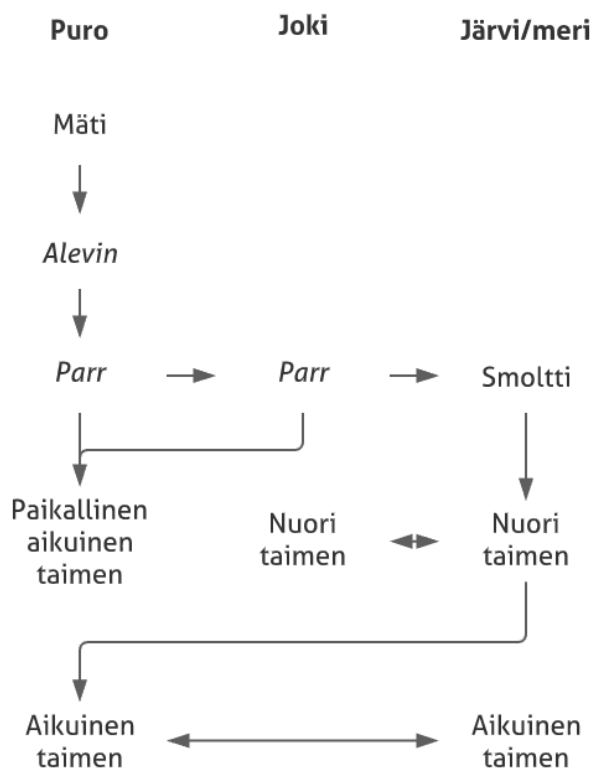
Vaelluskalana taimenen luontaiseen elinkiertoon kuuluu elinympäristöstä riippuen vaeltaminen erilaisten vesiympäristöjen välillä (kuva 6) (Jonsson & Jonsson 2019). Populaatioiden välisiä eroja elinkierron piirteissä aiheuttavat niiden erilaiset elinympäristöt, joiden elolliset sekä elottomat tekijät säätelevät ja vaikuttavat populaation toimintaan. Taimen kutee syksyllä tai alkutalvella tavallisesti sorapohjaiseen virtavesipaikkaan, jonka tuntumassa kalanpoikaset viettävät ensimmäiset vuotensa. Kudun ajankohtaa määrittelevät veden lämpötila ja sen säätelemä mädin kehitymisajan pituus, mistä syystä pohjoisilla leveysasteilla kutuaika on aikainen. Suomessa taimenen kutuaika ajoittuu yleensä lokakuulle (Koljonen ym. 2012).

Ruskuaispussilliset poikaset (*engl. alevin*) kuoriutuvat keväällä ja elävät pohjamateriaalin seassa käyttäen ravintonaan ruskuaispussinsa sisältöä (Jonsson & Jonsson 2019). Muutamien viikkojen jälkeen poikaset nousevat pohjamateriaalin seasta ja alkavat saalistaa ohi liikkuvia selkärangattomia pyrkimättä kauas synnyinympäristöstään. Tätä elinkierron vaihetta kutsutaan englanninkielisellä termillä *fry* (Elliot & Elliot 2010). Selkärangattomia saalistavat pienet poikaset ovat alttiita pedoille ja vaativat elinympäristöltään suojapaikkoja. Tässä elinkierron vaiheessa yksilöt alkavat myös puolustaa reviiriään.

Synnyinympäristönsä lähettävillä elävää kehittyneempää ja kooltaan jo suurempaa poikasvaihetta kutsutaan englanninkielisellä termillä *parr* (Jonsson & Jonsson 2019). Seuraavia elinkierron vaiheita määrittelee taimenen elinympäristö. Smoltiksi tai vaelluspoikaseksi (*engl. smolt*) kutsutaan noin parin vuoden ikäistä poikasta, jonka fysiologiassa tapahtuu muutoksia kalan valmistautuessa elämään suolaisemmassa vedessä. Luonnonmukaisesti yleensä kahdesta kolmeen vuoden ikäisenä smoltina taimen vaeltaa mereen tai järveen, jossa se viettää aikuisvaiheensa.

Meritaimenet (*Salmo trutta morpha trutta*) syntyvät rannikkoalueiden virtavesissä, joista on vaellusyhteys meriin (Jonsson & Jonsson 2019). Meritaimensmoltit vaeltavat synnyinalueeltaan mereen, jossa ne saalistavat lähellä rannikkoa ja kasvavat aikuisen kalan mittoihin. Jo samana vuonna tai pari vuotta meressä vietettyään meritaimenet palaavat synnyinvesiinsä lisääntymään, jonka jälkeen ne vaeltavat taas merelle. Järvitaimenen (*Salmo trutta lacustris*) elinkierto muistuttaa meritaimenta. Niiden vaeltaminen tapahtuu kuitenkin kalojen synnyinpuron ja järven välillä. Jonssonin ja Jonssonin (2019) mukaan kalat saattavat liikkua elinympäristössään järven ja virtavesien välillä lisääntymisen lisäksi myös muiden tekijöiden, kuten ravinnonsaannin ja lämpötilan ohjailemina.

Sopeutumista suolapitoisempaan veteen ei tapahdu populaatioissa, joiden elinympäristö on rajautunut estäen vaelluksen kauas synnyinseudulta. Purotaimenet (*Salmo trutta fario*) eivät lähde vaellukselle, vaan elävät virtavesissä koko elämänsä ajan. Riippuen ympäristöstä saattavat purotaimenet vaeltaa rajatussa elinympäristössään aikuisena isompiin virtavesiin ja palata lisääntymään puroihin ja koskialueille. Niukemman ravinnon vuoksi purotaimenten kasvu on järvi- tai meritaimenia hitaampaa, ja ne jäävät tavallisesti kooltaan pienemmiksi (Sandlund & Jonsson 2016). Eurajoen Kauttuankoskessa lisääntyvät taimenet ovat purotaimenia.



Kuva 6. Taimenen elinkierron vaiheet ja liikkuminen eri vesiympäristöjen välillä (Jonsson & Jonsson 2019: 232, mukailen). Englanninkielinen *alevin*-termi viittaa ruskuaispussilliseen poikasen alkuasteeseen ja *parr* smolttivaihetta edeltävään poikasvaiheeseen, joka elää synnyinympäristönsä lähetyvillä saalistaen selkärangattomia.

2.2.2 Käyttäytyminen ja elinympäristövaatimukset

Taimenen hyödyntämä ravinto, käyttäytyminen ja elinympäristövaatimukset muuttuvat kalan eri elinkierron vaiheissa (Jonsson & Jonsson 2011). Erityisesti kalan koko ohjaa sen habitaatin valintaa elämänsä aikana. Kaikissa elinkaarensa vaiheissa taimen vaatii elinympäristöltään tietynlaisia

olosuhteita, ja tärkeimpiä fyysisiä muuttujia kalan selviytymisen kannalta ovat veden lämpötila ja virtausnopeus sekä etenkin kutuaikana ja nuorilla yksilöillä pohjan substraattikoostumus. Virtaus-, pohja- ja lämpötilaolosuhteiden lisäksi taimenelle soveltuvaa habitaattia määrittelevät ainakin happipitoisuus ja pH-arvo, joille herkkiä ikävaiheita ovat etenkin pohjamateriaalisen seassa talven yli kehittyvä mäti ja nuoret poikasvaiheet (Louhi ym. 2008).

Taimenen elinympäristöä määrittelevät fyysiset muuttujat ovat vuorovaikutuksessa toisiinsa. Pohjasedimentin koostumus ja muut virtavesiuoman fyysiset ominaisuudet säätelevät sen virtausnopeuksia, kun taas virtauskäyttäytyminen muokkaa uoman geometriaa ja pohjasedimentin koostumusta (Knighton 1998). Lisäksi lämpötila vaikuttaa veden ominaisuuksiin, kuten viskositeettiin, ja on yhteydessä virtauskäyttäytymiseen. Uoman fluviaaligeomorfologiset ominaisuudet puolestaan vaikuttavat veden lämpötilaan sekä sen alueelliseen vaihteluun (Sinokrot & Gulliver 2000; Li ym. 2011). Myös mädin hapensaanti on pohjan substraattikoostumuksen ja virtausnopeuden varassa.

Pohjamateriaalin seassa kypsyvä mäti ja ruskuaispussistaan energiaa saavat poikaset tarvitsevat happea, joka kulkeutuu pohjamateriaalin rakoihin virtaavan veden kuljettamana (Armstrong ym. 2003; Louhi & Mäki-Petäys 2003; Louhi ym. 2008). Sedimentin koostumukselta vaaditaan siis riittävää huokoisuutta (*engl. porosity*), jotta veden virtaaminen pohjamateriaalin läpi onnistuisi. Myöhemmin pohjamateriaali antaa suojaa sen seasta nousseille poikasille, jotka eivät vielä ole valmiita liikkumaan kauas synnyinseudultaan (Jonsson & Jonsson 2011). Sedimenttipartikkelit ja raot niiden välissä tarjoavat suojaa poikasia saalistavilta pedoilta. Karkea sedimentti lisäksi hidastaa virtaamaa pohjan lähellä ja muodostaa taskuja, joissa poikaset voivat pysyä paikallaan käyttämättä runsaasti energiaa.

Kudun onnistumiseksi muun muassa pohjan materiaalin tulee olla raekooltaan tarpeeksi pientä, jotta naaras onnistuu kutukuopan kaivamisessa. Louhen ym. (2008: 330) useita tutkimuksia kokoavan artikkelin mukaan pohjan optimaalinen raekoko taimenen kutualueelle asettuu 16–64 mm välille. Pohjan materiaalissa voi olla mukana myös suurempia partikkeleja, mutta naaraan koosta riippuen isommat partikkelit haittaavat kutukuopan kaivamista (Louhi & Mäki-Petäys 2003). Taimenen suosiman pohjamateriaalin raekoko kasvaa kalan koon kasvaessa. Huuskon ym. (2003: 11) Suomessa toteuttaman tutkimuksen mukaan optimiraekoot kalan koon mukaan jakautuivat seuraavasti; alle 10 cm: 60–250 mm, 10–15 cm: 130–250 mm ja yli 15 cm: 130–520 mm (taulukko 2).

Poikasten väliset kokoerot näkyvät käyttäytymisessä pienten poikasten suosiessa voimakkaammin suojaa tarjoavia ja hitaan virtauksen paikkoja (Mäki-Petäys ym. 1994). Virtausnopeus on kriittinen etenkin pienimmille poikasille, joita esiintyy vain suhteellisen hitaan virtauksen paikoissa (Huusko ym. 2003). Erityisen tärkeä mittari habitaatin valinnalle on Heggenesin (1996) mukaan virtauksen nopeus kalan kuonon kohdalla. Kutupaikalle optimaalinen virtausnopeuden raja-alue on 20–55 cm/s (Louhi ym. 2008: 330). Alle 10 cm pituisille poikasille optimaalinen virtausnopeus 10–30 cm/s (Huusko ym. 2003: 10). 10–15 cm pituisten kalojen optimaalinen virtausnopeus oli 30–50 cm/s ja sitä isommilla 40–55 cm/s. Eri kokoisten taimenten suosimien virtausnopeuksien huomattiin olevan melko päällekkäisiä ja erot niiden välillä olivat pienempiä kuin eri kokoluokkien suosimien syvyyksien välillä.

Poikaset tavallisesti välttelevät syviä ja voimakkaasti virtaavia puron osia pysyen lähellä uoman reunoja, joissa virtaus on hitaampaa ja todennäköisyys kohdata petoja pienempi (Jonsson & Jonsson 2001). Taimenen suosiman habitaatin syvyys lisääntyy yksilön koon kasvaessa niin, että suurimmat kalat elävät tavallisesti uoman syvimmissä osissa (Mäki-Petäys ym. 1997). Kuitenkin lisäksi vuodenaikojen on huomattu vaikuttavan kalojen suosimien habitaattien syvyyksiin. Suomalaisissa tutkimuksissa taimenen kutupaikan optimaaliseksi syvyydeksi arvioidaan muun muassa 20–30 cm (Louhi & Mäki-Petäys 2003: 6) ja 15–45 cm (Louhi ym. 2008: 330). Huuskon ym. (2003: 10) mukaan pienimmille poikasvaiheille (pituus alle 10 cm) optimaalinen syvyys on 20–30 cm. 10–15 cm pituisille taimenille optimisyvyydeksi todettiin 40–50 cm ja yli 15 cm pituisille 60–70 cm.

Taulukko 2. Taimenen kokoluokille ja kutupaikalle soveltuvien sekä optimaalisten ympäristöolosuhteiden rajat. (Huusko ym. 2003; Louhi & Mäki-Petäys 2003; Louhi ym. 2008).

elinkierron vaihe / koko	soveltuva alue		
	raekoko (cm)	virtausnopeus (cm/s)	syvyys (cm)
< 10 cm	3–50	0–60	10–40
10–15 cm	6–52	10–60	20–65
> 15 cm	6–52	10–70	30–90
optimialue			
	raekoko (cm)	virtausnopeus (cm/s)	syvyys (cm)
< 10 cm	6–25	10–30	20–30
10–15 cm	13–25	30–50	40–50
> 15 cm	13–52	40–55	60–70
kuteminen	16–64	20–55	20–30/15–45

Lämpötila on avaintekijä taimenen habitaatinvalinnassa määritellen kalan aineenvaihduntaa, liikkumista, ravinnonhankintaa sekä lisääntymistä (Jonsson & Jonsson 2011). Lämpötila vaikuttaa vaihtolämpöisen kalan käyttäytymiseen esimerkiksi säädellen sen aktiivisuutta ja uimistehokkuutta vuodenaikaisesti. Lohikalojen on huomattu olevan aktiivisimmillaan sekä liikkuvan eniten kesäaikaan aktiivisuuden vähentyessä, kun lämpötila laskee kohti talvea (Heggenes & Dokk 2001; Huusko ym. 2006). Optimaalinen elinympäristön lämpötila edesauttaa taimenen kasvua sen eri ikävaiheissa, ja esimerkiksi mädin kehittymiseen kuluva aika ja sen myötä lisääntymiskäyttäytymisen ajoittuminen ovat voimakkaasti lämpötilaolosuhteiden säätelemiä (Armstrong ym. 2003; Louhi ym. 2003; Elliot & Elliot 2010). Optimaalinen lämpötila vaihtelee riippuen kalan iästä ja kehitysvaiheesta. Eri elinkierron vaiheille on selviytymisen kannalta määritelty kriittiset lämpötilarajat, joiden mukaan erityisen herkimpiä korkeille lämpötiloille ovat mäti ja pienimmät poikasvaiheet (taulukko 3). Optimilämpötila taimenen kasvulle on Elliotin ja Elliotin (2010) mukaan 13,1–14,1 °C.

Taulukko 3. Kriittiset lämpötilarajat taimenen eri ikävaiheiden selviytymiselle (Elliot & Elliot 2010: 1796, mukaillen).

elinkierron vaihe	alin lämpötila (°C)	ylin lämpötila (°C)
mäti	0	13
ruskuaispussilliset poikaset (alevin)		
alkuaste	0–1	20–22
kehittynyt aste	0	22–24
alle 2-vuotiaat poikaset (parr) ja smoltit		
alkuaste	0–0,7	22–25
kehittynyt aste	-0,8	26–30
selkärangallisia saalistavat	0,4–4	19–26

Ilmastonmuutos aiheuttaa painetta kylmään veteen sopeutuneille taimenkannoille paikoissa, joissa vesien lämpötila on nousemassa ylitse kalan sietoalueen (Jonsson & Jonsson 2009). Globaalin lämpötilan kasvun oletetaan siirtävän taimenen levinneisyysaluetta pohjoisemmas. Liian korkeat lämpötilat ja vuodenaikojen rytmin muutos saattavat heikentää esimerkiksi lisääntymistä ja nuorten yksilöiden kehittymistä. Pohjoisilla levinneisyysalueilla sademäärien lisääntymisellä, tulvimisella, jääpeitteisen ajan lyhenemisellä sekä niiden myötä lisääntyvällä ravinnehuuhtoumalla on suora vaikutus taimenen selviytymiseen ja yksilönkehitykseen. Tulviminen tulee muokkaamaan virtavesiuomia ja saattaa näin muokata kalojen elinympäristöjä lisääntyneen pohjamateriaalin kulutuksen kautta (Louhi & Mäki-Petäys 2003). Taimenen lisääntymisalueilla tulvat saattavat kuluttaa pois kutosoraikkoja tai huuhtoa niistä mukanaan mätiä. Junkerin ym. (2015) mukaan voimakkaiden virtaamien aiheuttama pohjasedimentin kulumisen uhkaa etenkin ihmisen suoristamia virtavesiympäristöjä, joiden puskurikyky tulvimista vastaan on luonnonuomaa heikompi.

2.3 Virtavesiympäristöjen mittausmenetelmät

2.3.1 Virtausolosuhteiden mittaaminen

Pääasiassa aina sijaintitietoon perustuvien käytössä olevien menetelmien kulmakivenä toimii nykyaikainen ja tehokas satelliittipaikannusteknologia (Kasvi ym. 2017). Joissain menetelmissä mittalaitteistoon on valmiiksi liitetty satelliittipaikannin, joka antaa kustakin pisteestä kerätylle aineistolle sijainnin jo mittaushetkellä. Osa tutkimusmenetelmistä taas edellyttää erikseen käsikäyttöisellä satelliittipaikantimella kerättyjä sijaintimittauksia, jotka myöhemmässä käsittelyvaiheessa yhdistetään muihin aineistoihin. Mallinnustarkoituksessa virtaaman mittaamisen ohessa mitataan vedenpinnan korkeutta uoman reunoista satelliittipaikantimella, kuten VRS-GNSS-laitteistolla. Lisäksi satelliittipaikannusta saatetaan hyödyntää uoman geometrian mittaamisessa. Tällöin uoman pohjasta kerätään useita sijaintipisteitä, jotka paikkatieto-ohjelmistossa interpoloidaan geometriaa kuvaavaksi tasoksi (Flener ym. 2013).

Virtavesiympäristöjen tutkimuksessa hyödynnetään perinteisesti tietoa uoman virtaamasta, jolla tarkoitetaan uoman poikkileikkauksen läpi tietyn ajan aikana virtaavan veden määrää. Virtaama-arvo joessa vaihtelee ajan ja paikan mukaan (Shaw 1983). Suure mitataan perinteisesti uomasta valitusta poikkileikkauksesta, jossa virtauksen oletetaan olevan mahdollisimman muuttumaton. Sopiva sijainti virtaaman mittaamiselle on uoman suora kohta, jonka yläpuolella ei ole virtaukseen

vaikuttavia esteitä. Virtauksen nopeus mitataan virtausmittarilla poikkileikkauksesta useasta kohdasta ja mahdollisesti eri korkeuksilta riippuen uoman syvyydestä. Uoman syvyys mitataan poikkileikkauksen mitalta useasta kohdasta, jotta saadaan tietää uoman muoto ja poikkileikkauksen pinta-ala. Näiden mittausten avulla voidaan laskea poikkileikkauksen läpi virtaavan veden määrä. Tavallisesti virtaama ilmoitetaan kuutiometreinä sekunnissa.

Kun tietoa virtavesiympäristöstä halutaan laajemmalla alueella, esimerkiksi kokonaiselta uoman osuudelta, voidaan virtaama mitata ja tarkastella useasta uoman kohdasta. Jos uomaan tulee tai siitä poistuu vettä, saadaan veden määrän muutos selville vertaamalla muutoskohdan ylä- ja alapuolisten poikkileikkausten virtaamia. Virtaamatietojen lisäksi virtauksen nopeuden ja suunnan vaihtelut eri kohdissa uomaa kuvaavat veden käyttäytymistä erilaisissa olosuhteissa ja ovat usein kiinnostuksen kohteena virtaavan veden ympäristöjä tutkittaessa. Virtausolosuhteiden ja uoman pohjan sedimenttiprosessien tarkastelemiseksi on myös oleellista kyetä mittaamaan uoman muotoa tarkasti.

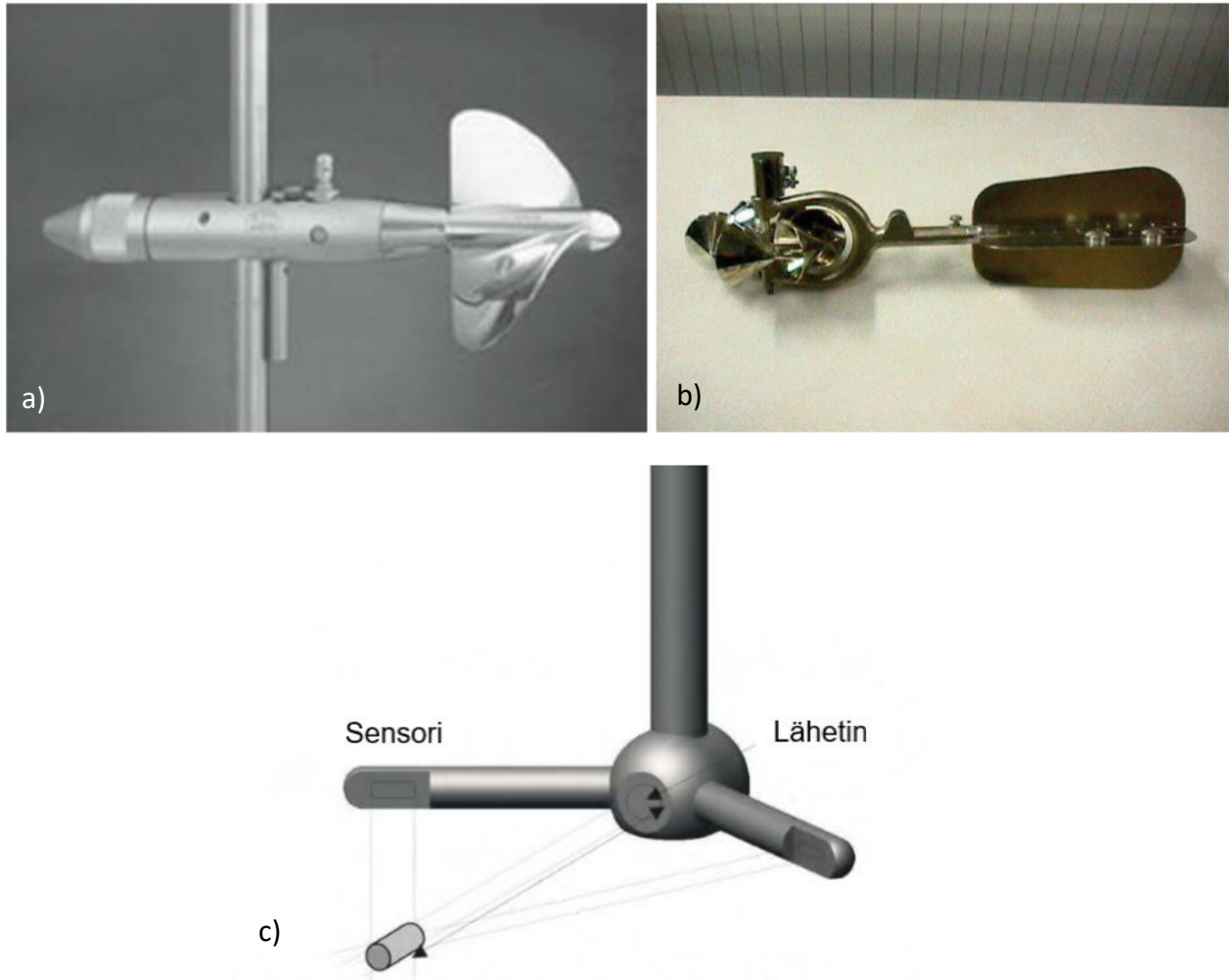
Virtausolosuhteiden mittaamiseen on perinteisesti käytetty erilaisia virtausmittareita (Kasvi ym. 2017). Virtausmittareilla kerättävä tieto on yksiulotteista eli yhdellä mittauksella saadaan tieto yhden uoman pisteen virtauksen nopeudesta. Laajemman käsityksen saamiseksi mittauksia tehdään yleensä systemaattisesti useista kohdista uomaa sen eri korkeuksilta (Flener 2015). Yhdistämällä pistemäisten mittausten tiedot uoman poikkileikkauksen eri kohdista saadaan kaksiulotteista aineistoa, jonka perusteella voidaan arvioida poikkileikkauksen virtaama.

Perinteisimmissä mekaanisissa virtausmittareissa veden virtaus pyörittää laitteen osaa, jonka liikkeen nopeuden perusteella virtauksen nopeus arvioidaan (Kondolf & Piégay 2016). Laitetta pidetään paikallaan ja suunnattuna virtausta vasten siinä kiinni olevan varren avulla. Mekaanisista mittareista on olemassa erilaisia versioita, joista tunnettuja ovat muun muassa siivikko, jossa virtaava vesi pyörittää propellia, sekä price-malli, jossa pyörivä mekanismi muodostuu akselin ympärille kiinnitetyistä kupeista (Stone & Hotchkiss 2007) (kuva 7). Virtauksen nopeus on verrannollinen molemmissa mekanismeissa muodostuvan pyörivän liikkeen nopeuteen. Elektromagneettiset virtausmittarit perustuvat toiminnaltaan Faradayn induktiolakiin: magneettikentässä virtaava vesi muodostaa jännitteen, joka on verrannollinen virtauksen nopeuteen (MacVicar ym. 2007). Elektromagneettinen virtausmittari muodostaa magneettikentän ja mittaa sylinterimäisen koettimen läpi virtaavan veden muodostaman jännitteen voimakkuutta.

Akustisen virtausmittarin (*engl. Acoustic Doppler Velocimeter, ADV*) (kuva 7) toiminta perustuu Doppler-ilmiöön, jossa ääniaallon havaittu taajuus muuttuu, aallon vastaanottajan ja lähteen välisen suhteellisen nopeuden muuttuessa (Song & Chiew 2001). Mittarin lähtin lähettää akustista pulssia, joka osuu virtaavan veden mukana kulkeutuviin partikkeleihin. Laitteen sensorit vastaanottavat partikkeleista takaisinkimpoavia kaikuja. Vastaanottimia on ADV:ssä mallin mukaan yleensä kahdesta neljään kappaletta, jotka on asetettu tasaisin etäisyyksin tiettyyn kulmaan suhteessa lähettimeen.

ADV:n lähettämät akustiset pulssit ovat tasataajuisia, mutta osuessaan partikkeleihin lähetetyn signaalin taajuus muuttuu Dopplerin ilmiön mukaisesti verrannollisesti laitteiston ja partikkelin

suhteelliseen nopeuteen (Song & Chiew 2001). Partikkelista takaisinheijastuvat taajuukseltaan erilaiset kaiut rekisteröidään vastaanottimissa. Menetelmä nojaa kahteen peräkkäiseen vakioidulla aikavälillä lähetettyyn pulssiin, joiden kaikkien muuttuneen taajuuden ja takaisinkimpoamisajan perusteella voidaan tarkasti laskea veden virtauksen suunta ja nopeus suhteessa paikallaan pysyvään mittalaitteeseen.



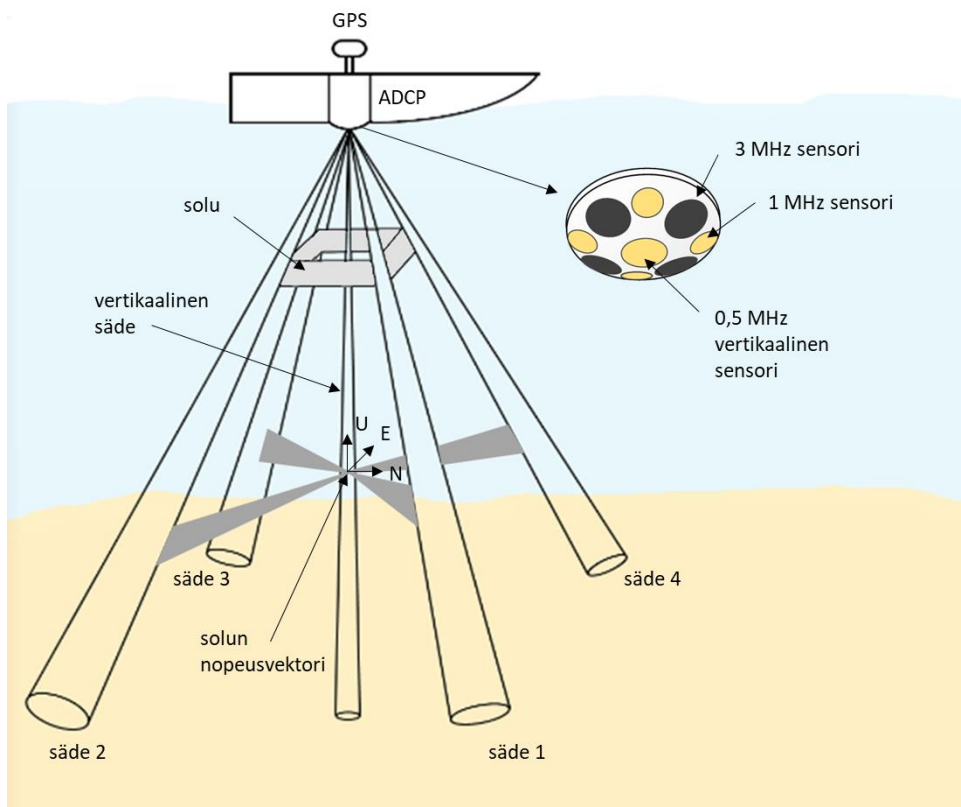
Kuva 7. Virtauksen mittaamiseen on erilaisia mittarimalleja kuten mekaaniset a) siivikko ja b) price-mallinen mittari sekä c) akustinen virtausmittari (Kondolf & Piégay 2016; FlowTracker... 2007, mukaillen).

ADV-mittareista on viime vuosikymmenten aikana tullut suosittuja työkaluja virtauksen mittaamiseen (Kasvi ym. 2017; Kondolf & Piégay 2016). Teknologia mahdollistaa tiedon virtauksen kolmiulotteisesta liikkeestä, minkä vuoksi ADV:llä on hyvät edellytykset monimutkaisten virtausolosuhteiden mittaamiseen. MacVicar ym. (2007) mukaan voimakas turbulenssi kuitenkin häiritsee kahteen peräkkäiseen signaaliin perustuvaa mittausta luoden pulssien välille epäyhtenevät olosuhteet ja näin vähentäen tulosten luotettavuutta. Koska Dopplerin ilmiöön perustuva mittalaite ei ole fyysisesti kosketuksissa sen mittaaman kohtaan vesipatsaassa, sen ei pitäisi aiheuttaa epävarmuutta tuottavaa häiriötä virtaukseen (Poindexter ym. 2011).

ADV-mittausta ei voida tehdä täysin puhtaassa vedessä, sillä menetelmä vaatii toimiakseen virtauksen mukana liikkuvia partikkeleja (Flener 2015). Lähellä pohjaa tai uoman reunoja pinnoista

heijastuvat voimakkaat kaiut peittoavat vesipatsaan partikkeleista heijastuvan heikomman pulssin (Kondolf & Piégay 2016). Jos tavoitteena on tutkia koko uoman osuuden virtauskäyttäytymistä, vaaditaan pistemäisiä virtaustietoja uoman alueelta ja sen eri korkeuksista useita (Kasvi ym. 2017).

Aikaa vievämpien mittausten lisäksi jokiuoman alueellista virtausnopeutta ja -suuntaa voidaan mitata kolmiulotteisesti nopealla menetelmällä käyttäen akustista virtausprofiilimittaria (engl. *Acoustic Doppler Current Profiler, ADCP*). ADCP:n toimintaperiaate perustuu ADV:n tavoin Doppler-ilmiöön. Akustiset pulssit lähetetään veden pinnalla lähellä olevasta laitteistosta sen alapuolelle noin 20–30 asteen kulmassa keskilinjasta eri suuntiin suunnattuja säteitä pitkin (Yorke & Oberg 2002) (kuva 8). Laitteiston liikuteltavuus mahdollistaa virtauksen mittaamisen poikkileikkauksesta nopeasti sekä yhdellä mittauksella uoman pohjanmuotoja ja virtausolosuhteita kuvaavan aineiston keräämisen halutulta alueelta koko vesipatsaasta (Kasvi ym. 2017). Laitteiston mitatessa jatkuvasti virtausta liikkuen uomassa se kerää alueellisesti kattavampaa aineistoa, jonka tulokset kuvaavat virtauskenttää pistemäisiä mittauksia tarkemmin.



Kuva 8. Alaspäin suunnatun nelisäteisen akustisen virtaamaprofiilimittarin toimintaperiaate. Neljän akustisen säteen väliin muodostuvat päällekkäiset solut, joista yksi on visualisoitu kuvaan. Solun nopeusvektori kuvaa, miten yhdistämällä neljän säteen tuottama tieto, lasketaan sensorin alapuolella kussakin solussa virtaavan veden nopeus ja suunta. Tarkennettu piirros sensoreista on piirretty Sontek M9 -laitteen mukaisesti (Flener 2015, mukaillen).

Liikkeen suunnan laskemiseksi tarvitaan vähintään kolme eri suuntiin suunnattua sädettä (Simpson 2001). Sensorien vastaanottamat eri suuntaisten ääniaaltojen kaiut ovat taajuuksiltaan erilaisia riippuen partikkelien liikkeen suunnasta ja nopeudesta. Kaikkien sensorien vastaanottamien signaalien perusteella voidaan laskea virtauksen nopeus ja suunta kolmiulotteisesti. Vesipatsas

jaetaan kerroksiin eli soluihin, joista mitatut pulssien kaiut voidaan erottaa toisistaan pulssin takaisinkimpoamiseen kuluneen ajan perusteella (Muste ym. 2004). Vesikerroksia kuvaaville soluille lasketaan virtauksen nopeus ja suunta kaikista saman solun mittauksista. Virtauksen mukana kulkevien partikkelien lisäksi ADCP lähettää ja vastaanottaa ääniaaltoja myös uoman pohjasta (Simpson 2001). Laitteeseen rekisteröityy pohjan etäisyys, jonka perusteella luodaan vesipatsaan eri korkeuksia kuvaavat virtaussolut. Alueellisesti kattavan mittauksen perusteella ADCP:n tuloksista saadaan tarkkaa tietoa uoman vedenpinnan alapuolisesta geometriasta (Kasvi ym. 2017).

Virtauksen mittaamiseksi on tiedettävä myös laitteen nopeus suhteessa paikallaan pysyvään pohjaan (Simpson 2001). Tuntemalla oman suhteellisen nopeutensa pohjaan nähden sekä virtauksen suhteellisen nopeuden itseensä nähden, laitteisto laskee varsinaisen virtausnopeuden. Veden pinnalla liikuteltavan laitteiston asentoa ei voida täysin hallita, vaan se vaihtelee seurauksena hetkellisistä virtausolosuhteista. Sensorien hetkellisten asentojen muutosten määrittämiseksi ja siitä johtuvien virheiden korjaamiseksi ADCP mittaa jatkuvasti kallistumistaan (*engl. pitch*), kiertymistään (*engl. roll*) ja kurssiaan (*engl. heading*). Laitteistoa tulisi osata ohjata tasaisella nopeudella ja minimoiden edellä mainitut asennon muutokset (Yorke & Oberg 2002). Kuitenkin hyvin voimakkaissa tai monimutkaisissa virtausolosuhteissa ADCP:n tulosten luotettavuus heikkenee.

ADCP-mittauksen tulokset sisältävät laitteiston koko kulkureitin ajalta kerättyä tietoa eri vesikerrosten virtauksen suunnasta ja nopeudesta sekä tiedon pohjan etäisyydestä. Perinteisesti tutkimusta on tehty mittaamalla uomista erillisiä poikkileikkauksia, mutta nykyään useissa tutkimuksissa on siirrytty alueellisesti laajempiin mittauksiin (Flener 2015). Jotta mittausaineistoa voidaan käyttää esimerkiksi uoman osuuden alueellisten olosuhteiden tarkasteluun, tulee mittauksen olla alueellisesti kattavia koko osuudelta. Tämä onnistuu käymällä alue tiheästi läpi esimerkiksi ohjaamalla mittalaitteistoa uoman sivulta toiselle (Flener ym. 2015).

2.3.3 Uoman geometrian mittaaminen

Perinteisiin maanpinnan mittausmenetelmiin kuuluva takymetrimittaus perustuu kojeen optisesti mittaamiin kohteiden etäisyyksiin ja kulmiin suhteessa itseensä. Polaarisisä mittauksessa koje mittaa ympäriltään pisteitä säteittäisesti. Takymetri on kehitetty pelkkiä kulmia mittaavasta optisesta laitteesta, teodoliitista, jota se edelleen pääosin vastaa rakenteeltaan (Laurila 2010). Laitteen erottaa teodoliitista sen koneistoon integroitu elektro-optinen etäisyysmittari, joka mahdollistaa automaattisen etäisyyden mittaamisen maastossa olevaan kohteeseen tai maastoon asetettuun prismaan. Laite mittaa havaitsemansa pisteen etäisyyden lisäksi pysty- ja vaakakulmat suhteessa omaan sijaintiinsa, joiden perusteella on mahdollista määritellä koordinaatteja, korkeuksia ja muita suureita.

Ennen mittaamisen aloittamista takymetri orientoidaan, mikä tarkoittaa sen korkeuden ja sijainnin määrittämistä koordinaatistossa (Laurila 2010). Laite mittaa kulmahavaintoja sen vaakakehältä luettavina tähtäyssuuntina tai pystykehältä pystykulmina. Takymetrin hyödyntämässä elektro-optisessa etäisyydenmittauksessa etäisyys kohteeseen määritetään laitteen lähettämän ja

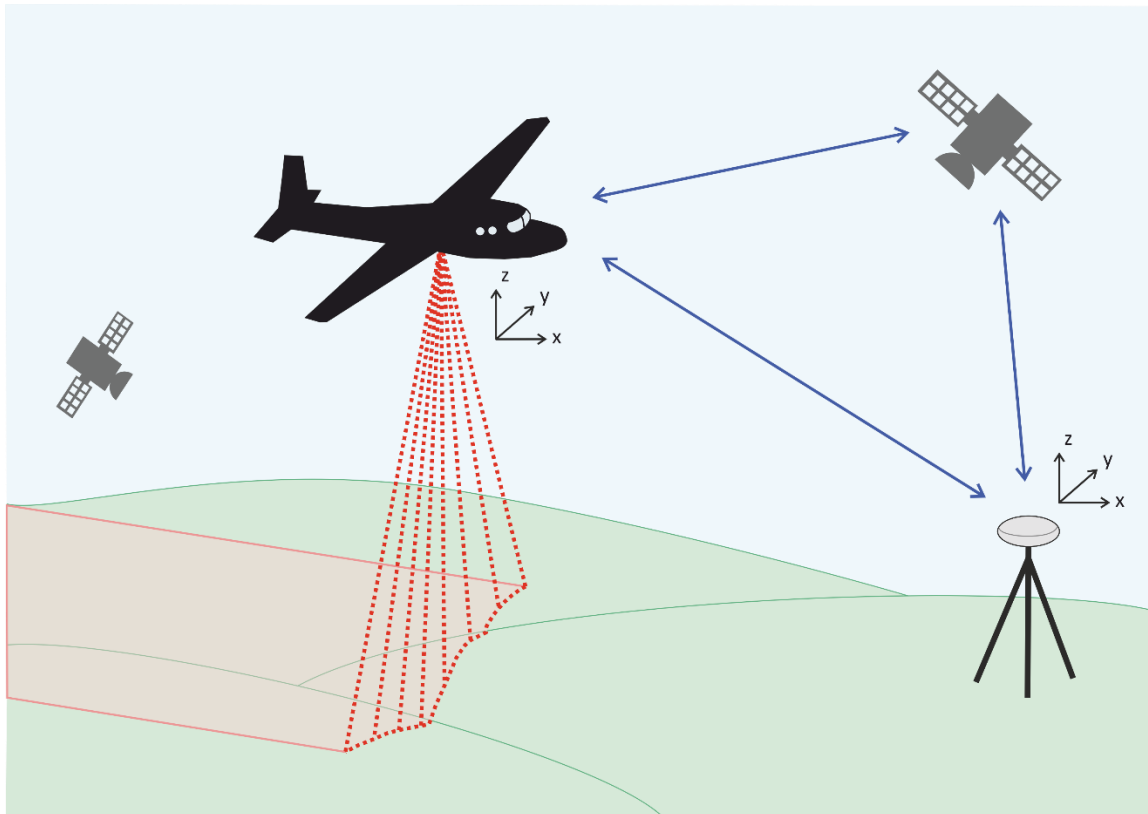
kohteesta heijastuneen signaalin vaihe-eron tai kulkuajan perusteella. Tavallisesti elektro-optisella etäisyysmittarilla päästään millimetrien tarkkuuteen.

Perinteisenä maastonmittausmenetelmänä takymetriaa on hyödynnetty myös virtavesitutkimuksessa uoman muodon selvittämiseksi (Myers ym. 2019; Resop & Hession 2010, Keim ym. 1999). Toisin kuin esimerkiksi laserkeilauksessa, ei kasvillisuus heikennä takymetrillä kerätyn aineiston tarkkuutta (Myers ym. 2019). Menetelmän tarkkuus mahdollistaa muun muassa täsmällisen uoman muotojen mittaamisen ja muutostarkastelun. Koska takymetrin käyttö ei ole riippuvaista satelliittiyhteydestä, voi sitä käyttää satelliittipaikannusta joustavammin sellaisissakin paikoissa, joissa satelliittiyhteyden saaminen on hankalaa (Fuller & Basher 2013).

Laserkeilauksella eli LiDAR-menetelmällä (Light Detection and Ranging) saadaan jokiympäristön vedenpinnan yläpuolisesta osuudesta tarkkaa kolmiulotteista geometriatietoa. Laserkeilauksessa mittalaite lähettää useita pulssimaisia tai jatkuvia lasersäteitä kohdealueelle (Vosselman & Maas 2010) (kuva 9). Säteen kimmotessa kohteen pinnasta keilain rekisteröi takaisinkimpoavan säteen ja mittaa sen kulkeman ajan. Valon nopeudella etenevän lasersäteen kulkemisajan perusteella voidaan laskea pinnan etäisyys laitteeseen. Tuntemalla laitteen sijainti siihen yhdistetyn satelliittipaikantimen avulla voidaan koordinaatit antaa myös sen kuvaamalle aineistolle. Mitatun kohteen pinnanmuoto tallentuu sijaintitiedon sisältävänä kolmiulotteisena pistemäisenä aineistona eli pistepilvenä.

Koska perinteisesti käytetty vihreä lasersäde kimpoaa myös vedenpinnasta, ei sitä voida käyttää vedenalaisen geometrian mittaamiseen (Hyyppä & Hyyppä 2006). Jos tarkoituksena on mallintaa maan pinnanmuotoja, ei vedenpinnan yläpuoleltakaan kuvattu aineisto ole aina sellaisenaan käytettävissä lasersäteen kimmotessa myös muista kiinteistä objekteista, kuten kasvillisuudesta. Pistepilvestä voidaan kuitenkin erottaa ainoastaan maan pintaa kuvaavat pisteet ja poistaa esimerkiksi kasvillisuus ja rakennukset. Jälkikäsitellyssä pistepilvi interpoloidaan maanpinnan muotoja kuvaavaksi tasoksi eli korkeusmalliksi (*engl. Digital Elevation Model, DEM/ Digital Terrain Model, DTM*).

Lentokonelaserkeilauksessa (*engl. Airborne Laser Scanning, ALS*) aineistoa kerätään lentokoneeseen kiinnitetyllä laserkeilaimella (Hyyppä & Hyyppä 2003). Lentokoneella lennetään linjoja yleensä noin kahden kilometrin korkeudella, laserkeilaimen keilatessa koneen alapuolista aluetta yleensä satojen metrien levyiseltä alueelta. Differentiaalinen navigointi- ja paikannusjärjestelmä (*engl. Differential Global Positioning System, DGPS*) keskustelee lentokoneen oman satelliittipaikantimen sekä tarkkaan paikannettujen maa-asemien välillä (Vosselman & Maas 2010). Lisäksi lentokoneeseen asennettu inertiamittausyksikkö (*engl. Inertial Measurement Unit, IMU*) mittaa tarkasti koneen kääntymistä, kiertymistä ja kallistumista. Laitteistojen avulla saadaan laskettua jokaiselle mittauspisteelle tarkka sijainti.



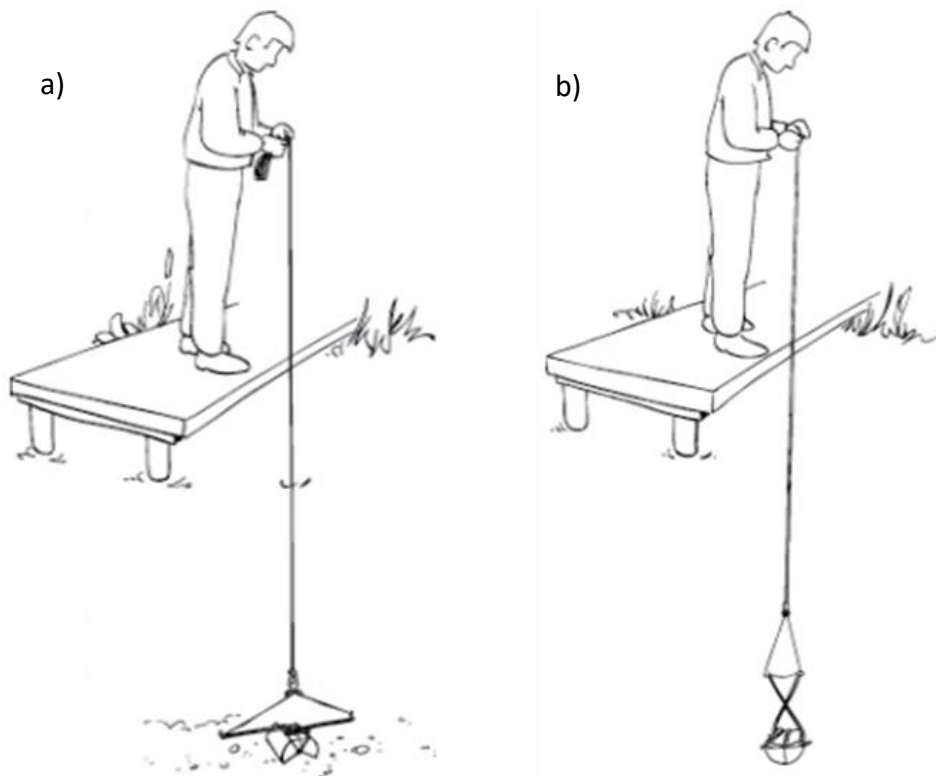
Kuva 9. Lentokonelaserkeilauksessa lentokoneeseen kiinnitetty keilain lähettää maahan laserpulsseja ja rekisteröi niiden takaisinkimpoamisajaa. Pistepilvelle määritetään sijaintitiedot lentokoneen satelliittipaikannukseen perustuvaan reaaliaikaisen sijaintitiedon avulla.

2.3.4 Uoman substraattikoostumuksen mittaaminen

Virtavesiympäristön substraattikoostumuksen tarkastelu mahdollistaa kohteen fluviaaligeomorfologisten prosessien paremman ymmärryksen. Tarkastelemalla uoman eri osuuksien substraattikoostumuksia saadaan sedimentin kulumisesta, kuljetuksesta ja kasautumisesta uoman eri paikoissa tarkempaa tietoa, jota saatetaan hyödyntää esimerkiksi uoman tarjoamien habitaattien tutkimuksessa (Pasternack ym. 2008; O'flynn ym. 2013). Koska sedimentinkuljetus on virtausnopeudesta riippuvaista, saadaan sedimenttinäytteistä tietoa menneistä virtausolosuhteista. Vertaamalla substraattikoostumusta Hjulströmin (1935) diagrammiin, voidaan arvioida, millaisissa virtausolosuhteissa nykyinen substraattikoostumus on muodostunut. Lisäksi diagrammin avulla voidaan laskea, millaiset virtausolosuhteet vaadittaisiin nykyisen pohjamateriaalin kulumiselle. Kun pohjamateriaalin koostumus uoman eri osissa tiedetään, voidaan lisäksi tehdä päätelmiä sen muokkautumisesta tulevaisuudessa sekä erilaisissa virtaamaskenaarioissa.

Uoman substraattikoostumusta mitataan tarkastelemalla pohjasta kerättyjä näytteitä. Näytteenottimia on erilaisia soveltuvin eriin käyttötarkoituksiin. Van Veen -koura on perinteinen siltti-, hiekka- ja sorapohjille soveltuva näytteenotin, jolla voidaan ottaa näytteitä pohjan pintakerroksesta (Van Veen grabs 2018; Van Veen Grabs s.a.). Näytteenotin viritetään auki ja lasketaan uoman pohjalle (kuva 10). Laitteen osuessa pohjaan sen mekanismi laukeaa aiheuttaen kouran sulkeutumisen sitä nostettaessa. Sulkeutuessaan koura pureutuu pohjaan keräten lajittelemattoman näytteen sen materiaalista. Kouran koko sisältö kerätään näytteeksi ja uusi

näytteenotto aloitetaan puhdistetulla kouralla. Eri käyttötarkoituksia ja -kohteita varten on näytteenottimesta erikokoisia versioita, joista pienimpiä voidaan käyttää käsin esimerkiksi veneestä tai uomassa seisten.



Kuva 10. Van Veen -näytteenottimen mekanismi viritetään auki ennen kouran laskemista veteen. Mekanismi laukeaa näytteenottimen osuessa pohjaan (a), jolloin nostettaessa koura sulkeutuu keräten näytteen pohjan materiaalista (b) (Van Veen grabs 2018, mukaillen).

Pohjanäytteiden koostumus eli raekokoluokat ja niiden suhteelliset osuudet selvitetään seulomalla näytteet. Kuivaseulonnassa sedimenttinäytteet kuivataan uunissa, jonka jälkeen sekoitetuista näytteistä punnitaan tietyn painoinen osuus seulottavaksi (Rodríguez & Uriarte 2009). Näyte asetetaan päällekkäin pinottujen sekä silmäkooltaan alaspäin pienenevien seulalevyjen päälle, ja seulasarjaa tärisytettäessä näytteen partikkelit varisevat alaspäin asettuen partikkelikokoaan vastaaville seulalevyille (O'flynn ym. 2013). Toisistaan erotellut raekokoluokat punnitaan yksitellen, jolloin saadaan tietää kunkin luokan suhteellinen osuus koko näytteestä. Raekokoluokkien suhteellisten osuuksien tilastollisella tarkastelulla voidaan laskea pohjasedimentin koostumusta kuvaavia tunnuslukuja sekä vertailla useiden näytteiden koostumuksia keskenään.

2.4 Virtavesiympäristöjen hydraulinen mallinnus

Hydraulisten mallien tarkoitus on imitoida olemassa olevaa virtavesiympäristöä, ja ne ovat käteviä työkaluja virtaavan veden dynamiikan tutkimuksessa sekä virtavesiympäristöjen suunnittelussa. Toimintaperiaatteiltaan erilaisia hydraulisia malleja ovat fyysiset ja matemaattiset mallit (Ji 2017). Fyysiset mallit ovat laboratorioon rakennettuja esimerkiksi joenuomaa kuvaavia pienoismalleja. Matemaattiset mallit taas rakennetaan tietokoneohjelmistoilla käyttäen virtavesisysteemeihin päteviä matemaattisia yhtälöitä sekä kohdetta kuvaavaa numeerista aineistoa, kuten kenttämittauksia. Tässä tutkimuksessa hyödynnettiin hydraulista numeerista mallintamista, joka on

yksi matemaattisen mallinnuksen kategorioista. Numeerisissa malleissa joukko vedessä tapahtuvia prosesseja kuvaavia yhtälöitä muunnetaan tietokonekoodiksi, joiden avulla voidaan tuottaa numeerisia ratkaisuja. Syöttämällä malliin lähtödata eli esimerkiksi kenttäaineisto ja malliparametrit saadaan mallista likimääräinen ratkaisu.

Mallinnusohjelmistossa rakennettava hydraulinen numeerinen malli tehdään yhdistämällä tarvittavat parametrit numeerisessa muodossa, joista algoritmisesti muodostetaan virtausolosuhteita kuvaavia kaavoja (Kondolf & Piégay 2016). Parametrit kuvaavat virtavesisysteemin fyysisiä ominaisuuksia, kuten virtaamaa, vedenpinnan korkeutta tai pohjan karkeutta. Lisäksi mallille on määritettävä mallinnettavan ajan pituus sekä laskuintervalli. Valmiita mallinnuksen tuotoksia esitetään esimerkiksi alueen virtausolosuhteita kuvaavina karttoina, diagrammeina ja taulukoina. Mallien monimutkaisuudella voidaan vaikuttaa mallinnuksen nopeuteen ja valmiin tuotteen tarkkuuteen. Malli voidaan toteuttaa joko yksi-, kaksi- tai kolmiulotteisena mallin monimutkaisuuden ja tehokkuuden lisääntyessä, kun spatiaalisia ulottuvuuksia on enemmän (Glock ym. 2019).

Yksiulotteiset hydrauliset mallit kuvaavat virtausolosuhteita ainoastaan pitkittäissuuntaisesti alavirran suuntaan (x-akselin suuntaisesti) (Kondolf & Piégay 2016). Yksiulotteisen mallin pohjana käytetään uoman mitalle rakennettuja poikkileikkauksia ja näin ollen virtauksen nopeus sekä suunta kuvataan peräkkäisinä poikkileikkauksina uomasta. Moniulotteiset mallit mahdollistavat virtausolosuhteiden yksityiskohtaisemman tarkastelun. Kaksiulotteisissa malleissa virtaus esitetään pitkittäis- ja poikkittäissuuntaisesti (x- ja y-akseleilla) käyttäen kaksiulotteista soluverkkoa eli gridiä (*engl. grid*). Verkko mahdollistaa virtauksen tarkastelun pienemmistä yksiköistä sekä useammasta kohtaa yhtä poikkileikkausta ja riittää virtausolosuhteiden tarkasteluun yleisellä tasolla (Alho & Mäkinen 2010). Kaksiulotteisessa mallinnuksessa kullekin gridiverkon solulle lasketaan syvyyskeskiarvotettu virtausnopeusarvo. Monimutkaisin, kolmiulotteinen malli kuvaa virtausta pitkittäin, poikittain ja pystysuunnassa (x-, y- ja z-akseleilla). Mallin pohjana käytetään kolmiulotteista soluverkkoa, joka mahdollistaa myös uoman eri syvyyksien virtausolosuhteiden tarkastelun. Ainoastaan kolmiulotteisen mallin avulla voidaan tarkastella pystysuuntaisia virtaussuuntia vesipatsaan sisällä (Kasvi ym. 2015).

Hydrauliset numeeriset mallit perustuvat kolmeen hydrodynaamisia prosesseja säätelevään säilymislakiin, joita ovat massan, liikemäärän ja energian säilymislait (Ji 2017; 13). Mallien laskennassa hyödynnetään lakeihin perustuvia yhtälöitä muunnellen niitä mallin piirteistä riippuen tilanteeseen sopivaksi (Kondolf & Piégay 2016). Massansäilymislaki osoittaa, että massaa ei voida tuottaa lisää eikä se voi vähentyä. Virtavesisysteemin kontekstissa tämä voidaan tulkita siten, että hydrauliseen yksikköön virtaavan veden määrä on sama kuin sieltä poistuvan veden määrä. Laki ilmaistaan tasapainoyhtälönä, joka kuvaa määritellylle alueelle saapuvaa ja sieltä poistuvaa massavirtaa. Massansäilymislaki on perusmuodossaan seuraava:

$$\frac{dM}{dt} = \frac{d}{dt} \int \rho dV = 0$$

, jossa p = tiheys

t = aika

v = nopeus

M = massa

dV = differentiaali, joka määrittää koko systeemin tilavuuden integraalin.

Liikemäärä lasketaan massan ja nopeuden tulona. Liikemäärän säilymislain mukaan liikemäärä pysyy vakiona, kun se ei ole ulkoisten voimien vaikutuksessa (Ji 2017). Tämän johdosta liikemäärän aste on verrannollinen siihen vaikuttaviin ulkoisiin voimiin. Niitä ovat tässä tapauksessa massa ja nopeus, joiden muuttuminen muuttaa liikemäärää. Liikemäärän säilymislain kaava on seuraava:

$$P = mv$$

, jossa P = liikemäärä

m = massa

v = nopeus

Energiansäilymislain mukaisesti energian kokonaismäärä säilyy muuttumattomana energian muuttaessa muotoaan toiseen. Potentiaalienergia voi muuttua liike-energiaksi ja toisinpäin, eikä energian kokonaismäärä vähene tai lisäännä muutoksen myötä. Energiansäilymislakia kuvaava kaava on seuraava:

$$\sum_i m_i v_i^2$$

, jossa m = massa

v = nopeus

Hydraulisille malleille on tyypillistä monimutkaisuus ja prosessoinnin raskaus, johtuen niihin syötetyn aineiston suuresta koosta (Kondolf & Piégay 2016). Yksinkertaisimmat, kuten yksiulotteiset mallit, eivät vaadi erityisen runsaasti dataa ja ovat siksi nopeammin valmistuvia kuin monimutkaiset, runsaasti dataa edellyttävät mallit (Alho & Mäkinen 2010). Monimutkaisemmat mallit tarjoavat mahdollisuuden mallintaa virtavesiympäristö tarkemmin, mutta ovat sen ohella herkempiä aineistojen virheiden aiheuttamille haasteille (Kasvi ym. 2015; Lane ym. 1999).

Koska tavoitteena on laskennallisesti kuvantaa luonnonympäristöä, on malliin mahdotonta sisällyttää jokaista skenaarioon luonnossa vaikuttavaa elementtiä ja siksi mallinnuksen tulos on aina epätäydellinen (Ji 2017). Numeerisen muodon takia laskennallisissa malleissa on tavallisesti riskinä virheellisten mittaustulosten, puuttuvan aineiston tai viallisen algoritmin aiheuttama virhe mallinnuksen tulokseen. Siksi mallin rakentamisen ja ajon jälkeen tapahtuva mallin kalibrointi ja oikeiden parametrien löytäminen ovat tärkeitä laadun edellytyksiä (Kondolf & Piégay 2016).

Hydrauliset mallit kalibroidaan tuomalla mallinnusohjelmistoon kentältä mitattu arvo, kuten vedenkorkeus, joka on mitattu tilanteessa, jonka virtaama tiedetään (Ji 2017). Vertaamalla mitattua vedenkorkeutta ohjelman tuottamaan mallinnettuun vedenkorkeuteen voidaan arvioida mallin toimivuutta. Jos simuloitu vedenkorkeus eroaa huomattavasti mitatusta vedenkorkeudesta, vaatii malli parametrien, kuten pohjan kitkan korjaamista (Ji 2017). Tavallisesti mallit tarvitsevat aina kalibrointia ja mitattujen ja mallinnettujen arvojen välillä saattaa olla suurikin ero. Teknisesti kalibrointi varmistaa mallin toiminnan vain yhdessä, kalibrointiaineiston keräämisen aikana vallinneessa, virtaamatilanteessa.

Kalibroinnin jälkeen malli verifioidaan vertaamalla kalibroidun mallin tuottamia tuloksia vielä toiseen itsenäiseen aineistoon. Yleensä verifiointi tehdään toisenlaiselle virtaamatilanteelle kuin jolla kalibrointi on tehty, jotta saadaan selville, toimiiko malli myös muissa olosuhteissa (Ji 2017). Kalibroinnilla ja verifiointilla saadaan arvioitua mallin tulosten tarkkuus ja niiden jälkeen mallilla luotetaan voivan riittävän tarkasti simuloida kohteen virtausolosuhteita eri tilanteissa. Verifiointin jälkeen malli on valmis tulosten analysointiin, jossa tulee kuitenkin ottaa huomioon, ettei mallilla ole mahdollista simuloida luonnonympäristön kaikkia prosesseja täydellisesti.

3. Tutkimusalue

3.1 Eurajoki

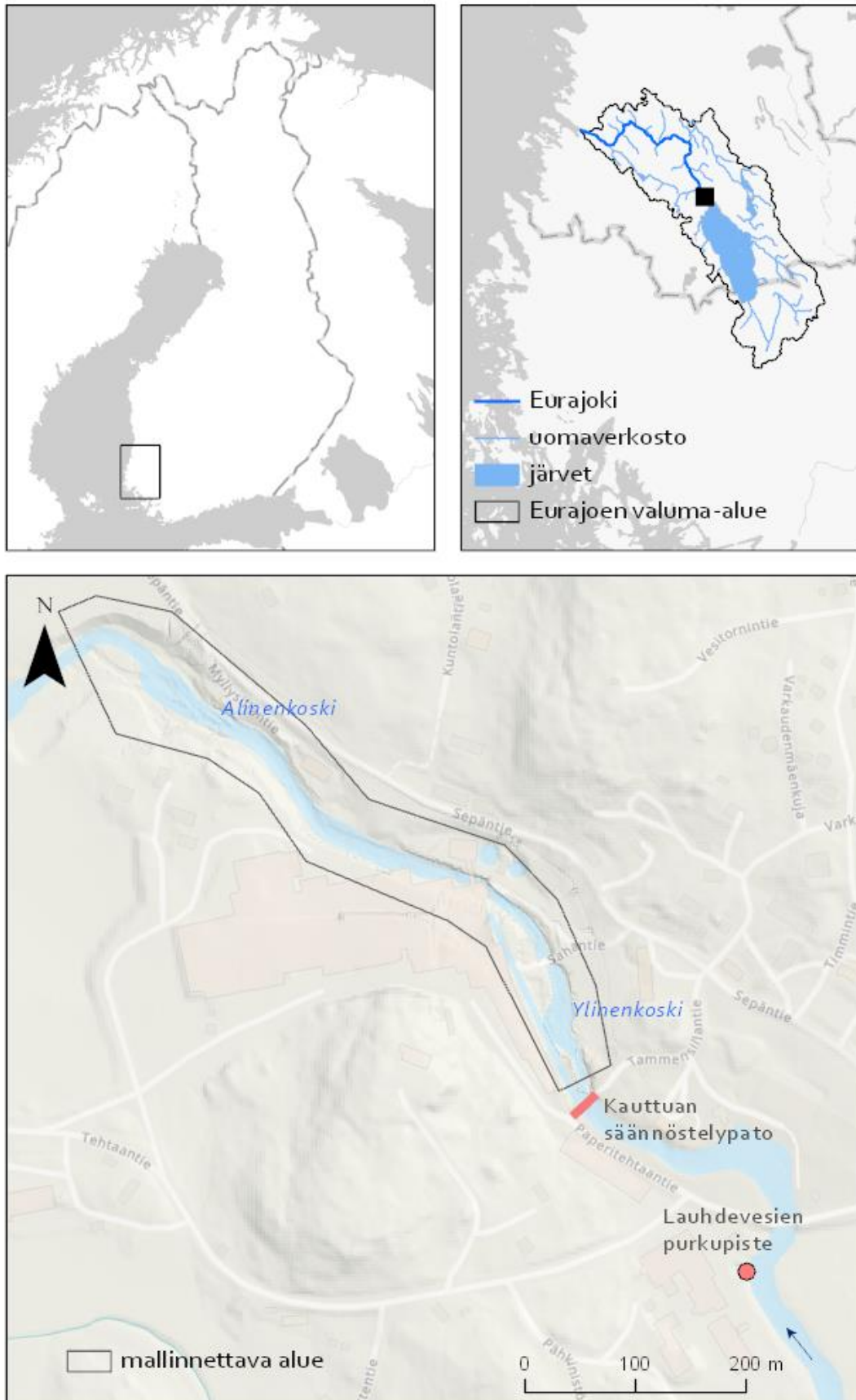
Eurajoki on Eurajoen vesistöalueen noin 52 kilometriä pitkä laskujoki Satakunnassa. Se saa alkunsa Säskylän Pyhäjärvestä ja virtaa Kauttuan, Euran, Kiukaisten, Panelian, Irjanteen ja Eurajoen taajamien läpi laskien Selkämereen Eurajoensalmeen (kuva 11). Eurajoen vesistöalue on pinta-alaltaan 1336 km² ja se jaetaan seitsemään osavaluma-alueeseen. Muita vesistöalueen jokia ovat Pyhäjärveen laskevat Pyhäjoki ja Yläneenjoki sekä Eurajokeen laskevat Juvajoki ja Köyliönjoki.

Joki virtaa voimakkaasti maatalousvaltaisella alueella pääosin avointen viljelysmaiden lävitse. Vesistöalueen maanpeitteestä vuoden 2018 Corine-maanpeiteaineistossa yli puolet on metsää ja maatalousmaat kattavat siitä noin 25 prosenttia (Corine maanpeiteaineisto... 2018). Vesistöalueen järvisyysprosentti on 13 ja Pyhäjärvi on alueen järvistä huomattavasti suurin (155 km²). Kosteikot ja suot kattavat alueen maanpeitteestä noin 1,6 prosenttia ja urbaani maankäyttö 5,5 prosenttia.

Eurajoen tiedetään vielä 1920-luvulla olleen hyvä lohijoki ja Pyhäjärvi-instituutin tietojen mukaan siitä on aikoinaan kerätty myös jokihelmisimpukkaa (Eurajoki s.a.). Aikoinaan joki on ollut tärkeä kulkureitti selkämereltä sisämaahan. Osaltaan sen vuoksi joen ympärille on keskittynyt asutusta. Alueen historia myötä Eurajoki on muotoutunut osaksi lounaissuomalaista kulttuurimaisemaa. Sitten alueen teollistuminen sen edellyttämine voimalaitoksineen, maatalouden kehittyminen, puhdistamattomat jätevedet sekä jokiuoman käyttö ja ihmisen tekemät muokkaukset ovat jättäneet jälkensä Eurajoen hydrologiaan, vedenlaatuun ja eliöstöön.

Alueen vesistöjä kuormittavat maa- ja metsätalous, jätevedet sekä turvetuotanto (Koivunen ym. 2006; Anttila 2018). Suurin osa kuormituksesta on hajakuormitusta. Jätevesiä Eurajokeen ja sen valuma-alueelle lasketaan nykyään Säskylän ja Kauttuan teollisuuslaitoksilta sekä Euran jätevedenpuhdistamolta. Myös teollisuuden lauhdevesiä lasketaan jokeen. Eurajoen ja Pyhäjärven ekologinen tila on luokitukseltaan tyydyttävä (Pintavesien ekologinen ja kemiallinen tila 2020). Vuonna 2013 joen kemiallinen tila on ollut hyvä (Kipinä-Salokannel 2015). Joen yläjuoksulla vedenlaatu on yleisesti parempaa ja veden väri kirkkaampi (Kirkkala & Ryömä 2011). Virkistystarkoituksessa jokea käytetään muun muassa kalastamiseen, ravustukseen, linturetkeilyyn, melontaan sekä uimiseen (Koivunen ym. 2006; Eurajoki – Köyliönjoki s.a.). Joella tapahtuneet jätevesien satunnaispäästöt sekä jätevesien ohijuoksutus ovat kuitenkin huolettaneet alueen asukkaita (Ojala 2020). Pyhäjärvi-Instituutin ja Varsinais-Suomen ELY-keskuksen mukaan suurin virkistyskäyttöä haittaava ongelma Eurajoessa on sen hygieeninen laatu (Eurajoki – Köyliönjoki s.a.).

Eurajoki on koko mitaltaan vahvasti ihmisen muokkaama ja säännöstelemä. Nykyään joessa on neljä voimalaitospatoa, jotka sijaitsevat Kauttualla, Eurakoskella, Paneliassa ja Pappilankoskessa (Kirkkala & Ryömä 2011). Näistä Paneliaan ja Pappilankoskeen on rakennettu kalatiet vuonna 2010. Kauttuan säännöstelypadolla, jolla säädellään Pyhäjärven pinnankorkeutta, on voimakas vaikutus Eurajoen virtaamiin etenkin sen yläjuoksulla. Voimalaitospatojen lisäksi joessa on myös muita patoja tai pohjapatoja. Koskia Eurajoessa on yhteensä 11 ja 2000-luvulla joen ala- ja keskiosissa niitä on kunnostettu lohikalakantojen tilan parantamiseksi (Anttila 2018).



Kuva 11. Lounais-Suomessa sijaitseva Eurajoki saa alkunsa Säskylän Pyhäjärvestä ja laskee Selkämereen Eurajoensalmella. Tässä tutkimuksessa käsitellään Eurajoen yläosassa sijaitsevaa Kauttuankosken aluetta.

Entisen lohijoen kalakantojen tilaan ovat vaikuttaneet joen kuormittuminen sekä vaellusesteet. Eurajoensalmelta kaloilla on uusien kalateiden myötä vaellusyhteys Kiukaisten Eurakosken voimalaitospadolle saakka. Eurakosken padon yläpuolella esteetön osuus jatkuu Kauttuan säännöstelypadolle. 1990- ja 2000-luvuilla Eurajokeen on istutettu lahnaa, ahventa, haukea ja kuhaa sekä lohikaloja (Holsti 2012). 2010-luvulla istutuksia on toteutettu suunnitelmallisemmin sekä kohdennettu kunnostetuille koskialueille. Joen kalataloudellista tilaa on 2000-luvun aikana tutkittu säännöllisesti sähkökoekalastuksilla, koeravustuksilla ja kalastuskyselyillä, ja 2010-luvun tutkimuksissa on huomattu joen kalataloudellisen tilan parantuneen. Ekologista tilaa kuvaa myös 2000- ja 2010-luvuilla kasvaneet kala- ja rapukannat (Anttila & Kirkkala 2019; Ojala 2020).

Joen yläjuoksulla on ilmennyt viime aikoina pahenevia tulvaongelmia johtuen uoman huonosta vedenjohtokyvystä ja kasvittuneisuudesta yhdistettynä tarpeeseen pitää Pyhäjärven pintaa sopivalla korkeudella (Blåfield 2019). Lisääntyneiden tulvimisongelmien vuoksi Eurajoen yläosiin on suunniteltu tulvasuojeluruoppauksen suorittamista (Etelä-Suomen Aluehallintoviraston päätös 12/2018/2). Joen perkaamisen lupapäätöksestä on valitettu perustellen asiaa muun muassa luonnonmukaisen vesirakentamisen vaihtoehtojen huomiotta jättämiselle (Piirin sekä Ala-Satakunnan... 2018). Tulvasuojeluhankkeen suunnittelu käynnistyi alkuvuonna 2021 (Valtuustaloite... 2021).

3.2 Kauttuankoski

Tässä tutkimuksessa keskitytään Euran Kauttualla sijaitsevaan Kauttuankoskeen. Kauttuankoski on vajaan kilometrin mittainen osa Eurajokea, joka jakaantuu suvantopaikkoihin sekä kahteen varsinaiseen koskialueeseen: Aliseen koskeen (kuva 11) ja Yliseen koskeen. Pudotuskorkeus koskessa on noin 13 metriä. Koskialue on vahvasti ihmisen vaikutuksen alainen ja aluetta ympäröivät teollisuuslaitokset sekä asutus. Paikoittain uoman muotoa on muokattu muun muassa pengertämällä. Alisessa koskessa on aikoinaan sijainnut mylly, jonka rauniot ovat edelleen jäljellä. Kosken yläpuolelle johdetaan teollisuuden lauhdevesiä.

Kauttuankosken jyrkin kohta sijaitsee alueen yläosassa Ylisessä koskessa välittömästi Kauttuan säännöstelypadon alapuolella. Ylinen koski jatkuu noin 150 metrin mittaisen matkan, kunnes joki alittaa teollisuusrakennuksen ja sen gradientti tasoittuu. Koskialueen päissä uoman pohja koostuu kalliosta ja isoista lohkareista. Ylisen kosken keskiosassa on leveämpi kohta, jossa uoma haaroittuu ja sen gradientti loivenee (kuva 12). Haaroittuneessa kohdassa uoman pohja muodostuu pienemmistä sammalten ja muun kasvillisuuden peittämistä lohkareista. Pienillä alueilla pohjamateriaalina on kiviä ja soraa. Uoman reunat ja saaret ovat pääosin puustoisia. Osittain uoman toinen reuna myötäilee teollisuusrakennuksen kivijalkaa.

Tutkimusalueen keskiosassa uoma on suorahko ja loiva (kuva 12). Noin 300 metrin mittaisella suoralla osuudella sijaitsevat tutkimusalueen syvimät kohdat ja virtaus on koskialueita hitaampaa. Pohjan materiaali koostuu pääosin karkeasta sorasta, jonka karkeus lisääntyy alajuoksua kohti. Uoman toinen, teollisuusaluetta myötäilevä reuna, on ruohikkoinen ja toinen reuna pääosin puustoinen.



Kuva 12. Lämpötilaloggerien asentamista Ylisen kosken haarautuneeseen osuuteen (a) ja sedimenttinäytteiden ottoa koskien välisellä osuudella (b) kesällä 2020 (Kuvat: Karoliina Lintunen).

Alle sadan metrin pituinen Alinen koski alkaa uoman ylittävästä kiviholvisillasta, jossa on vedelle kolme läpimenoaukkoa. Sillan alapuolella gradientti kasvaa ja uoma levenee sekä haaroittuu useaksi väyläksi, joissa vallitsee voimakas virtausnopeus (kuvat 13 ja 14). Pohjan materiaali koostuu suurista sammaleisista lohkarista. Saaret koskessa ja sen ympäristö ovat puustoisia. Alisessa koskessa sijaitsevat myös myllyn rauniot molemmin puolin uomaa.



Kuva 13. Alinen koski kuvattuna yläjuoksun suunnasta helmikuussa 2019 lopputalven tulvan aikana (a) (Kuva: Pyhäjärvi-instituutin arkistot) ja kesäkuussa 2021 matalan virtaaman aikaan (b).



Kuva 14. Alinen koski kuvattuna alajuoksun suunnasta kesällä 2020 (Kuva: Karoliina Lintunen).

Alisen kosken alapuolella gradientti tasoittuu nopeasti, jolloin uoma levenee ja syvenee suvantomaiseksi altaaksi (kuva 15). Suvannon pohjamateriaali koostuu sorasta ja hiekasta, eikä se ole kasvittunut. Suvannon alapuolella uoma haaroittuu kahteen haaraan, joita erottaa puustoinen saari. Saarta ympäröivät osat uomasta koostuvat pohjamateriaaliltaan hiekasta ja sitä pienemmistä sedimenteistä. Uoman rannat ovat puustoisia.

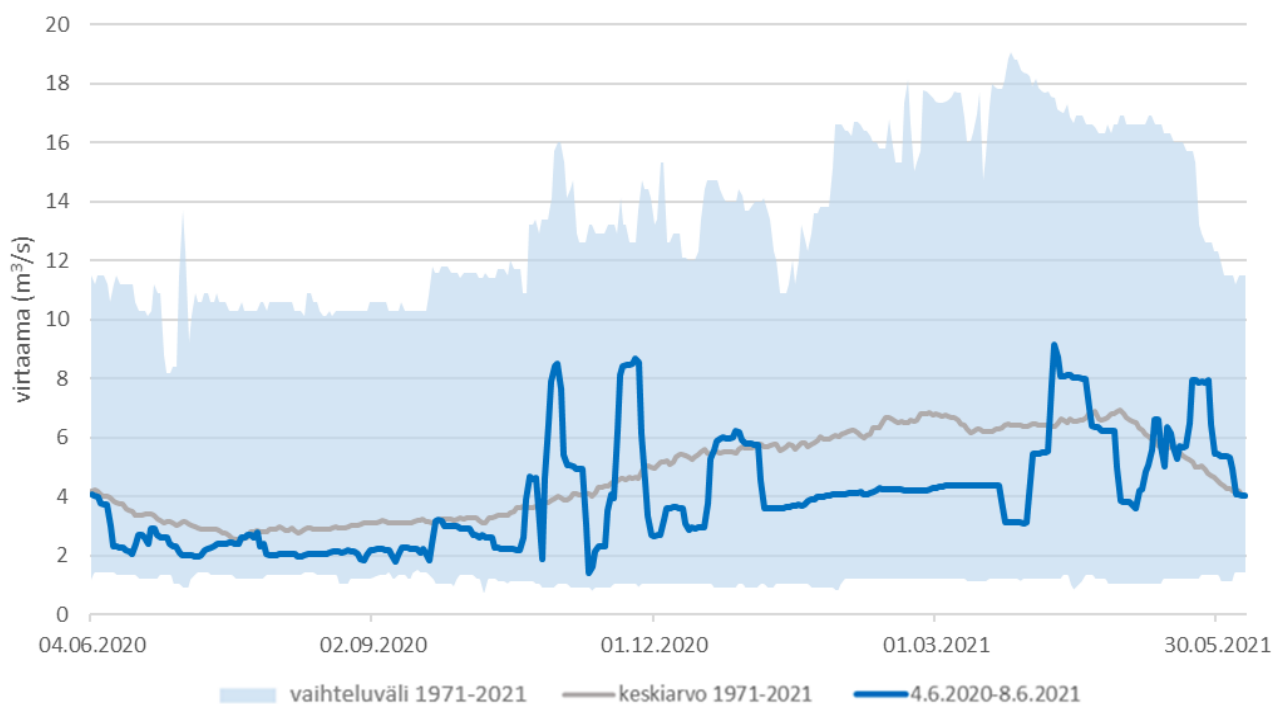


Kuva 15. ADCP-syvyysmittausta Alisen kosken alapuolisella suvantoalueella. Kesällä 2020 suvannon vasemmalla reunalla oli runsaasti kasautunutta hiekkaa (Kuva: Karoliina Lintunen).

Kauttuankosken keskivirtaama on 4,7 m³/s (taulukko 4) (Triipponen & Sallmen 2013). Sen ylivirtaamaksi sekä kerran 20 vuodessa toistuvaksi tulvalukemaksi on määritelty 17,5 m³/s. Korkeimmat tulvalukemat tutkimusalueella esiintyvät keväisin ja keskimääräisesti kuivinta koskessa on loppukesällä (kuva 16). Vuoden 2020 keväällä virtaama koskessa ylsi jopa 18,9 metriin sekunnissa ollen koskessa toistaiseksi suurin mitattu virtaama. Eurajoen valuma-alue luetaan Suomen rannikkoalueen jokiin, joissa tulviminen tulee lisääntymään ympärivuotisesti kasvaneen sadannan myötä (Veijalainen ym. 2010). Sateesta ja lumen sulamisesta johtuvaa tulvimista saattaa Kauttuankoskellakin ilmetä tulevaisuudessa läpi talven.

Taulukko 4. Kauttuankosken virtaaman tunnuslukuja (Triipponen & Sallmen 2013, mukaillen).

	Pyhäjärvi, luusua (m ³ /s)
Ylivirtaama HQ _{1/20}	17,5
Keskiylivirtaama MHQ	11,0
Keskivirtaama MQ	4,7
Keskialivirtaama MNQ	0,7



Kuva 16. Kauttuankosken virtaama mittausjakson aikana sekä vertailuarvoina vuosien 1971-2021 keskiarvo ja vaihteluväli. Virtaamatiedot on mitattu Suomen ympäristökeskuksen mittausasemalla Pyhäjärven luusualla (Ympäristötiedon hallintajärjestelmä... 2021).

Kauttuankoskessa lisääntyy geneettisesti eriytynyt taimenkanta, joka elää eristyneenä Kiukaisten keskustan alueella sijaitsevan Eurakosken voimalaitospadon ja joen yläjuoksulla Eurassa sijaitsevan Kauttuan säännöstelypadon välissä (Aaltonen 2014; Jokinen 2015). Yksi kosken kantaa uhkaavista tekijöistä on kesäisin liian korkeaksi nouseva veden lämpötila. Esimerkiksi vuoden 2021 heinäkuussa pitkään jatkunut helle tappoi taimenyksilöitä Kauttuankoskella (Joensuu 2021).

Koskelle on suunniteltu tehtäväksi kalataloudellinen kunnostus, jolla pyritään parantamaan paikallisen kannan lisääntymismahdollisuuksia. Aiemmin erityisesti taimenen lisääntymisen edistämiseksi on Pyhäjärvisuon Perhokalastajat ry:n talkoilla Alisen kosken niskalle lisätty kiviainesta vuosina 2017 ja 2018 (Degerman 2020). Lisäksi kalojen elinolojen edistämiseksi koskialueen pohjaa on pöyhitty ja siistitty sekä lisätty yksittäisiä suurempia lohkareita.

Tämän tutkimuksen varsinainen tutkimusalue alkaa Kauttuan säännöstelypadolta ja jatkuu Alisen kosken alapuolelle (kuva 11). Lisäksi veden lämpötilaa mitattiin säännöstelypadon yläpuoliselta alueelta teollisuuden lauhdevesien purkupisteen molemmin puolin.

4. Aineistot ja menetelmät

4.1 Tutkimusasetelma, kenttämittaukset ja valmiit aineistot

4.1.1 Tutkimusasetelma

Aineiston kerääminen tutkimukseen suoritettiin pääasiassa vuoden 2020 kesän ja alkusyksyn aikana. Tutkimusalueen geometriatietona käytettiin Pyhäjärvi-instituutin Mitta Oy:ltä tilaamaa takymetrimittauksella tuotettua korkeusmallia. Tutkimusalueen virtausolosuhteita mitattiin vuoden 2020 kesällä ja alkusyksyllä. Koska tutkimusalueen mitalla uomasta ei lähde eikä siihen tule lisää vettä, akustiset virtaamaprofiilimittaukset suoritettiin ainoastaan yhdestä poikkileikkauksesta.

Lämpötila-aineistoa kerättiin vuoden 2020 kesäkuusta vuoden 2021 kesäkuulle. Aineisto kerättiin vedenalaiseen mittaamiseen soveltuvilla HOB0 U22-001 ja HOB0 U20L-04 -loggereilla pääasiassa uoman pohjasta kattaen alueellisesti koko tutkimusalueen. Pohjan sedimenttinäytteet kerättiin vuoden 2020 kesäkuussa kahdeksasta pisteestä käyttäen Van Veen -keräintä. Sedimenttinäytteet kerättiin mahdollisista taimenen lisääntymis- ja poikashabitaattipaikoista. Näytteiden koostumus selvitettiin kuivaseulonnalla.

Geometria- ja virtaama-aineistojen pohjalta rakennettiin tutkimusalueesta hydraulinen malli, jonka tuloksia analysoimalla tehtiin sedimentin liikkeellelähtöä ja kasautumista kuvaavat karttaesitykset. Lisäksi mallinnus- ja pohjanäytetulosten perusteella tehtiin elinympäristön soveltuvuutta kuvaavat karttaesitykset taimenen eri kokoluokille sekä kutemiselle.

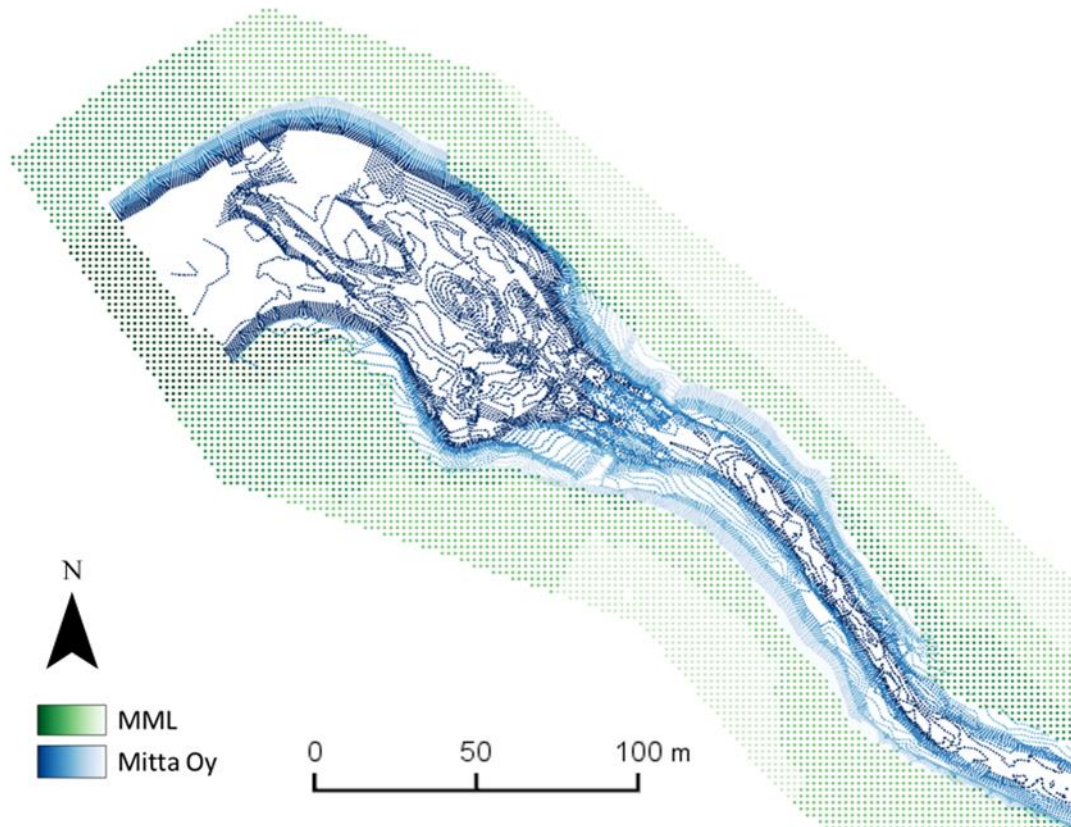
4.1.2 Geometria

Koskialueen vedenpinnan alapuolisia geometriatietoja mitattiin kesän aikana akustisella virtaamaprofiilimittarilla (*engl. Acoustic Doppler Current Profiler, ADCP*) (SonTek M9). ADCP-laitteistoa liikuteltiin kauko-ohjattavalla lautalla uoman reunasta reunaan muodostaen uoman alueellisesti kattavan siksak-kuvion. Pistemuotoinen geometriatieto interpoloitiin paikkatieto-ohjelmassa rasteripinnaksi. Lisäksi käytettiin Pyhäjärvi-instituutin Mitta Oy:ltä tilaamaa korkeusmallia Kauttuankosken alueesta. Mitta Oy:n mallin vedenpinnan yläpuoliset osat on mitattu takymetrimittauksena vuoden 2019 marras- ja joulukuussa ja vedenpinnan alapuoliset osat vuoden 2020 kesäkuun aikana. Malli muodostuu 20 cm välein piirretyistä korkeuskäyristä ja kattaa uoman matkan Kauttuan säännöstelypadolta Alisen kosken alapuolelle myötäillen leveydeltään uomamuodostuman reunoja.

Alkuperäisen tarkoituksen mukaan sekä ADCP- että takymetriaineistoa piti käyttää tutkimusalueen geometrian selvittämisessä. Verrattuna ADCP-aineistoon olivat Mitta Oy:n mallin sijaintitiedot kuitenkin takymetrimittauksen ansiosta huomattavasti täsmällisemmät. Verrattaessa kahdesta aineistosta luotuja rasteripintoja ja niiden luotettavuutta päätettiin ADCP:llä kerätty geometriaa kuvaava aineisto jättää tutkimuksesta pois.

Hydraulisen mallin rakentamista varten geometriatietoja esikäsiteltiin paikkatieto-ohjelmistossa (kuva 17). Geometriatietojen riittävän alueellisen kattavuuden varmistamiseksi käytettiin Maanmittauslaitoksen kansallista lentokonelaserkeilaamalla tuotettua rasterimuotoista 2 m x 2 m maanpinnan korkeusaineistoa. Rasterimuotoinen aineisto rajattiin mallinnettavan alueen kokoiseksi ja muutettiin pistemuotoon. Kansallisesta korkeusaineistosta poistettiin korkeuskäyrien kattama alue. Myös 20 cm välein piirrettyjen korkeuskäyrien muodossa oleva geometriatieto

muutettiin pistemuotoiseksi, ja molempien pisteaineistojen attribuuttitiedot muotoiltiin yhteneviksi. Aineistot interpoloitiin yhdessä 20 cm x 20 cm rasteriaineistoksi, ja rasteripinta muutettiin jälleen pistemuotoiseksi tiedostoksi, jota käytettiin hydraulisen mallin rakentamisessa.



Kuva 17. Maanmittauslaitoksen kansallinen korkeusaineisto ja Mitta Oy:n Kauttuankoskelta keräämä takymetrimittausaineisto yhdistettiin ja interpoloitiin kuvaamaan koskialueen geometriaa (Aineistolähteet: kansallinen korkeusaineisto: MML, Avoimien aineistojen tiedostopalvelu 2020; takymetrimittausaineisto: Juha Pulkkinen / Mitta Oy 2020).

4.1.3 Virtausolosuhteet

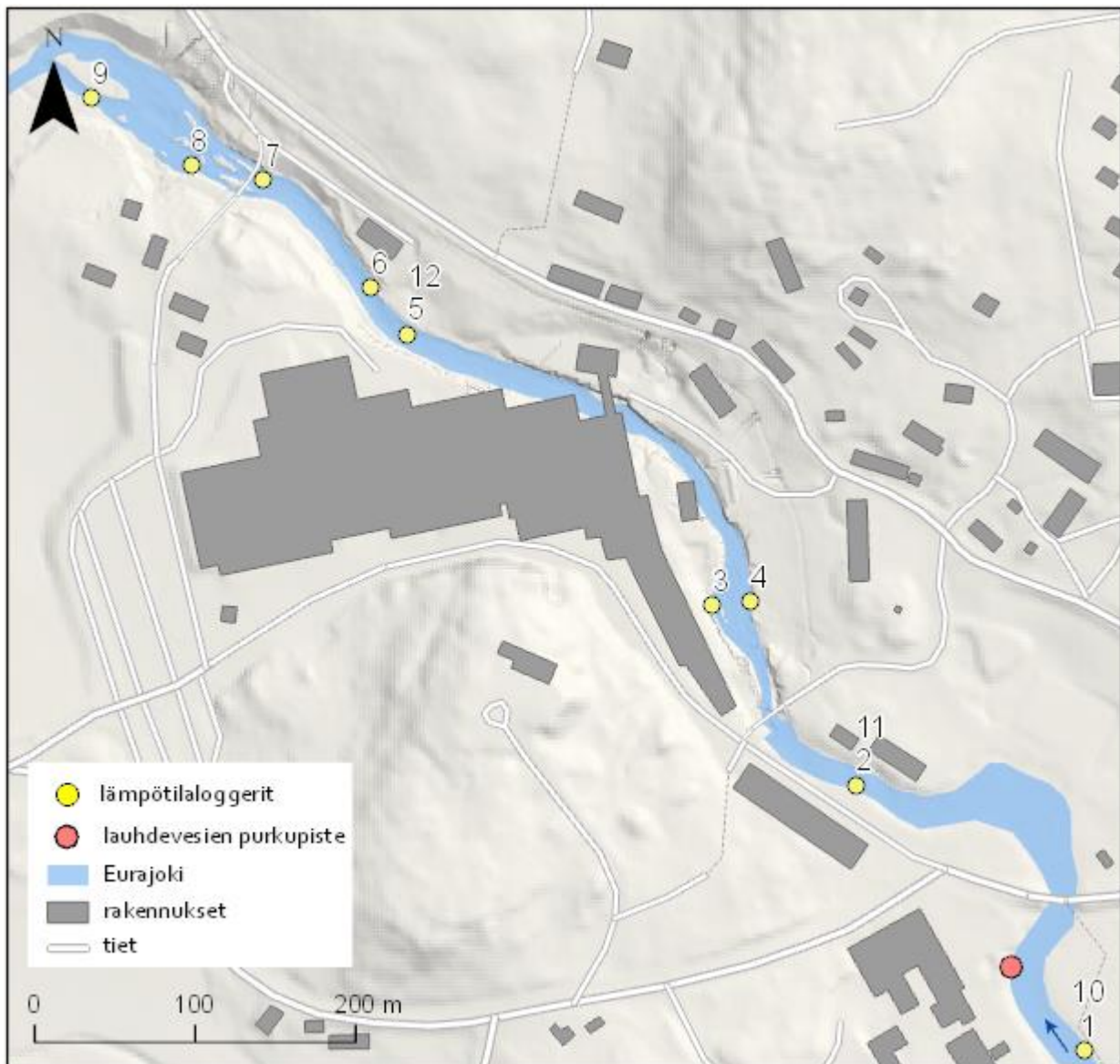
Koskialueen virtaamaa mitattiin Sontek M9 -mallin akustisella virtaamaprofiilimittarilla yhdestä poikkileikkauksesta noin 100 metrin etäisyydeltä Aliselta koskelta ylävirtaan. Mittauksia tehtiin tutkimuksen aikana eri virtaamatilanteissa. Virtaaman mittaaminen akustisella virtaamaprofiilimittarilla tapahtui liikuttaen laitteistoa kauko-ohjattavalla lautalla uoman poikkileikkauksen läpi useita kertoja laitteen mitatessa alapuoleltaan uoman muotoa ja vesipatsaan eri kerrosten virtausolosuhteita. Virtaamatulos laskettiin RiverSurveyor-ohjelmiston ilmoittamien laitteen mittausten pohjalta laskettujen virtaamalukujen keskiarvona. Virtaamamittausten ohessa mitattiin vedenpinnan tasoa (*engl. water level*) tutkimusalueen eri osissa VRS-paikannusmenetelmällä. Mittaukset tehtiin Trimble R10 VRS-GNSS-laitteistolla vedenpinnan tasosta. Vedenpinnan tasoa mitattiin koko kenttätyöjakson ajan eri virtaamatilanteissa.

Lisäksi hyödynnettiin Kauttuankoskessa olevaa jatkuvatoimista virtaaman mittausasemaa (Eurajoki Luusua). Mittausasema sijaitsi tutkimuksen ajankohdan alussa Jujo Thermal Oy:n tehdasrakennusten yhteydessä Ylisen kosken alapuolella. Edellisen kevään tulvavahinkojen vuoksi

kesän 2020 aikana se siirrettiin Alisen kosken niskalle yläjuoksun puolelle siltaa. Jatkuvatoimisen mittausaseman virtaamalukemia on hyödynnetty tutkimuksessa vertaamalla niitä ADCP-mittauksiin sekä käyttämällä niitä virtaamaskenaarioiden mallintamisessa.

4.1.4 Lämpötila

Koskialueen lämpötilaa mitattiin vedenalaisen lämpötilan mittaamiseen tarkoitetuilla HOBO U22-001 ja HOBO U20L-04 -loggereilla, jotka asetettiin Kauttuankosken tutkimusalueelle sekä Kauttuan säännöstelypadon yläpuolella sijaitsevan teollisuuden lauhdevesien purkuputken molemmin puolin (kuva 18). Lämpötilaloggereita asennettiin tutkimusalueelle yhdeksään eri paikkaan uoman pohjalle sijoittaen ne alueellisesti kattavasti sekä huomioiden erityisesti mahdolliset lisääntymis- ja poikasalueet. Lisäksi kolme loggeria asetettiin 70 cm mittaisen köyden ja kohon avulla mittaamaan lämpötilaa matalan vedenpinnan aikana pintavedestä ja korkeamman vedenpinnan aikana 70 cm pohjan yläpuolelta. 70 cm päähän pohjasta asetetut mittarit sijoitettiin muiden loggerien yhteyteen säännöstelypadon yläpuolelle molemmin puolin lauhdevesiputkea sekä koskialueiden väliselle osuudelle.



Kuva 18. Lämpötilaloggerit asetettiin uoman keskenään erilaisiin ympäristöihin. Loggerit 1–9 mittasivat lämpötilaa uoman pohjassa ja loggerit 10–12 70 cm pohjan yläpuolella tai pinnassa.

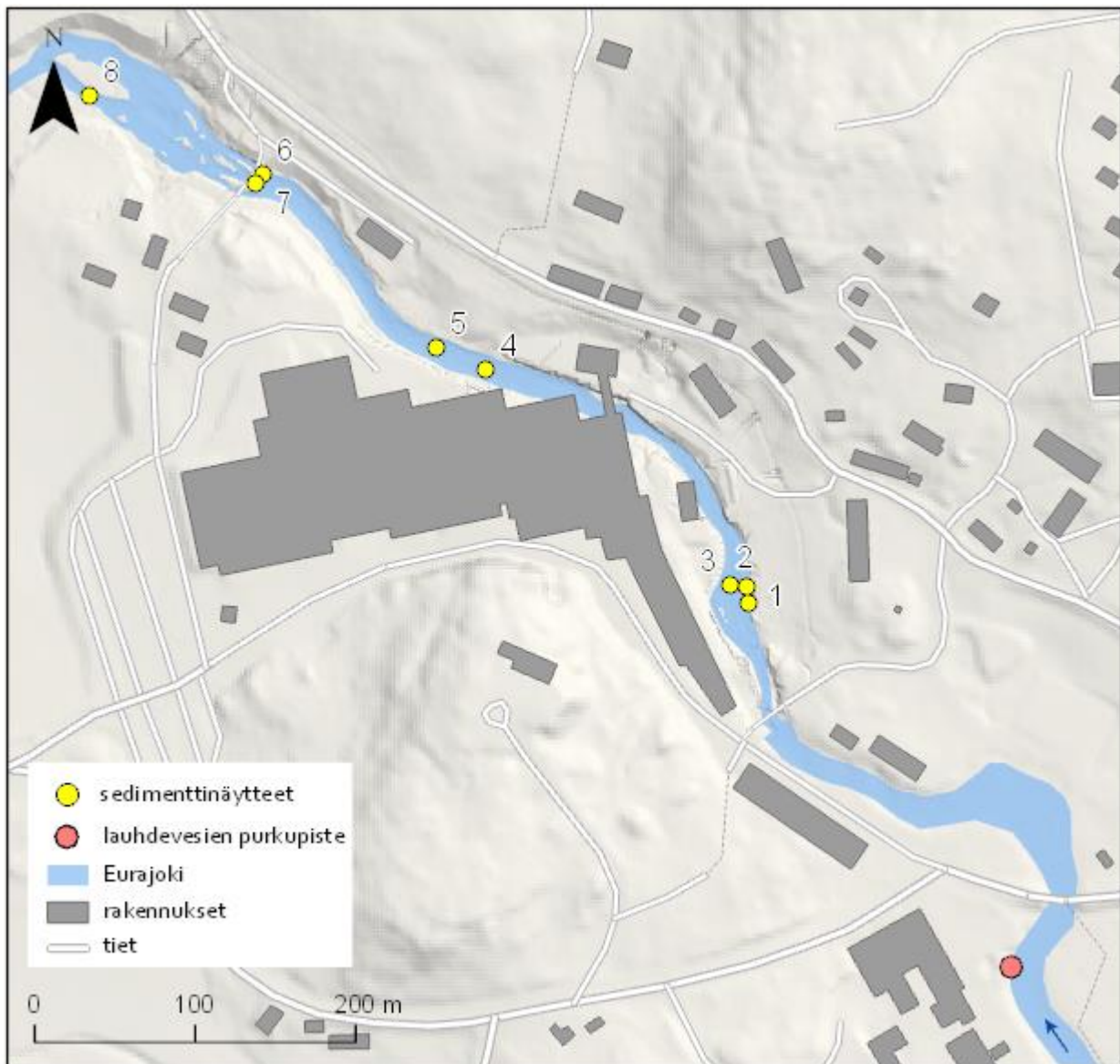
U22-001-loggeri mittaa ainoastaan veden lämpötilaa U20L-04 mitatessa lämpötilan lisäksi myös painetta, joka on verrannollinen vesipatsaan syvyyteen. Jotta kahden eri loggerimallin tuloksia voitaisiin vertailla luotettavasti keskenään, liitettiin mittausasemalle 9 kaksi loggeria – yksi kumpaakin mallia. Lämpötilamittausten onnistumisen varmistamiseksi jo aiempina vuosina käytössä olleet U22-001-loggerit asennettiin tutkimusalueelle pareittain (kuva 19). Uoman pohjaan loggerit asetettiin 3.6.2020, pois lukien loggeri 15, joka asetettiin paikalleen 23.6.2020. Seitsemänkymmenen senttimetrin korkeuteen asennetut loggerit vietiin paikalleen 30.6.2020 ja 2.7.2020. Loggerit noudettiin pois Kauttuankoskesta 8.6.2021.



Kuva 19. Lämpötilaa mittaavat loggerit paikallaan uoman pohjassa. Köydellä rantaan kiinnitettyyn tiiliskiveen on liitetty kaksi HOBO U22-001 -loggeria.

4.1.5 Substraattikoostumus

Kesäkuussa 2020 tutkimusalueelta kerättiin kahdeksan pohjanäytettä Van Veen -keräimellä (kuvat 20 ja 21). Näytteenottopaikkojen sijainnit suunniteltiin jälleen huomioiden mahdollisia lisääntymis- ja poikashabitaattipaikkoja. Lopulliset sijainnit valittiin kentällä virtausoloista ja substraattikoostumuksesta tehdyn arvioinnin perusteella. Kolme näytteenottopaikkaa sijaitsi Ylisen kosken haaroittuvassa osuudessa uoman rinnakkaisissa virtauskanavissa, joissa kentällä tehdyn havainnoinnin perusteella virtausolosuhteet ja pohjan raekoko todettiin mahdollisesti taimenen habitaatille soveltuviksi. Koskien välisestä osuudesta otettiin kaksi näytettä, kuin myös Alisen kosken niskalta sillan edustalta. Alisen kosken alapuolelta joen vasemmanpuolisesta uomasta otettiin yksi pohjanäyte. Näytteidenottohetkellä virtaama koskessa oli $2,2 \text{ m}^3/\text{s}$.



Kuva 20. Tutkimusalueelta kerättiin kahdeksan sedimenttinäytettä Van Veen-keräimellä.

Näytteiden substraattikoostumus selvitettiin kuivaseulonnalla, jossa käytettiin puolen phi-asteikon välisiä seulakokoja. Kuivaseulonnassa käytettävä seulasarja koostuu päällekkäin asetelluista alaspäin silmäkooltaan pienenevistä seulalevyistä, joiden läpi näyte suodattuu ja järjestyy raekokoluokkiin silmäkokojen perusteella (kuva 21). Näytteet kuivattiin 105 °C lämpötilassa, minkä jälkeen niistä punnittiin sekoittamalla homogenisoitu 1000 g osuus seulottavaksi. Punnittu näyte kaadettiin ylimmälle sekä silmäkooltaan suurimmalle seulalle ja laitteen annettiin tärisyttää näytettä seulojen läpi 20 minuuttia. Kymmenen minuutin kohdalla seulasarjaa käännettiin alustalla 180 astetta. Täristyksen jälkeen kuhunkin seulaan jäänyt osuus näytteestä punnittiin ja osuuksien yhteissumman tarkastettiin olevan sama kuin lähtöpaino. Kaikki yli 3,15 cm kokoiset partikkelit punnittiin ja niiden halkaisija mitattiin kolmesta suunnasta (x-, y- ja z-akselit). Lisäksi niiden pallomaisuus (*engl. sphericity*) ja kulmikkuus (*engl. angularity*) kirjattiin ylös.



Kuva 21. Sedimenttinäytteet kerättiin uoman pohjasta Van Veen -keräimellä (a), minkä jälkeen näytteet kuivaseulottiin laboratoriossa (b).

Raekokoluokkien painot syötettiin Gradistat 8.0 -ohjelmistoon tilastollista tarkastelua sekä tulosten visualisointia varten. Gradistat on partikkelikoostumuksen nopeaan tilastolliseen analyysiin kehitetty ohjelma, joka soveltuu erilaisilla standardimenetelmillä, kuten kuivaseulonnalla, mitattujen näytteiden analysointiin (Blott & Pye 2001). Microsoft Excel -pohjainen ohjelma laskee siihen syötettyjen tietojen perusteella näytteen ominaisuuksia kuvaavia tunnusarvoja, kuten keskiarvoa, lajittuneisuutta ja vinoutta, aritmeettisesti, geometrisesti sekä logaritmisesti. Lisäksi ohjelma piirtää näytteiden koostumusta ja niissä eri maalajien osuuksia kuvaavia diagrammeja.

Pohjanäytteiden koostumusta arvioitiin niiden D_{10} -, D_{50} - ja D_{90} -arvoja tulkitsemalla. D_{10} -arvo kuvaa partikkelikokoa, jota pienemmät partikkelit painavat näytteen koko painosta 10 prosenttia loppujen 90 painoprosentin ollessa kyseistä partikkelikokoa isompia. Vastaavasti D_{90} -arvolla kuvataan partikkelikokoa, jota pienemmät partikkelit kattavat näytteen painosta 90 prosenttia ja isommat 10 prosenttia. D_{50} -arvo kuvaa partikkelikokoa, jota sekä pienemmät että isommat partikkelit kattavat näytteestä 50 prosenttia. Toisin sanoen D_{50} -arvo on näytteen mediaani. Lisäksi Gradistatilla tuotettiin sedimenttinäytteiden raekokoluokkien jakautumista painoprosentin mukaan kuvaavat diagrammit.

4.2 Kauttuankosken hydraulinen mallinnus

4.2.1 HEC-RAS ja mallinnuksen lähtökohdat

Kauttuankoskea kuvaava hydraulinen malli tehtiin HEC-RAS-ohjelmistolla. HEC-RAS on Yhdysvaltain armeijan kehittämä virtavesiympäristöjen mallintamiseen suunniteltu avoin ohjelmisto, joka koostuu erillisistä ohjelmista ja analyysikomponenteista (HEC-RAS User's Manual 2021). Ohjelmistolla on mahdollista simuloida virtausta 1- ja 2-ulotteisesti sekä tarkastella sedimentinkuljetusta ja vedenlaatua luonnollisissa ja rakennetuissa jokiympäristöissä.

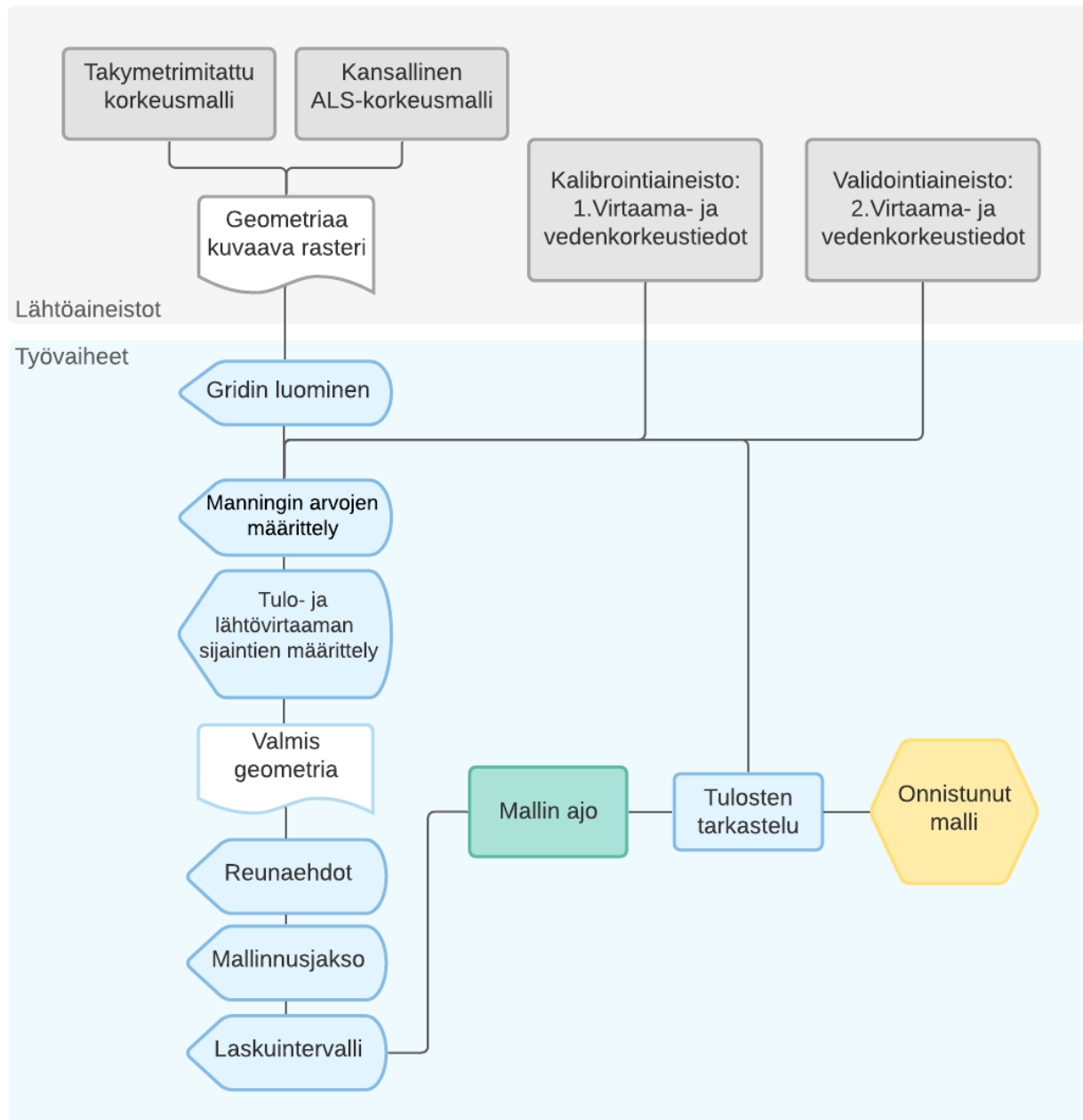
Tässä tutkimuksessa Kauttuankoskesta luotiin kaksiulotteinen hydraulinen malli hyödyntäen HEC-RAS-ohjelmiston muuttuvan virtauksen (*engl. unsteady flow*) analyysikomponenttia. Mallin rakentamiseksi onnistuneesti tarvittiin riittävän laajat ja tarkat taustatiedot, jotka tämän tutkimuksen tapauksessa tarkoittavat tutkimusalueen geometriaa kuvaavaa aineistoa, vedenkorkeusaineistoa kosken eri osista sekä virtaama-aineistoa. Kauttuankosken tutkimusaluetta kuvaava geometriatieto tehtiin yhdistämällä Mitta Oy:n luoma takymetrimalli sekä Maanmittauslaitoksen tarjoama kansallinen korkeusaineisto. Vedenpinnan korkeustiedot kerättiin VRS-paikannusmenetelmällä samoina ajankohtina, kun virtaamaa mitattiin ADCP-laitteistolla. Aineistojen keräämistä kuvataan tarkasti edellisissä luvuissa.

Hydraulista mallia tehtäessä tuli mallin parametrien arvojen olla linjassa todellisten fysikaalisten olosuhteiden kanssa, jotta tulokset vastaisivat oikeita havaintoja mahdollisimman tarkasti. Tutkimusalueelta mitatuilla tuloksilla luotiin todelliseen tilanteeseen perustuvat arvot parametreille, joiden perusteella malli ajettiin. Vertaamalla ajettun mallin laskentatuloksia oikeisiin havaintoihin voitiin päätellä, minkä parametrien arvot vaativat muuttamista. Tätä kutsutaan mallin kalibroinniksi. Mallin validointia varten kerättiin validointiaineistoa, joka tässä tutkimuksessa koostui eri virtaamatilanteiden virtaama- ja vedenpinnankorkeusmittauksista.

4.2.2 Mallin rakentamisen vaiheet

HEC-RAS-mallin rakentaminen aloitettiin tuomalla tutkimusalueen geometriaa kuvaava aineisto käyttäen ohjelmiston HEC-RAS Mapper karttaominaisuutta (kuva 22). Mallin pohjaksi geometria-aineiston päälle rakennettiin rasteriverkko eli gridi, joka mukaili mallinnettavaa uoman osuutta. Gridin rakentaminen aloitettiin piirtämällä mallinnettavan alueen rajat (*engl. Modelling Domain*).

Gridin resoluution valinnassa punnittiin tarvetta mallin alueelliselle tarkkuudelle sekä mallin ajoon kuluvaan aikaan. Tässä tutkimuksessa erityisesti kiinnostavia alueita olivat esimerkiksi oletetut taimenen kutu- ja poikashabitaattipaikat Ylisen kosken alaosissa, koskien välisellä tasaisella uoman osuudella, Alisen kosken niskalla sekä tutkimusalueen alaosassa. Gridin resoluutioksi päädyttiin valitsemaan 1 metri, joka mahdollistaisi uoman paikallisten habitaattien tarkastelun riittävällä tarkkuudella.

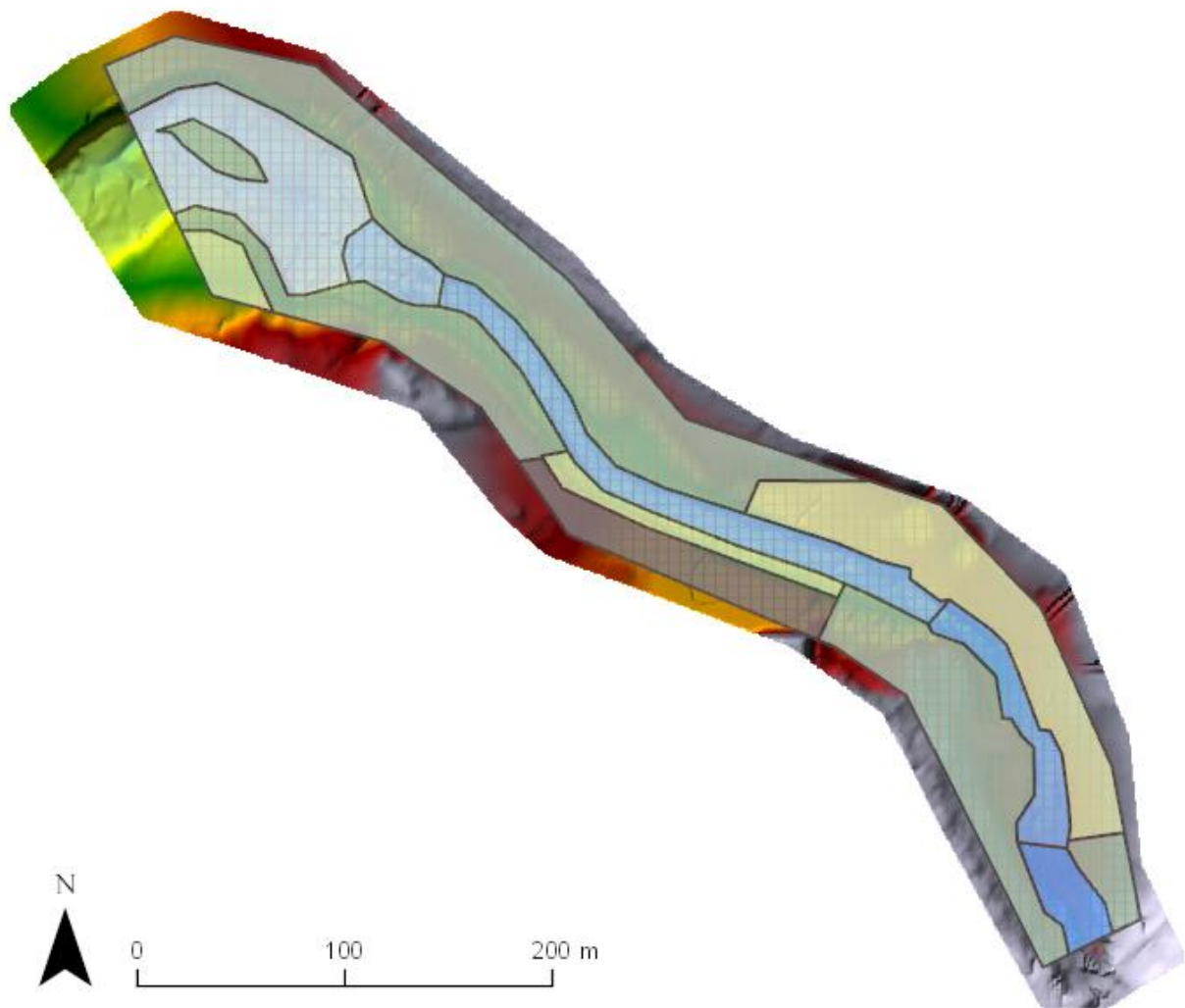


Kuva 22. HEC-RAS-ohjelmistossa mallin rakentaminen aloitettiin gridin luomisesta geometria-aineiston päälle. Mallinnettavalle alueelle määriteltiin karkeutta kuvaavat Manningin n -arvot sekä tulo- ja lähtövirtaamakohtien sijainti ja se kalibroitiin todellisessa tilanteessa mitatuilla virtaama- ja vedenkorkeustiedoilla. Mallille määriteltiin reunaehdot sekä mallinnusjakson sekä laskuintervallin pituus, jonka jälkeen se oli valmis ajettavaksi. Validointiaineistona käytettiin toisen todellisen tilanteen virtaama- ja vedenkorkeustietoja.

Geometry Editorissa määriteltiin tutkimusalueen sisällä karkeudeltaan erilaiset alueet, jotka rajattiin piirtämällä alueita kuvaavat polygonit. Karkeusominaisuudeltaan erilaisiksi alueiksi eroteltiin uoman koskialueet, niiden ulkopuolelle jäävät uoman kohdat sekä uomaa reunustavat erilaiset alueet (taulukko 5 ja kuva 23). Seuraavaksi määriteltiin alueiden karkeutta kuvaavat Manningin n -arvot. Arvojen määrittelyssä käytettiin kentällä tehtyjä havaintoja sekä esimerkkivalokuvia (Barnes 1967; Yochum ym. 2014). Lisäksi gridin reunoihin ala- ja yläjuoksulle piirrettiin lähtö- ja tulovirtaamaa kuvaavat linjat, joille myöhemmässä vaiheessa asetettaisiin mallin käyttäytymistä määrittelevät reunaehdot.

Taulukko 5. Tutkimusalue jaettiin pienempiin osioihin (kuva 23), joille annettiin niiden karkeutta kuvaava Manningin n-arvo. Taulukossa on esitettyinä lopulliset mallissa käytetyt Manningin n-arvot.

	Ylinenkoski yläosa	Ylinenkoski alaosa	keskiosa	Alinenkoski	alaosa	asfaltti	ruohikko	puusto
n	0,065	0,060	0,045	0,065	0,050	0,010	0,045	0,070



Kuva 23. Gridi jaettuna alueisiin maaston karkeuden perusteella. Värit kuvaavat maaston tyyppiä sekä niiden pohjalta alueille määriteltyä Manningin n-arvoa (taulukko 5).

Mallinnettavaan gridiin linkitetyille lähtö- ja tulovirtaaman kohdille määriteltiin reunaehdot. Lähtövirtaaman reunaehtona käytettiin veden pinnan kaltevuutta kuvaavaa normaalisyvyyttä (*engl. Normal Depth*), jonka arvoksi määriteltiin 0,01. Veden tulovirtaaman reunaehtoina käytettiin virtaamaa kuvaavaa hydrografia (*engl. Flow Hydrograph*). Molempien reunaehtoien kohdalla käytettiin samaa arvoa, koko mallinnettavan ajanjakson läpi. Mallinnusajanjaksona käytettiin 24 tuntia, jotta malli ehtisi tasoittua sen aikana. Laskuintervalliksi asetettiin 0,1 sekuntia. Näiden parametrien asettamisen jälkeen malli oli valmis ajettavaksi.

Valmiiden mallien tulokset avattiin HEC-RAS Mapperissa, jossa voitiin tarkastella mallinnettujen skenaarioiden eri muuttujien, kuten vedenpinnan korkeuden, vesipatsaan syvyyden ja virtausnopeuden arvoja mallinnusjakson eri vaiheissa. Malli kalibroitiin eli asetettiin vastaamaan todellisessa tilanteessa mitattuja arvoja käyttämällä virtaama- ja vedenpinnankorkeusaineistoja, jotka oli mitattu tutkimusalueelta 2,2 m³/s virtaamatilanteessa. Kalibroinnissa ajettua mallia tarkasteltiin HEC-RAS Mapperissa uudestaan, kunnes sen tuloksiin oltiin tyytyväisiä. Tässä tutkimuksessa mallin kalibrointi tehtiin muokkaamalla pääasiassa Manningin n-arvoja. Kalibroitu malli validoitiin toisen virtaamatilanteen (6,3 m³/s) mittauksilla. Mallin antamien muuttujien arvojen vastatessa riittävästi mitattuja arvoja molemmista tunnetuista tilanteesta, oli malli valmis ja sillä saatettiin mallintaa tutkimuksen kannalta kiinnostavia virtaamatilanteita.

4.3. Mallin tulosten analyysi

4.3.1 Sedimentin liikkeellelähtö- ja kasautumisalueiden määrittäminen

Alueiden, joilla virtaus irrottaa sedimenttiä uoman pohjasta, määrittämiseksi käytettiin analysoituja sedimenttinäytteitä sekä hydraulisen mallin tuloksena saatuja rasteriaineistoja virtausnopeudesta ja vesisyvyydestä. Tietojen perusteella laskettiin sedimentin liikkeellelähtöön vaadittava virtausnopeuden raja-arvo (*engl. threshold velocity*) kullekin uomaa kuvaavalle rasterisolulle. Laskutoimituksen suorittamiseksi sedimenttinäytteiden analyysitulosten sekä kentällä tehtyjen visuaalisten havaintojen pohjalta interpoloitiin sedimentin mediaaniraekokoa kuvaava taso. Tasoon lisättiin mekaanisesti piirtämällä tutkimusalueen lohkareiset koskialueet, joiden raekooksi asetettiin 4000 mm. Syvyyskeskiarvotetun virtausnopeuden raja-arvo laskettiin käyttämällä seuraavaa kaavaa:

$$U_{cr} = 1,07\sqrt{\Delta gd} \log\left(8,8 \frac{h}{D_{95}}\right)$$

kaava 9

, jossa U_{cr} = virtausnopeuden raja-arvo sedimentin liikkeellelähdölle

h = vesisyvyys

d = sedimentin mediaaniraekoko (D_{50} -arvo)

D_{95} = raekoko, jota pienempää on 95% osuus sedimentistä

g = painovoiman kiihtyvyys

Δ = sedimenttipartikkelien suhteellinen massan tiheys veden alla (Goncharov 1964; Shahmohammadi ym. 2021).

Käytetty laskukaava on tehty kuvaamaan syvyyskeskiarvotettua virtausnopeutta (Shahmohammadi ym. 2021), minkä vuoksi se on yhteensopiva kaksikulotteisen hydraulisen mallin tulosten kanssa. Lisäksi tulokset ovat vertailukelpoisia Hjulströmin (1935) sedimentin kulutusta, liikkeellelähtöä, kuljetusta ja kasautumista virtavesiympäristöissä kuvaavan diagrammin kanssa.

Vertaamalla laskettuja virtausnopeuden raja-arvoja sedimentin liikkeellelähdölle hydraulisella mallinnuksella tuotettuihin virtausnopeuksiin voidaan tutkimusalueesta paikkatietopohjaisesti rajata alueet, joilla sedimentti lähtee virtauksen voimasta liikkeelle. Kaava on kuitenkin suunniteltu hyödynnettäväksi Kauttuankoskea hienompiraekokoisten virtavesiympäristöjen tutkimukseen. Siinä käytetään sedimentin D_{95} -arvoa, joka kuvaa raekokoja, jota pienempää on näytteestä 95 prosenttia. Laskettaessa virtausnopeuden raja-arvoa Kauttuankoskelta mitatuilla D_{95} -arvoilla saadaan tulokseksi hyvin pieniä lukemia. Vertaamalla D_{95} -lukemia alueen virtausnopeuksiin saadaan uomasta erotettua pieniä alueita, joiden avulla sedimentinkulutusta tutkimusalueella ei onnistuta kuitenkaan perusteellisesti kuvaamaan. Jotta sedimentin liikkeellelähtöä Kauttuankoskella voitaisiin kuvata todenmukaisemmin, päädyttiin analyysissä käyttämään kaavan D_{95} -arvon tilalla mitattua arvoa pienempää lukemaa.

Sedimentin kasautumisalueiden tunnistamiseksi valittiin raekoot, joiden kasautumiseen vaadittavat keskiarvotetut virtausnopeudet saatiin Hjulströmin (1935) diagrammista (kuva 4). Hydraulisen mallin tuottamat virtausnopeutta kuvaavat rasteritasot luokiteltiin paikkatietopohjaisesti uudelleen kuvaamaan alueita, joilla kukin raekoko ja sitä pienemmät partikkelit kasautuvat. Raekokojen valinta tehtiin huomioimalla mallin tuottamat virtausnopeudet sekä raekoot, jotka saattaisivat kasautuessaan tukkia soraikkoja, joita taimenet käyttävät kutemiseen tai elinympäristönään. Tässä tutkimuksessa käytettiin 1, 2 ja 5 mm raekokoja. Hjulströmin diagrammin mukaan virtausnopeudet kasautumiselle ovat valituille raekoille seuraavat:

1 mm: 6 cm/s

2 mm: 10 cm/s

5 mm: 18 cm/s

4.3.1 Elinympäristön soveltuvuuden määrittäminen

Tutkimusalueen soveltuvuuden määrittämiseksi taimenen elinympäristölle käytettiin alueellista monimuuttuja-analyysia (*engl. spatial multi-criteria decision analysis, MCDA*). Alueellisessa monimuuttuja-analyysissa eri muuttujat arvotetaan samalle arvoasteikolle niiden tärkeyden perusteella (Carver 2008). Analyysi mahdollistaa usean eri ilmiön toteutumisen tarkastelun samassa karttaesityksessä. Menetelmä on käytössä muun muassa eliöiden elinympäristövaatimusten toteutumisen tarkastelussa.

MCDA-menetelmää on käytetty kaksiulotteisen hydraulisen mallin tulosten arvottamiseen esimerkiksi Suomessa lohen (Koljonen ym. 2012) sekä Yhdysvalloissa taimenen (Clark ym. 2006) elinympäristöjen tutkimuksessa. Virtavesihabitaattien tutkimuksessa menetelmästä käytetään englanninkielistä termiä *weighted usable area (WUA)*. Termi viittaa alueeseen, jota tietyn lajin tietyssä elinkierron vaiheessa olevat kalayksilöt potentiaalisesti käyttävät elinympäristönään (Boavida ym. 2011). Perinteisesti WUA:n määrittämiseen käytetään tietoja virtausnopeudesta, vesisyvyydestä ja pohjan raekoosta (Payne 2003).

Tässä tutkimuksessa monimuuttuja-analyysi tehtiin neljälle mallinnetulle virtaamatilanteelle (2, 6, 11 ja 17 m³/s) sekä neljälle taimenen elinkierron vaiheelle/kokoluokalle, joita olivat alle 10 cm pitkät, 10–15 cm pitkät ja yli 15 cm pitkät taimenet sekä kuteminen. Muuttujina käytettiin virtausnopeutta, vesisyvyyttä sekä pohjan raekokoja. Neljäntenä muuttujana olisi ollut mahdollista käyttää

lämpötilaa, mutta mittaustulosten alueellisen vaihtelun ollessa Kauttuankoskella hyvin pientä päätettiin se jättää analyysistä pois. Virtausnopeuden ja vesisyvyyden aineistoina käytettiin hydraulisen mallin tuottamia rasteritasoja ja raekokoa kuvaavana aineistona käytettiin edellisessä luvussa kuvailtua näytteiden mediaaniarvoista interpoloitua rasteritasoa. Muuttujien arvottamisessa hyödynnettiin tietoa taimenen elinympäristöksi soveltuvien sekä optimaalisten olosuhteiden rajoista (taulukko 2).

Elinympäristömuuttujat pisteytettiin siten, että optimialueille osuvat arvot luokiteltiin uudelleen arvolla 1 ja soveltuville alueille osuvat arvot arvolla 0,5. Soveltuvien alueiden ulkopuolelle jääville arvoille annettiin uudeksi arvoksi 0. Virtausnopeuden, vesisyvyyden ja raekoon arvot laskettiin yhteen tuottaen samalla uusi rasteritaso, jonka solut saivat arvoja 0 ja 3 välillä. Lopuksi arvot muutettiin prosenteiksi kuvaamaan elinympäristön soveltuvuusindeksiä (*engl. habitat suitability index, HSI*) eli toisin sanoen Kauttuankosken suhteellista soveltuvuutta taimenen elinympäristölle (Koljonen ym. 2012).

5. Tulokset

5.1 Lämpötilaolosuhteet

Kahden loggerimallin välinen vertailu tehtiin loggerien 9a ja 9b perusteella. Niiden mittaukset vastaavat toisiaan normaalitilanteessa erinomaisesti U20L-04- ja U22-001- loggerien erotuksen pysyessä -0,015 ja 0,015 celsiusasteen välillä. Aineistossa on kuitenkin kaksi selkeää jaksoa, jossa esiintyy jopa yli 3,5 celsiusasteen eroja loggerimallien välillä. Nämä erot saattavat johtua esimerkiksi loggerien likaantumisesta tai hautautumisesta pohjaan. Poikkeavat jaksot huomioiden on mittausaikavälillä U20L-04- ja U22-001-loggerien erotuksen keskiarvo 0,023 °C, moodi 0,012 °C ja mediaani 0,036 °C.

Tutkimusalueelta mitattujen pohjalämpötilojen väliset erot olivat pieniä läpi mittausajanjakson (liitteet 1–4). Suurinta loggerien välinen hajonta oli lämpiminä vuodenaikoina ja pienintä talvella. Suurimmillaan hajonta loggerien välillä oli 1,83 °C kesäkuussa vuonna 2020. Samana ajanjaksona Kauttuankosken vesi oli lämpimintä. Korkein lämpötila (27,08 °C) mitattiin 28.6.2020 iltapäivällä loggerilla 2. kesäkuun jälkeen vuorokausittaiset keskilämpötilat eivät ylittäneet 22 celsiusastetta. Elokuun loppupuolelta tammikuun alkuun vesi viileni noin 21-asteisesta nolla-asteiseksi loggerien välisen hajonnan samalla pienentyessä. Kauttuankosken vesi pysyy noin nolla-asteisena maaliskuun alkuun asti, jonka jälkeen se alkaa nousta. Korkeimmillaan vuonna 2021 mittausjakson aikana se on vuorokausikeskiarvoltaan yli 17°C kesäkuun alussa.

Tutkimusalueelta mitattujen lämpötilojen keskiarvoa verrattiin taimenen ikäluokkien selviytymisen kannalta kriittisiin lämpötilarajoihin. Vuoden 2020 kesäkuun loppupuolella lämpötilan ollessa mittausjakson korkein, ylittyi kriittinen lämpötilan yläraja ruskuaispussillisten poikasten (alevin) alku- (22 °C) ja kehittyneen asteen (24 °C) sekä alle 2-vuotiaiden poikasten alkuasteen (25 °C) kohdalla (kuva 24). Vuorokausien, joina lämpötilaraja ylittyi, määrä oli ruskuaispussillisten poikasten alkuasteella 12, kehittyneellä asteella 4 ja alle 2-vuotiaiden alkuasteella 2. Kriittiset lämpötilarajat eivät ylittyneet alle 2-vuotiaiden kehittyneen asteen (26 °C) ja selkärangallisia saalistavien yksilöiden (30 °C) kohdalla. Mädille kriittinen lämpötilan yläraja 13 °C alittui syksyllä 2.10.2020 ja ylittyi keväällä 13.5.2021.

selkärangallisia saalistavat30

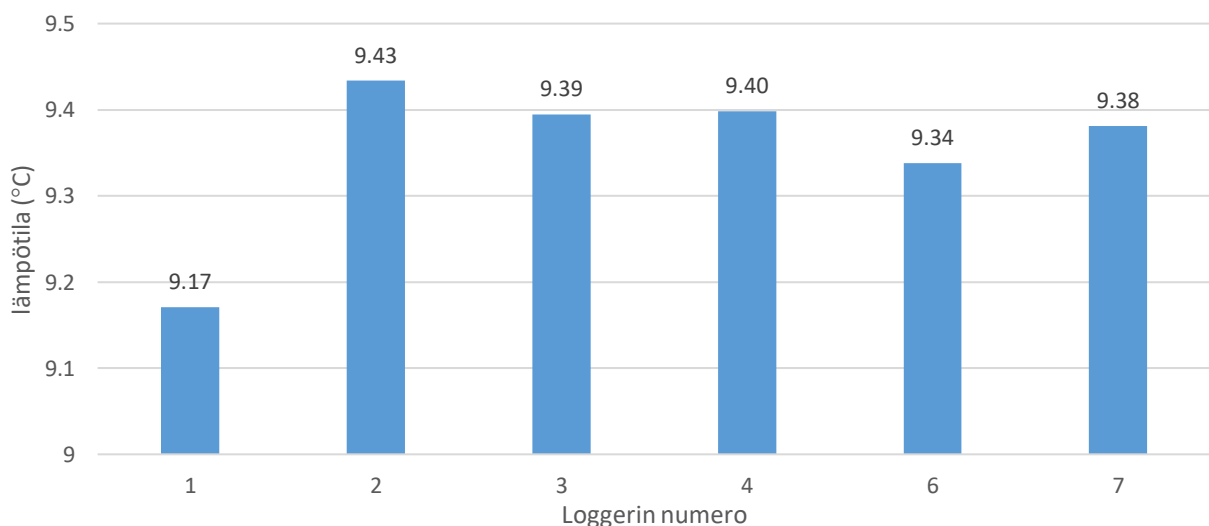
alle 2-v kehittynyt aste
alle 2-v alkuaste
alevin, kehittynyt aste
alevin, alkuaste

mäti



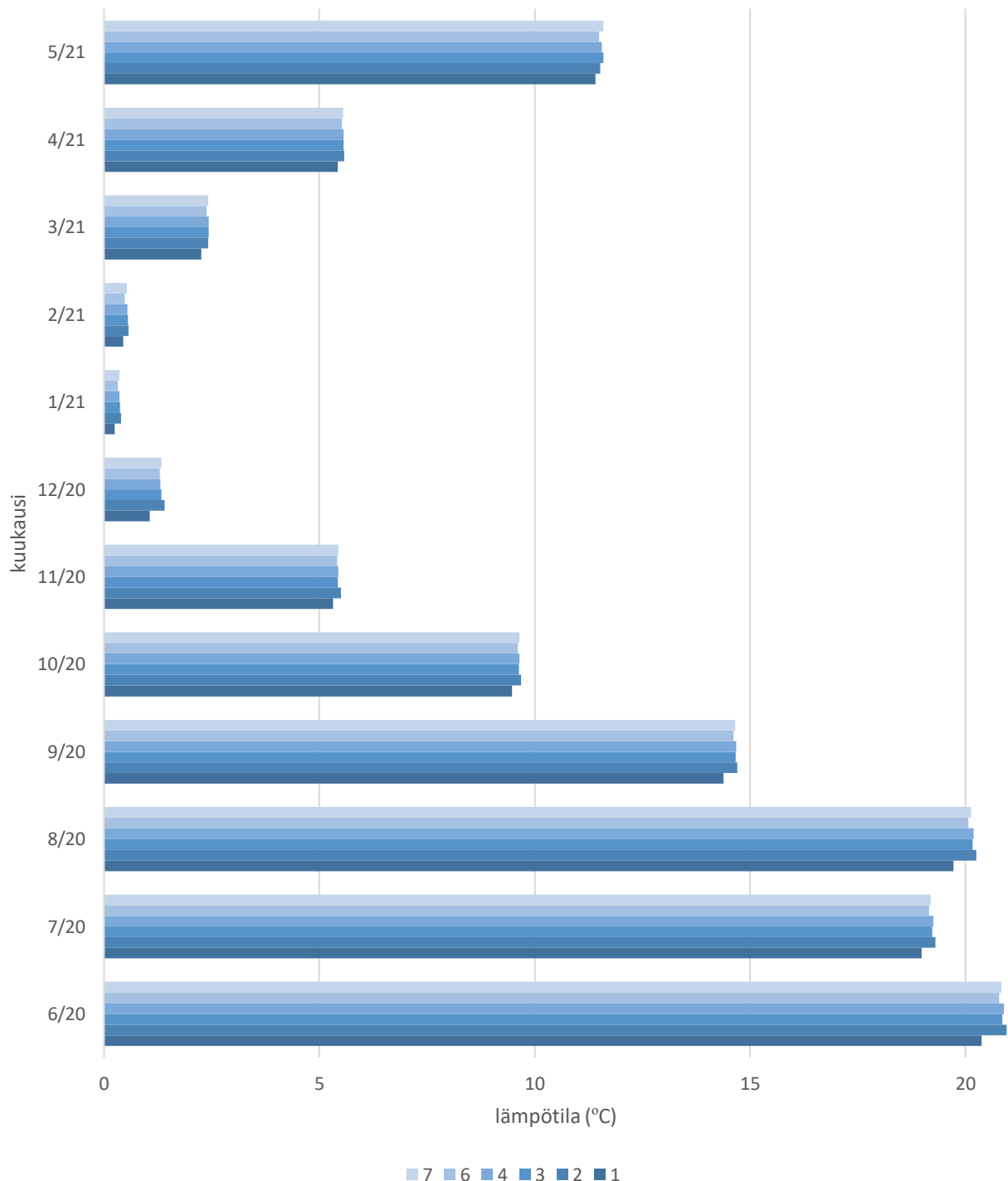
Kuva 24. Keskiarvo uoman pohjalle asetettujen loggerien lämpötiloista mittausjakson ajalta sekä taimenen eri ikäluokkien selviytymisen kannalta kriittiset lämpötilan ylärajat (Elliot & Elliot 2010: 1796) (taulukko 3). Kuvassa käytetty Elliotin ja Elliotin määrittelemien kriittisten lämpötilavähykkeiden ylärajoja. Kriittiset rajat ylittyivät ikäluokasta riippuen muutamien päivien ajaksi kesäkuun lopussa 2020.

Lauhdevesiputken vaikutusta lämpötilaan tarkasteltiin vertailemalla putken yläpuolisen loggerin (1) arvoja muihin loggereihin (kuvat 25 ja 26). Loggeri 1:n mitaamat lämpötilat ovat keskimäärin pienempiä kuin muiden loggerien mittaukset. Mittauksien väliset erot ovat voimakkaimpia kesällä ja alkusyksyllä 2020. Koko mittausjaksolla loggerin 1 keskiarvo 9,17 °C on vertailussa pienin, kun taas loggerin 2 keskiarvo 9,43 °C on suurin.



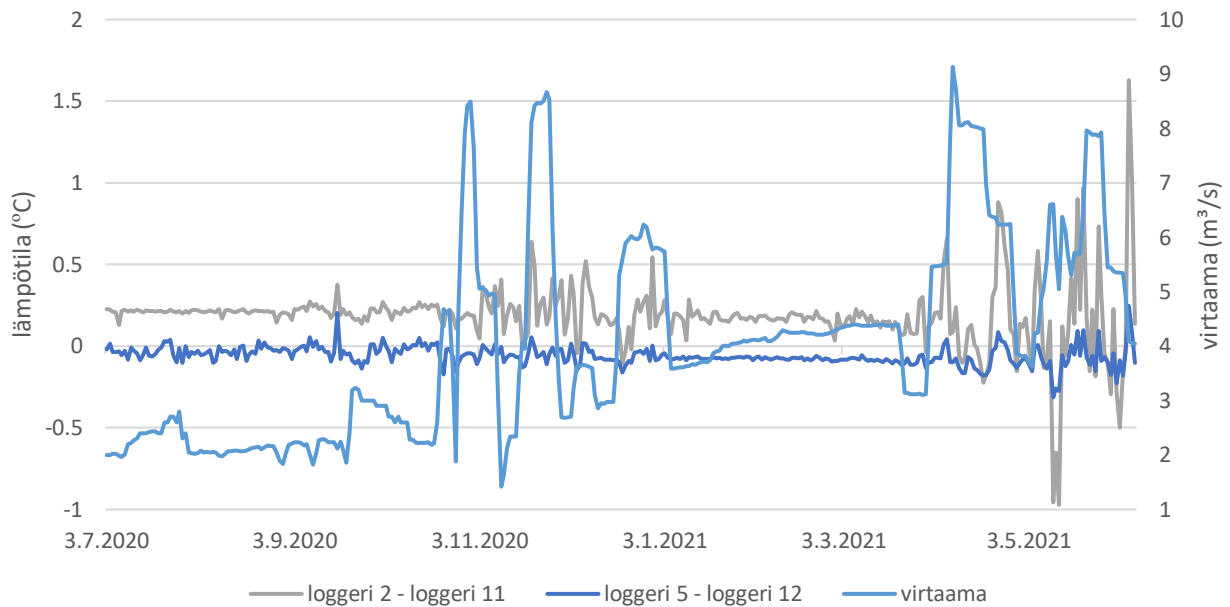
Kuva 25. Koko mittausajanjakson ajan toimineiden pohjan loggerien (1-7) mitaamat lämpötilan keskiarvot mittausjakson ajalta. Loggerit on numeroitu sijainnin mukaan niin että numerot kasvavat alavirtaa kohti. Teollisuuden lauhdevesiä johdetaan loggerien 1 ja 2 välille ja Kauttuan säännöstelypato sijaitsee loggerien 2 ja 3 välissä

Kauttuan säännöstelypadon vaikutusta sen alapuolisen veden lämpötilaan tarkasteltiin vertailemalla padon yläpuolista loggeria (2) sen alapuolisiin loggereihin (kuvat 25 ja 26). Padon alapuoliset lämpötilat olivat ympärivuotisesti hieman padon yläpuolista lämpötilaa matalampia. Alajuoksun suuntaan lämpötilojen keskiarvoissa esiintyi laskeva trendi, joka oli voimakkaimmillaan kesällä ja alkusyksyllä vuonna 2020.



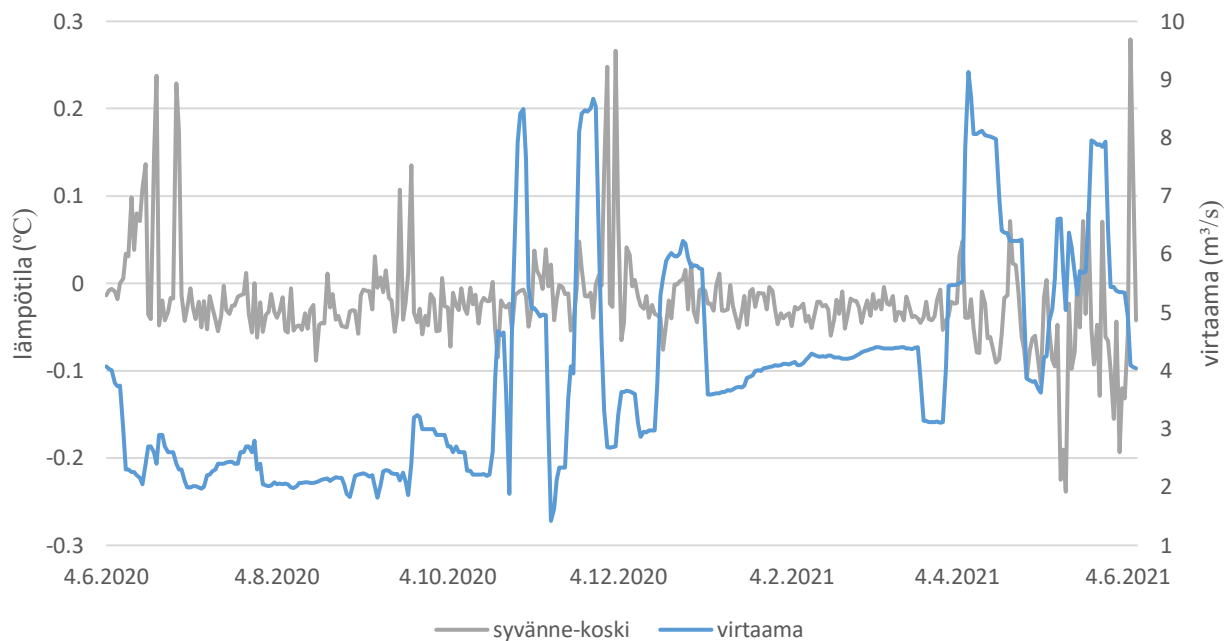
Kuva 26. Koko mittausajanjakson ajan toimineiden pohjan loggerien (1-7) mitaamat lämpötilan kuukausikeskiarvot. Loggerit on numeroitu sijainnin mukaan niin että numerot kasvavat alavirtaa kohti. Teollisuuden lauhdevesiä johdetaan loggerien 1 ja 2 välille ja Kauttuan säännöstelypato sijaitsee loggerien 2 ja 3 välissä.

Vesipatsaan vertikaalisessa tarkastelussa huomataan, että loggerilla 5 oli pohjan vesi vuoden läpi keskimäärin 0,0-0,1 °C viileämpää kuin 70 cm pohjan yläpuolella (kuva 27). Sama ilmiö toistui loggerilla 1, jossa korkeammalle asennettu mittari keräsi aineistoa ainoastaan elokuun 2020 loppuun asti. Sen sijaan loggerilla 2 pohjan lämpötila oli läpi vuoden keskimäärin lämpimämpää kuin 70 cm pohjan yläpuolella. Suurimmat lämpötilaerot (n. 0,2 °C) esiintyivät matalan virtauksen aikaan kesällä ja syksyllä vuonna 2020, jolloin lämpömittari ylsi vesipatsaan pintaan. Kaikkien loggeriparien kohdalla lämpötilaerot käyttäytyivät tasaisesti matalan virtaamaan aikaan ja vaihtelevat runsaammin korkean virtaaman aikaan.



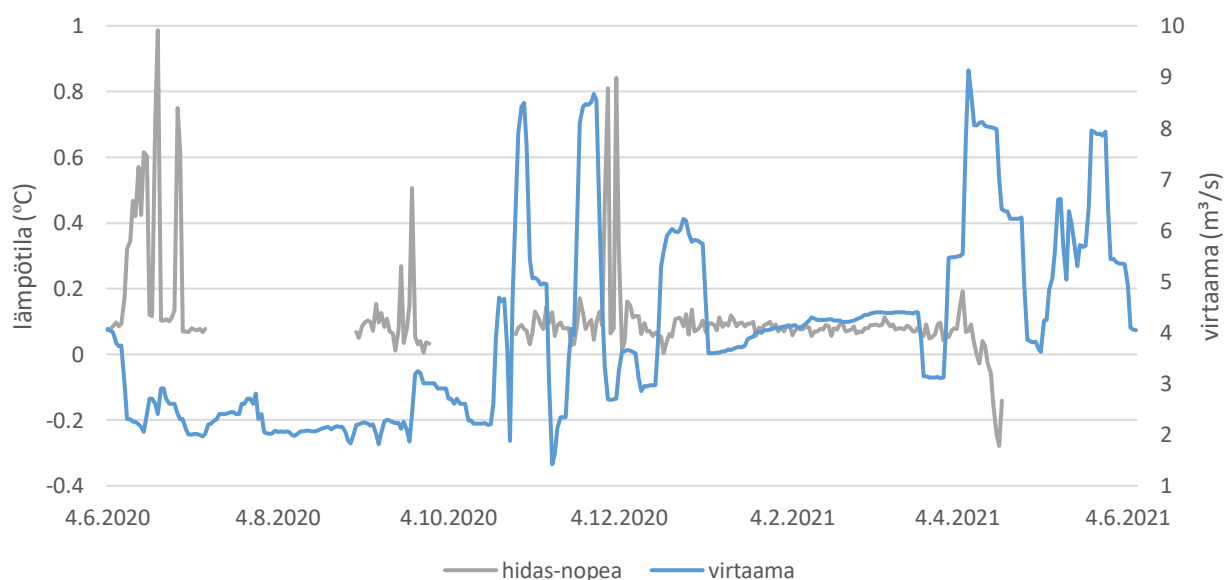
Kuva 27. Pohjan ja 70 cm korkeudelle asetettujen loggerien erotus vuorokausikeskiarvoina loggereilla 2 ja 5 sekä virtaamatiedot mittausjaksolta. Loggerilla 2 on pohjan vesi keskimäärin lämpimämpää kuin 70 cm korkeudessa päinvastoin kuin loggerilla 5.

Verratessa koskialueelle sijoitettujen loggerien 3, 4 ja 8 arvoja tutkimusalueen syvimpään paikkaan sijoitettujen loggerien 5 ja 6 arvoihin, saatiin selville veden olevan keskimäärin viileämpää syvänteissä kuin koskissa (kuva 28). Mittausjakson aikana keskimääräinen erotus syvänteiden ja koskien välillä on -0,02 °C. Syvänteissä vesi oli koskialueita viileämpää virtaaman ollessa tasaista heinäkuusta lokakuulle ja tammikuulta maaliskuulle. Muina aikoina syvänteiden ja koskien lämpötilan suhde oli epävakaampi ja virtaamapiikkien seurauksena koskien lämpötila saattoi olla syvänteitä viileämpää.



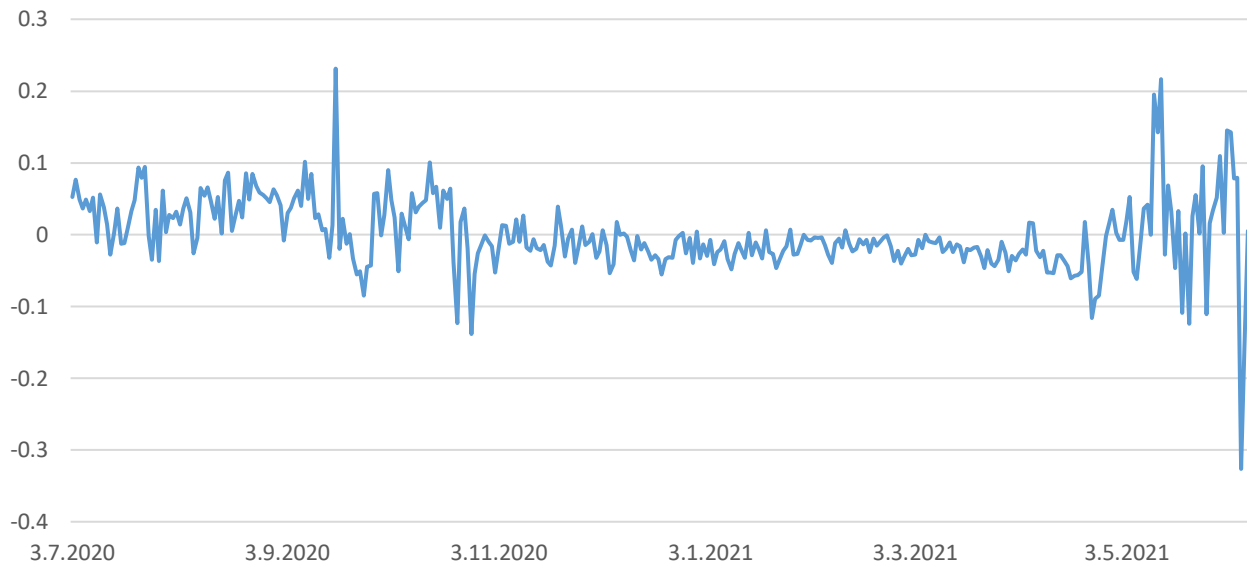
Kuva 28. Syvänteiden ja koskialueiden lämpötilan erotus vuorokausikeskiarvoina sekä virtaamatiedot mittausjaksolta. Veden lämpötila on keskimäärin viileämpää syvänteissä, kuin koskialueilla. Virtaamatilanteen ollessa tasainen ovat lämpötilaerot tasaisimpia. Virtaamapiikkien aikana erot kasvavat.

Hitaan virtauksen kohdassa sijainneen loggeri 9:n ja nopean virtauksen kohdassa sijainneen loggeri 8:n vertailussa huomataan, että lämpötila hitaan virtauksen kohdalla on ollut keskimäärin 0,0–0,01 astetta suurempi kuin nopean virtauksen kohdalla (kuva 29). Toisinaan hitaan virtauksen loggerin lämpötila oli hetkellisesti 0,5–1,0 astetta nopean virtauksen lämpötilaa korkeampi. Vuoden 2021 keväällä on nopean virtauksen paikassa lämpötila ollut hitaan virtauksen paikkaa korkeampi. Aineistoa ei voida kuitenkaan tulkita koko vuoden ajalta sen katkonaisuuden vuoksi.



Kuva 29. Hitaan ja nopean virtauksen paikkojen lämpötilan erotus vuorokausikeskiarvoina sekä virtaamatiedot mittausjaksolta. Lämpötila on keskimäärin korkeampi hitaan virtauksen paikassa.

Myös varjoisien ja avointen paikkojen lämpötilaeroja selvitettiin vertailemalla loggereita 5 (avoin) ja 6 (varjoisa). Vuoden 2020 kesällä avoimen paikan loggeri mittasi keskimäärin 0,0–0,1 °C lämpimämpiä arvoja kuin varjoisaan paikkaan sijoitettu loggeri (kuva 30). Sen sijaan talvella avoimen paikan mittaukset olivat toista loggeria viileämpiä. Keväällä 2021 mitatut lämpötilaerot ovat suurempia ja epäsäännöllisiä.



Kuva 30. Avoimen ja varjoisan paikan erotus vuorokausikeskiarvoina. Lämpötila on kesäisin korkeampi avoimessa paikassa.

5.2 Pohjan substraattikoostumus

D_{10} -, D_{50} - ja D_{90} -arvot Kauttuankoskelta kerätyistä pohjanäytteistä kuvaavat raekokojen jakautumista tutkimusalueella (taulukko 6). Pienirakeisinta sedimentti oli näytepisteellä 8 tutkimusalueen alaosassa ja suurirakeisinta Alisen kosken niskalla näytepisteillä 6 ja 7. Raekokoluokkien jakautumista tutkittiin myös tarkastelemalla Gradistat-ohjelmalla luotuja diagrammeja (liitteet 5–12). Lajittuneinta pohjamateriaali oli Alisen kosken niskan näytepisteillä 6 ja 7, joissa vallitseva maalaji oli pienet kivet. Tehtaan edustalla sekä Ylisellä koskella sijaitsevilla näytepisteillä 1–5 vallitseva materiaali oli hieman pienikokoisempaa (karkea sora ja pienet kivet). Kaikkein pienintä näytteen vallitseva materiaali oli alajuoksun näytepisteellä 8 (karkea sora). Yli 3,15 cm kokoisia partikkeleita esiintyi näytteissä 2–7 (liite 13). Näytteissä 6 ja 7 niitä oli eniten ja ne olivat suurikokoisimpia.

Taulukko 6. Kuivaseulottujen pohjanäytteiden D_{10} -, D_{50} - ja D_{90} -arvot millimetreinä.

mm								
näyte	1	2	3	4	5	6	7	8
D_{10}	4,03	2,44	1,43	1,60	3,62	7,22	26,00	0,02
D_{50}	10,62	18,37	13,76	14,50	19,61	38,54	48,46	6,67
D_{90}	17,91	35,66	30,36	29,39	35,68	56,37	59,78	16,25

5.3 Mallinnetut virtaamatilanteet

Tässä tutkimuksessa mallinnettiin 2 m³/s, 6 m³/s, 11 m³/s ja 17 m³/s virtaamatilanteet. 2 m³/s vastaa kuivan kesän ja alkusyksyn ajalle ominaista tilannetta (Ympäristötiedon hallintajärjestelmä... 2021). 6 m³/s taas vastaa talven ja kevään ajalle tavallista virtaamalukemaa. 11 m³/s on Kauttuankosken keskiylivirtaama eli se kuvaa tavanomaista tulvatilannetta (Triipponen & Sallmen 2013), ja 17 m³/s edustaa erittäin voimakasta tulvaa ollen lähellä teoreettista maksimia (17,5 m³/s), jota Kauttuan säännöstelypadolta on juoksutettavissa.

5.3.1 Virtausolosuhteet

Veden kattaman alueen koko oli mallinnetuissa virtaamatilanteissa seuraava:

2 m³/s: 8914 m²,

6 m³/s: 10339 m²,

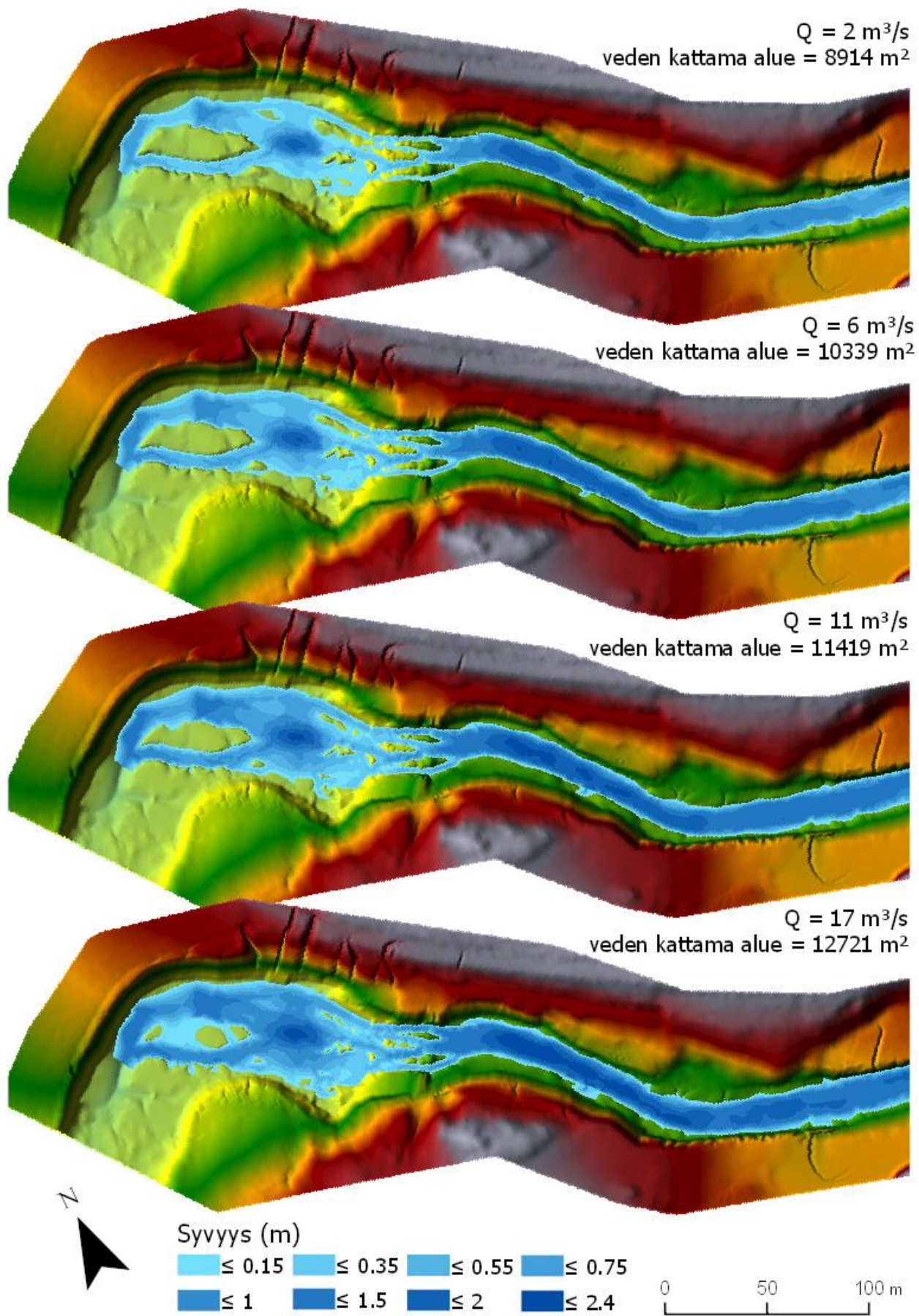
11 m³/s: 11419 m² ja

17 m³/s: 12721 m².

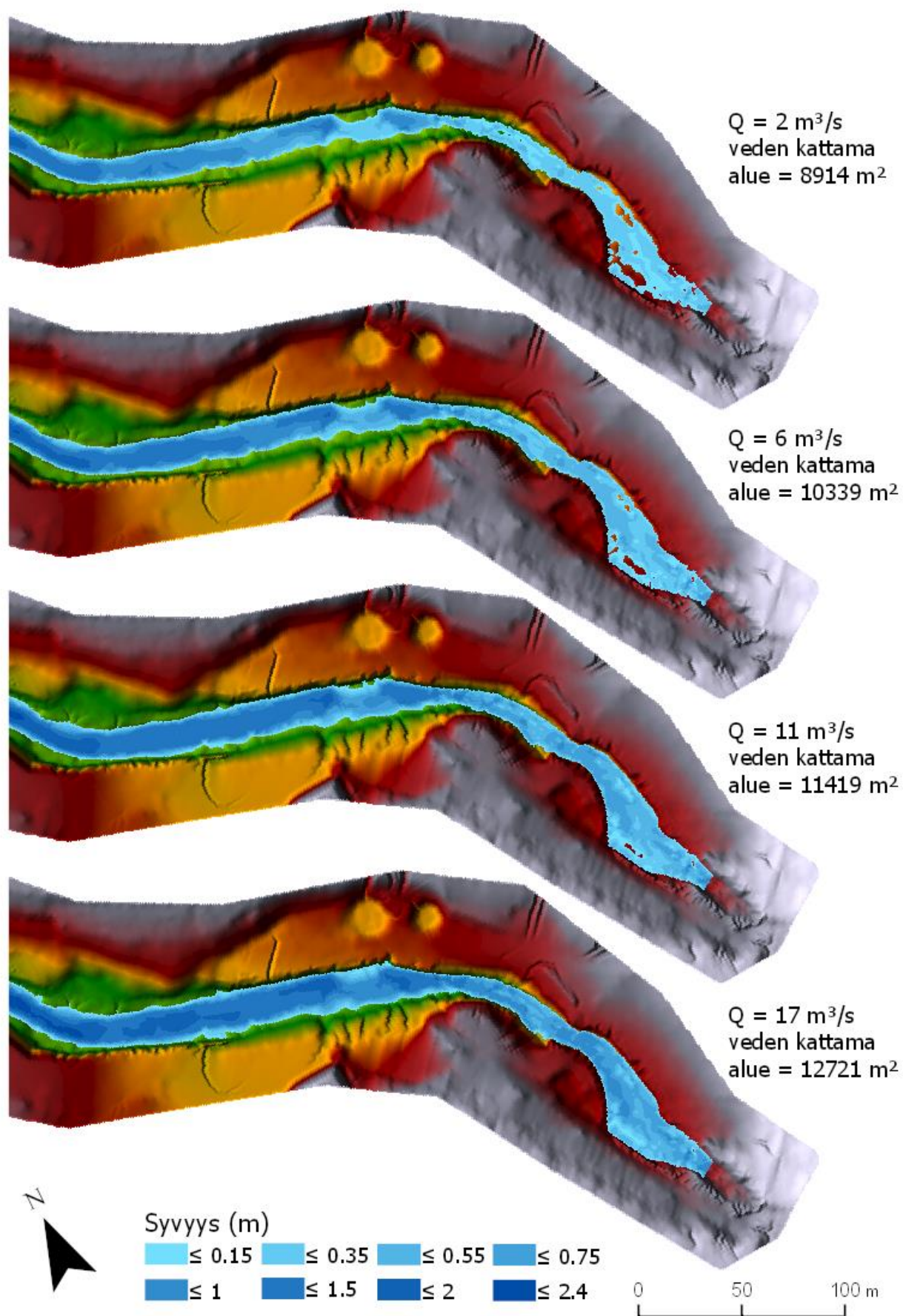
Virtaaman kasvun myötä mallinnettu vesialue laajeni etenkin Ylisen kosken alaosissa sekä Alisen kosken alapuolisella suvantoalueella. Tulva-alue ylsi teoreettista maksimia kuvaavassa 17,5 m³/s virtaamatilanteessa uoman ulkopuolelle peittäen muun muassa Ylisellä koskella ja tutkimusalueen alaosassa saaria, jotka ovat tavallisesti vedenpinnan yläpuolella. Syvimmät paikat uomassa sijaitsivat Alisen kosken alapuolisessa suvannossa sekä koskialueiden välisellä osuudella (kuvat 31 ja 32). 2 m³/s virtaamatilanteessa suurimmat syvyydet olivat 1,8 metriä ja 17 m³/s tilanteessa 2,4 metriä. 2 m³/s ja 17 m³/s tilanteiden vertailussa vedenpinnankorkeuden ero oli noin 50–60 cm koskialueiden ulkopuolella. Varsinaisissa koskissa vedenpinta ei noussut yhtä voimakkaasti virtaaman kasvun myötä.

Kaikissa mallinnetuissa virtaamatilanteissa virtaus oli voimakkainta varsinaisilla koskialueilla (kuvat 33 ja 34). Voimakkaan virtauksen alueita sijaitsi pääosin sekä Ylisellä että Alisella koskella, mutta myös koskialueiden välisellä suoralla uoman osuudella. 2 m³/s virtaamatilanteessa virtausnopeudet koskialueilla säilyivät pääasiassa alle 3 m/s. 17 m³/s tilanteessa virtausnopeudet koskialueilla ylsivät 3–4 m/s lukemiin. Lisäksi pienillä alueilla malli tuotti yli 5 m/s virtausnopeuksia.

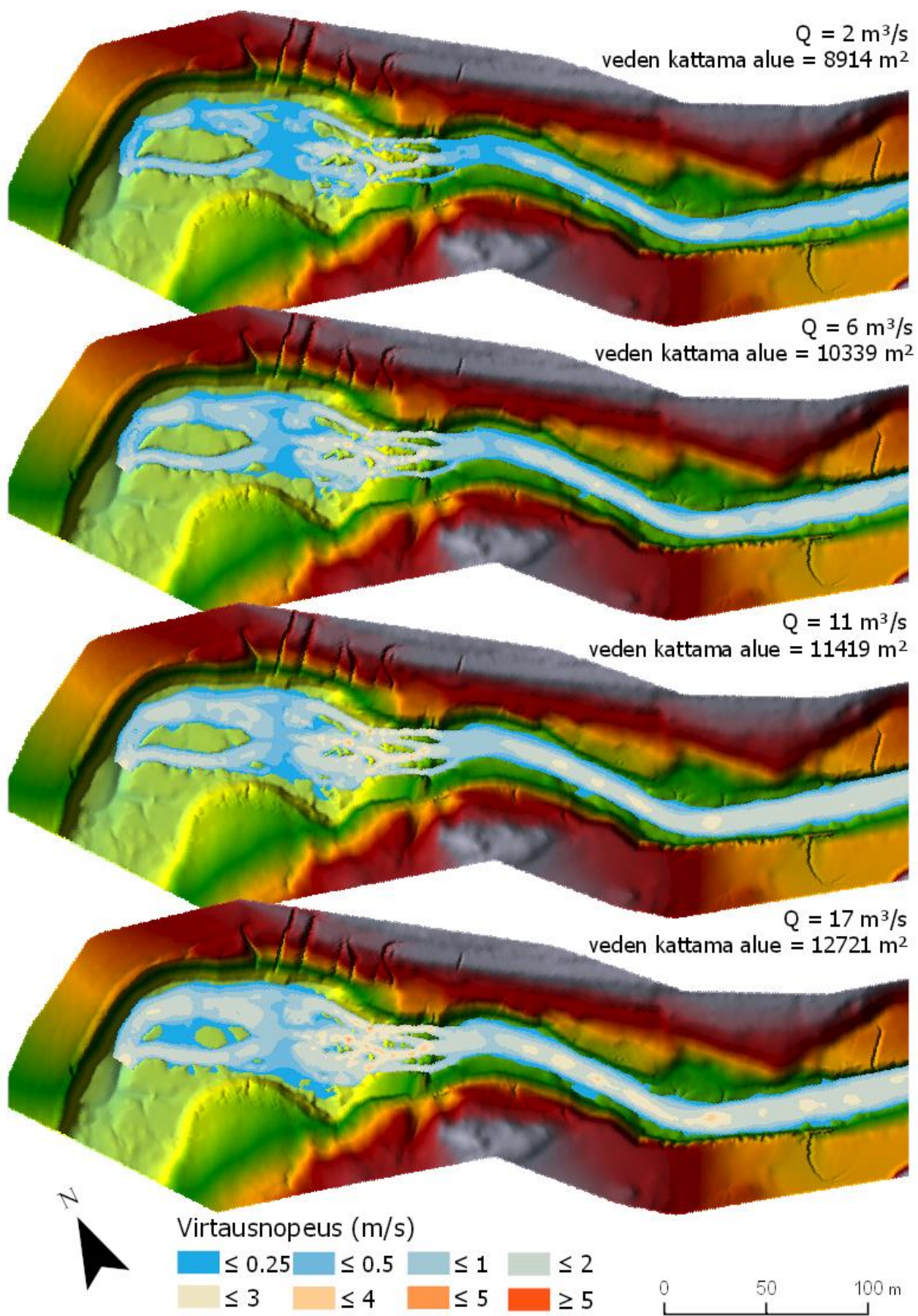
Kaikissa mallinnetuissa tilanteissa hitaimmat virtausnopeudet vallitsivat uoman reunoilla sekä leveissä kohdissa uomaa. Suurimmat hitaan virtauksen alueet sijaitsivat syvänteessä Alisen kosken alapuolella. Virtaaman kasvaminen vaikutti virtausolosuhteisiin muuttaen virtaussuuntaa Ylisellä koskella puhkaisemalla uuden reitin vedelle uoman vasemmalla reunalla. Myös Alisella koskella uoman vasemmanpuolisen kanavan läpi virtaavan veden määrä kasvoi suhteellisesti virtaaman kasvaessa.



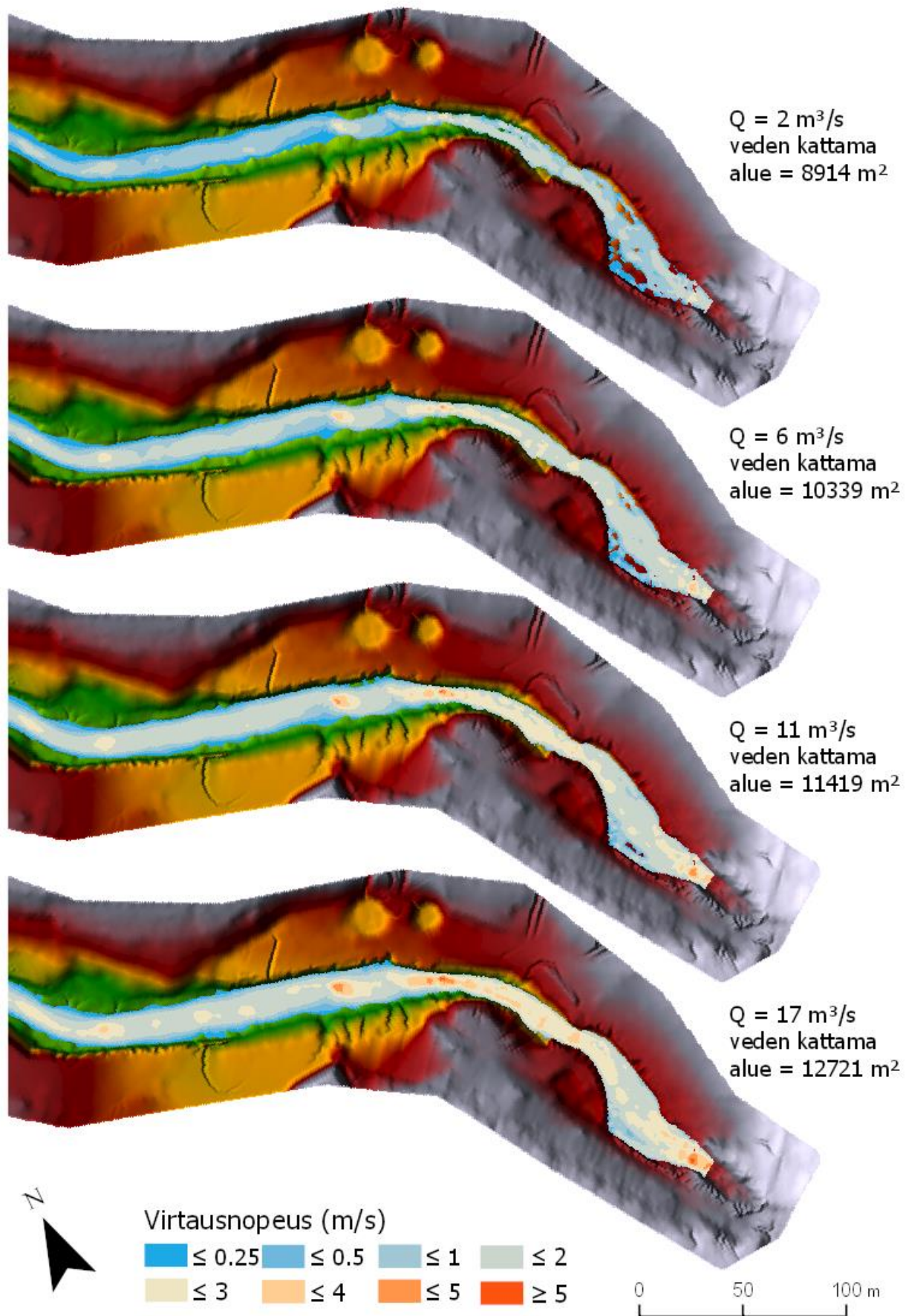
Kuva 31. Mallinnetut vesisyvytydet Kauttuankosken alaosaassa eri virtaamatilanteissa.



Kuva 32. Mallinnetut vesisyvyydet Kauttuankosken yläosassa eri virtaamatilanteissa.



Kuva 33. Mallinnetut virtausnopeudet Kauttuankosken alaosassa eri virtaamatilanteissa.



Kuva 34. Mallinnetut virtausnopeudet Kauttuankosken yläosassa eri virtaamatilanteissa.

5.3.2 Sedimentin liikkeellelähtö ja kasautuminen

Hydraulisen mallin tulosten perusteella mallinnetut alueet, joilla uoman sedimentti lähtee liikkeelle, kasvoivat virtaaman lisääntyessä (kuvat 35 ja 36). Alueet sijaitsivat Ylisen kosken haaroittuvalla osuudella, koskialueiden välisellä osuudella, Alisen kosken alapuolella sekä molemmin puolin tutkimusalueen alaosan saarta. Ylisellä koskella erodoituvan alueen rajat myötäilivät aineistonkäsittelyvaiheessa mekaanisesti rajattuja lohkaraisia koskialueita. Kosken haaroittuvassa osuudessa sedimentti ei lähtenyt liikkeelle uomassa olevien saarten läheisyydessä. Virtaaman lisääntyessä ja saarten jäädessä veden alle sedimentin liikkeellelähtöalue laajeni.

Koskialueiden välisellä osuudella 2 m³/s virtaamatilanteessa sedimenttiä lähti mallinnuksen mukaisesti liikkeelle vain yhdessä kohtaa uomaa sen keskellä. Virtaaman kasvaessa sedimentin liikkeellelähtöä kuvaavat laikut lisääntyvät osuudella painottuen sen yläosaan. Uomien välisellä osuudella sedimentin liikkeellelähtö tapahtui ainoastaan uoman keskellä. Alisen kosken niskalla tai itse koskialueella sedimentti ei lähtenyt yksittäisiä rasterisoluja huomioimatta liikkeelle missään virtaamatilanteessa.

Alisen kosken alaosassa ja sitä seuraavan suvantoalueen yläosassa sedimentin liikkeellelähtöä tapahtui kaikissa mallinnetuissa virtaamatilanteissa. Uomassa olevien saarten läheisyydessä sedimentti ei lähtenyt liikkeelle. Mallinnetut alueet olivat verrattain laajoja ja ne painottuvat matalissa virtaamissa uoman keskelle sekä oikeaan reunaan, mutta laajenivat koko jokiuoman leveydelle virtaaman lisääntyessä. Suvantoalueen alaosassa on alue, jolla sedimentti ei lähtenyt liikkeelle missään virtaamatilanteessa.

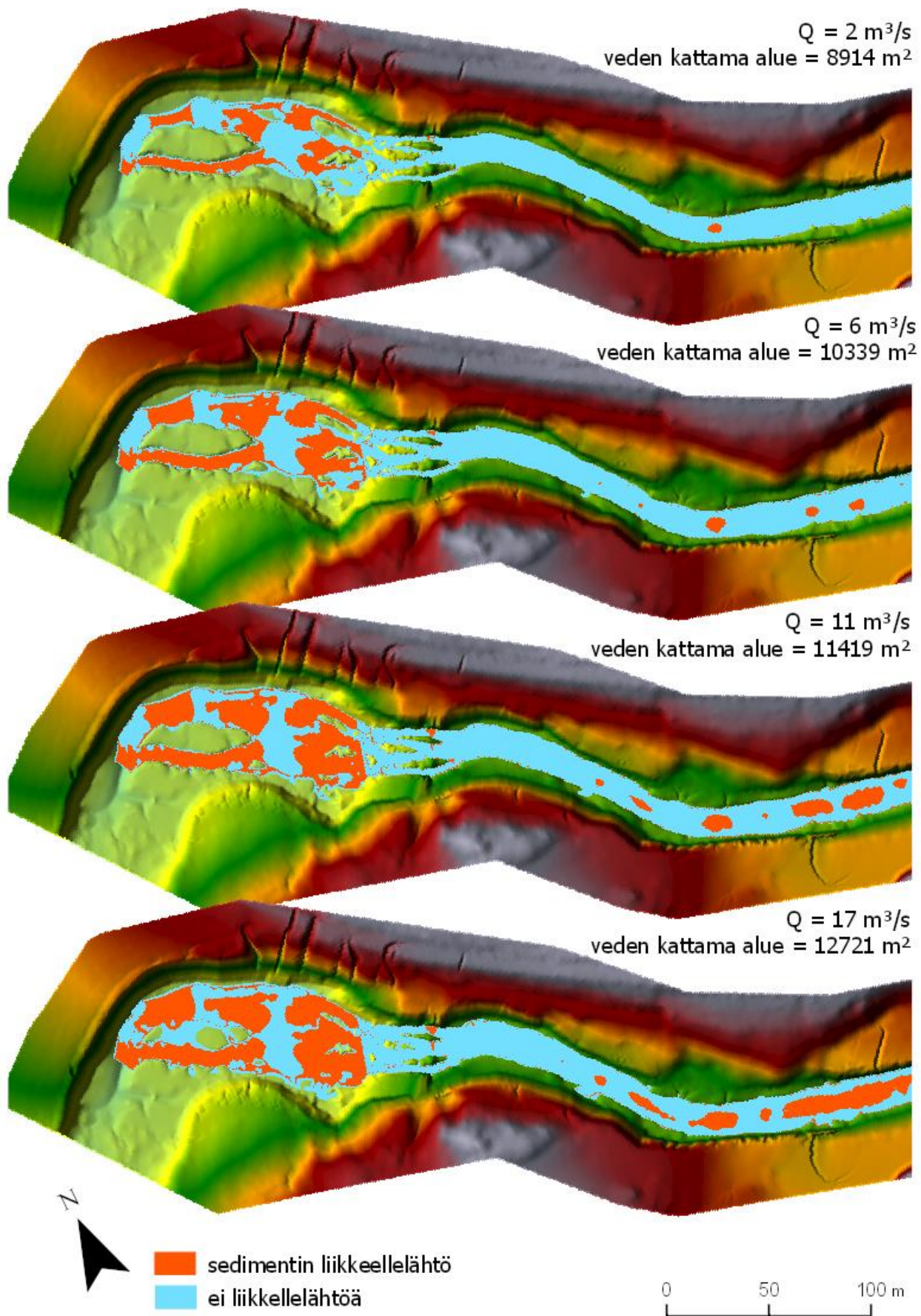
Tutkimusalueen alaosassa koko saarta kiertävässä vasemmanpuoleisessa uomassa sedimentti lähti liikkeelle kaikissa mallinnetuissa virtaamatilanteissa. Oikeanpuoleisessa uomassa liikkeellelähtöä tapahtui kahdessa eri laikussa, jotka kasvoivat virtaaman lisääntyessä. 17 m³/s virtaamatilanteessa veden peittäessä osan saaresta, ei liikkeellelähtöä tapahtunut saarta peittävällä osuudella.

Sedimentin kasautuminen painottui Kauttuankoskella tutkimusalueen alaosiin sekä matalan virtaaman tilanteisiin (kuvat 37 ja 38). Ylisellä koskella sedimenttiä kasautui uoman haaroittuvalla osuudella sen vasempaan reunaan 2 ja 6 m³/s virtaamatilanteissa. 2 m³/s tilanteessa kasautui raekooltaan sekä 0–1, 1–2 ja 2–5 mm partikkeleja, kun 6 m³/s tilanteessa kasautuva aines oli raekooltaan 2–5 mm kokoista. Voimakkaammissa virtaamatilanteissa ei Ylisellä koskella tapahtunut sedimentin kasautumista. Koskialueiden välisellä osuudella sedimentti kasautui uoman reunoille painottuen kohti Alisen kosken niskaa. Kaikissa virtaamatilanteissa kasautui jokaista käytettyä raekokoluokkaa, mutta virtaaman voimistuessa kasautumista kuvaavat alueet pienenivät.

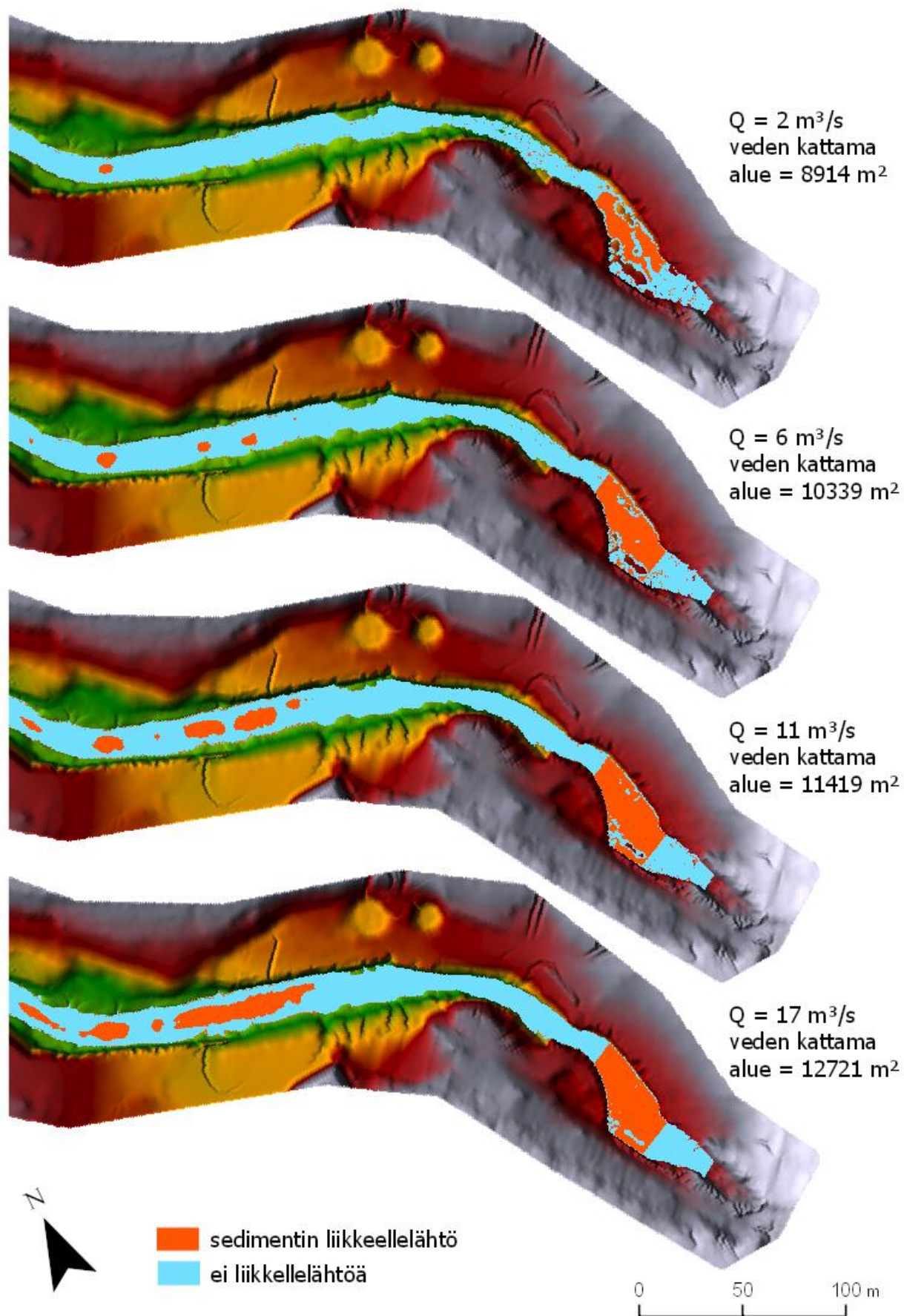
Alisen kosken alueella sedimenttiä kasautui ainoastaan 2 m³/s virtaamatilanteessa saarten yhteyteen sekä suurimpana alueena kosken vasemmanpuoleiseen kanavaan. Tutkimusalueen alaosan suvantoalueella raekooltaan pienin sedimentti kasautui uoman reunoille ja saarten yhteyteen suurempikokoisen sedimentin kasautuessa kauemmas uoman reunoista. Kasautumista kuvaavan alueen koko kasvaa virtaaman pienentyessä niin, että 2 m³/s tilanteessa sedimenttiä kasautuu suvannossa uoman koko leveydeltä. Kaikissa virtaamatilanteissa kasautumista tapahtui etenkin uoman vasemmalla reunalla.

Suvannon alapuolisella osuudella kasautuminen painottui uoman reunoille kuvat. Kasautuminen väheni virtaaman noustessa lukuun ottamatta saarta peittävää osuutta sekä uoman vasenta reunaa

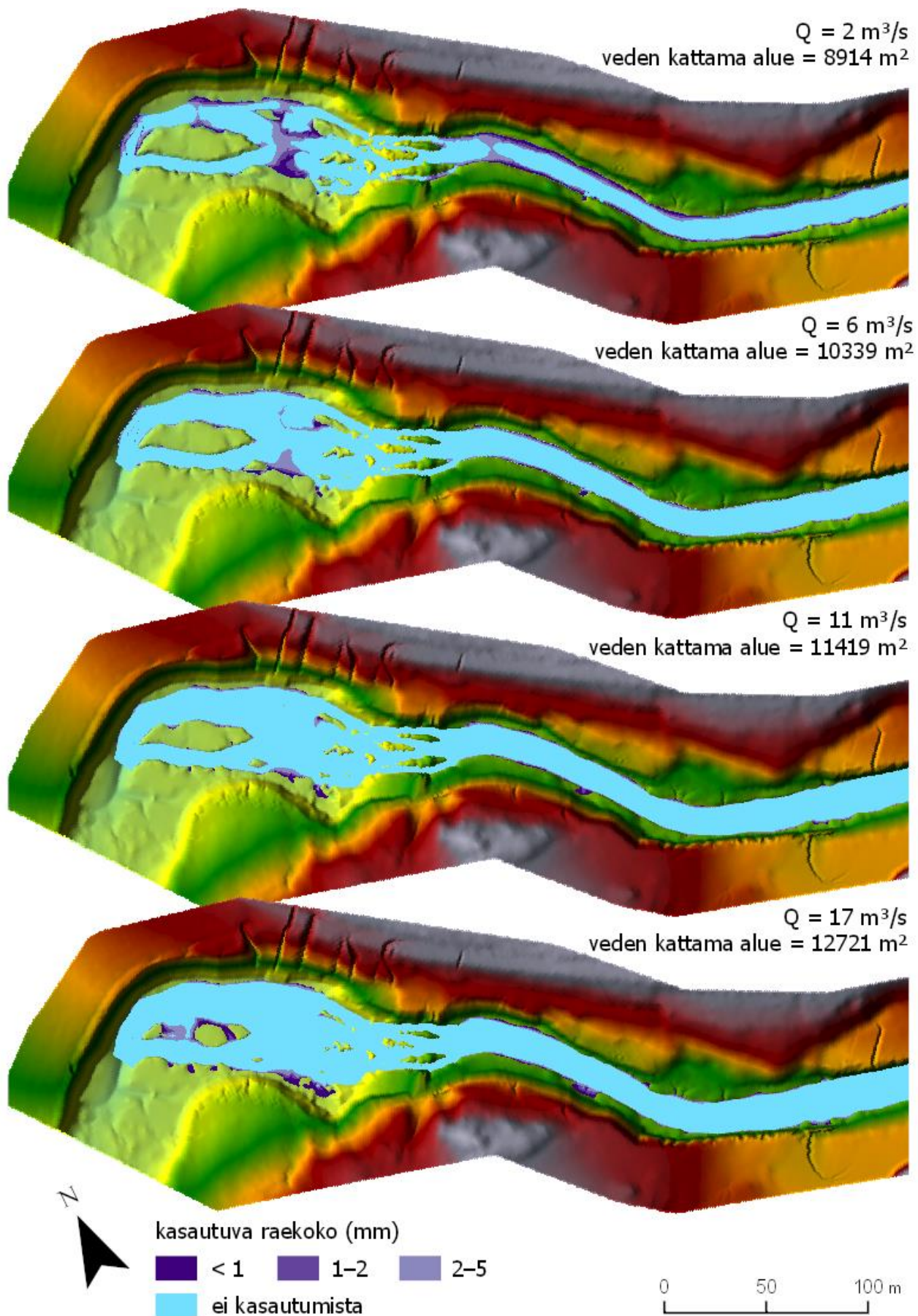
17 m³/s tilanteessa. Saarta peittävälle osuudelle kertyi kaikkia käytettyjä raekokoluokkia, ja vasempaan reunaan pääasiassa alle 1 mm kokoisia partikkeleja.



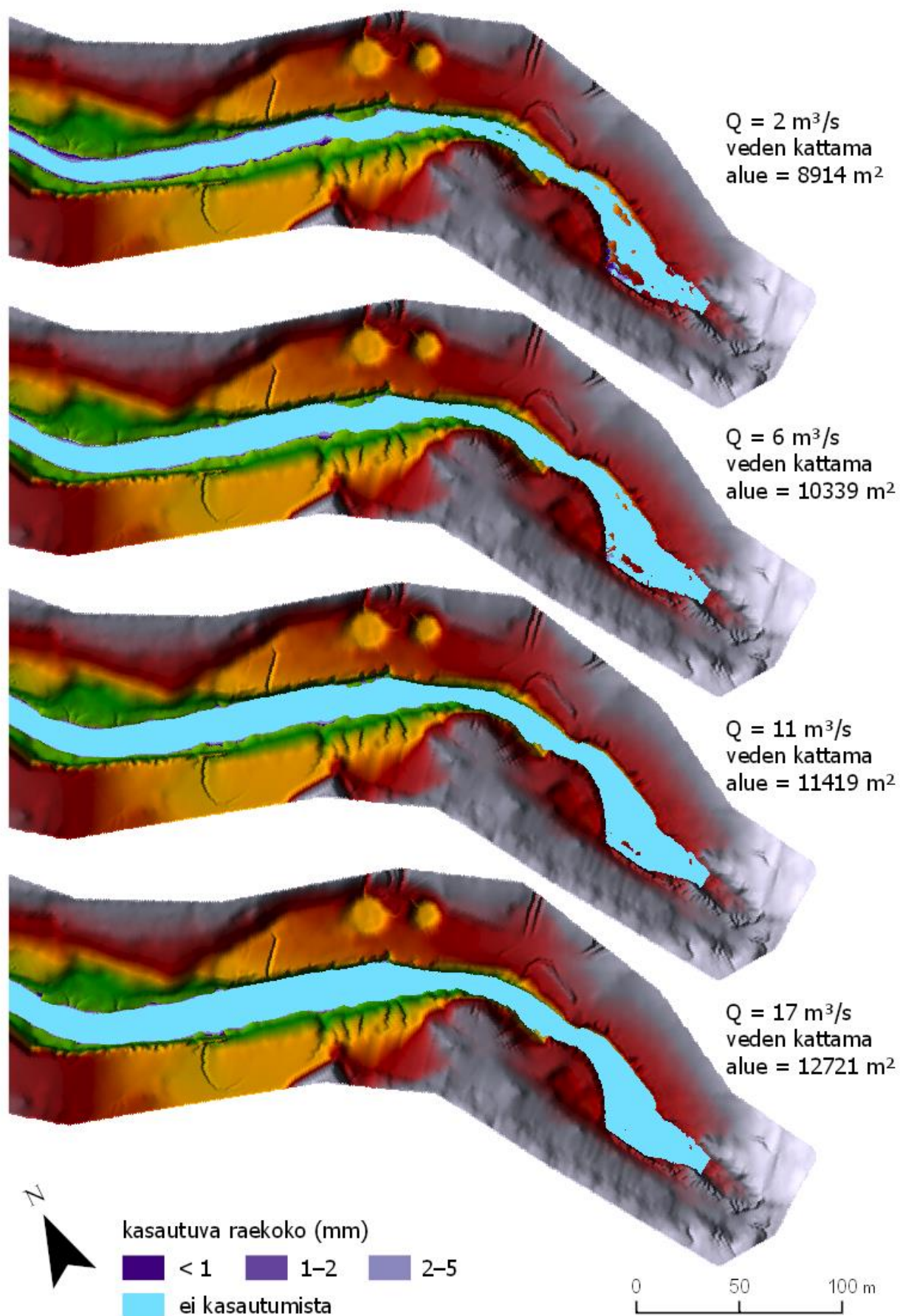
Kuva 35. Sedimentin liikkeellelähtöalueet Kauttuankosken ala-osaan eri virtaamatilanteissa.



Kuva 36. Sedimentin liikkeellelähtöalueet Kauttuankosken yläosassa eri virtaamatilanteissa



Kuva 37. Hienosedimentin kasautumisalueet Kauttuankosken alaosaassa eri virtaamatilanteissa



Kuva 38. Hienosedimentin kasautumisalueet Kauttuankosken yläosassa eri virtaamatilanteissa

5.4. Elinympäristön soveltuvuusindeksi

Elinympäristön soveltuvuusindeksi vaihteli taimenen eri kokoluokille sekä kutemiselle Kauttuankosken eri osissa (liitteet 14–21). Huomattavaa vaihtelua soveltuvuudessa tapahtui sekä eri luokkien että eri virtaamatilanteiden välillä. Yhdistävä tekijä kaikille alueellisen monimuuttuja-analyysin tuloksille oli varsinaisten koskialueiden, paitsi Ylisen kosken haaroittuvan osuuden, epäsopivuus elinympäristönä. Sen sijaan suhteellisen soveltuvuuden aste muilla uoman osuuksilla muuttui luokkien ja virtaamatilanteiden välillä. Olosuhteiden huomattiin olevan kaikille luokille lähtökohtaisesti parhaat matalan virtaaman tilanteissa. Vähiten soveltuvia alueita määriteltiin kutemiselle. Lisäksi kokoluokkien vertailussa 10–15 cm pituisille taimenille määriteltiin soveltuvia alueita vähiten.

Taimenen kutemiselle parhaiten soveltuvat (100 %) alueet Kauttuankoskessa sijaitsivat uoman reunojen lähetyvillä (liitteet 14 ja 15). Soveltuvia (≥ 50 %) alueita esiintyi eniten koskialueiden välisellä osuudella. Lisäksi niitä oli Alisen kosken alapuolisessa osuudessa sekä pieni alue Ylisen kosken haaroittuvan osuuden oikeassa reunassa. Soveltuvat alueet vähenivät virtaaman kasvaessa. Varsinaisten koskien lisäksi täysin epäsopivia (0 %) alueita sijaitsi koskien välisellä osuudella sekä koko Alisen kosken alapuolisella osuudella.

Parhaiten soveltuvat (100 %) alueet alle 10 cm pituisille taimenille painottuivat uoman reunojen sekä saarten läheisyyteen sekä erityisesti koskien välisen osuuden yläosaan ja tutkimusalueen alaosan oikeaan reunaan (liitteet 16 ja 17). Soveltuvat (≥ 50 %) alueet sijaitsivat alaosassa, koskien välisellä osuudella sekä Ylisen kosken haaroittuvalla osuudella. Etenkin matalissa virtaamatilanteissa soveltuvia alueita oli tutkimusalueen alaosassa suhteessa paljon verrattuna muihin luokkiin. Alisen kosken alapuolella täysin epäsopiva (0 %) alue sijoittui suvannon yläosaan.

Parhaiten soveltuvat (100 %) alueet 10–15 cm pituisille taimenille sijaitsivat melko samoilla alueilla, kuin pienemmällä kokoluokalla ollen kuitenkin hieman kauempana uoman reunoista (liitteet 18 ja 19). Soveltuvat (≥ 50 %) alueet sijaitsivat myös tutkimusalueen alaosassa, koskien välisellä osuudella ja Ylisen kosken haaroittuvalla osuudella ollen kuitenkin pienempiä kuin muiden kokoluokkien kohdalla. Ylisellä koskella soveltuvia alueita oli eniten virtaaman ollessa $6 \text{ m}^3/\text{s}$. Täysin epäsopivat (0 %) alueet Alisen kosken alapuolella olivat pirstaleisempia ja ulottuivat alemmas verrattuna pienempään kokoluokkaan.

Suurimmille, yli 15 cm pituisille kaloille, soveltuvat (≥ 50 %) alueet sijaitsivat taas samoilla uoman osuuksilla kuin muillakin kokoluokilla (liitteet 20 ja 21). Parhaiten soveltuvat (100 %) alueet olivat jälleen kauempana uoman reunoista ja lähempänä sen keskikohtaa. Soveltuvia alueita oli koskien välisellä osuudella suhteessa eniten matalissa virtaamatilanteissa verrattuna muihin luokkiin. Soveltuvat alueet Ylisellä koskella lisääntyivät virtaaman kasvaessa, kun taas sen alapuolisessa osassa alueet vähenivät. Täysin epäsopivat (0 %) alueet Alisen kosken alapuolella ulottuivat jälleen suvannon alaosiin.

6. Tulosten tarkastelu

6.1 Lämpötilaolosuhteet

Mittausjakson aikana Kauttuankosken keskimääräinen lämpötila ylitti mädin, ruskuaispussillisten poikasten alkuasteen ja kehittyneen asteen sekä alle 2-vuotiaan taimenen alkuasteen selviytymisen kannalta kriittiset ylärajat. Näistä mätiiä koskeva raja ylittyi kuitenkin mädin kehittymisajan ulkopuolella. Suurimmassa vaarassa olivat ruskuaispussillisten poikasten alkuaste, joille määritelty yläraja ylittyi kesäkuussa 2020 12 vuorokauden pituiseksi ajaksi. Vanhempien ikäluokkien kohdalla vastaava aika oli 4 ja 2 vuorokautta. Tulosten perusteella mittausjakson voidaan sanoa olleen liian lämmin taimenen nuorimpien ikäluokkien selviytymiselle sekä epäoptimaalinen vanhemmillekin kaloille.

Mittausjakson perusteella ei voida tehdä suoria johtopäätöksiä Kauttuankosken lämpötilaolosuhteiden pitkän aikavälin soveltuvuudesta taimenelle. Sääolosuhteiden vaihdellessa eri vuosina ovat pintavesienkin lämpötilaolosuhteet erilaisia vuodesta riippuen. Tutkimuksen tulokset olisivat myös hyvin erilaiset, jos mittauksia olisi jatkettu loppukesään 2021, jolloin korkeiden lämpötilojen ansiosta koskella todistettiin kalakuolemia (Joensuu 2021). Ilmastonmuutoksen voidaan kuitenkin olettaa tulevaisuudessa hankaloittavan Kauttuankosken taimenen oloja muun muassa nostamalla Pyhäjärvestä laskevan veden lämpötilaa kesäkuukausina entisestään.

Tutkimuksen yhtenä tavoitteena oli selvittää, ilmeneekö Kauttuankoskessa alueellista lämpötilanvaihtelua. Lämpötilaolosuhteet tutkimusalueella eivät kuitenkaan tulosten pohjalta vaihtelee alueellisesti koskialueen sisällä runsaasti, vaan pysyvät hyvin samankaltaisina paikasta riippumatta. Kerätyn aineiston pohjalta ei voida väittää, että koskipaikat itsessään nostaisivat tai laskisivat Pyhäjärvestä laskevan veden lämpötilaa merkitsevästi. Erilaisten ympäristöjen lämpötilavertailusta tutkimusalueen sisällä löydettiin kuitenkin pieniin systemaattisiin lämpötilaeroihin pohjautuvia perusteltavissa olevia lainalaisuuksia.

Pienistä, keskimäärin alle 0,1 celsiusasteen, eroista voidaan huomata uoman pohjakerroksen veden olevan Kauttuankoskella ylempiä vesikerroksia viileämpää. Myös syvänteiden sekä matalien koskipaikkojen pohjaan asetettujen loggerien vertailun perusteella voidaan todeta veden olevan hieman viileämpää syvänteiden pohjalla kuin uoman matalissa ja voimakkaasti virtaavissa kohdissa. Molemmissa vertailuissa huomattiin myös korkean virtaaman ja erityisesti virtaamapiikkien vettä sekoittava ja siten lämpötilaeroja tasaava vaikutus. Vesikerrosten sekoittuminen virtaaman vaihdellessa tai kasvaessa johtuu virtauksen muuttumisesta pyörteisemmäksi virtausnopeuden voimistuessa (Charlton 2008: 81).

Tutkimuksessa huomattiin veden olevan pääsääntöisesti lämpimämpää hitaan kuin nopean virtauksen paikassa. Keskimäärin erotus pysyi alle 0,1 celsiusasteessa. Aineistoista erottui jopa 1 celsiusasteen piikkejä, joita oli hankala yhdistää esimerkiksi virtaamatietoon. Päätelmien tekoa hankaloittaa selvästi pilalle menneiden mittausjaksojen huomiotta jättämisestä johtuva aineiston katkonaisuus. Jotta lämpötilaeroista hitaan ja nopean virtauksen paikoissa voitaisiin tehdä luotettavia päätelmiä, tulisi aiheutta tutkia lisää mitaten lämpötilaa usealla mittausasemalla.

Koskialueiden välisellä suoralla sijainneiden avoimen ja varjoisan paikan loggereiden vertailussa huomattiin veden olevan kesällä avoimella paikalla keskimäärin alle 0,1 celsiusastetta lämpimämpää

kuin varjoisalla paikalla. Tuloksen perusteella voidaan todeta varjoisten alueiden pysyvän viileämpinä aurinkoisena vuodenaikana. Päätelmää vahvistaa se, että talviaikaan samaa ilmiötä ei esiintynyt. Hieman syvemmällä sijainnut avoimen paikan loggeri oli puolestaan talvella mitannut varjoisan paikan loggeria viileämpiä arvoja.

Mittauksista on huomattavissa selkeä teollisuuden lauhdevesien lämmittävä vaikutus, joka oli voimakkaimmillaan loppukesän kuukausina, jolloin virtaama oli noin 2 m³/s. Vaikutus ilmenee lauhdevesien purkupisteen molemmille puolille sijoitettujen mittausasemien 1 ja 2 välisenä lämpötilaerona. Keskimäärin mittausjakson aikana purkupisteen alapuolinen vesi uoman pohjassa oli 0,26 °C sen yläpuolista vettä lämpimämpää. Vaikka lämpötilaero pysyykin celsiusasteen kymmenesosissa, on se huomattavissa aineistosta mittausjakson jokaisena kuukautena. Lisäksi vesipatsaan vertikaalisessa tarkastelussa huomattiin, päinvastoin kuin muilla mittausasemilla, purkuputken alapuolella pohjanläheisen lämpötilan olevan keskimäärin lämpimämpää kuin 70 cm pohjan yläpuolella. Poikkeuksellisten olosuhteiden voidaan todeta johtuvan lauhdeveden purkamisesta uoman pohjalle.

Vaikka erilaisten ympäristöjen lämpötilavertailussa huomattavat erot olivat pääosin pieniä, olivat ne selvästi voimakkaimmillaan kesäkuukausina. Syitä erojen suuruudelle ovat auringon pintavettä lämmittävä vaikutus ja matala virtaama, jotka tavallisesti ilmenevät yhtäaikaaisesti kesäisin. Ilmiöt vaikuttavat yhdessä vettä lämmittäen. Matalan virtaaman aikaan hitaasti liikkuva vesi ehtii lämmitä kauemmin ollessaan auringonpaisteessa. Lisäksi matalassa virtaamassa virtaus on vähemmän turbulenttista eikä sekoita vesikerroksia. Tällöin auringon lämmittämä pintavesi säilyy lämpimänä ja pohjan vesi viileänä.

Zaidelin ym. (2021) tutkimuksessa huomattiin ylhäältä purkavan padon lämmittävä vaikutus sen alapuoliseen vesistöön, joka sekin oli voimakkaimmillaan kesällä. Kauttuan säännöstelypadon yläpuolella sijaitsevan lauhdevesien purkupisteen sijainnin vuoksi pelkän padon vaikutusta tutkimusalueen lämpötilaan on vaikea tarkastella. Padon yläpuolisen loggeri 2:n ja sen alapuolisten loggerien kuukausikeskiarvojen vertailussa ei kuitenkaan ole huomattavissa selkeää lämmittävää vaikutusta, joka ilmenisi padon alapuolella. Ainoastaan toukokuussa 2021 lämpötilan voidaan tulkita nousevan padon alapuolella. Tulosten pohjalta ei voida kuitenkaan rajata pois mahdollisuutta, että säännöstelypadollakin olisi Kauttuankosken lämmittävä vaikutus.

Taimenen selviytymisen kannalta olisi edullista lisätä kesähelteillä juoksutusta Kauttuan säännöstelypadolta. Suurempien virtausnopeuksien ansiosta vesi ei seisoisi yhtä kauan paikallaan ehtien lämmitä. Kuivina ja kuumina aikoina virtaaman säilyttäminen tasaisena saattaisi myös edesauttaa lämpötilaltaan eroavien vesikerrosten muodostumista aikaansaaden mahdollisimman viileät olot syvänteisiin. Juoksutuksen säätelyn vaikutusta veden viilenemiseen olisi hyvä tutkia lisää. Yhtenä viilennyskeinona voitaisiin jo valmiiksi melko varjoisaan ympäristöön istuttaa vielä lisää puita tuomaan varjoa uoman ylle.

6.2 Pohjan substraattikoostumus

Pohjanäytteiden kuivaseulontatulosten ja kenttätöissä tehdyn visuaalisen havainnoinnin pohjalta saatiin muodostettua tyydyttävä käsitys Kauttuankosken substraattikoostumuksesta. Koska sedimenttinäytteitä otettiin rajallinen määrä ja niiden ottopaikoiksi valittiin tietynlaisia ympäristöjä, ei pohjan substraattikoostumuksesta muodostettu käsitys ole virheetön. Erityisesti

tutkimustulokset palvelevat Kauttuankosken tarkastelua taimenen elinympäristön kannalta, kuten tarkoitus tutkimuksessa oli. Substraattikoostumuksen tarkastelussa on hyvä huomioida, että pohjanäytteet otettiin vuoden 2020 helmi-maaliskuun harvinaislaatuisten voimakkaan tulvan jälkeen. Pitkään kestänyt ja mittaustietojen mukaan jopa 19 m³/s noussut tulva oli juuri ennen näytteenottoa kuluttanut huomattavan määrän sedimenttiä tutkimusalueen pohjasta (Ympäristötiedon hallintajärjestelmä... 2021).

Taimenen eri ikävaiheille soveltuvia raekokoja esiintyi tutkimusalueella varsinaisten koskialueiden ulkopuolella melko runsaasti. Koskialueiden lisäksi liian pienen raekoon vuoksi taimenelle epäsopiva alue sijaitsi Alisen kosken alapuolisessa suvannossa. Eri raekokojen ilmeneminen on linjassa liikkeellelähtö- ja kasautumisalueiden kanssa, ja tulevaisuuden kannalta taimenelle soveltuvien alueiden sijainnit tulisi ottaa huomioon esimerkiksi uutta pohjamateriaalia kunnostusten yhteydessä lisättäessä. Toisaalta erilaisia elinympäristöjä voidaan perustaa myös uusille alueille, kunhan niiden rakentamisessa minimoidaan riski materiaalin liikkeellelähdölle tai peittymiselle. Esimerkiksi Yliselle koskelle saattaisi olla mahdollisuus perustaa nykytilannetta laajempia ja monimuotoisempia soraikkoja, joiden kulumista voitaisiin pyrkiä estämään perustamalla ne katveisille alueille uoman reunaan tai saarten alapuolelle.

6.3 Virtausolosuhteet sekä sedimentin liikkeellelähtö ja kasautuminen

Hydraulisen mallin tuloksista havaitaan, että virtauskentän ominaisuudet muuttuvat Kauttuankosken tutkimusalueella eri virtaamatilanteissa ilmeten muun muassa virtauksen nopeudessa ja suunnissa. Nopean virtauksen keskus sijaitsee sille ominaisesti pääsääntöisesti uoman keskiosassa. Virtauksen jatkuvuutta kuvaavan teorian mukaisesti samassa virtaamatilanteessa suurempi virtausnopeus esiintyy siinä kohdassa uomaa, jossa poikkileikkausala on suurempi (Charlton 2008: 76–77). Ilmiön toteutuminen on huomattavissa tutkimustuloksista, joiden mukaan virtausnopeus on hyvin voimakas koskialueilla ja uoman muissa kapeissa kohdissa sekä hidas uoman leveissä ja syvissä osuuksissa.

Mallinnustulosten ja niistä johdettujen tulosten tarkastelussa on huomioitava mallin rakentamisessa käytetyn geometria-aineiston laatu. Pääsääntöisesti aineisto on erittäin tarkka ja alueellisesti kattava, mutta siitä puuttuu osa alueen alaosaan saaren oikeanpuoleisen uoman kohdalta (kuva 17). Geometriatietojen puuttuminen johti aineiston interpoloinnissa uoman madaltumiseen tässä kohdassa tutkimusaluetta, mikä ilmenee epärealistisina tuloksina esimerkiksi virtausnopeuksissa ja sedimentin kasautumisessa. Lisäksi malli on tuottanut joillekin pienille alueille hyvin voimakkaita, yli 5 m/s virtausnopeuksia, jotka eivät ole realistisia. Todennäköisesti epärealistiset nopeudet johtuvat laskennallisesti haastavista kohdista mallissa, joissa Manningin *n*-arvo muuttuu tai geometriaa kuvaava aineisto on virheellinen. Kohtien voidaan tulkita olevan luonnossa oikeasti nopean virtauksen paikkoja, joiden olosuhteita malli on ylikorostanut.

Jyrkkien koskialueiden niskalle muodostuu Kauttuankoskella hydraulinen pudotus, jossa äkkinäisen uoman jyrkkenemisen myötä verkasvirtaus muuttuu kiitovirtaukseksi. Samalla virtausnopeus kasvaa ja vedenpinnan korkeus laskee (Charlton 2008: 81). Samoin koskialueiden alapuolelle muodostuu hydraulinen nousu, jossa kaltevuuden pienentymisen takia kiitovirtaus muuttuu verkasvirtaukseksi ja veden syvyys lisääntyy virtausnopeuden pienentyessä. Hydraulinen nousu on erityisen hyvin huomattavissa Alisen kosken alapuolella, jossa koski päättyy sen välittömässä yhteydessä olevaan

alapuoliseen suvantoalueeseen. Hydrauliseen laskuun ja nousuun liittyvät veden syvyyden ja virtausnopeuden muutokset ovat huomattavissa kaikissa mallinnetuissa virtaamaskenaarioissa.

Tulosten mukaan Kauttuankosken sedimentti lähtee liikkeelle pääosin uoman keskiosasta, jossa virtausnopeus on voimakkainta. Lisäksi uoman keskellä, sen syvimässä kohdassa, pohjaan kohdistuva leikkausjännitys on voimakkaimmillaan (Charlton 2008: 69). Alisesta koskesta tuleva voimakkaasti virtaava vesi kuluttaa sedimenttiä suvannon yläosasta, kohdasta johon muodostuu hydraulinen lasku. Liikkeellelähtöä ei tapahdu suvannon alaosassa virtausnopeuden ollessa liian hidas, mutta se jatkuu taas saarta kiertävissä uomissa, joissa virtausnopeus kiihtyy.

Kauttuankosken liikkeellelähtöalueita kuvaavat tulokset koskevat nykytilannetta - tarkemmin sanottuna kesän 2020 tilannetta. Olettaen, että virtausolosuhteet eivät huomattavasti muutu, on mallinnetuille alueille mahdollista lisätä niissä nykytilanteessa olevaa sedimenttiä raekooltaan suurempaa materiaalia. Tulevan kunnostuksen suunnittelussa tulisi kuitenkin ottaa huomioon liikkeellelähtöalueet. Lisättäessä raekooltaan liian pienikokoista materiaalia eroosioherkille alueille saattaa se kulua ympäristölle luonnollisten prosessien myötä pois. Pienirakeisen sedimentin liikkeellelähtöä voidaan kuitenkin pyrkiä estämään sitomalla se paikalleen esimerkiksi suurempien kivien ja lohkareiden avulla. Lisäksi virtauksen suuntaa ja voimakkuutta uoman eri kohdissa voidaan pyrkiä muuttamaan erilaisilla ratkaisuilla, joiden vaikutuksia saattaa olla etukäteen hankala ennakoida ilman niiden mallintamiseen perustuvaa jatkotutkimusta. Nyrkkisääntönä voidaan kuitenkin pitää, että kulutus on sitä voimakkaampaa, mitä suurempi virtaama on ja mitä kauemmin se vaikuttaa.

Pienikokoisimmat partikkelit vaativat kasautuakseen hitaan virtauksen (Hjulström 1935; Charlton 2008). Kauttuankoskella hienosedimentti kasautuu oletetusti hitaan virtauksen alueille eli pääsääntöisesti uoman reunoille. Lisäksi matalan virtaaman aikaan hienosedimenttiä kasautuu Alisen kosken alapuolisen suvannon alaosaan, jossa virtausnopeus äkillisesti hidastuu. Näillä alueilla pohjaan laskeutuva raekooltaan pieni sedimentti täyttää pohjan tukkien raot suurempien partikkelien välissä pilaten mahdollisesti taimenelle sopivia elinympäristöjä (Armstrong ym. 2003). Kunnostusten suunnittelussa tulisi ottaa huomioon etenkin tämä alue, jossa virtausnopeudet laskevat todennäköisesti vuosittain riittävän pieniksi hienosedimentin kerrostumiselle. Alueelle ei ole kannattavaa suunnitella ympäristöjä esimerkiksi kutemiselle tai nuorimmille poikasvaiheille, jotka tarvitsevat huokoisen pohjamateriaalin.

Wangin ym. (2018) mukaan virtaamien säätely ja tasoittaminen padon avulla saattavat hillitä eroosioprosessien voimakkuutta padon alapuolella. Taimenen selviytymisen kannalta olisikin hyödyllistä, että Kauttuan säännöstelypadolta juoksutettavan veden määrää pystyttäisiin säätelemään niin, etteivät paikalliset virtausnopeudet nousisi liian voimakkaiksi kuluttaen kalalajin elinympäristölle soveltuvia raekokoja. Patojen tiedetään joissain tapauksissa myös lisäävän alapuolellaan eroosiota johtuen luonnollista pienemmästä hienosedimentin määrästä ja siihen normaalisti kiinnittyneen kasvillisuuden puutteesta (Smokorowski ym. 2011). E erityisen tärkeää säännöstely olisi virtavesikunnostusta seuraavina muutamana vuotena juuri kasvillisuuden puuttumisen takia. Toisaalta tarvetta suurien vesimäärien juoksuttamiselle tulevaisuudessa on hankalaa arvioida ja juoksutuksen suunnittelussa on taimenen elinolojen lisäksi punnittavana Pyhäjärven pinnankorkeus. Tästä huolimatta olisi perusteltua ainakin pyrkiä välttämään äkkinäisiä piikkejä virtaamassa.

6.4 Kauttuankosken soveltuminen taimenen elinympäristöksi

Jokaiselle luokalle onnistuttiin määrittelemään uniikit elinympäristön soveltumisindeksiä eri virtaamatilanteissa kuvaavat karttatasot. Kaikkein epäsovivin ympäristö Kauttuankoski on kutemiselle, jonka elinympäristövaatimuksia kuvaavat kriteerit on määritelty tiukoiksi (taulukko 2) (Louhi & Mäki-Petäys 2003; Louhi ym. 2008). Parhaiten kutemiselle soveltuvat alueet sijaitsevat matalissa sekä virtausnopeudeltaan riittävän hitaissa paikoissa. Onnistuakseen kuteminen vaatii virtaaman pysymistä matalana kutuajankohtana, etteivät virtausnopeudet ja vesisyvyys koskessa kasvaisi liian suuriksi. Tulosten tarkastelussa on lisäksi huomioitava, että käytetyt raekoon soveltuvuuden rajat on määritelty normaalikokoisille taimenille, eikä pienikokoisilta purotaimenilta kutukuopan kaivaminen todennäköisesti onnistu yhtä suuren raekoon sedimenttiin. Näin ollen soveltuvia alueita on Kauttuankoskessa kaiketi todellisuudessa vielä vähemmän.

Virtaamaskenaarioiden vertailussa soveltuvuus kutemiselle on paras virtaaman ollessa $2 \text{ m}^3/\text{s}$. Ilmastonmuutoksen myötä eri vuodenaikoina yleistyvä tulviminen on riski taimenen kudun onnistumiselle (Veijalainen ym. 2010). Jos kutuajalle osuu runsaista syyssateista johtuva tulva, vähenevät kutemiseen soveltuvat ympäristöt koskessa huomattavasti. Lisäksi mädin kiinnittyminen pohjamateriaalin sekaan hankaloituu voimakkaissa virtausnopeuksissa. Tulvien yleistymistä ja niiden ajankohdan epäsäännöllistymistä voidaankin pitää uhkana erityisesti talven yli tapahtuvalle mädin kehittymiselle.

Matalissa virtaamissa alle kymmensenttisten taimenten kohdalla elinympäristön soveltuvuuden laita on Kauttuankoskella valoisa verrattuna muihin luokkiin. Etenkin tutkimusalueen alaosissa olosuhteet ovat laajalti lähes optimaaliset $2 \text{ m}^3/\text{s}$ virtaamassa. Matalissa virtaamatilanteissa luokalle on verrattain paljon soveltuvia ja optimaalisia elinympäristöjä muissakin osissa tutkimusaluetta. Pienille kaloille soveltuvia ympäristöjä rajaa sedimentin raekoko, joka varsinaisilla koskialueilla ollessaan liian suurta sekä syvänteessä ollessaan liian pientä ei tarjoa riittävää suojaa. Korkean lämpötilan lisäksi pienikoiset kalat sietävät huonosti myös voimakasta virtaamaa. Soveltuvien alueiden määrä laskee sitä enemmän, mitä voimakkaammaksi virtaama muuttuu.

10–15 cm pituisille taimenille hyvin soveltuvia alueita on tutkimusalueella niukemmin johtuen kokoluokalle asetetuista tiukemmista raja-arvoista. Erityisesti raekoon ja virtausnopeuden kohdalla ovat luokan optimialueet muita luokkia pienemmät (taulukko 2) (Huusko ym. 2003). Huomattavaa kokoluokan tuloksissa on se, miten soveltuvuus Ylisen kosken haaroittuvassa osassa on parhaimmillaan 6 ja $11 \text{ m}^3/\text{s}$ virtaamatilanteissa, kun muilla alueilla parhaat olosuhteet ovat $2 \text{ m}^3/\text{s}$ virtaamassa. Taimenen hyvinvoinnin kannalta on positiivista, että virtaaman muuttuessa tarpeeksi suuret yksilöt voivat löytää kulloisessakin tilanteessa sopivia ympäristöjä elinympäristönsä eri osista.

Yli viisitoistasenttisille taimenille soveltuvia alueita on matalissa virtaamatilanteissa eniten tutkimusalueen varsinaisten koskialueiden välisellä alueella. Liian pieni raekoko, hitaat virtausnopeudet ja paikoin myös vesipatsaan mataluus kuitenkin rajaavat kokoluokalle soveltuvia alueita Alisen kosken alapuolisessa syvänteessä. Virtaaman kasvaessa soveltuvuus lisääntyy Ylisellä koskella. Suurikokoiset kalat voivat siis voimakkaissakin tulvatilanteissa löytää niille optimaalisia alueita tutkimusalueelta.

Ympäristömuuttujille määriteltyjen erilaisten raja-arvioiden ansiosta optimaaliset ja soveltuvat alueet eri luokille sijaitsevat samassa virtaamatilanteessa usein lähellä toisiaan, mutta kuitenkin

hieman eri paikoissa. Esimerkiksi koon mukaan lisääntyvä vaatimus syvyydelle saa sopivimman elinympäristön siirtymään kalan koon kasvaessa aina keskemmälle uomaa. Samoin erot virtausnopeudessa tutkimusalueen eri osissa määrittelevät kullekin luokalle parhaiten soveltuvien alueiden sijaintia. Osittain soveltuvat alueet ovat luokkien välillä kuitenkin päällekkäisiä. Eri luokkien elinympäristövaatimukset raekoon kannalta ovat jokseenkin päällekkäisiä, eivätkä näin erota luokkien suosimia alueita yhtä tehokkaasti toisistaan.

Yleisesti parhaita alueita eri kokoisten taimenten elinympäristöksi sekä kutupaikoiksi olivat Alisen kosken alapuolinen osa, varsinaisten koskialueiden väli sekä Ylisen kosken haaroittuva osa. Paikkoja yhdistävät riittävän matalat virtausnopeudet sekä taimenelle sopiva raekoko. Virtavesikunnostuksissa olisikin syytä panostaa juuri näihin alueisiin sekä pyrkiä mahdollistamaan soveltuvia alueita eri ikäisille ja kokoisille kaloille sekä kutemiselle. Kunnostuksissa voidaan myös ottaa huomioon mallinnettujen soveltuvien alueiden suhteellinen osuus kunkin luokan kohdalla ja pyrkiä lisäämään niitä etenkin olosuhteiden puolesta erityisen herkälle kutemiselle, jolle soveltuvia alueita oli Kauttuankoskella vähiten. Toisaalta soveltuvien alueiden määrään vaikuttavat aiemmissa tutkimuksissa (Huusko ym. 2003; Louhi & Mäki-Petäys 2003; Louhi ym. 2008) soveltuvuudelle asetetut raja-arvot, joissa soveltuvan alueen ja optimialueen koot vaihtelevat luokkien välillä. Arvoja hyödyntäessä vaikuttaa tuloksiin se, miten onnistuneita niiden alkuperäiset määritykset ovat.

7. Johtopäätökset

Kauttuankoskessa on taimenen eri ikäluokille pääosin soveltuva lämpötila sekä raekooltaan, virtausnopeudeltaan ja syvyydeltään soveltuvia alueita. Soveltuvuus heikkenee tulvatilanteissa ja lämpötilan noustessa liian korkeaksi kesähelteillä.

Kauttuankosken lämpötilassa on heikkoa, keskimäärin alle 1 celsiusasteen, alueellista vaihtelua erilaisten ympäristöjen välillä. Vesi on viileämpää pohjassa kuin korkeammissa vesikerroksissa sekä syvänteissä verrattuna matalikkoihin. Lisäksi hitaan virtauksen paikat ovat nopean virtauksen paikkoja lämpimämpiä.

Alueelliset lämpötilaerot ovat voimakkaimpia kesäkuukausina ja etenkin helteellä ja matalan virtaaman aikaan. Auringon lämmittävä vaikutus, hitaat virtausnopeudet ja matala vesisyvyys yhdessä mahdollistavat veden lämpenemisen. Varjoiset paikat ovat hieman avoimia paikkoja viileämpiä. Muina vuodenaikoina alueelliset lämpötilaerot tasoittuvat.

Teollisuuden lauhdevesien johtaminen Kauttuan säännöstelypadon yläpuolelle lämmittää tutkimusalueen vettä. Lämmittävä vaikutus on heikko, mutta huomattavissa ympärivuotisesti. Koskialueella ilmenee purkupisteen alapuolella heikko alavirtaa kohti viilenevä trendi.

Kauttuankosken virtaama vaikuttaa lämpötilaolosuhteisiin sekoittamalla vesikerroksia voimakkaan virtaaman aikaan. Matalan virtaaman aikaan vesi kerrostuu ja hitaan virtausnopeuden ansiosta pintavesi lämpenee auringonpaisteessa. Eniten sekoittumista aiheuttavat useat peräkkäiset piikit virtaamassa.

Sedimentin liikkeellelähtöä tapahtuu eniten tutkimusalueen alaosissa sekä Ylisen kosken haaroittuvalla osuudella. Virtaaman voimistuessa liikkeellelähtö lisääntyy ja sitä tapahtuu myös koskialueiden välisellä osuudella. Yleistyvää tulviminen uhkaa erityisesti pienten poikasten ja mädin selviytymistä voimakkaiden virtausnopeuksien aiheuttaessa riskin niiden elinympäristöksi sopivien raekokojen liikkeellelähdölle.

Kauttuankoskella hienosedimenttiä kasautuu pääosin matalissa virtaamatilanteissa Alisen kosken alapuolelle, missä se muodostaa taimenelle huonosti soveltuvan alueen tukkien isompien partikkelien väliin jääviä rakoja.

Pienet taimenen poikaset ja nuoret yksilöt kärsivät eniten korkeista lämpötiloista sekä voimakkaista virtaamista Kauttuankoskella. Poikasten lämmönsietokyky on vanhempia ikäluokkia heikompi, ja ne viihtyvät hitaissa virtausnopeuksissa sekä matalissa osissa uomaa. Voimakkaissa virtaamissa sopivia elinympäristöjä on vähän.

Mitä suurempia taimenet ovat, sitä paremmin Kauttuankoskella on niille soveltuvia elinympäristöjä eri virtaamatilanteissa. Virtaaman voimistuessa isot taimenyksilöt pärjäävät Ylisen kosken olosuhteissa, joissa virtausnopeus on pienille kaloille liian voimakas. Pitkittyvät kesähelteet ovat kuitenkin uhka myös vanhempien kalojen selviytymiselle.

Ilmastomuutoksen myötä lisääntyvä ja vaikeammin ennustettavissa oleva tulviminen aiheuttaa riskin taimenen kudun onnistumiselle, joka vaatii riittävän hitaat virtausnopeudet. Lisäksi voimakkaat virtaamapiikit talvella saattavat aiheuttaa uoman pohjaan liian nopeita virtauksia, jotta mäti selviytyisi talven yli vahingoittumattomana.

Tulevissa kunnostustoimenpiteissä tulisi Kauttuankoskella keskittyä rakentamaan ympäristöjä monipuolisesti eri ikäisten taimenten elinympäristövaatimukset huomioiden. Erityistä huomiota tulisi kiinnittää kutupaikkoihin sekä poikasille tarkoitettuihin ympäristöihin.

Kunnostustoimenpiteissä pitää huomioida ja hyväksyä Kauttuankoskella vaikuttavat hydrauliset prosessit. Kutupaikat ja poikasten elinympäristöt tulisi rakentaa voimakkailta virtauksilta suojaisiin paikkoihin. Hienosedimentin kasautumisalueelle Alisen kosken alapuolelle ei kannata suunnitella mitään, mitä kasautuva sedimentti voisi haitata.

Kauttuan säännöstelypadon juoksutuksen suunnittelussa tulisi pyrkiä ottamaan huomioon taimenen elinolot padon alapuolella. Tulva-aikoina taimenen kannalta parasta olisi mahdollisuuksien puitteissa välttää korkeita virtaamapiikkejä. Erityisen tärkeää piikkien välttäminen on kunnostustoimenpiteitä seuraavina muutamana vuotena. Kesähelteillä Kauttuankosken liiallista lämpenemistä voitaisiin pyrkiä estämään juoksutusta lisäämällä.

Kiitokset

Tutkielma toteutettiin Pyhäjärvi-instituutin sekä Turun yliopiston maantieteen ja geologian laitoksen virtavesi- ja rannikotutkimusryhmän yhteistyönä. Haluan kiittää minulle tämän tilaisuuden mahdollistaneita ja näkemystään tarjonneita Pyhäjärvi-instituuttilaisia. Ohjaajalleni Petteri Alholle kiitokset asiantuntevista kommentteista ja avusta hydraulisessa mallinnuksessa. Erityiskiitokset Karoliina Lintuselle ja Linnea Blåfieldille kaikesta tuesta ja avusta prosessin aikana.

Lähdeluettelo

- Aaltonen, J. (2014). Eurajoen Kauttuankosken sähkökoekalastusraportti 2014. Pyhäjärvi-instituutti. 11 s.
- Akan, A. O. (2006). *Open Channel Hydraulics*. 364 s. Elsevier, Oxford.
- Alho, P., A. Kukko, H. Hyyppä, H. Kaartinen, J. Hyyppä & A. Jaakkola (2009). Application of boat-based laser scanning for river survey. *Earth Surface Processes and Landforms* 34: 1831–1838.
- Alho, P. & J. Mäkinen (2010). Hydraulic parameter estimations of a 2D model validated with sedimentological findings in the point-bar environment. *Hydrological Processes* 24: 2578–2593.
- Anttila, L. (2018). Eurajoen ala- ja keskiosan virtapaikkojen kalataloudellinen investointi. *Pyhäjärvi-Instituutin julkaisuja* B 35. 31 s.
- Anttila, L. & T. Kirkkala (2019). Eurajoen alaosan sähkökoekalastusraportti 2019, *Pyhäjärvi-instituutin julkaisuja* B 40. 12 s.
- Armstrong, J. D., P. S. Kemp, G. J. A. Kennedy, M. Ladle & N. J. Milner (2003). Habitat requirements of Atlantic salmon and brown trout in rivers and streams. *Fisheries Research*, 62. 143–170.
- Bagnold, R. A. (1966). An approach to the sediment transport problem from general physics. *Physiographic and Hydraulic studies of rivers* 422:1.
- Bailey, R. G. (2009). *Ecosystem geography: from ecoregions to sites*. 251 s. Springer, New York.
- Barnes, H. H. (1967). *Roughness characteristics of natural channels* (No. 1849). US Government Printing Office, Washington.
- Bernoulli, D. (1738). Hydrodynamica sive de viribus et motibus fluidorum comment arii. *Nederlands Tijdschrift voor Natuurkunde*, 82: 6. 218–220.
- Blott, S. J. & K. Pye (2001). GRADISTAT: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth Surface Processes and Landforms* 26: 1237–1248.
- Blåfield, L. (2019). Tulvasuojeluruoppauksen vaikutuksen mallintaminen – esimerkkinä Eurajoki. Julkaisematon pro gradu –tutkielma. 93 s. Maantieteen ja geologian laitos, Turun yliopisto.
- Carver, S. J. (2008). Multicriteria evaluation. Teoksessa: Kemp, K.K. (toim.): *Encyclopedia of Geographic Information Science*. 291–293. Sage Publications Inc, Thousand Oaks.
- Casal, G., P. Harris, X. Monteys, J. Hedley, C. Cahalane & T. McCarthy (2020). Understanding satellite-derived bathymetry using Sentinel 2 imagery and spatial prediction models. *GIScience & Remote Sensing* 57:3. 271–286.
- Chanson, H. (2004). *Hydraulics of Open Channel Flow: An Introduction*. 650 s. Butterworth–Heinemann, Oxford.
- Charlton, R. (2008). *Fundamentals of fluvial geomorphology*. 234 s. Routledge, New York.
- Chow, V. T., (1959). *Open-channel hydraulics*. 680 s. McGraw-Hill, New York.
- Clark, J. S., W. C. Hession, D. M. Rizzo, J. P. Laible & M. C. Watzin (2006). Two-dimensional hydraulic modeling approach to linking stream morphology and aquatic habitat quality. International Congress on Environmental Modelling and Software. 433.
- Corine maanpeiteaineisto 2018 (2018). Suomen ympäristökeskus. 8.1.2021. <www.syke.fi/fi-FI/Avoin_tieto>
- De Moustier, C. & H. Matsumoto (1993). Seafloor Acoustic Remote Sensing with Multibeam Echo-Sounders and Bathymetric Sidescan Sonar Systems. *Marine Geophysical Researches* 15: 27–42.

- De Schipper, M., R. Zeeuw, S. Vries, M. Stive & J. Terwindt (2011). Horizontal ADCP measurements of waves and currents in the very nearshore. 10th Working Conference on Current, Waves and Turbulence Measurements (CWTM). 20.–23.3.2011.
- Degerman, T. (2020). Kauttuankoskeen lisätyistä sorista. Henkilökohtainen sähköpostiviesti J. Porkalle. 28.8.2020.
- Dingman, S. L. (2009). *Fluvial Hydraulics*. 570 s. Oxford University Press, New York.
- Elliot, M. (2019). Preface. Teoksessa Lobón-Cervía, J. & N. Sanz (toim.): *Brown trout: biology, ecology and management*, XV–XVI. Wiley, Hoboken.
- Etelä-Suomen Aluehallintoviraston päätös 12/2018/2 (2018). ESAVI/694/2015, 12.1.2021. <avi.fi>
- Eurajoki (s.a.) Jokiohjelma. Pyhäjärvi-instituutti. 5.1.2021. <www.jokiohjelma.fi/toiminta-alue/eurajoki>
- Eurajoki – Köyliönjoki (s.a.). Pyhäjärvi-instituutti & Varsinais-Suomen elinkeino-, liikenne ja ympäristökeskus. 12 s. 6.1.2020. <eurajoki.info/raportit.php>
- Flener, C. (2015). Remote sensing for three-dimensional modelling of hydromorphology. Väitöskirja, 80 s. Maantieteen laitos, Turun yliopisto.
- Flener, C., M. Vaaja, A. Jaakkola, A. Krooks, H. Kaartinen, A. Kukko, E. Kasvi, H. Hyyppä, J. Hyyppä & P. Alho (2013). Seamless Mapping of River Channels at High Resolution Using Mobile LiDAR and UAV-Photography. *Remote Sensing* 5. 6382–6407.
- Flener, C., Y. Wang, L. Laamanen, E. Kasvi, J-M. Vesakoski & P. Alho (2015). Empirical Modeling of Spatial 3D Flow Characteristics Using a Remote-Controlled ADCP System: Monitoring a Spring Flood. *Water* 2015: 7, 217–247.
- FlowTracker Handheld ADV Technical Manual. Firmware Version 3.3. Software Version 2.20. (2007). 113 s. SonTek/YSI Inc, San Diego.
- Frissell, C., W. Liss, C. Warren & M. Hurley (1986). A hierarchical framework for stream habitat classification: Viewing streams in a watershed context. *Environmental Management* 10. 199–214.
- Fuller, I. & L. Basher (2013). Riverbed Digital Elevation Models as A Tool For Holistic River Management: Motueka River, Nelson, New Zealand. *River Research and Applications* 29: 619–633.
- Glock, K., M. Tritthart, H. Habersack & C. Hauer (2019). Comparison of Hydrodynamics Simulated by 1D, 2D and 3D Models Focusing on Bed Shear Stresses. *Water* 11: 226.
- Goncharov, V. N. (1964). *Dynamics of Channel Flow*. Israel Programme for Scientific Translation, Moskova.
- Gordon, R. L., (1989). Acoustic Measurement of River Discharge. *Journal of Hydraulic Engineering* 115: 7, 925–936.
- HEC-RAS User's Manual (2021). US Army Corps of Engineers. 677 s.
- Heggenes, J., J. G. Dokk (2001). Contrasting temperatures, waterflows, and light: seasonal habitat selection by young Atlantic salmon and brown trout in a boreonemoral river. *Regulated Rivers, Research & Management* 17: 623–635.
- Heggenes, J., J. L. Baglienere, R. A. Cunjak (1999). Spatial niche variability for young Atlantic salmon (*Salmo salar*) and brown trout (*S. trutta*) in heterogeneous streams. *Ecology of Freshwater Fish* 8: 1–21.
- Heggenes, J. (1996). Habitat Selection by Brown Trout (*Salmo trutta*) and Young Atlantic Salmon (*S. salar*) in Streams: Static and Dynamic Hydraulic Modelling. *Regulated Rivers: Research & Management* 12: 155–169.
- Hockey, J. B., I. F. Owens & N. J. Tapper (1982). Empirical and Theoretical Models to Isolate the Effect of Discharge on Summer Water Temperatures in the Hurunui River. *Journal of Hydrology (New Zealand)* 21: 1, 1–12.

- Hohenthal, J., P. Alho, J. Hyyppä & H. Hyyppä (2011). Laser scanning applications in fluvial studies. *Progress in Physical Geography* 35, 782–809.
- Holsti, H. (2012). Eurajoen kalataloudellinen yhteistarkkailu vuonna 2011. Kokemäenjoen vesistön vesistönsuojeluyhdistys ry. Julkaisu 668. 39 s.
- Hugget, R. (2004). *Fundamentals of Biogeography*. 2. p. 439 s. Routledge, Lontoo.
- Huusko, A., L. Greenberg, M. Stickler, T. Linnansaari, M. Nykänen, T. Vehanen, S. Koljonen, P. Louhi & K. Alfredsen (2007). Life in the ice lane: the winter ecology of stream salmonids. *River research and applications* 23: 5, 469–491.
- Huusko, A., P. Kreivi, A. Mäki-Petäys, M. Nykänen & T. Vehanen (2003). Virtavesikalojen elinympäristövaatimukset Perustietoa elinympäristömallisovelluksiin. Riista- ja kalatalouden tutkimuslaitos. *Kala- ja riistaraportteja* 284. 39 s.
- Hyvärinen, E., A. Juslén, E. Kemppainen, A. Uddström & U-M. Liukko (2019). Suomen lajien uhanalaisuus – Punainen kirja 2019. Ympäristöministeriö & Suomen ympäristökeskus.
- Hyyppä, H. & Hyyppä, J. (2003). Laserkeilauksen laadun osatekijät. Teoksessa: Jokela, J. (toim.). Pikseleitä ja pistepilviä - kuvauksen uudet ulottuvuudet. Maanmittaustieteiden päivät 20.–21.11.2003, s. 43–49. Maanmittaustieteiden seura ry., Helsinki
- Hyyppä, H. & J. Hyyppä (2006). *National laser scanning handbook - Recommendation for best practices in airborne laser scanning - Laserkeilaus ja kansallisia suosituksia*. ver. 1.0. Geodeettinen laitos, Helsinki. 31 s.
- Ji, Z-G. (2017) *Hydrodynamics and Water Quality: Modeling Rivers, Lakes, and Estuaries*. 2. p. 583 s. John Wiley & Sons, New York.
- Joensuu, J. (2021). Eurajoesta on löytynyt kuolleita taimenia eikä kalan tulevaisuus näytä hyvältä – Asiantuntija: "Jokainen kuollut kala on menetys". *Yle*. 20.7.2021. 19.9.2021. <yle.fi/uutiset/3-12027231>
- Jokinen, J. (2015). Eurajoen yläjuoksulla elää ehkä uniikki taimenkanta. *Länsi-Suomi*. 15.5.2015. 11.10.2020. <ls24.fi/uutiset/eurajoen-ylajuoksulla-elaa-ehka-uniikki-taimenkanta>
- Jonsson, B. & N. Jonsson (2009). A review of the likely effects of climate change on anadromous Atlantic salmon *Salmo salar* and brown trout *Salmo trutta*, with particular reference to water temperature and flow. *Journal of fish biology* 75: 2381–2447.
- Jonsson, B. & Jonsson, N. (2011). *Ecology of Atlantic salmon and brown trout: habitat as a template for life histories*. 708 s. Springer, New York.
- Jonsson, B. & N. Jonsson (2019). Habitat as Template for Life-Histories. Teoksessa Lobón-Cervía, J. & N. Sanz (toim.): *Brown trout: biology, ecology and management*. 229–249. Wiley, Hoboken.
- Junker, J., F. U. Heimann, C. Hauer, J. M. Turowski, D. Rickenmann, M. Zappa & A. Peter (2015). Assessing the impact of climate change on brown trout (*Salmo trutta fario*) recruitment. *Hydrobiologia* 751: 1, 1–21.
- Kao H-M., H. Ren, C-S. Lee, C-P. Chang, J-Y. Yen & T-H. Lin (2009). Determination of shallow water depth using optical satellite images. *International Journal of Remote Sensing* 30: 23, 6241–6260.
- Kasvi, E., J. Hooke, M. Kurkela, M. Vaaja, J-P. Virtanen, H. Hyyppä & P. Alho (2017). Modern empirical and modelling study approaches in fluvial geomorphology to elucidate sub-bend-scale meander dynamics. *Progress in Physical Geography* 41: 5, 533–569.
- Kasvi, E., J. Salmela, E. Lotsari, T. Kumpula & S.N. Lane (2019). Comparison of remote sensing based approaches for mapping bathymetry of shallow, clear water rivers. *Geomorphology* 333: 180–197.

- Kasvi, E., P. Alho, E. Lotsari, Y. Wang, A. Kukko, H. Hyypä & J. Hyypä (2015). Two-dimensional and three-dimensional computational models in hydrodynamic and morphodynamic reconstructions of a river bend: sensitivity and functionality. *Hydrological Processes* 29: 1604–1629.
- Keim, R. F., A. E. Skaugset & D. S. Bateman (1999). Digital terrain modeling of small stream channels with a total-station theodolite. *Advances in Water Resources* 23: 41–48.
- Kipinä-Salokannel, S. (2015). Eurajoen-lapinjoen-Sirppujoen pintavesien toimenpideohjelma vuosille 2016–2021, Varsinais- Suomen elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus. 106 s.
- Kirkkala, T. & H. Ryömä (2011). Eurajoen kasvillisuusselvitys. *Pyhäjärvi-instituutin julkaisuja* B 21. 29 s.
- Knighton, D. (1984). *Fluvial Forms and Processes*. 218 s. Edward Arnold, Lontoo.
- Knighton, D. (1998). *Fluvial Forms and Processes, A new perspective*. 383 s. Edward Arnold, Lontoo.
- Koivunen S., H. Nukki & S. Salokangas (2006). Satakunnan vesistöt – Käyttö ja kunnostustarpeet. *Pyhäjärvi-instituutin julkaisuja* B 12. 112 s.
- Kolev, N. I. (2015). *Multiphase Flow Dynamics 1, Fundamentals*. 838 s. Springer, New York.
- Koljonen, S., A. Huusko, A. Mäki-Petäys, P. Louhi & T. Muotka (2012). Assessing Habitat Suitability for Juvenile Atlantic Salmon in Relation to In-Stream Restoration and Discharge Variability. *Restoration Ecology* 21: 3, 344–352.
- Kondolf, G. M. & H. Piégay (2016). *Tools in fluvial geomorphology*. 2. p. 541 s. Wiley Blackwell, Chichester.
- Lane S. N., K. F. Bradbrook, K. S. Richards, P. A. Biron, A. G. Roy (1999). The application of computational fluid dynamics to natural river channels: three-dimensional versus two-dimensional approaches. *Geomorphology* 29: 1–20.
- Larsen, E. W., A. K. Fremier & S. E. Greco (2007). Cumulative Effective Stream Power and Bank Erosion On The Sacramento River, California, Usa. *Journal of the American Water Resources Association* 4, 1077–1097.
- Larsen L. G., J. Choi, M. K. Nungesser & J. W. Harwey (2012). Directional connectivity in hydrology and ecology, *Ecological Applications* 22: 2204–2220.
- Laurila, P. (2010). Mittaus- ja kartoitustekniikan perusteet. 3. p. 360 s. Rovaniemen ammattikorkeakoulun julkaisusarja D nro 3. Kopijyvä Oy, Jyväskylä.
- Leopold, L. B. & M. G. Wolman (1960). River meanders. *Bulletin of the Geological Society of America* 71, 769–794.
- Li, Y., B.-M. Chen, Z.-G. Wang & S.-L. Peng (2011). Effects of temperature change on water discharge, and sediment and nutrient loading in the lower Pearl River basin based on SWAT modelling. *Hydrological Sciences Journal* 56: 1, 68–83.
- Louhi, P. & A. Mäki-Petäys (2003). Elämää soraikon ulkopuolella ja sisällä – lohen ja taimenen kutupaikan valinta sekä mädin elinympäristövaatimukset. Riista- ja kalatalouden tutkimuslaito. *Kalatutkimuksia* 191. 23 s.
- Louhi, P., A. Mäki-Petäys & J. Erkinaro (2008). Spawning habitat of atlantic salmon and brown trout: General criteria and intragravel factors. *River Research and Applications*. 24: 3, 330–339.
- Lovett, G. M., C. G. Jones, M. G. Turner & K. C. Weathers (2005). *Ecosystem Function in Heterogeneous Landscapes*. 489 s. Springer, New York.
- MacVicar B. J., E. Beaulieu, V. Champagne & A. G. Roy (2007). Measuring water velocity in highly turbulent flows: field tests of an electromagnetic current meter (ECM) and an acoustic Doppler velocimeter (ADV). *Earth Surface Processes and Landforms* 32, 1412–1432.

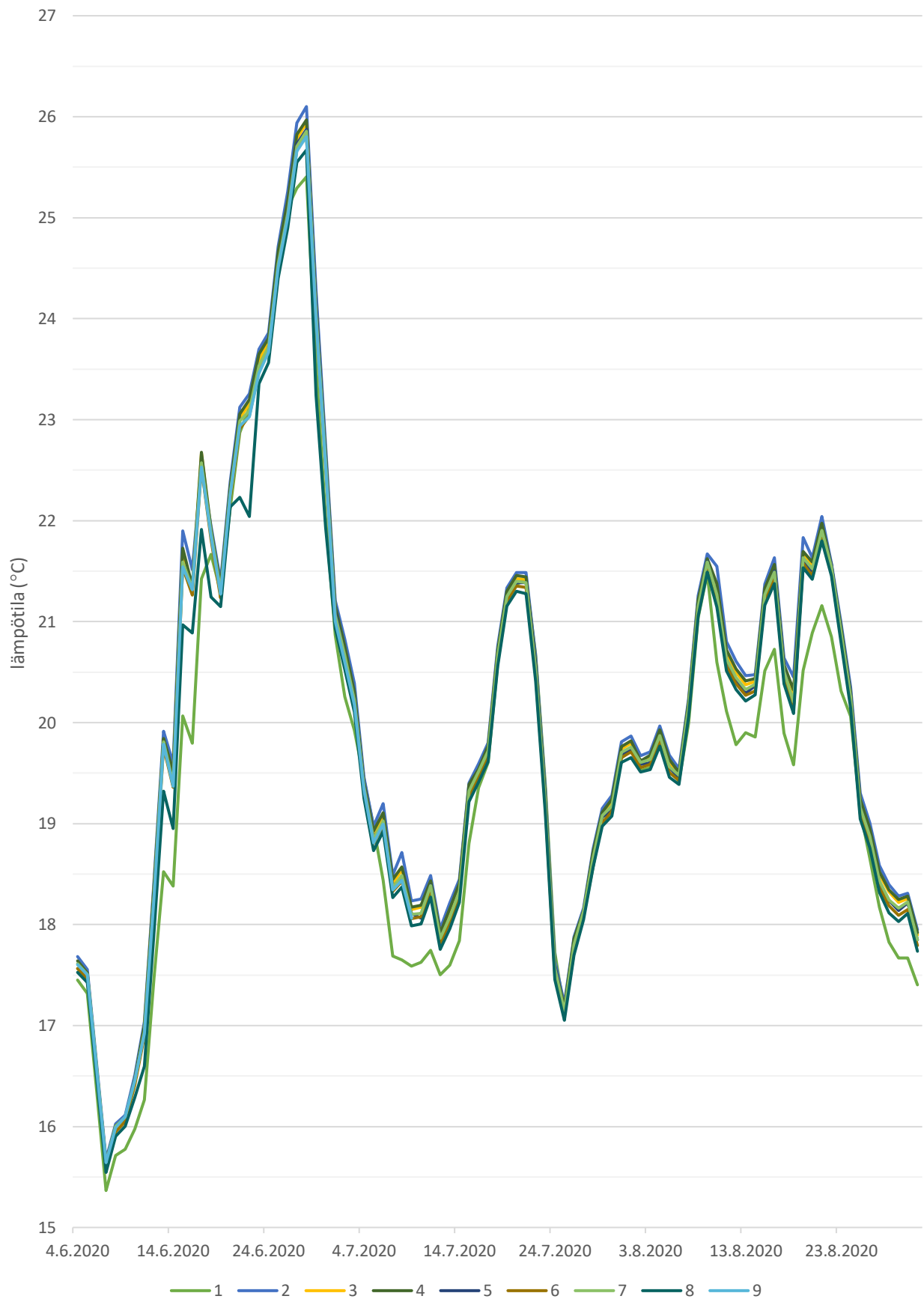
- Micalleh, A. (2011). Marine Geomorphology: Geomorphological Mapping and the Study of Submarine Landslides. Teoksessa Smith, M. J., P. Paron, J. S. Griffiths (toim.): *Geomapping: methods and applications*. 377–395. Elsevier, New York.
- Murtosaari, J. (s.a.) Järvitaimen. Keski-suomalainen. 9.4.2015-16. 12.2021 <www.ksml.fi/teemat/2601243>
- Muste, M., D. Kim & J. A. González-Castro (2010). Near-transducer errors in ADCP measurements: experimental findings. *Journal of Hydraulic Engineering* 136, 275–289.
- Muste, M., K. Yu & M. Spasojevic (2004). Practical aspects of ADCP data use for quantification of mean river flow characteristics; Part I: moving-vessel measurements. *Flow Measurement and Instrumentation* 15:1, 1–16.
- Myers, D. T., R. R. Rediske & J. N. McNair (2019). Measuring Streambank Erosion: A Comparison of Erosion Pins, Total Station, and Terrestrial Laser Scanner. *Water* 11: 9, 1846.
- Mäki-Petäys, A., T. Muotka, A. Huusko, P. Tikkanen & P. Kreivi (1997). Seasonal changes in habitat use and preference by juvenile brown trout, *Salmo trutta*, in a northern boreal river. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 54: 3, 520–530.
- Mäki-Petäys, A., T. Muotka, P. Tikkanen, A. Huusko, P. Kreivi & K. Kuusela (1994). Kokoluokkien väliset erot taimenen poikasten mikrohitaattien käytössä. Riista- ja kalatalouden tutkimuslaitos. *Kalatutkimuksia* 80. 38 s.
- O'Flynn, K., D. H. Phillips & M. Toland (2013). Sediment changes upstream and downstream of the Altnahinch Dam in the River Bush in Northern Ireland: a preliminary study. *Environmental earth sciences* 70: 6, 2645–2657.
- Ojala, S. (2020). Eurajoen ja Eurajoensalmen kalataloudellinen yhteistarkkailuohjelma vuodesta 2020 alkaen. KVVY Tutkimus Oy. 16 s.
- Parsons D. R., J. L. Best, O. Orfeo, R. J. Hardy, R. Kostaschuk & S. N. Lane (2005). Morphology and flow fields of three-dimensional dunes, Rio Paraná, Argentina: Results from simultaneous multibeam echo sounding and acoustic Doppler current profiling. *Journal of Geophysical Research* 110.
- Pasternack G. B., M. K. Bounrisavong & K. K. Parikh (2008). Backwater control on riffle–pool hydraulics, fish habitat quality, and sediment transport regime in gravel-bed rivers. *Journal of Hydrology* 357: 1–2, 125–139.
- Payne, T. (2003). The Concept of Weighted Usable Area as Relative Suitability Index. IFIM Users Workshop. 1.-5.6.2003. Fort Collins.
- Piirin sekä Ala-Satakunnan ja Rauman yhdistysten valitus koskien Eurajoen yläosan perkausta (2018). Suomen luonnonsuojeluliiton Satakunnan piiri ry. 12.1.2021. <www.sll.fi/satakunta/2018/02/19/piirin-seka-ala-satakunnan-ja-rauman-yhdistysten-valitus-koskien-eurajoen-ylaosan-perkausta/>
- Pintavesien ekologinen ja kemiallinen tila (2020). Suomen Ympäristökeskus. 5.1.2021. <www.ymparisto.fi>
- Poindexter C. M., P. J. Rusello & E. A. Variano (2011). Acoustic Doppler velocimeter-induced acoustic streaming and its implications for measurement. *Experiments in Fluids* 50, 1429–1442.
- Resop, J. P. & W. C. Hession (2010). Terrestrial Laser Scanning for Monitoring Streambank Retreat: Comparison with Traditional Surveying Techniques. *Journal of Hydraulic Engineering* 136: 10, 794–798.
- Rodríguez J. G. & A. Uriarte (2009). Laser Diffraction and Dry-Sieving Grain Size Analyses Undertaken on Fine- and Medium-Grained Sandy Marine Sediments: A Note. *Journal of Coastal Research* 25: 1, 257–264.
- Rowe, J. S. (1961). The level-of-integration concept and ecology. *Ecology* 42: 420–427.
- Sandlund, O. T. & B. Jonsson (2016). Life-history plasticity: migration ceased in response to environmental change?. *Ecology of Freshwater Fish* 25: 225–233.

- Shahmohammadi, R., H. Afzalimehr & J. Sui (2021). Assessment of Critical Shear Stress and Threshold Velocity in Shallow Flow with Sand Particles. *Water*. 2021; 13(7): 994.
- Shaw, E. M. (1983). *Hydrology in Practice*. 596 s. Van Nostrand Reinhold Co, Berkshire.
- Simpson, M. R. (2001). *Discharge Measurements Using a Broad-Band Acoustic Doppler Current Profiler*. Yhdysvaltain geologian tutkimuskeskus. Sacramento, Kalifornia.
- Sinokrot B. A. & J. S. Gulliver (2000). In-stream flow impact on river water temperatures. *Journal of Hydraulic Research* 38: 5, 339–349.
- Smokorowski, K., R. A. Metcalfe, S. D. Finucan, N. Jones, J. Marty, M. Power, R. S. Pyrcce & R. Steele (2011). Ecosystem level assessment of environmentally based flow restrictions for maintaining ecosystem integrity: A comparison of a modified peaking versus unaltered river. *Ecohydrology* 4. 791–806.
- Song, T. & Y. M. Chiew (2001). Turbulence measurement in nonuniform open-channel flow using acoustic Doppler velocimeter (ADV). *Journal of Engineering Mechanics* 127: 3, 219–232.
- Stone, M. C. & R. H. Hotchkiss (2007). Evaluating velocity measurement techniques in shallow streams. *Journal of Hydraulic Research* 45: 6, 752–762.
- Taylor, K. G. (2012). Sediments and sedimentation. *Teoksessa Holden, J. (toim.) (2012). An Introduction to Physical Geography and the Environment*. 3. p. 244–268. Pearson, Harlow.
- Terray, E., B. Brumley & B. Strong (1999). Measuring waves and currents with an upward-Looking ADCP. Proceedings of the IEEE Sixth Working Conference on Current Measurements. IEEE. 66–71. 13.3.1999.
- Triipponen, J-P. & a. Sallmen (2013). Eurajoen tulvasuojelu. VARELY/221/07.02/2013. Varsinais-Suomen elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus.
- Valtuustoaloite Euran keskusta-alueen tulvasuojelun käynnistämisestä 1348/11.01.01/2020 (2021). Euran kunnanvaltuuston kokous 8.3.2021. 12.1.2021. <<https://www.eura.fi/kunta-ja-hallinto/paatoksenteko/esityslistat-ja-poytakirjat/>>
- Van Veen grabs (2018). Manual. Eijkelkamp Soil & Water. 4 s.
- Van Veen Grabs (s.a.). Light weight and reliable Grabs for sediment sampling. OSIL. 1 s.
- Veijalainen, N., E. Lotsari, P. Alho, B. Vehviläinen, J. Käyhkö (2010). National scale assessment of climate change impacts on flooding in Finland. *Journal of Hydrology*. 391:3-4. 333–350 s.
- Vosselman, G. & H. G. Maas (2010). *Airborne and Terrestrial Laser Scanning*. Whittles Publishing, Dunbeath.
- Wang, F., S. C. Maberly, B. Wang & X. Liang (2018). Effects of dams on riverine biogeochemical cycling and ecology. *Inland Waters*, 8(2), 130–140.
- Ward, J. V. & J. A. Stanford (1995). Ecological connectivity in alluvial river ecosystems and its disruption by flow regulation. *Regulated rivers: research & management* 11: 1, 105–119.
- Williams, R. D., J. Brasington, M. Hicks, R. Measures, C. D. Rennie & D. Vericat (2013). Hydraulic validation of two-dimensional simulations of braided river flow with spatially continuous adcp data. *Water Resources Research* 49, 5183–5205.
- Williams, R. D., M-L. Lamy, G. Maniatis & E. Stott (2020). Three-dimensional reconstruction of fluvial surface sedimentology and topography using personal mobile laser scanning. *Earth Surface Processes and Landforms* 45, 251–26.
- Yang, J. (1977). The movement of sediments in rivers. *Geophysical surveys* 3, 39–68.

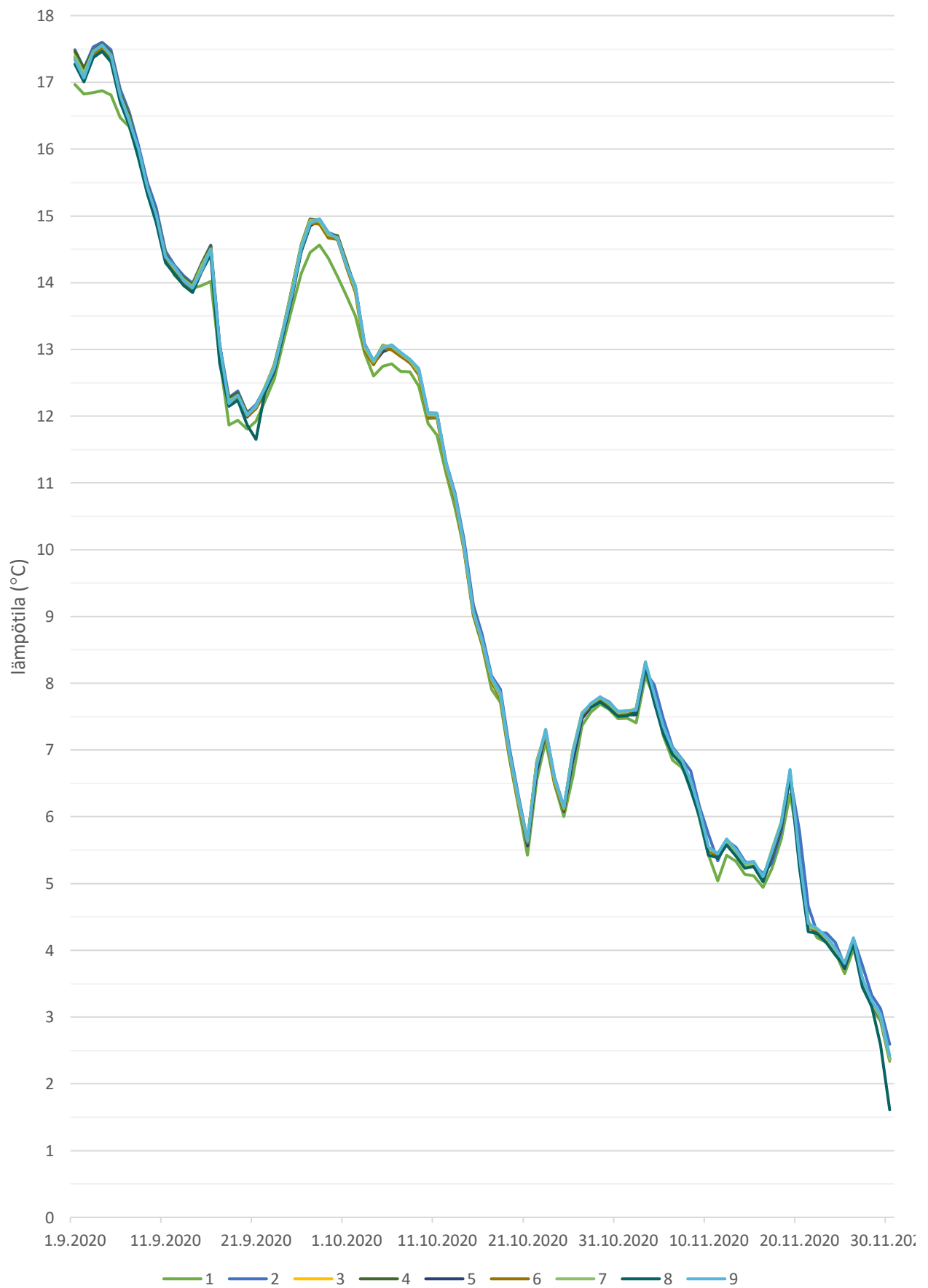
- Ympäristötiedon hallintajärjestelmä Hertta (2021). Suomen ympäristökeskus. Hydrologiset havainnot, 3400150 Pyhäjärvi – luusua. <www.syke.fi/fi-FI/Avoin_tieto/Ymparistotietojarjestelmat>
- Yochum, S. E., F. Comiti, E. Wohl, G. C. David & L. Mao (2014). *Photographic guidance for selecting flow resistance coefficients in high-gradient channels*. USDA Forest Service-General Technical Report RMRS-GTR, 1–91.
- Yorke, T. & K. A. Oberg (2002). Measuring river velocity and discharge with acoustic Doppler profilers. *Flow Measurement and Instrumentation* 13, 191–195.
- Zaidel P. A., A. H. Roy, K. M. Houle, B. Lambert, B. H. Letcher, K. H. Nislow & C. Smith (2021). Impacts of small dams on stream temperature. *Ecological Indicators* 120: 106878.

Liitteet

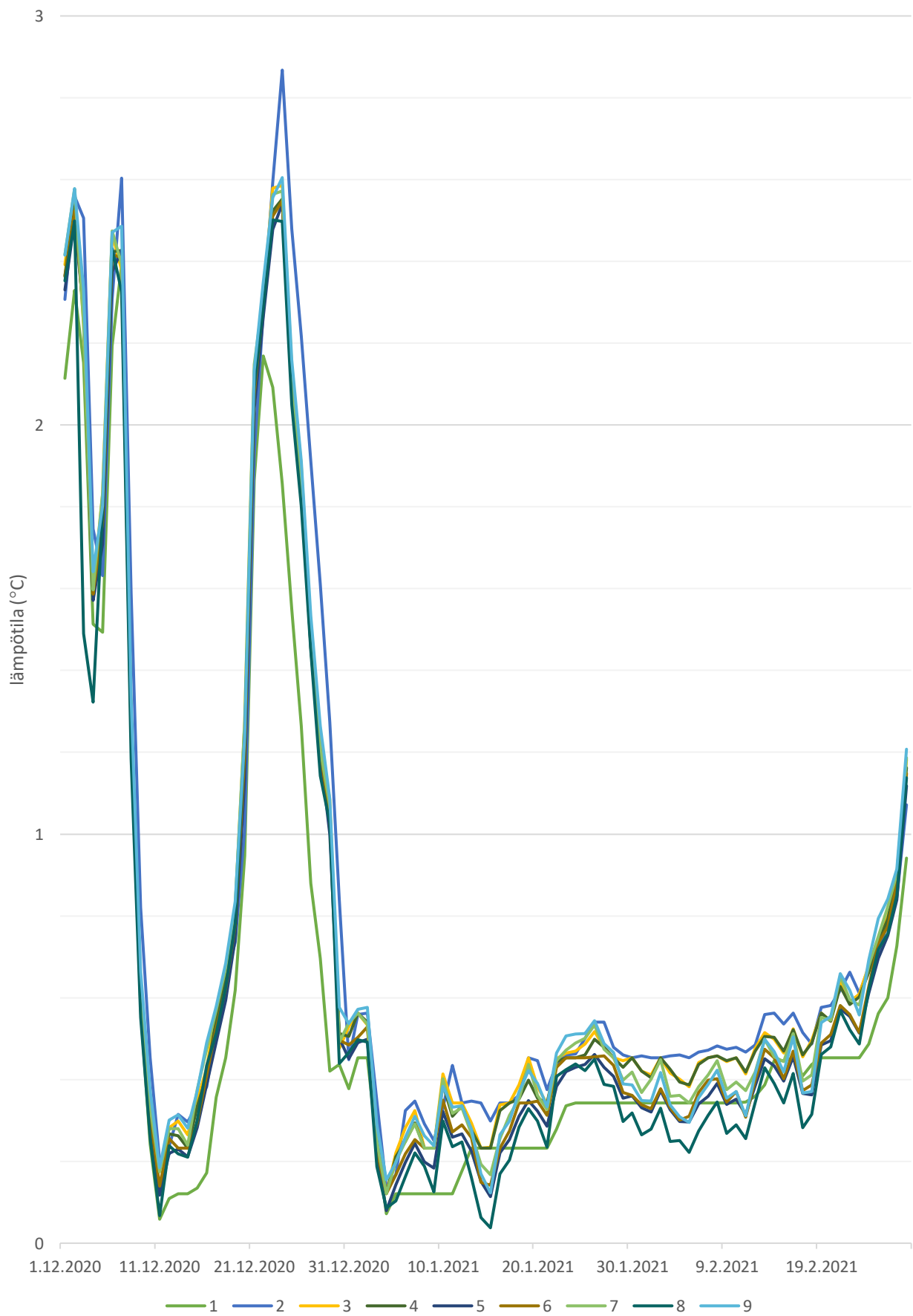
Liite 1. Loggerien 1–9 mitaamat lämpötilat 4.6.-31.8.2020.



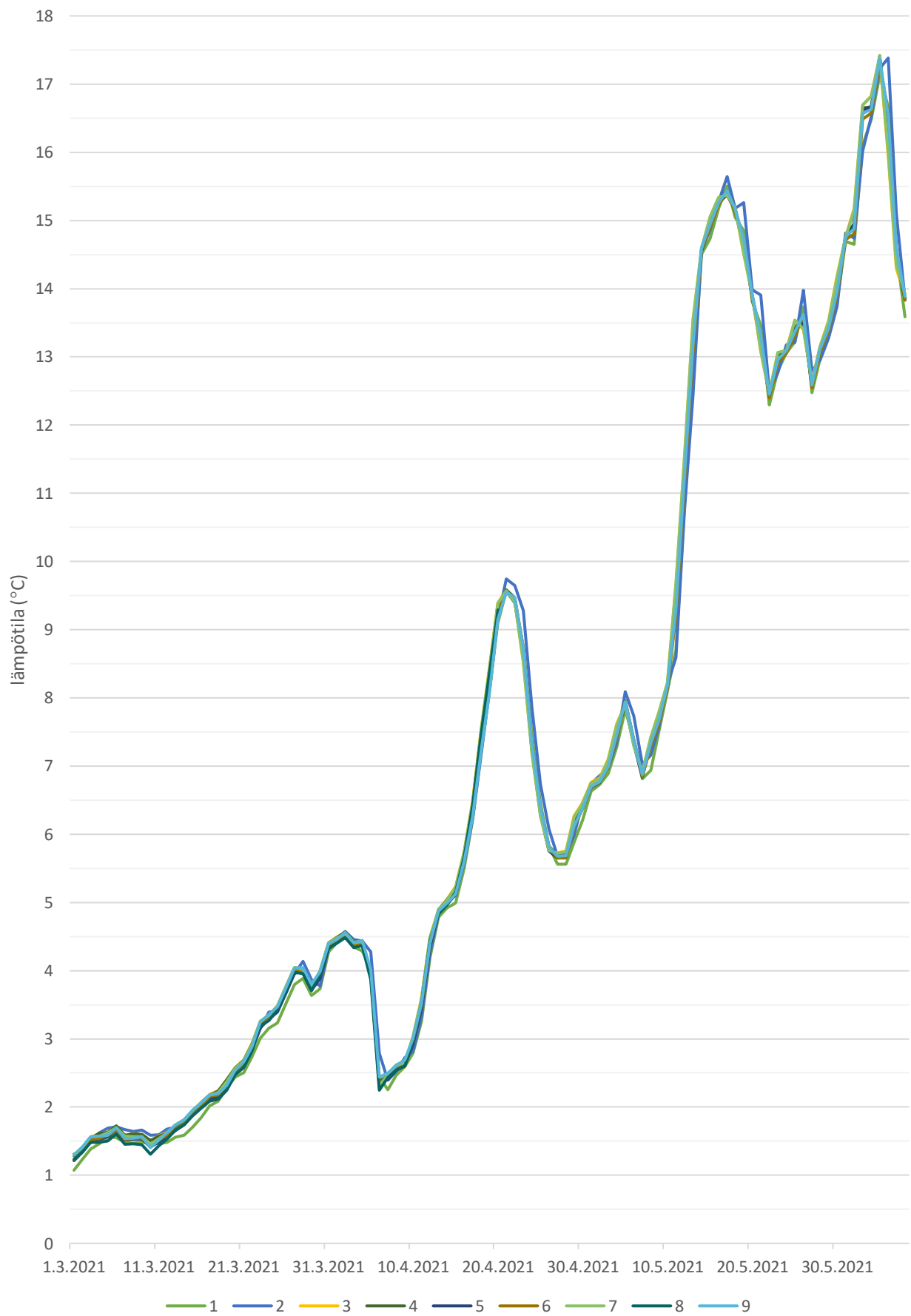
Liite 2. Loggerien 1–9 mittaamat lämpötilat 1.9.-30.11.2020.



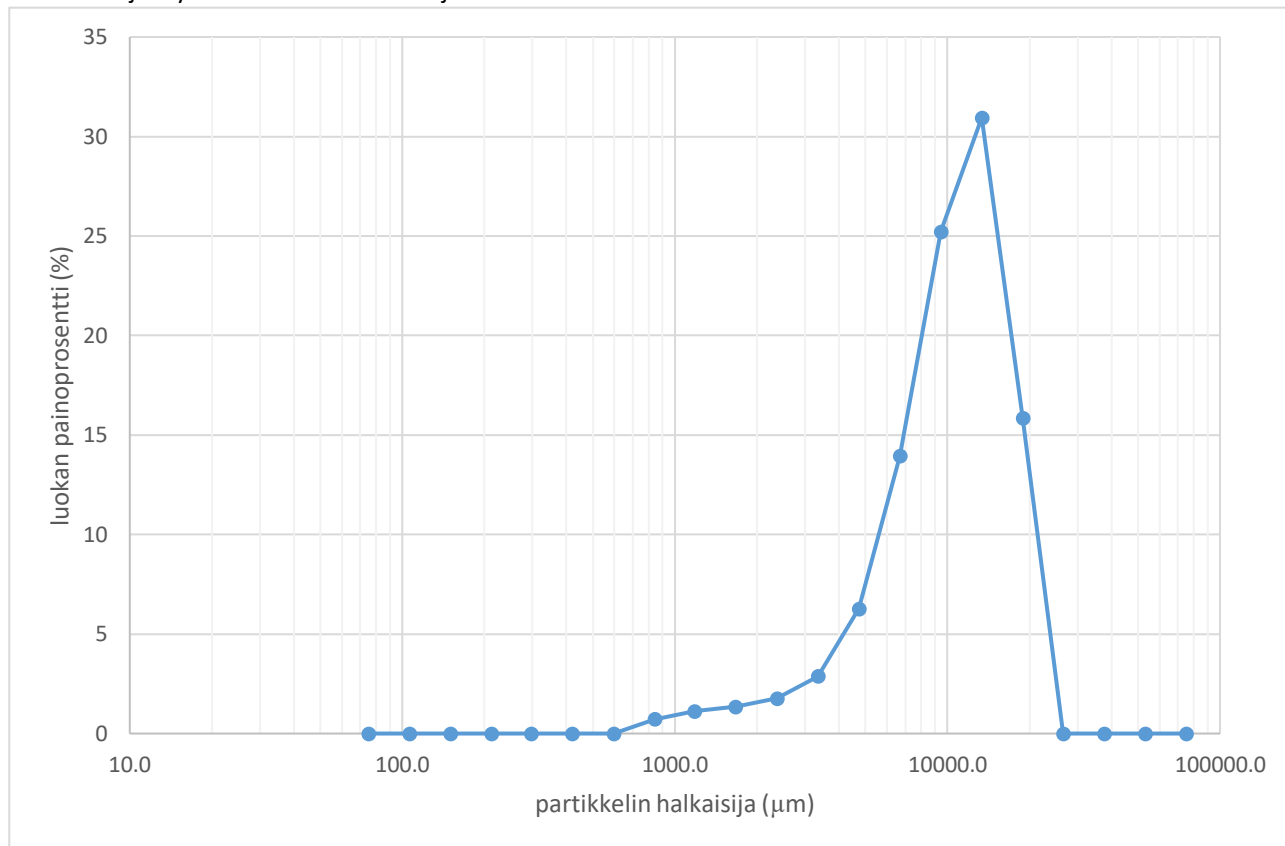
Liite 3. Loggerien 1–9 mittaamat lämpötilat 1.12.2020-28.2.2021.



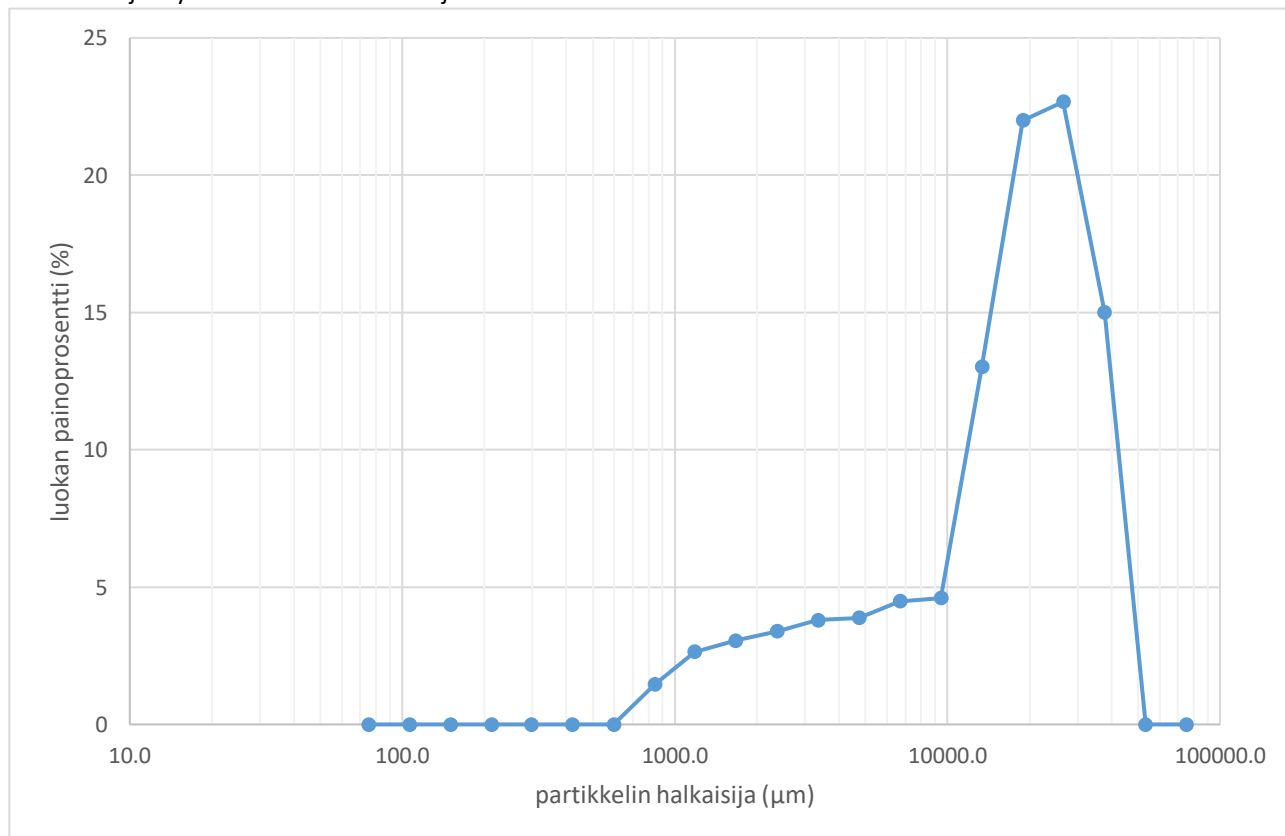
Liite 4. Loggerien 1–9 mittaamat lämpötilat 1.3.-7.6.2021.



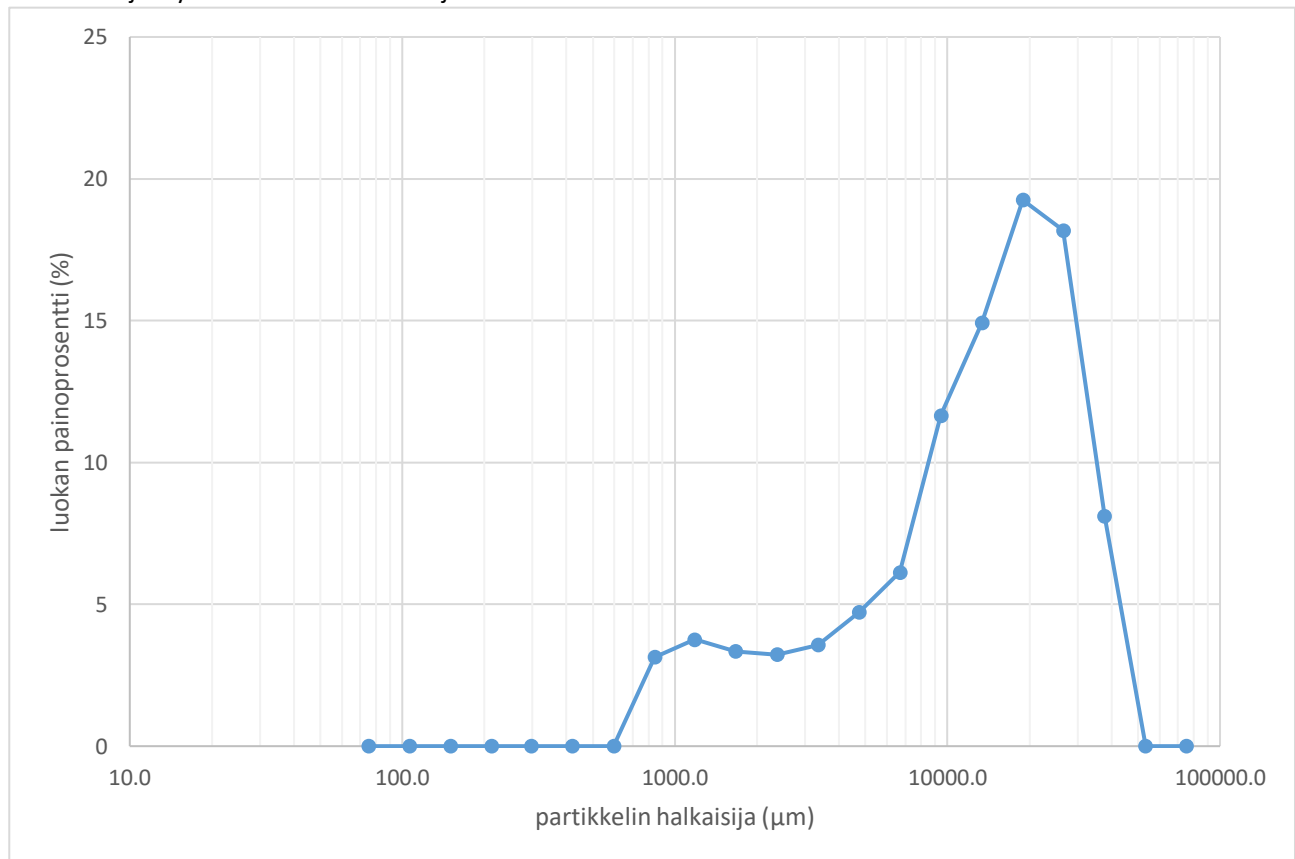
Liite 5. Pohjanäyte 1:n raekokoluokkien jakautuminen.



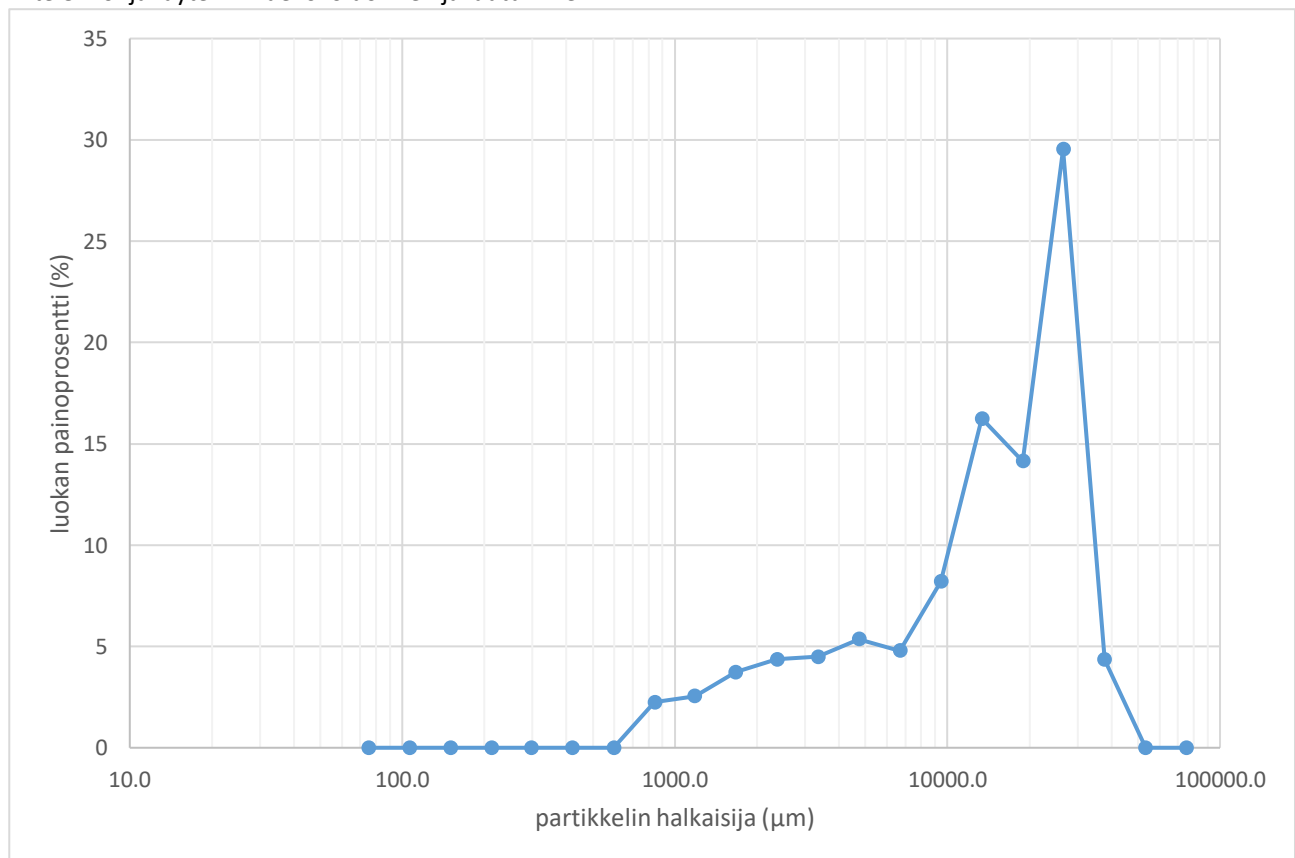
Liite 6. Pohjanäyte 2:n raekokoluokkien jakautuminen.



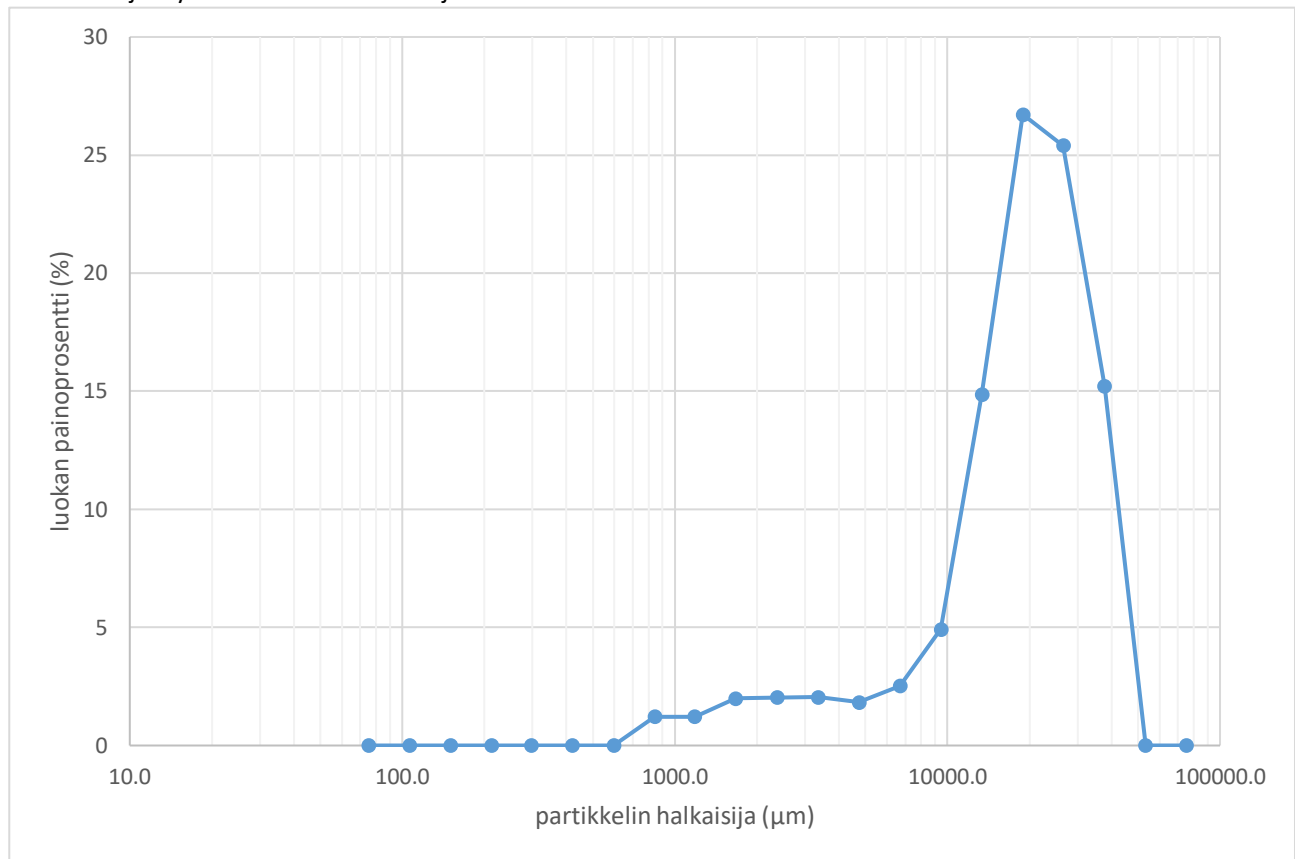
Liite 7. Pohjanäyte 3:n raekokoluokkien jakautuminen.



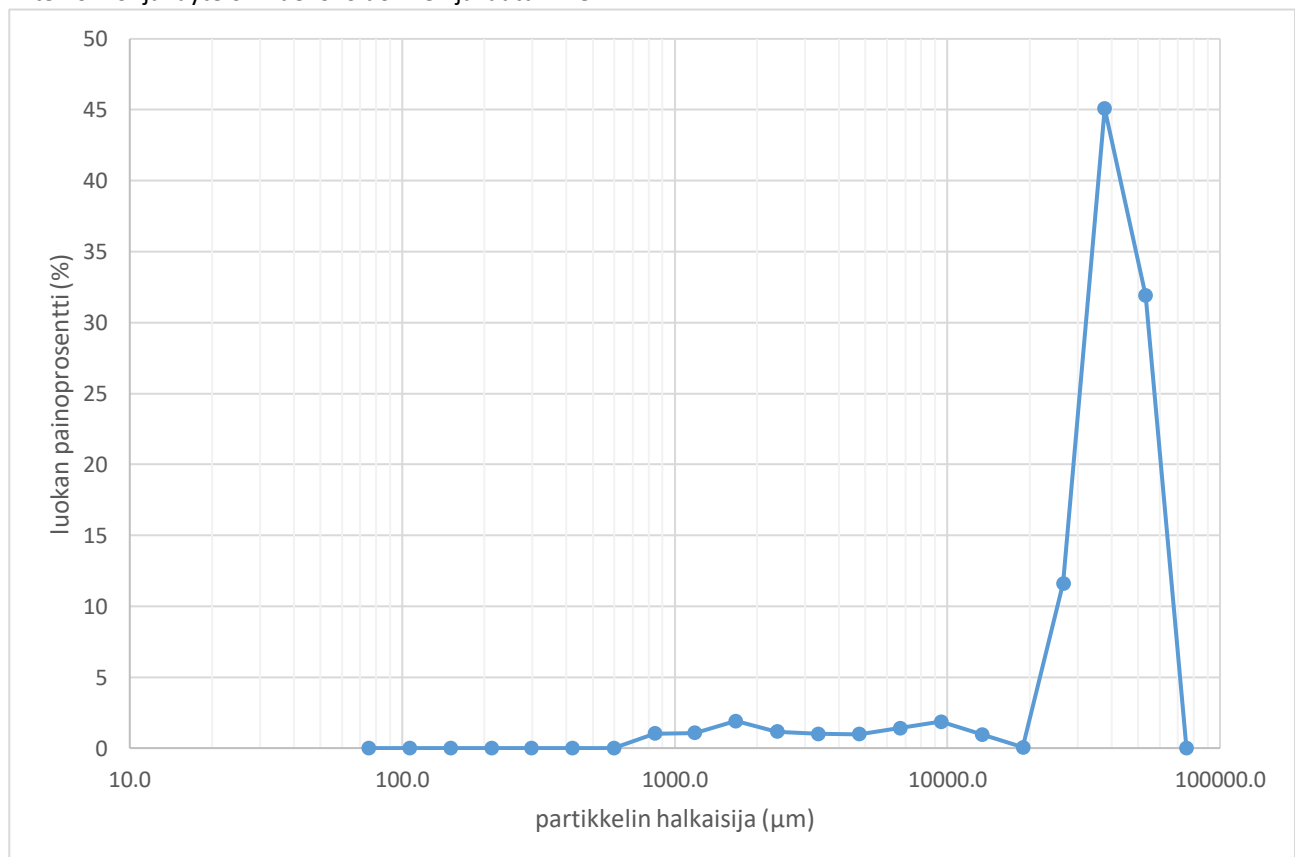
Liite 8. Pohjanäyte 4:n raekokoluokkien jakautuminen.



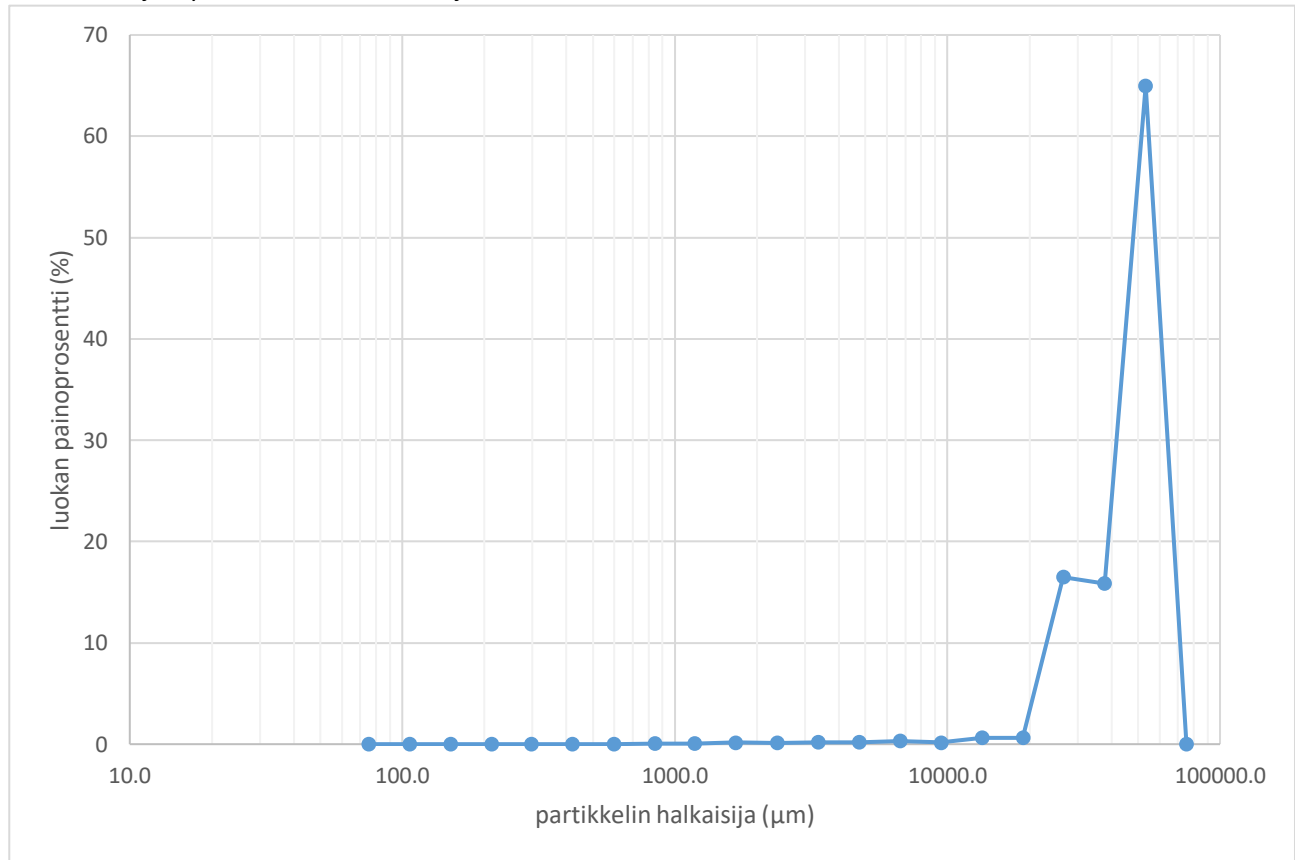
Liite 9. Pohjanäyte 5:n raekokoluokkien jakautuminen.



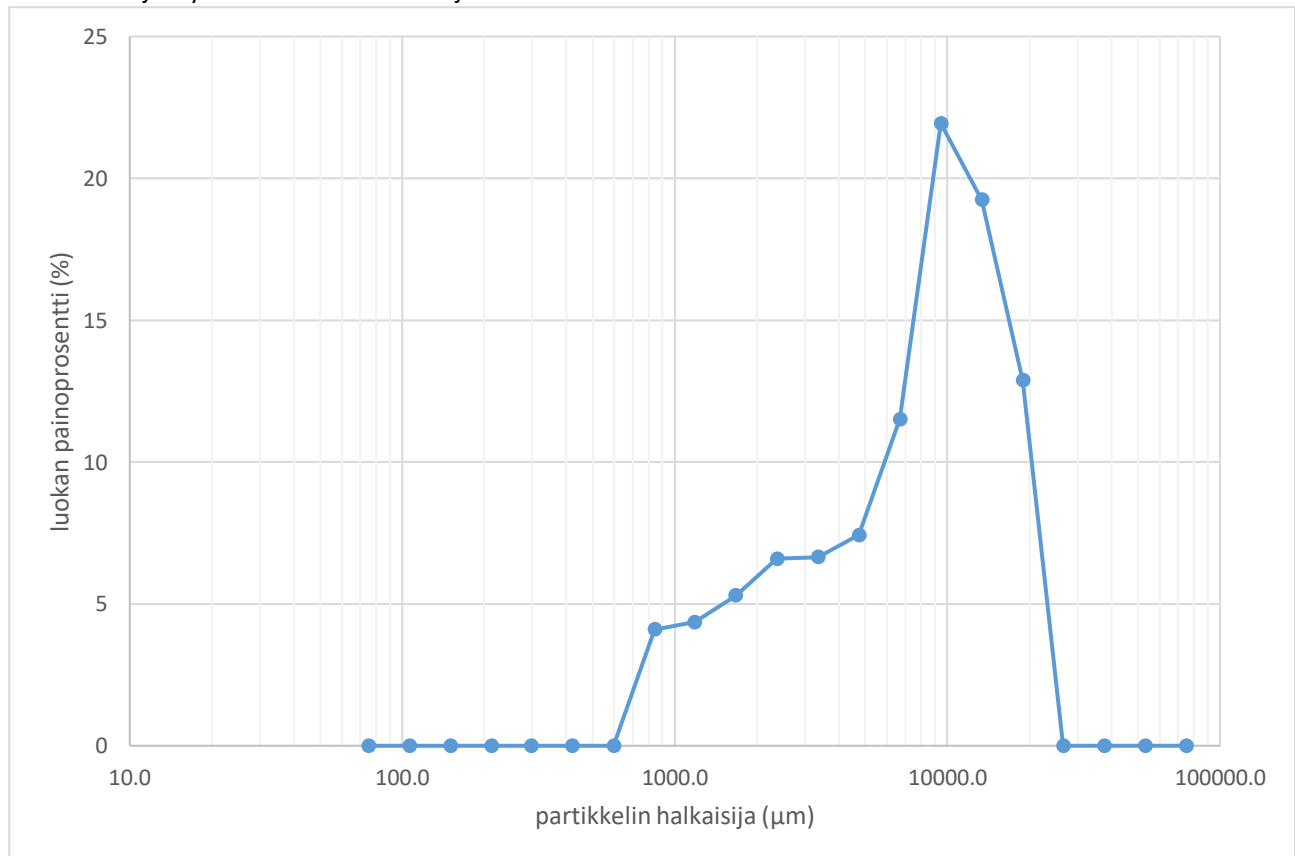
Liite 10. Pohjanäyte 6:n raekokoluokkien jakautuminen.



Liite 11. Pohjanäyte 7:n raekokoluokkien jakautuminen.



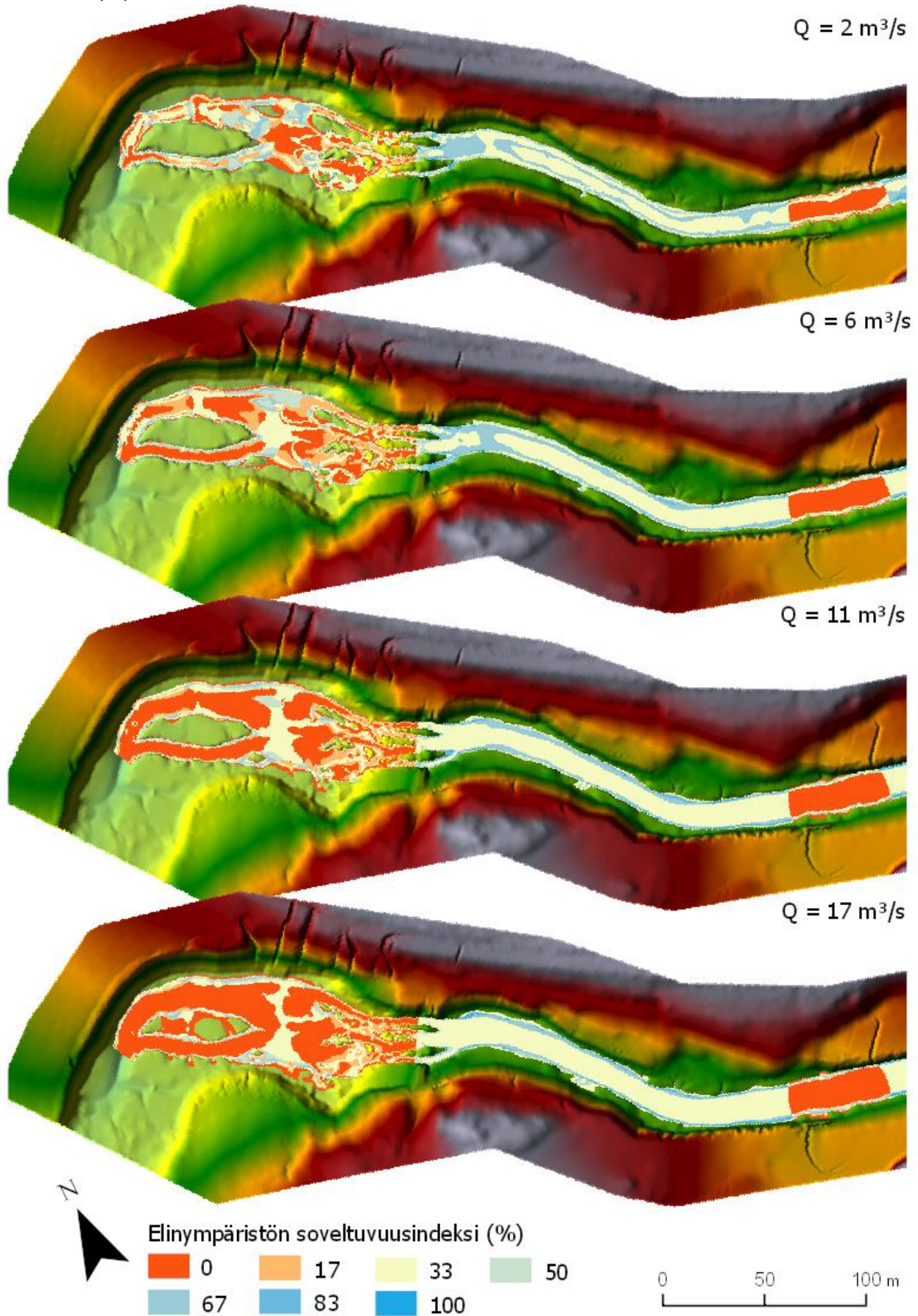
Liite 12. Pohjanäyte 8:n raekokoluokkien jakautuminen.



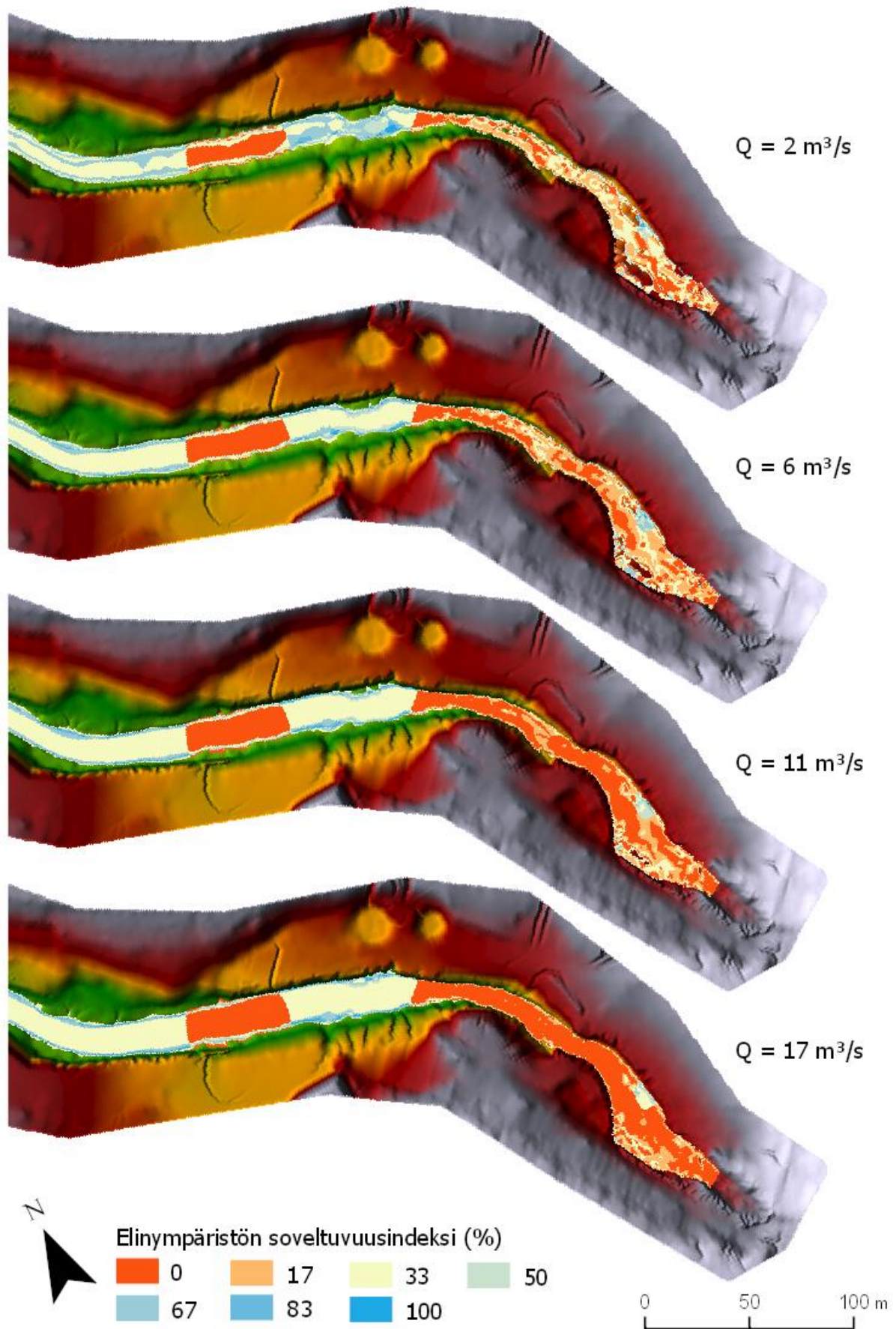
Liite 13. Sedimenttinäytteissä olleiden yli 3,15 cm kokoisten partikkelien mitat, paino ja muoto.

Näyte	x (mm)	y (mm)	z (mm)	paino (g)	sphericity	angularity
2	49	39	33	79,1	high sphericity	subangular
	65	41	27	74,5	low sphericity	subangular
3	58	47	28	81,2	high sphericity	rounded
4	55	44	32	43,1	high sphericity	very angular
5	93	45	34	153,8	low sphericity	subangular
6	65	64	50	302,7	high sphericity	well rounded
	69	45	29	142,0	low sphericity	well rounded
	65	43	25	59,5	low sphericity	angular
7	80	63	56	391,7	high sphericity	rounded
	75	51	38	165,4	low sphericity	rounded
	52	48	36	115,6	low sphericity	subrounded
	56	48	36	91,7	low sphericity	subrounded

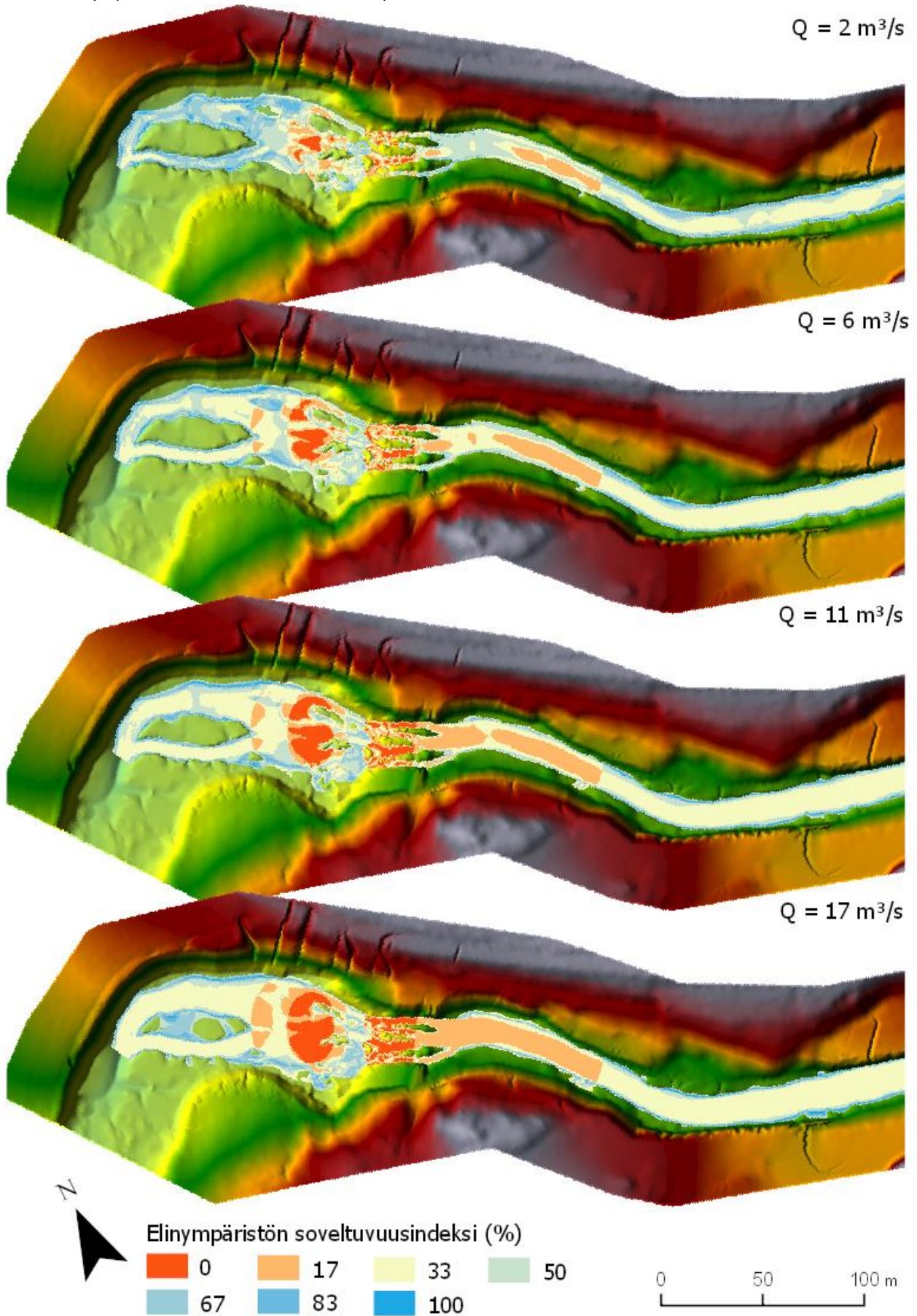
Liite 14. Elinympäristön soveltuminen taimenen kutemiselle eri virtaamatilanteissa tutkimusalueen alaosassa.



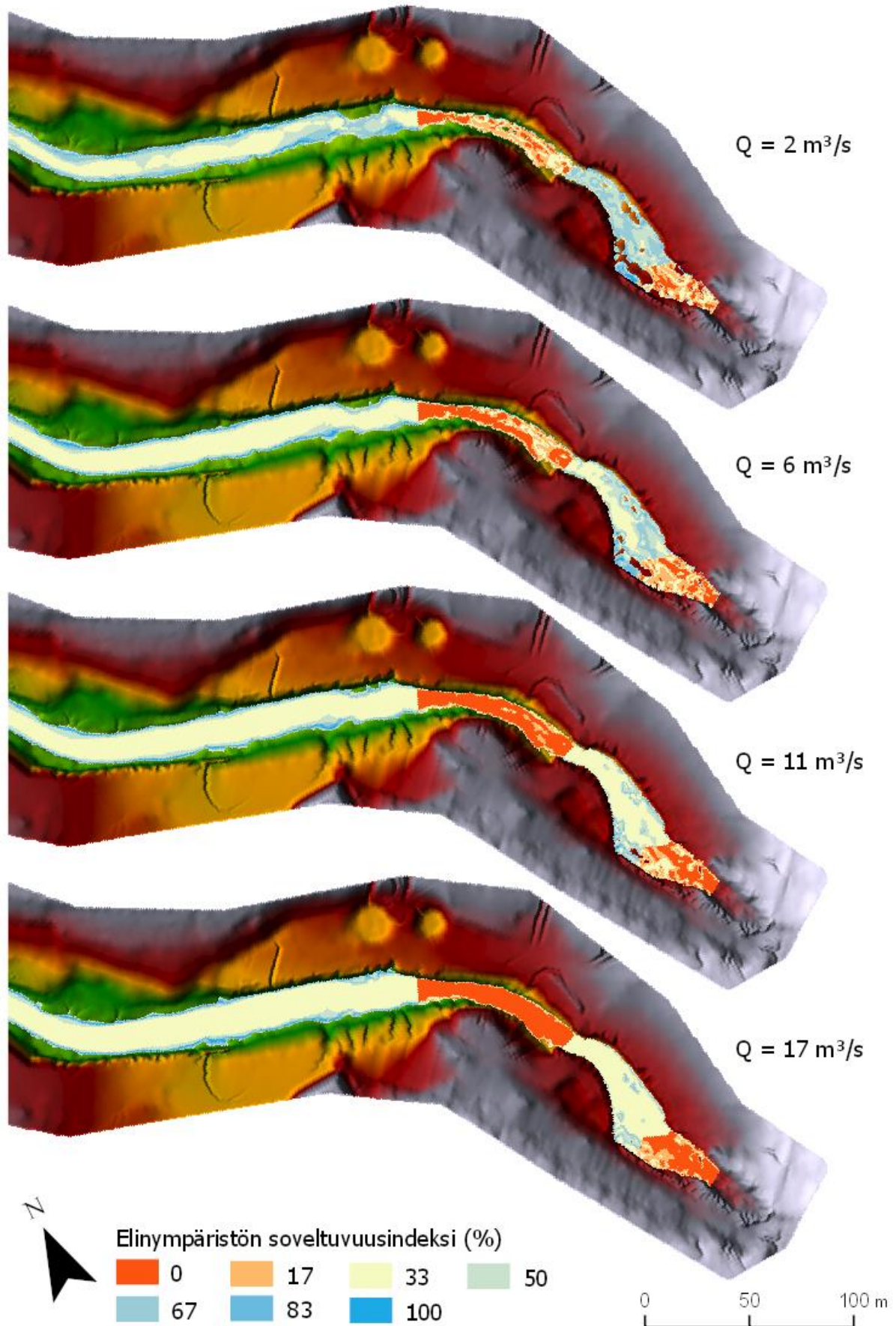
Liite 15. Elinympäristön soveltuminen taimenien kutemiseen eri virtaamatilanteissa tutkimusalueen yläosassa.



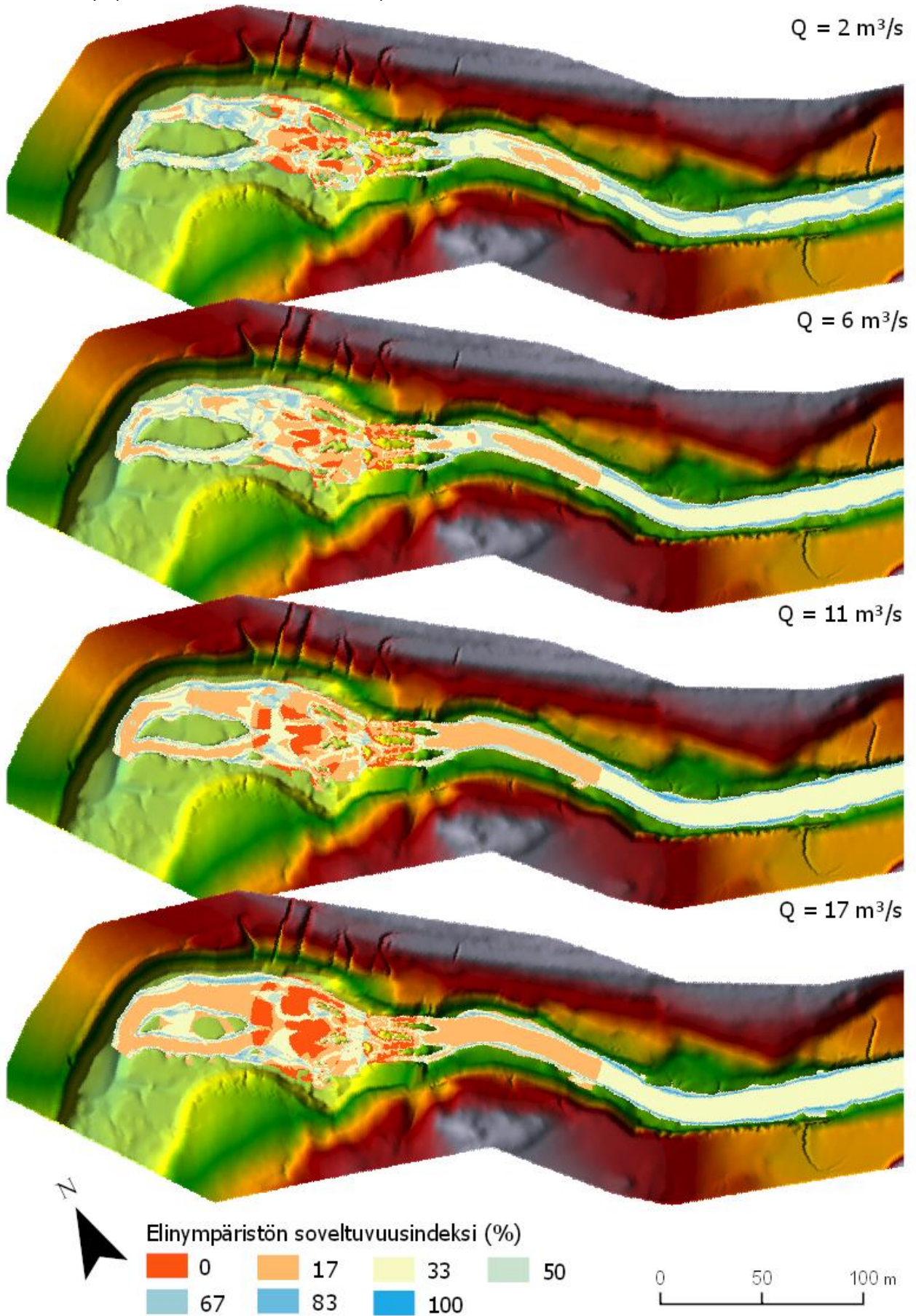
Liite 16. Elinympäristön soveltuminen alle 10 cm pituisille taimenille eri virtaamatilanteissa tutkimusalueen alaosassa.



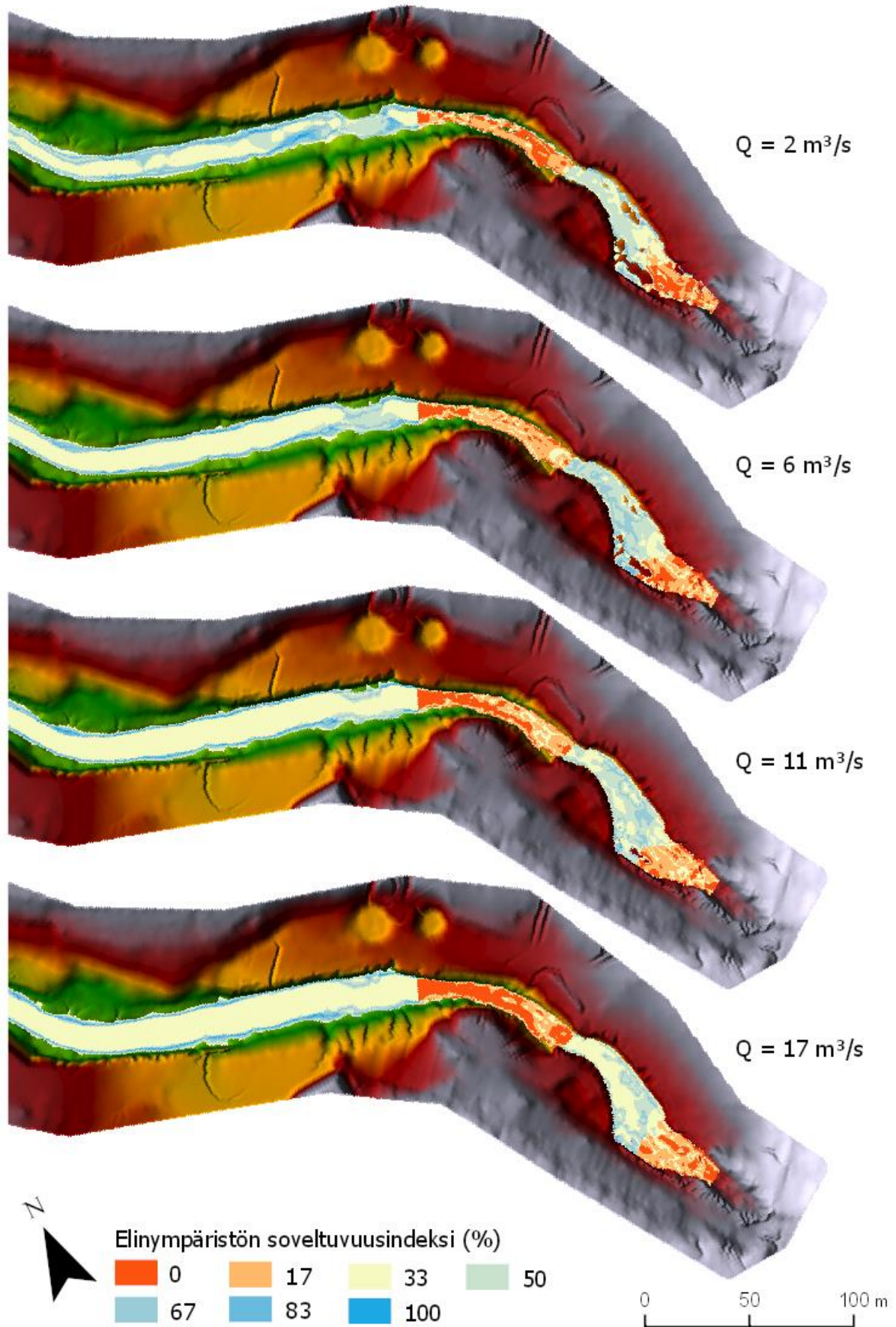
Liite 17. Elinympäristön soveltuminen alle 10 cm pituisille taimenille eri virtaamatilanteissa tutkimusalueen yläosassa.



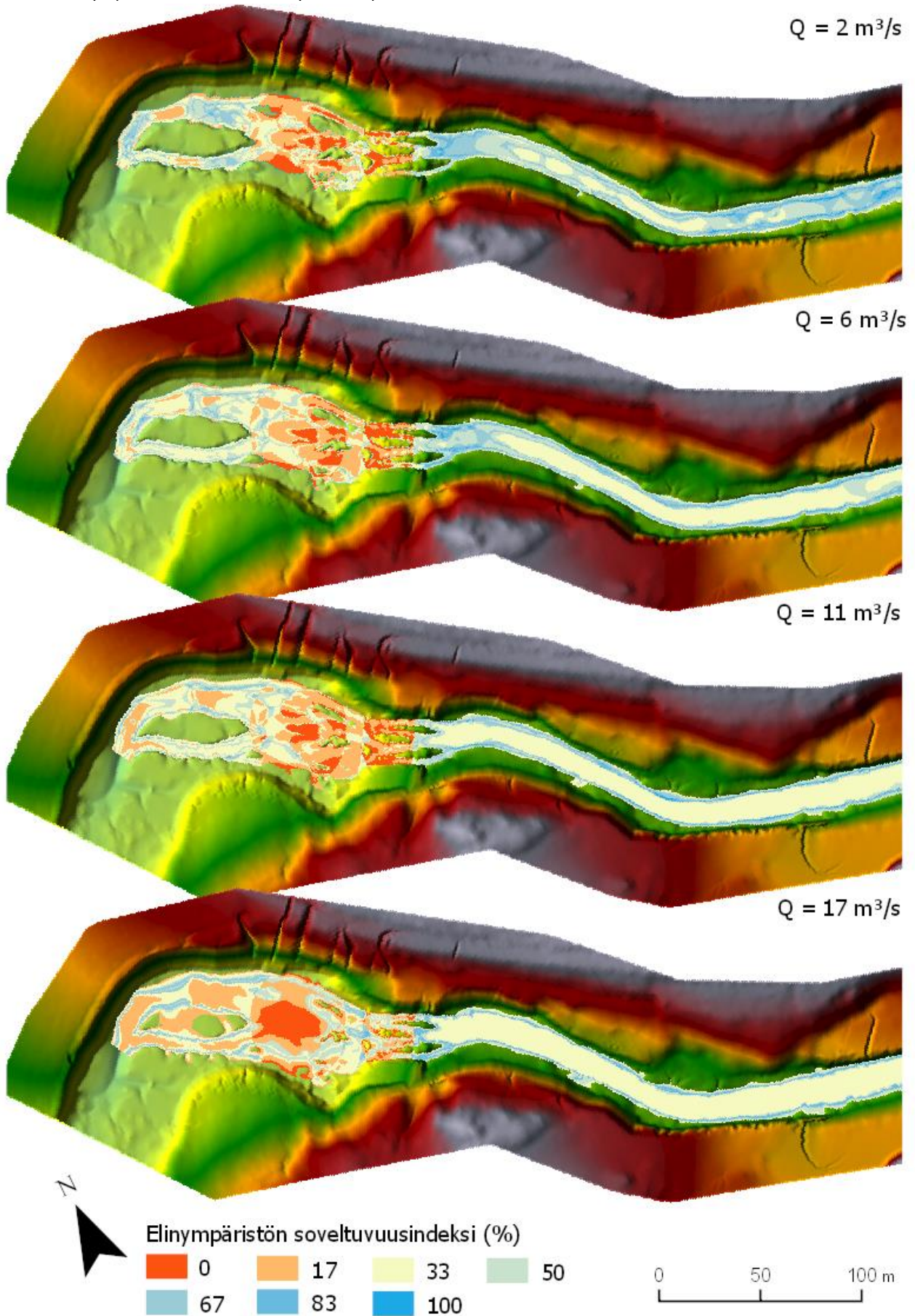
Liite 18. Elinympäristön soveltuminen 10–15 cm pituisille taimenille eri virtaamatilanteissa tutkimusalueen alaosassa.



Liite 19. Elinympäristön soveltuminen 10–15 cm pituisille taimenille eri virtaamatilanteissa tutkimusalueen yläosassa.



Liite 20. Elinympäristön soveltuminen yli 15 cm pituisille taimenille eri virtaamatilanteissa tutkimusalueen alaosassa.



Liite 21. Elinympäristön soveltuminen yli 15 cm pituisille taimenille eri virtaamatilanteissa tutkimusalueen yläosassa.

