



Santtu Kaipainen

VIRTAUSOLOSUHTEIDEN JA GEOMETRIAN YHTEYS KIINTOAINEEN
PIDÄTTYMISEEN VESIENSUOJELUALTAISSA

Maantieteen pro gradu -tutkielma

Turku 2020

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

TURUN YLIOPISTO
Luonnontieteiden ja tekniikan tiedekunta
Maantieteen ja geologian laitos

KAIPANEN, SANTTU: Virtausolosuhteiden ja geometrian yhteys kiintoaineen pidättymiseen vesiensuojelualtaissa

Pro gradu -tutkielma, 113 s.

40 op

Maantiede

Tammikuu 2020

Rehevöityminen heikentää sisävesien laatua ja hankaloittaa niiden hyödyntämistä. Pitkälti syy on maatalouden ja yhdyskuntien valumavesien sisältämissä ravinteissa. Sisävesien laadun heikkeneminen aiheuttaa huomattavia yhteiskunnallisia kustannuksia. Laskeutusaltaiden ja kosteikkojen muodostamat rakenteet ovat yksi vesiensuojelun keino, jolla valumavesiä pyritään puhdistamaan. Suomen ilmasto-oloissa toiminta perustuu pitkälti siihen, että virtauksen hidastumisen seurauksena kiintoaines ja siihen sitoutuneet ravinteet laskeutuvat altaiden pohjalle.

Tämän pro gradu -tutkielman tavoitteena on lisätä ymmärrystä siitä, miten kosteikkoaltaiden geometria ja virtausolosuhteet vaikuttavat altaiden kykyyn pidättää kiintoaineskuormaa. Tutkielman etuna aikaisempaan tutkimukseen verrattuna on kosteikkojen topografian tarkka, mittauksiin perustuva mallintaminen. Tutkimuksessa vertaillaan kahta Säkylän Pyhäjärven valuma-alueella sijaitsevaa laskeutusallas–kosteikko-rakennetta.

Altaiden vedenpäälliset pinnanmuodot kartoitettiin maastolaserkeilauksella ja vedenalaiset osat ADCP:n integroidun kaikuluotaimen sekä VRS-RTK-GNSS:n avulla. Tarkkoja korkeusmalleja käytettiin 2D- ja näennäis-3D-virtausmallien tausta-aineistona, joilla simuloitiin altaiden virtauskenttiä eri vuodenaikojen virtaamahuipuissa. Altaisiin tulevaa ja niistä lähtevää virtaamaa seurattiin vedenpaineanturien avulla huhtikuusta joulukuuhun vuonna 2017. Samoin seurattiin altaiden vesimäärän vaihtelua. Vedenlaatuaineisto koostui jatkuvatoimisten sameusmittarien tuottamasta aineistosta, joka kalibroitiin ja muunnettiin kiintoainespitoisuudeksi laboratoriossa analysoitujen vesinäytteiden avulla. Aineistojen yhdistelmällä tarkasteltiin vedenlaadun yhteyttä virtaamaan, altaiden vesipinta-alojen ja tilavuuksien vaihtelua sekä virtauskenttien vaikutuksia kiintoaineen laskeutumiseen ja uudelleensuspension.

Tutkielman tulokset osoittavat, etteivät yksittäiset vesiensuojelurakenteen toimintaa selittävät suuret riitä indikoimaan kiintoaines- tai ravinnekuormien pidättymistä. Veden viipymä vaikuttaa olevan tärkeä toimintaa edistävä tekijä, mutta hyvä hydraulinen tehokkuus ei automaattisesti johda kiintoaineskuorman pidättymiseen. Virtauskentät tulisi huomioida suunnitteluvaiheessa. Laskeutusallas–kosteikko-rakenteessa varsinkin alajuoksun puoleisen kosteikkoaltaan virtausolosuhteilla ja pinnanmuodoilla näyttäisi olevan merkitystä kiintoaineen pidättymiselle. Vesiensuojelualtaiden toimintaa olisi hyödyllistä tarkastella läpi vuoden ajallisesti tiheällä aineistolla virtaamista sekä ravinne- ja kiintoaineskuormista.

Asiasanat: vesiensuojelu, laskeutusallas, rakennettu kosteikko, suspensiokulkeuma, maastolaserkeilaus, korkeusmallinnus, syvyysmallinnus, hydraulinen mallinnus

UNIVERSITY OF TURKU
Faculty of Science and Engineering
Department of Geography and Geology

KAIPANEN, SANTTU: The effect of flow conditions and geometry on total suspended solids retention in pond–wetland treatment systems

Master's thesis, 113 pp.

40 ECTS

Geography

January 2020

Eutrophication degrades the quality of freshwaters and hinders their utilisation. Much of the nutrients causing eutrophication are introduced to water bodies in runoff from agricultural and residential areas. The degradation of freshwaters causes notable costs for societies. Pond–wetland treatment systems are one of the means used in water protection to purify runoff from these areas. In the Finnish climate their retention performance relies heavily on sedimentation of total suspended solids (TSS) and attached nutrients.

The goal of this thesis is to improve knowledge on how geometry and flow conditions of ponds and wetlands affect their ability to retain TSS load. The advantage of this thesis compared to previous studies is the utilisation of accurate, measurement-based modelling of pond and wetland topography. This study compares two pond–wetland treatment systems in SW Finland.

Dry topography was mapped with terrestrial laser scanning and bathymetry of the treatment systems was mapped with the use of integrated sonar of an ADCP platform and VRS-RTK-GNSS. Combined DEMs were used as input data in 2D and quasi-3D flow modelling that simulated flow during seasonal peak discharges. Flow in and out of the treatment systems was measured with water pressure sensors from April to December in 2017. Water quality data was derived from continuous turbidity sensor data that was calibrated and converted to TSS content with water samples analysed in laboratory. The combination of different data was utilised to analyse connections between water quality and discharge, the changes in the treatment systems' water area and volume and finally the effects of flow patterns on TSS sedimentation and resuspension.

Results show that single factors thought to influence the treatment process do not adequately indicate the way a treatment system functions. Water residence time seems to be an important factor for water purification but good hydraulic efficiency does not necessarily lead to retention of suspended solids. Flow patterns should be taken into account in planning. In pond–wetland treatment systems flow characteristics and geometry of the downstream wetland in particular seem to be of importance to retention performance. Operation of ponds and wetlands should be monitored throughout the year with high frequency data on discharge together with nutrient and TSS loads.

Keywords: water protection, sedimentation pond, constructed wetland, suspended load, terrestrial laser scanning, elevation modelling, bathymetric modelling, hydraulic modelling

Sisällysluettelo

1. Johdanto.....	1
2. Aineskuljetus, rehevöityminen ja vesiensuojelualtaat.....	3
2.1 Veden virtaus ja aineskuljetus.....	3
2.2 Vesistöjen rehevöityminen ja ravinteiden kierto.....	11
2.3 Vesiensuojelukosteikot ja -altaat.....	16
2.4 Vesiensuojelualtaiden kartoitus.....	21
2.4.1 Topografian kartoitus virtavesiympäristössä.....	21
2.4.2 Virtauksen mittaus.....	25
2.4.3 Veden virtauksen mallinnus.....	27
2.4.4 Vesiensuojelualtaiden suureiden laskenta.....	32
2.4.5 Veden puhdistumisen mittaus.....	34
3. Tutkimusalue.....	36
4. Aineisto ja menetelmät.....	44
4.1 Yleiskuva aineistosta.....	44
4.2 Altaiden topografia ja geometria.....	45
4.3 Altaiden virtausolosuhteet.....	51
4.4 Virtaussimulaatiot.....	53
4.5 Vedenlaatuaineisto.....	58
4.6 Altaiden valuma-alueet.....	59
5. Tulokset.....	60
5.1 Aineistojen jakaumat ja validointi.....	60
5.1.1 Vedenlaatuaineisto.....	60
5.1.2 Altaiden virtaamat.....	62
5.1.3 Topografia.....	65
5.1.4 Virtaussimulaatiot.....	66
5.2 Sameuden ja kiintoaineen pidäytyminen.....	68
5.2.1 Sameuden pidäytyminen altaissa.....	68
5.2.2 Kiintoaineen pidäytyminen.....	70
5.2.3 Virtaaman yhteys sameuteen ja kiintoaineeseen.....	72
5.3 Altaiden topografia ja geometria.....	77
5.3.1 Altaiden topografia.....	77
5.3.2 Vesipinta-alan vaihtelu.....	79
5.3.3 Kasvillisuuden määrä altaissa.....	83
5.4 Kosteikkojen virtausolosuhteet.....	85

5.4.1 Syvyysskeskiarvotettu virtaus	85
5.4.2 Pohjanläheinen virtaus	93
5.4.3 Veden viipymä	95
5.5 Pinnanmuotojen, virtauksen ja viipymän tulosten yhteenveto	97
6. Keskustelu.....	99
6.1 Suspensiokulkeuma ja virtaama	99
6.2 Pinnanmuodot ja pinta-ala	101
6.3 Virtauskentät ja veden viipymä	103
6.4 Mittausasetelman rajoitteet.....	105
7. Johtopäätökset	106
Kiitokset	107
Kirjallisuus.....	107
Avoimet paikkatieto- ja muut aineistot.....	113

1. Johdanto

Rehevöityminen ja siltaatio ovat sisävesien laatua heikentäviä prosesseja (Wetzel 2001: 836–837). Rehevöityminen eli eutrofituminen tarkoittaa vesistön biologisen tuotantokyvyn kasvua typpi- ja fosforikuorman kasvun seurauksena. Rehevöitymistä edistää siltaatio, joka tarkoittaa suspentoituneen aineksen määrän kasvua vesistössä sekä vesistön pohjan morfometrian muutosta hienoaineksen kasautuessa. Vesistön eutrofituminen on siis seurausta pohjimmiltaan kahdesta asiasta, kasvavasta typpi- ja fosforikuormituksesta sekä kiintoaineskuormituksesta. Rehevöityminen esimerkiksi muuttaa vesistön ekosysteemiä yksipuolisemmaksi ja aiheuttaa virkistyskäyttöä haittaavaa vesistön umpeenkasvua (Pretty ym. 2003). Kustannukset yhteiskunnille ovat taloudellisesti huomattavia.

Vesiensuojelualtaat ovat keino, jolla rehevöitymistä pyritään estämään. Ajatus on, että veden virtauksen hidastumisen seurauksena kiintoaines ja siihen sitoutuneet ravinteet laskeutuvat vesialtaan pohjalle. Yleisesti käytössä on kahden altaan kokonaisuus, jossa yläjuoksun puoleinen syvämpi laskeutusallas edistää etenkin sedimentaatiota, ja alajuoksun puoleinen matalampi kosteikkoallas sisältää ravinteita sitovaa kasvillisuutta. Etenkin kosteikkoaltaita käytetään vesiensuojelussa myös yksittäin. Hjulströmin (1935) mukaisesti kiintoaineksen raekoko ja virtausnopeus vaikuttavat siihen, miten suspensiossa kulkeutuva aines sedimentoituu altaan pohjalle. Virtauskentät altaissa vaihtelevat ajallisesti ja muotoutuvat altaan geometrian mukaan. Virtaus voi tarpeeksi kasvaessaan aiheuttaa jo varastoituneen kiintoaineen uudelleensuspensiota altaissa (esim. Kadlec & Wallace 2009). Altaissa myös syntyy ravinteita sisältävää kiintoainesta, kun ravinteita sitonut kasvillisuus hajoaa. Ravinnekuormasta osa tulee vesiensuojelurakenteisiin veteen liuenneena. Kasvukaudella altaiden kasvillisuus voi sitoa liukoisia ravinteita (esim. Kadlec & Wallace 2009). On myös mahdollista, että liuennutta ravinnekuormaa vapautuu kosteikkoaltaasta enemmän kuin altaaseen tulee (esim. Koskiaho ym. 2003). Rakennettujen kosteikkojen tosiasiallista toimintaa on siis tärkeää tarkastella ja pyrkiä löytämään syyt siihen, miksi ne toimivat tai eivät toimi.

Vesiensuojelualtaat pyritään suunnittelemaan niin, että niistä lähtevä vesi sisältää vähemmän kiintoainesta ja ravinteita kuin niihin virtaava. Tulvatilanteissakin aineskulkeuman tulisi jäädä altaisiin. Ravinnekulkeuman pidättymiseen vaikuttavia tekijöitä on tutkimusten mukaan monia, ja ne vaihtelevat myös kulkeuman olomuodon mukaan. Osa tekijöistä liittyy altaiden geometriaan: topografiaan, muotoon ja kokoon. Toiminnalle tärkeänä pidetään esimerkiksi kosteikon vesitilavuuden suurta vaihtelua suhteessa vedenpinnan korkeusvaihteluun sekä vaihtelevaa vesisyvyyttä kosteikon eri osissa (Puustinen ym. 2007: 23, 32). Myös kosteikon pituuden ja leveyden suhdetta käytetään suureena kosteikon toiminnan tarkastelussa (Braskerud 2002; Puustinen ym. 2007). Kokonaisfosforikuorman pidättämiseen vaikuttavaksi tekijäksi on aikaisemmassa tutkimuksessa havaittu kosteikon pinta-alan suhde sen valuma-alueen pinta-alaan (Uusi-Kämpä ym. 2000).

Ravinnepidätyskyvyn yhtenä selittävänä tekijänä pidetään veden pitkää viipymää kosteikossa (ks. Koskiaho 2003; Koskiaho ym. 2003; Kadlec & Wallace 2009; Puustinen ym. 2007). Koskiaho ym. (2003) selittävät havaitsemaansa liukoisen fosforin määrän kasvua kosteikon alajuoksun puolella muun muassa lyhyellä veden viipymällä. Veden viipyessä kosteikkoaltaassa pidempään on kosteikon kasvillisuudella parempi mahdollisuus ottaa liuennut ravinne käyttöönsä. Veden viipymään vaikuttavat esimerkiksi virtauskentät, jotka muotoutuvat pinnanmuotojen mukaan (esim. Koskiaho 2003). Kiintoaineskuorman pidättäminen edellyttää tarpeeksi hitaita virtausnopeuksia, mikä voi olla haaste etenkin hienoaineen kuten saven varastoitumisen kannalta. Suurimmissakaan tulvatilanteissa virtauskentät eivät saisi muuttua sellaisiksi, että altaisiin sedimentoitunut aines joutuu uudestaan suspensioon.

Suomessa kosteikkojen tilavuutta ei tiettävästi ole aikaisemmin kartoitettu yhtä tarkkoilla menetelmillä kuin mitä tässä pro gradu -tutkielmassa on tehty. Aikaisemmissa vesiensuojelukosteikkojen tutkimuksissa ei usein joko lainkaan mainita altaiden topografiatietojen alkuperää (esim. Koskiaho 2003) tai mittausten alueellisesta kattavuudesta ei ole mitään mainintaa (esim. Holland ym. 2004). Lisäksi altaiden vesitilavuutta on laskettu huomioimatta juurikaan syvyyden vaihtelua. Esimerkiksi Puustinen ym. (2007: 34) määrittelee kosteikon tilavuuden yksinkertaisesti sen pinta-alan ja keskisyvyyden perusteella, jolloin pohjan topografian vaihtelut eivät tule mallinnettua kuten tässä tutkielmassa. Myös Braskerud (2002) käyttää tutkimiansa kosteikkojen koon suureina ainoastaan pinta-alaa ja altaan syvyyden vaihteluväliä.

Aiempaa tarkemman kosteikkojen geometrian eli tilavuuden ja muodon mallintamisella sekä yksityiskohdaisella tulo- ja lähtövirtaamatiedolla pyritään löytämään erityisesti kiintoaineen varastoitumiseen mahdollisesti vaikuttavia tekijöitä. Selittävien tekijöiden löytäminen auttaisi suunnittelemaan geometrialtaan sellaisia kosteikkoja, jotka parhaiten pidättävät ravinteita. Tutkimuksen vesiensuojelurakenteet sijaitsevat Säkylän Pyhäjärven valuma-alueella, ja ne kumpikin koostuvat yläjuoksun puolella sijaitsevasta laskeutusaltaasta ja alajuoksun puolella sijaitsevasta kosteikosta, johon vesi virtaa laskeutusaltaasta lyhyttä uomaa pitkin.

Tutkielman tavoitteena on lisätä ymmärrystä siitä, miten kosteikkoaltaiden geometria ja virtausolosuhteet vaikuttavat altaiden kykyyn pidättää kiintoainekuormaa. Tutkielman lähtökohta on fluviaaligeomorfologian sekä vesiensuojelualtaiden tutkimuksen teoriassa ja menetelmissä. Tutkielman etuna aikaisempaan tutkimukseen verrattuna on kosteikkojen topografian tarkka, mittauksiin perustuva mallintaminen. Tutkimuksessa tarkastellaan kahden Säkylän Pyhäjärven valuma-alueella sijaitsevan kosteikkokokonaisuuden kiintoainekuormaa, geometriaa ja virtausoloja. Tavoitteeseen pyritään seuraavien tutkimuskysymysten avulla:

1. Miten aineskulkeuma pidättyy altaissa ja miten virtaaman muutos vaikuttaa pidättymiseen?
2. Ovatko altaiden geometriat niiden toimintaa edistäviä?
 - a. Millainen topografia altailla on?
 - b. Minkälainen altaiden vesipinta-ala on suhteessa valuma-alueeseen ja miten se vaihtelee vedenpinnan nousun seurauksena?
 - c. Kuinka paljon altaissa on vesikasvillisuutta?
3. Ovatko altaiden virtausolosuhteet niiden toimintaa edistäviä?
 - a. Mahdollistavatko syvyyskeskiarvotetut virtauskentät suspensiokulkeuman varastoitumisen altaisiin?
 - b. Voivatko pohjanläheiset virtaukset tulvatilanteissa aiheuttaa uudelleensuspensiota?
 - c. Minkälaiset veden viipymät altaissa on?

2. Aineskuljetus, rehevöityminen ja vesiensuojelualtaat

2.1 Veden virtaus ja aineskuljetus

Maa-aineksen siirtyminen veden kuljetettavaksi alkaa rapautumisesta. Rapautuminen tarkoittaa kiviaineksen hajoamista (Mayhew 2009) eikä ilman rapautumista olisi maaperää, jossa kasvit voisivat kasvaa (esim. Smith 2017: 347). Myös eroosio ja sedimentaatio ovat seurausta rapautumisesta. Rapautumisprosessit jaetaan usein kemiallisiin, mekaanisiin ja biologisiin, mutta biologinen voidaan myös luokitella kahden muun yhteyteen (Smith 2017). Vesi on usein tärkein rapautumisen aiheuttaja ja rapautuneen aineksen poistaja (Smith 2017: 350). Kemiallinen rapautuminen jaetaan hydrolyysiin, karbonoitumiseen, liukenemiseen, hapetus-pelkistysreaktioon ja eliöiden aiheuttamaan kemialliseen rapautumiseen (Smith 2017: 350–354). Vesi on toisinaan lievästi hapanta, koska sadevesi reagoi ilmakehän hiilidioksidin (CO₂) kanssa. Hydrolyysissä alumiinisilikaatit, kuten maasälpä, hajoavat lievästi happaman veden vaikutuksesta savimineraaleiksi ja liukoisiksi oksideiksi. Karbonoitumisenkin on heikon hiilihapon (H₂CO₃) aiheuttamaa kulumista. Liukenemista tapahtuu, koska monet luonnolliset mineraalit ovat helposti veteen liukenevia. Liukenemisen voimakkuus riippuu muun muassa veden pH:sta (Smith 2017: 353). Eliöt aiheuttavat kemiallista rapautumista tuottamalla hengittäessään CO₂:a ja jotkin bakteerit happea.

Mekaaninen rapautuminen tarkoittaa aineksen hajoamista ulkoisen jännitteen tai vapautuvan sisäisen jännitteen seurauksena ilman kemiallisia reaktioita (Smith 2017: 356–363). Kaltevilla pinnoilla materiaali voi tällöin irrota suoraan romahtamalla painovoiman vaikutuksesta. Halkeamien syntyminen myös luo reittejä kosteudelle ja eliöille ja mahdollistaa näin kemiallista rapautumista. Halkeamia syntyy kiviaineksen tai siihen tunkeutuneiden ulkopuolisten materiaalien laajetessa ja supistuessa. Lämpötilan nopeat ja voimakkaat vaihtelut, kuten metsäpalot, voivat aiheuttaa kiven halkeilua (Smith 2017: 358). Myös voimakkuudeltaan pieni, mutta toistuva lämpötilavaihtelu saa ajan mittaan kiven halkeilemaan. Kiven halkeamiin päässeen veden jäätyminen edistää rapautumista, kun vesi laajenee jäätyessään (Smith 2017: 358). Lämpötilan vaihtelu saa myös veden mukana kiven halkeamiin päässeet suolakiteet edistämään kiven murtumista, koska suolakiteet laajenevat eri tahtiin kiviaineksen kanssa lämpötilan noustessa (Smith 2017: 359).

Rapautunut kiviaines siirtyy aikanaan muualle eroosion seurauksena. Eroosio tarkoittaa maanpinnan poistumista sijoiltaan tuulen, veden, jään tai painovoiman vaikutuksesta (Mayhew 2009). Rapautuminen ja eroosio siis tuottavat virtaavan veden aineskuljetukseen (Kirkby 2017: 377–378). Virtaavan veden kuljetuksessa olevaa ja sen seurauksena kasautunutta kiintoainesta kutsutaan sedimentiksi (Mayhew 2009; Taylor 2017). Eroosiolla viitataan yleisesti sekä maa-aineen poistamiseen joltain alueelta että aineksen kuljettamiseen (Mayhew 2009). Virtavesien yhteydessä eroosio ja kuljetus yleensä erotetaan toisistaan (esim. Hjulström 1935, Knighton 1984; Taylor 2017) ja prosesseja tarkastellaan osittain erillisinä. Sedimentin kasautumista kutsutaan sedimentaatioksi (Taylor 2017).

Vesi on ylivoimaisesti yleisin sedimentin kuljettaja (Taylor 2017: 410). Vesi virtaa joko painovoiman vaikutuksesta tai tuulen ja vuorovesien synnyttämässä virtauksissa. Uomissa ja kosteikoissa kyse on lähinnä painovoimaan perustuvasta virtauksesta, mutta pienellä virtaamalla voi tuuli aiheuttaa pintavirtausta yläjuoksua kohti. Tässä luvussa puhutaan virtauksen teoriasta uomissa, mutta siihen tulee lukea mukaan myös kosteikkoaltaat, jotka ovat osa uomaverkkoa. Pienessä uomassa pätevät virtauksen lainalaisuudet pätevät myös uoman muuttuessa altaaksi. Avoimessa uomassa virtaavaan veteen vaikuttavat sekä painovoima että kitka, joka vastustaa liikettä pohjaa pitkin (Gilvear & Jefferies 2017: 499–500; Knighton 1984: 47–49). Jyrkkä uoman kaltevuus ja alhainen kitka lisäävät virtausnopeutta. Virtaavan veden määrää uoman poikkileikkauksessa kuvataan virtaamalla Q (l/s tai m³/s), joka on uoman poikkileikkaus A kerrottuna

virtauksen keskinopeudella (Knighton 1984: 44). Tutkielman kosteikkojen virtaus kuuluu avoimen uoman virtaukseen, jota voidaan luokitella eri kriteerien mukaan (taulukko 1).

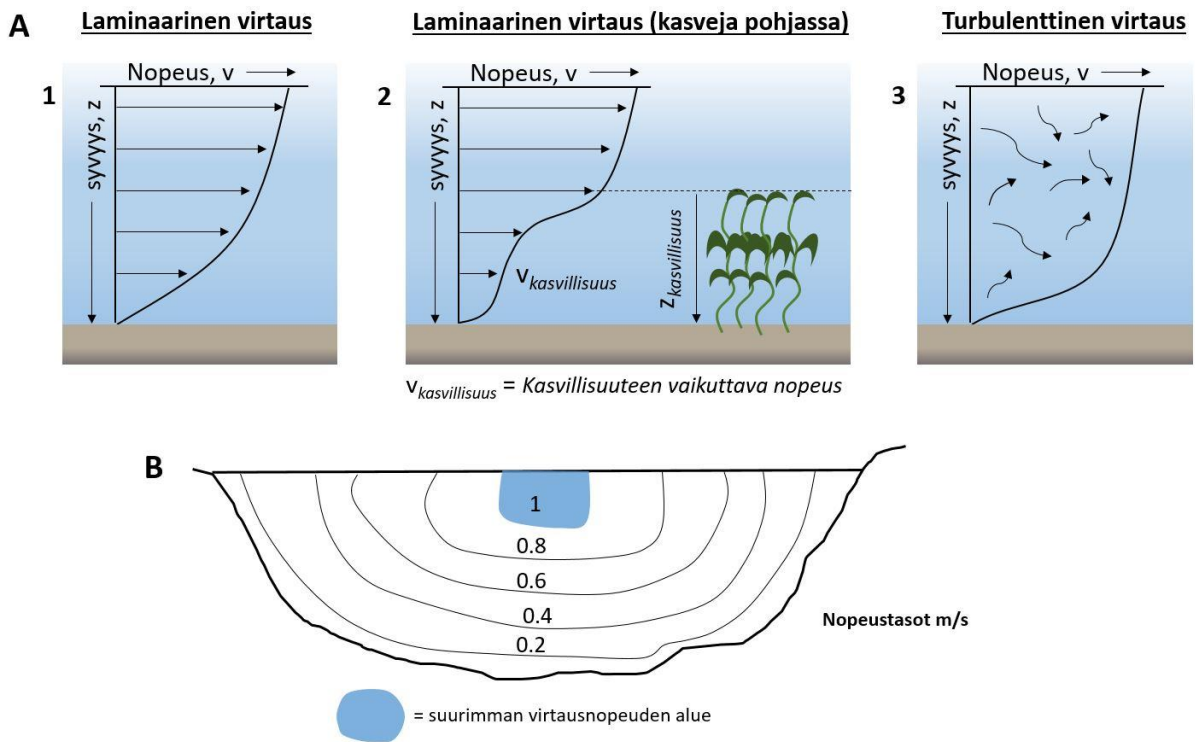
Taulukko 1. Virtausta määritellään nopeuden alueellisen ja ajallisen vaihtelun mukaan sekä matemaattisilla perusteilla.

Virtaustyyppi	Kriteerit
Tasainen/epätasainen	<i>Nopeus on vakio/vaihtelee sijainnin mukaan</i>
Vakaa/epävakaa	<i>Nopeus on vakio/vaihtelee ajallisesti</i>
Laminaarinen/turbulenttinen	<i>Reynoldsin numero $Re < 500/Re > 2000$ (yhdistelmä $500 < Re < 2000$)</i>
Verkasvirtaus/kiitovirtaus	<i>Frouden luku ($F = v/Vgd$) $> 1 / F < 1$ (kriittinen virtaus kun $F = 1$)</i>

Lähde: Knighton (1984: 48); Taylor (2017: 410)

Luonnollisten uomien virtaus ei koskaan ole tasaista eikä vakaata (Knighton 1984: 48). Aineskuljetuksen kannalta erottelu laminaarisen ja turbulenttisen virtauksen välillä on tärkeä. Laminaarisessa virtauksessa vesimolekyylit liikkuvat kaikilla syvyyksillä samaan suuntaan, minkä seurauksena vesipatsaassa ei tapahdu juurikaan sekoittumista toisin kuin turbulenttisessä virtauksessa (kuva 1A) (Knighton 1984: 48; Taylor 2017: 410). Turbulenttisessä virtauksessa virtaussuuntia on monia, vaikka liike tapahtuu yhteen lopulliseen suuntaan pyörteisenä (Knighton 1984: 48). Turbulenttisen virtauksen aiheuttama pohjaan kohdistuva kulutus on suurempaa, koska pyörteisyys nostaa veden viskositeettia. Turbulenttisyys laskee avoimen uoman poikkileikkauksen keskimääräistä virtausnopeutta (Gilvear & Jefferies 2017: 499–500). Luonnossa yleisempää on turbulenttinen virtaus, eikä laminaarista virtausta tapahdu kuin hyvin alhaisilla virtausnopeuksilla matalissa vesissä (Knighton 1984: 48).

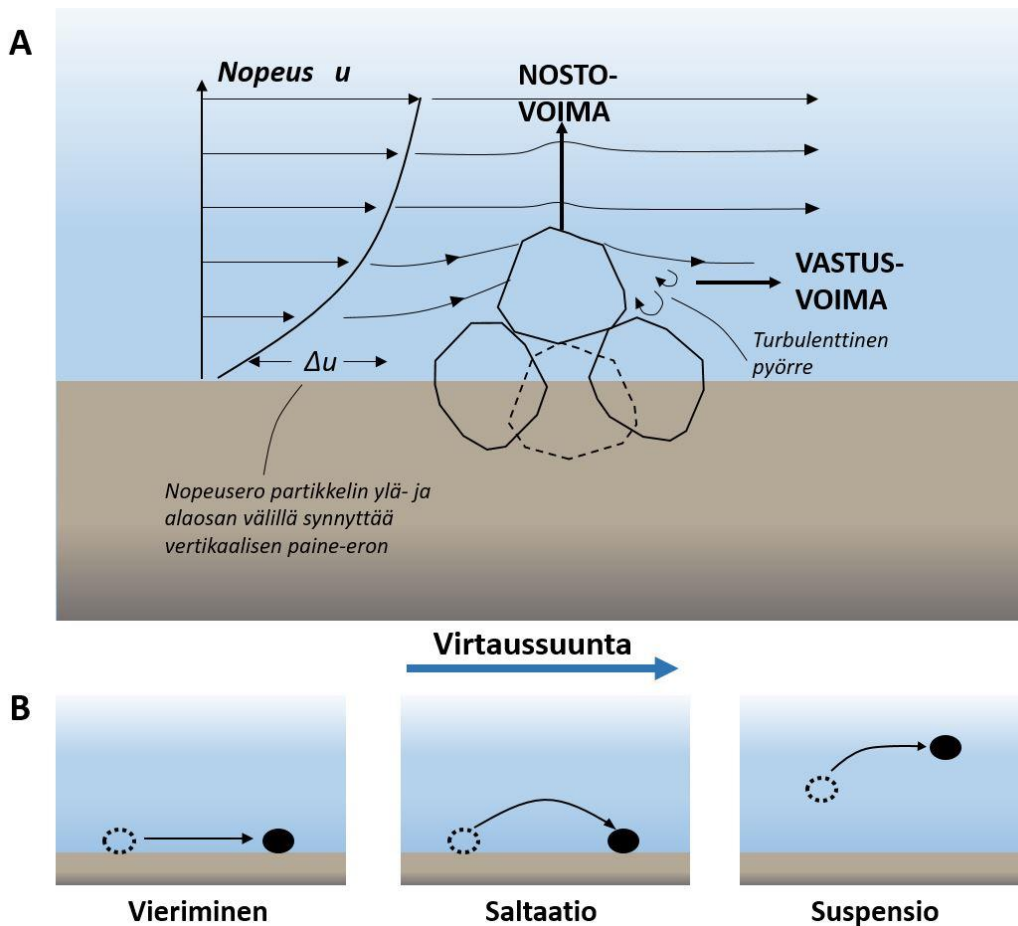
Knightonin (1984) mukaan nopeus (suunta ja voimakkuus) on yksi vaihtelevimmista virtauksen ominaisuuksista, koska se on riippuvainen monista virtausta luonnehtivista tekijöistä. Veden virtausnopeus vaihtelee koko uomaverkossa. Yksi merkittävä muuttuja on etäisyys uoman pohjasta sekä syvyyssuunnassa että uoman reunojen suhteen (Knighton 1984: 50) (kuva 1). Nopeus on suurempi etäämmällä uoman pohjan pinnasta, jolloin kitkan vaikutus on vähäisempi. Pohjan karkeus määrittää nopeusprofiilin jyrkkyyden: karkeampi pohja hidastaa pohjanläheistä virtausta voimakkaammin. Karkeuteen vaikuttaa muun muassa pohjan muoto sekä materiaali (Chow 1959). Kasvillisuus hidastaa virtausta virtaussyvyydellä, jolle kasvillisuuden korkeus ylettää, jolloin virtaus voi hidastua voimakkaastikin syvyyden mukaan (esim. Wu & He 2009: 248). Kasvillisuuden vaikutus virtaukseen lienee huomattava etenkin voimakkaasti kasvittuneissa uomissa tai altaissa. Turbulenttisessä virtauksessa nopeus on tasaisemmin jakautunut syvyyden mukaan, koska veden sekoittuminen hidastaa pinnan nopeinta virtausta ja kiihdyttää hitaampaa virtausta lähellä pohjaa (Knighton 1984: 48).



Kuva 1. Virtausnopeuden vaihtelu uomassa **A** Syvyyden mukaan laminaarisella virtauksella (1), laminaarisella virtauksella, jos pohjassa olisi joustamatonta kasvillisuutta (2) ja turbulenttisellä virtauksella (3) ja **B** Uoman poikkileikkauksessa suorassa uomassa. Kasvillisuus voi hidastaa pohjanläheistä virtaus merkittävästi, jolloin eroosiota tapahtuu vaikeammin. Mukailten Knighton (1984), Gilvear & Jefferies (2017) ja Wu & He (2009).

Virtaava vesi kuljettaa sedimenttiä monin tavoin ja virtaustapa sekä -nopeus vaikuttavat aineskuljetukseen. Partikkelin liikkeellelähtö edellyttää, että liikuttavat voimat ovat suurempi kuin vastustavat voimat (Gilvear & Jefferies 2017: 501). Pohjamateriaalin partikkelit lähtevät liikkeelle, koska virtausnopeus vaihtelee syvyyden mukaan (Knighton 1984: 58–59) (kuva). Partikkelin eri syvyydellä oleviin osiin kohdistuu toisistaan poikkeavia nopeuksia, mikä synnyttää partikkelin pohjasta irrottavaa nostovoimaa. Turbulenttisessä virtauksessa voi esiintyä myös pohjasta ylöspäin suuntautuvia pyörteitä. Liikkeelle lähdettyään suuremmat partikkelit etenevät tasaisemmin ja nopeammin kuin pienemmät (Rubey 1933, cit. Hjulström 1935: 300).

Törmien eroosio on pohjan kulumista monimutkaisempi prosessi (Knighton 1984: 60–63). Törmät ovat usein muodostuneet vaihtelevammasta materiaalista ja monesti kasvillisuus suojaa törmää kulumiselta. Veden aiheuttaman kulutuksen lisäksi törmää kuluttaa myös maan romahtaminen ja jäätyminen. Romahdamista tapahtuu maa-aineksen vettyessä, valuessa tai putkittuessa. Etenkin kohesiiviset maalajit kuten savi ovat herkkiä valumiselle. Jäätyminen usein leventää olemassa olevia halkeamia ja helpottaa muiden eroosiomekanismien tapahtumista. Eroosiotavat toimivat usein yhteistyössä. Lähdettyään liikkeelle kiinteät partikkelit liikkuvat kolmella tapaa: vierien, saltaatiossa tai suspensiossa (kuva 2) (Taylor 2017: 410). Vierimässään partikkelit liukuvat pohjaa pitkin virtauksen työntäminä. Saltaatiossa aines etenee hyppäyksittäin kosketuksissa pohjan pintaan, mahdollisesti nosto- ja vastusvoimien vaikutuksesta (Knighton 1984: 60). Suspensiossa partikkelit nousevat irti pohjasta ja liikkuvat ikään kuin leijuen vesipatsaan mukana. Suspensiota aiheuttaa ja ylläpitää turbulenttinen veden virtaus (Taylor 2017: 410). Vierimällä ja saltaatiossa liikkuvaa sedimenttiä kutsutaan pohjakulkeumaksi ja suspensiossa kulkevaa suspensiokulkeumaksi. Kulkeumamuotojen välillä tapahtuu myös partikkelien vaihtumista (Knighton 1984: 64). Kolmas aineskuljetuksen muoto on liuenneen aineksen kulkeuma.

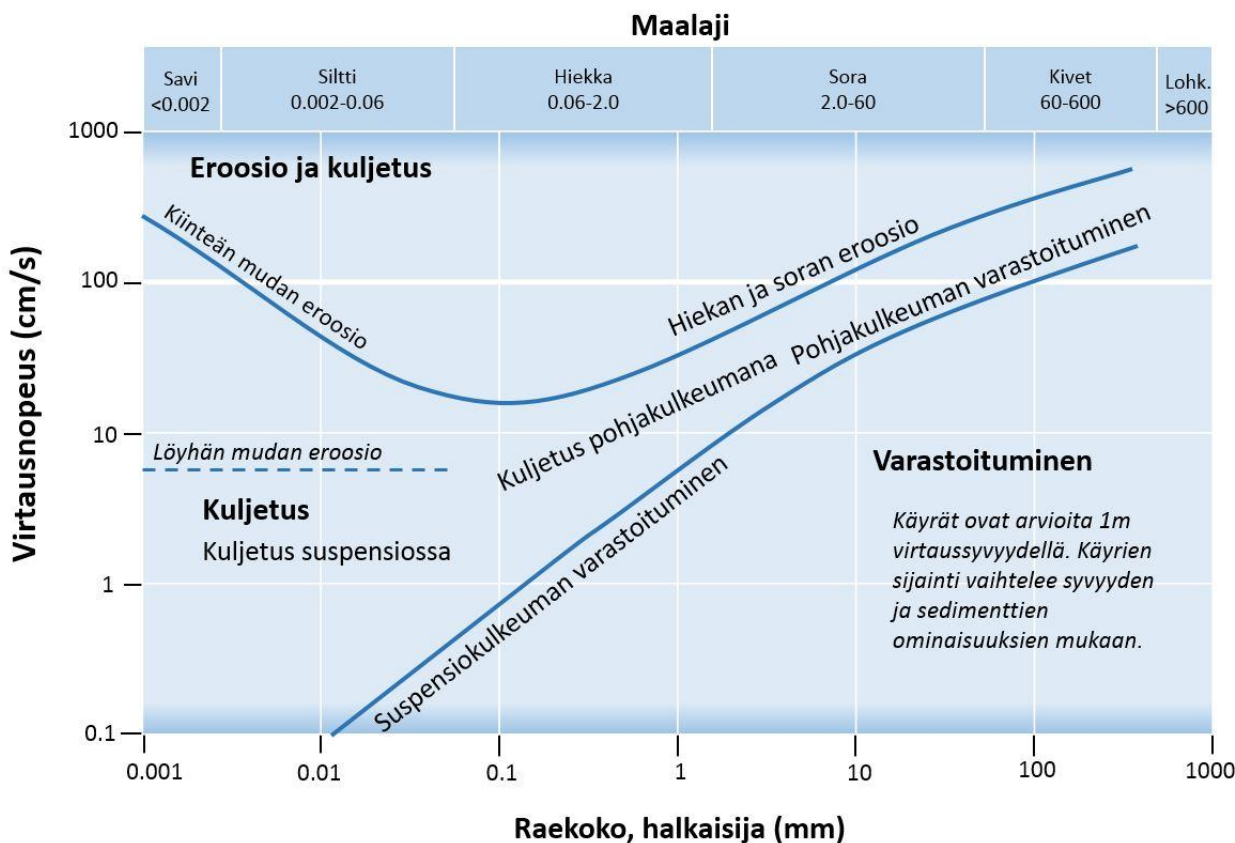


Kuva 2. A) Nostovoiman ja vastusvoiman aiheuttama pohjapartikkelin siirtyminen kuljetukseen. Partikkeli irtoaa pohjasta, koska sen yläosaan ja alaosaan kohdistuvat erisuuret virtausnopeudet synnyttävät vertikaalisen paine-eron. Mukailten Knighton (1984). B) Kiinteiden partikkelien kulkeutuminen vedessä. Virtausnopeus ja partikkelin koko vaikuttavat siihen, millä tavalla kuljetukseen lähtenyt partikkeli liikkuu. Tayloria (2017) mukailten.

Suspensiokulkeuma liikkuu noin veden virtausnopeudella ja laskeutuu vasta nopeuden selvästi laskiessa (Knighton 1984: 67). Suspensiokuorman määrä ei niinkään ole riippuvainen uoman kyvystä kuljettaa materiaalia vaan enemmänkin materiaalin saatavuudesta (Gilvear & Jefferies 2017; Knighton 1984). Eryityisesti hienosedimentin, saven ja siltin, kulkeuma on usein saatavuuden rajoittamaa, koska ne päätyvät uomiin vain sadetapahtumien aikana ja korkealla virtaamalla. Suspensiokulkeuma on tyypillisesti peräisin maaperän ja uoman törmien eroosiosta (Gilvear & Jefferies 2017: 500–501). Pohjakulkeuma on törmäeroosion lisäksi lähtöisin pohjan kulumisesta ja rinteiden romahtamisesta. Sekä suspensio- että pohjakulkeuma tapahtuvat pulsseittain.

Hjulströmin (1935) diagrammin mukaisesti aineksen raekoko ja veden virtausnopeus määrittävät virtaavan veden aineskuljetusta (kuva 3). Kuvaaja on suuntaa antava, ja todellisuudessa käyrissä esiintyy vaihtelua. Pienillä virtausnopeuksilla vain pienimmät sedimenttipartikkelit (savi) kulkee suspensiossa, kun suuremmilla virtausnopeuksilla isommatkin partikkelit voivat siirtyä suspensiokulkeumana (Taylor 2017: 410). Hyvin harvoin hiekkaa suuremmat rakeet kulkevat suspensiossa. Hjulströmin (1935) diagrammissa raekoon ja virtausnopeuden yhteys ei myöskään ole täysin suoraviivainen aineskuljetuksen suhteen. Suuren raekoon partikkelit, kuten lohkareet, vaativat erodoituakseen ja kulkeutuakseen suurempaa virtausnopeutta kuin esimerkiksi sora. Tarpeeksi pienet partikkelit, kuten savi ja hieno siltti, sen sijaan eivät siirry kuljetukseen yhtä helposti kuin hiekka. Suuri osa suspensiokuormasta on kuitenkin peräisin törmiltä, joilta

hienoa sedimenttiä romahtaa uomaan (Knighton 1984: 67). Savipartikkelit muodostavat yhtenäisiä paakkuja, joiden hajoaminen edellyttää suurempia virtausnopeuksia (Taylor 2017: 411). Varastoitunut savi ei siis kovin helposti lähde liikkeelle. Kerran siirryttyään aineskuljetukseen savi kuitenkin pysyy suspensiossa helposti eikä varastoidu uoman tai altaan pohjalle kuin vasta käytännössä olemattomilla virtausnopeuksilla. Hiekka sen sijaan alkaa varastoitua jo ennen kuin virtausnopeus pysähtyy, samoin kuin hiekkaa isommat partikkelit.



Kuva 3. Virtausnopeuden ja raekoon vaikutus aineskuljetukseen. Mukailten Press & Siever (1986, cit. Taylor 2017: 411), alkuperäinen kuva Hjulström (1935: 298).

Huomionarvoista Hjulströmin (1935) diagrammissa on, ettei siinä näy varastoitusnopeutta hienolle siltille ja savelle. Hjulström (1935: 299) viittaa Forbesiin (1857), joka määritteli tiilisavea koskevassa tutkimuksessaan mudan laskeutumisenopeudeksi 0,566 jalkaa/ minuutti (0,288 cm/s), hienoimman aineksen laskeutuessa huomattavasti hitaammin. Täsmällistä arvoa hienoaineksen varastoitusnopeudelle on kenttäoloissa vaikea, ellei mahdoton määrittää. Puustinen ym. (2007: 54) esittelevät joillekin pienille partikkeli-koille ominaisia laskeutumisenopeuksia (taulukko 2). Partikkelin laskeutuminen vedessä johtuu pohjimmiltaan hiukkasen ja veden tiheyserosta (esim. Kadlec & Wallace 2009). Laminaarisella virtauksella hiukkasen laskeutumisenopeus voidaan Stokesin lain perusteella laskea kaavasta

$$w = \frac{gd^2}{18\mu} (\rho_h - \rho),$$

missä d = partikkelin halkaisija (m), g = putoamiskiikkyvyys (m/s^2), w = laskeutumisenopeus (m/s), ρ = veden tiheys (kg/m^3), ρ_h = hiukkasen tiheys (kg/m^3) ja μ = veden viskositeetti ($kg/(m*s)$) (=0,001 μ senttipoiseina) (esim. Kadlec & Wallace 2009: 207).

Taulukko 2. Maahiukkasten teoreettinen laskeutumisnopeus ja laskeutumis aika raekoon mukaan. Mukailten Puustinen ym. (2007: 54).

Maalaji ja lajitteen koko	Laskeutumisominaisuus				
	Halkaisija (mm)	Nopeus (mm/s)	Nopeus (cm/s)	Laskeutumis aika 1 m kohden	Laskeutumis aika 1 m kohden (d)
Hiekka (0.2–2 mm)	0.6	85	8.5	11 s	0.00013
	0.2	25	2.5	40 s	0.00046
Hieta (0.02–0.2 mm)	0.06	3	0.3	5 min	0.0035
	0.02	0.28	0.028	60 min	0.042
Hiesu (0.002–0.02 mm)	0.006	0.065	0.0065	4 h	0.167
	0.002	0.0062	0.00062	45 h	1.875
Savi (< 0.002 mm)	0.0015	0.0035	0.00035	3 d	3
	0.0001	0.000015	0.0000015	750 d	750

Savipartikkelien kohdalla tulee ottaa huomioon yksittäisten partikkelin flokkuloituminen eli liittyminen suuremmiksi paakuiksi eli flokeiksi, jolloin varastoitumista tapahtuu suuremmilla virtausnopeuksilla (Teisson ym. 1993). Myös flokkien muoto vaikuttaa huomattavasti laskeutumisnopeuteen (Li & Ganczarczyk 1987), joten aina pätevän ja eksaktin nopeuden määrittäminen on hyvin monimutkaista. Teoriassa aines voi laskeutua, jos veden virtausnopeus on hiljaisempi kuin partikkelin laskeutumisnopeus, sillä tällöin aineksen nettoliike on laskeutuminen. Toisaalta suuri suspentoituneen saven pitoisuus itsessään voi hidastaa partikkelien varastoitumista (Teisson ym. 1993). Partheniadesin (1965) mukaan suspentoitunut savi alkaa varastoitua heti, kun suspensiossa pysymiseksi vaadittu kriittinen virtausnopeus alittuu. Myös kuaajan eroosionopeudet ovat vaihtelevia, sillä niihin vaikuttaa muun muassa maa-aineksen kemiallinen yhtenäisyys (Hjulström 1935: 295). Hjulströmin alkuperäisessä diagrammissa (1935) eroosiokäyrä onkin tarkoituksella paksumpi kuin sedimentoitumisen käyrä.

Lisäksi Hjulströmin klassinen diagrammi kuvaa raekooltaan yhtenäisen aineksen kulkeutumista, jota eri partikkelikokojen sekoittuminen muuttaa. Osittain sekoittuneen maa-aineksen eri partikkelit erodoituvat, kulkeutuvat ja varastoituvat omilla tavoillaan suhteessa virtaukseen. Toisaalta hienompi aines voi edistää karkeamman aineksen erodoitumista täyttämällä suurempien partikkelien välisiä koloja ja nostaa suurempi rakeita alttiiksi virtaukselle (Gilbert 1914, cit. Hjulström 1935: 300). Sekoittuneen aineksen eroosioon tarvitaan yleisesti ottaen suurinta virtausnopeutta, jonka aineksen partikkelikoot vaativat (Hjulström 1935: 300). Mitchenerin & Torfsin (1996) mukaan mudan sekoittuminen hiekkasedimenttiin saa hiekan käyttäytymään kohesiivisen mudan tavoin ja vastustamaan eroosiota.

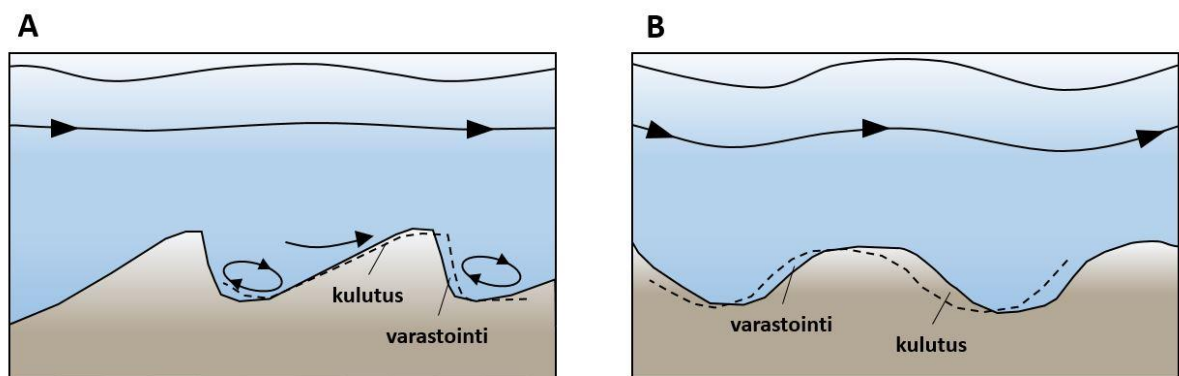
Vesi kuljettaa ainesta myös liuenneena. Veteen liunneet aineet ovat peräisin sekä kiven ja maaperän luonnollisesta kemiallisesta kulumisesta, että ihmistoiminnasta kuten maanviljelystä (Knighton 1984: 64–67). Suurin osa liunneen aineen kuormasta siirtyy virtavesiin pinnanalaisena valuntana, jossa vesi ja mahdollisesti liukenevat aineet ehtivät olla pidempään kosketuksissa (Knighton 1984:64–67). Liunneen kulkeuman määrä ei ole juurikaan riippuvainen virtauksen määrästä, ja sen vaikutus uoman tai altaan muuttamiseen on vähäinen.

Aineksen eroosio ja kasautuminen muuttavat uomaa vertikaalisesti ja horisontaalisesti. Jos nettoeroosio ja nettosedimentaatio ovat yhtä suuret, uoman korkeus ei juurikaan muutu (Gilvear & Jefferies 2017:

501). Horisontaalista hidasta muutosta voi tapahtua, vaikei vertikaalista muutosta olisikaan. Eroosion ollessa sedimentaatiota suurempaa uoman pohja laskee, ja törmät usein ennemmin tai myöhemmin romahtavat. Jos taas sedimentaatio on eroosiota suurempaa, uoma madaltuu ja ainesta varastoituu uoman reunoille. Tällainen kasautuminen voi myös johtaa eroosion lisääntymiseen, virtausnopeuden kasvaessa mikä kuvastaa hyvin virtavesiympäristöjen dynaamista luonnetta. Vesiensuojelukosteikkojen tulisi olla nettosedimentaation alueita, joten onkin mielenkiintoista kysyä, aiheuttaako sedimentaatio niissä ennen pitkää myös eroosiota.

Uomastoa eniten muokkaavia virtaamia pitkällä aikavälillä kutsutaan hallitseviksi virtaamiksi (engl. *dominant discharge*) (Gilvear & Jefferies 2017; Philips 2001). Hallitseva virtaama ei teorian mukaan ole suurin uoman kokema tulva, joka kuljettaa sedimenttiä hetkellisesti paljon, vaan ainesta hetkellisesti vähemmän kuljettava tulva, joka toistuu useammin. Hallitseva virtaama ei liity täyden uoman virtaukseen (engl. *bankfull flow*) (Gilvear & Jefferies 2017; Philips 2001), joka tarkoittaa uoman maksimivirtaamaa, joka ei tulvi yli törmien (Allaby 2008). Philips (2001) havaitsi tutkimallaan, Appalakeilla sijaitsevalla joella, että usein toistuvat ja selvästi alle täyden uoman virtauksen jäävät tilanteet olivat riittäviä hienosedimentin kuljetukseen. Toisaalta hiekan ja sitä suurempien raekokojen kuljetus edellytti tutkimusalueella kerran 200 vuodessa tapahtuvaa tulvimista. Vesiensuojelukosteikoissa tilanne voi olla erilainen, koska altaan tulisi hidastaa pienen tulouomansa maksimivirtaamaakin voimakkaasti.

Pienen mittakaavan alueelliset vaihtelut uoman pohjan muodoissa aiheuttavat sedimentin vähittäistä liikettä alavirtaan (Knighton 1984: 72–73). Hiekkapohjaisten uomien dyyneissä ja antidyyneissä kohdistuu tiettyihin muodostuman kohtiin jatkuvaa eroosiota ja tilapäistä kasautumista (kuva 4). Hiljaisilla virtausnopeuksilla säännöllisiä muodostumia ei kuitenkaan synny (King 1991, cit. Taylor 2017: 413–414), mikä näkyy esimerkiksi kosteikkoaltaiden pohjissa. Niiden hiljainen virtausnopeus ei kykene synnyttämään pohjaan säännöllisiä muodostumia.



Kuva 4. Pohjan kulumisen ja aineksen varastoituminen A) dyyneissä ja B) antidyyneissä. Dyynit näyttävät ikään kuin liikkuvan alajuoksua kohti, mutta antidyyneissä kulutusprosessi saa aikaan päinvastaiselta näyttävän ilmiön, vaikei aines sinänsä liikukaan nettona yläjuoksua kohti. Mukailten Knighton (1984: 72).

Virtausnopeudet ja uoman materiaali siis vaihtelevat alueellisesti ja ajallisesti. Näin ollen virtaava vesi aiheuttaa uoman kulumista toisaalla ja varastoi sedimenttiä toisaalle. Vesiensuojelukosteikkojen viitekehksessä uoman kulumista tulisi tapahtua kosteikkoaltaiden yläjuoksulla, missä erodoituneen aineksen olisi tarkoitus sedimentoitua rakennetun kosteikon altaisiin. Näin ollen uomaston muoto on jatkuvassa muutoksessa. Kasvi ym. (2013) havaitsivat meanderikaarten morfologista muutosta käsittelevässä tutki-

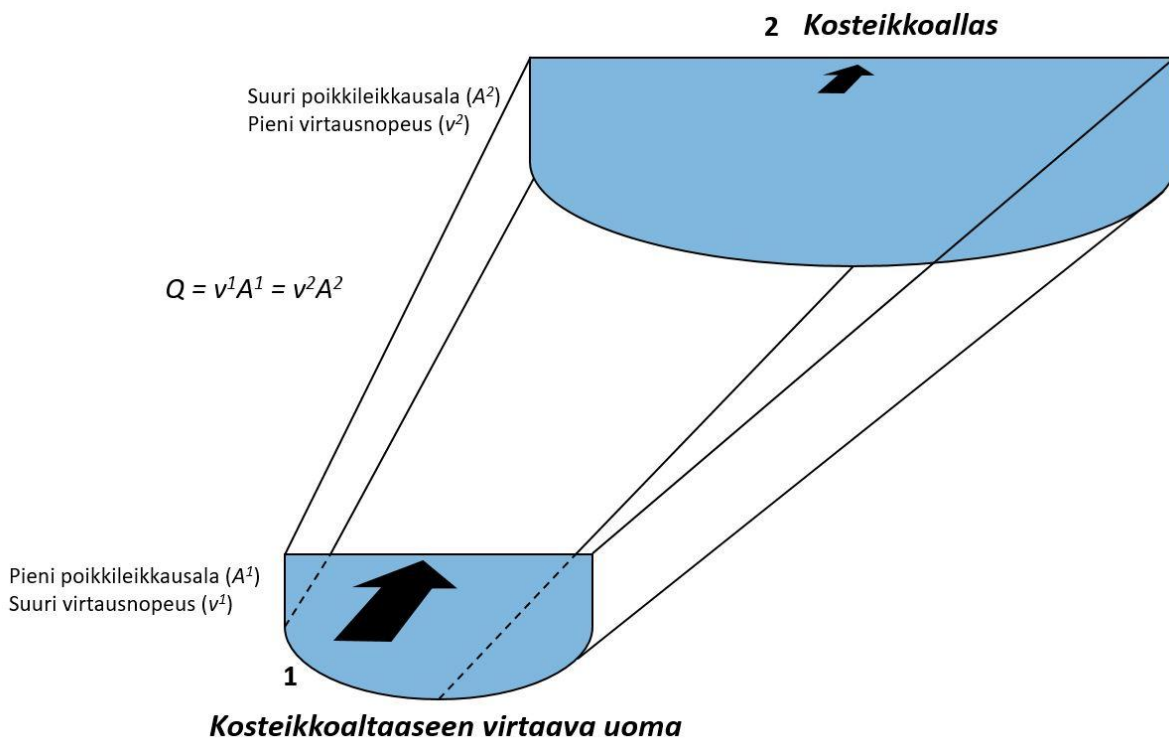
muksessaan uoman topografian ja virtausprofiilin olevan vuorovaikutteisia. Tutkimuksen löydökset viittasivat myös aiemman uomaerosion kykyyn vaikuttaa myöhempään sedimentaatioon (Kasvi ym. 2013: 588). Veden virtaus siis muokkaa uomaa, mutta uoma myös muokkaa veden virtausta.

Yksi tapa, jolla uoman geometria vaikuttaa virtaukseen, ilmenee virtauksen jatkuvuuden teoriassa (engl. *flow continuity*) (Charlton 2008: 76). Virtauksen jatkuvuus kuvastaa virtausnopeuden vaihtelua eri kokoisissa uoman poikkileikkauksissa (kuva 5). Teoria pätee tasaisen virtauksen tilanteessa (engl. *steady flow*), jolloin virtaama pysyy ajallisesti samana. Virtauksen jatkuvuutta kuvataan kaavalla:

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

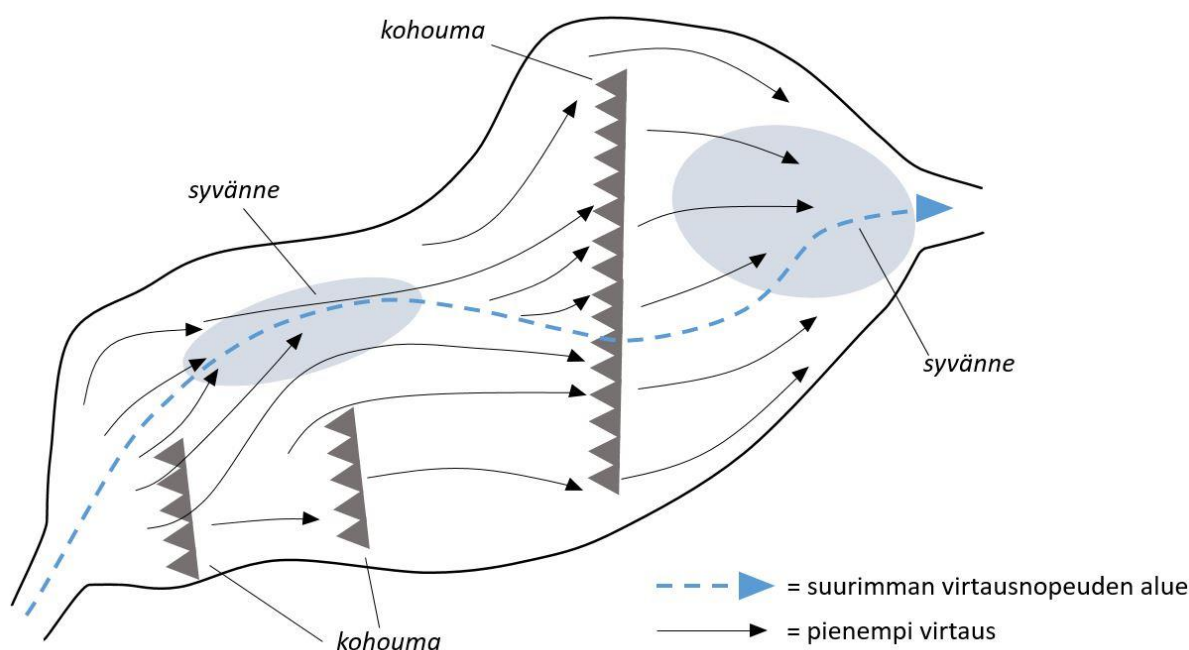
missä Q = virtaama, v^1 ja v^2 = poikkileikkausten 1 ja 2 keskiarvotetut virtausnopeudet sekä A^1 ja A^2 = poikkileikkausten 1 ja 2 pinta-alat.

Virtaama on sama molempien poikkileikkausten kohdalla, olettaen ettei uoma haaraudu poikkileikkausten välillä eikä siihen tule lisää vettä. Virtausnopeuden täytyy massan säilymislain mukaan kasvaa pienemmässä poikkileikkauksessa, koska molemmista poikkileikkauksista virtaa läpi sama määrä vettä (Charlton 2008: 76). Charltonin (2008: 76) mukaan joki tulvisi alaltaan pienemmän poikkileikkauksen yläjuoksun puolelta ja kuivuisi saman poikkileikkauksen alajuoksun puolelta, jos virtausnopeus ei muuttuisi. Pienemmässä tilassa sama vesimäärä virtaa nopeammin kuin suuremmissa tilassa, mihin vesiensuojelukosteikkojen toiminta osaltaan perustuu. Hidastuva virtaus luo edellytyksiä suspensiossa kulkevan aineksen sedimentoitumiselle ja edistää pohjaan juurtuvien vesikasvien kasvua (kuva 5).



Kuva 5. Virtauksen jatkuvuus. Samalla virtaamalla virtausnopeus on suurempi siellä, missä uoman poikkileikkauksen pinta-ala on pienempi (1). Suurempi poikkileikkausala (2) löytyy esimerkiksi uoman syventyessä ja leventyessä, tai muuttuessa kosteikkoaltaaksi. Muutos pienestä uomasta lammikkoon hidastaa virtausta voimakkaasti. Mukailen Charlton (2008: 76).

Uoman muoto ohjaa myös virtauksen suuntaa. Suurimman virtausnopeuden alue (engl. *thalweg*) liikkuu uoman muodon mukaan (Gilvear & Jefferies 2017: 500), mikä pätee myös vesialtaissa kuten vesiensuojelukosteikoissa. Suurimman virtausnopeuden linja mutkittelee tyypillisesti uoman laidasta laitaan (Ritter ym. 1995: 213) (kuva 6). Uoman reunojen lisäksi pohjan korkeusvaihtelut vaikuttavat virtauskenttään, mikä pätee myös vesiensuojelukosteikoissa (Koskiaho 2003). Syvänteet ohjaavat virtausta kohti itseään ja kohoumat levittävät virtausta laajemmalla alalle (Ritter ym. 1995: 214) (kuva). Syväntettä kohti suuntautuvaa virtausta kuvataan termillä yhtyvä virtaus (engl. *convergent flow*) ja levittäytyvästä virtauksesta puhutaan eriävänä virtauksena (engl. *divergent flow*). Yhtyvän virtauksen kohdalla päävirtaussuunta on kohti uoman keskikohtaa ja eriävän virtauksen kohdalla se suuntautuu kohti uoman reunoja. Vesiensuojelukosteikkojen altaissa ei hitaista virtausnopeuksista johtuen syntyne säännöllisiä pohjamuodostumia, mutta altaat eivät ole syvyydeltään tasaisia. Näin ollen niissä voi olettaa vaikuttavan osaltaan samat syvänteiden ja kohoumien aiheuttamat mekanismit kuin uomissakin. Virtauskenttiä ohjaa myös paikoin hyvin tiheä vesikasvillisuus, jonka läpi kulkeva virtaus on hidasta.

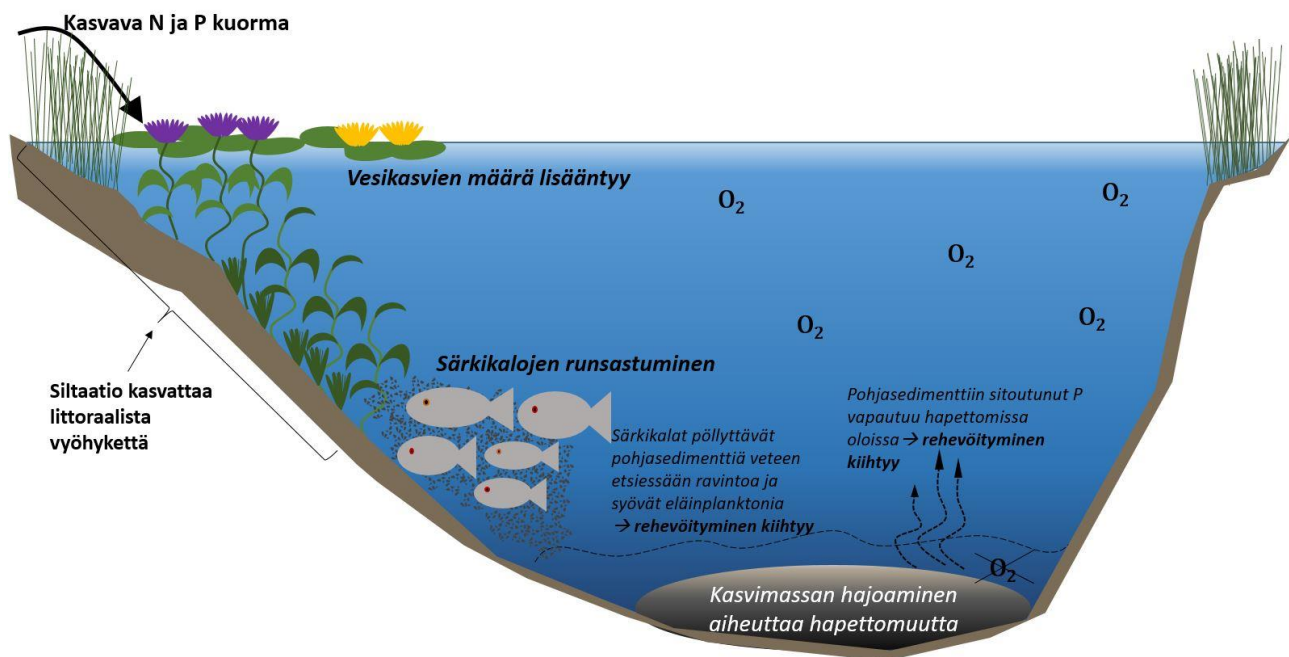


Kuva 6. Suurimman virtausnopeuden linja kosteikkoaltaissa syvänteiden ja kohoumien mukaan. Virtaus keskittyy kohti syvänteitä ja kohoumien kohdalla levittäytyy laajemmalle. Mukailten Ritter ym. (1995: 213–214).

2.2 Vesistöjen rehevöityminen ja ravinteiden kierto

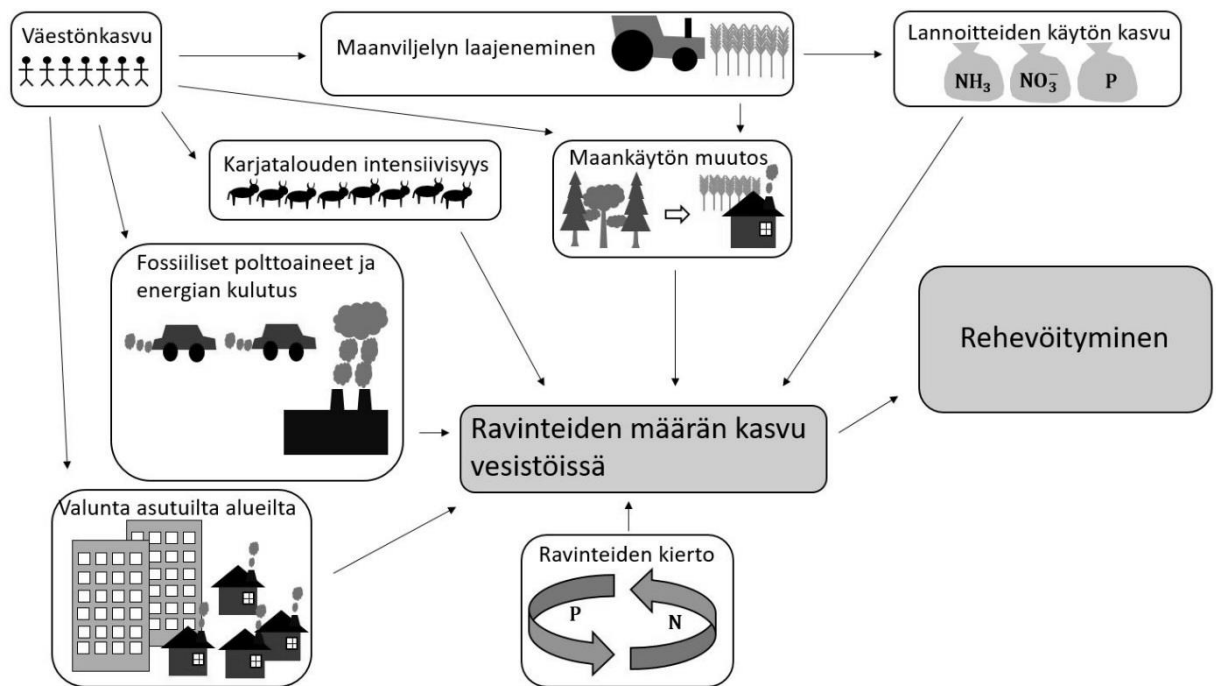
Rehevöityminen ja siltaatio ovat sisävesien laatua heikentäviä prosesseja (Wetzel 2001: 836–837), joita tapahtuu järvien ja lampien lisäksi myös virtavesissä (Moss 2010). Rehevöityminen eli eutrofituminen tarkoittaa vesistön biologisen tuotantokyvyn kasvua typpi- ja fosforikuorman kasvun seurauksena (Moss 2010; Wetzel 2001). Toisinaan englantilaisessa kirjallisuudessa käytetty termi ravinteiden karttuminen (esim. Park 2012) korostaa typen (N) ja fosforin (P) merkitystä prosessille. Vesistön ravinnemäärää kuvataan asteikolla (vähäravinteisesta suuriravinteiseen) oligotrofinen, mesotrofinen, eutrofinen ja hypertrofinen (Khan & Mohammad 2014). Rehevöitymistä edistää siltaatio, joka tarkoittaa suspentoituneen aineksen määrän kasvua vesistössä sekä vesistön pohjan morfometrian muutosta hienoaineksen kasautuessa (Wetzel 2001). Vesistön rehevöityminen on siis seurausta pohjimmiltaan kahdesta asiasta – kasvavasta ravinnekuormasta sekä kiintoainekuormituksesta.

Rehevöityminen voi myös olla itseään ruokkiva prosessi. Kasvanut biomassa järvessä voi aiheuttaa hajotessaan hapettomia oloja (Moss 2010). Hapettomissa oloissa pohjasedimenttiin sitoutuneet ravinteet ovat alttiita vapautumaan veteen (esim. Ingall & Jahnke 1994; Laakso 2017). Rehevöityneen järven kalakanta on viileässä ilmastossa tyypillisesti särkikalojen kuten lahnan ja särjen hallitsema (esim. Breukelaar ym. 1994). Särkikalojen on havaittu lisäävän pohjasedimentin suspentoitumista ja aiheuttavan sedimenttiin sitoutuneen fosforin vapautumista (Breukelaar ym. 1994; Havens 1991; Søndergaard ym. 2001). Näitä mekanismeja, jotka lisäävät järven sisäisen fosforikuorman määrää, kutsutaan sisäiseksi kuormitukseksi (esim. Jensen & Andersen 1992; Palmer-Felgate ym. 2011; Søndergaard ym. 2001; Søndergaard ym. 2003) (kuva 7).



Kuva 7. Rehevöitymisen vaikutuksia järven ekosysteemiin ja sisäisen kuormituksen synty. Kasvillisuus runsastuu, kun littoraalinen vyöhyke ja ravinteiden määrä kasvavat. Kasvimassan hajoamisen aiheuttama hapettomuus ja runsastuneen särkikalat vapauttavat veteen pohjasedimenttiin sitoutunutta fosforia.

Rehevöitymistä tapahtuu myös luonnollisesti, mutta usein termiä käytetään synonyyminä antropogeeniselle eli ihmistoiminnasta aiheutuvalla rehevöitymiselle (Brown 2017: 319–320). Mossin (2010) mukaan rehevöitymisellä viitataan nimenomaan ihmistoiminnan seuraukseen, koska luonnollinen rehevöityminen on hyvin harvinaista. Calliston ym. (2014) mukaan luonnollinen rehevöityminen ei ole harvainen ilmiö, mutta tapahtuu hitaasti vuosisatojen kuluessa. Ihmistoiminta aiheuttaa rehevöitymistä monen tekijän suorana ja epäsuorana seurauksena (Khan & Mohammad 2014) (kuva 8). Esimerkiksi väestönkasvu vaikuttaa epäsuorasti, koska se aiheuttaa painetta maankäytön muutoksille, joka puolestaan lisää vesistöihin päätyvää ravinnekuormaa.



Kuva 8. Ihmistoiminnan suoria ja epäsuoria rehevöitymistä lisääviä tekijöitä. Väestönkasvu on epäsuora tekijä, joka tuottaa suoria tekijöitä kuten maankäytön muutoksia ja karjatalouden intensiivisyyden lisääntymistä. Samoin teollisen maanviljelyn laajenemisen lisää lannoitteiden käyttöä. Mukailten Khan & Mohammad (2014).

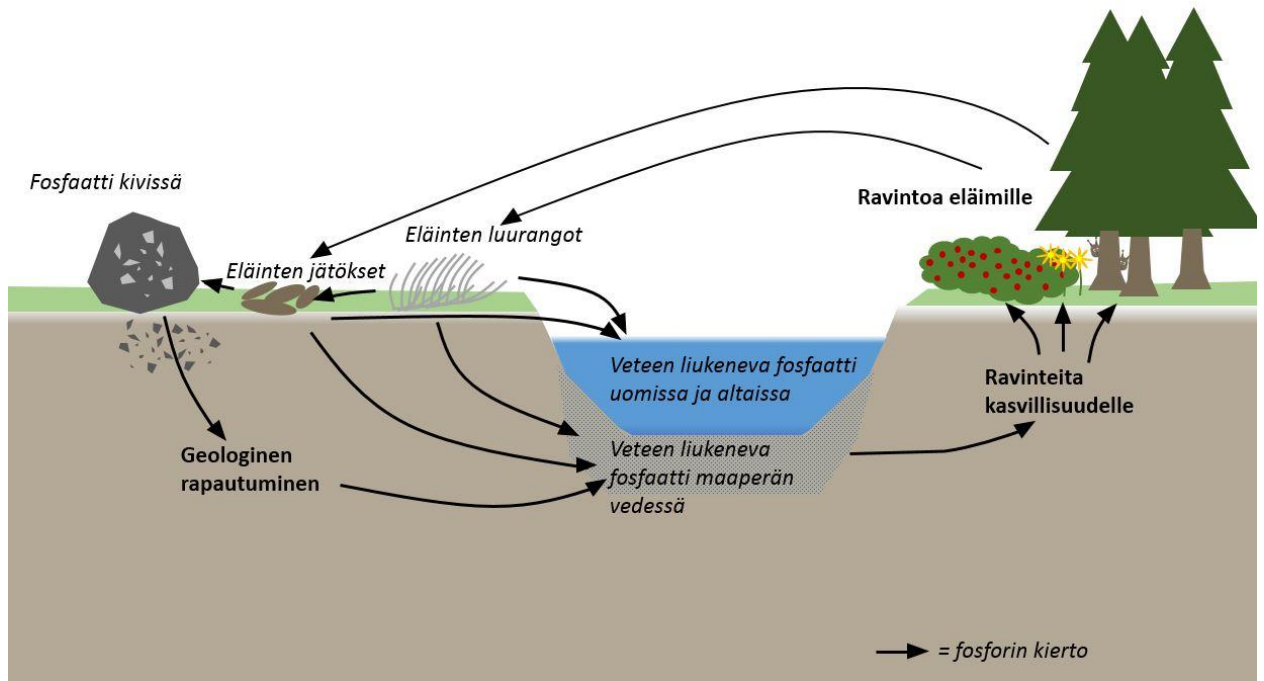
Siltaatiota aiheuttava aines on peräisin eroosion, aineskuljetuksen ja sedimentaation prosesseista (ks. luku 2.1). Sedimentaatio järviin lisää littoraalisen vyöhykkeen pinta-alaa (Wetzel 2001). Tarpeeksi pitkän ajan kuluessa sedimentaatio muuttaa järven lammeksi, lammen suoksi ja lopulta kuivaksi maaksi (Callisto ym. 2014). Littoraalinen vyöhyke tarkoittaa sitä osaa järveä, missä auringonvalo ylettää pohjasedimenttiin asti ja missä kasvaa pohjaan juurtuneita vesikasveja (Allaby 2008). Auringonvalon saatavuus määrittää, millä alueilla pohjassa voi kasveja kasvaa (Moss 2010). Wetzel (2001) kuvaa littoraalisen vyöhykkeen valuma-alueen maan ja järvien ja jokien avoimen veden välisenä rajavyöhykkeenä. Wetzelin (2001) määritelmässä otetaan huomioon vedenpinnan vaihtelu. Moss (2010) laskee littoraaliseen vyöhykkeeseen kuuluviksi myös tulvivat suot ja kosteikot. Matalissa järvissä littoraalisen vyöhykkeen kasvillisuudella on merkittävä osuus järven perustuotannossa ja littoraalinen kasvillisuus voi olla jopa järveä määrittävä tekijä (Wetzel 2001). Moss (2010) kuvailee littoraalisen vyöhykkeen olevan eliöstöltään kuin vesiympäristöjen sademetsiä monine latvuserroksineen ja runsaine lajikirjoineen. Syvyyden lisääntymisen mukaan vaihtuva kasvillisuus (Moss 2010) lisää eliöstön monimuotoisuutta. Littoraalinen vyöhyke on siis perustuotantoltaan vesistöjen aktiivisinta aluetta, joten sen pinta-alan kasvu luo edellytyksiä vesistön biomassan kasvulle.

Fosforin saatavuus on luonnollisissa oloissa organismien kasvua rajoittava tekijä lähinnä siksi, että eliöt tarvitsevat sitä suhteellisen paljon (Moss 2010). Fosforia päätyy maaperään ja vesistöihin luonnollisesti kivien rapautumisen kautta (ks. luku 2.1). Fosfaatteja valuu ekosysteemeihin myös lannoitteista ja pesuaineista (Park 2012). Fosfori ei liukene kovin helposti veteen, mutta esiintyy luonnossa sekä kiinteänä että veteen liuenneena (Moss 2010). Fosfori esiintyy luonnossa useina eri fosfaatti-ioneina (PO_4^{3-} , HPO_4^{2-} ja H_2PO_4^-), orgaanisiin yhdisteisiin kiinnittyneenä fosfaattina sekä maapartikkeleihin kiinnittyneenä liukenemattomana fosforina. Vesinäytteistä on vaikea erottaa kaikkia mahdollisia fosforin, joten usein tarkastellaan kiinteää fosforia, liuennutta fosforia ja kokonaisfosforia (Moss 2010). Liukoinen fosfori päätyy maaperästä nopeasti kasvien käyttöön, mutta valuntaa mahdollistava viljely ja fosforin määrän kasvattaminen lannoittamalla lisäävät vesistöihin valuvan fosforin määrää.

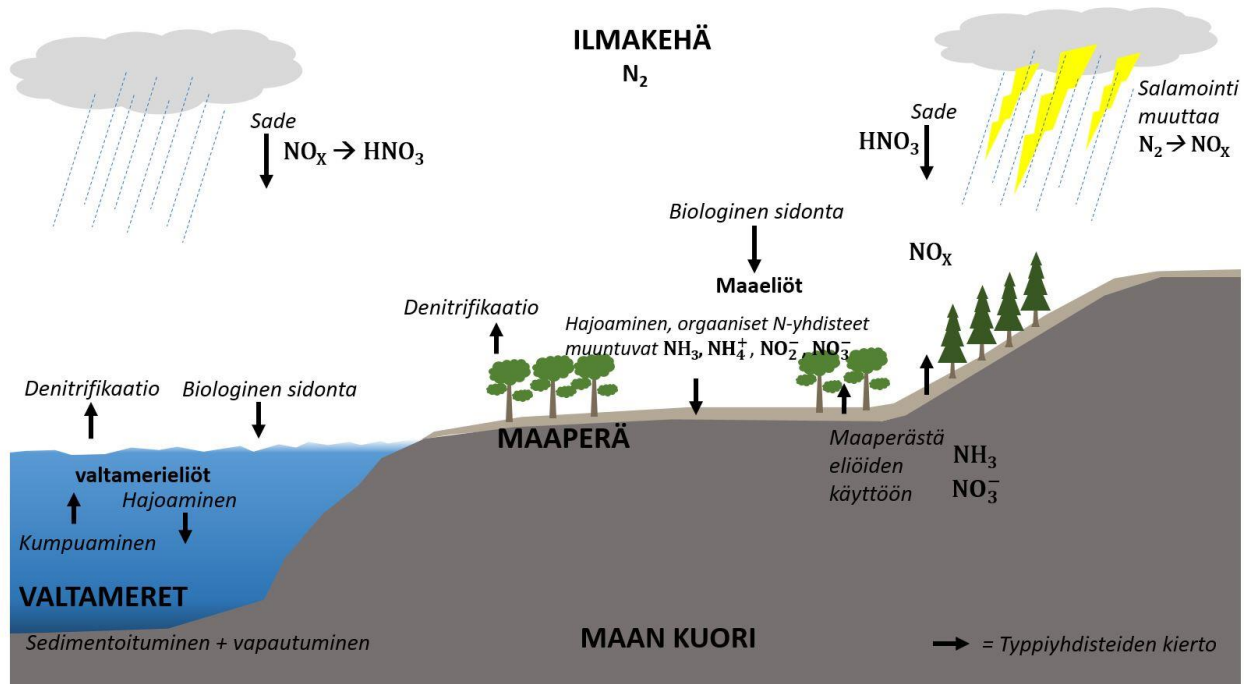
Typpi muodostaa pääosan eli noin 78 % Maan ilmakehästä (Lockwood 2017: 137; Park 2012). Se esiintyy siis luonnossa pääasiallisesti typpikaasuna, jota suurin osa eliöistä ei pysty hyödyntämään (Moss 2010). Typpikaasu muuttuu eliöiden käyttöön sopiviksi typpiyhdisteiksi typensidonnassa (Mayhew 2009; Park 2012). Typensidontaan pystyvät typensitojakasvit ja -bakteerit (Park 2012). Myös salamointi ja teollisuuden prosessit sitovat typpeä (Mayhew 2009). Typensidontaan kykeneviä bakteereita löytyy kasvien juuristoista, maaperästä ja vedestä (Moss 2010). Esimerkiksi jotkin syanobakteerit kykenevät typensidontaan. Typensitojien muokkaamat typpiyhdisteet vapautuvat muiden eliöiden käyttöön, kun typensitojat kuolevat ja maatuvat tai päätyvät ruokavalioksi. Eliöiden hyödynnettävissä olevia typen yhdisteitä, kuten ammoniakkia (NH_3) ja nitraattia (NO_3), vapautuu luontoon suuria määriä maataloudesta, ja typpioksidia ilmansaasteena (Park 2012). Suurin osa vesistöjen typestä on peräisin peltojen lannoitteista, ja osa myös ilmakehästä, jonka typpipitoisuutta liikenne ja sademetsien poltto lisäävät (Moss 2010).

Ravinteet, kuten typpi ja fosfori, ovat eliöiden kasvun kannalta tarpeellisia, mutta niiden saatavuus on normaalisti rajoitettua. Typen ja fosforin kiertoa ekosysteemeissä kuvastaa termi biogeokemiallinen sykli (Peacock 2017: 280–281). Biologiset, geologiset ja kemialliset prosessit kierrättävät fosforia ekosysteemeissä (kuva 9). Fosforin kierto biogeokemiallisessa syklissä tapahtuu pääosin paikallisesti, mutta vesistöihin päätyessään fosfori voi huuhtoutua jopa globaaleihin sykleihin (Peacock 2017: 280). Fosfori leviää myös ilmassa, johon sitä päätyy muun muassa biomassan polttamisesta, maaperän pölynä ja fosfaattien valmistuksen päästöinä (Tipping ym. 2014). Esimerkiksi Camareron & Catalanin (2012) tutkimia ilmaperäinen fosforikuorma Pyreneiden vuoriston valuma-alueilla oli peräisin muualta Pyreneiden niemimaalta sekä Pohjois-Afrikasta. Maakasvillisuus ottaa fosforia tehokkaasti käyttöönsä, joten luonnollisessa kierrossa fosfori ei viivy kauaa maaperän vedessä (Moss 2010). Fosforin ja typen kierroissa on alueellista eroa, sillä typen kaasulomuoto aiheuttaa laajempaa kulkeutumista (Peacock 2017). Typen kierto onkin hieman tyypillistä fosforin kiertoa monivaiheisempi, mutta nopeampi prosessi (Park 2012) (kuva 10). Typpiyhdisteet liukenevat veteen helposti ja ammoniakki voi myös haihtua. Mossin (2010) mukaan ravinnekuorman lisääntyminen saa pohjimmiltaan alkunsa metsien muuttamisesta laidunmaaksi. Tässä muutoksessa ravinteita sitova ja kierrättävä (Peacock 2017) systeemi muokataan ravinteita vapauttavaksi. Historiallisesti viljelyskäytössä olevilla mailla ravinteet ovat voineet loppua kesken, mutta nykyisin ravinnelähde ei tyrehdy, kun peltoja lannoitetaan (Moss 2010). Maanviljelyskäytössä oleva maa vapauttaa ravinteita jopa yli kymmenkertaisesti verrattuna luonnolliseen ympäristöön. Muita ravinnepäästöjen lähteitä ovat vesienkäsittelylaitokset, kala- ja karjatalouden jätevedet.

Vesikasvit saavat suurimman osan tarvitsemistaan ravinteista juuriensa kautta, ja jotkin pohjaan juurtuneet mutta pintaan ylettämättömät kasvit saavat ravinteita myös lehtiensä kautta (Moss 2010). Vesistön sedimentin ja veden kemialla on siis molemmilla merkitystä vesistön perustuotantoon, koska vesikasvit ottavat ravinteita molemmista. Vesiensuojelukosteikoissa kasveja hyödynnetään ravinteiden poistamiseen vedestä (luku 2.3).



Kuva 9. Fosforin biogeokemiallinen kierto tapahtuu pääasiassa paikallisesti. Kasvit ottavat ravinteita maaperästä, johon fosfaattia pääsee esimerkiksi kiviaineksen rapautuessa tai eläinten jätösten maatuessa. Eläimet saavat fosfaattia syömällä kasvillisuutta. Rapautumisen ja eloperäisen aineen hajoaminen siirtää fosfaattia veteen. Veteen liennut fosfaatti voi jokien ja pohjavesivalunnan mukana päätyä alueellisesti laajempiin kiertoihin. Mukailten Peacock (2017).



Kuva 10. Typen biogeokemiallinen kierto tapahtuu globaalisti. Typpi kiertää kaasuna, kiinteänä ja veteen liuenneena. Luonnolliset prosessit ja jotkin eliöt muuttavat typpeä olomuotoon, jossa muut eliöt voivat sitä hyödyntää. Biologinen sidonta ottaa typpeä ilmakehästä ja denitrifikaatio vapauttaa sitä ilmakehään. Mukailten Park (2012).

Rehevöityminen on ongelmallista monelta kantilta. Rehevöityneen vesistön lajisto muuttuu yksipuolisemmaksi ja ekosysteemin tila muuttuu epävakammaksi (Wetzel 2001). Biologisille ja kemiallisille muutoksille herkät lajit tai avainlajit voivat hävitä (Pretty ym. 2003). Avainlajilla tarkoitetaan suojelun kannalta tärkeintä kasvi- tai eläinlajia kussakin kontekstissa (Park 2012). Ekologisesti ajatellen avainlajit ovat tärkeitä. Koralliriuttojen tapauksessa avainlajien kantojen romahtaminen osaltaan ohjaa riuttaekosysteemejä toiminallisen romahtamisen partaalle (Hoegh-Guldberg ym. 2007). Rehevöityminen haittaa myös ihmistoimintoja, joista osa on kasvattanut vesistöjen ravinnekuormaa. Epätoivottujen levien ja vesikasvien lisääntynyt kasvu ja niiden lahoamisesta aiheutuva happikato rajoittavat vesistöjen käyttöä kalatalouden, virkistystyksen, teollisuuden ja juomaveden saatavuuden näkökulmasta (Khan & Mohammad 2014). Pretty ym. (2003) laskelmien mukaan rehevöitymisen taloudelliset kustannukset yhteiskunnille voivat olla huomattavia, vuositasolla noin 77 miljoonaa dollaria Yhdistyneessä kuningaskunnassa. Rehevöityneen vesistön arvo virkistyskäytön kannalta alenee ja rantatonttien arvo laskee. Juomaveden puhdistuksen kustannukset nousevat, mikäli rehevöitynyt vesistö toimii juomaveden lähteenä. Myös vesiväylien kunnostuskulut nousevat.

Pretty ym. (2003) mukaan teollisuus ja maatalous eivät 2000-luvun alussa olleet kovin kiinnostuneita ravinnekuorman vähentämisestä, koska ne eivät maksa ongelmien korjaamisesta. Ravinnekuorman vähentämiseen onkin pyritty yhteiskuntien taholta. EU:n vesidirektiivi (Direktiivi 2000/60/EY) määrää jäsenmaita suojelemaan kaikkia vesiään ja vähentämään vesimuodostumien pilaantumista. Direktiivin toteuttaminen näkyy esimerkiksi vesienhoitosuunnitelmissa (Ulvi & Lakso 2005: 11). Suomen vuosien 2007–2013 ympäristötukiohjelmassa tuettiin maatalouden kosteikkojen rakentamista (Puustinen ym. 2007). Ravinnekuorman vähentämisen kiinnostavuudesta viestinee myös suuri joukko esimerkiksi kosteikkojen toimivuuteen liittyviä tutkimuksia (esim. Braskerud 2001, 2002; Holland ym. 2004; Koskiaho 2006; Koskiaho & Puustinen 2019; Laakso 2017; Valkama ym. 2017). Viime vuosina ravinteiden kierrättämisestä on tullut kiinnostavaa myös maatalouden näkökulmasta, kun on havahduttu fosforivarojen rajallisuuteen (esim. Yle 2015). Tilanteen parantamiseksi näyttää siis olevan poliittista tahtoa, ja monista keinoistakin ollaan tieteessä hyvin perillä. Vesistöihin tulevien ravinnekuormien vähentäminen on paras pitkän aikavälin ratkaisu rehevöitymisongelmaan (Wetzel 2001: 837). Vesiensuojelukosteikot ovat yksi keino, jolla suojeltaavaan vesistöön kulkeutuvien ravinteiden määrää pyritään vähentämään. Muita ravinnekuormaa vähentäviä keinoja ovat esimerkiksi peltojen talviaikainen kasvipeitteisyys ja pintavalunnan suuntaan nähden poikittainen kyntö. Talviaikainen kasvipeitteisyys vähentää peltojen eroosiota ja poikittainen kyntö estää irronneen maa-aineksen kulkeutumista pintavalunnan mukana.

2.3 Vesiensuojelukosteikot ja -altaat

Kosteikot ovat maa-alueita, jotka ovat veden peitossa jatkuvasti tai osan vuotta (Kadlec & Wallace 2009: 3–4). Kosteikkoja voi muodostua moniin erilaisiin sijainteihin: maa- ja vesiekosysteemien tulvivalle rajuvyöhykkeelle, painanteisiin, vettä läpäisemättömille ja jyrkkärinteisille maa-alueille tai jokiuoman kohtiin, joissa virtaus hidastuu. Erilaisiin kosteikkosysteemeihin lasketaan kuuluvan niin vuorovesiestuaarit, marskimaat ja erilaiset suot (Mayhew 2009). Matalille vesialueille on ominaista, että niillä kasvaa laajalla alueella makrofyyttejä (Wetzel 2001: 626). Makrofyytti tarkoittaa sen kokoista kasvia, joka havaitaan paljaalla silmällä (Park 2012). Usein termillä viitataan vesikasveihin. Pitkäkestoisesta vettymisestä johtuen kosteikkojen kasvillisuus koostuu ainoastaan lajeista, jotka selviytyvät kokonaan vettymisessä maaperässä tai jopa vedessä, ja kestävät tulvimista sekä vähähappisia olosuhteita (Kadlec & Wallace 2009: 3–4). Toisaalta kosteikkojen kasvillisuudella ei ole pulaa vedestä, jonka saatavuudesta suurin osa perustuotannosta

eli orgaanisen aineen kertymisestä (Park 2012) on riippuvaista. Kosteikkoekosysteemit ovatkin kasvillisuutensa ja eläimistönsä puolesta hyvin monimuotoisia.

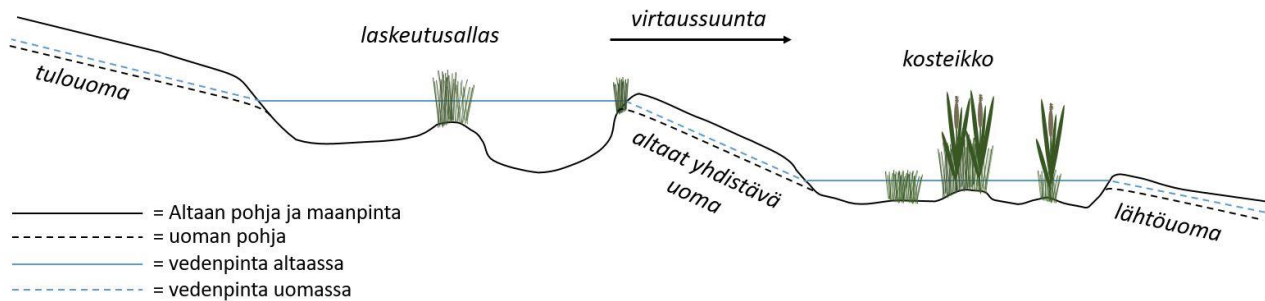
Kosteikkojen korkea biologinen aktiivisuus aiheuttaa sen, että kosteikot kykenevät muuttamaan monia tavanomaisia jätevesien saasteita harmittomiksi yhdisteiksi tai ravinteiksi, jotka voivat entisestään kiihdyttää biologista aktiivisuutta (Kadlec & Wallace 2009: 3–4). Yhdisteiden muuttaminen tapahtuu aurinгон, tuulen, maaperän, kasvien ja eläimistön yhteisvaikutuksen ja energian avulla. Rakennetuksi kosteikoksi (engl. *constructed wetland*) kutsutaan kosteikkoa, joka on tarkoituksella muodostettu paikkaan, jossa ei ole kosteikkoa, ja jota käytetään jäte- tai hulevesien käsittelyyn (Mayhew 2009). Englanninkielisessä kirjallisuudessa puhutaan myös käsittelykosteikoista (engl. *treatment wetlands*, esim. Kadlec & Wallace 2009), jolla viitataan monien eri lähteiden valunnan puhdistukseen kotitalouksien jätevesistä kaivosteollisuuden valumavesiin. Suomessa rakennettujen kosteikkojen painopiste on maatalouden valumavesien käsittelyssä, ja tällaisista kosteikoista puhutaan myös maatalouden monivaikutteisina kosteikkoina tai maatalouden vesiensuojelukosteikkoina (Puustinen ym. 2007). Tällaisten kosteikkojen päätavoite on maatalouden ravinnekuormituksen vähentämisessä, mutta samalla pyritään parantamaan luonnon monimuotoisuutta, tuottaa kasteluveden varastoja sekä parantaa maaseutumaisemaa ja alueiden virkistyskäyttöä. Vesiensuojelukosteikko tai rakennettu kosteikko ovat termit, joilla valumavesiä puhdistamaan tarkoitettuja kosteikkoja tässä tutkielmassa kutsun.

Luonnollisia kosteikkoja on käytetty jätevesien laskuun jopa satojen vuosien ajan, mutta lähinnä tarkoituksena niiden jäteveden hävittäminen (Vymazal 2011). Monessa tapauksessa jäteveden juoksuttaminen kosteikkoihin aiheutti näiden ekosysteemien peruuttamattoman pilaantumisen. Varsinaisten jätevesien käsittelyyn tarkoitettujen kosteikkojen historia on lyhempi (Kadlec & Wallace 2009: 11–13).

Ensimmäiset tutkimukset kosteikkojen käytöstä jätevesien käsittelyssä tehtiin Saksassa 1950-luvulla, ja ensimmäiset rakennetut kosteikot otettiin käyttöön 60-luvun lopulla (Vymazal 2011). Kosteikkoteknologia levisi kansainväliseen käyttöön lähteestä riippuen 80-luvun puolivälistä (Kadlec & Wallace 2009) tai 90-luvulta alkaen (Vymazal 2011). Suomalaisessa ympäristössä vesiensuojelukosteikkojen toimivuutta on tarkasteltu 1990-luvulta saakka erilaisissa hankkeissa (Puustinen ym. 2007: 21). Akateemisena uraauurtavana tutkimuksena suomalaisessa viitekehyksessä mainittakoon Koskiahon väitöskirja (2006), joka tarkastelee kosteikkojen hydraulisen suunnittelun vaikutusta kykyyn pidättää ravinteita. Tuoreempaan kosteikkoihin liittyvänä kotimaisena tutkimuksena mainittakoon Laakson väitöskirja (2017), joka tarkastelee fosforin käyttäytymistä vesiensuojelukosteikkojen sedimenteissä. Nykyisin rakennettujen kosteikkojen teknologia on laajalle levinnyt ja kustannustehokas tapa puhdistaa monen tyyppisiä jätevesiä (Kadlec & Wallace 2009; Vymazal 2011).

Maatalouden valumavesien puhdistukseen käytetyt rakennetut kosteikot ovat pääasiassa avoimen vedenpinnan (engl. *free water surface, FWS*) kosteikkoja (Kadlec & Wallace 2009: 5), jotka jäljittelevät ominaisuuksiltaan luonnollisia kosteikkoja ja toimivat myös kylmässä ilmastossa, jossa vesi välillä jäätyy. Myös erilaisia maanpinnan alaiseen horisontaaliseen ja vertikaaliseen virtaukseen perustuvia putkitettuja ratkaisuja on olemassa (Kadlec & Wallace 2009: 6–8), mutta en käsittele niitä sen tarkemmin, koska tutkielmassa tarkastellut kosteikot ovat avoimen vedenpinnan kosteikkoja. Kosteikkorakenteeseen voidaan sijoittaa yläjuoksulle syvämpi laskeutusallas, johon nopeasti laskeutuva suspensioikulkeuma sedimentoituu (Kadlec & Wallace 2009). Varsinkin tämän ensimmäisen altaan pohjasedimenttiä joudutaan ajoittain ruoppaamaan aineksen kasautuessa. Laskeutusallas on hyödyllinen kiintoainekuorman vähennyksessä varsinkin silloin, jos valuma-alueen kokoon nähden tarpeeksi suuren kosteikon rakentaminen ei ole mahdollista (Puustinen ym. 2007). Esimerkki kahden altaan vesiensuojelurakenteesta on kuvassa 11. Syvem-

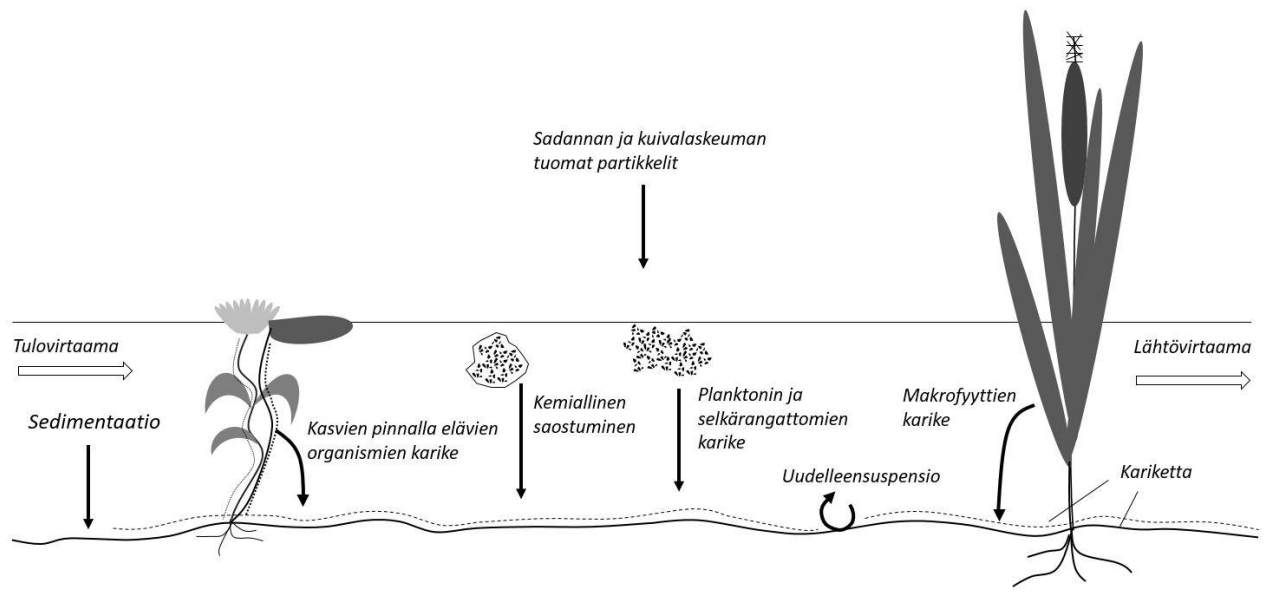
pää allasta ei kannata sijoittaa vesiensuojelurakenteen viimeiseksi osaksi, koska siinä syntyvä klorofyllirike säilyy herkästi suspensiossa ja lisää veden kiintoainekuormaa (Kadlec & Wallace 2009). Yksittäin kosteikot näyttäisivät toimivan laskeutusaltaita paremmin ainakin fosforin sitoijina (Uusi-Kämpä ym. 2000).



Kuva 11. Poikkileikkauspiirros vesiensuojelurakenteesta. Laskeutusallas hidastaa virtausta voimakkaasti ja luo edellytyksiä sedimentaatiolle. Matalammassa kosteikossa on enemmän elinaluetta vedestä ravinteita poistaville vesikasveille, ja suspensiossa kulkevilla partikkeleilla on lyhempi etäisyys laskeutua pohjaan. Havainnollistava poikkileikkaus perustuu tämän tutkimuksen kosteikkojen rakenteeseen.

Valumavesien typpikuormaa vähennetään kosteikoissa nitrifikaation ja denitrifikaation avulla (Kadlec & Wallace 2009: 9). Nitrifikaatio on prosessi, jossa mikro-organismit hapettavat ammoniakkia (NH_3) nitriitiksi (NO_2) ja nitriittiä nitraatiksi (NO_3) (Park 2012). Nitrifikaation tuottamia typen yhdisteitä voi kosteikon vesikasvillisuus sitoa itseensä. Nitrifikaatio ei siis suoraan vähennä typen kokonaismäärää vedessä, mutta denitrifikaatio vähentää (Kadlec & Wallace 2009: 9). Denitrifikaatiossa bakteerit muuttavat hapettomissa oloissa nitraattia typpikaasuksi (N) (Park 2012), joka siirtyy kosteikosta ilmakehään (Kadlec & Wallace 2009: 9). Myös fosforikuormaa voidaan vähentää biologisten prosessien avulla (Kadlec & Wallace 2009: 9). Ravinnekuormaa pienentävien biologisten prosessien toteutumisen mahdollisuudet nousevat, kun vesi pysyy kosteikossa pidempään. Biologisia prosesseja edistää myös korkeampi lämpötila, ja kosteikot toimivatkin hyvin erityisesti lämpimissä ilmasto-oloissa, joissa kasvillisuus on läpi vuoden aktiivista. Samoja prosesseja tapahtuu vaihtelevien vuodenaikojen ilmastoissa ainoastaan kasvukaudella.

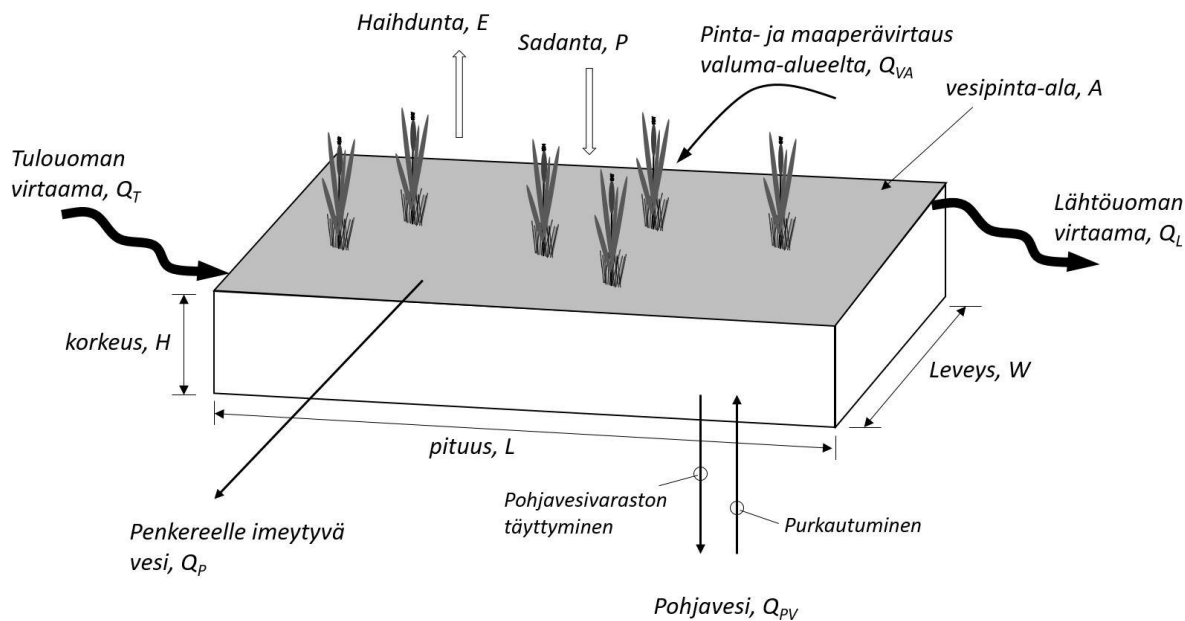
Rakennetut kosteikot voivat kuitenkin toimia valumavesien puhdistajina myös viileässä borealisessa ilmastossa (esim. Braskerud 2001, 2002; Koskiaho 2003; Koskiaho ym. 2003; Valkama ym. 2017). Viileässä ilmastossa tärkeää on erityisesti suspensiokulkeuman ja siihen sitoutuneiden ravinteiden sedimentoituminen altaiden pohjalle (esim. Valkama ym. 2017) (kuva 12). Sedimentoitumista aiheuttavat alhaiset virtausnopeudet sekä virtausta häiritsevä kasvillisuus (Kadlec & Wallace 2009: 203). Paitsi edistää sedimentoitumista, kasvillisuus myös kykenee sitomaan itseensä veteen liuenneita ravinteita. Kasvillisuuden vaikutus kosteikkojen kykyyn pidättää ravinteita voi siis olla huomattava myös viileässä ilmastossa. Myös Braskerud (2001) havaitsi kasvillisuuden edistävän ravinteiden pidättymistä erityisesti siksi, että pohjasedimentit eivät lähde uudestaan liikkeelle. Toisaalta kasvillisuuden merkitys vähenee, kun kasvillisuus-pinta-ala ylittää 50 % kosteikon pinta-alasta (Braskerud 2001: 1455). Kosteikon hydraulinen tehokkuus (Persson ym. 1999) parantuu makrofyyttien ansiosta, kun läpivirtaus hidastuu. Borealaisen ilmaston vesiensuojelukosteikoissa kasvillisuuden merkitys puhdistukselle voi myös olla vähäisempi siksi, että ravinnekuorma voi tulla altaisiin pääasiassa kasvukauden ulkopuolella (Koskiaho ym. 2003). Kasvillisuus myös hajotessaan tuottaa kiintoainesta vesipatsaaseen (esim. Kadlec & Wallace 2009). Rakennetut kosteikot kuitenkin näyttävät viileässä ilmastossa toimivan paremmin ikääntyessään, jolloin kasvillisuuden määrä ja biologinen aktiivisuus altaassa ovat kehittyneempiä kuin tuoreeltaan kaivetussa altaassa (Koskiaho & Puustinen 2019).



Kuva 12. Partikkelien kasautumisen ja syntymisen mekanismeja kosteikkoaltaassa. Kosteikkoon tuleva virtaama tuo mukanaan suspensiokulkeumaa, joka sedimentoituu virtauksen hidastuessa, tai virtaa läpi kosteikon. Kosteikkoaltaassa elävät organismit tuottavat hajotessaan kiinteää kariketta, joka sedimentoituu pohjalle tai kulkee virtauksen mukana pois kosteikosta. Mukailten Kadlec & Knight (1996, cit. Kadlec & Wallace 2009: 207).

Ravinteiden pidättymiseen vaikuttavia tekijöitä viileässä ilmastossa ovat esimerkiksi vuodenaika, suspensiokulkeuman fosforipitoisuus sekä se, missä muodossa fosfori tulee kosteikkoihin (Braskerud 2002). Varsinkin liukoista ainesta voi lähteä vesiensuojelurakenteesta enemmän kuin sinne tulee (esim. Koskiaho ym. 2003). Valkaman ym. (2017) tutkima kosteikko vähensi kokonaisfosforin määrää suhteellisesti eniten kesällä ja määrällisesti eniten joulukuun tulvassa. Talviaikainen vähentymä oli muuten alhaista. Nitraatin suhteen vuodenaikainen veden puhdistuminen oli samankaltainen. Valkama ym. (2017) mainitsee leudon ja sateisen talvisään aikana, jolloin kosteikko ei vähennä ravinnekuormaa. Myös kosteikon koolla suhteessa valuma-alueen kokoon on todettu olevan merkitystä (Koskiaho 2003). Suomen ilmasto-oloissa vesiensuojelukosteikot eivät toimi talviaikana pääsääntöisesti yhtä hyvin kuin kasvukaudella, koska matala lämpötila ei mahdollista kemiallisten ja biologisten vedenpuhdistusprosessien tapahtumista (Kirkkala 2014: 41). Kasvukauden lopussa kosteikkoaltaiden kasvillisuus kuolee ja alkaa hajota. Vuodenaikainen toiminnan vaihtelu ei ole yksiselitteistä. Braskerud (2002) toteaa, että kesäaikana pienillä virtaamilla kiintoainetta laskeutuu keskimäärin hitaammin kuin suurien virtaamien aikana. Ero johtuu karkeammasta suspensiokulkeumasta suuremmilla virtaamilla. Toisaalta kesäaikana savipartikkelit herkemmin muodostavat flokkeja, jotka laskeutuvat nopeammin kuin yksittäisen savihiukkaset.

Vesi päätyy luonnollisiin kosteikkoihin uoma-, pinta- ja pohjavesivaluntana sekä sateena (Kadlec & Wallace 2009: 21). Vastaavasti se poistuu niistä uomia pitkin, pohjavesivaluntana ja haihtumalla (kuva 13). Samat prosessit pätevät pääasiassa myös rakennetuissa kosteikoissa, varsinkin luonnollisia kosteikkoja jäljittelevissä. Vettä kosteikkoon lisäävät ja poistavat prosessit yhdessä kosteikkoaltaan ominaisuuksien kanssa määrittävät kosteikon vesivarastoa (Kadlec & Wallace 2009). Kosteikon vesitilavuus ei ole vakio, vaan se vaihtelee vuoden aikana kosteikkoon virtaavan veden määrän mukaan.



Kuva 13. Kosteikon vesivarastoa määrittävät vettä lisäävät ja poistavat prosessit. Virtaamat tulo- ja lähtöomissa lisäävät ja poistavat vettä nopeimmin. Sadanta ja haihdunta voivat ajoittain vaikuttaa voimakkaasti ja niissä. Kaikkia tekijöitä luonnehtii voimakas ajallinen, ennalta määräämätön vaihtelu. Mukailten Kadlec & Wallace (2009: 22).

Rakennetun kosteikon toiminnan eli veden puhdistamisen kannalta oleellista on se, miten pitkään vesi virtaa kosteikon läpi ja ehtii olla vuorovaikutuksessa sitä puhdistavien biologisten prosessien kanssa. Tätä aikaa, jonka kosteikkoon tullut vesi pysyy varastoituneena kosteikkoon, kutsutaan veden viipymäksi, ja sitä pidetään yhtenä ravinteiden pidätyskykyä selittävänä tekijänä (esim. Holland ym. 2004; Koskiaho ym. 2003; Koskiaho 2006; Kadlec & Wallace 2009: 22–24; Puustinen ym. 2007). Koskiahon ym. (2003) tutkimissa kosteikoissa parhaiten maatalouden valumavesiä puhdistivat kosteikot, joissa vesi viipyi pisimpään. Myös Valkama ym. (2017) havaitsivat pitkän viipymän vähentävän ravinnekuormaa. Mitä pidempään vesi pysyy altaassa, sitä enemmän sen kemia muuttuu biologisten prosessien vaikutuksesta (Moss 2010: 219). Seurauksena suurempi osa veden sisältämistä ravinteista päättyy kasvien käyttöön tai käy läpi denitrifikaation. Myös altaan vesipatsaan rakenne muokkautuu viipymisajan mukaan. Pidempään viipyvä vesi kerrotaan herkemmin talvella ja kesällä. Valkaman ym. (2017) tutkimuksessa veden viipymät olivat pidempiä kasvukaudella, kun altaan kasvillisuus on tiheää.

Yksinkertaisesti altaan tilavuuden ja virtaaman mukaan laskettava nimellisviipymä ei anna kovin tarkkaa kuvaa kosteikon veden vaihtumisesta. Mossin (2010) mukaan päävirtaus vesialtaan läpi voi tapahtua ikään kuin jokena altaan sisällä, jolloin suurin osa vesimassasta altaassa pysyy suhteellisen liikkumattomana. Todellinen viipymä tulee laskea merkkiaineen avulla (esim. Holland ym. 2004; Koskiaho 2006; Puustinen ym. 2007: 57). Nimellisviipymän ja todellisen viipymän suhdetta kuvataan hydraulisella tehokkuudella (λ) (Persson ym. 1999). Kosteikon hydraulinen tehokkuus on sitä parempi, mitä lähempänä todellisen viipymän tarkastelussa käytetyn merkkiaineen käyrän huippu on nimellisviipymää. Viipymän laskemisen menetelmiä on kuvattu tarkemmin luvussa 2.4.4.

Hydraulinen tehokkuus tarkoittaa sitä, että nimellisviipymä ja todellinen viipymä vastaavat toisiaan (Persson ym. 1999). Hyvä hydraulinen tehokkuus altaassa on silloin, kun veden virtaus altaan läpi tapahtuu mahdollisimman tasaisesti koko altaan alueella ilman selvästi voimakkaamman virtauksen tai seisovan veden alueita. Hydraulisesti tehokas kosteikko myös puhdistaa vettä paremmin (esim. Koskiaho 2003; Puustinen ym. 2007: 57). Hydraulinen tehokkuus voi vaihdella altaassa virtaaman mukaan. Pienemmällä

virtaamalla epätasaisesti jakautunut kasvillisuus ja pohjan pinnanmuodot ohjaavat virtausta tehokkainta reittiä pitkin, mutta suuremmalla virtaamalla virtaus ei mahdu tapahtumaan näissä ahtaissa tiloissa, ja jakautuu tasaisemmin koko altaaseen (Braskerud 2001). Kosteikon hydraulinen tehokkuus voi siten olla suurimmillaan, kun kosteikkoon tuleva virtaama on suurimmillaan. Kosteikkoaltaan pitkänomainen muoto vaikuttaa parantavan hydraulista tehokkuutta verrattuna pyöreisiin muotoihin (Koskiaho 2003). Pitkulaisen muodon riskinä Kadlec & Wallace (2009) mainitsevat riskin pohjaa kuluttavien virtausnopeuksien synnystä.

Virtauskenttien tasainen jakautuminen voidaan ottaa huomioon kosteikkoa suunniteltaessa, ja se onnistuu virtaussimulaatioiden avulla (Puustinen ym. 2007). Erilaisilla pohjarakenteilla veden virtausta voidaan yrittää ohjata käyttämään koko altaan pinta-alaa. Altaan muotojen lisäksi myös suuri valuma-alueen pinta-ala suhteessa vesialtaan pinta-alaan nopeuttaa virtausta altaan läpi (Moss 2010: 219). Pienempi valuma-alue suhteessa altaan kokoon sen sijaan hidastaa veden vaihtumista. Holland ym. (2004) havaitsivat vesitilavuuden kasvattamisen laskevan hydraulista tehokkuutta, kun altaan vedenpintaa kontrolloitiin padon avulla.

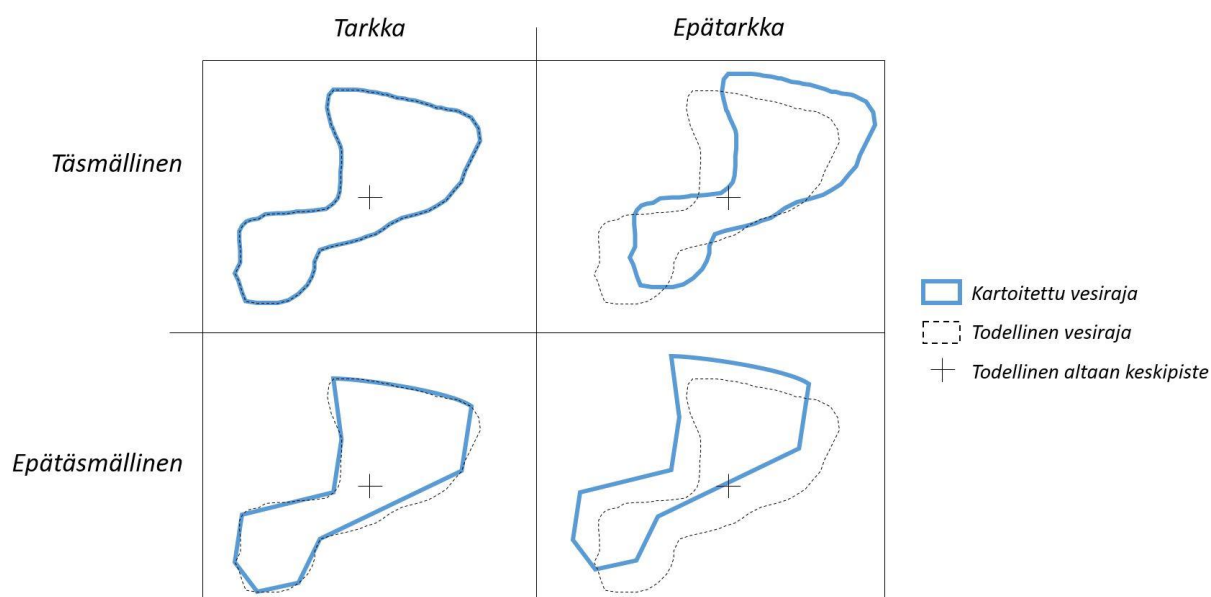
Sedimentti voi päätyä uudelleen suspensioon, jos virtausolosuhteet muuttuvat sellaisiksi, että ne erodoivat ja ottavat kuljetukseen jo varastoitunutta ainesta (Wetzel 2001: 633), mikä on kuitenkin hyvin harvinaista kosteikkoympäristöissä (Kadlec & Wallace 2009). Sedimentin erodoituminen, kulkeutuminen ja varastoituminen ovat Hjulströmin (1935) diagrammin mukaisesti riippuvaisia raekoosta ja virtausnopeudesta (kuva 3). Lisäksi Wetzelin (2001: 633) mukaan tähän sedimentin kulkeutumiseen vaikuttaa myös dimiktisten vesialtaiden vuosittainen täyskierto. Dimiktisten kylmän ja viileän ilmaston järvien vesi sekoittuu täydellisesti kaksi kertaa vuodessa lämpötilaeroista johtuen (Brown 2017). Matalissa kosteikkoaltaissa voimakasta veden kerrostumista ei välttämättä tapahdu, ja virtaus sekoittaa vesipatsasta joka tapauksessa lähes läpi vuoden. Sedimentin varastoituminen kosteikkoon ei kuitenkaan usein ole lopullista. Lisäksi kosteikkoaltaissa syntyy jatkuvasti kiintoainesta kasvillisuuden hajotessa (Kadlec & Wallace 2009) (kuva 12). Kosteikkoaltaiden pohjasedimentti on tyypillisesti epäorgaanisen aineen ja orgaanisen hajoavan aineen sekoitus, jonka tiheys on pieni. Tämä sekoitus lepää altaan pohjalla, mutta on irrallinen alla olevasta altaan pohjasta (Nolte 1997, cit. Kadlec & Wallace 2009: 211), ja lähtee suhteellisen herkästi liikkeelle, eikä asetu helposti. Kosteikkojen epävakaa pohjamateriaali voi eri arvioiden mukaan lähteä liikkeelle jo yli 3 cm/s nopeuksilla (Burns & McDonnell 1996, cit. Kadlec & Wallace 2009: 210) tai jo yli 2,1 cm/s nopeuksilla (Huisman 1973, cit. Koskiaho 2003: 330).

2.4 Vesiensuojelualtaiden kartoitus

2.4.1 Topografian kartoitus virtavesiympäristössä

Virtavesiympäristöissä topografian eli pinnanmuotojen kartoitus tarkoittaa pinnan korkeustietojen keräystä kenttämittauksilla. Korkeustiedolla tarkoitetaan maanpinnan vaihtelevaa korkeutta suhteessa karttakoordinaatistoissa määritettyyn keskimerenpintaan. Kattavan aineiston keräämiseksi virtavesiympäristöissä tietoa pinnanmuodoista on kerättävä sekä vedenpinnan yläpuolelta, että alapuolelta. Myös vedenpinnan taso ja sen vaihtelu on huomioitava, jotta mittaushetkellä kuivan ja vedenalaisen maanpinnan yhdistäminen onnistuu. Näiden kolmen asian, 1) kuivan maan, 2) uoman tai vesialtaan pohjan ja 3) vedenpinnan, kartoitus edellyttää eri mittausmenetelmien yhdistämistä. Erilaisten aineistojen yhdistäminen aiheuttaa omat haasteensa tiedon tarkkuuden näkökulmasta.

Maanpinnan korkeustieto on luonteeltaan paikkatietoa, eli sijaintiin sidottua tietoa. Paikkatiedon tarkkuus on keskeinen tekijä paikkatiedon laadussa – tarkempi mielletään laadukkaammaksi. Paikkatiedon alueellista eli spatiaalista tarkkuutta on kuvattu sen kahta ulottuvuutta kuvaavilla termeillä tarkkuus (engl. *accuracy*) ja täsmällisyys (engl. *precision*) (Heywood ym.: 2011: 311). Tarkka sijainti sijaitsee oikeissa koordinaateissa ja täsmällinen sijainti on yksityiskohtaisesti ja pienipiirteisesti kirjattu (kuva 14). Esimerkiksi vesiensuojelukosteikon kartoituksen tarkkuudessa tarkkuus viittaisi siihen, että mittauksen ajanhetken vesialueen keskipiste olisi oikeassa paikassa, ja täsmällisyys siihen, miten yksityiskohtaisesti vesiraja on mitattu. Samalla periaatteella tarkassa ja täsmällisessä syvyyspisteaineistossa syvyydet ovat todellisuutta vastaavissa sijainneissa. Epätarkassa mutta täsmällisessä syvyyspisteaineistossa pisteiden sijainti suhteessa toisiinsa olisi oikein, mutta koko aineiston sijainti olisi hieman ohi vesialtaasta.



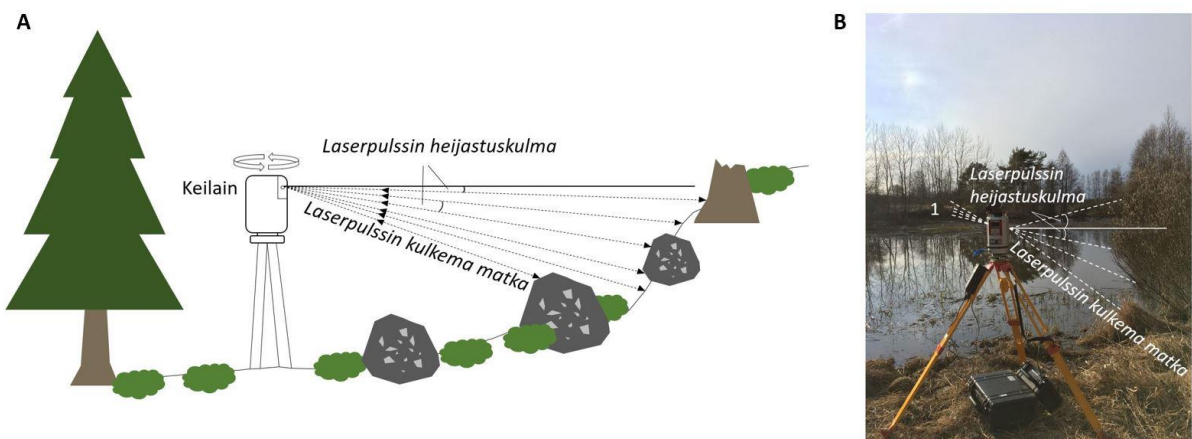
Kuva 14. Paikkatiedon tarkkuuden ulottuvuudet, esimerkkinä vesialtaan rajojen kartoitus. Kuvan luokittelu Heywood ym. (2011: 311).

Kolmiulotteista korkeuden määrittystä on ajateltu 1800-luvun loppupuolelta saakka, mutta määrittäminen ei onnistunut luotettavasti ennen 1900-luvun puolivälissä Yrjö Väisälän kehitettyä kolmiointia (Torge 2001: 12). Kolmiointia alkoi 1980-luvun kuluessa korvata satelliittipaikantaminen eli GNSS (*global navigation satellite systems*). GNSS:ssä kohteen kolmiulotteinen sijainti määrittyy vähintään neljän paikannussatelliitin etäisyyksien avulla, mitattuna suhteessa kohteeseen tietyllä ajanhetkellä (esim. Hofmann-Wellenhof ym. 2008). Arkikielessä satelliittipaikantamisen synonyyminä käytetty GPS (*Global Positioning System*) on Yhdysvaltain puolustusministeriön kehittämä ja laajassa käytössä oleva satelliittipaikannusjärjestelmä (esim. Hofmann-Wellenhof ym. 2008). Muita järjestelmiä ovat esimerkiksi eurooppalainen Galileo ja venäläinen GLONASS (*Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema*). Eri satelliittipaikannusjärjestelmien tietoja samanaikaisesti hyödyntämällä voidaan esimerkiksi välttää paikantamisen ongelmia katvealueilla (Hofmann-Wellenhof ym. 2008). Nykyisin GNSS-paikantamisella kyetään mittaamaan kohteen sijainti parhaimmillaan senttimetrin tarkkuudella. Tarkkuuden lisäksi paikkatiedon laatua määrittää resoluution puolesta. Korkea spatiaalinen eli alueellinen resoluutio tarkoittaa aineiston suurta alueellista erottelukykä, ja osaltaan mahdollistaa täsmällisen tiedon tuottamisen. Temporaalinen eli ajallinen resoluutio viittaa tiedon ajantasaisuuteen.

Sijainnin korkeus määritetään suhteessa kulloinkin ajankohtaiseen geoidiin. Geoidi on maapallon pintaa mallintava muoto, johon valtameren pinnat laskennallisesti, gravitaation vaikutuksesta asettuvat lepotilassa (Allaby 2008). Geoidimallissa tämä vedenpinta yhdistää valtameret ja jatkuu mantereiden läpi (Maanmittauslaitos 2019). Korkeuskartoituksessa geoidin pinta on nollataso, ja mitattu korkeus suhteessa siihen. Korkeusarvo +64,5 metriä tarkoittaa sijainti 64,5 metriä geoidimallin merenpinnan yläpuolella. Perinteisemmillä menetelmillä, kuten vaaituksella, kattavan korkeusaineiston kerääminen on vaatinut paljon aikaa. Mittausmenetelmien teknologia on kehittynyt nopeasti (Williams ym. 2014: 167), ja nykyisin käytössä olevien menetelmien avulla korkeuden kartointu onnistuu nopeammin, tarkemmin ja kattavammin, kun muutaman senttimetrin tarkkuuksista dataa kyetään keräämään lähes reaaliaikaisesti. Teknologian kehitys on pienentänyt mittalaitteiden kokoa, ja siten helpottanut pääsyn pienille vesialueille.

Tarkimmat topografian kartoitusmenetelmät virtavesiympäristöissä ovat erilaiset laserkeilausmenetelmät: ilmalaserkeilaus (ALS), maastolaserkeilaus (TLS) ja mobiililaserkeilaus (MLS) (Hohenthal ym. 2011). Näitä menetelmiä on hyödynnetty ja toimivuutta tarkasteltu viimeisen kymmenen vuoden aikana alan tutkimuksissa (esim. Alho ym. 2009; Flener ym. 2013; Kasvi ym. 2013). Laserkeilausmenetelmillä saadaan tietoa myös kasvillisuuden sijainnista ja geometriasta. Kasvillisuustietojen sisällyttäminen virtausmalleihin voi olla hyödyllistä, koska kasvillisuus muuttaa virtausta paikallisesti ja vaikuttaa sedimenttikulkeumaan.

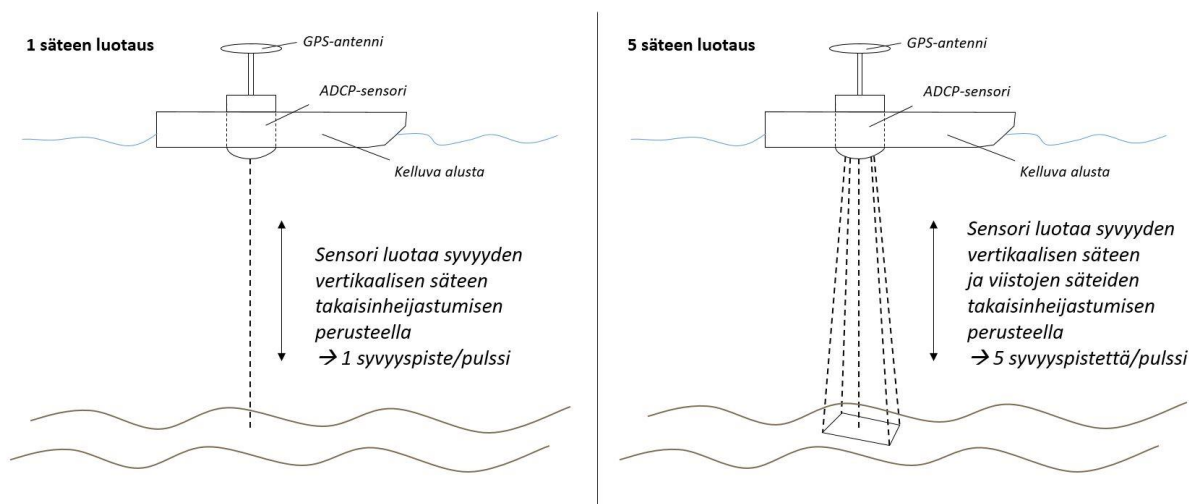
Maastolaserkeilain (*TLS, Terrestrial Laser Scanner*) lähettää lasersädettä sektoreittain viuhkamaisesti edeten horisontaalisesti sektorin kerrallaan. Kun lasersäde osuu johonkin kohteeseen, esimerkiksi puun runkoon, kiveen, heinikkoon tai ihmiseen, säde heijastuu takaisin. Perustuen säteen lähtökulmaan sekä lähettämisen ja takaisinheijastumisen aikaeroon keilain laskee kohteelle tarkan geometrian suhteessa itseensä (kuva 15). Tuloksena on kolmiulotteinen pistepilvimalli keilainta ympäröivästä maailmasta. VRS-RTK-GPS:llä mitattujen georeferointipisteiden avulla voidaan keilaimen keräämä data tarkasti rekisteröidä karttakoordinaatistossa sijaitseväksi tiedoksi. Kattavan mittausdatan luomiseksi kohde on hyödyllistä laserkeilata useammasta kuin yhdestä kulmasta.



Kuva 15. A) Maastolaserkeilaimen toimintaa havainnollistava piirros. Lasersäde heijastuu takaisin osuttuaan heijastavaan kohteeseen, kuten maanpintaan, kiveen tai kasvillisuuteen. Laserpulssin kulkema matka on koko etäisyys keilaimesta kohteeseen. Mukailten Salmela (2017). B) Saman havainnollistaminen oikeassa maastossa, missä numero 1 kuvaa vastarannalle lähtevää lasersädeviuhkaa. Maastolaserkeilain mittaa ympäristönsä vertikaalinen sektori kerrallaan.

Vedenpinnan alapuolista topografiaa, jota kutsutaan myös batymetriaksi, on perinteisesti mitattu matallisissa uomissa luotaamalla syvyyksiä mittapunnuksen tai mittatikun avulla. Teknologinen kehitys on paran-

tanut vedenalaisenkin topografian kartoitusta. Optisilla menetelmillä kyetään ilmakuvauksen avulla kartoittamaan syvyyttä ilman ammattilaistason välineitä, kun tarpeeksi hyviä kameroita ja lennokkeja on saatavilla kuluttajille (Williams ym. 2014: 167). Optiset menetelmät edellyttävät hyvää näkösyvyyttä, joten ne eivät sovellu kaikkiin ympäristöihin. Kaikuluotaus toimii sameassakin vedessä, kuten kosteikoilla, ja laitteiden pienentyminen mahdollistaa kaikuluotauksen suhteellisen pienissä altaissa ja matalilla vedensyvyyksillä. Akustisen virtaamaprofiilimittarin (engl. *Acoustic Doppler current profiler, ADCP*) integroitu kaikuluotain lähettää sensorista ja ohjelmasta riippuen vedenpinnalta pohjaa kohti kerrallaan yhden tai useamman kaikuluotaussäteen, joiden takaisinheijastumiseen perustuen laite laskee syvyyden senttimetrin tarkkuudella (kuva 16). ADCP-järjestelmän GPS tallentaa jokaiselle mitatulle syvyydelle myös sijainnin. Kosteikon pohjan korkeus karttakoordinaatistossa saadaan vähentämällä kaikuluodatut syvyydet RTK-GPS:llä mitatusta vedenpinnan korkeudesta. Hyvin matalia alueita voidaan kartoittaa mittasauvan päässä olevalla RTK-GPS:llä, jolloin vertikaalinen ja horisontaalinen tarkkuus ovat hyviä, mutta kattavan aineiston kerääminen hitaampaa (Flener ym. 2013).



Kuva 16. Kaikuluotaus kelluvaan alustaan kiinnitettyllä ADCP:llä. Yhden ja useamman säteen kaikuluotauksen havainnollistava kaaviokuva.

Virtavesiympäristöjen topografian kartoitus voi niiden luonteesta johtuen olla haastavaa huolimatta teknologian kehityksestä. Williams ym. (2014) mainitsee kolme päähaastetta liittyen topografian kartoitukseen jokiympäristöissä: 1) monimutkainen morfologia, 2) vaihteleva vedenalainen ja vedenpinnan yläpuolinen topografia ja 3) sedimenttikuljetus. Topografian monimutkaisuus, eli vaihteleva kaltevuus, edellyttää dataalta korkeaa vertikaalista tarkkuutta. Myös Hohenthal ym. (2011) mainitsevat kumpuilevan maanpinnan aiheuttavan haasteita TLS-datan peittävyydelle. Vedenalaisen ja -päällisen topografian yhdistelmä vaatii käyttämään eri lähteistä olevaa dataa (Williams ym. 2014). Yleensä datojen yhdistäminen tarkoittaa, että tiheämmin kerättyä dataa vedenpinnan yläpuolelta yhdistetään syvyysdataan, jonka pistetiheys on harvempi. Sedimenttikuljetus aiheuttaa haasteita topografian mittaamiselle, jos uoma kartoitetaan sedimentoitumista hitaammin. Myös kasvillisuus hankaloittaa topografian kartoitusta. Tiheä latvusto voi estää GPS-signaalien kulkua (Scherer ym. 2012). Hohenthal ym. (2011) mukaan kasvillisuus häiritsee TLS-mittauksia, mikä voidaan välttää mittaamalla kasvukauden ulkopuolella, jolloin pienempi kasvillisuus-pinta-ala heijastaa laserpulssia. Jalonen (2015) suosittelee tulvatasanteiden laserkartoitusta tehtäväksi keväällä ennen kasvipeitteen muodostumista. Avovesikosteikkojen syvyydet ovat myös tyypillisesti pieniä (Kadlec & Wallace 2009: 22), joten mittausmenetelmien on kyettävä pienipiirteiseen mittaukseen.

Kartoitusaineisto sekä vedenalaisesta että kuivan maan topografiasta koostuu käytännössä yksittäisten pisteiden joukoista, joilla on X-, Y- ja Z-koordinaatit. Tällaista yksittäisistä pisteistä koostuvaa aineistoa kutsutaan usein pistepilveksi (esim. Flener ym. 2013: 6399). Näistä yksittäisistä pisteistä luodaan yhtenäinen pinta interpoloimalla, eli täyttämällä pisteiden välit mitattuihin pisteisiin perustuen. Laserkeilausaineistoa voidaan suuren pistetiheyden vuoksi käyttää mallina myös ainoastaan suodattamalla siitä ylimääräinen pois (esim. Alho ym. 2009). Interpolointimenetelmiä pinnanmuotojen mallintamiseen on monia, kuten kolmiointi (engl. *triangulation*) ja lähimpien naapurien mukainen keskiarvotus (engl. *nearest neighbour*). Nämä perinteiset menetelmät eivät kiinnitä huomioita ilmiöiden spatiaaliseen vaihteluun (Oliver & Webster 1990). Parhaiten spatiaalisen datan, kuten korkeustietojen, satunnainen vaihtelu kuvataan geotilastollisilla menetelmillä, esimerkiksi krigingillä (Oliver & Webster 1990). Lopputuloksena on yleensä tasaisen kokoisesta ruudukosta koostuva pinta, jossa ruudukon solun arvo kuvastaa korkeutta keskellä ruutua (Fuller ym. 2003). Yhtenäisiä pintoja kutsutaan digitaalisiksi korkeusmalleiksi (engl. *digital elevation model, DEM*), digitaalisiksi maanpintamalleiksi (*digital terrain model, DTM*) tai digitaalisiksi pintamalleiksi (engl. *digital surface model, DSM*) (Hohenthal ym. 2011: 789). DSM:ssä mallinnetaan kahdesta muusta poiketen myös kasvillisuus, eikä vain paljasta maanpintaa.

2.4.2 Virtauksen mittaus

Veden virtauksen luotettava mittaus on perusta hyvälle vesistöjenhoidolle (Holden 2017: 468). Monesti uomassa virtaavan veden määrää tarkkaillaan vedenpinnan korkeuden muutosta seuraamalla. Luotettavimmin vedenpinnan korkeuden eli vesimäärän vaihtelua voidaan tarkkailla erilaisten patorakenteiden muuttumattomissa poikkileikkauksissa. Mitatut korkeudet voidaan muuttaa virtaamiksi, kun eri vedenpinnan korkeuksilla on mitattu myös virtaama (Holden 2017: 468–469). Vedenpinnan korkeuden vaihtelua voidaan ilman patorakenteita tarkastella esimerkiksi vedenpaineanturien avulla, ja muuttaa näin saatu jatkuva vedenpinnan korkeuden seuranta virtaamaksi mittausten avulla (esim. Kasvi ym. 2013). Vedenpaineanturien etuna on vedenpinnan korkeuden vaihtelun luotettava seuranta ilman kiinteitä mittapatorakenteita. Edellytyksenä on riittävä syvyys sille, että anturi pysyy vedenpinnan alapuolella.

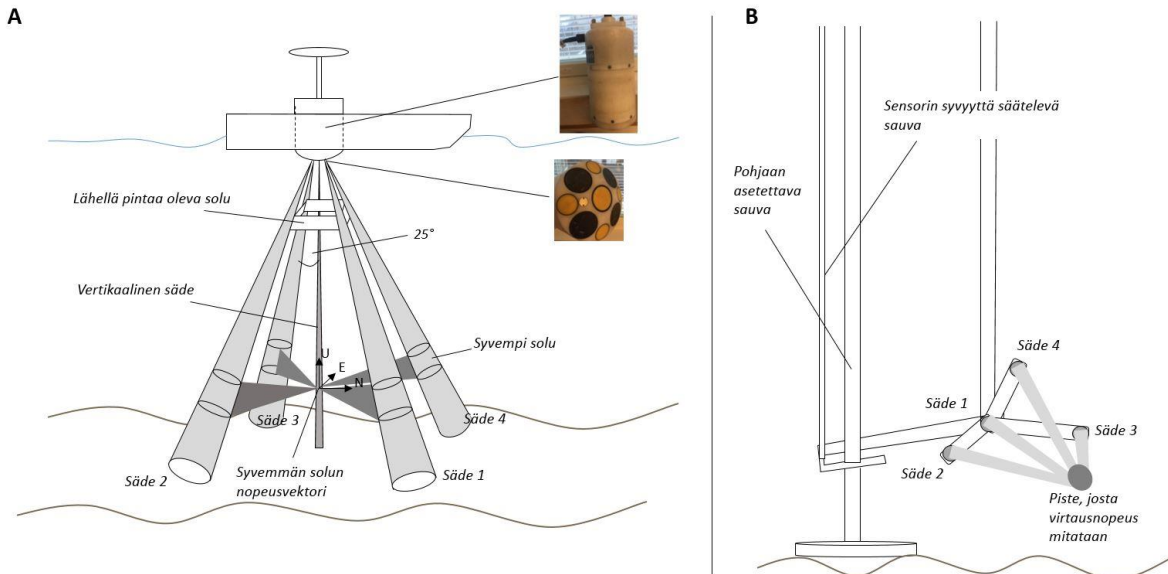
Virtaaman mittaukseen uomissa on monia menetelmiä. Eri mittaustavat voidaan luokitella nopeus–pinta-ala -menetelmiin, akustiseen mittaukseen, ja pitoisuusmittauksiin (Holden 2017: 470–471). Nopeus–pinta-ala -menetelmä perustuu uoman pinta-alan ja virtausnopeuden arviointiin. Virtausnopeutta voidaan mitata perinteisemmällä siivikoilla tai akustisilla sensoreilla. Virtausnopeuden karkeaan arviointiin voidaan käyttää aikaa, joka uomaan heitetyllä esineellä kestää kulkea ennalta mitattu matka. Uomassa liikkuvien esineiden seurantaan perustuvaa virtausnopeusmittausta voidaan tehdä myös drone-ilmakuvauksella (Tauro ym. 2016). Nopeus–pinta-ala -menetelmässä uoman poikkileikkaus jaetaan osiin, joissa jokaisessa mitataan virtausnopeus (Holden 2017: 470–4719). Tällöin virtaama Q saadaan kaavasta:

$$Q = V_1A_1 + V_2A_2 + \dots + V_nA_n,$$

missä V_1 = nopeus poikkileikkauksen osiossa 1, A_1 = osion 1 pinta-ala, V_2 = nopeus poikkileikkauksen osiossa 2, A_2 = osion 2 pinta-ala ja V_n = nopeus poikkileikkauksen n:essä osiossa, A_n = osion n pinta-ala. Menetelmä toimii, mutta on karkeampi kuin esimerkiksi akustinen mittaus.

Akustisia ultraäänimittareita voidaan käyttää uoman vastakkaisilla puolilla, jolloin ne laskevat virtaamaa sen perusteella, kuinka paljon aikaa säteellä kestää kulkea uoman läpi eri syvyyksillä (Holden 2017: 470–471). Tällainen akustinen mittaus toimii kirkasvetisissä uomissa. Sameissa uomissa voidaan käyttää Dopp-

lerin ilmiöön perustuvia akustisia mittareita, jotka mittaavat virtausnopeutta akustisten säteidensä heijastumisesta takaisin suspentoituneista partikkeleista ja muista veden epäpuhtauksista. Säde heijastuu takaisin eri taajuudella kuin sensori on sen lähettänyt, ja taajuuden muutos on verrannollinen heijastavan kohteen nopeuteen (Holden 2017: 471). ADCP-laitteet toimivat näin Dopplerin ilmiöön perustuen, ja mitaavat virtauksen liikesuuntaa ja nopeutta (kuva 17). Jotta mittaus onnistuu, on sensorin liikuttava hitaammin kuin veden virtaus, mikä aiheuttaa ongelmia kosteikkoaltaiden hyvin hitaissa tai seisovissa virtausoloissa. ADCP:t toimivat etenkin suurempien uomien mittauksessa (esim. Flener 2015; Kasvi ym. 2013), koska niiden toimintatavassaan on minimisyvyys, jota matalammassa vedessä mittaus ei onnistu. Mittasauvan päässä olevia akustisia sensoreita voidaan käyttää nopeus–pinta-ala -menetelmässä kuten siivikoita.



Kuva 17. A) Kelluvaan alustaan kiinnitetyn ADCP:n toimintaperiaate. Virtauskenttä rekisteröityy neljällä säteellä, jotka ovat 25° kulmassa vertikaaliseen säteeseen nähden. Lähellä pintaa oleva solu havainnollistaa solun tilavuuden laskentaperiaatetta: pinnassa solut ovat pienempiä kuin lähellä pohjaa. Virtausnopeus ja suunta (nopeusvektori) määrittyy ympäröivien signaalien keskiarvona. Mukailten Flener (2015: 24) ja Salmela (2017: 24). B) Akustisen virtausnopeusmittarin toimintaperiaate. Sensori lähettää akustisia säteitä veden virtausta vasten yhteen pisteeseen, jonka virtausnopeuden sensori mittaa. Sensorin syvyys voidaan asettaa halutuksi. Mitatessa laitteelle ilmoitetaan syvyys prosentteina, sekä etäisyys uoman reunasta. Usealla poikkileikkauksen eri kohdissa tehdyllä mitauksella lasketaan virtaama. Mukailten Sontek (2018).

Pitoisuuden vaihteluun perustuvat mittausmenetelmät perustuvat merkkiaineen säännöstellyn pitoisuuden lisäämiseen uomaan (Holden 2017: 471). Merkkiaineena voidaan käyttää esimerkiksi natriumkloridia eli ruokasuolaa. Virtaama lasketaan perustuen kaavaan:

$$Q = \frac{(C_i - C_b)V}{\int (C_d - C_d) dt}$$

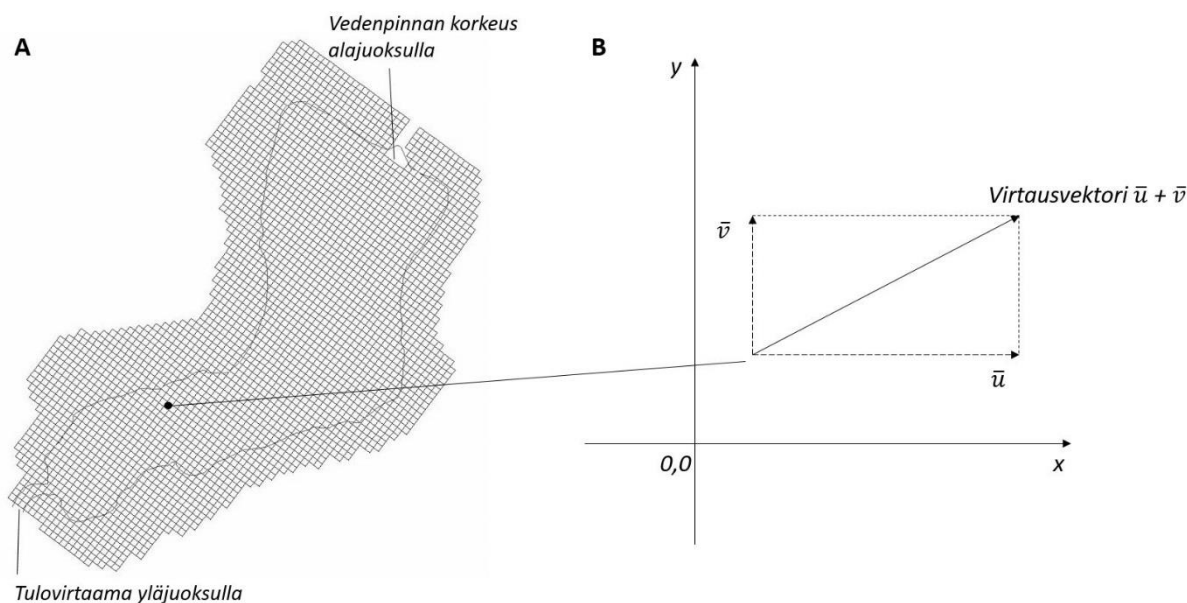
missä Q = virtaama, C_i = merkkiaineen pitoisuus lisätyssä vedessä, C_b = merkkiaineen taustapitoisuus uoman massa, V = uomaan lisätty vesitilavuus, C_d = mitattu merkkiaineen pitoisuus alajuoksulla veden lisäyksen

jälkeen ja $t =$ mittauksen kesto. Merkkiaineen pitoisuus saapuu alajuoksulle nousevana ja laskevana käyränä. Kun pitoisuus ei enää ylitä taustapitoisuutta, on koko merkkiaine valunut uomassa ohi alajuoksun tarkkailupisteen.

2.4.3 Veden virtauksen mallinnus

Sanakirjamääritelmän mukaan malli on ”todellisuuden kuvaus, jossa asian olemus kuvataan yksinkertaistettuna, jotta kyseinen asia olisi helpompi hahmottaa ja ennakoida” (Allaby 2008, vapaa suomennos). Vastaavasti mallinnus tarkoittaa asian esittämistä esimerkiksi tietokoneanalyysin avulla (Park 2012). Mallinnus tai simulointi ovat tapoja tutkia virtaustilanteita kattavammin, kuin kenttämittauskampanjoilla kyettään kartoittamaan (Kasvi 2015: 48). Simuloimalla voidaan myös tarkastella hypoteettisia tilanteita, kuten harvinaisia suurempia tulvia, ja analysoida niiden potentiaalisia vaikutuksia ympäristössä, jossa veden virtaus tapahtuu. Veden virtauksen mallintaminen nykyisin tapahtuu laskennallisen nestedynamiikan (engl. *computational fluid dynamics, CFD*) menetelmillä. CFD tarkoittaa numeerisen analyysin käyttöä lämmön tai aineen kulkeutumisen tutkimisessa (Zikanov 2010). Avovesiuomien ja -altaiden virtauksen mallinnusta kutsutaan myös hydrauliseksi mallinnukseksi.

Avovesivirtauksen mallinnus tapahtuu laskennallisessa ruudukossa, jossa ruutujen arvot kuvaavat veden liikesuuntaa ja virtauksen voimakkuutta (kuva 18). Hydraulinen mallinnus jaotellaan usein tarkasteltavien ulottuvuuksien määrän mukaan. Yksiulotteinen eli 1D-mallinnus tarkastelee veden liikettä jokaisessa ruudussa yhteen suuntaan ilman eri syvyyksiä. Kaksiulotteisessa (2D) mallinnuksessa veden virtaus on syvyyskeskiarvotettu ja jokaisessa ruudussa on veden liike sekä x - että y -vektorin suhteen. Kolmiulotteinen (3D) mallinnus laskee veden liikettä x -, y - ja z -vektorien mukaan. Näennäis-3D-mallinnuksessa (esim. Kasvi 2015) virtauskenttää voidaan tarkastella eri syvyyskerroksien mukaan, jolloin jokaisen kerroksen x - ja y -vektorien mukaisesta virtauksesta voidaan hahmottaa virtauksen kolmiulotteinen rakenne.



Kuva 18. A) Esimerkki kosteikon virtausmallinnusruudukosta. Kuvaan on merkitty tulovirtaaman ja alajuoksun vedenpinnankorkeuden rajaehtojen sijainti. Altaan ja tuloومان rajat merkitty ruudukon päälle. B) Yhden mallinnusruudukon solun horisontaalisen virtauksen määrittäminen x - ja y -suuntaisten vektorien yhteisvaikutuksena.

Laskennallisessa ruudukossa tapahtuva virtausmallinnus ratkaisee veden liikkeen kussakin solussa numeeristen yhtälöiden avulla. Näennäis-3D-mallinnuksessa veden vertikaalisen liikemäärän yhtälö on kaava

$$\frac{\partial P_h}{\partial \sigma} = -\rho g h,$$

missä P_h = hydrostaattinen paine ja σ = vertikaalinen sigmakoordinaatti, ρ = veden tiheys (kg/m^3), g = pu-
toamiskiihtyvyyys (m/s^2) ja h = vedenpinnan korkeus eli etäisyys pinnasta (m) (Kasvi 2015: 35). Näennäis-
3D-mallinnuksessa eri syvyyksillä sijaitsevien vesikerrosten horisontaaliset liikesuunnat lasketaan erik-
seen, ja kerrosten välinen liike määräytyy edellä kuvatulla kaavalla vesipatsaan muodostamaan painee-
seen perustuen. Horisontaalisen liikemäärän yhtälö on x-koordinaatin suhteen

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\omega}{d} \frac{\partial u}{\partial \sigma} = -\frac{1}{\rho_0} P_x + \frac{1}{d^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(V_v \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + V_h \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right)$$

ja y-koordinaatille vastaavasti

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\omega}{d} \frac{\partial v}{\partial \sigma} = -\frac{1}{\rho_0} P_y + \frac{1}{d^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(V_v \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) + V_h \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right)$$

joissa

u ja v = nopeuskomponentit tasokoordinaatistossa

$P_{x,y}$ = paine (Pa)

d = veden syvyys (m)

ρ_0 = veden referenssitiheys (kg/m^3)

ω = vertikaalinen nopeuskomponentti σ -koordinaatistossa (m/s)

V_v = vertikaalinen pyörreviskositeetti

V_h = horisontaalinen pyörreviskositeetti (Kasvi 2015: 35).

σ -koordinaatiston tasot seurailevat pohjan topografiaa ja veden vapaata pintaa, eivätkä siten ole täysin
horisontaalisia (Deltares 2017: 182). Verrattuna näennäis-3D-mallinnuksen liikemääräyhtälöihin on sy-
vyyskeskiarvotetun 2D-mallinnuksen liikemääräyhtälö x-koordinaatille puolestaan muotoa

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{gu\sqrt{u^2v^2}}{C^2h} = -\frac{1}{\rho_0} P_x + F_{sec,x} + V_h \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right)$$

ja y-koordinaatin suhteen

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial h}{\partial y} + \frac{gv\sqrt{u^2v^2}}{C^2h} = -\frac{1}{\rho_0} P_y + F_{sec,y} + V_h \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right)$$

missä C on Chézy'n kerroin ($\text{m}^{0.5}/\text{s}$) ja F_{sec} on sekundaarisen virtauksen vaikutusta huomioiva korjaustermi.
(Kasvi 2015: 35–36). Painegradientit x- ja y-suunnassa lasketaan olettaen tasaista veden tiheyttä kaavoilla

$$\frac{P_x}{\rho_0} = g \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial p}{\rho_0 \partial x} \text{ ja}$$

$$\frac{P_y}{\rho_0} = g \frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\partial p}{\rho_0 \partial y},$$

missä p = ilmanpaine (Pa) (Kasvi 2015: 36). Horisontaalisiin liikemääräyhtälöihin liittyy vielä yksinkertais-
tettu Reynoldsin rasisus. Horisontaalisen jatkuvuuden eli massan säilymisen yhtälö sekä 2D- että 3D-mal-
linnukselle kirjoitetaan muodossa

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial [h\bar{u}]}{\partial x} + \frac{\partial [h\bar{v}]}{\partial y} = 0,$$

missä ζ = vedenpinnan korkeus (m) sekä \bar{u} ja \bar{v} = syvyyskeskiarvotetut nopeuskomponentit (m/s) (Kasvi 2015: 36).

Yksi veden virtauksen onnistuneeseen mallintamiseen keskeisesti vaikuttava parametri on uoman tai altaan hydraulinen vastus. Hydraulinen vastus tarkoittaa yksinkertaisesti materiaalin, kuten kasvillisuuden tai kiven, veden virtaukselle tuottamaa vastusta (Mayhew 2009). Se voidaan kuvata laskennallisesti esimerkiksi Manningin yhtälöstä (Manning 1891, cit. Allaby 2008) laskettavalla karkeuskertoimella (tai Manningin n -arvolla). Se kuvastaa virtausta vastustavaa kitkaa uoman pohjan ja veden kontaktipinnassa. Manningin yhtälö, jolla voidaan laskea avoimen uoman keskimääräinen virtausnopeus, kirjoitetaan nyky muodossaan seuraavasti (Allaby 2008; Gilvear & Jefferies 2017: 499):

$$V = \frac{R^{2/3} s^{1/2}}{n},$$

missä

V = veden virtausnopeus (m/s)

R = uoman hydraulinen säde

s = uoman kaltevuus (m/m)

n = karkeuskerroin

Hydraulinen säde on uoman poikkileikkauksen pinta-ala jaettuna poikkileikkauksen vesi-uoma-kontaktipinnan pituudella (Allaby 2008; Gilvear & Jefferies 2017: 497). Suurempi hydraulinen säde tarkoittaa tehokkaampaa veden virtausta uomassa. Karkeuskerroin kuvastaa veden virtausta hidastavaa vaikutusta uoman ja tulvatasangon pinnassa (Arcement & Schneider 1989). Suurempi arvo tarkoittaa pinnan suurempaa karkeutta eli virtausta hidastavaa vaikutusta. Monissa virtausta kuvaavissa kaavoissa käytetään karkeutena Chézyn arvoa C , jonka suhde Manningin n -arvoon on seuraava

$$C = \frac{\sqrt[6]{h}}{n},$$

missä h = veden syvyys ja n = Manningin karkeuskerroin (Deltares 2017: 197, 259).

Eri pintojen karkeuserojen vuoksi tutkittava alue on hyvä jakaa pienempiin osiin, joissa Manningin arvo kuvaa hyvin kutakin osiota (Arcement & Schneider 1989: 32). Esimerkiksi paljas savipohja uomassa hidastaa virtausta vähemmän kuin ruovikkoinen uoman osa tai kasvipeitteinen törmä, jonne vesi voi tulva-aikana nousta. Mallinnuksessa alueelliset erot voidaan kuvata jakamalla mallinnusaluealue karkeuskertoimeltaan erilaisiin osiin (esim. Ervine & Pender 2006: 2), mikä tapahtuu määrittämällä mallinnusruudukon eri osille omat karkeusarvonsa. Manningin karkeuskerrointa uoman ominaisuuksien mukaan on tutkittu jo 50- ja 60-luvuilta saakka (Cowan 1956, Chow 1959, Henderson 1966, Barnes 1967). Manningin n -arvo määräytyy monen tekijän yhteisvaikutuksesta, ja Cowan (1956) kehitti menetelmän, jolla kokonaiskarkeuskerroin uomassa voidaan arvioida seuraavan kaavan avulla:

$$n = (n_b + n_1 + n_2 + n_3 + n_4)m,$$

missä

n_b = perusarvo suoralle ja yhtenäiselle luonnolliselle uomalle

n_1 = pinnan epätasaisuuden korjauskerroin

n_2 = uoman poikkileikkauksen muodon ja koon vaihtelu

n_3 = esteet virtauskentässä

n_4 = kasvillisuuden vaikutus

m = uoman meanderoinnin korjauskerroin

Chow (1959) esitti karkeudelle valmiita oletusarvoja uomatyypin mukaan, huomioiden mutkittelutavan, syvyyssvaihtelut, kasvillisuuden ja uoman pohjamateriaalin. Cowania (1956) mukailleen Arcement & Schneider kehittivät tutkimuksessaan (1989) menetelmän Manningin n -arvon arvioimiseksi myös tulvatasanteelle. Heidän kaavansa on osineen käytännössä sama, mutta n_b on tulvatasanteen maaperän arvo, n_2 oletetaan nolllaksi ja m :n arvo on yksi. Edellä mainitut tekijät huomioiden Manningin n -arvoksi muodostui esimerkiksi vaihtelevan kokoista kasvillisuutta ja vähäisiä kaatuneita puita sisältävällä, melko tasaisella tiivismaaperäisellä tulvatasangolla 0.20. Vastaavasti samankaltaisella maaperällä varustettu tulvatasanko, jonka kasvillisuus koostuu käytännössä pelkästään puista, saa Manningin n -arvoksi 0.10. Arcementin & Schneiderin (1989) artikkelissa määritellyt tulvatasanteet on valokuvattu vertailun helpottamiseksi.

Uoman kasvillisuuden ominaisuuksien vaikutusta virtauksen hidastumiseen on tutkittu myös tarkemmin (Wilson 2007). Wilsonin (2007: 218) laboratorio-olosuhteissa tehdyssä tutkimuksessa esitellään virtaus-
syvyyden ja kasvien uponneisuuden yhteyttä Manningin n -arvoon. Suurempi virtaus-
syvyys ja kasvien uponneisuus vähensivät kasvillisuuden hidastavaa vaikutusta. Wilsonin tutkimuksessa (2007) vedenalaisten 16,5 cm korkeiden heinäkavien Manningin arvo vaihteli noin välillä 0,1–0,3. Korkeammalla ja tiheämmällä kasvillisuudella n -arvo voi kohota 0,4 asti (USDA 1947, cit. Wilson 2007: 218–219). Myös De Doncker ym. (2009) havaitsivat, että pienemmällä virtausalueella kasvillisuuden hidastava vaikutus on suurempi. Suurempi biomassa uomassa hidastaa virtausta moninkertaisesti verrattuna pieneen biomassaan, mikä tarkoittaa huomattavia eroja kasvukauden ja muun vuoden välillä. Suurempi virtauspinta-ala poikkileikkauksessa kuitenkin vähentää kasvillisuuden hidastavaa vaikutusta, kun korkea virtaama voi kyetä painamaan uomakasvillisuutta kumoon. De Donckerin ym. kenttämittauksiin pohjautuvassa tutkimuksessa (2009: 559–564) mitatut Manningin arvot vaihtelivat vuodenajoinnoin noin välillä 0,05–0,55. De Doncker ym. (2009) tarkastelivat kahta Belgiassa ja Puolassa sijaitsevaa jokea, joiden kasvillisuudesta voi löytyä virtauksen hidastumiseen liittyvää yhtäläisyyttä eteläisessä Suomessa sijaitsevien pienten uomien kasvillisuuden kanssa. Ajallisesti ja alueellisesti vaihtelevan kasvillisuuden vaikutusta virtaukseen on tutkimuksissa simuloitu Manningin arvon avulla (esim. Al-Asadi & Duan 2014).

Kasvillisuus kuitenkin vaikuttaa virtaukseen muutenkin kuin kitkana uoman tai altaan pohjassa. Kasvillisuuden vaikutuksia virtaukseen voidaan kuvata paremmin sisällyttämällä virtausmalliin kasvillisuuden 3D-geometria. Klassinen tapa kuvata veden virtauksen tiellä olevien kohteiden aiheuttamaa vastusta on kaava

$$F = \frac{1}{2} \rho C_D A_c u_c^2,$$

missä ρ = nesteen tiheys, C_D = kohteen vastuskerroin, A_c = kohteen pinta-ala ja u_c = virtauksen lähestymisnopeus (Hoerner 1965, cit. Västilä ym. 2013: 49). Vastuskerroin $C_D = C_D(Re)$ ja kohteen Reynoldsin numero Re saadaan kaavasta

$$Re = \frac{u_c l_c}{\nu},$$

missä l_c = kohteen pituus ja ν = veden viskositeetti (Västilä ym. 2013: 49). Tässä tutkimuksessa käytetty Delft3D-FLOW laskee kasvillisuuden vaikutuksen kitkavoiman vertikaaliseen jakautumiseen kaavalla

$$F(z) = \frac{1}{2} \rho_0 C_D \phi(z) n(z) |u(z)| u(z) [N/m^3],$$

missä $F(z)$ = kitkavoima syvyydellä, ρ_0 = veden vakiotiheys, C_D = lieriömäinen vastuskerroin (oletusarvo 1,0), $\phi(z)$ = kasvillisuuden varren paksuus syvyyden funktiona, $n(z)$ = varsien lukumäärä alueyksikköä kohti syvyyden funktiona ja $u(z)$ = horisontaalinen virtausnopeusprofiili (Deltares 2017: 267). Kasvillisuuden horisontaalinen poikkileikkausala syvyyden funktiona $A_{kasv}(z)$ saadaan kaavasta:

$$A_{kasv}(z) = \frac{\pi}{4} \phi^2(z) n(z),$$

missä $\phi(z)$ = kasvillisuuden varren paksuus syvyyden funktiona ja $n(z)$ = varsien lukumäärä alueyksikköä kohti syvyyden funktiona (Deltares 2017: 267). Kasvillisuuden vaikutus virtauksen vertikaaliseen sekoittumiseen näkyy ylimääräisessä lähde-termissä T , joka löytyy kineettisen turbulenttisen energian kaavasta

$$\frac{\partial k}{\partial t} = \frac{1}{1 - A_{kasv}} \frac{\partial}{\partial z} \left\{ (1 - A_{kasv}) \left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial z} \right\} + T + P_k - B_k - \varepsilon,$$

missä k = turbulenttinen kineettinen energia (m^2/s^2), t = aika (s), z = syvyys (m), ν = virtausnopeus (m/s), σ = skaalattu vertikaalinen koordinaatti, P_k = tuotantotermi (m^2/s^3), B_k = kelluvuustermi (m^2/s^3) ja ε = häviö (m^2/s^4). Syvyyden funktiona $T(z)$ määrittyy kitkavoiman $F(z)$ ja horisontaalisen virtausnopeusprofiilin $u(z)$ tulona. (Deltares 2017: 267).

Joustamattoman kasvillisuuden vaikutuksia virtauskenttään on tutkittu myös empiirisesti mittaamalla. Esimerkiksi Liu ym. (2008) havaitsivat virtauksen olevan syvyyden mukaan tasainen kasvillisuuden muodostaman yksikön sisällä, ja muuttuvan logaritmisesti sen ulkopuolella. Kasvillisuutta itseään on sisällytetty virtausmalleihin ja tutkittu kasvillisuustyyppikohtaista vaikutusta virtaukseen tarkemmin myös suomalaisessa kontekstissa (esim. Västilä ym. 2013; Västilä & Järvelä 2014; Jalonen 2015). Näissä edistyneemmissä simuloinneissa on huomioitu kasvillisuuden ominaisuuksia tarkemmin kuin joustamattomina tankoina. Västilä ym. (2013) kehittivät virtausmallinnuksessa käytettäviä muuttujia, joilla kasvillisuuden taipumista ja vaikutusta virtaukseen voi simuloida. Hyviksi muuttujiksi havaittiin lehtipinta-ala, virtausta vasten oleva pinta-ala veden alla ja päällä sekä lehtipinta-alan ja varsipinta-alan suhde. Västilä & Järvelä (2014) kehittivät mallin, jossa kasvillisuuden lehdille ja varsille laskettiin erikseen fyysisiä ominaisuuksia kuten pinta-ala ja virtausvastus. Jalonen (2015) tutki puuvartisten kasvien virtausvastusta ja muodonmuutoksia vaihtelevilla virtauksilla ja vedensyvyyksillä sekä maalaserkeilauksen soveltuvuutta kasvillisuuden määrän ja ominaisuuksien kartoituksessa.

Nykyaikaisen mallinnusohjelmiston (kuten Delft3D-FLOW) käyttäjän ei tarvitse osata laskea edellä kuvattuja kaavoja, vaan ohjelma laskee virtauksen perustuen sille annettuun syötteeseen. Syötteenä vaaditaan vähintään mallinnusalueen geometria, vedenpinta alajuoksulla sekä tulovirtaama yläjuoksulla. Muut arvot, kuten karkeuskertoimet ja kasvillisuus, syötetään kohtiin, joihin ohjelmisto niitä kysyy. Delft3D:ssä on mahdollista määritellä kasvien määrä alueittain, varsien määrä sekä varren pituus ja paksuus eri syvyyksillä. Tämä menetelmä ei ole yhtä hienostunut kuin Västilän ym. (2013), Västilän & Järvelän (2014) tai Jalosen (2015) mallinnukset, mutta huomioi kuitenkin kasvillisuuden olemassaolon muutenkin kuin pelkkänä pohjan kitkana.

Mallinnus on aina todellisuutta yksinkertaistava kuvaus (Coulthard & Van de Wiel 2012: 2123) ja sen tulos on korkeintaan yhtä hyvä kuin reunaehdot, joilla mallinnusta ohjataan (Ervine & Pender 2006). Veden

virtausta matemaattisesti kuvatessa tulee ymmärtää myös ilmiön monimutkaisuus. Kuten Helsingin yliopiston matematiikan professori Samuli Siltanen toteaa: ”Veden liikettä kuvaava yhtälö on niin hankala, että vuosisatojen yritysten jälkeen matemaatikot eivät ole pystyneet ymmärtämään, onko edes olemassa yksiselitteistä ratkaisua” (Hautamäki 2019: 48). Yksinkertaistavasta luonteesta johtuen mallien tuloksia on hyödyllistä tarkastella empiiristen mittausten avulla (Kasvi 2015: 48). Tarkastelu tapahtuu esimerkiksi vertaamalla mallin antamia tuloksia tilanteessa, josta on olemassa mittauksia. Tyypillistä on vertailla virtausmallin antamia vedenpinnan korkeuksia tai virtausnopeuksia ja -suuntia kentällä mitattuihin. Malliin syötettäviä arvoja joudutaan yleensä muuttamaan, jotta sen tulokset vastaavat mitattuja arvoja mahdollisimman hyvin. Tällöin mallin voidaan olettaa toimivan myös niinä ajankohtina, joilta ei ole mitattuja arvoja.

2.4.4 Vesiensuojelualtaiden suureiden laskenta

Veden nimellisviipymä kosteikoissa on laskettavissa yksinkertaisesti altaan tilavuuden ja pinta-alan mukaan kaavalla

$$t_n = \frac{V}{Q}$$

missä t_n = nimellisviipymä päivinä, V = kosteikon tilavuus (m^3) ja Q = virtaama kosteikkoon (m^3/d) (esim. Koskiaho ym. 2003: 90). Kosteikon vesitilavuus ei ole vakio, vaan se vaihtelee vuoden aikana kosteikkoon virtaavan veden määrän mukaan. Vettä lisäävien ja poistavien prosessien jakautumisesta johtuen on tyypillistä, että kosteikon sisään- ja ulosvirtaamat eroavat toisistaan. Veden lisääntyessä virtaus kiihtyy ja veden vähetessä virtaus hidastuu (Kadlec & Wallace 2009). Nimellisviipymää laskiessa tulisikin ottaa huomioon veden siirtyminen kosteikon yläjuoksulta alajuoksulle, jolloin korjatun nimellisviipymän (t_{kn} , d) kaava kirjoitetaan muodossa (Chazarenc ym. 2003, cit. Kadlec & Wallace 2009: 25)

$$t_{kn} = t_t \left(\frac{\ln(R)}{R-1} \right),$$

missä

- R = Q_l/Q_t , veden palautumismurto-osa (engl. *water recovery fraction*)
- Q_l = lähtövirtaama (m^3/d)
- Q_t = tulovirtaama (m^3/d)
- t_t = tulovirtaaman perustuva nimellisviipymä (d)

Nimellisviipymää laskettaessa voidaan käyttää myös tulo- ja lähtövirtaamien keskiarvoa. Tällöin virhemarginaali ei ole suuri, kunhan $0,5 < R < 2,0$ (Kadlec & Wallace 2009: 25). Valkama ym. (2017) hyödyntävät viipymän tarkastelussa jatkuvatoimisten sameusmittarien dataa kosteikon tulo- ja lähtöuomissa merkkiaineen tavoin. Tällä menetelmällä kosteikon viipymä määrittyy sameuspiikkien välisenä viiveenä yläjuoksun ja alajuoksun välillä (Valkama ym. 2017).

Kosteikon vesitilavuus ei ole vakio, vaan se vaihtelee vuoden aikana kosteikkoon virtaavan veden määrän mukaan. Nimellisviipymä ei anna tarkkaa kuvaa kosteikon veden vaihtumisesta. Mossin (2010) mukaan päävirtaus vesialtaan läpi voi tapahtua ikään kuin jokena altaan sisällä, jolloin suurin osa vesimassasta altaassa pysyy suhteellisen liikkumattomana. Todellisen viipymän mittaaminen onnistuu luotettavimmin syöttämällä altaan tulouomaan merkkiainetta, ja seuraamalla, kuinka kauan merkkiaineella kestää virrata

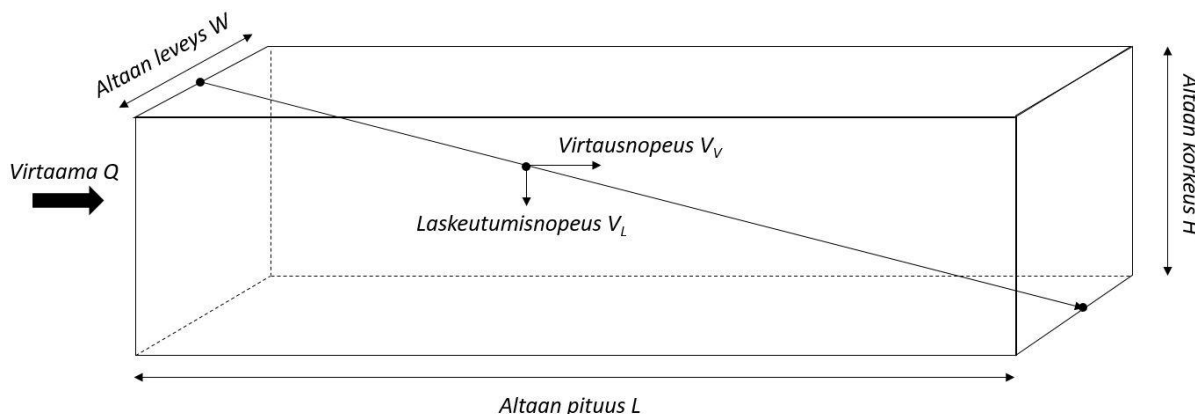
altaan läpi (esim. Koskiaho 2006; Puustinen ym. 2007: 57). Todellista viipymää voidaan myös arvioida ilman merkkiainetarkastelua kaavalla

$$t = \frac{V_{\text{aktiivinen}}}{Q} = \frac{\varepsilon h A_{\text{aktiivinen}}}{Q},$$

missä t = viipymä, $V_{\text{aktiivinen}}$ = virtauksen tilavuus kosteikossa (m^3), $A_{\text{aktiivinen}}$ = virtauksen pinta-ala kosteikossa (m^2), h = kosteikon syvyys (m) ja ε = veden täyttämä osuus tilavuudesta (Kadlec & Wallace 2009: 23). Haasteena edellisessä kaavassa virtaaman valinta, eli käytetäänkö tulo- vai lähtövirtaamaa. Aktiivisen virtauspinta-alan ja syvyyden määrittäminen riittävällä tarkkuudella voi olla haastavaa. Lisäksi veden täyttämä osuus tilavuudesta (ε) vaihtelee altaissa alueellisesti ja riippuu vesikasvillisuuden määrästä sekä laadusta. Virtaussimulaatioita voidaan hyödyntää viipymän tarkastelussa (esim. Koskiaho 2003).

Kosteikkojen vesitilavuutta on usein arvioitu hyvin yksinkertaisin, keskisyvyyteen ja pinta-alaan perustuvien menetelmin (esim. Braskerud 2002; Puustinen ym. 2007). Kadlec & Wallacen (2009: 22) mukaan joissain tapauksissa syvyyttä on arvioitu pelkästään suunnitelmien pohjalta, mikä voi johtaa suuriin mittavirheisiin. Tasapohjaiseksi suunniteltu kosteikon pohja voikin vettyessään muuttua muotoaan, jolloin eroa teoreettisiin pinnanmuotoihin syntyy. Tarkkoja syvyyskartoituksia tarvitaan kosteikkojen todellisten pinnanmuotojen, ja siten tilavuuden, laskentaan, kuten tässä tutkielmassa olen tehnyt. Virheelliset tilavuusarviot johtavat väärin arvioihin kosteikkojen nimellistilavuudesta (Kadlec & Wallace 2009: 22).

Suspensiokulkeuman laskeutumista kosteikkoaltaaseen voidaan tarkastella teoreettisesti altaan pinta-alan mukaan. Altaan alkupäässä veden pinnalla oleva hiukkanen voi laskeutua altaan pätyyn (kuva 19), kun hiukkasen virtausaika on yhtä suuri tai suurempi kuin hiukkasen koon mukainen laskeutumisaika (Puustinen ym. 2007: 55).



Kuva 19. Hiukkasen laskeutuminen vesialtaassa. Hiukkanen laskeutuu altaaseen, jos sen virtaus altaan läpi kestää kauemmin, kuin hiukkasella kestää laskeutua matka altaan pohjalle. Suurempikokoiset hiukkaset laskeutuvat nopeammin kuin pienet. Mukailten Puustinen ym. (2007: 55).

Laskukaavana edellinen voidaan ilmoittaa muodossa (Puustinen ym. 2007: 55).

$$\frac{L}{V_V} = \frac{H}{V_L} \leftrightarrow V_L = \frac{H V_V}{L},$$

missä H = altaan syvyys (m), L = altaan pituus, V_L = hiukkasen laskeutumisaika (m/s) ja V_V = veden virtausnopeus. Koska $V_V = Q/WH$ ja $L = A/W$, saadaan

$$V_L = \frac{Q}{WL} = \frac{Q}{A},$$

missä A = altaan pinta-ala (LW) (m^2) ja Q = virtaama (m^3/s). Niin sanotun pintakuormateorian mukaisesti suspensiossa kulkevan hiukkasen teoreettisesti vaatima allaspinta-ala voidaan siis lopulta ilmoittaa muodossa (Puustinen ym. 2007: 55):

$$A = \frac{Q}{V_L}$$

Todellisuudessa sedimentoitumisen arviointi ei ole yhtä yksiselitteistä, koska rakennettujen kosteikkojen altaat eivät ole tasasyvyisiä. Matalammissa altaissa suspensiossa kulkevat partikkelit voivat todennäköisemmin saavuttaa pohjan, koska laskeutumismatka on lyhempi (Braskerud 2002). Partikkelin on myös osuttava sellaiseen osaan virtauskenttää, jossa virtausnopeus sallii sen laskeutumisen.

Toisinaan puhutaan kosteikon hydraulisesta kuormituksesta (engl. *hydraulic loading rate, HLR*), joka tarkoittaa virtauksen sadantavastinetta (Kadlec & Wallace 2009: 22;) eli kosteikkoon tulevaa vesimäärää suhteessa kosteikon pinta-alaan (esim. Braskerud 2002; Puustinen ym. 2007: 8; Koskiaho & Puustinen 2019). Hydraulinen kuormitus on määritettävissä kaavalla:

$$q = \frac{Q}{A},$$

missä q = hydraulinen kuormitus (m/d), A = kosteikon vettynyt pinta-ala (m^2) ja Q = tulovirtaama kosteikkoon (m^3/d). Hydraulinen kuormitus pienenee, kun altaan pinta-ala kasvaa tai virtaama pienenee.

2.4.5 Veden puhdistumisen mittaus

Ravinteiden pidättymistä kosteikkoaltaisiin tarkkaillaan mittaamalla ravinne- ja kiintoainespitoisuutta, veden sameutta ja virtaamia kosteikkoihin laskevissa uomissa ja niistä pois virtaavissa uomissa (esim. Braskerud 2001, 2002; Koskiaho 2003; Koskiaho ym. 2003; Koskiaho & Puustinen 2019, Valkama ym. 2017). Kiintoainespitoisuudella tarkoitetaan suspensiossa kulkevan aineen määrää painoyksikkönä litraa kohti. Suspensiokulkeuman sedimentoitumista kosteikkoihin voidaan tutkia esimerkiksi kosteikon pohjaan asennettavilla ”lautasilla”, joihin kertyneen sedimentin määrää seurataan (esim. Braskerud 2002).

Vedenlaatua uomissa on tyypillistä tarkkailla ottamalla standardikokoisia vesinäytteitä, jotka analysoidaan laboratoriossa (esim. Braskerud 2002; Kadlec & Wallace 2009). Vesinäytteitä voidaan ottaa manuaalisesti sauvan päässä olevaan näytepulloon, jolloin vesinäytteen ottaja ei vaikuta näytteeseen esimerkiksi pohjasedimenttiä pölyttämällä. Hyvin matalissa vesissä näytteen ottaminen ilman pohjasedimentin pölyttämistä voi olla vaikeaa, koska jo näytepullon upottamisen aiheuttamat virtaukset tai pulloon virtaava vesi voivat aiheuttaa pohjasedimentin pölyttämistä (esim. Kadlec & Wallace 2009: 203). Kiintoainespitoisuus määritetään laboratoriossa punnitsemalla suodatusten ja kuivattamisen jälkeen (esim. Kadlec & Wallace 2009: 203). Orgaanisen aineen osuus lasketaan painohäviönä, kun näytettä on poltettu $550\text{ }^\circ\text{C}$:n lämpötilassa. Kiintoainepitoisuuden määrittäminen varsinkin pienissä pitoisuuksissa ($< 15\text{ mg/l}$) voi heitellä jopa 33 % (Gray ym. 2000, cit. Kadlec & Wallace 2009: 203).

Manuaalinen näytteenotto vie aikaa, mikä on tarkoittanut kohtalaisen harvaa näytteenottoväliä etenkin ennen 2000-lukua tehdyissä tutkimuksissa. Esimerkiksi Ekholmin ym. (1997) tutkimuksessa vesinäytteitä

oli vuosilta 1980–1991 otettu vain kerran kuukaudessa, ja hieman useammin tulva-aikoina. Vesinäytteiden otto voidaan tehdä myös automatisoidulla laitteistolla, joka pumppaa uomasta näytteitä halutulla intervallilla (esim. Braskerud 2002).

Vedenlaadun jatkuvatoimista mittaamista käytetään nykyisin laajalti (esim. Braskerud 2002; Koskiaho ym. 2015; Koskiaho & Puustinen 2019; Valkama ym. 2017), koska sen avulla on mahdollista havaita nopeita vaihteluita valumavesien laadussa (Kukkonen ym. 2013). Jatkuvatoimisella mittaamisella voidaan näin paremmin ymmärtää vesistökuormituksen dynamiikkaa kiintoaine- ja ravinnepitoisuuksien suhteen. Esimerkiksi Koskiaho & Puustinen (2019) toteavat jatkuvatoimisten sensorien datasta tehtävien analyysien olevan tarkempia, kuin mitä harvemmalla aikavälillä otetuista vesinäytteistä voidaan tehdä. Jatkuvatoimisten vedenlaatuantureiden tulokset tulee kalibroida mittauspaikkakohtaisesti laboratorionäytteiden avulla (esim. Kukkonen ym. 2013; Koskiaho ym. 2015). Rehevöitymiseen liittyvässä vedenlaatututkimuksessa on tyypillistä tarkastella laboratoriossa kokonaisfosforin, liukoisen fosforin, kokonaistypen, liukoisen typen ja kiintoaineen pitoisuutta sekä sähkönjohtavuutta ja pH:ta (esim. Ekholm ym. 1997).

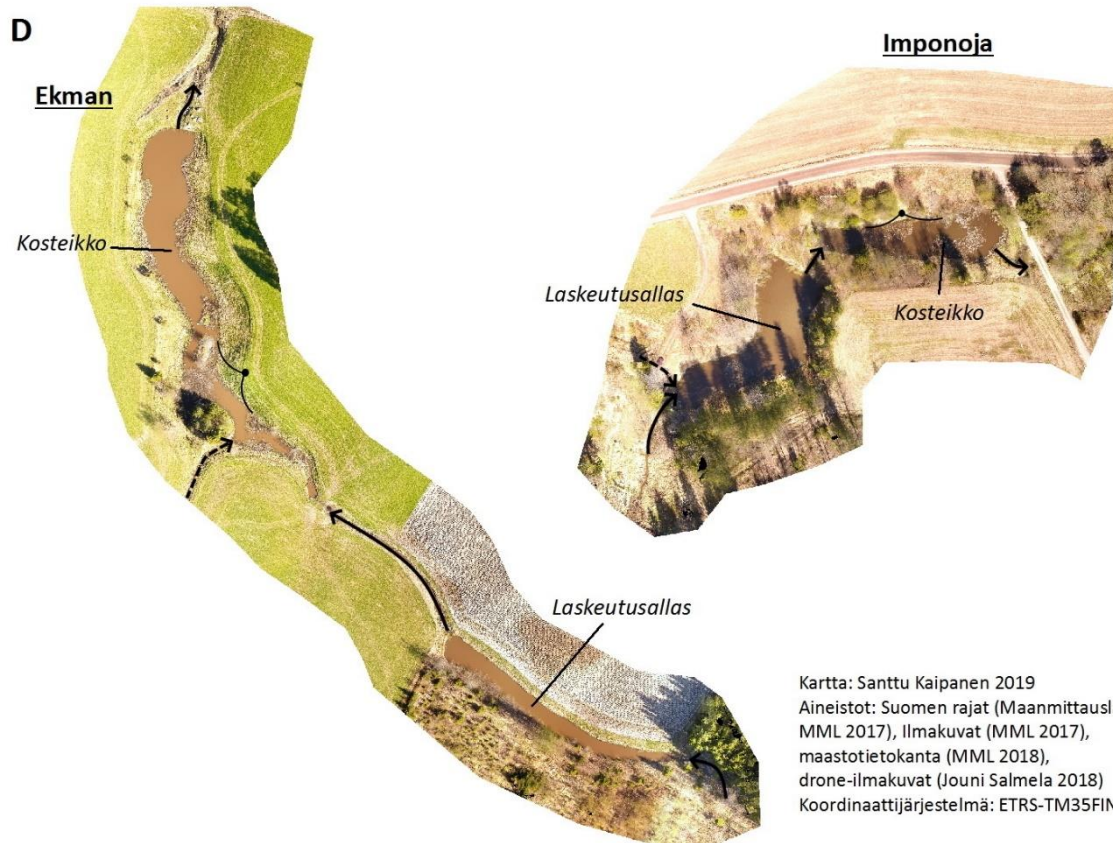
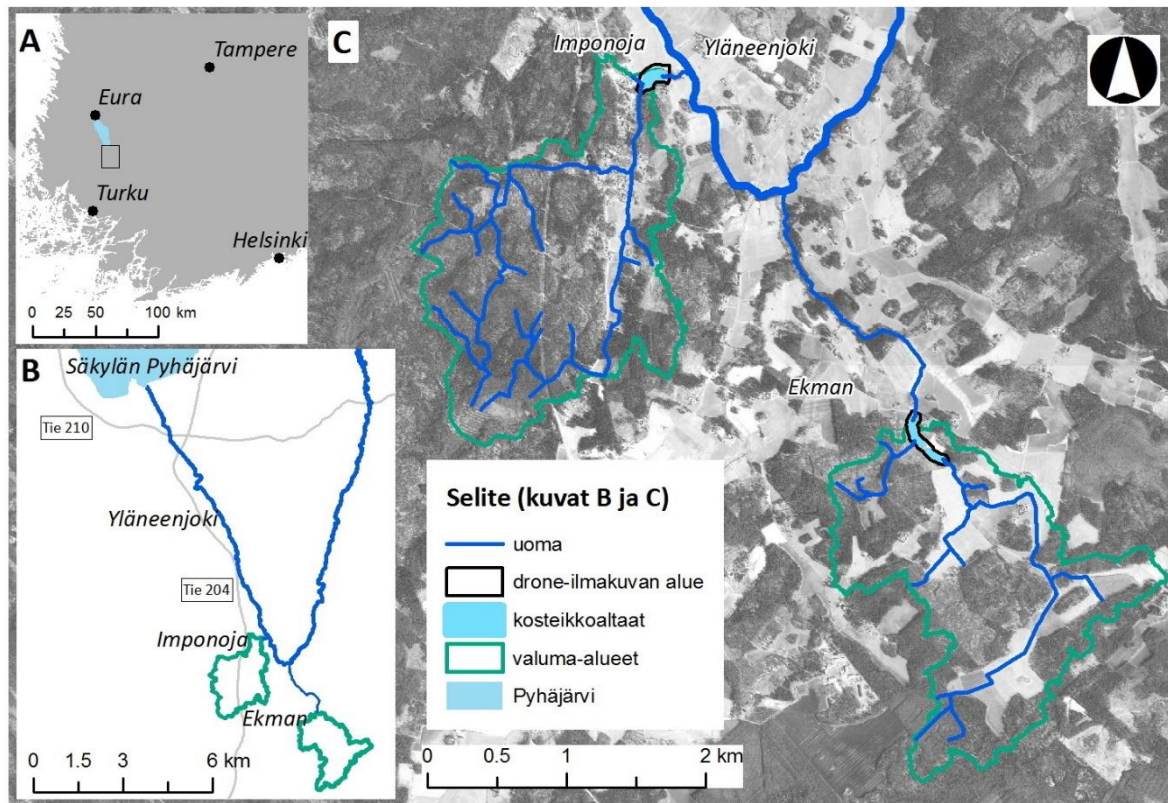
Jatkuvatoimiset mittarit tarkastelevat usein sameutta (*nephelometric turbidity unit*, NTU), jota voidaan kalibroinnin jälkeen käyttää sijaismuuttujana vesinäytteistä määritellyille ainepitoisuuksille, mikäli sameuden ja ainepitoisuuksien välinen riippuvuus on vahvaa. Lineaarisen regression avulla voidaan näin mahdollisesti tarkastella kiintoainepitoisuutta ja kokonaisfosforipitoisuutta ja/tai kiinteän fosforin pitoisuutta (Kukkonen ym. 2013). Varsinkin kiintoaines vesipatsaassa tuottaa sameutta, mutta myös liukoiset orgaaniset yhdisteet lisäävät veden sameutta (Kadlec & Wallace 2009). Kiintoaineen ja sameuden välinen yhteys on usein selvä tietyssä kosteikkosysteemissä, mutta vaihtelee systeemien välillä. Savipartikkelit sitovat fosforia itseensä voimakkaasti (Moss 2010: 43), joten fosforipitoisuuden laskeminen sameuden avulla onnistuu tyypillisesti savimailla. Nykyaikaiset sensorit kykenevät myös suoraan mittaamaan kosteikkoon tulevan ja sieltä lähtevän veden ravinnepitoisuutta. Esimerkiksi Koskiaho & Puustinen (2019) hyödyntävät tutkimuksessaan tällaisen sensorin dataa.

3. Tutkimusalue

Tutkittavat vesiensuojelukosteikot sijaitsevat Säkylän Pyhäjärveen laskevan Yläneenjoen valuma-alueella (kuva 20). Yläneenjoki ja Pyhäjoki muodostavat lähes 70 % Säkylän Pyhäjärven valuma-alueesta (Ekholm ym. 1997). Järven rehevöitymistä on tutkittu laajasti sitä voimistavien prosessien sekä kunnostustoimenpiteiden näkökulmasta (esim. Ekholm ym. 1997; Bärlund ym. 2007; Kirkkala ym. 2012; Kirkkala 2014; Ventelä ym. 2007; Ventelä ym. 2011).

Säkylän Pyhäjärvi on hyvä esimerkki suolattomien pintavesien laadun heikkenemisestä. 1970-luvulla järven vedenlaatu oli erinomaista, mutta 90-luvulla enää hyvää, ja 2000-luvulla järven tila oli jo mesotrofinen (Bärlund ym. 2007). Rehevöitymisprosessi eteni sekä ulkoisen että sisäisen kuormituksen vaikutuksesta (Ekholm ym. 1997). Ulkoisesta fosforikuormasta yli puolet (55 %) ja typpikuormasta 39 % oli peräisin peltoviljelystä ja karjataloudesta. Ulkoisesta fosforikuormasta noin 20 % ja typpikuormasta noin 30 % tuli ilmakehästä. Ekholmin ym. (1997) tutkimina 13 vuonna yli 80 % ulkoisesta ravinnekuormituksesta jäi Pyhäjärveen. Erityisesti fosforikuorman vähentämistä pidettiin tutkimustuloksiin perustuen tärkeänä Pyhäjärven rehevöitymisen pysäyttämiseksi ja vedenlaadun parantamiseksi (Bärlund ym. 2007). Ventelä ym. (2007) arvioivat, että ilmastonmuutoksen aiheuttama, lisääntyvä talviaikainen valunta vaikeuttaa valuma-alueelta tulevan ulkoisen kuormituksen vähentämistä. Erityisesti fosforikuorma vaikuttaisi lisääntyvän lämpimien talvien seurauksena (Ventelä ym. 2011). Maankohoaminen mataloittaa järveä erityisesti alajuoksulla (Kirkkala 2014: 21).

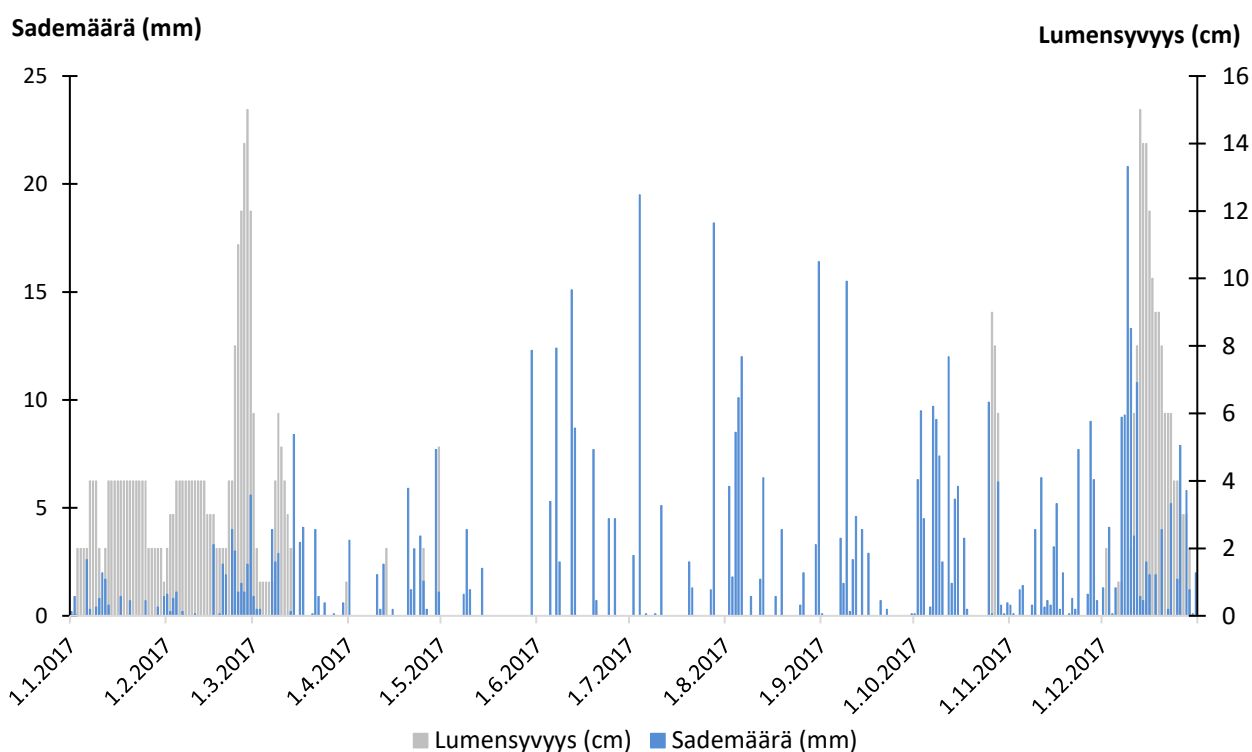
Imponojan vesiensuojelurakenne sijaitsee Uusikartanon kylässä Yläneellä, ja molemmat osat ovat valmistuneet vuonna 2000 (Pyhäjärvi-instituutti 2012). Ekmanin kokonaisuus sijaitsee lähellä Imponojaa Ristimäen kylässä Yläneellä, ja sen molemmat osat ovat valmistuneet 1997 (Pyhäjärvi-instituutti 2011). Molempia on rakentamisen jälkeen kunnostettu, Ekmanin laskeutusallasta viimeisimpänä 2016 ja Imponojan kokonaisuutta viimeksi 2009. Ekmanin vesiensuojelukokonaisuuden kunnostuksessa laskeutusaltaan ja kosteikon välistä patoa korjattiin, missä yhteydessä laskeutusallas myös ruopattiin. Imponojalla korotettiin laskeutusaltaan vedenpintaa korottamalla laskeutusaltaan ja kosteikon välistä patoa ja ruoppaamalla laskeutusaltaaseen kertynyttä sedimenttiä pois sekä avaamalla alajuoksulla sijaitsevaa hiekkasuodatinta.



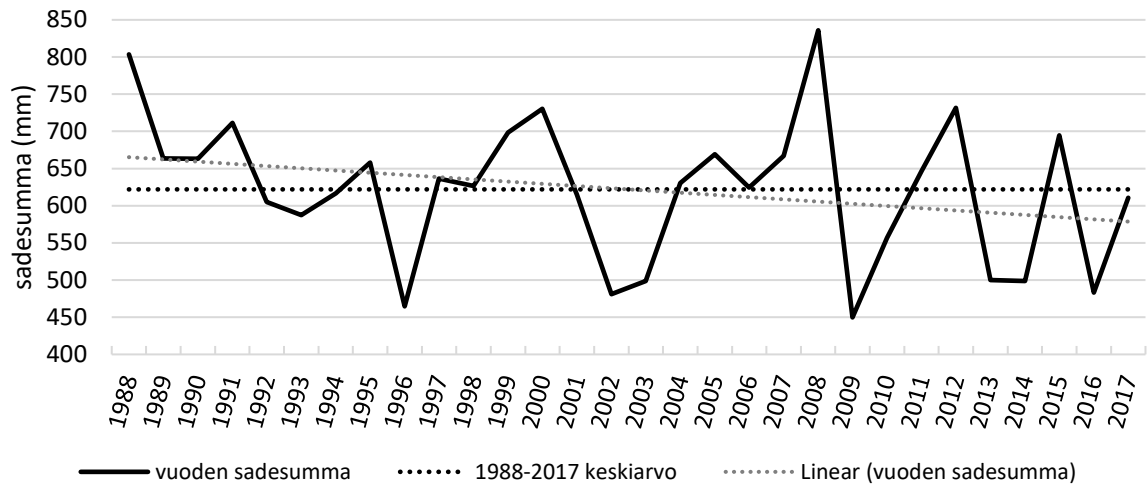
Kuva 20. A) Tutkimusalueen sijainti Varsinais-Suomessa. B) Kosteikkojen valuma-alueiden tarkempi sijainti. C) Kosteikkojen valuma-alueiden yksinkertaistetut uomaverkot. D) Kosteikkojen rakenteet drone-ilmakuvassa (drone-ilmakuva Jouni Salmela 2018). Nuolet kuvaavat altaisiin ja niistä pois virtaavia uomia. Katkoviivalla merkityt uomat, joiden virtausta ei ole huomioitu analyyseissa tai simulaatioissa. Ekmanin kosteikon toista tulouomaa ei mitattu, Imponojalta mitattiin 0,1 l/s virtaama 22.6.2017. Piste-kaari -yhdistelmät esittävät kuvien 24 A ja B ottopaikkoja. Maanmittauslaitoksen aineistot on ladattu Paituli paikkatietopalvelusta (CSC 2019).

Molemmat vesiensuojelukokonaisuudet ovat avoimen vedenpinnan altaita ja koostuvat laskeutusaltaasta ja kosteikosta siten, että laskeutusallas sijaitsee yläjuoksun puolella. Valuma-alueilta vesi siis laskee ensin laskeutusaltaisiin, joista se jatkaa kosteikkojen kautta eteenpäin. Kosteikoista vesi laskee Pyhäjärveen Yläneenjokeen kautta. Imponojan vesiensuojelukokonaisuus yhdistyy Yläneenjokeen alle 200 metriä pitkän ojan välityksellä. Ekmanin kosteikolta vesi valuu Yläneenjokeen pidempää reittiä Kreivilänjojan kautta. Laskeutusaltaan ja kosteikon kokonaisuuteen on Imponojalla yhdistetty myös Fosfilt-suodatin, jonka kautta vesi virtaa kosteikon jälkeen Yläneenjokeen (Imponojan vesiensuojelukokonaisuus 2012). Suodattimen suodatuskenttä on hiekkaa, johon on sekoitettu Fosfilt-materiaalia. Kyseisen suodattimien toimintaa Imponojan kosteikolla ovat tutkineet Kirkkala ym. (2012). Huolimatta suodattimen arvioidusta kyvystä poistaa nimenomaan fosforia tilanne Imponojalla oli tutkimuksessa kuitenkin se, että suodatin tukkeutui myös kunnostuksensa jälkeen ja alkoi vapauttaa fosforia. Tyyppikuormaa suodatin onnistui vähentämään.

Tutkimusalue kuuluu eteläboreaaliseen ilmastovyöhykkeeseen (Ilmatieteen laitos 2012). Eteläboreaalisen ilmastovyöhykkeen kesä on tyypillisesti pitkä ja lämmin, minkä seurauksena maaperä useimmiten kuivuu ja lämpenee hyvin, eikä soita muodostu kuin painanteisiin. Vuoden 2017 kokonaissademäärä alueella oli noin 611 mm (Ilmatieteen laitos 2019b) ja keskittyi kesään ja syystalveen (kuva 21). Kokonaissademäärä oli hyvin lähellä vuosien 1988–2017 keskiarvoa 623 mm/v (Ilmatieteen laitos 2019a) (kuva 22). Puusto on tyypillisesti runsasta, mikä lisää haihduntaa (Ilmatieteen laitos 2012). Terminen kasvukausi vuonna 2017 tutkimusalueella alkoi 1.5. ja päättyi 18.10. (Ilmatieteen laitos 2017). Kasvukaudella kasvillisuus täyttää kosteikkorakenteiden matalia osia ja uomia (kuva 23).



Kuva 21. Vuoden 2017 sademäärä ja lumensyvyys tutkimusalueella. Suurimmat yksittäiset sateet ajoittuivat kesään ja talveen, mutta kuukausitasolla eniten satoi joului- ja lokakuussa. Aineisto: Ilmatieteen laitos (2019b).



Kuva 22. Vuosien 1988–2017 kokonaissademäärät tutkimuskosteikkojen läheisellä Pöytyän säähavaintoasemalla. Aineistossa on havaittavissa lievästi laskeva trendi. Vuoden 2017 summa oli hieman alle aikajakson keskiarvon. Aineisto: Ilmatieteen laitos (2019a).



Kuva 23. Tutkimuksen vesiensuojelukosteikkojen tulo- ja lähtöumat kasvittuvat voimakkaasti kasvukaudella. Kuvat: Santtu Kaipainen.

Kosteikkojen valuma-alueet (kuva 20) ovat pääasiassa metsäisiä (taulukko 3). Ekmanin kosteikon valuma-alue kosteikon välittömässä läheisyydessä on kuitenkin maatalousvaltaisempaa (kuva 24). Maanpeitteiden vertailu kosteikkojen valuma-alueilla paljastaa, että Imponojan valuma-alue metsäisempi ja Ekmanin valuma-alue puolestaan peltovaltaisempi. Imponojan valuma-alueella rakennettua aluetta on enemmän kuin peltoja, mutta Ekmanin valuma-alueella pellot ovat metsien jälkeen yleisin maankäyttömuoto.

Taulukko 3. Valuma-alueen ja uomaverkoston tunnuslukuja sekä maanpeite ja pintamaalajit valuma-alueilla.

		Ekman	Imponoja
Valuma-alue	<i>Pinta-ala (km²)</i>	2.94	3.22
Uomaverkosto	<i>Pituus (km)</i>	6.58	11.75
	<i>Valumatiheys (km/km²)</i>	2.24	3.65
Vallitseva pintamaalaji <i>(raekoko mm)</i>	<i>savi (< 0.002)</i>	36.7 %	5.4 %
	<i>hiesu (0.002-0.02)</i>	0.1 %	-
	<i>hieno hietta (0.02-0.06)</i>	0.2 %	2.4 %
	<i>karkea hietta (0.06-0.2)</i>	1.3 %	16.9 %
	<i>hiekkä (0.2-2)</i>	0.6 %	-
	<i>hiekkamoreeni (0.06-600)</i>	11.3 %	11.8 %
	<i>Kalliomaa</i>	44.6 %	58.9 %
	<i>Turve</i>	5.3 %	4.4 %
	<i>Vesi</i>	-	0.3 %
Maanpeite	<i>pellot</i>	30.8 %	5.3 %
	<i>metsät</i>	65.6 %	82.4 %
	<i>rakennetut alueet</i>	3.5 %	9.9 %
	<i>suot ja kosteikot</i>	-	2.1 %
	<i>vesialueet</i>	0.1 %	0.3 %

Pintamaalajitieto: GTK:n Maaperä 1:20 000 -aineisto, GTK Avoin lisenssi CC 4.0, Hakku-palvelu 8.10.2019

raekoot luokiteltu Ronkainen (2012) perusteella

Maankäyttötieto: SYKE, Corine Land Cover 2018 20m x 20m

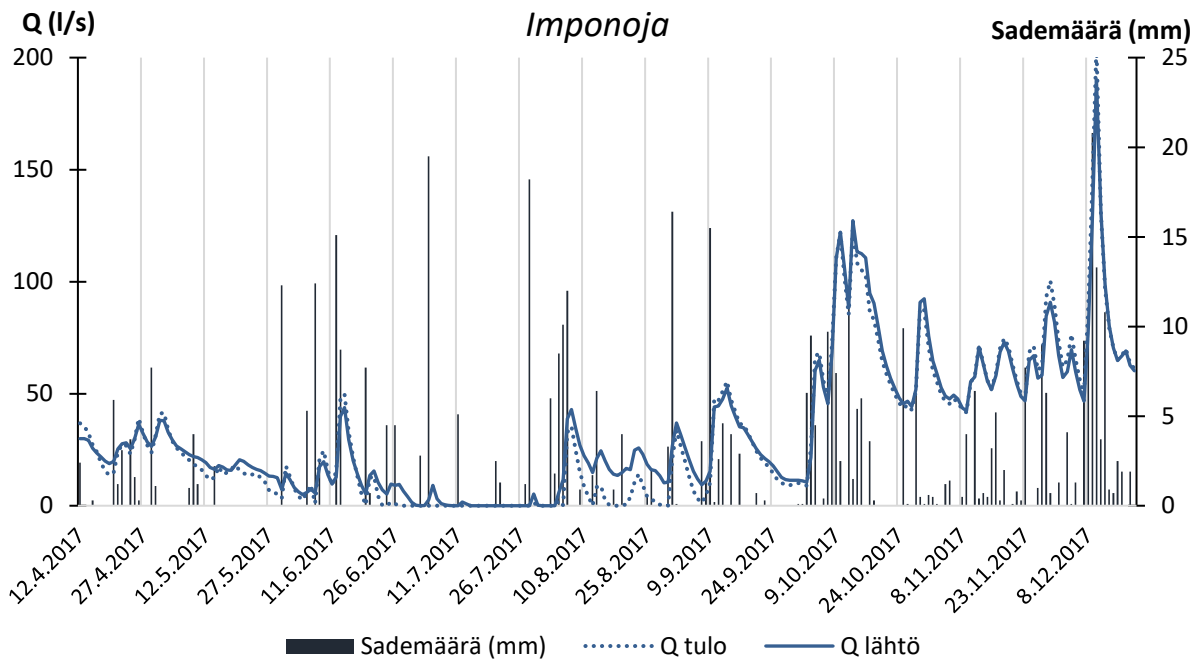
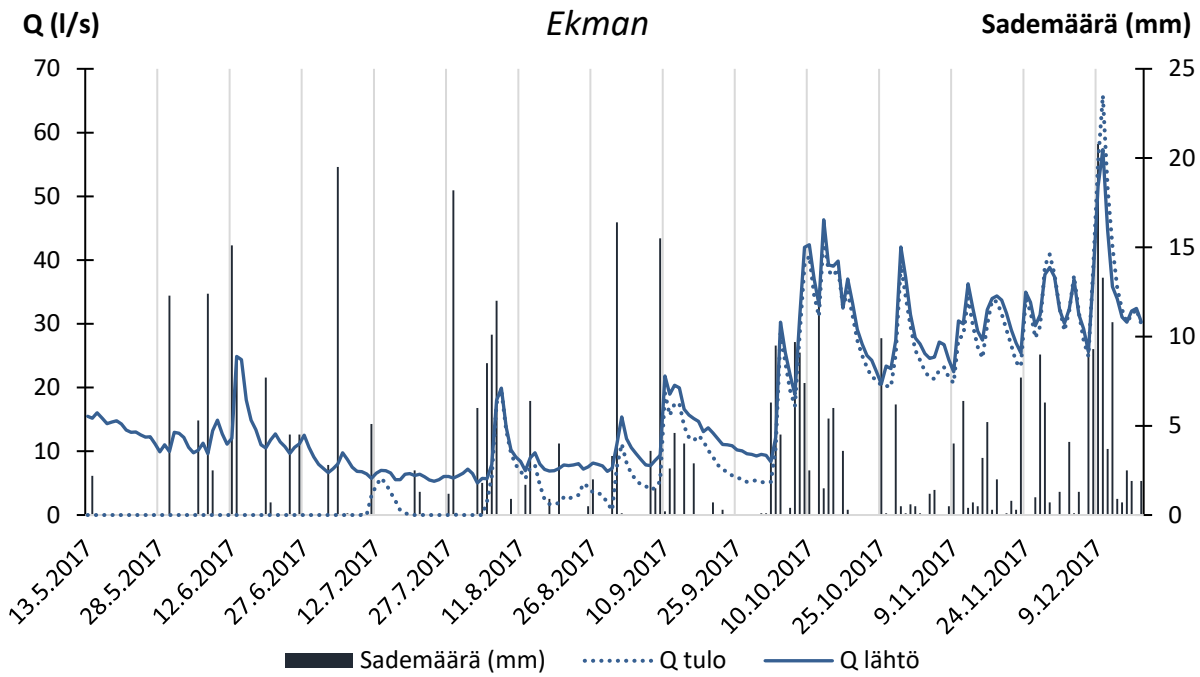


Kuva 24. Kosteikkoaltaita ympäröivän valuma-alueen eroa havainnollistava kuva. Ekmanin kosteikon ympäristö (A) on peltovaltaista, kun taas Imponojan kosteikkoa (B) ympäröi metsäinen maa. Kuvat: Santtu Kaipainen.

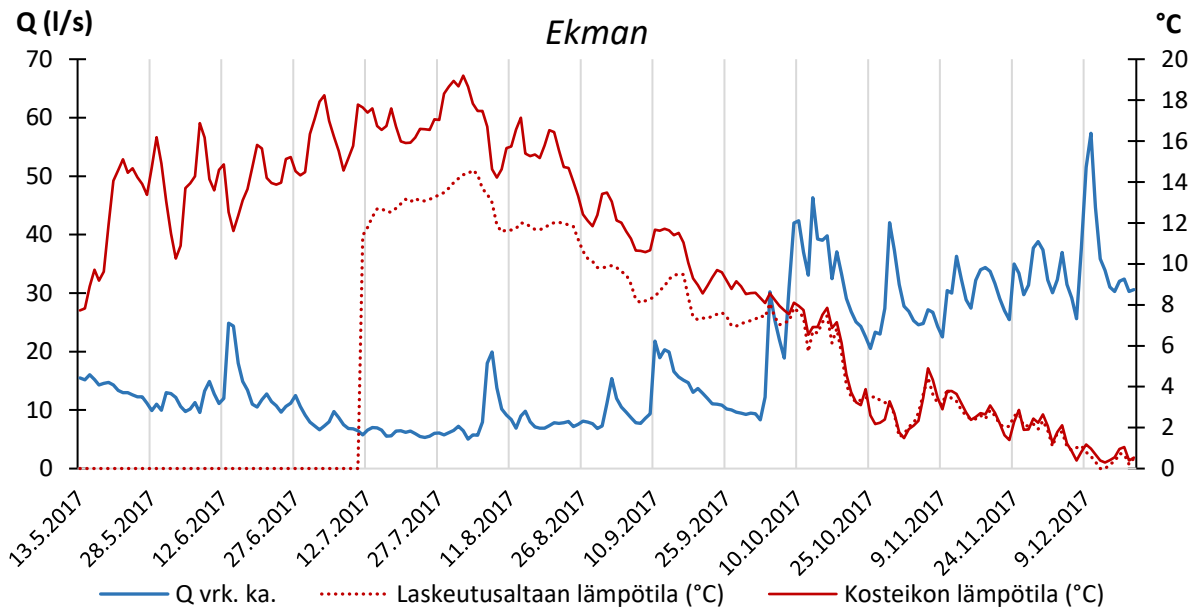
Tutkimuskosteikkojen valuma-alueet eroavat toisistaan myös pintamaalajien suhteen (taulukko 3). Molemmilla valuma-alueilla kalliomaa muodostaa suurimman osan, lähes tai yli puolet, pintamaasta, mutta

muiden maalajien suhteen on suuria eroja. Ekmanilla savi muodostaa valuma-alueen pintamaasta yli kolmanneksen ja hieta ainoastaan 1,5 %. Imponojan valuma-alueen pintamaasta on lähes viidennes hietaa ja savea vain 5,4 %. Pintamaalaji- (GTK 2018) ja maanpeitetiedoissa (SYKE 2018) on hieman eroa luokittelussa, sillä esimerkiksi Ekmanin valuma-alueen vesialueiden lukemat eroavat toisistaan aineistojen välillä. Ekmanin vesiensuojelukosteikkoa ei ole laskettu maanpeiteaineistossa kosteikoksi, mutta ei myöskään vedeksi pintamaalajaineistossa. Pintamaalaji- ja maanpeiteaineistot antavat kuitenkin hyvän yleiskuvan kosteikkojen valuma-alueiden oloista. Pintamaalajeilla on merkitystä, kun ajatellaan kiintoaineksen eroosiota, kulkeutumista ja sedimentaatiota. Hjulströmin (1935) mukaisesti raekoko yhdessä virtausnopeuden kanssa määrittää virtaavan veden aineskuljetusta (kuva 3, luku 2.1). Karkeampi aines sedimentoituu herkemmin kuin hienorakeisin savi, mutta vastaavasti myös erodoituu herkemmin kuin jo kertaalleen sedimentoitunut savi. Pelkästään raekoon perusteella voisi olettaa Imponojan kosteikon valuma-alueen olevan eroosion kannalta aktiivisempaa.

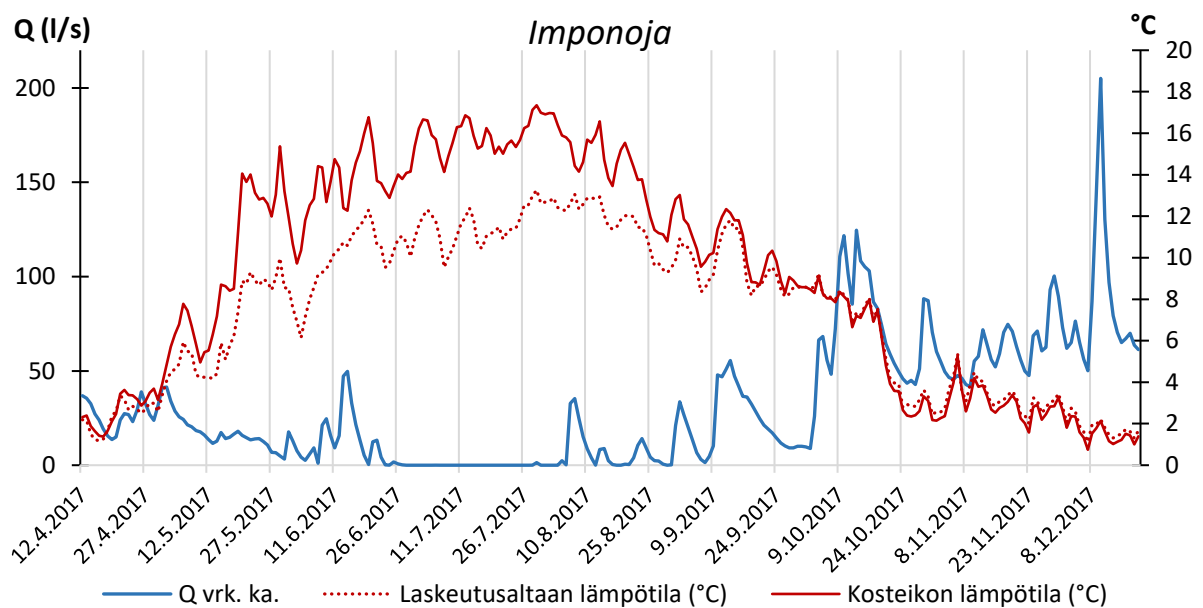
Huolimatta runsaista sateista, virtaamat vesiensuojelukokonaisuuksiin pysyivät läpi kesän pieninä lukuun ottamatta runsaimpien sateiden aiheuttamia valuntahuippuja (kuva 25). Kosteikkojen valumahuiput ajoittuvat mittausjaksolla (12.4.–19.12.2017 ja 12.5./10.7.–19.12.2017) syystalveen, jolloin maaperä ja kasvilisuus eivät hidasta valuntaa ja vesialtaiden lämpötila on alhainen (kuvat 26 ja 27). Tilanne tutkimuskosteikoilla on siis juuri, kuten Puustinen ym. (2007) kuvaa tyypillisiä olosuhteita suomalaisissa vesiensuojelukosteikoissa: vedenpuhdistuksen kannalta parhaissa olosuhteissa kesäaikaan tapahtuu vähiten veden virtausta. Kevään oletettua valumahuippua ei saatu mitattua kummallakaan tutkimuskosteikolla. Suurimmat mallinnetut virtaamat ajoittuivat molemmilla kosteikoilla talviaikaan 10.12.2017.



Kuva 25. Virtaamat ja sademäärä Imponojan kosteikolla (12.4.–18.12.2017) ja Ekmanin kosteikolla (13.5.–18.12.2017, Q-havainnot laskeutusaltaaseen 10.7.2017 alkaen). Sadedata Pöytyän säähavaintoasemalta (Ilmatieteen laitos 2019b).



Kuva 26. Ekmanin altaiden lämpötila suhteessa tulovirtaamaan vuorokausikeskiarvoina. Laskeutusaltaan lämpötilan äkillinen nousu heinäkuussa on harhaa, mittaukset alkavat 11.7.2017. Lämpötilat kuvattu punaisina käyrinä ja virtaama sinisellä.



Kuva 27. Imponojan altaiden lämpötila suhteessa tulovirtaamaan vuorokausikeskiarvoina. Tarkastelujakso 12.4–18.12.2017. Lämpötilat kuvattu punaisina käyrinä ja virtaama sinisellä.

4. Aineisto ja menetelmät

4.1 Yleiskuva aineistosta

Tutkielman aineistot on kerätty Turun yliopiston Maantieteen ja geologian laitoksen Virtavesien tutkimusryhmän ja Pyhäjärvi-instituutin yhteisessä projektissa. Tutkielman kirjoittaja on kerännyt vuoden 2017 virtaaman ja topografian aineistoja itse yhdessä muun Virtavesien tutkimusryhmän henkilöstön kanssa ja tarkistanut Imponojan valuma-alueen rajoja maastossa keväällä 2018. Vedenlaatuaineisto on Pyhäjärvi-instituutin henkilöstön keräämää ja esikäsittelyä. Kosteikkojen virtaamiin ja korkeusmalleihin liittyvän aineiston on tutkielman kirjoittaja käsitellyt alusta asti henkilökohtaisesti, kuten myös tässä tutkielmassa esitetyt vedenlaatuaineiston tunnusluvut ja keskinäiset yhteydet. Kaikki tutkielman analyysit ovat kirjoittajan itsenäisesti tekemiä.

Aineistona on edellä mainitusti kevät–syksyllä 2017 kerättyjä maastolaserkeilaus-, kaikuluotaus-, virtaama- ja veden-korkeusaineistoja. Lisäksi käytetään vuonna 2016 kerättyjä maastolaserkeilaus- ja kaikuluotausaineistoja sekä jatkuvista vedenlaadun seurannasta saatuja ravinnepitoisuusaineistoja vuodelta 2017. Tarkat ajankohdat yksittäisille mittauksille sekä mittausjaksoille on eritelty taulukossa 4.

Taulukko 4. Kenttämittausten aikataulu ja kattavuus. Taulukossa vertailtu vesiensuojelukokonaisuuksien tulo- ja lähtöomien sekä kaikkien altaiden aineistojen ajallista ja määrällistä kattavuutta. Vedenlaatuaineiston kohdalla esitelty lisäksi aineistosta saatavat muuttujat. 2016 mittaukset korostettu asteriskilla (*), muuten kaikki 2017.

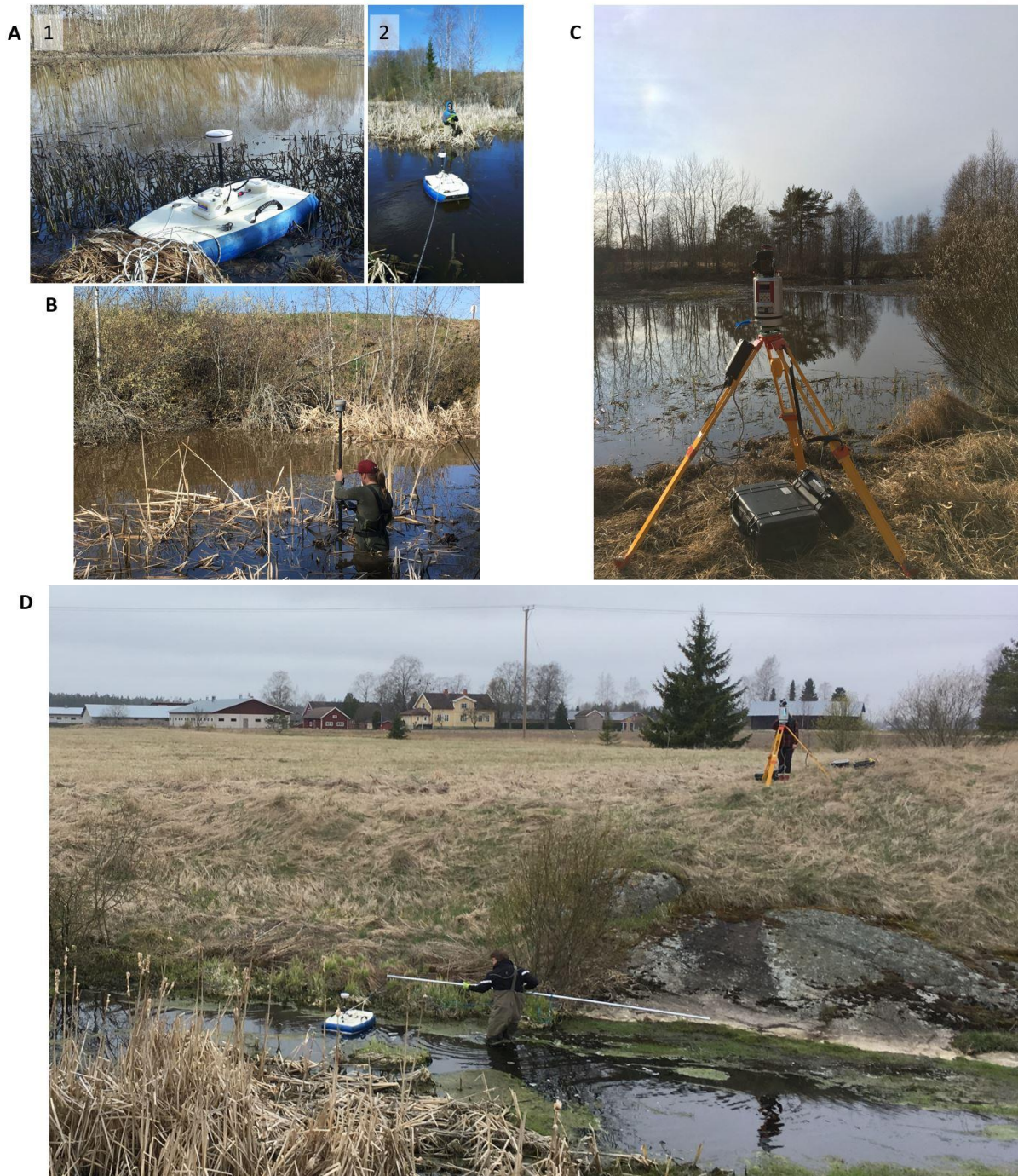
		Ekman	Imponoja
DEM laskeutusallas	<i>laserkeilaus</i>	11.4.	30.6.2016*
	<i>syvyysmittaus</i>	12.5., 22.6.	30.6.2016*
DEM kosteikko	<i>laserkeilaus</i>	29.6.2016*	11.4.
	<i>syvyysmittaus</i>	29.6.2016*	11.5., 8.8.
Tulouoman Q	<i>Levellogger</i>	10.7.–19.12.	11.4.–19.12.
	<i>IQ</i>	12.5.–28.6.	11.5.–22.6.
	<i>Q-mittaus (FT ja ST)</i>	12.5., 22.6., 9.11. (3 kpl)	14 kpl
	<i>VRS-RTK-GPS</i>	11.4., 22.6., 10.7.	11.4., 11.5., 22.6.
Lähtöoman Q	<i>Levellogger</i>	12.5.–19.12.	11.4.–19.12.
	<i>IQ</i>	12.5.–3.6. ja 28.6.–8.7.	11.5.–28.6.
	<i>Q-mittaus (FT ja ST)</i>	9 kpl	70 kpl
	<i>VRS-RTK-GPS</i>	22.6., 9.11.	11.5., 22.6., 9.11.
Laskeutusallas WL	<i>Levellogger</i>	10.7.–19.12.	11.4.–19.12.
	<i>VRS-RTK-GPS</i>	11.4., 12.5., 22.6., 10.7., 9.11.	11.4., 22.6.
Kosteikko WL	<i>Levellogger</i>	12.5.–19.12.	11.4.–19.12.
	<i>VRS-RTK-GPS</i>	9.11.	11.4., 11.5., 22.6., 8.8.
Jatkuvatoiminen tulo	<i>ajankohta</i>	24.3.–30.11.	24.3.–30.11. (ei 22.–25.10.)
	<i>muuttujat</i>	NTU, Sähköjoht.	NTU, Sähköjoht.
Jatkuvatoiminen lähtö	<i>ajankohta</i>	24.3.–30.11.	24.3.–30.11. (ei 2.–3.7. + 11.–25.10.)
	<i>muuttujat</i>	NTU, Sähköjoht.	NTU, Sähköjoht.
Vesinäytteet tulo	<i>ajankohta</i>	1 näyte/2 vko, 29.3.–20.11.	1 näyte/2 vko, 29.3.–20.11.
	<i>muuttujat</i>	FNU, P, P-liuk., N, ka 0.4N	FNU, P, P-liuk., N, ka 0.4N
Vesinäytteet lähtö	<i>ajankohta</i>	1 näyte/2 vko, 29.3.–20.11.	1 näyte/2 vko, 29.3.–20.11.
	<i>muuttujat</i>	FNU, P, P-liuk., N, ka 0.4N	FNU, P, P-liuk., N, ka 0.4N

IQ = uoman pohjaan asennettava jatkuvatoiminen virtaamamittari, FT = FlowTracker, ST = Sommer Tracer & WL = vedenpinnan korkeus

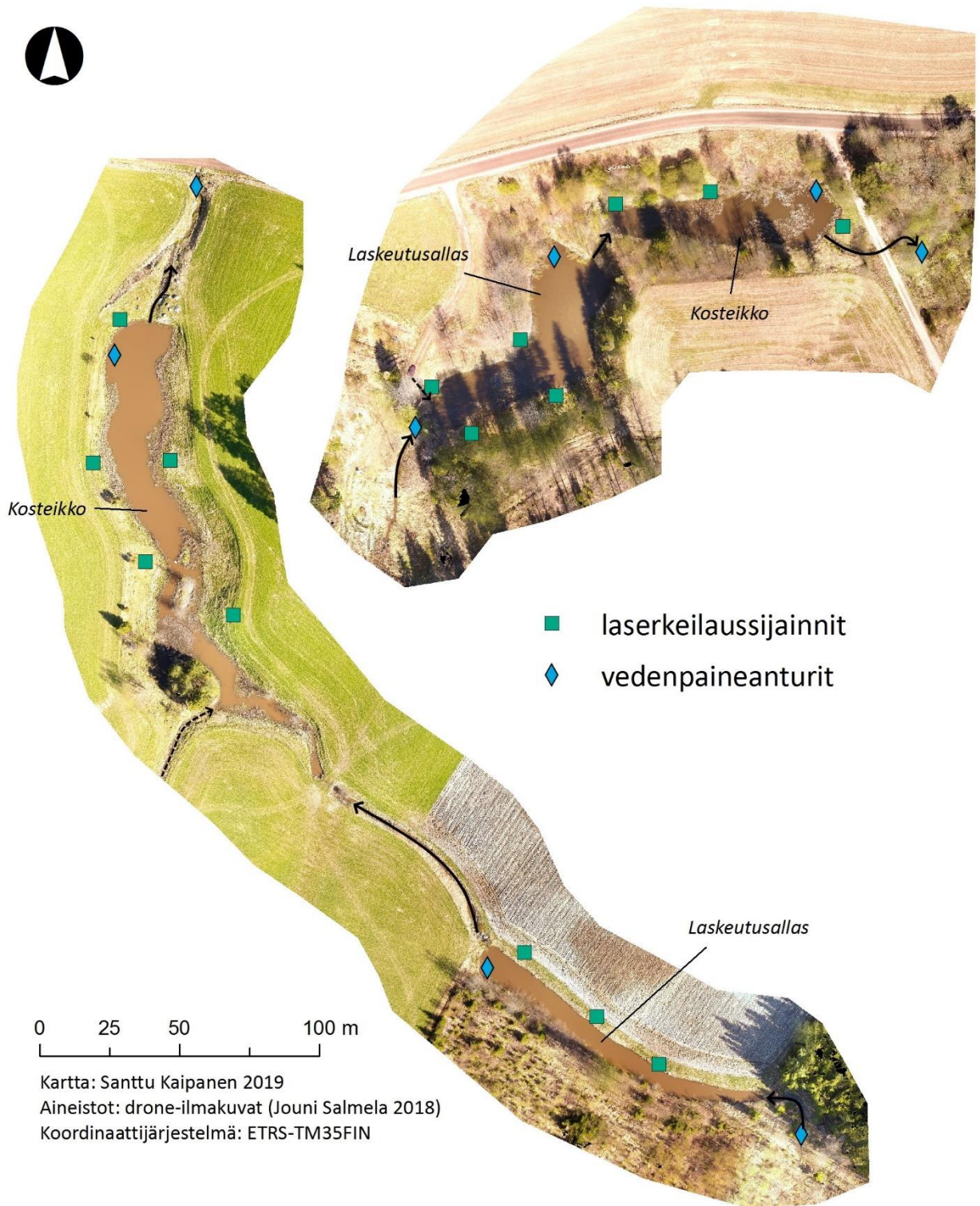
4.2 Altaiden topografia ja geometria

Altaiden topografia mallinnettiin pääsääntöisesti kahdella eri lähikaukokartoitusmenetelmällä – TLS:llä ja ADCP:llä. TLS-aineisto kerättiin RIEGLin maastolaserkeilaimella (kuva 28 C) ja aineiston perusteella mallinnettiin kosteikkojen vedenpinnan yläpuolinen topografia. Vedenpinnan alapuolisten osien pinnanmuodot mitattiin Sontekin M9-ADCP:llä, joka oli kiinnitettynä naruilla vedettävään lauttaan (kuva 28 A). ADCP mittasi syvyyttä sekunnin välein, ja järjestelmässä on oma differentiaalinen GPS, joka yhdistää jokaiseen mittaukseen sijainnin noin puolen metrin tarkkuudella. Vedenpinnan korkeus mitattiin RTK-GPS:llä, ja mitausajankohdan vedenpinnan korkeudesta vähennettiin kaikuluotaamalla mitatut syvyydet, jolloin syvyydet muuttuivat karttakoordinaatistossa olevaksi kolmiulotteiseksi sijaintitiedoksi. ADCP:lle liian matalien tai kasvittuneiden vesialueiden pinnanmuodot mitattiin keräämällä topografiapisteitä RTK-GPS:llä (kuva 28 B). Parhaimmillaan mittauksia kyettiin suorittamaan samanaikaisesti (kuva 28 D). Geometrialla viitataan tässä yhteydessä altaiden topografian, pinta-alojen ja kasvillisuuden muodostamaan kokonaisuuteen. Altaiden kasvillisuusalueet pinta-aloineen on määritetty kasvukauden alussa vuonna 2018 otetuista drone-ilmakuvista (kuva 29).

TLS-aineisto kerättiin mittaamalla niin monesta sijainnista, että altaiden rannat saatiin kattavasti kartoitettua (kuva 29). Keilaimen mitaamat pistepilvet siirrettiin karttakoordinaatistoon RTK-GPS:llä mitattujen tähyspisteiden avulla, jotka ovat heijastavia georeferointipisteitä, jotka keilain poimii muusta mittaamastaan datasta. Tämä miljoonista pisteistä koostuva raakadatapilvi on käytännössä 3D-kuvaus keilaimen ympäristöstä. Siihen tallentuvat esimerkiksi puut, heinät, ilmassa lentelevät hyönteiset ja lasersäteen tielle osuvat ihmiset. Raakadatapisteiden sijaintitarkkuus karttakoordinaatistossa on RTK-GPS:n tarkkuuden mukaisesti 5 cm sekä horisontaalisesti että vertikaalisesti. Raakadatapisteiden sijaintitarkkuus suhteessa toisiinsa on kuitenkin teoriassa jopa 1 mm luokkaa.



Kuva 28. A) ADCP-kosteikkoympäristössä kiinnitettynä manuaalisesti liikuteltavaan alustaansa (1) ja mittaus käynnissä Imponojan kosteikolla (2). B) Kasvittuneiden osien vedenalaisen topografian kartoitusta VRS-RTK-GPS:illä. C) Maastolaserkeilan kosteikkoympäristössä. D) Samanaikaista topografian ja batymetrian kartoitusta. Kuva A2 Linnea Blåfield, muut kuvat Santtu Kaipainen.



Kuva 29. Laserkeilausten ja vedenpaineanturien sijainnit tutkimuskosteikoilla. Vedenpaineanturit olivat asennettuina kosteikkojen molempiin altaisiin sekä tulo- ja lähtöuomiin. Nuolet kartassa kuvaavat altaisiin ja niistä pois virtaavia uomia. Katkoviivalla merkitty pienet uomat, joiden virtausta ei ole huomioitu analyyseissa tai simulaatioissa.

TLS-aineiston käsittely alkaa eri keilauspisteiden tuottamien pistepilvien yhdistämisellä ja georeferoinnilla. Kun pistepilvet on rekisteröity koordinaatistoon, täytyy haluttu alue rajata, koska pisteitä tallentuu huomattavasti laajemmalla alueella kuin yleensä on tarpeen. Rajattu pistepilvi on vielä harvennettava, jotta käsittely olisi käytännöllisesti mahdollista. Rajaaminen ja harventaminen ovat aineiston käytännöllisen käsittelyn kannalta välttämättömiä esitoimenpiteitä. Keilain tallentaa raakadatan niin suuren määrän pisteitä, ettei niiden kaikkien käyttäminen onnistu virtausmallinnuksessa. Laserkeilausaineiston raakadata harvennettiin RIEGLin RiSCAN-ohjelmiston *octree*-suodattimella, joka jakaa aineiston kolmiulotteisiin soluihin ja antaa jokaiseen soluun yhden pisteen datan keskiarvon mukaan, huomioiden X-, Y- ja Z-koordinaatit (RIEGL 2017). Suodattimen soluna käytettiin kuutiota, jonka jokainen sivu on 10 cm.

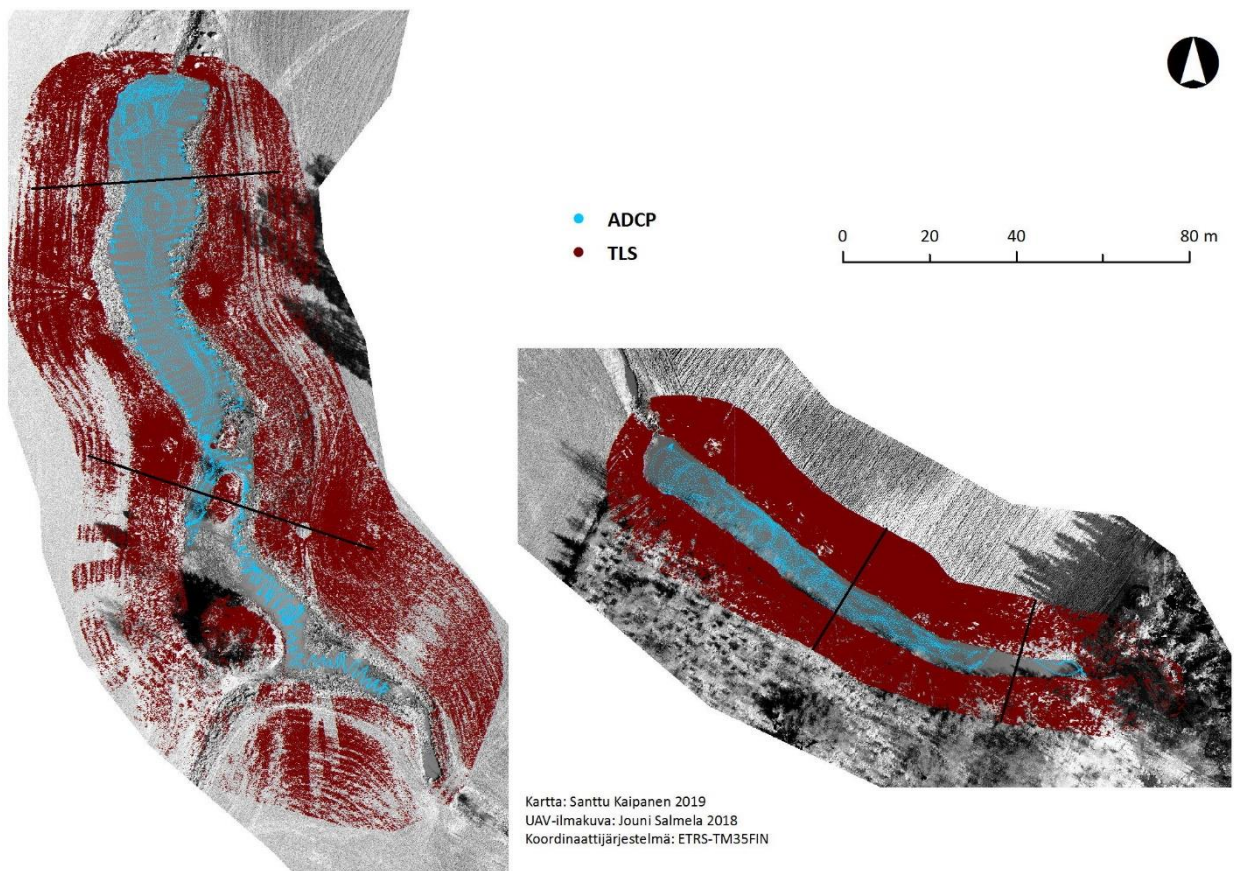
Harvennettuunkin laserkeilausdataan jää maanpintamallien kannalta tarpeettomia pisteitä, kuten puiden latvoja tai heiniä. Nämä pisteet suodatettiin pois datasta RiSCAN-ohjelmiston *terrain filter* -työkalulla, joka erottaa maanpintaan kuulumattomat pisteet maanpinnan pisteistä (RIEGL 2017). Erottelu tapahtuu vertaamalla kaikkien pisteiden etäisyyttä ohjelman arvioimaan maanpintaan. Tämä suodatus ei ohjelmiston tekijän mukaan toimi parhaalla mahdollisella tavalla alueilla, joissa esimerkiksi oksia riippuu maanpinnan yllä. Luultavasti juuri siksi suodatus ei meinannut toimia datalle, jossa kasvillisuus oli tiheässä kasvussa. Tiheä kasvillisuus myös selvästi oli paikoin estänyt lasersädetä saavuttamasta maanpintaa. Tällaisilta alueilta oli löydettävissä oikeita maanpinnan pisteitä niin harvassa, että ohjelmisto tulkitse ne häiriödataksi. Imponojan kosteikon yläjuoksun puoleinen laskeutusallas ja Ekmanin kosteikon alajuoksun kosteikko keilattiin kesällä 2016 kasvukauden keskellä, joten maanpinnan suodatus niistä datoista esiin oli haasteellisempaa kuin kasvukauden ulkopuolella keuhällä 2017 keilattujen Imponojan kosteikon ja Ekmanin laskeutusallasta. Rahoituskelliset seikat johtivat laserkeilausten toteuttamiseen eri vuosina. Pintamallien teossa käytetyt kartoitusmenetelmät ja pistetiheydet on esitelty taulukossa 5. Kasvukauden ulkopuolella toteutetuista laserkeilauksista saatiin tiheämpää pisteaineistoa maanpinnasta.

Taulukko 5. Korkeusmallien teossa käytetyt mittausmenetelmät, mittauksen ajankohta ja raakadatan kattavuus allaskohtaisesti. Erikseen on ilmoitettu kuivan topografian ja vedenalaisen batymetrian mittausten tiedot.

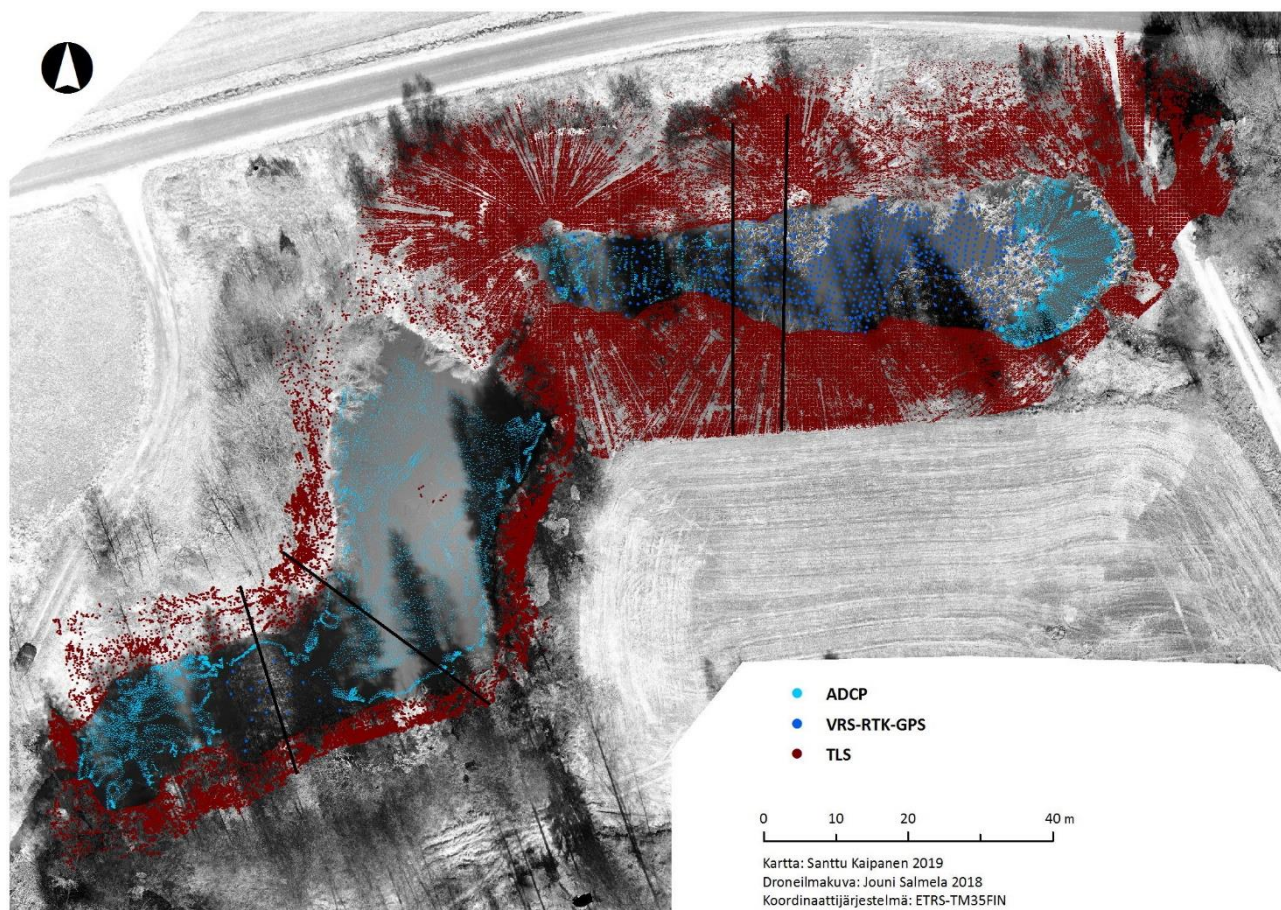
		Kartoitus (korkeusmallit)		
		menetelmä	ajankohta	pisteitä/m ²
Ekman laskeutusallas	<i>batymetria</i>	ADCP	5, 6/2017	12.9
	<i>topografia</i>	TLS	4/2017	114.1
Ekman kosteikko	<i>batymetria</i>	ADCP	6/2016	10.4
	<i>topografia</i>	TLS	6/2016	54.6
Imponoja laskeutusallas	<i>batymetria</i>	ADCP	6/2016	10.7
		VRS-RTK-GPS	5/2018	*
	<i>topografia</i>	TLS	6/2016	19.9
Imponoja kosteikko	<i>batymetria</i>	ADCP	5/2017	9.9
		VRS-RTK-GPS	8/2017	*
	<i>topografia</i>	TLS	4/2017	149.2

*=VRS-RTK-GPS -pisteet mukana batymetrian pisteissä

Eri menetelmin mitatuista pistepilvistä (kuvat 30 ja 31) poistettiin virheellinen data manuaalisesti intuitiivisesti luottaen, esimerkiksi kuivalla maalla sijaitsevat syvyyspisteet siirrettiin vesialueelle tai poistettiin. Kosteikkojen rantaviivat digitoitiin dronella otettujen ilmakuviin (kuva 29) perusteella ja rajauksesta luotiin pisteaineisto, joka sai kuvaushetken vedenpinnankorkeustiedon (10.5.2018). Vesirajaa kuvaava pisteaineisto helpotti sekä vedenalaisten että kuivan maan korkeusmallien interpolointia ja yhdistämistä. Maastolaserkeilausaineistoa käytettiin vedenpinnan yläpuolisen geometrian mallintamiseen. Kaikuluotausaineistolla saatiin vastaavaa tietoa vedenalaisesta geometriasta. Nämä yhdistämällä tehtiin tarkka korkeusmalli koko kosteikkoaltaasta, kun pistepilvet interpoloitiin jatkuviksi tasoiksi. Vedenpinnan korkeus mitattiin samanaikaisesti maalaserkeilaus- ja kaikuluotausmittausten kanssa, ja vedenpinnan korkeuden päivittäistä vaihtelua seurattiin vedenpaineantureilla (kuva 29).



Kuva 30. Ekmanin laskeutusaltaan ja kosteikon korkeusmalleihin käytetyt raakadatapistet kartalla. Laskeutusaltaan TLS-dataa voitiin käyttää tiheämmin, koska rannat laserkeilattiin kasvukauden ulkopuolella. Mustat viivat ovat linjat, jonka pisteitä käytettiin korkeusmallien validointeihin (luku 5.1.3).



Kuva 31. Imponojan laskeutusaltaan ja kosteikon korkeusmalleihin käytetyt raakadatapisteet kartalla. Kosteikon TLS-dataa voitiin käyttää tiheämmin, koska rannat laserkeilattiin kasvukauden ulkopuolella. Mustat viivat ovat linjat, jonka pisteitä käytettiin korkeusmallien validointeihin (luku 5.1.3).

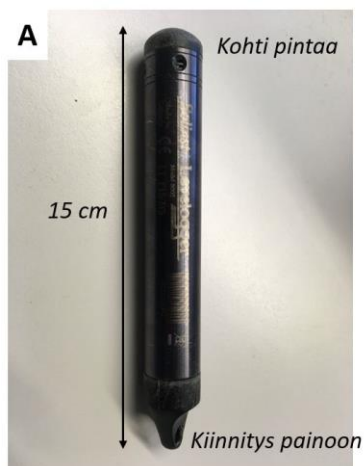
Jokaiselle kosteikkoaltaalle interpoloitiin erikseen korkeusmalli altaaseen ja rannoille, jotka sitten yhdistettiin yhdeksi saumattomaksi malliksi molemmat rantaviivalla leikkaamalla. Leikkauksen aiheuttamat yksittäiset tyhjät solut pohjan ja tulvasanteen välillä täytettiin ArcMap-ohjelmiston *elevation void fill function* -toiminnolla (ESRI 2019).

Kosteikkoaltaiden korkeusmallien interpoloinnissa käytettiin kahta eri geotilastollista menetelmää, joista valittiin kussakin korkeusmallissa parhaiten toimiva. Testatuiksi menetelmiksi valikoituivat *ordinary kriging* – sekä *simple kriging* -menetelmät, jotka ovat eri batymetristen interpolointimenetelmien vertailussa osoittautuneet hyviä tuloksia antaviksi (esim. Curtarelli ym. 2015; Diaconu ym. 2019; Šiljeg ym. 2015). Valmiiden mallien solukokona käytettiin 0,20 m.

Altaiden korkeusmallien perusteella laskettiin allaskohtaisia tilavuuksia ja vesipinta-aloja ArcMap-ohjelmiston tilavuudenlaskentatyökalulla. Näin saatuja tilavuuksia tarkasteltiin veden viipymien laskennassa (ks. luku 4.3). Pinta-alojen vaihtelua suhteessa kosteikkojen valuma-alueisiin tarkasteltiin vedenpinnan vaihtelun mukaan. Lisäksi pinta-aloja vertailtiin suspensiokulkeuman hiukkasten tarvitsemiin pinta-aloihin eri virtaamasuuruksilla.

4.3 Altaiden virtausolosuhteet

Kosteikkoihin sekä niiden tulo- ja lähtöuomiin oli asennettuna vedenpinnan korkeusvaihtelua seuraavat Solinstin Levellogger-vedenpaineanturit (kuvat 29 ja 32). Kosteikkoaltaisiin virtaavia pienempiä tulo-uomia (kuva 29) ei mitattu. Vedenpaineanturien asennusajat on eritelty taulukossa 4. Vedenpinnan korkeutta seuraamalla saadaan tietoa kosteikkojen vesimäärän vaihtelusta, eli tulvapiikkien ja matalan virtaaman tilanteiden ajankohdista.



Kuva 32. A) Vedenpaineen perusteella vedenpinnan korkeuden vaihtelua mittaava Solinst Levellogger -sensori. Sensori kiinnitetään pohjastaan painoon ja asennetaan uoman tai altaan pohjaan siten, että sensori osoittaa mahdollisimman suoraan kohti pintaa. Kuva: Santtu Kaipanen. B) Levellogger-sensorin asennus veteen. Kuva: Leena Laamanen.

Kosteikkoihin ja niistä pois virtaavien uomien virtaamia mitattiin tilannekohtaisesti muutamana eri ajankohtana. Näitä mittauksia tehtiin suolapitoisuuden vaihteluun perustuvalla tracerilla sekä Flowtrackerillä (akustinen virtausnopeusmittari) (kuva 33 AB). Kesä–heinäkuulta on myös muutamana viikon pituinen jakso, jona kosteikkojen tulo- ja lähtö-uomiin oli asennettuna virtaaman tunneittain mittaavat akustiset sensorit (kuva 33 C). Jatkuvatoimisten virtaamasensorien haasteena oli kuvassa näkyvän mutaan peittymisen lisäksi akkujen kesto sekä akkukoteloihin pesiytyvät muurahaiset. Virtausmittausten menetelmien aikataulu ja onnistuneiden mittausten määrä löytyvät taulukosta 4.

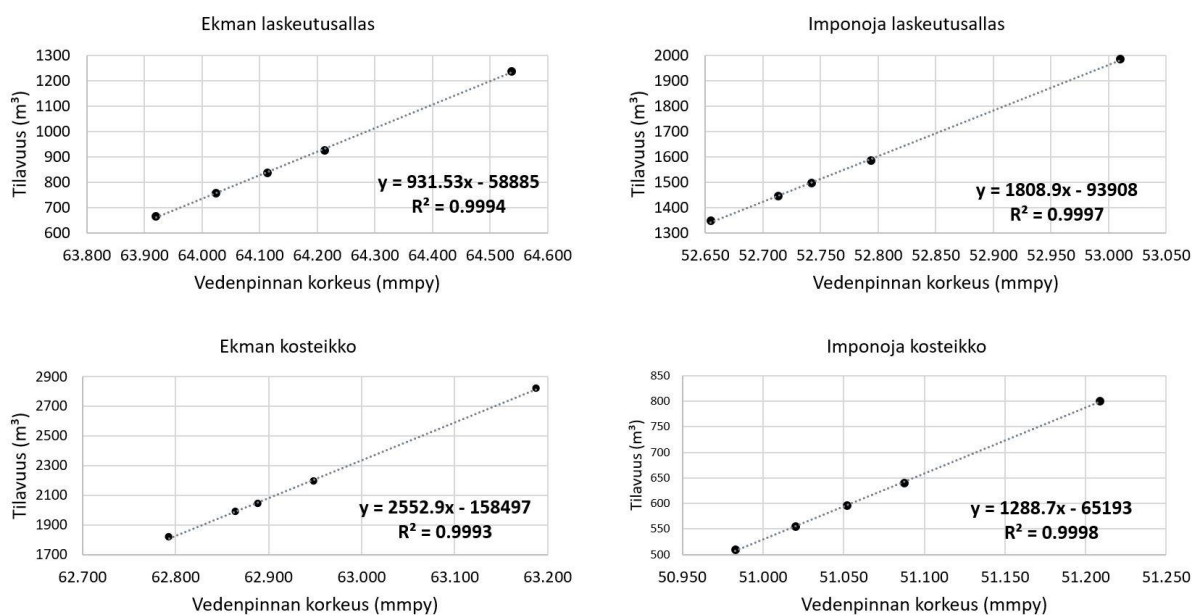


Kuva 33. Virtaamamittausten menetelmien käyttöä: A) suolapitoisuuden vaihteluun perustuva tracer-sensori kosteikon tulo-uomassa (vasemmassa alalaidassa nähtävillä jatkuvatoiminen ravinnemittari uoman pohjassa). B) Virtaaman mittausta Flowtracker-ADV:llä (ks. kuva 17 B). C) Jatkuvatoiminen ADCP-sensori mutaan peittyneenä. Kuvat A ja B: Santtu Kaipanen, kuva C: Jouni Salmela.

Vedenpaineaineistosta johdettiin kosteikossa kulloinkin olevaa veden määrää sekä tulo- ja lähtövirtaamia. Vedenpinnankorkeusvaihtelusta saatiin virtaamat lineaarisen regression avulla kuten esimerkiksi Kasvi ym. (2013) teki. Kun tiedettiin vedenpinnan korkeudet mitatuilla virtaamalla, voitiin virtaamat kulloisellekin vedenpinnankorkeudelle laskea lineaarisesti vedenpainesensorien avulla. Näin vedenpainesensorien

jatkuva aineisto muuntui virtaamaa kuvaaviksi hydrografeiksi. Tulo- ja lähtöomien hydrografit on esitelty tulososion alussa luvussa 5.1.2.

Kosteikkoaltaiden nimellisviipymät (t_n) laskettiin jakamalla päiväkohtaiset keskiarvotilavuudet (m^3) päivittäisillä virtaamilla (m^3/d). Näin ollen ne kuvaavat teoreettista viipymää päivämääräkohtaisesti. Päivittäiset virtaamat on laskettu summaamalla tasatuntiset virtaamakeskiarvot yhteen kyseisen päivämäärän osalta, ja muuttamalla yksikkö päivittäiseksi virtaamiksi (m^3/d). Päiväkohtaiset keskiarvotilavuudet on saatu laskemalla ensin suurimman, pienimmän, 25-fraktiilin, mediaanin ja 75-fraktiilin vedenpinnankorkeuksien tilavuudet ArcMapilla allaskohtaisesti. Näistä allaskohtaisista muunnoksista muodostui tilavuuden ja vedenpinnankorkeuden välille lineaarinen yhteys, jolla tilavuuden laskenta onnistui jokaisen päivän keskimääräiselle vedenpinnan korkeudelle (kuva 34).



Kuva 34. Vedenpinnan korkeuden muuntaminen tilavuuksi allaskohtaisesti. Vedenpinta muuntuu tilavuudeksi hyvin lineaarisesti, vaikka altaiden topografia on vaihtelevaa.

Laskeutusaltaiden sisään virtaamana on käytetty tulooman virtaamaa, ja kosteikkojen sisään virtaamana niistä lähtevää virtaamaa. Taustalla on oletus, että kosteikkoon tuleva virtaama vastaa sieltä lähtevää paremmin kuin laskeutusaltaalle tuleva virtaama. Näin lasketuista altaiden nimellisviipymistä poistettiin tarkastelua varten suurimmat 2,5 %, koska hyvin pienet virtaamalukemat joidenkin altaiden kohdalla tuottivat jopa tuhansien päivien nimellisviipymiä, joiden raportointi suurimpina arvoina ei vaikuttanut mielekkäältä. Imponojan molempien altaiden osalta ja Ekmanin kosteikkoaltaasta poistettiin näin 5 arvoa, ja Ekmanin laskeutusaltaasta 3 suurinta. Ekmanin laskeutusaltaasta arvoja karsiutui vähemmän, koska sieltä oli vähemmän virtaaman ja tilavuuden havaintoja. Suositellun yhden päivän ylittävien nimellisviipymien osuutta kaikista nimellisviipymistä tarkasteltaessa huomioitiin kaikki nollavirtaamat riittävän pitkänä veden viipymänä, kuten myös edellä mainitusti karsitut suurimmat arvot.

Allaskohtaisten nimellisviipymien lisäksi tarkasteltiin koko vesiensuojelurakenteen viipymää (laskeutusallas ja kosteikko yhdessä). Tähän käytettiin korjatun nimellisviipymän (t_{kn}) kaavaa (Chazarenc ym. 2003, cit. Kadlec & Wallace 2009: 25):

$$t_{kn} = t_t \left(\frac{\ln(R)}{R-1} \right),$$

missä

R = Q_l/Q_t , veden palautumismurto-osa (engl. *water recovery fraction*)

Q_l = lähtövirtaama (m^3/d)

Q_t = tulovirtaama (m^3/d)

t_t = tulovirtaaman perustuva nimellisviipymä (d)

Korjatut nimellisviipymä ovat tuloksissa siltä ajalta, kuin saman sijainnin uomista ja altaista on päällekkäisiä havaintoja, koska korjatun nimellisviipymän kaavan käyttö vaatii sekä tulo- että lähtövirtaaman tuntemista. Ekmanilla näin oli 11.7.–18.12. ja Imponojalla 12.4.–18.12. Imponojan korjattuja viipymiä tarkasteltiin erikseen myös Ekmanin kanssa päällekkäiseltä ajalta, jolloin vertailu sijaintien välillä tapahtuu samankaltaisissa olosuhteissa.

Altaiden todellista viipymää tarkasteltiin virtaussimulaatioiden (luku 4.3) avulla kaavalla:

$$t = \frac{V_{aktiivinen}}{Q} = \frac{\varepsilon h A_{aktiivinen}}{Q},$$

missä t = viipymä, $V_{aktiivinen}$ = virtauksen tilavuus kosteikossa (m^3), $A_{aktiivinen}$ = virtauksen pinta-ala kosteikossa (m^2), h = kosteikon syvyys (m) ja ε = veden täyttämä osuus tilavuudesta (Kadlec & Wallace 2009: 23). Kadlecin & Wallacen (2009: 23) mainitsema laskukaavan haasteet on suurelta osin ylitetty, sillä aktiivinen virtauskenttä on määritetty virtaussimulaatioilla ja keskiarvosyvyys perustuu tarkkaan korkeusmallinnukseen. Syvyytenä käytettiin kunkin tilanteen vedenpinnankorkeuden mukaista keskiarvoa altaassa. Aktiiviseen virtauspinta-alaan laskettiin mukaan kaikki solut, joiden virtausnopeus oli suurempi kuin 1 mm/s. Kasvillisuuden määrästä on pinta-alalliset arviot, joiden mukaan altaiden ε on arvioitu. Virtaaman valintaan liittyvä haaste on olemassa, ja laskeutusaltaissa käytettiin niihin tulevaa virtaamaa ja kosteikoissa niistä lähtevää. Laskeutusaltaan ja kosteikon muodostamien kokonaisuuksien viipymät mallinnetuissa tilanteissa laskettiin sekä keskiarvovirtaamalla että summaamalla yhteen allaskohtaiset viipymät.

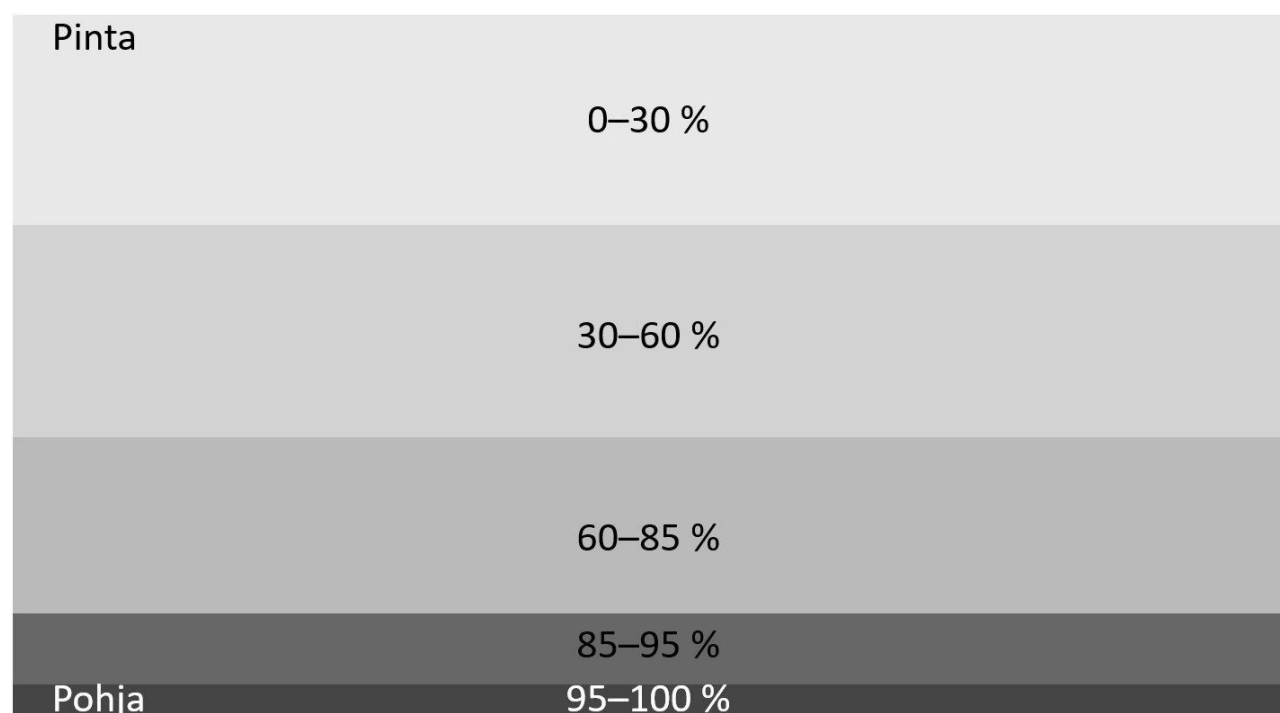
4.4 Virtaussimulaatiot

Virtauskenttien mittaus kosteikkoaltaissa ei onnistunut, joten niitä tarkastellaan virtaussimulaatioiden avulla. Simulaatiot tehtiin Deltaresin Delft3D-ohjelmiston 4.03.01-versiolla, ja niihin valittiin vuodenaikaista vaihtelua kuvaavat tulvahuiput ennen kasvukautta, kasvukaudella, kasvukauden loppuessa ja kasvukauden jälkeen (kuvat 41 ja 42, luku 5.1.2). Kosteikkojen virtaussimulaatioissa käytettiin noin 1 m^2 kokoisia ruudukoita (taulukko 6). Solukoko ei ole tismalleen 1 m^2 johtuen mallinnusohjelmiston ominaisuuksista. Tähän resoluutioon päädyttiin, koska pienemmällä mallinnusruudukon solukoolla mallien Courantin numerot olisivat olleet yli sallitun 10 jopa 0,6 sekunnin aikaporrastuksella (*time step*), ja pienemmän aikaporrastuksen käyttö olisi tehnyt mallinnukseen kuluvista laskenta-ajoista hyvin pitkiä. Tutkielmaan tehtyjen simulaatioiden laskenta-ajat vaihtelivat välillä 7–22 tuntia. Mikäli mallissa ilmenee ongelmia, tarkoittaa pitkä laskenta-aika pitkää odotusaikaa ennen kuin selviää, toimivatko malliin tehdyt parametrien korjaukset. Virtaussimulaatioiden tulokset validoitiin vertaamalla niitä vedenpinnan korkeuden malleihin. Mallinnettuja virtauksia ei voitu verrata mitattuihin, koska virtauksen mittaukset kosteikoilla eivät onnistuneet.

Taulukko 6. Virtausmallinnusten ruudukoiden keskimääräiset solukoot (m²). Vasemmalla laskeutusaltaiden ja oikealla kosteikkojen arvot.

	laskeutusallas	kosteikko
<i>Ekman</i>	0,94	1,11
<i>Imponoja</i>	1,03	0,98

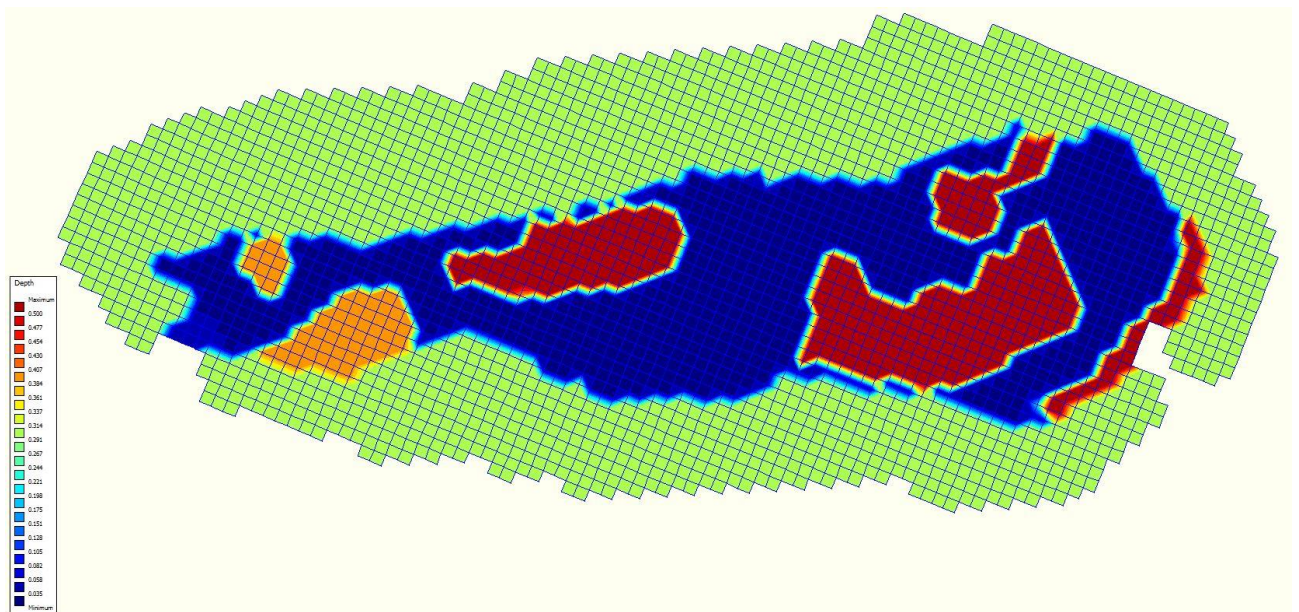
Virtaus mallinnettiin näennäis-3D:nä viidessä syvyyskerroksessa siten, että pohjanläheisiä virtauksia kuvasi ohuin syvyyskerros (kuva 35). Aidosti lähellä pohjaa tapahtuvalla virtauksella pyritään tarkastelemaan mahdollista virtauksen aiheuttamaa pohjaeroosiota. Näennäis-3D-simulaatioiden tuloksia voi tarkastella myös syvyyskeskiarvotettuna 2D-mallina, mitä hyödynnettiin hienoaineen sedimentaation tarkastelussa. Manningin karkeusarvo määritettiin alueittain erikseen ns. paljaalle altaalle, törmille sekä eri kasvillisuustyypeille (taulukko 7, kuva 36). Vuodenaikaisvaihtelu huomioitiin määrittämällä eri Manningin arvot keväälle ennen kasvukautta, kasvukaudelle sekä syystalvelle ennen uomien jäätymistä. De Donckerin ym. (2009) mukaisesti karkeusarvo oli suurin kasvukaudella. Simulaatioissa käytetyt Manningin arvot on eritelty taulukossa ja alueellinen vaihtelu havainnollistettu kuvassa. Vaikka simulaatioissa käytetyt Manningin karkeuskertoimen arvot perustuvat lähteissä esitettyihin arvioihin, ei lähteissä ole käsitelty tismalleen samanlaista kasvillisuutta. Lopulliset arvot valikoituivat testisimulaatioiden perusteella.



Kuva 35. Virtaussimulaatioiden syvyyskerrokset syvyysprosentteittain. Pohjanläheisin kerros on ohuin pohjaan vaikuttavien virtausten tarkastelua varten.

Taulukko 7. Manningin karkeusarvot virtaussimulaatioissa vuodenajan ja altaan aluetyypin mukaan. Alueellisella vaihtelulla erotettiin toisistaan altaiden kasvillisuusalueet, ns. paljas allas sekä ranta-alueet. Eri vuodenaajoille käytettiin eri karkeusarvoja simuloimaan kasvillisuuden tiheyden vaihtelua.

		Manningin karkeuskerroin n			Lähde
		<i>kevät</i>	<i>kasvukausi</i>	<i>syystalvi</i>	
Ekman	<i>paljas uoma</i>		0,035	0,035	<i>Arcement & Schneider (1989); Chow (1959)</i>
	<i>korte</i>		0,4	0,3	<i>Wilson 2007; De Doncker ym. (2009)</i>
	<i>osmankäämi</i>		0,5	0,4	<i>Champion & Tanner (2000); De Doncker ym. (2009)</i>
	<i>puu</i>		0,4	0,4	<i>arvio</i>
	<i>törmä</i>		0,35	0,2	<i>Arcement & Schneider (1989)</i>
Imponoja	<i>paljas uoma</i>	0,035–0,04	0,035–0,04	0,035–0,04	<i>Arcement & Schneider (1989); Chow (1959)</i>
	<i>korte</i>	0,1	0,4	0,3	<i>Wilson 2007; De Doncker ym. (2009)</i>
	<i>osmankäämi</i>	0,25	0,5	0,35	<i>Champion & Tanner (2000); De Doncker ym. (2009)</i>
	<i>törmä</i>	0,2	0,3	0,25	<i>Arcement & Schneider (1989)</i>



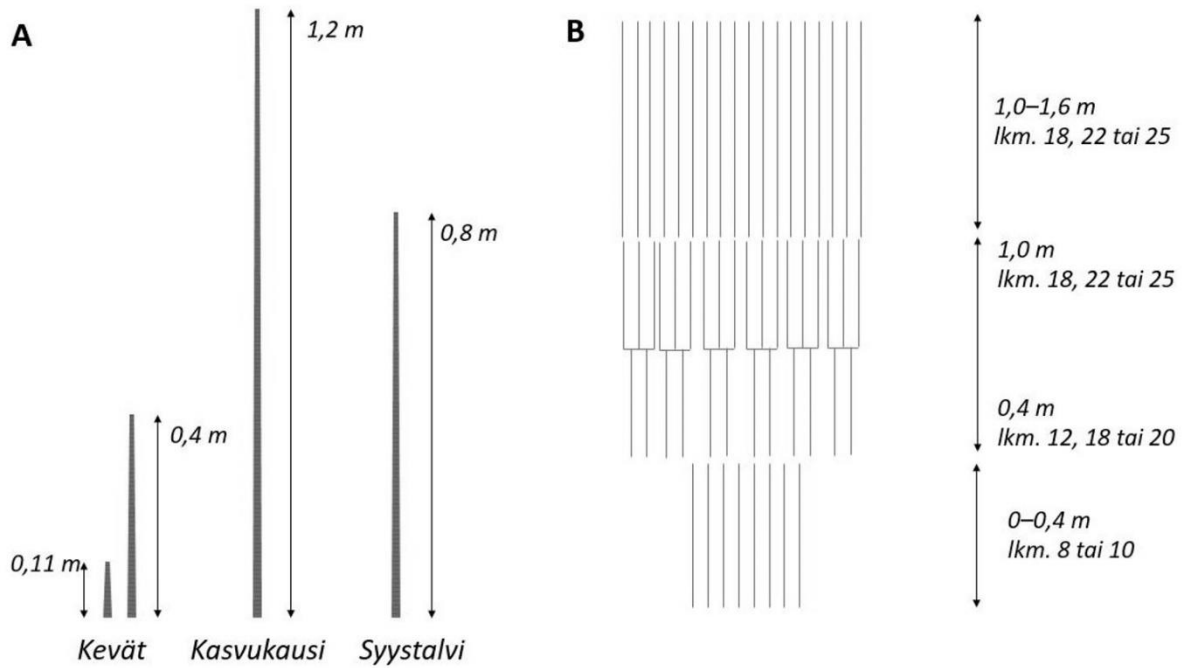
Kuva 36. Kasvukauden alueellisesti vaihteleva Manningin n -arvo Imponojan kosteikon mallinnusruudukossa kasvillisuusalueiden mukaan. Kuvakaappaus Delft3D:stä.

Kasvillisuuden sisällytettiin simulaatioihin myös jäykkänä 3D-kasvillisuusmallina, jossa simulaatioon annetaan syötteenä kasvillisuuden geometriatiedot: korkeus, varsien lukumäärä ja paksuus eri syvyyksillä sekä kasvien lukumäärä. Kasvillisuutta ja sen sijaintia määrittävän syötetiedoston perusrakenne on kuten Delft3D-FLOW:n käyttöohjeessa (Deltares 2017: 470–474). Kasvillisuuden geometrian arvot (taulukko 8, kuva 37) ovat tutkielman tekijän arvioita. Valituilla arvoilla esimerkiksi osmankäämin vesitilavuudesta otettava tila (78,5 %) vastaa suurin piirtein keskiarvoa 79 %, jonka Champion & Tanner (2000: 5) määrittelee kasvillisuuden valtaamaksi tilavuudeksi kasvukaudella Uuden-Seelannin vuodenaikaisvaihtelua kartoittavassa tutkimuksessaan. Delft3D-FLOW:n jäykkään kasvillisuusmalliin ei voi sisällyttää lehtiä, joten lehtien vaikutusta imitoitiin lisäämällä osmankäämeille varsia. Kasvillisuuden vaikutus virtauskenttään tämän tutkimuksen simulaatioissa on siis yhdistelmä vuodenajoittain vaihtuvaa pohjan karkeuskerrointa (Manningin n) sekä joustamatonta kasvillisuuden 3D-geometriaa.

Taulukko 8. Virtaussimulaatioissa käytetty kasvillisuuden 3D-geometria. Keväällä kasvillisuuden määrä oletettiin pienimmäksi ja kasvukaudella suurimmaksi. Oletus erityisesti osmankäämien säilymiseen altaissa talven yli perustuu ennen kasvukautta tehtyihin käynteihin altailla (kuva 24).

	vuoden- aika	varren korkeus <i>m</i>	varren paksuus <i>m</i>	varsien määrä <i>lkm/kasvi</i>	kasvien määrä <i>lkm/m²</i>	Manning <i>n</i>	allas
Korte	<i>kevät</i>	0,11	0,002– 0,0038	1	625 3600	0,1	EKY, EKA, IMA IMY
	<i>Kasvukausi</i>	1,2	0,002– 0,0038	1	10000	0,4	kaikki
	<i>talvi</i>	0,8	0,002– 0,0038	1	5000 8000	0,3	EKY, EKA, IMA IMY
Osmankäämi	<i>kevät</i>	1,4	0,01– 0,02	8–18	81	0,25	kaikki
	<i>kasvukausi</i>	1,6	0,02	10–25	100	0,5	kaikki
	<i>talvi</i>	1,6	0,01– 0,02	10–22	100	0,35	kaikki
Puu	<i>kaikki</i>	3	0,017– 0,1	1–30	1	0,035	EKY

EKY = Ekman laskeutusallas, EKA = Ekman kosteikko, IMY = Imponoja laskeutusallas, IMA = Imponoja kosteikko



Kuva 37. Virtaussimulaatioiden kasvillisuusgeometriaa havainnollistava piirros. A) Kortteen käytetyt pituudet kasvukauden mukaan. Kaikkien vuodenaikojen varren leveys pohjassa 3,8 mm ja latvassa 2mm. Imponojan laskeutusaltaalla kevään korte on korkeampaa kohdassa, jossa se simuloi mättäikön vaikutusta. B) Osmankäämin/kaislasvillisuuden geometriaa havainnollistava piirros, jossa jokaisen korkeuden varsien määrä levitetty tasoon. Todellisuudessa varret jakautuvat tasaisesti vesitilavuuteen, jonka pohjan pinta-ala on 1 m². Kaikkien varsien halkaisija 2 cm.

Virtaussimulaatioiden pohja-aineistona käytettiin edellä mainituin keinoin tuotettuja tulovirtaaman ja altaiden vedenpinnan korkeuden aikasarjoja. Kaikki aikasarjat keskiarvotettiin tasaisesti neljän tunnin välein niin, että keskiarvotettuun aikasarjaan päätyneiden kellonaikojen arvot edustavat aina edeltävää neljää tuntia. Altaan vedenpinnan korkeuden ja tulovirtaaman aikasarjoihin oli yhdistettynä samoin keskiarvotettu veden lämpötila. Aineistoista muutettiin varsinkin virtaamadatassa esiintyneet nolaa pienemmät lämpötila-arvot nolaksi, koska mallinnusohjelmisto ei kyennyt käsittelemään jäätymislämpötilassa olevan suolattoman veden virtausta.

Wetzelin (2001: 635) mukaan matalissa järvissä suuri osa fosforikuormasta voi olla peräisin pohja-aineksen uudelleen suspentoitumisesta. Kosteikkoaltaat ovat käytännössä matalia vesialtaita, ja niissäkin virtausolot edistävät joko suspentoitumista tai sedimentoitumista. Virtaussimulaatioilla tarkastellaan virtauskenttien yhteyttä toisaalta aineskuljetukseen sekä toisaalta virtausnopeuteen ja virtauksen jakautumiseen altaissa eri vuodenaikojen havaituilla virtaamahuipuilla. Virtaushuippuihin keskittyminen on oleellista, koska suurin osa aineskuljetuksesta tapahtuu Suomessa tyypillisesti muutaman suurimman virtaus tilanteen aikana (esim. Koskiaho 2003). Aineskuljetusta tarkasteltiin tutkimalla syvyyskeskiarvotettuja virtausnopeuksia (2D) ja etenkin pohjan läheisiä virtausnopeuksia (näennäis-3D-mallin pohjakerros). Pohjan eroosion mahdollisuutta tarkasteltiin Hjulströmin (1935) esittämien arvojen avulla (taulukko 9) ja hienoaineksen varastoitumista Puustisen ym. (2007:54) esittämien nopeuksien ja raekokojen mukaan (taulukko 2, luku 2.1). Kosteikkojen epävakaa pohjamateriaali voi eri arvioiden mukaan lähteä liikkeelle jo yli 3 cm/s nopeuksilla (Burns & McDonnell 1996, cit. Kadlec & Wallace 2009: 210) tai yli 2,1 cm/s nopeuksilla (Huisman 1973, cit. Koskiaho 2003: 330). Pohjanläheisiä virtausnopeuksia verrattiin myöskin näihin arvioihin. Kosteikkoihin tulevan sedimentin laadusta ei ollut mittauksia, joten laskeutumismahdollisuuksia tarkasteltiin teoreettisesti.

Taulukko 9. Eri maalajien liikkeellelähtoon vaadittavat virtausnopeudet Hjulströmin (1935) mukaan. Taulukoiduista maalajeista herkimmin lähtee liikkeelle karkea hieta. Hienompia maalajeja pitää paikallaan pienten hiukkasten väliset kemialliset sidokset, ja suurempirakeisia puolestaan hiukkasten suurempi koko.

	suurin raekoko (mm)	v (cm/s) >
savi	0,002	100
hiesu	0,02	26
hieno hieta	0,06	26
karkea hieta	0,2	20
hiekkä	2	25

Virtauksen nopeus ja jakautuminen laskeutus- ja kosteikkoaltaissa kertoo myös epäsuorasti kemiallisten ravinteiden sitoutumisen mahdollisuuksista ja nimellisten veden viipymien yhteydestä todelliseen viipymään. Virtauksen tasainen jakautuminen koko altaaseen mahdollistaisi teoriassa viipymän tilavuuden ja tulovirtaaman mukaisesti. Pitkä viipymä edistää kemiallisten reaktioiden tapahtumista altaissa. Voimakkaasti keskittynyt virtauskenttä tarkoittaisi, että todelliset veden viipymät altaissa olisivat lyhempiä kuin nimellisesti lasketut.

4.5 Vedenlaatuaineisto

Vedenlaatuaineisto on Pyhäjärvi-instituutin kokoama ja koostuu sameudesta (FNU) sekä kiintoaineen (0.4N, mg/l), kokonaistypen, kokonaisfosforin ja liukoisin fosforin pitoisuuksista (µg/l), jotka on mitattu laboratoriossa kosteikkojen tulo- ja lähtöumista otetuista vesinäytteistä. Kiinteän fosforin pitoisuus laskettiin erottamalla liukoinen fosfori kokonaisfosforin pitoisuudesta. Vesinäytteitä on otettu parhaimmillaan kahden viikon välein 29.3.–20.11.2017. Kosteikkojen tulo- ja lähtöumissa oli myös asennettuna jatkuvatoimiset, sameutta (NTU) ja sähkönjohtavuutta (mS/m) mittaavat vedenlaatumittarit avovesikaudella 24.3.–30.11.2017.

Jatkuvatoimisten mittarien datan vastaavuutta vesinäytteiden muuttujiin tarkasteltiin lineaarisen regression avulla kuten esimerkiksi Kukkonen ym. (2013) ja Koskiahon ym. (2015). Pyhäjärvi-instituutilta saadussa aineistossa oli Imponojalla aukkoja NTU-sameusarvoissa. NTU-arvoja puuttui 2.–3.7., 26.–27.8. ja 11.–26.10. Lisäksi Imponojalla FNU- ja NTU- havainnoista karsittiin viisi poikkeavaa näyteparia paremman vastaavuuden saamiseksi, muuten poikkeavia havaintoja ei karsittu.

Vedenlaadun muuttujien keskinäistä yhteyttä (taulukko 10, luku 5.1.1) tutkittiin koko vedenlaatuaineiston ajalta (25.3.–30.11.2017). Jatkuvatoimisten sameusmittarien aineistoa tarkasteltiin myös sellaisenaan, koska pitoisuuksia ei voi virtaamatiedon puuttuessa muuttaa absoluuttisiksi kiintoainemääräksi muuten kuin kasvukaudesta alkaen, jolloin Ekmanin virtaaman aikasarja alkaa. Sameus oletettavasti indikoi muista vedenlaadun muuttujista.

4.6 Altaiden valuma-alueet

Kosteikkojen valuma-alueet (kuva 20) rajattiin Maanmittauslaitoksen tuottaman, avoimen 2 m x 2 m -resoluutioisen korkeusmallin perusteella. Rasterimuotoisen korkeusmallin vertikaalinen tarkkuus tutkimusalueella on 0.3 m (Maanmittauslaitos 2018a). Valuma-alueen rajaamisen työvaiheet perustuvat Jensonin & Dominguen (1988) tutkimukseen. Ensin korkeusmallista on poistettava virtausta haittaavat painanteet ja huiput, jotta saadaan tasainen pinta, jossa virtaussuuntien mallintaminen ei pysähdy näihin esteisiin. Virtaussuuntien laskenta tapahtuu vertaamalla jokaisen rasterisolun korkeusarvoa ympäröivään kahdeksaan soluun. Korkeusarvoja vertaamalla saadaan kullekin solulle suunta, johon vesi pinnalla valuu. Käytännössä suunta on ympäröivää alinta korkeusarvoa kohti. Tuloksena on virtaussuuntia kuvaava pinta. Virtauksen kerääntyminen lasketaan tarkastelemalla virtaussuuntien pintaa. Tuloksena on pinta, jossa jokaisen solun arvo on siihen virtaavien solujen lukumäärä koko aineistossa. Valuma-alueen rajausta edellyttää taustatiedoksi virtaussuuntien pintaa ja valuntapistettä. Valuntapisteen tulee sijaita solulla, johon virtaus kasautuu. Tämän pisteen valuma-alueena on kaikki ne solut, joilta valunta päättyy kyseiseen pisteeseen. Tätä Jensonin & Dominguen (1988) kuvaamaa menetelmää noudatettiin ESRI:n ArcMap-ohjelmiston *Fill*, *Flow direction*, *Flow accumulation* ja *Watershed*-työkaluilla (ESRI 2018a, 2018b, 2018c, 2018d).

Imponojan valuma-alueen Turuntien (tie 204) länsipuoleista osaa (kuva 20B) valmiit työkalut eivät osaa laskea. Automaattinen laskenta ei onnistu luultavasti siksi, että korkeusmallista ei ole havaittavissa ojaa, jota pitkin Turuntien länsipuolisen suon (Kailassuo) valunta alittaa Turuntien. Tämä Imponojan valuma-alueen yläosa on rajattu manuaalisesti Maanmittauslaitoksen korkeusmallin, maastotietokannan (Maanmittauslaitos 2018b) ja maastokäynnin perusteella. Valuma-alueen yläosalla käveltiin keväällä 2018 GPS-paikantimen kanssa, ja tallennettiin uomien virtaussuuntia mahdollisilla rajaavilla alueilla. Maastokäynnin perusteella Kailassuon pohjoisosista virtaa vettä Imponojan kosteikkoon, mutta eteläosista muualle. Myös ESRI:n työkalujen tekemiä rajauksia Imponojan kosteikon onnistuneella osalla ja Ekmanin kosteikolla tarkastelin suhteessa maastotietokantaan mahdollisten ilmiselvien virheiden varalta, joita ovat esimerkiksi automaattisessa valuma-alueessa saman uoman virtaaminen kahteen eri suuntaan.

Molemmille vesiensuojelurakenteille rajattiin valuma-alueeksi niiden alajuoksun puoleisen altaan lähtöuoman alkuun rajoittuva alue. Aivan koko tältä alueelta valuva vesi ei luonnollisesti kulje koko vesiensuojelurakenteen läpi, vaan osa valuu suoraan alajuoksun puoleiseen altaaseen. Suhteellisesti kyse on hyvin pienestä osuudesta valuma-alueesta, jolta vesi ei valu molempien altaiden läpi, mutta suurempi kuin altaiden yhteenlaskettu ala. Vesiensuojelukosteikkojen kirjallisuudessa (esim. Koskiaho 2006; Puustinen ym. 2007) puhutaan ainoastaan kosteikon yläpuolisesta valuma-alueesta. Kosteikot ovat kuitenkin vesialtaita. Vesialtaiden valuma-alue on se alue, jolta vesi valuu koko altaaseen, eikä vain yhdestä pisteestä läpi virtaava vesi. Valuma-alueiden maankäyttötiedot ovat peräisin Corine Land Cover 2018 aineistosta (SYKE 2018).

5. Tulokset

5.1 Aineistojen jakaumat ja validointi

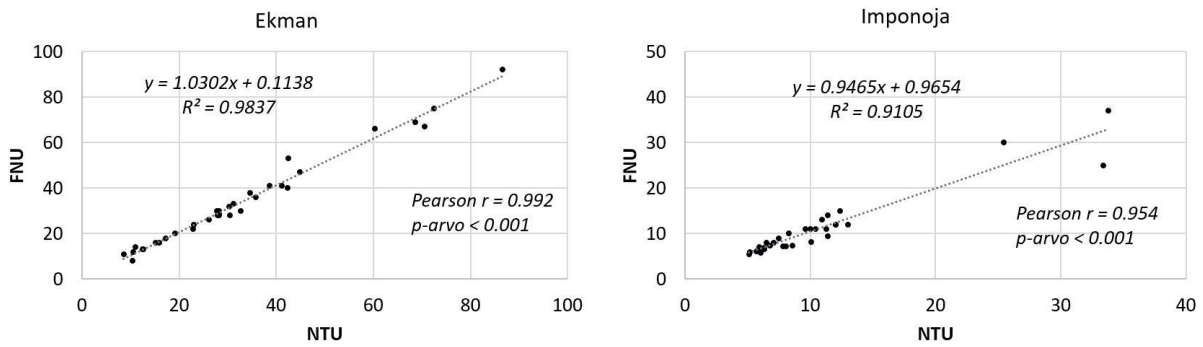
5.1.1 Vedenlaatuaineisto

Vedenlaatumuuttujien korrelaatioarvot ja selitysasteet on esitetty taulukossa 10. Sijaismuuttujana käytämiseen riittävän vahvat selitysasteet löytyivät ainoastaan FNU- ja NTU-sameuden sekä FNU:n ja kiintoaineen (0.4N) välille (kuvat 38 ja 39). Ekmanin kosteikolla tosin myös hieman yli puolet sekä kiinteän fosforin että kokonaistypen kuormista ovat selitettävissä sameuden avulla. Jatkuvatoimisten mittarien NTU-sameus muutettiin FNU-sameudeksi ja kiintoainespitoisuudeksi (0.4N, mg/l) analyysjä varten. Näin saaduista aikasarjoista tarkasteltiin mitattujen pitoisuuksien yhteyttä kosteikkojen virtaamiin sekä virtaaman suhteen mitattavia absoluuttisia ravinnemääriä Pearsonin lineaarisella korrelaatiolla. Tarkastelussa keskiytettiin vuorokausikeskiarvoihin.

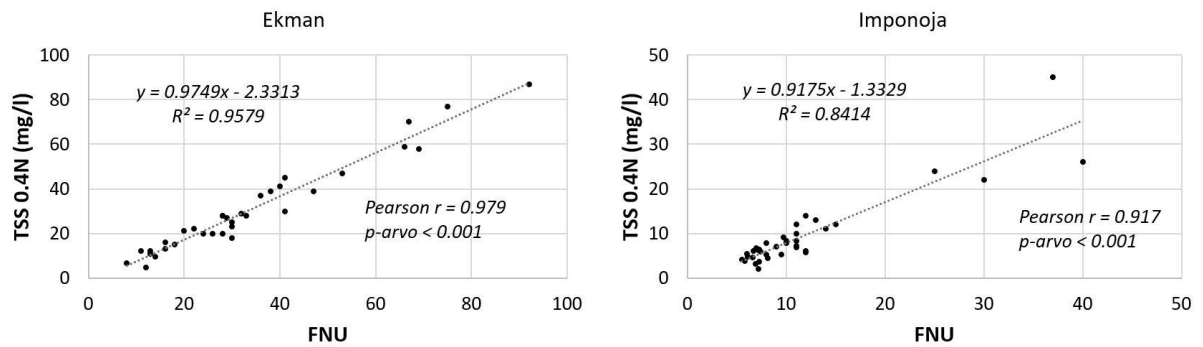
Taulukko 10. Ravinteiden ja sijaismuuttujien yhteys tutkimuskosteikoilla. Korrelaatiokerroin > 0,8 on korostettu lihavoimalla.

		<i>Ekman</i>	<i>Imponoja</i>
FNU ja NTU	<i>Pearson r</i>	0,992 *	0,954 *
	R^2	0,984	0,911
	<i>p-arvo</i>	0,000	0,000
	<i>n</i>	34	31
FNU ja ka 0.4N	<i>Pearson r</i>	0,979 *	0,917 *
	R^2	0,958	0,841
	<i>p-arvo</i>	0,000	0,000
	<i>n</i>	34	36
FNU ja kiint. P	<i>Pearson r</i>	0,797 *	0,292 *
	R^2	0,635	0,085
	<i>p-arvo</i>	0,000	0,042
	<i>n</i>	34	36
FNU ja PO4-P (liukoinen)	<i>Pearson r</i>	0,215	-0,175
	R^2	0,046	0,031
	<i>p-arvo</i>	0,112	0,153
	<i>n</i>	34	36
FNU ja kok. N	<i>Pearson r</i>	0,713 *	-0,067
	R^2	0,508	0,005
	<i>p-arvo</i>	0,000	0,348
	<i>n</i>	34	36
Sähkönjohtavuus ja PO4-P (liukoinen)	<i>Pearson r</i>	0,467 *	0,674 *
	R^2	0,218	0,454
	<i>p-arvo</i>	0,003	0,000
	<i>n</i>	34	36
Sähkönjohtavuus ja kok. N	<i>Pearson r</i>	0,433 *	0,529 *
	R^2	0,187	0,280
	<i>p-arvo</i>	0,005	0,000
	<i>n</i>	34	36

* = tilastollisesti merkitsevä korrelaatio

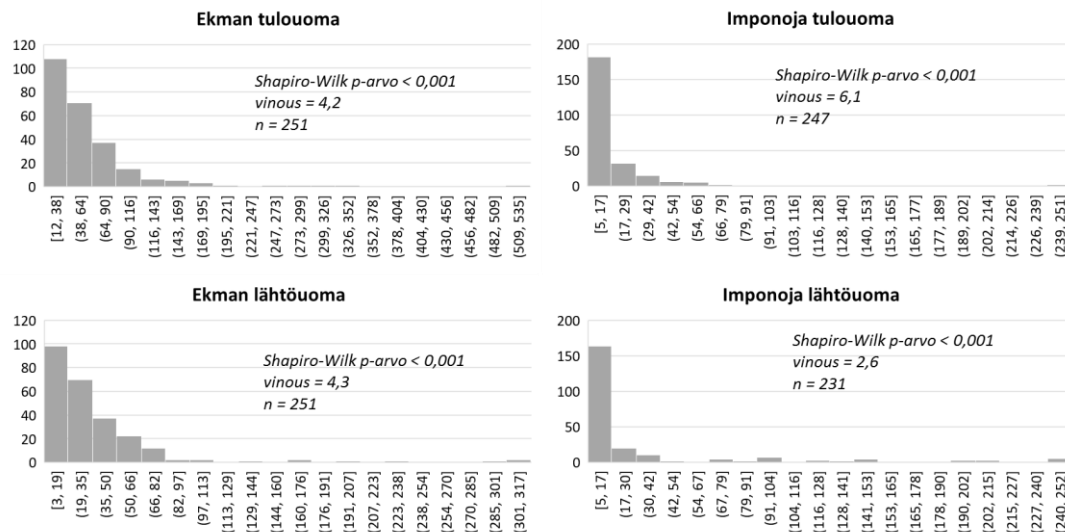


Kuva 38. NTU-sameuden (jatkuvatoiminen sensori) ja FNU-sameuden (vesinäytteet) korrelaatiot ja muunnoskaavat. Ekmanin uomissa yhteys on voimakkaampi, Imponojalla hajontaa on enemmän.



Kuva 39. Sameuden (FNU) ja kiintoaineen (0.4N, mg/l) korrelaatiot ja muunnoskaavat. Ekmanin uomissa yhteys on voimakkaampi, Imponojalla hajontaa on enemmän.

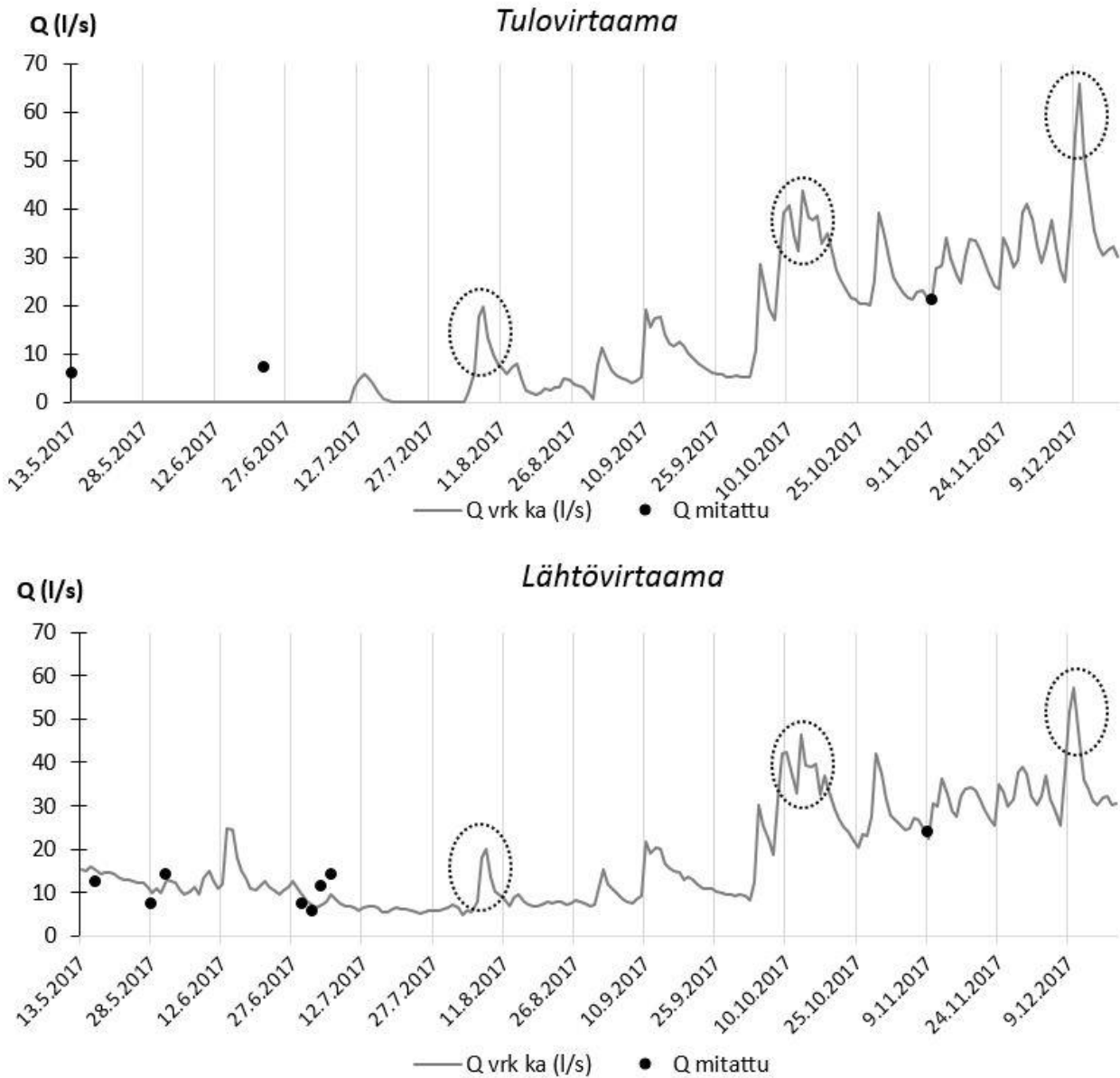
Myös sameusaineiston, kuten virtaama-aineiston, jakaumat olivat vinoja painottuen pieniin arvoihin (kuva 40), joten tarkastelen vedenlaatuaineistoa mediaanin, kvartiilien ja fraktiilien avulla. Koska sameusaineisto on vinosti jakautunut, voidaan olettaa, että myös sameudesta johdettu kiintoainepitoisuus on.



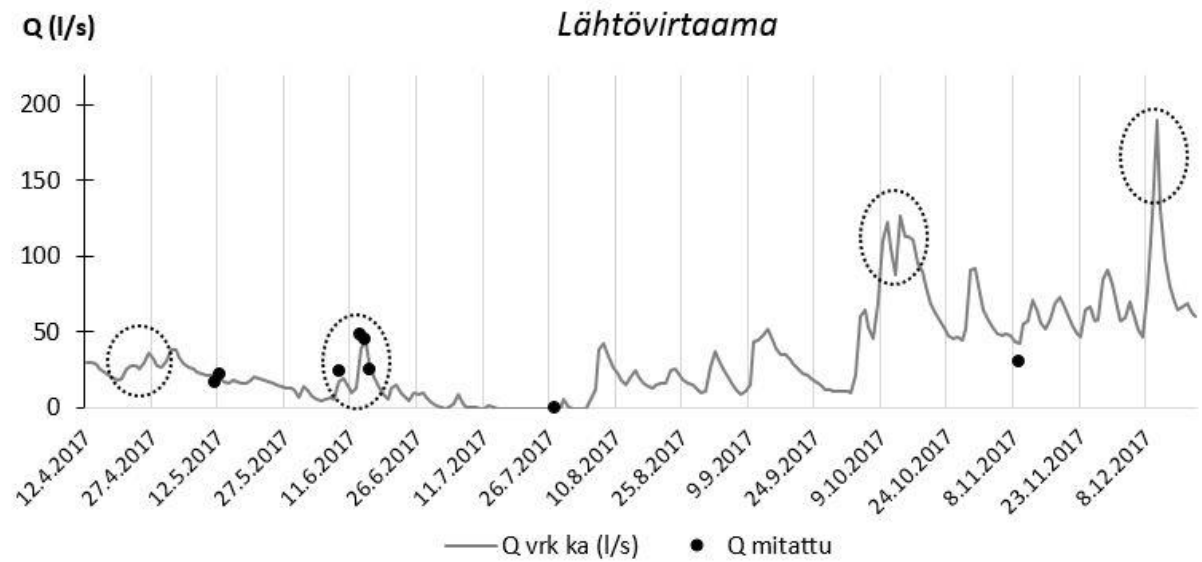
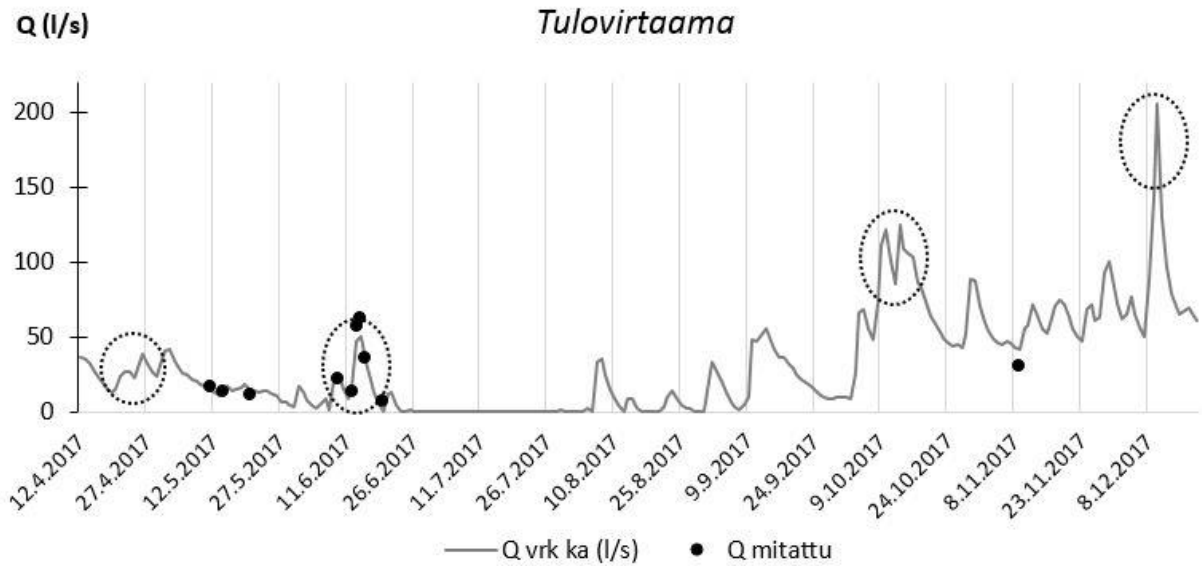
Kuva 40. Sameuden aikasarjojen jakaumat tutkimuskosteikoilla olivat 12.4–30.11.2017 vinot painottuneet pieniin arvoihin. Ekmanin uomissa sameuden histogrammit ovat keskenään samankaltaiset, kuten myös Imponojalla.

5.1.2 Altaiden virtaamat

Uomista saatiin mitattua virtaama onnistuneesti vain muutamana hetkenä varsinkin Ekmanin kosteikolla, joten hydrografien (kuvat 41 ja 42) validointia varten virtaamamittauksia ei pilkottu mallinnusdataan ja validointidataan. Validointi suoritettiin samoilla virtaamilla, joilla luotiin hydrografit, joten sen tulokset kuvaavat käytännössä vain muunnoskaavan toimivuutta (taulukko 11).



Kuva 41. Ekmanin tulo- ja lähtöuomien virtaamamallit. Huomaa hydrografien toisistaan poikkeava alkamisajankohta: tulouomasta on jatkuvaa aineistoa vasta 11.7.2017 alkaen. Virtaamat alkavat kasvaa syyskuussa, ja suurimmat virtaamat ajoittuvat joulukuulle. Katkoviivalla on ympyröity virtaamahuiput, joiden ajalta virtauskentät mallinnettiin.

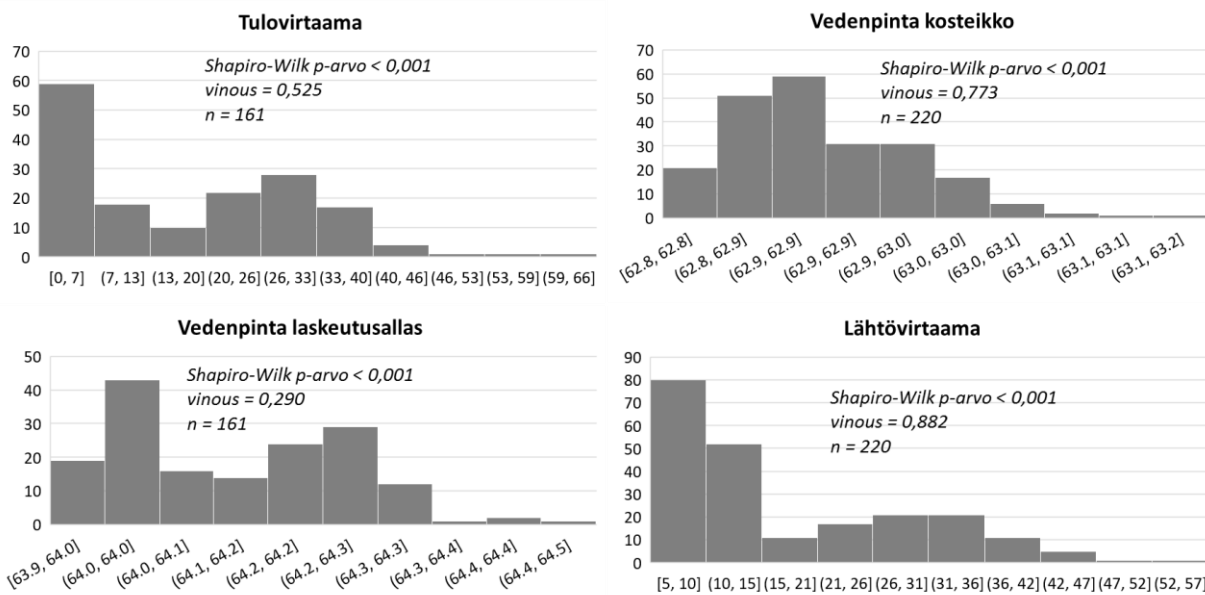


Kuva 42. Imponojan tulo- ja lähtöuomien virtaamamallit. Virtaama kasvaa elokuusta joulukuuhun, ja suurimmat virtaamat tapahtuivat joulukuussa. Katkoviivalla on ympyröity virtaamahuiput, joiden ajalta virtauskentät mallinnettiin.

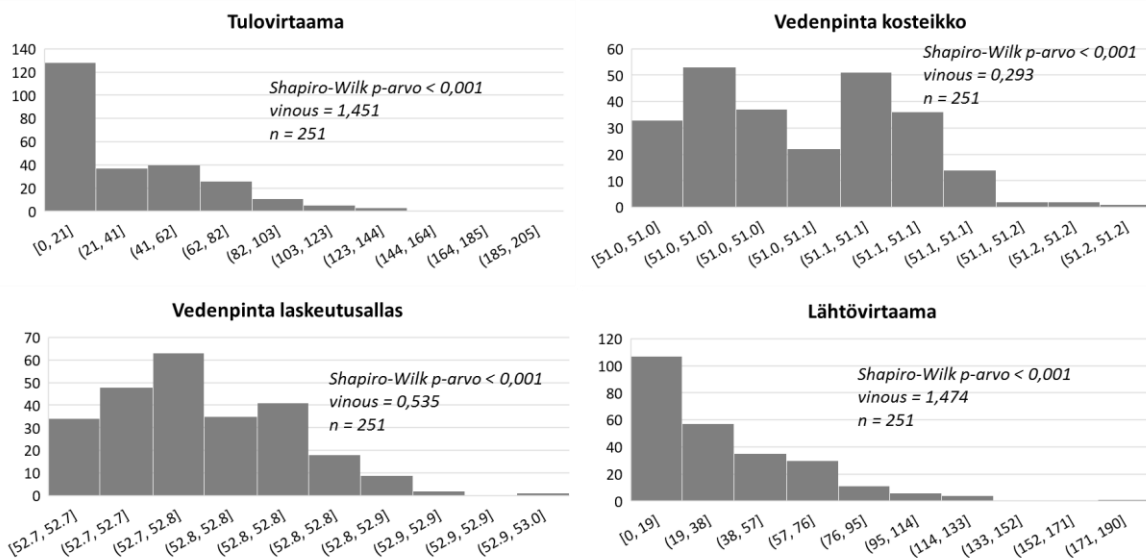
Taulukko 11. Mitattujen virtaamien ja mallinnettujen hydrografien yhtenevyys. Ekmanilla vertailupareja on vain vähän.

		Pearson r	p-arvo	R ²	RMSE (l/s)	n (parit)
Ekman	<i>tulouoma</i>	0,977	0,069	0,955	1,2	3
	<i>lähtöuoma</i>	0,895	0,001	0,801	2,5	9
Imponoja	<i>tulouoma</i>	0,978	0,000	0,956	7,6	14
	<i>lähtöuoma</i>	0,96	0,000	0,922	4,8	69

Tilastollisia vertailuja varten tarkastelin virtaama- ja vedenpinta-aikasarjojen jakaumia SPSS-tilasto-ohjelmalla. Jotta altaiden ja uomien aikasarjat olisivat keskenään vertailukelpoisia, keskiarvotin aikasarjat vuorokausittain Excelissä. Shapiro-Wilkin normaalijakautuneisuustestin p-arvot olivat kaikilla aika-sarjoilla < 0,001 (kuvat 43 ja 44), joten tarkastelen aineistosta tunnuslukuja, jotka kuvaavat hyvin ei-normaalijakautunutta aineistoa. Tällaisia lukuja ovat esimerkiksi keskiarvon sijaan mediaani, kvartiilit ja fraktiilit (Nummenmaa ym. 2014). Koska aineistot ovat aikasarjoja, kuvaa mediaani keskimmäisenä lukuna sitä, minkä alle havainnot jäävät 50 % ajasta. Vuorokausikeskiarvojen tunnusluvut molemmissa sijainneissa poikkeavat hieman tulouoman ja lähtöuoman välillä, mikä liittyyne hydrografien lähtöaineiston eroihin (taulukko 12) sekä Ekmanilla eroavaan aikajaksoon. Myös vuorokausittainen jako vaikuttanee, jos vesi ei siirry yläjuoksulta alajuoksulle tasan vuorokausittain. Vuorokausikeskiarvojen ero tulo- ja lähtöuoman välillä ei ollut tilastollisesti merkitsevä kummallakaan vesiensuojelurakenteella.



Kuva 43. Virtaaman ja vedenpinnan korkeuden aikasarjat Ekmanin altaissa eivät olleet normaalisti jakautuneet. Tarkastelujakso tulouomassa ja laskeutusaltaassa 11.7.–18.12.2017, lähtöuomassa ja kosteikossa 13.5.–18.12.2017.



Kuva 44. Virtaaman ja vedenpinnan korkeuden aikasarjat Imponojan altaissa eivät olleet normaalisti jakautuneet 12.4.–18.12.2017.

Taulukko 12. Virtaaman vuorokausikeskiarvojen tunnuslukuja. Pienistä eroista huolimatta tulo- ja lähtöoman väliset erot eivät olleet tilastollisesti merkitseviä. Ekmanilla T-testin p-arvo = 0,747 ja Imponojalla p-arvo 0,47.

	Ekman		Imponoja	
	<i>tulouoma</i>	<i>lähtöuoma</i>	<i>tulouoma</i>	<i>lähtöuoma</i>
<i>maksimi</i>	65,8	57,3	205,1	190,0
<i>95-fraktiili</i>	39,2	38,8	94,6	93,4
<i>75-fraktiili</i>	29,6	27,3	50,0	51,8
<i>mediaani</i>	17,1	12,8	19,3	22,8
<i>25-fraktiili</i>	4,7	8,4	3,9	11,4
<i>keskihajonta</i>	14,3	11,4	32,9	30,8
<i>n</i>	161	220	251	251

5.1.3 Topografia

Kahdesta testatusta eri kriging-menetelmällä tehdystä korkeusmallista valittiin kullekin topografialle ja batymetrialle käyttöön paremmin referenssiaineistoa vastaava. Mallien ja referenssiaineiston vastaavuutta tarkasteltiin jäännösten neliöjuuren keskiarvolla (engl. *root mean square error, RMSE*), Pearsonin lineaarisella korrelaatiolla (r) ja selitysasteella (R^2) (taulukko 13). Jäännösten tarkastelu kertoo, miten paljon mitatut arvot poikkeavat mallista (esim. Heywood ym. 2011: 241). Selitysaste kertoo, miten suuri osuus mallinnetuista arvoista selittyy mitatuilla arvoilla. Valmiit mallit vastaavat hyvin mitattuja arvoja. Alin mallin selitysaste oli Imponojan alakosteikon vesialueella (0.888), missä kuitenkin RMSE arvo oli valituista malleista pienin vesialueella. Muuten korkeusmallien selitysasteet olivat suurempia kuin 0.95. Korkeusmallien voi siis ajatella edustavan hyvin kosteikkojen pinnanmuotoja sekä mittaushetkien vedenpinnan alta, että kuivan maan alueelta.

Taulukko 13. Korkeusmallien valintaan vaikuttaneet validointiarvot. Ordinary Kriging ja Simple Kriging antoivat kumpikin validoitaessa hyviä tuloksia R^2 :n ja RMSE:n suhteen. Kunkin altaan vedenalaisista ja -päällisistä malleista valittiin analyysiin paremmat tunnuslukujen perusteella. Ekmanin kosteikon batymetriaksi valittiin Ordinary Kriging -malli intuition perusteella; siinä vesialue oli yhtenäinen mittaamattomalla alalla. Valittujen mallien arvot lihavoitu. Kaikki p-arvot < 0,001.

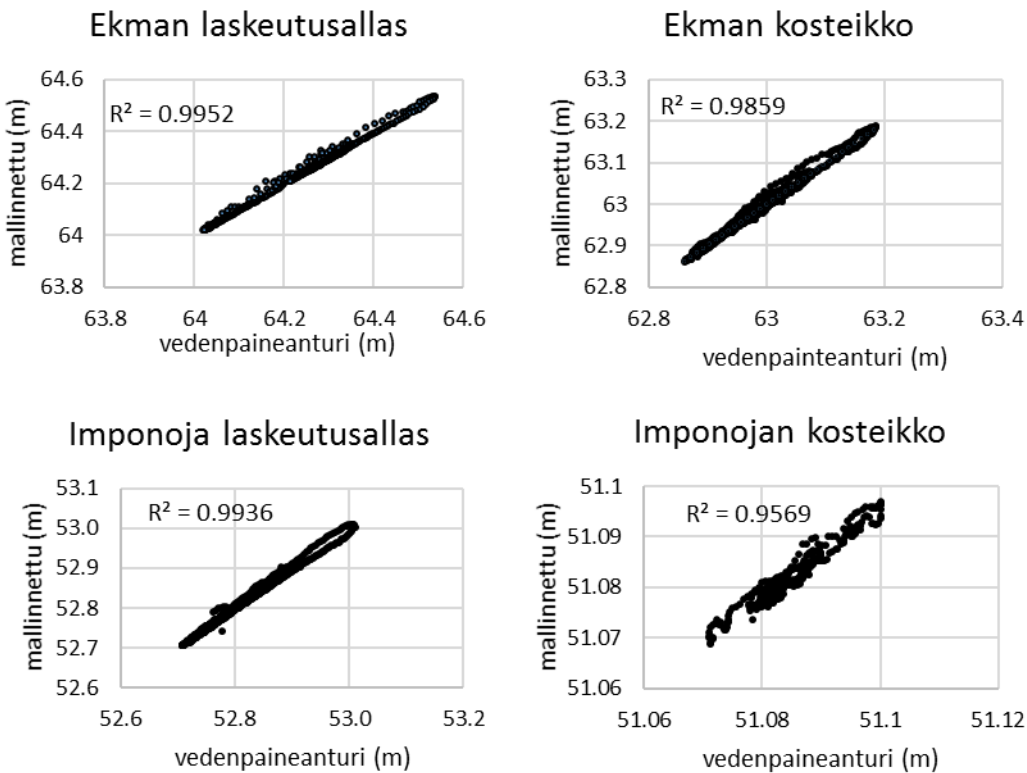
		Ordinary Kriging			Simple Kriging		
		R^2	r^*	RMSE (m)	R^2	r^*	RMSE (m)
<i>Ekman laskeutusallas</i>	<i>batymetria</i>	0,954	0,977	0,071	0,931	0,965	0,088
	<i>topografia</i>	0,994	0,997	0,044	0,994	0,997	0,044
<i>Ekman kosteikko</i>	<i>batymetria</i>	0,959	0,979	0,087	0,950	0,975	0,097
	<i>topografia</i>	0,998	0,999	0,041	0,999	0,999	0,038
<i>Imponoja laskeutusallas</i>	<i>batymetria</i>	0,969	0,984	0,063	0,961	0,980	0,072
	<i>topografia</i>	0,972	0,986	0,075	0,976	0,988	0,078
<i>Imponoja kosteikko</i>	<i>batymetria</i>	0,851	0,922	0,057	0,888	0,942	0,060
	<i>topografia</i>	0,999	1,000	0,044	0,999	1,000	0,048

5.1.4 Virtaussimulaatiot

Virtaussimulaatioiden todenmukaisuutta tarkastelin vertaamalla simuloituja vedenpinnan korkeuksia (30 minuutin intervallilla) suoraan vedenpaineantureista saatuihin vedenpinnankorkeuksiin (taulukko 14 ja kuva 45). Virtaussimulaatioiden pohjana olivat keskiarvotetut aikasarjat, joten vertailu tapahtui eri lukujen välillä. Mitattujen ja mallinnettujen vedenpinnankorkeuden aikasarjoista vertailtiin lineaarista korrelaatiota, korrelaation p-arvoa, mallin selitysastetta ja jäännösten neliöjuuria. Ekmanin altailla validoinnin vertailuparien lukumäärä on pienempi, koska siellä ei simuloitu kevätaikaisia virtaamia. Lisäksi Ekmanin laskeutusaltaalla vedenpaineanturilla mitattiin vedenpinnan korkeutta tunnin intervallilla, muuten käytettiin 30 minuutin välein mitattuja aikasarjoja.

Taulukko 14. Virtaussimuloitujen ja mitattujen vedenpinnankorkeuksien yhtenevyys. RMSE-arvot ovat pienemmät kuin vedenpainesensorin datan muunnoksessa käytetyn VRS-RTK-GNSS:n virhemarginaali.

		Pearson r	p-arvo	R ²	RMSE (m)	n (parit)
Ekman	laskeutusallas	0,998	0,000	0,995	0,009	531
	kosteikko	0,993	0,000	0,986	0,008	1059
Imponoja	laskeutusallas	0,997	0,000	0,994	0,004	1900
	kosteikko	0,980	0,000	0,959	0,032	1948



Kuva 45. Virtausmallinnusten ja vedenpainesensoreista saatujen vedenpinnankorkeuksien yhteys on selvästi lineaarinen ja mallinnus vastaa hyvin mitattuja arvoja.

Virtausnopeuden jakaumat eivät ole kummallakaan laskeutusaltaalla tai kosteikolla normaalisti jakautuneet (taulukot 15 ja 16). Näin ollen sekä syvyysskeskiarvotettuja ja pohjanläheisiä virtausnopeuksia on mielekästä tarkastella ei-normaalijakautuneelle aineistolle sopivien tunnuslukujen pohjalta, kuten kvartiileina ja fraktiileina.

Taulukko 15. Syvyysskeskiarvotettujen virtaussimulaatioiden jakaumien tunnuslukuja. Shapiro-Wilkin normaalijakautuneisuustestin p-arvo oli kaikissa tapauksissa <0,001, eli jakaumat poikkeavat normaalijakaumasta.

		<i>Ekman syv. ka. virtaus</i>		<i>Imponoja syv. ka. virtaus</i>	
		<i>laskeutusallas</i>	<i>kosteikko</i>	<i>laskeutusallas</i>	<i>kosteikko</i>
huhtikuu	<i>vinous</i>			14,6	11,6
	<i>huipukkuus</i>			243,3	197,1
	<i>n</i>			1766	1359
kesäkuu/ elokuu	<i>vinous</i>	3,4	6	14,1	11,3
	<i>huipukkuus</i>	16,8	43,4	228,6	187,2
	<i>n</i>	1050	2323	1766	1354
lokakuu	<i>vinous</i>	3,3	5,7	12	6,9
	<i>huipukkuus</i>	17,3	41,1	178,2	74,6
	<i>n</i>	1088	2448	1802	1386
joulukuu	<i>vinous</i>	3,2	5,2	10,1	5,8
	<i>huipukkuus</i>	16,5	35,7	138,6	58,5
	<i>n</i>	1122	2493	1849	1425

Taulukko 16. Pohjanläheisten virtaussimulaatioiden jakaumien tunnuslukuja. Shapiro-Wilkin normaalijakautuneisuustestin p-arvo oli kaikissa tapauksissa <0,001, eli jakaumat poikkeavat normaalijakaumasta.

		<i>Ekman pohjavirtaus</i>		<i>Imponoja pohjavirtaus</i>	
		<i>laskeutusallas</i>	<i>kosteikko</i>	<i>laskeutusallas</i>	<i>kosteikko</i>
Kevät	<i>vinous</i>			22,6	18,3
	<i>huipukkuus</i>			636,6	442,087
	<i>n</i>			1766	1359
Kasvukausi	<i>vinous</i>	9,6	11,4	19,5	18,7
	<i>huipukkuus</i>	132	217,6	491,2	462,5
	<i>n</i>	1050	2323	1766	1354
Kasvukau- den	<i>vinous</i>	10,6	10,5	19,8	11,2
	<i>huipukkuus</i>	167,5	193,4	546,4	190,9
	<i>n</i>	1088	2448	1802	1386
Syystalvi	<i>vinous</i>	10,7	10,6	18,9	12,4
	<i>huipukkuus</i>	168,2	198,5	532,2	243,9
	<i>n</i>	1122	2493	1849	1425

5.2 Sameuden ja kiintoaineen pidättyminen

5.2.1 Sameuden pidättyminen altaissa

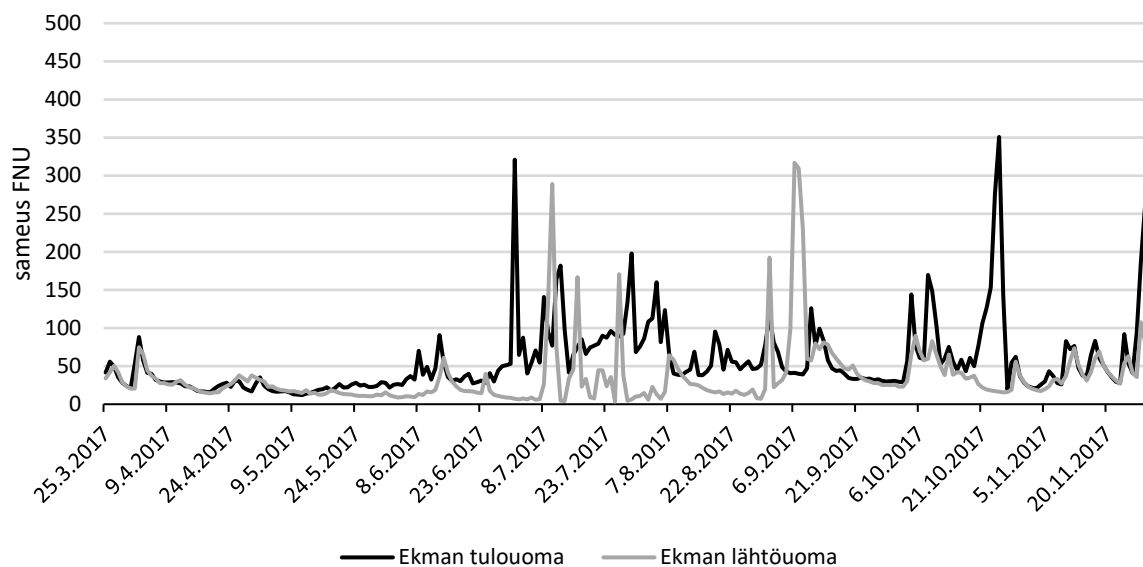
Ekmanilla sameusarvot ovat yleisesti ottaen pienempiä alajuoksulla kuin yläjuoksulla (taulukko 17). Imponojalla tilanne on päinvastainen eli laskeutusallas ja kosteikko eivät vaikuta vähentävän sameutta. Uomien sameudet korreloivat tilastollisesti merkitsevästi vain Ekmanilla, mutta molemmissa tapauksissa uomien sameuksien välinen korrelaatio on heikko (taulukko 18). T-testien p-arvot osoittavat, että molemmissa sijainneissa ero laskeutusaltaaseen tulevan ja kosteikosta lähtevän sameuden välillä on tilastollisesti merkitsevä koko tarkastelujakson aikana. Eri vuodenaikojen välillä on vaihtelua toimivuudessa (taulukko 17). Ekmanin altaat pidättävän sameutta koko tarkastelujakson ajan tilastollisesti merkitsevästi, mutta vuodenajoittaisista tuloksista vain touko–lokakuun tulos on tilastollisesti merkitsevä. Imponojan altaat pidättävät sameutta tilastollisesti merkitsevästi koko mittausjakson ajan. Vuodenajoittaisista tuloksista tilastollisesti merkitseviä ovat sameuden pidättyminen maalishuhtikuussa ja sameuden kasvu marraskuussa. Sameuden aikasarjojen visuaalinen tarkastelu paljastaa, että sameus tulee kaikkiin altaisiin äkillisinä piikkeinä (kuvat 46 ja 47).

Taulukko 17. Tulo- ja lähteuomien sameuden ero kaksisuuntaisen T-testauksen perusteella. Koko tarkastelujaksolla Ekmanin altaat vähentävät sameutta, Imponojalla lähteuoman vesi on sameampaa kuin tulouoman. Imponojan altaat toimivat tarkasteluvuonna maalishuhtikuussa. Ekmanin altaat toimivat erityisesti marraskuussa, jolloin Imponojan altaat toimivat erittäin huonosti. Tilastollisesti merkitsevät erot keskiarvoissa lihavoitu ja korostettu tummalla taustalla.

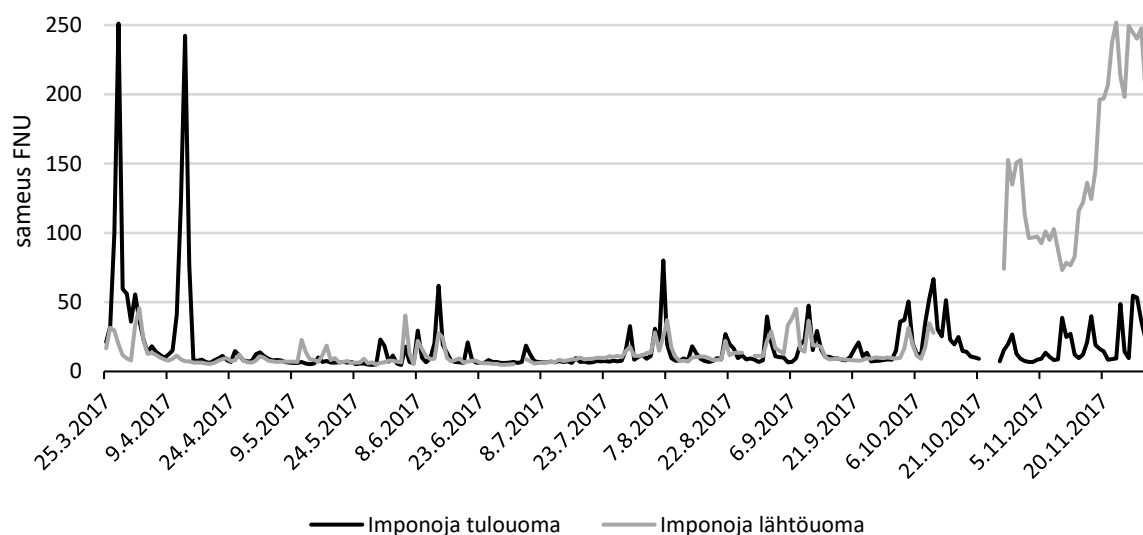
	Ekman		Imponoja	
	<i>tulo</i>	<i>lähtö</i>	<i>tulo</i>	<i>lähtö</i>
<i>vrk. keskiarvo (maalis–marraskuu)</i>	58,2	38,8	17,7	32,6
<i>mediaani</i>	41,6	25,1	9,5	9,9
<i>keskihajonta</i>	55,9	41,5	26,1	54,8
<i>pidättyminen (keskiarvo)</i>		22,4 (38 %)		-15,0 (-84 %)
<i>n</i>	251	251	247	231
<i>vrk. keskiarvo (maalis–huhtikuu)</i>	30,8	30,5	37,6	12,3
<i>mediaani</i>	28,0	27,8	13,7	8,6
<i>keskihajonta</i>	14,7	13,2	57,5	9,1
<i>pidättyminen (keskiarvo)</i>		0,4 (1 %)		25,3 (67 %)
<i>n</i>	37	37	37	37
<i>vrk. keskiarvo (touko–lokakuu)</i>	60,9	35,5	13,3	15,7
<i>mediaani</i>	46,0	19,6	8,7	9,5
<i>keskihajonta</i>	49,2	47,2	11,8	22,8
<i>pidättyminen (keskiarvo)</i>		25,3 (42 %)		-2,3 (-17 %)
<i>n</i>	184	184	184	164
<i>vrk. keskiarvo (marraskuu)</i>	75,6	43,9	19,4	150,9
<i>mediaani</i>	42,8	37,8	12,9	123,2
<i>keskihajonta</i>	100,4	21,5	14,6	64,3
<i>pidättyminen (keskiarvo)</i>		31,6 (42 %)		-131,4 (-676 %)
<i>n</i>	30	30	30	30

Taulukko 18. Tulo- ja lähtöomien sameuden (vrk ka) välinen yhteys. Lievästi positiivinen korrelaatio on tilastollisesti merkitsevä ainoastaan Ekmanin uomissa.

	Ekman	Imponoja
<i>Pearson r</i>	0,124	0,081
<i>p-arvo</i>	0,049	0,219
<i>n</i>	251	231



Kuva 46. Sameuden vuorokausikeskiarvot Ekmanin kosteikon tulo- ja lähtöuomissa. Yläjuoksun (tulo-uoma) sameusarvot ovat yleisesti ottaen suurempia kuin alajuoksulla (lähtö-uoma). Myös yläjuoksulle tulevat sameushuiput ovat suurempia.



Kuva 47. Sameuden vuorokausikeskiarvot Imponojan kosteikon tulo- ja lähtöuomissa. Alajuoksulta (tulo-uoma) lähtevät sameushuiput ovat suurempia kuin yläjuoksulle (tulo-uoma) tulevat.

5.2.2 Kiintoaineen pidättyminen

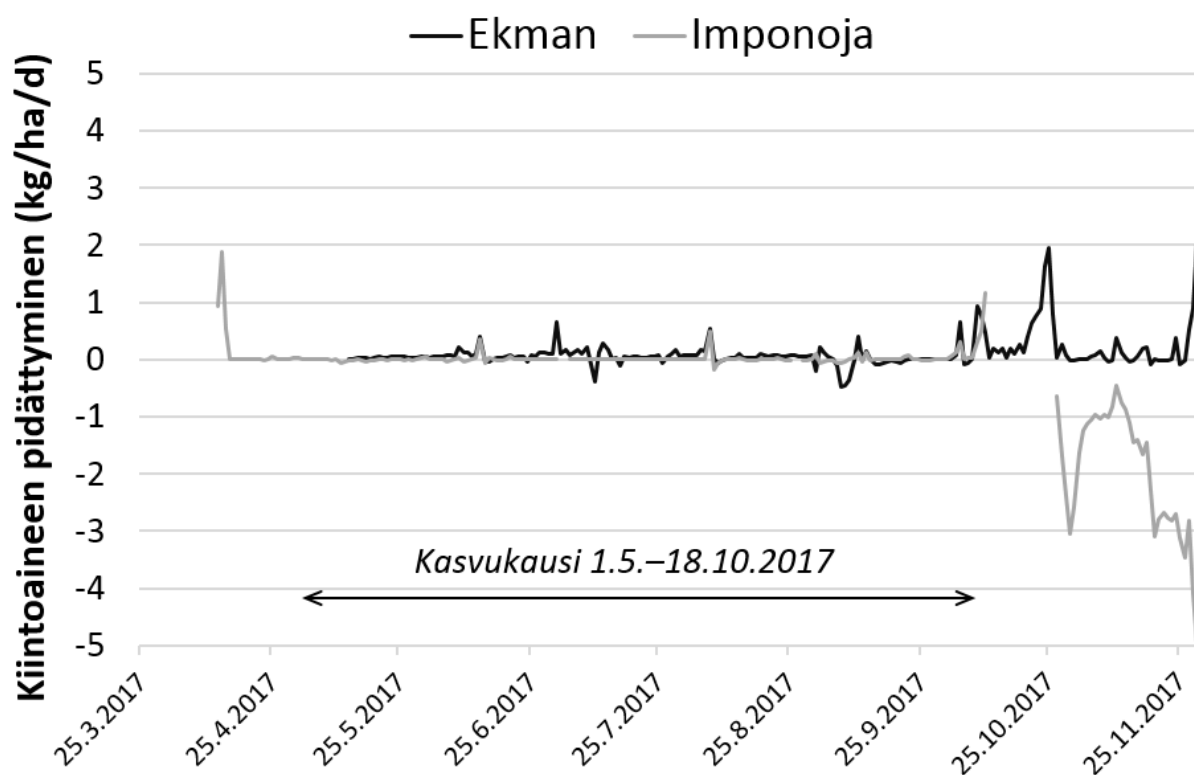
Koko mittausjakson aikana lähtevä kiintoainekuorma on pienempi kuin tuleva kiintoainekuorma Ekmanilla (taulukko 19). Imponojalla tilanne on päinvastainen. Molemmat tulokset ovat tilastollisesti merkitseviä. Eri vuodenaikojen tuloksista tilastollisesti merkitseviä ovat ainoastaan Ekmanin altaiden pidättämä kuorma toukokuusta lokakuuhun (n = 172) ja Imponojan altaiden lisäämä kiintoainekuorma marraskuussa (n = 30). Koko mittausjakson aikana tulo- ja lähtöomien kiintoainekuormat (kg/ha/d) korreloivat molemmissa tapauksissa positiivisesti, tilastollisesti merkitsevällä tasolla (taulukko 20). Vuodenaikaisesta pidättymisen kuvaajasta (kuva 48) voidaan havaita, että suuri osa Imponojalta lähtevästä kiintoainekuormasta vapautuu lokakuun lopun jälkeen. Ekmanilla lokakuussa puolestaan tapahtuu suurin vuodenaikainen pidättyminen.

Taulukko 19. Tulo- ja lähtöomien kiintoainekuorman ero kaksisuuntaisen T-testauksen perusteella ja muita tunnuslukuja. Koko tarkastelujaksolla Ekmanin altaat vähentävät kiintoainekuormaa, Imponojalla eivät. Tilastollisesti merkitsevät erot (tasolla 0,05) on lihavoitu ja korostettu tummalla taustalla. Mittausjakson havainnot ovat Ekmanilta 12.5.–30.11. ja Imponojalta 12.4.–30.11.

	Ekman		Imponoja	
	<i>tulo</i>	<i>lähtö</i>	<i>tulo</i>	<i>lähtö</i>
<i>vrk. ka</i> (kg/ha/d) (mittausjakso)	0,304	0,167	0,141	0,427
<i>mediaani</i> (kg/ha/d)	0,117	0,066	0,035	0,031
<i>keskihajonta</i> (kg/ha/d)	0,545	0,209	0,288	0,987
<i>vrk. keskiarvojen summa</i> (kg/ha/d)	61,477	33,718	32,465	90,900
<i>pidättyminen</i> (keskiarvo, kg/ha/d)	0,137 (45 %)		-0,285 (-202 %)	
<i>n</i>	202	202	229	213
<i>vrk. ka</i> (kg/ha/d) (maalis–huhtikuu)			0,226	0,041
<i>mediaani</i> (kg/ha/d)			0,046	0,039
<i>keskihajonta</i> (kg/ha/d)			0,480	0,019
<i>vrk. keskiarvojen summa</i> (kg/ha/d)			4,286	0,784
<i>pidättyminen</i> (keskiarvo, kg/ha/d)				0,184 (81 %)
<i>n</i>			19	19
<i>vrk. ka</i> (kg/ha/d) (touko–lokakuu)	0,235	0,131	0,107	0,127
<i>mediaani</i> (kg/ha/d)	0,097	0,051	0,023	0,024
<i>keskihajonta</i> (kg/ha/d)	0,323	0,176	0,252	0,438
<i>vrk. keskiarvojen summa</i> (kg/ha/d)	40,350	22,455	19,336	20,818
<i>pidättyminen</i> (keskiarvo, kg/ha/d)	0,104 (44 %)			-0,020 (-18 %)
<i>n</i>	172	172	180	164
<i>vrk. ka</i> (kg/ha/d) (marraskuu)	0,704	0,375	0,295	2,310
<i>mediaani</i> (kg/ha/d)	0,332	0,289	0,156	1,832
<i>keskihajonta</i> (kg/ha/d)	1,120	0,258	0,283	1,329
<i>vrk. keskiarvojen summa</i> (kg/ha/d)	21,127	11,263	8,843	69,298
<i>pidättyminen</i> (keskiarvo, kg/ha/d)	0,329 (47 %)		-2,015 (-683 %)	
<i>n</i>	30	30	30	30

Taulukko 20. Tulo- ja lähtöomien kiintoainekuorman (kg/ha/d) vuorokausikeskiarvojen välinen yhteys. Positiivinen korrelaatio on tilastollisesti merkitsevä molemmissa tapauksissa.

	Ekman	Imponoja
<i>Pearson r</i>	0,602	0,423
<i>p-arvo</i>	< 0,001	< 0,001
<i>n</i>	202	213



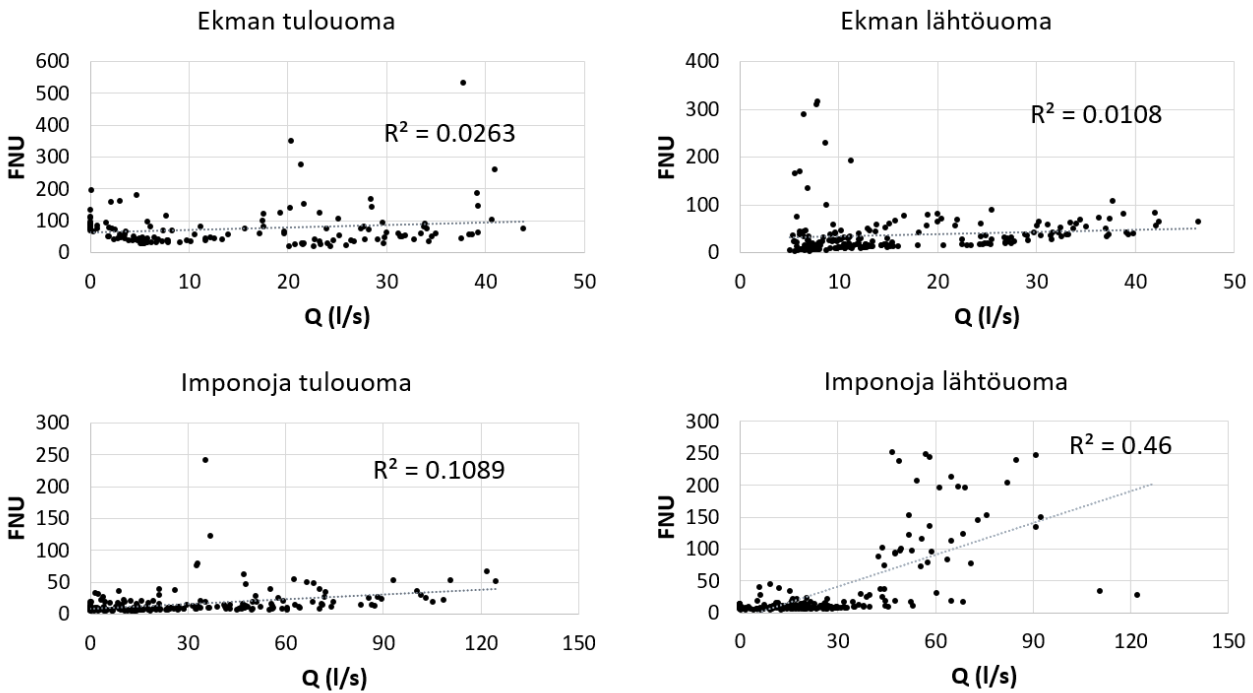
Kuva 48. Vuodenaikainen kiintoaineen pidättyminen altaissa aikasarjana. Vaikka Ekmanin altaat tilastollisesti pidättävät kiintoainesta koko tarkastelujakson ajan, on niiden toiminnassa huomattavaa vaihtelua tarkastelujakson aikana. Joissain tilanteissa myös Imponojan altaat pidättävät kiintoainesta.

5.2.3 Virtaaman yhteys sameuteen ja kiintoaineeseen

Pearsonin lineaarisella korrelaatiolla löytyi tilastollisesti merkitsevä positiivinen korrelaatio virtaaman ja sameuden välillä kaikista uomista (taulukko 21). Lineaarinen korrelaatio oli Ekmanin kosteikolla hyvin heikko ja Imponojan kosteikolla voimakkaampi. Varsinkin Imponojan lähtuomassa virtaama ja sameus korreloivat voimakkaasti. Hajontakuvioiden (kuva 49) perusteella yhteys ei ole täysin lineaarinen missään uomassa.

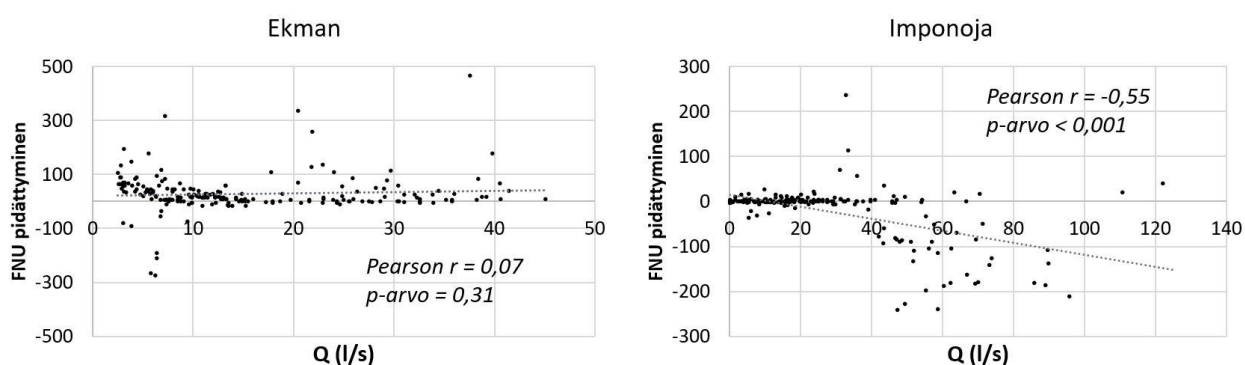
Taulukko 21. Sameuden (NTU-arvoista johdettu FNU) ja virtaaman (l/s) lineaarinen korrelaatio kosteikkojen tulo- ja lähtuomissa on kaikissa tapauksissa positiivinen. Kaikissa uomissa 4 tunnin keskiarvojen yhteydet ovat tilastollisesti merkitseviä tasolla 0,05. Vuorokausikeskiarvojen yhteys on voimakkaampaa, mutta tilastollisesti merkitsevä ainoastaan Imponojan uomissa.

		4 h keskiarvot				vrk ka			
		Pearson r	p-arvo	R ²	n	Pearson r	p-arvo	R ²	n
Ekman	tulouoma	0,129	< 0,001	0,017	855	0,162	0,053	0,026	143
	lähtuoma	0,077	0,007	0,006	1209	0,104	0,141	0,011	202
Imponoja	tulouoma	0,299	< 0,001	0,089	1363	0,330	< 0,001	0,110	229
	lähtuoma	0,678	< 0,001	0,459	1267	0,678	< 0,001	0,460	213



Kuva 49. Sameuden (FNU) ja virtaaman (l/s) vuorokausikeskiarvojen hajontakuviot paljastavat suurta poikkeavuutta lineaarisen yhteyden kuvaajavasta. Hajontakuviosta ei muutenkaan ole yksiselitteisesti havaittavissa selvää yhteyttä.

Tulo- ja lähtöomien välisen sameuseron ja virtaaman korrelaatio kertoo altaiden toiminnasta virtaaman kasvaessa (kuva 50 ja taulukko 22). Ekmanilla yhteys ei ole koko aineistossa tilastollisesti merkitsevä, mutta sameus enimmäkseen pidättyy etenkin silloin, kun virtaama kasvaa. Suurin osa havainnoista viittaa sameuden pidättymiseen, kun virtaa yllittää noin 20 l/s. Imponojalla sen sijaan koko aineiston yhteys on tilastollisesti merkitsevä, ja selvästi suurin osa havainnoista viittaa sameuden kasvuun tulouoman ja lähtöuoman välillä, kun virtaama on yli 40 l/s. Vuodenaikaisen tarkastelun mukaan ravinteiden pidättymisen ja virtaaman kasvun korrelaatio oli Ekmanilla tilastollisesti merkitsevää marraskuussa (n = 30) (taulukko). Muutoin korrelaatio ei ollut tilastollisesti merkitsevä (n = 172). Imponojalla vuodenaajoittain erotelluista korrelaatioista vain touko–lokakuun negatiivinen on tilastollisesti merkitsevä (n = 164). Marraskuun voimakkaampi negatiivinen korrelaatio (n = 30) ei aivan ole tilastollisesti merkitsevä, kuten ei maaliskuu–huhtikuun positiivinenkaan (n = 19).

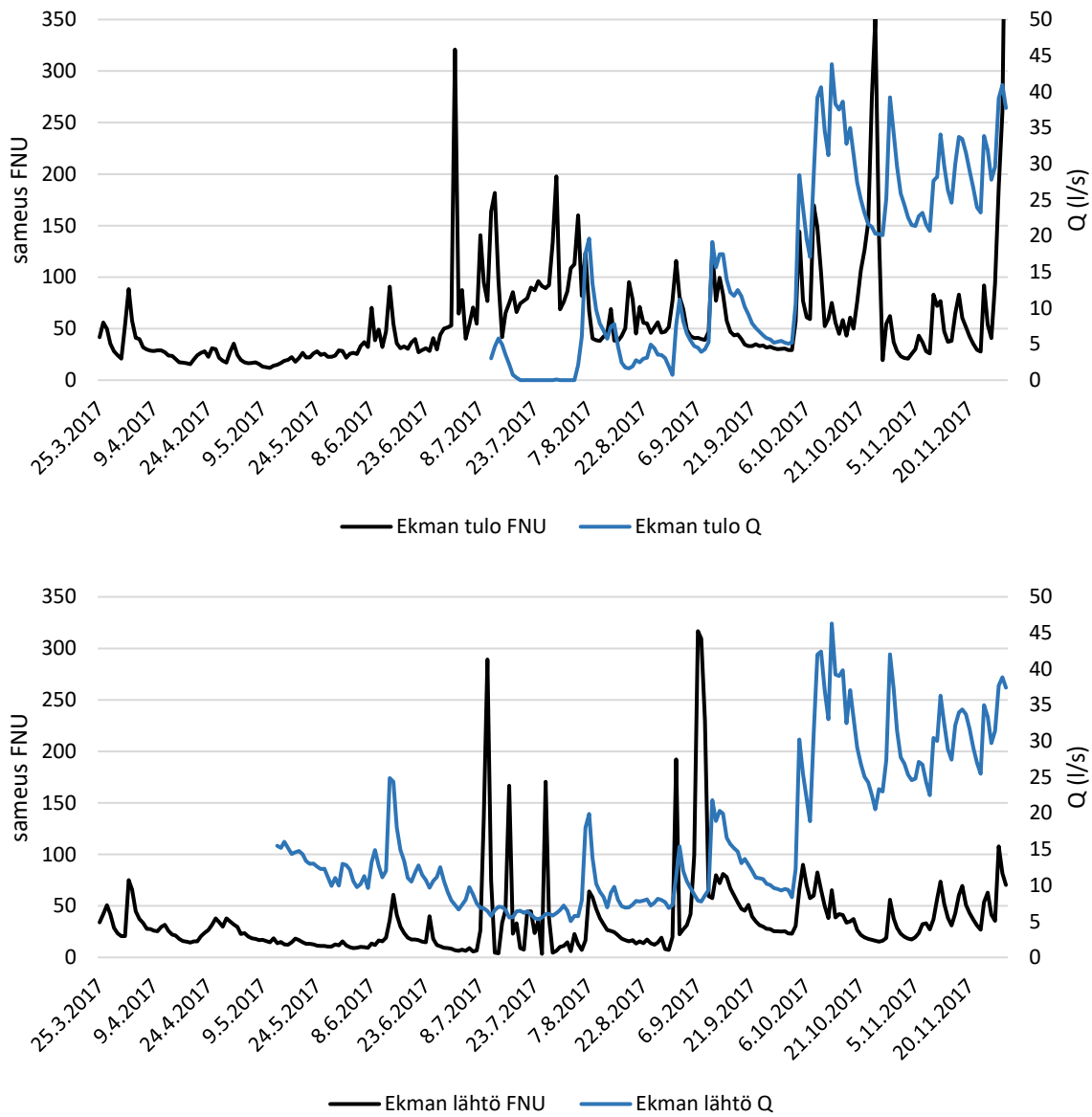


Kuva 50. Sameuden pidättymisen ja virtaaman yhteys vuorokausikeskiarvojen perusteella. Positiivinen sameus tarkoittaa tilannetta, jossa sameus pidättyy. Negatiivinen ero tarkoittaa alajuoksun suurempaa sameutta verrattuna yläjuoksulle. Vain Imponojan negatiivinen korrelaatio on tilastollisesti merkitsevä.

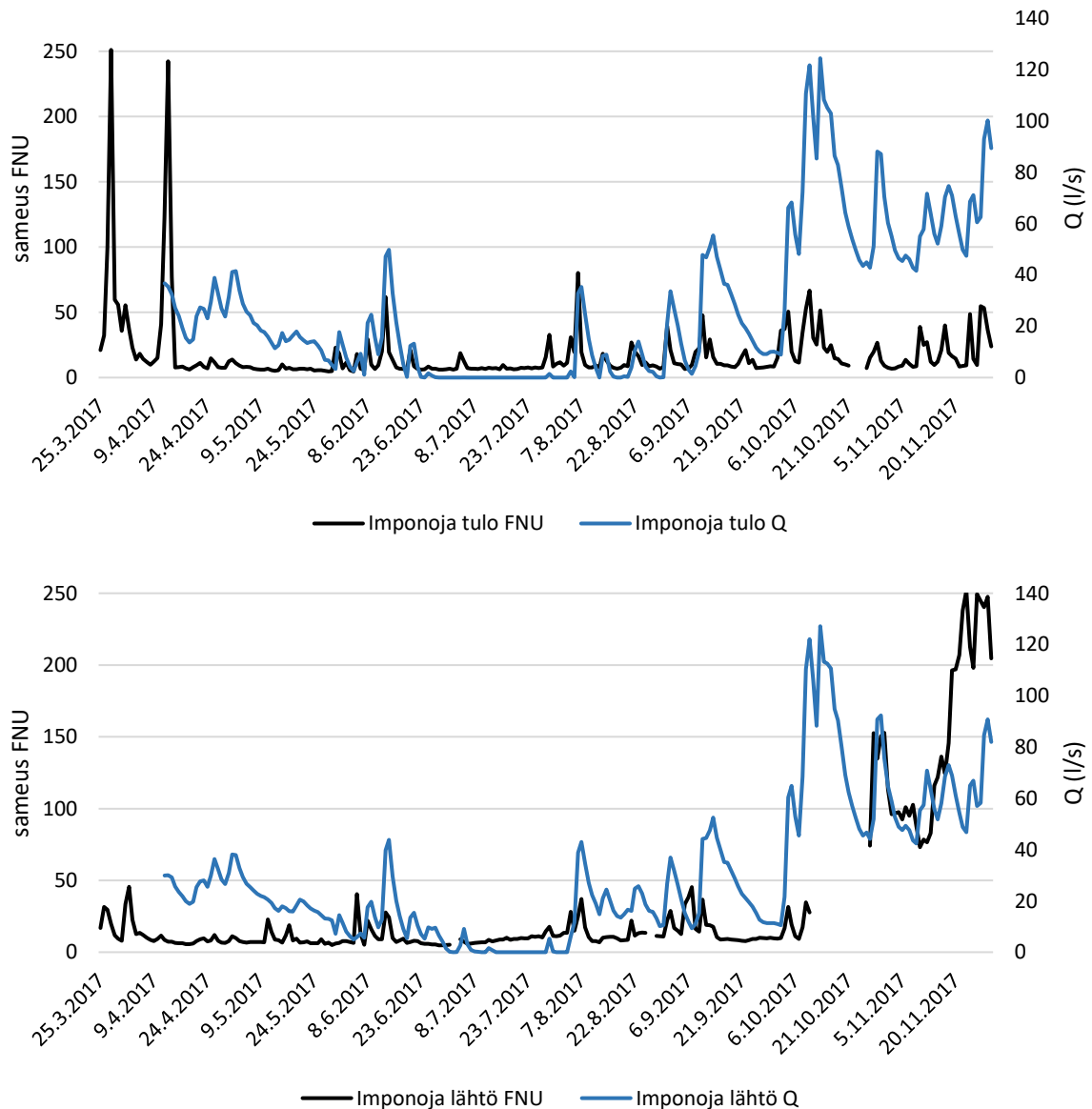
Taulukko 22. Sameuden pidättymisen ja virtaaman korrelaatiot vuodenaajoittain. Positiivinen korrelaatio tarkoittaa tässä tapauksessa sameuden absoluuttista pidättymistä virtaaman kasvaessa. Negatiivinen korrelaatio tarkoittaa kiintoainepitoisuuden absoluuttista kasvua tulouomasta lähtöuomaan siirryttäessä silloin, kun virtaama kasvaa. Tilastollisesti merkitsevät korrelaatiot lihavoitu ja korostettu tummalla taustalla. Ekmanin maaliskuu–huhtikuun korrelaatiota ei laskettu, koska virtaaman aikasarja alkaa vasta toukokuulta.

	Ekman				Imponoja			
	touko- marras	maaliskuu- huhti	touko- loka	marras	maaliskuu- marras	maaliskuu- huhti	touko- loka	marras
Pearson r	0,072	-	0,023	0,515	0,551	0,394	-0,267	-0,323
p-arvo	0,31	-	0,765	0,004	<0,001	0,095	0,001	0,081
n	202	-	172	30	213	19	164	30

Suurimmat sameushuiput eivät tapahdu täysin samanaikaisesti suurimpien virtaamahuippujen kanssa kuin toisinaan (kuvat 51 ja 52). Imponojan lähtöuomassa, missä Pearsonin korrelaatiokerroin oli voimakkain (r = 0,678), suurimmat sameusarvot ajoittuvat virtaama-arvojen tapaan loppuvuodelle.



Kuva 51. Sameuden ja virtaaman aikasarjojen vastaavuus Ekmanin tulo- ja lähtöuomissa. Sameuden ja virtaaman huippujen ajankohdat näyttävät seurailevan toisiaan, mutta voimakkuus ei ole yksiselitteistä.



Kuva 52. Sameuden ja virtaaman aikasarjojen vastaavuus Imponojan tulo- ja lähtöuomissa. Sameuden ja virtaaman huippujen ajankohdat näyttävät seurailevan toisiaan, mutta voimakkuus ei ole yksiselitteistä.

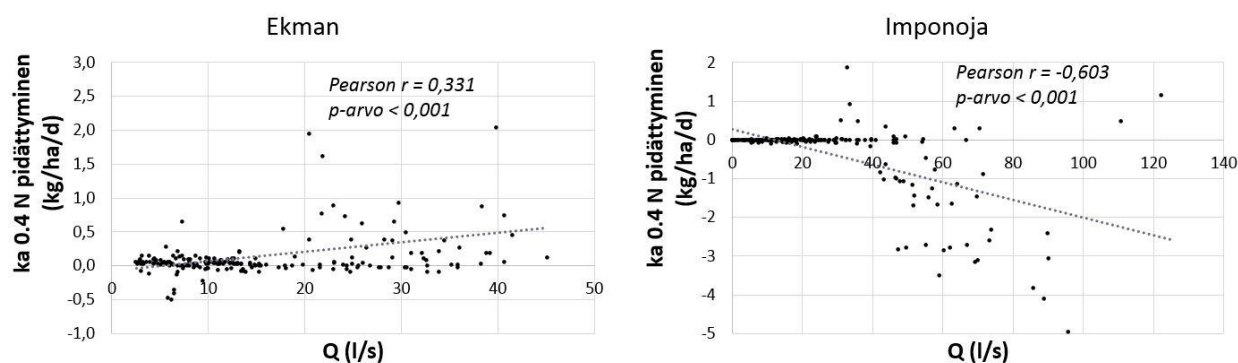
Kiintoaineen pitoisuuden ja virtaaman korrelaatiot (taulukko 23) ovat samankaltaisia, kuin sameuden ja virtaaman (taulukko 21). Kiintoainepitoisuuden korrelaatioissa myös Ekmanin tulooman lievä positiivinen korrelaatio on tilastollisesti merkitsevä tasolla 0,05. Kiintoainekuorman (kg/ha/d) ja virtaaman positiiviset korrelaatiot ovat kaikissa uomissa tilastollisesti merkitseviä tasolla 0,05. Imponojan tulooman korrelaatio on voimakkaampi kuin Ekmanin tulooman, ja lähtöuomien korrelaatiot ovat lähes yhtä voimakkaat. Kiintoainekuorman pidättymisen vuodenaikaiset korrelaatiot (taulukko 24) ovat päinvastaiset verrattuna Ekmanin ja Imponojan välillä.

Taulukko 23. Kiintoaineen pitoisuuden (mg/l) ja kuorman (kg/ha/d) sekä virtaaman (l/s) lineaarinen korrelaatio kosteikkojen tulo- ja lähtöuomissa on kaikissa tapauksissa positiivinen. Ainoastaan Ekmanin lähtöuomassa pitoisuuden ja virtaaman korrelaatio ei ole tilastollisesti merkitsevä (tasolla 0,05). Tilastollisesti merkitsevät korrelaatiot lihavoitu korostettu tummalla taustalla. Korrelaatiot on laskettu vuorokausikeskiarvojen perusteella.

		kiintoaine mg/l			kiintoaine kg/ha/d		
		<i>Pearson r</i>	<i>p-arvo</i>	<i>n</i>	<i>Pearson r</i>	<i>p-arvo</i>	<i>n</i>
Ekman	<i>tulouoma</i>	0,158	0,025	202	0,565	< 0,001	202
	<i>lähtöuoma</i>	0,094	0,185	202	0,761	< 0,001	202
Imponoja	<i>tulouoma</i>	0,314	<0,001	229	0,692	<0,001	229
	<i>lähtöuoma</i>	0,684	< 0,001	213	0,736	<0,001	213

Taulukko 24. Kiintoainekuorman (kg/ha/d) pidättymisen ja virtaaman korrelaatiot vuodenajoin. Positiivinen korrelaatio tarkoittaa tässä tapauksessa sameuden absoluuttista pidättymistä virtaaman kasvaessa. Negatiivinen korrelaatio tarkoittaa kiintoainepitoisuuden absoluuttista kasvua tulouomasta lähtöuomaan siirryttäessä silloin, kun virtaama kasvaa. Tilastollisesti merkitsevät korrelaatiot lihavoitu ja korostettu tummalla taustalla. Ekmanin maalishuhtikuun korrelaatiota ei laskettu, koska virtaaman aikasarja alkaa vasta toukokuulta.

	Ekman				Imponoja			
	<i>touko-</i> <i>marras</i>	<i>maalis-</i> <i>huhti</i>	<i>touko-</i> <i>loka</i>	<i>marras</i>	<i>maalis-</i> <i>marras</i>	<i>maalis-</i> <i>huhti</i>	<i>touko-</i> <i>loka</i>	<i>marras</i>
Pearson r	0,331	-	0,352	0,524	-0,603	0,396	-0,280	-0,694
p-arvo	< 0,001	-	< 0,001	0,003	< 0,001	0,093	< 0,001	< 0,001
n	202	-	172	30	213	19	164	30

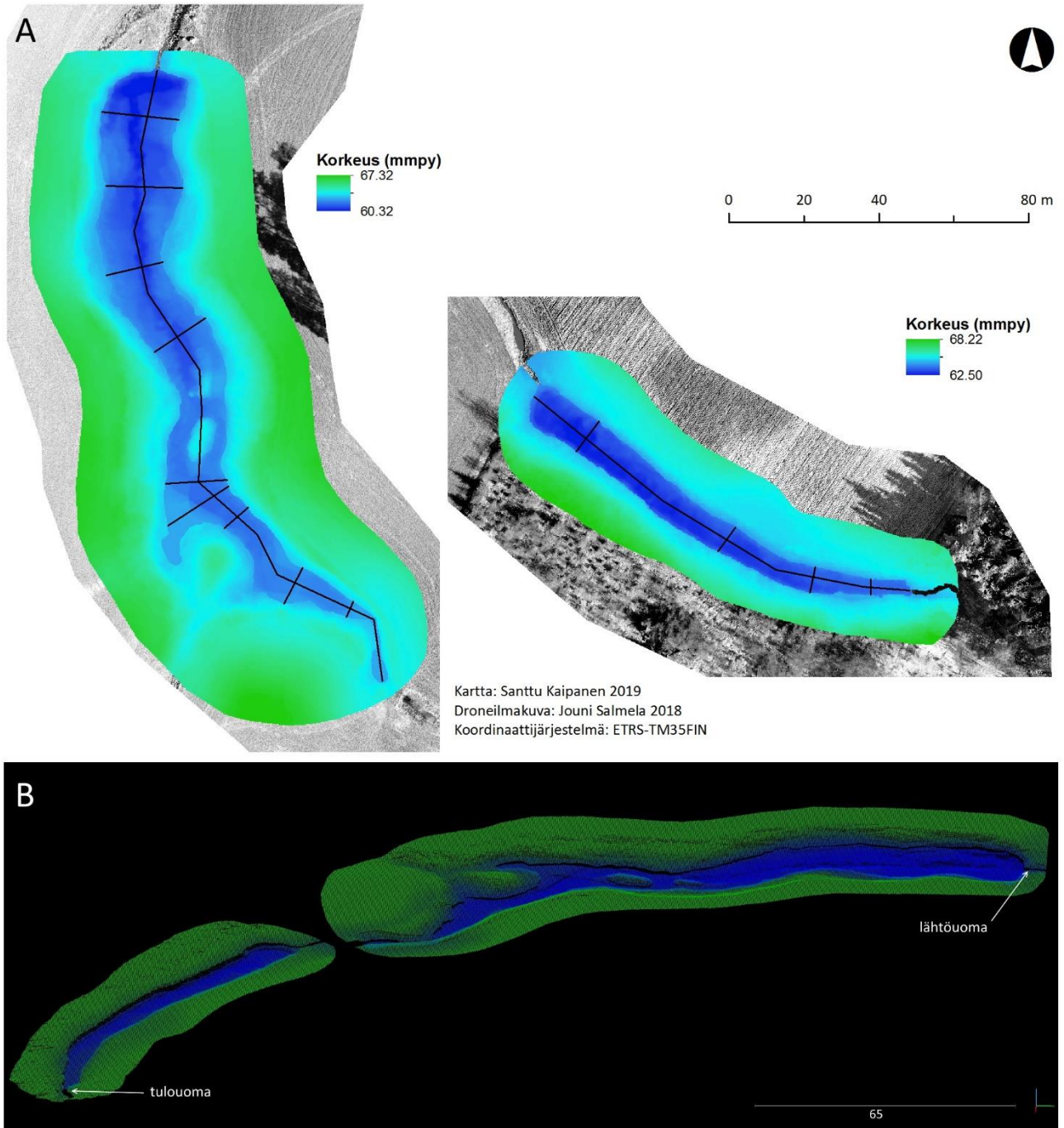


Kuva 53. Absoluuttisen kiintoaineen pidättymisen (kg/ha/d) ja virtaaman yhteys tutkimusaltaissa. Positiivinen korrelaatio tarkoittaa kiintoaineen pidättymistä virtaaman kasvaessa ja negatiivinen korrelaatio kiintoaineen vapautumista virtaaman kasvaessa. Molemmat tulokset ovat tilastollisesti merkitseviä.

5.3 Altaiden topografia ja geometria

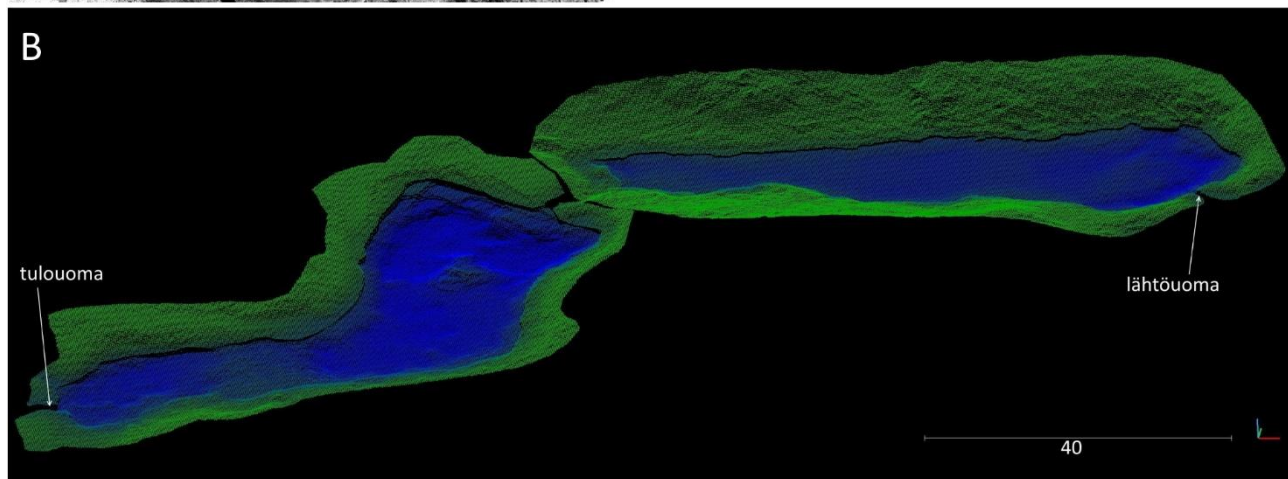
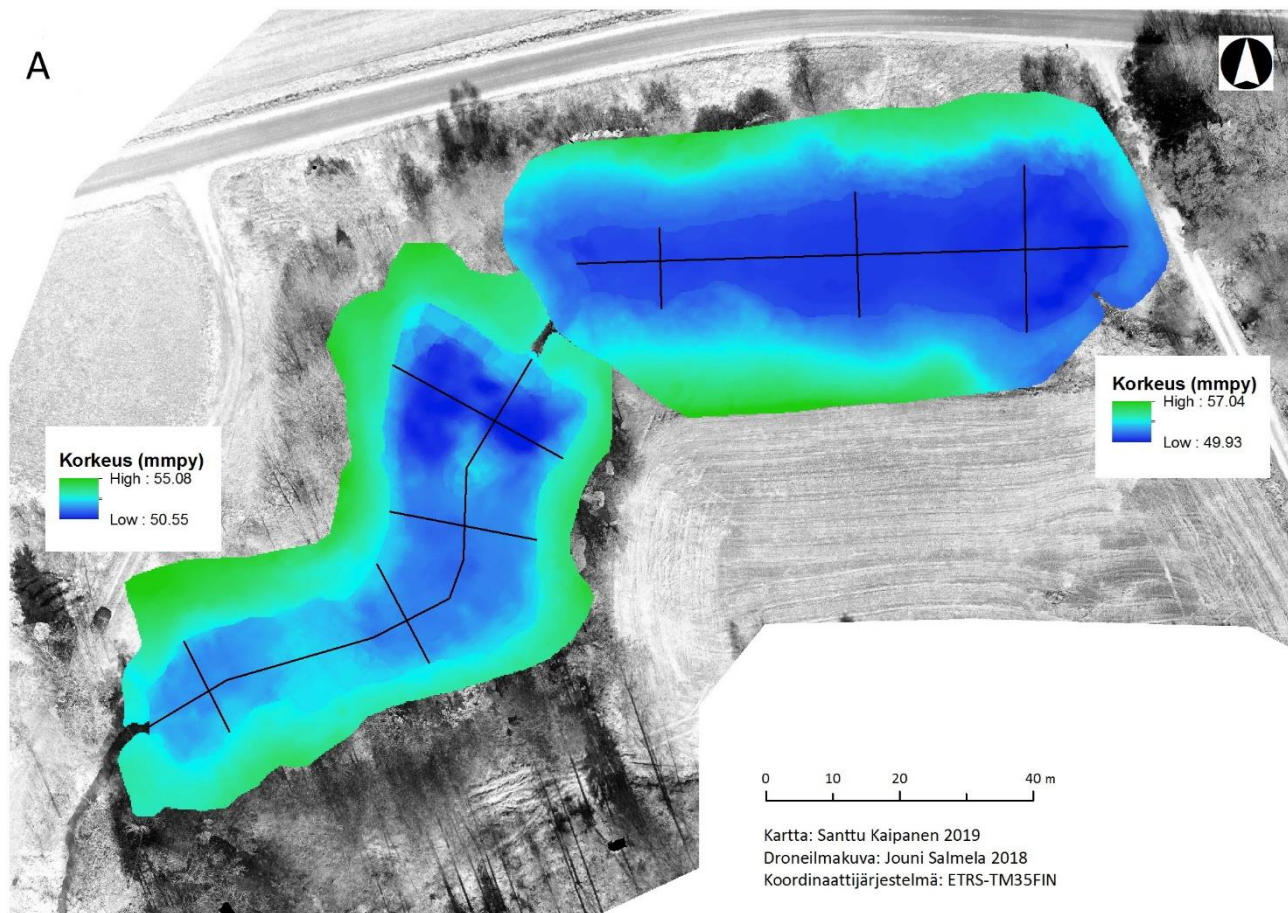
5.3.1 Altaiden topografia

Ekmanin laskeutusallas on syvyydeltään melko tasainen, suurimmat syvyydet ovat etelärannalla (kuva 54). Kosteikon keskellä mutkittelee uomamainen syväne, syvintä on pohjoispäädssä alajuoksulla. Kosteikon syvyys on vaihtelevampaa. Ekmanin altaat ovat muodoltaan huomattavasti pitkulaisempia kuin Imponojan altaat (taulukko 25).



Kuva 54. A) Ekmanin valmiit korkeusmallit. Sinisempi sävy tarkoittaa matalampaa korkeutta ja vihreämpi korkeampaa. Mustat viivat kuvaavat linjoja, joilla altaiden pituus ja leveys on määritetty (taulukko y). B) Ekmanin altaiden korkeusmallit kolmiulotteisina pistepilvinä visualisoituna. Vesialueet sinertävällä ja rannat vihertävällä kuvattuna. Altaiden etäisyys toisiinsa on visualisointisyistä pienempi kuin luonnossa, mutta altaiden koot ovat luonnollisessa suhteessa toisiinsa.

Imponojan laskeutusaltaan jakaa kahteen osaan etelärannan matalikko (kuva 55). Alajuoksun puoleisessa päädyssä on laskeutusaltaan syvin kohta. Kosteikon syvin alue on myös alajuoksulla. Kosteikon koko alueella on tasaisesti vaihtelevaa matalampaa ja syvempää vesialuetta, siten että syvänteet ovat vesialueen keskellä leveysuunnassa.



Kuva 55. A) Imponojan valmiit korkeusmallit. Sinisempi väri tarkoittaa matalampaa korkeutta. Mustat viivat kuvaavat linjoja, joilla altaiden pituus ja leveys on määritetty (taulukko y). B) Imponojan altaiden korkeusmallit kolmiulotteisina pistepilvinä visualisoituna. Vesialueet sinertävällä ja rannat vihertävällä kuvattuna. Aitaiden sijainti toisiinsa on kuten luonnossa.

Taulukko 25. Altaiden pinnanmuotojen lukuarvoja. Vasemmalla Ekmanin altaiden arvot, laskeutusallas ensin. Ylimmät kolme riviä ovat altaan muotoa kuvaavia arvoja, alimmat kolme altaiden syvyyttä kuvaavia.

	Ekman		Imponoja	
	laskeutusallas	kosteikko	laskeutusallas	kosteikko
<i>Pituus (m)</i>	115,7	193,5	88,0	82,4
<i>Leveys keskiarvo (m)</i>	7,25	14,7	18,9	18,5
<i>Pituuden ja leveyden suhde</i>	16:1	13:1	5:1	4:1
<i>Suurin syvyys (m)</i>	1,62	2,59	2,20	1,13
<i>Keskisyvyys (m)</i>	0,94	0,83	0,87	0,48
<i>Syvyyden keskihajonta (m)</i>	0,35	0,54	0,51	0,17

5.3.2 Vesipinta-alan vaihtelu

Ekmanin vesiensuojelukokonaisuus on hieman suurempi sekä absoluuttiselta pinta-alaltaan että suhteessa valuma-alueeseensa kuin Imponojan vesiensuojelukokonaisuus (taulukko 26). Imponojan laskeutusallas on suhteessa valuma-alueen pinta-alaan noin kaksinkertainen Ekmanin laskeutusallastaan verrattuna. Ekmanilla kosteikko on noin kaksinkertainen Imponojaan verrattuna.

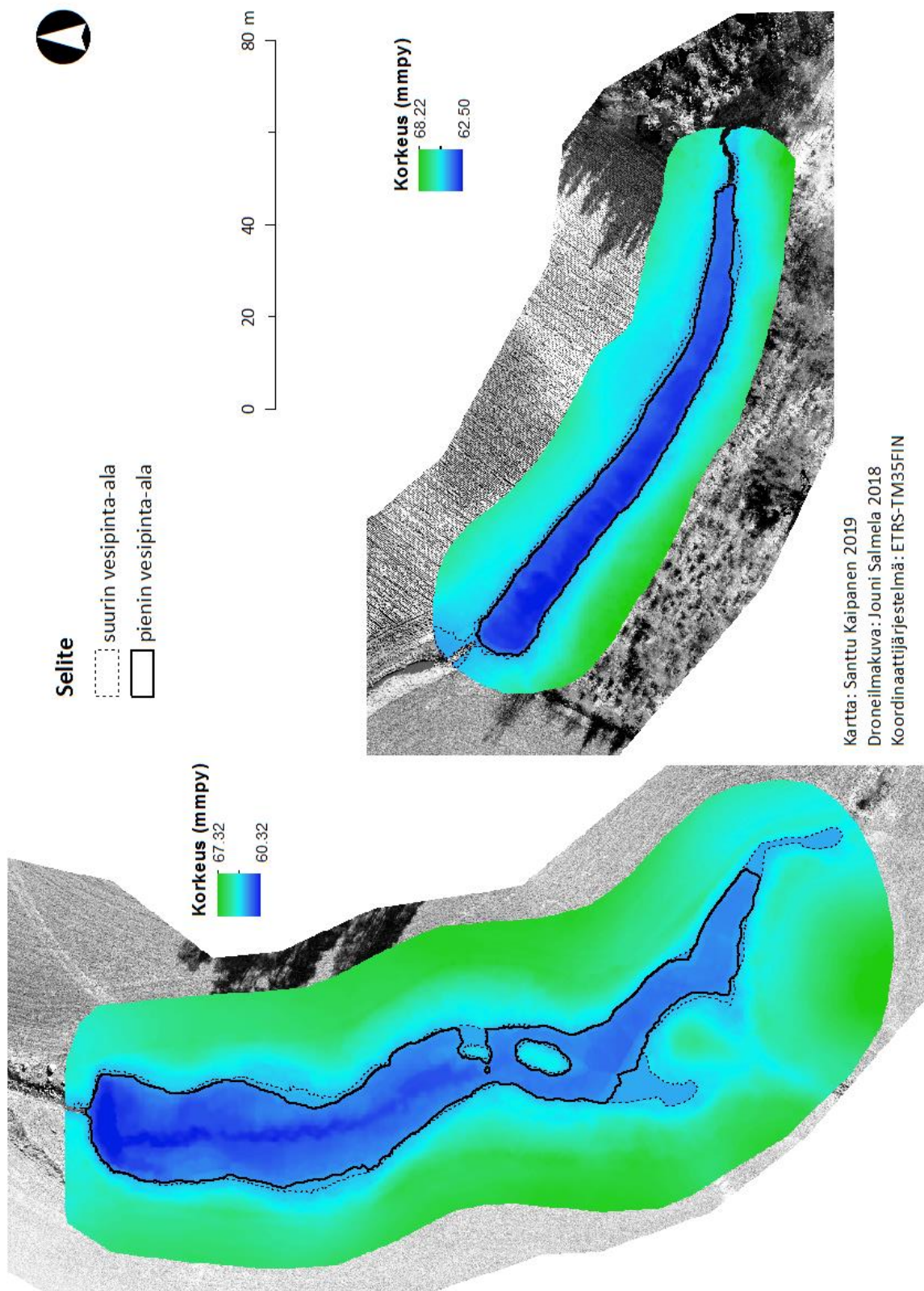
Taulukko 26. Pinta-alan vaihtelu tutkimusaltailta. Taulukossa on tarkasteltu pinta-alan vaihtelua allaskohtaisesti tutkimusajanjaksolla sekä pinta-alan muutosta tilanteiden yleisyysluokkien välillä. Prosenttiluvut (A/A(va)) viittaavat altaiden pinta-alaan suhteessa valuma-alueen pinta-alaan kussakin tilanteessa.

Pinta-ala		Ekman (valuma-alue 2,94 km ²)			Imponoja (valuma-alue 3,22 km ²)		
		<i>m²</i>	<i>muutos (m²)</i>	<i>A/A(va)</i>	<i>m²</i>	<i>muutos (m²)</i>	<i>A/A(va)</i>
<i>Laskeutusallas</i>	<i>min</i>	877		0,030 %	1 698		0,053 %
	<i>25-fraktiili</i>	888	10		1 718	21	
	<i>50-fraktiili</i>	895	8		1 737	19	
	<i>75-fraktiili</i>	904	9		1 771	34	
	<i>max</i>	1 060	156	0,036 %	1 938	167	0,060 %
	yht		183			240	
<i>Kosteikko</i>	<i>min</i>	2 312		0,079 %	1 242		0,039 %
	<i>25-fraktiili</i>	2 347	35		1 247	5	
	<i>50-fraktiili</i>	2 355	8		1 251	4	
	<i>75-fraktiili</i>	2 521	166		1 256	5	
	<i>max</i>	2 737	216	0,093 %	1 390	133	0,043 %
	yht		425			148	
<i>Yhteensä</i>	<i>min</i>	3 189		0,11 %	2 940		0,09 %
	<i>25-fraktiili</i>	3 234	45	0,11 %	2 965	25	0,09 %
	<i>50-fraktiili</i>	3 250	15	0,11 %	2 989	23	0,09 %
	<i>75-fraktiili</i>	3 425	175	0,12 %	3 028	39	0,09 %
	<i>max</i>	3 797	372	0,13 %	3 328	300	0,10 %
	yht		608			388	

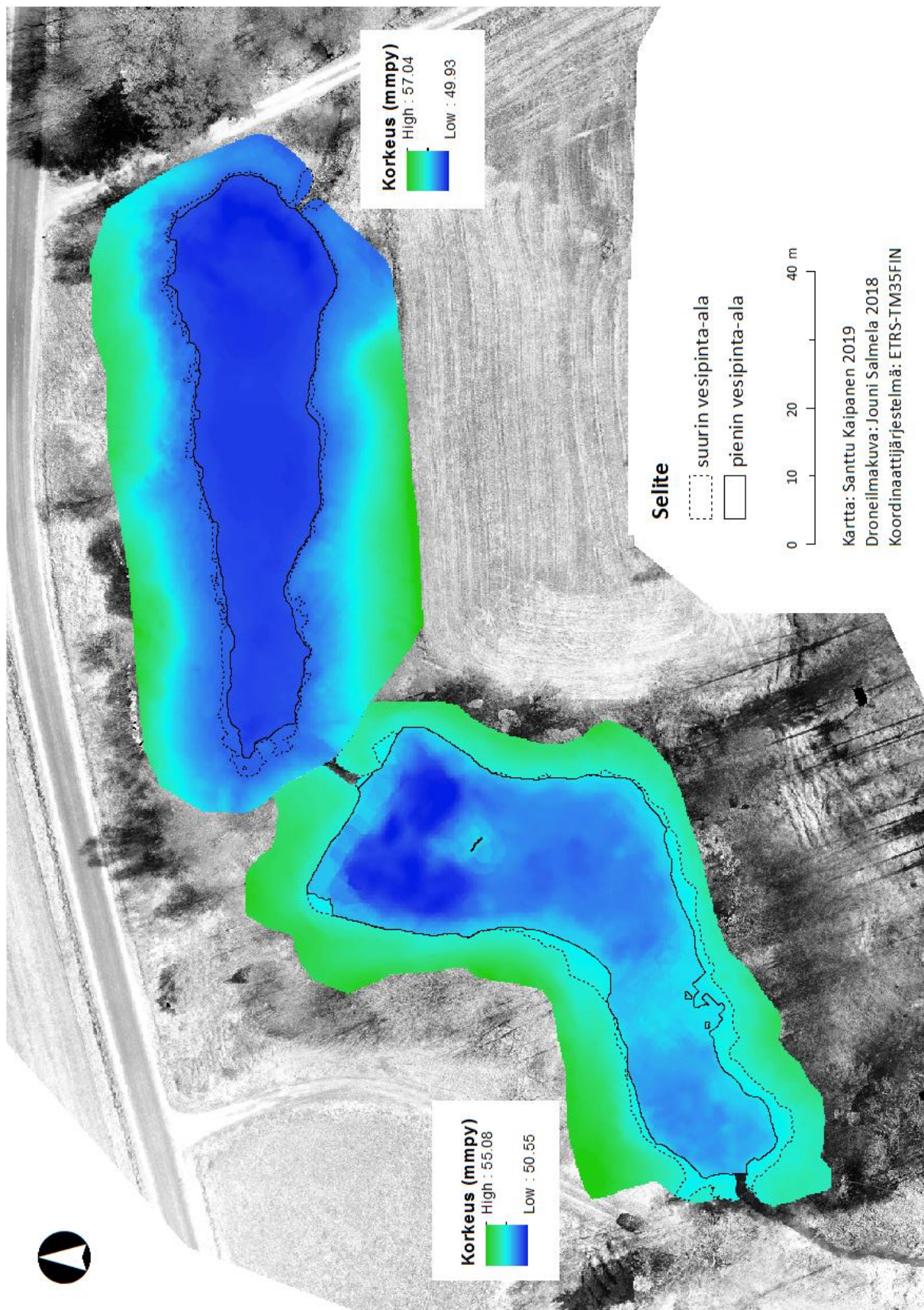
Pinta-alan muutoksesta saa tarkemman kuvan, kun tarkastelee sen muutosta suhteessa vedenpinnan korkeuden vaihteluun. Ekmanin vesiensuojelukokonaisuudella vedenpinnan korkeus vaihtelee Imponojaa enemmän (taulukko 27). Laskeutusaltaita vertailtaessa paljastuu, että Imponojalla altaan pinta-ala kasvaa voimakkaammin ja helpommin vedenpinnan nousun seurauksena kuin Ekmanin laskeutusaltaassa (kuvat 56 ja 57). Kosteikkoaltaiden suhteen tilanne on kuitenkin päinvastainen. Ekmanin kosteikolla altaan pinta-ala kasvaa voimakkaasti jokaista vedenpinnan nousun senttimetriä kohden 50-fraktilista alkaen. Toisin sanoen pinta-ala alkaa kasvaa voimakkaasti, kun vedenpinnankorkeus on suurempi kuin puolet havainnoista. Imponojalla pinta-ala kasvaa kosteikossa voimakkaasti vedenpinnan nousun seurauksena vasta, kun vedenpinnan korkeus ylittää 75 % havainnoista. Imponojalla vedenpinnan nousu kasvattaa altaiden pinta-alaa samankaltaisesti sekä kosteikossa että laskeutusaltaassa. Ekmanilla kosteikon pinta-ala kasvaa vedenpinnan nousun seurauksena selvästi voimakkaammin kuin laskeutusaltaan.

Taulukko 27. Vedenpinnan nousun vaikutus altaiden pinta-aloihin. Erikseen on tarkasteltu tilanteiden yleisyydestä kertovia vedenpinnan korkeuden fraktiileja. $A(m^2)/WL$ cm kertoo pinta-alan muutoksen jokaista vedenpinnan nousun senttimetriä kohden.

Vedenpinta		Ekman (valuma-alue 2,94 km ²)			Imponoja (valuma-alue 3,22 km ²)		
		<i>mmpy</i>	<i>muutos (cm)</i>	<i>A(m²)/WL +1 cm</i>	<i>mmpy</i>	<i>muutos (cm)</i>	<i>A(m²)/WL +1 cm</i>
Laskeutusallas	<i>min</i>	63,921			52,655		
	<i>25-fraktiili</i>	64,024	10,4	1,0	52,713	5,9	3,5
	<i>50-fraktiili</i>	64,114	9,0	0,9	52,742	2,9	6,6
	<i>75-fraktiili</i>	64,213	9,9	0,9	52,794	5,1	6,6
	<i>max</i>	64,537	32,4	4,8	53,010	21,7	7,7
	yht		61,7	3,0		35,5	6,8
Kosteikko	<i>min</i>	62,793			50,983		
	<i>25-fraktiili</i>	62,865	7,1	4,9	51,020	3,7	1,3
	<i>50-fraktiili</i>	62,889	2,4	3,2	51,052	3,2	1,3
	<i>75-fraktiili</i>	62,949	6,0	27,6	51,088	3,5	1,5
	<i>max</i>	63,188	23,9	9,0	51,209	12,1	11,0
	yht		39,4	10,8		22,6	6,5



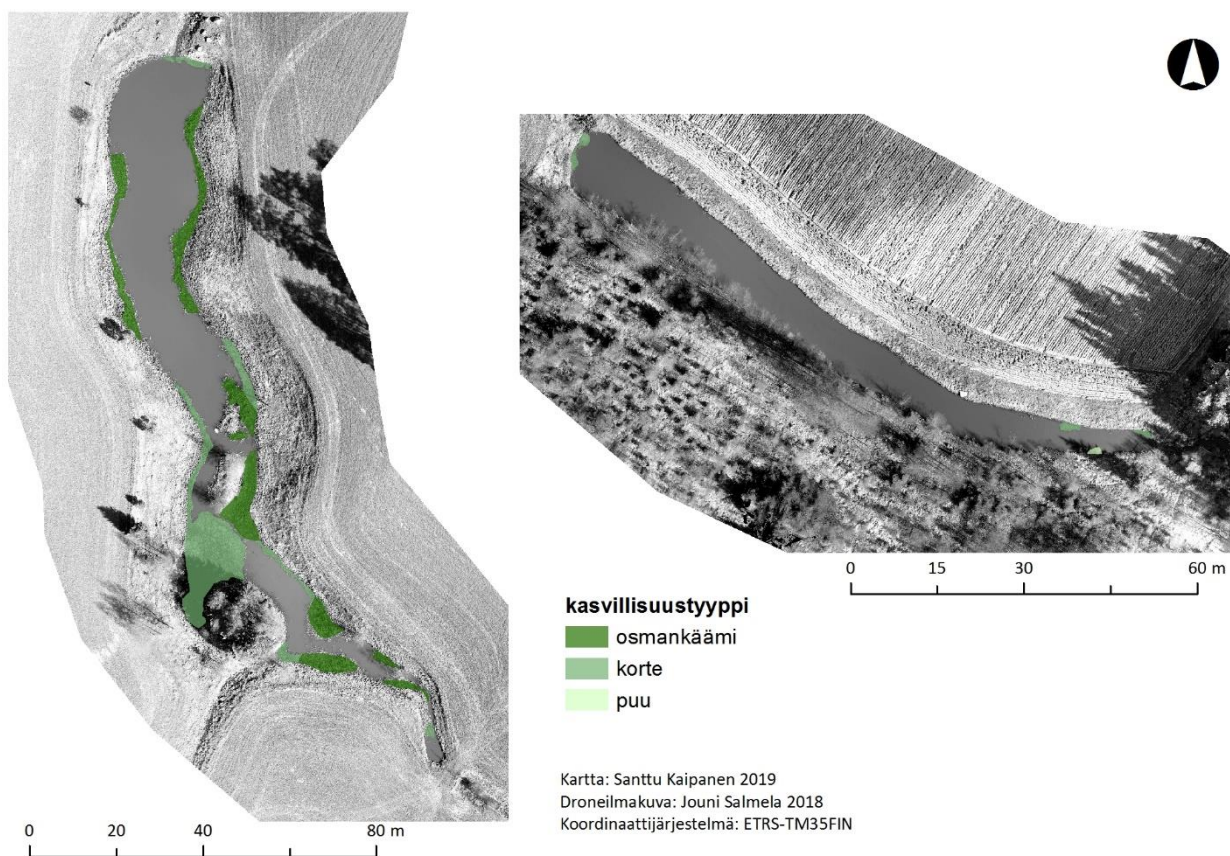
Kuva 56. Suurimman ja pienimmän vesipinta-alan ero Ekmanin altaissa. Laskeutusaltaassa vesipinta-ala kasvaa lähinnä altaan päädyistä, sillä jyrkät törmät eivät mahdollista suurta pinta-alan kasvua. Laskeutusallas tulvii lähitöumastaan suurimmalla vesipinta-alalla. Kosteikossa vesipinta-ala sen sijaan kasvaa altaan reunoilta. Kuivana aikana kosteikkoon tuleva laskeutusaltaan lähtöuoma kuivuu.



Kuva 57. Suurimman ja pienimmän vesipinta-alan ero Imponojan altaissa. Molempien altaiden vesipinta-ala laajenee melko tasaisesti joka suuntaan vedenpinnan noustessa. Laskeutusaltaan pinta-ala kasvaa kosteikkoa enemmän. Kosteikko tulvii lähtöumastaan suurimmalla vesipinta-alalla.

5.3.3 Kasvillisuuden määrä altaissa

Kasvillisuustilavuuksien vertailu paljastaa yhtäläisyyksiä ja eroja tutkimuskosteikkojen välillä (kuvat 58 ja 59, taulukko 28). Molempien altaiden yhteenlasketut kasvillisuuspinno-alueet eivät juuri poikkea toisistaan tutkimussijaintien välillä. Ekmanin laskeutusallas on kuitenkin käytännössä kasviton, ja kasvillisuus painotuu kosteikkoon. Myös Imponojalla vesikasvillisuutta on enemmän kosteikossa, mutta laskeutusaltaassa huomattavasti enemmän kuin Imponojalla. Kosteikkojen vesikasvillisuuden suhteelliset pinta-alueet ovat lähes identtiset.



Kuva 58. Kasvillisuusalueet Ekmanin altaissa. Kasvillisuusalueet ja luokittelu ovat samat, kuin virtaussimulaatioissa käytetyt. Laskeutusaltaassa kasvillisuutta on hyvin vähän, mutta kosteikossa runsaasti varsinkin keskivaiheilla.



Kuva 59. Kasvillisuusalueet Imponojan altaissa. Kasvillisuusalueet ja luokittelu ovat samat, kuin virtaussimulaatioissa käytetyt. Laskeutusaltaassa kasvillisuutta on enemmän kuin Ekmanilla. Kosteikossa kasvillisuutta on melko runsaasti koko altaan alueella.

Taulukko 28. Kasvillisuuspinna-alojen vertailu altaissa. Ensin on lueteltu molempien altaiden yhteenlasketut vesikasvillisuuspinna-alat, sekä erikseen eri kasvillisuustyypeille. Samat luvut on esitetty myös allaskohtaisesti. Kaikki pinna-alat sekä absoluuttisina (m²) että suhteellisina (%). Suhteelliset kasvillisuuspinna-alat on laskettu suhteessa altaiden mediaanipinna-aloihin.

		Ekman		Imponoja	
		ala (m ²)	ala (%)	ala (m ²)	ala (%)
Altaat yhteensä	<i>kaikki kasvit</i>	777	23,9 %	672	22,5 %
	<i>osmankäämi</i>	415	12,8 %	354	11,8 %
	<i>korte</i>	362	11,1 %	318	10,6 %
Laskeutusallas	<i>kaikki kasvit</i>	12	1,4 %	236	13,6 %
	<i>osmankäämi</i>	0		0	
	<i>korte</i>	12	1,4 %	236	13,6 %
Kosteikko	<i>kaikki kasvit</i>	765	32,5 %	435	34,8 %
	<i>osmankäämi</i>	415	17,6 %	354	28,3 %
	<i>korte</i>	350	14,8 %	82	6,5 %

5.4 Kosteikkojen virtausolosuhteet

5.4.1 Syvyyskeskiarvotettu virtaus

Ekmanin ja Imponojan välillä on eroa syvyyskeskiarvotetuissa virtausnopeuksissa. Ekmanilla virtausnopeudet ovat yleisesti ottaen alhaisempia saman vuodenaajan simulaatioissa (taulukko 29). Kaikissa altaissa on myös selvä vuodenaikainen ero, joka johtuu virtaaman suuruudesta. Imponojalla suuremmat virtausnopeudet ovat jokaisessa simulaatiossa kosteikkoaltaassa, ja Ekmanilla laskeutusaltaassa.

Virtausnopeuksien vertailu samankaltaisten virtaamien kesken Ekmanilla ja Imponojalla paljastaa myös yhtäläisyyksiä sijaintien välillä. Ekmanin joulukuun simulaation huippuvirtaama ($Q = 67,0 \text{ l/s}$) on samaa suuruusluokkaa Imponojan kesäkuun virtaaman ($Q = 58,5 \text{ l/s}$) kanssa. Samoin Ekmanin lokakuun huippuvirtaama ($Q = 49,1 \text{ l/s}$) vastaa suunnilleen Imponojan huhtikuun mallinnettua huippuvirtaamaa ($Q = 39,9 \text{ l/s}$). Ekmanilla kosteikon joulukuun virtaukset ovat 95-fraktiilin perusteella hitaampia (-29,4 %) kuin Imponojalla kesäkuussa, ja lokakuun virtaukset vain hieman suurempia (+ 5,7 %) kuin Imponojalla huhtikuussa. Laskeutusaltaiden vastaavassa vertailussa Ekmanin lokakuun virtausnopeudet ovat selvästi suurempia (+51,5 %) kuin Imponojalla. Ekmanin laskeutusaltaan joulukuun virtaukset ovat myös suurempia (+ 30,2 %) kuin Imponojan kesäkuussa.

Karkeaa hietaa hienompien hiukkasten laskeutumisen mahdollistavia virtausnopeuksia on kaikissa altaissa vain hyvin pienellä pinta-alalla (taulukot 30 ja 31, kuvat 60 ja 61). Laskeutusaltaiden vertailussa Ekmanilla on vähemmän hienomman aineksen laskeutumista mahdollistavaa pinta-alaosuutta (taulukko 30 ja kuva 60). Esimerkiksi Ekmanin laskeutusaltaassa karkeakin hietä voi laskeutua suurimman virtaaman simulaatiossa vain 8 %:ssa altaan pinta-alasta. Imponojan laskeutusaltaassa tällaista pinta-alaa on 24,6 % altaan pinta-alasta. Hienon hiekan laskeutumista mahdollistavaa pinta-alaa on kuitenkin Ekmanin laskeutusaltaassa hieman enemmän, myös saman suuruusluokan virtaamien simulaatioissa. Kosteikkojen vertailussa tilanne on toisinpäin.

Ekmanin kosteikossa on samankaltaisissa virtaamatilanteissa huomattavasti enemmän karkean hiedan laskeutumista mahdollistavaa pinta-alaa (taulukko 31 ja kuva 61). Ekmanin joulukuun ($Q = 67,0 \text{ l/s}$) virtaamahuipussa tällaista suhteellista pinta-alaa on 2,7-kertaisesti verrattuna Imponojan kesäkuun virtaamahuippuun ($Q = 58,5 \text{ l/s}$). Molempien kosteikkojen suurimpien virtaamien kohdalla ero on vielä selvempi Ekmanin hyväksi (7,6-kertainen). Hienon hiedan suhteen samankaltaisten virtaamatilanteiden välillä ei ole juuri eroa. Hiesun ja karkean saven kohdalla Ekmanin kosteikossa on selvästi enemmän laskeutumisen mahdollistavaa pinta-alaa, vaikka saven ja hienon hiesun laskeutumiselle ei kummassakaan altaassa ole juurikaan mahdollisuutta.

Simuloidut virtauskentät osoittavat virtauksen alueellisen jakautumisen eroavan sijaintien välillä, kuten myös saman sijainnin eri altaiden välillä (kuvat 62–64). Kaikissa altaissa nopeimman virtauksen alueet kuitenkin levittäytyvät tasaisemmin altaan pinta-alalle virtaaman ja vedenpinnan korkeuden kasvaessa. Imponojalla on varsinkin laskeutusaltaassa hitaasti virtaavat pyörteet alajuoksulla kohti altaan laitoja. Ekmanin altaissa virtaus suuntautuu selvemmin lähtöuomaan. Imponojan kasvukautta edeltävän virtaussimulaation perusteella kosteikon virtaus keskittyy voimakkaammin ilman kasvillisuutta (kuva 65).

Ekmanin joulukuun virtauskentät (kuva 64) ovat hyvin samankaltaiset kuin Imponojalla kesäkuussa (kuva 62): toisessa altaassa virtaus jakautuu tasaisesti lähes koko altaan alalle, ja toisessa altaassa virtaus keskittyy enemmän alueellisesti. Ekmanilla tasaisempi virtaus esiintyy kuitenkin laskeutusaltaassa ja Imponojalla kosteikossa. Samankaltainen tilanne on vertailtaessa Ekmanin lokakuun virtauskenttiä (kuva 63) Imponojan huhtikuun virtauskenttiin (kuva 65).

Taulukko 29. Syvyyskeskiarvotettujen virtausnopeuksien tunnuslukuja altaissa. Molemmista sijainneista (ylä-palkki) on esitelty erikseen laskeutusaltaan ja kosteikon arvot. Mallinnetut tilanteet ovat aikajärjestyksessä al-lekkain. 95- ja 99,5-fraktiileja on käytetty havainnollistamaan suurimpien virtausnopeuksien pientä osuutta. Arvoista on korostettu lihavoimalla ja tummennetulla taustalla mediaanit ja 95-fraktiilit.

		Ekman syv. ka. v (cm/s)		Imponoja syv. ka. v (cm/s)	
		laskeutusallas	kosteikko	laskeutusallas	kosteikko
huhtikuu <i>Imponoja</i> <i>ka 39,9 l/s</i>	<i>maksimi</i>			26,28	15,50
	<i>99,5-fraktiili</i>			7,95	3,95
	<i>95-fraktiili</i>			0,97	1,23
	<i>75-fraktiili</i>			0,38	0,57
	<i>mediaani</i>			0,19	0,40
	<i>25-fraktiili</i>			0,07	0,23
	<i>n</i>			1766	1359
elokuu <i>Ekman</i> <i>ka 27,6 l/s</i>	<i>maksimi</i>	3,25	7,42	32,18	22,17
	<i>99,5-fraktiili</i>	2,36	4,46	9,27	5,73
	<i>95-fraktiili</i>	1,17	0,85	1,29	1,94
	<i>75-fraktiili</i>	0,39	0,31	0,54	0,83
	<i>mediaani</i>	0,28	0,15	0,27	0,55
kesäkuu <i>Imponoja</i> <i>ka 58,5 l/s</i>	<i>25-fraktiili</i>	0,21	0,10	0,10	0,35
	<i>n</i>	1050	2323	1766	1354
lokakuu <i>Ekman</i> <i>ka 49,1 l/s</i>	<i>maksimi</i>	4,64	10,10	44,32	26,04
	<i>99,5-fraktiili</i>	3,08	6,02	16,06	11,39
	<i>95-fraktiili</i>	1,47	1,30	2,10	3,60
	<i>75-fraktiili</i>	0,62	0,51	1,04	1,68
	<i>mediaani</i>	0,45	0,25	0,54	1,08
	<i>25-fraktiili</i>	0,36	0,16	0,19	0,78
	<i>n</i>	1088	2448	1802	1386
joulukuu <i>Ekman</i> <i>ka 67,0 l/s</i>	<i>maksimi</i>	4,71	9,69	50,31	28,60
	<i>99,5-fraktiili</i>	3,60	5,61	19,33	14,77
	<i>95-fraktiili</i>	1,68	1,37	3,18	4,50
	<i>75-fraktiili</i>	0,79	0,57	1,58	2,30
	<i>mediaani</i>	0,58	0,29	0,85	1,47
	<i>25-fraktiili</i>	0,50	0,20	0,31	1,06
	<i>n</i>	1122	2493	1849	1425

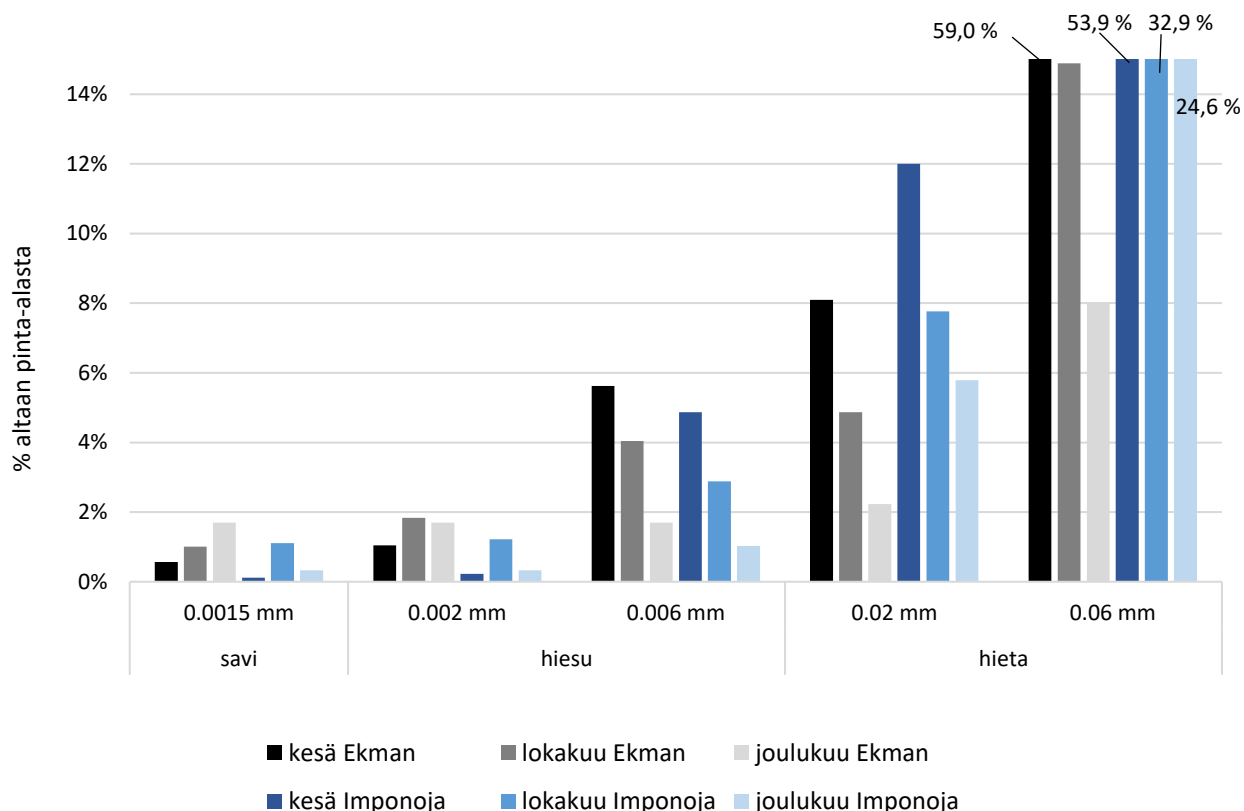
Taulukko 30. Hienoaineksen mahdollisuus sedimentoitua laskeutusaltaissa raekoon ja vuodenajan mukaan. Mahdollisuutta kuvaa %-osuus altaan pinta-alasta, jolla virtausnopeus mahdollistaa sedimentoitumisen.

		Sedimentoitumista mahdollistava pinta-ala raekoon mukaan						Huippu Q		
		<i>savi</i>		<i>hiesu</i>		<i>hieta</i>		<i>hiekkä</i>		
		0,0001 mm	0,0015 mm	0,002 mm	0,006 mm	0,02 mm	0,06 mm	0,2 mm	0,6 mm	l/s
kevät*	<i>IM</i>	0,1 %	1,7 %	2,4 %	7,9 %	15,5 %	70,1 %	99,0 %	99,5 %	39,9
kesä	<i>EK</i>	0,0 %	0,6 %	1,0 %	5,6 %	8,1 %	59,0 %	99,6 %	100,0 %	27,6
	<i>IM</i>	0,0 %	0,1 %	0,2 %	4,9 %	12,0 %	53,9 %	98,4 %	99,5 %	58,5
lokakuu	<i>EK</i>	0,6 %	1,0 %	1,8 %	4,0 %	4,9 %	14,9 %	99,2 %	100,0 %	49,31
	<i>IM</i>	0,0 %	1,1 %	1,2 %	2,9 %	7,8 %	32,9 %	96,1 %	99,2 %	132,2
joulukuu	<i>EK</i>	0,0 %	1,7 %	1,7 %	1,7 %	2,2 %	8,0 %	99,1 %	100,0 %	67,0
	<i>IM</i>	0,0 %	0,3 %	0,3 %	1,0 %	5,8 %	24,6 %	91,5 %	98,9 %	221,0

EK = Ekman

IM = Imponoja

* Ekmanin kevättä ei mallinnettu



Kuva 60. Hienoaineksen mahdollisuus sedimentoitua laskeutusaltaissa eri vuodenaikojen tulvatilanteissa. Palkkien väri kuvaa sijaintia (Ekman harmaat, Imponoja siniset) ja värin tummuus simuloituja tilanteita aikajärjestyksessä (tummin on kesä). Palkin koko kuvaa altaan pinta-alaa (%), jolla kyseinen raekoko voi laskeutua. Palkkien arvo on merkitty vain niille palkeille, jotka eivät mahdu asteikolle (0–15 %). Hiedan laskeutumisen mahdollistavia nopeuksia on Imponojalla enemmän. Hienomman aineen laskeutumisen mahdollistavia nopeuksia on molemmissa sijainneissa hyvin vähän, mutta Ekmanilla hieman enemmän.

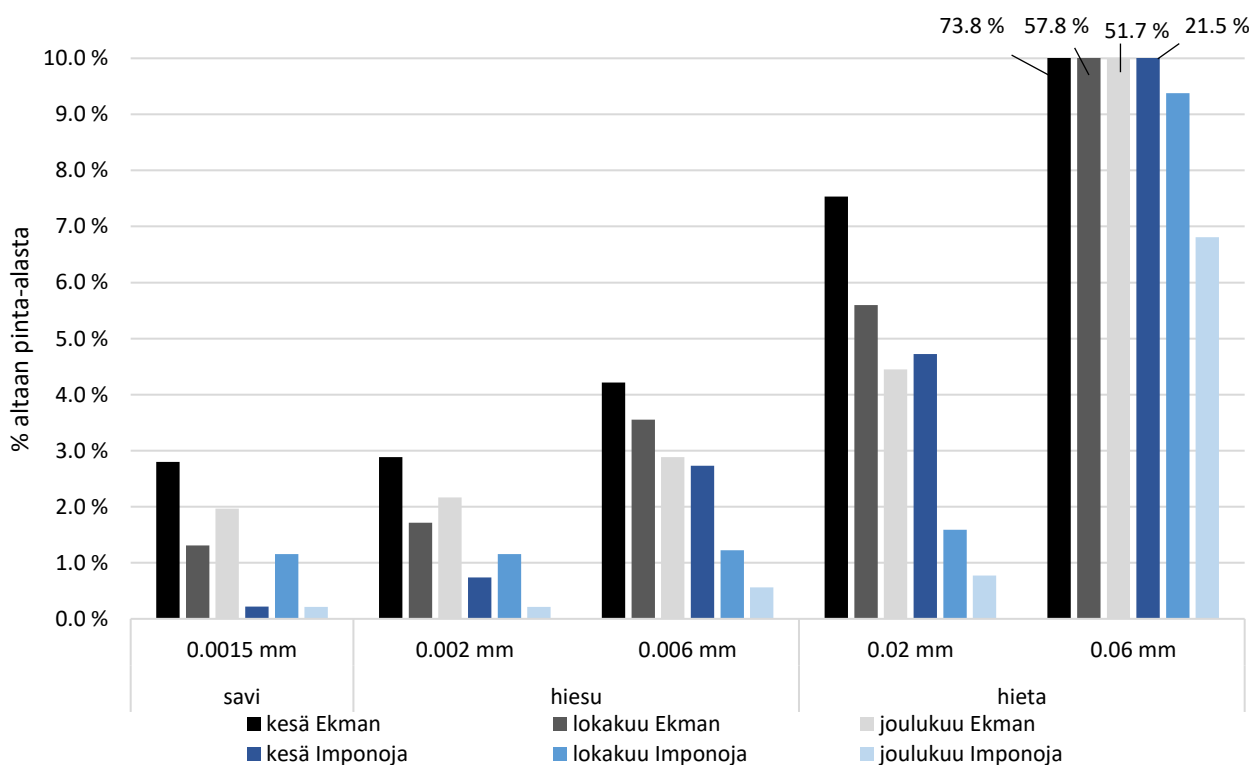
Taulukko 31. Hienoaineksen mahdollisuus sedimentoitua kosteikkoaltaissa raekoon ja vuodenajan mukaan. Mahdollisuutta kuvaa % -osuus altaan pinta-alasta, jolla virtausnopeus mahdollistaa sedimentoitumisen.

		Sedimentoitumista mahdollistava pinta-ala raekoon mukaan						Huippu Q		
		<i>savi</i>		<i>hiesu</i>		<i>hieta</i>		<i>hiekkä</i>		l/s
		0,0001 mm	0,0015 mm	0,002 mm	0,006 mm	0,02 mm	0,06 mm	0,2 mm	0,6 mm	
kevät*	<i>IM</i>	0,0 %	2,4 %	2,7 %	3,2 %	5,7 %	32,9 %	99,3 %	99,9 %	39,9
kesä	<i>EK</i>	0,0 %	2,8 %	2,9 %	4,2 %	7,5 %	73,8 %	98,3 %	100,0 %	27,6
	<i>IM</i>	0,0 %	0,2 %	0,7 %	2,7 %	4,7 %	21,5 %	98,8 %	99,7 %	58,5
lokakuu	<i>EK</i>	0,0 %	1,3 %	1,7 %	3,6 %	5,6 %	57,8 %	97,7 %	99,9 %	49,31
	<i>IM</i>	0,0 %	1,2 %	1,2 %	1,2 %	1,6 %	9,4 %	87,0 %	99,1 %	132,2
joulukuu	<i>EK</i>	0,0 %	2,0 %	2,2 %	2,9 %	4,5 %	51,7 %	97,8 %	100,0 %	67,0
	<i>IM</i>	0,0 %	0,2 %	0,2 %	0,6 %	0,8 %	6,8 %	79,2 %	99,1 %	221,0

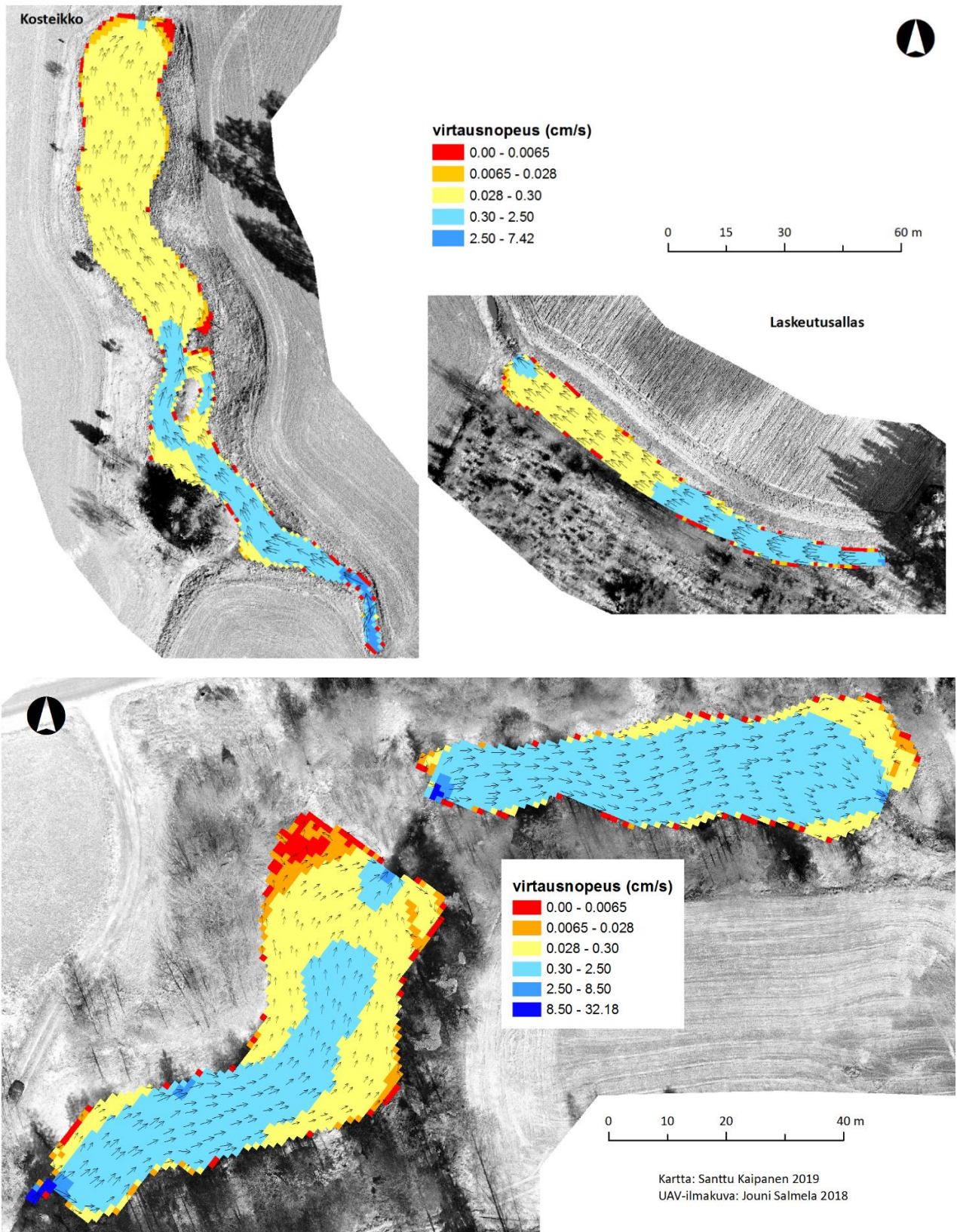
EK = Ekman

IM = Imponoja

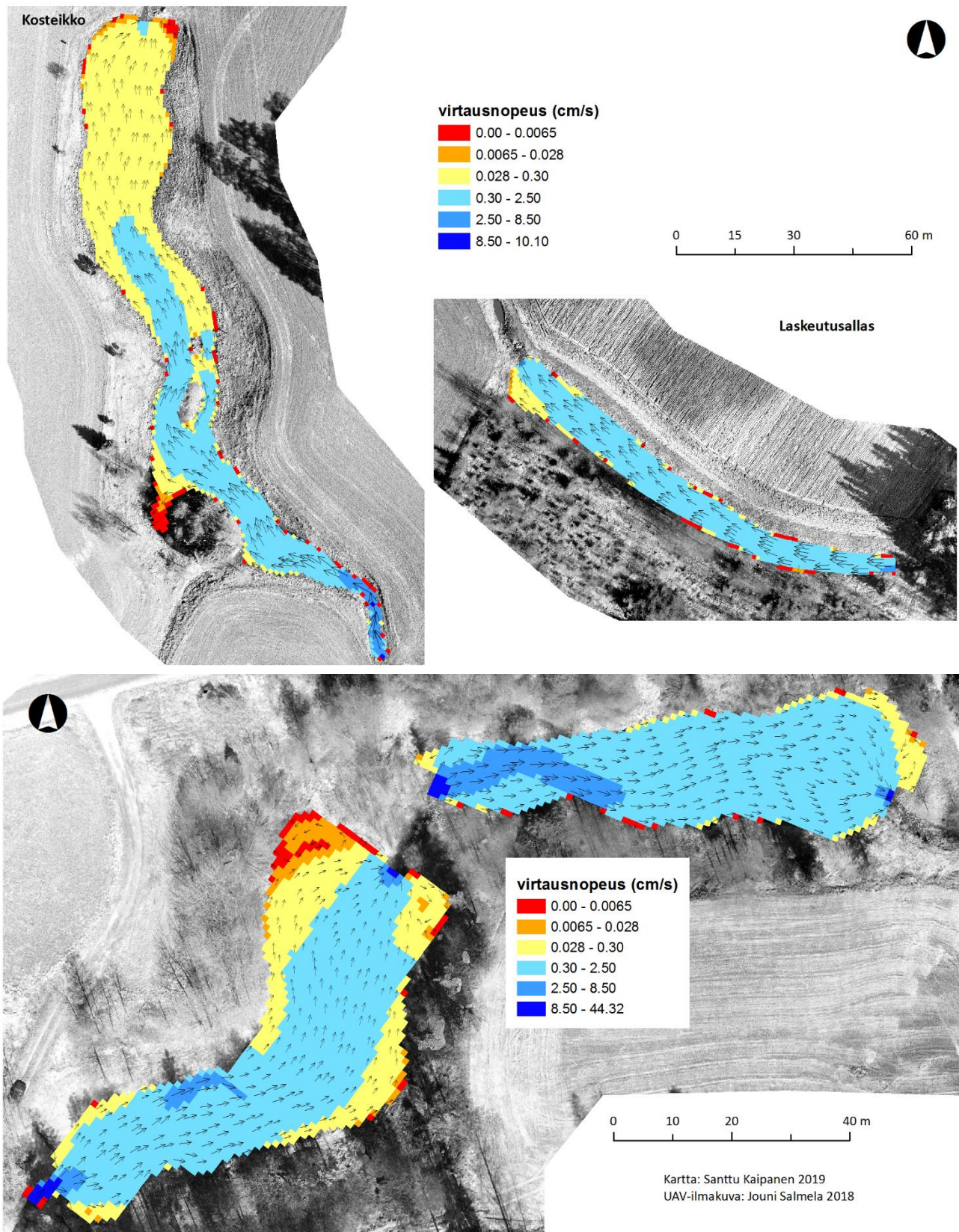
* Ekmanin kevättä ei mallinnettu



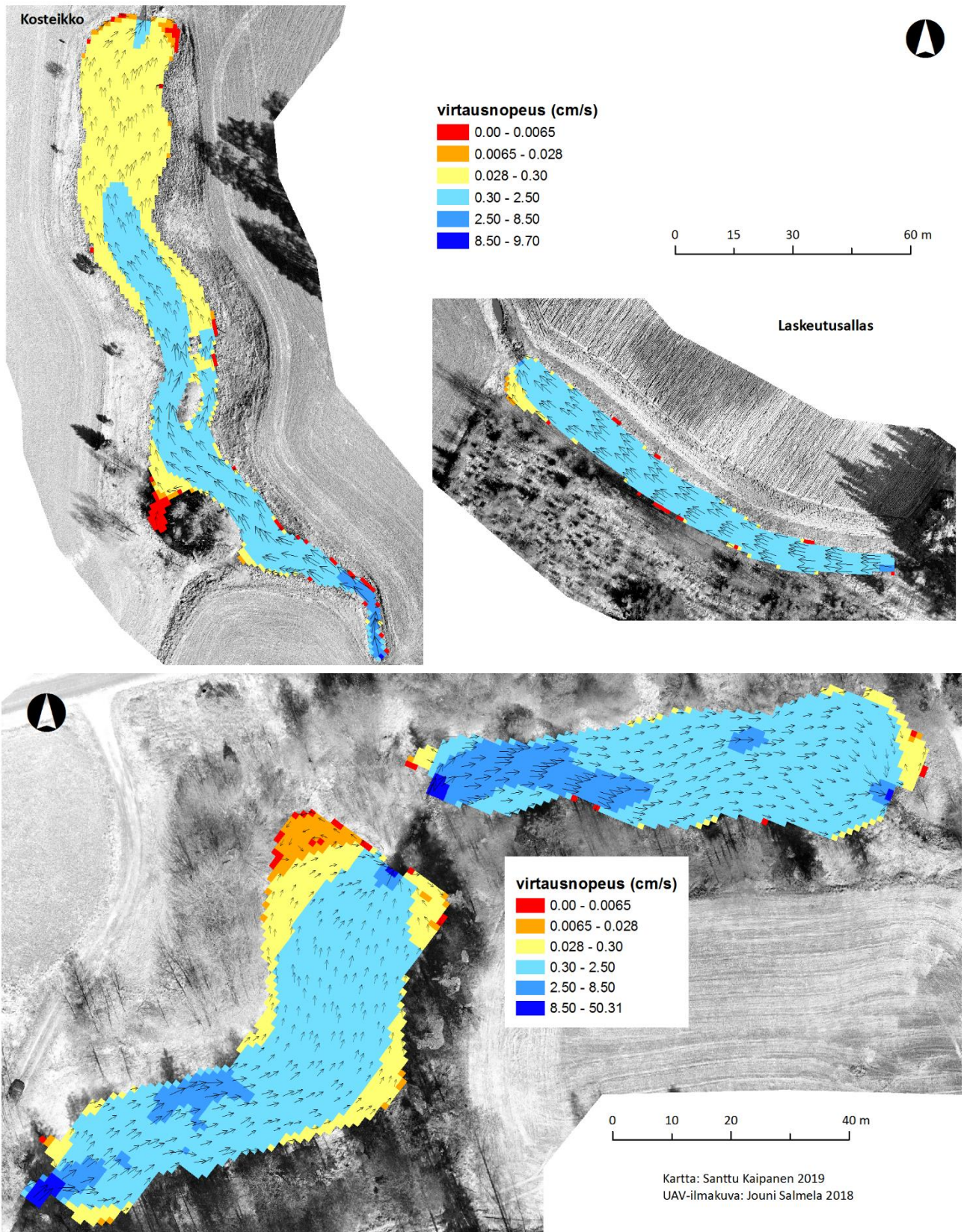
Kuva 61. Hienoaineksen mahdollisuus sedimentoitua kosteikoissa. Palkkien väri kuvaa sijaintia (Ekman harmaat, Imponoja siniset) ja värin tummuus simuloituja tilanteita aikajärjestyksessä (tummin on kesä). Palkin koko kuvaa altaan pinta-alaa (%), jolla kyseinen raekoko voi laskeutua. Palkkien arvo on merkitty vain niille palkeille, jotka eivät mahdu asteikolle (0–15 %). Ekmanilla on raekoosta riippumatta enemmän laskeutumista mahdollistavaa pinta-alaa. Siltti (hiesu ja savi) voi sedimentoitua vain hyvin pienissä osissa altaita, sijainnista riippumatta.



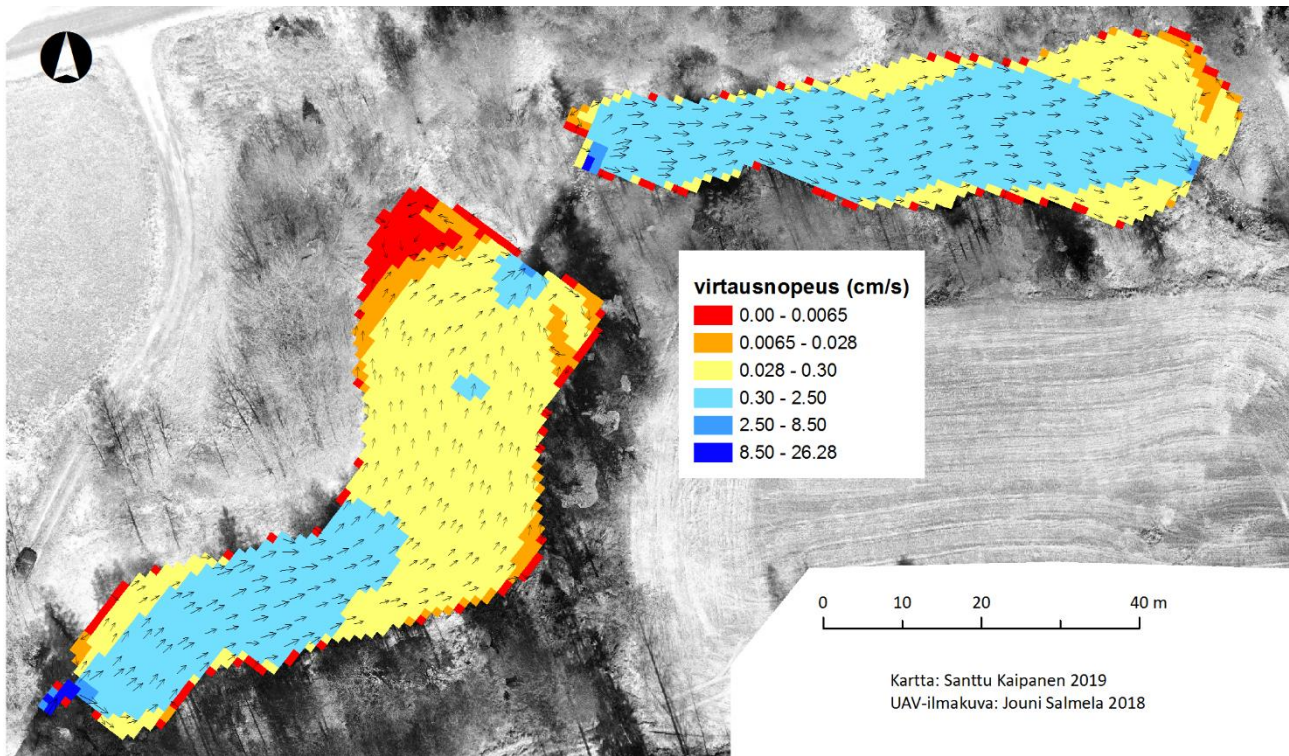
Kuva 62. Kasvukauden virtaamahuippujen virtauskentät. Luokittelu perustuu eri maalajien teoreettisiin laskeutusnopeuksiin. Sinisellä on kuvattu nopeampi virtaus, punaisella seisovampi vesi. Ekmanin (ylempi kartta) laskeutusaltaassa virtaus jakautuu tasaisesti koko altaan leveydellä ja hidastuu noin puolivälissä altaan pituutta. Kosteikossa virtaus hidastuu samoin altaan puolivälissä, mutta keskittyy selvemmin leveysuunnassa. Imponojalla virtaukset alkavat hidastua vasta lähtöomien lähellä. Laskeutusaltaassa virtaus keskittyy leveysuunnassa voimakkaammin kuin kosteikossa.



Kuva 63. Lokakuun virtaamahuipun virtauskentät. Yli 0,3 cm/s virtausnopeus jatkuu kaikissa tapauksissa läpi altaan lukuun ottamatta Ekmanin kosteikkoa. Ekmanin laskeutusaltaassa ja Imponojan kosteikossa lähes koko altaan alalla virtaus on vähintään 0,3 cm/s. Imponojan laskeutusaltaassa virtaus keskittyy selvästi leveyssuunnassa.



Kuva 64. Syvyykeskiarvotetut virtauskentät suurimman virtauksen tilanteessa joulukuussa 2017. Ekmanin laskeutusaltaassa ja Imponojan kosteikossa $>0,3$ cm/s virtaus valtaa käytännössä koko altaat. Imponojan kosteikossa yli 2,5 cm/s virtaus jatkuu lähes altaan puoliväliin, ja laskeutusaltaassakin keskivaiheilla esiintyy nopeaa virtausta. Ekmanin laskeutusaltaassa virtaus laskee alle 0,3 cm/s noin neljäsopitus ennen lähtöomaa.



Kuva 65. Huhtikuun simulaation virtauskentät Imponojalla. Molemmissa altaissa virtaus on keskittynyt leveyssuunnassa etenkin alaiden alajuoksun päässä. Yli 0,3 cm/s virtaus loppuu laskeutusaltaassa noin puolivälissä pituutta. Kosteikossa yli 0,3 cm/s virtaus jatkuu läpi altaan.

5.4.2 Pohjanläheinen virtaus

Pohjanläheisten (> 95 % syvyys) virtausnopeuksien tarkastelu kosteikkoaltaissa paljastaa, että virtausnopeudet pohjassa ovat Imponojalla yleisesti ottaen hieman suuremmat kuin Ekmanilla (taulukko 32). Suurimmat virtausnopeudet sijaitsevat altaiden tulooman kohdalla yhdessä solussa. Paremman kuvan pohjanläheisten virtausnopeuksien suuruusluokasta saa 99,5-fraktiilista, jota pienempiä 99,5 % pohjanläheisistä virtauksista on. Ekmanin kosteikossa lokakuun ($Q = 49,1$ l/s) virtausnopeudet ovat 95-fraktiilissa pienemmät (- 6,8 %) kuin Imponojalla hieman pienemmällä virtaamalla huhtikuussa ($Q = 39,9$ l/s). Samoin Ekmanin molempien altaiden joulukuun ($Q = 67,0$ l/s) virtausnopeudet ovat 95-fraktiilissa hieman pienemmät kuin Imponojalla kesäkuussa ($Q = 58,5$ l/s). Ekmanin laskeutusaltaassa pohjanopeuden 95-fraktiili on suurempi kuin Imponojalla (+ 41,7 % / 0,01 cm/s).

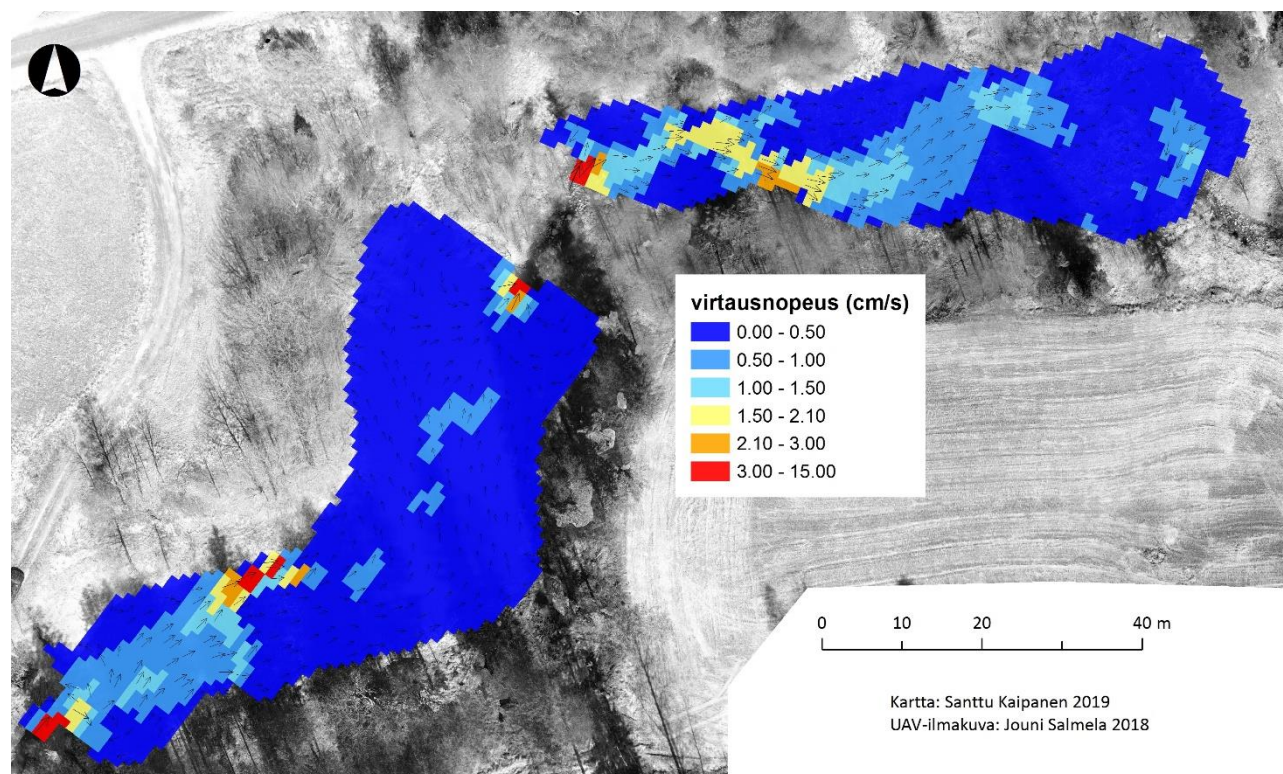
Taulukko 32. Pohjanläheisten virtausnopeuksien tunnuslukuja altaissa. Molemmista sijainneista (yläpalkki) on esitelty erikseen laskeutusaltan ja kosteikon arvot. Mallinnetut tilanteet ovat aikajärjestyksessä allekkain vasemmanpuoleisimmassa sarakkeessa. 95- ja 99,5-fraktiileja on käytetty havainnollistamaan suurimpien virtausnopeuksien pientä osuutta. Arvoista on korostettu lihavoimalla ja tummennetulla taustalla mediaanit ja 95-fraktiilit.

		Ekman pohjavirtaus (cm/s)		Imponoja pohjavirtaus (cm/s)	
		laskeutusallas	kosteikko	laskeutusallas	kosteikko
huhtikuu <i>Imponoja</i> <i>ka 39,9 l/s</i>	<i>maksimi</i>			16,27	12,62
	<i>99,5 -fraktiili</i>			1,67	2,00
	<i>95-fraktiili</i>			0,24	0,59
	<i>mediaani</i>			0,06	0,14
	<i>n</i>			1766	1359
elokuu/kesäkuu <i>Ekman</i> <i>ka 27,6 l/s</i> <i>Imponoja</i> <i>ka 58,5 l/s</i>	<i>maksimi</i>	2,88	6,40	20,07	17,40
	<i>99,5 -fraktiili</i>	1,08	1,70	2,33	2,77
	<i>95-fraktiili</i>	0,31	0,34	0,49	0,77
	<i>mediaani</i>	0,10	0,05	0,18	0,15
	<i>n</i>	1050	2323	1766	1354
lokakuu <i>Ekman</i> <i>ka 49,1 l/s</i> <i>Imponoja</i> <i>ka 132,2 l/s</i>	<i>maksimi</i>	3,36	8,90	28,20	21,74
	<i>99,5 -fraktiili</i>	0,86	2,51	3,73	6,24
	<i>95-fraktiili</i>	0,34	0,55	0,81	1,77
	<i>mediaani</i>	0,14	0,09	0,18	0,37
	<i>n</i>	1088	2448	1802	1386
joulukuu <i>Ekman</i> <i>ka 67,0 l/s</i> <i>Imponoja</i> <i>ka 221,0 l/s</i>	<i>maksimi</i>	3,91	8,46	32,57	21,07
	<i>99,5 -fraktiili</i>	1,05	2,51	5,68	4,63
	<i>95-fraktiili</i>	0,44	0,56	1,14	1,62
	<i>mediaani</i>	0,17	0,10	0,25	0,34
	<i>n</i>	1122	2493	1849	1425

Yli 3 cm/s pohjanläheisiä virtauksia esiintyy Imponojalla lokakuun ja joulukuun simulaatioissa noin 12–24m² (0,7–1,3 %) alueella laskeutusaltaassa ja noin 11 m² (0,8 %) alalla kosteikossa (taulukko 33). Yli 2,1 cm/s pohjavirtauksia puolestaan löytyy Imponojan laskeutusaltaasta lokakuun simulaatiossa noin 31 m² (1,7 %) ja joulukuun huippuvirtaaman aikana jo noin 41 m² (2,2 %) alueelta. Kosteikolla vastaavia virtauksia on lokakuussa noin 31 m² (2,3 %) ja joulukuussa 20 m² (1,4 %) alalla. Nopeuksia löytyy tulo- ja lähtöuomien läheltä sekä altaista (kuva 66). Ekmanin laskeutusaltaalla yli 2,1 tai 3 cm/s pohjavirtauksia on lokakuun ja joulukuun simulaatioissa vain 2 m² (0,2 %) alalla ja kosteikolla noin 18 m² (0,7 %) alalla.

Taulukko 33. Uudelleensuspensiota mahdollistavien pohjavirtausnopeuksien pinta-alat altaissa.

<i>simulaatio</i>	<i>virtausnopeus</i>	Ekman		Imponoja	
		<i>laskeutusallas</i>	<i>kosteikko</i>	<i>laskeutusallas</i>	<i>kosteikko</i>
<i>lokakuu</i>	<i>yli 3 cm/s</i>	2 m ²	3 m ²	12 m ²	11 m ²
	<i>yli 2,1 cm/s</i>	2 m ²	18 m ²	31 m ²	31 m ²
<i>joulukuu</i>	<i>yli 3 cm/s</i>	2 m ²	3 m ²	25 m ²	11 m ²
	<i>yli 2,1 cm/s</i>	2 m ²	18 m ²	41 m ²	20 m ²



Kuva 66. Pohjanläheiset virtausnopeudet Imponojan altailla mittausjakson suurimmalla virtaamalla joulukuussa. Punaiset (yli 3 cm/s) ja oranssit (yli 2,1 cm/s) virtausnopeudet osoittavat mahdolliset uudelleensuspensioalueet.

5.4.3 Veden viipymä

Yksinkertaisesti virtaaman ja tilavuuden mukaan lasketut nimellisviipymät eroavat etenkin kosteikkojen vertailussa (taulukko 34). Ekmanin kosteikon nimellisviipymistä selvästi suurempi osuus ylittää tavoitellun yhden päivän. Laskeutusaltaiden toiminta nimellisviipymien suhteen on lähempänä toisiaan, mutta Imponojalla hieman suurempi osuus nimellisviipymistä ylittää yhden päivän.

Taulukko 34. Laskeutusaltaiden ja kosteikkojen nimellisviipymien jakauman tunnuslukuja sekä päivän ylittävien nimellisviipymien osuus altaissa. Vaaleanharmaalla taustalla yli päivän ylittävät jakauman tunnusluvut.

		Laskeutusallas		Kosteikko	
		Ekman	Imponoja	Ekman	Imponoja
t_n (d)	min	0,21	0,11	0,54	0,05
	mediaani	0,49	0,65	1,78	0,27
	75-fraktiili	1,55	1,35	2,67	0,44
	90-fraktiili	2,8	4,16	3,32	0,7
	95-fraktiili	3,81	11,48	3,5	1,19
	97,5-fraktiili	5,13	39,79	3,69	2,99
$t_n > 1$ d	osuus havaintopäivistä	42,2 %	47,4 %	71,4 %	16,7 %

Veden siirtymistä altaiden välillä sekä molempia altaita huomioivien korjattujen nimellisviipymien tarkastelu korostaa Ekmanin vesiensuojelurakenteen hyvää toimintaa (taulukko 35). Lyhimmät viipymät jäävät alle päivän, mutta 94,6 % tilanteista viipymä ylittää yhden päivän. Imponojalla vain 46,9 % viipymistä koko tarkastelujaksolla ja 31,9 % yhteiseltä tarkastelujaksolta ylittää yhden päivän. Koko aikana vesiensuojelurakenteiden maksimiviipymä on Imponojalla hieman pidempi, mutta yhteisellä tarkastelujaksolla selvästi pidempi Ekmanilla. Mediaani, 25-fraktiili ja 75-fraktiili ovat Ekmanilla selvästi pidemmät kuin Imponojalla riippumatta tarkastelujaksosta.

Taulukko 35. Molemmat altaat yhdessä ja veden siirtymän altaiden läpi huomioivat korjatut nimellisviipymät. Imponojalla tarkasteltu erikseen koko havaintojaksoa sekä jaksoa, jolta myös Ekmanilta on havaintoja. Vaaleanharmaalla korostettu päivän ylittävät nimellisviipymät.

		Ekman	Imponoja	
		11.7.–18.12.	12.4.–18.12.	11.7.–18.12.
t_{kn} (d)	minimi	0,73	0,16	0,16
	25-fraktiili	1,20	0,47	0,39
	mediaani	1,68	0,91	0,54
	75-fraktiili	4,52	1,71	1,40
	maksimi	31,33	33,19	9,89
$t_{kn} > 1$ d		94,6 %	46,9 %	31,9 %

Virtaussimulaatioiden perusteella lasketut arviot todellisista viipymistä jäävät alle yhden päivän lukuun ottamatta Ekmanin kesän virtaamahuippua (taulukko 36). Ekmanilla viipymät ovat samojen vuodenaikojen skenaarioita vertailtaessa moninkertaisia Imponojaan verrattuna. Lähes yhtä suurien virtaamatilanteiden vertailussa Ekmanin viipymät ovat edelleen pidempiä, huolimatta Ekmanin hieman suuremmista virtaamista. Ekmanin joulukuun simulaation ($Q = 241,20 \text{ m}^3/\text{h}$) viipymä on 86,9 % pidempi kuin Imponojan kesäkuun simulaation ($Q = 210,42 \text{ m}^3/\text{h}$). Ekmanin lokakuun simulaation ($Q = 176,94 \text{ m}^3/\text{h}$) viipymä on

67,2 % pidempi kuin Imponojan huhtikuun simulaation ($Q = 143,46 \text{ m}^3/\text{h}$). Saman kokoluokan virtaamien tilanteissa Ekmanin altaat ovat hydraulisesti tehokkaampi.

Taulukko 36. Laskeutusaltaan ja kosteikon yhteenlaskettu veden viipymä ja laskennassa käytetyt arvot. Virtaama on tulo- ja lähtöomien keskiarvo, jota voidaan pitää luotettavana, koska $0,5 < R < 2,0$. Molempien altaiden keskiarvosyvyyden, -virtaaman ja ϵ :n mukaan laskettu viipymä t korostettu tummennetulla taustalla, yli päivän viipymät lihavoitu. Hydraulinen tehokkuus laskettu tilanteen nimellisviipymän mukaan.

	pvm	Q (m ³ /h)	h (m, ka)	Aktiivinen			t (h)	λ
				A (m ²)	ε	R		
Ekman	6.-7.8.	99,18	0,962	2779,7	0,990	0,93	26,7	0,77
	13.10.	176,94	1,050	3299,6	0,990	1,08	19,4	0,84
	10.12.	241,20	1,100	3480,0	0,990	0,88	15,7	0,91
Imponoja	26.4.	143,46	0,707	2393,6	0,985	0,93	11,6	0,76
	13.6.	210,42	0,703	2551,9	0,985	0,88	8,4	0,81
	13.10.	475,74	0,753	2833,3	0,985	1,01	4,4	0,91
	10.12.	795,42	0,801	3016,8	0,985	0,92	3,0	0,93

Virtaussimulaatioihin perustuvien allaskohtaisten viipymien vertailussa laskeutusaltaiden tulokset ovat jälleen tasaisempia (taulukko 37). Ekmanin laskeutusaltaassa on pidemmät viipymät kaikissa saman vuodenajan virtaussimulaatioissa: kasvukauden keskellä 61 %, kasvukauden lopussa (lokakuu) 103 % ja talvella (joulukuu) 130 % pidempi. Saman suuruusluokan virtaamien tilanteissa Ekmanin viipymät sen sijaan ovat 15 % lyhemmät. Imponojan virtaamat ovat tosin hieman pienemmät. Laskeutusaltaiden välillä ei ole suurta syvyyseroa, mutta Imponojan laskeutusaltaan keskisyvyys on kaikissa simulaatioissa hieman pienempi. Ekmanin laskeutusallas on kautta linjan hydraulisesti tehokkaampi.

Taulukko 37. Laskeutusaltaiden todelliset viipymät simuloituissa tilanteissa. Simuloitujen tilanteiden suurin virtaama (m³/s) muunnettu tuntikohtaiseksi virtaamaksi (m³/h). Hydraulinen tehokkuus laskettu tilanteen nimellisviipymän mukaan.

	pvm	Q (m ³ /h)	WL (m)	h (m, ka)	Aktiivinen			t (h)	λ
					A (m ²)	ε	R		
Ekman	6.8.	102,60	64,199	1,023	869,5	1	8,7	0,88	
	13.10.	170,28	64,351	1,138	947,3	1	6,3	0,93	
	10.12.	255,96	64,533	1,167	1014,7	1	4,6	0,97	
Imponoja	26.4.	149,04	52,783	0,891	1255,8	0,99	7,4	0,69	
	13.6.	224,28	52,799	0,902	1354,6	0,99	5,4	0,75	
	13.10.	473,04	52,888	0,959	1529,6	0,99	3,1	0,82	
	10.12.	828,72	53,008	1,027	1662,4	0,99	2,0	0,87	

Kosteikkojen virtaussimulaatioihin perustuvat viipymät ovat Ekmanilla Imponojaan verrattuna moninkertaiset saman vuodenajan malleissa (taulukko 38): kasvukauden keskellä 5,9-kertaiset, kasvukauden lopussa 8,1-kertaiset ja talvella 11-kertaiset. Saman suuruusluokan virtaamatilanteiden vertailu on tasaisempi, tosin edelleen vesi viipyy Ekmanin kosteikossa pidempään: joulukuu–kesäkuu-vertailussa 3,7-kertaisesti ja lokakuu–huhtikuu-vertailussa 2,9-kertaisesti kauemmin. Ekmanin virtaamat tässä vertailussa ovat silti hieman suurempia. Imponojan kosteikon hydraulinen tehokkuus on hieman parempi saman suuruusluokan virtaamatilanteissa, ja selvästi parempi samojen vuodenaikojen vertailussa.

Taulukko 38. Kosteikkoaltaiden todelliset viipymät simuloituissa tilanteissa. Simuloitujen tilanteiden suurin virtaama (m³/s) muunnettu tuntikohtaiseksi virtaamaksi (m³/h). Hydraulinen tehokkuus laskettu tilanteen nimellisviipymän mukaan.

	pvm	Q (m ³ /h)	WL (m)	h (m, ka)	Aktiivinen		t (h)	λ
					A (m ²)	ε		
Ekman	7.8.	95,76	62,984	0,901	1910,2	0,98	17,6	0,74
	13.10.	183,60	63,075	0,963	2352,3	0,98	12,1	0,87
	10.12.	226,44	63,185	1,033	2465,3	0,98	11,0	0,89
Imponoja	26.4.	137,88	51,096	0,524	1137,8	0,98	4,2	0,86
	13.6.	196,56	51,075	0,503	1197,4	0,98	3,0	0,91
	13.10.	478,44	51,145	0,548	1303,7	0,98	1,5	0,96
	10.12.	762,12	51,208	0,575	1354,5	0,98	1,0	0,97

5.5 Pinnanmuotojen, virtauksen ja viipymän tulosten yhteenveto

Ekmanin altaiden tulokset viittaavat yhteensä vesiensuojelurakenteen parempaan toimintaan (taulukko 39). Kosteikkojen vertailussa Imponojan tulokset ovat selvästi huonommat. Laskeutusaltaiden vertailu on melko tasainen, mutta Imponoja voittaa sen niukasti.

Taulukko 39. Altaiden (ylärivi) pinnanmuotojen, virtauksen ja viipymän tuloksia kokoava taulukko. Taulukkoon on merkitty rasti sen altaan kohdalle, jonka tulokset kyseisen muuttujan osalta viittaavat parempaan toimintaan suhteessa toisen vesiensuojelurakenteen samaan altaaseen. Alimmalle riville summattu kyseisen altaan saamien "voittojen" määrä.

	Ekman		Imponoja	
	laskeutusallas	kosteikko	laskeutusallas	kosteikko
Pituus–leveys-suhde	x	x		
A/A (va)		x	x	
A / WL +1cm		x	x	
Kasvillisuus		x	x	
Syv. ka virtaus		x	x	
Virtauksen jakautuminen	x			x
Virtauksen hidastuminen		x	x	
Pohjanläheinen virtaus	x	x		
t_n	x	x		
Simulaatioon pohjaava t				
sama vuodenaika	x	x		
sama Q		x	x	
Yhteensä	5	10	6	1

Altaan pinta-alat, joita erikokoisten partikkelien laskeutuminen pintakuormateorian mukaan (esim. Puustinen ym. 2007) vaatii, vaihtelee voimakkaasti hienon hiedan ja saven välillä samoilla virtaamilla (taulukko 40). Halkaisijaltaan 0,06 mm hietapartikkelit laskeutuvat voimakkaimmillakin kosteikoilla mitatuilla virtaamilla (> 200 l/s) jo 67 m²:n altaassa. Hieno hiesu taas vaatisi jo 25 l/s virtaamalla suurempia altaita, kuin kummankaan sijainnin laskeutusallas ja kosteikko yhteensä ovat suurimmillaan. Karkealla savella puoles-

taan on näin laskettuna teoreettinen mahdollisuus laskeutua Ekmanin tai Imponojan altaiden pohjalle ai-noastaan alle 10 l/s virtaamilla. Hienempi savi ei ehdi laskeutua kummankaan vesiensuojelurakenteen altaisiin, jos vettä virtaa altaisiin yhtään.

Taulukko 40. Erikokoisten hienoaineshiukkasten laskeutumisen mahdollistavia altaan pinta-aloja. Pinta-alat las-kettu vaihtelevan tulovirtaaman mukaan. Virtaamien suuruusluokat havainnollistavat kosteikoilla mitattuja vir-taamia.

Maalajite	Halkaisija mm	Laskeutumisnopeus V_L m/s	Virtaama Q m^3/s	Altaan ala (Q/V_L) m^2
<i>Hieta (0,02–0,2 mm)</i>	0,06	0,003	0,200	67
	0,02	0,00028	0,030	107
			0,050	179
			0,100	357
			0,200	714
<i>Hiesu (0,002–0,02 mm)</i>	0,006	0,000065	0,030	462
			0,050	769
			0,100	1 538
			0,200	3 077
	0,002	0,0000062	0,001	161
			0,005	806
			0,010	1 613
			0,025	4 032
			0,050	8 065
<i>Savi (< 0,002 mm)</i>	0,0015	0,0000035	0,001	286
			0,005	1 429
			0,010	2 857
			0,025	7 143
	0,0001	0,000000015	0,001	66 667
			0,005	333 333

6. Keskustelu

6.1 Suspensiokulkeuma ja virtaama

Suspensiokulkeuman pidättymistä kosteikkoihin tarkasteltiin tuloksissa osittain sameuden kautta. Koska sameus korreloi molemmissa vesiensuojelurakenteissa vahvasti kiintoaineen kanssa (luku 5.1.1, taulukko 10 ja kuva 39), voidaan sameustulosten perusteella tehdä olettamuksia kiintoainepitoisuuksista. Myös ravinnekuormasta sameus indikoi tilastollisesti merkitsevällä tasolla, mutta ei yhtä voimakkaasti. Sameustulosten perusteella Ekmanin altaista lähtevä vesi sisältää koko tarkastelujaksolla keskimäärin vähemmän sameutta aiheuttavaa ainesta kuin altaisiin virtaava vesi. Imponojan altailla tilanne on päinvastainen. Tämän tutkielman analyyseissa Ekmanin kosteikkoa siis käytetään esimerkkinä toimivasta vesiensuojelukosteikosta ja Imponojaa puolestaan ei-toimivana. Sameuden pidättymisestä löytyy kuitenkin vuodenaikaista vaihtelua, eikä ”toimivuus” ole yksiselitteistä. Braskerud (2002) pohti tutkimiansa rakennettujen kosteikkojen toiminnan heittelyn ja erilaisten ajallisten piirteiden selittyvän valuma-alueiden eroilla esimerkiksi eroosion kannalta. Imponojan ja Ekmanin valuma-alueet eroavat toisistaan selvästi maankäytön ja maa-lajien suhteen (taulukko 3), joten valuma-alueiden eroosioprosesseissa todennäköisesti on myös eroa.

Imponojalla suurin osa mittausjakson absoluuttisesta vapautuvasta suspensiokuormasta ajoittui kasvukauden jälkeiseen aikaan (taulukko 19). Ekmanilla vastaavasti suurimmat absoluuttiset suspensiokulkeuman pidättymiset tapahtuivat kasvukauden jälkeen. Valkama ym. (2017) havaitsivat kiintoaineeseen sitoutuneen fosforin pidättävän suhteellisesti eniten keskellä kasvukautta, mutta suurimmat absoluuttiset vähentymät löytyivät joulukuulta. Lähtevä kokonaisfosforipitoisuus oli tilastollisesti merkitsevästi pienempi toukokuusta lokakuuhun, mutta tammi–huhtikuussa tai marras–joulukuussa ei löytynyt tilastollisesti merkitsevää eroa. Tämän tutkimuksen tulokset ovat osittain linjassa edellä kuvattujen Valkaman ym. (2017) tulosten kanssa. Ekmanin altaat vähensivät sameutta tilastollisesti koko tarkastelujaksolla, mutta eroteltuina vuodenaikoina ainoastaan juuri touko–lokakuussa. Imponojan altailla tulokset ovat päinvastaisia, ja ainoastaan touko–lokakuun lievä sameuden lisäys ei ollut tilastollisesti merkitsevä. Koko tarkastelujaksolla ja marraskuussa altaat lisäsivät sameutta, mutta maaliskuussa vähensivät. Vuodenaikaisvaihtelusta Braskerud (2002) havaitsi kesäajan parantavan ravinteiden pidättymistä. Imponojalla kasvukauden aikana ei tilastollisesti tapahtunut pidättymistä, vaikka valuma-alueesta on peltoa samankaltainen osuus kuin Braskerudin (2002) tutkimuksessa, tosin savea on Imponojan maaperästä pääasiassa vähemmän.

Myös Koskiahon & Puustisen tutkimuksen (2019) toisessa kosteikossa eniten kiintoainesta pidättyi kasvukauden jälkeen, kun sitä tuli altaaseen enemmän. Toisessa kosteikossa suurin osa kiintoaineen pidättymisestä tapahtui myös syksyllä. Yhtenä mahdollisena erona tutkijat esittävät suurempia kiintoaineen ja ravinteiden pitoisuuksia kosteikkoon valuvassa vedessä. Tämän tutkielman tulokset saattavat osoittaa samaan suuntaan, sillä paremmin toimivilla Ekmanin altailla sisään virtaavat pitoisuudet eli sameus oli pääsääntöisesti korkeampi kuin Imponojalla (taulukko 17). Koskiahon & Puustisen (2019) mukaan suurempi kiintoainekuorman olisi pidättymisen kannalta parempi tulla suurena pitoisuutena kuin suurena virtaamana. Imponojalla virtaamat olivat suurempia kuin Ekmanilla.

Koskiahon & Puustisen (2019) tutkimuksessa kiintoaineen pidättyminen oli paremmin toimivassa kosteikossa suhteellisesti suurimmillaan syksyllä (44 %). Heikommin toimivassa kosteikossa kiintoainekuorma kasvoi tulo- ja lähtöuomien välissä talvella, keväällä ja kesällä, mutta vähentyi suurimman kuorman aikaan syksyllä. Ekmanin kosteikon keväinen toiminta oli heikompa kuin Koskiahon & Puustisen (2019) tutkimuksen toimivalla kosteikolla, mutta kesäinen pidättyminen toisaalta parempaa. Syksyinen

pidättyminen on samalla tasolla. Koskiahon & Puustisen (2019) heikommin toimivan kosteikon ja Imponojan altaiden tulokset ovat päinvastaiset kevään ja syksyn osalta. Erot aiempien tutkimusten (Koskiahon & Puustinen 2019; Valkama ym. 2017) selittynevät osittain tämän tutkielman vuodenaikaisjaottelulla, joka noudattelee Valkaman ym. (2017) jakoa, mutta josta puuttuvat havainnot tammikuusta maaliskuun loppupuolelle sekä joulukuulta. Puhdas tulosten vertailu osoittaa, ettei pienten, viileän ilmaston vesiensuojelurakenteiden vuodenaikaistoinnata välttämättä löydy selkeää säännönmukaisuutta. Paikalliset erityispiirteet altaiden muodosta, virtauskentistä ja kiintoaineskuorman laadusta lähtien voivat vuodenaikoja voimakkaammin säädellä, miten kukin vesiensuojelurakenne toimii. Toisaalta vertailuun olisi hyvä saada useampia kooltaan, virtausoloiltaan ja valuma-alueiltaan mahdollisimman samankaltaisia vesiensuojelurakenteita.

Tutkittujen kosteikkojen huippuvirtaamat ovat suunnilleen samaa suuruusluokkaa kuin muissa rakennettujen kosteikkojen tutkimuksissa (esim. Koskiahon 2003; Valkama ym. 2017). Ekmanin virtaamat ovat hieinan pienempiä. Imponojalla lähtöuoman sameuden kasvu korreloi voimakkaasti ja tilastollisesti merkitsevällä tasolla virtaaman mutta ei käytännössä lainkaan tulouoman sameuden kanssa. Lähtö- ja tulouomien sameuden vuorokausikeskiarvot eivät ole tilastollisesti merkitsevästi yhteydessä toisiinsa, vaikka veden viipymät ovat suurimmaksi osaksi alle vuorokauden pituisia. Lähtöuoman sameus ei siis vaikuta olevan peräisin pelkästään tulouomasta. Lisäksi lähtöuoman vesi on pääsääntöisesti sameampaa kuin tulouoman vesi silloin, kun virtaama ylittää 40 l/s. Tällaisia tilanteita esiintyy karkeasti 25 % tutkimusjakson ajasta (taulukko 12). Edellä kuvattujen perusteella voidaan esittää se mahdollisuus, että Imponojan lähtöuomassa virtaava sameus on peräisin vesiensuojelurakenteen altaista varsinkin niissä tilanteissa, jolloin lähtöuoman sameus on suurempi kuin tulouoman. Esimerkiksi altaissa hajoavaa kasviainesta voi Imponojalla virrata kosteikosta voimakkaammin pois, koska virtaus on tulvahuipeissa voimakas koko altaan alueella. Etenkin alajuoksun puoleisesta altaasta itsestään lähtevä kiintoaine on ongelmallista, koska alemmasta altaasta virtaava vesi ei virtaa seuraavaan vesiensuojelualtaaseen. Toisaalta tämän tutkimuksen analyysi ei kerro, kummasta altaasta vapautuva kiintoaine on peräisin. On myös huomioitava, että sameus yleisesti ottaen ei ole pelkän suspensio kulkeuman aiheuttamaa. Imponojan ja Ekmanin välillä voi olla eroa esimerkiksi veteen liukenevien orgaanisten aineiden suhteen, joita ei tämän tutkimuksen aineistosta ilmene.

Virtaaman kasvun heikentämä kiintoaineen pidättyminen Imponojalla (kuva 53) on linjassa Koskiahon & Puustisen (2019) tutkimuksen kiintoainetulosten kanssa. Heidän tutkimassaan pienemmässä kosteikossa (pinta-ala 1,3 % valuma-alueesta) valunnan kasvu heikensi kiintoaineen pidättymistä. Ekmanin altaiden toiminta virtaaman kasvusta huolimatta on mielenkiintoista sikäli, että se on suhteelliselta pinta-alaltaan pienempi kuin Koskiahon & Puustisen (2019) tutkima pienempi kosteikko, jolla virtaaman kasvu heikensi puhdistustehoa. Ekmanin keskimääräinen hydraulinen kuormitus tarkastelujaksolla oli 2,21 m/d ja Imponojalla vastaava luku oli 3,65 m/d. Luvut ovat jokseenkin samaa suuruusluokkaa kuin Braskerudin (2002) tutkimuksessa. Koskiahon & Puustisen (2019) tutkimien kosteikkojen hydrauliset kuormitukset sen sijaan ovat selvästi pienempiä, mutta selvästi paremmin toimii kosteikko, jonka hydraulinen kuormitus on alhaisempi. Braskerud (2002) havaitsi tutkimillaan kosteikoilla niiden kykenevän pidättämään ravinteita huolimatta hydraulisen kuormituksen kasvusta, koska hydraulisen kuormituksen kasvaessa altaiisiin virtasi suurempia maahiukkasia, jotka laskeutuivat nopeammin. Toisaalta virtaaman kasvaessa pienten savihiukkasten sedimentoituminen väheni. Ekmanin altaiden hyvän toiminnan positiivinen korrelaatio virtaaman kanssa voi johtua esimerkiksi tästä Braskerudin (2002) havainnosta, että virtaaman kasvu kuljettaa helpommin sedimentoituvia hiukkasia. Havainto virtaaman suhteesta pidättymiseen on erilainen Imponojalla, mikä voi selittyä valuma-alueen eroilla.

Niin Valkama ym. (2017) kuin Koskiahon & Puustinen (2019) havaitsivat absoluuttisen pidättymisen korreloivan positiivisesti virtaaman kanssa. Nyt tehdyssä tutkielmassa päivittäisten hehtaarikohtaisten kiintoainekuormien korrelaatiot tulo- ja lähtöomien välillä (taulukko 23) ovat molemmissa tapauksissa voimakkaammat kuin sameusarvojen korrelaatiot (taulukko 21). Absoluuttisten määrien korrelaatiot ovat voimakkaammat luultavasti siksi, että virtaaman kasvaessa suspensiokulkeuman absoluuttinen massa kasvaa myös pienemmällä pitoisuudella.

Koskiahon & Puustinen (2019) toteavat vesiensuojelualtaan toiminnan paranevan altaan iän mukana. Tämän tutkielman altaista Ekmanin ovat alun perin hieman vanhempia (1997) verrattuna Imponojaan (2000). Ekmanin laskeutusallasta kuitenkin kunnostettiin huomattavasti 2016, mitä voinee verrata ”uuteen” altaaseen. Imponojalla kunnostusta tehtiin viimeksi 2009. Ekmanin altaat puhdistavat vettä paremmin, joten altaan iällä ei tämän tutkimuksen tulosten puolesta näytä olevan vaikutusta kiintoaineen pidättymiseen.

6.2 Pinnanmuodot ja pinta-ala

Tutkimuksessa kosteikkojen pinnanmuodot on kartoitettu kattavammilla menetelmillä, kuin aikaisemmissa topografiaa käsittelevissä kosteikkotutkimuksissa. Esimerkiksi Hollandin ym. (2004) tutkimuksessa altaan topografia perustuu takymetrimittaukseen, eikä mitattujen pisteiden alueellista kattavuutta tai määrää ole kerrottu. Koskiahon (2003) tutkimuksessa ei lainkaan mainita altaiden topografiatietojen alkupehää.

Ekmanin altaat ovat muodoiltaan huomattavasti pitkulaisempia kuin Imponojan altaat (luku 5.3.1). Ne myös pidättävät paremmin sameutta ja kiintoainesta (luvut 5.2.1 ja 5.2.2). Kadlecin & Wallacen (2009) mainitsemaa riskiä pohjaa kuluttavista virtausnopeuksista ei näytä pitkulaisesta muodosta huolimatta olevan. Päinvastoin pohjanläheiset virtausnopeudet (taulukko 32) ovat saman suuruusluokan virtaamilla simulaatioiden mukaan suurempia Imponojan altailla, jotka ovat muodoltaan vähemmän pitkulaisia. Pohjanläheisiin virtauksiin näyttää siis vaikuttavan pinta-alan muodon lisäksi monet muut seikat, kuten pohjan topografia, altaassa oleva kasvillisuus sekä vesialtaan tilavuus suhteessa virtaamaan.

Muodon suhteen Braskerud (2002) pohtii, että kosteikko-osuuden tulisi vesiensuojelurakenteessa olla matala, jotta laskeutuvat hiukkaset saavuttaisivat pohjan nopeasti ja kasvillisuudella olisi alaa kasvaa. Tämän tutkielman tulosten perusteella voidaan kuitenkin esittää, että mataluudesta ei automaattisesti saa hyötyä vesiensuojelualtaiden toiminnan kannalta. Imponojan kosteikko-allas on selvästi matalampi kuin Ekmanin kosteikko (taulukko 25), joten mataluuden mahdolliset hyödyt näyttäisivät kumoutuvan heikentävien seikkojen vaikutuksesta. Imponojan kosteikon tilavuus on esimerkiksi pienempi suhteessa virtaamaan ja pohjanläheiset virtausnopeudet ovat suurempia (taulukot 32–35). Kasvillisuutta on Imponojan kosteikossa jopa hieman enemmän (taulukko 28), tosin Ekmanilla kasvillisuus on voimakkaammin sijoittunut altaan reunoille (kuvat 58 ja 59). Imponojan suuremmista pohjanläheisistä virtausnopeuksista (taulukko 32) johtuen voidaan pohtia, kumoaako tilavuuteen nähden suuri virtaama Braskerudin (2002) esittämän kasvillisuuden uudelleensuspensiota heikentävän vaikutuksen.

Ekmanin altaiden yhteenlaskettu pinta-ala suhteessa valuma-alueeseen on hieman suurempi kuin Imponojalla, mutta molempien vesiensuojelurakenteiden pinta-ala jää paljon alle Koskiahon (2003) liian pienenä pitämästä 0,5 %:sta suhteessa valuma-alueeseen. Toisaalta Koskiahon (2003) tutkimuksen vesiensuojelurakenteet koostuivat pelkästä kosteikosta, kun taas tässä tutkielmassa tarkastelussa oli kaksi laskeutusallas–kosteikkoyhdistelmää. Molemmissa sijainneissa altaiden yhteenlaskettu pinta-ala suhteessa valuma-alueisiinsa on samaa luokkaa kuin Braskerudin (2002) ja Valkaman ym. (2017) tutkimuksissa, joissa

todettiin rakenteen toimivan ravinteiden ja kiintoaineen pidättäjinä. Ekmanin ja Imponojan altaiden yhteenlasketut pinta-alat suhteessa valuma-alueisiinsa eivät juuri eroa toisistaan, mutta Ekmanilla kosteikon osuus on huomattavasti suurempi. Uusi-Kämpä ym. (2000) toteaa yksittäisten kosteikkojen olevan parempia fosforin sijoja kuin yksittäiset laskeutusaltaat. Näin ollen tämän tutkielman tulos paremmin puhdistuvasta valumavedestä suuremman kosteikon rakenteessa voi vahvistaa kosteikkoaltaan tärkeyttä.

Koskiahon & Puustisen (2019) tutkimassa pienemmässä kosteikossa (pinta-ala 1,3 % valuma-alueesta) kiintoaineen vähentymä oli koko neljän ja puolen vuoden tarkastelujaksolla keskimäärin 7 %, mikä on vähemmän kuin Ekmanin altailla (pinta-ala 0,11 % valuma-alueesta) ja paremmin kuin Imponojan altailla (pinta-ala 0,09 % valuma-alueesta) tässä tutkielmassa. Tämän tutkielman valuma-alueiden pinta-alat ovat siis molemmat hyvin pieniä suhteessa valuma-alueisiinsa, joskin Ekmanilla osuus on Imponojaan verrattuna 18 % suurempi. Huomattavampi ero on suurimpien virtaamien suhteessa valuma-alueen pinta-alaan, joka on Imponojalla 69 l/s/km² ja Ekmanilla 23 l/s/km². Tämä luku on toki suurempi molemmissa Koskiahon & Puustisen tutkimissa altaissa. Altaiden pinta-alan suhde valuma-alueen pinta-alaan ei kuitenkaan välttämättä ole yhtä merkittävä vesiensuojelurakenteen toiminnan kannalta kuin virtaaman suhde valuma-alueen pinta-alaan, tai virtaaman suhde tilavuuteen eli nimellisviipymä.

Koskiahon (2003) vahvistaa altaiden pitkänomaisen muodon vähentävän seisovan veden pinta-alaa eli lisäävän hydraulista tehokkuutta. Tämän tutkielman tulosten perusteella pitkänomainen altaan muoto ei ole ainoa suurempaan hydrauliseen tehokkuuteen johtava tekijä kosteikkoaltaissa. Ekmanin kosteikko on muodoltaan huomattavasti pitkälisempi kuin Imponojan kosteikko, mutta hydraulinen tehokkuus on Imponojan kosteikolla suurempi. Toisaalta Ekmanin kosteikon nimellisviipymä eli tilavuuden suhde virtaamaan on selvästi suurempi. Näyttäisikin siltä, että suurella nimellisviipymällä virtaus ei kykene leviämään koko altaan alueella tai pienellä nimellisviipymällä altaan muodon vaikutus hydrauliseen tehokkuuteen saattaa ohittua. Laskeutusaltaista Ekmanin pitkälisempi allas oli hydraulisesti tehokkaampi, mutta myös vähemmän kasvillisuutta sisältävä. Imponojan laskeutusaltaan kasvillisuus tai sen poissaolo näytti selvästi ohjaavan virtausta (kuvat 62–65). Koskiahon (2003) pohtii hydraulisen tehokkuuden parantuvan myös sillä, että altaan syvin kohta on yläjuoksulla heti tulouoman jälkeen. Tämän tutkimuksen altaissa syvin kohta on kaikissa tapauksissa altaiden alajuoksulla juuri ennen lähtöomaa (kuvat 54 ja 55). Tulosten perusteella pitkänomainen altaan muoto kuitenkin voi auttaa virtausta hidastumaan aikaisemmin suhteessa altaan pituuteen, mahdollistaen sedimentaatiota. Pitkänomainen muoto voi siis hyvin olla altaiden toiminnan kannalta eduksi.

Puustinen ym. (2007) mainitsevat vesipinta-alan nopean kasvun suhteessa vedenpinnan nousuun olevan tärkeää altaiden toiminnan kannalta. Altaiden vesipinta-ala kasvoi vaihtelevasti suhteessa vedenpinnan korkeuden vaihteluun. Ekmanilla kasvu oli kosteikossa nopeampaa ja Imponojalla puolestaan laskeutusaltaassa. Imponojan laskeutusaltaan vesipinta-ala kasvoi yli kaksi kertaa nopeammin suhteessa vedenpinnan nousuun ja Ekmanin kosteikon vesipinta-alan kasvu oli vajaa kaksi kertaa nopeampaa. Selvää eroa suhteessa altaiden toimintaan ei näin ollen löytynyt. Lisäksi vesipinta-alan kasvu sinällään ei vaikuta sedimentaatioon, kun virtaus ei tapahdu koko altaan alalla, vaikkakin suurempi vesitilavuus oletettavasti hidastaa virtausta. Vesipinta-alan vaihtelu ei tämän tutkimuksen tulosten valossa näytä olevan sedimentaation kannalta tärkeä muuttuja analysoitaessa vesiensuojelualtaiden toimintaa.

Molempien vesiensuojelurakenteiden altaat ovat selvästi liian pieniä suhteessa pintakuormateorian mukaan laskettuihin pinta-aloihin (taulukko 40), jotta yksittäisillä savipartikkeleilla (< 0,0015 mm) olisi mahdollisuuksia sedimentoitua altaisiin etenkin virtaamapiikkien aikana. Pintakuormateoria ei kenties ota hyvin huomioon syvyyden vaihtelua altaassa, mutta virtaussimulaatioiden tulokset ovat samansuuntaisia

(taulukot 30 ja 31, kuvat 60–65). Kumpikaan arvio ei ota huomioon savipartikkelien mahdollista flokkuloitumista, mutta toisaalta jo hienon hiedan (< 0,02 mm) sedimentoituminen altaisiin on virtaamapiikkien aikana epävarmaa.

6.3 Virtauskentät ja veden viipymä

Sedimentaation merkitys kiinteän ravinne- ja kiintoainekuorman pidättämisessä nousee esiin viileän ilmaston vesiensuojelualtaita koskevassa tutkimuksessa (esim. Braskerud 2002; Koskiaho & Puustinen 2019; Valkama ym. 2017). Näin ollen Ekmanin ja Imponojan altaiden eroavilla virtauskentillä (luku 5.4.1) on luultavasti yhteys altaiden erilaiseen toimintaan. Tehokkaamman pidättymisen aikaan saamiseksi Valkama ym. (2017) korostavat virtausnopeuden hidastamista, ensisijaisesti altaiden pinta-alaa kasvattamalla. Oleellista lienee edellisessä luvussa pohdittu virtauksen suhde vesitilavuuteen ja valuma-alueen pinta-alaan.

Valkama ym. (2017) havaitsivat suurimman absoluuttisen ravinteiden pidättymisen tapahtuvan suurimman osan kuormasta tuovien tulvapiikkien aikana, vaikka suhteellinen ravinteiden pidättyminen olikin tällöin pienempää. Myös tämän tutkielman tulokset viittaavat virtaama- ja kiintoainekuormahuippujen olevan yhteydessä toisiinsa (kuvat 50 ja 53). Imponojalla suurin absoluuttinen kiintoaineen vapautuminen päivää kohti tapahtuu suurimpien virtaamien aikaan marraskuussa, jolloin Ekmanilla havaitaan suurin absoluuttinen pidättyminen (taulukko 19). Suurimmat kuormat näyttävät myös tulevan äkillisinä tapahtumina, kuten Valkaman ym. (2017) tutkimuksessa, vaikka Imponojalla vapautuva kuormitus lieneekin peräisin altaista itsestään.

Hollandin ym. (2004) mukaan kosteikkoaltaan syvyydellä on suurempi vaikutus veden viipymään kuin virtaamalla. Tämän tutkielman virtaussimulaatioiden ja viipymälaskelmien perusteella virtauksen kasvu lyhentää veden viipymää altaissa ja muokkaa virtauskenttiä, jotka ohjaavat viipymää. Toisaalta Hollandin ym. (2004) tutkimat kontrolloidut virtaaman vaihtelut ovat hyvin pieniä (0,29–5,03 l/s). Holland ym. (2004) toteaaakin luonnollisten virtaamien olevan luonteeltaan pulssimaisempia ja vaihtelun suurempaa kuin heidän tutkimuksessaan, ja pohtii virtaaman ohjaavan viipymää enemmän luonnollisissa virtaustilanteissa. Tässä tutkielmassa ei toisaalta eroteltu altaan syvyyden ja virtaamien vaikutusta toisiinsa, koska mallinnetuissa luonnollisissa virtaustilanteissa altaan vedenpinta ja altaaseen tuleva virtaama kasvoivat samanaikaisesti.

Holland ym. (2004) tulkitsevat virtauskenttien keskittyvän pienemmälle alueelle ja hydraulisen tehokkuuden laskevan, kun altaan vedenpinta nousee. Tämän tutkielman tulosten perusteella virtaus levittyy laajemmin koko altaaseen ja hydraulinen tehokkuus nousee, kun altaan vedenpinta nousee (taulukot 36–38). Ainoa poikkeus on Imponojan kosteikkoallas, jonka hydraulinen tehokkuus oli kesäkuun mallissa suurempi kuin huhtikuun mallissa, huolimatta matalammasta vedenpinnasta, mikä voisi indikoida kasvillisuuden edistävän hydraulista tehokkuutta oikein sijoiteltuna. Muutoin kaikilla altailla vedenpinnan nousu ja hydraulinen tehokkuus tapahtuivat samanaikaisesti. Toisaalta samanaikaisesti vedenpinnan nousun kanssa myös mallinnetut virtaamat kasvoivat, joten tämä ristiriita Hollandin ym. (2004) tuloksen kanssa voi selittyä virtaaman suuremmalla kasvulla suhteessa vedenpinnan korkeusvaihteluun. Myös Holland ym. (2004) pohtivat virtaaman kasvun parantavan hydraulista tehokkuutta. Hydraulisen tehokkuuden ja virtaaman suhde ei Hollandin ym. (2004) mukaan ole veden puhdistumisen kannalta kuitenkaan yhtä oleellinen kuin virtaaman ja veden viipymän suhde. Vastaava näyttäisi pitävän tämänkin tutkielman tulosten valossa paikkansa, sillä paremmin toimivissa Ekmanin altaissa yhteenlaskettu hydraulinen tehokkuus oli pienempi, mutta veden viipymä (sekä nimellisviipymä että virtaussimulaatioista laskettu) selvästi pidempi kuin Imponojan altailla (taulukot 34–38).

Erityisesti tulvahuipuissa Imponojan kosteikkoaltaassa virtaus tapahtuu koko altaan pituudella, kun Ekmanin kosteikossa virtausnopeudet hidastuvat jo puolivälissä altaan pituutta (kuvat 62–65). Tämä ero virtauskentissä voi olla osasyynä siihen, miksi Imponojan lähtöuomassa virtaa sameampaa vettä erityisesti suuremman virtauksen aikaan (taulukko 21 ja kuvat 50, 53 ja 63). Ekmanin lähtöuoman sameus ainoastaan hieman kasvaa virtaaman kasvaessa, vaikkei yhteys olekaan tilastollisesti merkitsevä. Ekmanin kosteikon pitkänomainen muoto näyttäisi luovan edellytyksiä virtauksen hidastumiselle. Pitkulaisen muodon ansiosta tulovirtaamalla on matkaa, jolla hidastua, kuin vähemmän pitkulaisissa altaissa.

Virtaussimulaatioiden tulokset voisivat olla erilaisia, mikäli batymetria olisi kartoitettu samana vuonna, kuin miltä virtaama-aineisto on. Suspensiossa kulkevaa ainesta kasautuu jatkuvasti kosteikko- ja laskeutusaltaisiin, mikä muuttaa niiden topografiaa. Maatalouden valumavesiä käsittelevissä avoimen vedenpinnan kosteikoissa on tyypillistä varsinkin tulo-uoman suulle kertyvät kiintoainekasaumat (Kadlec & Wallace 2009: 203). Imponojan laskeutusaltaaseen olikin muodostunut tällainen kasauma vuosien 2017 ja 2018 välisen talven–kevään aikana (kuva 67). On siis selvää, että altaisiin kasautuu kiintoainesta. Kiintoaineen kasautuminen tulo-uoman suulle selittää suurimpien syvyyksien sijaitsemisen altaiden alajuoksuilla.



Kuva 67. Imponojan laskeutusaltaan tulo-uoman suulla keväällä 2018 kuvattua kiintoainekasaumaa (rajattu katkoviivalla) ei ollut vielä vuonna 2017. Nuoli kuvaa tulo-uoman virtausta altaaseen. Kuva: Santtu Kaipainen.

Imponojalla Hjulströmin (1935) mukaisia hiekkaa ja sitä pienempää ainesta kuljetukseen ottavia pohjavirtausnopeuksia löytyi ainoastaan 1 tulo-uoman solusta sekä laskeutusaltaassa että kosteikossa. Ekmanin altaissa vastaavia nopeuksia ei ollut lainkaan. Pohjanläheiset virtausnopeudet (taulukko 32) eivät siis Hjulströmin (1935) (taulukko 9) mukaan aiheuta pohjaeroosiota missään altaassa, ainakaan simuloiduissa tilanteissa. Kosteikkojen epävakaa pohjamateriaali voi toisaalta lähteä liikkeelle jo yli 3 cm/s (Burns & McDonnell 1996, cit. Kadlec & Wallace 2009: 210) tai jopa yli 2,1 cm/s (Huisman 1973, cit. Koskiahho 2003: 330) nopeuksilla. Näitä nopeuksia esiintyy Imponojan altaissa kohtalaisilla pinta-aloilla uomien suilla ja altaassa (taulukko 33 ja kuva 65). Uudelleensuspensio voi siis selittää osan Imponojan lähtöuoman tulo-uomaa suuremmasta sameudesta. Ekmanin altaissa vastaavia nopeuksia on suhteellisesti paljon pienemmillä pinta-aloilla, eikä uomien välillä ole samanlaista eroa sameudessa. Kadlec & Wallacen (2009: 210) mukaan pohjaeroosion todennäköisyys on suurempi altaissa, joissa pituuden suhde leveyteen on

suurempi. Tämän tutkielman mallinnusten mukaan suuremmat pohjavirtausnopeudet löytyivät Imponojalta, jossa altaiden pituuden suhde leveyteen on pienempi. Mahdollinen selittävä tekijä voi olla myös altaassa syntyvän orgaanisen kiintoaineen ulosvirtaus.

Sameutta pidättivät paremmin Ekmanin altaat, joilla veden viipymät (taulukot 34–38) olivat pidempiä kuin Imponojalla samojen vuodenaikojen vertailussa. Viipymät olivat pidempiä myös monessa saman suuruusluokan virtaamatilanteen vertailussa, vaikka Ekmanin virtaamat näissä vertailuissa olivatkin hieman suurempia. Viipymän yhteys altaiden kykyyn puhdistaa niihin virtaavaa vettä näyttää siis olevan yhtenevä aikaisempien tutkimusten kanssa (esim. Holland ym. 2004; Koskiahho 2003; Valkama ym. 2017). Viipymässä, ja hydraulista tehokkuutta lukuun ottamatta kaikissa hyvässä toimintaa selittävässä suureissa, Ekmanin altaiden ”paremmat” arvot johtuvat kosteikkoaltaan hyvistä tuloksista (taulukko 39). Kyseessä voi olla muuttujien tärkeysjärjestys tai se, että nimenomaan kosteikkoaltaan hyvä toiminta on tärkeää.

6.4 Mittausasetelman rajoitteet

Virtaaman aikasarjat olisi hyödyllistä aloittaa jo aikaisemmin keväällä, jotta kevättulva saataisiin mitattua ja otettua analyysiin mukaan. Lisäksi kaikkien altaiden mittaukset olisi hyvä ajoittaa alkamaan samanaikaisesti ja virtaamamittauksia tulisi olla enemmän luotettavampien virtaamamallien johtamiseksi. Erityisesti virtaamia tulisi mitata matalan ja korkean virtaaman aikoina. Esimerkiksi Holdenin (2012) mukaan vedenpinnan korkeuden ja virtaaman yhteyden kuvaaja voi muuttaa muotoaan nimenomaan hyvin pienen virtauksen ja tulvan aikaan. Nyt virtaamia ei saatu mitattua varsinkaan tulvien ajalta. Lisäksi altaiden todellisia veden viipymiä olisi hyödyllistä tarkastella merkkiainemittausten avulla. Näin voitaisiin arvioida tehtyjen viipymälaskelmien todenmukaisuutta. Mitattujen viipymien avulla saataisiin myös tietoa altaiden todellisista hydraulisista tehokkuuksista.

Altaisiin ja niistä pois virtaavista ravinnepitoisuuksista olisi hyödyllistä saada mitattua tiheämpää aikasarjaa. Sekä Valkama ym. (2017) että Koskiahho & Puustinen (2019) korostavat jatkuvatoimisen ravinnemittauksen antavan tarkempia tuloksia kosteikkojen toiminnasta. Vedenlaatuanalyysissä olisi hyvä erotella toisistaan orgaaninen ja epäorgaaninen kiintoaine, ja altaista itsestään tulisi ottaa vesinäytteitä. Näin saataisiin tarkasteltua uudelleensuspension tai altaissa syntyvän orgaanisen kiintoaineen mahdollisia vaikutuksia erityisesti Imponojan lähtöoman tulouomaa suurempaan sameuteen. Valkama ym. (2017) havaitsivat varsinkin kasvukauden ulkopuolisen vedenlaadun ja virtaaman vaihtelun olevan niin nopeaa, että 10 minuutin mittausintervalli jatkuvatoimisessa laitteistossa oli tarpeen vaihtelun havaitsemiseksi. Tässä tutkimuksessa mittausintervalli oli pienempi, tiheimmillään 30–60 minuuttia. Ajallisesti tiheämpi aineisto varsinkin ravinteiden suhteen mahdollistaisi paremman analyysin eri ravinteiden pidätyksestä. Tässä tutkimuksessa ravinnepitoisuuksista ei ollut vesinäytteitä suurimpien mallinnettujen pitoisuuksien kanssa samanaikaisesti. Koska jatkuvatoimisten mittarien dataa ei saatu vastaamaan vesinäytteitä kovinkaan hyvin ravinteiden osalta, ei koko tarkastelujaksolta voida tehdä luotettavia oletuksia esimerkiksi liukaisen fosforin ja kiinteän fosforin osuuksista. Esimerkiksi Braskerud (2002) korostaa tarvetta tutkia sitä, missä muodossa ravinteet päätyvät kosteikkoihin. Vesinäytteiden pohjalta ei voitu tehdä arvioita pidätyksestä, koska näytteet on otettu käytännössä samalla kellonajalla tulouomasta ja lähtöomasta, ja ravinteet virtaavat kosteikon läpi vain yhtä nopeasti kuin vesi.

Sekä Imponojan että Ekmanin vesiensuojelurakenteiden on tarkoitus vähentää Säkylän Pyhäjärven ravinnekuormaa. Suurin osa Pyhäjärveen päätyvästä ravinnekuormasta tulee talviaikaan (esim. Ventelä ym. 2011), jota ei juurikaan tässä tutkimuksessa saatu mallinnettua tai mitattua. Mittauksia ja analyysijä olisi hyödyllistä tehdä myös talviajalta, jotta kyseessä olevien vesiensuojelurakenteiden mekanismeja voitaisiin ymmärtää myös ravinnekuorman kannalta kriittisimpänä vuodenaikana. Valkama ym. (2017) tutkii

ravinteiden pidättymistä suomalaisessa ilmastossa läpi vuoden, mutta heidän tutkimuksensa vesiensuojelurakenne ei ole laskeutusallas–kosteikkoyhdistelmä, vaan yhden altaan rakenne.

Altaiden topografiat samasta rakenteesta mitattiin eri vuodenaikoina, ja Ekmanin batymetria lisäksi alueellisesti puutteellisesti johtuen tiheästä vesikasvustosta. Näin ollen virtaussimulaatioiden pohjana ollut pintamalli ei vastanne todellisuutta parhaalla mahdollisella tavalla. Parempien virtausmallien ja laskelmien tekemiseksi topografiat altaista olisikin hyvä kartoittaa mahdollisimman samana ajankohtana. Näin tehtyjen mittausten toistaminen vuosittain mahdollistaisi altaiden pohjan muutostulkinnan. Pohjan topografian kartoitus tulvien jälkeen voisi tuoda lisää ymmärrystä virtaustapahtumien aiheuttamiin muutoksiin altaissa. Samalla ymmärrys ruoppaustarpeen aikavälistä voisi parantua. Sedimentin kasautumisesta voisi tarkastella myös sedimenttilautasten avulla, kuten Braskerud (2002) teki tutkimuksessaan. Sedimenttilautasilla saataisiin parempi kuva suspensiokulkeuman kasautumisesta altaisiin. Nyt tehdyn tutkimuksen avulla ei esimerkiksi saada suoraa tietoa siitä, minkä suuruiset raekoot varastoituvat altaisiin ja minkä suuruiset virtaavat altaiden läpi laskeutumatta pohjaan.

Vuosittain hajoavan kasvillisuuden määrää ja kohtaloa olisi hyödyllistä selvittää. Kun kasviaines hajoaa kosteikoissa, sen typpipitoisuus laskee (Wetzel 2001: 632). Toisin sanoen kasvin eläessään sitoma typpi vapautuu vesistöön. Kuolleilla kosteikkokasveilla voi siis olla merkittävä vaikutus kosteikkojen ravinteiden sitouttamiseen, etenkin jos suuri osa kosteikkoon jäävistä ravinteista sitoutuu kasveihin.

7. Johtopäätökset

Tutkielman tavoitteena oli lisätä ymmärrystä siitä, miten kosteikkoaltaiden geometria ja virtausolosuhteet vaikuttavat altaiden kykyyn pidättää kiintoainekuormaa. Tarkastelussa oli kaksi Lounais-Suomessa sijaitsevaa laskeutusallas–kosteikko-rakennetta. Tutkielman tulosten perusteella voidaan tehdä seuraavat johtopäätökset

- Hydraulinen tehokkuus kasvaa virtaaman kasvaessa. Hyvä hydraulinen tehokkuus ei kuitenkaan paranna kosteikkoaltaan toimintaa, jos vesi virtaa altaan läpi liian nopeasti.
- Vesiensuojelurakenteen hyvän toiminnan kannalta oleellisia pidettyjä virtauksen suureita tulisi suunnitteluvaiheessa tarkastella kokonaisuutena. Suuri nimellisviipymä näyttää olevan tärkein yksittäinen suure.
- Altaiden virtauskenttien mallintamisesta on hyötyä suunnitteluvaiheessa, koska virtauskentät vaikuttavat sedimentaation tapahtumiseen ja uudelleensuspension riskiin.
- Valuma-alueisiin nähden hyvin pienillä vesiensuojelualtailla pinta-ala suhteessa valuma-alueeseen ei yksinään riitä selittämään rakenteen kykyä vähentää kiintoaines- ja ravinnekuormaa. Altaan pitkänomainen muoto ja kasvillisuuden virtausta hidastava sijoittuminen näyttäisivät olevan eduksi sedimentaatiolle.
- Laskeutusallas–kosteikko-yhdistelmissä varsinkin alajuoksun puoleisen kosteikkoaltaan virtausolosuhteilla ja pinnanmuodoilla näyttäisi olevan merkitystä vesiensuojelurakenteen toiminnan kannalta.
- Vesiensuojelurakenteen toiminnassa tulee huomioida altaista itsestään lähtevä aines, joka on peräisin uudelleensuspensiosta tai altaissa hajoavasta kasvillisuudesta.
- Vesiensuojelualtaiden toimintaa olisi hyödyllistä tarkastella läpi vuoden ajallisesti tiheällä aineistolla virtaamista sekä ravinne- ja kiintoainekuormista.

Kiitokset

Haluan kiittää tutkielman ohjaajaa professori Petteri Alhoa tutkimusaiheen tarjoamisesta ja tutkimuksen mahdollistamisesta. Lisäksi kiitos kuuluu myös muille Turun yliopiston Virtavesien tutkimusryhmän entisille ja nykyisille jäsenille: Linnea Blåfieldille kenttätöavusta, Elina Kasville tuesta virtausmallinnuksen kanssa, Markus Kataiselle avusta kenttätöiden ja virtausmallinnuksen kanssa sekä Jouni Salmelalle aineiston käsittelyyn ja tutkimuksen tekoon liittyvistä keskusteluista sekä ohjauksesta kenttätöissä. Kiitos Pyhäjärvi-instituutille vedenlaatuaineiston keräämisestä ja tutkimuksen tilauksesta.

Kirjallisuus

- Al-Asadi, K. & Duan, J. G. (2014). Three-Dimensional Simulation of Tidal Flow in Vegetated Marsh Area. *World Environmental and Water Resources Congress 2014*. <<https://doi.org/10.1061/9780784413548.143>> 15.10.2019.
- Alho, A., A. Kukko, H. Hyypä, H. Kaartinen, J. Hyypä & A. Jaakkola (2009). Application of boat-based laser scanning for river survey. *Earth Surface Processes and Landforms* 34: 13, 1831–1838.
- Allaby, M. (toim.) (2008). Manning equation. *Teoksessa* A Dictionary of Earth Sciences. 3. p. Oxford University Press, Oxford. Verkkoversio, eISBN 9780191726613. 18.9.2019.
- Arcement, G. J., Jr. & Schneider, V. R. (1989). Guide for Selecting Manning's Roughness Coefficients for Natural Channels and Flood Plains. *United States Geological Survey Water-Supply Paper* 2339, 38 s.
- Barnes, H. H., Jr. (1967). Roughness characteristics of natural channels. *U.S. Geological Survey Water-Supply Paper* 1849, 213 s.
- Braskerud, B. C. (2001). The Influence of Vegetation on Sedimentation and Resuspension of Soil Particles in Small Constructed Wetlands. *Journal of Environmental Quality* 30: 4, 1447–1457.
- Braskerud, B. C. (2002). Factors affecting phosphorus retention in small constructed wetlands treating agricultural non-point source pollution. *Ecological Engineering* 19: 1, 41–61.
- Breukelaar, A. W., E. H. R. R. Lammens, J. G. P. Klein Breteler & I. Tátrai (1994). Effects of benthivorous bream (*Abramis brama*) and carp (*Cyprinus carpio*) on sediment resuspension and concentrations of nutrients and chlorophyll *a*. *Freshwater Biology* 32: 1, 113–121.
- Brown, L. E. (2017). Freshwater ecosystems. *Teoksessa* Holden, J. (toim.) (2017). *An Introduction to Physical Geography and the Environment*. 4. p. 298–322. Pearson, Harlow. E-kirja.
- Bärlund, I., T. Kirkkala, O. Malve & J. Kämäri (2007). Assessing SWAT model performance in the evaluation of management actions for the implementation of the Water Framework Directive in a Finnish catchment. *Environmental Modelling & Software* 22: 5, 719–724.
- Callisto, M., J. Molozzi & J. L. E. Barbosa (2014). Eutrophication of Lakes. *Teoksessa* Ansari, A. A. & Gill, S. S. (toim.) (2014). *Eutrophication: causes, consequences and control*. 2. p. 55–71. Springer, Heidelberg. E-kirja.
- Camarero, L. & Catalan, J. (2012). Atmospheric phosphorus deposition may cause lakes to revert from phosphorus limitation back to nitrogen limitation. *Nature Communications* 3, artikkeli 1118. [doi:10.1038/ncomms2125](https://doi.org/10.1038/ncomms2125)
- Champion, P. D. & Tanner, C. C. (2000). Seasonality of macrophytes and interaction with flow in a New Zealand lowland stream. *Hydrobiologia* 441, 1–12.
- Charlton, R. (2008). *Fundamentals of fluvial geomorphology*. 1. p. 234 s. Routledge, Lontoo.
- Chow, V.T. (1959). *Open-channel hydraulics*. 680 s. McGraw-Hill Book Co., New York.

- Coulthard, T. J. & Van de Wiel, M. J. (2012). Modelling river history and evolution. *Philosophical Transactions of the Royal Society A* 370: 1966, 2123–2142.
- Cowan, W.L. (1956). Estimating hydraulic roughness coefficients. *Agricultural Engineering* 37: 7, 473–475.
- Curtarelli, M., J. Leão, I. Ogashawara, J. Lorenzetti, & J. Stech (2015). Assessment of Spatial Interpolation Methods to Map the Bathymetry of an Amazonian Hydroelectric Reservoir to Aid in Decision Making for Water Management. *ISPRS International Journal of Geo-Information* 4: 1, 220–235.
- Diaconu, D. C., P. Bretcan, D. Peptenatu, D. Tanislav & E. Mailat (2019). The importance of the number of points, transect location and interpolation techniques in the analysis of bathymetric measurements. *Journal of Hydrology* 570, 774–785.
- Direktiivi 2000/60/EY. Hyvälaatuinen vesi Euroopassa (EU:n vesidirektiivi). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/?uri=LEGISSUM:l28002b> 24.10.2019.
- De Doncker, L., P. Troch, R. Verhoeven, K. Bal, P. Meire, J. Quintelier (2009). Determination of the Manning roughness coefficient influenced by vegetation in the river Aa and Biebrza river. *Environmental Fluid Mechanics* 9: 5, 549–567.
- Deltares (2017). Delft3D-FLOW User manual. Versio 3.15. 686 s.
- Ekholm, P., O. Malve & T. Kirkkala (1997). Internal and external loading as regulators of nutrient concentrations in the agriculturally loaded Lake Pyhäjärvi (southwest Finland). *Hydrobiologia* 345: 1, 3–14.
- Ervine, A. & Pender, G. (2006). 141: Computer Modeling of Overbank Flows. *Teoksessa* Encyclopedia of Hydrological Sciences. John Wiley & Sons, Weinheim. <https://doi.org/10.1002/0470848944.hsa148>
- ESRI (2018a). How Fill works. <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/tool-reference/spatial-analyst/how-fill-works.htm> 6.3.2019.
- ESRI (2018b). How Flow Direction works. <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/tool-reference/spatial-analyst/how-flow-direction-works.htm> 6.3.2019.
- ESRI (2018c). How Flow Accumulation works. <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/tool-reference/spatial-analyst/how-flow-accumulation-works.htm> 6.3.2019.
- ESRI (2018d). How Watershed works. <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/tool-reference/spatial-analyst/how-watershed-works.htm> 6.3.2019.
- ESRI (2019). Elevation Void Fill Function. <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/help/data/imagery/elevation-void-fill-function.htm> 16.9.2019.
- 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: 12, 6382–6407.
- Flener, C. (2015). Remote sensing for three-dimensional modelling of hydromorphology. *Turun yliopiston julkaisuja, Sarja A 2, Biologica, Geographica, Geologica*, osa 302. 78 s. Väitöskirja.
- Gilvear, D. J. & Jefferies, R. (2017). Fluvial geomorphology and river management. *Teoksessa* Holden, J. (toim.) (2017). *An Introduction to Physical Geography and the Environment*. 4. p. 493–524. Pearson, Harlow. E-kirja.
- Hautamäki, T. (2019). Niin makeita ja cooleja juttuja! *Suomen Kuvalehti* 37/2019, 13.9.2019, 46–49.
- Havens, K. E. (1991). Fish-induced sediment resuspension: effects on phytoplankton biomass and community structure in a shallow hypereutrophic lake. *Journal of Plankton Research* 13: 6, 1163–1176.
- Henderson, P.M. (1966). *Open-channel flow*. 522 s. MacMillan Publishing Co., Inc., New York.

- Heywood, I. D., S. Cornelius & S. Carver (2011). *An introduction to geographical information systems*. 4. p. E-kirja. 446 s. Pearson Education Limited, Harlow.
- Hjulström, F. (1935). *Studies of the morphological activity of rivers as illustrated by the River Fyris*. Inaugural dissertation. 527 s. Almqvist & Wiksells Bokbryckeri-A.-B., Uppsala.
- Hoegh-Guldberg, O., P. J. Mumby, A. J. Hooten, R. S. Steneck, P. Greenfield, E. Gomez, C. D. Harvell, P. F. Sale, A. J. Edwards, K. Caldeira, N. Knowlton, C. M. Eakin, R. Iglesias-Prieto, N. Muthiga, R. H. Bradbury, A. Dubi, M. E. Hatzioios. (2007). Coral Reefs Under Rapid Climate Change and Ocean Acidification. *Science* 318: 5857, 1737–1742.
- Hofmann-Wellenhof, B., H. Lichtenegger & E. Wasle (2008). *GNSS – Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more*. 1. p. 516 s. Springer, Wien.
- Hohenthal, J, P. Alho, J. Hyyppä & H. Hyyppä (2011). Laser scanning applications in fluvial studies. *Progress in Physical Geography* 35: 6, 782–809.
- Holden, J. (2012). Catchment hydrology. *Teoksessa* Holden, J. (toim.) (2012). *An Introduction to Physical Geography and the Environment*. 3. p. 307–335. Pearson, Harlow.
- Holden, J. (2017). Catchment hydrology. *Teoksessa* Holden, J. (toim.) (2017). *An Introduction to Physical Geography and the Environment*. 4. p. 465–492. Pearson, Harlow. E-kirja.
- Holland, J. F., J. F. Martin, T. Granata, V. Bouchard, M. Quigley & L. Brown (2004). Effects of wetland depth and flow rate on residence time distribution characteristics. *Ecological Engineering* 23, 189–203.
- Ilmatieteen laitos (2012). Suomen ilmastovyöhykkeet. <<https://ilmatieteenlaitos.fi/suomen-ilmastovyohykkeet>> 8.3.2019.
- Ilmatieteen laitos (2017). Terminen kasvukausi 2017. <<https://ilmatieteenlaitos.fi/kasvukausi-2017>> 20.9.2017.
- Ingall, E. & Jahnke, R. (1994). Evidence for enhanced phosphorus regeneration from marine sediments overlain by oxygen depleted waters. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 58: 11, 2571–2575.
- Jalonen, J. (2015). Hydraulics of vegetated flows: estimating riparian plant drag with a view on laser scanning applications. *Aalto-yliopiston julkaisusarjoja, tohtoriväitöksiä* 137/2015.
- Jensen, H. S. & Andersen, F. Ø. (1992). Importance of temperature, nitrate, and pH for phosphate release from aerobic sediments of four shallow, eutrophic lakes. *Limnology and Oceanography* 37: 3, 577–589.
- Jenson, S.K. & Domingue, J. O. (1988). Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 54: 11, 1593-1600.
- Kadlec, R. H. & Wallace, S. D. (2009). *Treatment Wetlands*. 2. p. 1046 s. CRC Press, Lontoo.
- Kasvi, E. (2015). Fluvio-morphological processes of meander bends - Combining conventional field measurements, close-range remote sensing and computational modelling. *Turun yliopiston julkaisu, Sarja A II, osa 298*. Väitöskirja, 64 s.
- Kasvi, E., M. Vaaja, P. Alho, H. Hyyppä, J. Hyyppä, H. Kaartinen & A. Kukko (2013). Morphological changes on meander point bars associated with flow structure at different discharges. *Earth Surface Processes and Landforms* 38: 6, 577–590.
- Khan, M. N. & Mohammad, F. (2014). Eutrophication: Challenges and Solutions. *Teoksessa* Ansari, A. A. & Gill, S. S. (toim.) (2014). *Eutrophication: causes, consequences and control*. 2. p. 1–15. Springer, Heidelberg. E-kirja.
- Kirkby, M. (2017). Slope processes and landform evolution. *Teoksessa* Holden, J. (toim.) (2017). *An Introduction to Physical Geography and the Environment*. 4. p. 377–406. Pearson, Harlow. E-kirja.

- Kirkkala, T., A.-M. Ventelä & M. Tarvainen (2012). Fosfilt filters in an agricultural catchment: a long-term field-scale experiment. *Agricultural and Food Science* 21:3, 237–264.
- Kirkkala, T. (2014). Long-term nutrient load management and lake restoration: Case of Säkylän Pyhäjärvi (SW Finland). *Turun yliopiston julkaisuja, Sarja A II, osa 286*. Väitöskirja, 55 s.
- Knighton, D. (1984). *Fluvial Forms and Processes*. 1. p. 218 s. Edward Arnold, Lontoo.
- Koskiaho, J. (2003). Flow velocity retardation and sediment retention in two constructed wetland–ponds. *Ecological Engineering* 19: 5, 325–337.
- Koskiaho, J. (2006). Retention performance and hydraulic design of constructed wetlands treating runoff waters from arable land. *Acta Universitatis Ouluensis*. Ser. C 252.
- Koskiaho, J., P. Ekholm, M. Rätty, J. Riihimäki & M. Puustinen (2003). Retaining agricultural nutrients in constructed wetlands—experiences under boreal conditions. *Ecological Engineering* 20 (2003), 89–103.
- Koskiaho, J., T. Siimekselä & M. Puustinen (2015). Maatalouden vesiensuojelukosteikkojen tehokkuusseuranta automaattilaitteistojen avulla. *Vesitalous* 4/2015, 35–40.
- Koskiaho, J. & Puustinen, M. (2019). Suspended solids and nutrient retention in two constructed wetlands as determined from continuous data recorded with sensors. *Ecological Engineering* 137, 65–75.
- Kukkonen, M., S. Tattari & S. Jaakkola (2013). Valuma-alueiden vedenlaadun seuranta jatkuvatoimisella mittauksella. *Vesitalous* 5/2013, 31–34.
- Laakso, J. (2017). Phosphorus in the Sediment of Agricultural Constructed Wetlands. *Dissertationes Schola Doctoralis Scientiae Circumiectalis, Alimentariae, Biologicae*. Universitatis Helsinkiensis 20/2017.
- Li, D.–H. & Ganczarczyk, J. J. (1987). Stroboscopic determination of settling velocity, size and porosity of activated sludge flocs. *Water Research* 21: 3, 257–262.
- Liu, D., P. Diplas, J. D. Fairbanks & C. C. Hodges (2008). An experimental study of flow through rigid vegetation. *Journal of Geophysical Research* 113: F4015. doi:10.1029/2008JF001042.
- Lockwood, J. G. (2017). Atmospheric processes. *Teoksessa* Holden, J. (toim.) (2017). *An Introduction to Physical Geography and the Environment*. 4. p. 137–174. Pearson, Harlow. E-kirja.
- Maanmittauslaitos (2018a) Korkeusmalli 2 m. <<https://www.maanmittauslaitos.fi/kartat-ja-paikkatieto/asiantuntevalle-kayttajalle/tuotekuvaukset/korkeusmalli-2-m>> 6.3.2019.
- Maanmittauslaitos (2018b). Maastotietokanta. <<https://www.maanmittauslaitos.fi/kartat-ja-paikkatieto/asiantuntevalle-kayttajalle/tuotekuvaukset/maastotietokanta-0>> 6.3.2019.
- Maanmittauslaitos (2019). Geoidi. <<https://www.maanmittauslaitos.fi/tutkimus/teematietoa/geoidi>> 10.11.2019.
- Manning, R. (1891). On the flow of water in open channels and pipes. *Transactions of the Institution of Civil Engineers of Ireland* 20: 161–207.
- Mayhew, S. (2009). *A Dictionary of Geography*. 4. p. Oxford University Press, Oxford. Verkkoversio, eISBN 9780191726699. 1.10.2019
- Mitchener, H. & Torfs, H. (1996). Erosion of mud/sand mixtures. *Coastal Engineering* 29: 1–2, 1–25.
- Moss, B. (2010). *Ecology of freshwaters: a view for the twenty-first century*. 4. p. 470 s. Wiley-Blackwell, Chichester.
- Nummenmaa, L., M. Holopainen & P. Pulkkinen (2014). *Tilastollisten menetelmien perusteet*. 1. p. 353 s. Sanoma Pro, Helsinki.
- Oliver, M. A. & Webster, R. (1990). Kriging: a method of interpolation for geographical information systems. *International Journal of Geographical Information Systems* 4: 3, 313–332.

- Palmer-Felgate, E. J., R. J.G. Mortimer, M. D. Krom, H. P. Jarvie, R. J. Williams, R. E. Spraggs, C. J. Stratford (2011). Internal loading of phosphorus in a sedimentation pond of a treatment wetland: Effect of a phytoplankton crash. *Science of The Total Environment* 409: 11, 2222–2232.
- Park, C. (toim.) (2012). *A Dictionary of Environment and Conservation*. Oxford University Press, Oxford. Verkkooversio, eISBN 9780191726651. 24.9.2019.
- Partheniades, E. (1965). Erosion and Deposition of Cohesive Soils. *Journal of the Hydraulics Division* 91: 1, 105–139. American Society of Civil Engineers.
- Peacock, J. (2017). Ecosystem processes. *Teoksessa* Holden, J. (toim.) (2017). *An Introduction to Physical Geography and the Environment*. 4. p. 277–297. Pearson, Harlow. E-kirja.
- Persson, J., N. L. G. Somes & T. H. F. Wong (1999). Hydraulics efficiency of constructed wetlands and ponds. *Water Science and Technology* 40: 3, 291–300.
- Philips, J. D. (2001). Geomorphic impacts of flash flooding in a forested headwater basin. *Journal of Hydrology* 269: 3–4, 236–250.
- Pretty, J. N., C. F. Mason, D. B. Nedwell, R. E. Hine, S. Leaf & R. Dils (2003). Environmental Costs of Freshwater Eutrophication in England and Wales. *Environmental Science and Technology* 37: 2, 201–208.
- Puustinen, M., J. Koskiaho, J. Jormola, L. Järvenpää, A. Karhunen, M. Mikkola-Roos, J. Pitkänen, J. Riihimäki, M. Svensberg & P. Vikberg (2007). Maatalouden monivaikutteisten kosteikkojen suunnittelu ja mitoitus. *Suomen ympäristö* 21/2007. SYKE.
- Pyhäjärvi-instituutti (2011). Ekmanin kosteikko. http://www.pyhajarvi-instituutti.fi/default2.asp?active_page_id=201 1.3.2019.
- Pyhäjärvi-instituutti (2012). Imponojan laskeutusallas, kosteikko ja suodatin. http://www.pyhajarvi-instituutti.fi/default2.asp?active_page_id=201 1.3.2019.
- RIEGL (2017) *RiSCAN PRO – Operating & Processing Software for RIEGL 3D Laser Scanners*. RiSCAN PRO version 2.5.0 manuaali. 467 s.
- Ritter, D. F., R. C. Kochel & J. R. Miller (1995). *Process geomorphology*. 3. p. 546 s. Wm. C. Brown, Lontoo.
- Ronkainen, N. (2012). Suomen maalajien ominaisuuksia. *Suomen Ympäristö* 2/2012. SYKE.
- Salmela, J. (2017). *Meanderoivan jokiuoman vertikaalinen muutos: kohoumien ja syvänteiden välinen vuorovaikutus*. Pro gradu -tutkielma. Maantieteen ja geologian laitos, Turun yliopisto.
- Scherer, S., J. Rehder, S. Achar, H. Cover, A. Chambers, S. Nuske, S. Singh (2012). River mapping from a flying robot: state estimation, river detection, and obstacle mapping. *Autonomous Robots* 33: 1–2, 189–214.
- Šiljeg, A., S. Lozić & S. Šiljeg (2015). A comparison of interpolation methods on the basis of data obtained from a bathymetric survey of Lake Vrana, Croatia. *Hydrology and Earth System Sciences* 19, 3653–3666.
- Smith, B. J. (2017). Weathering. *Teoksessa* Holden, J. (toim.) (2017). *An Introduction to Physical Geography and the Environment*. 4. p. 347–376. Pearson, Harlow. E-kirja.
- Sontek (2018). FlowTracker2® Handheld-ADV®. <https://www.sontek.com/flowtracker2> 11.12.2019.
- Søndergaard, M., J. P. Jensen & E. Jeppesen (2001). Retention and Internal Loading of Phosphorus in Shallow, Eutrophic Lakes. *The Scientific World* 1: 427–442.
- Søndergaard, M., J. P. Jensen & E. Jeppesen (2003). Role of sediment and internal loading of phosphorus in shallow lakes. *Hydrobiologia* 506: 1–3, 135–145.

- Tauro, F., M. Porfiri & S. Grimaldi (2016). Surface flow measurements from drones. *Journal of Hydrology* 540, 240–245.
- Taylor, K. G. (2017). Sediments and sedimentation. *Teoksessa* Holden, J. (toim.) (2017). *An Introduction to Physical Geography and the Environment*. 4. p. 407–428. Pearson, Harlow. E-kirja.
- Teisson, C., M. Ockenden, P. Le Hir, C. Kranenburg & L. Hamme (1993). Cohesive sediment transport processes. *Coastal Engineering* 21: 1–3, 129–162.
- Tipping, E., S. Benham, J. F. Boyle, P. Crow, J. Davies, U. Fischer, H. Guyatt, R. Helliwell, L. Jackson-Blake, A. J. Lawlor, D. T. Monteith, E. C. Rowe & H. Toberman (2014). Atmospheric deposition of phosphorus to land and fresh-water. *Environmental Science: Processes and Impacts* 16: 7. doi: [10.1039/c3em00641g](https://doi.org/10.1039/c3em00641g)
- Torge, W. (2001). *Geodesy*. 3. p. 403 s. W. de Gruyter, Berliini. E-kirja.
- Ulvi, T. & Lakso, E. (toim.) (2005). *Järvien kunnostus*. Ympäristöopas 114, 336 s. Suomen Ympäristökeskuksen julkaisu.
- Uusi-Kämpä, J., B. Braskerud, H. Jansson, N. Syversen & R. Uusitalo (2000). Buffer Zones and Constructed Wetlands as Filters for Agricultural Phosphorus. *Journal of Environmental Quality* 29: 1, 151–158.
- Valkama, P., E. Mäkinen, A. Ojala, H. Vahtera, K. Lahti, K. Rantakokko, H. Vasander, E. Nikinmaa & O. Wahlroos (2017). Seasonal variation in nutrient removal efficiency of a boreal wetland detected by high-frequency on-line monitoring. *Ecological Engineering* 98, 307–317.
- Ventelä, A.-M., M. Tarvainen, H. Helminen & J. Sarvala (2007). Long-term management of Pyhäjärvi (southwest Finland): eutrophication, restoration – recovery?. *Lake and Reservoir Management* 23: 1, 428–438.
- Ventelä, A.-M., T. Kirkkala, A. Lendasse, M. Tarvainen, H. Helminen, J. Sarvala (2011). Climate-related challenges in long-term management of Säkylän Pyhäjärvi (SW Finland). *Hydrobiologia* 660: 1, 49–58.
- Vymazal, J. (2011). Constructed Wetlands for Wastewater Treatment: Five Decades of Experience. *Environmental Science and Technology* 45: 1, 61–69.
- Västilä, K. & Järvelä, J. (2014). Modeling the flow resistance of woody vegetation using physically based properties of the foliage and stem. *Water Resources Research* 50: 1, 229–245.
- Västilä, K., J. Järvelä & J. Aberle (2013). Characteristic reference areas for estimating flow resistance of natural foliated vegetation. *Journal of Hydrology* 492, 49–60.
- Wetzel, R. G. (2001). *Limnology: Lake and River Ecosystems*. 3. p. 1006 s. Academic Press, Lontoo.
- Williams, R. D., J. Brasington, D. Vericat & D. M. Hicks (2014). Hyperscale terrain modelling of braided rivers fusing mobile terrestrial laser scanning and optical bathymetric mapping. *Earth Surface Processes and Landforms* 39: 2, 167–183.
- Wilson, C. A. M. E. (2007). Flow resistance models for flexible submerged vegetation. *Journal of Hydrology* 342: 3–4, 213–222.
- Wu, W. & He, Z. (2009). Effects of vegetation on flow conveyance and sediment transport capacity. *International Journal of Sediment Research* 24, 247–259.
- Yle (2015). *Suomi haluaa ympäristöön joutuneet ravinteet kiertoon*. Ylen verkkouutiset/Luonto 7.1.2015. <<https://yle.fi/uutiset/3-7702426>> 25.10.2019.
- Zikanov, O. (2010). *Essential computational fluid dynamics*. 302 s. John Wiley & Sons, Weinheim. <<https://ebook-central.proquest.com/lib/kutu/detail.action?docID=819001>>

Avoimet paikkatieto- ja muut aineistot

- CSC – Tieteen tietotekniikan keskus (2019). Paituli paikkatietopalvelu. <www.csc.fi/paituli> 20.9.2019.
- GTK – Geologian tutkimuskeskus (2018). Maanpeite 1: 20 000 / 1: 50 000 -aineisto. Creative Commons Nimeä 4.0 lisenssi. Hakku-palvelu: <<https://hakku.gtk.fi/>> 8.10.2019.
- Ilmatieteen laitos (2019a). Säähavainnot, kuukausihavainnot. Pöytyän havaintoasema, Yläne. <<https://ilmatieteenlaitos.fi/havaintojen-lataus#!/>> 10.12.2019
- Ilmatieteen laitos (2019b). Säähavainnot, vuorokausihavainnot. Pöytyän havaintoasema, Yläne. <<https://ilmatieteenlaitos.fi/havaintojen-lataus#!/>> 8.10.2019
- SYKE – Suomen Ympäristökeskus (2018). Corine Land Cover 2018, 20 m x 20 m -aineisto. LAPIO-palvelu: <<https://paikkatieto.ymparisto.fi/lapio/latauspalvelu.html>> 8.10.2019.