



**TURUN
YLIOPISTO**

Matemaattis-luonnontieteellinen
tiedekunta

Oulankajoen virtausolosuhteiden vuodenaikainen vaihtelu

Tarkastelussa Jäkälämutka

Karoliina Korkiakoski

Maantiede
Pro gradu -tutkielma
Laajuus: 30 op

20.5.2025

Turku

Turun yliopiston laatujärjestelmän mukaisesti tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu

Turnitin OriginalityCheck -järjestelmällä.

Pro gradu -tutkielma

Pääaine: Maantiede

Tekijä: Karoliina Korhokoski

Otsikko: Oulankajoen virtausolosuhteiden vuodenaikainen vaihtelu – Tarkastelussa Jäkälämutka

Ohjaajat: Petteri Alho, Linnea Blåfield

Sivumäärä: 76 sivua

Päivämäärä: 20.5.2025

Jokiuoman virtausolosuhteet vaihtelevat voimakkaasti korkeilla leveysasteilla vuodenaikojen mukaan sääolosuhteiden kausittaisen vaihteluiden seurauksena. Talvella virtaus hidastuu jääpeitteen vaikutuksesta, keväällä lumien sulaminen aiheuttaa tulvia ja kesällä sekä syksyllä vesisateet voivat nostaa virtaamaa hetkellisesti. Ilmastonmuutoksen on havaittu vaikuttavan voimakkaammin korkeiden leveysasteiden virtavesiympäristöihin kuin muihin alueisiin. Aikaisemman tutkimuksen mukaan ilmastonmuutoksen myötä esimerkiksi sadanta lisääntyy ja ilman lämpötilat nousevat.

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli selvittää millaiset ovat jokiuoman virtausolosuhteet yhden meanderikaarten alueella talvella, keväällä ja syksyllä yhden vuoden aikana. Lisäksi tavoitteena oli tarkastella vuodenaikaisiin muutoksiin liittyviä tekijöitä, kuten nopean virtauksen solun sijainnin vaihtelua ja kevättulvan vaikutusta sedimentin liikkeellelähtöön. Virtausolosuhteita tarkasteltiin akustisella virtausprofiilimittarilla talvella, keväällä ja syksyllä tutkimusalueella kerätystä aineistosta. Tarkemmassa tarkastelussa olivat virtausnopeus, virtaussuunta, nopean virtauksen solun sijainti, vedenkorkeus ja virtaama. Aineiston perusteella laskettiin lisäksi Reynoldsin luvut jokaiselle tutkimusjaksolle. Sedimentin liikkeellelähtöä tarkasteltiin Hjulströmin diagrammin, mitattujen virtausnopeuksien ja tutkimusalueen sedimentin raekokojakauman avulla.

Virtausolosuhteiden havaittiin vaihtelevan tutkimusalueella merkittävästi eri vuodenaikoina. Kevättulvan aikana vedenpinnankorkeus oli yli kolme metriä muina tutkimusjaksoina mitattuja vedenpinnankorkeuksia korkeammalla. Myös virtausnopeus ja virtaama olivat kevään virtausolosuhteissa merkittävästi suurempia kuin muina vuodenaikoina. Nopean virtauksen solun sijainnin havaittiin muuttuvan vuodenaikojen välillä niin, että talvella ja syksyllä se seuraa meanderikaarten syvintä osaa, kun taas keväällä se oikaisee yläjuoksulta särkän yli alajuoksulle. Lisäksi kevään ja talven aineistosta havaittiin nopean virtauksen solun meanderikaarten sisäreunalta ulkoreunalle ulottuva vaihettumisvyöhyke. Kevättulvan ensimmäisinä päivinä suurimmat kulutusvoimat kohdistuivat meanderikaarten yläjuoksulla sisäreunaan ja särkkään, kun taas alajuoksulla ne kohdistuivat uoman syvimmälle osalle ulkoreunan läheisyyteen. Talven aikana virtausolosuhteisiin vaikutti jääpeite ja kevättulvan muodostumiseen jääkannen sekä lumien sulaminen.

Avainsanat: Virtausolosuhteet, akustinen virtausprofiilimittaus, hydrogeografia, fluviaaligeomorfologia, jääpeite, tulva

Master's thesis

Subject: Geography

Author: Karoliina Korkiakoski

Title: Seasonal variation in the flow conditions of the Oulanka River - Jäkälämutka as the study area

Supervisors: Petteri Alho, Linnea Blåfield

Number of pages: 76 pages

Date: 20.5.2025

Flow conditions in river channels vary significantly at high latitudes due to the seasonal changes in weather conditions. In winter, the flow slows down due to the effect of ice cover, and in spring, snowmelt causes flooding. In summer and autumn, rainfall can lead to temporary increases in discharge. Climate change has been studied to impact fluvial environments at high latitudes more strongly than in other areas. Previous studies have shown that climate change has increased precipitation and raised temperatures in these areas.

The aim of this study was to examine the flow conditions of a river channel within a single meander bend during winter, spring, and autumn within one year. In addition, the aim was to examine factors related to seasonal changes, such as the spatial variation of the high velocity core (HVC) and the impact of the spring flood on sediment movement. Flow conditions were analyzed using data collected with an acoustic doppler current profiler (ADCP) during winter, spring, and autumn. The analysis focused on discharge, flow velocity, flow direction, the location of the HVC and water level. Reynolds numbers were also calculated for each measurement period, based on the data collected. Sediment movement was estimated using the Hjulström diagram, measured flow velocities, and the grain size distribution of sediments from the study area.

The flow conditions in the study area were found to vary significantly between seasons. During the spring flood, the water level was more than three meters higher than the levels measured during the other study periods. Both discharge and flow velocity were also significantly higher in spring compared to other seasons. The location of the HVC was observed to shift seasonally: in winter and autumn it followed the deepest part of the meander bend, and in spring it cut across the point bar from the upstream to the downstream section. In winter, the flow conditions were influenced by the effect of ice cover, and the formation of the spring flood was driven by both ice breakup and snowmelt. Additionally, data from winter and spring revealed a transitional zone where the HVC extended from the inner to the outer bank of the meander bend. During the first days of the spring flood, the strongest erosional forces were located on the inner bank and point bar of the upstream area, while downstream they affected the deepest part of the channel near the outer bank.

Key words: Flow dynamics, Acoustic Doppler Current Profiler, boreal hydrology, fluvial geomorphology, ice cover, flood

Sisällysluettelo

1	Johdanto	7
2	Teoreettinen viitekehys	10
2.1	Valuma-alueella tapahtuvat prosessit	10
2.1.1	Hydrologinen kierto	10
2.1.2	Valunta	10
2.1.3	Tulvat	12
2.1.4	Ilmastonmuutoksen vaikutukset valuma-alueen prosesseihin	14
2.2	Jokiuoman virtausolosuhteet	16
2.2.1	Virtausnopeus, virtaussuunta ja virtaama	16
2.2.2	Meanderikaarteen virtausolosuhteet	21
2.3	Jokiuoman geomorfologia	24
2.3.1	Virtaavan veden muokkausominaisuudet	24
2.3.2	Muutokset jokiuomassa	26
2.4	Akustinen virtausprofiilimittaus virtavesien tutkimuksessa	28
3	Tutkimusalue	30
3.1	Oulankajoen valuma-alue	30
3.2	Jäkälämutka	32
4	Aineisto ja menetelmät	34
4.1	Kenttätyöt	34
4.1.1	Akustinen virtausprofiilimittaus	34
4.1.2	Akustinen virtausprofiilimittaus talvella	34
4.1.3	Akustinen virtausprofiilimittaus keväällä ja syksyllä	35
4.1.4	Vedenpinnankorkeuden mittaus	36
4.2	Virtausolosuhteiden tarkastelu	37
4.2.1	ADCP-aineiston laadun tarkastaminen ja jälkikäsitteily	37
5	Tulokset	38
5.1	Virtausolosuhteet eri vuodenaikoina	38
5.1.1	Virtausolosuhteet talvella	38
5.1.2	Virtausolosuhteet kevättulvan aikana	43
5.1.3	Virtausolosuhteet syksyllä	55
5.1.4	Erot virtausolosuhteissa vuodenaikojen välillä	59
6	Keskustelu	61

6.1	Virtausolosuhteiden vuodenaikainen vaihtelu	61
6.2	Muutokset virtausolosuhteissa kevättulvan aikana	63
6.3	Kevättulvan vaikutukset jokiuoman geomorfologiaan	65
7	Johtopäätökset	68
	Kiitokset	70
	Lähteet	71

1 Johdanto

Virtavedet muodostavat hyvin pienen osan maailman makeasta vedestä, mutta niillä on elintärkeä merkitys niin luonnon monimuotoisuuden kuin ihmistoiminnan kannalta. Ne tarjoavat monipuolisia elinympäristöjä eri eliölajeille ja tuottavat tärkeitä ekosysteemipalveluja, kuten puhdasta juomavettä, ravintoa, energiaa ja virkistysmahdollisuuksia. Korkeilla leveysasteilla sijaitsevat joet ovat tärkeitä etenkin ekosysteemipalvelujen ja biologisen monimuotoisuuden näkökulmasta (Heino ym. 2020). Andersonin ym. (2009) mukaan jopa 10 % maailman makeasta vedestä virtaa Jäämereen pelkästään Siperian suurten jokien kautta. Joet ovat myös hyvin herkkiä valuma-alueilla tapahtuville ympäristönmuutoksille (Jyrkänkallio-Mikkola ym. 2017). Korkeilla leveysasteilla jokiin vaikuttavat erityisesti kylmä ilmasto, lyhytkestoiset vuodenaajat ja voimakas kausivaihtelu (Heino ym. 2020).

Virtaavaan veteen liittyvät prosessit ovat myös yksi voimakkaimmin maanpintaa muokkaavista tekijöistä (Knighton 1998; Charlton 2008). Virtaava vesi muokkaa ympäristöään kuluttamalla, kuljettamalla ja kasaamalla sedimenttiä. Jokiuoman muutokset ovat riippuvaisia veden ja jokiuoman vuorovaikutuksesta sekä sedimentin raekoosta ja jokiuoman maantieteellisestä sijainnista. Ihmistoiminta, kuten patoaminen, maa- ja metsätalous, rantojen rakentaminen ja ruopaukset, ovat muuttaneet virtavesiympäristöjä merkittävästi. Esimerkiksi Euroopan virtavesissä on arvioiden mukaan vähintään 1,2 miljoonaa patoa (Belletti ym. 2020).

Korkeilla leveysasteilla sijaitsevat virtavesiympäristöt ovat erityisen herkkiä muutoksille, ja esimerkiksi ilmastonmuutos vaikuttaa niihin nopeammin kuin muihin alueisiin (Veijalainen ym. 2010). Makean veden ekosysteemit ovat myös kokonaisuudessaan vakavammin uhattuina kuin maanpäälliset ekosysteemit (Heino & Koljonen 2022). Tästä huolimatta korkeilla leveysasteilla sijaitsevia virtavesiympäristöjä on toistaiseksi tutkittu vasta vähän. Ilmastonmuutoksen seurauksena on esimerkiksi odotettavissa, että lumisateiden muuttuminen vesisateiksi tulee vaikuttamaan esimerkiksi kevättulvien aikaistumiseen (Blöschl ym. 2017; Irannezhad ym. 2022). Toisaalta lisääntyvät vesisateet voivat aiheuttaa nykyistä enemmän tulvia talvisin ja syksyisin (Gohari ym. 2022; Blåfield ym. 2024). Näiden muutosten ymmärtäminen edellyttää parempaa tietopohjaa virtavesien käyttäytymisestä muuttuvissa ilmasto-olosuhteissa.

Pienet valuma-alueet kattavat suuren osan pohjoisen pallonpuoliskon maa-alueista, mutta jokien tutkimus on keskittynyt pääasiassa kaikista suurimpiin jokiin ja niiden valuma-alueisiin

(Lotsari ym. 2022). Virtausolosuhteiden tutkimista vaikeuttaa erityisesti kenttätöiden hankaluus. Aineiston kerääminen vaatii laajoja kenttätutkimuksia ja esimerkiksi talvisin jokijäällä sekä keväisin tulvien aikana virtaavien vesien lähellä työskentelyyn sisältyy riskejä. Avovesien aikana kenttätöiden tekeminen voi olla mahdotonta ilman venettä. Tutkittavat alueet voivat myös sijaita hankalakulkuisissa paikoissa.

Valuma-alueiden ja jokiympäristöjen nykytilasta sekä niiden virtausolosuhteista tarvitaan lisää tietoa, jotta tulevaisuuden muutoksia voidaan ennakoida. Sallan ja Kuusamon kuntien alueelta Venäjän puolelle virtaavan Oulankajoen virtausolosuhteista ei ole tehty tarkempaa tutkimusta lukuun ottamatta virtaamien ja vedenkorkeuksien seuranta. Aikaisempi tutkimus on painottunut jokiuoman geomorfologiaan ja ilmasto-olosuhteisiin (Koutaniemi 1979; Blåfield ym. 2024). Jääpeitteen aikaisia virtausolosuhteita ja sedimentin kuljetusta on tutkittu pitkään laboratorio-olosuhteissa, mutta vasta muutamia kenttäolosuhteissa toteutettuja tutkimuksia on julkaistu (Demers ym. 2011; Lotsari ym. 2017).

Luonnontilaisten jokien tutkimisella voidaan tuoda lisätietoa esimerkiksi siitä mihin rakennettujen jokien ennallistamisessa tulisi pyrkiä. Oulankajoen virtausolosuhteita tutkimalla saadaan tietoa luonnontilaisen meandroivan jokiuoman käyttäytymisestä borealisella ilmastovyöhykkeellä. Heinin ym. (2022) mukaan tällaisten turmeltumattomien ja luonnonmukaisten alueiden tulisi olla kokonaisten valuma-alueiden suojelun keskipisteenä, koska ne voivat edistää erilaisia toimintoja. Tällaisia toimintoja ovat esimerkiksi aineiden ja organismien liikkuminen virtaavassa vedessä, organismien leviäminen vähemmän soveltuville alueille ja ekosysteemipalveluiden ylläpito.

Vuodenaikaisten virtausolosuhteiden tutkiminen on tärkeää sekä ekologisten vaikutusten että käytännön ja ihmisten toimintaan liittyvien tarpeiden kannalta. Esimerkiksi kevättulvat voivat muokata elinympäristöjä merkittävästi, ja ekosysteemien ymmärtäminen sekä suojeleminen edellyttää näiden vuodenaikaisten prosessien tuntemista. Virtausolosuhteet vaikuttavat lämpötilaan, happipitoisuuteen ja ravinteiden kiertoon, jotka ovat eliöille elintärkeitä. Myös tulvarisikien arviointi ja hallinta edellyttävät virtausolosuhteiden kausittaisten vaihteluiden ymmärtämistä, ja ilmastonmuutoksen myötä tämä tieto on yhä tärkeämpää. Lisäksi virtausolosuhteissa vuoden aikana tapahtuvat muutokset voivat kertoa ilmastonmuutoksen paikallisista vaikutuksista. Muuttuvat sademäärät ja lämpötilat vaikuttavat suoraan valunnan ja virtaaman rytmiin, mikä voi siirtää esimerkiksi tulvimisen ajankohtaa. Lisäksi vuodenaikaiset virtausolosuhteet vaikuttavat siihen, millä tavalla ja kuinka paljon jokiuoma ajan kuluessa muuttuu.

Virtavesiin liittyvien prosessien ymmärtäminen edellyttää tarkkaa tietoa virtausolosuhteista, jotka voivat vaihdella nopeasti sekä ajallisesti että paikallisesti (Kasvi ym. 2017). Modernit mittaustekniikat, kuten Doppler-ilmiöön perustuvat akustiset virtausprofiilimittarit eli ADCP:t (eng. *Acoustic Doppler Current Profiler*) tarjoavat tehokkaan keinon virtausolosuhteiden tutkimiseen. ADCP mahdollistaa kolmiulotteisen virtausaineiston nopean ja toistuvan keräämisen myös haastavissa kenttäolosuhteissa. Sen tarkkuus ja monipuoliset käyttömahdollisuudet ovat tehneet siitä yhä suosittumman työkalun virtausolosuhteiden tutkimuksessa.

Tutkielmani päätavoitteena on tutkia Oulankajoen virtausolosuhteita yhden meanderikaarten alueella talvella, keväällä ja syksyllä yhden vuoden aikana. Kerätyn aineiston avulla pyrin selvittämään veden virtausnopeuden, -suunnan ja virtaaman jokiuomassa sekä vertailen näitä tekijöitä eri vuodenaikoina. Vertailen myös muutoksia nopean virtauksen solun sijainnissa meanderikaarten alueella. Toisena tavoitteenani on selvittää kevättulvan vaikutuksia sedimentin liikkeellelähtöön jokiuomassa.

Pyrin tavoitteeseeni seuraavien tutkimuskysymyksien avulla:

1. Millaiset virtausolosuhteet Oulankajoessa on eri vuodenaikoina?
2. Miten Oulankajoen virtausolosuhteet muuttuvat kevättulvan aikana?
3. Millaisia vaikutuksia kevättulvalla on jokiuoman geomorfologiaan?

2 Teoreettinen viitekehys

2.1 Valuma-alueella tapahtuvat prosessit

2.1.1 Hydrologinen kierto

Veden päätyminen jokiuomaan on seurausta hydrologisesta kierrosta eli veden jatkuvasta liikkeestä maan, meren ja ilmakehän välillä (Knighton 1998; Charlton 2008). Hydrologinen kierto koostuu haihdunnasta, sadannasta ja valunnasta. Kun sadanta on täyttänyt kasvillisuuden ja haihtumisprosessin tarpeet, ylijäävä vesi päätyy valumana vesistöihin, esimerkiksi jokiin (Leopold ym. 2020). Hydrologinen kierto vaikuttaa suoraan jokiuoman virtausolosuhteisiin ja määrittää, kuinka paljon vettä joessa virtaa eri vuodenaikoina.

Virtavesiä esiintyy kaikilla maapallon ilmastovyöhykkeillä. Suurimmat joet virtaavat usean ilmastovyöhykkeen läpi ja alkavat kosteammilta vyöhykkeiltä virraten kohti kuivempia vyöhykkeitä (Charlton 2008). Vettä haihtuu maasta, vesistöistä, lumen pinnalta ja kasvillisuuden kautta (Leopold ym. 2020). Ilmakehässä vesihöyry tiivistyy pilviksi ja palaa maanpinnalle sateena. Sateen vesi imeytyy maaperään, virtaa pintavaluntana jokiin ja lopulta järviin tai mereen. Sade voi tulla maahan eri olomuodoissa vetenä, lumena tai rakeina. Sekä sadanta että haihtuminen ovat ilmastosta riippuvia prosesseja. Lämpimillä alueilla haihtuminen voi ylittää sadannan määrän, jolloin valunta on vähäisempää.

Suomessa keskimäärin noin puolet vuotuisesta sadannasta muodostuu haihdunnaksi, ja toinen puoli muodostaa virtaaman (Korhonen 2007). Virtaaman osuus vuotuisesta sadannasta vaihtelee vuosittain 40–60 % välillä. Sadannan vaihtelut vaikuttavat virtaamiin, mikä puolestaan vaikuttaa jokiuoman muutoksiin, sedimentin ja epäpuhtauksien kulkeutumiseen sekä ekosysteemien elinolosuhteisiin. Esimerkiksi rankkasateet voivat aiheuttaa äkkitulvia, jolloin vedenpinnan korkeus, virtausnopeus ja virtaama jokiuomassa kasvavat (Zhang ym. 2022; Roggenkamp & Herget 2024). Pitkittynyt kuivuus puolestaan pienentää virtaamaa ja voi hidastaa virtausnopeuksia merkittävästi. Äärimmäisessä tapauksessa jokiuoma kuivuu kokonaan.

2.1.2 Valunta

Valuma-alue tarkoittaa aluetta, josta sade- ja sulamisvedet valuvat jokeen, järveen tai mereen (Knighton 1998; Charlton 2008). Valuma-alueet rajautuvat maaston korkeimpiin kohtiin, joita kutsutaan vedenjakajiksi. Näiltä alueilta maahan satanut vesi valuu eri suuntiin, päätyen eri

valuma-alueille ja lopulta eri vesistöihin. Valuma-alueiden koko vaihtelee muutamasta hehtaarista miljooniin neliökilometreihin. Valuma-alueella pääuoma ja sivu-uomat muodostavat yhdessä uomaverkoston, missä sivu-uomat kuljettavat vettä pääuomaan, jonka suu sijaitsee valuma-alueen matalimmassa kohdassa (Charlton 2008). Uomaverkoston rakenne vaihtelee eri valuma-alueiden välillä ja tähän vaikuttavat valuma-alueen geologia, ilmasto sekä pitkän aikavälin muutokset.

Valuma-alueelle satanut vesi joko imeytyy maaperään eli infiltroituu tai jää maanpinnalle valuen pintavaluntana jokiuomaan (Knighton 1998; Charlton 2008). Maaperään imeytymiskykyyn vaikuttavat kasvillisuuden määrä, maaperän läpäisevyys sekä veden määrä maaperässä. Maaperän läpäisevyydellä tarkoitetaan maa-aineksen laatua. Esimerkiksi hiekka läpäisee vettä tehokkaammin kuin savi. Kuivilla jaksoilla maanpintaan voi muodostua kova kuori, joka heikentää veden imeytymistä.

Maaperään imeytynyt vesi voi kulkeutua joko suoraan jokiuomaan maaperän läpi tai suodattua alas päin maaperässä veden kyllästämään kerrokseen ja sieltä edelleen pohjavaluntana uomaan. Veden valunta on nopeinta pintavaluntana, jonka etenemisnopeus on tyypillisesti 50–500 metriä tunnissa (Charlton 2008). Maaperän läpi vesi valuu hitaammin, noin 0,005–0,3 metriä tunnissa ja pohjavaluntana noin 0,005–1,5 metriä päivässä. Vedenpinnan korkeuden ajallinen vaihtelu riippuu siis siitä mitä reittiä vesi valuu jokiuomaan.

Maaperän imeytymiskapasiteetti vaikuttaa siihen, kuinka nopeasti satanut vesi imeytyy maaperään (Charlton 2008). Imeytymiskapasiteetti on maksiminopeus, jossa vesi läpäisee maaperän tietyssä olosuhteessa. Imeytymiskapasiteetti vaikuttaa myös vedenpinnan korkeuden vaihteluihin jokiuomassa. Jos vesisateen intensiteetti ylittää imeytymiskapasiteetin, maaperä ei voi imeä kaikkea vettä ja ylimääräinen vesi kerääntyy maanpinnalle. Kerääntynyt vesi alkaa valua pintavaluntana ja tätä kutsutaan Hortonin pintavalunnaksi (eng. *Hortonian overland flow*). Imeytymiskykyyn vaikuttavat maaperän ominaisuudet eli läpäisykyky, kasvillisuuden määrä ja juuristo sekä maaperän kosteustila (Charlton 2008). Kuivan jakson jälkeen maaperän imeytymiskyky on korkeimmillaan sateen alussa, mutta imeytymiskyky laskee nopeasti sateen jatkuessa, kunnes vakio tunkeutumisenopeus on saavutettu.

Toinen pintavalunnan tyyppi on saturoitunut pintavalunta (eng. *Saturation overland flow*). Se muodostuu, kun maaperä on kokonaan kyllästynyt vedellä eikä enää kykene imemään vettä (Charlton 2008:22). Tämä voi tapahtua esimerkiksi tilanteessa, jossa vesisade nostaa pohjave-

den pintaa niin paljon, että se nousee maanpinnalle. Tällaisilla alueilla vedestä kyllästynyt maaperä sijoittuu jokiuoman ympärille ja käyttäytyy siten kuin se olisi osa uomaverkostoa eli kuljettaa suuren määrän vettä lyhyessä ajassa. Ilmiötä kutsutaan lähdealueen vaihteluksi. Vesi voi virrata maaperässä myös luonnollisia putkimaisia rakenteita pitkin ja veden läpivirtausnopeus näissä maaperän putkistoissa on verrattavissa maanpinnalla sijaitseviin uomiin (Charlton 2008:23). Nämä maaperän putkimaiset rakenteet voivat olla halkaisijaltaan jopa metrin ja pituudeltaan useita satoja metrejä. Näiden rakenteiden avulla valuma-alue pystyy vastaanottamaan nopeita sadantapiikkejä.

Lateraalinen pohjavesivirtaus vaikuttaa merkittävästi maaperän kosteusdynamikkaan lumen sulamisen ja rankkasateen jälkeen (Nousu ym. 2024). Korkeilla leveysasteilla lumipeite- ja pakaskausi on pitkä, jonka takia lähes puolet vuoden sademäärästä sataa lumena. Lumen sulamisaika ajoittuu yleensä huhtikuun lopusta kesäkuun alkuun ja lumen sulamisen aikana maaperän kosteus on korkeimmillaan. Kesällä viileä tai lämmin lämpötila on ominaista ja sademäärä korkeimmillaan heinäkuussa. Nousu ym. (2024) havaitsivat tutkimuksessaan, että laajojen alueiden matalassa maankosteusarvossa suurin vaikuttava tekijä on maaperätyyppi. Myös Tananevin & Lotsarin (2022) mukaan maaperän rakenne vaikuttaa merkittävästi valuntaprosesseihin ja esimerkiksi routiminen estää veden kulkemisen ja imeytymisen maaperään, jolloin pintavalunta kasvaa erityisesti kaltevilla alueilla.

Ihmisen toimista suoraan valuma-alueisiin vaikuttavia toimia ovat metsätalous, kaupungistuminen, maatalouden kehittyminen ja kaivosteollisuus (Maaß ym. 2021). Jokiuomaan vaikuttavia tekijöitä ovat jokiuomien suoristaminen, vesivoimalaitokset, uomiin rakennettava infrastruktuuri kuten sillat ja satamat sekä erilaiset tulvasuojelurakennelmat. Maa- ja metsätalous lisäävät maaperän eroosiota, sedimentin tuotantoa, valunnan määrää ja korkeita virtaamia, koska maaperän imeytymiskapasiteetti on pienentynyt. Mitä enemmän alueella on kasvillisuutta, sitä enemmän ne myös imevät vettä itseensä ja pidättävät maa-ainesta. Maa- ja metsätalouden myötä valunta suoraan vesistöihin on suurempaa ja eroosion myötä valunnan mukana vesistöihin kulkeutuu myös suurempia määriä epäpuhtauksia.

2.1.3 Tulvat

Tulva on tilanne, jossa virtausnopeus ja vedenkorkeus ylittää jokiuoman kapasiteetin, jolloin vesi nousee uomaan ympäröivälle alueelle (Charlton 2008:30). Tulvaksi voidaan myös määritellä tilanne, jossa vesi ei ylitä joen penkkoja, mutta suurin virtaama toistuu vuosittain (Humphries ym. 2024). Tällaisessa tilanteessa tulvat ovat riittävän suuria aiheuttamaan geomorfologisia

muutoksia jokiuomissa. Näitä muutoksia ovat esimerkiksi rantojen eroosio ja jokiuoman vaeltaminen. Kärkkäisen ja Lotsarin (2022) mukaan tulvan laskuvaiheet muokkaavat jokiuoman geomorfologiaa enemmän kuin nousuvaihe. Myös virtausnopeudet ja pohjan leikkausvoimat ovat voimakkaimmillaan juuri kevään tulvahuipun aikana. Blåfieldin ym. (2024) mukaan maan routimisella, suurella lumimäärällä ja kevättulvien korkealla virtaamalla sekä vedenkorkeudella on myös yhteys jokiuoman meanderoinnin etenemisnopeuteen ja törmien eroosioon.

Tulviminen on jokiympäristöjen luonnollinen prosessi (Knighton 1998:144). Vuoden suurin virtaama voi olla elintärkeä alueen kasvi- ja eliölajeille (Humphries ym. 2024). Yhteiskunnallisesti tulvat koetaan usein negatiivisina, koska kaikista luonnonhasardeista juuri tulvat aiheuttavat eniten vahinkoa sekä ihmisille että infrastruktuurille. Veijalaisen ym. (2010) mukaan tulvimiseen vaikuttavia alueellisia tekijöitä ovat paikalliset ilmasto-olosuhteet, valuma-alueen ominaisuudet, alueen järvisyysaste, lumen vesiarvo, maantieteelliset vaihtelut, maankäyttö ja topografia. Nämä tekijät ohjaavat alueen geomorfologisia, biokemiallisia ja ekologisia prosesseja (Humphries ym. 2024).

Gorelits ym. (2022) havaitsivat, että talvikauden positiivinen arktinen oskillaatio voimistaa kevättulvia Koillis-Euroopassa. Positiivinen arktinen oskillaatio vaikuttaa talven lumikertymään positiivisesti ja toisaalta aikaistaa lumipeitteen sulamista keväällä. Suomessa tulvat syntyvät keväällä lumien sulamisen takia (Käyhkö ym. 2007). Kesällä ja syksyllä tulvat muodostuvat sateiden vaikutuksesta ja järvi-altaiden täyttymisen takia useiden sateisten vuosien jälkeen. Tulvien syntyntavoissa on kuitenkin alueellisia eroja myös Suomen sisällä. Lumien sulaminen vaikuttaa tulvien muodostumiseen eniten Pohjois- ja Koillis-Suomessa eli alueilla, jossa lumikertymä on suurempaa kuin muualla Suomessa. Lumen sulaminen yhdessä jääpatojen muodostumisen kanssa saa jokiuomat tulvimaan herkemmin. Jos maa on vielä roudassa, eivät sulamisvedet pääse imeytymään maaperään. Tämä aiheuttaa suurempaa valuntaa suoraan jokiuomaan. Järvisyys ja niiden vuorovaikutus jokiympäristöjen kanssa vaikuttavat tulvien käyttäytymiseen (Veijalainen ym. 2010). Järvet ovat tärkeitä vesivarastoja ja luonnollisia tulvasuojajärjestelmiä.

Alueellisten tekijöiden lisäksi tulvat voidaan jakaa myös niiden keston mukaan. Äkkitulvat ovat tulvia, jotka alkavat hyvin nopeasti yleensä rankkasateiden seurauksena, jotka ylittävät maaperän infiltraatiokapasiteetin (Humphries ym. 2024; Roggenkamp & Herget 2024). Tämän takia syntyy runsasta valuntaa, joka nostaa jokiverkoston vedenkorkeuden hyvin nopeasti. Kaikista tulvista äkkitulvat aiheuttavat eniten vahinkoa sekä ihmisille että infrastruktuurille, koska niitä

on hyvin vaikea ennustaa (Jonkman & Kelman 2005). Äkkitulvan vastakohtana on pitkäkestoinen tulva (Humphries ym. 2024). Tällaiset tulvat alkavat hitaammin kuin äkkitulvat, ne kestävät pidempään ja johtuvat pidempään jatkuneesta sateesta tai jään ja lumen sulamisesta. Jatkuvat tulvat kestävät useita päiviä, viikkoja tai jopa kuukausia.

2.1.4 Ilmastonmuutoksen vaikutukset valuma-alueen prosesseihin

Keskeisimpiä muuttujia fluviaalijärjestelmän toiminnassa ovat ilmasto, tektoniikka ja ihmisen toimet valuma-alueella (Knighton 1998; Charlton 2008). Alueilla missä ilmastollisissa tekijöissä esiintyy vuodenaikaisvaihtelua, erityisesti lumella ja jääpeitteellä on vaikutuksia veden virtauksen jakautumiseen jokiuomassa ja virtauksen suuruuteen (Lotsari ym. 2020; Burrel ym. 2023). Selkeimmin ilmastonmuutoksen vaikutukset näkyvät korkeilla leveysasteilla. Ilmaston lämpeneminen ja sademäärän lisääntyminen nopeuttaa esimerkiksi ikiroudan sulamista ja vaikuttaa tätä kautta veden kiertokulkuun (Tananev & Lotsari 2022). Suomen olosuhteissa ikiroutaa on paikoin vain Pohjois-Lapin palsasoilla, mutta kesäisin sulavaa routaa syntyy talvisin koko Suomen alueella. Maan routiminen vaikuttaa valuntaan samalla tavalla kuin ikiroutakin ja on mahdollista, että tulevaisuudessa myös routiminen vähenee.

Jääpeiteajan kestoon vaikuttavat pienetkin lämpötilan nousut (Burrel ym. 2023). Myös jään muodostumis- ja hajoamispäivät, enimmäisvedenkorkeus jääpeiteaikana, talviajan virtaama, jääpeitteen kestävyys ja jääpatojen esiintyminen voivat muuttua ilmastonmuutoksen edetessä. Burrelin ym. (2023) mukaan jääpeitteen haurastuminen ja jääntuotannon vähentyminen johtaa ohuempiin järvien ja jokien jääpeitteisiin sekä jääpeiteajan lyhenemiseen. Talvien muuttuessa kylmistä leudoiksi jäätä muodostuu vain satunnaisesti esiintyvien kylmien jaksojen aikana.

Lämpötilojen noustessa myös talvella, lumisateet vähenevät ja sade tulee vetenä maahan. Sadannan ja erilaisten sään ääri-ilmiöiden lisääntyessä, muuttuu myös hydrologinen vaste nopeammaksi. Talvisin tämä voi johtaa jääpatojen aiheuttamiin tulviin (Burrel ym. 2023). Jokeen satanut lumi muodostaa nopeasti sohjoa, mikä edistää paksujen jäiden muodostumista (Vergynst ym. 2017). Pilvipeitteisyys vaikuttaa jään muodostumiseen, koska kylmien selkeiden öiden aikana jäätä muodostuu nopeammin kuin pilvisinä öinä (Burrel ym. 2023). Pilvinen taivas kuitenkin viivyttää jäiden sulamista ja hajoamista. Myös tuulella on vaikutus jäiden muodostumiseen. Syksyllä tuuli voi jäähdyttää vettä, mutta toisaalta muodostaessaan aaltoja, tuulet hidastavat jäiden muodostumista.

Vuosittaisen sadannan määrän odotetaan lisääntyvän Suomessa (Veijalainen ym. 2010). Tämä voi vaikuttaa tulvien lisääntymiseen erityisesti talvella ja syksyllä. Irannezhad ym. (2014) havaitsivat tutkimuksessaan sadannan lisääntyneen talvella ja kesällä vuosien 1911–2011 aikana. Talven sadanta oli selvimmin yhteydessä Pohjois-Atlantin oskillaatioon (NAO). Samassa tutkimuksessa havaittiin myös arktisen oskillaation vaikutus sadannan määrään Oulankajoen alueella. Kärkkäisen ja Lotsarin (2022) mukaan kesäsateiden aiheuttamat ääritapahtumat voivat yleistyä keskiborealisella alueella ilmastonmuutoksen vuoksi. Maaperän routiminen ja lumisateiden muuttuminen vesisateiksi voi johtaa myös maaperän lisääntyneeseen eroosion (Blåfield ym. 2024).

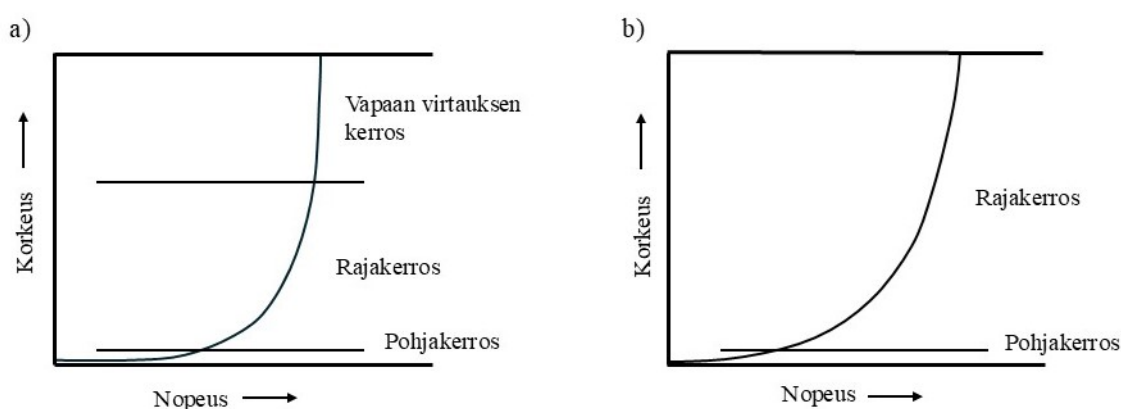
Blåfield ym. (2024) havaitsivat, että kuukausien ja vuosien keskilämpötilat Oulankajoen alueella nousivat vuosien 1974–2022 välisenä aikana. Lokakuusta maaliskuuhun sijoittuvana aikana lämpeneminen oli merkittävintä. Termisen kevään havaittiin aikaistuneen 19 päivällä ja kesän sademäärien lisääntyneen sekä vuotuisen lumisumman vähentyneen. Myös kevättulvien havaittiin aikaistuneen ja tulvan nousun sekä laskuvaiheen välisen ajan lyhentyneen. Tulvien havaittiin lisääntyneen muina vuodenaikoina kuin keväällä, mikä voi johtua lisääntyneestä sademäärästä ja valumasta kevään ulkopuolella sekä pidentyneestä ajanjaksosta, jolloin lumen sijasta sataa vettä. Veijalaisen ym. (2010) mukaan tulvien aikaiset suuremmat virtaamat voivat pienentyä lumenmäärän vähentyessä lämpötilojen nousun takia. Blåfieldin ym. (2024) mukaan virtaaman ääriarvojen välinen vaihtelu Oulankajoella pieneni. Kesän virtauksessa ei havaittu pienenemistä, vaikka esimerkiksi Irannezhad ym. (2022) ja Gohari ym. (2022) havaitsivat tällaiset laskevat trendit eri puolilta Suomea. Blåfieldin ym. (2024) mukaan alueen jyrkkä topografia ja korkea soiden osuus yhdistettynä voimakkaampiin ja lisääntyneisiin kesäsateisiin voi ylläpitää kesän virtausta Oulankajoessa.

Lintusen ym. (2024) ja Veijalaisen (2010) mukaan vähenevä lumen sulaminen keväällä vähentää suurten tulvien todennäköisyyttä ja äärimmäisen korkeiden virtauksien esiintymistiheyttä, mutta Blåfieldin ym. (2024) mukaan Oulankajoella kevättulvan pieneneminen ei ole yhtä voimakasta kuin muualla Suomessa. Blåfieldin ym. (2024) mukaan tämä voi johtua Oulankajoen valuma-alueen ominaispiirteistä, joita ovat keskimääräistä suurempi lumen kertymä, jyrkkä topografia, laajat suoalueet ja alhainen järvisyysaste. Soiden korkea osuus yhdessä alhaisen järvisyysprosentin kanssa johtaa alhaiseen veden varastointikapasiteettiin valuma-alueella ja nopeaan vastaukseen joen virtaamassa.

2.2 Jokuoman virtausolosuhteet

2.2.1 Virtausnopeus, virtaussuunta ja virtaama

Veden virtaamisen jokuomassa aiheuttaa painovoima ja uoman kaltevuus (Knighton 1998:96; Charlton 2008:69). Virtausta yläjuoksulta kohti alajuoksua kutsutaan primäärivirtaukseksi. Virtaamista vastustaa kitka, joka muodostuu virtaavan veden ja jokuoman pohjan sekä reunojen välille. Talvisin kitkan muodostumiseen vaikuttaa myös jääpeite. Kitka aiheuttaa veteen eri nopeuksilla virtaavia kerroksia (kuva 1).

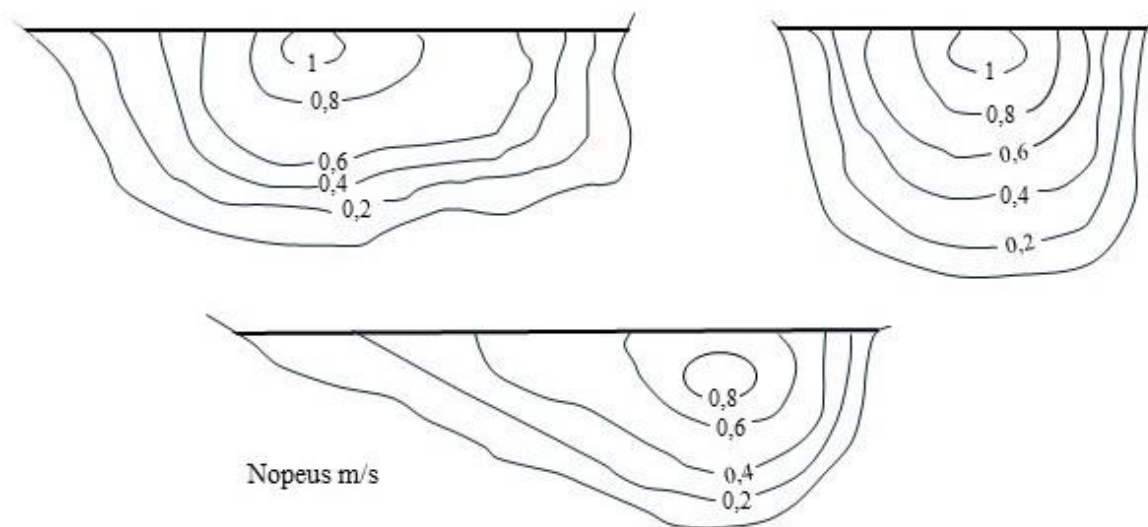


Kuva 1. Jokuomissa missä vedenkorkeus on riittävän korkea, kitka ei vaikuta pintakerroksiin ja vapaan virtauksen pintakerros (a) pääsee muodostumaan. Vapaan virtauksen pintakerrosta ei muodostu uomissa missä vedenkorkeus on matala (b), koska kitka vaikuttaa koko vesipatsaan korkeudella (Knighton 1998, mukaillen).

Yksi yleisimmin mitattavista hydraulisista muuttujista on virtausnopeus, joka vaihtelee sekä ajassa että tilassa ja sen yksikkö on m/s. Virtausnopeus ja suunta ovat virtausominaisuuksista herkimmin muuttuvia. Jokuoman sisällä virtausnopeus vaihtelee sen mukaan, mikä on etäisyys pohjasta ja uoman reunoista sekä alavirran suuntaisesti ja ajan mukaan (Knighton 1998:100). Jokuoman fyysiset ominaisuudet vaikuttavat maksiminopeuden sijaintiin. Poikkileikkauksessa eli uoman toiselta reunalta toiselle reunalle sijoittuvalla alueella suurin virtausnopeus sijaitsee avoimen uoman tilanteessa lähellä vedenpintaa poikkileikkauksen syvimmässä kohdassa (kuva 2).

Virtausnopeus pysyy vakiona tai kasvaa hieman alajuoksulle siirryttäessä, koska alajuoksulla uoman reunojen vastus vaikuttaa pienempään osaan kokonaisvirtausmäärästä. Virtausnopeudessa voi olla myös vuodenaikaisia eroja. Esimerkiksi jäänalaisen virtausnopeuden on havaittu olevan hitaampaa verrattuna syksyn avouomatilanteeseen (Lotsari ym. 2017). Toisin kuin

avouomatilanteessa, jääkannen aikana suurin virtausnopeus esiintyy vesipatsaan keskikerroksissa (Lotsari ym. 2017).



Kuva 2. Jokiuoman muoto vaikuttaa kitkan muodostumiseen ja pienimmät virtausnopeudet sijaitsevat uomassa lähellä pohjaa sekä reunoja. Suurimmat virtausnopeudet sijaitsevat lähellä pintaa jokiuoman syvimmän kohdan alueella (Knighton 1998; Charlton 2008, mukailten).

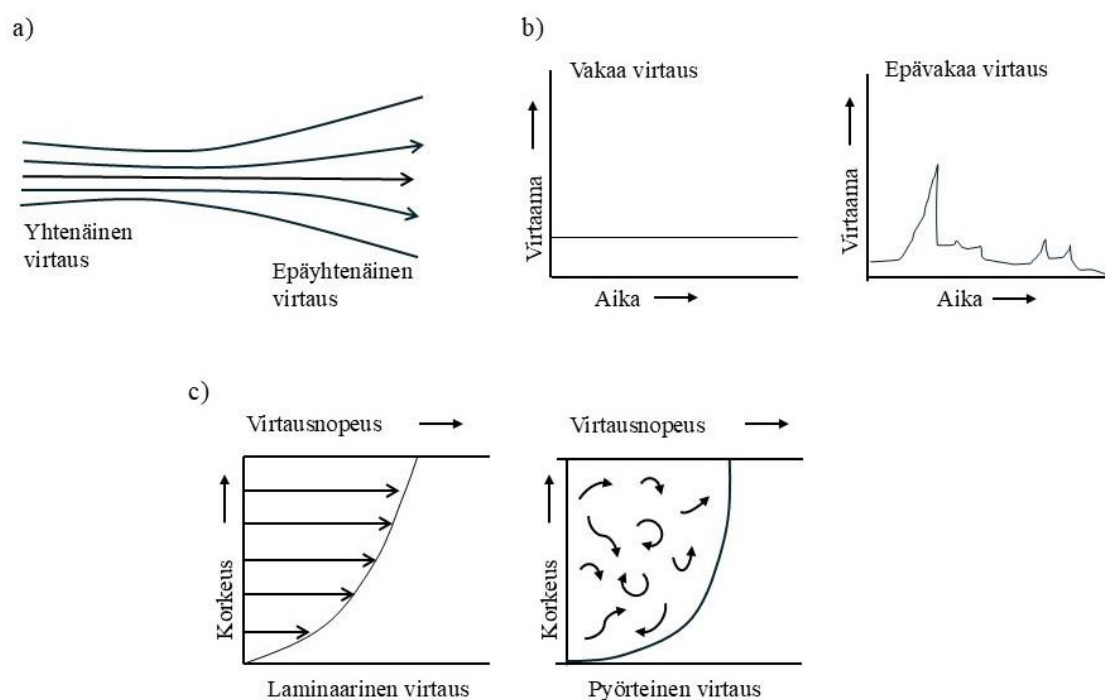
Primäärivirtauksen lisäksi vesi voi virrata vertikaalisesti ja lateraalisesti jokiuomaan nähden (Knighton 1998; Charlton 2008). Tätä kutsutaan sekundääriseksi virtaukseksi. Useimmin tällaisia virtauksia syntyy meanderikaarteiden läheisyydessä ja ne vaikuttavat erityisesti pohjasedimentin kulumiseen, kulkeutumiseen ja kasautumiseen. Virtaus saa energiansa virtauspurkauksen voimakkuuden ja uoman kaltevuuden mukaisesti (Charlton 2008). Virtaus tarvitsee suurimman osan energiasta virtausvastuksen eli veden ja uoman pohjan sekä reunojen välisen kitkan voittamiseen.

Jokiuoman pohjan kitkaan vaikuttavat virtauksen syvyys, uoman kaltevuus ja pohjan materiaali. Kun syvyys kasvaa, pohjan kitka vähenee ja virtausnopeus kasvaa. Uoman kaltevuuden kasvu taas lisää virtausenergiaa ja kitkan vaikutus on pienempi. Karkea pohjamateriaali lisää kitkaa, jolloin virtausnopeus hidastuu. Luonnollisissa jokiuomissa virtausnopeuteen vaikuttavat uoman kaltevuus, virtaama ja uoman ominaisuudet kuten poikkileikkausala ja pohjan karheus. Lisäksi kasvillisuus, uomassa olevat esteet kuten kaatuneet puut, sekä jokiuoman muoto voivat hidastaa virtausta. Sääolosuhteet, esimerkiksi sade ja lumen sulaminen, muuttavat virtaamaa ja sitä kautta virtausnopeutta. Veden virtaus avoimessa uomassa voidaan jakaa eri virtaustyyppihin neljään kriteeriin perustuen (taulukko 1) (Knighton 1998:96).

Taulukko 1. Avoimen uoman virtaustyyppit ja niiden ominaisuudet (Knighton 1998, mukaillen).

Virtaustyyppi	Ominaisuus
Yhtenäinen / epäyhtenäinen	Paikan suhteen tasainen / muuttuva nopeus
Vakaa / epävakaa	Ajan suhteen tasainen / muuttuva nopeus
Laminaarinen / pyörteinen	Yhdensuuntainen / sekoittuva virtaus Reynoldsin luku < 500 / > 2500
Verkasvirtaus / kiitovirtaus	Voi edetä / ei voi edetä vastavirtaan Frouden luku < 1 / > 1

Jos virtaus on tietyssä paikassa tasaisesti virtaavaa, virtaustyyppiä kutsutaan yhtenäiseksi (eng. *uniform*) (Knighton 1998:97). Jos taas virtausnopeus muuttuu, virtaustyyppi on epäyhtenäinen (eng. *non-uniform*). Virtaustyyppi voi olla yhtenäinen ainoastaan painovoiman ja kitkan ollessa tasapainossa (Knighton 1998:96). Luonnontilaisissa jokiuomissa virtaustyyppi on tavallisesti epäyhtenäinen ja epävakaa (eng. *unsteady*) eli virtausnopeus vaihtelee sekä paikassa että ajassa (kuva 3). Yksinkertaistetut matemaattiset mallit perustuvat yhtenäiseen ja vakaaseen (eng. *steady*) virtaukseen, jonka takia luonnonuomia on vaikea mallintaa.



Kuva 3. Virtaustyyppit voidaan jakaa niiden ominaisuuksien mukaan a) yhtenäiseen ja epäyhtenäiseen virtaukseen b) vakaaseen ja epävakaaseen virtaukseen c) laminaariseen ja pyörteiseen virtaukseen (Knighton 1998, mukaillen).

Laminaarisessa (eng. *laminar*) virtauksessa jokainen nesteen elementti liikkuu saman suuntaisesti koko vesipatsaan matkalta eri kerroksissa (Knighton 1998:96–97). Kerroksissa virtausnopeus voi vaihdella, mutta kerrokset eivät sekoitu keskenään. Virtauksen ollessa pyörteinen (eng. *turbulent*) eri kerrokset sekoittuvat keskenään. Laminaarinen virtaus voi muuttua pyörteiseksi virtausnopeuden kasvaessa. Virtaustyyppin laminaariseksi tai pyörteiseksi määrittämiseen voidaan käyttää apuna Reynoldsin lukua. Jos luku on alle 500 virtaus on laminaarinen ja jos luku suurempi kuin 2500 on virtaus pyörteinen. Reynoldsin luku (Re) määritellään nesteen viskositeetin ja painovoiman vaikutusten perusteella suhteessa virtauksen inertiaivoimiin eli aineen taipumukseen vastustaa liikkeen muutosta. Se voidaan laskea seuraavasti:

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

Kaava 1.

Jossa v = virtausnopeus, R = hydraulinen säde, ρ = veden tiheys ja μ = molekulaarinen viskositeetti.

Pyörteisyyteen vaikuttavat uoman pinnanmuodot, kivet ja kasvillisuus (Charlton 2008:81). Esimerkiksi jokiuoman pohjassa sijaitseva kivi voi aiheuttaa primäärivirtaukseen nähden vastakkaiseen suuntaan virtaavan pyörteen eli akanvirran alavirran puolelle kiveä (eng. *recirculating flow*). Myös vuodenajat vaikuttavat pyörteisyyden syntyyn. Esimerkiksi jääpeite lisää virtauksen pyörteisyyttä verrattuna avoimen uoman virtaukseen (Kämäri ym. 2017). Voimakkaimmillaan pyörteisyys on keväisin lumien sulamisen aiheuttamien tulvien ja jäiden hajoamisen aikana.

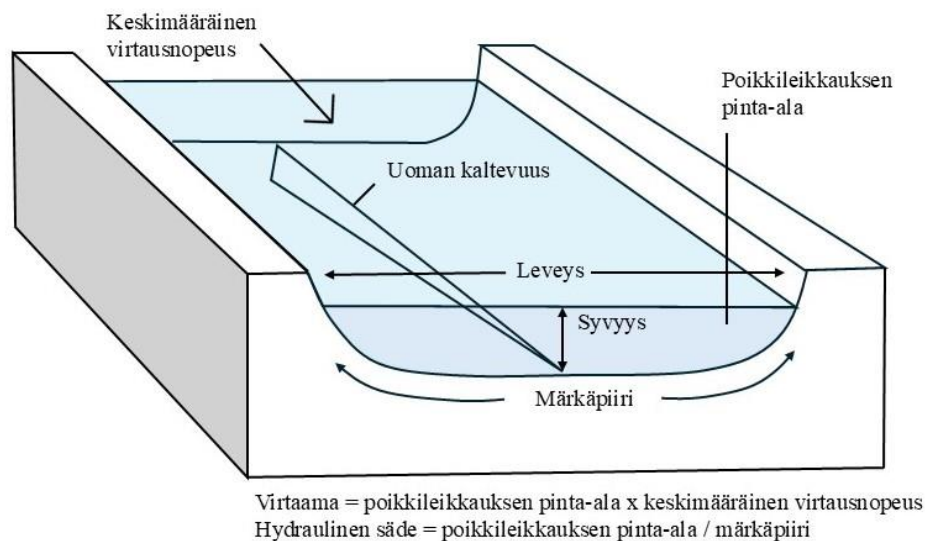
Virtaus voidaan määritellä myös verkkavirtaukseksi (eng. *tranquil*) tai kiitovirtaukseksi (eng. *rapid*) (Knighton 1998:97). Verkkavirtaus voi edetä vastavirtaan, mutta kiitovirtaus ei ja näiden virtaustyyppien ero voidaan määritellä Frouden luvun avulla. Frouden luku kuvaa inertiaivoimien ja painovoiman suhteellista merkitystä virtauksessa. Jos Frouden luku on <1 niin, kyseessä on verkkavirtaus ja luvun ollessa >1 , kyseessä on kiitovirtaus. Frouden luku voidaan laskea seuraavasti:

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

Kaava 2.

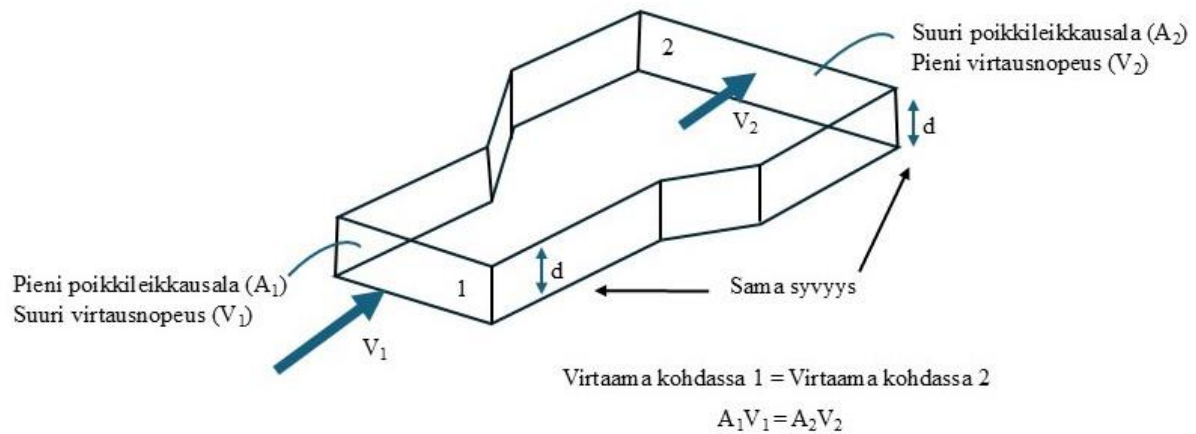
Jossa v = virtausnopeus, g = painovoiman kiihtyvyys ja d = hydraulinen säde.

Virtaama on jokiuoman poikkileikkauksen läpi kulkevan nestemäärän tilavuus aikayksikköä kohden (Knighton 1998). Virtaaman yksikkö on kuutiometriä sekunnissa m^3/s . Joen yläjuoksulta tuleva virtaama määrittää jokiuoman koon (Charlton 2008:3). Yläjuoksulla jokiuoman vesimäärä on pienempi kuin alajuoksulla ja siksi myös virtaama on yläjuoksulla pienempi (kuva 4). Virtaama voidaan mitata jatkuvana tai hetkellisenä mittauksena. Jatkuvassa mittauksessa virtaama on tietynä ajanjaksona mitattujen arvojen keskiarvo ja hetkellisessä mittauksessa virtaama on mitattu tietynä aikana tietystä pisteestä.



Kuva 4. Jokiuoman ominaisuudet (Charlton 2008:70, mukailen).

Virtauksen vaihtelua voidaan tarkastella virtauksen jatkuvuus -teorian (eng. *flow continuity*) avulla (Charlton 2008:76). Virtausnopeus on nopeampi niissä jokiuoman osissa, jossa poikkileikkauksen pinta-ala on pienempi, koska saman vesimäärän on kuljettava samassa ajassa jokiuoman erikokoisissa osissa (kuva 5). Jos tätä ei tapahtuisi, joki alkaisi tulvia matalimmissa kohdissa ja toisaalta muut osat uomasta kuivuisivat, kun vesi virtaisi alajuoksulle nopeammin kuin sitä virtaa yläjuoksulta.



Kuva 5. Virtauksen jatkuvuus jokiuomassa, jossa jokiuoma levenee alavirran suuntaisesti (Charlton 2008:76, mukaillen).

2.2.2 Meanderikaarten virtausolosuhteet

Meandroiva jokiuoma syntyy uoman loivan kaltevuuden, veden virtauksen vaihteluiden sekä kulutus ja kasaussprosessien yhteisvaikutuksesta (Knighton 1998:217). Luonnonmukaisissa jokiuomissa veden virtausnopeus ei ole tasaista uoman poikkileikkauksessa, vaan virtaus osuu toiselle rannalle voimakkaammin kuin toiselle ja vesi alkaa kuluttaa rantaa. Tämän takia jokiuoma alkaa mutkitella eli meanderoida. Jokiuoman kaltevuus säätelee virtauksen energiaa ja siten meanderoinnin kehittymistä. Loivassa uomassa virtausnopeus on alhainen, minkä takia eroosio kohdistuu uoman reunoille. Jokiuomissa, joiden kaltevuus on jyrkempi, eroosio kohdistuu uoman pohjaan, mikä johtaa suurempiin ja syvempiin uomiin. Loivapiirteiset alueet, joiden maa-aines on hienojakoista, ovat erityisen alttiita meanderoinnille. Kun kaltevuus edelleen pienenee, virtaava vesi menettää kykynsä kuljettaa karkeaa materiaalia, mikä edelleen voimistaa jokiuoman sivuttaissuuntaista liikettä.

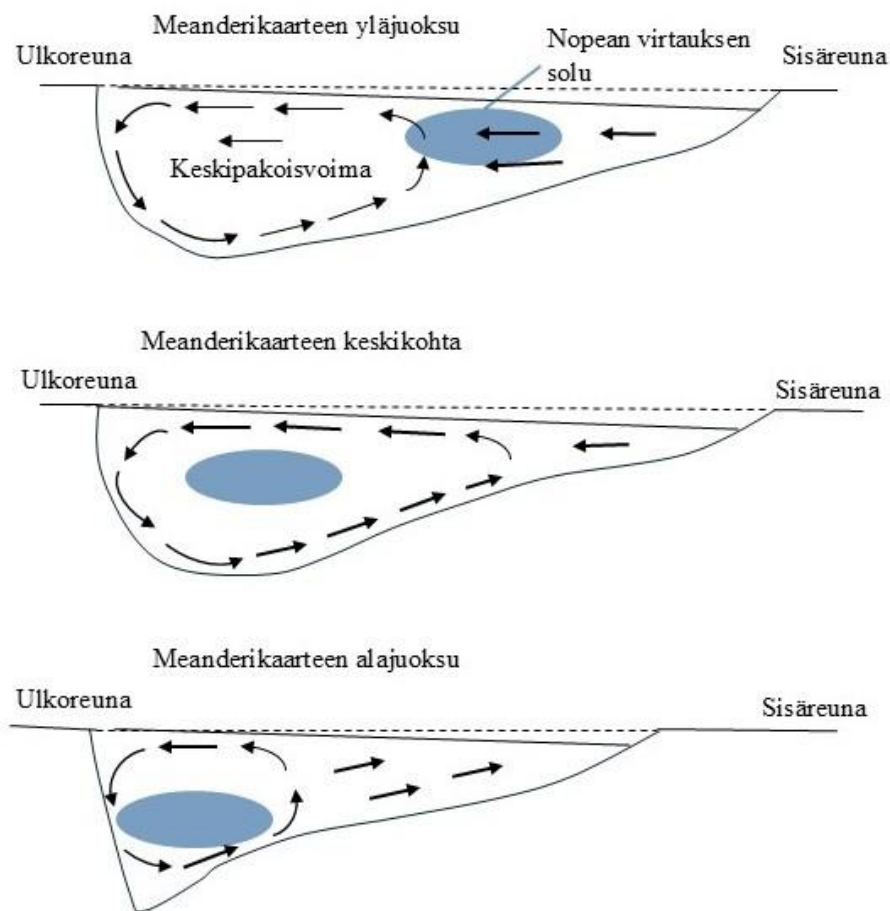
Meanderikaarten virtausrakenne koostuu kolmesta päätekijästä:

1. Vedenpinta on ulkokaarteessa korkeammalla kuin sisäkaarteessa.
2. Pinnalla virtaus suuntautuu ulkorantaa kohti, mutta pohjalla se liikkuu takaisin sisärantaa kohti. Tämä aiheuttaa poikittaisvirtauksen eli sekundäärivirtauksen primäärivirtauksen lisäksi.
3. Nopean virtauksen solu siirtyy sisäkaarteesta meanderin kärjen jälkeen alajuoksulla ulkokaarteeseen.

Virtausrakenne meanderikaarteissa muodostuu keskipakoisvoiman ja painegradientin välisen vuorovaikutuksen takia (Knighton 1998:217). Kun vesi virtaa kaarteissa, se pyrkii jatkamaan suoraan, mutta meanderikaarre pakottaa sen muuttamaan suuntaa. Tämä aiheuttaa keskipakoisvoiman syntymisen, joka työntää vettä ulkokaarten suuntaisesti ja nostaa vedenpintaa ulkoreunalla (kuva 6). Koska vedenpinta on korkeammalla ulkoreunalla kuin sisäreunalla, syntyy reunojen välille paine-ero. Keskipakoisvoima vaikuttaa pohjan läheisessä kerroksessa hitaaseen virtaukseen vähemmän kuin paine ja tämän takia virtaus suuntautuu kohti sisäkaarretta (Demers ym. 2011). Tämä aiheuttaa yksittäisen helikoidin muotoisen kierteisvirtauksen muodostumisen avovesiolosuhteissa (Tsai & Ettema 1996).

Meanderikaarteiden jatkuva muutos riippuu pitkälti sekundäärivirtauksesta (Dietrich ym. 1979; Dietrich & Smith 1984). Sekundäärivirtaus liikkuu helikoidin muotoisena (eng. *helical flow*) eli vesi virtaa samaan aikaan sekä alavirtaan, että poikittain primäärivirtaukseen nähden. Helikoidinen virtausrakenne kuluttaa kaarten ulkoreunaa, kun taas sisäkaarteeseen kasaantuu hiekasärkkä.

Primääri- ja sekundäärivirtauksen vuorovaikutuksesta uoman keskelle pinnan läheisyyteen muodostuu nopean virtauksen solu (eng. *high velocity core*) (kuva 6) (Knighton 1998:217). Nopean virtauksen solu muodostuu uomassa siihen kohtaan missä kitka on pienin. Meanderikaarten yläjuoksulla nopean virtauksen solu sijaitsee sisäreunalla vedenpinnan läheisyydessä (Dietrich ym. 1979; Kasvi ym. 2013). Meanderikaarten keskikohdalla sen sijainti on lähempänä ulkoreunaa hieman syvemmillä ja meanderikaarten alajuoksulla se sijaitsee ulkoreunalla lähellä uoman pohjaa. Tämän takia pohjanläheinen virtaus on meanderikaarteissa hitaampi yläjuoksulla kuin alajuoksulla.



Kuva 6. Virtausrakenne ja nopean virtauksen solun sijainti meanderikaarteen eri osissa (Kasvi ym. 2017, mukaillen).

Jääpeite muuttaa meanderikaarteen virtausrakennetta (Lotsari ym. 2017). Jääpeitteen aikana esiintyy kaksi päällekkäin virtaavaa helikoidin muotoista virtaussolua. Nämä virtaukset virtaavat toisiinsa nähden vastakkaisiin suuntiin (Demers ym. 2011; Lotsari ym. 2017). Jääkannen aikana virtausnopeus hidastuu, kun virtaus saavuttaa uomassa syvemmän kohdan meanderin kärjen jälkeen (Lotsari ym. 2017). Kun vesi saavuttaa seuraavan meanderikaarteen, virtausnopeus kasvaa yhdessä uoman mataloitumisen kanssa.

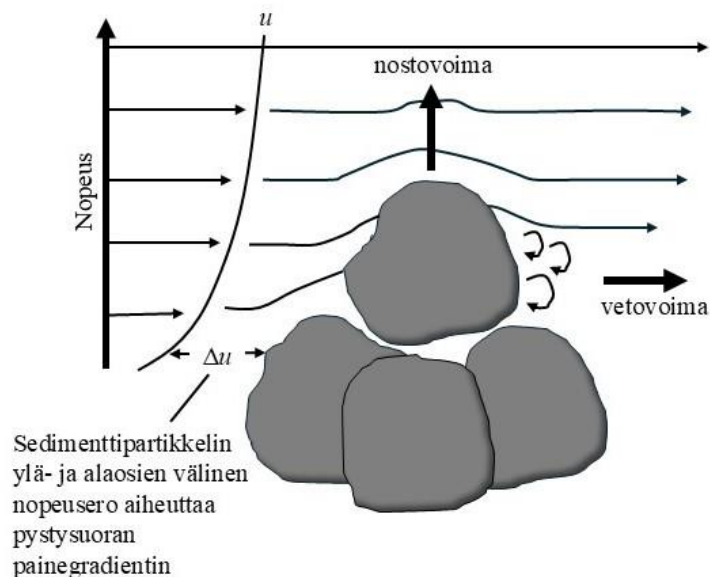
Sekä avouoman että jääpeitteen aikaisessa virtauksessa esiintyy myös muutaman sekunnin kestoisia nopeita virtauspulsseja (*eng. macroturbulent flow*) (Lotsari ym. 2020). Tällaisia virtauspulsseja esiintyy yleensä virtausprofiilin rajakerroksissa ja selkeimpiä ne ovat meanderikaarteen yläjuoksun puolella. Meanderikaarteen kärjen kohdalla virtauspulssit heikkenevät, kunnes taas voimistuvat alajuoksun puolella. Jääpeitteen aikana virtaus voi pintakerroksissa suuntautua myös pystysuuntaisesti alaspäin.

2.3 Jokuoman geomorfologia

2.3.1 Virtaavan veden muokkausominaisuudet

Sedimentin määrä ja laatu sekä veden määrä jokuomassa ovat ne tekijät, joiden takia jokuoma muuttuu (Knighton 1998:107; Charlton:118). Sedimentin raekoko vaikuttaa suoraan sen liikkuvuuteen. Koheesio pitää ainesta koossa ja se vaikuttaa eniten hienojakoisten materiaalien kuten saven ja siltin liikkeellelähdykseen. Esimerkiksi savihiukkasten välillä koheesivoima on suurempi kuin hiekanjyvien ja siksi hiekka lähtee virtaavassa vedessä herkemmin liikkeelle.

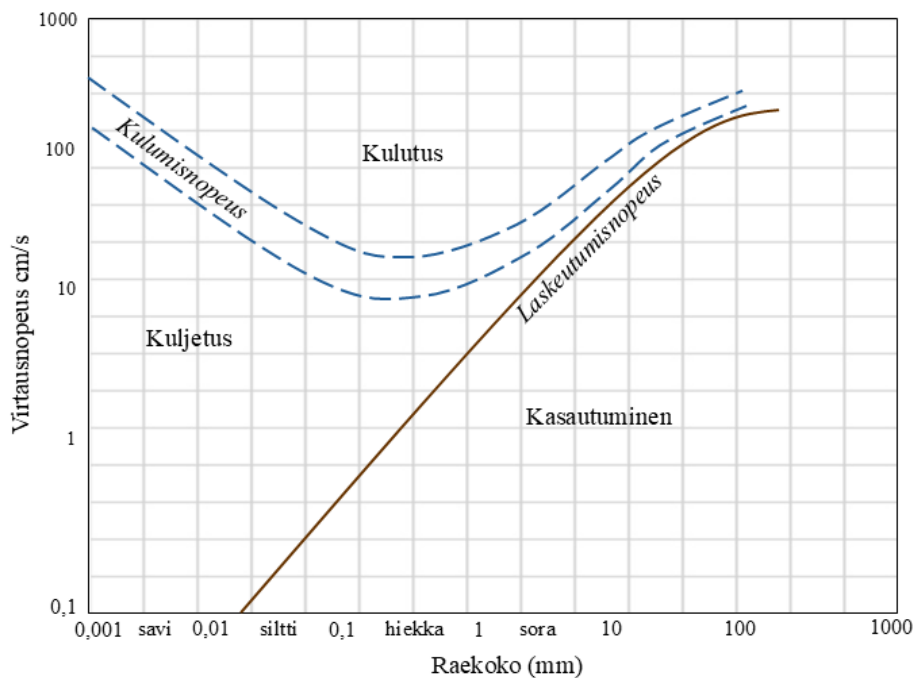
Virtauksen voimistuessa myös sedimenttipartikkeliin kohdistuva voima kasvaa (Knighton 1998:108). Virtaava vesi kohdistaa sedimenttipartikkeliin vetovoiman sekä nostovoiman, joka johtuu virtausnopeuden vaihteluista (kuva 7). Vaihtelut virtausnopeudessa muodostavat painegradientin, jonka takia sedimentti pyrkii liikkumaan pystysuunnassa. Myös pyörteinen virtaus voi aiheuttaa paikallisia nopeampia virtauksia, minkä takia sedimenttipartikkeli voi irrota veden kuljettamaksi. Nostovoima on voimakkainta uomien pohjassa, missä nopeus- ja painegradientti on suurinta. Vetovoima taas muodostuu, kun sedimenttipartikkelin ja virtavaan veden välille syntyy riittävästi kitkaa.



Kuva 7. Virtaavan veden sedimenttipartikkeliin kohdistamat voimat. Sedimenttipartikkelin ylä- ja alapuolella veden virtausnopeudessa voi olla eroja, jonka takia muodostuu nostovoima. Vetovoima muodostuu virtaavan veden aiheuttaman kitkan vaikutuksesta (Knighton 1998, mukailten).

Hjulströmin diagrammi kuvaa sedimentin partikkelikoon ja virtausnopeuden vaikutusta eroosi-oon, kulkeutumiseen ja kasautumiseen (Hjulström 1935). Diagrammin avulla pystytään määrittämään kullekin raekoolle kulumis- ja laskeutumisenopeus (kuva 8). Mitä suurempi raekoko, sitä suuremman virtausnopeuden partikkeli tarvitsee irrotakseen virran kuljettamaksi. Sedimentti voi kulkeutua suspensiossa, pohjakuljetuksena tai liuenneena aineksena. Helpoiten liikkeelle lähtee hiekka, koska hiekkaa hienompaan ainekseen vaikuttavat koheesivoimat. Kun hiekkaa hienompi sedimentti lähtee liikkeelle, se kuitenkin kulkeutuu veteen suspendoituneena pidemmälle kuin karkeammat raekoot keveytensä takia.

Uoman eroosio-, kulkeutumis- ja laskeutumisprosesseihin vaikuttavat sedimentin syöttö joen yläjuoksulla, valuma-alueella sekä paikallisesti uoman pohjasta ja reunoilta erodoitunut sedimentti (Knighton 1998; Charlton 2008). Sedimentin kokojakauma vaikuttaa jokiuoman muotoon. Hienot materiaalit voivat kulkeutua pitkiäkin matkoja veden mukana suspensiossa, mutta karkeampi ja painavampi materiaali kulkeutuu pohjakuljetuksena uoman pohjaa pitkin. Pohjakulkeuman määrä vaihtelee tilallisesti ja ajallisesti (Ancey 2020). Pohjakulkeumaksi luetaan karkeimpien hiukkasten, kuten soran tai hiekan, liukuminen, pyöriminen tai saltaatio eli hiekanjyvien hyppelhtiminen uoman pohjaa pitkin veden kuljettamana. Suspendoituneeseen ainekseen verrattuna pohjakulkeuma on paikallisempaa ja pohjakulkeumana aines myös kulkeutuu lyhyempiä matkoja.



Kuva 8. Hjulströmin diagrammi kuvaa virtausnopeuden vaikutusta erikokoisten sedimenttipartikkeleiden liikkeellelähtöön, kuljetukseen ja kasautumiseen (Hjulström 1935:298, mukailten).

2.3.2 Muutokset jokiuomassa

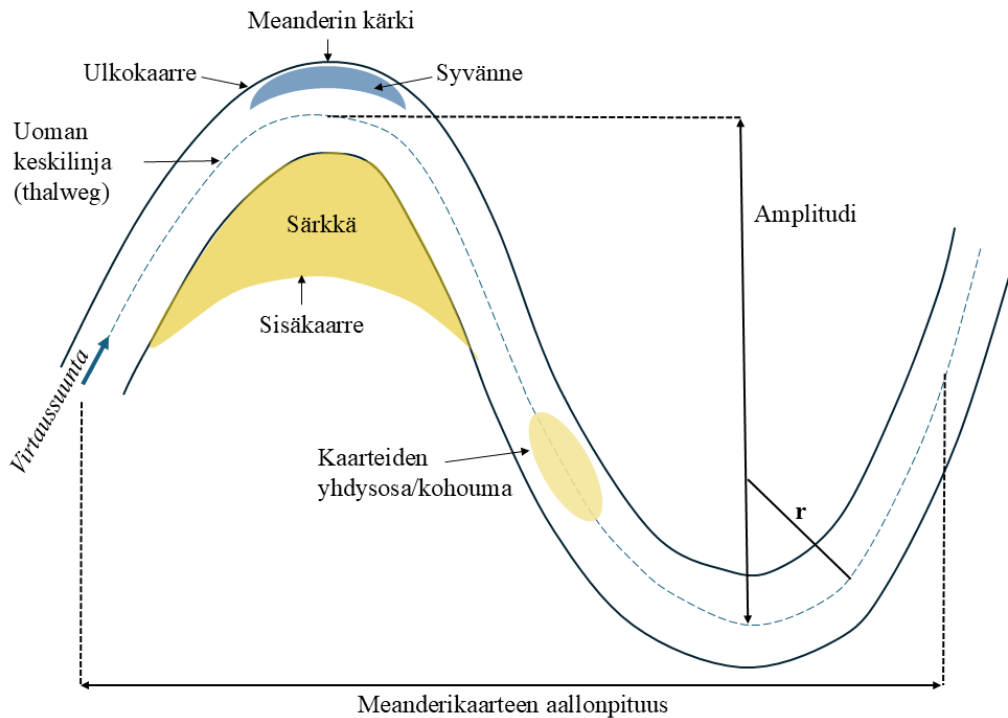
Jokiuoma on jatkuvassa muutoksessa uoman ja rantojen eroosion sekä sedimentin kuljetuksen ja kasautumisen takia (Knighton 1998; Charlton 2008). Muutoksien laajuuteen ja nopeuteen vaikuttavat sedimentin raekoko, virtaama, virtausnopeus ja virtauksen voimakkuus. Kanava voi leventyä uoman reunojen eroosion vuoksi, mikä on yleistä esimerkiksi alueilla missä maaperä on hiekkapitoista. Veden virtaus saa sedimenttiä liikkeelle myös uoman pohjalta, jonka takia uomaan muodostuu syvänteitä (kuva 9) (Charlton 2008). Toisaalta hitaamman virtauksen aikana sedimentti voi kasautua uomaan muodostaen kohoumia.

Jokiuoman meanderointi saa alkunsa veden virtauksen, pohjasedimentin, rannan materiaalin, kasvillisuuden ja korkeuserojen vuorovaikutuksesta (Kasvi ym. 2017). Esimerkiksi suorassa jokiuomassa veden virtaus voi häiriintyä esteen tai sedimentin epätasaisen kokojakauman takia mikä johtaa virtauksen värähtelyyn ja särkkien muodostumiseen. Meanderoivassa jokiuomassa pienemmät symmetrisen muotoiset meanderikaarteet kuluvat pääasiassa avoimen uoman aikana, mutta epäsymmetrisissä törmissä ja jokiuoman suorilla osuuksilla eroosiota tapahtuu ympäri vuoden (Lotsari ym. 2019). Tämän takia pitkä jääpeiteaika voi vaikuttaa jokiuoman vedenalaiseen geomorfologiaan.

Meanderikaarteissa fluviogeomorfologiset prosessit vaikuttavat alueellisesti eri tavoin. Kasvi ym. (2013) havaitsivat, että meanderikaarteessa virtaus muuttuu meanderin sisäkaarteessa sijaitsevan särkän vaikutuksesta, mutta myös särkkä muuttuu virtaavan veden vaikutuksesta. Suurimmat virtausnopeudet ja eniten eroosiota tapahtuu yleensä ulkokaarteessa särkän kärjen jälkeen alajuoksun puolella. Särkkä taas kasvaa kohti ulkoreunaa. Meanderikaarteessa syvänteet sijaitsevat tyypillisesti meanderikaarten ulkoreunassa, mihin veden virtaus osuu voimakkaimmin (Kasvi ym. 2017). Kohoumat taas sijaitsevat meanderikaarteiden välisillä alueilla.

Lotsarin ym. (2017) mukaan eroosipotentiaali kohoumien alueilla ja kasautumispotentiaali syvänteiden alueella kasvaa jääpeitteen aikana, koska ylemmän ja alemman kerroksen virtaukset suuntautuvat meanderikaarten kärjen alueella keskikerroksen maksimivirtauksien vastaisesti. Flener ym. (2015a) havaitsivat, että meanderikaarteessa ylävirran puolella ollut syvänte muotautui syvemmäksi päivittäin ja eteni hitaasti alavirtaan lopulta yhdistyen uoman syvempään osaan lähellä mutkan ulkokaarretta.

Sekä avoimen uoman että jääpeitteen aikana suurimmat eroosivoimat sijoittuvat jokiuoman suorille osuuksille (Lotsari ym. 2019). Kuitenkin kriittiset kynnsarvot partikkelin liikkeellelähdtöön ovat tavallisesti pienemmät avouoman olosuhteissa kuin jääpeitteen aikana. Tilallisesti sedimentin kuljetus on laajempaa avouoman virtausolosuhteissa, mutta alueellinen vaihtelu ja erot eroosio- sekä kasautumisalueissa lisääntyvät jääpeiteolosuhteissa.



Kuva 9. Meanderikaarteiden rakenne ja perusosat (Kasvi ym. 2017, mukaillen).

Tulvat vaikuttavat suoraan jokiuoman muotoon (Kasvi ym. 2017; Kärkkäinen & Lotsari 2022). Jokiuoman eroosioon vaikuttaa erityisesti kevättulvan laskeva vaihe. Tämä johtuu siitä, että laskuvaihe kestää pidempään ja vaikuttaa voimakkaammin meanderikaarteiden eroosioon ja kehitykseen kuin nousuvaihe. Kärkkäinen ja Lotsari (2022) havaitsivat tutkimuksessaan, että tulvahuippujen suurimmat pohjan leikkausjännitysarvot (eng. *bed shear stress*) sijaitsivat mutkan sisään tulossa sisäkaarteiden puolella, särkän ulkoreunalla ja ulostulossa ulkoreunan puolella. Syksyllä virtaus ei vaikuttanut joen kehitykseen yhtä paljon kuin keväällä ja kesällä tulvahuippujen aikana.

Tulvan aikana meanderikaarteiden särkän yläosassa tapahtuu eroosiota myös pienillä virtausnopeuksilla (Kasvi ym. 2013). Eroosioherkkyyteen vaikuttaa esimerkiksi rantojen kasvillisuus,

joka suojaa eroosiolta sitomalla maaperää juurillaan (Van Dijk ym. 2013). Kasvillisuuden vaikutus lisääntyy kasvillisuuden tiheyden ja iän myötä. Tasaisesti jokiuoman rannoilla sijaitseva kasvillisuus myös lisää jokiuoman mutkaisuutta ja aiheuttaa tiukempia meanderikaarteita.

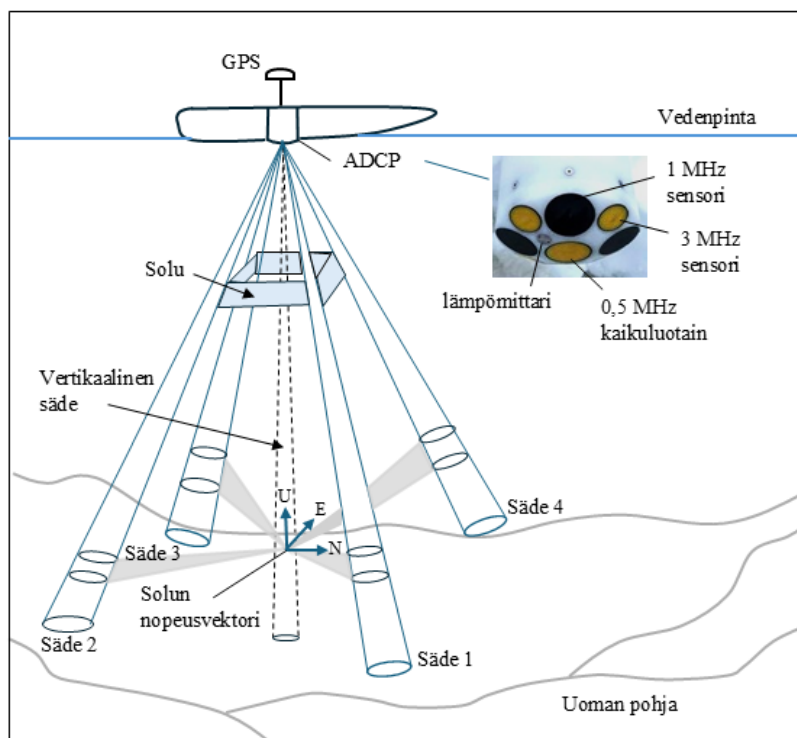
2.4 Akustinen virtausprofiilimittaus virtavesien tutkimuksessa

Akustinen virtausprofiilimittari eli ADCP (eng. *Acoustic Doppler Current Profiler*) on yleisimmin käytetty laite kolmiulotteisten virtausrakenteiden mittaamiseen (Mueller 2018). Ensimmäiset ADCP:t kehitettiin 1990-luvulla merialueiden ja suistojen mittauksiin (Muste ym. 2004). Laitteen toiminta perustuu Dopplerin-ilmiöön eli sen lähettämä ääniaalto heijastuu takaisin sensoriin veden mukana kulkeutuvista hiukkasista, sedimenttipartikkelista tai uoman pohjasta. Doppler-siirtymään eli akustisten aaltojen taajuuden muuttumiseen perustuen se laskee veden nopeusprofiilin kolmiulotteisesti (Mueller 2018). Laitteen avulla laajojen alueiden nopea mittaaminen on mahdollista ja se toimii erinomaisesti alueilla missä virtausolosuhteiden vaihtelu on nopeaa (Kasvi ym. 2017). ADCP voidaan kiinnittää veneeseen, kauko-ohjattavaan lauttaan tai esimerkiksi jääpeiteolosuhteissa se voidaan kiinnittää tankoon ja laskea veteen kairanreiästä.

ADCP lähettää akustisia pulsseja neljän tai kolmen sensorin avulla vesipatsaan läpi (Mueller 2018) (kuva 10). Sensorit suuntautuvat yleensä 20° tai 30° kulmassa pois päin laitteesta (Flener ym. 2015b). Laite laskee horisontaalisen virtauksen kolmen anturin avulla ja neljäs anturi määrittää virtauksen pystykomponentin. Pohjan syvyys mitataan laitteen pystysuoran säteen avulla. Liikkuvassa mittauksessa ADCP mittaa nopeuksia vesipatsaassa suhteessa alukseen, johon se on kiinnitetty (Muste ym. 2004). Jos alusta liikkuu, sen nopeus täytyy mitata suhteessa uoman pohjaan veden nopeuden laskemiseksi. Sijainti voidaan määrittää suhteessa uoman pohjaan (BottomTrack), joka mittaa veneen ja pohjan välistä suhteellista nopeutta pitkien akustisten pulssien avulla. Tämä tapa kuitenkin edellyttää, että uoman pohjalla ei tapahdu sedimentin kulkeumaa, sillä muutoin veden nopeus voi vinoutua liian alhaiseksi ja toisaalta myös veneen rata siirtyä ylävirtaan. Tällaisissa olosuhteissa voidaan käyttää laitteen DGPS-antennia (eng. *Differential Global Position System*) (Sontek 2022).

Virheellisiä mittaustuloksia virtauskentässä on havaittu aivan sensorin läheisyydessä ja siksi läheltä sensoria sekä matalasta vedestä mitattua virtausta tulee arvioida kriittisesti (Mueller ym. 2007). Esimerkiksi Sontekin M9-sensori ei pysty mittaamaan virtaamaa, jos vesipatsas on alle 30 cm syvä eikä syvyyttä, jos vesipatsas on alle 20 cm syvä. Kaiken kaikkiaan ADCP:n mittaustarkkuus ja ominaisuudet ovat kuitenkin erinomaisia verrattuna muihin mittaustapoihin. ADCP mittaa virtaussolut ja pohjan etäisyyden sekunnin välein (Sontek 2022). Koska sensori

tarvitsee toimiakseen sedimentin kuljetusta uomassa, se ei toimi täysin kirkkaissa vesissä. ADCP:tä voidaan käyttää myös talviajan virtausolosuhteiden tutkimiseen (Lotsari ym. 2020). Talvella myös jäänpaksuus tulee mitata, jotta vedenkorkeus saadaan selville ja laitteen ohjelmistoon saadaan syötettyä tarkat tiedot sensorin vertikaalisesta sijainnista vesipatsaassa.

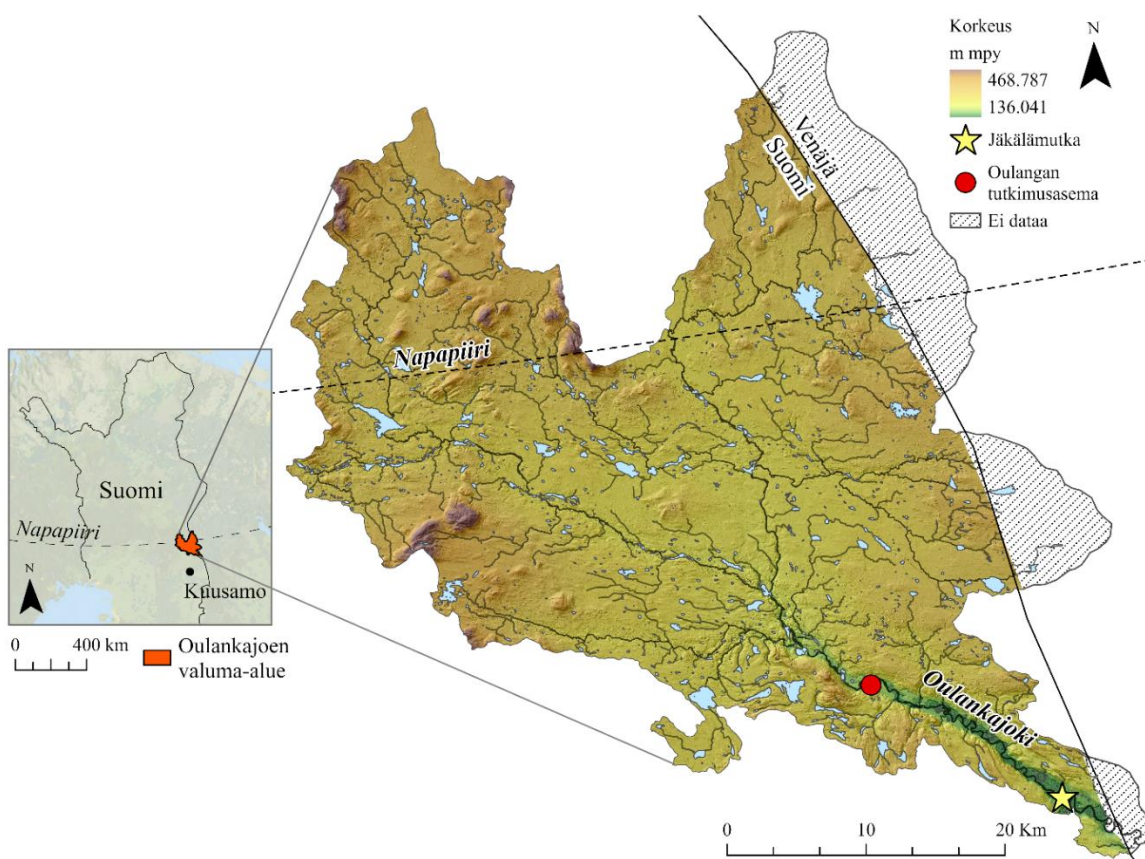


Kuva 10. Akustisen virtausprofiilin toimintaperiaate neljällä viistolla ja yhdellä pystysuoralla säteellä. Poikittaisen (E), pystysuoran (U) ja uomansuuntaisen (N) virtauskomponentin perusteella saadaan laskettua virtausnopeus ja virtaussuunta yhdelle virtaussolulle (Flener 2015b:24; Sontek 2022, mukailen).

3 Tutkimusalue

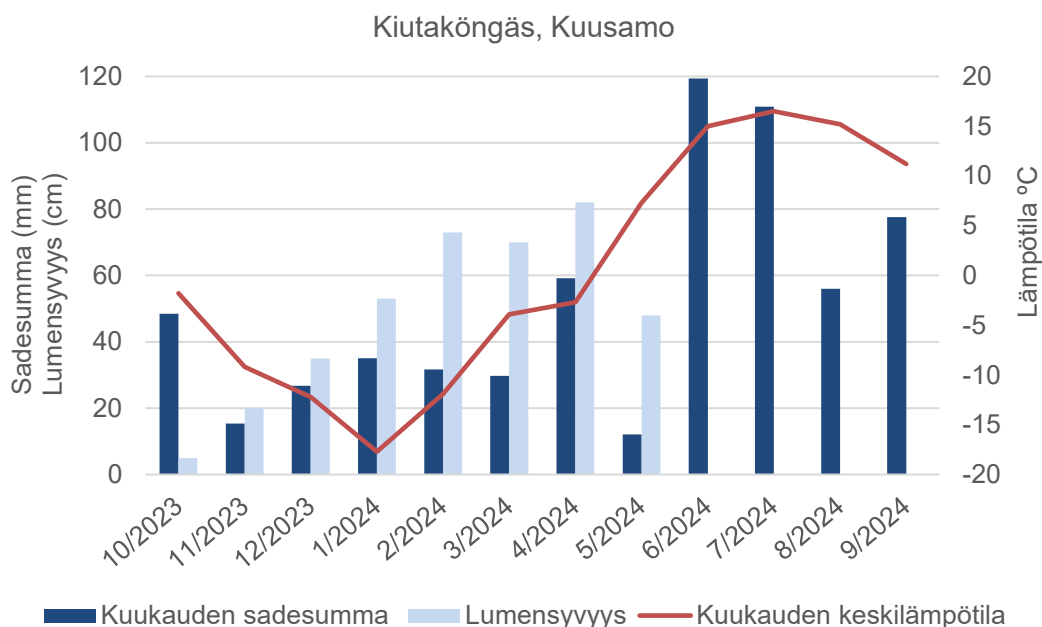
3.1 Oulankajoen valuma-alue

Oulankajoki sijaitsee Koillis-Suomessa, Sallan ja Kuusamon kuntien alueella (kuva 11). Se alkaa Sallasta, kulkee Oulangan kansallispuiston halki ja laskee Venäjän puolella Paanajärveen Paanajärven kansallispuiston alueella ja sieltä Pääjärveen (Metsähallitus 2014). Jokuoma on noin 135 kilometriä pitkä. Oulankajoen ominaispiirteisiin kuuluvat kevättulvat, jotka johtuvat valuma-alueen vähäisestä järvien määrästä ja suuresta turvemaiden määrästä, valuma-alueen maanpinnan muodoista sekä talven suuresta lumimäärästä (Koutaniemi 1979). Oulankajoen nimi on peräisin sanoista oula ja oulu, jotka merkitsevät tulvavettä. Lumen sulamisen aiheuttama kevättulva sijoittuu tavallisesti toukokuun puolivälin ja kesäkuun puolivälin väliselle ajalle. Oulankajoen koko vuoden keskivirtaama on $24 \text{ m}^3/\text{s}$. Suurin mitattu virtaama on $462 \text{ m}^3/\text{s}$ ja pienin $4,1 \text{ m}^3/\text{s}$. Vedenpinnankorkeuden vaihteluväli mitatun huipputulvan ja alimman mitatun vedenkorkeuden välillä on yli kolme metriä.



Kuva 11. Oulankajoen valuma-alueen sijainti Suomessa ja Jäkälämutkan sijainti valuma-alueella. Paikkatietoaineistot: Maanmittauslaitos 2023; SYKE 2023; SYKE 2012.

Oulankajoen kansallispuisto on perustettu vuonna 1956 ja alue on lajistollisesti Suomen merkittävimpiä suojelukohteita (Metsähallitus 2014). Se on myös geologisesti, biologisesti ja maisemallisesti ainutlaatuinen alue. Oulankajoen ekologinen tila on erinomainen ja se kuuluu Natura 2000-suojelualueeseen. Oulankajoen alueen tyypillisiä maisemia ovat vanhat metsät, suo-
luonto sekä jokivarsien tulvaniityt ja tulvametsät. Koillismaa on ilmastoltaan mantereista ja se sijaitsee suurimmaksi osaksi yli 200 metriä merenpinnan yläpuolella (Kersalo & Pirinen 2009). Se kuuluu pohjoisboreaaliseen ilmastovyöhykkeeseen. Lämpötilan vaihtelut voivat olla suuria ja talvet ovat runsaslumisia. Alin mitattu havainto on -48 °C ja korkein $+32\text{ °C}$ (Jokinen ym. 2021). Alueen vuodenaikaisuus on selkeää, vaikka hallitsevana vuodenaikana on talvi, joka kestää noin puoli vuotta. Lämpimin kuukausi on heinäkuu, jonka keskilämpötila on noin $+15\text{ °C}$ (Kersalo & Pirinen 2009). Suurten korkeuserojen takia vuotuinen sademäärä on noin 550 mm, josta noin puolet on lumisadetta. Ensilumi sataa alueelle keskimäärin lokakuun lopussa ja pysyvä lumipeite keskimäärin marraskuun alussa. Lumipeitteen paksuus on noin 65–80 senttimetriä. Maaperä on roudassa noin lokakuusta kesäkuun puoliväliin ja sen syvyys vaihtelee 0,4–1 metrin välillä (Koutaniemi 1984). Oulankajoen Kiutaköngkään havaintoasemalla mitattu talven 2024 suurin lumensyvyys 82 cm mitattiin huhtikuussa 2024 (kuva 12). Keväällä 2024 viimeiset lumet sulivat toukokuun puolessa välissä.



Kuva 12. Kiutaköngkään havaintoasemalla mitatut kuukausittaiset sadesummat, lumensyvyydet ja keskilämpötilat yhden vuoden ajalta. (Lähde: Ilmatieteen laitos 2025)

Alueen maaperä on muodostunut viimeisimmän jäätiköitymisen ja mannerjäätikön vetäytymisen aikana. Jokiuoma kiemurtelee kalliolaaksossa, jonka aines on kvartsiittia. Jokilaakson sedimenttiaines on jäätikön kerrostamaa ja lajittelemaa soraa sekä hiekkaa (Metsähallitus 2014). Maa-aines jokilaaksossa on huuhtoutumisen myötä menettänyt ravinteikkuutensa, jonka takia se on kasveille epäedullisempi kasvupaikka, kuin esimerkiksi rinteiden huuhtoutumaton ja lajittumaton moreeni. Oulankajoki kuuluu Suomen kolmeen suurimpaan meandroivaan jokiuomaan yhdessä Pulmankijoen ja Ivalojoen kanssa (Koutaniemi 2000). Oulankajoki mutkittelee lähes 40 metriä ympäröiviä kallioita alempana. Ajan kuluessa jokiuoman ympäristöön ja sen rannoille on muodostunut juoluoita eli makkarajärviä sekä kulutus-kasaus prosessien aikaansaamia tulvatasankoja. Eroosion voimasta meanderikaarteet ovat myös siirtyneet alavirran suuntaan, koska joki ei voi siirtyä sivusuunnassa kalliolaakson kapeuden takia (Koutaniemi 2000). Siirtymisvauhti on Fennoskandian nopeimpia.

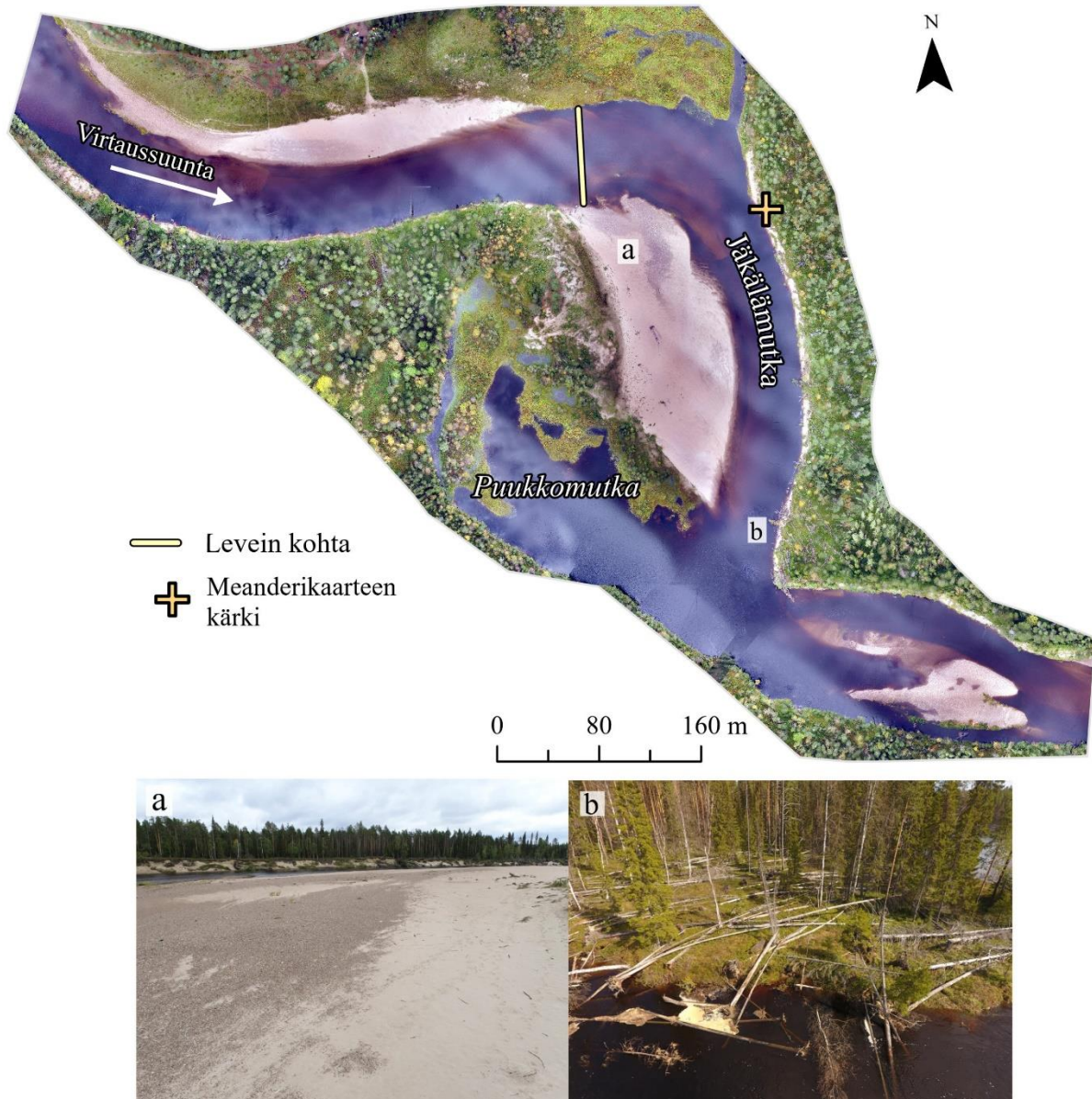
3.2 Jäkälämutka

Tutkimusalueena on Jäkälämutka, yksi Oulankajoen meanderikaarteista, joka sijaitsee linnuntietä noin 2,5 kilometrin päässä Suomen ja Venäjän väliseltä valtionrajalta (kuva 13). Tutkimusalueen pituus on noin 400 metriä. Jokiuoman leveys matalan virtaaman aikana syksyllä 2024 oli yläjuoksulla 50 metriä, 50 metriä särkän kärjen kohdalla ja 50 metriä alajuoksulla. Meanderikaarteen levein kohta oli 75 metriä, joka sijaitsee yläjuoksun ja särkän kärjen välisellä matalammalla alueella. Kevään viimeisenä mittauspäivänä ylivirtaaman aikana veden täyttämän alueen leveys oli yläjuoksulla 105 metriä, 200 metriä särkän kärjen kohdalla ja 80 metriä alajuoksulla.

Ulkokaarteen puolella hallitsevana kasvillisuutena on mäntyvaltainen metsä ja sen aluskasvillisuus. Ulkokaarteessa törmä on meanderin keskikohdan jälkeen alajuoksun suuntaan erodoitunut ja alajuoksulla törmän päällä on useita kymmeniä mahdollisesti aikaisemman myrskyn kaatamia puita. Aivan ulkokaarteen reunalla sijaitsee myös puunrunkoja, jotka ovat kaatuneet jokiuomaan törmän eroosion myötä. Nähtävillä on myös puuston ja aluskasvillisuuden juurakkoa. Vedenalainen osa uomasta on kasvillisuusvapaata. Keväällä 2024 otettujen kuivaseulottujen sedimenttinäytteiden mukaan uoman sedimenttiaineksen D_{50} -arvo vaihtelee välillä 125,1–699,7 μm . D_{50} -arvo on sedimenttinäytteen mediaaniarvo.

Vuosien 1974–2022 aikana Jäkälämutkan ulkokaarre on siirtynyt maksimissaan 120 metriä sivusuuntaisesti eli keskimäärin 2,55 metriä vuodessa (Blåfield ym. 2024). Vuosien 1975–1995

keskimääräinen eroosion määrä oli 3780 m^3 ja vuosien 2020–2022 välillä keskiarvoinen eroosion määrä oli 9310 m^3 . Blåfieldin ym. (2024) mukaan jokiuoman liikkuminen ja eroosion määrä olivat suurinta vuosina, joina lumen akkumulaatio ja kevättulvien virtaamat olivat suurimpia.



Kuva 13. Tutkimusalueen ominaispiirteet. Matalan virtaaman aikana särkällä on havaittavissa nopean virtauksen solun kulkureitti, jossa sedimentin raekoko on ympäröiviä alueita suurempaa (a). Meanderikaarteen alajuoksulla jokiuoman ulkoreunalla sijaitsee kaatuneita puita (b). Kuvat: Linnea Blåfield

4 Aineisto ja menetelmät

4.1 Kenttätyöt

4.1.1 Akustinen virtausprofiilimittaus

Akustiset virtausprofiilimittaukset toteutettiin Jäkälämutkassa osana Turun yliopiston virtavesien ja rannikoiden tutkimusryhmän kenttätöitä talven, kevään ja syksyn 2024 aikana (taulukko 2). Mittauksessa käytettiin laitevalmistaja Sontekin RiverSurveyor M9 laitetta, joka mittaa virtausnopeutta ja virtaussuuntaa neljän 3,0 MHz ja neljän 1 MHz anturin avulla (Sontek 2022). Anturit lähettävät samanaikaisesti pulsseja useilla taajuuksilla, ja laitteen sisäänrakennettu algoritmi valitsee parhaimman paluusignaalin tietylle syvyydelle ja nopeudelle. Laitteen pystysuuntaisella 0,5 MHz:n säteellä, mitattiin vedensyvyys. Nopeusmittauksissa mittausvirhemarginaali on 0,25 % ja syvyysmittauksissa 0,1 %. Sontekin (2022) mukaan sijainnin tarkkuus on < 1 m eli sijainti voi poiketa todellisesta sijainnista. Ennen mittauksen aloittamista laitteisto kalibroitiin ja sille määritettiin tiedot sensorin syvyydestä sekä magneettinen deklinaatio eli napapohjoisen ja magneettisen pohjoisen välinen kulma. Talven mittausjaksolla sensorin syvyydeksi määritettiin jään paksuus jokaiselta kairanreiältä. Kevään ja kesän mittauksissa sensorin syvyydeksi määritettiin käytetyn alustan paksuus.

Taulukko 2. Tutkimusajanjakson ADCP-mittaukset ja mittaustiedot.

Mittauksen ajankohta	Sensori	Poikkileikkaukset	Metodi	Mittauksen kesto
23.2.2024	Sontek M9	1–2	Stationäärinen	60 s
24.2.2024	Sontek M9	3–4	Stationäärinen	60 s
25.2.2024	Sontek M9	5–6	Stationäärinen	60 s
19.5.2024	Sontek M9	1–6	Liikkuva	-
20.5.2024	Sontek M9	1–6	Liikkuva	-
24.5.2024	Sontek M9	1–6	Liikkuva	-
19.9.2024	Sontek M9	1–6	Liikkuva	-

4.1.2 Akustinen virtausprofiilimittaus talvella

Talven mittaukset toteutettiin 23.-25.2.2024 stationäärisenä eli paikallaan pysyvänä mittauksena jääkannen alta kuudesta poikkileikkauksesta yhteensä 93:n kairausreiän kautta (kuva 14). Poikkileikkaus tarkoittaa suoraa linjaa jokiuoman sisäreunalta ulkoreunalle. Poikkileikkauksien

sijainti määritettiin visuaalisesti tasaisesti meanderikaarten ympärille. Poikkileikkauksista ensimmäinen sijaitsi meanderikaarteessa yläjuoksun puolella ja viimeinen alajuoksun puolella. Kairausreiät sijaitsivat poikkileikkauksessa kahden metrin etäisyydellä toisistaan.

Jääpeitteen päällä oli runsaasti lunta ja jokainen poikkileikkaus lapioitiin puhtaaksi ennen jäänpaksuuden mittaamista. Talven aineisto kerättiin kolmen päivän aikana eli kahden poikkileikkauksen tiedot päivässä. Sensori yhdistettiin RiverSurveyor Stationary Live -ohjelmistoon. Sensorin syvyydeksi määritettiin jäänpinnan paksuus, joka mitattiin jokaisen kairanreiän kohdalta erikseen yhden sentin tarkkuudella. Sensori kiinnitettiin tankoon, jonka avulla laite laskettiin kairausreiästä veteen täsmälleen jäänpinnan alapuolelle (kuva 14c). Jääpeite ulottui jokiuomassa reunalta toiselle, eikä sulia kohtia havaittu. Ilman lämpötila oli mittausaikana päivällä ylimmillään 3,2°C ja yöllä alimmillaan -1,5°C. Mittausajankohdan päivälämpötilojen takia jäänpinnalle muodostui sohjoa ja lumen sulamisen takia poikkileikkauksilla 5 ja 6 jäänpinnalla oli paikoin myös vettä. Poikkileikkauksen 2 keskellä sijaitsee kohouma. Kyseisessä kohdassa myös jää oli paksu ja vesipatsas jäi liian matalaksi ADCP:llä mitattavaksi eikä kuudenesta kairanreiästä saatu mittaustulosta.



Kuva 14. Talven mittausjakson mittausolosuhteet (a) ja poikkileikkaus 1 (b). ADCP-mittauksessa sensori kiinnitettiin metallitankoon, joka kiinnitettiin kolmijalkaan (c). Kuvat: Karoliina Korhikoski

4.1.3 Akustinen virtausprofiilimittaus keväällä ja syksyllä

Kevään mittaukset tehtiin kevättulvan aikana 19.-24.5.2024. Keväällä aineisto kerättiin kaikista poikkileikkauksista kerran päivässä kuuden päivän ajalta. Tässä tutkimuksessa käytän mittausjakson kahtena ensimmäisenä ja viimeisenä päivänä mitattua aineistoa, jotta muutokset kevät-

tulvan aikaisissa virtausolosuhteissa saadaan selville. Kevään aineistot mitattiin liikkuvana mittauksena samoista poikkileikkauksista kuin talvella. Kevään tulvan aikana virtaama oli niin suuri, että kauko-ohjattavaa lauttaa ei voitu käyttää ja sensori kytkettiin lauttaan, joka kiinnitettiin moottoriveneen keulaan (kuva 15a). Moottoriveneellä ajettiin keula kohti ylävirtaa uoman reunasta kohti vastakkaista reunaa ja pyrittiin siihen, että veneen vauhti pysyi pienempänä kuin virtausnopeus. Tämä sen takia, että laite ehtii mitata virtausolosuhteet mahdollisimman tarkasti. Sensori yhdistettiin RiverSurveyor Live -ohjelmistoon. Meanderikaarteen alajuoksulla poikkileikkauksella 6 mittaus keskeytettiin noin 5 metriä ennen ulkoreunaa nopean virtauksen ja ulkoreunalle veteen kaatuneiden puunrunkojen takia.

Syksyn mittausjaksolla vesi oli niin matalalla, että aineisto kerättiin poikkileikkauksittain ADCP:n ollessa kiinnitettynä kauko-ohjattavaan lauttaan (kuva 15b). Kauko-ohjattavalla lauttalla ajettiin keula kohti ylävirtaa ja nopeus pyrittiin pitämään pienempänä kuin virtausnopeus. Aineisto kerättiin kaikista kuudesta poikkileikkauksesta yhden päivän aikana.



Kuva 15. Kevään mittausjaksolla akustisen virtausprofiilimittarin alustana käytettiin moottoriveneen keulaan kiinnitettyä lauttaa (a) ja syksyn mittausjaksolla kauko-ohjattava lauttaa (b). Kuvat: Linnea Blåfield (a) ja Karoliina Korkiakoski (b)

4.1.4 Vedenpinnankorkeuden mittaus

Vedenpinnankorkeudet mitattiin VRS-GNSS:llä (eng. Virtual Reference Station – Global Navigation Satellite System), jonka horisontaalinen tarkkuus on +/- 1 cm ja vertikaalinen tarkkuus

on +/-2 cm. Talven mittausjaksolla vedenpinnan korkeus mitattiin jokaisesta kairanreiästä. Kevään toisena päivänä meanderikaarten särkältä mitattiin vedenkorkeus rantaviivan kohdalta. Kevään mittausjakson viimeisenä päivänä vedenkorkeus mitattiin tiheästi koko särkän rantaviivan pituudelta.

4.2 Virtausolosuhteiden tarkastelu

4.2.1 ADCP-aineiston laadun tarkastaminen ja jälkikäsittely

Mitatun aineiston laatu tarkastettiin talven osalta RiverSurveyor Stationary Live -ohjelmistossa ja kevään sekä syksyn osalta RiverSurveyor Live ohjelmistossa. Ennen mittauksia ohjelmiston asetuksiin määritettiin magneettinen deklinaatio ja sensorin syvyys suhteessa käytettyyn alustaan (lautan korkeus, jään paksuus). Kevään ja syksyn aineiston valinnassa käytettiin apuna poikkileikkauksesta mitattua virtaamaa. Koska poikkileikkaukset mitattiin useampaan kertaan, pystyttiin vertailua tekemään mittausten välillä. Sellainen mittausaineisto, jonka virtaamatiedot selkeästi poikkesivat muista mittauksista, jätettiin pois. Myös sellainen aineisto, jonka mittauksen aikana sijainti oli epätarkka tai ei ollenkaan käytössä, jätettiin pois.

Talven mittauksista kaikki mitattu aineisto ja keväältä sekä syksyiltä valittu aineisto vietiin Exceliin, jossa aineistosta valittiin tarvittavat tiedot. Nämä tiedot olivat sijainti, virtaussuunta asteina, keskiarvoinen virtausnopeus ja virtaama. Talven aineistoon lisättiin VRS-GNSS:llä mitatut sijaintitiedot jokaisesta kairanreiästä. Talven virtaussuunnista laskettiin jokaiselle mittauspisteelle mediaaniarvo. Aineisto vietiin CSV-muotoisena ArcGIS Pro:hon, jossa poikkileikkausten virtaussuunnat ja nopeudet visualisoitiin kartalle. Lisäksi jokaiselle mittausjaksolle laskettiin Reynoldsin luku, jotta pyörteisyyden vaihtelut saatiin selvitettyä.

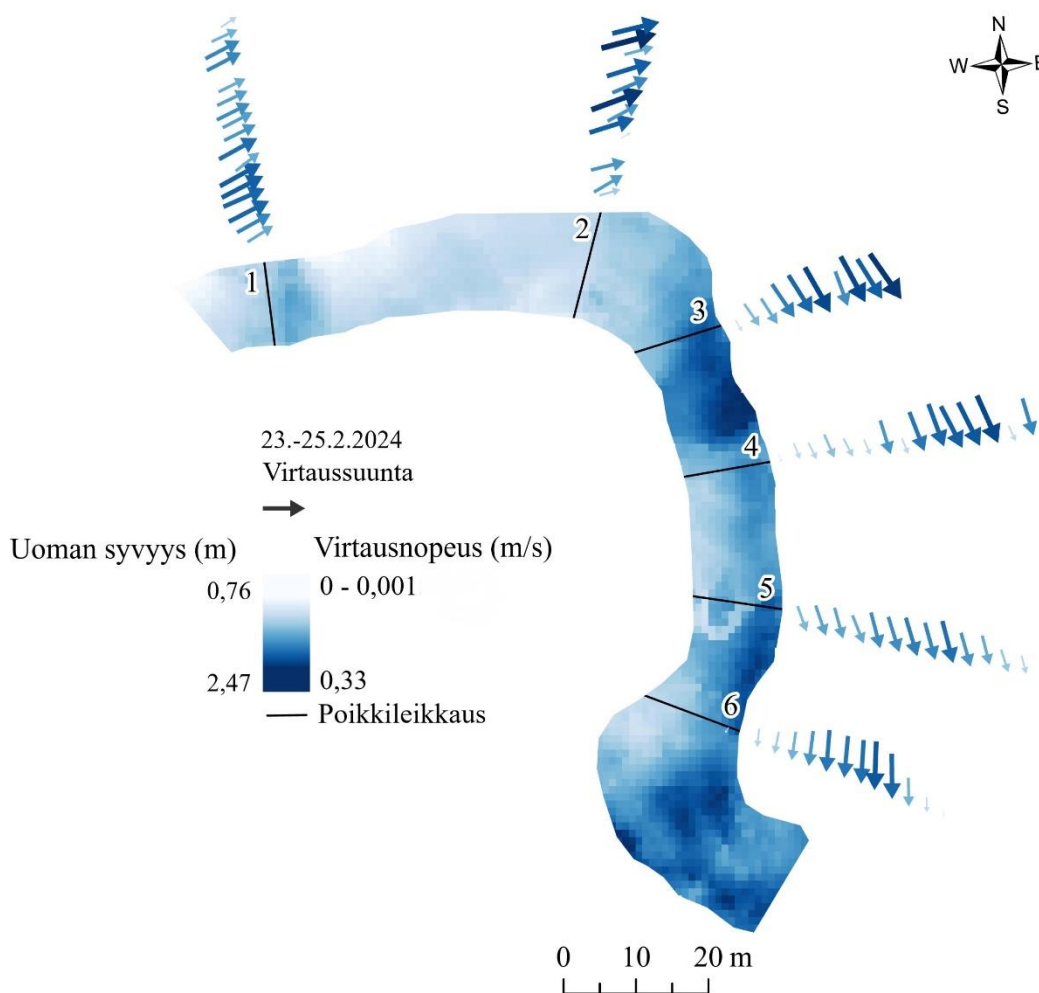
RiverSurveyor Stationary Liven -ohjelmiston virheen takia ohjelmisto ei laske virtaussuuntia oikein ja esimerkiksi pohjoisen virtaussuunnat ovat etelään. Tämän takia talven osalta virtaussuunnat laskettiin uudestaan jokaiselle mitatulle solulle R-ohjelmointikielellä.

5 Tulokset

5.1 Virtausolosuhteet eri vuodenaikoina

5.1.1 Virtausolosuhteet talvella

Poikkileikkaus 1 sijaitsee jokiuomassa meanderikaarteen sisääntulossa (kuva 16). Poikkileikkauksella 1 virtaussuunta suuntautuu koillisen ja idän väliin. Poikkileikkauksella 2 virtaus suuntautuu suoraan itään meanderikaarteen ulkoreunaa kohti samalla kun uoma kaartaa jyrkästi etelään. Poikkileikkauksella 3 virtaussuunta kääntyy myötäilemään uomaa ja suuntautuu kaakkoon. Poikkileikkauksella 4 ja 5 virtaussuunta on kaakon ja etelän väliin. Poikkileikkauksella 6 virtaussuunta on etelään.



Kuva 16. Talven virtaussuunnat ja -nopeudet poikkileikkauksittain. Virtauksen nopeusvektorit on sijoitettu poikkileikkauksen viereen selkeämmän esitystavan takaamiseksi. Taustakuvana syvyysmalli Jä-kälämutkasta vuodelta 2022.

Poikkileikkauksen 1 syvin kohta 1,64 m sijaitsee uoman sisäreunalla (taulukko 3). Syvimmän kohdan keskellä pohjalla sijaitsee kohouma. Suurimmat virtausnopeudet sijaitsevat uoman syvimmällä alueella vesipatsaan keskikerroksissa, missä myös nopean virtauksen solu on selkeästi havaittavissa. Keskimääräinen virtausnopeus nopean virtauksen solun kohdalla on 0,251–0,274 m/s (kuva 17). Jääpeite on poikkileikkauksessa muutaman senttimetrin ohuempi syvimmän kohdan ja siinä sijaitsevan nopean virtauksen solun kohdalla kuin viereisillä alueilla. Poikkileikkauksen sisäreunalla keskimääräinen virtausnopeus on 0,174–0,220 m/s ja ulkoreunalla 0,102–0,219 m/s. Jokaisella mitatulla pisteellä suurimmat virtausnopeudet sijaitsevat vesipatsaan keskikerroksissa.

Taulukko 3. Talven mittausjaksolla mitatut tunnusluvut poikkileikkauksittain.

	Syvin kohta (m)	Keskiarvoinen virtausnopeus m/s (max)	Keskiarvoinen virtausnopeus m/s (min)
Poikkileikkaus 1	1,64	0,27	0,10
Poikkileikkaus 2	1,12	0,32	0,18
Poikkileikkaus 3	2,00	0,31	0,06
Poikkileikkaus 4	2,00	0,30	0,03
Poikkileikkaus 5	2,10	0,25	0,09
Poikkileikkaus 6	2,47	0,27	0,02

Verrattuna poikkileikkaukseen 1, poikkileikkauksessa 2 uoman syvin kohta sijaitsee ulkoreunalla (kuva 17). Syvyys tässä kohdassa on 1,12 m. Poikkileikkaus on kokonaisuudessaan matalin muihin meanderikaarten poikkileikkauksiin verrattuna. Poikkileikkauksen 2 matalin kohta sijaitsee sisäreunalla, missä syvyys on 0,78 m. Poikkileikkauksen suurimmat keskimääräiset virtausnopeudet ovat 0,268–0,328 m/s. Suurin virtausnopeus sijaitsee uoman syvimmässä osassa. Nopean virtauksen solu ei ole selkeästi havaittavissa, vaan suurimmat virtausnopeudet esiintyvät tasaisesti keskikerroksissa koko poikkileikkauksen alueella. Poikkileikkauksella 2 sijaitsee mahdollisesti nopean virtauksen solun vaihettumisvyöhyke, jossa nopean virtauksen solu siirtyy uoman sisäreunalta uoman ulkoreunalle.

Poikkileikkauksen 3 kohdalla uoma on kokonaisuudessaan syvempi kuin poikkileikkauksella 2. Poikkileikkauksen syvin kohta on 2 m (taulukko 3). Poikkileikkauksen sisäreunalla keskiarvoinen virtausnopeus on 0,65 m/s. Virtausnopeus kasvaa siirryttäessä sisäreunalla ulkoreunalle. Uoman pohjalla syvimmän osan keskellä sijaitsee kohouma, jonka kohdalta alkaa rakentua

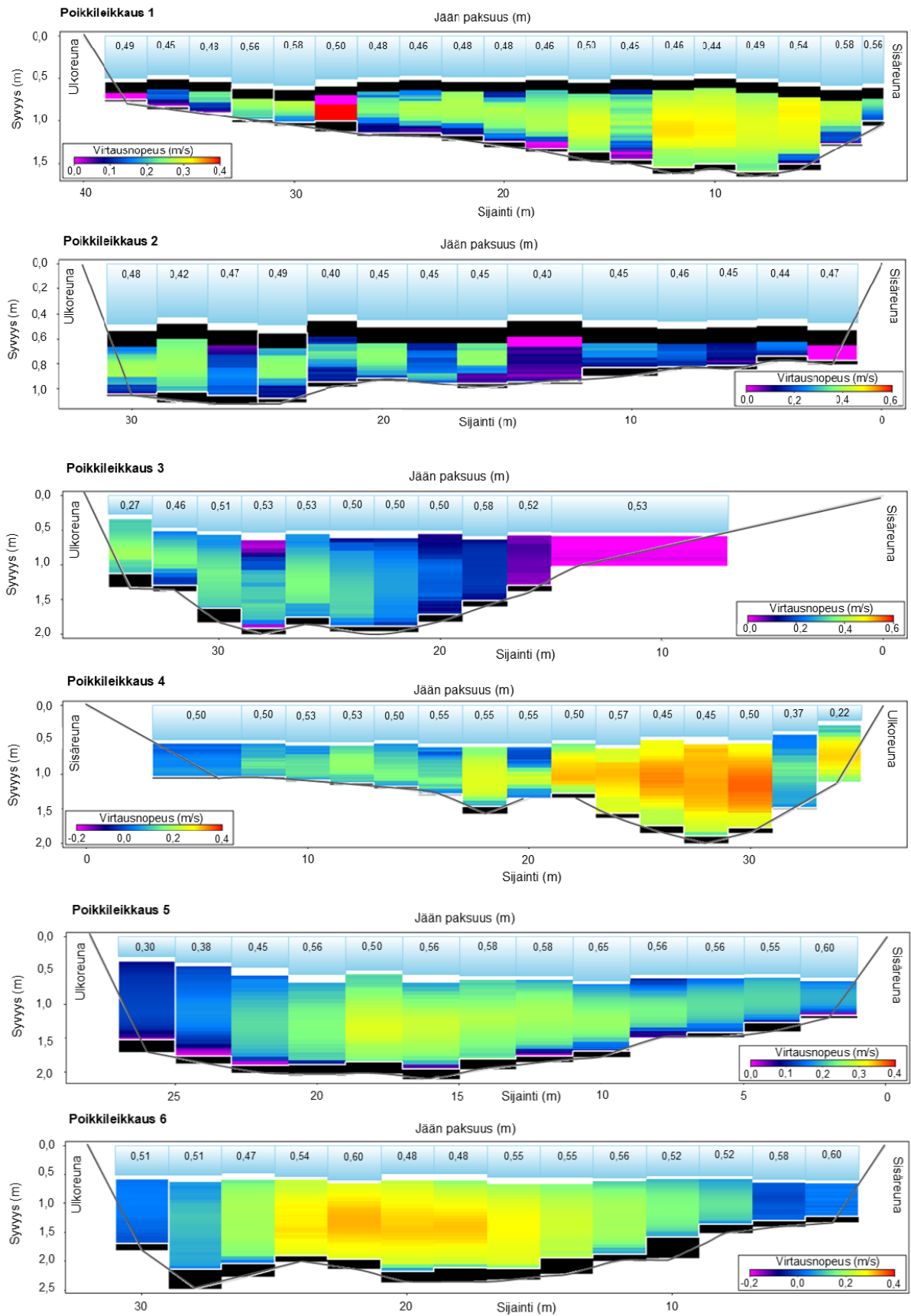
myös nopean virtauksen solu ulkoreunaa kohti. Suurimmat keskimääräiset virtausnopeudet ovat 0,264–0,316 m/s ja ne sijaitsevat uoman ulkoreunalla sekä kohouman kohdalla. Nopean virtauksen solu sijoittuu vesipatsaan keskikerrokseen (kuva 17). Suurin keskiarvoinen virtausnopeus sijaitsee viimeisellä mitta-asemalla uoman ulkoreunalla. Poikkileikkauksen ulkoreunalla toiseksi reunimmaisena mitta-asetuksen keskimääräinen virtausnopeus on hitaampi kuin viereisten mitta-asetusten virtausnopeudet.

Myös poikkileikkauksella 4 nopean virtauksen solu sijaitsee uoman syvimmissä kohdassa ulkoreunan puolella (kuva 17). Se sijoittuu selkeästi uomassa sijaitsevan kohouman ja ulkoreunan väliselle alueelle vesipatsaan keskikerrokseen. Keskimääräiset virtausnopeudet tässä kohdassa ovat 0,243–0,300 m/s. Uoma on poikkileikkauksen 4 kohdalla syvempi kohouman ulkoreunan puoleiselta alueelta verrattuna poikkileikkaukseen 3. Tämä voi vaikuttaa nopean virtauksen solun sijaintiin. Myös ennen kohoumaa sisäkaarteiden puolella syvänteessä virtausnopeudet ovat hieman suurempia 0,197 m/s kuin nopeudet viereisissä vesipatsaissa 0,091 m/s. Samoin kuin poikkileikkauksessa 3, myös poikkileikkauksessa 4 nopean virtauksen solun ja ulkoreunalla mitatun nopeammin virtaavan vesipatsaan 0,221 m/s väliin jää hitaammin virtaava vesipatsas 0,197 m/s.

Virtausnopeus kasvaa poikkileikkauksen 5 sisäreunalta alkaen syvyyden mukaisesti ja on nopeinta 0,252 m/s kohouman kohdalla poikkileikkauksen keskiosassa (kuva 17). Verrattuna ylävirran puoleisiin poikkileikkauksiin, jossa nopean virtauksen solu sijaitsee uoman ulkoreunalla poikkileikkauksen syvimmissä osassa, poikkileikkauksella 5 nopean virtauksen solu sijaitsee uoman keskikohdassa. Vesipatsaassa nopean virtauksen solu sijaitsee keskikerroksien alueella. Uoman syvin kohta 2,10 m sijaitsee ulkoreunalla. Virtausnopeus laskee jälleen ulkoreunaa kohti siirryttäessä. Hitain keskimääräinen virtausnopeus 0,09 m/s sijaitsee ulkoreunalla. Poikkileikkauksen 5 keskimääräiset virtausnopeudet ovat hitaampia kuin poikkileikkauksen 4 nopeudet.

Virtausnopeus on keskiosia hitaampaa sekä ulko- että sisäreunassa. Suurin keskimääräinen virtausnopeus on 0,277 m/s ja hitain on 0,025 m/s. Verrattuna meanderikaarteiden ylävirran puoleisiin poikkileikkauksiin, poikkileikkauksella 6 nopean virtauksen solu sijoittuu poikkileikkauksessa kohouman ja sisäkaarteiden väliselle alueelle vesipatsaan keskimäisiin kerrokseen (kuva 17). Poikkileikkauksella 6 nopean virtauksen solu ei siis sijaitse poikkileikkauksen syvimmissä 2,47 m kohdassa ja sen sijainti poikkeaa siksi muista poikkileikkauksista.

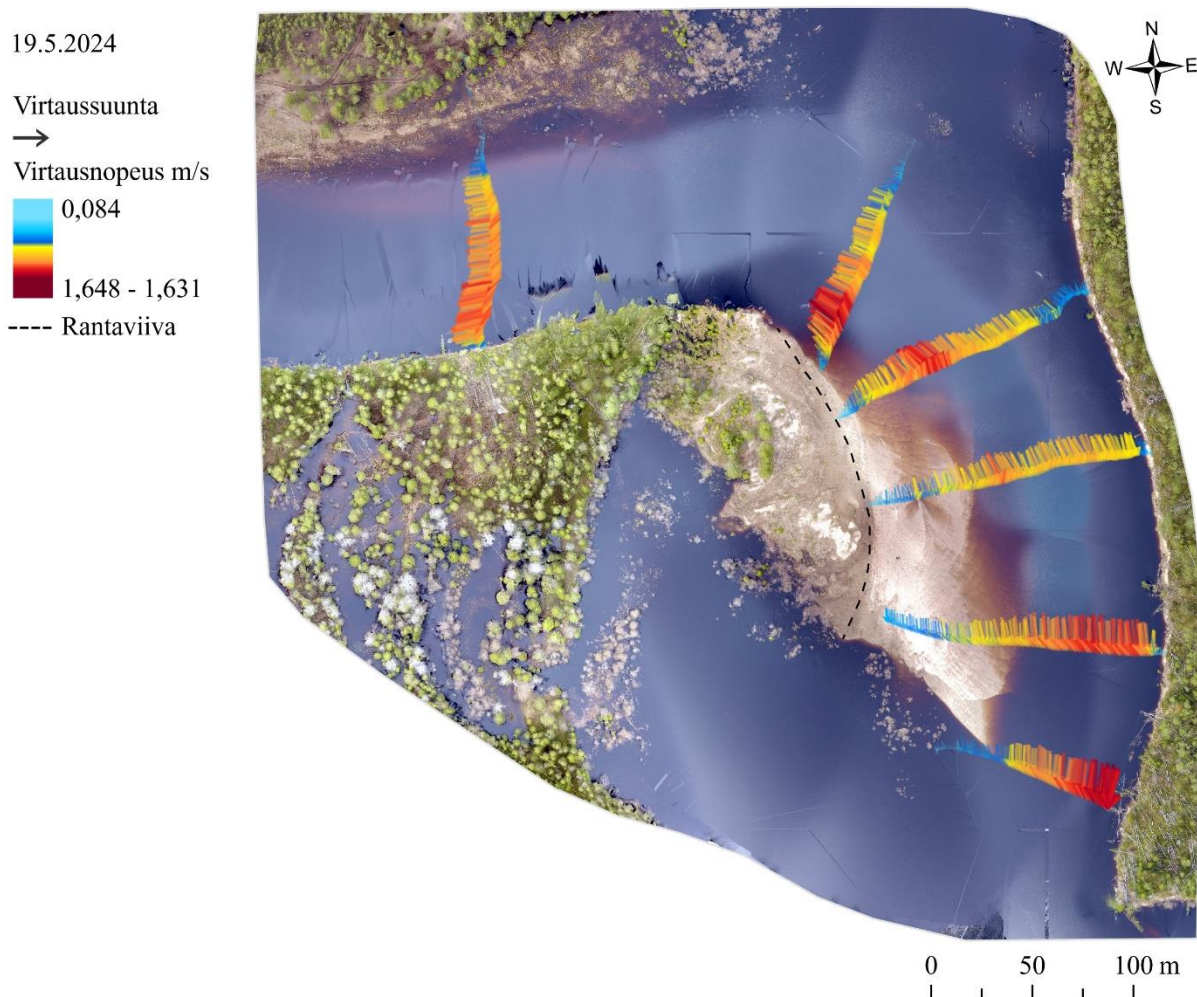
Meanderikaarten yläjuoksulta alajuoksulle siirryttäessä nopean virtauksen solu sijaitsee yläjuoksulla lähellä sisäreunaa ja alkaa siirtyä poikkileikkauksen 2 kohdalla kohti ulkoreunaa (kuva 17). Poikkileikkaukselta 3 nopean virtauksen solu kulkee ulkoreunalla poikkileikkaukselle 5 saakka. Tämän jälkeen nopean virtauksen solu siirtyy kohti uoman keskiosaa ja poikkileikkauksella 6 sen sijainti on lähempänä uoman sisäreunaa. Kaikissa poikkileikkauksissa keskimääräinen virtausnopeus on alle 0,4 m/s ja nopeimmat virtausnopeudet sijoittuvat vesipatsaan keskikerrokseen. Suurimmat virtausnopeudet sijaitsevat poikkileikkauksella 2, mikä todennäköisesti johtuu uoman mataluudesta tässä kohdassa. Pienin keskiarvoinen virtausnopeus löytyy poikkileikkauksen 6 kohdalta (taulukko 3).



Kuva 17. Talven mittausjaksolla ADCP:llä mitatut virtausnopeudet ja jään paksuudet jokaiselta poikkileikkaukselta. Vesi virtaa lukijasta pois päin poikkileikkauksilla 1, 2, 3, 5 ja 6 kohdalla. Poikkileikkauksen 4 kohdalla vesi virtaa lukijaa kohti.

5.1.2 Virtausolosuhteet kevättulvan aikana

Kevään mittausjakson ensimmäisenä päivänä 19.5. poikkileikkauksen 1 virtaussuunta on itään (kuva 18). Poikkileikkauksen 2 virtaussuunta on sisäreunalla kaakkoon ja ulkoreunalla itään. Poikkileikkauksen 1 ja 2 virtaussuunta poikkeaa talven virtaussuunnasta. Talvella poikkileikkauksen 1 virtaussuunta oli koillisen ja idän väliin, kun taas poikkileikkauksen 2 virtaussuunta oli suoraan itään. Poikkileikkauksella 3 ja 4 virtaus on kaakon suuntaista. Talven virtausolosuhteista poiketen nopean virtauksen solu kulkee särkän yli poikkileikkauksilla 2–4. Poikkileikkauksilla 5 ja 6 virtaussuunta on uoman suuntaisesti etelään. Talven virtausolosuhteissa virtaussuunta oli kaakon ja etelän väliin poikkileikkauksella 5.



Kuva 18. Kevään mittausjakson ensimmäisen päivän 19.5. virtaussuunnat ja virtausnopeudet. Rantaviivan sijainti on mitattu 20.5. Suurimmat virtausnopeudet sijaitsevat yläjuoksulla sisäreunassa ja alajuoksulla ulkoreunassa. Särkälle tultaessa suurimmat virtausnopeudet sijaitsevat särkän kohdalla. Ilmakuva: Linnea Blåfield 23.5.2024

Kevään mittausjakson ensimmäisenä päivänä syvin kohta poikkileikkauksella 1 on 5,14 m (taulukko 4). Poikkileikkauksessa suurimmat keskiarvoiset virtausnopeudet sijaitsevat syvimmän kohdan alueella sisäreunassa ja maksimivirtausnopeus on 1,4 m/s (kuva 20). Nopean virtauksen solu ei kuitenkaan ole selkeästi erotettavissa ja suurimmat virtausnopeudet esiintyvät tasaisesti uoman syvimällä alueella. Pienimmät virtausnopeudet sijoittuvat poikkileikkauksen ulkoreunalle, jossa pienin keskiarvoinen virtausnopeus on 0,035 m/s.

Taulukko 4. Kevään mittausjakson ensimmäisenä päivänä mitatut tunnusluvut poikkileikkauksittain.

	Syvin kohta (m)	Keskiarvoinen virtausnopeus m/s (max)	Keskiarvoinen virtausnopeus m/s (min)
Poikkileikkaus 1	5,14	1,40	0,03
Poikkileikkaus 2	4,50	1,63	0,01
Poikkileikkaus 3	5,72	1,50	0,02
Poikkileikkaus 4	5,28	1,33	0,08
Poikkileikkaus 5	5,50	1,45	0,06
Poikkileikkaus 6	6,15	1,64	0,11

Poikkileikkauksen 2 syvin kohta 4,5 m sijaitsee poikkileikkauksen keskiosan ja ulkoreunan välissä. Nopean virtauksen solu muodostuu lähelle poikkileikkauksen sisäreunaa ja korkeimmat virtausnopeudet ovat havaittavissa vesipatsaan yläosassa pinnan läheisyydessä (kuva 20). Suurin keskiarvoinen virtausnopeus on 1,63 m/s. Pienin keskimääräinen virtausnopeus on 0,01 m/s ja se sijaitsee sisäreunassa.

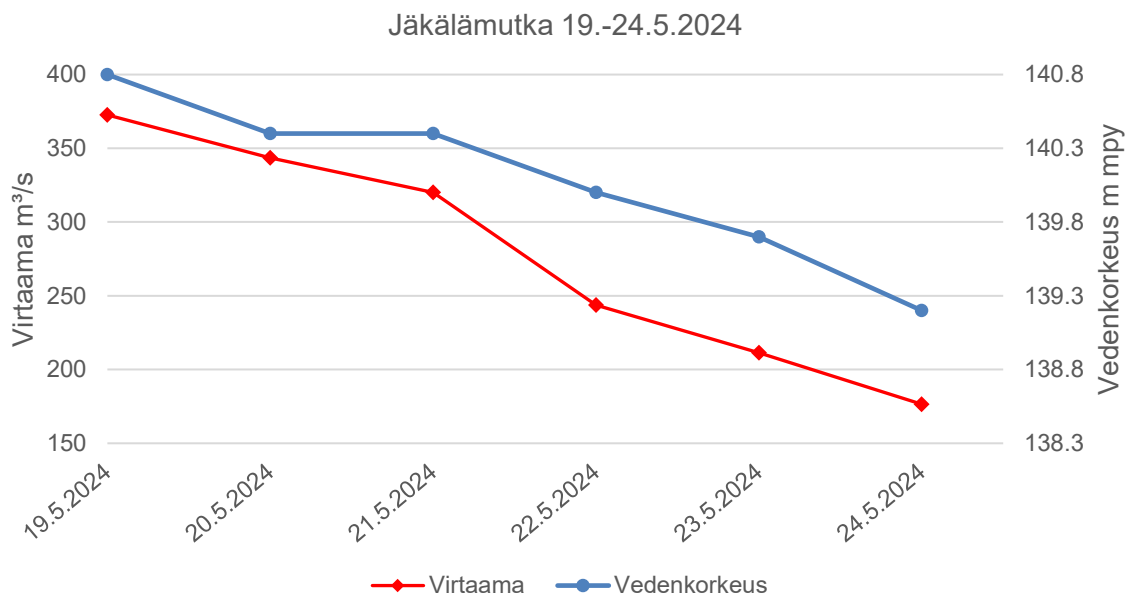
Jokiuoman tulvimisen takia meanderikaarteen särkkä on veden alla ja poikkileikkauksella 3 korkean virtauksen solu kulkee särkän yli (kuva 18). Nopean virtauksen solu sijaitsee vesipatsaan yläosassa lähellä vedenpintaa (kuva 20). Nopein keskimääräinen virtausnopeus on 1,5 m/s. Virtausnopeus hidastuu selkeästi poikkileikkauksen sisäreunalta ulkoreunalle, jossa sijaitsee poikkileikkauksen syvin kohta.

Poikkileikkauksella 4 nopean virtauksen solu sijaitsee edelleen särkän päällä, mutta se ei ole yhtä selkeästi havaittavissa kuin poikkileikkauksella 3 (kuva 20). On mahdollista, että poikkileikkauksella 4 sijaitsee vaihettumisvyöhyke, joka talven virtausolosuhteissa sijaitsi poikkileikkauksella 2. Korkein keskimääräinen virtausnopeus on 1,33 m/s. Virtausnopeudet ovat poikkileikkauksen syvimässä osassa hieman korkeammat kuin poikkileikkauksella 3.

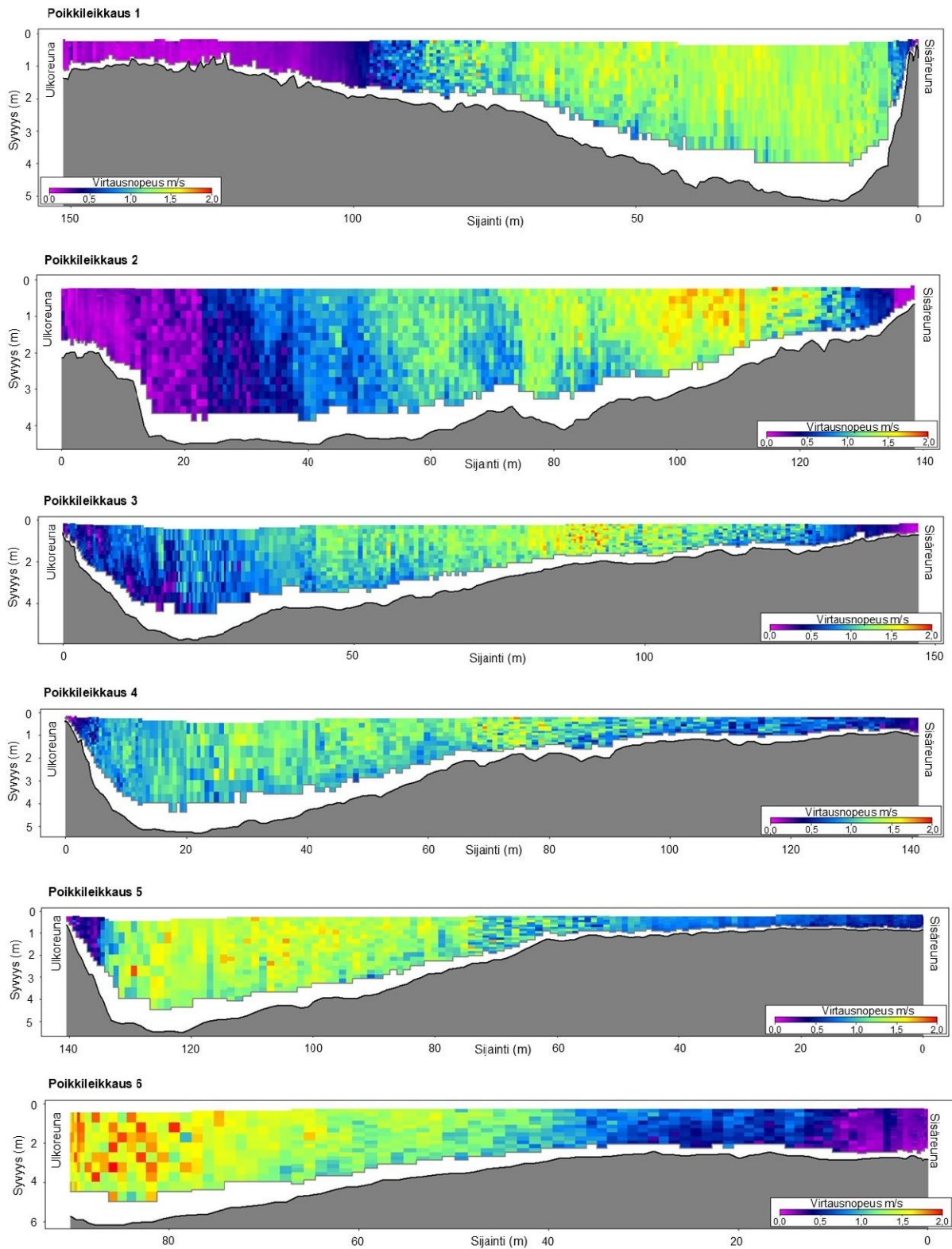
Poikkileikkauksella 5 suurimmat keskimääräiset virtausnopeudet ja nopean virtauksen solu sijaitsevat uoman syvimässä osassa ulkoreunan läheisyydessä (kuva 20). Nopean virtauksen sijoittuu vesipatsaan keskikerrokseen. Suurin keskimääräinen virtausnopeus tällä poikkileikkauksella on 1,454 m/s.

Poikkileikkauksen 6 ulkoreunalla sijainneiden puunrunkojen ja voimakkaan virtauksen takia aivan ulkoreunan läheisyydestä ei ole saatavilla mittaustuloksia (kuva 13). Mitatusta aineistosta kuitenkin selviää, että nopean virtauksen solu sijaitsee poikkileikkauksen syvimässä osassa lähellä ulkoreunaa ja suurin virtausnopeus tällä alueella on 1,64 m/s, joka on myös mittauspäivän suurin virtausnopeus. Nopean virtauksen solu sijaitsee vesipatsaan keskikerroksissa (kuva 20).

Kevään mittausjakson ensimmäisenä mittauspäivänä mitattu kokonaisvirtaama oli korkein kevään mittausjaksolla päivittäin mitatuista virtaamista (Kuva 19). Kokonaisvirtaama laski tasaisesti kolmanteen mittauspäivään asti, $\pm 30 \text{ m}^3$ päivässä. Kolmannen sekä neljännen päivän välinen lasku virtaamassa oli 76 m^3 eli kaksinkertainen verrattuna kahteen ensimmäiseen päivään. Neljännen päivän jälkeen virtaama laski taas tasaisesti noin 34 m^3 viimeisten mittauspäivien välillä.

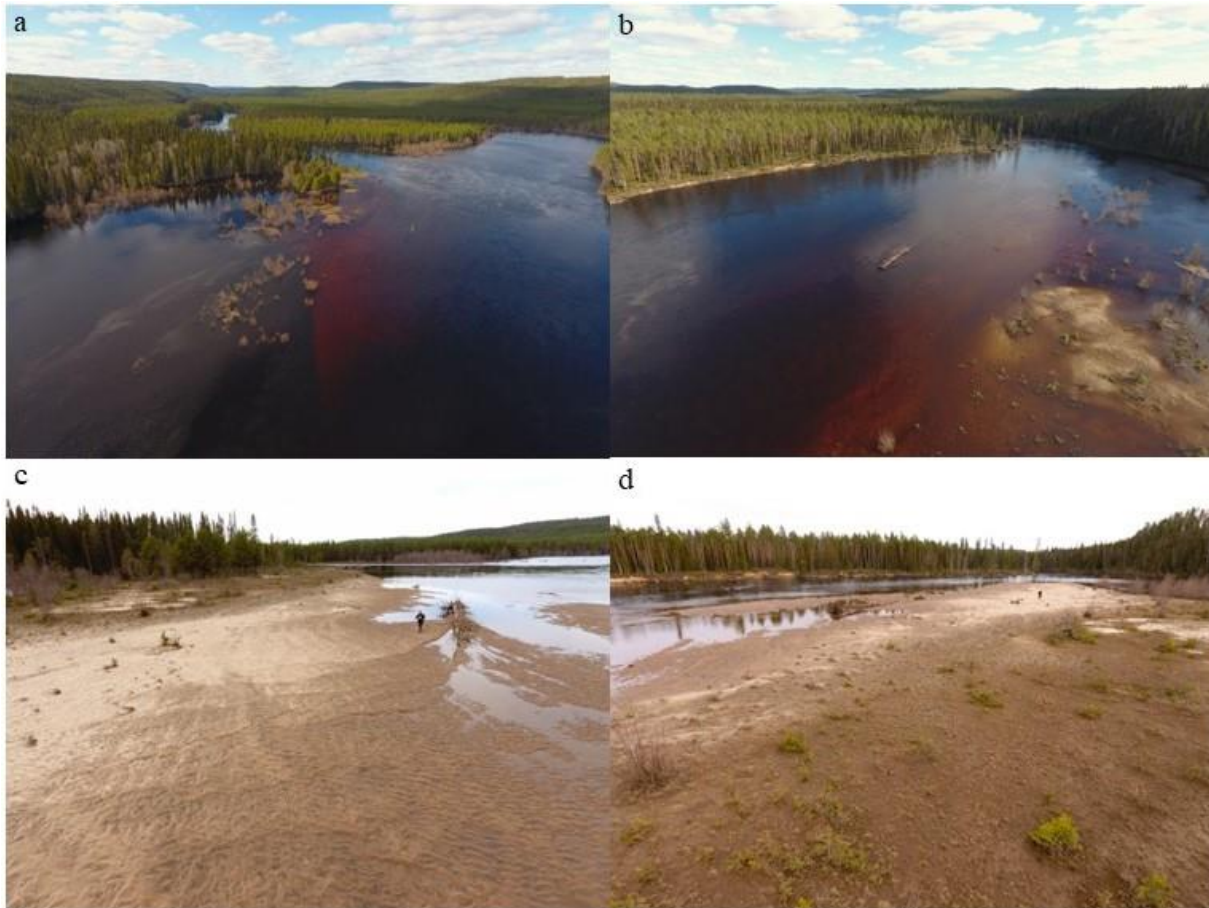


Kuva 19. Virtaaman ja vedenkorkeuden muutos kevään mittausjakson aikana poikkileikkauksella 1.



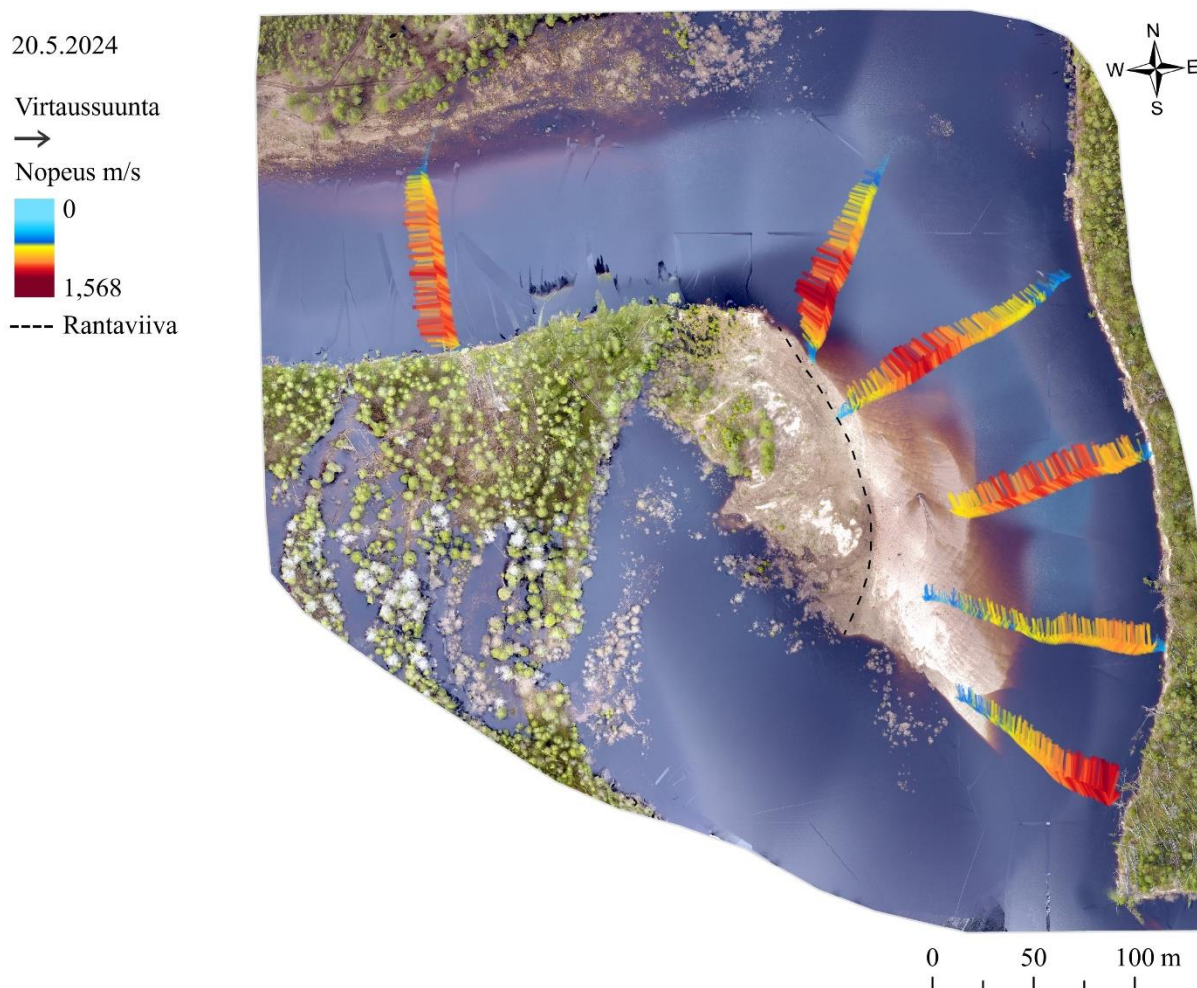
Kuva 20. Kevään mittausjakson ensimmäisenä päivänä 19.5. ADCP:llä mitatut virtausnopeudet poikkileikkauksittain. Vesi virtaa kaikilla poikkileikkauksilla lukijasta poispäin.

Kevään mittausjakson kolmena ensimmäisenä päivänä vesi tulvi jokiuomaa ympäröiville alueille meanderikaarten sisääntulossa ulkoreunan yli metsän puolelle ja koko särkkä oli veden peittämä (kuva 21). Viimeisenä mittauspäivään mennessä vedenpinta laski niin, että särkkä tuli näkyviin (kuva 21).



Kuva 21. Kevään tulva-alueen laajuus Jäkälämutkassa 21.5.2024 ylävirran suuntaan kuvattuna (a) ja alavirran suuntaan kuvattuna (b). Tulva-alueen laajuus mittausjakson viimeisenä päivänä 24.5.2024 ylävirran suuntaan kuvattuna (c) ja alavirran suuntaan kuvattuna (d). Kuvat: Linnea Blåfield 2024

Kevään mittausjakson toisena mittauspäivänä virtaussuunnat ovat lähes samat kuin ensimmäisenä päivänä. Poikkileikkauksella 1 virtaussuunta on jokiuoman myötäinen ja suuntautuu kohti itää (kuva 22). Poikkileikkauksella 2 virtaus suuntautuu ulkoreunalla idän ja kaakon väliin ja sisäreunalla kaakkoon. Poikkileikkauksella 3 virtaus suuntautuu ulkoreunalla idän ja kaakon väliin. Keskiosassa virtaussuunta on kaakon ja etelän väliin. Aivan poikkileikkauksen 3 sisäreunalla virtaussuunta on kaakon ja etelän väliin. Poikkileikkauksella 4 virtaussuunta on kaakon ja etelän väliin. Poikkileikkauksilla 5 ja 6 virtaussuunta on etelään.



Kuva 22. Kevään mittausjakson toisen päivän 20.5. virtaussuunnat, virtausnopeudet ja rantaviivan sijainti. Suurimmat virtausnopeudet sijaitsevat yläjuoksulla sisäreunassa ja alajuoksulla ulkoreunassa. Särkälle tultaessa poikkileikkauksella suurimmat virtausnopeudet sijaitsevat särkän reunan kohdalla ja poikkileikkauksella 3 särkän päällä. Ilmakuva: Linnea Blåfield 23.5.2024

Syvin kohta poikkileikkauksella 1 on 4,81 m lähellä uoman sisäreunaa, jonne myös suurimmat virtausnopeudet sijoittuvat (taulukko 5). Suurin keskiarvoinen virtausnopeus on 1,36 m/s. Nopean virtauksen solu ei ole selkeästi erotettavissa. Poikkileikkauksella 1 on havaittavissa nopeita virtauspulsseja (kuva 23). Hitaimmat virtausnopeudet sijoittuvat poikkileikkauksen ulkoreunan matalalle alueelle.

Taulukko 5. Kevään mittausjakson toisena päivänä mitatut tunnusluvut poikkileikkauksittain.

	Syvin kohta (m)	Keskiarvoinen virtausnopeus m/s (max)	Keskiarvoinen virtausnopeus m/s (min)
Poikkileikkaus 1	4,81	1,36	0,06
Poikkileikkaus 2	4,48	1,54	0,02
Poikkileikkaus 3	5,60	1,49	0,01
Poikkileikkaus 4	5,45	1,36	0,06
Poikkileikkaus 5	5,43	1,20	0,03
Poikkileikkaus 6	6,15	1,56	0,43

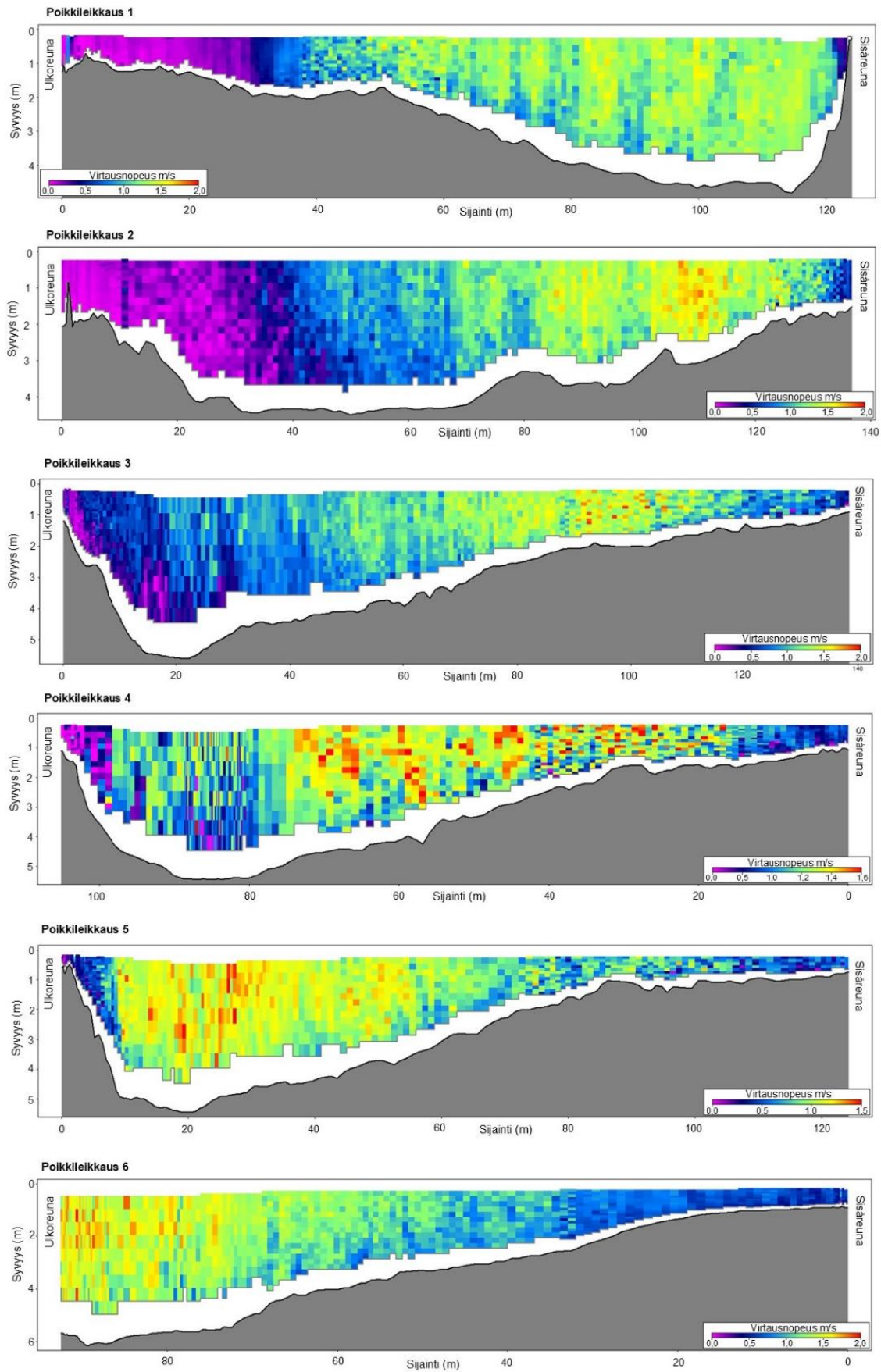
Poikkileikkauksella 2 nopean virtauksen solu sijaitsee lähellä uoman sisäreunaa vesipatsaan yläosassa (kuva 23). Tämän selkeästi erottuvan nopean virtauksen solun läheisyydessä lähempänä poikkileikkauksen keskikohtaa on havaittavissa myös toinen nopean virtauksen rakenne. Näiden kahden nopeammin virtaavien kohtien välissä uoman pohjalla sijaitsee kohouma, mikä saattaa vaikuttaa tällaisen rakenteen syntyyn. Suurin keskiarvoinen virtausnopeus poikkileikkauksella 2 on 1,54 m/s. Syvin kohta on 4,48 m syvä. Virtausnopeus hidastuu poikkileikkauksen syvimmällä alueella.

Poikkileikkauksella 3 nopean virtauksen solu sijaitsee särkän päällä vesipatsaan yläosassa, samoin kuin ensimmäisen päivän mittauksissa (kuva 23). Virtausnopeus on suurimmillaan 1,49 m/s ja hidastuu kohti poikkileikkauksen ulkoreunaa. Hitaimmat virtausnopeudet sijaitsevat aivan poikkileikkauksen ulkoreunalla.

Poikkileikkauksen 4 virtausrakenteessa ei ole havaittavissa selkeää nopean virtauksen solua ja suurimmat virtausnopeudet sijoittuvat särkän reunan ja poikkileikkauksen syvimmän kohdan väliselle alueelle vesipatsaan yläosaan (kuva 23). Suurin mitattu keskiarvoinen virtausnopeus on 1,36 m/s. Lähellä uoman ulkoreunaa virtausnopeudet hidastuvat lähelle nollaa.

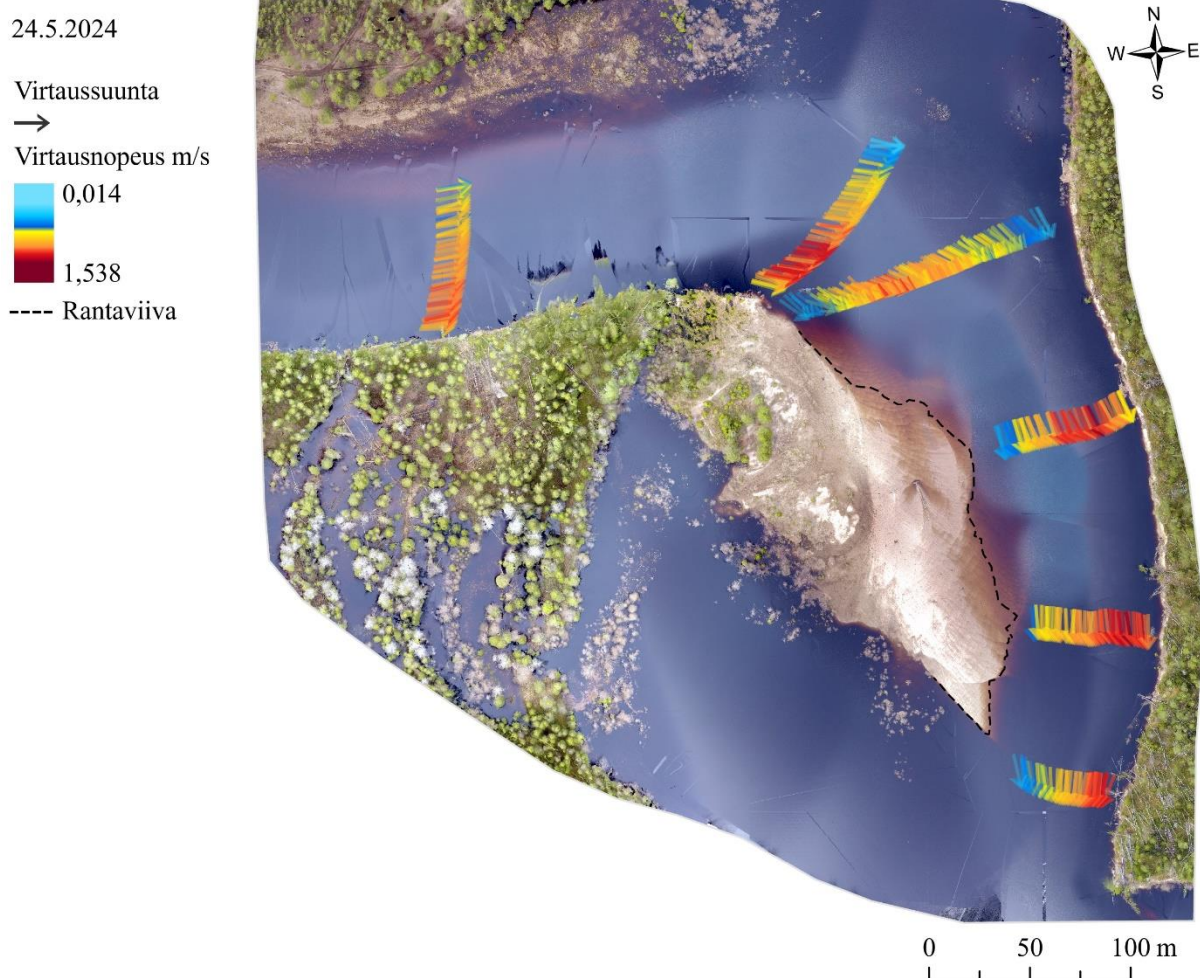
Nopean virtauksen solu on siirtynyt uoman syvimmän kohdan alueelle poikkileikkauksella 5 ja se sijaitsee vesipatsaan keskikerroksissa (kuva 23). Suurin mitattu virtausnopeus on 1,20 m/s. Poikkileikkauksen matalimmalla alueella särkän päällä virtausnopeus on selkeästi hitaampi kuin poikkileikkauksella 4. Myös lähellä ulkoreunaa virtausnopeudet ovat hitaampia.

Siirryttäessä poikkileikkaukselle 6, nopean virtauksen solu sijaitsee poikkileikkauksen syvimmässä kohdassa vesipatsaan keskikerroksissa (kuva 23). Suurin mitattu virtausnopeus on 1,56 m/s. Hitaimmat mitatut keskiarvoiset virtausnopeudet sijaitsevat uoman sisäreunalla.



Kuva 23. Kevään mittausjakson toisena päivänä 20.5. ADCP:llä mitatut virtausnopeudet poikkileikkauksittain. Virtaussuunta on jokaisella poikkileikkauksella lukijasta poispäin.

Kevään viimeisenä mittauspäivänä poikkileikkauksen 1 suuntautuu koillisen ja idän väliin (kuva 24). Tämä poikkeaa kevään mittausjakson toisesta mittauspäivästä. Tuolloin virtaussuunta oli itään poikkileikkauksella 1. Poikkileikkauksella 2 virtaus suuntautuu idän ja kaakon väliin. Poikkileikkauksella 3 virtaussuunta on sisä- ja ulkoreunassa kaakkoon. Poikkileikkauksen keskiosassa virtaussuunta on idän ja kaakon väliin. Poikkileikkauksella 4 virtaussuunta on ulkoreunalla kaakkoon ja sisäreunalla etelään. Poikkileikkauksen 5 virtaussuunta on etelään. Poikkileikkauksella 6 virtaussuunta on ulkoreunalla etelän ja lounaan väliin, keskiosassa etelään ja sisäreunalla kaakon ja etelän väliin.



Kuva 24. Kevään mittausjakson viimeisen päivän 24.5. virtaussuunnat, virtausnopeudet ja rantaviivan sijainti. Suurimmat virtausnopeudet sijaitsevat yläjuoksulla sisäreunassa ja alajuoksulla ulkoreunassa. Mittausjakson ensimmäisistä päivästä poiketen virtausnopeudet sijaitsevat poikkileikkauksella 2 aivan särkän reunassa jokiuoman puolella. Ilmakuva: Linnea Blåfield 23.5.2024

Kevään mittausjakson viimeisenä päivänä poikkileikkauksella 1 suurimmat virtausnopeudet sijoittuvat syvimmän kohdan 3,51 m lähelle uoman sisäreunaa (kuva 25). Suurin keskiarvoinen virtausnopeus on 1,26 m/s (taulukko 6). Nopean virtauksen solu ei ole selkeästi erotettavissa. Hitaimmat virtausnopeudet sijoittuvat poikkileikkauksen ulkoreunan matalalle alueelle ja sisäreunalle.

Taulukko 6. Kevään mittausjakson viimeisenä päivänä mitatut tunnusluvut poikkileikkauksittain.

	Syvin kohta (m)	Keskiarvoinen virtausnopeus m/s (max)	Keskiarvoinen virtausnopeus m/s (min)
Poikkileikkaus 1	3,51	1,26	0,18
Poikkileikkaus 2	3,05	1,37	0,05
Poikkileikkaus 3	3,45	1,33	0,05
Poikkileikkaus 4	3,88	1,52	0,30
Poikkileikkaus 5	4,05	1,53	0,41
Poikkileikkaus 6	4,73	1,41	0,01

Poikkileikkauksella 2 virtausnopeus on suurin uoman keskikohdan ja sisäreunan välissä, jossa uoma on noin 0,8 metriä matalampi kuin syvimmissä kohdassa. Nopean virtauksen solu sijoittuu tälle alueelle vesipatsaan ylimpiin kerroksiin (kuva 25). Virtausnopeus hidastuu ulkoreunaa kohti siirryttäessä. Suurin keskiarvoinen virtausnopeus poikkileikkauksella 2 on 1,37 m/s. Syvimmän kohdan vedenkorkeus on 3,05 m. Poikkileikkauksen hitaimmat virtausnopeudet sijaitsevat poikkileikkauksen sisä- ja ulkoreunalla.

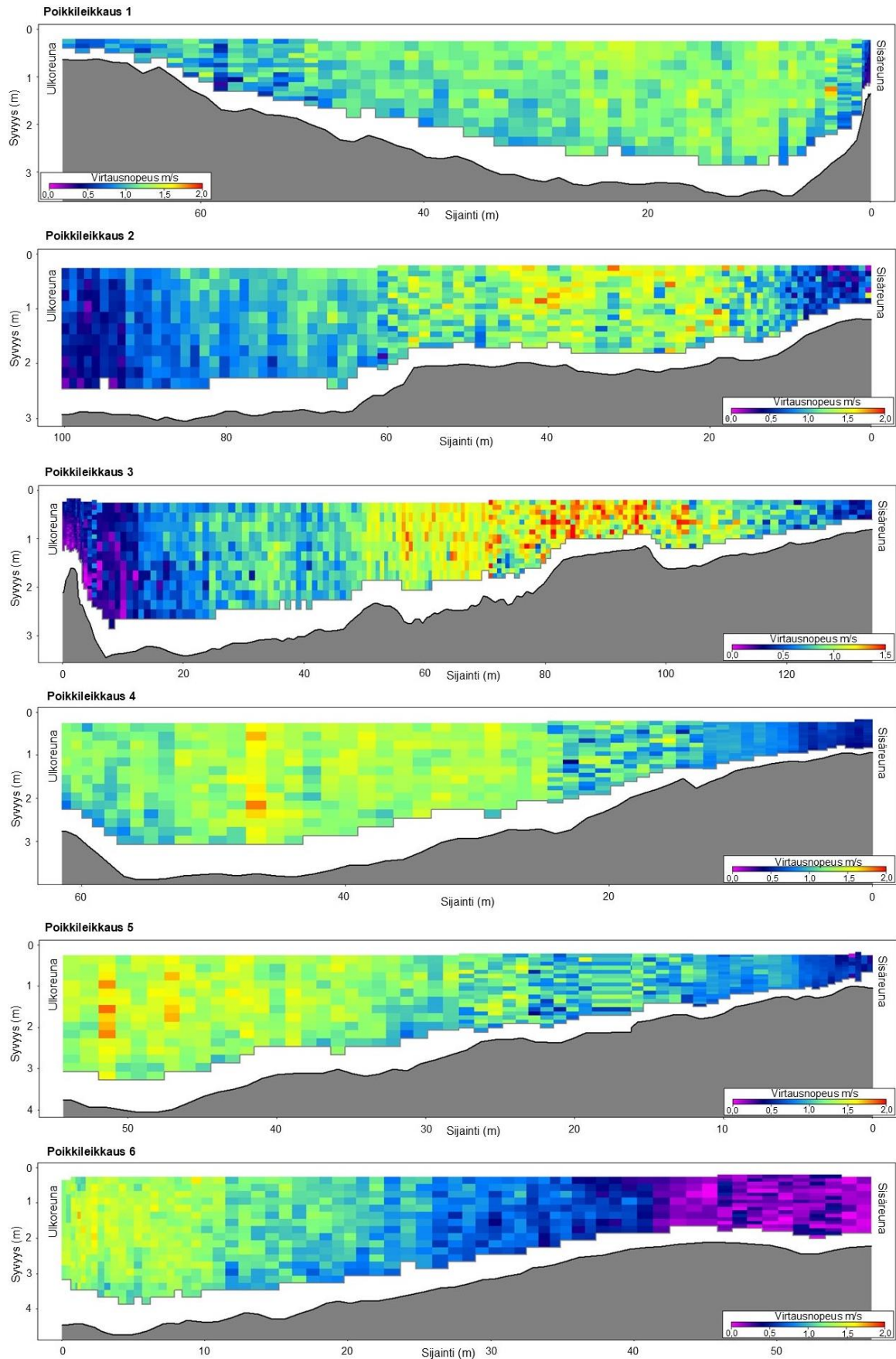
Poikkileikkauksella 3 virtausnopeus on suurin särkän päällä, samoin kuin kahden ensimmäisen päivän mittauksissa. Nopean virtauksen solu on havaittavissa koko vesipatsaan korkeudella (kuva 25). Virtausnopeus on suurimmillaan 1,33 m/s ja hidastuu kohti poikkileikkauksen ulkoreunaa. Hitaimmat virtausnopeudet sijaitsevat aivan poikkileikkauksen ulkoreunalla.

Poikkileikkauksella 4 nopean virtauksen solu sijaitsee poikkileikkauksen syvimmissä osassa vesipatsaan keskikerroksissa (kuva 25). Suurin mitattu keskiarvoinen virtausnopeus on 1,52 m/s (taulukko 6). Hitaimmat virtausnopeudet sijaitsevat poikkileikkauksen sisäreunalla särkän päällä.

Nopean virtauksen solu on muodostunut uoman syvimmän kohdan alueelle vesipatsaan keskikerroksiin lähelle ulkoreunaa poikkileikkauksella 5 (kuva 25). Suurin mitattu virtausnopeus on

1,53 m/s. Poikkileikkauksen matalimmalla alueella särkän päällä virtausnopeus on hieman nopeampi kuin poikkileikkauksella 4.

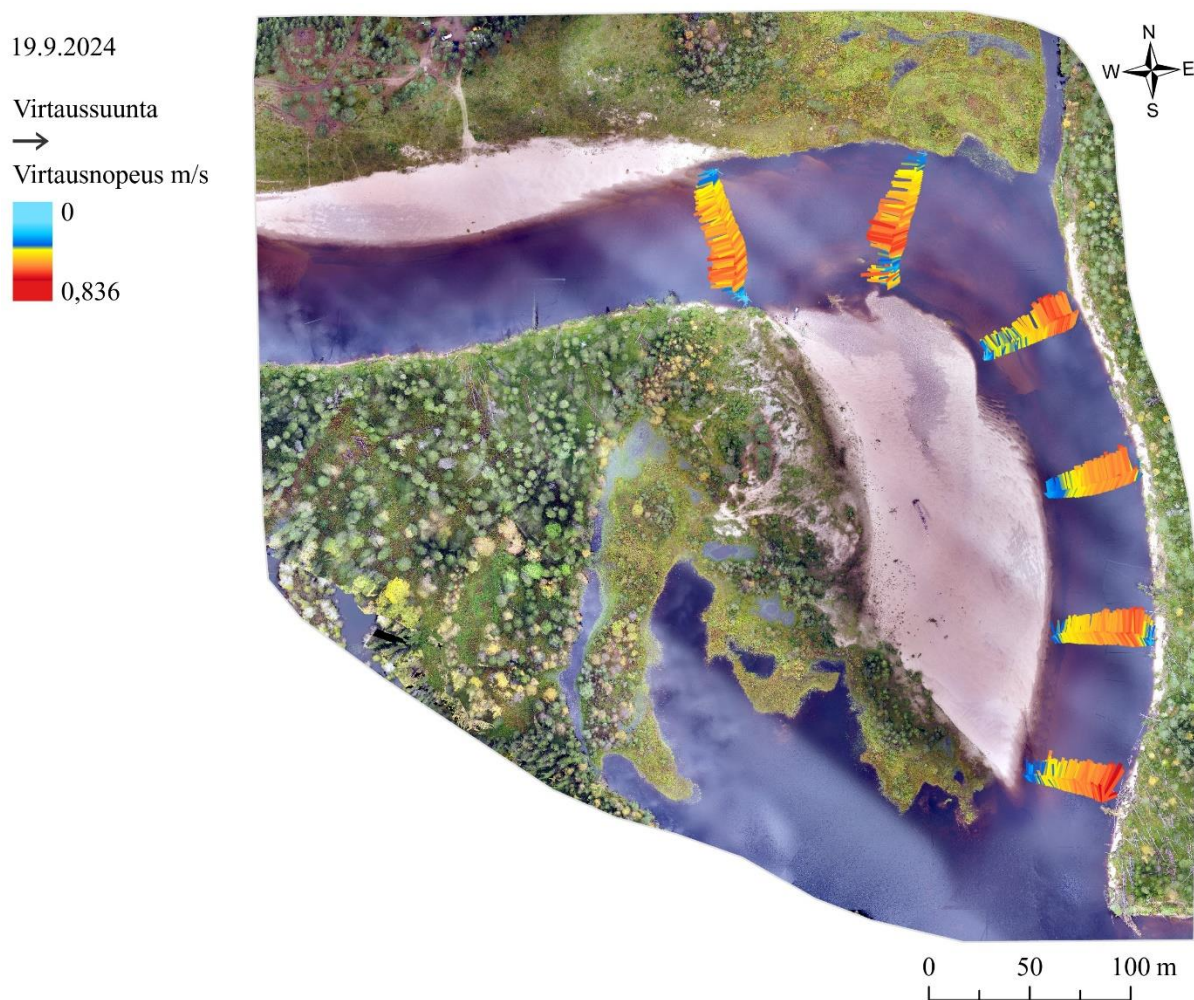
Poikkileikkauksella 6 nopean virtauksen solu sijaitsee syvimmässä kohdassa vesipatsaan keskikerroksissa samoin kuin mittausjakson toisena päivänä (kuva 25). Suurin mitattu virtausnopeus on 1,41 m/s. Hitaimmat mitatut keskiarvoiset virtausnopeudet sijaitsevat uoman sisäreunalla. Poikkileikkauksen syvin kohta on 4,73 m (taulukko 6).



Kuva 25. Kevään mittausjakson viimeisenä päivänä 24.5. ADCP:llä mitatut virtausnopeudet poikkileikkauksittain. Virtaussuunta on jokaisella poikkileikkauksella lukijasta poispäin.

5.1.3 Virtausolosuhteet syksyllä

Poikkileikkaus 1 on syksyllä mitattu noin 140 metriä alavirran suuntaan verrattuna talven ja kevään mittauksiin (kuva 26). Tässä kohdassa uoma on hieman leveämpi ja matalampi kuin kohta missä syksyn ja talven mittaukset on tehty. Syksyllä virtaussuunta poikkileikkauksella 1 on itään. Kevään viimeisenä mittauspäivänä virtaus suuntautui koillisen ja idän väliin eli syksyn virtaussuunta poikkeaa syksyllä hieman kevään virtaussuunnasta poikkileikkauksella 1. Poikkileikkauksella 2 virtaus suuntautuu idän ja kaakon väliin. Poikkileikkauksella 3 virtaussuunta on kaakkoon ja poikkileikkauksella 4 kaakon ja etelän väliin. Poikkileikkauksella 5 virtaussuunta on etelään ja poikkileikkauksella 6 virtaussuunta on etelän ja lounaan väliin.



Kuva 26. Jäkälämutkan virtaussuunnat ja virtausnopeudet syksyllä poikkileikkauksittain. Suurimmat virtausnopeudet sijaitsevat poikkileikkauksella kaksi poikkileikkauksen keskikohdalla. Poikkileikkaukselta 3 alkaen alajuoksun suuntaisesti suurimmat virtausnopeudet sijaitsevat uoman ulkoreunalla. Ilmakuva: Linnea Blåfield 2024

Syksyllä syvin kohta poikkileikkauksella 1 on 1,65 m (taulukko 7). Poikkileikkauksessa suurimmat keskiarvoiset virtausnopeudet sijaitsevat syvimmän kohdan alueella. Maksimivirtausnopeus on 0,72 m/s ja se sijoittuu lähelle vedenpintaa (kuva 27). Nopean virtauksen solu ei ole selkeästi havaittavissa. Koko poikkileikkauksen leveydeltä on erotettavissa nopeampia virtauspulsseja. Poikkileikkauksen syvin kohta sijoittuu uoman keskikohdan ja sisäreunan välille. Hitaimmat virtausnopeudet sijoittuvat poikkileikkauksen sisä- ja ulkoreunalle. Pienin mitattu keskiarvoinen virtausnopeus on 0,002 m/s.

Taulukko 7. Syksyllä mitatut tunnusluvut poikkileikkauksittain.

	Syvin kohta (m)	Keskiarvoinen virtausnopeus m/s (max)	Keskiarvoinen virtausnopeus m/s (min)
Poikkileikkaus 1	1,65	0,72	0,002
Poikkileikkaus 2	1,44	1,04	0,029
Poikkileikkaus 3	2,47	0,74	0,048
Poikkileikkaus 4	2,40	0,75	0,011
Poikkileikkaus 5	2,24	0,72	0,033
Poikkileikkaus 6	2,81	0,83	0,026

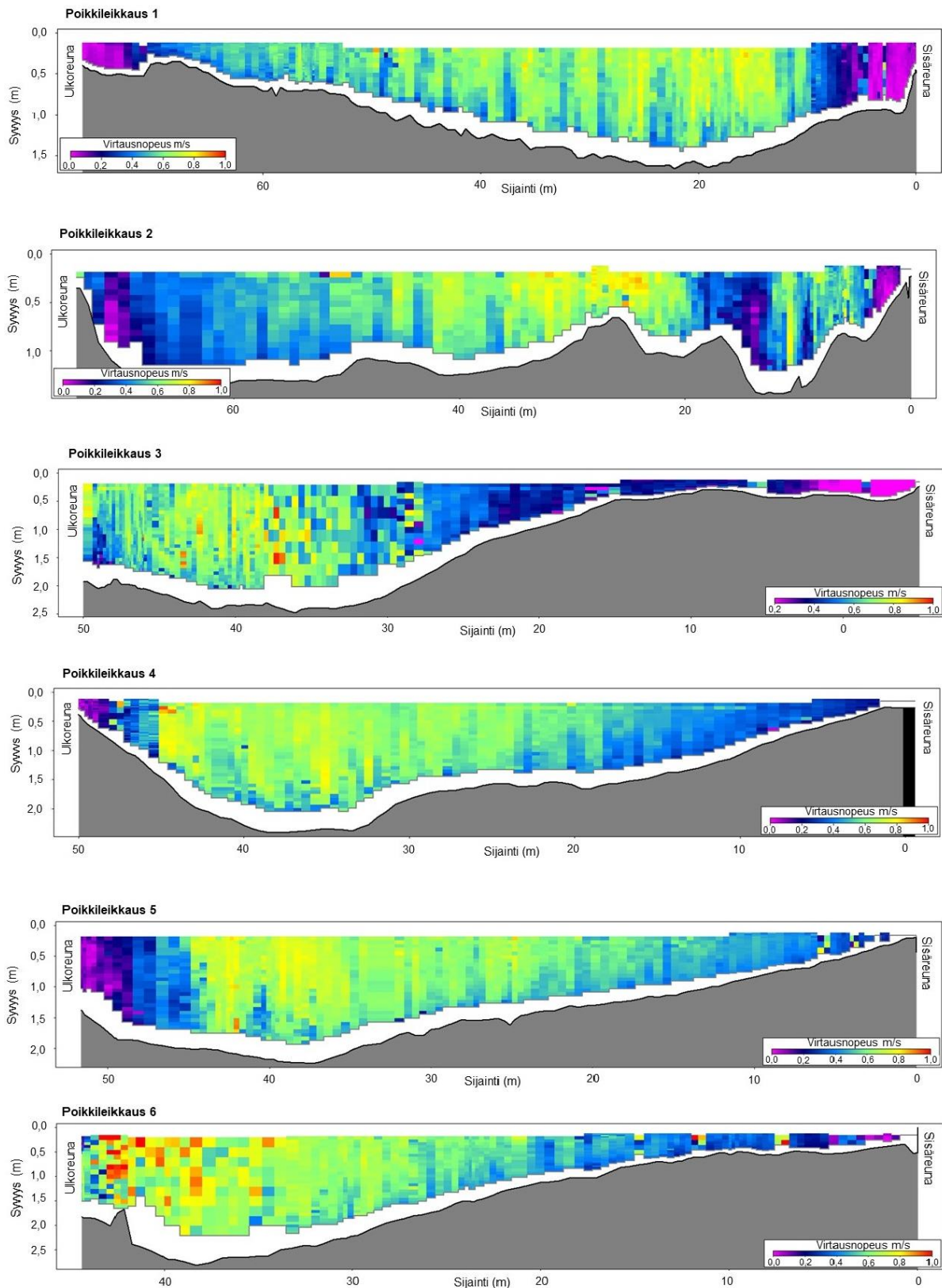
Poikkileikkauksen 2 syvin kohta 1,44 m sijaitsee lähellä poikkileikkauksen sisäreunaa (kuva 27). Syvimmän kohdan ja poikkileikkauksen keskikohdan väliin sijoittuu kohouma, jonka kohdalle myös nopean virtauksen solu sijoittuu vesipatsaan ylimpiin kerroksiin. Suurimmat virtausnopeudet ovat tässä kohdassa lähellä vedenpintaa ja suurin mitattu keskiarvoinen virtausnopeus on 1,04 m/s mikä on myös nopein kaikista syksyn poikkileikkauksilta mitatuista nopeuksista (taulukko 7). Sisäreunalla sijaitsevan syvän kohdan keskikohdasta sisäreunaan suuntaan sijaitsee toinen nopean virtauksen rakenne. Tämän ja nopean virtauksen solun välisellä alueella on hitaamman virtauksen alue, mikä mahdollisesti syntyy kohouman reunan muodostaman kitkan vaikutuksesta.

Poikkileikkauksella 3 nopean virtauksen solu sijoittuu syvimmän kohdan ja ulkoreunan väliselle alueelle vesipatsaan ylimpiin kerroksiin (kuva 27). Poikkileikkauksen syvin kohta on 2,47 m (taulukko 7). Nopein keskiarvoinen virtausnopeus on 0,74 m/s. Virtausnopeus on poikkileikkauksen sisäreunan matalilla alueilla hitaampaa kuin ulkoreunan syvemmillä alueilla. Tämä poikkeaa kevään mittausjaksosta, koska tuolloin virtausnopeudet olivat nopeimmat sisäreunan puolella ja hitaimmat ulkoreunalla.

Poikkileikkauksella 4 nopeimmat virtausnopeudet sijaitsevat poikkileikkauksen keskikohdan ja ulkoreunan välisellä syvimmällä alueella (kuva 27). Syvin kohta on 2,4 m. Suurin keskimääräinen virtausnopeus on 0,75 m/s (taulukko 7). Nopean virtauksen solu on havaittavissa poikkileikkauksen keskiosassa vesipatsaan keskikerroksissa.

Poikkileikkauksella 5 suurimmat keskiarvoiset virtausnopeudet ja nopean virtauksen solu sijaitsevat uoman syvimmässä osassa ulkoreunan läheisyydessä vesipatsaan ylimmissä kerroksissa (kuva 27). Suurin keskiarvoinen virtausnopeus tällä poikkileikkauksella on 0,72 m/s (taulukko 7). Aivan poikkileikkauksen ulkoreunalla virtausnopeus laskee nollaan.

Poikkileikkauksen 6 aivan ulkoreunan läheisyydestä ei ole saatavilla mittaustuloksia. Nopean virtauksen solu sijaitsee poikkileikkauksen syvimmässä osassa lähellä ulkoreunaa vesipatsaan keskikerroksissa (kuva 27). Suurin keskiarvoinen virtausnopeus tällä alueella on 0,836 m/s. Poikkileikkauksella 6 sijaitsee meanderikaarteen syvin kohta, joka on 2,81 m (taulukko 7). Kevään ensimmäisen mittauspäivän ja syksyn mittauspäivän erotus syvimmän kohdan osalta on 3,34 m.



Kuva 27. Syksyllä mitatut virtausnopeudet poikkileikkauksittain. Virtaussuunta on jokaisella poikkileikkauksella lukijasta poispäin.

5.1.4 Erot virtausolosuhteissa vuodenaikojen välillä

Virtausolosuhteet vaihtelevat tutkimusalueella merkittävästi eri vuodenaikoina. Kevään mittausjakson ensimmäisenä päivänä ja talven mittausjaksolla poikkileikkauksella 1 mitatun syvimmän kohdan välinen erotus on 3,5 m. Talven ja syksyn mittausjaksolla poikkileikkauksen 1 syvyydessä on 1 cm:n ero eli ne ovat lähes samat (taulukko 3, taulukko 7). Ero voi johtua mitalaitteistosta tai mittausolosuhteista.

Kevään ensimmäisen päivän virtaama on noin 372 m³/s ja talvella noin 6 m³/s. Keväällä virtaama on noin 366 m³/s suurempi kuin talvella. Syksyn mittausjaksolla virtaama on noin 37 m³/s, joka on 335 m³/s pienempi kuin keväällä. Talven virtaama on noin 31 m³/s syksyn virtaamaa pienempi.

Maksimivirtausnopeus 0,32 m/s sijaitsee talven virtausolosuhteissa poikkileikkauksella 2 (taulukko 3). Virtausnopeuksissa ei ole talven olosuhteissa merkittäviä eroja. Kevään ensimmäisenä mittauspäivänä maksimivirtausnopeudet sijaitsevat poikkileikkauksilla 2 1,63 m/s ja 6 1,64 m/s (taulukko 4). Mittaustulos on siis lähes sama. Talven olosuhteisiin verrattuna erotus poikkileikkauksella 2 on 1,31 m/s. Syksyn virtausolosuhteissa maksimivirtausnopeus sijaitsee poikkileikkauksella 2 1,04 m/s, joka on 0,59 m/s pienempi kuin kevään ensimmäisenä mittauspäivänä ja 0,72 m/s suurempi kuin talven mittausjaksolla. Jääpeitteen vaikutuksesta talven virtausnopeudet ovat vesipatsaan yläosassa hitaammat kuin avoimen uoman aikana.

Jokaiselle mittausjaksolle lasketun Reynoldsin luvun (Re) mukaan virtaus on pyörteistä kevään mittausjaksolla (taulukko 8). Talven virtaus on laminaarista. Talven virtausolosuhteissa Re on pienin ja syksyn virtausolosuhteissa toiseksi pienin. Suurin Re on kevään mittausjakson ensimmäisenä päivänä. Kevään mittausjaksolla Re on pienin viimeisenä mittauspäivänä.

Taulukko 8. Reynoldsin luku Jäkälämutkassa kaikille mittausjaksoille laskettuna.

	Reynoldsin luku
23.–25.2.	307
19.5.	5344
20.5.	5210
24.5.	3923
19.9.	1508

Nopean virtauksen solu on syksyllä poikkileikkauksella 1 lähimpänä uoman sisäreunaa (taulukko 9). Kevään mittausjakson ensimmäisenä päivänä poikkileikkauksella 2 nopean virtauksen solu virtaa särkän päällä 96 m jokiuoman ulkoreunasta. Talvella nopean virtauksen solu sijaitsee 9 metrin päässä uoman ulkoreunasta eli se siirtyy kevään virtausolosuhteissa 87 metriä uoman sisäreunan suuntaan poikkileikkauksella 2. Syksyllä nopean virtauksen solun sijainti on 47 m uoman ulkoreunasta eli 49 m lähempänä ulkoreunaa kuin kevään tulvan aikana. Talven virtausolosuhteissa nopean virtauksen solu siirtyy lähemmäs jokiuoman ulkoreunaa poikkileikkauksella 2 ja syksyllä poikkileikkauksella 3. Kevään virtausolosuhteissa nopean virtauksen solu siirtyy kohti uoman ulkoreunaa poikkileikkauksella 4. Keväällä ja syksyllä meanderikaarteen alajuoksun puolella poikkileikkauksilla 5 ja 6 nopean virtauksen solu sijaitsee lähempänä uoman ulkoreunaa kuin talvella. Poikkileikkauksella 6 nopean virtauksen solu sijaitsee keväällä lähempänä uoman ulkoreunaa kuin syksyllä.

Taulukko 9. Nopean virtauksen solun sijainti jokaisella mittausjaksolla uoman ulkoreunasta mitattuna.

Nopean virtauksen solun etäisyys uoman ulkoreunasta (m)					
	23.–25.2.	19.5.	20.5.	24.5.	19.9.
Poikkileikkaus 1	39	28	17	32	48
Poikkileikkaus 2	9	96	85	83	47
Poikkileikkaus 3	16	80	83	83	11
Poikkileikkaus 4	13	70	53	17	5
Poikkileikkaus 5	14	10	13	11	10
Poikkileikkaus 6	14	6	8	8	10

6 Keskustelu

6.1 Virtausolosuhteiden vuodenaikainen vaihtelu

Pohjoisilla alueilla sijaitsevien jokien virtausolosuhteet voivat vaihdella voimakkaasti vuodenaikojen mukaan (Gautier ym. 2018). Talven virtaus on vähäistä ja keväällä tulvan aikana virtaama voi kasvaa jyrkästi. Talven virtaamaan verrattuna kevättulvan aikainen virtaama voi olla kymmenkertainen. Tässä tutkimuksessa havaittiin, että kevättulvan aikainen virtaama Jäkälämutkassa oli suurimmillaan yli 60 kertaa suurempi kuin talven virtaama. Korkeilla leveysasteilla jokiin vaikuttavat erityisesti kylmä ilmasto, lyhytkestoiset vuodenaajat ja voimakas kausivaihtelu (Heino ym. 2020). Nämä tekijät vaikuttavat myös Oulankajoen virtausolosuhteisiin.

Jäänalaiset virtausnopeudet ovat hitaampia verrattuna syksyn avouomatilanteeseen (Lotsari ym. 2017). Myös tässä tutkimuksessa mitatut virtausnopeudet olivat pienempiä talvella kuin syksyllä. Kevään virtausnopeudet olivat kaikista suurimmat. Talven ja syksyn virtausolosuhteissa mitatuista keskiarvoisista virtausnopeuksista suurimmat esiintyivät poikkileikkauksella kaksi. Virtauksen jatkuvuus -teorian mukaisesti virtausnopeus kasvaa, kun uoman poikkileikkausala pienentyy (Charlton 2008:76). Poikkileikkauksen kaksi kohdalla sijaitsee uoman matalin kohta, jonka takia uoman poikkileikkausala on tässä kohdassa todennäköisesti suurimmillaan mikä vaikuttaa virtausnopeuteen hidastavasti. Talvella virtausnopeudet olivat huomattavasti hitaampia nopeanvirtauksen solun ja jääkannen välisellä alueella vesipatsaan yläosassa. Todennäköisesti tämä johtuu jääpeitteen ja vedenpinnan välille muodostuvasta kitkasta, koska samanlaista hitaamman virtauksen kerrosta ei esiintynyt kevään ja syksyn mittausjaksolla.

Avoimen uoman ja jääpeitteen virtausolosuhteissa esiintyy muutaman sekunnin kestoisia nopeita virtauspulsseja (Lotsari ym. 2020). Virtauspulsseja esiintyy yleensä virtausprofiilin raja-kerroksissa ja meanderikaarteissa ne ovat selkeimmin havaittavissa yläjuoksun puolella. Myös Jäkälämutkassa tällaisia virtauspulsseja havaittiin kevään ja syksyn tuloksissa poikkileikkauksella 1. Kämärin ym. (2017) tutkimuksessa havaittiin, että pyörteisyys on voimakkainta kevättulvien ja jäiden hajoamisen aikana. Tässä tutkimuksessa virtauksen havaittiin olevan pyörteistä kevään mittausjaksolla ja voimakkainta kevättulvan ensimmäisenä päivänä (taulukko 8). Kämärin ym. (2017) tutkimuksessa havaittiin lisäksi, että jääpeite lisää pyörteisyyttä. Tässä tutkimuksessa virtaus oli laminaarista talven mittausjaksolla, mikä poikkeaa Kämärin ym. (2017) havainnoista.

Samoin kuin Kasvin ym. (2017) tutkimuksessa myös tässä tutkimuksessa nopean virtauksen solu sijaitsee kevättulvan aikana yläjuoksun puolella sisäreunalla ja siirtyi kaarteeseen keskiosassa ulkoreunalle. Tässä tutkimuksessa havaittiin myös, että meanderikaarteeseen keskikohdalla sijaitsee vaihettumisvyöhyke, jossa nopean virtauksen solu ei ole niin selkeästi havaittavissa kuin meanderikaarteeseen ylä- ja alapuolisella alueella. Samanlainen vaihettumisvyöhyke havaittiin myös talven virtausolosuhteissa. Talvella kyseinen vyöhyke sijaitsee meanderikaarteeseen kärjen yläjuoksun puolelle sijoittuvalla matalimmalla alueella. Vesi pyrkii virtaamaan meanderikaarteeseen suoraan, mutta meanderikaarteeseen pakottaa virtauksen muuttamaan suuntaa (Knighton 1998:217). Vedenpinta ulkoreunalla nousee, koska keskipakovoima työntää vettä ulkoreunalle. Sisä- ja ulkoreunan välille muodostuu paine-ero, jonka seurauksena vesi virtaa nopeammin ulkoreunalla. Tässä tutkimuksessa kevättulvan aikana havaittu vaihettumisvyöhyke sijoittuu särkän kärjen alueelle todennäköisesti siksi, että tulvan aikana vedenpinta on korkeammalla ja virtausnopeus on suurempi. Kun nopean virtauksen solu ylittää särkän ja saavuttaa jokiuoman, virtausnopeus hidastuu ja nopean virtauksen solu alkaa vaihettua ulkoreunalle, jossa virtausnopeus jälleen kasvaa. Talven virtausolosuhteissa vaihettumisvyöhykkeen syntyyn voi vaikuttaa jääpeitteen aiheuttama kitka ja särkän reunan muodostama paine. Syksyn tuloksissa tällaista vaihettumisvyöhykettä ei havaittu.

Jäkälämutkassa talven virtausolosuhteissa nopean virtauksen solu sijaitsee vesipatsaan keskikerroksissa, kun taas avouomatilanteissa nopean virtauksen solu sijaitsee lähempänä vedenpintaa. Tulokset nopean virtauksen solun sijainnista ovat samanlaiset Kasvin ym. (2017) ja Lotsarin ym. (2017) havaintojen kanssa. Demersin ym. (2011) ja Lotsarin ym. (2017) tutkimuksissa jääpeitteen aikana havaittuja kahta päällekkäin virtaavaa helikoidin muotoista virtaussolua ei havaittu Jäkälämutkassa. Lotsarin ym. (2017) mukaan virtausnopeudet hidastuvat talvella meanderikaarteeseen kärjen jälkeen, kun virtaus saavuttaa uoman syvimmän kohdan. Lisäksi suurimmat virtausnopeudet esiintyvät talvella vesipatsaan keskikerroksissa. Jäkälämutkassa tapahtui samanlainen hidastuminen ja suurimmat virtausnopeudet esiintyivät vesipatsaan keskikerroksissa seuraten meanderikaarteeseen syvintä kohtaa. Virtaussuunta on meanderikaarteeseen pinnalla ulkoreunaa kohti, mutta pohjalla se liikkuu takaisin sisäreunaa kohti (Knighton 1998:217). Tässä tutkimuksessa virtaussuunnista laskettiin mediaaniarvot koko vesipatsaan syvyydeltä. Jotta eroja pinnan ja pohjan välisissä virtaussuunnissa voitaisiin havaita, tulisi virtaussuuntia tarkastella vesipatsaan eri kerroksissa.

Ilmastonmuutoksen myötä pienetkin lämpötilan nousut voivat lyhentää jääpeiteajan kestoa ja heikentää jään kestävyyttä (Burrel ym. 2023). Samalla jääpeitteen muodostumis- ja sulamisajankohdat voivat muuttua ja talven virtaamat suurentua. Oulankajoella keskilämpötilojen on havaittu nousseen ja kevään aikaistuneen (Blåfield ym. 2024). Myös kevättulvien ajankohta on aikaistunut ja kesän sekä syksyn tulvien odotetaan lisääntyvän. Vaikka muualla Suomessa kevättulvat ovat pienentyneet, Oulankajoella tällaista kehitystä ei ole havaittu mikä johtuu todennäköisesti valuma-alueen ominaispiirteistä, kuten suuresta soiden määrästä, vähäisestä järvien määrästä ja jyrkästä topografiasta.

Koko meanderikaarten virtausolosuhteiden ja jokiuoman pohjan korkeuden mittaaminen jatkuvana mittauksena on tarkempi silloin kun halutaan tarkastella meanderikaarten geomorfologisia muutoksia (Kasvi ym. 2017). Tässä tutkimuksessa meanderikaarten virtausolosuhteet mitattiin poikkileikkauksittain. Talven mittausjaksolla kolmen päivän aikana mitattiin kaksi poikkileikkausta päivässä paikallaan pysyvänä mittauksena ja mittaustapa poikkeaa kevään sekä syksyn mittaustavasta. Koska talvella toteutettavat ADCP-mittaukset ovat aikaa vieviä, virtausolosuhteet ovat voineet muuttua ensimmäisen ja viimeisen mittauspäivän aikana. Kevään ja syksyn mittaukset toteutettiin yhden päivän aikana jokaiselta poikkileikkaukselta liikkuvana mittauksena.

Erityisesti sensorin läheisyydestä ja matalasta vedestä saatuja mittaustuloksia tulee arvioida kriittisesti, koska näillä alueilla on havaittu virheellisiä mittaustuloksia (Mueller ym. 2007). Tässä tutkimuksessa käytetty Sontekin M9-sensori ei pysty mittaamaan virtaukseen liittyviä parametrejä, jos vesipatsas on alle 30 cm syvä eikä syvyyttä, jos vesipatsas on alle 20 cm syvä (Sontek 2022). Kevään mittaustuloksiin voi vaikuttaa myös veneen nopeus suhteessa virtausnopeuteen. Jos vene liikkuu liian nopeasti suhteessa virtausnopeuteen, mittaus voi olla epätarkka. Jotta sensori pystyy mittaamaan virtausolosuhteet luotettavasti, tulee veneen nopeuden olla hitaampi kuin virtausnopeus. Kevään poikkileikkauksen 6 mittaustuloksiin vaikuttaa ulko-reunalle uomaan kaatuneet puut, jonka takia virtausolosuhteita ei pystytty mittaamaan koko poikkileikkauksen leveydeltä (kuva 13).

6.2 Muutokset virtausolosuhteissa kevättulvan aikana

Äärimmäiset hydrologiset tapahtumat vaihtelevat ilmasto-olosuhteiden vaihtelun ja ilmankäynnin muutosten mukaan (Costard 2014). Nämä aiheuttavat märkiä ja kuivia syklejä pohjoisilla joilla. Oulankajoen valuma-alueella korkeusvaihtelut ovat suuria, järviä on vähän ja turvemaita on paljon (Koutaniemi 1979). Valuma-alueella on myös talvisin paksu lumipeite ja talvisin maa

on roudassa. Nämä tekijät vaikuttavat erityisesti kevättulvien syntymiseen. Aikaisemman tutkimuksen mukaan terminen kevät on Oulankajoella aikaistunut 19 päivällä, vuotuinen lumisumma on vähentynyt ja kesän sademäärät ovat lisääntyneet (Blåfield 2024). On mahdollista, että kevättulvat aikaistuvat tulevaisuudessa ja kesän sekä syksyn tulvat tulevat yleistymään.

Suomessa tulvat syntyvät keväällä lumien sulamisen takia (Käyhkö ym. 2007). Lumen sulaminen alkaa yleensä aikaisemmin kuin roudan sulaminen ja lumi muuttuu suurimmaksi osaksi pintavalunnaksi (Park ym. 2024). Lumen sulamisen aiheuttaman pintavalunnan osuus kevään huippuvirtaaman aikana on 90 %. Viimeinen lumihavainto mitattiin neljä päivää ennen mittausjakson ensimmäistä päivää. Lumien sulamisvesillä oli siis suuri vaikutus kevään tulvan syntymisessä. Mittausjakson ensimmäisenä päivänä virtaama oli kevään mittausjakson suurin. Ensimmäisen ja viimeisen mittauspäivän välillä vedenkorkeus laski 1,42 m poikkileikkauksella 6. Toisen ja kolmannen mittauspäivän välillä virtaama pieneni kaksinkertaisesti verrattuna muihin päiviin mikä viittaa valunnan pienenemiseen.

Kevään virtausolosuhteissa mittausjakson kahtena ensimmäisenä päivänä suurimmat virtausnopeudet sijaitsivat poikkileikkauksella 6 ja toiseksi suurimmat virtausnopeudet sijaitsivat poikkileikkauksella 2. Kevään mittausjakson viimeisenä päivänä eli tulvan laskuvaiheessa keskiarvoinen virtausnopeus oli suurempi meanderikaarten alajuoksun puoleisilla poikkileikkauksilla. Virtauksen jatkuvuus -teorian mukaisesti virtausnopeuden pitäisi hidastua silloin kun poikkileikkauksala kasvaa (Charlton 2008:76). Virtausnopeus kasvaa poikkileikkauksella 6 todennäköisesti siksi, että vedenpinnan noustessa virtaus ei enää seuraa uomaa samalla tavalla kuin alhaisemmilla vedenkorkeuksilla, vaan kulkee suoraa reittiä särkän yli. Nopean virtauksen solu myös sijaitsee meanderikaarten yläjuoksulla vedenpinnan läheisyydessä, kun taas alajuoksulla se sijaitsee lähempänä pohjaa (Kasvi ym. 2017). Lisäksi alajuoksulla uoman reunojen vastus vaikuttaa pienempään osaan kokonaisvirtausmäärästä ja virtausnopeus pysyy vakiona tai kasvaa hieman (Knighton 1998). Jäkälämutkassa jokiuoma on alajuoksun puolella myös syvämpi kuin yläjuoksulla, mikä vähentää pohjan ja uoman reunojen aiheuttamaa kitkaa. Tämä edesauttaa virtausnopeuden kasvua siitä huolimatta, että poikkileikkauksala on suurentunut.

Tulvan aikana suurin virtausnopeus sijaitsee meanderikaarten yläjuoksulla sisäreunan puolella ja siirtyy alajuoksun puolella ulkoreunalle (Abhari ym. 2010). Suurin virtausnopeus siirtyy uoman ulkoreunalle siinä kohdassa, jossa sekundäärinen virtaus on voimakkaimmillaan. Jäkälämutkassa nopean virtauksen solu liikkui samalla tavalla kevään mittausjakson viimeisenä päi-

vänä. Shafaei ym. (2025) havaitsivat tutkimuksessaan, että tulvan aikana keskiarvoinen virtausnopeus on hitaampi uoman sisällä kuin normaalitilanteessa ja tulvan aikana suurimmat virtausnopeudet sijaitsivat yläjuoksun puolella sisäkaarteessa. Kevättulvan aikana Jäkälämutkassa virtausnopeudet olivat ensimmäisenä ja toisena mittauspäivänä suurimmat yläjuoksun matalimmalla alueella ja alajuoksulla meanderikaarten syvimmällä alueella. Maksimivirtausnopeudet sijaitsivat särkän päällä yläjuoksun puolella ja alajuoksulla uoman ulkoreunalla. Viimeisenä mittauspäivänä suurimmat virtausnopeudet sijaitsivat meanderikaarten kärjen kohdalla ja sen alajuoksun puolella.

Nopean virtauksen solu siirtyi ensimmäisenä mittauspäivänä virtaamalla särkän päällä meanderikaarten kärjen kohdalle, josta se siirtyi uoman ulkoreunalle kärjen jälkeen. Toisena mittauspäivänä nopean virtauksen solu sijaitsi yläjuoksun puolella osittain särkän päällä ja osittain uoman puolella virraten uoman ulkoreunalle särkän kärjen jälkeen. Viimeisenä mittauspäivänä nopean virtauksen solu sijaitsi aivan uoman sisäreunassa ja ennen meanderikaarten kärkeä se siirtyi osittain särkän päälle. Särkän kärjen jälkeen se siirtyi ulkoreunalle. Nopean virtauksen solun sijainti siis muuttuu kevättulvan aikana sivuttaissuunnassa yhdessä vedenpinnan laskun ja virtaaman pienenemisen kanssa. Samanlaiset muutokset nopean virtauksen solun sijainnissa havaitsivat myös Kasvi ym. (2013). Tässä tutkimuksessa nopean virtauksen solun sijainnin havaittiin sijaitsuvan kevättulvan ensimmäisinä päivinä syvemmällä vesipatsaassa kuin mitä viimeisenä päivänä. Viimeisenä mittauspäivänä nopean virtauksen solu sijaitsi lähempänä pintaa, mikä viittaa vedenpinnan laskun aiheuttaman pohjan ja reunojen kitkan suurenemiseen.

6.3 Kevättulvan vaikutukset jokiuoman geomorfologiaan

Borealisilla alueilla merkittävin hydrologinen tapahtuma vuoden aikana on kevättulva (Korhonen 2007). Tulvan laskuvaiheen on havaittu olevan nousuvaihetta tärkeämpi tekijä jokien kehityksessä, koska laskuvaihe kestää nousuvaihetta pidempään (Kärkkäinen & Lotsari 2022). Jäkälämutkassa uoman sedimenttiaineksen D_{50} -arvo vaihtelee välillä 125,1–699,7 μm . Hjulströmin (1935) diagrammin mukaisesti kyseinen raekoko erodoituu ja lähtee liikkeelle, kun virtausnopeus on 0,1–0,3 m/s. Kahden ensimmäisen päivän aikana suurimmat kulutusvoimat sijaitsivat meanderikaarten yläjuoksulla sisäreunalla ja särkän päällä. Alajuoksulla suurimmat kulutusvoimat kohdistuivat uoman syvimpään osaan ulkoreunan läheisyyteen. Samoin kuin Kasvin ym. (2013) tutkimuksessa myös Jäkälämutkassa särkän yläosassa nopean virtauksen solun virtauskohdassa sedimentin raekoko oli ympäröiviä alueita suurempaa (kuva 13a).

Jäkälämutkassa särkän yläosan kohdalla sijaitsee uoman matalin alue ja särkän kärjen jälkeen alajuoksulla sijaitsee uoman syvin osuus. Tämä viittaa samanlaiseen kulutuskausaan prosessiin, minkä Dietrich & Smith (1984) havaitsivat. Heidän mukaansa meanderikaarten yläjuoksun puoleisella alueella suuret partikkelit vierivät painovoiman vaikutuksesta ulkoreunan suuntaan. Kasvin ym. (2013) mukaan ulospäin suuntautuvan virtauksen tehostamana syvänteeseen vierivät partikkelit aiheuttavat lisäksi eroosiota ulkoreunalla. Meanderikaarten yläjuoksun puolelle jokiuomaan kasaantuu hitaammilla virtausnopeuksilla jokiuoman yläjuoksun alueilta irronnutta sedimenttiä.

Engelin ja Rhoadsin (2017) mukaan turbulenssi meanderikaarteessa syntyy kaarevuuden vaikutuksesta ja on suurinta kaarten ulkoreunalla. Suuret esteet meanderikaarteessa, esimerkiksi törmän sortumat tai kaatuneet puut, häiritsevät kaarevuuden aiheuttamaa turbulenssia pienentämällä virtausnopeuksia ja turbulenttisia jännityksiä esteen välittömässä läheisyydessä. Tämän takia on mahdollista, että törmien eroosio vähentyy uomaan kaatuneiden puiden tai törmän sortumien alueilla. Engelin ja Rhoadsin (2017) tutkimukseen perustuen voidaan siis olettaa, että Jäkälämutkassa alavirran puolen poikkileikkauksilla havaitut kaatuneet puut voivat ehkäistä eroosiota uoman ulkoreunalla. Toisaalta niiden juuret sitovat sedimenttiä ja juurineen irronneiden puiden vaikutus voi olla päinvastainen.

Tässä tutkimuksessa havaittiin, että nopean virtauksen solu sijoittuu kevättulvan aikana meanderikaarten alajuoksulla lähelle ulkoreunaa (taulukko 9). Vastaavanlaisen havainnon nopean virtauksen solun sijainnista ovat esittäneet aiemmin myös Kasvi ym. (2017) (kuva 6). Meanderikaarten ulkoreunan suuremmat virtausnopeudet aiheuttavat suurempaa eroosiota, mikä saattaa Jäkälämutkan alueella johtaa ulkoreunan sortumaan. Keskipakoisvoiman ja sisäreunan pienempien virtausnopeuksien takia eroosion myötä irronnut sedimentti voi kulkeutua ja kasautua meanderikaarten sisäreunalla sijaitsevalle särkälle. Meanderikaarten ulkoreunan sortuman yhteyden sedimentin kasautumiseen särkälle ovat aikaisemmin kuvanneet Zhao ym. (2021). Samassa tutkimuksessa havaittiin myös, että mutkien kaarevuus kasvaa mutkien siirtymisen ja venymisen takia. Kun mutkan kaarevuus kasvaa, reunan romahtaminen on todennäköisempää niissä kohdissa, missä pohjan leikkausjännitys saavuttaa maksimin. Törmien romahtamisen havaittiin myös olevan yhteydessä mutkien lyhytaikaiseen vaeltamiseen. Tässä tutkimuksessa analysoitiin keskiarvotettuja virtausnopeuksia vesipatsaasta eikä tämän aineiston perusteella voida täysin luotettavasti arvioida pohjan virtausnopeuksia. ADCP ei myöskään mittaa virtausolosuhteita, jos vesipatsas on alle 30 cm syvä.

Blåfieldin ym. (2024) tutkimuksessa havaittiin, että Jäkälämutkan ulkokaarteen siirtymisnopeus on kolme kertaa nopeampi kuin Oulankajoessa ylävirralla sijaitsevan meanderikaarteen siirtymisnopeus. Samassa tutkimuksessa havaittiin lisäksi, että jokiuoman liikkuminen ja eroosion määrä olivat suurimpia sellaisina vuosina, joina lumen akkumulaatio ja kevättulvien virtaamat olivat suurimpia. Jäkälämutkassa meanderikaarre on erodoitunut ulkoreunalta ja kaarteen jälkeen alavirran puolella sijaitsee kohouma. Kohouman muodostanut aines voi olla meanderin ulkokaarteesta erodoitunutta sedimenttiä. Jotta kevättulvan aiheuttamia muutoksia voitaisiin tarkastella luotettavasti, tulisi sedimentin raekokojakauma tutkia ennen ja jälkeen tulvan. Tässä tutkimuksessa aineistona käytettiin ainoastaan ADCP:llä poikkileikkauksittain mitattuja virtausnopeuksia. Kattava mittaus koko meanderikaarteen alueelta tulvan aikana antaisi luotettavamman kuvan eroosio ja laskeuma-alueista.

7 Johtopäätökset

Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää millaiset ovat Oulankajoen vuodenaikaiset virtausolosuhteet yhden meanderikaarteen alueella ja miten kevättulva vaikuttaa sedimentin liikkeellelähtoon jokiuomassa. Virtausolosuhteiden tarkastelussa käytettiin Oulankajoen Jäkälämutkasta ADCP:llä poikkileikkauksittain kerättyä aineistoa. Tulosten perusteella voidaan tehdä seuraavat johtopäätökset:

- Virtaama ja vedenkorkeus vaihtelee boreaalisissa ja subarktisisissa joissa voimakkaasti vuodenaikojen mukaan. Oulankajoella tehtyihin mittauksiin perustuen voidaan sanoa, että talvella jääkansi hidastaa erityisesti pinnanläheisiä virtausnopeuksia. Avoimen uoman aikana suurimmat virtausnopeudet sijoittuvat meanderikaarteen yläjuoksun matalimmalle osalle ja alajuoksun syvimmälle osalle. Talven virtausolosuhteissa virtausnopeudet hidastuvat meanderikaarteen kärjen jälkeen. Kevättulvan aikana virtaama on Oulankajoella yli 60 kertaa suurempi kuin talven virtausolosuhteissa.
- Nopean virtauksen solu sijaitsee jääpeitteen aikana vesipatsaan keskikerroksissa, kun taas avouomatilanteessa se sijaitsee lähempänä vedenpintaa. Nopean virtauksen solu seuraa talven ja syksyn virtausolosuhteissa meanderikaarteen syvintä osaa, virraten yläjuoksulla uoman sisäreunalla ja siirtyen ennen kaarteen kärkeä ulkoreunalle. Kevättulvan aikana nopean virtauksen solu virtaa särkän yli ja siirtyy ulkoreunalle meanderikaarteen kärjen kohdalla. Talven ja kevään mittauksissa havaittiin vaihtumisvyöhyke, joka liittyy nopean virtauksen solun sijainnin muutokseen. Syksyn virtausolosuhteissa tätä ei ollut havaittavissa.
- Kevään ja syksyn virtausolosuhteissa meanderikaarteen yläjuoksun puolella muodostuu muutaman sekunnin kestoisia virtauspulsseja, mutta jääpeitteen aikana tällaisia pulsseja ei havaittu.
- Kevättulvan ensimmäisinä päivinä suurimmat kulutusvoimat kohdistuvat meanderikaarteen yläjuoksulla sisäreunaan ja särkkään, kun taas alajuoksulla suurimmat kulutusvoimat kohdistuvat uoman syvimpään osaan ulkoreunan läheisyyteen. Ulkoreunan suurimmat virtausnopeudet voivat johtaa törmän sortumiin. Nopean virtauksen solun virtauskohdassa sedimentin raekoko oli suurempi, kuin ympäröivillä alueilla.

Ilmastonmuutoksen edetessä jokiuomien virtausolosuhteiden tutkimuksen merkitys korostuu entisestään. Virtausolosuhteet, jääpeiteajan kesto, lumien sulaminen ja kevättulvien ajoittuminen voivat muuttua, mikä voi vaikuttaa jokiuoman geomorfologiaan, sedimentin kulkeutumiseen sekä eliöyhteisöjen rakenteeseen. Erityisesti korkeilla leveysasteilla tapahtuvat muutokset voivat olla nopeita ja vaikeasti ennakoitavissa, mikä lisää alueellisesti yksityiskohtaisen ja ajallisesti toistuvan seurannan tarvetta. Jotta virtavesiä voidaan hallita ja suojella kestävästi myös tulevaisuudessa, tarvitaan pitkäaikaisia aikasarjoja, monipuolisia mittaamenetelmiä ja tarkempaa ymmärrystä virtausolosuhteista suhteessa ympäristöön. Akustiseen virtausprofiilimittaukseen perustuvat menetelmät antavat arvokasta tietoa virtausolosuhteista. Niiden rinnalle tarvitaan kuitenkin myös muita tutkimustapoja, esimerkiksi laserkeilausta, mallinnusmenetelmiä ja biologista seurantaa, jotta virtaavien vesien kokonaisvaltainen tarkastelu olisi mahdollista.

Kiitokset

Erityiskiitos ohjaajilleni väitöskirjatutkija Linnea Blåfieldille tuesta ja rakentavasta palautteesta sekä professori Petteri Alholle kaiken mahdollistamisesta. Kiitos myös Virtavesien ja Rannikkomaantieteen tutkimusryhmän jäsenille kenttätyöavusta. Lisäksi kiitos Karoliina Lintuselle avusta aineiston käsittelyssä ja Mandi Hannulalle vertaistuesta sekä hulvattomista hetkistä niin kellarissa kuin kentälläkin. Markus, kiitos että olet.

Lähteet

- Abhari, M.J., Ghodsian, M., Vaghefi, M. & Panahpur, N. (2010) Experimental and numerical simulation of flow in a 90° bend. *Flow Measurement and Instrumentation* 21(3) 292–298. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2010.03.002>
- Ancey, C. (2020) Bedload transport: a walk between randomness and determinism. Part 1. The state of the art. *Journal of Hydraulic Research* 58(1) 1–17. <https://doi.org/10.1080/00221686.2019.1702594>
- Anderson, A. (2009). *After the ice: Life, death, and geopolitics in the new Arctic*. Brockman, Inc.
- Belletti, B., Garcia de Leaniz, C., Jones, J., Bizzi, S., Börger, L., Segura, G., Castelletti, A., van de Bund, W., Aarestrup, K. & Barry, J. (2020) More than one million barriers fragment Europe's rivers. *Nature* 588(7838) 436–441. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-3005-2>
- Blåfield, L., Marttila, H., Kasvi, E. & Alho, P. (2024) Temporal shift of hydroclimatic regime and its influence on migration of a high latitude meandering river. *Journal of Hydrology* 633, 130935. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.130935>
- Blöschl, G., Hall, J., Parajka, J., Perdigão, R.A.P., Merz, B., Arheimer, B., Aronica, G.T., Bilibashi, A., Bonacci, O., Borga, M., Čanjevac, I., Castellarin, A., Chirico, G.B., Claps, P., Fiala, K., Frolova, N., Gorbachova, L., Gül, A., Hannaford, J., Harrigan, S., Kireeva, M., Kiss, A., Kjeldsen, T.T., Kohnová, S., Koskela, J.J., Ledvinka, O., Macdonald, N., Mavrova-Guirguinova, M., Mediero, L., Merz, R., Molnar, P., Montanari, A., Murphy, C., Osuch, M., Ovcharuk, V., Radevski, I., Rogger, M., Salinas, J.L., Sauquet, E., Šraj, M., Szolgay, J., Viglione, A., Volpi, E., Wilson, D., Zaimi, K. & Živković, N. (2017) Changing climate shifts timing of European floods. *Science* 357 (6351) 588–590. <https://doi.org/10.1126/science.aan2506>
- Burrell, B.C., Beltaos, S. & Turcotte, B. (2023) Effects of climate change on river-ice processes and ice jams. *International Journal of River Basin Management* 21(3) 421–441. <https://doi.org/10.1080/15715124.2021.2007936>
- Charlton, R. (2008) *Fundamentals of fluvial geomorphology*. Routledge, New York. 234 s.
- Costard, F., Gautier, E., Fedorov, A., Konstantinov, P. & Dupeyrat, L. (2014) An assessment of the erosion potential of the fluvial thermal process during ice breakups of the Lena River (Siberia). *Permafrost and Periglacial Processes* 25(3) 162–171. <https://doi.org/10.1002/ppp.1812>

- Demers, S., Buffin-Bélanger, T. & Roy, A.G. (2011). Helical cell motions in a small ice-covered meander river reach. *River Research and Applications* 27(9), 1118–1125. <https://doi.org/10.1002/rra.1451>.
- Dietrich, W. E., Smith, J.D. & Dunne, T. (1979) Flow and sediment transport in a sand bedded meander. *The Journal of Geology* 87(3) 305–315.
- Dietrich, W.E. & Smith, J.D. (1984) Bed load transport in a river meander. *Water Resources Research* 20(10) 1355–1380. <https://doi.org/10.1029/WR020i010p01355>
- Engel, F.L. & Rhoads, B.L. (2017) Velocity profiles and the structure of turbulence at the outer bank of a compound meander bend. *Geomorphology* 295 191–201. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.06.018>
- Flener, C., Wang, Y., Laamanen, L., Kasvi, E., Vesakoski, J. & Alho, P. (2015a) Empirical modeling of spatial 3D flow characteristics using a remote-controlled ADCP system: Monitoring a spring flood. *Water* 7(1) 217–247. <https://doi.org/10.3390/w7010217>
- Flener, C. (2015b). *Remote sensing for three-dimensional modelling of hydromorphology, PhD Thesis*. Turun yliopiston julkaisuja Annales Universitatis Turkuensis. <https://urn.fi/URN:ISBN:978-951-29-6109-2>
- Gautier, E., Dépret, T., Costard, F., Virmoux, C., Fedorov, A., Grancher, D., Konstantinov, P., & Brunstein, D. (2018) Going with the flow: Hydrologic response of middle Lena River (Siberia) to the climate variability and change. *Journal of Hydrology* 557 475–488. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.12.034>
- Gohari, A., Shahrood, A.J., Ghadimi, S., Alborz, M., Patro, E.R., Klöve, B. & Haghghi, A.T. (2022) A century of variations in extreme flow across Finnish rivers. *Environmental Research Letters* 17(12) 124027. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aca554>
- Gorelits, O.V., Kryjov, V.N., Rakcheeva, E.A. & Ermakova, G.S. (2022) Wintertime arctic oscillation harbinger of spring floods in mouth areas of the North-Eastern European rivers. *Water Resources* 49(5) 836–844. <https://doi.org/10.1134/S0097807822050049>
- Heino, J., Culp, J., Erkinaro, J., Goedkoop, W., Lento, J., Ruhland, K., & Smol, J.P. (2020) Abruptly and irreversibly changing Arctic freshwaters urgently require standardized monitoring. *The Journal of Applied Ecology* 57(7) 1192–1198. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13645>
- Heino, J. & Koljonen, S. (2022) A roadmap for sustaining biodiversity and ecosystem services through joint conservation and restoration of northern drainage basin. *Ecological Solutions and Evidence* 3(2). <https://doi.org/10.1002/2688-8319.12142>

- Hjulström, F. (1935) *Studies of the morphological activity of rivers as illustrated by the river Fyris*. Almqvist & Wiksell.
- Humphries, P., Wohl, E., Agostinho, A.A., Kopf, R.K., McCasker, N., Moyle, P. & Thorp, J. (2024) Flood ecology. *Bioscience* 74(6) 355–368.
<https://doi.org/10.1093/biosci/biae038>
- Ilmatieteen laitos (2025) Havaintojen lataus. Kuukausihavainnot Kiutaköngkään havaintoasemalta, ladattu 8.4.2025. <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/havaintojen-lataus>
- Irannezhad, M., Marttila, H. & Kløve, B. (2014) Long-term variations and trends in precipitation in Finland. *International Journal of Climatology* 34(10) 3139–3153.
<https://doi.org/10.002/joc.3902>
- Irannezhad, M., Ahmadian, A., Sadeqi, M., Minaei, B., Ahmadi, H. & Marttila, H. (2022) Peak Spring flood discharge magnitude and timing in natural rivers across northern Finland: Long-term variability, trends, and links to climate teleconnections. *Water* 14(8) 1312. <https://doi.org/10.3390/w14081312>
- Jonkman, S.N. & Kelman, I. (2005) An analysis of the causes and circumstances of flood disaster deaths. *Disasters* 29(1) 75–97. <https://doi.org/10.1111/j.0361-3666.2005.00275.x>
- Jyrkänkallio-Mikkola, J., Meier, S., Heino, J., Laamanen, T., Pajunen, V., Tolonen, K. T., Tolkkinen, M., & Soininen, J. (2017). Disentangling multi-scale environmental effects on stream microbial communities. *Journal of Biogeography* 44(7) 1512–1523.
<https://doi.org/10.1111/jbi.13002>
- Kasvi, E., Vaaja, M., Alho, P., Hyyppä, H., Hyyppä, J., Kaartinen, H. & Kukko, A. (2013) Morphological changes on meander point bars associated with flow structure at different discharges. *Earth Surface Processes and Landforms* 38(6) 577–590.
<https://doi.org/10.1002/esp.3303>
- Kasvi, E., Laamanen, L., Lotsari, E. & Alho, P. (2017) Flow Patterns and Morphological Changes in a Sandy Meander Bend during a Flood—Spatially and Temporally Intensive ADCP Measurement Approach. *Water* 9(2) 106.
<https://doi.org/10.3390/w9020106>
- Kersalo, J. & Pirinen, P. (2009) *Suomen maakuntien ilmasto*. Ilmatieteen laitoksen raportteja 2008:8. Ilmatieteen laitos, Helsinki.
- Knighton, D. (1998) *Fluvial forms and processes: A new perspective*. Arnold, London. 383 s.
- Korhonen, J. (2007) *Suomen vesistöjen virtaaman ja vedenkorkeuden vaihtelut*. Suomen Ympäristökeskuksen julkaisuja 2007:45. Suomen ympäristökeskus, Helsinki.
<http://hdl.handle.net/10138/38428>

- Koutaniemi, L. (1979) Late-glacial and post-glacial development of the valleys Oulanka river basin, North-Eastern Finland. *Fennia – International Journal of Geography* 157(1) 13–73.
- Koutaniemi, L. (1984). The role of ground frost, snow cover, ice break-up and flooding in the fluvial processes of the Oulanka river, NE Finland. *Fennia - International Journal of Geography* 162(2).
- Koutaniemi, L. (2000) Meanderointi ja sen yhdentoista vuoden seuranta Oulankajoella Kuusamossa. *Terra* 112(4) 217–228.
- Kämäri, M., Alho, P., Colpaert, A. & Lotsari, E. (2017) Spatial variation of river-ice thickness in a meandering river. *Cold Regions Science and Technology* 137 17–29.
<https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2017.01.009>
- Kärkkäinen, M. & Lotsari, E. (2022) Impacts of rising, peak and receding phases of discharge events on erosion potential of boreal meandering river. *Hydrological Processes* 36(10). <https://doi.org/10.1002/hyp.14674>
- Käyhkö, J., Alho, P. & Selin, M. (2007) Tulvat ja tulvien kartoitus Suomessa. *Terra* 119 3–4.
- Leopold, L. B., Wolman, M.G., Miller, J.P. & Wohl, E. (2020) *Fluvial Processes in Geomorphology*. 2 p. Mineola, New York: Dover Publications, Inc.
- Lintunen, K., Kavi, E., Uvo, C. B. & Alho, P. (2024) Changes in the discharge regime of Finnish rivers. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 53 101749.
<https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2024.101749>
- Lotsari, E., Kasvi, E., Kämäri, M. & Alho, P. (2017) The effects of ice cover on flow characteristics in a subarctic meandering river. *Earth Surface Processes and Landforms* 42(8) 1195–1212. <https://doi.org/10.1002/esp.4089>
- Lotsari, E., Tarsa, T., Kämäri, M. & Alho, P. (2019) Spatial variation of flow characteristics in a subarctic meandering river in ice-covered and open channel conditions: A 2D hydrodynamic modelling approach. *Earth Surface Processes and Landforms* 44(8) 1509–1529. <https://doi.org/10.1002/esp.4589>
- Lotsari, E., Dietze, M., Kämäri, M., Alho, P. & Kasvi, E. (2020) Macro-Turbulent Flow and Its Impacts on Sediment Transport Potential of a Subarctic River during Ice-Covered and Open-Channel Conditions. *Water* 12(7) 1874. <https://doi.org/10.3390/w12071874>
- Lotsari, E., Lintunen, K., Kasvi, E., Alho, P. & Blåfield, L. (2022) The impacts of near-bed flow characteristics on river bed sediment transport under ice-covered conditions in 2016–2021. *Journal of Hydrology* 615 128610. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128610>

- Maaß, A.-L., Schüttrumpf, H. & Lehmkuhl, F. (2021) Human impact on fluvial systems in Europe with special regard to today's river restorations. *Environmental Sciences Europe* 33(1) 119. <https://doi.org/10.1186/s12302-021-00561-4>
- Maanmittauslaitos (2023) Korkeusmalli 2 m, ladattu 3.3.2025. <https://www.maanmittauslaitos.fi/kartat-ja-paikkatieto/aineistot-ja-rajapinnat/tuotekuvaukset/korkeusmalli-2-m>
- Metsähallitus (2014) *Oulangan hoito- ja käyttösuunnitelma*. Metsähallituksen luonnonsuojelujulkaisuja. Metsähallitus, Vantaa.
- Mueller, D.S. (2018) Assessment of acoustic Doppler current profiler heading errors on water velocity and discharge measurements. *Flow Measurement and Instrumentation* 64 24–233. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2018.10.004>
- Mueller, D.S., Abad, J.D., García, C.M., Gartner, J.W., García M.H. & Oberg, K.A. (2007) Errors in acoustic doppler profiler velocity measurements caused by flow disturbance. *Journal of Hydraulic Engineering* 133(12) 1411–1420. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2007\)133:12\(1411\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2007)133:12(1411))
- Muste, M., Yu, K. & Spasojevic, M. (2004) Practical aspects of ADCP data use for quantification of mean river flow characteristics; Part I: moving-vessel measurements. *Flow Measurements and Instrumentation* 15(1) 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2003.09.001>
- Nousu, J.-P., Leppä, K., Marttila, H., Ala-aho, P., Mazzotti, G., Manninen, T., Korkiakoski, M., Aurela, M., Lohila, A. & Launiainen, S. (2024) Multi-scale soil moisture data and process-based modeling reveal the importance of lateral groundwater flow in a subarctic catchment. *Hydrology and Earth System Sciences* 28(20) 4643–4666. <https://doi.org/10.5194/hess-28-4643-2024>
- Park, H., Kim, Y., Suzuki, K. & Hiyama, T. (2024) Influence of snowmelt on increasing Arctic river discharge: numerical evolution. *Progress in Earth and Planetary Science* 11(1) 13–15. <https://doi.org/10.1186/s40645-024-00617-y>
- Roggenkamp, T. & Herget, J. (2024) Flood reconstruction – The unexpected rather frequent event at River Ahr in July 2021. *Global and Planetary Change* 240 104541. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2024.104541>
- Shafaei, H., Esmaili, K. & Beheshti, A. (2025) Experimental study of hydrodynamics of in-bank and overbank flows in meandering compound channel. *Water Resources Management*. <https://doi.org/10.1007/s11269-025-04114-9>
- Sontek. (2022) RiverSurveyor S5/M9 System Manual Firmware Version 4.10.

- SYKE (2012) Uomaverkosto, ladattu 3.3.2025. <https://ckan.ymparisto.fi/dataset/%7BE15CD0B3-3934-4ABC-BF23-A8C622FA6A57%7D>
- SYKE (2023) Valuma-aluejako, ladattu 3.3.2025. <https://ckan.ymparisto.fi/dataset/valuma-aluejako>
- Tananaev, N. & Lotsari, E. (2022) Defrosting northern catchments: Fluvial effects of permafrost degradation. *Earth-Science Reviews* 228 103996. <https://doi.org/10.1016/j.earsci-rev.2022.103996>
- Tsai, W-F. & Ettema, R. (1996). *A study of ice-covered flow in an alluvial bend*. Teoksessa IIHR Report No. 376. Iowa Institute of Hydraulic Research (IIHR), College of Engineering, The University of Iowa: Iowa City, IA.
- van Dijk, W.M., Teske, R., van de Lageweg, W.I. & Kleinhaus, M.G. (2013) Effects of vegetation distribution on experimental river channel dynamics. *Water Resources Research* 49 7558–7574. <http://dx.doi.org/10.1002/2013WR013574>
- Veijalainen, N., Lotsari, E., Alho, P., Vehviläinen, B. & Käyhkö, J. (2010) National scale assessment of climate change impacts on flooding in Finland. *Journal of Hydrology* 391 333–350. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.035>
- Vergeynst, J., Morse, B. & Turcotte, B. (2017) Quantifying frazil production, transport and deposition in a gravel-bed river: Case study of the St. Raymond hanging dam. *Cold Regions Science and Technology* 141 109–121. <http://dx.doi.org/10.1016/j.coldregions.2017.06.003>
- Zhang, P., Sun, W., Peiqing, X., Yao, W. & Liu, G. (2022) Driving factors of heavy rainfall causing flash floods in the middle reaches of the Yellow River: A case study in the Wuding River basin, China. *Sustainability* 14(13) 8004. <https://doi.org/10.3390/su14138004>
- Zhao, K., Lanzoni, S., Gong, Z. & Coco, G. (2021) A numerical model of bank collapse and river meandering. *Geophysical Research Letters* 48(12). <https://doi.org/10.1029/2021GL093516>