

**Pintavalunnan GIS-pohjainen mallintaminen –
tapauksena topografialtaan tasainen metsäojitettu
Jäälinjärven valuma-alue**

Katri Ollila

Pro gradu -tutkielma 791619S
Maantieteen tutkinto-ohjelma
Oulun yliopisto
14.9.2022

Yksikkö: Maantieteen tutkimusyksikkö	Pääaine: Maantiede	
Tekijä: Ollila Katri Tuulikki	Opiskelija- numero: Y52877210	Tutkielman sivumäärä: 82 s. + 1 liit.
Tutkielman nimi: Pintavalunnan GIS-pohjainen mallintaminen – tapauksena topografialtaan tasainen metsäojitettu Jäälinjärven valuma-alue		
Asiasanat: pintavalunnan mallintaminen, GIS, stream burning, virtausverkko, valuma-aluejako		
Tiivistelmä: <p>Tämän tutkielman aiheena on pintavalunnan mallintaminen paikkatietomenetelmillä. Tutkimuksen tavoitteena on luoda yhtenäinen virtausverkko, joka kuvaa tutkimusalueen päävirtausreitit, ja alivaluma-aluejaottelu, joka jakaa tutkimusalueen pienempiin alueellisiin tarkasteluysiköihin. Tutkimuksen kohteena on Oulussa sijaitseva Jäälinjärven valuma-alue, joka on tunnistettu haitallisen rautakuormituksen lähteeksi sen alapuolisissa vesistöissä.</p> <p>Pintavaluntamallin pohja-aineistona käytettiin 2 m x 2 m resoluution digitaalista korkeusmallirasteria ja mallin uomaoptimointiin maastotietokannan vesistö- ja tiestöaineistoja. Uomaoptimointi tarkoittaa virtauksen kohdistamista uomaverkoston. Alueen uomaverkosto poltettiin korkeusmalliin <i>stream burning</i> -menetelmällä sekä madaltamalla tiepenkereet teiden alittavien tierumpujen kohdilta. Hydrologinen eheytytys toteutettiin <i>breaching</i>-menetelmällä ja pintavalunnan mallinnus yksisuuntaisella D8-virtaussuunta-algoritilla. Valunnan kumuloitumisen mallinnuksella määritettiin virtausverkko muodostumaan yhden hehtaarin kokoisilta valuma-alueilta alkaen. Virtausverkko luokiteltiin yläpuolisen valuma-alueen koon mukaan kuuteen luokkaan. Alivaluma-alueet määritettiin virtaussuunta- ja valunnan kumuloitumisen tulosrasterin pohjalta sekä 14 purkupisteen mukaisesti. Mallinnusalgoritmit suoritettiin ArcGIS Pro -paikkatieto-ohjelmiston ja avoimen lähdekoodin GIS Whitebox Geospatial Analysis Tools -ohjelmiston työkaluilla.</p> <p>Virtausverkon avulla tunnistettiin tutkimusalueen päävirtausreitit. Mallin paikkansapitävyyttä tarkistettiin maastossa tehtyjen havaintojen avulla, ja virtausverkko muodostui todellisten päävirtausreittien mukaisesti alivaluma-aluejaottelin mittakaavassa. Uomaoptimoidun mallin lisäksi tuotettiin vertailumalli yksinkertaisemmillä mallinnusmenetelmillä, ilman uomaoptimointia. Mallien vertailun pohjalta tunnistettiin tekijöitä, jotka vaikuttavat mallin lopputulokseen, ja arvioitiin uomaoptimoidun mallin sopivuutta tutkimuksen tavoitteisiin nähden.</p> <p>Työssä mallinnetuilla aineistoilla voidaan toteuttaa valuma-aluesuunnittelua: rautakuormituksen kannalta haitallisten hydrologisten yhteyksien vähentämistä, veden pidätystä, vesiensuojelurakenteiden tarpeen arviointia ja soveltuvan vesiensuojelurakenteen suunnittelua. Aineistojen avulla voidaan kohdentaa vesiensuojelutoimia ja resursseja alueille, joilla siitä on eniten hyötyä.</p>		
Muita tietoja:	Toteutettu osana Oulun yliopiston Vesi-, energia- ja ympäristötekniikan tutkimusyksikön tutkimushanketta Raudan haitallisten vesistövaikutusten vähentäminen turvevaltaisilla metsätalousmailla (2021–2023)	
Päiväys:	Seinäjoella, 14.9.2022	

Alkusanat

Pääsin tekemään pro gradu -tutkielmani osana Oulun yliopiston Vesi-, energia- ja ympäristötekniikan yksikön tutkimushanketta Raudan haitallisten vesistövaikutusten vähentäminen turvevaltaisilla metsätalousmailla. Haluan kiittää mahdollisuudesta osallistua hankkeeseen, ja mielenkiintoisesta vesiensuojeluun liittyvästä tutkimusaiheesta, jossa pääsin hyödyntämään geoinformatiikan tutkimusmenetelmiä. Erityisesti kiitos ohjaajalleni Markus Saarelle kaikesta avusta ja tuesta. Kiitos myös Oulun yliopiston Maantieteen yksikön geoinformatiikan tutkimusryhmälle, erityisesti ohjaajalleni Harri Antikaiselle, työn kommentoinnista ja avusta viimeistelyissä.

Suuri kiitos myös perheelleni kaikista tsempeistä ja kiinnostuksen osoittamisesta – hyvin olette jaksaneet kuunnella, kun yritän vääntää GIS-velhoiluja selkosuomelle.

Seinäjoella, 14.9.2022

Katri Ollila

Sisällys

1	Johdanto.....	5
2	Tutkimusalueena Jäälinjärven valuma-alue.....	8
3	Teoreettinen viitekehys pintavalunnan GIS-pohjaiselle mallintamiselle	11
3.1	Pintavalunnan mallintaminen digitaaliseen korkeusmalliin perustuen	11
3.2	Mallinnusvaiheet.....	12
3.3	Mallinnuksessa huomioon otettavia tekijöitä.....	16
3.3.1	Korkeusmallin tarkkuus vaikuttaa mallinnuksen lopputulokseen	16
3.3.2	Korkeusmallin nielujen hydrologinen eheyttäminen	18
3.3.3	Topografialtaan tasainen mallinnusalue edellyttää uomaoptimointia.....	22
4	Aineistot	27
4.1	Pintavaluntamallinnuksen paikkatietoaineistot ja niiden esikäsittelyn tarve.....	27
4.1.1	Digitaalinen korkeusmalli.....	27
4.1.2	Lisäaineistona vesistöt ja tiestö.....	31
4.2	Maastotarkistukset	32
5	Pintavaluntamallinnuksen toteutus.....	33
5.1	Uomaoptimoituun malliin pohjautuva virtausverkko ja alivaluma-aluejaottelu.....	33
5.2	Vertailumalliin pohjautuva virtausverkko	46
6	Tulokset ja tulosten tarkastelu	46
6.1	Uomaoptimoidun mallin virtausverkko ja alivaluma-aluejaottelu.....	46
6.2	Virtausverkkojen vertailu uomaoptimoidun ja vertailumallin välillä	51
7	Uomaoptimoidun mallin epävarmuustekijöitä ja onnistuneisuus.....	56
8	Yhteenveto ja johtopäätökset.....	69
	Lähteet.....	75
	Liitteet	83

1 Johdanto

Vesistöjen ekologiseen ja kemialliseen tilaan vaikuttavat merkittävästi ihmistoiminta ja maankäyttö, erityisesti maa- ja metsätalous, vesimuodostuman yläpuolisella valuma-alueella (Vesistöjen kuormitus... 2021), ja sen takia vesiensuojelussa ja vesienhallinnassa on siirrytty enenevässä määrin valuma-alueelähtöiseen tarkasteluun (esim. Häggblom ym. 2020: 10). Valuma-alueajaudella tarkastelu kohdistuu kokonaisvaltaisesti koko valuma-alueen nykyiseen ja tulevaan maankäyttöön, sen kuormitukseen ja vesistövaikutuksiin (Häggblom ym. 2020: 46). Kokonaisvaltaisen valuma-alue-tarkastelun tavoitteena on tunnistaa riskikohteet ja suunnitella toimenpiteet, joilla ehkäistään ja vähennetään vesistökuormitusta mahdollisimman kustannustehokkaasti (Häggblom ym. 2020: 46). Häggblomin ym. (2020: 16) mukaan valuma-aluekohtaisen suunnittelun merkitys korostuu muun muassa vesiensuojelurakenteiden sijoittamisessa ja mitoittamisessa sekä luonnon monimuotoisuuden turvaamisessa.

Valuma-alue-tarkastelun lisäksi, mutta myös sen mahdollistamiseksi maa- ja metsätalouden kestävässä vesitalouden suunnittelussa ja hallinnassa painotetaan paikkatietoaineistojen hyödyntämistä (Häggblom ym. 2020: 46). Käytettävissä olevia avoimia paikkatietoaineistoja voidaan hyödyntää valuma-aluekohtaisen suunnittelun tarpeen arvioinnissa ja suunnittelun tukena (Häggblom ym. 2020: 46). Paikkatietotyökalut siis tukevat valuma-alue-mittakaavan tarkastelua. Siten myös jatkuvaa paikkatietotyökalujen kehittämistä korostetaan, jotta voidaan taata tuotettujen, entistä tarkempien aineistojen parempi hyödyntäminen (Häggblom ym. 2020: 61).

Tässä työssä tutkimusalueena on Jäälinjärven valuma-alueelle, joka on tunnistettu haitallisen rautakuormituksen lähteeksi sen alapuolisissa vesistöissä (Savolainen 2013; Määttä 2019). Monet vesistöjen rautapitoisuuden hallintaan liittyvät tutkimukset korostavat juuri valuma-alueelta tulevan rautakuormituksen merkitystä (esim. Ekström ym. 2016; Björnerås ym. 2021: 2). Raudan kulkeutumista tulisikin estää rautahuuhtouman riskialueita, ja esimerkiksi Heikkinen ym. (2022: 7) korostavat huolellista valuma-alue-suunnittelua.

Vesiensuojelun tueksi on tuotettu muun muassa erilaisia hydrologisten mallinnusten paikkatietotyökaluja. Albrecht (2007: 63) kuvailee hydrologisen mallintamisen yksinkertaistetuksi lähtökohdaksi selvittää, mihin suuntaan vesipisara maahan osuessaan lähtee valumaan. Mallien avulla voidaan simuloida valuma-alueen vesien ja niiden mukana kulkeutuvien aineiden liikkeitä. Hydrologiset mallit jaotellaan eri kategorioihin riippuen niiden rakenteesta ja siitä, miten ne esittävät hydrologisten prosessien spatiaalisuutta (Sitterson ym. 2017: 10, 15). Alueellisen ulottuvuuden osalta mallit jaotellaan hajautettuihin (eng. *distributed*), osittain hajautettuihin (eng. *semi-distributed*) ja keskitettyihin (eng. *lumped*)

malleihin sen perusteella, miten tarkasti malli ottaa huomioon alueellisuutta (Mujumdar & Nagesh Kumar 2012: 1; Sitterson ym. 2017: 10, 15). Hajautetuissa malleissa, joissa otetaan huomioon hydrologisten prosessien valuma-alueen sisäinen, yksityiskohtainen alueellisuus, mallinnettava alue jaetaan pienempiin alueellisiin yksiköihin soluruudun avulla (Sitterson ym. 2017: 15–16, 18).

Tässä työssä luon mallinnuksen Jäälinjärven valuma-alueen pintavalunnasta, eli maan pinnalla valuvasta, uomien kautta poistuvasta vedestä (Leppäranta ym. 2017: 57). Sopiva pintavalunnan mallinnusmenetelmä riippuu mallinnuksen tarkoituksesta (Sitterson ym. 2017: 10). Tässä työssä tarkoituksena on saada kuva veden uomavirtauksen pääreiteistä tutkimusalueen halki – selvittää, miltä alueilta ja mitä reittejä pitkin mahdollista rautakuormitusta kuljettavat vedet valuvat kohti Jäälinjärveä – ja jakaa alue pienempiin hydrologisiin tarkasteluyksiköihin. Siten mallinnusmenetelmänä on hajautettu, mutta yksinkertainen pintavalunnan mallinnus (joka ei simuloi mitään tiettyä sadantatilannetta, eikä ota huomioon eri hydrologisen kierron komponentteja).

Veden valunnan ominaisuuksia voidaan mallintaa geoinformatiikan menetelmillä eli paikkatietojärjestelmien (GIS, *Geographic Information System*) työkaluilla, tyypillisesti korkeusmallin pohjalta (esim. Mujumdar & Nagesh Kumar 2012: 120; Lindsay 2014; An overview... 2022). Tämän työn malli on paikkatietopohjainen, ja se perustuu digitaaliseen korkeusmalliin (DEM, *Digital Elevation Model*). Paikkatieto-ohjelmistoihin on kehitetty erityisiä hydrologian mallintamisen työkaluja (esim. An overview... 2022; Hydrological analysis 2022). Jäälinjärven valuma-alueen mallinnustyössä haasteena on kuitenkin topografialtaan eli maanpinnan muodoiltaan erityisen tasainen ja tiheään metsäoijitettu tutkimusalue, minkä vuoksi mallinnuksessa täytyy hyödyntää useampia esikäsittelyvaiheita lopputuloksen tarkkuuden optimoimiseksi.

Pintavaluntamallin pohjalta tuotan virtausverkon ja alivaluma-aluejaottelun. Virtausverkko kuvaa pintavalunnan ja uomavirtauksen reittejä valuma-alueella, eli se havainnollistaa hydrologisia yhteyksiä. Virtausverkon muodostamisella on tärkeä rooli hydrologisessa mallinnuksessa ja edelleen erilaisten vesistökuormitusten mallintamisessa (Wu ym. 2019). Virtausverkkoa voidaan hyödyntää muun muassa veden johtamisen suunnittelussa esimerkiksi pintavaluntakentälle tai vedenpalauttamiseen soveltuvalle suojelusuolle (Luonnonhoidon paikkatietoaineistot 2021). Lisäksi virtausverkon luokitusta yläpuolisen valuma-alueen mukaan voidaan hyödyntää vesiensuojelurakenteiden tarpeen arvioinnissa ja soveltuvan vesiensuojelurakenteen valinnassa ja suunnittelussa (Luonnonhoidon paikkatietoaineistot 2021).

Virtausverkon avulla voidaan myös suunnitella rautakuormituksen kannalta haitallisten hydrologisten yhteyksien eli uomaverkostoyhteyksien vähentämistä. Heikkinen ym. (2022: 7) korostavat rautakuormitukseen liittyvässä vesiensuojelussa, että on tärkeää välttää hydrologisten yhteyksien lisääntymistä ja laajentumista erityisesti niillä valuma-alueilla, jotka ovat alttiita raudan huuhtoutumiselle. Jos rautahuuhtoumalle riskialttiit alueet ovat suoraan hydrologisesti yhteydessä vastaanottaviin vesistöihin, korkeisiin rautapitoisuuksiin liittyvät ongelmat ovat todennäköisiä. Hydrologista yhteyttä voidaan kuitenkin valuma-alue suunnittelun avulla vähentää niiltä alueilta, joilta tiedetään huuhtoutuvan paljon rautaa (Heikkinen ym. 2022: 7).

Vastaavasti alivaluma-aluejaottelulla voidaan tarkastella tutkimusalueen rautakuormitukseen vaikuttavien tekijöiden alueellisuutta pienemmissä tarkasteluyksiköissä. Martzin ja Garbrechtin (1992: 755) mukaan alivaluma-alueiden mallinnus tarjoaa hyödyllisen pohjan tutkimusalueen ominaisuuksien tarkasteluun; erilaisten paikkatietoaineistojen avulla voidaan tunnistaa rautakuormituksen riskitekijöitä pienemmällä mittakaavalla, alivaluma-alue tasolla. Alivaluma-alueet määritetään pääosin tutkimusalueen vedenlaadun näyteenottopisteiden yläpuolisiksi valuma-alueiksi. Siten jaottelun pohjalta voidaan myöhemmin analysoida vesinäytteiden tulosten ja alivaluma-alueiden rautakuormitukseen vaikuttavien ominaisuuksien (kuten kallio- ja maaperän sekä maankäytön) kausaalisuutta. Lisäksi yhdessä alivaluma-aluejaottelun ja virtausverkon avulla voidaan tarkastella vedenpidätyksen mahdollisuuksia kokonaisvaltaisesti tutkimusalueella. Työssä mallinnettavilla aineistoilla voidaan näin ollen toteuttaa ympäristöriskien arviointia ja tarkempaa valuma-alue suunnittelua sekä kohdentaa vesiensuojelutoimia niille alueille, joilla siitä on eniten hyötyä.

Tutkimuksen tavoitteena on selvittää, millaisilla korkeusmallin esikäsitteilyvaiheilla voidaan toteuttaa mahdollisimman todenmukainen ja tarkka pintavalunnan mallinnus tasaisella, tiheään ojitetulla tutkimusalueella. Lopputuloksena mallinnan kaksi pintavalunnan mallia: uomaoptimoidun mallin, jonka teen esikäsitellyn korkeusmallin pohjalta, kohdentamalla virtauksen uomaverkoston, ja vertailumallin, jonka teen yksinkertaisemmin ilman uomaoptimointia. Vertaan mallien pohjalta muodostuvia virtausverkkoja – eroavaisuuksien perusteella tarkastelen tekijöitä, jotka eri mallinnusvaiheissa vaikuttavat lopulliseen mallinnustulokseen, ja arvioin lopullisen uomaoptimoidun mallin onnistuneisuutta.

Pintavalunnan mallinnuksen avulla vastaan seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

1. Mitkä ovat valunnan pääreitit Jäälinjärven valuma-alueen tutkimusalueella?

2. Millaisia eroavaisuuksia muodostuu uomaoptimoidun ja ilman uomaoptimointia tehdyn mallinnuksen tulosten (virtausverkon ja alivaluma-aluejaottelun) välille?

Tutkielma on osa Oulun yliopiston Vesi-, energia- ja ympäristötekniikan yksikön tutkimushanketta Raudan haitallisten vesistövaikutusten vähentäminen turvevaltaisilla metsätalousmailla (2021–2023). Rahoituksen työhön on tarjonnut Pohjois-Pohjanmaan ELY-keskus ja Oulun yliopisto.

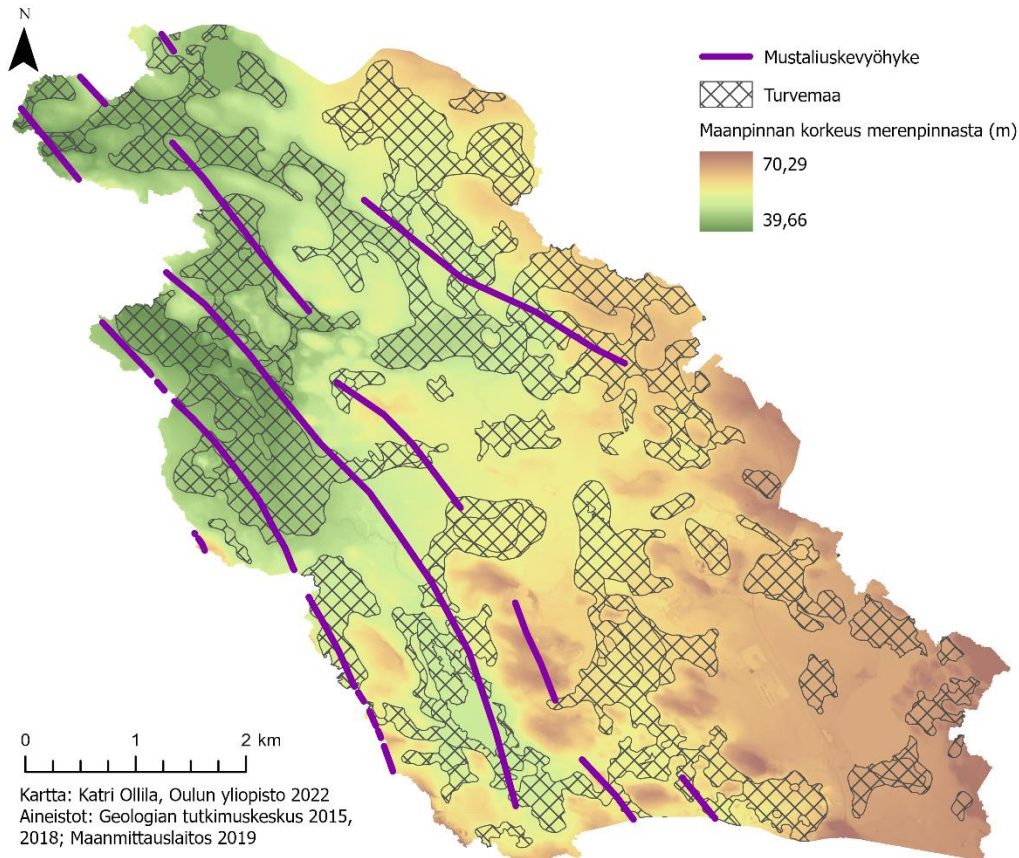
2 Tutkimusalueena Jäälinjärven valuma-alue

Jäälinjärven yläpuolinen valuma-alue sijaitsee Pohjois-Pohjanmaalla, Oulun kaupungin alueella, Jäälissä. Jäälinjärven valuma-alue on osa Kalimenjoen valuma-aluetta (kuva 1). Jäälinjärvestä vedet laskevat Jäälinojan kautta Kalimenjokeen, ja sen kautta Pohjanlahteen Oulun Kellon kaupunginosassa. Jäälinjärven yläpuolisen valuma-alueen laajuus tässä työssä koostuu kahdesta päävaluma-alueesta, jotka ovat tutkimusalueen pääuomien valuma-alueet (kuva 1). Tutkimusalue on kooltaan yhteensä 35.38 neliökilometriä (laskettu ArcGIS Pro:lla tässä työssä mallinnettujen päävaluma-alueiden mukaan).



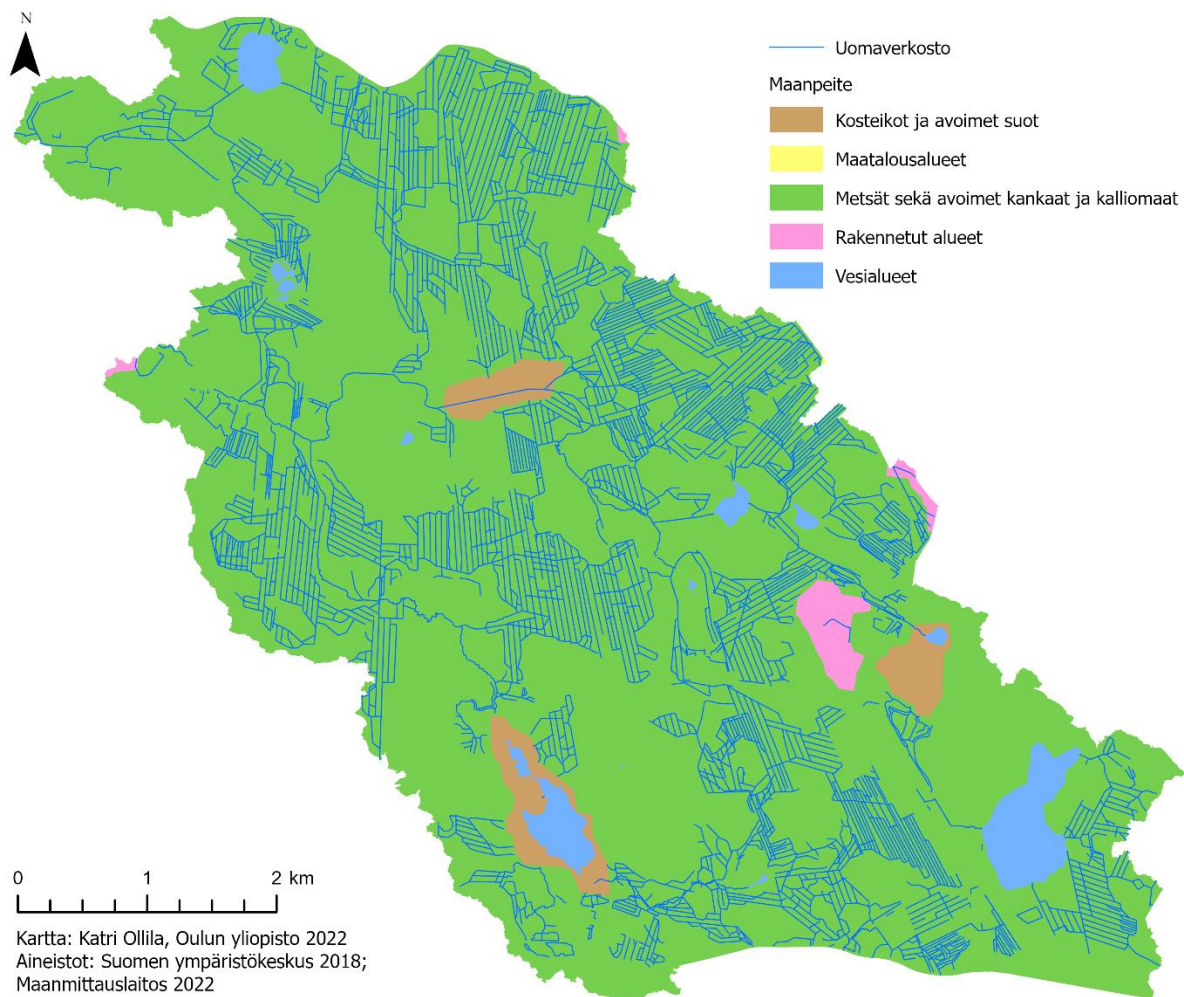
Kuva 1. Oulussa sijaitseva Jäälinjärven valuma-alue on osa Kalimenjoen valuma-aluetta, josta vedet laskevat Pohjanlahteen. Tutkimusalueeksi on rajattu kahden Jäälinjärveen laskevan pääuoman valuma-alueet, joiden purkupisteet on kuvattu kartassa punaisilla pisteillä.

Jäälinjärven tutkimusalueen maaperästä 35.0 % on turvemaata (kuva 2). Turvemaavaltaisuus viittaa myös maanpinnan tasaisuuteen. Kuten kuvasta 2 nähdään, tutkimusalue on topografialtaan tasaista: korkeusvaihtelu on 39.66–70.29 metriä merenpinnan yläpuolella (mmp).



Kuva 2. Jäälinjärven tutkimusalueella maanpinnan korkeus merenpinnasta vaihtelee 39.66–70.29 metrin välillä. Tutkimusalueen maaperässä on turvemaata ja kallioperässä esiintyy rautapitoista mustaliusketta. Mustaliuske-esiintymät kuvaavat kallioperähavaintoja ja tulkintaa magneettiselta/sähkömagneettiselta kartalta, tulkintaa pelkästään sähkömagneettiselta kartalta tai tulkintaa kairaustietoon perustuen.

Jäälinjärven valuma-alue on metsämaavaltaista aluetta (kuva 3); tutkimusalueen pinta-alasta 94.1 % on metsämaata, avoimia kankaita ja kalliomaata. Kosteikkojen ja avoimien soiden osuus alueesta on 3.1 %, ja maatalousalueiden osuus on 1.5 %. Rakennettuja alueita pinta-alasta on alle prosentti. Kuvan 3 kartasta nähdään myös tutkimusalueen vesistöt: alueella on kattava ojitusverkosto sekä järviä ja pienempiä lampia.



Kuva 3. Jäälinjärven valuma-alueen tutkimusalueen maanpeitekartta ja vesistöt (järvet, lammet ja uomaverkosto).

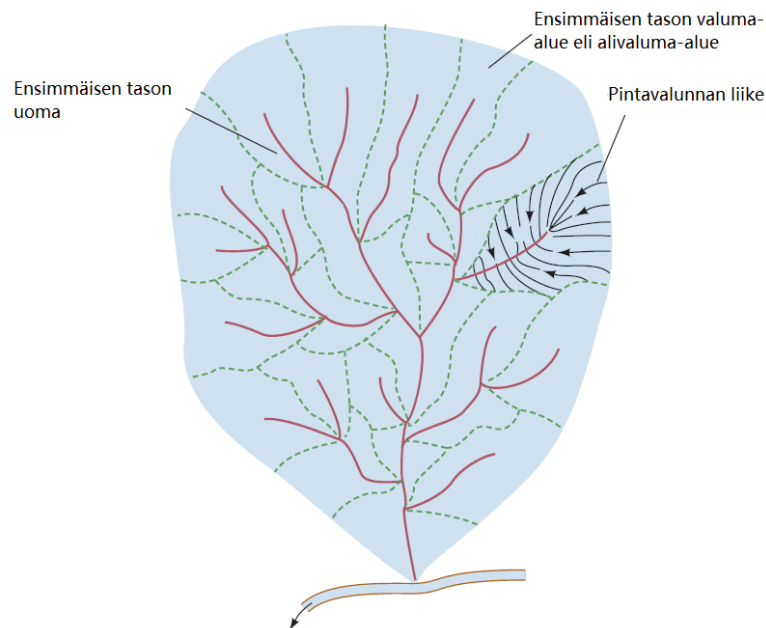
Raudan mobilisoitumisen, eli maaperästä liikkeelle lähdön, ja vesistöihin huuhtoutumisen kannalta merkittävimmit Jäälinjärven valuma-alueen ominaisuuksiksi on arvioitu turvemaavaltaisuutta ja metsätalouden laajoja ojituksia; rautaan liittyvää vedenlaatuongelmaa ja monimutkaista prosessia sen taustalla on selvitetty eri hankkeissa, viimeisimpänä KaliVesi-hanke, 2019 (Oulun yliopisto, Oulun kaupunki ja Pohjois-Pohjanmaan ELY-keskus). Lisäksi muun aikaisemman tutkimuksen mukaan korkeita rautapitoisuuksia on havaittu esiintyvän turvemaavaltaiten metsätalousalueiden valumavesissä (Vuori 1995: 325–326; Kortelainen & Saukkonen 1998: 247; Palviainen ym. 2015; Ekström ym. 2016: 479). Turvemaalla raudan mobilisoitumiseen vaikuttavat maaperän liukoinen orgaaninen hiili (eng. *dissolved organic carbon*, DOC), johon rauta on taipuvainen yhdistymään (Heikkinen 1990a; 1990b: 150; Lahermo ym. 1996: 79; Sjöstedt ym. 2013: 185; Sundman ym. 2014) ja ojitukset (Estlander ym. 2021); ojitusten muuttamat hapetus-pelkistysolosuhteet (Dillon & Molot 2005: 6; Kritzberg & Ekström 2012: 1475; Ekström ym. 2016). Vesistöjen rautapitoisuuden lisääntyminen voi

johtua myös siitä, että pintavesiin päätyy enemmän rautapitoista pohjavettä syvemmistä turvemaan kerroksista (Heikkinen 1994: 85; Kritzberg & Ekström 2012: 1475–1476), joihin rauta on rikastunut (Puustjärvi 1953: 5). Lisäksi tutkimusalueen kallioperässä esiintyy rautapitoista mustaliusketta (Virtanen & Lerssi 2006: 15, Kuva 2 kuva 2), joka vaikuttaa turpeen rautapitoisuuteen (Virtanen & Lerssi 2006: 18) ja siten edelleen vesistöön mahdollisesti huuhtoutuvan raudan määrään.

3 Teoreettinen viitekehys pintavalunnan GIS-pohjaiselle mallintamiselle

3.1 Pintavalunnan mallintaminen digitaaliseen korkeusmalliin perustuen

Hydrologisia malleja hyödynnetään useimmiten valuma-alueen mittakaavassa (Mujumdar & Nagesh Kumar 2012: 1). Valuma-alue on hydrologinen perusyksikkö, jonka alueelta maahan satavat vedet kerääntyvät ja purkautuvat valuma-alueen purkupisteestä samaan vesistöön (Leppäranta ym. 2017: 56–57). Valuma-alue rajoittuu vedenjakajiin eli ympäristöään korkeammalla oleviin alueisiin, jotka jakavat pintavalunnan kulkemaan eri suuntiin. Yksittäinen valuma-alue koostuu uomaverkostosta (eli uomastosta), joka haaroittuu yhä useampiin uomiin (Strahler & Strahler 2013: 480). Uomaverkosto voidaan jakaa systemaattisesti uomien osiin, jotka muodostavat omat alivaluma-alueensa (kuva 4).



Kuva 4. Kaaviokuva valuma-alueen uomaverkostosta, uomaverkoston haarojen alivaluma-alueista ja pintavalunnasta. Lähde: Mukailien Strahler & Strahler 2013: 480

Valuma-alueet muodostuvat siis topografian eli maanpinnan korkeusvaihteluiden mukaisesti (Leppäranta ym. 2017: 57). Näin ollen myös hydrologinen mallintaminen perustuu topografiaan (Albrecht 2007: 63; Wood 2008a: 390). Tärkeimpänä pohja-aineistona hydrologisessa mallinnuksessa käytetäänkin maanpinnan muotoja kuvaavaa digitaalista korkeusmallia (esim. Albrecht 2007: 63; Wood 2008b: 109; Petroselli & Alvarez 2012: 712; Kansallisen maastotietokannan... 2017: 4; Sitterson ym. 2017: 19), sillä se tarjoaa olennaista tietoa maanpinnan topografiasta, kuten kaltevuudesta ja kaltevuussuunnasta (Rahman ym. 2010: 49). Siten se selittää veden virtauksen suuntaa, kertymää, virtausverkkoa ja edelleen valuma-alueita (Mujumdar & Nagesh Kumar 2012: 1–2).

Digitaaliseen korkeusmalliin viitataan tässä työssä termeillä korkeusmalli ja DEM. Korkeusmalli on tyypillisesti aineistomuodoltaan jatkuvaa tietoa kuvaava rasteri; korkeusmallirasteri muodostuu ruudukosta, jossa yksittäinen ruutu eli solu kuvaa kyseisen maanpinnan kohdan sijainti- ja ominaisuus- eli korkeustietoa (Galati 2006: 30). Rasteriaineiston tarkkuuden eli resoluution määrittelee solukoko (Galati 2006: 158). Korkeusmallin resoluutio vaikuttaa myös pintavalunnan mallinnustuloksen alueelliseen tarkkuuteen (Sitterson ym. 2017: 19).

Valunnan mallintaminen DEM-rasteriaineiston pohjalta perustuu naapurustoanalyysiin (eng. *neighborhood analysis*) (Albrecht 2007: 55–56), jossa tarkastellaan kerrallaan 3 x 3 solun kokoista rasterialuetta (O’Callaghan & Mark 1984: 327; Mujumdar & Nagesh Kumar 2012: 126). Analyysi laskee solu kerrallaan kahdeksan ympäröivän naapurisolun perusteella arvon tarkasteltavana olevalle solulle, ja näistä arvoista muodostuu tulosrasteri (Mujumdar & Nagesh Kumar 2012: 126).

3.2 Mallinnusvaiheet

Kuvan 5 kaaviossa esitellään pintavalunnan ja valuma-alueiden muodostuksen mallinnusvaiheet yksinkertaistetusti. Ensimmäisenä pintavalunnan mallintamisessa selvitetään virtaussuunta, sen jälkeen valunnan kertymä (Albrecht 2007: 63; Mujumdar & Nagesh Kumar 2012: 125) ja niiden pohjalta muodostetaan virtausverkko (Li ym. 2005: 276). Valuma-alue ja sen alivaluma-alueita muodostetaan virtaussuunnan ja valunnan kertymän pohjalta (Li ym. 2005: 276). Seuraavaksi esittelen vaiheet yksityiskohtaisemmin.



Kuva 5. Vuokaavio korkeusmalliin pohjautuvan pintavalunnan mallintamisen vaiheista yksinkertaistetusti.

Virtaussuunnan (eng. *flow direction*) mallintamisessa käytetään usein D8-algoritmia (esim. O’Callaghan & Mark 1984; Jones 2002: 1052; Kenny & Matthews 2005: 770; Li ym. 2005: 277; Oksanen & Sarjakoski 2005; Korkalainen ym. 2008; Zhang & Huang 2009; Zhao ym. 2009: 2; Mujumdar & Nagesh Kumar 2012: 126; Qin ym. 2013: 1064). Mujumdar ja Nagesh Kumar (2012: 126) kuvaavat sen toimintaperiaatteen seuraavanlaisesti: D8-algoritmi laskee solujen korkeuserojen perusteella jokaiselle solulle tulosteen, joka kuvaa virtauksen suuntaa solusta yhteen sen ympäröivistä kahdeksasta naapurisolusta. Virtaus suuntautuu siihen naapurisoluuun, johon verrattuna lähtösolulla on suurin korkeusero, eli jyrkin kaltevuus. Kaltevuuden jyrkkyys lasketaan kuvan 6 esimerkin mukaisesti jakamalla solujen korkeuksien erotus solukeskipisteiden välisellä etäisyydellä. Jokaisella kahdeksalla naapurisolun suunnalla on suuntaa ilmaiseva numeroarvo (kuva 7 B), jonka perusteella korkeusrasterista (kuva 7 A) muodostuu tulosrasteri eli virtaussuuntamatriisi (kuva 7 C).

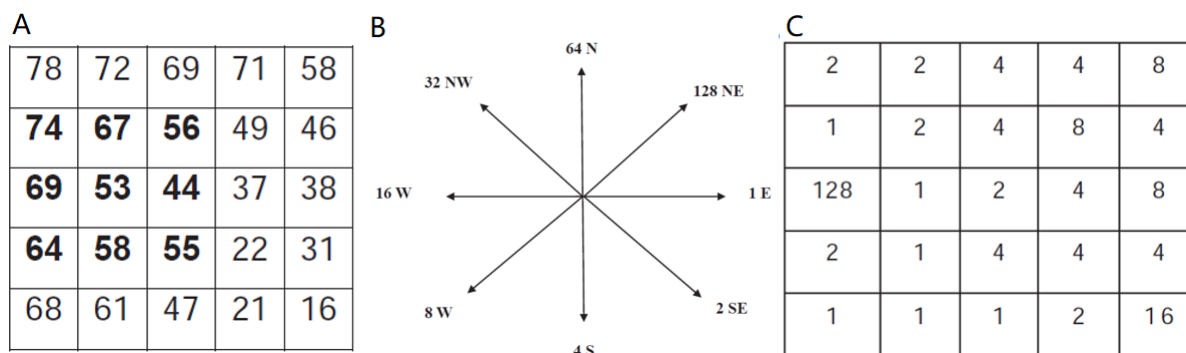
78	72	69	71	58
74	67	56	49	46
69	53	44	37	38
64	58	55	22	31
68	61	47	21	16

78	72	69	71	58
74	67	56	49	46
69	53	44	37	38
64	58	55	22	31
68	61	47	21	16

78	72	69	71	58
74	67	56	49	46
69	53	44	37	38
64	58	55	22	31
68	61	47	21	16

$$\text{Kaltevuus} = \frac{67 - 56}{1} = 11.00 \quad \text{Kaltevuus} = \frac{67 - 44}{\sqrt{2}} = 16.26 \quad \text{Kaltevuus} = \frac{67 - 53}{1} = 14.00$$

Kuva 6. Korkeusmallirasterin solujen välinen kaltevuus lasketaan jakamalla solujen välinen korkeusarvojen erotus solukeskipisteiden etäisyydellä. Kohtisuoraan vierekkäisten solujen etäisyyden arvo on 1 ja viistojen solujen etäisyys $\sqrt{2}$ (O’Callaghan & Mark 1984: 328). Esimerkkitapauksessa jyrkin kaltevuussuunta 67-arvoisesta lähtösolusta on oikeaan alakulmaan (kaltevuudella 16.26). Lähde: Mukailten Mujumdar & Nagesh Kumar (2012: 127).



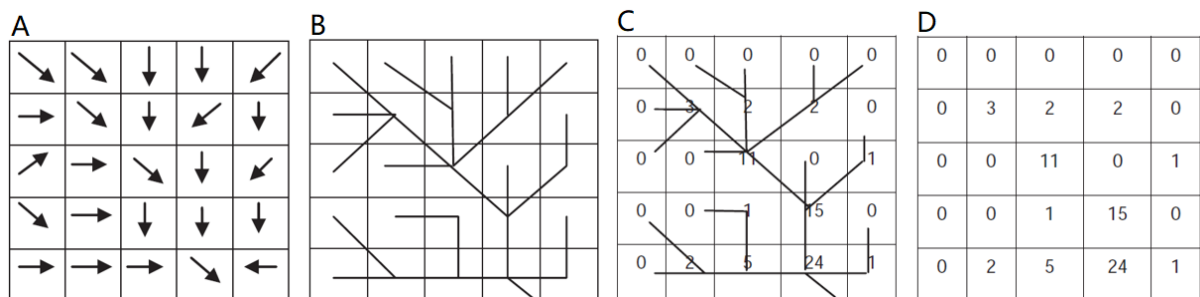
Kuva 7. D8-algoritmi laskee korkeusarvoja kuvaavasta rasterista (A) kahdeksan naapurisolun perusteella jokaiselle solulle virtaussuunnan, jota ilmaistaan suuntanumerolla (B). Suuntanumerot vaihtelevat mallin eri sovellutuksissa (Li ym. 2005: 278), mutta tässä esitelty on käytössä muun muassa Esrin ArcGIS Pro -sovelluksessa (How flow direction works 2022). Lopputuloksena on tulorasteri (C), eli virtaussuuntamatriisi. Lähde: Mukailleen Mujumdar & Nagesh Kumar (2012: 126–127).

Virtaussuunnan laskennassa ilmenee myös erikoistapauksia: solu voi olla matalampi kuin yksikään sen kahdeksasta naapurisolusta tai sillä voi olla samanarvoinen suurin kaltevuus kahteen tai useampaan naapurisoluun (Mujumdar & Nagesh Kumar 2012: 126). Lisäksi oma erityistapauksensa ovat täysin tasaiset alueet. Solut, jotka eivät saa virtaussuunta-arvokseen yhtä tiettyä naapurisolun suunta-arvoa, muodostavat haasteita tulevissa mallinnusvaiheissa – niitä selvennetään tarkemmin luvussa 3.3 *Mallinnuksessa huomioon otettavia tekijöitä*.

D8-algoritmin lisäksi on kehitetty muitakin algoritmeja tarkemman virtaussuunnan määrittämiseen. Virtaussuuntamallit ovat joko D8 tapaan yksisuuntaisia (eng. *single flow direction*), jossa virtaus kohdistuu yhteen naapurisoluun, tai monisuuntavirtausmalleja (eng. *multiple flow direction*), joissa virtaus voi jakautua useampaan naapurisoluun (Li ym. 2005: 277; Qin ym. 2007: 444). Pintavalunnan mallinnustuloksen tarkkuus riippuukin merkittävästi valinnasta yksi- ja monisuuntaisen virtausmallin välillä. Yksisuuntamallit yksinkertaistavat enemmän veden valuntaa, joka todellisuudessa voi jakautua useampaan suuntaan (Jones 2002: 1052; Qin ym. 2007: 444); monisuuntavirtausmallit simuloivat luonnossa tapahtuvaa valuntaa todenmukaisemmin (Zhao ym. 2009: 3; Qin ym. 2013: 1071). Siksi yksisuuntamallien käyttöä on kritisoitu (esim. Zhao ym. 2009: 3) ja monisuuntavirtausmalleja on käytetty enemmän (Kenny & Matthews 2005: 770). Toisaalta esimerkiksi Li ym. (2005: 280) toteavat, että yksisuuntamallit aiheuttavat epätodennäköistä virtauksen suuntausta erityisesti pienen mittakaavan mallinnuksessa. Lisäksi Martz ja Garbrecht (1992: 749) mainitsevat, että jos tavoitteena on mallintaa laajan ojitetun alueen virtausverkko, joka ojituksen takia kulkee pääasiassa uomaverkoston mukaisesti, on yksisuuntavirtausmallin käyttö perusteltua.

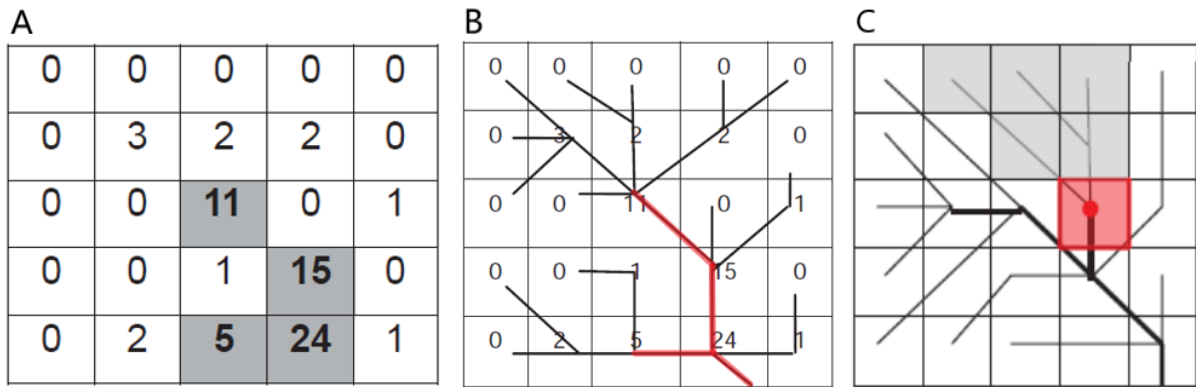
Seuraavaksi pintavalunnan mallinnuksessa lasketaan virtaussuuntatulorasterin perusteella valunnan kumuloituminen eli kertymä (eng. *flow accumulation*). Se kuvaa jokaisen

solun kohdalla, kuinka monesta solusta vesi valuu kyseiseen soluun (O’Callaghan & Mark 1984: 326; Mujumdar & Nagesh Kumar 2012: 128; kuva 8). Jos solujen painoarvoiksi asetetaan oletusarvo yksi (Mujumdar & Nagesh Kumar 2012: 128), jokaisesta solusta muodostuu laskennallisesti yhtä suuri valunnan määrä, ja tällöin tulorasteri kertoo tarkasteltavana olevan solun valuma-alueen koon solujen lukumääränä (O’Callaghan & Mark 1984: 326). Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää yksilöllisiä painoarvoja (O’Callaghan & Mark 1984: 326), joilla kuvataan jotain hydrologiaan liittyvää tekijää. Esimerkiksi sadannan painoarvoilla voidaan mallinnuksessa ottaa huomioon sadannan alueelliset erot (Schäuble ym. 2008: 637).



Kuva 8. Virtaussuuntien (A ja B) perusteella lasketaan jokaisen solun kohdalla valunnan kertymä (C). Tässä esimerkissä kaikkien solujen painoarvoiksi annetaan oletusarvo yksi. Näin muodostuu valuntakertymän tulorasteri (D). Kertymältään nollan arvoiset solut merkitsevät alueen korkeimpia kohtia, joihin ei kohdistu valuntaa (Li ym. 2005: 278). Lähde: Mukailleen Mujumdar & Nagesh Kumar (2012: 127–128).

Valuntamallinnuksen seuraava vaihe on virtausverkon (eng. *flow network*) muodostaminen virtaussuuntamatriisiin pohjalta (Mujumdar & Nagesh Kumar 2012: 127). Prosessia esittävät jo aiemmat, kuvien 8 A ja B virtaussuuntia kuvaavat matriisit (jotka ovat jatkoa kuvien 6 ja 7 esimerkkitalanteelle). Virtausverkon määrittämiseen voidaan hyödyntää myös valuntakertymän tulorasteria (Li ym. 2005: 279), josta voidaan erottaa solut, joissa kumuloidun valunta muodostaa teoreettisen virtauksen (O’Callaghan & Mark 1984: 327). Tätä varten täytyy asettaa kynnyksarvo, joka määrittelee, monestako solusta, eli kuinka suurelta alueelta kumuloiduva valunta muodostaa virtauksen (Mujumdar & Nagesh Kumar 2012: 127). Kuvan 9 A esimerkkimatriisissa on määritetty virtauksen solut kynnyksarvolla viisi. Virtaussolujen erottelussa määritellään siis se, kuinka suuri valuma-alue valunnan mallinnuksessa muodostuvalla virtauslinjalla minimissään on – määritellään siis teoreettisesti ensimmäisen tason latvauoma (ks. kuva 4), eli missä pintavaluntaa kumuloiduu niin paljon, että muodostuu virtaus (Li ym. 2005: 279) Kuva 4. Virtausverkkoa kuvaavat yhtenäiset virtauslinjat (eng. *flow lines*) saadaan muodostettua, kun kynnyksarvon ylittävät solut korostetaan, kuten kuvassa 9 A, linkitetään yhtenäiseksi ja muutetaan vektorimuotoiseksi, kuten kuvassa 9 B (Li ym. 2005: 279).



Kuva 9. Valuntakertymämatrisiin (kuva 5 D) pohjalta määritetyt virtauksen solut, joille valuntakertymän kynnsarvoksi on asetettu 5, näkyvät tummennettuina soluina (A). Rasterista voidaan virtausverkkomatriisiin (B) avulla erottaa virtausta kuvaava linja, joka näkyy verkoston punaisena osana. C-kuvan matriisissa punaisena näkyvä solu on valittuna purkupisteeksi, jonka yläpuolisen valuma-alueen muodostavat rasterit näkyvät harmaina. C-kuva ei ole samaa esimerkkitapausta kuin A- ja B-kuvat. Lähteet: How stream order works (2022); mukailen Mujumdar & Nagesh Kumar (2012: 128–129).

Valuma-alueet määritetään mallinnuksen ensimmäisen vaiheen virtaussuuntarasterin pohjalta (Mujumdar & Nagesh Kumar 2012: 129). Lisäksi tarvitaan määritettävän valuma-alueen purkupiste (eng. *pour point* tai *outlet*) (Mujumdar & Nagesh Kumar 2012: 129). Mallinnettavan alueen rastereista valitaan purkupiste (esimerkiksi kuvaamaan järveen laskevan joen suuta), jonka koko yläpuolisen valuma-alueen määrittäminen pohjautuu virtaussuuntarasteriin (Mujumdar & Nagesh Kumar 2012: 129). Kun purkupiste asetetaan valuntakertymän rasteriaineiston perusteella, eli valitaan purkupisteeksi virtausta indikoiva solu (kuva 9 C) (Snap pour point... 2022), muodostuu valuma-alue virtausverkon pisteen yläpuolelle (kuten kuvassa 9 C). Näin voidaan muodostaa mallinnetun virtausverkon päävaluma-alue tai kuvan 4 tapaisia alivaluma-alueita. Koska valuma-aluemallinnus perustuu virtaussuuntaan, lopputuloksen tarkkuuteen ja todenmukaisuuteen vaikuttaa käytetty virtaussuunta-algoritmi (Li ym. 2005: 276).

3.3 Mallinnuksessa huomioon otettavia tekijöitä

3.3.1 Korkeusmallin tarkkuus vaikuttaa mallinnuksen lopputulokseen

Edellisissä kappaleissa on kuvattuna yksinkertaistetusti hydrologisen mallintamisen päävaiheet pintavalunnan, virtausverkon ja valuma-alueiden muodostamisen osalta. Esimerkiksi Oksanen ja Sarjakoski (2005) sekä Choi (2012) kuitenkin muistuttavat, että hydrologinen mallintaminen on aina yleistys todellisesta hydrologiasta. Mallintamiseen liittyykin erilaisia haasteita ja epävarmuustekijöitä, joista esimerkiksi Hammond ja Han (2006: 50) listaavat tärkeimmiksi

korkeusmallin tarkkuuden, algoritmien ongelmat sekä ihmisen rakentaman infrastruktuurin vaikutukset hydrologiaan.

Ensinnäkin korkeusmallilla on pohja-aineistona suuri merkitys mallinnuksen lopputulokseen. Se, miten hyvin DEM-aineistolla pystytään mallintamaan hydrologista todellisuutta, määräytyy: 1) DEM:n resoluution, eli solukoon; 2) DEM:n vertikaalisen ja horisontaalisen tarkkuuden sekä 3) mallinnettavan alueen tasaisuuden mukaan (Kenny ym. 2008: 1418). Korkeusmallin tarkkuus vaikuttaa siis tuotetun mallin todenmukaisuuteen ja tarkkuuteen (Kumar ym. 2017: 65); virtausreittien simulointi DEM:n pohjalta voi sisältää useita epätarkkuuksia verrattuna todenmukaisiin virtausreitteihin. On myös huomioitava, että mallin epätarkkuudet voivat edelleen vaikuttaa mallinnuksen pohjalta tehtäviin jatkoanalyysiin (Petroselli & Alvarez 2012: 712), kuten uoman eroosioriskin analysointiin (Kenny & Matthews 2005: 771; Callow ym. 2007: 32; Lindsay 2016; Wu ym. 2019: 185–186).

Korkeusmallin tarkkuuteen liittyen tulee ottaa myös huomioon sen tietomuoto, eli rasterimuoto. Kuten aikaisemmin todettiin, rasteriaineistot kuvaavat jatkuvaa tietoa (Galati 2006: 30), mutta kuten Qin ym. (2007: 1056) tarkentavat, rasterimuotoinen korkeusmalli on todellisuudessa epäjatkuva kuvaus jatkuvasta maanpinnan topografiasta. Vaikka korkeusmalli tuotetaan ilmalaserkeilauksen pistepilven interpoloinnilla (Kansallisen maastotietokannan... 2017: 9), havaintoarvot asetetaan resoluution mukaisten, esimerkiksi Suomessa tarkimman 2 m x 2 m resoluution kokoisten solujen arvopisteisiksi, jolloin tieto maanpinnan jatkuvasta korkeudesta esitetään kahden metrin välein – ei täysin jatkuvasti. Korkeusmallin tuotantovaiheessa voi siis syntyä virhettä, joka johtaa hydrologisen mallin epävarmuuteen (Oksanen & Sarjakoski 2005: 3086). Esimerkiksi Kenny ja Matthews (2005: 770) mainitsevat, että jo suhteellisen pienet korkeusvirheet DEM:ssä voivat aiheuttaa huomattavia eroja mallinnettavien valuma-alue-eräajojen ja todellisten vedenjakajien välille.

Korkeusmallin tarkkuuden lisäksi on otettava huomioon, että hydrologiaa mallintavat GIS-pohjaiset menetelmät ovat keskittyneet usein juuri pintaveden valunnan mallintamiseen (esim. Understanding drainage 2022) – kuten tässäkin työssä. Näin ollen pohjaveden vaikutusta ei oteta huomioon (Mujumdar & Nagesh Kumar 2012: 2), vaikka todellisuudessa esimerkiksi lähteistä virtaava vesi voi vaikuttaa pintavaluntaan monimutkaistamalla valunnan reittejä (Jones 2002: 1052). Lisäksi Oksanen ja Sarjakosken (2005: 3086) mukaan tehokkaasti vettä läpäisevä maaperä voi aiheuttaa massiivista pintaveden valumista pohjavedeksi, joka ei kuitenkaan ole näkyvä ilmiö maan pinnalla, eikä siten tule huomioiduksi maanpinnan korkeusmalliin pohjautuvassa mallinnuksessa. Korkeusmalliin perustuva mallinnus ei siis ota huomioon kaikkia valuma-alueen ominaisuuksia, kuten kasvillisuutta ja maaperän

ominaisuuksia, eikä rakennuksia ja muita kohteita, sillä korkeusmalli on kuvaus paljaista maanpinnan muodoista (Mujumdar & Nagesh Kumar 2012: 2, 123).

Lisäksi monet ihmisen tekemät muutokset maisemassa, kuten ojitukset ja muu infrastruktuuri, aiheuttavat ongelmia hydrologisessa mallintamisessa (Callow ym. 2007: 31), koska ne muuttavat luonnollisia pintavalunnan kulkureittejä (Choi 2012: 81). Etenkin rakenteet, jotka johtavat vesiä kulkemaan maanpinnan alapuolella, eivät sovellu yksinkertaisiin, maanpinnan korkeusmalliin pohjautuviin hydrologisiin malleihin. Esimerkiksi tierummut, joiden läpi vesi ohjataan valumaan teiden ali, voivat näyttäytyä maanpinnan korkeusmalleissa tielinjojen tasossa, eli vesi ei ohjautuisi valumaan uoma korkeamman tien läpi, vaikka todellisuudessa vesi virtaa tien ali (Choi 2012: 82). Lindsay ja Dhun (2015) täsmentävät, että vaikka nykyiset LiDAR-menetelmällä (*Light Detection and Ranging*) tuotetut, entistä tarkemmat korkeusmallit parantavat pintavalunnan reittien ja valuma-alueiden mallinnuksen tarkkuutta, niin edelleen maan alla kulkevat veden kulkureitit, joita korkeusmalli ei huomioi, aiheuttavat haasteita mallin tarkkuudessa.

Hydrologisen mallinnuksen algoritmeista on kehitetty paljon erilaisia versioita, jotka ottavat huomioon erilaisia maiseman tekijöitä, kuten ihmisen rakentamaa infrastruktuuria (esim. Choi 2012). Kehittyneemmät algoritmit voivat ottaa huomioon pohjaveden vaikutuksen pintavaluntaan, eli huomioida maahan imeytyvän veden sekä sieltä maan pinnalle tulevan valunnan (Choi 2012: 82). Yksinkertaisissa valuntamallinuksissa ei myöskään huomioida sadantaa, lämpötilaa ja haihduntaa (Mujumdar & Nagesh Kumar 2012: 2), mutta tarkempaan hydrologiseen malliin voidaan yhdistää esimerkiksi reaaliaikaista sadantatietoa (Albrecht 2007: 64) tai kokonaishaihdunnan määrä (Choi 2012: 82). Kehittyneempiin mallinuksiin hyödynnetään sadantatietojen lisäksi esimerkiksi kaukokartoitus-, maanpeite- ja maankäyttöaineistoja (Mujumdar & Nagesh Kumar 2012: 120; Sitterson ym. 2017: 18).

3.3.2 Korkeusmallin nielujen hydrologinen eheyttäminen

Korkeusmalli sisältää virtaussuunnan määrittystä haittaavia nieluja, joista virtausta ei suuntaudu mihinkään ympäröivästä kahdeksasta naapurisoluista (Kumar ym. 2017: 67). Nielu (eng. *sink* tai *pit*) tarkoittaa siis solua tai soluista muodostuvaa aluetta, jonka kaikki ympäröivät solut ovat kyseistä kohtaa korkeammalla (O’Callaghan & Mark 1984: 324, 326; Kenny ym. 2008: 1418). Nieluja on sekä todellisia luonnosta löytyviä kuoppia (Kenny ym. 2008: 1418) että DEM-aineiston satunnaisvirhekohtia (O’Callaghan & Mark 1984: 325, 337).

Nielut haittaavat valunnan mallintamista, koska virtaussuuntien kumuloituva ketju katkeaa nieluissa (O’Callaghan & Mark 1984: 324; Petroselli & Alvarez 2012: 712; Wu ym. 2019: 185). Vesi siis kerääntyy nieluun, jolloin mallinnettava valunta ikään kuin pysähtyy nielun kohtaan. Tämä voidaan nähdä mallinnusvirheenä, koska kyseisen kohdan virtaussuuntaa ei voida määrittää (O’Callaghan & Mark 1984: 325). Jos kyseessä on todellinen topografian nielu, eli kuoppa, valunta jatkaisi sen yli täytettyään kuopan valuntavedellä.

Nieluja on yleensä enemmän virtausverkkosolujen kohdalla kuin verkon ulkopuolisilla alueilla (Kenny ym. 2008: 1426). Lisäksi virtausverkon ulkopuoliset nielukohdat ovat usein laajuudeltaan ja syvyydeltään pienempiä (Kenny ym. 2008: 1426). Näin ollen nielujen osalta pintavalunnan mallinnuksessa merkittävimmät virheet syntyvät juuri virtausverkon ja sen läheisyydessä olevien solujen kohdille, eikä niinkään virtausverkon ulkopuolisille alueilla (Kenny ym. 2008: 1419).

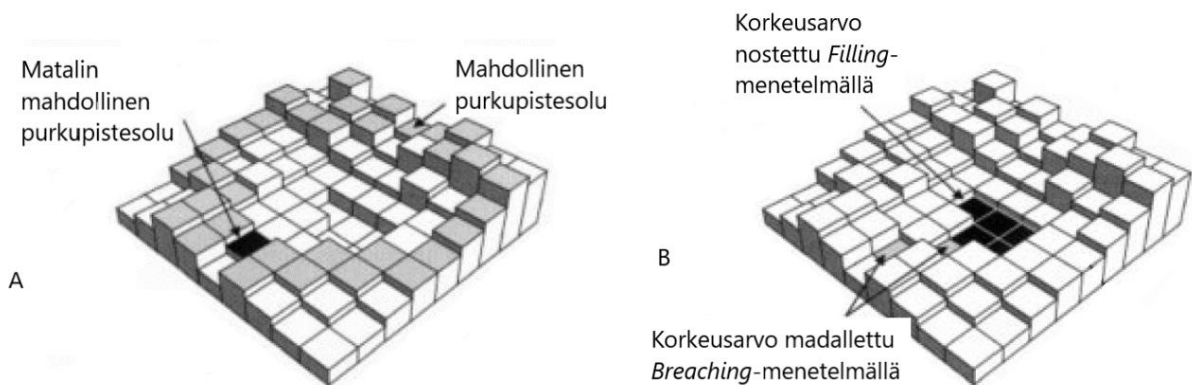
Nielujen takia DEM-aineistolle täytyy tehdä eheytystä (eng. *smoothing*) (O’Callaghan & Mark 1984: 328; Kenny ym. 2008; Mujumdar & Nagesh Kumar 2012: 127; Van Nieuwenhuizen ym. 2021), jotta hydrologiset mallit pystyvät simuloimaan valuntaa yhtäjaksoisesti tarkasteltavan alueen laajuudella (Saunders 1999). Suurin osa eheytystä toteuttavista menetelmistä perustuu nielusolujen korkeusarvojen uudelleenmäärittämiseen (Kenny ym. 2008; Petroselli & Alvarez 2012: 713). Eheytykseen hyödynnetään erilaisia algoritmeja. Wangin ym. (2019: 93) mukaan nykyisten nieluja poistavien algoritmien joukossa ei ole yhtä ainoaa, jota voidaan kutsua optimaalisimmaksi, koska eri algoritmit soveltuvat erilaisiin tilanteisiin – erilaisille mallinnusalueille. Vaikka ei ole olemassa yhtä kaikille alueille soveltuvaa algoritmia, Wangin ym. (2019) mukaan eri käsittelymenetelmiä yhdistelemällä voidaan päästä parempaan tulokseen kuin yhtä tiettyä menetelmää käyttämällä.

Yksi yleisimmistä menetelmistä nielujen eheyttämiseksi on Jensonin ja Dominguen (1988) esittelemä *filling*-menetelmä, eli nielujen täyttäminen (mm. Kenny ym. 2008: 1420; Petroselli & Alvarez 2012: 712; Wangi ym. 2019: 84). Jenson ja Domingue (1988) selostavat algoritmin toimivan niin, että se ensin tunnistaa nielun purkupisteen ja sitten nielusolujen kohdalta täyttää korkeusmallin eli nostaa korkeusarvot purkupisteen korkeusarvoon, jolloin jokainen nielualue muuttuu tasaiseksi alueeksi. Sen jälkeen algoritmi käsittelee tasaisen alueen tunnistamalla tasaisen alueen purkupisteen ja ohjaa virtauksen kaikista tasaisen alueen soluista iteroimalla kohti purkupistettä, kunnes koko tasainen alue on käyty läpi.

Vaikka nielujen täyttö eheyttää korkeusmallin hydrologiseen mallinnukseen sopivaksi, liittyy täyttömenetelmän käyttöön kuitenkin dilemma nimenomaan tasaisten alueiden näkökulmasta: nostamalla nielujen korkeutta lisätään kokonaisuudessaan

mallinnusalueen tasaisten alueiden osuutta (Petroselli & Alvarez 2012: 712). Tasaiset alueet ovat myös ongelmallisia pintavalunnan mallintamisessa (tasaisista alueista kerron tarkemmin seuraavassa luvussa 3.3.3 *Topografialtaan tasainen mallinnusalue edellyttää uomaoptimointia*). Kenny ym. (2008: 1421) huomauttavatkin, että pelkästään *filling*-menetelmällä, ilman korkeusmallin lisäkäsittelyä, ei voida taata, että siitä johdettu virtausverkko vastaa todellisia virtauksen kulkureittejä. Toisin sanoen nielujen täyttö takaa vain sen, että virtaussuunnat muodostavat yhtenäisen virtausverkon, mutta ei sen oikeellisuutta todelliseen uomastoon verrattuna. Tämä siis lisää mallinnuksen tuloksen epävarmuutta. Lisäksi Martzin ja Garbrechtin (1999: 843) mukaan *filling*-menetelmässä on heikkoutena se, että kaikkien nielujen kohdalla pätee oletus, että nielu on virheellisesti liian matala, koska kaikille nieluille toteutetaan korkeusarvon suurentaminen. Toisin sanoen kaikkien nielujen kohdalla oletetaan, että korkeusarvo on virheellisesti aliarvioitu liian matalaksi. Todellisuudessa nielu voi olla myös korkeusarvon yliarviota, eli sillä voi olla todellisuutta pienempi korkeusarvo.

Filling-menetelmän sijaan voidaan käyttää *breaching*-menetelmää, jonka etuna on se, että se ottaa huomioon myös mahdolliset yliarvioitujen korkeusarvot (Martzin ja Garbrechtin 1999: 843). Käytännössä menetelmässä yhdistetään korkeusarvojen madallusta sekä *filling*-menetelmän mukaista nostamista. Menetelmässä on siis pohjana *first breaching and then filling*-periaate, joka on kuvattu alla olevassa kuvassa 10.

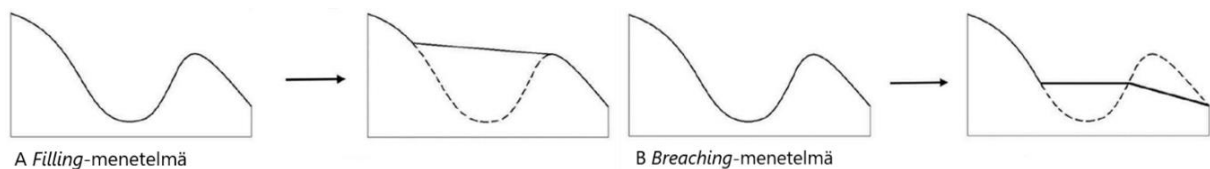


Kuva 10. Kaaviokuva *Breaching*-menetelmästä, joka tunnistaa tasaisten alueiden purkupisteen (A) ja madaltaa purkupisteen aluetta sekä muokkaa tasaisten nielualueiden solujen korkeusarvoja *filling*-menetelmään perustuen (B) niin, että virtaus tasaiselta alueelta virtaa kohti ”rikottua” purkupistettä. Mukailen Martz ja Garbrecht (1999: 839).

Martz ja Garbrecht (1999: 837, 1998: 847) tarkentavat, että nielujen purkupisteiden ”rikkominen” (eng. *breaching*) tapahtuu niin, että algoritmi tunnistaa kunkin nielun todennäköisimmän purkautumiskohdan eli matalimman mahdollisen purkupisteen ja selvittää, voiko purkauksen alueen yhtä tai kahta solua madaltamalla saada valunta poistumaan purkupisteen kautta – ilman, että madaltaminen muuttaa virtaussuuntaa väärään suuntaan. Jos tämä onnistuu, algoritmi alentaa yhden tai kahden solun korkeusarvoa. Potentiaalisia purkupaikkoja ovat nielun alueen reunasolujen naapurisolut, jotka ovat korkeampia kuin reunasolut. Potentiaalisista soluista purkupistesoluksi valikoituu matalimman korkeusarvon solu (Martz & Garbrecht 1998: 848).

Breaching-menetelmällä nielun alue joko poistuu kokonaan tai pienenee. Jos nielu ei poistu kokonaan, vaan alue vain pienenee, täytetään loppu alue *filling*-menetelmän mukaisesti, jolloin syntyy tasainen alue. Tasaiselle alueelle kohdistetaan muokkaus, jonka Martz ja Garbrecht (1998: 850) kuvaavat seuraavanlaisesti: Algoritmi muuttaa solujen korkeuksia ohjaamaan virtauksen suunnat kohti tunnistettua purkupistettä. Korkeusmuutokset perustuvat oletukseen, että virtaussuunnat kohdistuvat sekä kohti alemmalla korkeudella että pois päin korkeammasta korkeudesta. Algoritmi asettaakin kaksi kaltevuutta tasaiselle pinnalle: yhden kohti vierekkäisiä alemman korkeuden alueita, joka edelleen vie valunnan lähimpään purkupisteeseen, ja toisen, joka pakottaa valunnan pois viereisistä suuremman korkeusarvon soluista. Nämä vaiheet tuottavat yhteen pisteeseen eli purkupisteeseen suuntautuvan valunnan. Martz & Garbrecht (1998: 850–851) huomauttavat, että solujen korkeusarvojen muutokset ovat korkeusarvojen tarkkuuteen suhteutettuna hyvin pieniä – vain sen suuruisia, että valunnan suunta on mahdollista tunnistaa korkeuserojen avulla, mutta eivät kuitenkaan niin suuria, että ne muuttaisivat korkeusarvoja merkittävästi.

Filling- ja *breaching*-menetelmien eroavaisuus on esitetty kuvan 11 kaviossa. *Breaching*-menetelmän etuna on, että siihen sisältyy tyypillisesti vähemmän korkeusmallin korkeusarvojen muutosta kuin nielujen täytössä (Kenny ym. 2008: 1421). Lisäksi etuna on se, että tasaisten nielun alueiden sisäiset, alkuperäiset virtausreitit säilyvät, kun kaikkia alueen sisäisiä korkeuksia ei nosteta purkupisteen korkeuteen, kuten *filling*-menetelmässä, vaan korkeusarvoja muokataan vain pienin määrin, kaltevoittaen valuntaa kohti tasaisen alueen purkupistettä (Kenny ym. 2008: 1421; Lindsay 2016b: 663).



Kuva 11. Kaaviokuva *filling*-menetelmän (A) ja *breaching*-menetelmän (B) erosta nielujen eheyttämiseksi. *Filling*-menetelmässä kaikki nielualueiden solujen korkeusarvot nostetaan matalimman nielualan ulkopuolella olevan solun korkeuteen, jolloin nielu täyttyy. Vastaavasti *breaching*-menetelmässä algoritmi tunnistaa nielun purkupisteen ja madaltaa purkupistealueen korkeusarvoa, sekä muuttaa nielualan sisäisten solujen korkeusarvoja kaltevoittaan valunnan kohti purkupistettä. Mukailten Wang ym. (2019: 87).

Kenny ym. (2008: 1421) huomauttavat, että *breaching*-menetelmä yksistään – kuten *filling*-menetelmäkään – ei takaa, että korkeusmallin pohjalta mallinnettu hydrologinen virtausverkko vastaisi täsmällisesti luonnossa olemassa olevaa, todellista uomaverkosta. Hydrologisessa eheytyksessä on myös otettava huomioon, että alkuperäinen rasterimuotoinen korkeusmalli aina jonkin verran yksinkertaistaa maanpinnan todellisia muotoja. Sen lisäksi eheyttäminen – joka toisaalta poistaa DEM:n nieluja (O’Callaghan & Mark 1984: 325) – vaikuttaa myös maanpinnan muotoja yksinkertaistavasti.

3.3.3 Topografialtaan tasainen mallinnusalue edellyttää uomaoptimointia

Pintavalunnan mallintamisen tarkkuutta heikentää tutkimusalueen tasaisuus (Kenny ym. 2008: 1418). Tasaiset alueet (eng. *flat*) tunnetaan ongelmallisina kohteina DEM-pohjaisessa hydrologisessa mallintamisessa (Callow ym. 2007: 30; Kenny ym. 2008: 1418; Rahman ym. 2010; Kumar ym. 2017: 68–69), koska vähäisen maanpinnan korkeusvaihtelun alueilla korostuu samanarvoisten solujen ongelma (O’Callaghan & Mark 1984: 337; Kenny ym. 2008: 1418). Toisin sanoen, kun kaltevuus on laajalla alueella nolla, millekään alueen sisäisille soluille ei voida määrittää virtaussuuntaa pelkästään naapurisolujen perusteella, eikä mallinnettava pintavalunta näin jatka eteenpäin (O’Callaghan & Mark 1984: 324; Kenny ym. 2008: 1418).

Nielujen tapaan myös tasaiset alueet voivat olla joko todellisia tai korkeusmallin resoluutioon tai satunnaisvirheisiin liittyviä virheellisyyksiä (O’Callaghan & Mark 1984: 337; Kenny ym. 2008: 1418). Zhao ym. (2009: 2) nostavat esiin kaksi esimerkkiä virheellisistä tasaisista alueista: maa- ja metsätalousalueet, joilla on ihmisen toimesta rakennettu kuivatusojaverkosto, sekä järvet, jotka näyttävät korkeusmallissa tasaisina pintoina vedenpinnan korkeuden mukaan. Jones (2002: 1057) jatkaa, että virtaussuuntamallinnusta ei voi toteuttaa järven alueella, koska virtaussuunnat eivät kuvaisi järven todellisia

virtausolosuhteita. Järvien tasaisiin alueisiin liittyy myös toinen mallinnusongelma: järvet saattavat olla bi- tai trifurkaatioaluetta, eli aluetta, jolta virtaus haarautuu yhden purkupisteen sijaan kahteen tai kolmeen (tai useampaan) purkupisteeseen (Oksanen & Sarjakoski 2005: 3086). Vaikka käytössä olisi monisuuntavirtausmalli, nollakaltevuuden takia valunnan mallinnuksella ei voida simuloida virtauksen jakautumista.

Mallinnettavan alueen tasaisuus vaikuttaa siis siihen, miten hyvin pelkästään DEM-aineiston pohjalta pystytään mallintamaan pintavaluntaa (Kenny ym. 2008: 1418). Tasaisten alueiden ongelmat liittyvät erityisesti karkeampaan resoluutioon (esim. 20 m solukokoon) pohjautuviin pintavalunnan mallinuksiin (esim. Kumar ym. 2017; Rahman ym. 2010), mutta tarkkojenkaan korkeusmallien avulla ei pelkästään pystytä mallintamaan hydrologiaa, jos korkeusmallin vertikaalinen tarkkuus ei ole riittävä ottaakseen huomioon kaikkia ihmisen rakentamia maiseman piirteitä, kuten ojituksia ja teitä (Hammond & Han 2006: 50). Myös Petroselli ja Alvarez (2012: 712) toteavat, että hyvin tarkkojen korkeusmallien, kuten LiDAR-aineistojen, hyödyntämiseen liittyy ongelmia, ellei aineistoa esikäsitellä tarkoituksenmukaisesti ennen hydrologista mallinnusta. Usein tasaisilla alueilla ei siis ole saatavilla niin tarkkaa ja korkearesoluutioista korkeusmallia, että sen vertikaalinen tarkkuus riittäisi todenmukaisen pintavalunnan mallintamiseen (Callow ym. 2007: 31; Kenny ym. 2008: 1421–1422; Zhao ym. 2009: 2, 4).

Jos korkeusmallin tasaisia alueita ei käsitellä asianmukaisesti, voi tuloksena olla joko katkonainen virtausverkko tai yhtenäinen virtausverkko, joka ei kuitenkaan kuvaa todenmukaisia valunnan ja ennen kaikkea uomavirtauksen kulkureittejä (Kenny ym. 2008: 1419; Zhao ym. 2009: 4). Petrosellin ja Alvarezin (2012: 712) mukaan tasaisilla alueilla DEM:stä johtuvat epätarkkuudet koostuvat usein pitkistä yhdensuuntaisista ja rinnakkain kulkevista, epärealistisista virtauslinjoista. Lisäksi virtaussuuntamalliin muodostuva virhe aiheuttaa edelleen virheellisyyttä valuma-alueen määrittämisessä (Kumar ym. 2017: 68–69), koska määrittäminen pohjautuu virtaussuuntiin (Li ym. 2005: 276).

Tasaiset alueet tulee siis käsitellä, jotta korkeusmallin pohjalta tuotettu pintavalunnan mallinnus kuvaisi paremmin todenmukaisia valunnan reittejä. Valunnan kohdentaminen todelliseen uomaverkostoon (eng. *flow enhancement*) voidaan toteuttaa monin eri menetelmin (Kenny ym. 2008: 1420). Toisin kuin yksittäisten nielusolujen ja -alueiden tapauksessa tasaisten alueiden ongelmassa valuntamallin parantamiseen kannattaa hyödyntää täydentäviä, saatavilla olevia lisäaineistoja (Kenny & Matthews 2005; Zhao ym. 2009: 2), kuten vektorimuotoista vesistöaineistoa (Saunders 1999; Yan ym. 2020: 5500).

Callow'n ym. (2007: 31) mukaan tasaisten alueiden käsittelymenetelmät voidaan jakaa niin sanottuihin pehmeisiin (eng. *soft solutions*) ja koviin (eng. *hard solutions*) ratkaisuihin. Pehmeät ratkaisut eivät muokkaa alkuperäisen korkeusmallin arvoja, vaan hyödyntävät esimerkiksi uomaverkoston kuvaavaa vektoriaineistoa virtaussuuntien määrittämiseen (esim. Zhu ym. 2006). Vastaavasti kovat ratkaisut muuttavat DEM:n korkeusarvoja (Callow ym. 2007: 31) – joko pelkästään vesistövektoreiden kohdalta tai lisäksi niiden ulkopuolisilta alueilta. Korkeusarvojen muokkaaminen voi aiheuttaa epätodellista topografiaprofiilia, eli virheitä muokatun korkeusmallin ja maaston todellisten muotojen välillä, tai luoda kokonaan vääristyneen esityksen virtausverkosta (Wu ym. 2019). Useimmiten kuitenkin – kuten nielujenkin poisto – tasaisten alueiden hydrologisen eheyden ratkaisut perustuvat koviin ratkaisuihin (Soille 2004; Callow ym. 2007: 31; Kenny ym. 2008; Petroselli & Alvarez 2012: 713).

Yksi yleisimmistä tasaisten alueiden käsittelymenetelmistä on ennen virtaussuunnan määrittämistä tehtävä uomien poltto (eng. *stream burning*) (esim. Callow ym. 2007; Kenny ym. 2008), joka muokkaa korkeusmallin arvoja. Menetelmä perustuu vektorimuotoisen uomaverkostoaineiston integroimiseen rasterimuotoiseen korkeusmalliin (Saunders 1999). Uomien polton tavoitteena on Kennyn ym. (2008: 1420–1421) sanoin keskittää virtausverkoksi mallinnettava virtaus kulkemaan todellisessa uomaverkostossa, joka ei alkuperäisessä korkeusmallissa erotu liian epätarkan vertikaalisen tarkkuuden takia.

Uomien poltto voidaan tehdä joko pelkästään uomiin kohdistuen tai myös ulkopuolisiin alueisiin kohdistuen (Callow ym. 2007: 32–33; Lindsay 2012). Uomien poltto tapahtuu joko nostamalla uomaverkoston ulkopuolisia, maa-alueen solujen korkeusarvoja (esim. Saunders & Maidment 1996: 69) tai madaltamalla uomaverkoston kohdalla olevien solujen korkeusarvoja (Kenny & Matthews 2005: 770–771; Wu ym. 2019: 185). Kennyn ja Matthews'n (2005: 771) mukaan korkeusmalliin tehtävä muokkauksen määrä on pienempi, kun korkeusarvojen muutokset kohdistetaan vain soluihin, joiden kohdalla tunnettu uomaverkosto kulkee. Wun ym. (2019: 185) mukaan menetelmistä madaltaminen on yleisempi, koska siinä muokataan pienempi lukumäärä soluja. Lindsay'n (2016b: 659) mukaan uomien ulkopuolisten alueiden nosto on yleistä rannikkoalueilla, joilla uomien madaltaminen tuottaisi negatiivisia, merenpinnan alapuolisia korkeusarvoja.

Uomien poltto on tarkoituksenmukainen ja sopiva menetelmä silloin, kun käytettävissä oleva uomaverkostoaineisto on tarkempi kuin saatavilla oleva korkeusmalli (Lindsay & Dhun 2015: 398; Lindsay 2016b: 667). DEM:n resoluutiota tarkemman uomaverkoston poltolla saadaan lopputuloksena korkeusmalli, joka kuvaa korkeusarvoillaan

paremmin uomien sijaintia sekä edelleen korkeusarvoista johdettuja valuma-alueita (Callow ym. 2007).

Käytännössä vektorimuotoinen uomaverkostoaineisto muutetaan ensin rasteriksi (samaa resoluutioon korkeusmallin kanssa) ja sen jälkeen uomaa kuvaavien rasterien kohdalla korkeusmallin korkeusarvoja madalletaan käyttäjän määrittelemän arvon verran (Saunders 1999; Kenny & Matthews 2005: 770–771; Callow ym. 2007: 32; Wu ym. 2019: 186). Wu ym. (2019: 186) tarkentavat, että korkeusarvojen madallukseen käytetään binääristä, kaksiosaista korkeusmallin luokittelua uomasoluihin ja ei-uomasoluihin – uomasolut poltetaan ja ei-uomasolut jätetään alkuperäiseen korkeuteen tai niihin kohdistetaan erilainen (vähemmän korkeusarvoa muokkaava) käsittely.

Sopivan polttosyvyyden määrittäminen voi olla haasteellista (Lindsay 2016b: 659). Esimerkiksi Callow'n ym. (2007: 34) mukaan alle viiden metrin polttosyvyys ei vielä muokkaa virtausreittien sijaintia merkittävästi. Heidän tutkimuksessaan oli käytössä karkearesoluutioinen 10 x 10 metrin korkeusmalli, jonka vertikaalinen tarkkuus on yksi metri. Syvyyden määrittämisessä on siis otettava huomioon saatavilla olevan korkeusmallin resoluutio.

Vaikka uomien polttaminen parantaa huomattavasti pintavalunnan ja valuma-alueiden mallinnuksen yleistä tarkkuutta, ei menetelmä ole täysin ongelmaton. Ensinnäkin uomaverkoston rasterointiin liittyy haasteita. Vaikka virtaus pakotetaan kulkemaan madallettuja virtaussoluja pitkin, alkuperäistä topologiatietoa (kuten uomien välisiä yhteyksiä) ja morfologista tietoa (kuten uomien muokittelua) menetetään huomattavasti rasteroinnin aikana (Wu ym. 2019: 185). Rasteroituun verkostoon voi muodostua vääriä uomien yhtymäkohtia, kun kaksi uomaa ovat toisistaan erillään vain pienen välimatkan verran, mutta rasteroinnin resoluutiossa ne kulkevatkin saman solun läpi (eng. *stream collision*) tai kahden viereisen solun läpi muodostaen yhdistyvän, monihaaraisen uoman (eng. *stream adjacency*) (Lindsay 2016b: 660; Wu ym. 2019: 186). Lisäksi binäärinen luokitus vektoriaineiston rasteroinnissa voi johtaa korkeusarvojen muutosten virheisiin poltossa – varsinkin jos uomaverkosta kuvaavan lisäaineiston ja DEM:n mittakaavat eivät ole samat (Wu ym. 2019: 186), koska silloin ei-uomiksi ja uomiksi määräytyvät solut eivät välttämättä vastaa todellisuutta eli sitä, missä sijaitsee uomia ja missä ei. Edellä kuvattujen haasteiden takia mallinnettava virtausverkko voi vääristyä rasteroinnista.

Toiseksi aineistojen tarkkuus aiheuttaa haastetta uomien poltossa. On siis otettava huomioon, että uomaverkostovektorissa saattaa olla sijaintivirhettä, mikä aiheuttaa edelleen virhettä pintavalunnan mallinnuksessa (Saunders & Maidment 1996; Saunders 1999; Callow ym. 2007: 32). Lisäksi korkeusmallin mukainen ja lisäaineiston mukainen uoma saattavat

kulkea hieman eri kohdissa, jolloin lopullisessa virtausverkossa voi näkyä virheellisesti kaksi rinnakkaista uomaa (Callow ym. 2007: 32; Lindsay 2016b). Muun muassa näiden virheellisten ”kaksoisuomien” takia on kehitetty monimutkaisempia uomien polton algoritmeja (Callow ym. 2007: 32; Lindsay 2012; 2016b), jotka uomasolujen lisäksi muokkaavat uomia ympäröivien alueiden soluja (Kenny & Matthews 2005: 771; Wu ym. 2019: 185).

Kolmanneksi uomapoltoissa haasteena on se, että merkittävät korkeusarvojen muutokset uomien poltoissa vaikuttavat myös aineiston jatkokäytössä: korkeusarvojen muutokset vaikuttavat ominaisuuksiin, joita voidaan analysoida ja johtaa muokatun korkeusmallin pohjalta (Lindsay 2016b). Esimerkiksi Callow ym. (2007: 32, 34, 36) huomauttavat, että DEM-aineiston pysyvä muokkaus voi vaikuttaa merkittävästi maaston kaltevuusanalyysiin.

Vaikka uomien poltto on sopiva menetelmä silloin, kun käytettävissä oleva uomaverkostoaineisto on tarkempi kuin DEM (Lindsay & Dhun 2015: 398; Lindsay 2016b: 667), niin toisaalta liian tarkkakin uomaverkostoaineisto aiheuttaa haasteita. Uomaverkostovektorin resoluutio voi olla niin tarkka, eli niin yksityiskohtainen, ettei sitä voida esittää rasterina korkeusmallin resoluutiossa ilman, että alkuperäistä verkon topologiaa eli sijaintia ja linjoja muutetaan merkittävästi (Lindsay 2016b: 660). Tällöin uoma-aineiston polttaminen sellaisenaan voi olla huono vaihtoehto kytkeä uomaverkosto korkeusmalliin (Lindsay 2016b: 660). Aineistoa voi kuitenkin karsia latvauomien osalta ja rasteroida vain suuremmat ”pääuomat”, koska sen pitäisi Lindsayn (2016b: 660) mukaan vähentää virheellisten uomaosuusien rasteroinnin vaikutusta mallinnettuun virtausverkkoon. Latvauomien poistamista voidaan perustella myös sillä, että ne ovat kapeina uomina usein uomaverkoston katkonaisia osia ja voivat olla myös kasvillisuuden peittämiä eli umpeutuneita (Lindsay 2016b: 660).

Kuten edellä kävi ilmi, uomien polton menetelmä voi vaatia uomaverkostovektorin esikäsittelyä – menetelmän haasteena voidaan siis nähdä myös manuaalisen esikäsittelytyön tarve (Lindsay 2016b: 660). Esimerkiksi uoma-aineiston epäjatkuvat uomaosuudet vaativat voimakasta esikäsittelyä, jotta uomaverkostoon keskitettävä virtaus on yhtenäinen (Saunders 1999) ja jotteivat lyhyet, madalletut uomaosuusien solut tule uudelleen täytetyksi hydrologisen eheytyksen työvaiheessa (Lindsay 2016b: 659). Saundersin (1999) mukaan uomien poltoissa käytettävä vektorimuotoinen vesistöaineisto tulee aina esikäsitellä, jotta se on yhtenäinen ja siten lisää mahdollisimman tehokkaasti pintavaluntamallin toimivuutta. Saundersin (1999) mukaiset esikäsittelyn vaiheet ovat seuraavat: 1) poltoissa käytettävän vesistöaineiston laajuus asetetaan laajemmaksi kuin mallinnettava alue, eli mallinnettavaa

valuma-aluetta reunustavien alueiden uomaverkostot tulee ottaa mukaan mallinuksen pohja-aineiston spatiaaliseen ulottuvuuteen, jotta algoritmit ”löytävät” mahdollisimman todenmukaiset vedenjakajat itse tutkimuksen kohteena olevan valuma-alueen ja sen ulkopuolisten valuma-alueiden väliltä; 2) järvet ja virtavesialueet (polygonit), joiden läpi uomaverkosto luonnossa kulkee, korvataan alueen kahtia jakavilla keskilinjoiilla; 3) uomaverkoston monihaaraisissa kohdissa valitaan virtauksen pääreitti (eng. *primary drainage path*) irrottamalla verkostosta muut virtauksen reitit (eng. *secondary drainage paths*), eli poistamalla niiden yhtymäkohdat eli solmukohdat (eng. *node*), joista monihaaraisuus alkaa; ja 4) kaikki uomaverkoston murtoviivakohteet, jotka ovat irrallisia yhtenäisestä verkostosta, tulee joko poistaa tai yhdistää verkostoon.

Korkeusmallin uomien poltto voidaan kohdistaa myös pelkästään osaan uomaverkostosta: Lindsay (2016: 667) mainitsee menetelmän, joka polttaa uomia matalampaan korkeuteen vain niistä kohdista, joissa uomat ja tiet risteävät. Risteämiskohdat ovat siis sellaisia, joissa tien ali kulkee tierumpu. Tarkoituksena tällaisessa osittaisessa aineiston poltossa on poistaa korkeusmallista teiden muodostamat, uomapolton syvyyttä korkeammat tiepenkereet.

Vaikka uomien polton menetelmässä on heikkouksia, muistuttavat muun muassa Hammond ja Han (2006: 65), Callow ym. (2007) ja Kenny ym. (2008: 1421), että uomien poltolla voidaan merkittävästi lisätä virtausverkon ja valuma-alueiden mallinuksen tarkkuutta, kun lopputuloksia verrataan mallinuksiin, joissa ei ole tehty ollenkaan korkeusmallin esikäsittelyä. Uomien polton lisäksi tulee aina tehdä myös korkeusmallin hydrologinen eheytytys (Kenny ym. 2008: 1420; Lindsay 2012) – käytännössä ensin poltetaan uomat ja sitten tehdään hydrologinen eheytytys.

4 Aineistot

4.1 Pintavaluntamallinuksen paikkatietoaineistot ja niiden esikäsittelyn tarve

4.1.1 Digitaalinen korkeusmalli

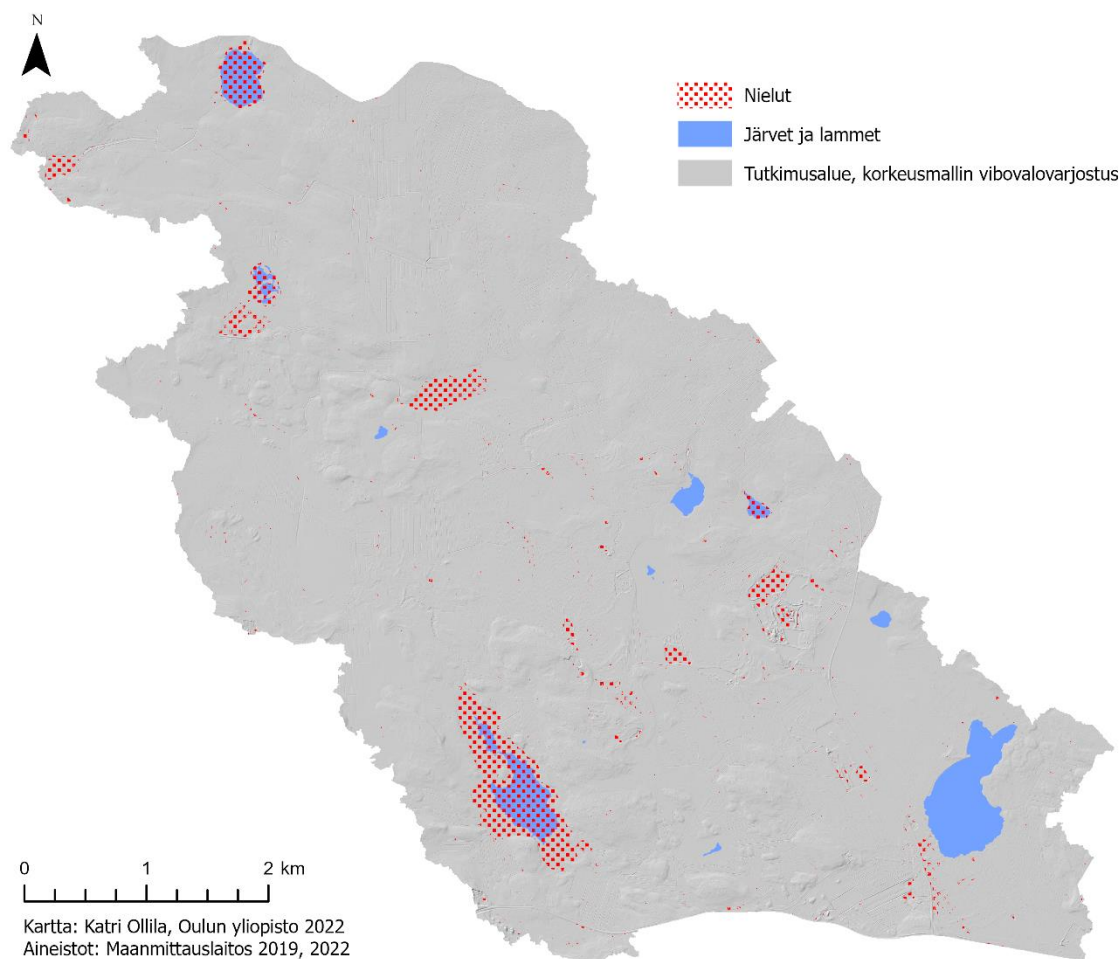
Käytin hydrologisen mallinuksen pohja-aineistona Maanmittauslaitoksen (MML) rasterimuotoista korkeusmallia (lataus- ja metatiedot liitteessä 1). Korkeusmalli on kuvaus maanpinnan muodoista, eli siihen eivät kuulu 1) maanpinnalla olevat irtonaiset geologiset kohteet, kuten siirtolohkareet; 2) ihmisen muodostamat ei-pysyvät pinnanmuodot, kuten

esimerkiksi väliaikaiset maa-ainekasat ja 3) ihmisen luomat rakenteet, kuten talot ja sillat (Kansallisen maastotietokannan... 2017: 9).

Tutkimusalueelle saatavilla olevan korkeusmallin resoluutio on 2 m x 2 m (Kansallisen maastotietokannan... 2017: 9) ja korkeustarkkuus on keskimäärin 0.3 metriä (Korkeusmalli 2... 2022). Korkeusmalli on tuotettu ilmalaserkeilaukseen (LiDAR) perustuvasta pistepilviaineistosta, jonka pistetiheys on vähintään 0.5 pistettä/m² ja aineiston korkeus on määritelty N2000-korkeusjärjestelmässä (Kansallisen maastotietokannan... 2017: 9). Korkeusmallin viimeisin ajantasaistus on tehty vuonna 2019 (Peruspaikkatietojen ylläpito 2022). Tarkemmin aineiston tarkkuudesta kerrotaan MML:n laatukäsikirjassa (Kansallisen maastotietokannan... 2017).

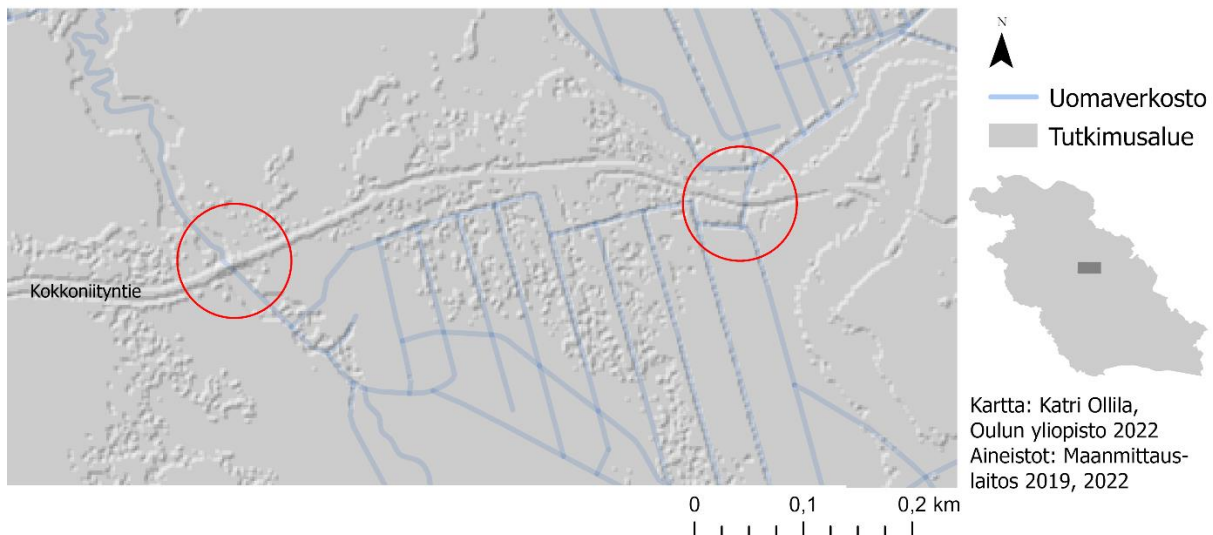
Korkeusmallin tuotannossa on otettu huomioon erilaisia vesimuodostumia. Ensinnäkin virta- ja vakavesistä sekä vesialtaista yli tuhannen neliömetrin muodostumat on peitetty käyttäen keilausajankohdan keskivedenkorkeutta (Kansallisen maastotietokannan... 2017: 9). Toisin sanoen tutkimusalueen yli 1000 m² kokoiset vesimuodostumat muodostavat täysin tasaisia alueita. Toiseksi korkeusmalli on tarkastettu ja käsitelty siltojen ja tierumpujen kohdalta (Kansallisen maastotietokannan... 2017: 13).

Onnistunut pintavalunnan mallinnus vaatii korkeusmallin hydrologista eheytyä (O'Callaghan & Mark 1984: 328; Kenny ym. 2008; Mujumdar & Nagesh Kumar 2012: 127; Van Nieuwenhuizen ym. 2021). Tarkastelin mahdollisia mallinnettavan alueen nieluja ArcGIS Pron *Sink*-työkalun avulla. Kaikki solut, joille ei määrydy D8-algoritmin mukaista virtaussuunta-arvoa, näkyvät analyysin tuloksessa nieluina (yksittäisinä nieluina tai laajempina nielualueina) (Sink... 2022). Kuvassa 12 näkyvät punaiset alueet ilmentävät näitä korkeusmallin nielualueita tutkimusalueen laajuudella. Tutkimusalueella on siis paljon pintavalunnan mallintamista haittaavia nieluja, jotka vaativat hydrologista eheytyä.



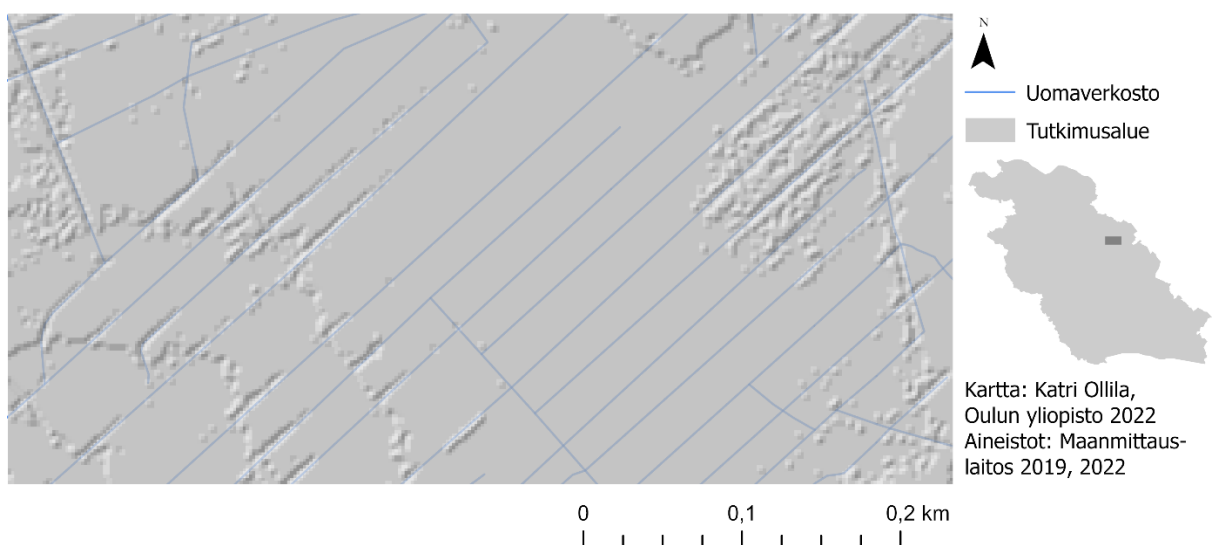
Kuva 12. Punaisella pilkuttetut alueet kuvaavat tutkimusalueen laajuudella digitaalisen korkeusmallin hydrologisia nielualueita, jotka on kartoitettu ArcGIS Pron *Sink*-työkalulla. Osa nielualueista on järvien, lampien ja niitä ympäröivien kosteikkoalueiden kohdalla.

Hydrologisen eheytyksen lisäksi korkeusmalli vaatii muutakin esikäsittelyä. Vaikka korkeusmalli on valmiiksi käsitelty siltojen ja tierumpujen kohdalta (Kansallisen maastotietokannan... 2017: 13), eli kaikkien uomien ja teiden risteyskohdat kuuluisi olla aukaistu, on aineistossa sellaisia tieosuusia, joiden läpi virtaus ei näytä pääsevän – siitä huolimatta, että tiedossa olevassa uomaverkostossa on tien alittava rumpu. Kuvassa 13 on esimerkkinä kaksi Kokkoniityntien alittavaa rumpukohtaa, joissa korkeusmallilla mallinnettaessa vesi ei virtaisi tien läpi, koska tie muodostaa uomaan korkeamman tiepenkereen. Kuvan vibovalvarjostus osoittaa, että tie muodostaa uomaan korkeammalla olevan penkereen, jonka läpi ei ole uomien aukaisua.



Kuva 13. Punaisilla ympyröillä havainnollistetaan tutkimusalueen esimerkkitapauksia, joissa korkeusmallin tuotannossa ei ole valmiiksi ”puhkaistu” tierumpua, eli aukaistu linjaa veden todelliselle virtaukselle Kokkoniiyntyntien halki. Kuvassa pohjakarttana olevan korkeusmallin vinovalovarjostus osoittaa, että korkeusmallissa ei ole aukaisuja, eli matalampia linjoja uomaverkostoaineiston osoittamien tierumpujen kohdalla, vaan tie muodostaa korkean penkereet kohdissa, joissa uomalinja kulkee tien halki.

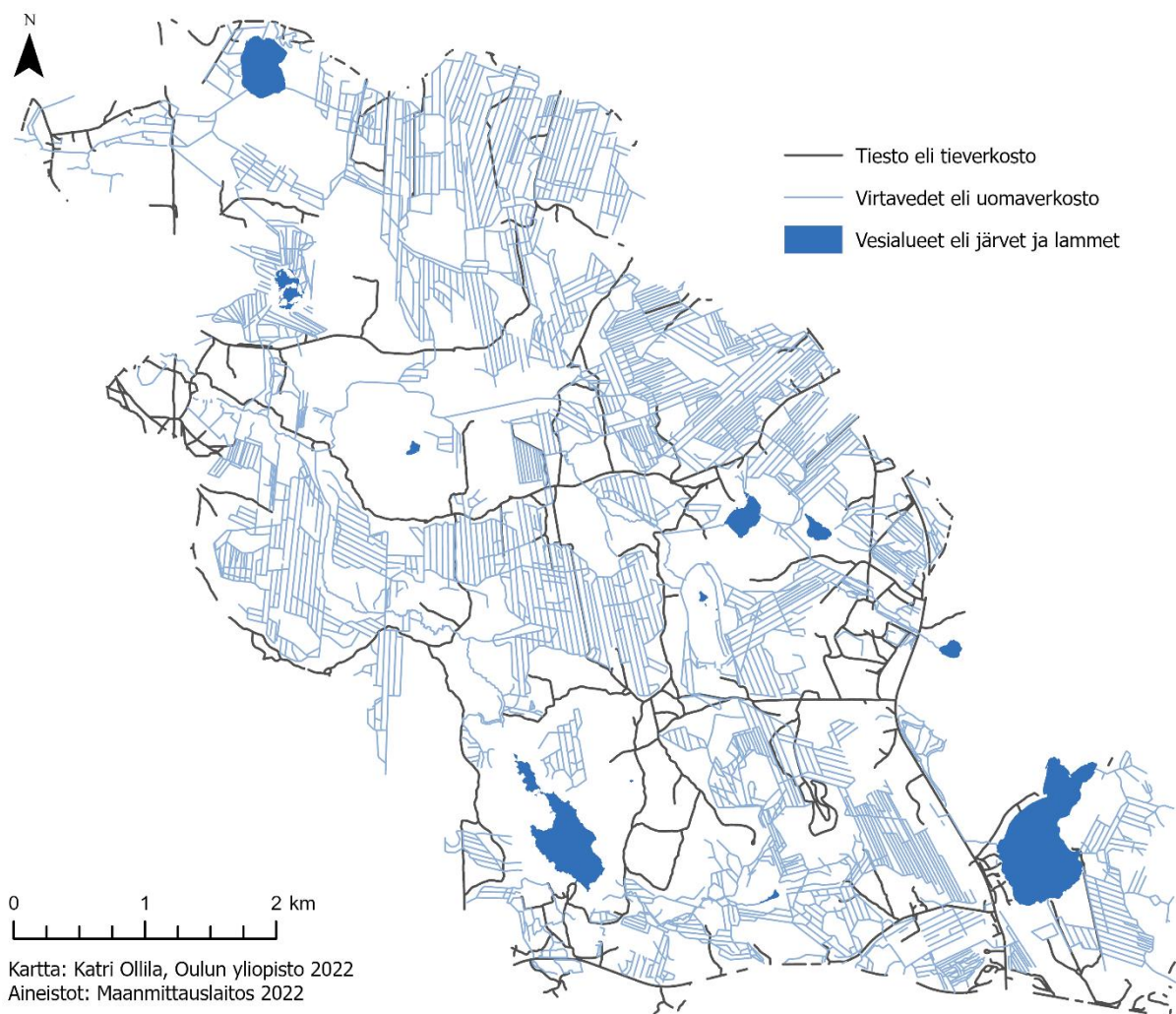
Tutkimusalueella on myös paljon ojitettua metsätalousaluetta (ks. kuva 3), joka on niin ikään haasteellista aluetta korkeusmalliin pohjautuvan hydrologisen mallinnuksen toteutuksessa (Zhao ym. 2009: 2). Kuten kuvan 14 esimerkkitapahtumasta nähdään, kaikki metsäojitukset eivät erotu korkeusmallin korkeusarvoista. Edellä kuvattujen korkeusmallin epätarkkuuksien takia mallille on tehtävä esikäsittelyä, joka kohdistaa valuntaa kohti todellista uomaverkostoa ja tierumpujen ali.



Kuva 14. Korkeusmallin vinovalovarjostus osoittaa, miten tutkimusalueen ojitukset (sinisellä) eivät erotu kauttaaltaan korkeusmallissa.

4.1.2 Lisäaineistona vesistöt ja tiestö

Korkeusmallin ohella käytin pintavaluntamalliin vesistö- ja tiestöaineistoja Maanmittauslaitoksen Maastotietokannasta (kuva 15; lataus- ja metatiedot liitteessä 1). Maastotietokanta on koko Suomen kattava ja sijainniltaan tarkin valtakunnallinen maastoa kuvaava aineisto (Maastotietokanta 2022). Sen tärkeimpiä kohderyhmiä ovat muun muassa vedet ja liikenneverkko, joita käytetään esimerkiksi erilaisissa optimoinneissa ja analyyseissä (Maastotietokanta 2022) – tässä työssä hyödynsin tietokannan vesistö- ja tiestöaineistoja pintavaluntamallin optimointiin.



Kuva 15. Valunnan optimoinnissa käytettävät aineistot ovat Maanmittauslaitoksen Maastotietokannan (2022) tiestö-, virtavesi-, vesialueaineistot. Kuvassa näkyvät aineistot ovat rajattuna tutkimusalueen laajuuteen, mutta mallinnuksessa ne rajattiin tutkimusaluetta laajemmalle, mallinnusalueen laajuudelle (ks. kuva 17).

Maastotietokannan virtavesiä ovat pysyvästi (mutta metsäojien osalta myös ajoittain) veden peittämät joet, purot ja ojat, joissa on virtaama (Maastotietokohteet 2018: 51). Virtavesinä kuvataan kaikki 2–5 metriä leveät uomat, mutta metsämaan alueella myös alle kaksi metriä leveät. Virtavedet on tallennettu tietokantaan murtoviivana (eng. *polyline*) keskiuoman mukaisesti. Vastaavasti yli viisi metriä leveät virtavedet ovat aineistossa virtavesialueina, eli polygoneina (Maastotietokohteet 2018: 51). Kutsun virtavesiä ja virtavesialueita tässä työssä uomaverkostoksi. Virtavesien tasosijainti on yleensä pinnalla, myös veden virratessa sillan ali tai tierummussa, mutta jos vesi virtaa rakennetussa tunnelissa tai putkessa maan alla tai kyseessä on piilo-oja tai -puro, on virtaveden tasosijainti pinnan alla (Maastotietokohteet 2018: 51). Ojaverkoston tulisi laatuvaatimusten mukaan olla jatkuva (Maastotietojen laatumalli 1995: 43), mutta yhtenäisten uomaverkoston osien lisäksi verkostoon kuuluu yksittäisiä uomaosuuksia, jotka tulee esikäsitellä ennen aineiston hyödyntämistä hydrologisessa mallinnuksessa (Saunders 1999).

Hyödynsin mallinnustyössäni myös Maastotietokannan vakavesiaineistoa, joka kuvaa polygoneina vesialueita eli järviä ja lampia, jotka ovat yli 1000 m² kokoisia, veden jatkuvasti peittämiä alueita (Maastotietokohteet 2018: 49). Vakavesissä vedenpinnan korkeus pysyy alueellisesti samalla tasolla, eikä niissä ole olennaista virtaamaa. Vakavesiaineisto täytyy esikäsitellä niin, että se on yhtenäinen muiden vesistöjen eli uomaverkostoaineiston kanssa. Vesistöaineistojen lisäksi hyödynnän mallinnuksessa Maastotietokannan tiestöaineistoa eli tieverkostoa, joka sisältää kaikki maalla käytettävät kulku- ja kuljetusyhteydet (Maastotietokohteet 2018: 6).

4.2 Maastotarkistukset

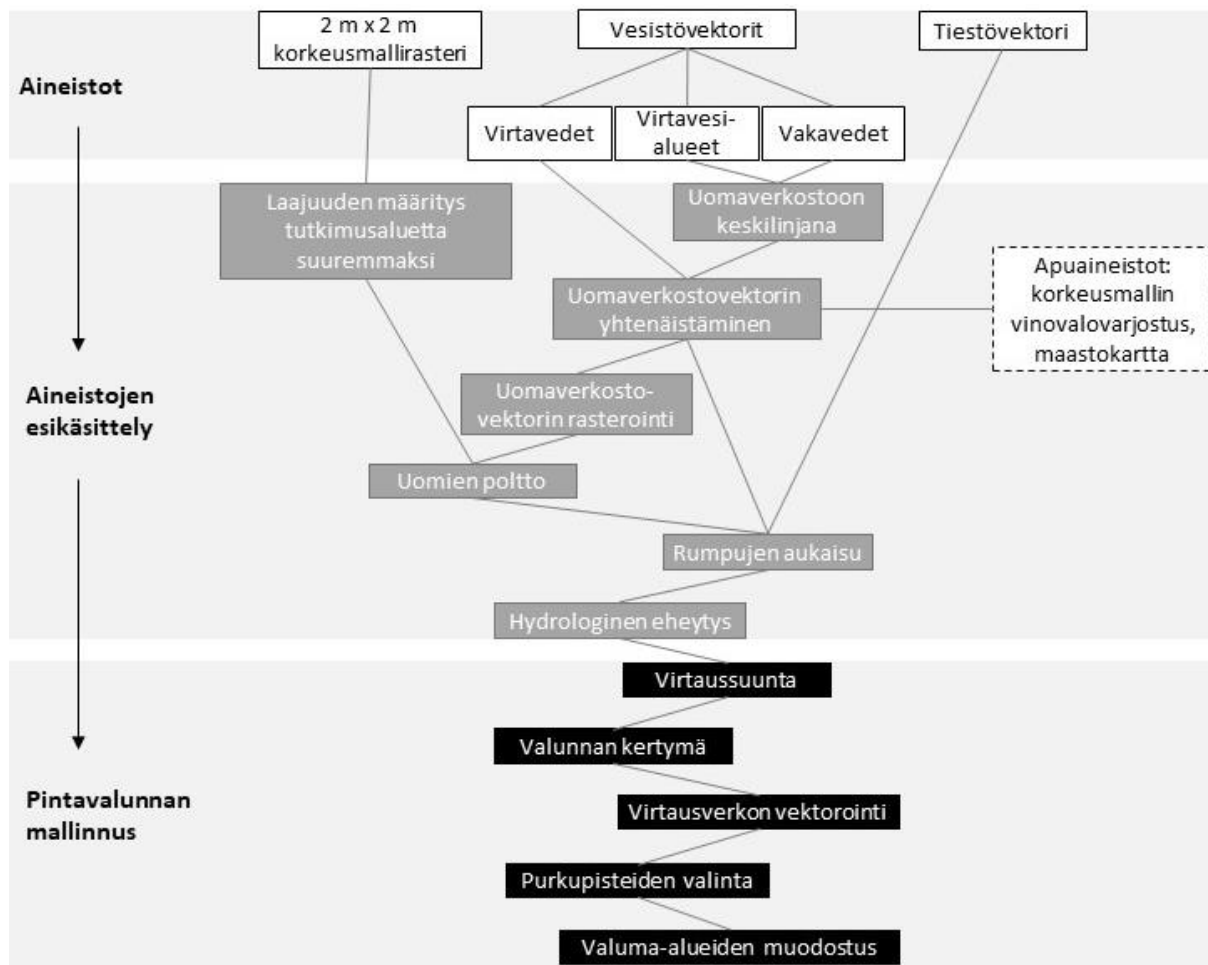
Hyödynsin maastotarkastuksilla kerättyjä havaintoja todellisista virtausreiteistä lopullisen mallin tarkistuksessa. Samaan tapaan esimerkiksi Callow'n ym. (2007) tutkimuksessa selvitettiin todellisia uomavirtauksen reittejä maastohavaintojen avulla. Maastotarkastuksia tehtiin tutkimushankkeen toimesta keväällä ja kesällä 2022, ja ne kohdistuivat erityisesti tutkimusalueen pääuomiin. Niiden avulla tarkasteltiin hydrologisen mallin paikkansapitävyyttä vertaamalla sen tuloksia todellisiin virtausolosuhteisiin luonnossa. Maastotarkastuksissa keskityttiin eritoten niihin uomaston kohtiin, joissa mallin mukaan tuli sijaita suurikokoisempia uomia.

5 Pintavaluntamallinnuksen toteutus

5.1 Uomaoptimoituun malliin pohjautuva virtausverkko ja alivaluma-aluejaottelu

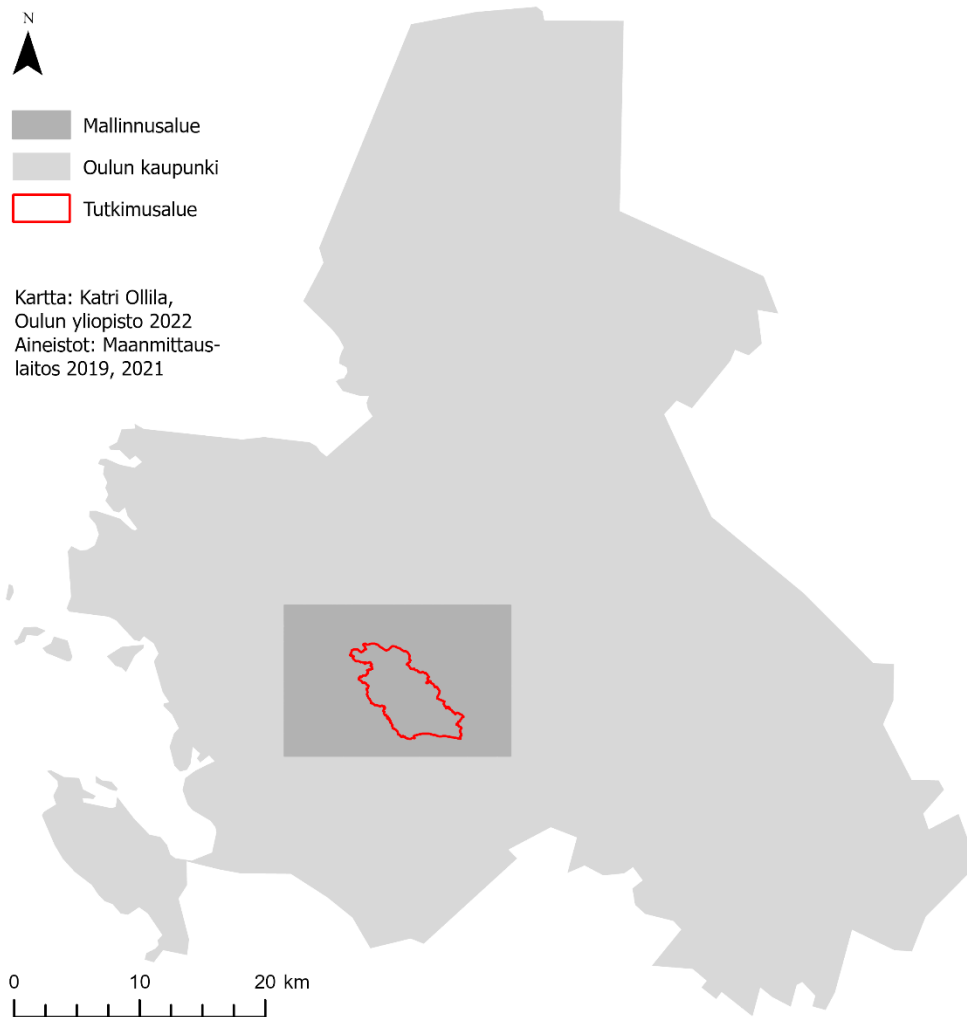
Toteutin pintavaluntamallinnuksen ja sitä edeltävät paikkatietoaineistojen esikäsittelyt pääasiassa ArcGIS Pro -ohjelmistolla (versio 2.9.1). Lisäksi hyödynsin mallinnuksessa GIS Whitebox Geospatial Analysis Tools (GAT) -ohjelmistoa, joka jaetaan avoimen lähdekoodin lisenssillä ja on saatavilla Whitebox GAT -kotisivulla (Whitebox Geospatial Inc 2022). GAT on ilmainen ohjelmistopaketti, jonka työkaluissa painotetaan digitaalisen korkeustiedon analysointia (Lindsay 2014), ja yhtenä työkalupakettina on hydrologiset analyysit (Hydrological analysis 2022).

Toteutin hydrologisen mallinnuksen kuvan 16 vuokaaviossa esiteltyjen työvaiheiden mukaisesti. Vaiheet koostuvat aineiston esikäsittelyn toimenpiteistä, uoma- ja tieverkoston kytkemisestä osaksi pohja-aineistona olevaa korkeusmallia (eli valunnan optimointi uomaverkoston) sekä pintavalunnan mallin tuottamisesta O'Callaghanin ja Markin (1984) sekä Mujumdarin ja Nagesh Kumarin (2012: 120–129) kuvaamien vaiheiden (ks. kuva 2) mukaisesti, D8-virtaussuunta-algoritmiin pohjautuen.



Kuva 16. Kaaviokuva paikkatietoaineistoista sekä niiden esikäsittelyn ja pintavalunnan mallinnuksen vaiheista.

Ennen uomaverkoston hyödyntämistä uomien polttoon esikäsittelin sen soveltaen Saundersin (1999) esittämiä muokkausvaiheita, jotka yhtenäistävät uomaverkostoaineiston ja siten parantavat mallinnuksen lopputulosta. Vaikka uomaverkoston muokkaus on osittain manuaalisesti suoritettavaa, eli se vie runsaasti aikaa, on se toteutettavissa oleva työvaihe suhteellisen pienen tutkimusalueen vuoksi. Ensimmäiseksi varmistin tarpeeksi suuren mallinnuksen spatiaalisen laajuuden valitsemalla pohja-aineistojen laajuudeksi korkeusmallin kuusi karttalehteä (kuva 17). Käytin samaa laajuutta kaikkien pohja-aineistojen rajaamiseen, jotta Saundersin (1999) mukaisesti mallinnus perustuu tarpeeksi kattavalle laajuudelle, tutkimusalueen ulkopuolellekin.

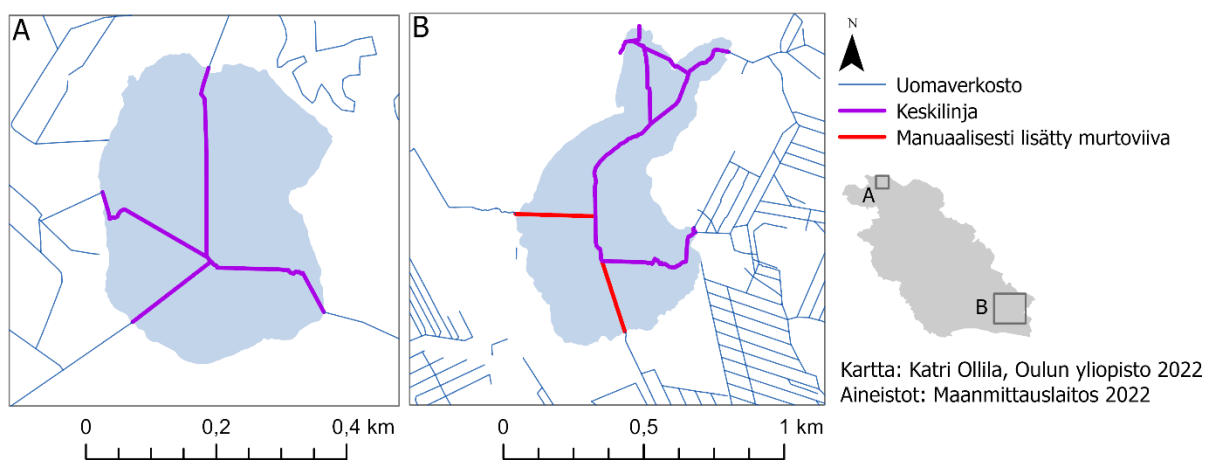


Kuva 17. Pintavalunnan mallinnukseen käytettävien aineistojen spatiaalinen rajausta tehtiin kuvan mukaisella korkeusmalliaineiston karttalehtien laajuudella (karttalehdet R4414D, R4414F, R4414H, R4423C, R4423E, R4423G). Mallinnuksen laajuus on siten tutkimusaluetta (punaisella) laajempi.

Aineistojen rajauksen jälkeen korvasin vaka- ja virtavesialuepolygonit, joiden läpi uomaverkosto luonnossa kulkee, vesialueet kahtia jakavilla keskilinjoilla. Toteutin tämän hyödyntämällä ensin ArcGIS Pron *Polygon to Centerline* -työkalua, joka muodostaa keskiviivan, ja lisäksi niissä kohdissa, joissa keskilinja koskettaa uomaverkostoa, linkittää keskiviivan uomaverkoston (Polygon to centerline... 2022). Seuraavaksi yhdistin alkuperäisen virtavesiaineiston (murtoviiva) ja keskiviiva-aineiston (murtoviiva) yhdeksi vektorialueeksi, jotta pystyin tehdä loput manuaaliset muokkaukset yhtenäiseen, lopulliseen uomapoltossa käytettävään uomaverkoston kuvaavaan murtoviiva-aineistoon.

Lisäksi Saundersin (1999) mukaan haarautuville järville oli tunnistettava ja luotava haarainen virtauksen reitti, eli tunnistettava kaikki kohdat, joista virtaus purkautuu järveen ja joissa virtaus purkautuu pois järvestä. Tämän takia tarkistin maastokartan (Maastokartta 2020), korkeusmallin vinovalovarjostuksen ja uomaverkostovektorin avulla, että kaikki tunnistettavat

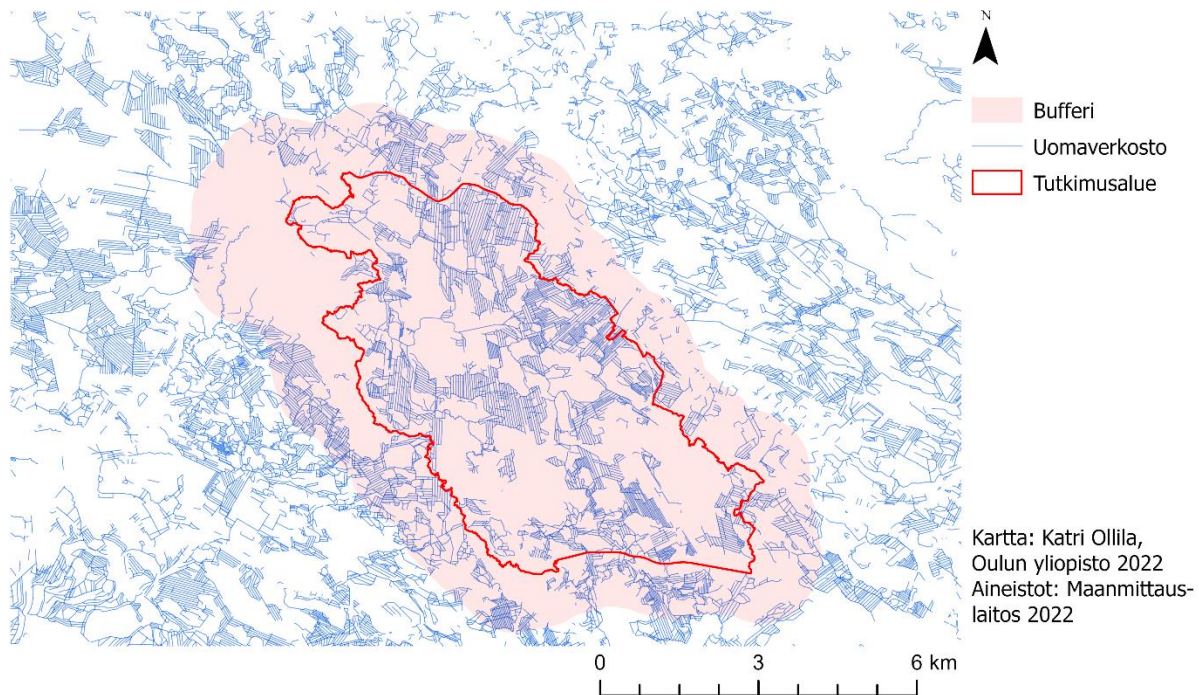
haarat ovat näkyvissä aiemmin luoduissa vesialueiden keskilinjoissa, ja jos eivät olleet, lisäsin ne manuaalisesti pidentämällä uoman murtoviivaa tai lisäämällä uuden murtoviivan, joka kiinnittyy keskilinjaan. Alla olevassa kuvassa 18 on esimerkkinä Lauttalammen polygoniin *Polygon to Centerline* -työkalulla muodostuneet, lampea ympäröiviin uomiin yhdistyvät keskiviivat (kuva 18 A), sekä Lylykkäänjärven polygoniin muodostuneet keskiviivat (kuva 18 B) ja manuaalisesti lisätyt murtoviivat uomaverkoston murtoviivoista keskilinjaan (kuvassa 18 B punaisella). Samalla varmistin silmämääräisesti, että kaikki vesialtaiden keskiviivat ja alkuperäisen uomaverkoston murtoviivakohteet ovat varmasti yhtenäisiä – jos murtoviivojen väliltä löytyi rakoja, yhdistin kohteet lisäämällä murtoviivan niiden välille.



Kuva 18. ArcGIS Pron *Polygon to Centerline* -työkalulla muodostetut keskilinjat (violetti) korvasivat vesialuepolygonit. Esimerkkinä Lauttalammi (A) ja Lylykkäänjärvi (B). Osaan vesialuepolygoneista tuli lisätä manuaalisesti murtoviiva (punainen), joka yhdistää tunnistetun uomaverkoston polygonin keskilinjaan (esimerkkinä Lylykkäänjärvi kuvassa B).

Suuri osa uomaverkoston lisätyistä tai pidennetyistä murtoviivakohteista, jotka Saundersin (1999) mukaan todennukaistavat haarautuvaa virtausta vesialtaiden kohdilla, sijaitsevat vesialtaan (eli järven tai lammen) ympäröimällä kosteikkoalueella. Valunnan tiedetään olevan yhteydessä näiden kosteikkoalueiden reunalle ulottuvilta metsäojilta kosteikkoalueen halki vesialtaaseen, eli näennäisesti monihaarainen virtaus yhdistyy järvessä, mutta haarautumisen yhdistyminen ei ole yksiselitteisen, suoran uomavirtauksen muodossa. Näin ollen valunta ei todellisuudessa yhdistyisi suoraviivaisesti järven keskiviivaan, koska alue on tasaista kosteikko-vesiallasaluetta, jolla valunnan suunnat ja siten virtauksen reitit eivät algoritmin avulla muodostu välttämättä todennukaisesti (O’Callaghan & Mark 1984: 324; Kenny ym. 2008: 1418). Tarkoitukseni on näennäisillä uomaverkoston pidennetyillä murtoviivoilla saada selkeyttä virtausverkon lopputulokseen, eli yksinkertaistaa valunnan reittejä suoraan kosteikon ulkopuolelta tulevilta uomilta vesialtaaseen eli sen keskiviivaan.

Edellä mainittu murtoviivakohteiden lisääminen edistää jo viimeistä Saundersin (1999) esittämää muokkausvaihetta, jossa kaikki loput yhtenäisestä uomaverkostosta irralliset murtoviivakohteet tulee joko poistaa tai yhdistää yhtenäiseen verkostoon. Hyödynsin muokkausvaiheessa Saundersin (1999) laajuuteen liittyvää ohjetta, jonka mukaan viereisillä valuma-alueilla olevat, lähimmät uomakohteet tulee muokata. Muodostin apuvälineeksi kilometrin laajuisen bufferin tutkimusvaluma-alueen ympärille (kuva 19), jonka alueella tein muokkaukset. Näin vältin ylimääräistä manuaalista työtä. Tein bufferin vertailumallilla määritetyn valuma-alueen laajuuden mukaisesti (vertailumallin yksityiskohdista kerron tarkemmin seuraavassa luvussa 5.2 *Vertailumalliin pohjautuva virtausverkko*). Oletukseni oli, etteivät kilometrin sädettä kaukaisemmat verkoston katkonaisuudet vaikuta itse tutkimusalueen virtaussuuntien oikeellisuuteen. Tuloksissa mallien valuma-aluerajausten vertailun (ks. kuva 31) perusteella kilometrin bufferi vaikuttaa sopivalta etäisyysvalinnalta, sillä uomaoptimoidun mallin valuma-alue sisältyy kokonaisuudessaan vertailumallin mukaisen bufferin sisään. Lisäksi käytin apuna maastokarttaa ja korkeusmallin vinovalovarjostusta tehdessäni valintaa murtoviivakohteen yhdistämisen ja poistamisen välillä. Lisäksi vinovalovarjostuksella tunnistin selkeästi korkeampia vedenjakajia valuma-aluerajoilla. Niiden ulkopuolisia, bufferin sisään kuuluvia yksittäisiä uomaosuuksia, en muokannut, koska selvien vedenjakajien ulkopuoliset alueet kohdistuvat virtaussuunta-algoritmin mukaan erittäin varmasti pois päin tutkimusvaluma-alueesta.



Kuva 19. Kuvan mukaista bufferia käytettiin apuna havainnollistamaan laajuutta uomaverkostovektorin muokausvaiheessa (eli uomamurtoviivakohteiden poistamisessa tai yhdistämisessä yhtenäiseen uomaverkoston murtoviivoja lisäämällä). Bufferi on muodostettu vertailumallin (ks. 5.2 *Vertailumalliin pohjautuva virtausverkko*) mukaisesta valuma-alueesta kilometrin säteelle.

Uomaverkostoaineistoa tarvitaan myöhemmin esiteltävässä uomapolton algoritmin suorittamisessa rasterimuotoisena. Näin ollen muutin vektoriaineiston rasteriksi lisäämällä ensin vektoriaineistoon sarakkeen, jossa annoin kaikille uomien murtoviivakohteille arvon 1, ja sen jälkeen hyödynsin *Polyline to Raster* -työkalua, joka tunnistaa ja tuottaa tulorasteriin uomia esittävät solut (arvolla 1) ja erottaa ne taustan *NoData*-soluista (*Polyline to raster...* 2022).

Seuraavaksi poltin korkeusmalliin uomaverkoston. Koska tutkimusalueen korkeusvaihtelu 39.66–70.29 mmp ei ole liian lähellä merenpinnan korkeutta, voi uomapolton tehdä madaltamalla uomaverkoston kohdalla olevien solujen korkeusarvoja (Kenny & Matthews 2005: 770–771; Wu ym. 2019: 185), eikä nostamalla uomaverkoston ulkopuolisia, maa-alueen solujen korkeusarvoja. Toteutin uomien polton Lindsayn (2012) mukaisella algoritmilla, joka madaltaa uomasolujen lisäksi uomia ympäröiviä soluja sitä enemmän, mitä lähempänä ne sijaitsevat uomasoluista. Näin muodostuu kohti uomaa kaareutuva gradientti. Valitsin kyseisen, uomasolujen lisäksi niiden ulkopuolisiin soluihin kohdistuvan polttoalgoritmin, koska muun muassa Lindsayn (2012) ja Callow'n ym. (2007: 32) mukaan se vähentää niin sanottujen kaksoisuomien syntymistä, eli sellaista poltetun korkeusmallin lopputulosta, jossa uomaverkoston osien kohdalle muodostuisi virheellisesti kaksi vierekkäistä uomaa. Algoritmin yhtälö on seuraavanlainen:

$$Z = E - \left(\frac{G}{G + D} \right)^k * H$$

jossa Z on uusi poltossa laskettu solun korkeusarvo, E on alkuperäisen korkeusmallin korkeusarvo, G on soluresoluutio, D on etäisyys uomasolusta, k on kerroin (eng. *decay coefficient*) ja H on korkeuden madaltamiskerroin, eli käytännössä madalluksen enimmäismäärä (samassa mittayksikössä kuin korkeusmalli eli metreinä). Etäisyys uomasolusta (D) lasketaan euklidisen, eli suoran etäisyyden mukaan (Lindsay 2012). Mitä suurempi kerroin (k) on, sitä jyrkempi madaltuminen korkeusmalliin syntyy kohti uomaa, eli sitä vähemmän korkeusarvot muuttuvat kauempana uomasolusta (Lindsay 2012).

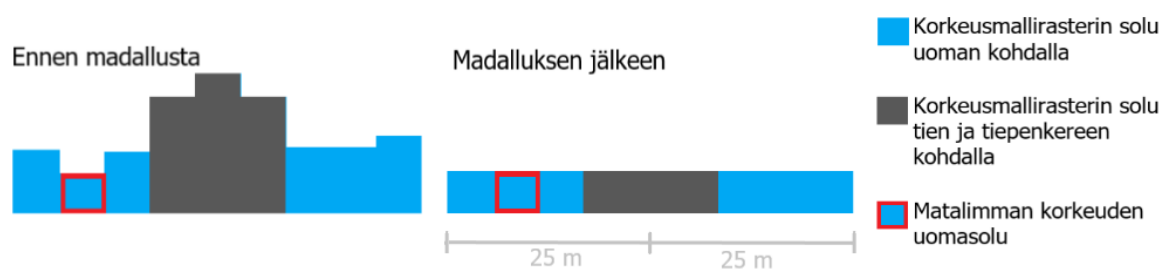
Toteutin polttoalgoritmin laskennan yhden metrin polttosyvyydellä ArcGIS Pron *Raster Calculator* -työkalulla, johon syötin alla olevan, Lindsayn (2012) algoritmin mukaisen lausekkeen:

$$"DEM" - Power(2 / (2 + EucDistance("vesistoviiva_rasteri")), 2) * 1$$

jossa DEM on alkuperäinen korkeusmalliaineisto, $Power$ on operaattori potenssiin korotukselle, $EucDistance$ on euklidisen eli suoran etäisyyden laskeva funktio ja $vesistoviiva_rasteri$ on rasterimuotoon muutettu uomaverkostoaineisto. Rasterin resoluutio on kaksi (metriä), *decay coefficient* -kerroin on kaksi ja madalluksen enimmäismäärä yksi (metriä).

Uomien polton jälkeen tein korkeusmallille vielä toisen polttokäsittelyn, jossa uomien ja teiden risteyskohdat madaltuivat. Vaikka korkeusmalliin muodostuu uomien aukaisu jo edellä toteutetussa uomien poltossa – eli uomia risteävissä kohdissa korkeusarvot teiden kohdalta madaltuvat metrin alemmas – niin siitä huolimatta on mahdollista, että korkeusmallista löytyy edelleen virhekohtia, joissa uoman pohjakorkeutta korkeammalle jäävä tiepenger näennäisesti estää veden virtauksen tierummun läpi (Lindsay 2012: 667). Syy tälle on se, että tiepenger voi olla huomattavasti korkeammalla kuin tietä risteävän uoman pohjan korkeus. Tällöin siis uomien yhden metrin polttosyvyys saattaa edelleen jättää tien ja uoman risteämiskohtaan uoman pohjan korkeuteen verrattuna korkeamman tielinjan, jonka yli vesi ei mallinnuksessa valuisi, vaikka se todellisuudessa virtaa tien alittavan rummun läpi. Uoman ja tien risteämiskohtaan kohdennettu madaltaminen on hyvä keino, koska silloin koko aineistoon kohdistuvaa polttoa ei tarvitse tehdä syvemmäksi pelkästään tiepengerten takia, vaan maltillinen, paremmin todellisuutta kuvaava metrin poltto riittää (Lindsay 2019b).

Koska uomaverkostoaineisto sisältää tierumpujen osuudet eli uomaosuudet tierumpujen läpi (Maastotietokohteet 2018: 51), voidaan aineistoa hyödyntää rumpujen aukaisuun eli rumpukohtien polttoon. Poltin uomien ja teiden risteyskohdat ensimmäisessä poltossa tuotettuun korkeusmalliin. Käytin työvaiheeseen Whitebox GAT -ohjelmiston *BurnStreamsAtRoads*-työkalua, jonka algoritmi perustuu siihen, että se tunnistaa käyttäjän määrittelemältä pituudelta tien halki matalimman uomasolujen korkeusarvon ja madaltaa määritellyn etäisyyden pituudelta kaikki uomasolut tälle minimikorkeudelle (Lindsay 2019b). Määritin pituudeksi 50 metriä, eli tällöin uomasolujen korkeusarvot tasoittuvat matalimman korkeuden tasoon tien keskikohdalta molempiin suuntiin 25 metrin matkalta (ks. kuva 20). Madallus ei siis synnytä nielua madallettujen uomasolujen kohdalle, koska madalluksen jälkeen korkeusarvot eivät ole matalampia kuin aikaisempi alin korkeusarvon. Asetin käsittelylaajuudeksi 50 metriä, koska tutkimusalueella ja sen ulkorajojen välittömässä läheisyydessä on leveitä maanteitä (perustuu ArcGIS Prossa *Measure*-työkalulla tekemiini mittauksiin teiden leveyksistä).



Kuva 20. Poikkileikkauskuvat Whitebox GAT -ohjelmiston *BurnStreamsAtRoads*-työkalun toimintaperiaatteesta. Kohdissa, joissa tie- ja uomamurtoviivat risteävät päällekkäin, työkalu madaltaa määritellyn etäisyyden (50 m) pituudelta kaikki solut uoma-aineiston kohdalla matalimman uomasolun korkeuteen.

Hydrologisessa eheytyksessä en hyödyntänyt ArcGIS Pron valmista *Fill*-työkalua, joka perustuu *filling*-menetelmään (Fill... 2022), vaan toteutin vaiheen Whitebox GAT -ohjelmiston *BreachDepressions*-työkalulla, koska sen pohjalla olevalla *breaching*-menetelmällä on etuja *filling*-menetelmään verrattuna (Kenny ym. 2008: 1421; Lindsay 2016b: 663; ks. 3.3.2 *Korkeusmallin nielujen hydrologinen eheyttäminen*). *BreachDepressions*-työkalun algoritmi on Martzin ja Garbrechtin (1998, 1999) kuvaaman *breach first, fill second* -menetelmän tapainen yhdistelmä (Lindsay 2019a), jossa hydrologisesti eheä virtaus nielujen ja tasaisten alueiden läpi muodostetaan ensisijaisesti etsimällä pintavalunnalle purkautumispiste ja muokkaamalla (madaltamalla) korkeuksia purkupisteen alueella ja (madaltamalla ja nostamalla) nielun alueella (ks. kuva 10), ja toissijaisesti nostamalla nielujen korkeuksia

matalimman naapurisolun korkeuteen *filling*-menetelmän mukaisesti (Lindsay 2016a). Koska Wangin ym. (2019) mukaan eri käsittelymenetelmiä yhdistelemällä voidaan päästä parempaan eheytytulokseen kuin yhtä tiettyä menetelmää käyttämällä, valitsin hydrologiseen eheytykseen *breach first, fill second* -menetelmän – *BreachDepressions*-työkalun.

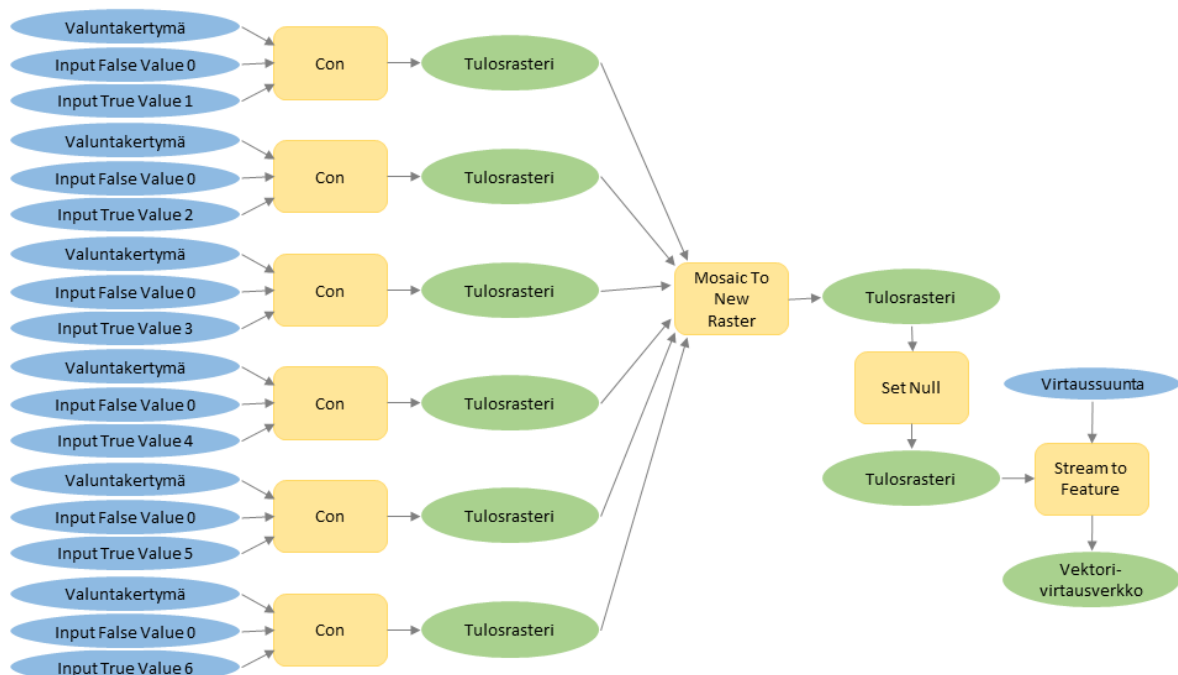
Työkaluun voi määrittellä korkeusarvon muutosuuruuden (eng. *flat increment value*), joka on Lindsayn (2019a) mukaan hyvä olla tarpeeksi pieni, ettei liian suuri muutos aiheuta selkeitä virhekohtia todellisiin tasaisten alueiden korkeuksiin verrattuna. Samoin Martz ja Garbrecht (1998: 850–851) huomauttavat, että solujen korkeusarvojen muutosten tulee olla alkuperäisten korkeusarvojen tarkkuuteen suhteutettuna hyvin pieniä. Muutoskorkeus välillä 0.00001–0.01 on yleisesti sopiva (Lindsay 2019a), joten määritin luvuksi 0.001 (metriä). Valitsin myös työkalun vaihtoehdoista *Fill single-cell pits*, jolloin työkalu täyttää yksittäiset nielusolut *filling*-menetelmän mukaisesti (Lindsay 2016a).

Korkeusmallin hydrologisen eheytyksen valmistuttua jatkoin itse pintavalunnan mallintamiseen, jossa ensimmäisenä vaiheena on virtaussuunnan määrittäminen (ks. kuva 5). Virtaussuunnan mallintamisessa voidaan hyödyntää erilaisia yksisuuntaisia tai monisuuntaisia algoritmeja (Mujumdar & Nagesh Kumar 2012: 3). Valitsin tähän työhön yksisuuntaisen D8-algoritmin ja perustelen valintaani algoritmin soveltuvuudella suurimittakaavaiselle ja tiheästi ojitetulle alueelle. Lin ym. (2005: 280) mukaan yksisuuntaiset virtaussuunta-algoritmit aiheuttavat epätodennäköistä virtauksen suuntausta erityisesti pienen mittakaavan mallinnuksessa, ja tässä työssä kyseessä on suuren mittakaavan (korkeusmallin 2 x 2 metrin korkeaan resoluutioon pohjautuva) mallinnus, mikä pienentänee yksisuuntaisen virtausmallin aiheuttamaa epävarmuutta – verrattuna esimerkiksi 30 metrin tai 90 metrin resoluution mallinnuksiin (esim. Rahman ym. 2010; Kumar ym. 2017). Lisäksi Martz ja Garbrecht (1992: 749) mainitsevat, että jos tavoitteena on mallintaa virtausverkko laajalle ojitetulle alueelle, jossa verkko kulkee pääasiassa uomaverkoston mukaisesti, on yksisuuntavirtausmallin käyttö perusteltua.

D8-algoritmi on perusteltu valinta myös siksi, että hyödynnän alivaluma-aluejaottelun muodostamisessa ArcGIS Pron *Watershed*-työkalua, jonka syöttötiedostoksi soveltuu ainoastaan D8-algoritmillä luotu virtaussuuntarasteri (Watershed... 2022). Oksanen ja Sarjakoski (2005: 3088–3089) toteavatkin, että vaikka monisuuntavirtausalgoritmit lisäävät virtaussuuntien määrittämisen tarkkuutta, ne eivät tuo lisätarkkuutta valuma-aluejärjestyksen tarkkuuteen. Koska mallinnukseni tavoitteena on luoda alivaluma-aluejaottelu, on tarkoituksenmukaista valita virtaussuunta-algoritmi myöhempää mallinnusvaihetta tukeva D8-menetelmä. Toteutin virtaussuunnan mallinnuksen ArcGIS Pron *Flow Direction* -

työkalulla, joka muodostaa virtaussuuntarasterin poltetun ja eheytetyn korkeusmallin pohjalta, D8-algoritmin mukaisesti (How flow direction works 2022; ks. kuva 7).

Seuraavaksi määritin virtaussuuntarasteriin perustuvan valunnan kertymän ArcGIS Pron *Flow Accumulation* -työkalulla. Virtauksen kertymän tulosrasterista muodostetaan yhtenäinen virtauksen linja (ks. kuva 9 B) erottelemalla tulosrasterin soluista virtauksen solut, linkittämällä ne ja muuttamalla linjat vektoriksi (Li ym. 2005: 279). Käytännössä toteutin sen kuvan 21 vuokaaviossa näkyvän, ArcGIS Prossa kootun *ModelBuilder*-mallin mukaisella automatisoinnilla.



Kuva 21. Vuokaavio virtausverkon vektorointiin luodusta *ModelBuilder*-mallista. Siniset ovaalit kuvaavat syöttöaineistoja, keltaiset laatikot ArcGIS Pron työkaluja ja vihreät ovaalit tulosrastereita. Valuntakertymän syöttöaineisto on aiemmassa vaiheessa laskettu tulosrasteri, *Input true value* on väliltä 1–6, *Input false value* on 0 ja virtaussuunnan syöttöaineisto on aiemmassa vaiheessa laskettu tulosrasteri.

ModelBuilder-mallin ensimmäinen vaihe liittyy virtausverkon luokitteluun valunnan kertymän kynnysarvoilla. Kuten O’Callaghan ja Mark (1984: 327) toteavat, alimmalla kynnysarvolla voidaan teoreettisesti määrittää ensimmäisen tason latvauoma, mutta todellisuudessa määrittelin tässä alimman kynnysarvon avulla sen, kuinka suuri valuma-alue mallinnuksessa muodostuvalla virtauslinjalla (ks. kuva 9) minimissään on. Alimman kynnysarvon lisäksi asetin valunnan kumuloitumiselle muitakin kynnysarvoja, eli luokittelin virtausverkon erikokoisten yläpuolisten valuma-alueiden mukaisesti. Samantapaista määritystä on käytetty esimerkiksi Metsäkeskuksen avoimessa virtausverkkoaineistossa (Tietotuotokuvaus 2021). Valitsemieni kynnysarvojen eli yläpuolisten valuma-alueiden kokojen määrittämisessä vaikuttivat myös

tavoitteet visuaalisesti mahdollisimman selkeästi kuvailevasta ja tutkimusalueen mittakaavalla toimivasta virtausverkosta. Hehtaareina esitetty virtausverkon luokitus on listattu taulukon 1 ensimmäiseen sarakkeeseen.

Taulukko 1. Virtausverkon luokittelun rajat hehtaareina ja ArcGIS Pron *Con*-työkalun SQL-ehdolauseeseen syötettävänä solujen määrinä, sekä luokkia osoittavat, mallinnuksen jäljemmissä työvaiheissa käytettävät numerot.

Luokkarajat hehtaareina	Luokkarajat solujen lukumääränä SQL-lauseessa	Luokan numero
1–5	2 500–12 500	1
6–50	12 501–125 000	2
51–100	125 001–250 000	3
101–200	250 001–500 000	4
201–400	500 001–1 000 000	5
Yli 400	Yli 1 000 000	6

Määritin virtausverkon luokituksen valunnan kumuloitumisen tulorasterista ja käytännössä laskin yläpuolisen valuma-alueen koon solujen lukumääränä alla olevan yhtälön mukaisesti:

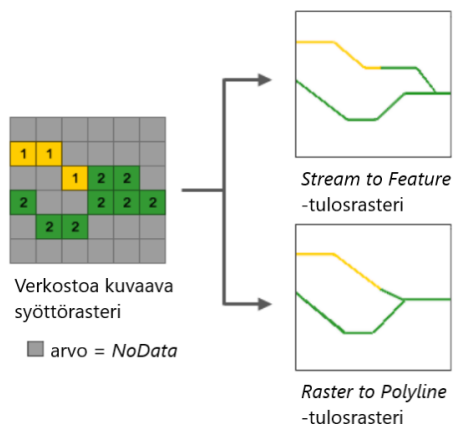
$$\text{solumäärä} = \text{valuma-alueen pinta-ala} \times 10\,000 / \text{rasterin solukoko}$$

jossa *solumäärä* on yläpuolisen valuma-alueen ala- tai ylärajan määrittämä solumäärä, valuma-alueen pinta-ala on hehtaareina ja *rasterin solukoko* on 2 m x 2 m = 4 m². Kerroin 10 000 muuntaa valuma-alueen yksikön hehtaareista samaan yksikköön kuin rasterin solukoko eli neliömetreihin. Taulukon 1 keskimmaisessä sarakkeessa nämä luokkarajat on esitetty solujen lukumääränä. Niiden perusteella muodostin jokaiselle luokkavälille *Con*-työkalulla SQL-ehdolauseeseen (kuvan 21 vaihe 1), joka asettaa tiettyyn luokkaan kuuluville soluille arvoksi luokkaa osoittavan numeron (taulukossa 1 ”Luokan numero”) ja asettaa kaikki muut solut arvolle nolla. Näin jokaiselle luokalle syntyy oma tulorasteri, eli yhteensä kuusi tulorasteria, jotka kuvaavat tietyn luokan mukaisia virtausverkon uomaosuuksia.

ModelBuilder-mallin (kuva 21) toisessa vaiheessa yhdistin kaikki kuusi *Con*-työkalussa muodostunutta tulorasteria *Mosaic to New Raster* -työkalulla. Työkalun *Mosaic Operator* -parametri tekee valinnan yhdistettävien solujen päällekkäisten arvojen väliltä (*Mosaic...* 2022). Määritin parametrin arvoksi *Maximum*, jolloin tarkasteltavana olevan solun arvoksi määräytyy kuuden päällekkäisen rasteritason suurin arvo. Koska jokainen solu on kaikissa rasteritasoissa joko 0 (eli virtausverkon ulkopuolinen solu) tai arvo väliltä 1–6 (virtausverkon tiettyyn luokkaan kuuluva solu), niin kaikkien virtausverkkoon kuuluvien solujen kohdalla valituksi tulee päällekkäisten tasojen 0-arvon sijaan sen luokan arvo, joka

kuvaa kyseisessä solussa kulkevan virtausverkon luokkaa. Tulorasterissa solut arvoilla 1–6 muodostavat virtausverkon ja 0-arvon solut muodostavat virtausverkon ulkopuolisen alueen. Tieto luokan numerosta tallentuu automaattisesti tulorasterin *grid_code*-sarakkeelle, ja lopullinen virtausverkon väritys ja selite voidaan lisätä ja muokata sen perusteella (ks. tuloksissa kuva 24).

ModelBuilder-mallin (kuva 21) kolmannessa vaiheessa virtausverkon ulkopuoliset eli 0-arvon solut saavat arvoksi *NoData*. Tein vaiheen siksi, että seuraavan vaiheen, virtausverkon vektoriksi muuntamisen työkalu *Stream to Feature* vaatii syöttötiedoston, jossa virtausverkon ulkopuoliset solut ovat arvoltaan *NoData* (*Stream to feature...* 2022). *Stream to Feature* -työkaluun määritellään syöttörasteriksi myös aikaisemmin luotu virtaussuuntarasteri (*Stream to feature...* 2022), jolloin lopputuloksena syntyvä vektori sisältää myös tiedon virtauksen suunnasta. Siten uomalinjat muodostuvat todenmukaisemmin kuin ne muodostuisivat enemmän yksinkertaistusta tekevän *Raster to Polyline* -työkalun avulla (*How stream to feature works* 2022), mitä havainnollistaa alla oleva kuva 22.



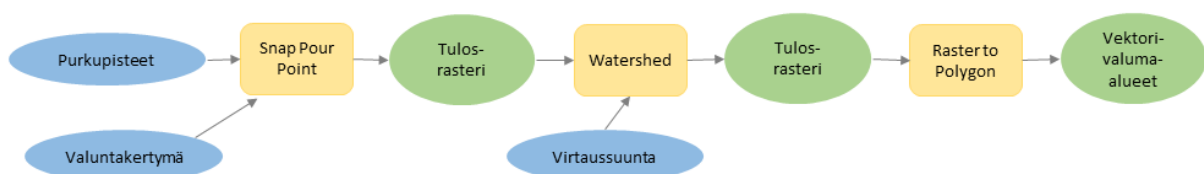
Kuva 22. Rasterina kuvatun virtauslinjan vektoroinnin lopputuloksen tarkkuuteen vaikuttaa käytettävä työkalu. *Stream To Feature* -työkalun algoritmi on suunniteltu uomia kuvaavien linjojen vektorointiin, sillä se ottaa huomioon virtausverkoksi valikoituneiden solujen lisäksi virtaussuuntarasterin suunta-arvot. Yleisemmin käytetty *Raster To Polyline* -työkalu ei ota huomioon solun suunta-arvoa, jolloin se tuottaa yksinkertaistetun lopputuloksen, jossa on enemmän virtausverkon kahden erillisen, lähellä kulkevan murtoviivan yhdistymistä epätodellisesti. Mukaillen *How stream to feature works* (2022).

ModelBuilder-mallin suorittamisen jälkeen muotoilin lopullisen virtausverkkovektorin visuaalisesti selkeän näköiseksi muokkaamalla väritystä ja lisäämällä luokkarajojen mukaisen selitteen. Virtausverkon määrittämisen jälkeen muodostin tutkimusalueen alivaluma-alueet. Valuma-alueiden muodostamisessa valitaan ensin purkupisteet, joiden yläpuoliset valuma-alueet voi määrittää automaattisesti siihen tarkoitettulla työkalulla (Mujumdar & Nagesh Kumar 2012: 129). Määritin alivaluma-alueiden purkupisteet manuaalisesti pistemuotoiselle

aineistotasolle ja hyödynsin pisteiden sijaintien valintaan aiemmin luotua valunnan kertymän (*Flow Accumulation* -työkalun) tulorasteria ja luokiteltua, murtoviivamuotoista virtausverkkoa. Siten sain sijoitettua purkupisteet haluttuihin virtausverkon sijainteihin.

Asetin osan alivaluma-alueiden purkupisteistä aikaisemmin valikoituneisiin vedenlaadun näytteenottopisteisiin, koska niiden kohdilta on saatavilla näytetuloksia pidemmältä aikaa (noin kymmenen vuotta). Siten saatavilla on kattavasti vedenlaatutietoa, jota voi aineiston jatkokäytössä analysoida verraten alivaluma-alueen (rautakuormitusta aiheuttaviin) ominaisuuksiin. Tarkistin näytteenottopisteiden sijaintien yhteensopivuuden valunnan kertymän virtaussoluihin, ja virheellisten sijaintien tapauksissa siirsin pisteiden sijainnit manuaalisesti lähimpään virtaussoluun. Siten näytteenottopisteitä hyödyntämällä voidaan kuvata virtausverkon mukaisia yläpuolisia alivaluma-alueita. Loput purkupisteet valitsin mallinnetun virtausverkon mukaisesti. Lisäksi määritin päävaluma-alueiden purkupisteet valunnan kumuloitumisen soluihin, joiden kohdalta valunta purkautuu päävaluma-alueilta Jäälinjärveen. Yhteensä muodostin 14 purkupistettä.

Syötin valmiin purkupisteaineiston *ModelBuilderilla* automatisoituun malliin (kuva 23). Sen ensimmäisessä vaiheessa *Snap Pour Point* -työkalu etsii ja kytkee jokaisen purkupisteen valuntakertymän (eli *Flow Accumulation* -tulorasterin) suurimman arvon soluun, määritetyn etäisyyden päähän alkuperäisen pisteen sijainnista (Snap pour point... 2022). Käytin etäisyytenä nolla metriä, jolloin purkupisteet kytkeytyvät tismalleen samoihin soluihin, joihin määritin pisteet manuaalisesti.



Kuva 23. Vuokaavio valuma-alueiden määrittämiseen ja vektorointiin luodusta *ModelBuilder*-mallista. Siniset ovaalit kuvaavat syöttöaineistoja, keltaiset laatikot ArcGIS Pron työkaluja ja vihreät ovaalit tulorastereita.

ModelBuilder-mallin (kuva 23) toisessa vaiheessa *Watershed*-työkalu määrittää aiemmin luodun virtaussuuntarasterin perusteella jokaiselle purkupisteelle valuma-alueen, eli valuma-alueita syntyy yhtä monta kuin purkupisteitä (*Watershed*... 2022). Tuloksena syntyy rasterimuotoiset valuma-alueet, jotka *ModelBuilder*-mallin viimeinen työkalu eli *Raster to Polygon* muuntaa vektorimuotoon. Valuma-alueiden rajaukset yksinkertaistetaan *Simplify polygons* -valinnalla, joka tasoittaa kulmikkaat rasterin reunat (*Raster to*... 2022).

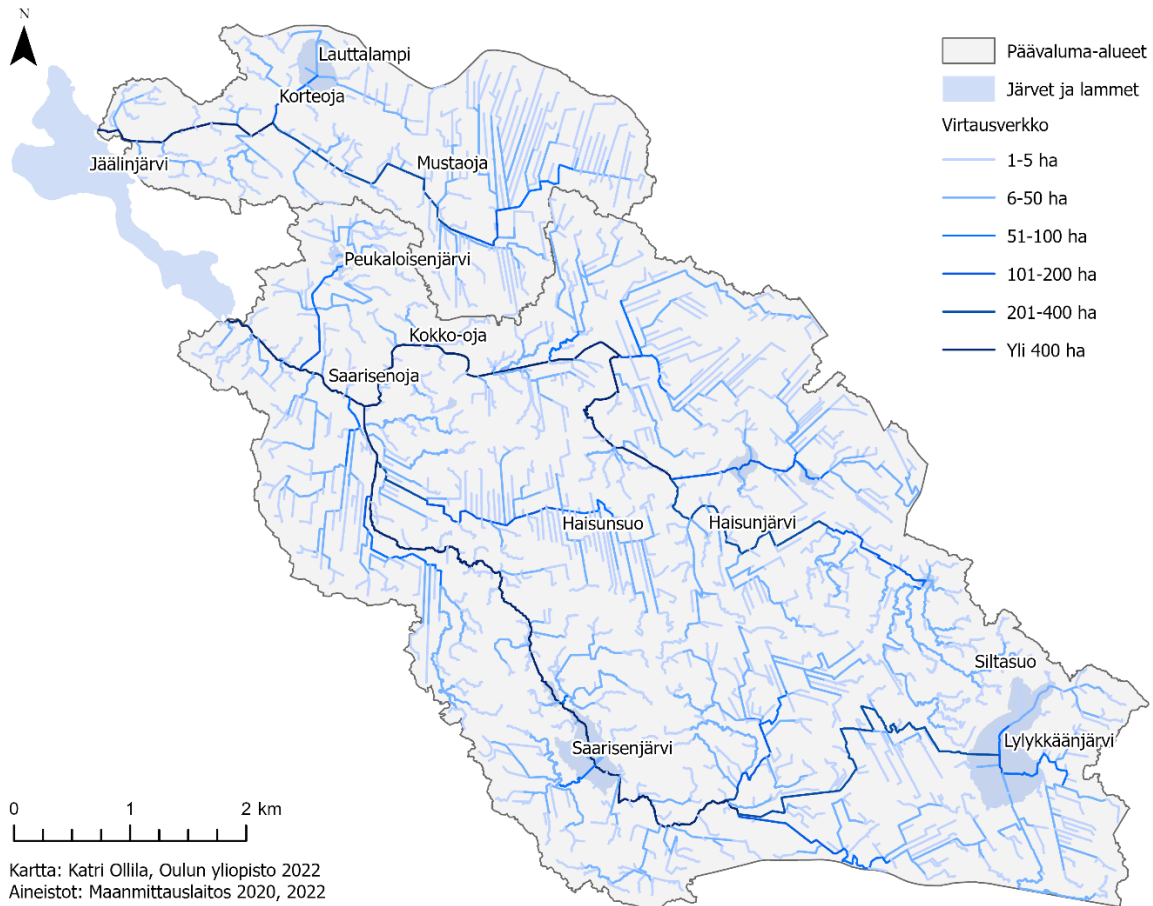
5.2 Vertailumalliin pohjautuva virtausverkko

Vertaan edellä luodun virtausverkon lopputulosta vertailumallin virtausverkkoon. Tein vertailumallin pelkästään ArcGIS Pron hydrologian mallintamiseen tarkoitetuilla työkaluilla: *Fill*, *Flow Direction* ja *Flow Accumulation* (An overview... 2022). Vertailumalliin en ole tehnyt uomaverkoston tai rumpujen polttoa, ja hydrologisen eheytyksen tein *breaching*-menetelmän sijaan *filling*-menetelmällä. Toteutin siis kuvan 16 vuokaavion vaiheista korkeusmallin hydrologisen eheytyksen (*Fill*-työkalulla, joka perustuu teoriaosuudessa kuvattuun *filling*-menetelmään (Fill... 2022)), virtaussuunnan määrittämisen (*Flow Direction* -työkalulla) ja valunnan kertymän (*Flow Accumulation* -työkalulla). Toteutin mallinnuksen samalla laajuudella kuin uomaoptimoidussa mallinnuksessa (ks. kuva 17). Virtausverkon vektoroinnin tein aiemmin kuvatulla *ModelBuilder*-mallin automatisoinnilla (kuva 21), jotta virtausverkkojen lopputulokset ovat samalla tavalla luokiteltu ja siten vertailtavissa. Lisäksi määritin vertailumallin mukaiset päävaluma-alueet kuvan 23 mukaisen *ModelBuilder*-mallin avulla. Käytin purkupisteinä valunnan kumuloitumisen mukaisia soluja, joiden kohdalta valunta purkautuu päävaluma-alueilta Jäälinjärveen.

6 Tulokset ja tulosten tarkastelu

6.1 Uomaoptimoidun mallin virtausverkko ja alivaluma-aluejaottelu

Valmis uomaoptimoidun mallinnuksen mukainen virtausverkko on kuvattuna alla (kuva 24). Alimman luokan alarajan mukaisesti virtausverkko muodostuu niissä valunnan kertymän soluissa, joissa valuntaa kumuloituu yhden hehtaarin alueelta. Mitä suuremmalta alueelta valuntaa kumuloituu, sitä tummempi virtausverkon väri on. Tummimmista virtausverkon linjoista (yli 400 ha) nähdään, että pohjoisemmalla päävaluma-alueella virtauksella on yksi pääreitti ja vastaavasti eteläisemmällä päävaluma-alueella virtaus haarautuu kahteen yli 400 hehtaarin valuma-alueen muodostamaan pääreittiin, Kokko-ojaan ja Saarisenjärveltä päin virtaavaan Saarisenojaan.



Kuva 24. Uomaoptimoidusta pintavaluntamallista tuotettu virtausverkko ja päävaluma-alueet.

Jäälinjärven pohjoisemmalla päävaluma-alueella Mustaojan virtaus muodostuu metsäojitetun alueen pintavalunnasta, kulkien kohti Jäälinjärveä. Valuntaa kumuloituu pääuomaan myös Lauttalampeesta ja sen valuma-alueelta, Korteojaa pitkin. Eteläisen päävaluma-alueen eteläisemmällä päävirtauksen reitillä valunta alkaa kumuloitua Lylykkäänjärven yläpuoliselta valuma-alueelta, ja virtaus kulkee Saarisenjärven läpi Saarisenojaa pitkin Jäälinjärveen. Lylykkäänjärven ja Saarisenjärven välillä valuntaa kumuloituu myös laajoilta metsäojitetuilta alueilta. Lisäksi Saarisenjärven ja Kokko-ojan haaran välillä Saarisenojaan yhtyy valuntaa metsäojitetulta Haisunsuon alueelta. Kokko-ojaan valuntaa kertyy aina Siltasuon kosteikkoalueelta asti. Virtaus kulkee Haisunjärven läpi, sen jälkeen keräten valuntaa metsäojitetuilta alueilta virtausreitien varrelta.

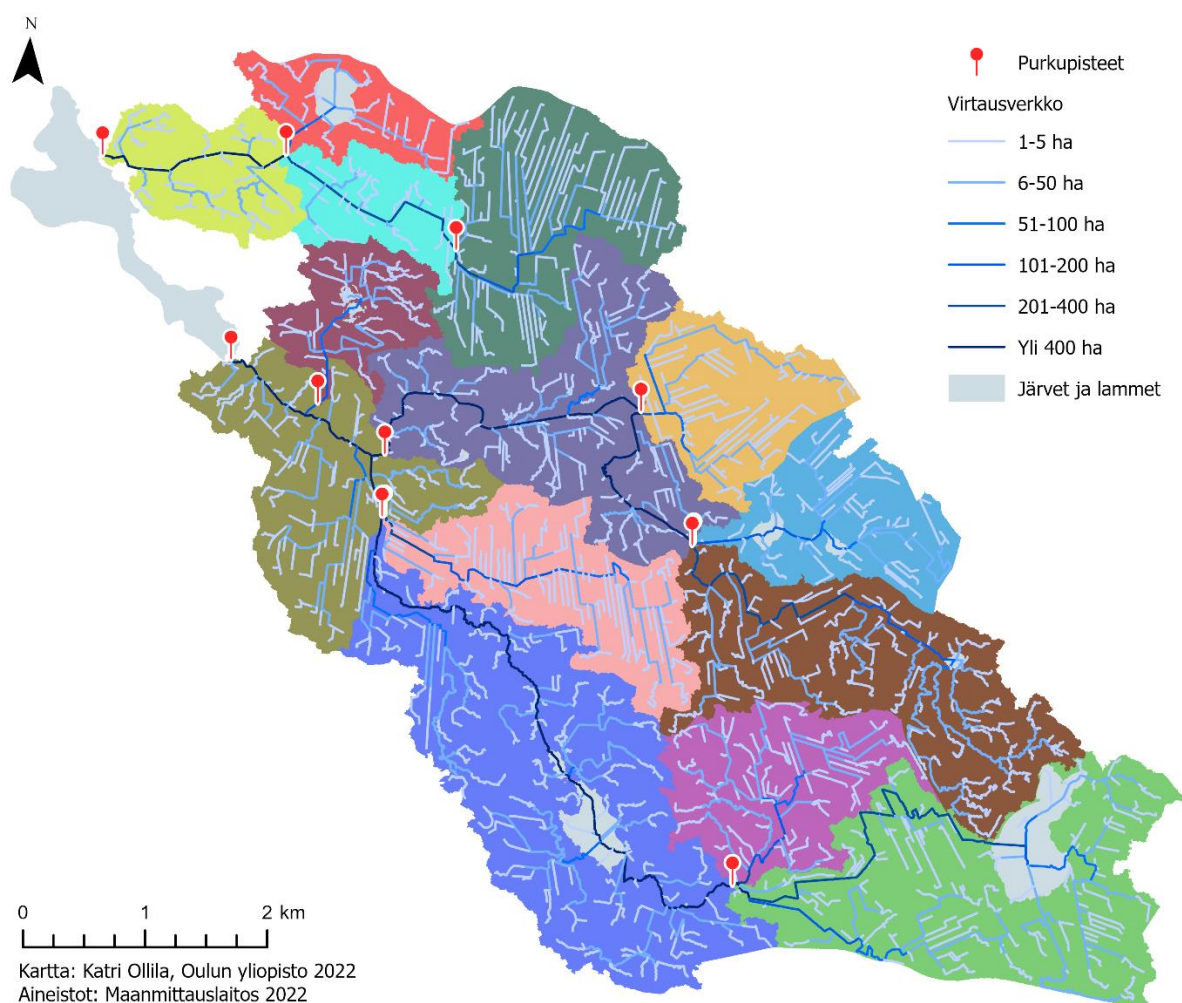
Virtausverkon tulkinnaissa on huomioitava, ettei se ole sama asia kuin uomaverkosto: osa virtausverkon linjoista ovat uomastoa, mutta osa virtausverkosta, varsinkin verkon alkupäät, kuvaavat veden pintavaluntaa, eli sitä mihin uomaverkoston uomiin vedet miltäkin alueelta valuvat. Myöskään uomaverkosto ei kokonaisuudessaan kuulu virtausverkkoon – jos virtausta ei verkoston omaisuuden kohdalla kumuloidu yläpuolisen valuma-alueen

muodostaman kynnyksarvon verran, eli yhden hehtaarin alueelta, ei uoma ole osa virtausverkkoa.

On myös huomioitava, että virtausverkko ei kuvaa mitään tiettyä sadantatilannetta, eli malli ei ota huomioon maahan satavaa tai lumen sulamisesta muodostuvaa veden määrää, eikä se ota huomioon sitä, että osa maanpinnalla olevasta vedestä imeytyy maaperään; virtausverkkomalli kuvaa yleisesti pintavalunnan ja erityisesti uomavirtauksen reittejä silloin, kun maanpinnalle tulee vettä. Malli ei myöskään välttämättä kuvaa veden virtausreittejä tulvatilanteessa. Kaiken kaikkiaan mallin mukaiset virtausreitit eivät siis esiinny luonnossa jatkuvasti – maanpinnalla ei kulje jatkuvasti valuntaa ja uomat voivat olla kuivana esimerkiksi vuodenajasta riippuen. Maastotietokannan kuvauksenkin mukaan uomapolttoon käytettyyn virtavesien aineistoon lukeutuvat metsäojat voivat olla veden peittämiä vain ajoittain, ei pysyvästi (Maastotietokohteet 2018: 51).

Virtausverkon määrittystä yläpuolisen valuma-alueen mukaan voidaan perustella sillä, että se estää harhakuvaa siitä, että virtausverkko kuvaisi todellista uomaverkostoa. Tämän takia yläpuolisen valuma-alueen koko on varsin perusteltu esitystapa, koska tällöin virtausverkolla ei pyritäkään esittämään todellista uomaverkostoa, vaan havainnollistetaan, miten suurelta alueelta mihinkin (uoma)pisteeseen pintavaluntaa kertyy. Väriteemoituksella voidaan siis helposti havainnollistaa, kuinka laajalta alueelta tiettyyn virtausverkon kohtaan pintavaluntaa kertyy. Myös aineiston jatkohyödyntämisen kannalta esitystapa on hyödyllinen, koska yläpuolisen valuma-alueen koko usein määrittelee vesiensuojelurakenteiden suunnittelua (esim. Häggblom ym. 2020: 48; Luonnonhoidon paikkatietoaineistot 2021).

Kuvasta 25 nähdään uomaoptimoidun mallinnuksen ja purkupistesijaintien pohjalta muodostettu alivaluma-aluejaottelu. Alivaluma-alueita on 14 ja ne ovat kooltaan 1.03–5.58 km². Jaottelu muistuttaa kuvan 4 kaaviokuvaa alivaluma-aluejaottelusta, mutta määritetyt alueet eivät jakaudu jokaisen uomahaaran kohdalla, vaan pääasiassa suurimpien uomahaarojen kohdalla. Alivaluma-aluejaottelun päällä näkyvä virtausverkko, ja erityisesti sen suurimmat päälinjat (yli 200 ha), voidaan hahmottaa ylimpien latvauomien alivaluma-alueilta alempien alivaluma-alueiden läpi, aina Jäälinjärveen saakka. Alivaluma-aluejaottelu tuo myös selkeästi esiin, missä päävirtausreitien varrella siihen yhtyy suurimpien sivu-uomien alivaluma-alueet. Virtausverkon luokittelu (yhden hehtaarin alueelta kumuloituvasta virtauksesta alkaen) ja alivaluma-aluejaottelun kokoluokka toimivat nyt hyvin yhdessä, koska virtausverkko kuvaa myös alivaluma-alueiden sisäisiä virtausreittejä ja auttaa siten hahmottamaan alueiden sisäisiä, seuraavan asteen alivaluma-alueita.

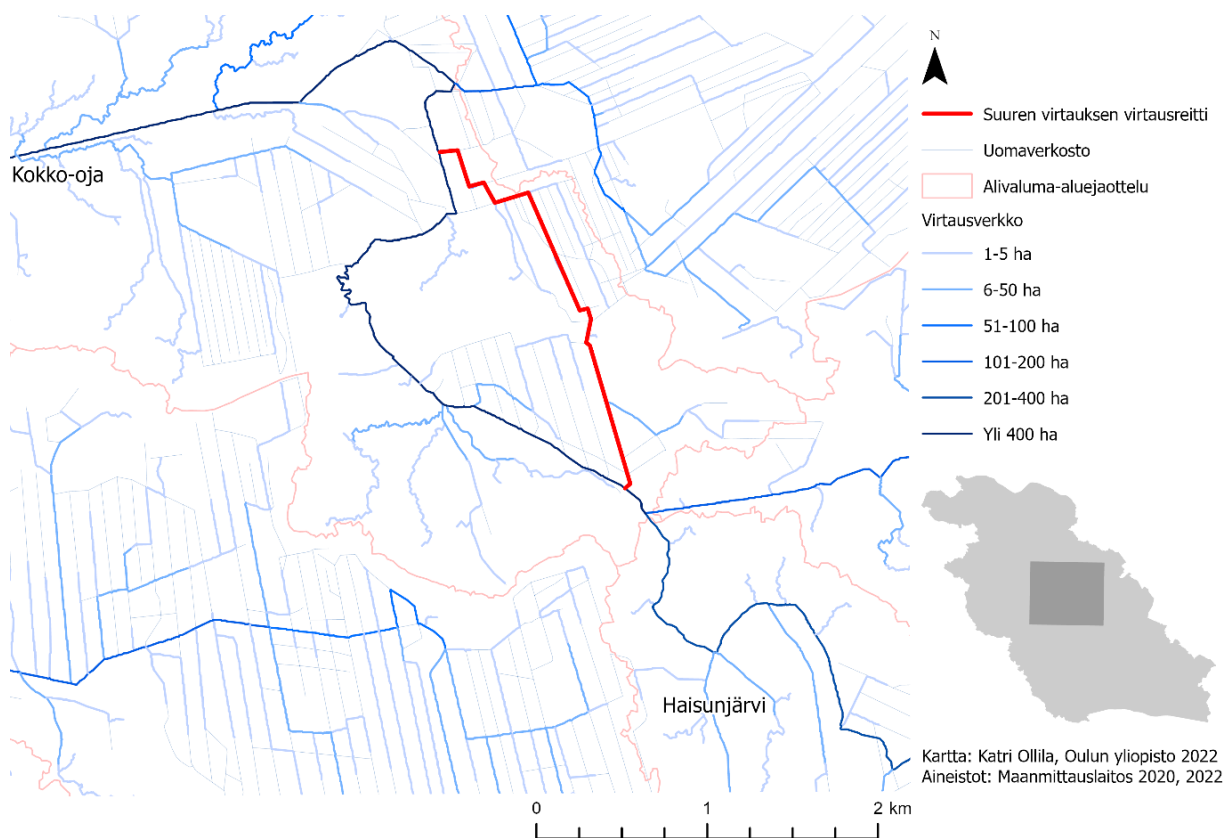


Kuva 25. Uomaoptimoidusta pintavaluntamallista tuotettu alivaluma-aluejaottelu Jäälinjärven yläpuolisille päävaluma-alueille. Purkupisteitä on yhteensä 14, ja niiden yläpuoliset alivaluma-alueet on kuvattu eri väreillä. Lähekkäin vierekkäisistä pisteestä kahteen eri suuntaan haarautuvien alivaluma-alueiden purkupisteet eivät erotu vierekkäisinä symboleina, koska pisteet sijaitsevat erittäin lähellä toisiaan, viereisissä soluissa.

Maastotarkasteluilla varmennettiin mallin paikkansapitävyyttä tutkimusalueen todellisiin virtausreitteihin verrattuna. Maastotarkasteluiden perusteella lopullisen mallin päävirtausreitit ovat pääosin todenmukaisia (ks. kuvassa 24 tummimmat yli 400 ha muodostamat virtausverkon osat). Lisäksi Saarisenjärveen kohdistuvaa valuntaa tarkkailtiin maastossa ja sen havaittiin kerääntyvän suurelta osin järven eteläosasta tulevasta virtauksesta (joka kumuloituu suurelta valuma-alueelta), mutta lisäksi järven ympäröiviltä harjualueilta. Siten mallinnettu virtausverkko kuvaa Saarisenjärveen kohdistuvaa valuntaa todenmukaisesti (ks. kuva 24). Myös Saarisenojasta Haisunsuolle haarautuvan virtauslinjan sijaintia tarkasteltiin maastossa ja mallin mukainen virtausreitti kulkee samoin kuin luonnossa (ks. kuvassa 24 Haisunsuon läpi kulkeva 51–100 ha virtausverkon linja). Koska maastotarkasteluja ei ole kohdistettu muille

päävirtausreittien ulkopuolisille alueille, ei muiden alle 400 hehtaarin muodostamien virtausverkon linjojen tarkkaa todenmukaisuutta voida varmistaa.

Maastotarkastusten perusteella tiedetään kuitenkin myös alueita, joilla mallin mukaisen virtauksen todenmukaisuudesta ei voida olla varmoja. Mallin mukaan esimerkiksi Kokko-ojan virtausverkon linja kulkee kaartaen Haisunjärveltä kohti pohjoista, mutta maastokäyntien perusteella kuvassa 26 esitetyn punaisen virtauslinjan kautta virtaa myös suuri määrä vettä kohti Jäälinjärveä. Vaihtoehtoinen virtauslinja kulkee saman alivaluma-alueen sisällä kuin mallin mukainen virtauslinja. Silmämääräisen maastotarkastelun perusteella ei voida olla varmoja, kumpi linja on todellinen virtauksen pääreitti.



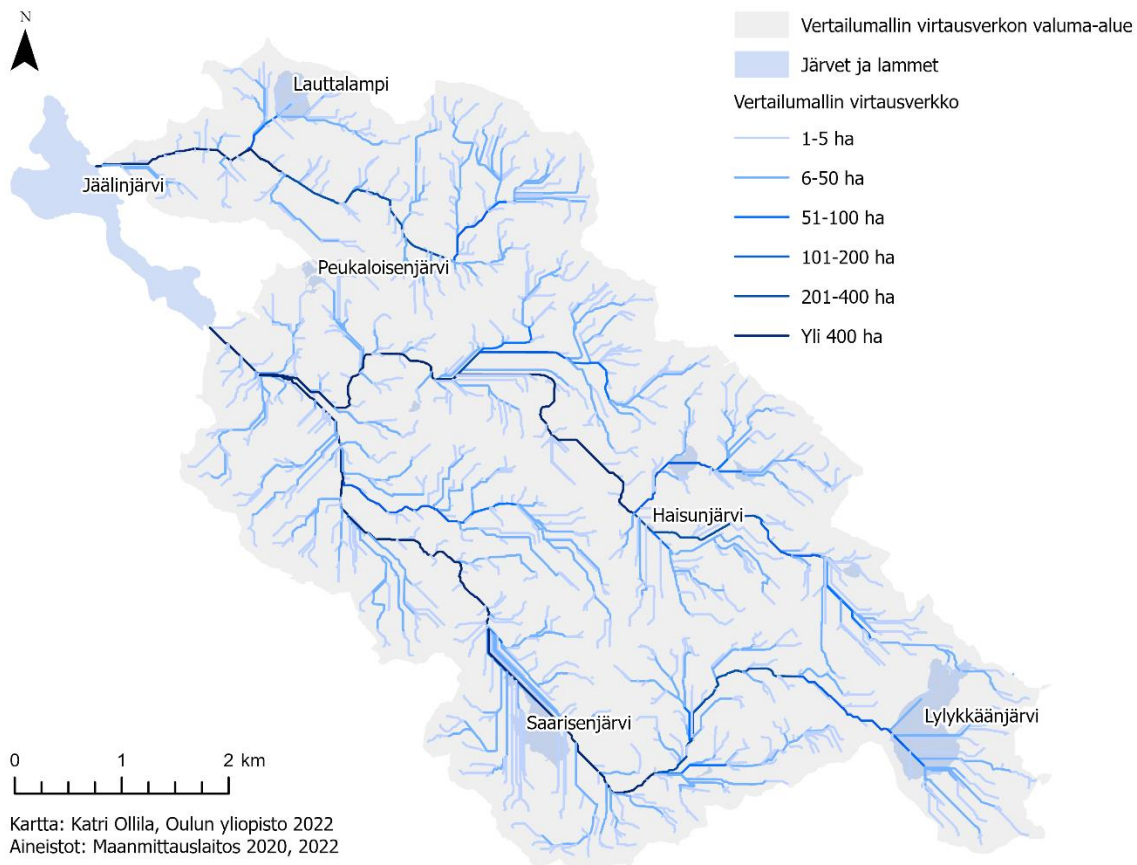
Kuva 26. Uomaoptimoidun mallin mukaan Kokko-ojan päävirtausreitti (yli 400 ha virtausverkko) kulkee Haisunjärveltä kaartaen vasemmalle ja kohti pohjoista. Maastotarkasteluiden mukaan myös punaisen linjan kohdalla on suuri virtaus kohti Kokko-ojaa.

Lisäksi virheellisyttä on Saarisenjärven länsipuolella olevassa, suurehkolta valuma-alueelta (51–100 ha) kumuloituvassa virtausverkon osassa, joka yhtyy Saarisenjärven läpi kulkevaan päävirtausreittiin. Todellisuudessa järven länsipuolella ei ole yhtä virtausreittiä järveen, vaan järven ympäröimä alue on kosteikkoaluetta, jolta pintavaluntaa kertyy järveen useita eri valuntalinjoja pitkin. Virheellisyys virtausverkkoon on syntynyt Saarisenjärven

vesialuepolygonin korvanneen keskilinjan takia, sillä keskilinja korkeusmalliin poltettuna kokoaa järven länsipuolisen valunnan keskilinjan päähän, järven reunaan (ks. kuva 24).

6.2 Virtausverkkojen vertailu uomaoptimoidun ja vertailumallin välillä

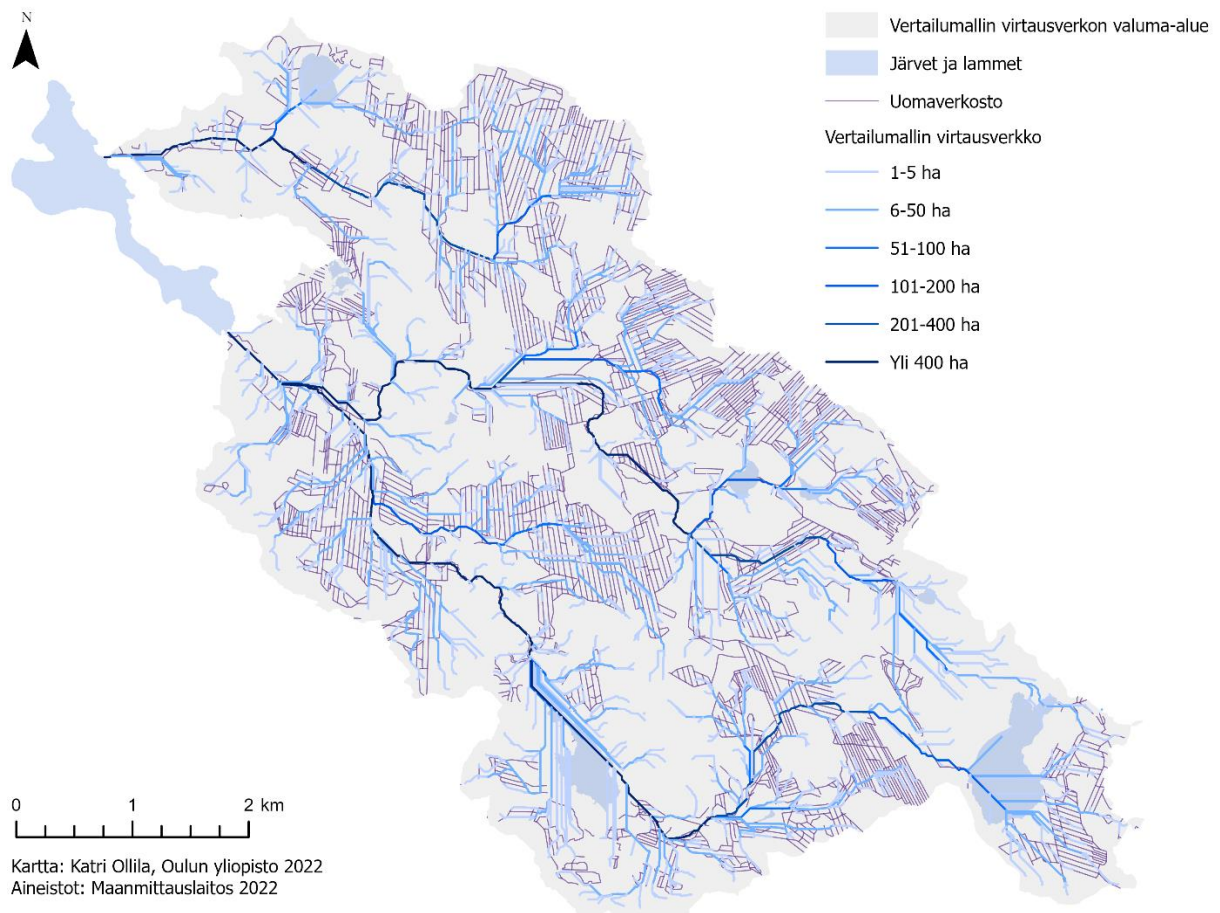
Vertailumallin mukainen virtausverkko on esiteltyä kuvassa 27. Koko valuma-alueen laajuudella on havaittavissa, että virtauslinjat kulkevat hyvin suoraviivaisesti kohti päävirtauksen linjoja, eli virtausreitit eivät suurelta osin kulje tiheää metsäojitusverkostoa pitkin. Lisäksi järvien kohdalla virtausverkko muodostaa tiheitä linjojen ryppäitä (ks. esim. Saarisenjärvi kuvassa 27). Se johtuu siitä, että järvet ovat täysin tasaisia alueita (Kansallisen maastotietokannan... 2017: 9), jolloin niiden kohdalle on muodostunut epätodelliset pintavalunnan linjat (Zhao ym. 2009: 2).



Kuva 27. Vertailumalliin pohjautuva virtausverkko ja virtausverkon kattama valuma-alue.

Ilman uomaoptimointia lopputuloksena on siis Kennyn ym. (2008: 1419) ja Zhaon ym. (2009: 4) kuvaama yhtenäinen virtausverkko, joka ei kuitenkaan kuvasta todenmukaisia virtauksen kulkureittejä. Kuvassa 28 nähdään, että mallinnuksessa muodostunut virtausverkko mukaillee todellista uomaverkostoa heikosti. Vertailumallin ainut esikäsittely, nielujen täyttö (*filling-*

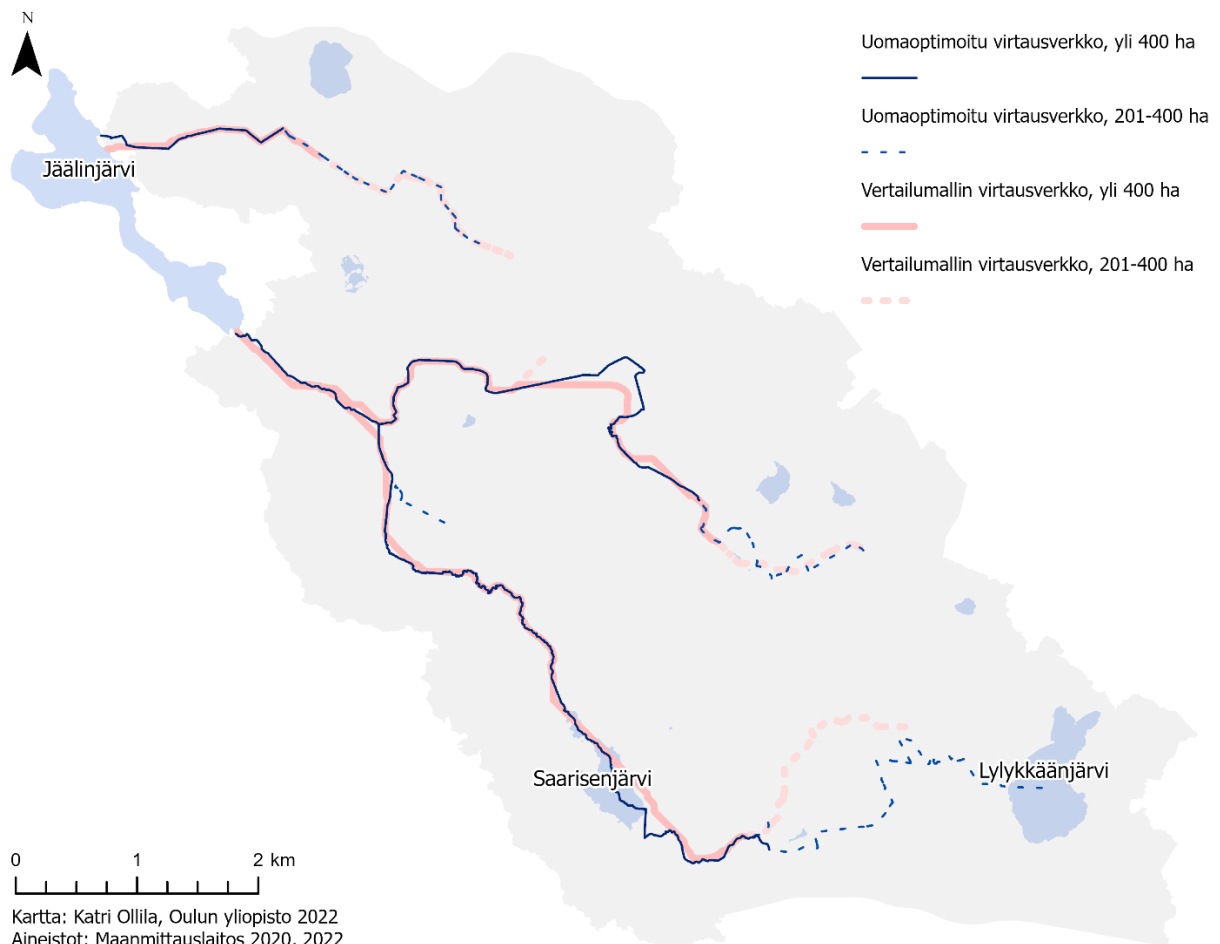
menetelmällä), ei yksistään takaa kuin hydrologisen eheyden, eli sen, että virtaussuunnat muodostavat yhtenäisen virtausverkon, mutta se ei kuitenkaan takaa virtaussuuntien paikkansapitävyyttä todelliseen uomaverkoston verrattuna (Kenny ym. 2008: 1421). Kuten kuvissa 27 ja 28 nähdään, virtausverkon vääristymät ilmenevät pitkinä yhdensuuntaisina ja rinnakkain kulkevinä, epärealistisina virtauslinjojen ryppäinä, jollaisina Petroselli ja Alvarez (2012: 712) toteavat korkeusmallista johtuvien epätarkkuuksien usein ilmenevän tasaisilla alueilla.



Kuva 28. Vertailumalliin pohjautuva virtausverkko (sininen) ja uomaverkosto (ruskea).

Merkittävin eroavaisuus uomaoptimoidun ja vertailumallin välillä on siis se, että uomaoptimoidun mallin virtausverkko mukailee hyvin todellista valuntaa tiheään metsäojitetuilla alueilla, kun taas vertailumallissa virtausverkko ei kulje metsäojaverkoston mukaisesti. Lisäksi esimerkkinä voidaan mainita Peukaloisenjärveltä tuleva valunta, joka jakautuu eri tavoin mallien välillä. Uomaoptimoidussa mallissa järven ja sen yläpuolisen valuma-alueen valunta suuntautuu kohti Saarisenojaa, kun taas vertailumallissa osa alueen valunnasta suuntautuu kohti Kokko-ojaa ja osa kohti Saarisenojaa (vrt. kuva 24 ja 27).

Toisaalta vertailumalli mukailee varsin todenmukaisesti virtausverkon päälinjoja; uomaoptimoidun ja vertailumallin virtausverkossa yli 400 ja 201–400 hehtaarin valuma-alueen muodostamat päävirtausreitit kulkevat hyvin samanlaisia linjoja pitkin (kuva 29). Vertailumallissa Kokko-ojaa pitkin kulkeva valunta alkaa kuitenkin muodostua Lylykkäänjärven alueelta saakka, kun taas uomaoptimoidussa mallissa valunta alkaa kertyä Lylykkäänjärven luoteispuolelta, Siltasuon alueelta (vrt. kuva 24 ja 27). Myös Saarisenjärven läpi kulkevassa päävirtausreitissä on hieman eroavaisuutta: vertailumallin virtausverkko kaartaa Lylykkäänjärven jälkeen pohjoisempaa reittiä kohti Saarisenjärveä kuin uomaoptimoitu virtausverkko (ks. kuva 29). Sama pohjoisempi virtausreitti (metsäojitetulta alueelta) muodostaa uomaoptimoidussa mallissa oman sivuhaaran (ks. kuva 24).

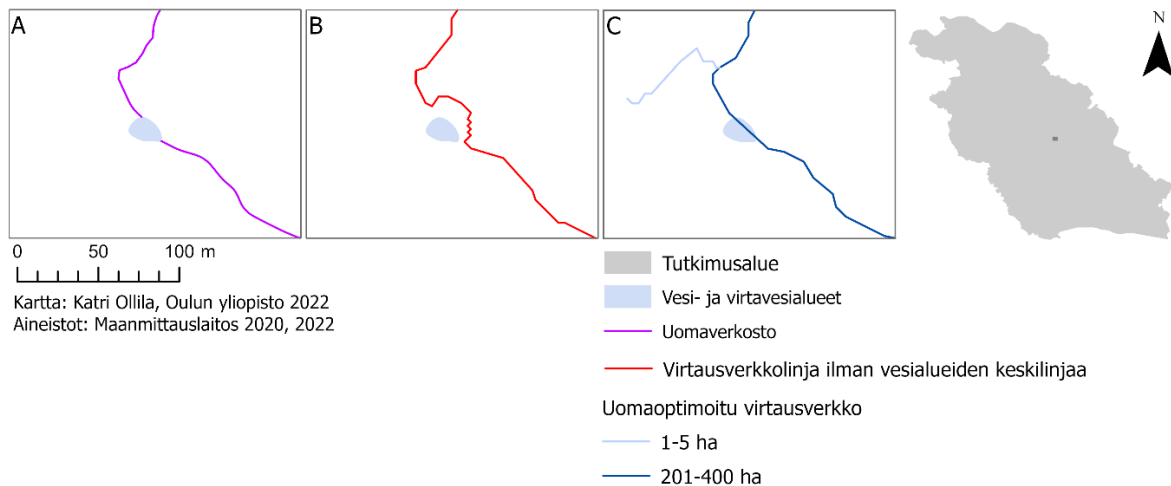


Kuva 29. Uomaoptimoidun ja vertailumallin mukaiset virtausverkkojen päälinjat: yli 400 hehtaarin ja 201–400 hehtaarin osuudet.

Mallien vertailun perusteella voidaan siis todeta, että laajat, tiheät metsäojitukset eivät näkyisi oikein mallinnetussa virtausverkossa, jos uomaverkostoa ei esikäsittelyvaiheessa poltettaisi korkeusmalliin. Toisin sanoen pintavaluntamalliin ja edelleen virtausverkkoon ja valuma-

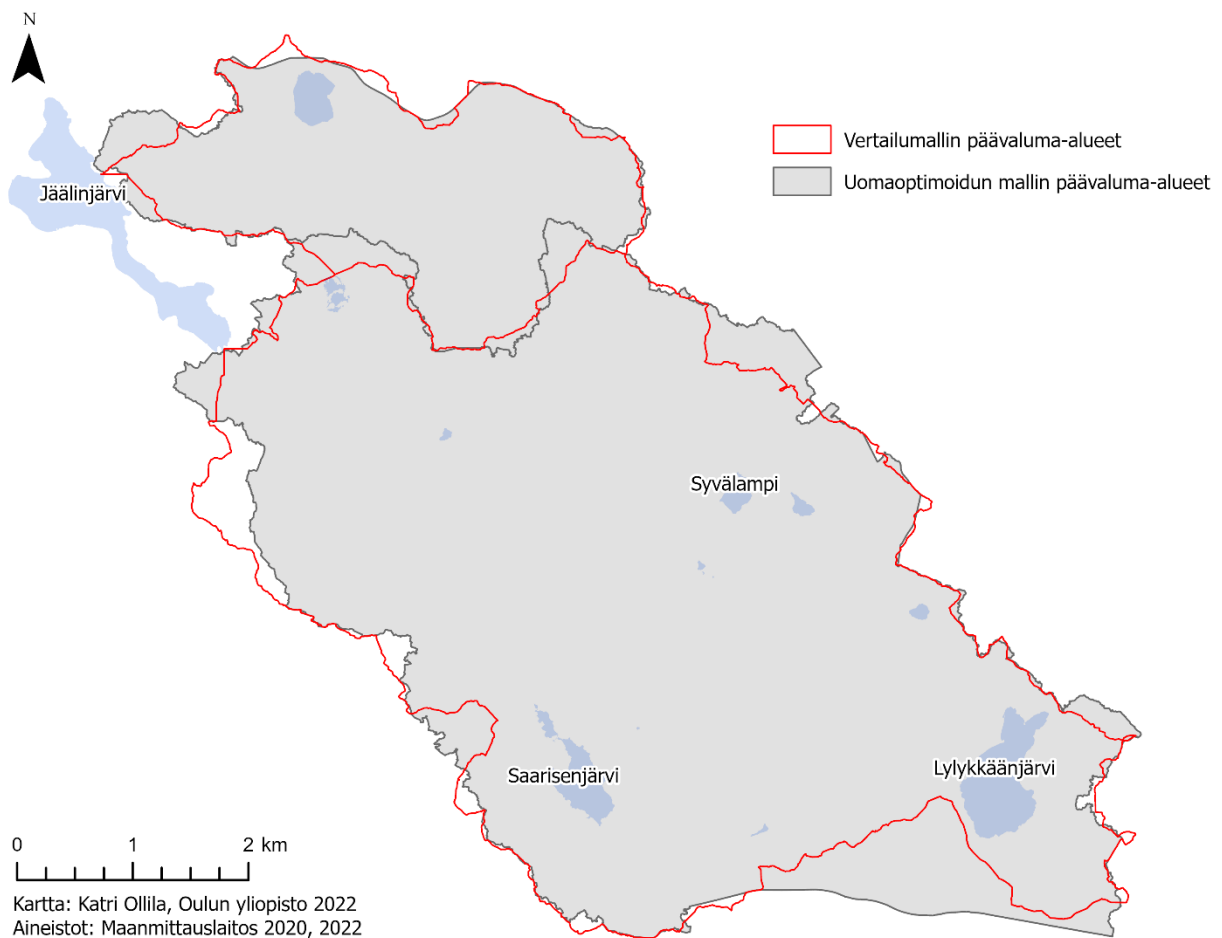
aluemääritykseen muodostuisi merkittävä määrä tasaisten alueiden vääristymää. Uomaoptimoituun malliin verrattuna vertailumallin virtausverkko muistuttaa enemmän kuvan 4 kaavion mukaista uomaverkostoa. Vertailumallin voidaan siis ajatella kuvaavan näennäistä ”luonnollista” virtausverkkoa – sellaista, jota todellinen tutkimusalueen virtausverkko luultavasti enemmän muistuttaisi (erityisesti tasaisilla alueilla), jos alueella ei olisi tiheää metsäojitusta, joka ohjaa merkittävästi virtaussuuntia.

Metsäojitusalueiden lisäksi virtausverkko kulkee järvien kohdalla selkeämmin uomaoptimoidussa mallissa, koska uomaverkoston vesialueet on korvattu keskilinjalla. Vertailumallin virtausverkon lopputuloksessa järvien kohdilla näkyvät vierekkäisten virtausverkkolinjojen ryppäät poistuvat kokonaan uomaoptimoidussa mallissa ja korvautuvat selkeällä järven keskilinjalla (vrt. esim. Saarisenjärvi kuvassa 24 ja 27). Näin virtausverkon visuaalinen silmäiltävyys ja ymmärrettävyys ovat paremmat ja virtauslinjat näkyvät todenmukaisempina reitteinä. Virtauslinjojen todenmukaisuuden parantumisesta nähdään esimerkki kuvassa 30, jossa alkuperäinen uomaverkosto katkeaa lammen kohdalla (kuva 30 A) ja virtaussuunta-algoritmi muodostaisi vääristyneitä virtauksen suuntia ja sen takia virtausverkko kiertyisi lammen epätodellisesti (kuva 30 B). Lammen kohdalle muodostettu keskilinja varmistaa virtauksen todenmukaisemman linjan, joka näkyy uomaoptimoidussa virtausverkon lopputuloksessa (kuva 30 C).



Kuva 30. Uomaverkostoaineisto on katkonainen virtavesialueiden ja vakavesien eli järvien ja lampien kohdalla, kuten Haisunjärven yläpuolisen lammen kohdalla (A). Katkonainen uomaverkosto voi aiheuttaa vääristyneen virtausverkkolinjan vesialueen ympärillä (B), mutta polygonien korvaaminen keskilinjalla ja keskilinjän yhdistäminen yhtenäiseen, poltettavaan uomaverkoston parantaa uomaoptimoidun mallinnuksen ja virtausverkon lopputulosta (C).

Uomaoptimoidun ja vertailumallin välisiä eroavaisuuksia voidaan tarkastella myös päävaluma-aluerajauksen, eli virtausverkon kattaman valunnan kumuloitumisalueen mukaan. Mallinnusten päävaluma-aluerajaukset ovat jokseenkin vastaavanlaisia, mutta eivät täysin samanlaisia (kuva 31). Uomaoptimoidun mallin mukaiset valuma-alueet (eli tutkimusalue) on kooltaan yhteensä 35.38 km². Vastaavasti vertailumallin mukaiset valuma-alueet ovat kooltaan 33.57 km². Uomaoptimoidun mallin mukainen ala on siis noin 1.81 km² suurempi kuin vertailumallin mukainen.



Kuva 31. Uomaoptimoidun (harmaa) ja vertailumallin (punainen) mukaiset päävaluma-alueet.

Vertailumallin mukainen valuma-aluerajaus kulkee selvästi eri tavalla muutamissa paikoissa: Lylykkäänjärven eteläpuolella vertailumallin valuma-aluerajaus on selvästi pienempi kuin uomaoptimoidun mallin. Myös Saarisenjärven länsipuolella, Syvälammen pohjoispuolella ja valuma-alueen pohjoisrajalla valuma-aluerajaus on vertailumallissa pienempi. Vastaavasti Jäälinjärven eteläpuolella vertailumalli rajaa suuremman alueen valuma-alueeksi. Myös pohjoisemman ja eteläisemmän päävaluma-alueen välinen raja kulkee hieman eri tavalla mallien välillä.

Mallinnustulosten vertailun perusteella voidaan todeta, että vertailumalli ei ole soveltuva tämän tutkimuksen tarkoitukseen. Kuten Hammond ja Han (2006: 65), Callow ym. (2007) ja Kenny ym. (2008: 1421) toteavat, uomien poltto lisää merkittävästi virtausverkon ja valuma-alueiden mallinnuksen tarkkuutta, kun lopputulosta verrataan mallinnukseen, joissa ei ole tehty korkeusmallin esikäsittelyä uomien osalta. Kaiken kaikkiaan mallinnustulosten vertailun perusteella eroavaisuuden ovat selkeät ja uomaoptimoidun mallin voidaan todeta kuvaavan paremmin tutkimusalueen todenmukaista pintavaluntaa.

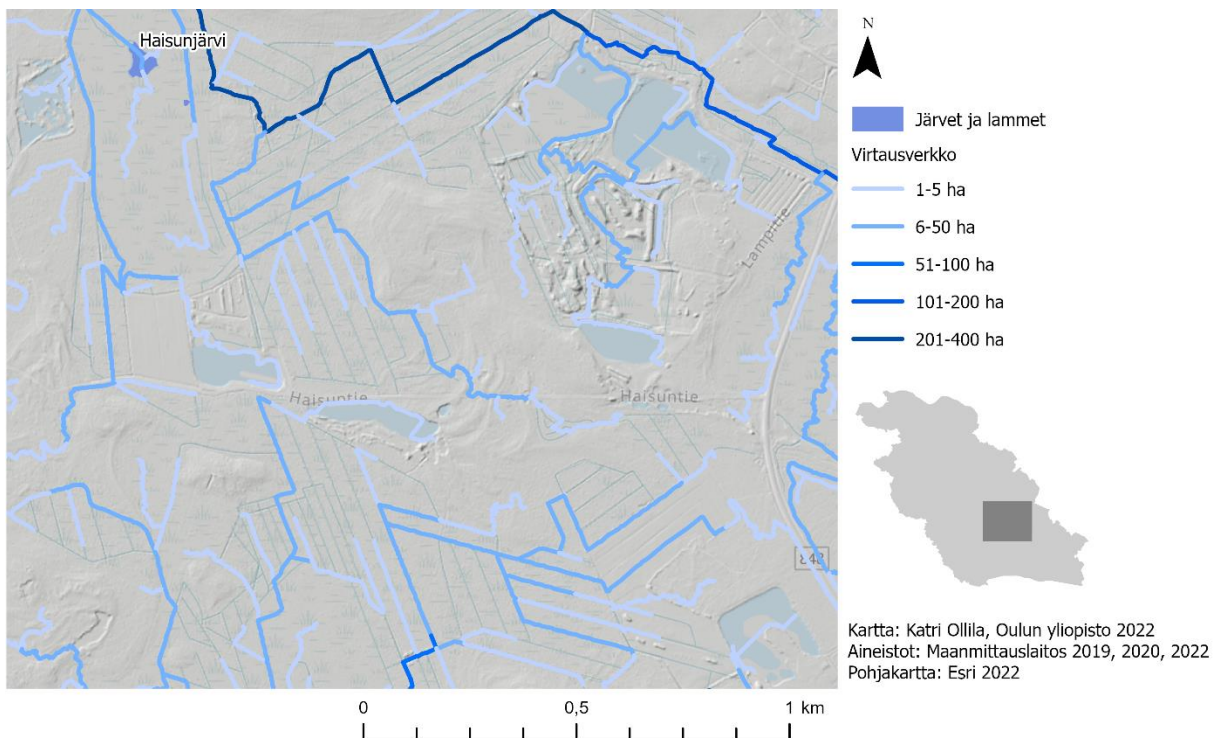
Vertailumalliin pohjautuvan mallinnuksen voidaan kuitenkin olettaa olevan riittävän tarkka ja siten soveltuva, jos tutkimusalue olisi tämän työn aluetta suurempi, sillä jos tarkastelu kohdistuisi suuremmalle alueelle ja karkeammalle virtausverkon tarkkuudelle (esimerkiksi virtausverkko pääuomien tarkkuudella pienipiirteisemmän uomatarkkuuden sijaan), voisi mallinnus kuvata todellista pintavaluntaa tarpeeksi tarkasti. Käytännössä mallinnuksen todenmukaisuutta voitaisiin parantaa ilman uomaoptimointia nostamalla valunnan kumuloitumisen kynnsarvoa yhden hehtaarin valuma-alueetta suurempaan kokoon. Tätä voidaan perustella sillä, että vertailumallin virtausverkko kuvaa suhteellisen todenmukaisesti valunnan pääreittejä, eli niitä virtausverkon osia, joissa valuntaa kumuloituu yli 400 hehtaarin alueelta (ks. kuva 29). Jos kynnsarvo nostettaisiin ylintä luokkaa suuremmaksi, esimerkiksi 600 hehtaariin, voisi malli kuvastaa todellisia päävirtausreittejä entistä todenmukaisemmin.

7 Uomaoptimoidun mallin epävarmuustekijöitä ja onnistuneisuus

Pintavalunnan mallinnuksessa on monia epävarmuustekijöitä, joita muodostuu mallinnuksen eri vaiheissa. Siksi mallinnuksen lopputuotteissa, virtausverkossa ja alivaluma-aluejaottelussa, voi olla erilaisia virheellisyyksiä. Epävarmuutta muodostuu mallinnuksen pohja-aineiston tarkkuudesta, sen esikäsittelystä, uomien poltosta ja itse pintavalunnan mallinnusvaiheissa. Seuraavaksi kerron niistä yksityiskohtaisemmin ja arvioin, miten hyvin käyttämäni menetelmät soveltuivat tutkimuksen tavoitteisiin.

Ensinnäkin aineistojen osalta vesialtaiden kattavuuteen liittyy epävarmuutta, koska järviä ja lampia kuvaava Maastotietokannan (2022) aineisto ei sisällä kaikkia alueen vesialueita. Tutkimusalueella on vesialueita, jotka ovat maastohavaintojen perusteella sorakuoppia eli soranottoaikoja (kuva 32). Ne eivät näy valuntamallissa samalla tavalla kuin muut vesialueet, eli niiden läpi ei muodostu keskilinjaa, eivätkä ne ole yhteydessä uomaverkostoon. Maastokartan tarkastelun perusteella ne eivät ole yhteydessä virtavesiin eli niitä lähellä kulkevaan uomastoon. Valuntamallinnuksen virtaussuunnat muodostuvat

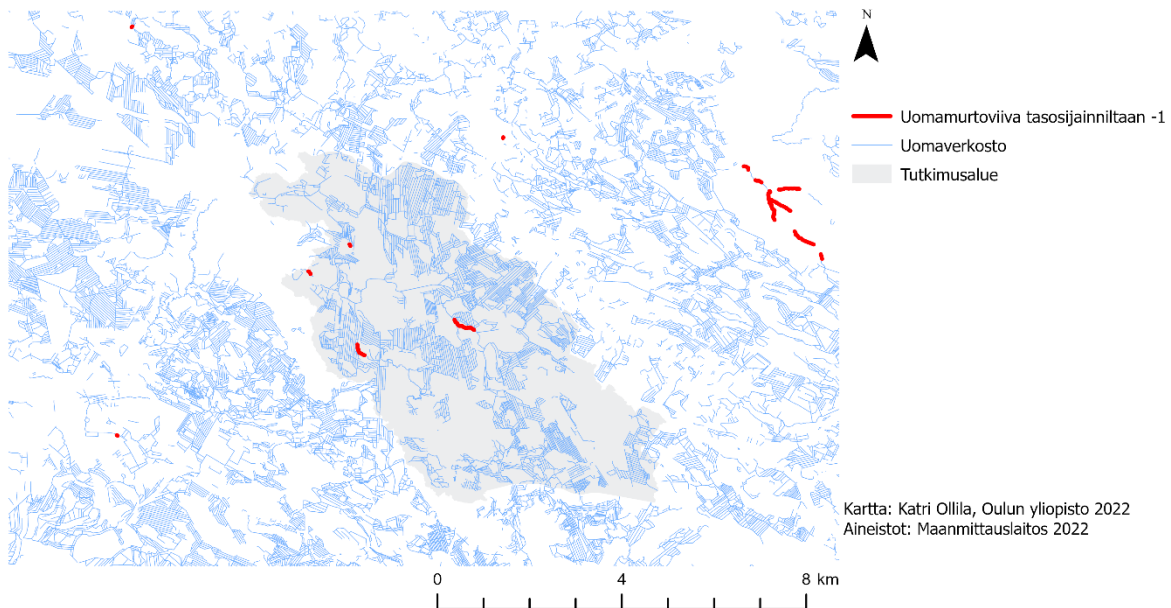
sorakuoppien kohdalla korkeusmallin mukaisiin korkeusarvoihin perustuen. Mallinnettu virtausverkko pääasiassa kiertää altaat niiden reunoja pitkin (vrt. kuva 32 ja 18). Sorakuopat olisi voinut digitoida Maastotietokannan vesialueiden aineistoon, jolloin ne olisi korvaantunut keskilinjolla. Alueet on kuitenkin perusteltua jättää lisäämättä aineistoon, koska altaat eivät ole yhteydessä muuhun uomaverkostoon, virtausverkko muodostuu niistä huolimatta oikein alivaluma-alueiden skaalassa, eikä virtausreitit tarkat sijainnit sorakuoppien lähistöllä vaikuta päävirtausreittien todenmukaisuuteen.



Kuva 32. Tutkimusalueella on soranottoalueita, joista on muodostunut vesialtaita (vaaleansiniset alueet pohjakartassa), ja jotka eivät ole yhteydessä läheisiin uomastoihin. Altaat eivät lukeudu Maastotietokannan (2022) vesialueisiin, minkä vuoksi niiden läpi ei kulje keskilinjoihin. Vesialueet näyttävät uomaoptimoidussa valuntamallinnuksessa korkeusmallin korkeusarvojen perusteella muodostuvien virtaussuuntien mukaisesti, ja virtausverkko kiertää altaat kuvan mukaisesti.

Aineistojen osalta myös virtavesiaineistoon liittyy epävarmuutta, koska aineiston mallinnuslaajuudelta löytyy muutamia pinnan alla kulkevia uomaosuuksia, eli murtoviivakohteita tasosijainniltaan -1. Maanmittauslaitoksen mukaan tasosijainti pinnan alla viittaa siihen, että vesi kulkee rakennetussa tunnelissa tai putkessa maan alla tai piilo-ohjassa tai -purossa (Maastotietokohteet 2018: 51). Pinnan alapuoliset uomaosuudet sijaitsevat pääasiassa hajallaan yksittäisinä osuuksina, osana pinnan yläpuolisia uomia (kuva 33). Lisäksi suurin osa niistä sijaitsee kosteikkoalueilla. On todennäköistä, että aineistossa on virheitä; mallinnusalueen pinnan alla kuvatut uomat ovat luultavasti muiden uomien tapaan pinnan

yläpuolisia. Otin pinnan alapuoliset uomaosuudet mukaan mallinnukseen, koska tasosijainnissa on mahdollisesti virheitä, ja koska pinnan alapuolisia uomia on aineistossa vain vähän, tutkimusalueella 5 ja koko mallinnusalueella 16 (mallinnusalueen uomakohteiden kokonaismäärästä 22 640). Jos osa uomaosuuksista on todellisuudessa pinnan alapuolisia, malli kuvaisi niiden osalta maanpinnan alapuolista valuntaa, eikä pintavaluntaa.



Kuva 33. Uomaverkostoaineistossa (sininen) on uomaosuuksia, joiden tasosijainti on -1 (punainen), eli uoma kulkee maanpinnan alapuolella. Tutkimusalueella tällaisia murtoviivakohteita on 5 ja koko mallinnusalueella 16.

Malliin on voinut muodostua epävarmuutta myös uomaverkostoaineiston esikäsittelyssä. Saundersin (1999) mukaisissa esikäsittelyvaiheissa korvasin järvet ja muut vesialueet keskilinjoilla, ja koska muodostin ne ArcGIS Pron *Polygon to Centerline* -työkalulla, muodostuivat ne usein haarautuvaa virtausreittiä kuvaavaksi (ks. kuva 18) kuten Saundersin (1999) mukaan pitääkin, jotta keskilinjat kuvastaisivat virtauksen haarautumista. On kuitenkin mahdollista, että keskilinjat eivät kuvaa todellista järvien sisäisen virtauksen haarautumista, eikä siten todellisia purkupisteiden sijainteja – niitä, joista vesi purkautuu uomastosta järveen, ja niitä, joista vesi purkautuu järvestä uomastoon.

Uomaverkoston manuaalisen muokkauksen (muun muassa vesialueiden keskilinjojen uomaverkostoon yhdistämisen) osalta on otettava huomioon, että muokkaukset perustuivat omaan tulkintaan maastokartasta, korkeusmallista ja uomaverkostosta. On siis mahdollista, että muokkauksilla tavoitellut uomaverkoston kattavuuden ja toisaalta visuaalisen yksinkertaistamisen lisääminen eivät ole lisänneet valuntamallin todenmukaisuutta; muokattu uomaverkostoaineisto ei välttämättä kuvaa täysin todenmukaisesti veden kulkureittejä. Lisäksi

tein irrallisten murtoviivakohteiden muokkauksen etsien yksittäisiä murtoviivakohteita silmämääräisesti, ja sen takia on mahdollista, että aineistoon on jäänyt yksittäisiä uomien osuuksia. Se ei kuitenkaan merkittävästi heikentäne mallin luotettavuutta, eikä aiheuttane epävarmuutta malliin, koska uomapolton vaiheessa yksittäiset uomakohteet madaltuvat muun uomaverkoston tapaan, ja jos ne ympäristöönsä matalampina soluina muodostavat nielun, joka rikkoisi hydrologisen eheyden, niin nämä nielut kuitenkin ”korjaantuvat” myöhemmässä eheytysvaiheessa (*breaching*) (Lindsay 2016b: 659). Käytännössä tällaiset irralliset uomakohteet madaltuvat korkeusmalliin, mutta virtaus niiden soluista kohti yhtenäistä uomaverkoston osaa määrittyy täysin D8-algoritmin mukaan.

Manuaalisessa esikäsittelyssä tulisi Saundersin (1999) mukaan poistaa myös uomaverkoston monihaaraiset kohdat (jotka eivät sijaitse järvissä tai lammissa) valitsemalla virtaukselle ensisijainen reitti. Vaikka tutkimusalueen metsäojitukset ovat useassa kohdassa monihaaraisia (ks. kuva 15), en toteuttanut Saundersin (1999) esittämää esikäsittelyvaihetta, koska käytössä olleen uoma-aineiston perusteella ei pysty erottelemaan monihaaraisen virtauksen ensisijaista ja toissijaisia reittejä. Käytännössä uomien monihaaraisuus esiintyy tutkimusalueella kohdissa, joissa useampi uoma kulkee lähekkäin vieden virtausta samaan suuntaan, kohti esimerkiksi samaa kokoomaojaa, tai vaihtoehtoisesti yksi uoma haarautuu, ja haarautuneet omat lopulta kuljettavat virtauksen samaan uomaan. Työssä käytetty uoma-aineisto eli virtavesivektori erittelee omat leveyden perusteella alle 2 metriä ja 2–5 metriä leveisiin uomiin (Maastotietokanta 2022), mutta tutkimusalueella leveämpään luokkaan kuuluvia uomia on vain muutamien uomaosuuksien verran, eivätkä ne sijaitse monihaaraisten uomien kohdilla. Näin ollen uoma-aineisto ei sovellu virtauksen ensisijaisten ja toissijaisten reittien erotteluun.

Käsittelyvaiheen pois jättäminen tarkoittaa mallinnuksen kannalta sitä, että D8-algoritmi päättää poltetun DEM-aineiston pohjalta – eli käytännössä poltettavien uomien lopullisten korkeusarvojen perusteella – ensisijaisen virtausreitit. Toisin sanoen, kuten Saunders (1999) toteaa, antamalla DEM-korkeusarvoille ”päättävävalta” ensisijaisen virtausreitit määrittämisessä mitätöidään uomien polton alkuperäinen tarkoitus ”pakottaa” virtaus kulkemaan tiettyjä, tiedossa olevia (ensisijaisia) reittejä pitkin. Päätelmäni mukaan sillä ei kuitenkaan ole merkitystä, mikä virtausreiteistä valikoituu ensisijaiseksi, koska ”reittivaihtoehdot” kulkevat lähekkäin, ja tulosten perusteella virtauslinjat ovat tarpeeksi tarkat. Tarkalla virtauksen ensisijaisella reitillä ei siis ole merkitystä, kun tämän työn tavoitteena ei ole selvittää virtauksen kulkureittejä täsmällisesti uoman tarkkuudella.

Esikäsittelyn lisäksi uomaverkosta kuvaavan vektoriaineiston rasterointi voi yksinkertaistaa uomia ja siten hävittää merkittävästi tietoa esimerkiksi uomien mutkittelusta ja uomien välisistä yhteyksistä (Wu ym. 2019: 185). Uomien yhteyksiin voi muodostua virheellisyyttä esimerkiksi niin, että resoluutiotarkkuuteen (2 m x 2 m) nähden kaksi lähekkäin, toisistaan vain pienen välimatkan verran erillään kulkevaa uomaa yhdistyvät rasteroinnissa kulkemaan saman solun läpi (Lindsay 2016b: 660; Wu ym. 2019: 186). Lindsayn ja Dhun (2015: 398) sekä Lindsayn (2016b: 660, 667) mukaan uomaverkostovektori voi siis olla rasterointivaiheen näkökulmasta liian tarkka; murtoviiva voi olla niin yksityiskohtainen, että sen rasteroinnissa karkeampaan 2 m x 2 m resoluutioon menetetään tarkkoja uomavektoreiden muotoja.

Rasteroinnissa menetettävää uomaverkoston tarkkuutta voisi ehkäistä korkeusmallin rasterien solukoon uudelleenmäärittämisellä (eng. *resample*) eli keinotekoisella resoluution muuttamisella (Resample... 2022). Pohja-aineistona käytettävän korkeusmallin 2 x 2 metrin resoluutio muutettaisiin siis esimerkiksi 0.5 m x 0.5 m resoluutioon, ja uomavektorin rasterointi, uomien poltto ynnä muut mallinnuksen rasteriaineistoihin kohdistuvat vaiheet toteutettaisiin uudelleen määritetyssä resoluutiossa. Tällöin aiemman yhden solun tilalla saman alueen muodostaisi 4 x 4 solun alue. Siten resoluutioltaan korkeusmallia tarkemman uomaverkostovektorin rasteroinnissa uomastoksi valikoituvat solut muodostuisivat tarkemmalla resoluutiolla. Tällöin Lindsayn (2016b: 660) ja Wun ym. (2019: 186) mainitsemia rasteroinnin haasteita muodostuisi todennäköisesti vähemmän, kun lähekkäin kulkevien, rasteroitujen uomien välille muodostuisi selkeä eli vähintään solun kokoinen väli.

Jäälinjärven tutkimusalueella rasteroinnilla ei kuitenkaan olisi välttämättä suurta merkitystä mallinnuksen lopputulokseen, koska valuma-alueella merkittävä osa uomista on suoraviivaisia, samansuuntaisesti rinnakkain kulkevia metsäoimia ja mutkittelevia tai lähellä toisiaan kulkevia uomia on melko vähän (ks. kuva 15). Siten rasteroinnista uomien sijaintiin ja muotoihin muodostuvien epätarkkuuksien voidaan olettaa olevan vähäisiä.

Rasterien solukoon uudelleenmäärittäminen ei myöskään käytännössä parantaisi korkeusmallin tarkkuutta, vaan toisi pelkästään korkeusmallin lähemmäs uomavektoreiden resoluutiotarkkuutta. DEM:n korkeusarvot olisivat siis tismalleen samat 4 x 4 solun alueella, eli käytännössä solukoon uudelleenmäärittäminen muodostaisi jokaisen alkuperäisen DEM:n solun kohdalle 4 x 4 solun kokoisen tasaisen alueen. Solukoon uudelleenmäärittäminen lisäisi alueen tasaisten alueiden määrää ja käsittelyn tarvetta. Käytännössä hydrologisen eheytyksen mallinnusvaihe eli *breaching*-menetelmä poistaisi tasaiset alueet, minkä jälkeen virtaussuunnan määrittämisessä pintavalunnan linjat muodostuisivat pienipiirteisemmin kuin karkeamman

solukoon mukaiset linjat. Ne eivät kuitenkaan välttämättä kuvaisi todellisia pintavalunnan suuntia todenmukaisemmin kuin 2 m x 2 m solukokoon pohjautuva mallinnus. Lisäksi virtausverkossa nämä tarkemmat pintavalunnan linjat, eli uomaverkoston ulkopuoliset linjat, eivät suurelta osalta tulisi näkyviin, koska virtausverkko muodostuu pääasiassa uomaverkoston virtauksesta (ks. kuva 24), ja pintavalunnan osalta vain yhden hehtaarin valuma-alueelta kumuloituva valunta tulee näkyviin virtausverkkoon.

Vaikka rasterien solukoon uudelleenmäärittäminen tarkentaisi uomavektoreiden poltossijainteja ja siten virtausverkon sijaintia, ei menetelmästä olisi hyötyä tässä työssä, koska tulosten perusteella uomaverkostovektorin ja siten virtausverkon voidaan todeta ”istuvan” jo varsin hyvin rasteroitujen uomien ja edelleen mallinnetun virtausverkon kohdille, 2 m x 2 m resoluution tarkkuudella, koska uomaverkosto on pääasiassa suoraviivaista ja säännönmukaista metsäojitusverkostoa (ks. kuva 24). Jos tarkoituksena olisi kohdentaa tarkastelua vielä pienemmälle tutkimusalueelle, suurempaan mittakaavaan, ja uomaverkosto olisi luonnonomukaisempi ja siten mutkittelevampi, voisi uomien tarkemman sijainnin rasterointi solukoon uudelleenmäärittäyksellä olla toimiva menetelmä.

Rasteroinnin lisäksi mallinnuksen uomapoltossa on epävarmuutta aiheuttavia tekijöitä. Kuten Wu ym. (2019) toteavat, tasaisilla alueilla käytettävät, alkuperäisiä DEM:n korkeusarvoja muuttavat muokkausmenetelmät voivat aiheuttaa vääristyneen esityksen virtausverkosta. Tämä on mallintamassani virtausverkossa epävarmuustekijä, joka on todennettu maastotarkasteluiden perusteella (esim. kuva 26).

Uomapoltossa syntyviin epätarkkuuksiin vaikuttaa ensinnäkin poltossa käytettävien aineistojen tarkkuus. Maastotietokannan tie- ja uomaverkostoaineistojen mahdolliset epävarmuudet vaikuttavat mallin paikkansapitävyyteen. Tietokannan laatuvaatimustietojen (Maastotietojen laatumalli 1995: 12) perusteella aineiston sijaintitarkkuudessa voi olla hieman (5 % todennäköisyydellä) minimitarkkuuden alittavaa epävarmuutta. On kuitenkin todennäköistä, että aiemmin kuvattu uomaverkoston esikäsittely (eli verkoston yhtenäisyyden lisääminen) on vaikuttanut enemmän pintavaluntamallin todenmukaisuuteen kuin Maastotietokannan aineistotarkkuus, koska yhtenäistettäviä uomakohteita oli paljon ja tein prosessia paljon manuaalisesti ja silmämääräisesti Maastokartan (Maastokarttarasteri 2020) tarkastelun perusteella.

Toiseksi poltossyvyys, joka tässä työssä uomien kohdalla on yksi metri, voi aiheuttaa epävarmuutta malliin – kuten Lindsay (2016b: 659) toteaa, uomien poltossa sopivan poltossyvyyden määrittäminen on vaikeaa. Todelliset uomien syvyydet voivat vaihdella suurestikin ja osa uomista voi olla ummessa esimerkiksi luonnollisen umpeenkasvun tai

ihmisen toimesta muodostettujen kaivukatkojen¹ takia. Kaiken kaikkiaan on siis otettava huomioon, että uomien polton tulos kuvaa tilannetta, jossa ojat ovat Maastotietokannan vesistöaineistojen mukaisia. Toisin sanoen mallissa ei ole mukana mahdollisia kaivukatkoja, muita vesiensuojelurakenteita eikä puuttuvia oja.

Pyrin määrittelemään optimaalisen polttosyvyyden aiempien tutkimusten (esim. Callow ym. 2007), mutta myös tutkimusalueen topografian perusteella. Syvyyden ei tulisi olla topografiaan ja todellisiin uomasyvyyksiin verrattuna yliarvioitu, mutta sen tulisi olla kuitenkin niin syvä, että se muokkaa korkeusmallia jokaisen uomaverkoston mukaisen uomasolun kohdalta ympäröivää aluetta matalammaksi, ja siten ohjaisi virtausverkon kulkemaan todellisia uomia pitkin. Syvyyden määrittämisessä tulee myös huomioida, että millään polttosyvyydellä kaikki uomat eivät tule näkymään virtausverkossa, koska virtausverkon muodostumisen kynnyksisarvo, yksi hehtaari, määrittelee virtausverkon muodostumaan vasta yhden hehtaarin valuma-alueen purkupisteestä alaspäin. Loppujen lopuksi polttosyvyys ei siis ole se, joka määrittelee, kuinka suuri osuus tutkimusalueen uomaverkostosta näkyy virtausverkossa, koska määrittävä tekijä on nimenomaan virtauksen muodostumisen kynnyksisarvo.

Kolmanneksi DEM-aineiston korkeustarkkuus (keskimäärin 0.3 m) aiheuttaa sen, että syvät ojat saattavat näyttäytyä alkuperäisessä korkeusmallissa matalampina ja vastaavasti matalammat syvempinä kuin ne todellisuudessa ovat. Nämä virheelliset suhteet ojien (kuten päähaaran ja sivuhaarojen) syvyyksissä säilyvät poltossa, koska polttosyvyys on sama kaikissa uomakohteissa. Tämä voi mahdollisesti aiheuttaa lopulliseen mallinnukseen virheitä. Kaiken kaikkiaan uomien poltossa ei kuitenkaan ole tavoitteena polttaa uomia niiden todellisiin korkeuksiin, vaan optimoida virtaus kulkemaan todellista uomaverkostoa pitkin.

Callow'n ym. (2007: 34) mukaan uomien poltto, joka ei muokkaa uomaverkoston ulkopuolisten solujen korkeusarvoja, on sen kannalta parempi vaihtoehto, että se madaltaa kokonaisuudessaan vähemmän korkeusmallin arvoja – valuma-alueen keskimääräinen korkeus madaltuu vähemmän. Käytin kuitenkin polttoalgoritmia, joka muokkasi uomia ympäröivätkin alueet, ja polton aiheuttamia korkeusmuutoksia voidaan tarkastella yksityiskohtaisemmin: Alkuperäisen korkeusmallin korkeusarvo vaihtelee välillä 39.66–70.29 metriä merenpinnan yläpuolella. Vastaavasti pintavalunnan mallinnuksen pohjalla olevan korkeusmallin (joka on käsitelty uomapoltolla, uomien ja rumpujen aukaisulla ja hydrologisella eheytyksellä) korkeusarvo vaihtelee välillä 38.66–70.29 mmp. Korkeusarvot ovat siis madaltuneet 0–1.00 metriä. Kun korkeusarvoissa ei oteta huomioon uomasoluja, joihin on kohdistunut suurempi

¹ Kaivukatkot ovat ojiin kaivamatta jätettäviä osuuksia, joissa maanpinta säilytetään koskemattomana, ja niiden pituus voi vaihdella muutamasta metristä muutamaan kymmeneen metriin (Joensuu ym. 2019: 13).

korkeusarvojen madallus, vaan pelkästään uomien ulkopuoliset alueet, vaihtelee korkeus välillä 39.12–70.29 mmp. Siten uomien ulkopuolisilla alueilla korkeusarvo on madaltunut 0–0.54 metriä. Muutos on yli 0.3 metriä, eli yli keskimääräisen korkeusmallin vertikaalisen tarkkuuden (Korkeusmalli 2... 2022). Siten korkeusarvojen muokkauksen, joka käsittelee myös uomien ulkopuolisia soluja, voi olettaa aiheuttavan suuremman epävarmuuden pintavalunnan mallinnuksen todenmukaisuuteen kuin alkuperäisen korkeusmallin korkeustarkkuuden.

Vaikka uomien polton algoritmeja, jotka muokkaavat korkeusmallin kaikkien solujen arvoja (kuten tässä työssä käytetty Lindsay (2012)), on kritisoitu muokkauksen laaja-alaisuuden takia (esim. Wu ym. 2019: 185), ne kuitenkin edesauttavat hydrologista eheyttä, koska käytännössä lähes jokaisen solun korkeusarvon madaltaminen minimaalisella määrällä ohjaa valuntaa kohti läheisintä uoma. Toisaalta on ymmärrettävä, että koko aineiston korkeusarvoja muuttava algoritmi voi tehdä korkeusmallista epätodellisen. Esimerkiksi järvet muuttuvat niin, että niiden keskellä kulkee yksi syvä uoma, keskilinja, jota kohti järven pohja näennäisesti kaareutuu. Vaikka muodostunut järven geometria ei pidä paikkansa, se kuitenkin parantaa muussa tapauksessa tasaisen järviolueen veden valunnan mallinnustulosta. Muokattu korkeusmalli tai siitä johdettu pintavaluntamallinnuksen aineisto eivät soveltuisi korkeusarvoja hyödyntäviin jatkoanalyysiin, mutta laaja korkeusarvojen modifiointi ei tee poltetusta DEM:stä epäsoveltuva pintavalunnan suuntien määrityksen näkökulmasta.

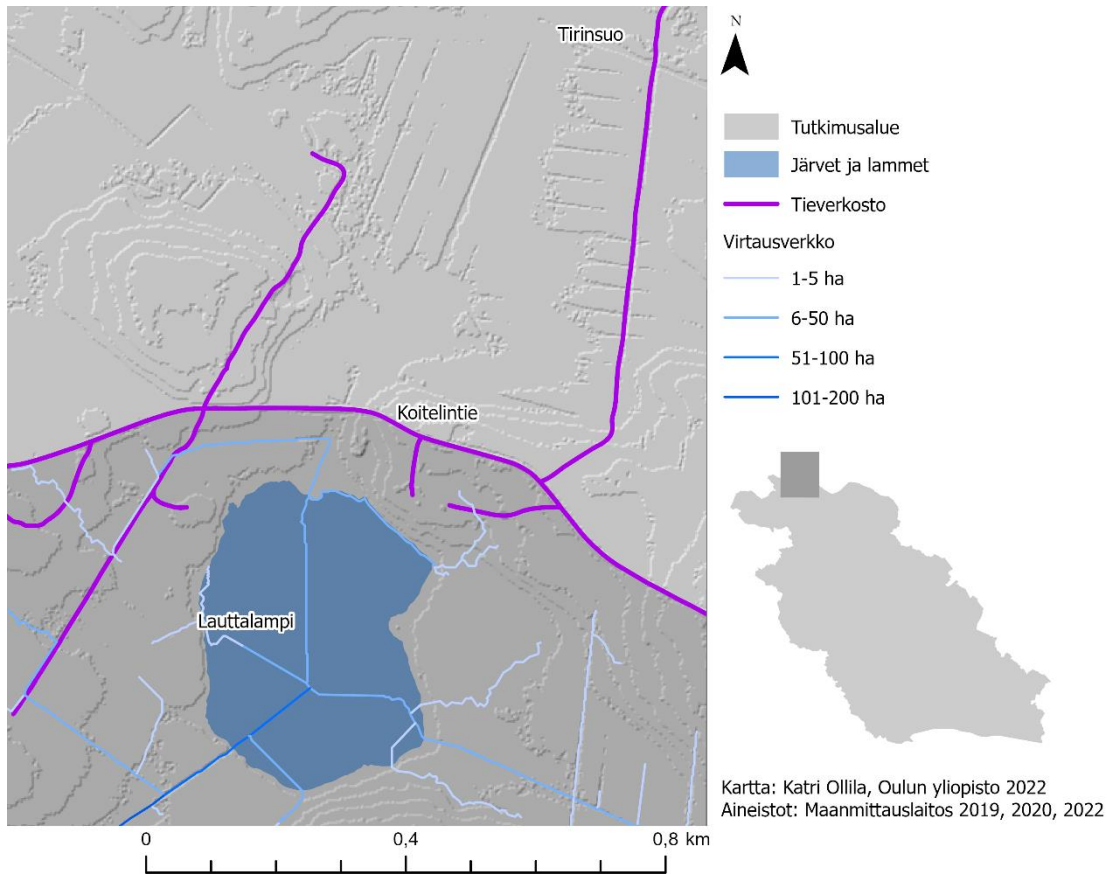
Lisäksi korkeusmallin ulkopuolisiin soluihin kohdistuvan polttoalgoritmin käyttöä voi perustella sillä, että se vähentää ”kaksoisuomien” muodostumista virtausverkkoon (Callow ym. 2007: 32; Lindsay 2016). Koska poltossa muodostuu laskeva gradientti kohti uoma, mahdollinen läheisissä soluissa kulkeva ”kaksoisuoma” häviää tai loiventuu kohti poltettua uoma (koska uoma kohti muodostuva korkeusmallin gradientti syvenee kohti uomasoluja). Valunta siis kohdistuu virtaussuunta-algoritmillä uomaverkostovektorin mukaiseen, korkeusmalliin madaltuneeseen uomaan ja virtaa sitä pitkin, eli virtaus todennäköisemmin ”löytää” yhden reitin, eikä kulje kahta vierekkäistä reittiä pitkin.

Toisaalta ”kaksoisuoman” virheen muodostuminen mallinnukseen ei heikentäisi lopputulosta huomattavasti, koska tarkoituksena tässä työssä on luoda kuvaus siitä, mitkä ovat virtaukset pääreitit tutkimusalueella ja miten virtausreitit kulkevat alivaluma-alueiden läpi. Siten lopputulosta ei heikentäne pienet muutokset virtauksen todellisissa sijainneissa eikä virtauksen kulku kahdessa osassa. Haittaa ”kaksoisuomasta” syntyy kuitenkin aineiston silmäiltävyydessä; pelkistyminen yhdeksi virtauslinjaksi tekee mallin lopputuloksesta helpomman tarkastella. Lisäksi ”kaksoisuomien” pelkistyminen helpottaa seuraavia mallinnusvaiheita, kuten myös aineiston jatkoanalysointia (jos aineiston pohjalta luodaan

uusien vedenlaadun näytteenottopisteiden mukaisia alivaluma-alueita), koska purkupisteiden sijoitus alivaluma-alueiden määrittämistä varten on yksinkertaisempaa, kun virtaus muodostuu yhdestä linjasta, jonka kohdalle purkupiste sijoitetaan. Jos virtaus muodostuisi useammasta linjasta, vaatisi purkupisteen optimaalinen sijoitus tarkempaa arviointia siitä, minkä kokoiset valuma-alueet ”kaksoisuoman” eri linjat muodostavat – kumpi niistä kuvaa paremmin todellista uoma. Käytännössä yhden valuma-alueen muodostus voisi vaatia purkupisteen sijoittamista ja valuma-alueen määrittämistä molempien linjojen mukaisesti ja sen jälkeen kahden valuma-alueen yhdistämistä yhtenäiseksi polygoniksi.

Uomien poltossa on kuitenkin huomioitava muutkin geometrian muutokset. Kaikki uomat esimerkiksi muuttuvat kahden metrin levyisiksi, koska rasteroin uomaverkostovektorin korkeusmallin resoluution (2 m x 2 m) mukaan, jolloin se on myös uomien polttoleveys. Todellisuudessa uomat voivat olla leveämpiä tai kapeampia (Maastotietokohteet 2018: 51). Kaikki poltossa muodostuvat korkeusmallin epätodelliset piirteet, kuten uomageometrian muutokset, vaikuttavat jatkoanalyysien tarkkuuteen (Callow ym. 2007: 32; Petroselli & Alvarez 2012: 712; Lindsay 2016b). Tässä työssä poltossa syntyvillä muutoksilla ei kuitenkaan ole merkitystä, koska esikäsiteltyä DEM-aineistoa ei käytetä uomageometriaa hyödyntävään jatkoanalyysiin, kuten virtauksen nopeuden mallintamiseen – tavoitteena on vain ohjata pintavalunta virtaamaan virtausverkossa todellisia uomia pitkin kohti Jäälinjärveä.

Epävarmuustekijöitä on myös uomaverkoston ja tieverkoston risteyskohtien poltossa. Ensinnäkin epävarmuus liittyy aineiston virheettömyyteen: aineistosta voi puuttua joitain tierumpuja, eli tie ja uoma eivät risteä, vaikka ne todellisuudessa risteävät ja vesi kulkee tien ”läpi”. Tästä esimerkki on Jäälinjärven pohjoisemman päävaluma-alueen raja, johon liittyy epävarmuutta. Alueen pohjoisosassa olevaan Lauttalampeen kertyy uomaoptimoidun mallin mukaan valuntaa vain sen läheiseltä ympäröivältä alueelta, mutta ei mallin mukaista valuma-alueen rajaavan Koitelintien toisella puolelta olevalta Tirinsuon alueelta (kuva 34). Korkeusmallin vinovalovarjostuksen osoittamien korkeuksien ja kaltevuussuuntien perusteella voidaan kuitenkin pohtia, voisiko Koitelintien läpi todellisuudessa kulkea rumpu – koska tien kohdalla uomaverkostoaineisto katkeaa vain lyhyen matkan pituudelta ja koska alkuperäisessä korkeusmalliaineistossa on mahdollista olla virheellisyyksiä rumpujen aukaisun osalta – ja muodostuisiko valuma-alueen raja todellisuudessa pohjoisemmaksi, Tirinsuon alueelle.



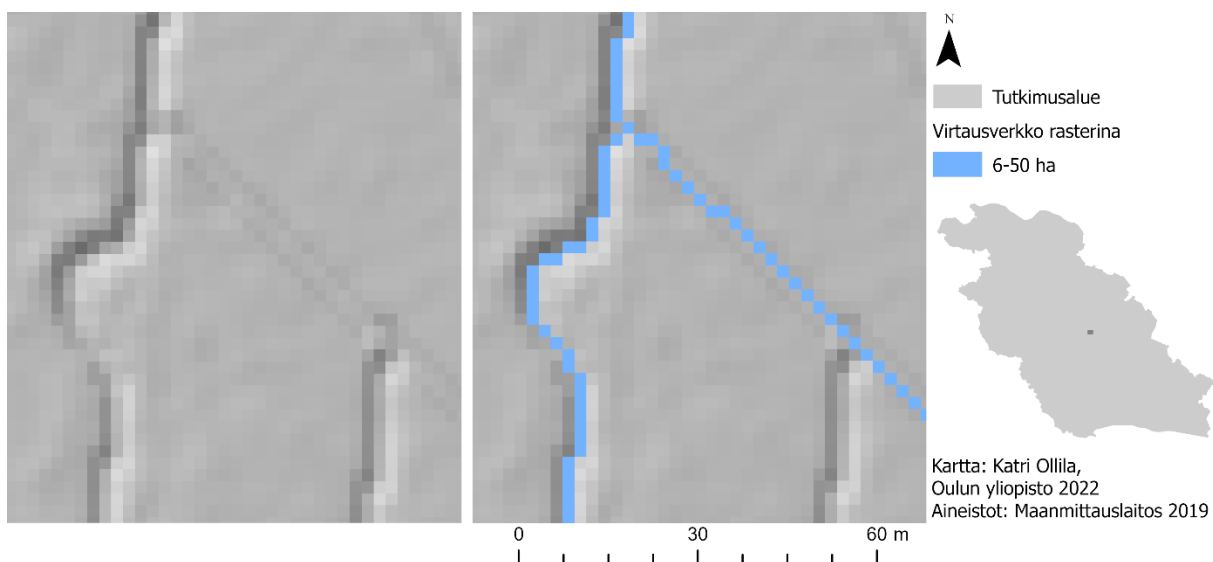
Kuva 34. Pohjoisempi päävaluma-alue rajautuu uomaoptimoidun mallinnuksen mukaan Koitelintiehen. Uomaverkostoaineiston (Maanmittauslaitos 2022) mukaan Koitelintien ali ei kulje tierumpua, eli Lauttalampeen ei kumuloidu valuntaa Koitelintien pohjoispuolelta, Tirinsuon alueelta. Pohjakarttana korkeusmallin vinovalovarjostus.

Toiseksi tierummut voivat olla umpeutuneita, jolloin niiden läpi ei todellisuudessa virtaa vesi ja virtaus on ohjautunut eri suuntaan. Kolmanneksi on otettava huomioon, että käyttämäni uoman madallusetäisyys (eli tien keskikohdasta 25 metriä molempiin suuntiin uomaa) voi olla osassa teiden ja uomien risteyskohtia yliarvioitu etäisyys. Todellisuudessa tutkimusalueella on siis myös paljon kapeampia teitä, joissa 50 metrin poltto on selvästi madallettavia tiepenkereitä leveämpi. Liian pitkälle ulottuva poltto ei kuitenkaan vaikuta lopulliseen virtausverkkoon, koska ”ylipitkä” poltto kohdistuu vain uomasoluihin, jolloin virtaus ainoastaan kohdistuu varmemmin uomiin. ”Ylipitkä” poltto ei myöskään vaikuta hydrologiseen eheyteen, koska käyttämäni *breaching*-menetelmä (Lindsay 2019a) eheyttää tarvittaessa mahdollisen uoman kohdalle syntyneen nieluosuuden.

Esikäsittelyvaiheiden lisäksi pintavalunnan mallin lopputulokseen vaikuttaa merkittävästi mallinnuksessa käytetty yksisuuntainen D8-virtaussuunta-algoritmi; yksisuuntainen virtaussuunta-algoritmi vaikuttaa sekä virtausverkon että valuma-alueiden täsmällisyyteen. Kuten Jones (2002: 1052) ja Qin ym. (2007: 444) toteavat,

monisuuntavirtausmalli kuvaa paremmin todenmukaista valunnan hajautumista. Kun miettii tarkemmin valunnan mallinnuksen lähtökohtaa – mihin suuntaan vesipisara maahan osuessaan lähtee valumaan (Albrecht 2007: 63) – vaikuttaa 2 x 2 metrin alue luonnossa varsin suurelta alueelta, jonka kahdeksasta naapuriruudusta tulisi löytyä yksi todenmukainen valunnan suunta. Toisaalta Martzin ja Garbrechtin (1992: 749) mukaan laajan ojitetun alueen virtausverkon mallintamiseen on perusteltua käyttää yksisuuntaista virtaussuuntamallia. Vaikka heidän väitteestään on jo vuosikymmeniä aikaa ja mallinnusalgoritmit ovat kehittyneet sen jälkeen, vaikuttaa se silti pätevä, koska varsinkin metsäojitusten alueilla pintavalunta ohjautuu jo lyhyen matkan päässä tiheään uomaverkoston ja virtaus kulkee enimmäkseen verkostoa pitkin – siihen metsäojituksilla juuri tähdätään, että vesi kulkeutuu tehokkaasti uomaan ja uomia pitkin alueelta pois.

Yksisuuntaisen mallin käyttöä puoltaa myös se, että valunnan ohjaututtua uomaan virtaussuunta vaikuttaa määrittyvän tarpeeksi tarkasti yksisuuntaisella D8:lla. Tätä havainnollistaa kuva 35, josta nähdään, että virtaussuunta-algoritmi pystyy valikoimaan kahdeksasta naapurisolusta sen uomalinjan solun, johon virtaus liikkuu. Siten tässä työssä yksisuuntamallin tarkkuus vaikuttaa riittävältä, koska tutkimusalue on suurelta osin metsäojitettu, ja uomaverkosto on poltettu mallinnuksen pohjalla olevaan korkeusmalliin.



Kuva 35. Vinalovarjostuksella kuvatussa, uomat poltetussa korkeusmallissa uomat erottuvat 2 x 2 metrin soluruudukossa (A). Rasterimuotoinen, uomaoptimoidun mallin virtausverkko kulkee näitä uomasoluja pitkin (B).

Toisaalta D8 ei ole soveltuvin virtaussuunta-algoritmi kaikilla tutkimusalueen ojittamattomilla tasaisilla alueilla, joilla uomaverkosto ei ohjaa valuntaa, ja niillä alueilla yksisuuntainen

algoritmi voi aiheuttaa virheellisyyttä. Yksisuuntaisuus vaikuttaa myös järvien läpi kulkevan virtauksen todenmukaisuuteen – erityisesti tasaisten järviolueiden kohdalla monihaarainen virtaus on ongelmallista (Jones 2002: 1057). Todellisuudessa järvistä vesi voi purkautua useamman purkupisteen kautta pois, mutta mallinnuksen lopputuloksen mukaan purkupisteitä on kuitenkin vain yksi. Se johtuu siitä, että uomapoltossa järvien läpi muodostuu näennäiset uomaverkoston linjat (eli keskilinjat) ja siitä, että virtaussuunnat määräytyvät yksi- eikä monisuuntaisena.

Tästä esimerkki on Lylykkäänjärvi ja sen pohjoispuolella oleva laaja ja tasainen suoalue, Siltasuo. Sen lisäksi, että Lylykkäänjärven alueelta lähtee yksi tutkimusalueen päävirtausreiteistä kohti Saarisenjärveä (ks. kuva 24), voi järvestä purkautua vettä myös Siltasuon suuntaan. Toisin sanoen Lylykkäänjärven vesialuepolygonin korvaaminen keskilinjalla (ja keskilinjan poltto muun uomaverkoston polton yhteydessä) on voinut ohjata kaiken tasaisen järven ja sen ympäröivän alueen virtauksen keskilinjaan ja edelleen yksisuuntaisella virtaussuunta-algoritmilla epätodellisesti vain yhteen suuntaan (vrt. kuva 18 B). Lylykkäänjärveen liittyneekin Oksasen ja Sarjakosken (2005: 3086) kuvailema tasaisten järviolueiden bi- tai trifurkaatioalueiden ongelma, eli virtaus voi todellisuudessa haarautua järvestä useampaan suuntaan, jolloin yksinkertaisella, yhteen suuntaan kohdistuvalla virtaussuunnan mallinnuksella ei voida mallintaa virtauksen jakautumista.

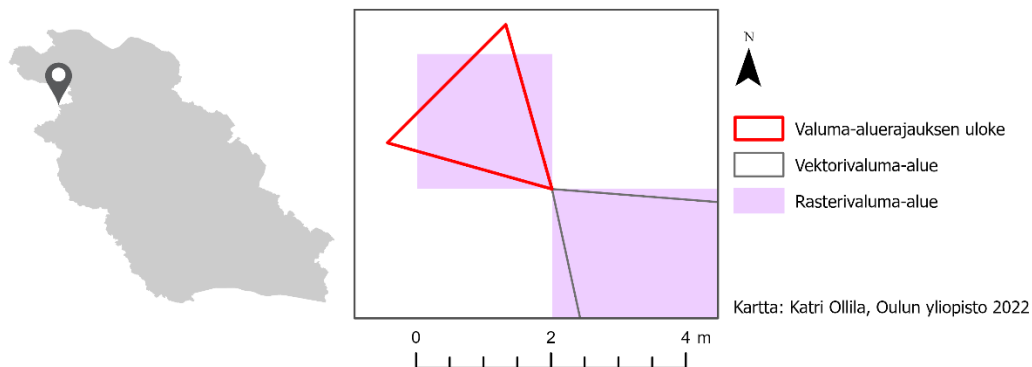
Koska virtaussuunta-algoritmi vaikuttaa myös valuma-aluemallinnuksen tarkkuuteen ja todenmukaisuuteen (Li ym. 2005: 276), tässä työssä käytetty yksisuuntainen D8-algoritmi vaikuttaa myös alivaluma-aluejaottelun lopputulokseen. Koska todellisia Jäälinjärven valuma-alueiden rajauksia ei tiedetä täydellä varmuudella edes kahden päävaluma-alueen (ks. kuva 31) osalta, on vaikea arvioida alivaluma-alueiden todenmukaisuutta.

Valuma-alueiden määrittämisessä lopputuloksen tarkkuuteen vaikuttaa olennaisesti myös se, mitkä valunnan kumuloitumisen rasterisolut valikoituvat valuma-alueiden purkupisteiksi. *Snap Pour Point* -työkalun tarttumisetäisyys (eng. *snap distance*) eli se, kuinka pitkän etäisyyden päähän käyttäjän muodostama valuma-alueen purkupiste (pistekohde) voi siirtyä valunnan kumuloitumisen tulorasterin mukaisissa soluissa, vaikuttaa lopulliseen purkupisteen sijaintiin. Jos etäisyys on esimerkiksi viisi (rasteriresoluution yksikköä, eli tässä työssä metriä), etsii työkalu purkupisteelle viiden metrin säteeltä sen valunnan kumuloitumisen tulorasterin solun, jossa on suurin kumuloitumisarvo (Snap pour point... 2022). Toteutin purkupisteiden valinnan niin, että asetin tai siirsin pisteet suoraan valunnan kumuloitumisen virtaussolujen kohdille ja valitsin tarttumisetäisyydeksi nolla, jolloin valuma-alueen purkupisteiksi määrittyivät tismalleen (soluresoluution 2 m x 2 m tarkkuudella) valitsemani

pisteiden sijainnit. Purkupisteiden manuaalinen määrittäminen eksaktisti tiettyihin valunnan kumuloitumisen virtaussoluihin tuottaa siis tarkimman lopputuloksen haluttujen purkupisteiden valuma-alueista. Käytännössä tämä tuo lisätyötä, koska jokaisen vedenlaadun näytepisteen mukaisen purkupisteen sijoittuminen virtausverkkorasterin virtausta kuvaavaan soluun täytyy tarkistaa ja mahdollisesti siirtää sijaintia manuaalisesti.

Mallinnusaineiston jatkokäytössä voi kuitenkin muodostua ongelma valuma-alueiden määrittämisessä, jos vedenlaadun näytteenottopisteille asetetaan sijainnit suoraan esimerkiksi näytteenottoaineiston Excel-tiedoston koordinaattisarakeista. Jos koordinaattipisteet eivät osu täsmällisesti virtausverkon päälle – koska virtausverkko ei välttämättä noudata täysin luonnossa todellisesti kulkevan uomaverkoston sijaintia – voivat näytteenottopisteiden yläpuoliset valuma-alueet määrittyä virheellisen purkupisteen mukaisesti. Tällöin *Snap Pour Point* -työkalun tarttumisetäisyysarvo voisi muuttaa nollaa suuremman arvon, mutta se ei kuitenkaan takaa, että purkupiste sijoittuisi todelliseen näytteenoton sijaintiin. Esimerkiksi liian suuri etäisyysarvo voi siirtää pisteen toiseen, lähellä sijaitsevaan suuren valunnan kumuloitumisen soluun, jonka kohdalta näytettä ei todellisuudessa ole otettu. Lisäksi GPS-laitteella tallennetuissa näytteenottopisteiden sijainneissa voi olla GPS:n aiheuttamaa sijaintivirhettä, joka voi olla laitteesta riippuen muutamista metreistä kymmeneen metriin (El-Rabbany 2002: 27–31), ja myös se aiheuttaa epävarmuutta purkupisteen sijainnin todenmukaisuudelle. Manuaalinen purkupisteiden määrittäminen tuottaa siis eksaktimman lopputuloksen.

Alivaluma-alueiden määrittämisen lopputulokseen vaikuttaa lisäksi rasterimuotoisten valuma-alueiden muuntaminen polygoniksi ArcGIS Pro:n *Raster to Polygon* -työkalun yksinkertaistusvalinnalla (*Simplify polygons*), koska se pyöristää valuma-alueiden rajoja. Tässä työssä valuma-alueiden vektorimuotoisessa lopputuloksessa on kolme kolmion muotoista, epätodellista uloketta mallinnettujen valuma-alueiden reunojen ulkopuolella (esimerkki kuvassa 36). Ne ovat syntyneet rasterimuotoisen valuma-alueen vektoroinnissa polygoniksi, kun työkalun valinta polygonin reunojen yksinkertaistamisesta on muodostanut yhdestä rasterisolusta (2 m x 2 m) yksittäisen ulokkeen. Poistin kaikki nämä yhden solun kokoiset kolmiot, jotta valuma-alueerajaukset ovat siistimmät ja jotta ne muodostuvat yhdestä yksittäisestä polygonista. Yhden rasterisolun alueelta muodostuvat kolmiot ovat pinta-alaltaan 2.7 neliometriä, joten niiden poistaminen ei vaikuta valuma-alueiden kokoon merkittävästi.



Kuva 36. Rasterimuotoisten valuma-alueiden muuntaminen vektoriksi ArcGIS Pron *Raster to Polygon*-työkalulla, yksinkertaistusvalinnalla (*Simplify polygons*), muodosti uomaoptimoidun mallinnuksen lopputulokseen kolmionmuotoisia ulokkeita.

8 Yhteenveto ja johtopäätökset

Hydrologisilla malleilla voidaan simuloida veden kiertoa ympäristössä sekä esimerkiksi veden mukana huuhtoutuvien aineiden kulkeutumista (esim. Krysanova & Arnold 2008), ja siksi hydrologisia malleja hyödynnetään työkaluna vesiensuojelussa ja vesienhallinnassa. Pintavalunta on hydrologisen kierron osa, joka kuvaa maan pinnalla valuvaa, uomien kautta poistuvaa vettä (Leppäranta ym. 2017: 57), ja sitä voidaan mallintaa hajautetulla mallilla (Sitterson ym. 2017: 15–16, 18), joka ottaa huomioon valuma-alueen spatiaaliset, pintavaluntaa ohjaavat topografiset ominaisuudet.

Mallinsin tässä työssä rautahuhtoumasta kärsivän Jäälinjärven valuma-alueen pintavaluntaa GIS-pohjaisilla mallinnusmenetelmillä, digitaalinen korkeusmalli (2 m x 2 m) olennaisimpana pohja-aineistona. Jäälinjärven tutkimusalueen pienipiirteinen uomaverkosto, eli metsäojitukset olivat tämän työn mallinnusmenetelmien lähtökohtaisena ongelmana, tutkimusalueen tasaisen topografian lisäksi. Työn tavoitteena oli selvittää, millaisilla korkeusmallin esikäsittelyvaiheilla voidaan toteuttaa riittävän todenmukainen ja tarkka pintavaluntamallin lopputulos. Valituilla mallinnusalgoritmeilla ohjasin valuntaa kulkemaan alueen uomaverkosta pitkin. Uomaoptimoidun mallin lisäksi tein vertailumallin, jossa menetelmät olivat yksinkertaisemmat, eivätkä ne kohdistaneet valuntaa uomaverkostoon.

Uomaoptimoidun mallin pohjalta tuotetun virtausverkon perusteella voidaan tunnistaa Jäälinjärven valuma-alueen pintavalunnan ja uomavirtauksen reitistö, jota pitkin valunta kumuloituu kohti Jäälinjärveä. Tutkimusalueen pohjoisemmalla päävaluma-alueella valunta kumuloituu yhteen ja eteläisemmällä päävaluma-alueelta kahteen päävirtausreittiin (ks. kuva 24). Mallin mukaan määritetyt alivaluma-alueet (14 kpl) jakavat tutkimusalueen ja virtausverkon reitit pienempiin tarkasteluyksiköihin (ks. kuva 25).

Tutkimuksen tulosten perusteella pintavalunnan mallissa on huomattavasti enemmän epävarmuutta ja virheitä todelliseen pintavaluntaan verrattuna, jos se tehdään ilman uomaoptimointia. Merkittävin ero uomaoptimoidun ja vertailumallin välillä on se, että vertailumalli ei uomaoptimoidun mallin tapaan kuvaa pintavalunnan kohdistumista uomaverkostoon ja virtausta uomaverkostoa pitkin. Voidaan siis todeta, että vertailumalli ei ole tarkkuudeltaan riittävä tämän työn tavoitteisiin nähden.

Uomaoptimoidun ja vertailumallin pohjalta tuotettujen virtausverkkojen vertailu tuo ilmi esikäsittelyn merkityksen tasaisilla, tiheän ojituksen mallinnusalueilla. Vaikka Jäälinjärven valuma-alueen tutkimusalueelle on saatavilla LiDAR-menetelmällä tuotettu, aikaisempaa tarkempi 2 m x 2 m resoluution korkeusmalli, aiheuttaa alueen tasaisuus haasteita myös niin tarkkaan korkeusmalliin pohjautuvassa pintavalunnan mallinnuksessa (Petroselli & Alvarez 2012: 712). Myös Lindsay ja Dhunin (2015) huomio tarkempien korkeusmallien haasteista pitää paikkansa tämän tutkimuksen mallinnuksessa: maanalaiset veden kulkureitit aiheuttavat edelleen haasteita pintavalunnan mallin tarkkuudessa. Kuten virtausverkkomallien eroista (ks. kuva 24 ja 27) käy ilmi, maanalaisten tierumpujen aukaisu (ja uomien poltto) olivat olennaista, jotta mallinnus muodosti tarpeeksi todenmukaisen kuvauksen pintavalunnasta.

Tutkimusalueen ominaisuuksiin ja haasteisiin nähden sopivien mallinnusmenetelmien valinta ei ollut ongelmattonta. Kuten Lindsay (2014) toteaa, monet geospaatialiset mallit ovat monimutkaisia ja niihin vaikuttavat merkittävästi käytettävän algoritmin yksityiskohdat. Hän jatkaa, että saman tehtävän suorittamiseen on monesti useita kilpailevia algoritmeja – kuten tämänkin tutkimuksen hydrologiseen mallinnukseen – ja lopullinen menetelmän valinta voi Lindsayn (2014) mukaan vaikuttaa suuresti spatiaalisen analyysin tulokseen.

Sopivien mallinnusmenetelmien etsiminen aikaisemman tutkimuksen pohjalta ei ollut yksinkertaista. Vertaillen pintavalunnan mallinnuksen tutkimuksia ja arvioidessani, mitkä menetelmät ja parametrien arvot soveltuisivat tämän työn tutkimusalueelle, haastetta toi erityisesti valuma-aluekijöiden merkittävä vaihtelevuus eri tutkimusten välillä. Valuma-alueen ominaisuudet, kuten maaperä ja maankäyttö (esim. Haahti ym. 2016; Yan ym. 2020) ja korkeuserot (Kenny ym. 2008: 1418) vaikuttavat sopivan mallinnusmenetelmän valintaan. Lisäksi oli otettava huomioon, että pintavaluntamallinnuksia voidaan tehdä moneen eri tarkoitukseen, ja käyttötarkoitus vaikuttaa sopivan mallinnusmenetelmän valintaan (Sitterson ym. 2017: 10). Pintavaluntamallin tarkoituksena voisi olla myös esimerkiksi vesienhallintaan liittyvä valunnan määrän tai esiintymistiheyden arviointi (Sitterson ym. 2017: 10) tai tulvaennustus, jolloin mallin olisi hyvä sisältää tietoja sadannasta ja virtaamasta (Mujumdar & Nagesh Kumar 2012: 5–7).

Tässä työssä mallinnuksen tavoitteita ohjasi mallin käyttötarkoitukset tutkimushankkeessa: virtausreittien kuvailu sopivassa alivaluma-aluejaottelun mittakaavassa. Tutkimuksen tarkoituksena ei ole tehdä jatkoanalyysiä muokatusta korkeusmallista tai mallinnetusta virtausverkostosta, vaan pelkästään luoda mahdollisimman todenmukainen virtausverkko sekä alivaluma-aluejaottelu. Mallinnuksella ei ole tavoitteena kuvata esimerkiksi veden virtausnopeutta uomissa tai muita vastaavia, tarkempia hydrologisia tietoja, eikä tavoitteena ole esikäsitellyn DEM:n perusteella laskea uomien kaltevuutta ja siihen liittyviä funktioita, kuten eroosioherkkyyttä. Näin ollen uomien poltto on perusteltu käsittelymenetelmä virtauksen keskittämiseen todellisiin uomiin – siitä huolimatta, että korkeusmalliin syntyy todennäköisesti virheellisyyttä verrattuna todelliseen ympäristöön.

Käytännössä valintani eri menetelmien välillä perustuivat teoreettiseen menetelmien sopivuuteen Jäälinjärven tutkimusalueelle, mutta lisäksi valintojani ohjasi käytännön toteutettavuus. Menetelmävalintoja ohjasi myös pyrkimys hyödyntää ArcGIS Pron valmiita hydrologiseen mallintamiseen tarkoitettuja työkaluja. Valmiit työkalut osoittautuivat monissa mallinnuksen vaiheissa hyödyllisiksi ja aikaa säästäviksi (ks. esim. kuva 22).

Kaiken kaikkiaan mallinnuksen onnistuneisuutta on suhteellisen haastavaa arvioida. Vaikka mallin todenmukaisuutta tulkittiin maastotarkasteluilla, ei tarkastuksia ole tehty systemaattisesti koko tutkimusalueen kattavuudella. Maastohavaintojen perusteella voidaan kuitenkin todeta, että virtauksen reitit kulkevat todenmukaisesti virtauksen pääreittien osalta, alivaluma-alueiden tasolla. Se, että virtausverkko kulkee pääasiassa tutkimusalueen uomaverkosta pitkin, kertoo mallin onnistuneisuudesta käytettyjen menetelmien suhteen: virtausverkon mukainen pintavalunta on onnistuttu kohdistamaan todelliseen uomaverkoston.

Tulosten perusteella uomien polton voi siis todeta olevan soveltuva menetelmä tässä työssä – ennen kaikkea siksi, että uomien poltto soveltuu menetelmäksi korkeusmallin esikäsitelyyn silloin, kun käytettävissä oleva uomaverkostoaineisto on tarkempi kuin DEM (Lindsay & Dhu 2015: 398; Lindsay 2016b: 667). Siten voidaan myös todeta tutkimuksen epävarmuustekijöiden osalta, että lopputuloksen (eli todenmukaisen virtausverkon muodostumisen) kannalta merkittävämpää on yksisuuntaisen virtaussuunta-algoritmin epävarmuuden sijaan se, onnistuuko uomien poltto; onko polttosyvyys sopiva aikaansaamaan tarpeeksi syvän uurteen korkeusmalliin uomien kohdalle, ja siten ohjaamaan virtauksen uomaverkoston.

Mallinnuksen lopputuloksessa on mahdollisia epävarmuuksia, kuten luvussa 7 *Uomaoptimoidun mallin epävarmuustekijöitä ja onnistuneisuus* esittelen. Toisaalta mallin virhelähteet ja mahdolliset epävarmuudet ovat suhteellisen täsmällisesti tiedossa, kun malli on

toteutettu pohja-aineiston esikäsittelystä lähtien itse. Siten mallin virheitä on helpompi ottaa huomioon tulosten ja aineistojen jatkokäytössä. Mallinnuksen epävarmuustekijät korostavat myös tässä työssä hyödynnettyjen maastohavaintojen merkitystä. Tarkastettujen maastokohteiden lisäksi tutkimusalueella on mahdollisesti kohteita, jotka eivät näy oikein mallinnusaineistoissa tai lopullisessa mallinnuksessa. Kaikkien mahdollisten epävarmojen kohteiden maastotarkastukseen ei kuitenkaan ollut resursseja, vaikka ne olisivat tuoneet lisätarkkuutta mallinnustulokseen (ks. esim. kuva 34). Työn haasteellisuutta lisäksi se, että tein sen pääasiassa paikkatietoaineistojen varassa, tutkimusaluetta tarkemmin tuntematta.

Tutkimuksessa mallinnettuja aineistoja voidaan hyödyntää alueen rautakuormitukseen keskittyvässä vesiensuojelutyössä. Valuma-alue suunnittelussa voidaan esimerkiksi virtausverkon osoittamien virtausreittien avulla vähentää hydrologista yhteyttä niiltä alueilta, joilta tiedetään huuhtoutuvan merkittäviä määriä rautaa. Lisäksi virtausverkon yläpuolisen valuma-alueen koon perusteella voidaan arvioida vesimääriä eri paikoissa tutkimusaluetta, ja esimerkiksi arvioida vesiensuojelurakenteiden soveltuvuutta. Alivaluma-aluejaottelua voidaan hyödyntää muun muassa analysoimalla purkupisteiden kohdilta otettuja vedenlaatuäytteiden tuloksia ja alivaluma-alueiden rautakuormitukseen vaikuttavia ominaisuuksia. Mallinnusaineistojen ohella voidaan siis hyödyntää muita avoimia paikkatietoaineistoja rautahuuhtouman riskialueiden arviointiin. Yhdessä alivaluma-aluejaottelun ja virtausverkon avulla voidaan tarkastella vedenpidätyksen mahdollisuuksia kokonaisvaltaisesti tutkimusalueella. Työssä mallinnettavilla aineistoilla voidaan näin ollen kohdentaa vedenlaadun seurannan ja vesiensuojelutoimien resursseja tehokkaammin niille alueille, joilla siitä on eniten hyötyä.

Tämän työn pintavalunnan mallinnusmenetelmiä voidaan hyödyntää muillakin samantapaisilla tutkimusalueilla, jotka ovat topografialtaan tasaisia ja tiheään ojitettuja. Menetelmät eivät kuitenkaan sovellu urbaaniin ympäristöön, koska urbaanissa ympäristössä veden valuntaa ohjautuu tehokkaammin maan alle viemäriverkostoon ja kulkee monimutkaisissa, maanalaisissa vesikanavissa (Choi 2012: 82), joita avoimet korkeusmalli- ja uomaverkostojen paikkatietoaineistot eivät kuvaa. Lisäksi mallinnusmenetelmiä käytettäessä on otettava huomioon epävarmuustekijöitä, joita tässä työssä esitellään.

Tämän työn mallinnuksessa on toisaalta myös parannettavaa, jos siitä olisi tarve saada kuvaamaan tarkemmin todenmukaista pintavaluntaa. Tutkimusalueella voisi esimerkiksi toimia paremmin mallinnusmenetelmä, joka tunnistaisi vektorimuotoisen uomaverkoston virtaussuunnan ja ohjaisi virtauksen kulkemaan uomaverkoston pitkin ilman, että uomaverkosto poltettaisiin korkeusmalliin (esim. Callow ym. 2007: 31). Uomavirtauksen optimoinnin voisi

toteuttaa esimerkiksi verkostanalyysiin perustuen, uomaverkosta kuvaavan murtoviiva-aineiston avulla (kuten esim. Yan ym. 2020) ja uomien ulkopuolinen pintavalunta mallinnettisiin hydrologisesti eheytyneen korkeusmalliaineiston pohjalta. Tällöin uomapoltossa mahdollisesti muodostuneita virheellisyyksiä ei syntyisi, koska virtauksen optimointiin ei vaikuttaisi korkeusmallin korkeustarkkuuden aiheuttama mahdollinen virhe, joka uomapoltossa heikentää mallinnuksen tarkkuutta.

Jäälinjärven valuma-alueen pintavalunnan mallintamiseen voisi siis olla parempiakin mallinnusmenetelmiä, mutta jos tavoitteena olisi ollut löytää lähes täydellisen virtausverkon ja alivaluma-alueet mallintava menetelmä, olisi työhön ollut hyvä sisällyttää osio, joka vertailisi eri mallien lopputuloksia, ja sopivimman mallin valintaan olisi ollut hyvä käyttää esimerkiksi kvantitatiivista vertailumenetelmää. Mallinnuksen tulos saattaa olla yhdessä mallinnettavan alueen kohdassa todenmukainen ja toisaalla virheellinen ja vastaavasti toisella menetelmällä tulokset voivat olla päinvastaiset. Käytännössä esimerkiksi virtaussuunnan perusteella mallinnettavien alivaluma-alueiden koot voivat olla mallinnusalueen eri kohdissa yliarvio tai aliarvio todellisista aloista (esim. Hammond & Han 2006; Qin ym. 2013).

Tarkemman virtaussuunta-algoritmin ja virtausreittien optimoinnin menetelmien lisäksi voisi käyttää kehittyneempää mallinnusmenetelmää, joka jakaa veden liikkeet useampiin hydrologisiin komponentteihin (Mujumdar & Nagesh Kumar 2012: 5; Sitterson ym. 2017: 11). Kehittyneemmät algoritmit ottavat huomioon maan pinnalta haihtuvan ja maahan imeytyvän veden sekä maanpinnan alta pinnalle tulevan valunnan (esim. Choi 2012: 82; Haahti ym. 2016), ja siten kuvaavat hydrologiaa myös esimerkiksi pohjaveden virtauksen osalta. Jäälinjärven valuma-alueen ongelman eli rautahuuhtouman näkökulmasta pinta- ja pohjaveden vuorovaikutus on tärkeä tekijä, koska rautakulkeuman määrään voi vaikuttaa myös rautapitoisen pohjaveden tihkuminen pintavesiin (Heikkinen 1994: 85; Kritzberg & Ekström 2012: 1475–1476). Malliin voisi lisätä myös esimerkiksi reaaliaikaista sadantatietoa (Albrecht 2007: 64) muuttamalla valunnan kumuloitumisen painoarvoa (Schäuble ym. 2008: 637), jolloin mallilla voisi paremmin kuvata sadannan alueellisuutta ja esimerkiksi valuntaa eri vuodenaikoina.

Björneråsin ym. (2021: 9) mukaan boreaalisilla alueilla tarkoille hydrologiseen seurantaan perustuville valuma-alueille on suuri tarve, jotta raudan huuhtoutumisesta saadaan parempia arvioita. Tämän työn hydrologista mallia edistyneempi menetelmä olisi ekohydrologinen malli, johon sisältyisi vedenlaatuun vaikuttavia ekologisia ja biogeokemiallisia tekijöitä (Krysanova & Arnold 2008: 939), kuten virtaamamäärä, sadanta ja maaperän ominaisuuksia. Esimerkiksi Saaren ym. (2020) tutkimuksessa mallinnettiin

rautakulkeumaa hydrologisten tekijöiden lisäksi maaperä- ja maankäyttötietojen perusteella. Tutkimus kohdistui maaperältään mineraalimaavaltaiselle ja maankäytöltään maatalousvaltaiselle valuma-alueelle – eli hyvin erilaiselle kuin Jäälinjärven valuma-alue. He toteavat, että valuma-alueilla, joilla rautahuuhtouma riippuu enemmän maaperän hapetus-pelkistysolosuhteista tai liukoisen orgaanisen hiilen kulkeumasta, rautakulkeuma ei ole pelkästään hydrologisten ominaisuuksien aiheuttamaa, ja se tekee mallinnuksesta monimutkaisempaa (Saari ym. 2020: 7). Siten Jäälinjärven valuma-alueen kaltaisella turvemaa- ja metsätalousvaltaisella alueella, jolla rautakulkeumaan vaikuttavat erityisesti hapetus-pelkistysolosuhteet (Dillon & Molot 2005: 6; Kritzberg & Ekström 2012: 1475; Ekström ym. 2016) ja liukoisen orgaanisen hiilen kulkeuma (Heikkinen 1990a; 1990b: 150; Lahermo ym. 1996: 79; Sjöstedt ym. 2013: 185; Sundman ym. 2014), on rautakulkeuman tarkempi mallintaminen haastavaa.

Lähteet

- Albrecht, J. (2007). *Key concepts & techniques in GIS*. SAGE Publications.
<https://dx.doi.org/10.4135/9780857024442>
- An overview of the Hydrology toolset (2022). ArcGIS Pro Documentation, Esri. 16.2.2022.
<https://pro.arcgis.com/en/pro-app/2.8/tool-reference/spatial-analyst/an-overview-of-the-hydrology-tools.htm>
- Björnerås, C., Persson, P., Weyhenmeyer, G. A., Hammarlund, D., & Kritzberg, E. S. (2021). The lake as an iron sink – New insights on the role of iron speciation. *Chemical Geology* 584 120529. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2021.120529>
- Callow, J. N., Van Niel, K. P., & Boggs, G. S. (2007). How does modifying a DEM to reflect known hydrology affect subsequent terrain analysis? *Journal of Hydrology* 332(1–2) 30–39. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.06.020>
- Choi, Y. (2012). A new algorithm to calculate weighted flow-accumulation from a DEM by considering surface and underground stormwater infrastructure. *Environmental Modelling & Software* 30 81–91. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.10.013>
- Ekström, S. M., Regnell, O., Reader, H. E., Nilsson, P. A., Löfgren, S., & Kritzberg, E. S. (2016). Increasing concentrations of iron in surface waters as a consequence of reducing conditions in the catchment area. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 121(2) 479–493. <https://doi.org/10.1002/2015JG003141>
- El-Rabbany, A. (2002). *Introduction to GPS: The Global Positioning System*. Artech House.
- Estlander, S., Pippingsköld, E., & Horppila, J. (2021). Artificial ditching of catchments and brownification-connected water quality parameters of lakes. *Water Research* 205 117674. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117674>
- Fill (Spatial Analyst) (2022). ArcGIS Pro Documentation, Esri. 5.6.2022.
<https://pro.arcgis.com/en/pro-app/2.8/tool-reference/spatial-analyst/fill.htm>
- Galati, S. (2006). *Geographic Information Systems Demystified*. Artech House.
- Haahti, K., Warsta, L., Kokkonen, T., Younis, B. A., & Koivusalo, H. (2016). Distributed hydrological modeling with channel network flow of a forestry drained peatland site. *Water Resources Research* 52(1) 246–263. <https://doi.org/10.1002/2015WR018038>
- Hammond, M., & Han, D. (2006). Issues of using digital maps for catchment delineation. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Water Management* 159(1) 45–51. <https://doi.org/10.1680/wama.2006.159.1.45>

- Heikkinen, K. (1990a). Seasonal changes in iron transport and nature of dissolved organic matter in a humic river in northern Finland. *Earth Surface Processes and Landforms* 15(7) 583–596. <https://doi.org/10.1002/esp.3290150702>
- Heikkinen, K. (1990b). Transport of organic and inorganic matter in river, brook and peat mining water in the drainage basin of the River Kiiminkijoki. *Aqua Fennica* 20 143–155.
- Heikkinen, K. (1994). Organic matter, iron and nutrient transport and nature of dissolved organic matter in the drainage basin of a boreal humic river in northern Finland. *Science of The Total Environment* 152(1) 81–89. [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(94\)90553-3](https://doi.org/10.1016/0048-9697(94)90553-3)
- Heikkinen, K., Saari, M., Heino, J., Ronkanen, A.-K., Kortelainen, P., Joensuu, S., ... & Marttila, H. (2022). Iron in boreal river catchments: Biogeochemical, ecological and management implications. *Science of The Total Environment* 805 150256. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150256>
- How flow direction works (2022). ArcGIS Pro Documentation, Esri. 6.5.2022. <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/2.8/tool-reference/spatial-analyst/how-flow-direction-works.htm>
- How stream order works (2022). ArcGIS Pro, Esri. 17.2.2022. <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/2.8/tool-reference/spatial-analyst/how-stream-order-works.htm>
- How stream to feature works (2022). ArcGIS Pro Documentation, Esri. 16.6.2022. <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/2.8/tool-reference/spatial-analyst/how-stream-to-feature-works.htm>
- Hydrological analysis (2022). Whitebox Geospatial Inc. 5.5.2022. https://www.whiteboxgeo.com/manual/wbt_book/available_tools/hydrological_analysis.html
- Hägglom, O., Härkönen, L., Joensuu, S., Keskisarja, V., & Äijö, H. (2020). *Water management guidelines for agriculture and forestry*. Maa- ja metsätalousministeriö. <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/162417>
- Jenson, S. K., & Domingue, J. O. (1988). Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis. *Photogrammetric engineering and remote sensing* 54(11) 1593–1600.
- Joensuu, S., Kauppila, M., Lindén, M., & Tenhola, T. (2019). *Metsänhoidon suositukset vesiensuojeluun, työopas*. Tapio Oy. <https://tapio.fi/wp-content/uploads/2020/09/Metsanhoidon-suositukset-vesiensuojeluun-TAPIO-2019.pdf>

- Jones, R. (2002). Algorithms for using a DEM for mapping catchment areas of stream sediment samples. *Computers & Geosciences* 28(9) 1051–1060.
[https://doi.org/10.1016/S0098-3004\(02\)00022-5](https://doi.org/10.1016/S0098-3004(02)00022-5)
- Kansallisen maastotietokannan laatumallit: Korkeusmallit* (2017). Maanmittauslaitos.
https://www.maanmittauslaitos.fi/sites/maanmittauslaitos.fi/files/attachments/2017/05/K_MTK_korkeusmallit_laatusikikirja_2017-01-02.pdf
- Kenny, F., & Matthews, B. (2005). A methodology for aligning raster flow direction data with photogrammetrically mapped hydrology. *Computers & Geosciences* 31(6) 768–779.
<https://doi.org/10.1016/j.cageo.2005.01.019>
- Kenny, F., Matthews, B., & Todd, K. (2008). Routing overland flow through sinks and flats in interpolated raster terrain surfaces. *Computers & Geosciences* 34(11) 1417–1430.
<https://doi.org/10.1016/j.cageo.2008.02.019>
- Korkalainen, T., Laurén, A., Koivusalo, H., & Kokkonen, T. (2008). Impacts of peatland drainage on the properties of typical water flow paths determined from a digital elevation model. *Hydrology Research* 39(5–6) 359–368.
<https://doi.org/10.2166/nh.2008.127>
- Korkeusmalli 2 m (2022). Maanmittauslaitos. 15.2.2022.
<https://www.maanmittauslaitos.fi/kartat-ja-paikkatieto/asiantuntemalle-kayttajalle/tuotekuvaukset/korkeusmalli-2-m>
- Kritzberg, E. S., & Ekström, S. M. (2012). Increasing iron concentrations in surface waters – a factor behind brownification? *Biogeosciences* 9(4) 1465–1478.
<https://doi.org/10.5194/bg-9-1465-2012>
- Krysanova, V., & Arnold, J. G. (2008). Advances in ecohydrological modelling with SWAT – a review. *Hydrological Sciences Journal* 53(5) 939–947.
<https://doi.org/10.1623/hysj.53.5.939>
- Kumar, B., Patra, K. C., & Lakshmi, V. (2017). Error in digital network and basin area delineation using d8 method: A case study in a sub-basin of the Ganga. *Journal of the Geological Society of India* 89(1) 65–70. <https://doi.org/10.1007/s12594-017-0559-1>
- Lahermo, P., Väänänen, P., Tarvainen, T., & Salminen, R. (1996). *Suomen geokemian atlas, Osa 3: Ympäristögeokemia - purovedet ja sedimentit*. Geologian tutkimuskeskus.
- Leppäranta, M., Virta, J., & Huttula, T. (2017). *Hydrologian perusteet*. Helsingin yliopisto, Fysiikan laitos. <https://doi.org/10.31885/2018.00021>
- Li, Z., Zhu, Q., & Gold, C. (2005). *Digital terrain modeling: Principles and methodology*. CRC Press.

- Lindsay, J. B. (2012). Burn streams into DEM. 6.2.2022.
<https://jblindsay.github.io/ghrg/Whitebox/Help/BurnStreams.html>
- Lindsay, J. B. (2014). *The Whitebox Geospatial Analysis Tools Project and Open-Access GIS*. Proceedings of the GIS Research UK 22nd Annual Conference, The University of Glasgow, 16–18 April. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1010.8962>
- Lindsay, J. B. (2016a). Efficient hybrid breaching-filling sink removal methods for flow path enforcement in digital elevation models: Efficient Hybrid Sink Removal Methods for Flow Path Enforcement. *Hydrological Processes* 30(6) 846–857.
<https://doi.org/10.1002/hyp.10648>
- Lindsay, J. B. (2016b). The practice of DEM stream burning revisited: The Practice of DEM Stream Burning Revisited. *Earth Surface Processes and Landforms* 41(5) 658–668.
<https://doi.org/10.1002/esp.3888>
- Lindsay, J. B. (2016c). The practice of DEM stream burning revisited: The Practice of DEM Stream Burning Revisited. *Earth Surface Processes and Landforms* 41(5) 658–668.
<https://doi.org/10.1002/esp.3888>
- Lindsay, J. B. (2019a). BreachDepressions. Whitebox GAT Manual. 27.5.2022.
https://www.whiteboxgeo.com/manual/wbt_book/available_tools/hydrological_analysis.html#BreachDepressions
- Lindsay, J. B. (2019b). BurnStreamsAtRoads. Whitebox GAT Manual. 27.5.2022.
https://www.whiteboxgeo.com/manual/wbt_book/available_tools/hydrological_analysis.html#BurnStreamsAtRoads
- Lindsay, J. B., & Dhun, K. (2015). Modelling surface drainage patterns in altered landscapes using LiDAR. *International Journal of Geographical Information Science* 29(3) 397–411. <https://doi.org/10.1080/13658816.2014.975715>
- Luonnonhoidon paikkatietoaineistot (2021). Metsäkeskus. 16.6.2022.
<https://storymaps.arcgis.com/stories/017240466fba495892f15c6e0b339849>
- Maastokartta 2020, 1:50 000. Maanmittauslaitos. CSC – Tieteen tietotekniikan keskus Oy.
<http://urn.fi/urn:nbn:fi:att:61bdc714-d16f-4dc4-8d5e-1d3080c80525>
- Maastotietojen laatumalli. (1995). Maanmittauslaitos.
https://www.maanmittauslaitos.fi/sites/maanmittauslaitos.fi/files/old/Maastotietojen_laatumalli.pdf
- Maastotietokanta (2022). Maanmittauslaitos. 9.5.2022.
http://www.nic.funet.fi/index/geodata/mml/maastotietokanta/2022/mml_maastotietokanta_2022.pdf 4.4.2022

- Maastotietokohteet.* (2018). Maanmittauslaitos.
https://www.maanmittauslaitos.fi/sites/maanmittauslaitos.fi/files/attachments/2018/03/Maastotietokohteet_0.pdf
- Martz, L. W., & Garbrecht, J. (1992). Numerical definition of drainage network and subcatchment areas from Digital Elevation Models. *Computers & Geosciences* 18(6) 747–761. [https://doi.org/10.1016/0098-3004\(92\)90007-E](https://doi.org/10.1016/0098-3004(92)90007-E)
- Martz, L. W., & Garbrecht, J. (1998). The treatment of flat areas and depressions in automated drainage analysis of raster digital elevation models. *Hydrological Processes* 12(6) 843–855. [https://doi.org/10.1002/\(ISSN\)1099-1085](https://doi.org/10.1002/(ISSN)1099-1085)
- Martz, L. W., & Garbrecht, J. (1999). An outlet breaching algorithm for the treatment of closed depressions in a raster DEM. *Computers & Geosciences* 25(7) 835–844. [https://doi.org/10.1016/S0098-3004\(99\)00018-7](https://doi.org/10.1016/S0098-3004(99)00018-7)
- Mosaic to new raster (Data management) (2022). ArcGIS Pro Documentation, Esri. 6.6.2022. <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/2.8/tool-reference/data-management/mosaic-to-new-raster.htm>
- Mujumdar, P. P., & Nagesh Kumar, D. (2012). *Floods in a changing climate. Hydrologic modeling.* Cambridge University Press.
- Määttä, J. (2019). *Rautakulkeuma Kalimenjoen valuma-alueella.* Diplomityö. Oulun yliopisto, Vesi-, energia- ja ympäristötekniikan tutkimusyksikkö.
<http://jultika.oulu.fi/files/nbnfioulu-201908222786.pdf>
- O’Callaghan, J. F., & Mark, D. M. (1984). The Extraction of Drainage Networks from Digital Elevation Data. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing* 28(3) 323–344. [https://doi.org/10.1016/S0734-189X\(84\)80011-0](https://doi.org/10.1016/S0734-189X(84)80011-0)
- Oksanen, J., & Sarjakoski, T. (2005). Error propagation analysis of DEM-based drainage basin delineation. *International Journal of Remote Sensing* 26(14) 3085–3102. <https://doi.org/10.1080/01431160500057947>
- Peruspaikkatietojen ylläpito (2022). Maanmittauslaitos. 15.2.2022. <https://www.maanmittauslaitos.fi/peruspaikkatietojen-yllapito>
- Petroselli, A., & Alvarez, A. F. (2012). The flat-area Issue in Digital Elevation Models and its consequences for rainfall-runoff modeling. *GIScience & Remote Sensing* 49(5) 711–734. <https://doi.org/10.2747/1548-1603.49.5.711>
- Polygon to centerline (Topographic production) (2022). ArcGIS Pro Documentation, Esri. 23.5.2022. <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/2.8/tool-reference/topographic-production/polygon-to-centerline.htm>

- Polyline to raster (Conversion) (2022). ArcGIS Pro Documentation, Esri. 27.5.2022.
<https://pro.arcgis.com/en/pro-app/2.8/tool-reference/conversion/polyline-to-raster.htm>
- Puustjärvi, V. (1953). Raudan saostuminen soissa. *Suo* 4 5–12.
- Qin, C., Zhu, A. -X., Pei, T., Li, B., Zhou, C., & Yang, L. (2007). An adaptive approach to selecting a flow-partition exponent for a multiple-flow-direction algorithm. *International Journal of Geographical Information Science* 21(4) 443–458.
<https://doi.org/10.1080/13658810601073240>
- Qin, C.-Z., Bao, L.-L., Zhu, A.-X., Hu, X.-M., & Qin, B. (2013). Artificial surfaces simulating complex terrain types for evaluating grid-based flow direction algorithms. *International Journal of Geographical Information Science* 27(6) 1055–1072.
<https://doi.org/10.1080/13658816.2012.737920>
- Rahman, M. M., Arya, D. S., & Goel, N. K. (2010). Limitation of 90 m SRTM DEM in drainage network delineation using D8 method—A case study in flat terrain of Bangladesh. *Applied Geomatics* 2(2) 49–58. <https://doi.org/10.1007/s12518-010-0020-2>
- Raster to polygon (Conversion) (2022). ArcGIS Pro Documentation, Esri. 7.6.2022.
<https://pro.arcgis.com/en/pro-app/2.8/tool-reference/conversion/raster-to-polygon.htm>
- Resample (Data Management) (2022). ArcGIS Pro Documentation, Esri. 6.7.2022.
<https://pro.arcgis.com/en/pro-app/2.8/tool-reference/data-management/resample.htm>
- Saari, M., Rossi, P. M., Postila, H., & Marttila, H. (2020). Predicting iron transport in boreal agriculture-dominated catchments under a changing climate. *Science of The Total Environment* 714 136743. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136743>
- Saukkonen, S. & Kortelainen, P. (1995). Metsätaloustoimenpiteiden vaikutus ravinteiden ja orgaanisen hiilen huuhtoutumiseen. Teoksessa Saukkonen, S. & Kenttämies, K. (toim.) *Metsätalouden vesistövaikutukset ja niiden torjunta: METVE-projektin loppuraportti*, 15–32. Suomen ympäristökeskus.
- Saunders, W. (1999). *Preparation of DEMs for use in environmental modeling analysis*. Esri user conference July 24-30, 1999 San Diego, California. Texas Natural Resource Conservation Commission.
<https://proceedings.esri.com/library/userconf/proc99/proceed/papers/pap802/p802.htm>
- Savolainen, K. (2013). *Muuttuneen vesistön kokonaisvaltainen kunnostus: Esimerkkinä Jäälinojan vesistö*. Diplomityö. Oulun yliopisto, Vesi- ja ympäristötekniikan osasto.
<http://jultika.oulu.fi/Record/nbnfioulu-201306171608>

- Schäuble, H., Marinoni, O., & Hinderer, M. (2008). A GIS-based method to calculate flow accumulation by considering dams and their specific operation time. *Computers & Geosciences*, 34(6), 635–646. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2007.05.023>
- Sink (Spatial analyst) (2022). ArcGIS Pro Documentation, Esri. 3.5.2022.
<https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/sink.htm>
- Sitterson, J., Knightes, C., Parmar, R., Wolfe, K., Muche, M., & Avant Brian, A. (2017). *An Overview of Rainfall-Runoff Model Types*. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, EPA/600/R-17/482.
https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_report.cfm?dirEntryId=339328&Lab=NERL
- Sjöstedt, C., Persson, I., Hesterberg, D., Kleja, D. B., Borg, H., & Gustafsson, J. P. (2013). Iron speciation in soft-water lakes and soils as determined by EXAFS spectroscopy and geochemical modelling. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 105 172–186.
<https://doi.org/10.1016/j.gca.2012.11.035>
- Snap pour point (Spatial Analyst) (2022). ArcGIS Pro Documentation, Esri. 18.2.2022.
<https://pro.arcgis.com/en/pro-app/2.8/tool-reference/spatial-analyst/snap-pour-point.htm>
- Strahler, A. H., & Strahler. (2013). *Introducing physical geography*. 6. p. Wiley.
- Stream to feature (Spatial analyst) (2022). ArcGIS Pro Documentation, Esri. 18.2.2022.
<https://pro.arcgis.com/en/pro-app/2.8/tool-reference/spatial-analyst/stream-to-feature.htm>
- Sundman, A., Karlsson, T., Laudon, H., & Persson, P. (2014). XAS study of iron speciation in soils and waters from a boreal catchment. *Chemical Geology* 364 93–102.
<https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2013.11.023>
- Tietotuotekuvaus (2021). Metsäkeskus. 12.5.2022.
<https://www.metsakeskus.fi/sites/default/files/document/tietotuotekuvaus-2m-10m-virtausverkko.pdf>
- Understanding drainage systems (2022). ArcGIS Pro Documentation, Esri. 22.2.2022.
<https://pro.arcgis.com/en/pro-app/2.8/tool-reference/spatial-analyst/understanding-drainage-systems.htm>
- Van Nieuwenhuizen, N., Lindsay, J. B., & DeVries, B. (2021). Smoothing of digital elevation models and the alteration of overland flow path length distributions. *Hydrological Processes* 35(7) e14271. <https://doi.org/10.1002/hyp.14271>

- Vesistöjen kuormitus ja luonnon huuhtouma (2021). Suomen ympäristökeskus. 1.9.2022.
https://www.ymparisto.fi/fi-fi/kartat_ja_tilastot/vesistojen_kuormitus_ja_luonnon_huuhtouma
- Virtanen, K., & Lerssi, J. (2006). *Mustaliuskekilajin vaikutus turpeen alkuainepitoisuuksiin*. Geologian tutkimuskeskus. http://tupa.gtk.fi/raportti/arkisto/s42_0000_2006_1.pdf
- Wang, Y.-J., Qin, C.-Z., & Zhu, A.-X. (2019). Review on algorithms of dealing with depressions in grid DEM. *Annals of GIS* 25(2) 83–97.
<https://doi.org/10.1080/19475683.2019.1604571>
- Watershed (Spatial Analyst) (2022). ArcGIS Pro Documentation, Esri. 6.5.2022.
<https://pro.arcgis.com/en/pro-app/2.8/tool-reference/spatial-analyst/watershed.htm>
- Whitebox Geospatial Inc (2022). 5.5.2022. <https://www.whiteboxgeo.com/>
- Wood, J. (2008a). Slope measures. Teoksessa Kemp, K. K. (toim.) *Encyclopedia of geographic information science*, 389–390. SAGE Publications.
- Wood, J. (2008b). Digital elevation model (DEM). Teoksessa Kemp, K. K. (toim.) *Encyclopedia of geographic information science*, 107–109. SAGE Publications.
- Wu, T., Li, J., Li, T., Sivakumar, B., Zhang, G., & Wang, G. (2019). High-efficient extraction of drainage networks from digital elevation models constrained by enhanced flow enforcement from known river maps. *Geomorphology* 340 184–201.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.04.022>
- Yan, Y., Lidberg, W., Tenenbaum, D. E., & Pilesjö, P. (2020). The accuracy of drainage network delineation as a function of environmental factors: A case study in Central and Northern Sweden. *Hydrological Processes* 34(26) 5489–5504.
<https://doi.org/10.1002/hyp.13963>
- Zhang, H., & Huang, G. (2009). Building channel networks for flat regions in digital elevation models. *Hydrological Processes* 23(20) 2879–2887.
<https://doi.org/10.1002/hyp.7378>
- Zhao, G., Gao, J.-F., Tian, P., & Tian, K. (2009). *Comparison of two different methods for determining flow direction in catchment hydrological modeling* 2(4) 15.
- Zhu, Q., Tian, Y., & Zhao, J. (2006). An efficient depression processing algorithm for hydrologic analysis. *Computers & Geosciences* 32(5) 615–623.
<https://doi.org/10.1016/j.cageo.2005.09.001>

Liitteet

LIITE 1.

Liitetaulukko 1. Suomen ympäristökeskuksen (SYKE), Maanmittauslaitoksen (MML) ja Geologian tutkimuskeskuksen (GTK) paikkatietoaineistojen lataus- ja muut metatiedot.

Aineiston nimi	Tuottaja	Vuosi	Koordinaattijärjestelmä	Lisenssi	Lataussivu
CORINE maanpeite 2018, 25 ha	SYKE	2018	ETRS-TM35FIN (EPSG:3067)	CC BY 4.0	https://www.syke.fi/fi-FI/Avoin_tieto/Paikkatietoaineistot/Ladattavat_paikkatietoaineistot#C
Hallintorajat, teemakartoille, ei merialueita 2021–2022, 1:1 000 000	MML	2021	ETRS-TM35FIN (EPSG:3067)	CC BY 4.0	https://etsin.fairdata.fi/dataset/218d5c60-ab60-4d5c-80ab-2fa15f54fa96/data
Kallioperä 1:200 000	GTK	2018	ETRS-TM35FIN (EPSG:3067)	CC BY 4.0	https://hakku.gtk.fi/fi/locations/search
Korkeusmalli 2008–2020, 2 m x 2 m	MML	2019	ETRS-TM35FIN	CC BY 4.0	http://urn.fi/urn:nbn:fi:csc-kata000010000000000000187
Maaperä 1:20 000 / 1:50 000	GTK	2015	ETRS-TM35FIN (EPSG:3067)	CC BY 4.0	https://hakku.gtk.fi/fi/locations/search
Maastotietokanta	MML	2022	ETRS-TM35FIN (EPSG:3067)	CC BY 4.0	http://urn.fi/urn:nbn:fi:att:d32f46b8-17cb-4f78-8dad-d026179835dd
Paikannimet 2020, 1:20 000	MML	2020	ETRS-TM35FIN (EPSG:3067)	CC BY 4.0	https://etsin.fairdata.fi/dataset/d0b5980e-4407-4022-8c8b-b7c12d7c484e
Ranta10 - rantaviiva 1:10 000	SYKE	2020	ETRS-TM35FIN (EPSG:3067)	CC BY 4.0	https://ckan.ymparisto.fi/dataset/%7BC40D8B4A-DC66-4822-AF27-7B382D89C8ED%7D
Uomaverkosto	SYKE	2021	ETRS-TM35FIN (EPSG:3067)	CC BY 4.0	https://ckan.ymparisto.fi/dataset/%7BE15CD0B3-3934-4ABC-BF23-A8C622FA6A57%7D
Valuma-aluejako	SYKE	2010	ETRS-TM35FIN (EPSG:3067)	CC BY 4.0	https://ckan.ymparisto.fi/dataset/%7B44394B13-85D7-4998-BD06-8ADC77C7455C%7D