

Tartu Ülikool

Loodus- ja täppisteaduste valdkond

Ökoloogia ja maateaduste instituut

Geograafia osakond

Bakalaureusetöö geograafias (12 EAP)

**Uljaste järve ja selle ümbruse iseloomustamine reljeefi- ja hüdroloogilise  
modelleerimise teel**

**Mariana Rohtsalu**

Juhendaja: PhD Raivo Aunap

Tartu 2021

## **Annotatsioon**

### **Uljaste järve ja selle ümbruse iseloomustamine reljeefi- ja hüdroloogilise modelleerimise teel.**

Bakalaureusetöö eesmärk oli kirjeldada Uljaste järve ja selle ümbrust hüdrogeoloogilise mudeli jaoks perspektiivsete sisenditena reljeefi-, hüdroloogia- ja pinnakatte mudelite näol. Lisaks iseloomustada karakteristikuid, millest sõltub järve hüdroloogiline režiim ning kirjeldada järve ümbruse tunnuseid ja loodusgeograafilisi tingimusi, mis sealse pinnavee liikumist kujundavad. Töös kasutati Maa-ameti geoportaalist alla laetud kõrgusmudelit ning sellel põhinevate ArcGISi reljeefi- ja hüdroloogilise modelleerimise töövahendeid. Uurimistöö tulemusena tekkis ülevaade Uljaste järve ümberkaudse ala nõlva karakteristikutest ning pinnavete liikumisest.

**Märksõnad:** hüdroloogiline modelleerimine, reljeefi modelleerimine, ArcGIS, kõrgusmudel

**CERCS kood:** P510 – Füüsiline geograafia, geomorfoloogia, mullateadus, kartograafia, klimatoloogia

### **Characterization of Lake Uljaste and its surroundings by terrain analysis and hydrological modeling.**

**Abstract:** The aim of the thesis was to describe Lake Uljaste and its surroundings as perspective inputs for the hydrogeological model in the form of relief, hydrology and surface models. In addition, to characterize the characteristics on which the hydrological regime of Lake Uljaste depends and to describe the features of the lake surroundings and the natural geographical conditions that shape the movement of surface water. ArcGIS relief and hydrological modeling tools and digital elevation model downloaded from Maa-amet were used. An overview of the characteristics of the slope of the area around Lake Uljaste and the movement of surface waters was obtained from the research.

**Keywords:** hydrological modeling, relief modeling, ArcGIS, digital elevation model

**CERCS code:** P510 – Physical geography, geomorphology, pedology, cartography, climatology

# Sisukord

Sissejuhatus .....	5
<b>1. Teoreetiline ülevaade .....</b>	<b>7</b>
<b>1.1 Hüdrogeoloogiline modelleerimine.....</b>	<b>7</b>
1.1.1 Mudeli eesmärkide püstitamine.....	7
1.1.2 Konseptuaalne mudel .....	7
1.1.3 Piiride tingimused .....	8
1.1.4 Mudelid .....	9
1.1.5 Mudeli kalibreerimine ja kinnitamine .....	11
1.1.6 Peamised eksimused modelleerimises .....	11
<b>1.2 ArcGISi pinna analüüsi töövahendid .....</b>	<b>12</b>
1.2.1 Nõlvakalle .....	12
1.2.2 Nõlva ekspositsioon .....	12
1.2.3 Nõlvakõverus .....	12
1.2.4 Reljeefivarjutus .....	13
<b>1.3 ArcGIS hüdroloogilise modelleerimise töövahendid .....</b>	<b>13</b>
1.3.1 DEMi täitmine .....	14
1.3.2 Voolusuund .....	14
1.3.3 Voolu akumulatsioon .....	15
1.3.4 Voolujoonte numbriline järjestus .....	15
1.3.5 Voolujoonte vektoriseerimine .....	15
1.3.6 Valgla .....	15
<b>2. Metoodika ja andmed .....</b>	<b>17</b>
2.1 Uurimisala kirjeldus .....	17
2.2 Andmed .....	19
2.3 Uljaste järve ümbruse analüüs .....	21
<b>3. Tulemused.....</b>	<b>23</b>
<b>3.1 Uljaste järve ümbruse kõrgusmudel .....</b>	<b>23</b>
3.1.1 Kõrgusmudeli karakteristikud .....	23
3.1.2 Uljaste ümbruse reljeefiprofiilid.....	27
3.1.3 Mahuarvutused .....	29

3.1.4	Kõrgusmudel koos järvenõoga .....	30
3.1.5	Uljaste järve ümbruse pinnakate.....	31
3.2	Uljaste järve ümbruse pinnavee mudelpinnad.....	32
3.2.1	Sulglohud ja haripunktid .....	32
3.2.2	Voolusuunad.....	33
3.2.3	Vooluvõrk .....	34
3.2.4	Järvest ülevoolu parandamine .....	36
3.2.5	Kraavitruupide parandamine.....	36
3.2.6	Uljaste järve valgla.....	37
3.3	Uljaste järve ümbruse infiltratsiooninäitajad .....	40
3.3.1	Hüdrogeoloogia analüüsi tulemus .....	40
	Arutelu .....	42
	Kokkuvõte.....	45
	Summary.....	47
	Tänuavaldused .....	49
	Kasutatud kirjandus.....	50
	Lisa 1.....	57
	Lisa 2.....	58

## Sissejuhatus

Magevesi on üks tähtsamaid loodusvarasid, mida ei saa asendada. See on eluks ülimalt oluline, mõjutades tugevalt Maa ökosüsteeme ning organismide vahelisi seoseid. Vett vajatakse näiteks ka kodumajapidamise, põllumajanduse ja tööstuse jaoks. Veeökosüsteemid pakuvad elupaikasid erinevatele looma- ja taimeliikidele ning on väga tundlikud vee kvaliteedi ja kvantiteedi muutuste suhtes. Peaaegu igasugune keskkonna muutus mõjutab lõpuks pinnaveet või põhjavett. (Battaglin et al., 2002)

Ida-Virumaal on põhjavee olukord kõige tõsisem sealse kauaaegse kaevandustööstuse tõttu. Paljudes kohtades on selle tase eksessiivse tarbimise tagajärjel langenud või on vesi saasteainetega reostunud (Põhjavee seire süsteem..). Taoline olukord ohustab põhjaveest sõltuvaid veekogusid, näiteks Uljaste järve, mida vene luuletaja Igor Severjanin nimetas omalajal eesti Baikaliks (Põhjaveekogumi veest sõltuvad..., 2015; Uljaste matkarada..., 2002). Järve lähedusse on plaanis rajada Põhja-Kiviõli II põlevkivikaevandus, mis järvest mitu meetrit madalamal asudes ohustab selle veetaset (Põhjaveekogumite seosed maismaaökosüsteemide..., 2019).

Geoloogilistes koosseisudes esinevat põhjavett ja selle liikumist mõjutavad mitmed tegurid. Selleks, et paremini mõista, kuidas vesi pinnakihtides liigub ning kaitsta ökosüsteeme, on olemas erinevaid põhjavee modelleerimise mudeleid. (Kushwaha & Goyal, 2016) Suur osa põhjaveesüsteeme puudutavatest olukordadest on väga keerukad, mis nõuavad ka keerulisi matemaatilisi mudeleid. Samas mõnikord piisab ka lihtsamast mudelist. Näiteks geoinfosüsteemi (GIS) kasutades on võimalik anda hea ülevaade ning viia läbi põhilisi modelleerimise protseduure kasutades minimaalseid sisendandmeid. (Jani, 2012)

Kuna tavaline 2D GIS ei ole otseselt mõeldud 3D hüdrogeoloogiliseks modelleerimiseks, siis töös tõsteti selle loogika ümber tasapinnalisele meetodikale. Töö eesmärgiks on kirjeldada Uljaste järve ja selle ümbrust hüdrogeoloogilise mudeli jaoks perspektiivsete sisenditena reljeefi-, hüdroloogia- ja pinnakatte mudelite näol. Töö eesmärgiks on vaadelda karakteristikuid, millest sõltub Uljaste järve hüdroloogiline režiim ning kirjeldada järve ümbruse tunnuseid ja loodusgeograafilisi tingimusi, mis sealse pinnavee liikumist kujundavad. Töö eesmärgiks on ka uurida, milliste andmete ja protseduuride abil on võimalik GIS tarkvara kasutades uurida pinnavee liikumise võtmeküsimusi. Selles töös kirjeldatakse Uljaste järve ümbrust ArcGIS Pro tarkvara hüdroloogia ja pinna analüüsi pakettide tööriistadega.

Töö koosneb neljast osast. Esimeses osas antakse teoreetiline ülevaade hüdrogeoloogilise modelleerimise põhimetoodikast ning reljeefi- ja hüdrooloogilise modelleerimise töövahenditest. Teises osas antakse ülevaade andmetest kogumisest, meetodikast, uuritavast piirkonnast ning analüüsi meetodikast. Kolmandas peatükis esitletakse analüüsi tulemused ning neljandas osas arutletakse nende üle.

# 1. Teoreetiline ülevaade

## 1.1 Hüdrogeoloogiline modelleerimine

Põhjavesi, kui peamine mageveevaru on üks tähtsamaid ressursse maailmas ning rahvaarvu suurenemine ja majandusareng on tekitanud selle järgi üha suureneva nõudluse. Põhjaveeks nimetatakse vett, mis asub maapinna all geoloogilistes kihtides. (Kushwaha & Goyal, 2016) Selleks, et põhjavett paremini mõista ja tarbida on olemas laialdaselt kasutusel olevad mudelid, mille abil lahendatakse erineva keerukusega olukordi (Jani, 2012) Kuna põhjaveesüsteemid on keerukad ning mõjutatud erinevatest teguritest, koosnevad ka mudelid eri tüüpi sisenditest (Dripps & Bradbury, 2007). Tüüpilisemateks teguriteks, mida modelleerimisel arvesse võetakse, on topograafia, sademed, õhutemperatuur, pinnakatte omadused, taimestik ja hüdrogeoloogia. (Devia *et al.*, 2015) Sademete ja õhutemperatuuri andmeid saab kasutada pinnakattelt vee aurumise leidmiseks, mis on osa veebilansist ning mõjutab põhjaveesüsteeme (Dripps & Bradbury, 2007).

### 1.1.1 Mudeli eesmärkide püstitamine

Esimeseks sammuks on püstitada eesmärgid, mida soovitakse mudeli kasutamisega saavutada. Sellest omakorda oleneb, kui põhjalikku ja keerukat mudelit läheb tarvis. (Baalousha *et al.*, 2008) Põhjavee mudeleid on erinevaid. Kui soovitakse analüüsida põhjavee voolu või vees lahustunud aine transporti, siis on mõistlik kasutada selgitavat mudelit. Kui aga soovitakse ette näha vees olevate saasteainete kontsentratsiooni muutuseid, siis ennustavat mudelit. Üldistavat mudelit on mõistlik kasutada siis, kui soovitakse veeressursse hallata. (Baalousha *et al.*, 2008)

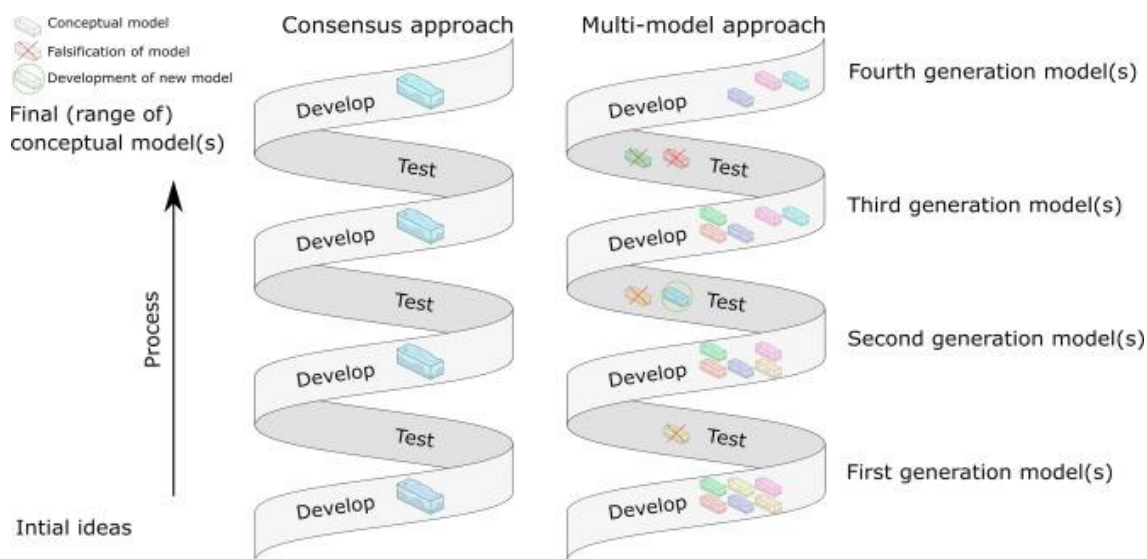
### 1.1.2 Konseptuaalne mudel

Konseptuaalne mudel on põhjavee modelleerimise protsessi tähtsaimaks osaks (Baalousha *et al.*, 2008). Kuna põhjaveesüsteemid on väga keeruka iseloomuga, siis kontseptuaalse mudeli eesmärgiks on lihtsustatud viisil kirjeldada hetkeolukorda ja uuritavat teemat, määratleda modelleerimismeetod ning millist tarkvara mudeli koostamisel kasutada (Rivera, 2007). Põhivaldkonnad, mida mudelis käsitlema peaks on 1) põhjaveekihi geomeetria 2) piiritingimused 3) põhjavee infiltratsioon 4) põhjaveekihi parameetrid 5) veebilanss 6) veeallikate ja sulglohkude identifitseerimine (Baalousha *et al.*, 2008).

Kontseptuaalse mudeli loomiseks kasutatakse peamiselt kahte meetodit: konsensuslik lähenemisviis ja mitmemudeliline lähenemisviis. Konsensusliku lähenemisviisi (*consensus model approach*) puhul lisatakse kõik kogutud andmed mitu korda ainult ühte mudelisse. Mitmemudelise

meetodi (*multi-model approach*) puhul aga lisatakse mudelisse erinevaid andmeid paralleelselt mudeli erinevate etappidega. (Enemark *et al.*, 2019; joonis 1)

Iga mudeli testimise etapis analüüsitakse uusi andmeid ja nii tuvastatakse usaldusväärsed ja mitte usaldusväärsed mudelid. Juhul kui leitakse uut informatsiooni, mis muudab eelneva mudeli kehtetuks, siis see eemaldatakse ja vajadusel asendatakse uuega. (Betancur *et al.*, 2012). Sellist olukorda nimetatakse „üllatuseks“ ning hea oleks selle esinemise tõenäosuse protsenti mudeli loomisel arvesse võtta, kuna vastasel juhul võib see kahtluse alla seada ka ülejäänud hüdrogeoloogilise mudeli usaldusväärset. Üllatuse olukorra esinemise tõenäosust saab vähendada suurendades järk-järgult mudeli keerukust. (Enemark *et al.*, 2019)



Joonis 1. Konseptuaalse mudeli loomise protsess kasutades konsensuslikku või mitme-mudelilist lähenemisviisi (Enemark *et al.*, 2019)

### 1.1.3 Piiride tingimused

Põhjaveesüsteem koosneb erinevatest piiridest, mida on võimalik leida kas tööpõllul mõõdistusi tehes või võttes need topograafilistelt kaartidelt (Kumar *et al.*, 2020). Põhjavee voolu modelleerimisel soovitatakse kasutada olemasolevaid kindlaid füüsilisi piire, näiteks ümberkaudsed jõed ja järved. Pehmemate looduslikemate piiride, nagu näiteks hüdrauliliste piiride kasutamise miinuseks on see, et nende positsioon võib aja jooksul muutuda. Levinumateks piirideks on konstantne peaosa (*constant head boundary*), määratletud peaosa (*specified head boundary*), voolupiir puudub (*no flow boundary*), määratletud voolupiir (*specified flux boundary*),

pea osast sõltuv voolupiir (*head-dependent flux boundary*), vaba pinna piir (*free-surface boundary*) ja imbumise vaba pinna piir (*seepage face boundary*). (Baalousha *et al.*, 2008)

#### 1.1.4 Mudelid

Põhjavee voolu kohta on olemas mitmeid erinevaid mudeleid, selles töös kajastatakse neist kolme. Nendeks on füüsilised mudelid (*physical models*), analoogsed mudelid (*analogue models*) ja matemaatilised mudelid (*mathematical models*)

Füüsilisi mudeleid saab luua lisades näiteks liiva või muud materjali läbipaistvasse konteinerisse. Neid kasutatakse laboratooriumites ning see on kõige lihtsakoelisem mudeli variant, mille abil on võimalik uurida näiteks vee filtreerumise omadusi läbi erinevate materjalide. Füüsiliste mudelite miinuseks on see, et nendega ei saa kirjeldada keerulisi põhjaveesüsteemide olukordi ning nende konstrueerimine on materjalikulukas.

Analoogse mudeli kõige levinumaks näiteks on elektriline mudel. Kuna veevool läbi poorse materjali sarnaneb elektrivooluga läbi elektrijuhi, siis on selline mudel heaks analoogiks tegelikele põhjaveesüsteemidele. Tänapäevaks on elektrilised mudelid asendatud arvutimudelitega, kuna nendega ei ole võimalik jäljendada mitmeid keerukamaid veevoolu olukordi.

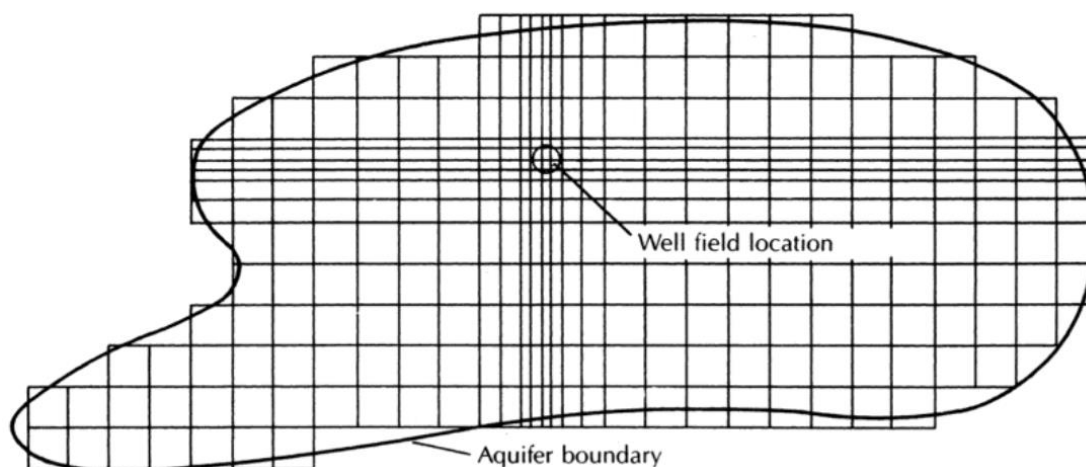
Matemaatiliste mudelitega arvutatakse põhjavee voolu kasutades võrrandeid. Kui mudel on lihtne, lahendatakse võrrandid analüütiliselt. Analüütilise mudeliga saab selgitada veevoolu transpordiomadusi või näiteks selle voolu kuskile kaevu. Tingimuseks jääb vaid see, et põhjaveesüsteemi piiride tingimused peavad olema piisavalt lihtsad, et võrrandeid oleks võimalik lahendada ka tavalist arvutit kasutades. (Fetter, 2001)

Numbrilised mudelid on mõeldud keerukamate olukordade lahendamiseks. Kaks kõige levinumat meetodit on lõplike erinevuste meetod (*finite difference method*) ja lõplike elementide meetod (*finite element method*).

„Lõplike erinevuste mudelit kasutatakse, kui kontseptuaalses mudelis eeldatakse, et põhjaveesüsteemi omadused on teada kogu ala ulatuses. Siis võib asendada mudeli võrgustikuga, kus asetsevad peal sõlmpunktid.“ (Fetter, 2001) Kui mingis kindlas kohas soovitakse tulemuse täpsust suurendada, paigutatakse võrgustikku vahekaugused seal väiksemalt (joonis 2). Lõplike erinevuste meetodi puuduseks on, et tulemuse täpsus sõltub siiski oluliselt võrgustiku vahede suurusest ning see ei sobi hästi ebaregulaarset täpsust nõudvale mudelile, kuna sellel juhul on

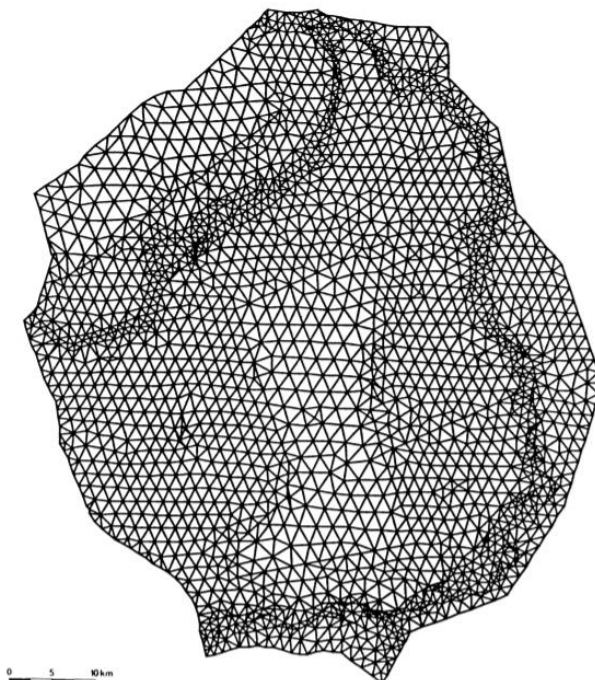
mudeli keskmine tulemus küsitava usaldusväärsusega. Kõige levinum selle meetodi alusel kasutatava mudeli näide on MODFLOW. (Baalousha *et al.*, 2008)

Üldises mõttes on MODFLOW kolme dimensiooniline blokkidel, mida nimetatakse ka voksliteks põhinev mudel (Meyer *et al.*, 2018). Tänu sellele omadusele saab erinevaid kihte üksteise peale lisada ning leida nende vee läbilaskvusvõime. (Fetter, 2001) Kitsamas mõistes on see tegelikult käskude real põhinev programm, mis ise ei paku väljundina valmis graafilisi mudeleid. Need tuleb kasutajatel hiljem tulemustest ise genereerida kasutades selleks muid vastavaid programme. (MODFLOW)



Joonis 2. Lõpliku erinevuse mudeli ebaregulaarne võrgustik (Fetter, 2001)

Lõpliku elemendi mudel erineb lõpliku erinevuse mudelist selle poolest, et see on matemaatiliselt keerukam ning võrgustik koosneb pigem kolmnurksetest osadest (joonis 3). Kohtades, kus põhjaveesüsteemi muutujad muutuvad kiiremini, on võrgustik tihedam ning tänu sellele saab huvipakkuvat nähtust täpsemini uurida. (Baalousha *et al.*, 2008) Lõpliku elemendi mudel jäljendab paremini reaalselt põhjaveesüsteemi, kuna see on oma olemuselt paindlikum (Fetter, 2001). Mudeli puuduseks on, et seda on vähem uuritud kui lõpliku erinevuse mudelit ning keeruliste olukordade puhul on sellise mudeli konstrueerimine ajamahukas. Levinumad selle meetodi alusel kasutatavateks mudeliteks on FEFLOW ja FEMWATER. (Baalousha *et al.*, 2008)



Joonis 3. FEMGRIDiga genereeritud lõpliku elemendi mudeli võrgustik (Biesheuvel & Hemker, 1993)

### 1.1.5 Mudeli kalibreerimine ja kinnitamine

Kuna põhjavee modelleerimise abil üritatakse lihtsustatult kirjeldada reaalseid põhjaveesüsteeme, siis teatud erinevused mudeli tulemustes võrreldes tööpõllult võetud andmetega on paratamatud. Lisaks sisaldab mudel reaalse süsteemi lihtsustamise tõttu mitmeid oletusi. Selletõttu kalibreeritaksegi lõpus mudel võimalikult vastavusse selle piirkonna tööpõllu andmetega ning leitakse, millistel parameetritel on suurem mõju mudeli lõpptulemusele. Peale mudeli kalibreerimist kontrollitakse, kas see töötab erinevate andmetega ning sellest sõltub kas mudel kinnitatakse sobivana või on vaja kalibreerimist edasi teha. (Baalousha *et al.*, 2008)

### 1.1.6 Peamised eksimused modelleerimises

Kõige tõenäolisemaks modelleerimise vea põhjustajaks on valesti koostatud kontseptuaalne mudel. Kindlasti peaks modelleerimise jooksul ka aeg-ajalt põhjaveesüsteemi piire üle kontrollima, kuna need võivad mudeli loomise ajal muutuda. Lisaks on mudelis osad parameetrid, nagu näiteks põhjavee hüdraulilised omadused, mis peaksid põhinema pigem tööpõllult saadud mõõdistustele, kui teoreetilistele oletustele. (Baalousha *et al.*, 2008)

## **1.2 ArcGISi pinna analüüsi töövahendid**

Pinna tööriistade põhjal saab teha parema ülevaate piirkonna reljeefist, visualiseerides digitaalselt kõrgusmudelilt (DEM) pinnavorme, mis ei olnud esialgsel mudelil kergesti nähtavad (Lisa 1). (An overview of the Surface., Esri) Sellisteks töövahenditeks on näiteks nõlvakõverus, aspekt (ekspositsioon), nõlvakalle ja reljeefivarjutus. Lisaks avaldab reljeef mõju hüdroloogiale ning sellel põhinevad mitmed hüdroloogilise modelleerimise töövahendid. (Gruber & Peckham, 2009).

### **1.2.1 Nõlvakalle**

Nõlvakalde arvutamise tööriist Slope näitab, kui järsk või lame on maastik, arvutades selleks, kui järsk on iga rasterpinna piksel. Seda saab leida kasutades tasapinnalist või geodeetilist meetodit. Tasapinnalise meetodiga arvutatakse suurim nõlva kallaku muutus piksli lähinaabritesse 2D koordinaatsüsteemis. Geodeetilise meetodi käigus arvutatakse nõlvakalle topograafilise pinna ja viidatud tugipunkti vahelise nurga mõõtmise teel 3D koordinaatsüsteemis. Lisaks on olemas võimalus valida, kas tulemuses soovitakse nõlvakallet näha kraadides või protsentides. Mida järsem nõlv, seda suurem on selle kraad või protsent. (How Slope..., Esri)

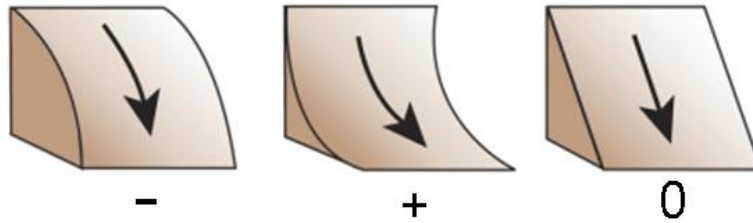
### **1.2.2 Nõlva ekspositsioon**

Nõlva ekspositsiooni tööriist Aspect tuvastab, millise kompassi suuna poole nõlva pind asub. Suunda arvestatakse kraadides ning päripäeva. Kusjuures täiesti lamedate pindade väärtus on -1. Sarnaselt nõlvakalde tööriistale, on ka aspekti arvutamiseks kaks meetodit - tasapinnaline ja geodeetiline. (How Aspect..., Esri)

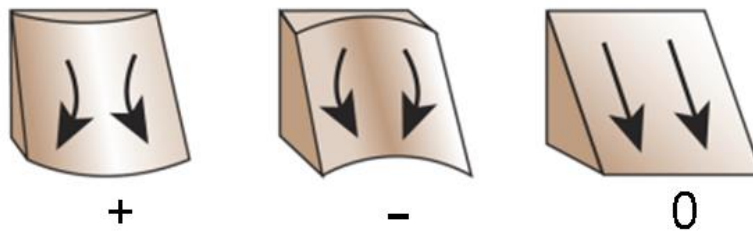
### **1.2.3 Nõlvakõverus**

Nõlvakõveruse tööriist Curvature arvutab kõveruse, võttes arvesse igat pikslit ja selle kaheksat naaberpikslit. Sellega saab arvutada lisaks veel kaks karakteristikut, täpsemalt profiili- ja pinnakumeruse, millest tegelikkuses nõlvakõverus koosnebki. Profiilikõverus näitab, kas nõlvakõverus kaardub nn sissepoole või väljapoole ning pinnakumerus on risti profiilikõverusega. (joonis 4) (Curvature, Esri)

## Profile curvature



## Plan curvature



Joonis 4. Visuaalne selgitus profiili- ja pinnakumerusest (Zaragozí *et al.*, 2013)

### 1.2.4 Reljeefivarjutus

Reljeefivarjutuse tööriist Hillshade loob varjud, võttes arvesse pinnale langeva valguse nurga. Arvestades valgusallika (päikese) hüpoteetilist asukohta, milleks on vaikimisi loode ilmakaar, arvutab tööriist iga piksli valgusväärtuse. Tulemuseks on visuaalselt oluliselt parem reljeefi kuvand. Reljeefivarjutust võib veel parema graafilise kuvandi esitamiseks kombineerida ka mõne teise reljeefist sõltuva kihiga, nagu on tehtud joonisel 19. (How Hillshade..., Esri)

### 1.3 ArcGIS hüdroloogilise modelleerimise töövahendid

Pinnavee äravool hakkab toimuma siis, kui kõrgematelt aladelt juurdetulev vesi ületab pinnase infiltratsiooni mahtuvust (Wang *et al.*, 2020). ArcGISi hüdroloogilise analüüsi tööriistad kasutades on võimalik uurida digitaalse kõrgusmudeli (DEM) abil reljeefi mõju piirkonna hüdroloogiale ja pinnavee liikumisele. Enamasti on nendeks fokaaloperaatorid. „Fokaaloperaatorid kasutavad rasterandmete ühte kihti, mille igale asupaigale vastava piksli uus väärtus leitakse selle paiga lähiümbruse omaduste alusel.“ (Roosaare *et al.*, 2019) DEMil on hüdroloogilises modelleerimises väga oluline roll. Selle abil on võimalik arvutada voolusuunda ja voolu akumulatsiooni, voolu järjestust ning luua drenaaživõrk ja piiritleda valglat. (Saraf *et al.*, 2004) Ehkki Uljaste järve sisse ega välja ei paista mingit vooluvõrku olevat, tekkis huvi teada saada, kuhu maapind veevoolu suunab ja kui suurelt alalt Uljaste järv oma vett kogub.

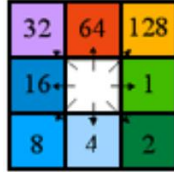
Kuigi GISi võimalused on põhjavee modelleerimisel piiratud, põhjuseks asjaolu, et keerulisemate olukordade lahendamiseks oleks tarvis kasutada 3D mudelit, on see siiski omamoodi kasulikuks variandiks modelleerimisel (Jani, 2012). „GISist on kujunenud otsuste toetamise süsteem, mis võimaldab tõhusalt andmeid salvestada ja erinevatest allikatest pärinevaid ruumiandmeid ühtlustada.“ (Kumar *et al.*, 2020) Sageli kasutatakse GISi hüdroloogilises modelleerimises just ruumiandmete eel- ja järeltöötlemiseks (Roosaare *et al.*, 2019)

### **1.3.1 DEMi täitmine**

Selleks, et voolusuunda saaks korrektselt arvutama hakata, oleks kõigepealt vajalik eemaldada DEMist sulglohud (Saraf *et al.*, 2004). Sulglohk on piksel, millest voolu suuna määramine ei ole võimalik, kuna ükski seda ümbritsev piksel pole sellest madalam. Seda võib põhjustada looduslik sulglohk, aga ka viga andmestikus. Vastupidiselt sulglohkudele võib esineda ka voolamist takistavaid nõ haripunkte, mille kõrgus on ümbritsevatest pikslitest suurem ja mis tuleks samuti eemaldada. Fill tööriistaga on võimalik sellised andmete väikesed puudused eemaldada, vastasel juhul võib vooluvõrk jääda katkendlikuks. (How Fill works, Esri)

### **1.3.2 Voolusuund**

Maapinna hüdroloogiliste omaduste teada saamiseks on vajalik voolu suundade määramine. ArcGIS Pros on selleks olemas Flow Direction tööriist, mis leiab iga piksli põhjal voolusuuna selle madalamal asuvasse naaber pikslisse. (How flow direct..., Esri) Selle tegemiseks võib valida sobivaima kolmest erinevast algoritmist. Kõige levinumaks on nn kaheksa suuna voolumudel (D8), mille puhul eeldatakse, et vesi voolab pikslist ühte selle naaber pikslite hulgast, millesse on kõige suurem langus. Sõltuvalt millises suunas vool toimub, määratakse pikslile vastav väärtus, mida on selgitatud joonisel 5 (Flow Direct..., Esri; Saraf *et al.*, 2004). Teiseks võimalikuks lahenduseks on kasutada D-Infinity (DINF) algoritmi, mis kasutab natukene teistsugust lähenemisviisi. D-Infinity määrab voolu suuna kõige järsema languse järgi kaheksal kolmnurksel tahul, mis on loodud huvipakkuvale rastrile. Tulemuseks on piksel, mida kujutatakse ühe nurgana kraadides. Kolmandaks võimaluseks on kasutada Multiple Flow Direction (MFD) algoritmi, mis jagab voolu kõigi allpool asuvate naabepikslite vahel ära. (Flow Direct..., Esri)



Joonis 5. Voolusuundade arvutamise D8 mudel (Flow Direct..., Esri)

### 1.3.3 Voolu akumulatsioon

Flow Direction tööriista tekitatud tulemust sisendina kasutades saab arvutada voolu akumulatsiooni (Saraf *et al.*, 2004). Flow Accumulation tööriist arvutab voolu akumulatsiooni selle järgi, kui mitmest ülesvoolu asuvast pikslist voolab vesi madalamal asuvasse pikslisse. Selle tulemusena eristuvad suurema voolu akumulatsiooniga piirkonnad, mida saab kasutada voolusängide tuvastamiseks. (How Flow Acc..., Esri)

### 1.3.4 Voolujoonte numbriline järjestus

Voolusuunda ja voolu akumulatsiooni sisenditena kasutades saab määrata voolujoonte numbrilise järjestuse tööriistaga Stream Order. Tänu sellele on võimalik teada saada nende omadused, liigitada neid nende lisaharude arvu alusel ning tulemuseks on vooluvõrgu puu. (How Stream Order..., Esri; Roosaare *et al.*, 2019; Saraf *et al.*, 2004) ArcPro pakub voolujoonte järjekorra leidmiseks kahte meetodit, Stahleri ja Shreve'i. Enim kasutatavaks meetodiks on Stahleri meetod, mille järgi kasvab voolujoonte järjestus vaid siis, kui ristuvad sama järjekorra numbriga voolujooned. See tähendab, et sama taseme voolujoonte lõikumine moodustab ühe taseme võrra kõrgema voolujoone jne. Erinevalt Stahleri meetodist ei ole aga Shreve'i meetodiga voolujoone numbrilise suurenemiseks vajalik sama tasemega joonte ristumist, vaid need liidetakse omavahel järjest kokku. (How Stream Order..., Esri)

### 1.3.5 Voolujoonte vektoriseerimine

Stream To Feature tööriista kasutatakse voolu vektoriseerimiseks. Töövahend vektoriseerib ristuvad ja üksteisega külgnevad voolurastrid, kasutades selleks eelnevalt saadud voolusuundasid. Kaks kõrvuti asetsevat sama väärtusega lineaarset tunnust vektoriseeritakse kahe paralleeljoonena. (How Stream to Feature..., Esri)

### 1.3.6 Valgla

Valgla on maa-ala, millelt voolab vesi madalamale kokku. Tööriista Watershed kasutades saab seda arvutada. Väljalaskepunkt (*pour point*) on selle madalaim punkt ning näitab, kust alates

hakkab vesi mingist piirkonnast välja voolama. Valgla arvutamiseks on vaja teada voolusuundasid ning väljalaskepunkti. (How Watershed works, Esri)

## 2. Metoodika ja andmed

### 2.1 Uurimisala kirjeldus

Uurimisala asub Eestis, Ida-Viru maakonnas, Lüganuse vallas, Uljaste külas koordinaatidega 59° 21' N, 26° 46' E, kõrgusega 67,5 meetrit üle merepinna (X-GIS, Maa-Amet). Järve pindala on 62,2 hektarit ja suurim sügavus 6,4 meetrit (Laarmaa, 2019). Uljaste järve ümbritseb kuni 20 meetri kõrgune, terava harjaga oos, poolekilomeetrise läbimõõduga küngas ja Uljaste raba (Karukäpp ja Mäemets, 1990). Uljaste oos on Ida-Virumaa kõrgeim tipp, ulatudes 95,2 m üle merepinna. Uljaste järv on oligotroofne ehk vähetoiteline ja semidüstroofne ehk pehmeveeline järv. Just oligotroofsed järved on maailma kõige ohustatumad. (Uljaste maastikukaitseala., 2017) Järv saab oma vee valglalt pärinevast voolust, sademetest ja põhjavee sissevoolust (Põhjaveekogumi veest sõltuvad..., 2015). Kirjanduse järgi toimub sissevool järve põhjaallikate ja raba kaudu, väljavool aga kraavi kaudu lähedalasuvasse Pada jõkke (Mäemets, 1968).

Uljaste järve ebastabiilset iseloomu tasakaalustab lähedalasuv Uljaste soo, mis on oluliseks järve veetaseme säilitajaks. Seega suur osa rabas toimuvast kajastub ka järve muutustes. (Krause *et al.*, 2020) Rabas asub kolm soojärve ning raba seisundit võib pidada heaks, kuna älved ei ole kinni kasvanud (Uljaste maastikukaitseala., 2017). Raba on tekkinud Uljaste järve kinni kasvamisest ja seda meenutavad tänapäevani arvukad soolaukad ja soojärved. Raba toitub nii sademetest kui ka põhjaveest. Soo kogupindala on 1332 hektarit. Madalsoolasund moodustab sellest suurima osa ning seda leidub rohkelt raba põhja- ja idaosas. Peamiselt koosneb madalsooturvas keskmiselt lagunenuid tarnaturbast, mille horisondi paksus on 1,2-1,8 meetrit. Suuruselt järgmine on rabalasadund, mis koosneb kompleksturbast või fuskumiturbast ja horisondi paksuseks on 3,8-7,5 meetrit. Siirdesoo lasundis esineb sfagnumiturbast, mille vertikaalseks läbimõõduks on 1,7-3,2 meetrit. (Orru, 1995)

Osa Uljaste maastikukaitsealast ja kaks rabajärve kuuluvad Natura 2000 võrgustikku. Uljaste Maastikukaitseala kaitse eesmärgiks on sealse järve, raba ja oosi kaitse (Uljaste maastikukaitseala., 2017). Ka Ida-Virumaa maakonnaplaneeringus aastani 2030+, on Uljaste piirkond arvestatud 32 väärtusliku maastiku hulka (Ida-Viru maakonna..., 2016). Kurvaks näiteks järve kehvast vastupanuvõimest keskkonnanriskidele on ka seal toimunud kalade massilised hukkumised 1981. ja 1993. aastal (Uljaste maastikukaitseala., 2017; Ürglooduse objekt: Uljaste..., 2010). Tänu veekogu eraldatusele, leidub seal ka haruldasi ja ohustatud liike. Uljaste puhul on

tähelepanuväärseimaks näideteks vesilobeelia (*Lobelia dortmanna*) ja järv-lahnarohi (*Isoetes lacustris*). Mõlemad taimeliigid kuuluvad II kaitsekategooriasse. Järves leidub veel ka III kaitsekategooria liiki valget vesiroosi (*Nymphaea alba*). Vesilobeelia arvukus on viimastel aastatel tunduvalt vähenenud, varasemast 12 elupaigast on alles vaid seitse ja üheks peamiseks asurkonnaks ongi Uljaste järv. (Uljaste maastikukaitseala., 2017)

Järv on põhjaveest sõltuv siis, kui selle veetaseme muutus oleneb primaarselt seda varustavast põhjaveekogumist (Põhjaveekogumi veest sõltuvad., 2015). Kuna Uljaste järv ei ole tavapärase läbivoolujärv, vaid põhjaveetoiteline umbjärv, siis võib seda pidada põhjaveest ja selle muutustest väga sõltuvaks (Põhjaveekogumite seosed maismaaökosüsteemide., 2019). Muidugi oleneb palju ka järve veebilansist (Põhjaveekogumi veest sõltuvad., 2015).

Intensiivne põhjavee vahetus toimub järvel hea hüdraulilise juhitavusega lasundites, näiteks liivas, kruusas, moreenis ja karstialal. Mida suurem on järve hüdrauliline seos põhjaveesüsteemiga, seda tugevam on kraavide ja põhjavee välja pumpamise mõju sellele. (Põhjaveekogumi veest sõltuvad., 2015) Uljaste järv kuulub liiva-alade vähetoiteliste järvede hulka. Selle põhi ja kaldad on liivased ning Uljaste sooga kokkupuute alal võib esineda ka turvast. Kuna järve põhja pinnase infiltratsioon on hea, siis osaleb aktiivses veevahetuses suurem osa veekogust. (Uljaste maastikukaitseala., 2017)

Kui looduslikult kaotab järv vett läbi auramise ja põhjavette infiltreerumise, siis antropogeenseks teguriks võib Uljaste puhul kujuneda järvest paari kilomeetri kaugusel asuv Põhja-Kiviõli II põlevkivikaevandus (Põhjaveekogumite seosed maismaaökosüsteemide., 2019). Mõju põhjuseks oleks see, et kaevandatava põlevkivikihi kuivendamiseks on vaja vesi välja pumbata. (Uljaste maastikukaitseala., 2017) Geoloogilised kihid lasuvad teatud kaldega, seega liigub survealine põhjavesi kõrgema rõhuga alalt madalama rõhuga ala poole (Põhjaveekogumi veest sõltuvad..., 2015). Senimaani on puudunud järve piirkonna kohta tehtud hüdrogeoloogilised uuringud ning ei saa olla kindel, et plaaneeritav allmaakaevandustegevus ei mõjutaks järve ja selle veetaset negatiivselt. Seetõttu tellis Kiviõli Keemiatööstus OÜ 2020. aastal Geoloogiateenistuselt uuringu, mis tooks selgust Uljaste järve fenomenile ning kas ja kuidas mõjutaks inimtegevus järve veetaset. (Kriis, 2020) Peamiste muutuste teada saamiseks kontrollib ka Keskkonnaagentuur iga kuu Uljaste järve veetaset. Samas selleks, et oleks selge, kas veetaseme muutused on tingitud ilmastikust või

inimmõjust põhjaveetasemele, oleks vaja andmete kogumine muuta automaatseks. (Põhjaveekogumite seosed maismaaökosüsteemide..., 2019)

## **2.2 Andmed**

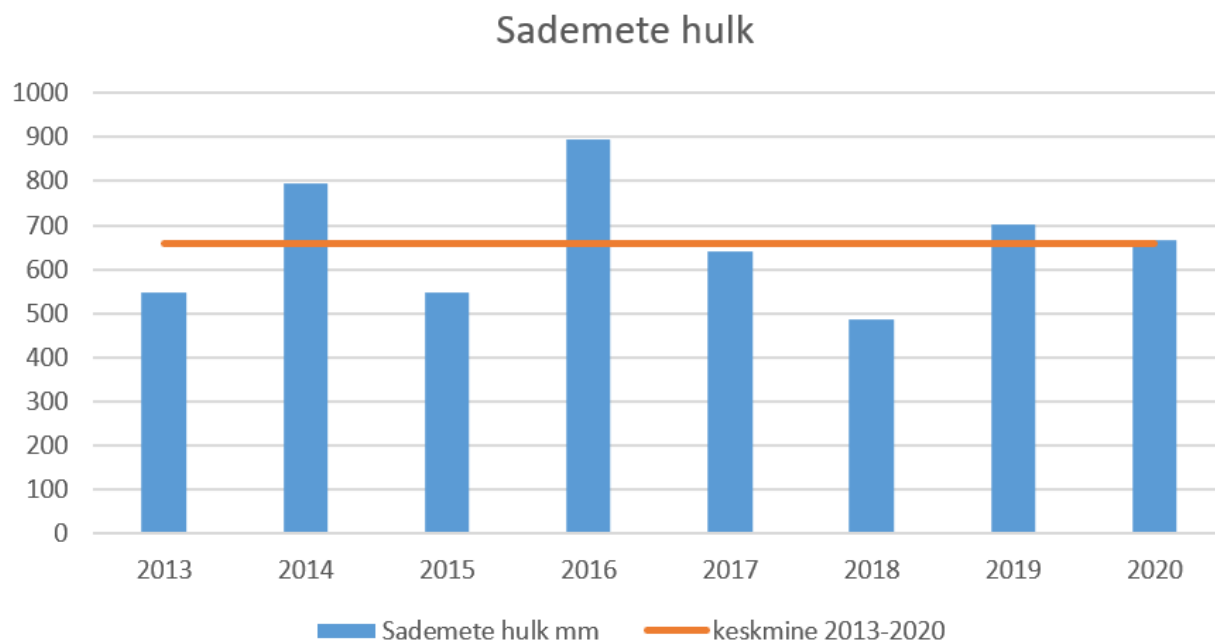
Käesoleva uurimistöo põhialuseks on Maa-ameti geoportaalist saadud erinevate hüdroloogiaga seotud valdkondade andmed. Huvipakkuva ala kõrgusandmed saab alla laadida sisestades kaardilehe numbri. Selles töös kasutati kaardilehtede 64851, 64852, 64853, 64854 ühe meetrise eraldusvõimega GeoTIFF maapinna kõrgusmudelit, mis on välja toodud lisas 1. (Kõrgusandmed, Maa-amet)

Lisaks saab alla laadida ka Eesti topograafia andmekogu (ETAK) seisuveekogud. Selles töös kasutati Uljaste järve ja selle rabaveekogude kontuure. (ETAK andmed, Maa-amet)

Selleks, et teada saada, millest koosneb ja kuidas on jaotunud Uljaste piirkonna pinnakatte kihid on Maa-ameti geoportaalil Geoloogiline baaskaart mõõtkavas 1:50 000, millelt on võimalik alla laadida kaardiakna suuruse ala kohta käivad pinnakatte kihid koos nende andmete iseloomustusega. (Geoloogiline baaskaart, Maa-amet) Lisaks koguti andmeid erinevatest internetiallikatest pinnakatte materjalide vee läbilaskvusvõime kohta, kus võeti arvesse infiltratsiooninäitajate keskmised väärtused.

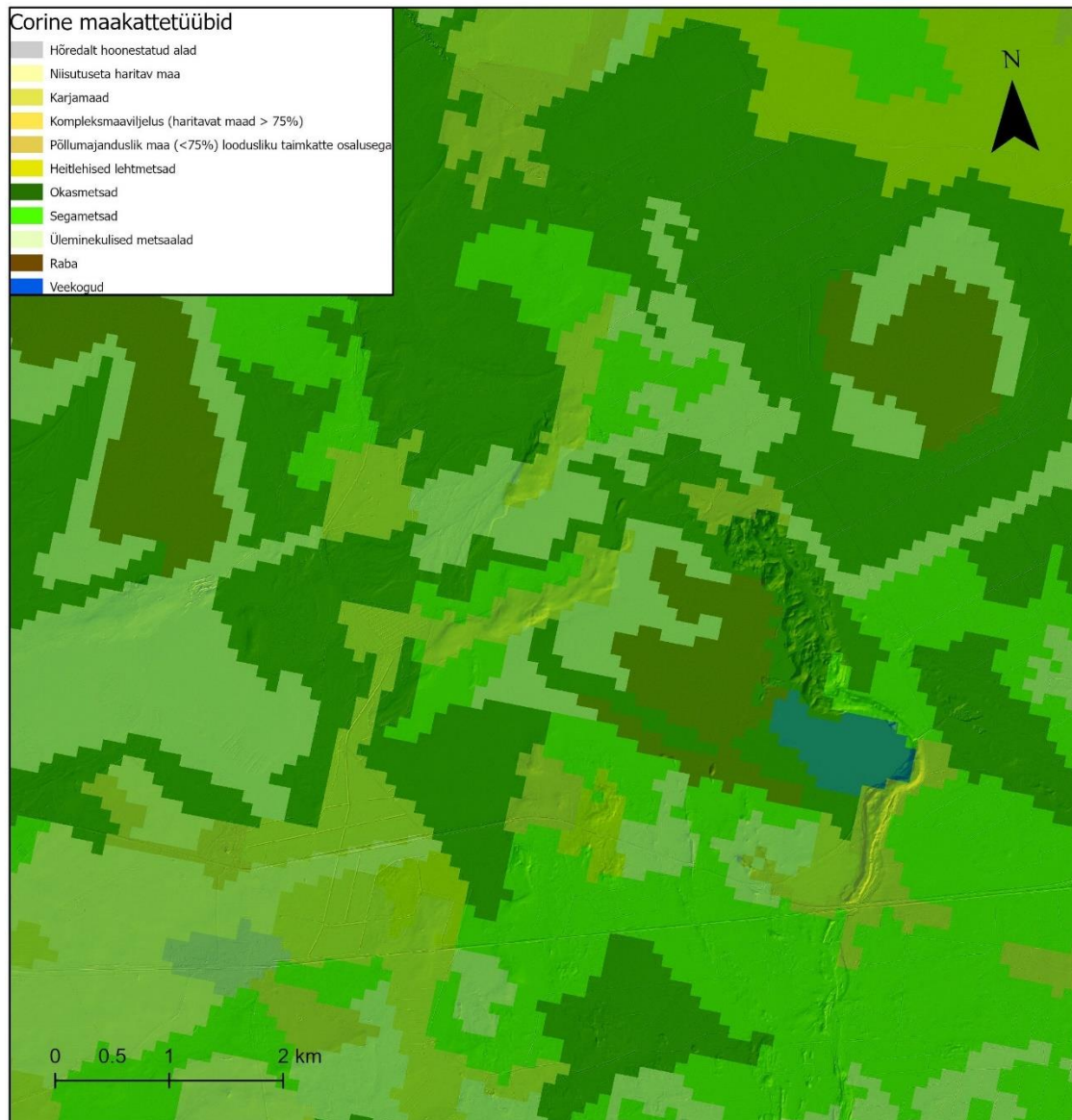
Keskonnaseire infosüsteemis (KESE) on üleval aruanne 2019. aasta Väikejärvede batümeetrilise seire kohta, kust leiab Uljaste järve ühe meetrise resolutsiooniga sügavusandmed, järvenõo kõrgusmudeli ning järvenõo polügonid (Väikejärvede batümeetriline seire).

Töö järgmisesse etappi planeeritud veebilansi arvutamise jaoks, koguti paralleelselt töö põhikäiguga ka erinevaid ilmastikuandmed nagu sademed ja temperatuur. Need saadi Riigi Ilmateenistuse käest, mis on Keskkonnaagentuuri (KAUR) alluses tegutsev üksus. Andmete saamiseks täideti Ilmateenistuse lehel tellimisvorm, märkides ära milliseid andmeid, mis piirkonna ja ajavahemiku kohta sooviti saada. Saadud ilmastikuandmed on kogutud viimase 10 aasta pikkuse perioodi, 2011-2021 jooksul Uljastele lähimas hüdromeetriaajas, mis asub Sämil. (Sämi hüdromeetriaaja..., Keskkonnaagentuur) Joonisel 6 on näha saadud andmete põhjal arvutatud sademete hulgad aastate 2013-2020 kohta ning nende aastate keskmine sademete hulk, mis on 660 mm.



Joonis 6. Sademete hulk ja 2013-2020 sademete hulga keskmine (KAUR)

Teiseks olemasolevaks andmestikuks on Corine 2018. aasta maakattetüüpide kiht, mille abil saaks arvutada evatranspiratsiooni. (Nistor, 2016; Corine Land Cover, 2018) Maakattetüüpide kihiga koos on näha ka kõrgusmudeli reljefivarjutuse kihti, millel on ka mõju auramisele (joonis 7).



Joonis 7. Corine maakattetüübid (Corine Land Cover, 2018)

### 2.3 Uljaste järve ümbruse analüüs

Selleks, et kirjeldada Uljaste järve ümbruse tunnuseid, mis kujundavad pinnavee liikumist, leiti töös erinevad nõlva karakteristikud. Kasutades ArcGIS Pro pinna tööriistakomplekti (*surface toolset*), loodi reljeefi mudelpinnad, kasutades selliseid tööriistu nagu Hillshade, Slope, Aspect ja Curvature. Reljeefivarjutust kasutati, et paremini visualiseerida kõrgusmodelilt reljeefi tunnuseid, mis ei ole muidu silmaga kuigi hästi eristatavad. Teiste karakteristikute nagu nõlvakalde arvutamiseks kasutati tasapinnalist meetodit ning nõlva kallaku muutus esitati kraadides. Tasapinnalist meetodit kasutati ka nõlva ekspositsiooni arvutamiseks. Selleks, et saada veelgi

täpsem ülevaade Uljaste ümbruse reljeefi karakteristikutest, arvutati nõlvakõveruse tööriista kasutades peale nõlvakõveruse ka profiili- ja pinnakumerus.

Uljaste järve ümbruse pinnavee liikumise kirjeldamiseks loodi töös erinevad pinnavee mudelid, kasutades tarkvara ArcGIS Pro hüdroloogia tööriistakomplekti (*hydrology toolset*). Täidetud sulglohkudega kõrgusmudelilt arvutati tööriistaga Flow Direction voolusuunad, kasutades D8 voolumudelit, mis tekitas olulise tähtsusega andmestiku järgnevate mudelite loomiseks. Selleks, et leida voolu akumulatsiooni igasse pikslisse, mille põhjal tekitatakse voolujooned, kasutati tööriista Flow Accumulation, mille sisendiks oli eelnevas etapis arvutatud voolusuunad. Enne lõpliku vooluvõrgu saamist määrati voolule numbriline järjestus, kasutades Stahleri meetodit ning lõpuks vektoriseeriti tulemus Stream To Feature tööriistaga voolujoonteks. Selleks, et näha kui suurelt maa-alalt järv oma vee saab, kasutati Watershed tööriista, enne mida leiti Feature Verticles To Points vahendiga järve väljalaskepunkti vooluvõrgul. Valgla pindala arvutati töövahendiga Calculate Geometry. Kuna toore DEMi põhjal arvutatud vooluvõrk on kohati ebatäpne, parandati seda Pixel Editor tööriistaga.

Selleks, et demonstreerida järve kirjeldamise tööprotsessi võimalikult algsete andmetega, otsustati ise interpoleerida järvenõo kõrgusmudel kasutades KESEst saadud sügavuspunkte. Järvenõo kõrgusmudel tehti kasutades ArcGIS Pro Topo To Raster tööriista, mis interpoleerib sügavuspunktide põhjal hüdrooloogiliselt korrektse rastri (lisa 2) (Topo To Raster, Esri). Valmis saadud mudel asetati kokku ülejäänud kaardilehtede kõrgusmudeliga. Selleks liideti Raster Calculatoriga järvenõogu kokku rastriga, mille väärtuseks on null. Järgmisena määrati Is Null tööriista kasutades järvenõo väärtuseks 1 ja ülejäänud ala väärtuseks 0. Sellise vaheprodukti abil sai kaks erinevat kihti nn kokku sulatada kasutades Con tööriista.

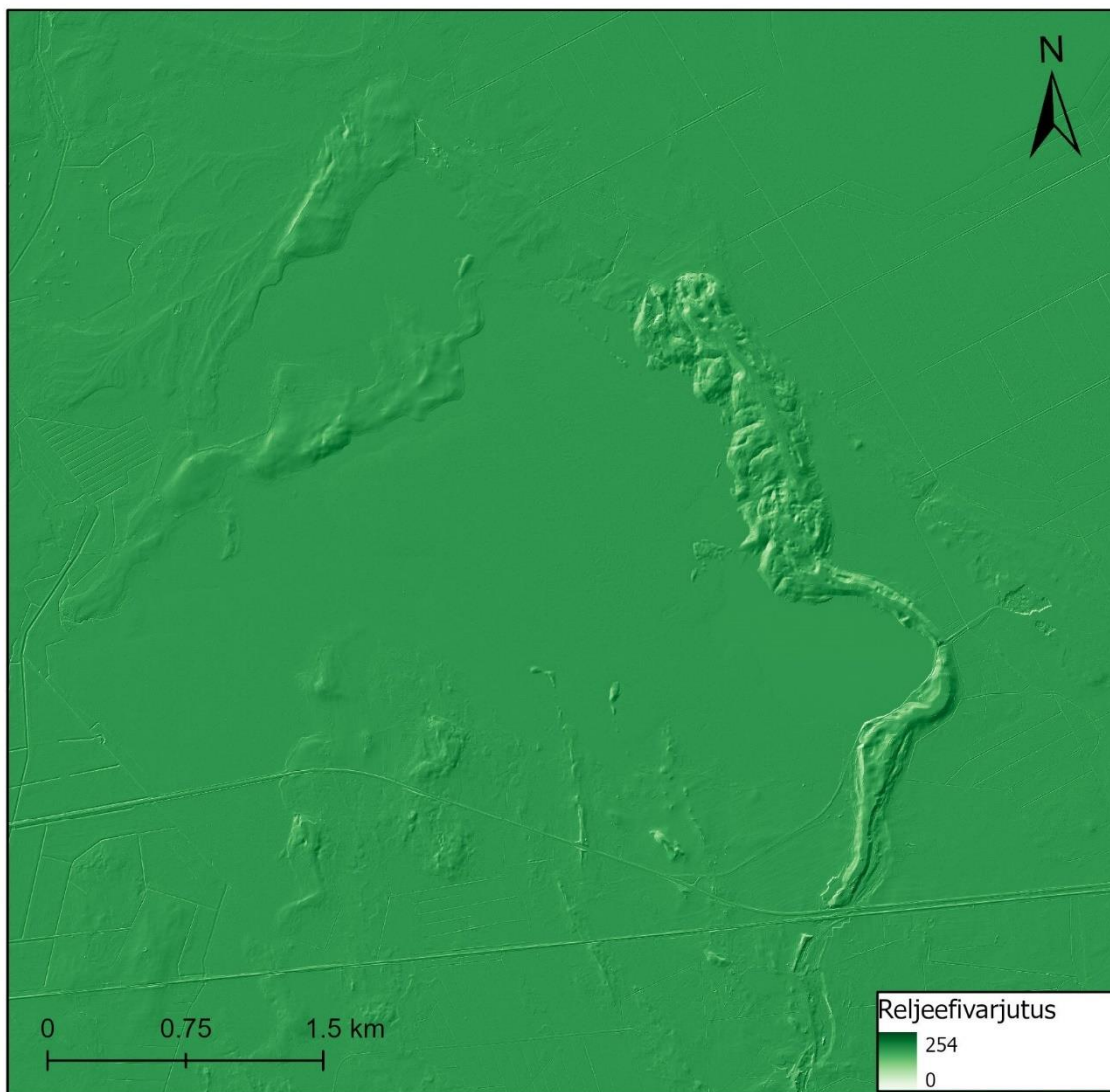
Töös puudutati põgusalt ka põhjavee modelleerimise temaatikat, täpsemalt pinnase materjalide infiltratsiooninäitajate modelleerimist. Internetiallikast pärit andmestiku põhjal omistati igale pinnakattetüübi polügonile selle vee läbilaskvuskiiirus sentimeetrit sekundi kohta (Letts *et al.*, 2000; Hydraulic Conductivity..). Peale seda loodi sellest rasterkiht, kasutades Feature To Raster tööriista ning Raster Calculatoriga arvutati läbilaskvuskiiiruste pöördväärtused. Cost Distance tööriistaga saadi infiltratsiooninäitajate põhjal mudeli.

### 3. Tulemused

#### 3.1 Uljaste järve ümbruse kõrgusmudel

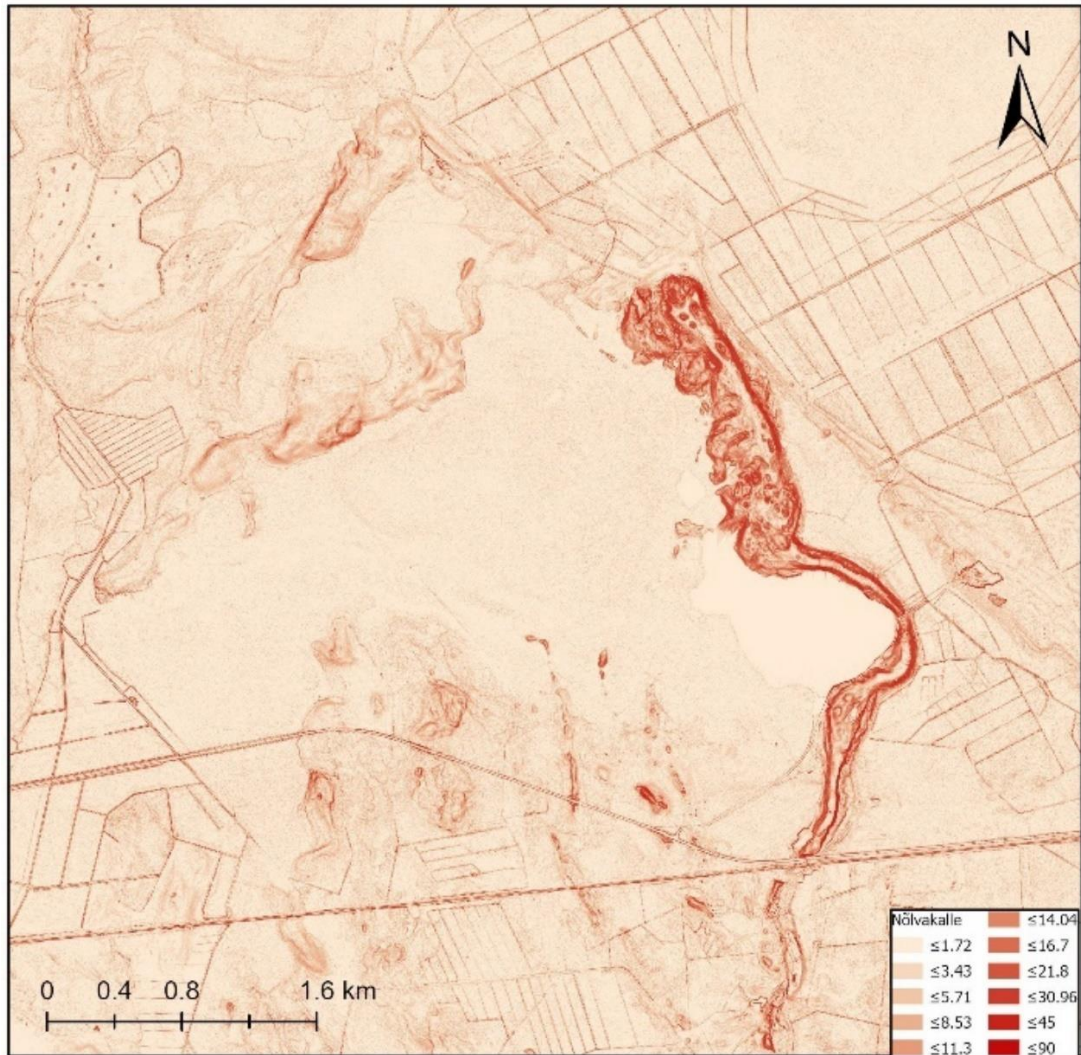
##### 3.1.1 Kõrgusmudeli karakteristikud

Reljeefivarjutus on kõige levinum viis, kuidas paremini visualiseerida kõrgusmudelilt reljeefi tunnuseid. Joonisel 8 langeb pinnasele valgus loode ilmakaarest. Tänu reljeefivarjutusele torkab kohe silma Uljaste oos ja kui palju järsem see pinnavorm on võrreldes ülejäänud reljeefiga. Näha on ka mõned kõrgemad kohad Uljaste rabast loode- ja lõunapool, mis piiravad raba ja selle vee liikumist.



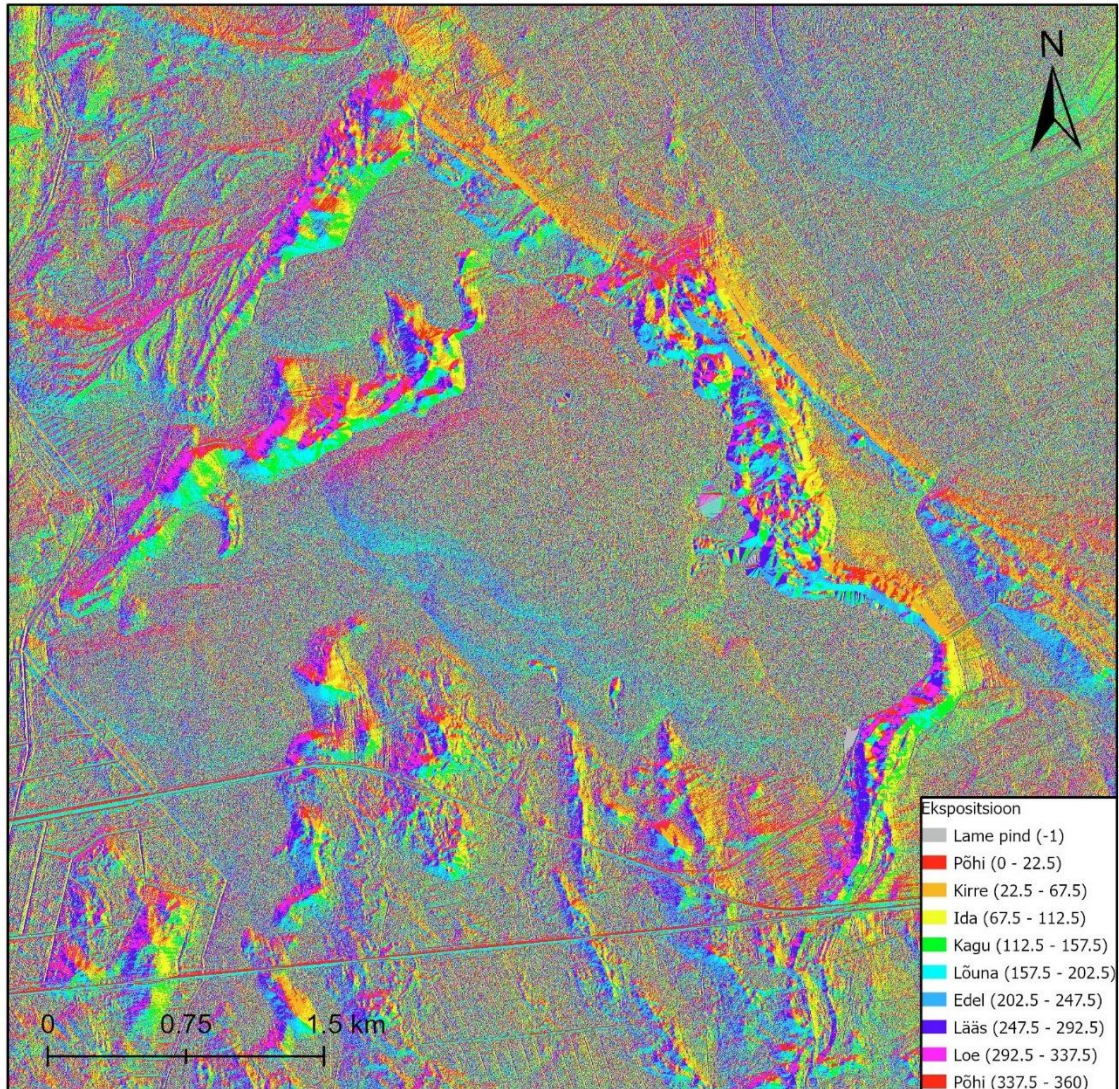
Joonis 8. Reljeefivarjutuse mudel (ArcGIS)

Nõlvakalde mudelil märkab samuti esimesena suurt kontrastsust oosi ja ülejaanud reljeefi vahel (joonis 9). Nõlvakaldega saab näha ka väiksemaid erinevusi pinnamoos, mis võrreldes reljeefivarjutuse mudeliga annab täpsema ülevaate.



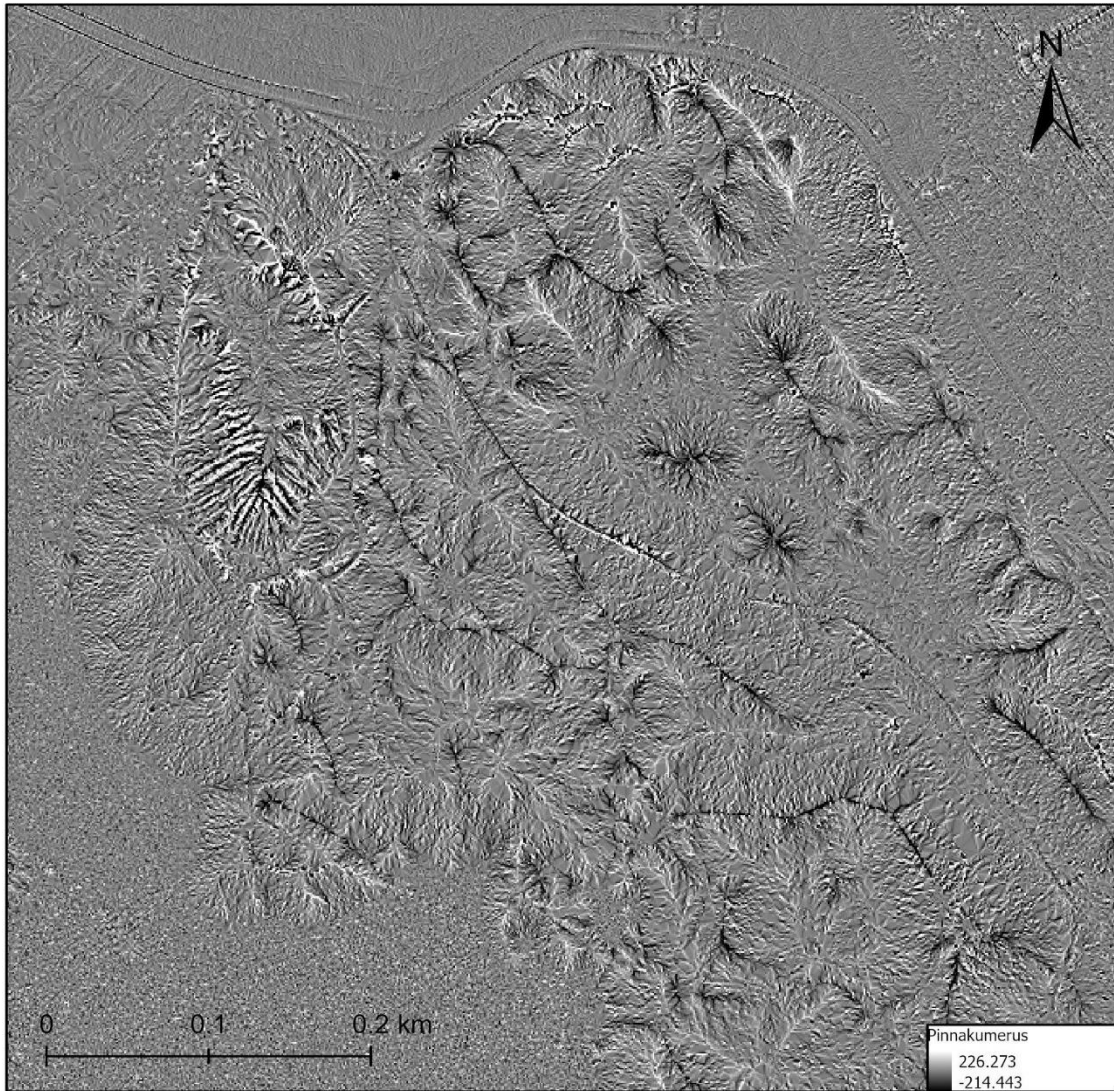
Joonis 9. Nõlvakalde mudel (ArcGIS)

Nõlva ekspositsiooni mudelilt on näha, mis suunas Uljaste ümbruse nõlvad paiknevad (joonis 10). Võib öelda, et sealsed nõlvad paiknevad rohkem põhja-lõuna suunas. Nõlva ekspositsioon annab informatsiooni ka selle kohta, millised nõlvad saavad rohkem päikesevalgust ning millised vähem. Päikesevalgusest on mõjutatud ka maakatte tüübid, mis omakorda mõjutavad evapotranspiratsiooni.

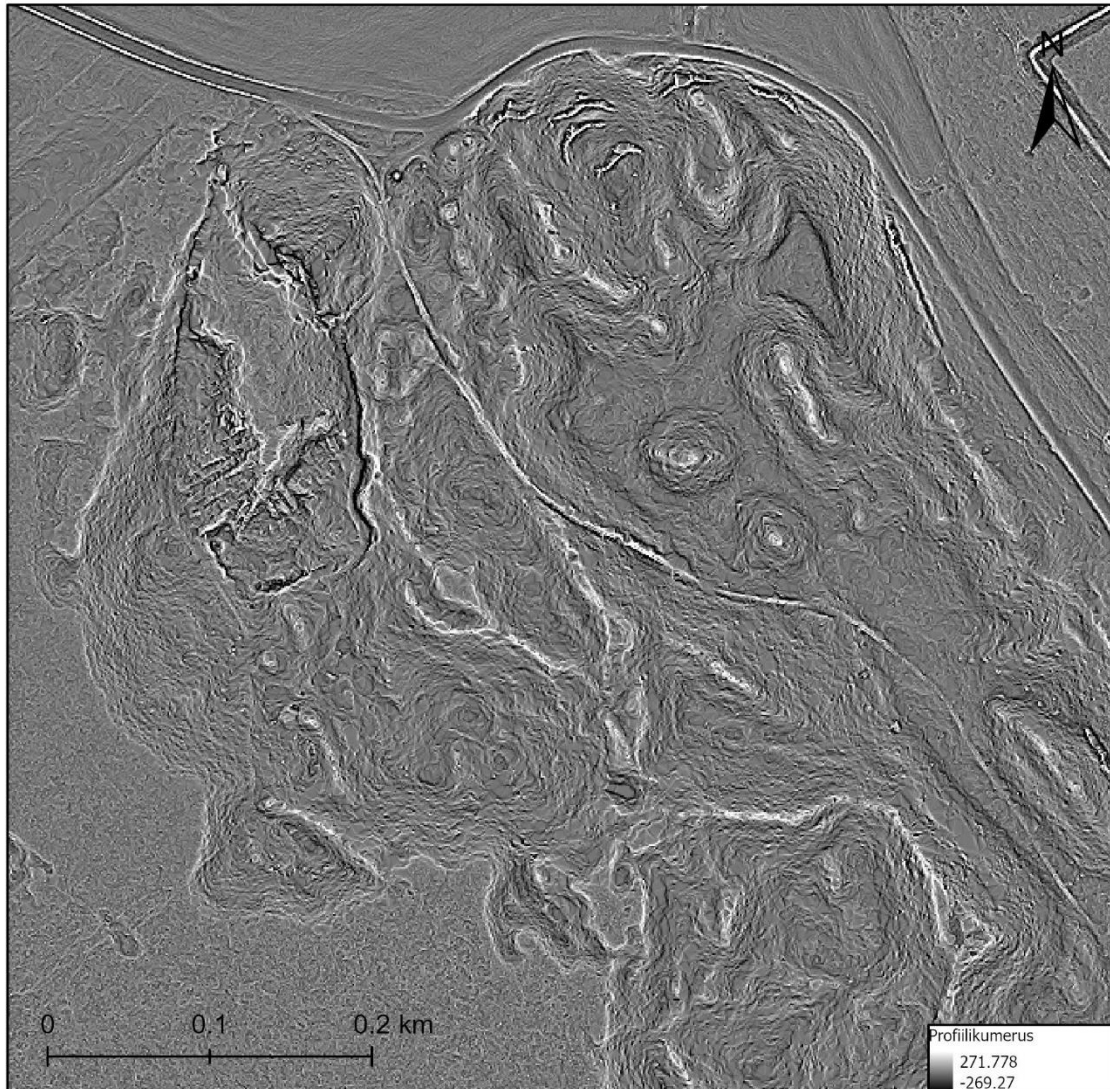


Joonis 10. Nõlva ekspositsiooni mudel (ArcGIS)

Nõlvakõverusega koos arvatatud pinna- ja profiilikumeruse mudelitelt eristuvad pinna karakteristikud veelgi täpsemalt. Kuna kõige paremini näeb neid järsema nõlvakaldega pinnavormilt ja üpriski lähedalt vaadates, valiti jooniste näideteks Uljaste oosi kõige loodepoolsem tipp. Pinnakumeruse mudel näitab eriti hästi oosi harjad ja orud (joonis 11). Profiilikõveruse mudelilt on aga näha, kus asuvad kumerad ja nõgusad nõlvad (joonis 12).



Joonis 11. Pinnakumeruse mudel (ArcGIS)

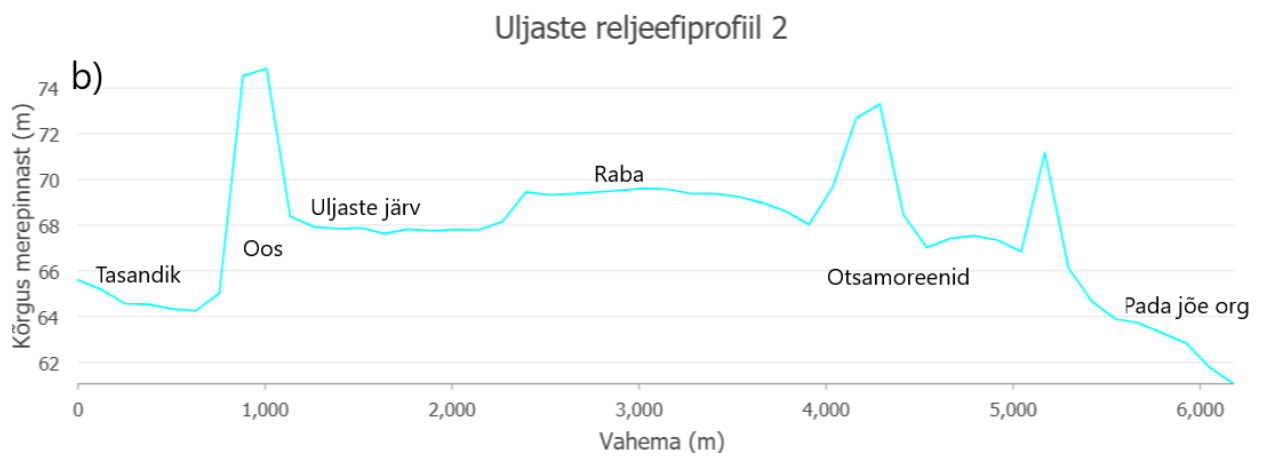
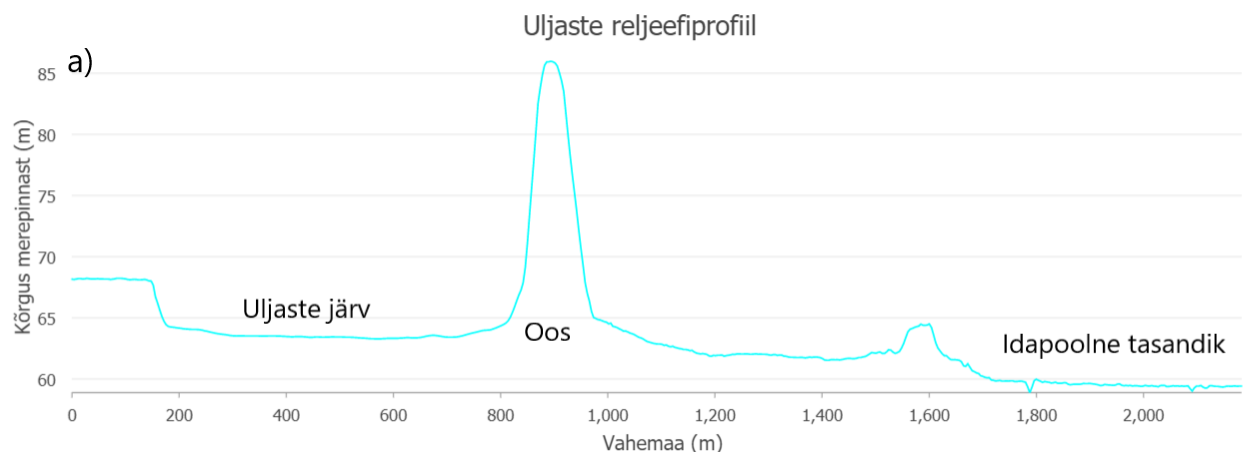


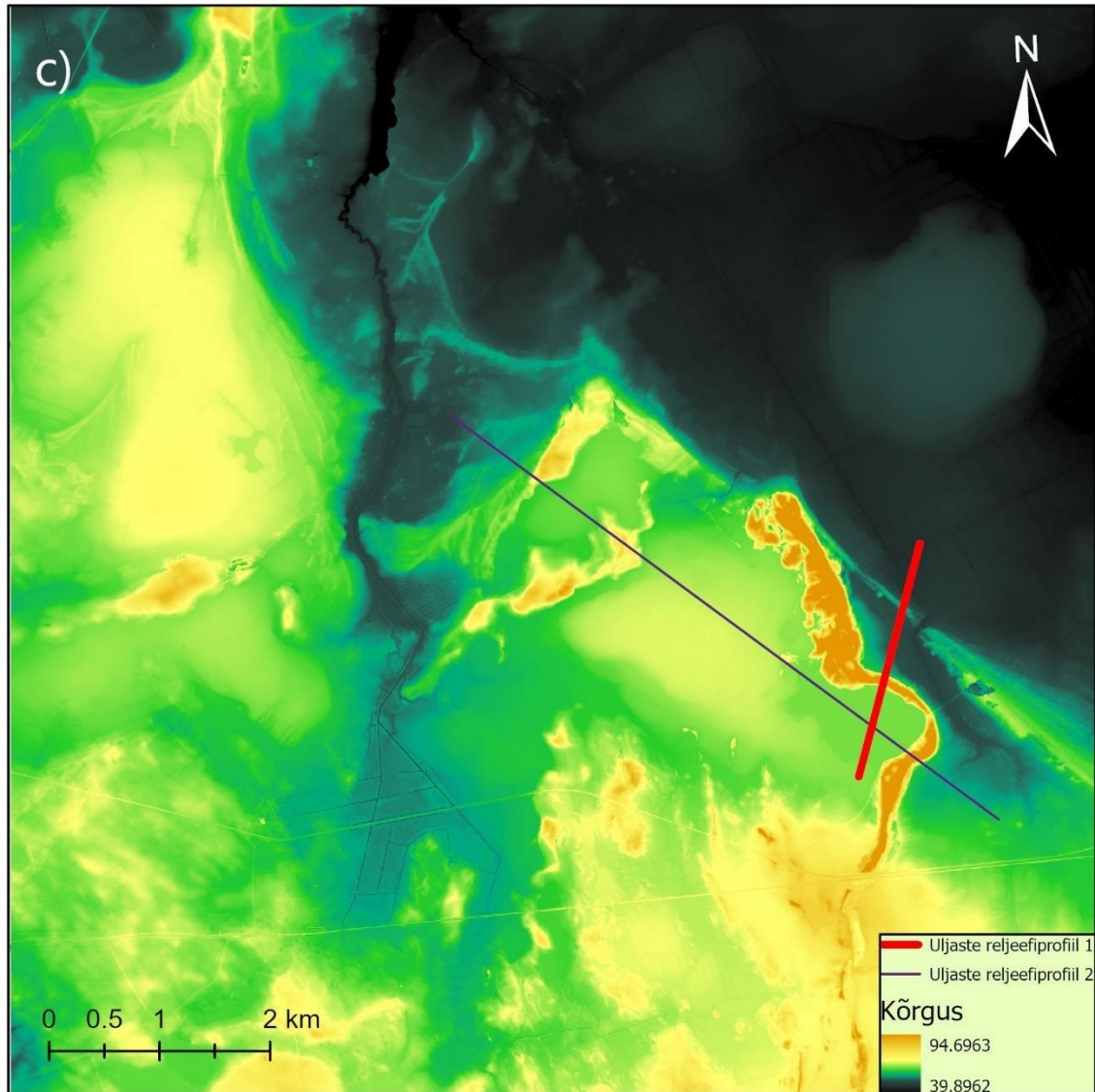
Joonis 12. Profilikõveruse mudel (ArcGIS)

### 3.1.2 Uljaste ümbruse reljeefiprofiilid

Kõrgusmudeli põhjal tehtud reljeefiprofiililt on näha, miks järve ökosüsteemi säilitamisel on oosil eriti tähtis roll. Kuna järvest ida poole jääv tasandik on veepinnast ligi viis meetrit madalamal, siis oosi paiknemine mööda järve külge takistab seda tühjaks voolamast (joonis 13a). Suurte kõrguste vahe tõttu saab ka aru, kui ohustatud on järv põhjaveetaseme muutuste suhtes. Joonisel 13b on näha reljeefiprofiili alates oosi kõrval olevalt tasandikult, üle raba piiravate otsamoreenide kuni Pada jõe oruni. Joonisel on hästi ära näha kupli kujuline profiil, mida liigestavad kõrgemad pinnavormid. Lisaks on näha, et ka raba pind on kupli kujuga ning et sarnaselt oosi ja Uljaste järve olukorrale, on ka seal tegemist sellega, et ilma kõrgema pinnavormita valguks sealt vesi liialt

kiiresti ära. Joonisel 13c on aga ära märgitud, kust täpsemalt kõrgusmudeli pealt reljeefiprofiilid tekitatud on.





Joonis 13. Uljaste järve ja selle lähikümbruse reljefi profiil (a), tasandikult kuni Pada jõe oru reljef (b), reljefiprofiilide paiknemine kõrgusmudelil (c) (ArcGIS)

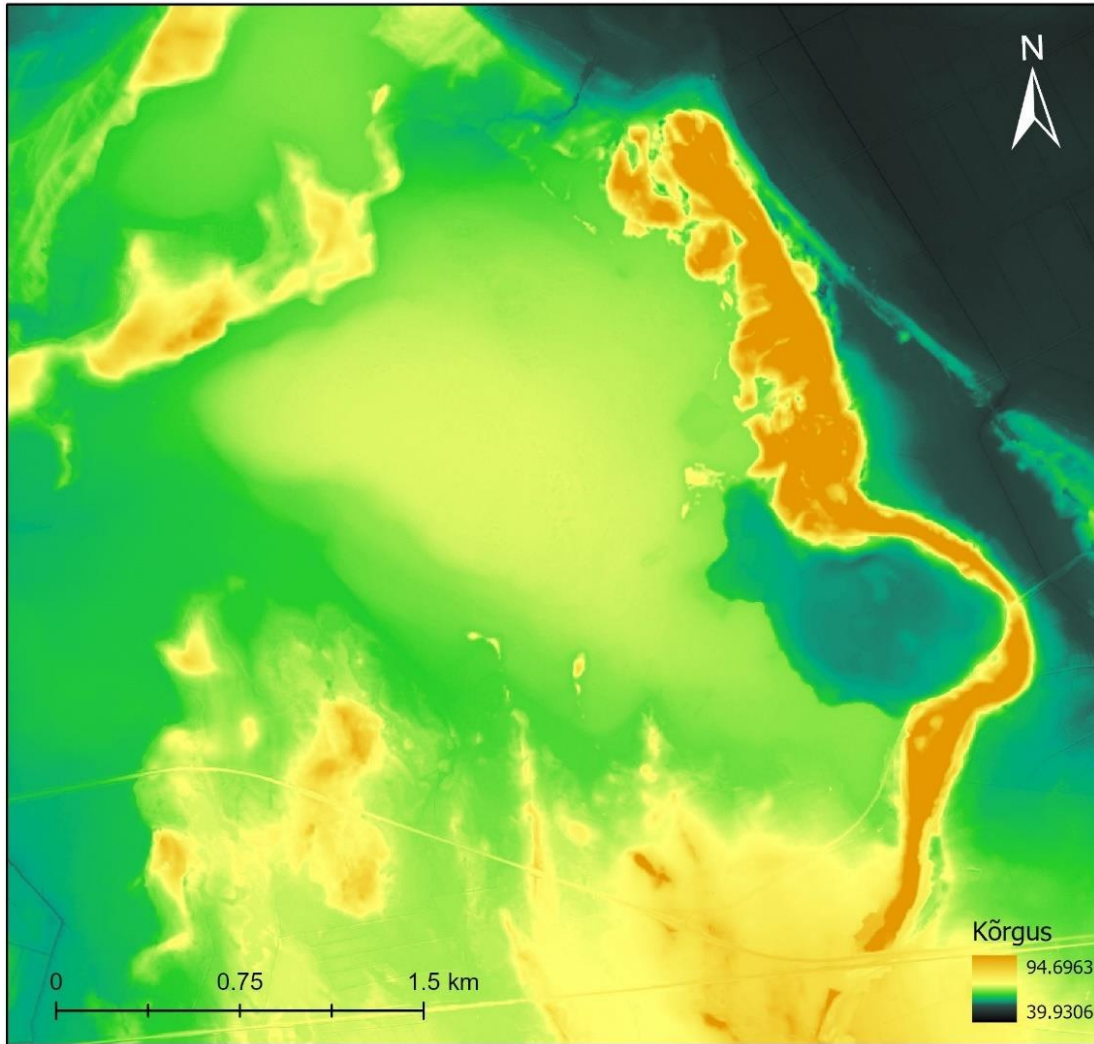
### 3.1.3 Mahuarvutused

Kasutades pinna mahu arvutamise tööriista (*surface volume*) arvutati nii Uljaste järve maht kui ka oosi pinnasemaht. Oosi maht saadi digides kõrgusmudeli pealt oosi kuju ning seejärel kasutati seda mahu arvutamise tööriista sisendina. Järve maht saadi aga kasutades sisendina juba eelnevalt sügavuspunktidest interpoleeritud kõrgusmudelit. Saadud andmete põhjal on oosi pinnasemaht  $16151039.4 \text{ m}^3$  ning järve maht  $2191693.2 \text{ m}^3$ .

### **3.1.4 Kõrgusmudel koos järvenõoga**

Uljaste järve sügavuspunktide põhjal interpoleeritud järvenõo kõrgusmudel illustreerib, milline näeks järve põhi välja siis, kui sellest oleks vesi eemaldatud (joonis 14). Sügavuspunktid on saadud Hydrosurveyor M9 mitmekiirelise sonariga mõõdistamise teel, mille GPS seade fikseerib punktide asukohad automaatselt. (Vandel, 2020) Sonariga kogutud punktidest on interpoleeritud raster, mis omakorda uuesti punktide kujule viidi.

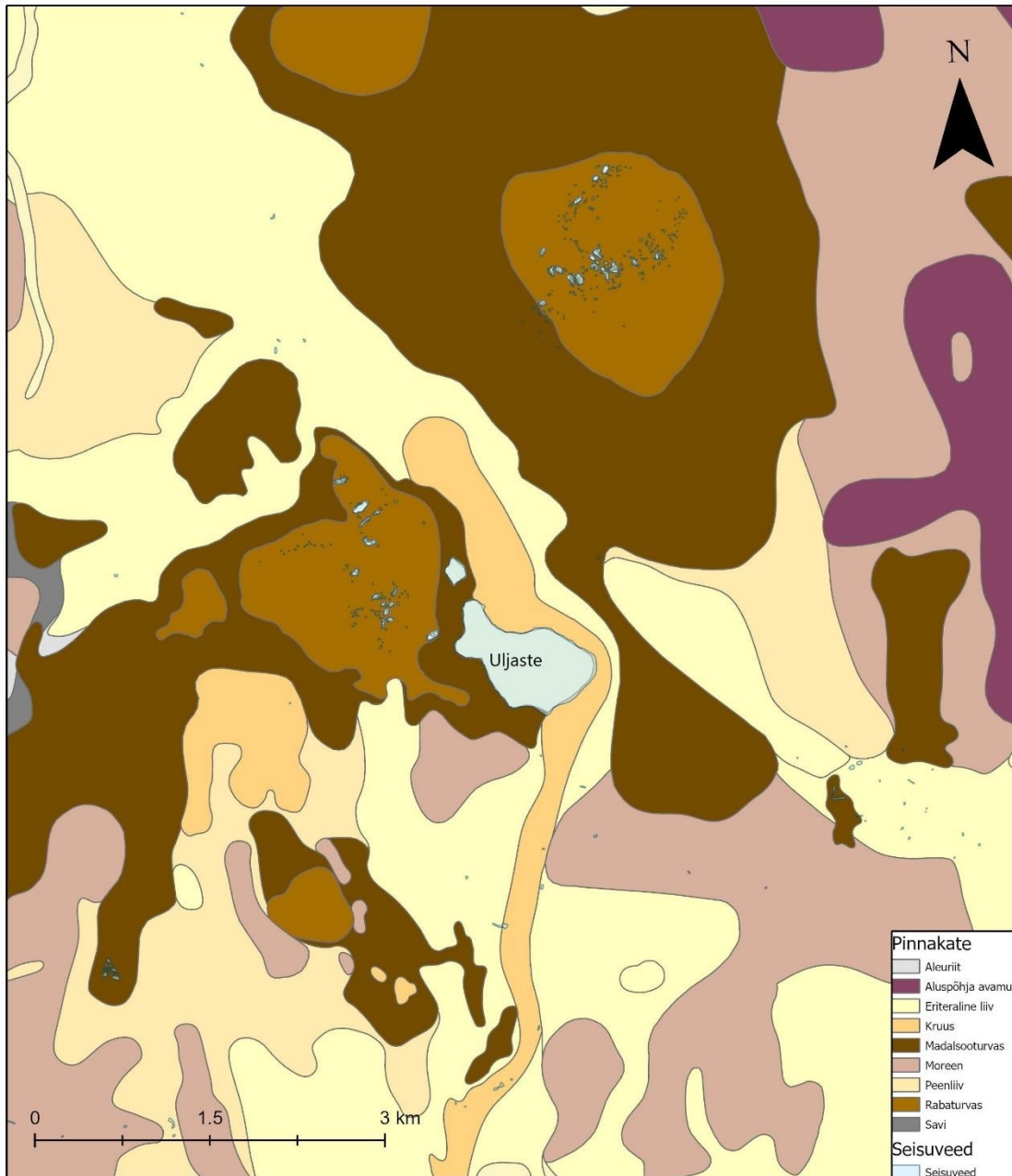
Järvenõgu võib täpsemalt näha lisas 2 joonisel. Järve võib laias laastus kaheks jagada. Suurem ümmargune tuumikala, milles on suur osa järve veest ning ka järve sügavamad alad. Järvepõhja keskosa on lamedam koos paari märgatavalt kõrgema alaga. Kitsam ja madalam osa järvest on loodesse sopistunud. Järvenõo idaosa moodustab tõenäoliselt osaliselt ka veedalune Uljaste oosi külg. Saadud mudelilt on ka näha, kui sügavale ulatub järve põhi võrreldes ümberkaudse alaga. Lisaks on järve lõunaosas kunagi ilmselt olnud vooluava, mis on nüüdseks kinnikasvanud.



Joonis 14. Uljaste järvenõgu koos ülejäänud kõrgusmudeliga (Kõrgusmudel: Maa-amet 2021)

### 3.1.5 Uljaste järve ümbruse pinnakate

Uljaste järve ümbruse pinnakate koosneb mitmetest erinevatest materjalidest. Kõige rohkem on erinevat turvast, mida leidub suurte aladena (joonis 15). Nagu näha, siis kruusast koosnev oos ja eriteralisega liivaga riba eraldavad kahte rabamassiivi.



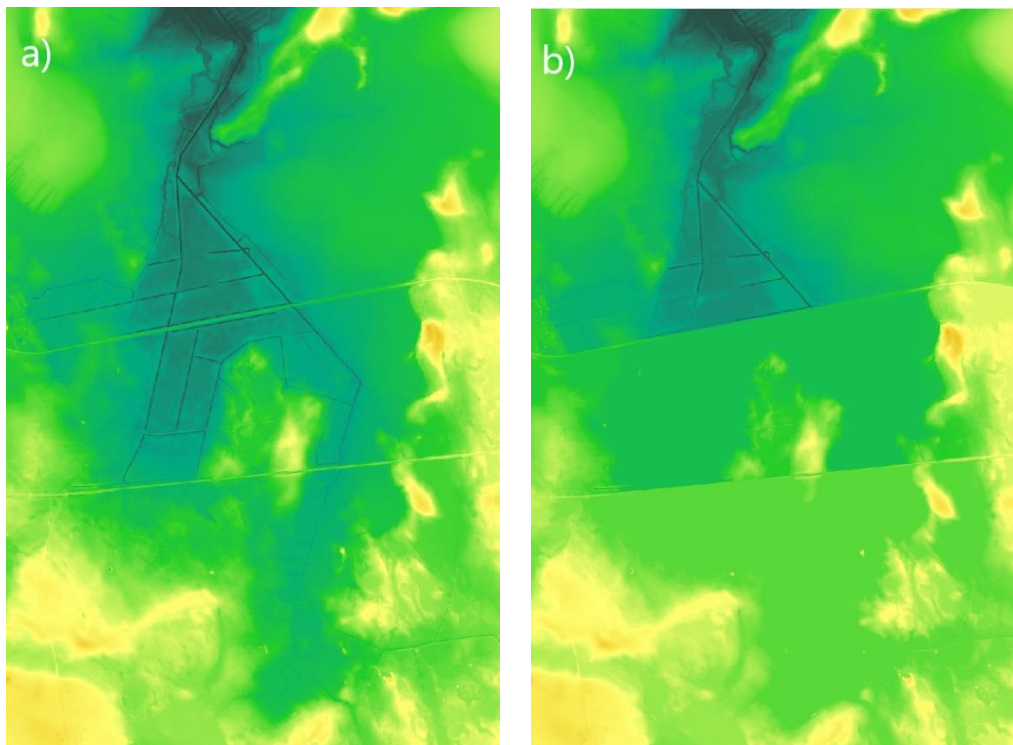
Joonis 15. Uljaste järve ümbruse pinnakattekihid (ArcGIS)

### 3.2 Uljaste järve ümbruse pinnavee mudelpinnad

#### 3.2.1 Sulglohud ja haripunktid

Kõrgusmudelilt sulglohkude ja haripunktide eemaldamisel oli oluline osa voolujoonte arvutamises. Joonis 16 on näha, kuidas sulglohkude täitmine muudab kõrgusmudeli karakteristikuid nii, et toimuks ülevool üle teatud takistuste. Taolisi olukordi on mudelil palju,

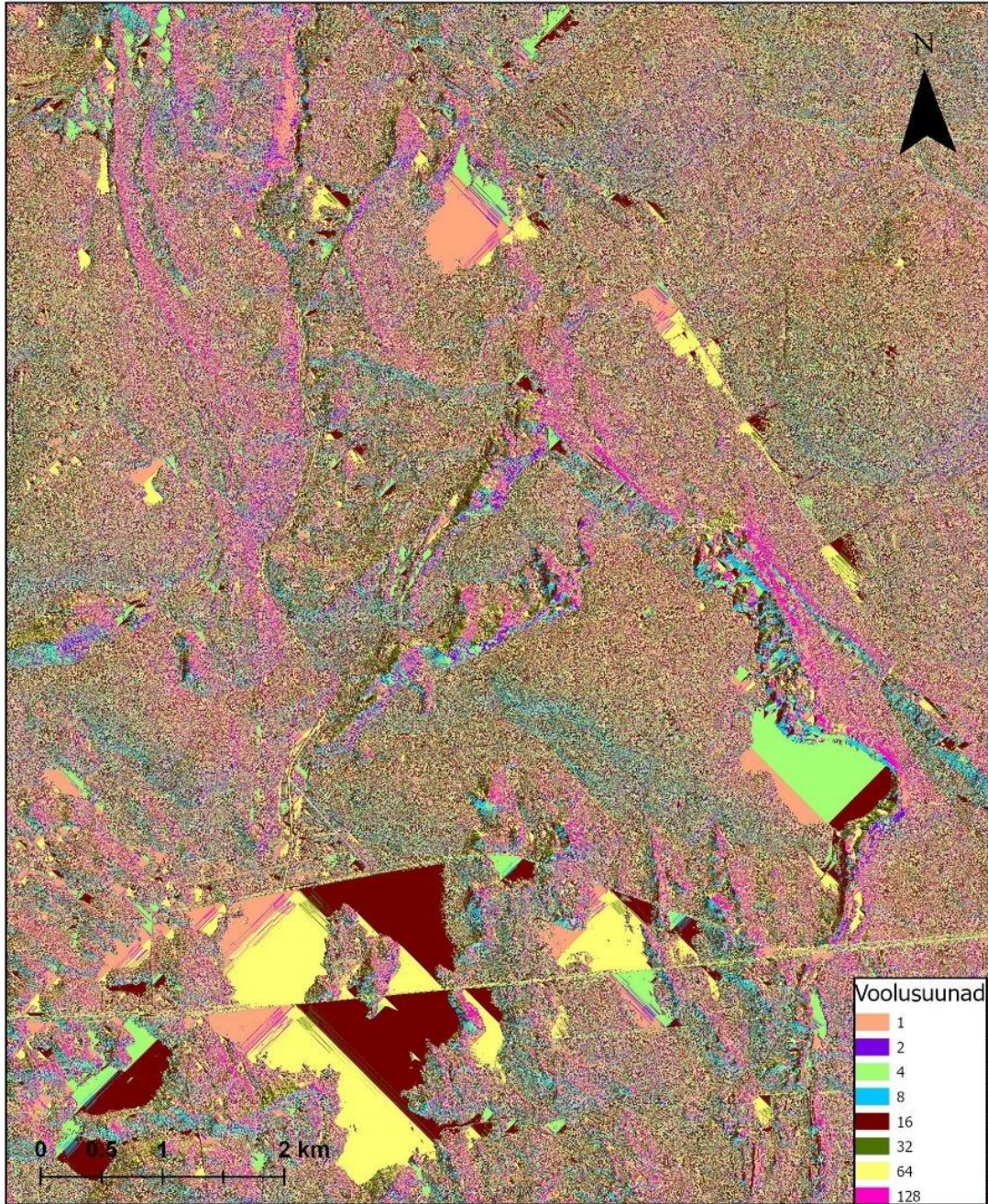
kuid selgelt eristatava erinevuse näitamise eesmärgil valiti just see. Selles olukorras on tegemist maantee ja raudteega, mis mõlemad on voolu allapoole liikumisel takistuseks. Jooniselt on näha kuidas täite tööriist lahendab probleemi tõstes pikslid takistusega samale tasemele nii, et hakkab toimuma ülevool. Kuigi antud olukorda saaks paremini lahendada lisades käsitsi sobiva sügavusega truubi kohad läbi teede, on see töö mahukas ning igale poole ei jõuaks seda teha.



Joonis 16. Täitmata kõrgusmudel on näha joonisel (a) ja täidetud joonisel (b) (ArcGIS)

### 3.2.2 Voolusuunad

Voolusuundade mudeli tulemust on näha joonisel 17. Sõltuvalt sellest, mis suunas vool toimub, on pikslite värvid nii nagu on näidatud joonisel 5 ja joonise 17 legendis. Mudeli karakteristikud eristuvad hästi seda kaugemalt vaadates, sest siis on näha, kuidas lähestikku paiknevad samasuunalised pikslid moodustavad erinevaid kujutisi. Mudeli järgi paistavad hästi silma kirde suunalised voolusuunad ja ka lõuna ning edela suunalised, millest võib omakorda järeldada, et selliste suundadega nõlvu esineb rohkem. Lisaks on kohe silma torkavad ühtlaselt siledad alad, mis on kõrgusmudeli täitmisest tekkinud.

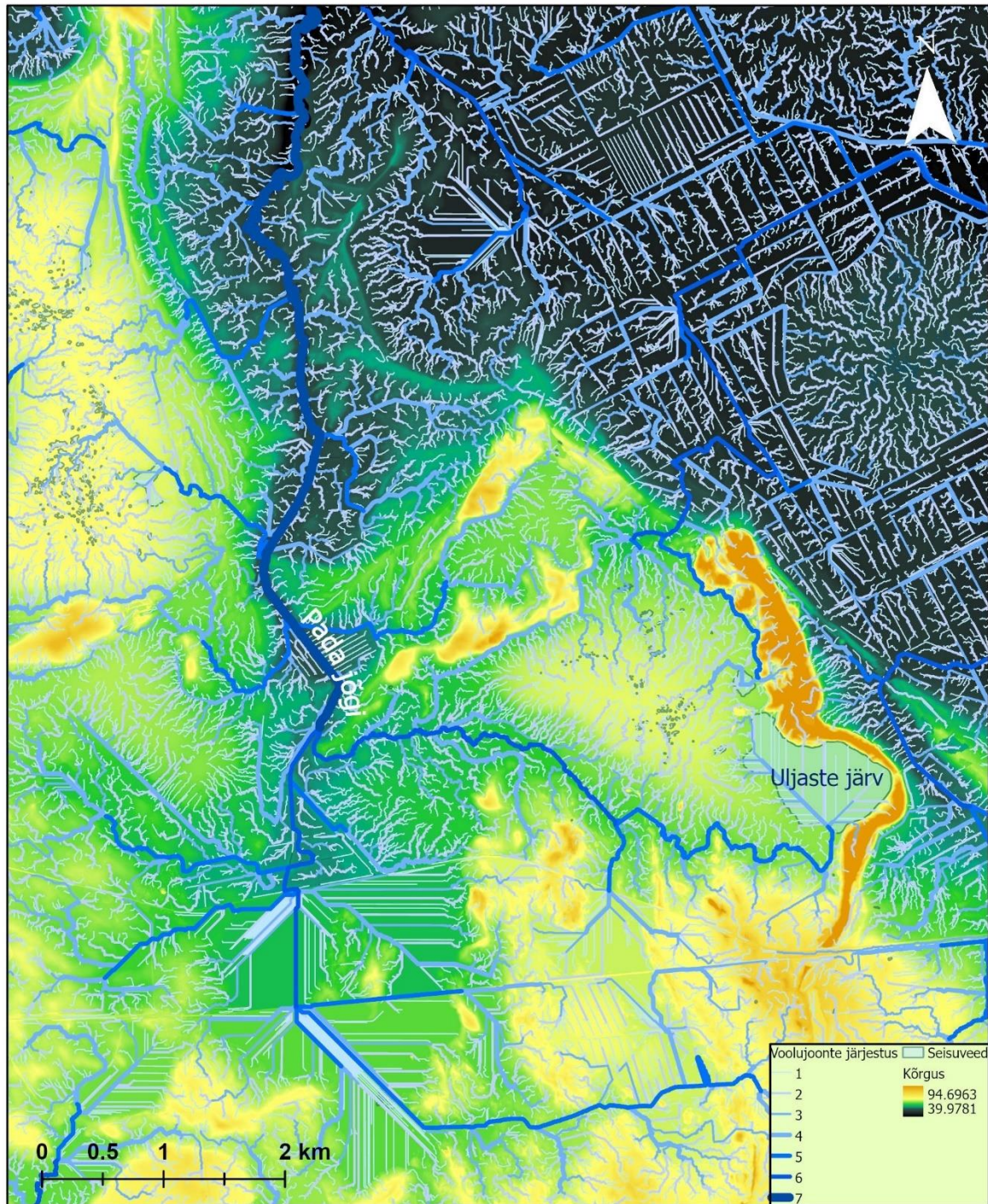


Joonis 17. Voolusuundade mudel (ArcGIS)

### 3.2.3 Vooluvõrk

Uljaste järve ja selle ümbruse pinnavee liikumisest annab parima ülevaate vooluvõrgu mudel. Kuigi Uljaste järvest ei ole otseselt tuvastatud vett välja voolamas, siis joonis 18 mudeli järgi on näha, et mingi osa siiski valgub järvest madalamal asuva pinnase kaudu Pada jõkke. Lisaks ilmestab vooluvõrk koos kõrgusmudeliga hästi Pada jõe orgu ning seda, kuidas vesi liigub sellesse

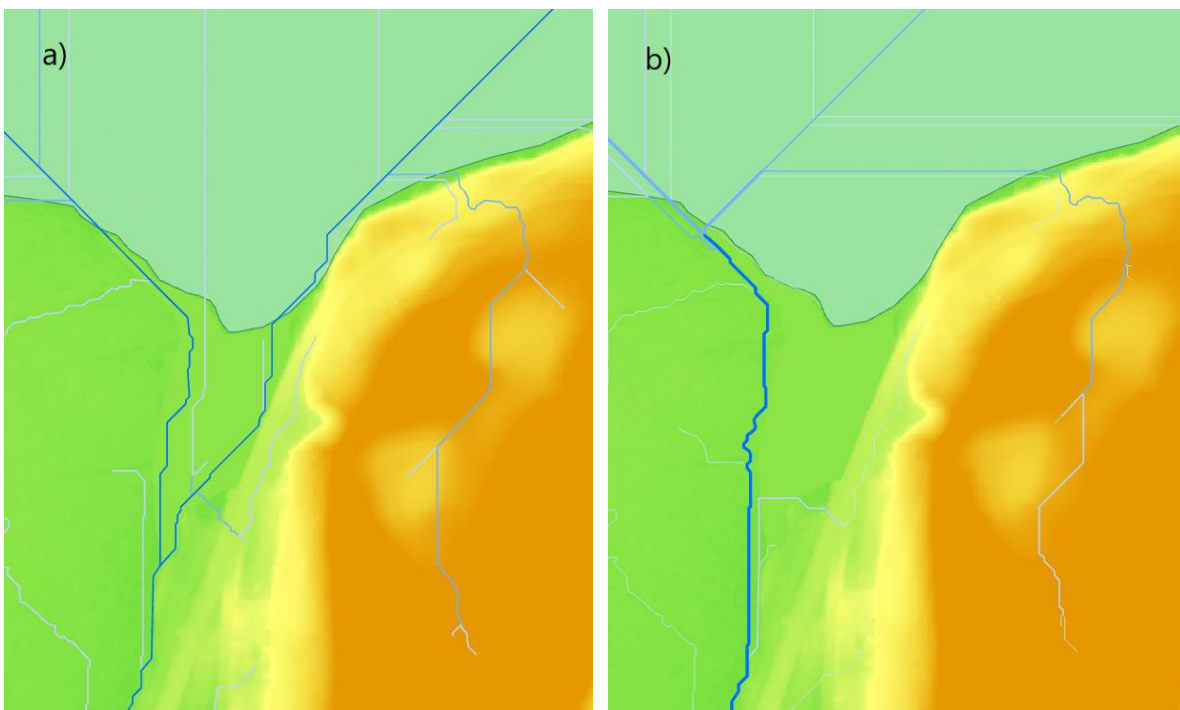
ümberkaudsetelt kõrgematelt aladelt. Mudeli järgi imub suurem osa Uljaste raba veest koos rabajärve ja laugastega ära idapoolsele tasandikule. Hästi on mudelil välja joonistunud ka idapoolsest tasandilt liigniiskuse eemaldamiseks loodud kuivenduskraavide võrgustik, mille põhjal saab aru, et seal on tegemist kõrge põhjaveetasemega.



Joonis 18. Vooluvõrgu mudel (ArcGIS)

### 3.2.4 Järvest ülevoolu parandamine

Selleks, et voolujoonte võrk näitaks voolu üle Uljaste järve õigest kohast, viidi töös läbi DEMi parandused. Nagu on näha joonisel 19a, koonduvad kõik voolujooned järvest tükk maad eemal. Seda põhjustab see, et kõrgusmudeli täitmise tööriist Fill tõstab järve välist madalamat ala nii palju, et vool saaks sealt üle minna. See annaks aga vale tulemuse valgla arvutamisel, kuna tegelikkuses asub punkt, kuhu koonduvad kõik järve voolujooned ning hakkab toimuma väljavool, hoopis järve kalda ligidale (joonis 19b). Selle lahendamiseks muudeti Pixel Editor tööriistaga probleemse ala pikslite väärtused suuremaks, et Fill tööriist ei peaks pärast seda ala puutuma.

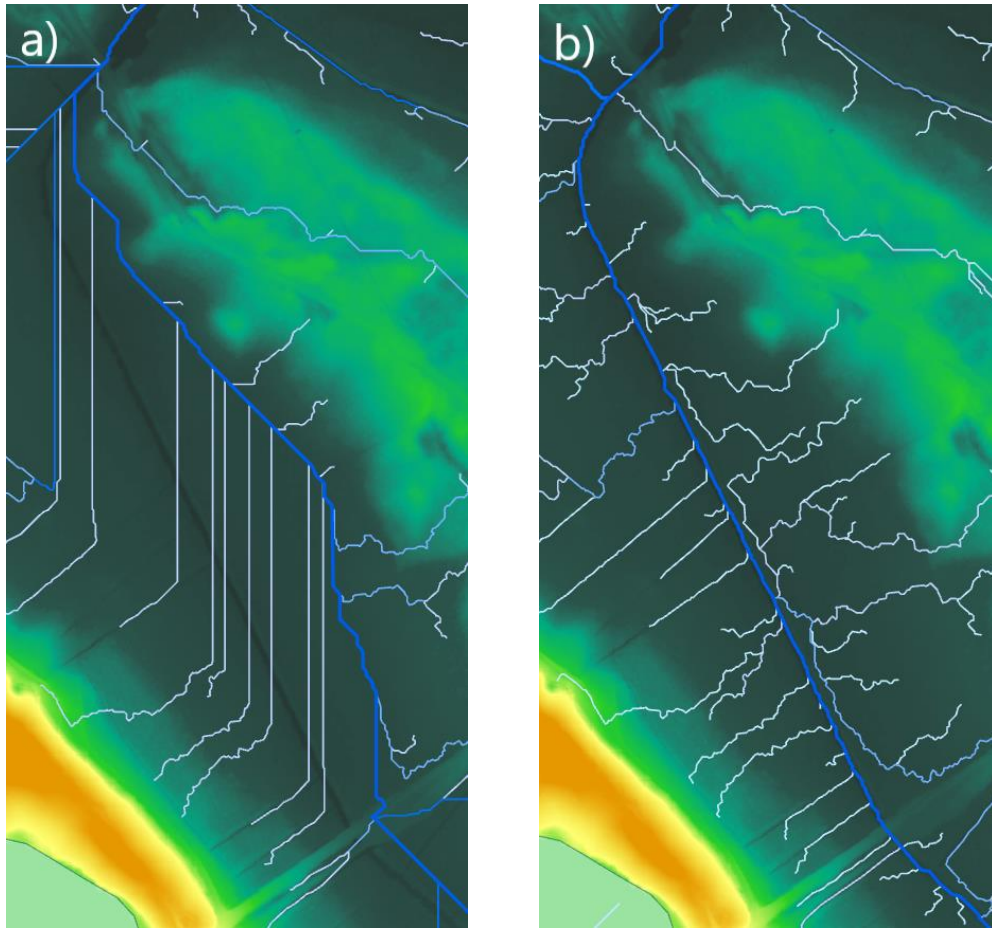


Joonis 19. Parandamata DEMi ülevool Uljaste järvest (a) ja parandatud mudeli ülevool (b) (ArcGIS)

### 3.2.5 Kraavitrüüpide parandamine

Nagu juba eespool mainitud, tekitab kõrgusmudeli täitmine mõnikord ebatäpseid tulemusi seoses erinevate takistuste ületamisega. Joonisel 20 on näha, miks ei tohiks pimesi usaldada eeltöötluseta kõrgusmudelilt arvutatud voolujooni, sest need ei pruugi kokku langeda tegeliku voolu liikumisega looduses. Põhjuseks kõrgusmudelil nähtamatud teede alused trüübid, mis ühendavad omavahel kuivenduskraave. Probleemi lahendamiseks kasutati Pixel Editor tööriista, millega saab muuta

soovitud pikslite väärtusi. Määrates nendele pikslitele uue kõrgusväärtuse, märgistati ala, kuhu need soovitakse lisada. Nii lõigati tee sisse auk kohta, kust looduses voolab vesi läbi truubi. Joonisel 20a on näha, kuidas ilma eelneva protseduurita ei voola vesi läbi sealt, kust ta peaks ning voolujooned ei järgi õiget kraavi. Joonisel 20b on aga voolujooned ilusti kraavide järgi arvutatud.

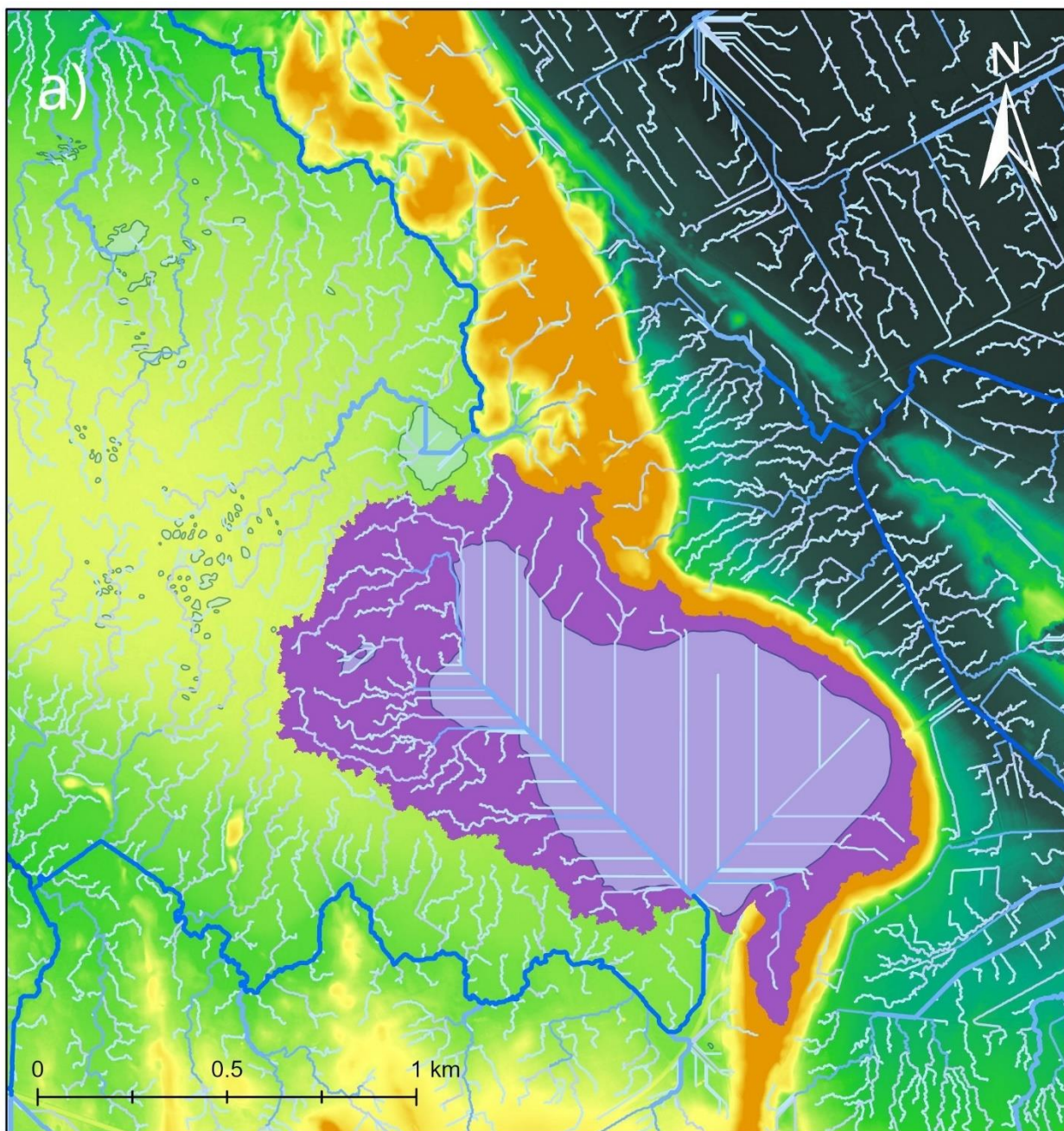


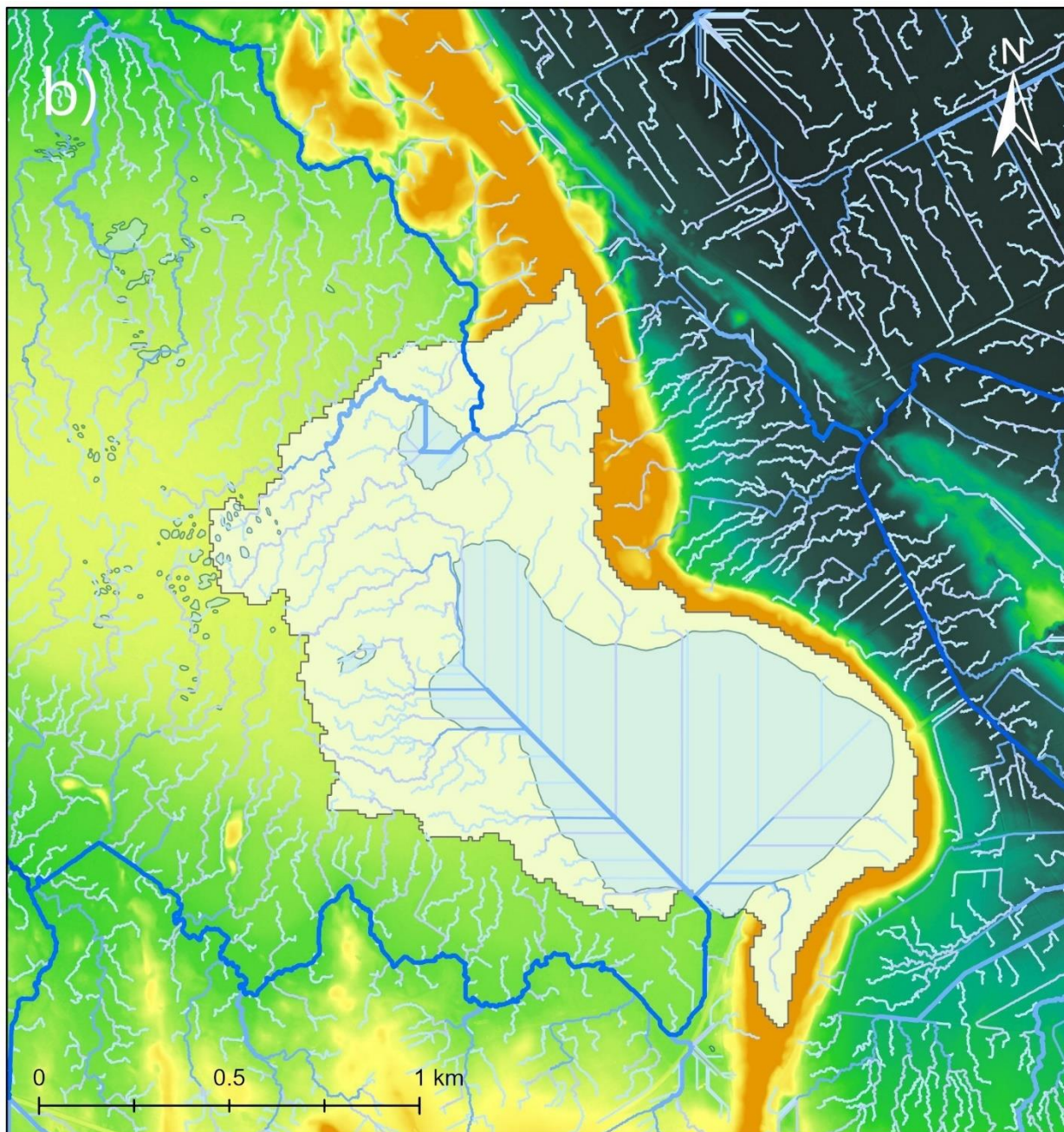
Joonis 20. Parandamata kraavitruupidega kõrgusmudeli põhjal loodud vooluvõrk on näha joonisel (a) Parandatud versioon on näha joonisel (b) (ArcGIS)

### 3.2.6 Uljaste järve valgla

Valgla mudel näitab, kui suurelt maa-alalt Uljaste järve vett voolab. Nagu on näha joonisel 21, siis suurem osa sellest valgub raba ning palju ka oosi pinnase kaudu. Võrdlusena on välja toodud ka Eesti Looduse Infosüsteemist (EELIS) pärit Uljaste järve valgla kiht, mis erineb selle uurimistöö valglast silmatorkavalt selle poolest, et võtab arvesse ka eemal asuva rabajärve. Kõrgusmudeli põhjal arvutatud vooluvõrgu järgi ei tundu rabajärv Uljastesse voolavat, vaid

tõenäoliselt infiltreerub aeglaselt. Selles töös arvatud Uljaste järve valgla pindalaks saadi 1,3 km<sup>2</sup>.





Joonis 21. Uljaste järve valglate mudelid. Joonisel (a) on selle uurimistöö vooluvõrgu põhjal arvutatud valgla, joonisel (b) EELIS valgla

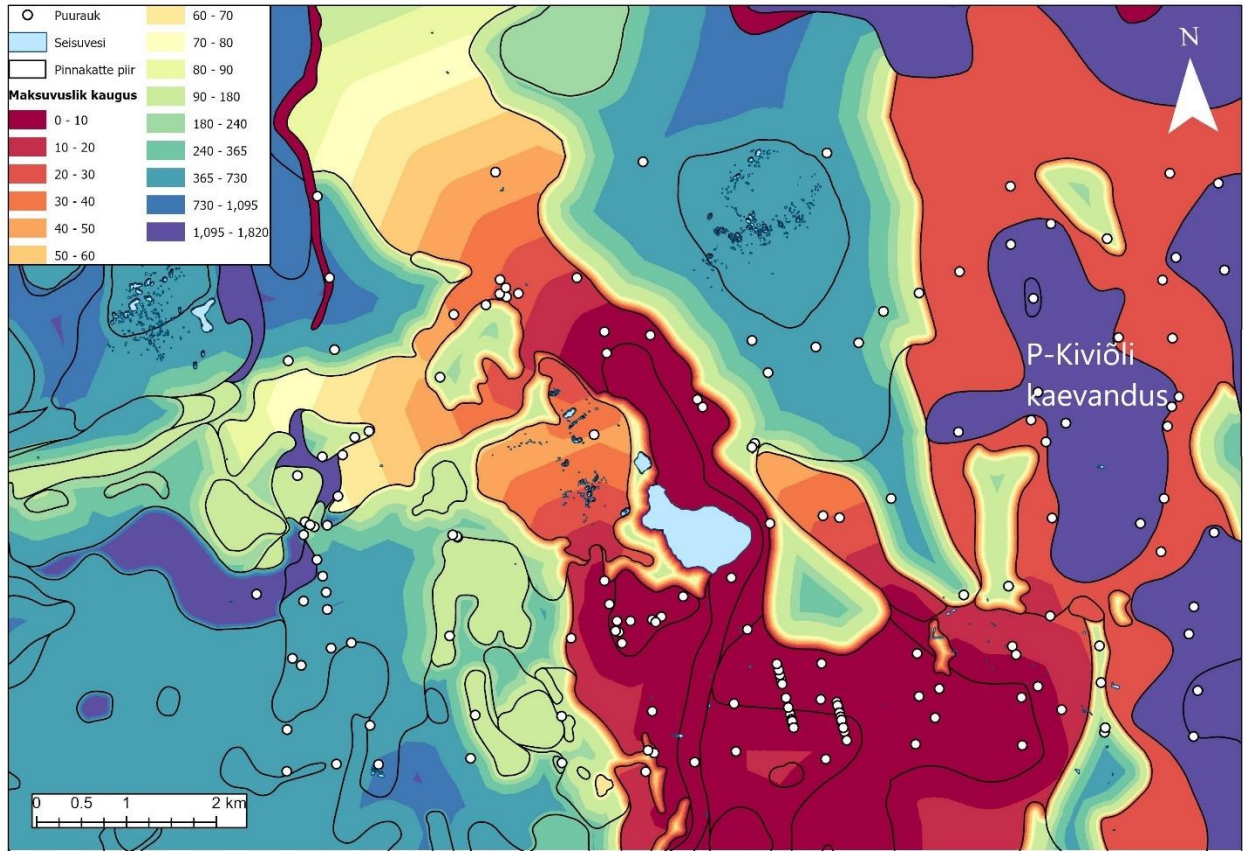
### 3.3 Uljaste järve ümbruse infiltratsiooninäitajad

#### 3.3.1 Hüdrogeoloogia analüüsi tulemus

Veevoolu süsteemide puhul on oluliseks aspektiks pinnase võime vett edasi juhtida (Klute, 1965). Mida savikam, seda halvemini laseb vett läbi ning mida liivasem, seda suurem läbilaskvusvõime. (Adeyeye *et al.*, 2019) Töös arvatati Cost Distance tööriistaga mudel, mis näitab, kui kaua aega läheb veel Uljaste järvest imbumiseks mööda erinevaid pinnakattekihte, millele on mudelis omistatud selle vee juhtivuse aeg sentimeetrit sekundi kohta (joonis 22). Kuigi tegemist on infiltratsiooni näitajatega, mis peaksid näitama vertikaalset imbumist pinnasesse, on mudelil näha horisontaalne valgumine. Selletõttu on tegemist suure lihtsustusega ning analüüs on tehtud üldpildi saamiseks, et näha mis suunas on vee liikumine avatum või takistatum.

Rastri väärtused on antud päevades. Esimesed värvid näitavad 10 päevast intervalli, siis kolme kuud, siis kvartaleid, aastat, kahte aastat, kolme aastat ja nii edasi. Selleks, et paremini aru saada, milliste materjalide läbimiseks veevool kulutab rohkem aega ja millistele vähem, on mudeli taustal näha ka vastavate kihtide piirid, mida võib kontrollida jooniselt 15. Kaardil on näidatud ka Põhja-Kiviõli II põlevkivikaevanduse asukoht ning puuraukude ehk surfide asukohad, mille puhul saab samuti jooniselt vaadata kui kiiresti vesi neisse jõuab.

Nagu näha, siis järve vahetus läheduses toimub valgumine kõige kiiremini materjalide suure läbilaskvusvõime tõttu. Järvest eemal on aga kohti, kus see on väga aeglane, näiteks madalsooturba, savi ja aleuriidiga alade juures. Mudeli järgi toimub vee liikumine kõige kiiremini piki oosi. Suur osa surfidest asuvad järve vahetus läheduses ning nende veega täitumine peaks toimuma kiiresti. Kui aga vaadata mudelil vee valgumise potentsiaalset kiirust Uljaste järvest Põhja-Kiviõli II põlevkivikarjääri, siis sinna jõudmiseks võtab sellel aega aastaid. Huvitavaks kohaks on Uljaste järve lääneküljes olev madalsooturbakiht, mille läbimise aeg on selle mudeli järgi võrdlemisi pikk. Lausa nii pikk, et vesi pääseb ümber madalsooturbakihi minnes kiiremini kui sellest otse läbi.



Joonis 22. Uljaste järvest vee valgumise aeg päevades läbi erinevate pinnakatte tüüpide (ArcGIS)

## Arutelu

Pinnavee modelleerimine 2D GISis on tänu töövahendite kättesaadavusele ja lihtsatele karakteristikutele võrdlemisi kerge. Hoopis keerulisem on see, mis toimub vee liikumisega pinnase sees ning mis kujundab selle omadusi seal. Põhjavee modelleerimisel võetakse arvesse, kuidas mõjuvad veesüsteemile topograafia, sademed, õhutemperatuur, pinnakatte omadused, taimestik ja hüdrogeoloogia ning Baalousha jt (2008) väitel on kõige levinumaks kasutatavaks mudeliks vokslitel põhinev MODFLOW. Kuna ühel vokslil on 26 naabervokslit (Jones *et al.*, 1999), saab vee liikumist modelleerida palju täpsemalt ja efektiivsemalt, kui tavalises 2D geoinfosüsteemiga, kus voolu leidmiseks tuleb arvutada iga kiht eraldi.

Sarnaselt Montes jt (2017) tehtud uurimusele, vaadeldi ka selles uurimistöös lihtsamaid vee liikumise ajakulu pinnakattes Cost Distance tööriistaga arvutatud mudeli kaudu. Selles töös mudeli sisendina kasutatavate pinnasematerjalide vee läbilaskvusindeksitele omistati keskmised väärtused, et saada teada vähemalt suurusjärgud, mille põhjal siis kirjeldada vee liikumise aega Uljaste järvest väljapoole. Selletõttu peab arvestama, et mudel on tehtud suurte lihtsustustega ning tegelikkuses sõltub see ka paljudest muudest olulistest teguritest, mida saaks paremini arvesse võtta kasutades hoopiski ArcGISi põhjavee tööriistaid. Põhjavee tööriistade, eriti Darcy Velocity, mis ongi mõeldud arvutamaks põhjavee imbumise kiirusvektorit (An overview of the Groundwater..., Esri) ning selle kasutamine on seatud töö kaugemaks eesmärgiks. Põhjuseks asjaolu, et selliste tööriistade jaoks on hetkel veel vajalikud andmed töös puudu. Töö kaugemaks eesmärgiks on saada teada Põhja-Kiviõli II põlevkivikaevanduse mõjust Uljaste järvele, kasutades hüdrogeoloogilist modelleerimist Nii kaua aga saab aimu põhjavee liikumisest Maa-ameti X-GIS (2) kaardiserveri kaudu, kus on olemas eraldi kiht, mis näitab erinevate veekomplekside hüdroisohüpsed. Hüdroisohüpsed joon näitab, kus asuvad sama põhjaveetasemega alad ning kui vaadelda Uljaste ja Põhja-Kiviõli II põlevkivikaevanduse ala, on näha, et kaevanduse ala asub madalama survetasemega piirkonnas kui Uljaste järv, mille tõttu liigub vesi sinna.

Kuna töö kaugemaks eesmärgiks on teha hüdrogeoloogilist modelleerimist, pakub enne seda huvi ka see, milline on Uljaste järve ümbruse pinnavee iseloomustus. ArcGISi hüdrooloogilise analüüsi tööriistaid kasutati hüdrooloogiliseks modelleerimiseks ka Zhang *et al.* (2010) uurimuses, kus meetodika oli sarnane selles töös tehtuga. Põhinedes kõrgusmudelile arvutati erinevaid voolu karakteristikuid, et leida lõpuks valgla. Sarnast tööd tegid ka Liu ja Zhang (2010) oma uurimuses.

Nõlva- ja pinnavee mudelite tulemustest selgus, et peamiseks pinnavee liikumise mõjutajaks on Uljaste oos ning kõrgemad kohad rabast loode- ja lõunapool, mis säilitavad sealset veesüsteemi piirates väljavoolu. Ilma oosi olemasoluta voolaks vesi järvest minema viis meetrit madalamal asuvale tasandikule, mis juhtubki näiteks kõrvaloleva rabaga, kuna seal ei ulatu oos piisavalt kaugele. Wang ja kaasautorid (2020) on väitnud, et pinnavee äravool hakkab toimuma siis, kui kõrgematelt aladelt juurde tulev vesi ületab pinnase infiltratsiooni mahtuvuse. Seda on hästi näha voolujoonte modelleerimise tulemustest joonisel 18, kus järvest toimub äravool Pada jõkke mööda madalamat ala.

Selles uurimistöös tehtud hüdroloogilise modelleerimise ühe tulemusena saadud valgla ja EELISest pärit valgla võrdlusest selgus, et viimane võtab huvitaval kombel arvesse ka eemal asuva rabajärve. Põhjuseks see, et nagu on näha joonisel 21b, on EELISe valgla piir veidi väiksema resolutsiooniga, mida põhjustavad tõenäoliselt valgla arvutamiseks kasutatud teistsugune DEM ja vooluvõrk ning selletõttu võivadki tulemused olla erinevad. Üleüldse on antropogeensetest tegevustest mõjutatud maailmas valglate piire raskem määratleda, kuna inimestel on soov veesüsteeme oma huvide järgi muuta. Näiteks rajatakse erinevaid takistavaid teetamme ja kraave, mis võivad muidu looduslikult eraldi olevaid valglaid omavahel ühendada. Inimese poolt rajatud kuivenduskraavide süsteemi on näha ka selle töö teemaga seoses, joonisel 18.

Kuna looduses on vesi pidevalt ringluses, muutudes vahepeal vedelast olekust gaasilise (ka tahkesse) ja vastupidi, on selle hoomamiseks vajalik teha ka veebilansi arvutus (Stauffer). Veebilansi leidmine on keeruline ülesanne, kuna selle koostisosi, eriti muutusi põhjavees on raske otse mõõta. Erinevaid veebilansi komponente hinnatakse sageli kaudsete empiiriliste meetoditega, näiteks aurustumist, infiltratsiooni põhjavette ja äravoolu pinna teel (Falalakis & Gemitzi, 2020). Veebilansi saab leida valemiga  $P = Q + E \pm \Delta S$ , kus P on sademed, Q on äravool, E on aurustumine ja  $\Delta S$  on veevaru muut ajas. Veebilanss on tasakaalus, kui mingis kindlas piirkonnas mingi kindla ajavahemiku jooksul on vee sissevool võrdne väljavooluga, mille hulka on arvestatud ka piirkonnas ladestunud vee muutus. (Stauffer)

KAURist saadud Sämi hüdromeetriaajaamas kogutud õhutemperatuuri andmeid saab vaadelda kui Uljaste temperatuuri käiku, millest on mõjutatud auramine ja sademete andmed näitavad sademeterežiimi. Töö järgmises etapis on plaanitud leida nende andmete põhjal koos Corine maakattetüüpidega Uljaste veebilanss. Põhjus, miks seda veel ei tehtud on selles, et saadi küll teada

kuidas vesi liigub pinnases, aga tulemustest jäi puudu, kuidas auramist leida. Lisaks avaneb teemast ka täiesti uus modelleerimise suund.

Reljeefimudeli tulemustesse kriitiliselt suhtumise vajalikkus ilmestus töös hästi kuivenduskraavi truupide ja Uljaste järve ülevoolu parandamisega. Kuna kõrgusmudelil ei olnud truubid kohe nähtavad, tekkis alguses reaalsusega mitte kokku langev vooluvõrk. Seda lahendati töös käsitsi, leides visuaalselt vaadates arvatavad truubi asukohad ning seejärel parandades neid Pixel Editor tööriistaga. Selle meetodi puuduseks on aga see, et tegevus on üpriski ajakulukas ning võrdlemisi subjektiivne. Tööd saaks tõenäoliselt ka automatiseerida, luues vastava algoritmi, mis leiaks kraavide ja teede lõikumiskohad. Samas tekiks küsimus, kuidas lahendada seda, et iga truub asub erineval kõrgusel. Juhul, kui Uljaste järve esialgse ülevoolu tulemuse korrigeerimine oleks ära jäetud, oleks tulemuseks tulnud valed valgla piirid, mida võib pidada tõsisemaks veaks, kui lihtsalt voolujoonte vale asetus. Varasemate kogemuste põhjal võib ka väita, et enamik reljeefimudeleid käsitleb DEMi kui tõepärast pinda. Voolu modelleerimine võib looduslikel aladel isegi kohe adekvaatne olla, kuid mitte niivõrd antropogeensetel. Sageli usutakse kõrgusmudelitel põhinevaid tulemusi pimesi ning selles leiduvaid probleemseid kohti ei märgata, kuna ei teostata voolu modelleerimist, mis need nähtavale toob.

## Kokkuvõte

Bakalaureusetöö eesmärgiks oli kirjeldada Uljaste järve ja selle ümbrust hüdrogeoloogilisel modelleerimisel kasutatavate sisendite abil. Töös on osaliselt kasutatud 3D hüdrogeoloogilise modelleerimise meetodikad, samal ajal keskendudes tunnustele, mida on võimalik kirjeldada 2D GISiga. Selleks analüüsiti erinevaid karakteristikuid nagu pinnavee mudelpinnad, kirjeldati pinnakattekihte ja nõlva karakteristikuid, mis mõjutavad pinnavee liikumist ja järve hüdroloogilist režiimi. Lisaks oli eesmärgiks uurida ka, milliste protseduuride ja vahenditega saab pinnavee liikumist kirjeldada kasutades GIS tarkvara.

Töös selgus, et Uljaste ümbruse reljeef on muutliku iseloomuga, kus lavamaad liigendab oos. Uurimisala kirjeldamiseks loodi neli mudelpinda: reljeefivarjutus, nõlvakalle, nõlva ekspositsioon ja nõlvakõverus. Kõige paremini ilmnesis mudelilt Uljaste ümbruse suurimaks pinnavormiks oleva oosi nõlva karakteristikud. Nõlva karakteristikute kirjeldamine oli vajalik, kuna nendest sõltub ka pinnavee liikumine.

Pinnavee modelleerimise tulemusena saadud vooluvõrgu mudel andis ülevaatliku arusaama Uljaste ning selle ümbruse pinnavee liikumise iseloomustusest. Kui topograafilised andmed ei näita järve ei sissevoolu ega ka väljavoolu, siis hüdroloogiliste töövahenditega saadud tulemus osutab nendele potentsiaalsetele kohtadele, kus võivad tekkida ülevoolud.

Kuna hüdrogeoloogilises modelleerimises ei pääse ei üle ega ümber vee liikumisest pinnasekihtides, siis tehti eelanalüüs pinnasekihtide vee läbilaskevõime kohta. Pinnakattekihtide ja nende infiltratsiooni näitajate põhjal tehti mudel, mis näitas kui kaugele järvest vesi jõuaks teatud ajahikute jooksul.

Uurimistöö näitas, et GIS tarkvarade reljeefi- ja hüdroloogia modelleerimise vahendid koos fokaalstatistikute kasutamisega annavad häid ülevaateid uuritava piirkonna veevoolu mõjutavatest karakteristikutest, mis on olulised loodusgeograafilises kirjelduses. Isegi kui kasutada hüdrogeoloogilisel modelleerimisel MODFLOW mudelit, siis ArcGISi modelleerimise vahendid on sellegipoolest heaks täienduseks looduslike tingimuste kirjeldamiseks ja tervikpildi saamiseks.

Edasistes uuringutes tasub bakalaureusetöö meetodikat edasi arendada ning minna täielikult hüdrogeoloogilise modelleerimise peale, et teada saada Põhja-Kiviõli II põlevkivikaevanduse

mõjust Uljaste järvele. Selleks kaasata töösse ka veebilansi arvutamine, mis selles töös jäi kaugemaks eesmärgiks.

# **Characterization of Lake Uljaste and its surroundings by relief and hydrological modeling.**

Mariana Rohtsalu

## **Summary**

The aim of this thesis was to describe Lake Uljaste and its surroundings with the help of inputs used in hydrogeological modeling. While 3D hydrogeological modeling methodologies have been used, the thesis focuses on features that can be described by 2D GIS. Various characteristics were analyzed, such as surface water model surfaces, surface layers and slope characteristics that affect surface water movement and the hydrological regime of the lake. In addition, the aim was to investigate the procedures and tools that can be used to describe the movement of surface water using GIS software.

The topography around Uljaste varies alot. To describe this, four model surfaces were created: hillshade, slope, aspect and slope curvature. The esker, which is the largest landform around Uljaste had the most distinguished slope. It was necessary to describe the slope characteristics, as the movement of surface water depends on them.

Based on the hydrological modelling, the stream network model provided an overview of the characterization of surface water movement in Uljaste and its surroundings. Before that, neither the inflow nor the outflow from the lake was observed.

In hydrogeological modeling neither of the water movement or water movement in the soil layers subjects can be overseen. Based on the earth materials and their hydraulic conductivity, a model was made that showed how long would it take for the water from lake to reach different materials. Although the result of the model is a simplification, it helps to understand in which direction the water moves from the lake and which layers help to prevent it.

The research findings showed that the relief and hydrology modeling tools of GIS software together with the use of focal statistics provide good overviews of the characteristics influencing the water flow in the study area, which are important in the natural geographical description. Even if the MODFLOW model is used for hydrogeological modeling, ArcGIS modeling tools are still a good addition to describe natural conditions and get a complete picture.

The methodology of the thesis is worth further developing and moving entirely to hydrogeological modeling to find out the impact of the North Kiviõli II oil shale mine on Lake Uljaste. Also next time the water balance should also be taken into consideration.

## **Tänuavaldused**

Soovin tänada oma juhendajat Raivo Aunapit pühendatud aja ja nõustamise eest. Samuti soovin tänada oma perekonda ja sõpru tööle kaasa elamise eest.

## Kasutatud kirjandus

Adeyeye, O. A., Ikpokonte, E. A., & Arabi, S. A. (2019). GIS-based groundwater potential mapping within Dengi area, North Central Nigeria. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 22(2), 175–181.

All, T., Kõiv, M., Mardim, T., Morgen, E., Niin, M., Otsmaa, M., Suuroja, K. (2007). Baaskaardi Kiviõli (6443) lehe geoloogilise kaardikomplekti koostamine ja digitaalse andmebaasi loomine. *Aruanne. Tallinn: Eesti Geoloogiakeskus*.

An overview of the Groundwater toolset (Spatial Analyst). Esri. Kasutatud 20.05.2021, <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/an-overview-of-the-groundwater-tools.htm>

An overview of the Surface toolset (Spatial Analyst). Esri. Kasutatud 16.05.2021, <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/an-overview-of-the-surface-tools.htm>

Arusoo, H. Uljaste matkarada peidab minevikku. (2002). Loodusesõber. Kasutatud 24.04.2021. [http://vana.loodusajakiri.ee/loodus/artikkel77\\_56.html](http://vana.loodusajakiri.ee/loodus/artikkel77_56.html)

Baalousha, H., Mckay, G., Haik, Y., Siddique, A., Koç, M., Francis, L., Saleem, J., Abdulrahim, H., & Al-Adwan, A. (2008). Fundamentals of groundwater modelling. *Groundwater: Modelling, Management and Contamination. New York: Nova Science Publishers, Inc.*

Basin (Spatial Analyst). Esri. Kasutatud 30.03.2021, <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/basin.htm>

Battaglin, W., Vandas, S., Winter, T. (2002). Water and the environment. *American Geological Institute in cooperation with Bureau of Reclamation, National Park Service, U.S. Army Corps of Engineers, USDA Forest Service, U.S. Geological Survey.* <http://www.agiweb.org/environment/publications/water.pdf>

Betancur, T. & others. (2012). Conceptual models in hydrogeology, methodology and results. In *Hydrogeology-A Global Perspective. IntechOpen*.

Biesheuvel, A., & Hemker, C. (1993). Groundwater modelling and GIS: integrating MICRO-FEM and ILWIS. *IAHS PUBLICATION*, 289–289.

CORINE Land Cover. (2018). Pan-European. Copernicus.

Curvature (Spatial Analyst). Esri. Kasutatud 16.05.2021, <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/curvature.htm>

Devia, G. K., Ganasri, B. P., & Dwarakish, G. S. (2015). A Review on Hydrological Models. *Aquatic Procedia*, 4, 1001–1007. <https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.126>

Dripps, W. R., & Bradbury, K. R. (2007). A simple daily soil–water balance model for estimating the spatial and temporal distribution of groundwater recharge in temperate humid areas. *Hydrogeology Journal*, 15(3), 433–444.

Enemark, T., Peeters, L. J., Mallants, D., & Batelaan, O. (2019). Hydrogeological conceptual model building and testing: A review. *Journal of Hydrology*, 569, 310–329.

ETAK andmed. Maa-amet. Kasutatud 17.05.2021, <https://geoportaal.maaamet.ee/est/Ruumiandmed/Eesti-topograafia-andmekogu/Laadi-ETAK-andmed-alla-p609.html>

Falalakis, G., & Gemitzi, A. (2020). A simple method for water balance estimation based on the empirical method and remotely sensed evapotranspiration estimates. *Journal of Hydroinformatics*, 22(2), 440–451.

Fetter, C. W. (2001). *Applied hydrogeology*. Waveland Press.

Flow Direction (Spatial Analyst). Esri. Kasutatud 23.03.2021, <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/flow-direction.htm>

Geoloogiline baaskaart. Maa-amet. Kasutatud 16.05.2021, <https://geoportaal.maaamet.ee/est/Ruumiandmed/Geoloogilised-andmed/Geoloogiline-baaskaart-1-50000-p39.html>

Gruber, S., & Peckham, S. (2009). Land-surface parameters and objects in hydrology. *Developments in Soil Science*, 33, 171–194.

How Aspect works (Spatial Analyst). Esri. Kasutatud 16.05.2021, <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/how-aspect-works.htm>

How Fill works (Spatial Analyst). Esri. Kasutatud 30.03.2021, <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/how-fill-works.htm>

How Flow Accumulation works (Spatial Analyst). Esri. Kasutatud 30.03.2021, <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/how-flow-accumulation-works.htm>

How Flow Direction works (Spatial Analyst). Esri. Kasutatud 23.03.2021, <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/how-flow-direction-works.htm>

How Hillshade works (Spatial Analyst). Esri. Kasutatud 16.05.2021, <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/how-hillshade-works.htm>

How Slope works (Spatial Analyst). Esri. Kasutatud 16.05.2021, <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/how-slope-works.htm>

How Stream Order works (Spatial Analyst). Esri. Kasutatud 30.03.2021, <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/how-stream-order-works.htm>

How Stream To Feature works (Spatial Analyst). Esri. Kasutatud 30.03.2021, <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/how-stream-to-feature-works.htm>

How Watershed Works (Spatial Analyst). Esri. Kasutatud 17.05.2021, <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/how-watershed-works.htm>

Hydraulic Conductivity Ranges of Various Soil Types. Soil Properties. Struct. Kasutatud 12.05.2021, [https://structx.com/Soil\\_Properties\\_007.html](https://structx.com/Soil_Properties_007.html)

Ida-Viru maakonnaplaneering 2030+. (2016). Ida-Viru maavalitsus. *OÜ Hendrikson & Ko*.

Jani, J. (2012). GIS as a tool for modelling groundwater flow. *2012 IEEE Symposium on Business, Engineering and Industrial Applications*, 513–517.

Jones, D. K., Simmons, A., Williams, S. C., & Horsfield, M. A. (1999). Non-invasive assessment of axonal fiber connectivity in the human brain via diffusion tensor MRI. *Magnetic Resonance in*

Medicine: An Official Journal of the International Society for Magnetic Resonance in Medicine, 42(1), 37–41.

Karukäpp, R., Mäemets, A. (1990). Ürglooduse objekt: Uljaste järved ja oos.

Kliimamuutuste mõju uuring Eesti väikejärvedele. (2020). Tartu: Eesti Maaülikooli põllumajandus- ja keskkonnainstituut.

Klute, A. (1965). Laboratory measurement of hydraulic conductivity of saturated soil. *Methods of Soil Analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Properties, Including Statistics of Measurement and Sampling*, 9, 210–221.

Krause, T., Laarmaa, R., Lehtpuu, M., Maileht, K., Meesak, E., Ott, I., Palm, A., Timm, H., Kriis, K. (2020). Geoloogiateenistus hakkab Kiviõli Keemiatööstuse rahaga Uljaste järve uurima. Põhjarannik. Kasutatud 02.05.2021, <https://pohjarannik.postimees.ee/7100431/geoloogiateenistus-hakkab-kivioli-keemiatööstuse-rahaga-uljaste-jarve-uurima>

Kumar, C. (2013). Introduction to groundwater modelling. *Journal of Hydrology*, 90201–90209.

Orru, M. (1995). Eesti turbasood. Eesti geoloogiakeskus. Tallinn. lk. 61.

Kumar, S., Narjary, B., Kumar, N., Kaur, S., Yadav, R., Kamra, S., & others. (2020). A GIS-based Methodology for Assigning a Flux Boundary to a Numerical Groundwater Flow Model and Its Effect on Model Calibration. *Journal of the Geological Society of India*, 96(5), 507–512.

Kushwaha, K., & Goyal, R. (2016). Methodology for the estimation of groundwater flux across simplified boundary using GIS and groundwater levels. *Current Science*, 1050–1058.

Kõrgusandmed. Maa-amet. Maa-amet. Kasutatud 02.05.2021, <https://geoportaal.maaamet.ee/est/Ruumiandmed/Korgusandmed/Laadi-korgusandmed-alla-p614.html>

Laarmaa, R., Timm, H., Ott, I., Maileht, K., Sepp, M., Palm, A., Krause, T., Saar, K., Mäemets, H. (2019). Eesti järved. Tallinn: Varrak, lk. 160.

Letts, M. G., Roulet, N. T., Comer, N. T., Skarupa, M. R., & Versegny, D. L. (2000). Parametrization of peatland hydraulic properties for the Canadian Land Surface Scheme. *Atmosphere-Ocean*, 38(1), 141–160.

Liu, X., & Zhang, Z. (2010). Extracting drainage network from high resolution DEM in Toowoomba, Queensland. Proceedings of the 2010 Queensland Surveying and Spatial Conference (QSSC 2010).

Meyer, R., Engesgaard, P., Høyer, A.-S., Jørgensen, F., Vignoli, G., & Sonnenborg, T. O. (2018). Regional flow in a complex coastal aquifer system: Combining voxel geological modelling with regularized calibration. *Journal of Hydrology*, 562, 544–563.

MODFLOW and Related Programs. USGS. Kautatud 26.04.2021, [https://www.usgs.gov/mission-areas/water-resources/science/modflow-and-related-programs?qt-science\\_center\\_objects=0#qt-science\\_center\\_objects](https://www.usgs.gov/mission-areas/water-resources/science/modflow-and-related-programs?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects)

Montes, R. V., Martínez-Graña, A. M., Martínez Catalán, J. R., Arribas, P. A., Sánchez San Román, F. J., & Zazo, C. (2017). Integration of GIS, electromagnetic and electrical methods in the delimitation of groundwater polluted by effluent discharge (Salamanca, Spain): A case study. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(11), 1369.

Mäemets, A. (1968). Eesti järved. Tallinn: Valgus, lk. 378.

Nistor, M.-M. (2016). Mapping evapotranspiration coefficients in the Paris metropolitan area. *GEOREVIEW Scientific Annals of Ștefan Cel Mare University of Suceava, Geography Series*, 26(1), 138–153.

Põhjaveekogumite seosed maismaaökosüsteemide ja pinnaveekogudega, hüdrogeoloogilised mudelid ning seirevõrgu kujundamine. (2019). Tallinna Ülikooli Ökoloogia keskus. Tallinn: Keskkonnaministeerium.

Põhjaveekogumi veest sõltuvad ökosüsteemid, nende seisundi hindamise kriteeriumid ja seirevõrk. (2015). TLÜ Ökoloogia Instituut. Tallinn: Keskkonnaministeerium.

Põhjaveeseire süsteem Ida-Viru maakonnas. (2019). Keskkonnaministeerium. Kasutatud 25.04.2021, <https://www.envir.ee/et/eesmargid-tegevused/vesi/pohjavesi/pohjaveeseire-susteem-ida-viru-maakonnas>

Rivera, A. (2007). Groundwater modelling: From Geology to Hydrogeology. *Geological Society of America*, 07–4.

Roosaare, J., Aunap, R., Oja, T., Mõisja, K., Sepp, E. (2019). Geoinformaatika. Tartu Ülikooli kirjastus.

Stauffer, B. Water Balance Estimation. SSWM University. Kasutatud 20.05.2021, <https://sswm.info/sswm-university-course/module-4-sustainable-water-supply/further-resources-water-sources-software/water-balance-estimation>

Surface Volume (3D Analyst). Esri. Kasutatud 22.04.2021, <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/3d-analyst/surface-volume.htm>

Sämi hüdromeetriaajaama ilmastikuandmed. Keskkonnaagentuur.

Topo To Raster (Spatial Analyst). Esri. Kasutatud 17.05.2021, <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/topo-to-raster.htm>

Uljaste maastikukaitseala kaitsekorralduskava 2018–2027. (2017). Keskkonnaamet.

Vandel, E., Vaasmaa, T., Vainu, M., Terasmaa, J. (2020). Eesti väikejärvede batümeetriline seire 2019. Tallinn: Tallinna Ülikooli loodus- ja terviseteaduste instituudi ökoloogiakeskus.

Väikejärvede batümeetriline seire. (2019). Keskkonnaseire infosüsteem. <https://kese.envir.ee/kese/viewProgramNew.action?uid=473564>

Wang, Z., Timlin, D., Kouznetsov, M., Fleisher, D., Li, S., Tully, K., & Reddy, V. (2020). Coupled model of surface runoff and surface-subsurface water movement. *Advances in Water Resources*, 137, 103499.

Ürglooduse objekt: Uljaste järved ja oos. (2010). Keskkonnaagentuur. Kasutatud 24.04.2021. [https://infoleht.keskkonnainfo.ee/default.aspx?state=5;68547593;est:eelisand;:&comp=objresult=yrg&obj\\_id=978810976](https://infoleht.keskkonnainfo.ee/default.aspx?state=5;68547593;est:eelisand;:&comp=objresult=yrg&obj_id=978810976)

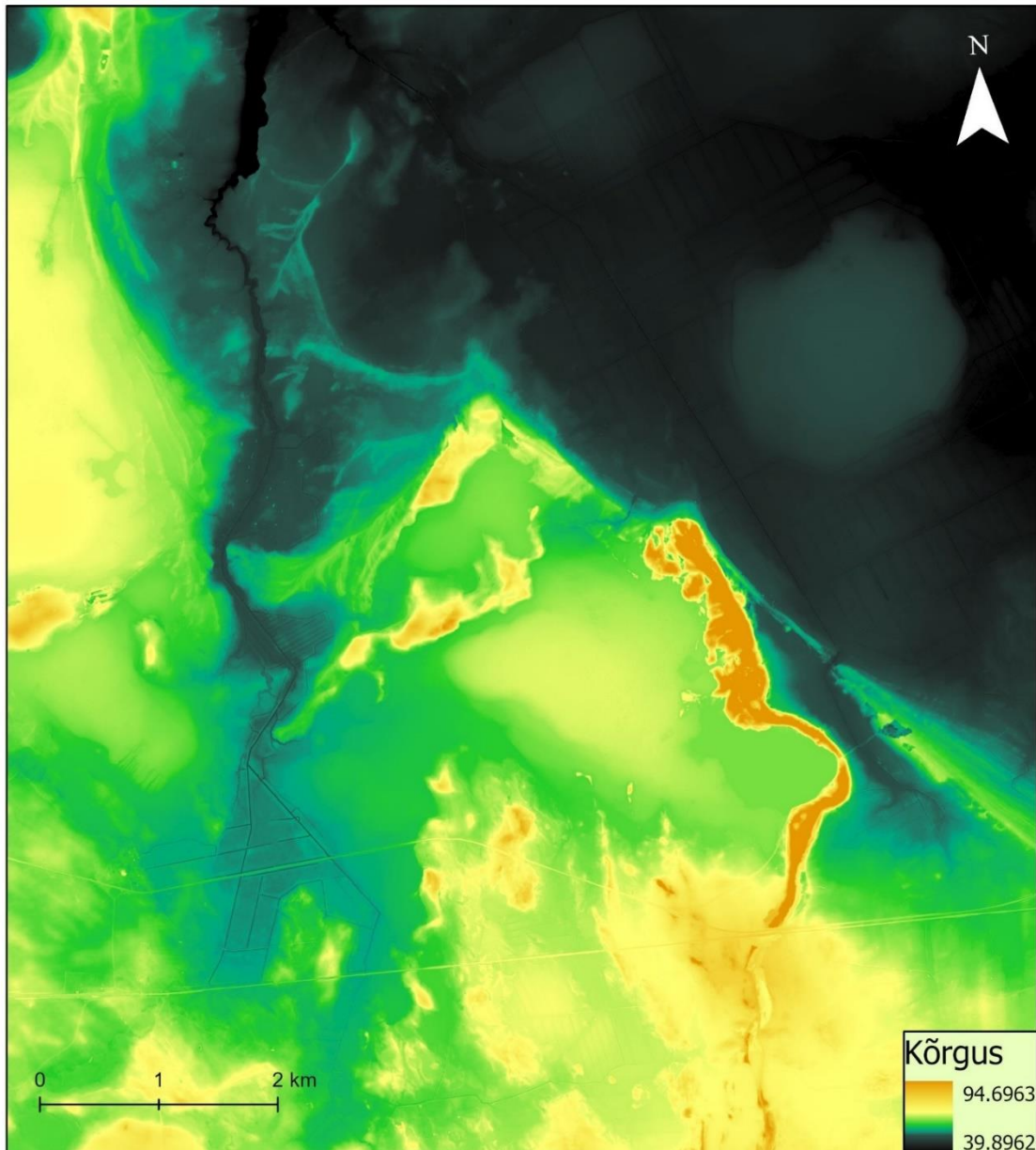
X-GIS. Maa-amet. Kasutatud 27.04.2021, <https://xgis.maaamet.ee/xgis2/page/app/maainfo>

Zaragozí Zaragozí, B. M., Rodríguez Sala, J. J., Rabasa Dolado, A., Ramon-Morte, A., Olcina, J., & others. (2013). A data driven study of relationships between relief and farmland abandonment in a Mediterranean region.

Zhang, J., Li, Q., Gong, H., Li, X., Song, L., & Huang, J. (2010). Hydrologic information extraction based on arc hydro tool and DEM. 2010 International Conference on Challenges in Environmental Science and Computer Engineering, 1, 503–506.

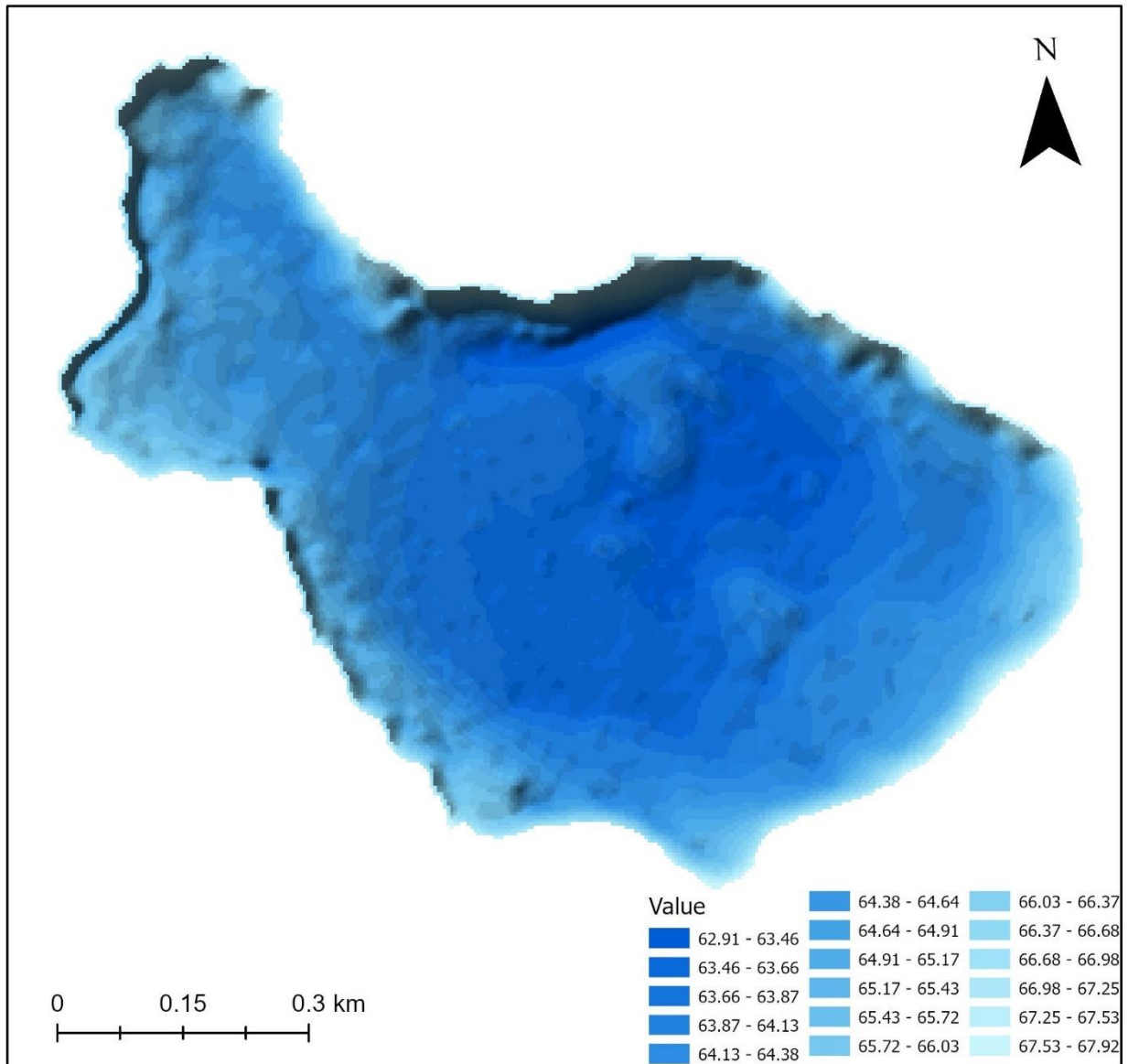
## Lisa 1.

Üldine reljeefi kõrgusmudel (Kõrgusandmed, Maa-amet).



## Lisa 2.

Uljaste järvenõo kõrgusmudel (ArcGIS).



## **Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks**

Mina, Mariana Rohtsalu,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose „Uljaste järve ja selle ümbruse iseloomustamine reljeefi- ja hüdroloogilise modelleerimise teel“, mille juhendaja on Raivo Aunap reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada, sealhulgas lisada digitaalarhiivi DSpace kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.

2. Annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace kaudu Creative Commons'i litsentsiga CC BY NC ND 3.0, mis lubab autorile viidates teost reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.

3. Olen teadlik, et punktides 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

4. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei riku ma teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse õigusaktidest tulenevaid õigusi.

Mariana Rohtsalu

24.05.2021