

Tartu Ülikool

Loodus- ja täppisteaduste valdkond

Ökoloogia ja maateaduste instituut

Geoloogia osakond

Edgar Prass

Lõuna-Eesti orgude algoritmi-põhine tuvastamine ja analüüs

Magistritöö (30 EAP)

Juhendaja Argo Jõelet, PhD

Tartu 2016

Lõuna-Eesti orgude algoritmi-põhine tuvastamine ja analüüs

Töös katsetatakse erinevaid algoritme Lõuna-Eesti orgude tuvastamiseks reljeefimudelilt. Algoritm-põhine pinnavormide tuvastamine võimaldab hoida kokku aega ning annab ühesugustel kriteeriumitel põhineva tulemuse. Edukaimaks meetodiks osutus tuvastamine suhtelise kõrguse alusel. Tulemuseks on piirkonna oruvõrgustiku kaart. Arutelus kirjeldatakse oruvõrgustiku kujunemise etappe ja tekkemehhanisme.

Pinnavormide tuvastamine, liustikualused orud, matemaatiline algoritm

Algorithm based identification and analysis of valleys in southern Estonia

The study tests different algorithm-based methods in order to identify valleys from the digital terrain model of southern Estonia. Algorithm-based landform identification saves times and provides an objective result with even quality. The best results were achieved using topographic position index. The result is a map of valleys in the study area. Different stages and processes involved in formation of valley network in the study area have been discussed.

Landform identification, subglacial valleys, mathematical algorithm

P510 Füüsiline geograafia, geomorfoloogia, mullateadus, kartograafia, klimatoloogia

P470 Hüdrogeoloogia, geoplaneering ja ehitusgeoloogia

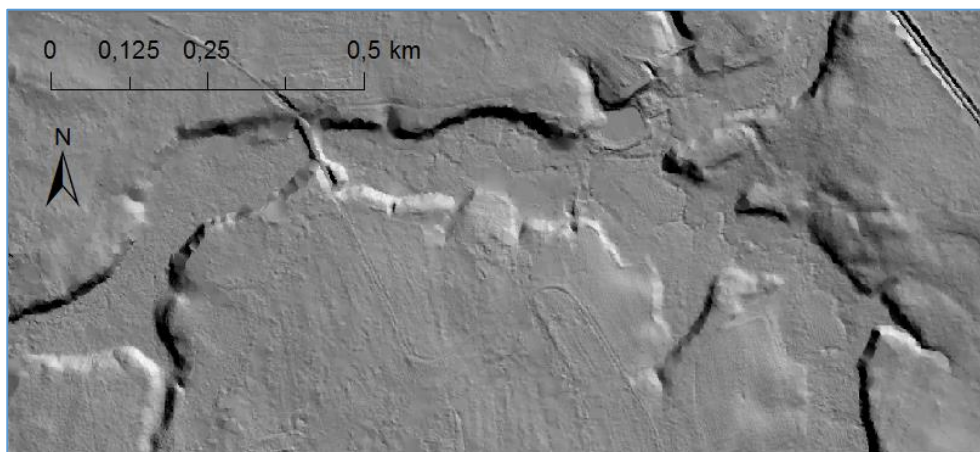
Sisukord

1	Sissejuhatus	5
2	Ülevaade mandriliustikuga seotud orgudest	6
3	Andmed	10
4	Metoodika	13
4.1	Andmete ettevalmistus.....	13
4.1.1	Puuduvad üksikute pikslite väärtused	13
4.1.2	Väärad piksli väärtused	14
4.1.3	Tehislike jooneliste pinnavormide eemaldamine	15
4.2	Maastiku põhiparameetrite kaudu orgude defineerimine.....	16
4.2.1	Absoluutkõrgus	16
4.2.2	Maapinna kuju	16
4.2.3	Topograafiline asend	21
4.2.4	Topograafiline/orograafiline kontekst.....	35
4.3	Polügoonide klassifitseerimine naabrussuhete alusel.....	38
5	Tulemused	40
6	Arutelu	41
6.1	Meetodi head-vead, tugevused-nõrkused	42
6.2	Hüdroloogiline ja geoloogiline situatsioon	43
6.3	Oruvõrgustiku vorm	44
6.4	Mudelid/orgude tüübid	44
6.5	Vanusest.....	45
6.6	Põhjused, miks kaardistatud oruvõrgustik pole täielik.....	45
6.7	Tõendid liustikualusest veevoolust.....	46
6.8	Meetodite võrdlus	47
7	Järeldused.....	49

8	Kokkuvõte	51
9	Summary.....	52
10	Kasutatud kirjandus	53
11	Lisad	55

1 Sissejuhatus

Eesti maastik, mille on suurel määral kujundanud Kvaternaari jääaeg, koosneb eriilmelistest glatsiaalsetest pinnavormidest. Kujunenud on iseloomulike pinnavormidega alad nagu mõhnastikud, voorestikud, lavamaad ja mitmed muud omapäraseid piirkonnad. Pinnavormid on reljeefvarjutuse kaardipildilt (Joonis 1) vaadates silmale hõlpsasti eristatavad ja määratavad. Olles õppinud reljeefivormide geneesi, suudab vaataja nende geomeetriliste tunnuste nagu kõrgus ümbruskonna suhtes, orienteeritus, väljavenitatus jpm alusel liigitada neid voorteks, mõhnastikeks, orgudeks, otsmoreenideks, oosideks ja mitmeteks muudeks levinud pinnavormideks. Milliste tunnuste abil saab klassifitseerida neid pinnavorme? Kas neid tunnuseid saab matemaatiliselt kirja panna ja lasta arvutil pinnavorme tuvastada sarnaste tulemustega nagu inimene seda teeb?



Joonis 1 Näide reljeefvarjutuse kaardist (Maa-amet)

Õpikutes kujutatakse pinnavorme geomeetriselt lihtsustatult, kuid reaalsuses on need märksa komplitseeritumad. Näiteks võib tuua voored, mis teoorias on ovaalsed liustiku voolusuunaga paralleelselt orienteeritud positiivsed pinnavormid. Vööri võib pidada Eesti pinnavormidest ehk lihtsaimateks oma geomeetria poolest, kuid püüded neid lihtsaid vorme algoritm-põhiselt tuvastada on osutunud keerukamaks, kui võinuks algselt arvata (Ülem, 2015). Lihtsam pole olnud ka mõõtmetelt väiksemate retsensioonimoreenide algoritm-põhine tuvastamine detailselt aerolaserskaneerimise detailselt andmestikult (Järveoja, 2012). Käesoleva magistritöö esmaseks eesmärgiks oli välja töötada algoritm-põhine meetod orgude tuvastamiseks ja kaardistamiseks. Teine eesmärk oli kirjeldada tõenäolise liustikualuse tekkega orgude võrgustikku Lõuna-Eestis.

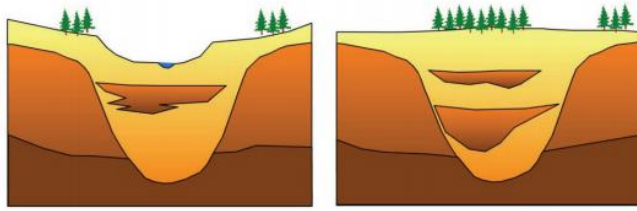
2 Ülevaade mandriliustikuga seotud orgudest

Mandriliustikuga on peamiselt seotud kahte tüüpi orud – liustiku-alused tunnelorud ja liustiku serva ees jääjärvi ühendavad orud. Tunnelorud on liustikualuse vee voolamisel kujunenud orud, mis tekkisid liustiku serva lähedal. Mandrijää all voolav vesi on justkui torus, sest voolukanalit katab jää. Liustiku serva lähedal võib tunnelorg pealt avaneda ja muutuda jäälöhes voolavaks jõeks. Tunnelorus liigub vesi madalama rõhu suunas, mistõttu on võimalik ka voolamine nõlvast ülesse. Liustiku serva lähedal on tüüpiline oru paiknemine liustiku servaga risti, sest rõhu langus on sellel suunal suurim. Liustiku servast kaugemal, kus rõhu gradient on väiksem, on orgude orientatsioon muutlikum. Kuid suures plaanis on ka seal orud paralleelsed mandrijää voolusuunaga.

Liustikualuseid orgusid, mis on erodeeritud basaalmoreeni ja nõrgematesse aluspõhja kivimitesse nimetatakse N-kanaliteks (Nye, 1976)(Joonis 2). Reeglina on N-kanali tüüpi orud järsunõlvallised ja tasase põhjaga U-kujulised orud. N-kanalid moodustuvad pikaajase stabiilse voolu tingimustes (Nye, 1976). Piirkondades, kus aluspõhja kivim ei ole hõlpsasti erodeeritav, paikneb voolukanal (R-kanal) (Röthlisberger, 1972) liustiku jää sees (Joonis 2). Pärast liustiku sulamist, kui orgu on eelnevalt akumulunud palju setet, võib orust alles jääda oos. Levinud on ka kanalitüüpide vahelised üleminekud.



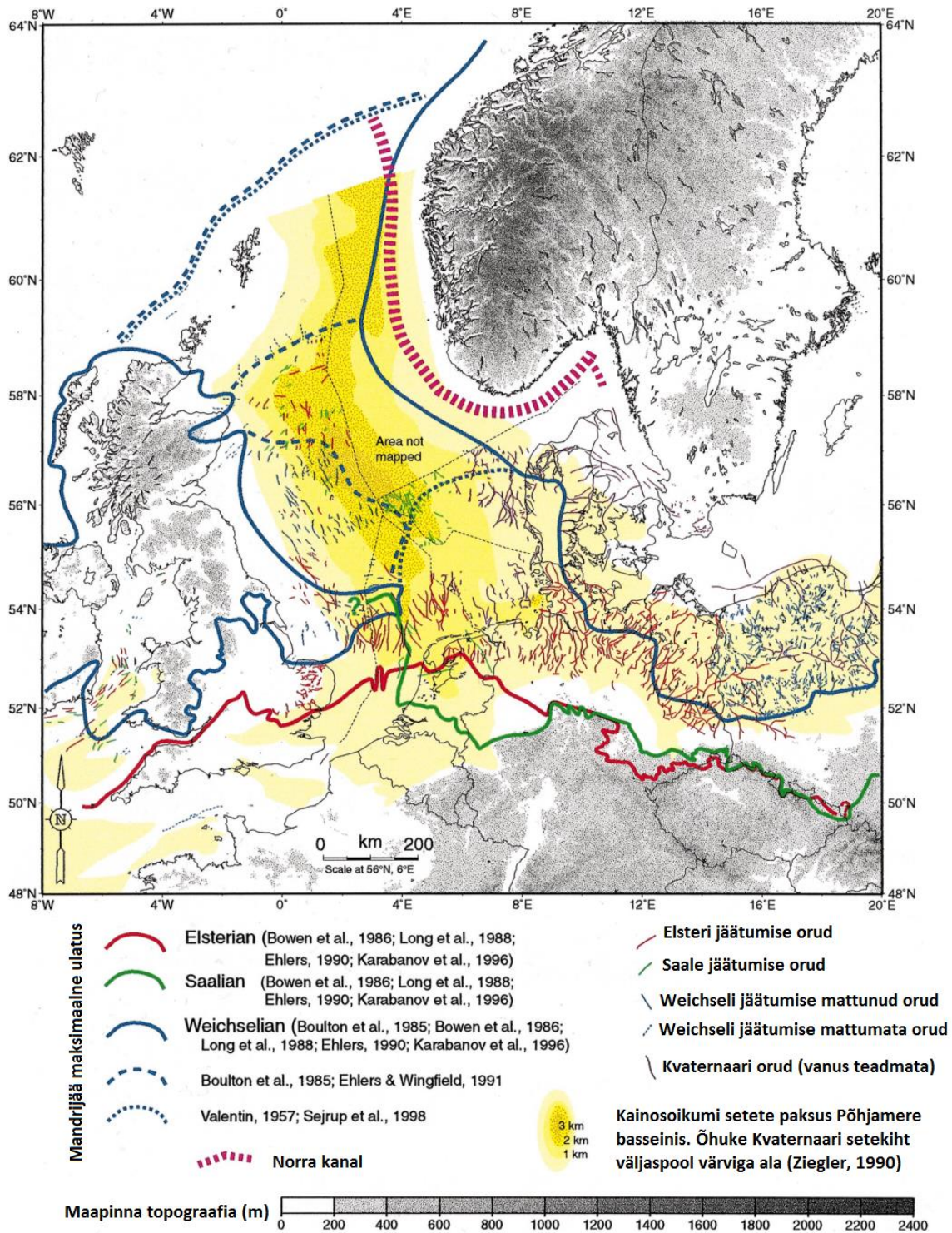
Joonis 2 Vasakul R-kanal (foto: https://sarpimentel.files.wordpress.com/2010/11/subglacial_channel.jpg) ja paremal N-kanal (foto: http://www.swisseduc.ch/glaciers/svalbard/midtre_lovenbreen/icons/under_glacier.jpg)



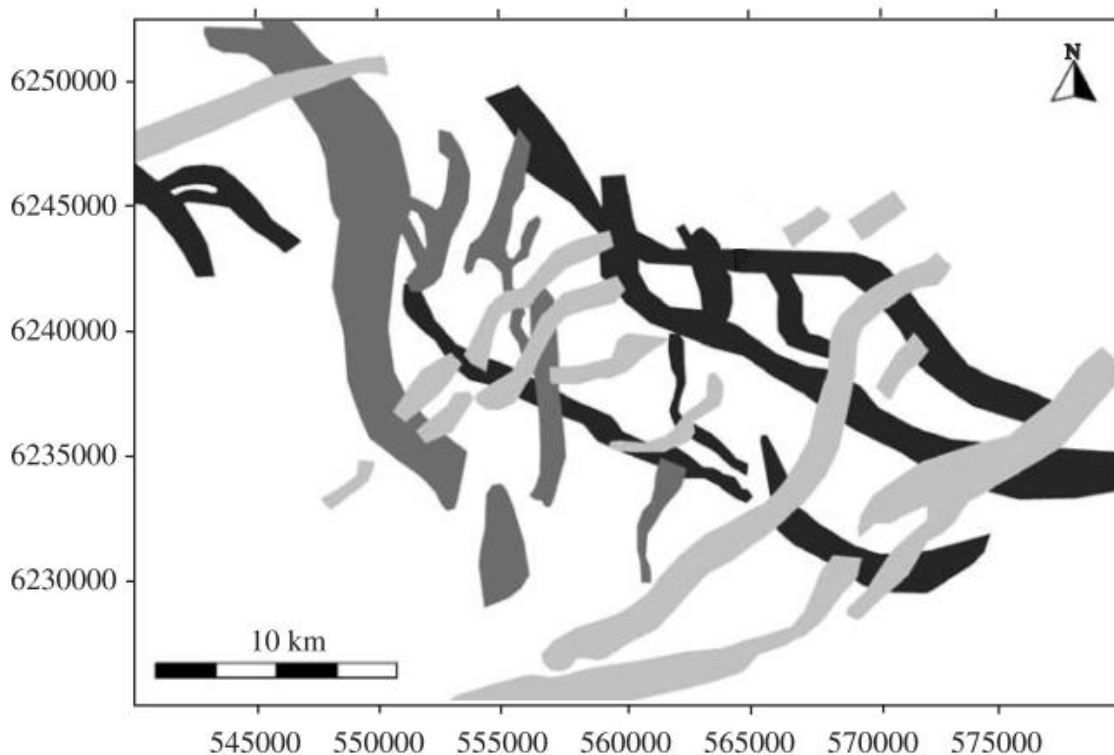
Joonis 3 Osaliselt (vasakul) ja täielikult (paremal) mattunud orud.
 Joonis (Kirsch, Rumpel, Scheer, & Wiederhold, 2006)

Tänapäeva maastikul on kunagised tunnelorud valdavalt kas täielikult mattunud või osaliselt mattunud (Joonis 3). Üheks põhjuseks, miks kunagised liustiku alused orud pole täielikult mattunud, on orgude mattumine surnud jääga. Surnud jää hiljem sulas, ning kunagised orud tulid vähemalt osaliselt uuesti maastikus esile. Täiesti mattumata tunneloru esinemise on pigem erandlik. Oru võib osaliselt või täielikult matta mineraalne sete, turvas või vesi, mis moodustab orgu järve. Mattumise tõttu võivad maastikul nähtavad orud olla palju väiksemad, kui on oru tegelik suurus. Liustikualuste orgude tänapäevasest maetusest lähtuvalt käsitletakse kirjanduses sageli mattumata, osaliselt mattunud ja täielikult mattunud orge eraldi, olgugi, et nende tekkemehhanism on sama. Sage on ka maismaal ja merepõhjas asuvate orgude eraldi käsitlemine, kuid ka nende puhul on tegemist sama tüüpi orgudega.

Tunnelorud on lühikesed ja suhteliselt sirged. Nende pikkus jääb vahemikku 10 kuni 20 km, laius 0,5 kuni 2 km ja sügavus 10 kuni 50 m (Kehew et al., 2013). Liustiku alused orud kujunevad jääkilbi serva lähedal ja lõppevad sageli otsmoreeni juures suudmedelta või sanduriga. Sellised suudmedeltad või sandurid võivad sisaldada endas väga jämedaid setteid nagu rahnud, veerised ja jäme kruus. Kuna vool tunnelorgudes toimub tänu jääkilbi serva suunas langevale hüdraulilisele rõhule, on orud liustiku voolusuunaga samasuunalised (Kehew et al., 2013). Täheldatud on orgude paiknemist regulaarsete vahemaade tagant (Boulton et al. 2007a, b; 2009). Ooside paiknemine tunnelorgudes on samuti levinud (Shaw, 1983; Wright, 1973). Oosid võivad paikneda nii oru põhjas, oruga ristuda või olla ühenduslüliliks kahe orulõigu vahel. Selline koosinemine on tõendiks nende liustikualusest tekkest ja erosioonilise arengufaasi asendumisest settelise faasiga. Tunnelorus asuva oosi palju väiksemad mõõtmed on tingitud voolukanali läbilõike kitsenemisest aja jooksul (Wright, 1973).



Joonis 4 Ülevaatlük kaart liustikualustest orgudest Põhjameris ja Läänemere lõunaosas (Huuse & Lykke-Andersen, 2000). Modifitseeritud autori poolt. Kaardi legendis olevad viited on Huuse & Lykke-Andersen, 2000 kasutatud kirjanduse loetelule

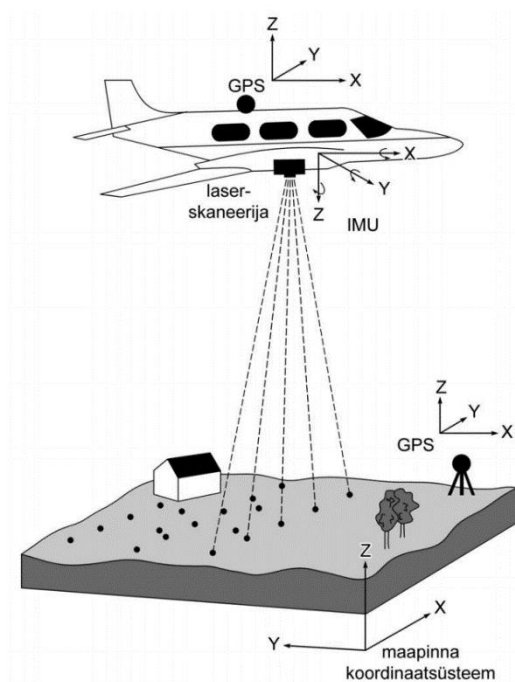


Joonis 5 Kolm generatsiooni liustikualuseid orge Taanis Aarhuse piirkonnast. Vanimad tumehallid on kagu-loode suunalised. Hallid on põhja-lõuna suunalised. Noorimad helehallid on kirde-edela suunalised. Joonis Jørgensen & Sandersen, 2006

Põhjalikult on uuritud tunnelorge kunagise jääkilbi maksimaalse ulatuse servaaladel Põhjamere ümbruses, Põhja-Saksamaal ja Põhja-Poolas (Joonis 4) (Huuse & Lykke-Andersen, 2000). Taanis on mattunud orgude sügavusteks määratud 50 kuni 350 m, ning laiuks 0,5 kuni 4 km. Mattumata orgude sügavuseks on üldiselt 20–60 m ning laiuks enamasti 0,5–1,5 km (Jørgensen & Sandersen, 2006). Oru ristprofiil on U-kujuline, tasase põhja ja järskude nõlvadega (Jørgensen & Sandersen, 2006). Orgude põhjas on sageli pärast-jääaegsed jõed, sood ja järved. Taani orud arvatakse olevat kujunenud mitme liustiku pealetungi ja taandumise käigus (Joonis 5), millest igaüks on kujundanud iseloomuliku orientatsiooniga orud. Samuti on tõenäoline, et sama org võib olla korduvalt mattunud ning uuesti erodeeritud (Jørgensen & Sandersen, 2006). Taani oruvõrgustik on anastomoosne (orud hargnevad üksteisest ning ühinevad taas üheks). Sealseid orge erodeerinud vesi arvatakse pärinevat liustikualustest reservuaaridest, millest vesi vabanes korduvate jõkulhlaupide ehk kiirete liustikualuse vee reservuaaride (järvede) tühjenemisenä (Jørgensen & Sandersen, 2006).

3 Andmed

Alusandmestikuna on kasutatud Maa-ameti aerolaserskaneerimise kõrguspunktide kogumi alusel moodustatud kõrgusmudelit. Aerolaserskaneerimine toimus lennukilt, mis lendas umbes 2400 m kõrgusel. Aerolaserskanner on seade, mis saadab maapinna suunas laserimpulsse ja mõõdab nende tagasi peegeldunud signaale (Joonis 6). Sõltuvalt tagasi peegeldumisele kulunud ajast arvutatakse selle punkti kauguse ja suuna lennukil olevast skannerist. Lennuki asukoht on kindlaks määratud GPS süsteemi alusel (Maa-amet, n.d.).

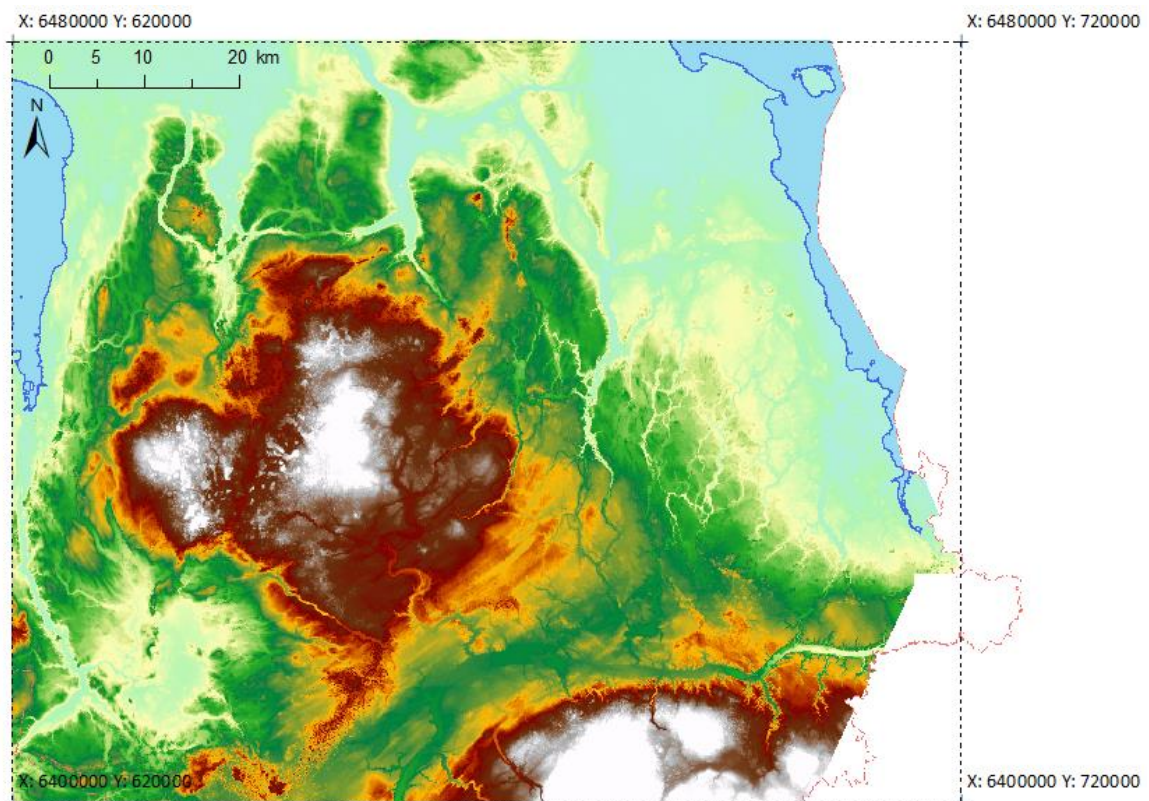


Joonis 6 Aerolaserskaneerimise põhimõtte ja mõõdistussüsteemi osad (Lillesand & Kiefer, 1994)

Maa-ameti andmete maapinna punktide tihedus keskmiselt 0,21 punkti m² kohta ja vertikaalne täpsushinnang kontrollmõõtmistel jäi vahemikku +/- 0,34 m (Maa-amet). Käesolevas töös uuritava ligikaudu 7200 ruutkilomeetrise piirkonna (Joonis 7) kohta on see umbes 1,5 miljardit kõrguspunkti. Punkte on palju rohkem kui mõnesaja meetri laiuste orgude kujutamiseks vajalik. Seetõttu on neist tehtud lihtsam 5 m horisontaallahutusega kõrgusmudel (Joonis 8). Loodud mudeli punktitiheus on 1 punkt 5x5 m ala kohta (0,04 punkti m² kohta).



Joonis 7 Uuringuala asukoht. Nurgapunktid ja piirjoon kujutavad asukoha kaardi ja tulemuste kaardi ulatust.



Joonis 8 Käesoleva töö uuringuala täpset ulatust kujutab reljefimudeli ulatus.

Uuringuala piiritlevad L-EST97 koordinaatsüsteemis põhjapiir X=6480000, läänepiir Y=620000 ja lõunapiir X=6400000. Idapiiriks on valdavalt Eesti-Vene kontrolljoon. Uuringuala kagunurgas puudus riigipiiri lähedasel alal andmestik (Joonis 8).

Võrdlusandmetena kasutati autori varasemalt samal alal käsitsi kaardistatud andmeid (Prass, 2014). Varasemas töös kaardistati tunnelorge kokku 1454 km, mille laiused on vahemikus 50 kuni 1500 m (keskmine 208 m) ja sügavused ulatuvad ühest kuni kolmekümne viie meetrini (keskmine 6,6 m). Vabaveelisi orge kaardistati kokku 325 km. Nende laiused on vahemikus 200 kuni 1800 m (keskmine 725 m) ja sügavused on kolmest kolmekümne meetrini (keskmine 10,9 m).

4 Metoodika

Töö eesmärgiks on algoritmide abil kaardistada Lõuna-Eestis asuv orgude võrgustik. Oruvõrgustiku kaardistamise all peetakse silmas orgude kujutamist polügoonidega. Töö kitsam siht on tuvastada võimalikke liustikualuse tekkega orge. Töö baseerub ArcGIS tarkvaral, mille tööriistade abil püütakse jõuda eesmärgini. Järgnevalt kirjeldatakse reljeefiandmete töötlemise viise, milledest osasid kasutati lõpptulemuseni jõudmiseks, kuid osade rakendamine jäi katsetuste tasemele.

4.1 Andmete ettevalmistus

Reljeefimudeli edukaks rakendamiseks peab mudel olema terviklik ja ilma märkimisväärsete vigadeta. Mudelis parandati esinevad puudujäägid ja vead vähendamaks väärtõlgendusi hilisemal töötlusel. Piksli all mõeldakse edaspidi reljeefimudeli vähimat üksust kujutavat kõrguspunkti. Piksli suurus esialgses mudelis on 5 x 5 m. Hiljem võetakse algoritmi pika arvutusaja vähendamiseks kasutusele 10 x 10 m piksliga reljeefimudel, mis on samuti piisavalt detailne tuvastamiseks vähemalt 50 m laiasid orge.

4.1.1 Puuduvad üksikute pikslite väärtused

Andmetes leidus piksleid, millel puudusid väärtused. Need pikslid oleks edasises analüüsis tekitanud väärtulemusi. Rastris puuduvad piksliväärtused täideti 8 naaberpiksli aritmeetilise keskendatud väärtustega. Selleks kasutati tööriista *Focal Statistics* valemit.

```
Con(IsNull("sisend_raster"), FocalStatistics("sisend_raster", NbrRectangle(3,3, "CELL"), "MEAN"), "sisend_raster")
```

4.1.2 Väärad piksli väärtused

Väärade piksliväärtuste tuvastamiseks võrreldi pikslit seda ümbritsevate nelja naaberpiksli väärtustega. Kui vähemalt kolm naaberpikslit erinesid vaatlusalusest vähemalt 2 meetri võrra, klassifitseeriti keskne piksel veaks algandmetes. Selle meetodiga tuvastatud pikslid on asendatud samal viisil, mida kasutati puuduvate pikslite puhul (vt. ülal). Katseala ligikaudu 64 km² suuruse ala 2584496 pikslit asendati 131 pikslit, mis moodustab ca 0,005% (Tabel 1). Teadmata on põhjus, miks algandmetes puuduvate või valede väärtustega pikslid sisalduvad.

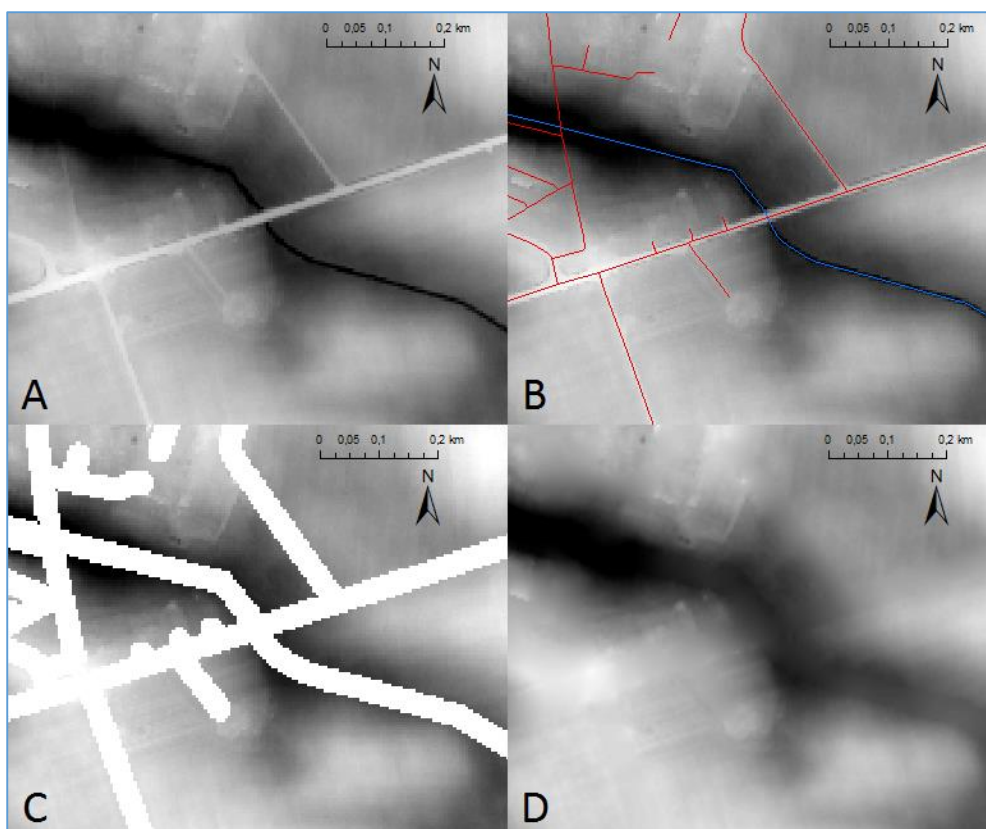
Tabel 1 Katseala 64 km² suurusel alal pikslite väärtuste erinevine võrrelduna naaberpikslitega. Punaselt kujutatud erinevusega pikslid asendati keskendatud väärtustega.

Erinevus (m)	-13	-9	-5	-4	-2	-1	0	1	2	3	4	10	11	13	18
Pikslite arv	1	1	6	26	52	312399	1963883	308083	35	2	2	1	1	2	1

4.1.3 Tehislike jooneliste pinnavormide eemaldamine

Reljeefimudelil on ohtralt inimtekkelisi reljeefivorme (Joonis 9A). Käesolevas töös, milles on vaatluse all orud, valmistavad probleeme ennekõike orgudega ristuvad (raud)teetammid, mille kohal org näiliselt katkeb. Probleemiks on ka suured kraavid, mis on algoritmi jaoks kitsad orud.

Teed ja kraavid on joonobjektidena Eesti topograafilises andmekogus. Teetamme võib kaasneda peaaegu kõigi teetüüpidega, ning seetõttu kasutati andmekogust kõiki teejooni (välja arvatud teekatteta teede omi). Vooluvete kihist kasutati kõiki jooni, mis olid kraavid või peakraavid. Andmekogust valiti eemaldamist vajavaid objekte kujutavad joonobjektid (Joonis 9B) ning loodi nende ümber 20 m raadiusega puhvertsoon, mis piiritles alad, milles asuvad ebasoovitavad reljeefivormid. Enamasti piisanuks ka 5 või 10 m raadiusega puhvrist, kuid alal esines üksikuid suuri tehiseobjekte, kus probleemsete kohtade eemaldamiseks tuli kasutada 20 m raadiusega puhvrit. Kõigi piiritletud alasse jäänud pikslite väärtused eemaldati (Joonis 9C). Eemaldatud väärtuste asemele interpoleeriti uued väärtused (Joonis 9D).



Joonis 9 Teetammide ja kraavide eemaldamine reljeefist. A - algne reljeefimudel, B - teede ja kraavide telgjooned andmekogust, C - puhvertsooni jäänud väärtused eemaldatud, D - reljeefimudel interpoleeritud väärtustega.

4.2 Maastiku põhiparameetrite kaudu orgude defineerimine

Maastiku arvuliselt kirjeldavateks parameetriteks on absoluutkõrgus, maapinna kuju/vorm, topograafiline asend ja topograafiline konteksti. Neist neljast arvulisest parameetrist saab omakorda järelda uuritavate nähtuste mastaapi ja pinnavormi tüüpi (Deng, 2007). Järgnevalt on katsetatud kõigi eelpool toodud parameetrite kaudu orgude defineerimist ning analüüsitud, kas katsetatav parameeter on sobilik kirjeldamiseks orgu.

4.2.1 Absoluutkõrgus

Käesoleva töö aluseks on absoluutkõrgust kujutav digitaalne reljeefimudel, millest arvutatakse välja muude parameetrite mudelid.

4.2.2 Maapinna kuju

Absoluutkõrgust kujutades on pikslite väärtused täiesti sõltumatud naaberpikslite väärtusest. Soovides kujutada maapinna kuju tuleb vaadelda pikslit naaberpikslite suhtes. Seejuures naaberpikslitena saab kasutada vahetuid naaberpikseid või mingisse ettemääratud kaugusvahemikku jäävaid pikseid.

4.2.2.1 Kaldenurk

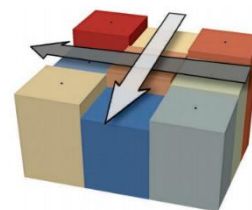
Käesolevas töös kasutati ArcGIS tarkvara laienduse *DEM Surface Tools* tööriista *Slope*. Tööriist võimaldab kaldenurga arvutamiseks rakendada kolme meetodit, milleks on 4 piksli meetod (4-Cell Method), Horn'i meetod (Horn's Method) ja Sharpnack'i ja Akin'i meetod (Sharpnack & Akin's Method). Nende kolme (ja veel viie meetodi, mida kasutatav tööriist kasutada ei võimalda) täpsust on võrreldud (Jones, 1998), ning leitud, et täpsem on 4 piksli meetod, kuigi täpsuse vahe Horn'i meetodiga on väga väike. Erinevalt 4 piksli meetodist kasutab Horn'i meetod kaheksat naaberpikslit kaldenurga leidmiseks. Tulenevalt sellest hinnangust kasutatakse käesolevas töös 4 piksli meetodit (Fleming, Hoffer & Lafayette, 1979); (Zevenbergen & Thorne, 1987) nõlva kalde leidmiseks. Samuti on tegemist matemaatiliselt lihtsaima meetodiga ja seeläbi võimaldab lühemaid arvutusaegu suurte rastritega töötamisel.

Käesolevas töös on kaldenurgad esitatud kraadides, mille puhul 0 kraadi vastab horisontaalsele pinnale ja 90 kraadi vastab vertikaalsele pinnale. Valemid leidmaks piksli Z_5 kaldenurka 4 piksli meetodiga on järgnevad:

$$\text{Ida - lääne gradient} = G = \frac{(-Z_4 + Z_6)}{2\Delta x}$$

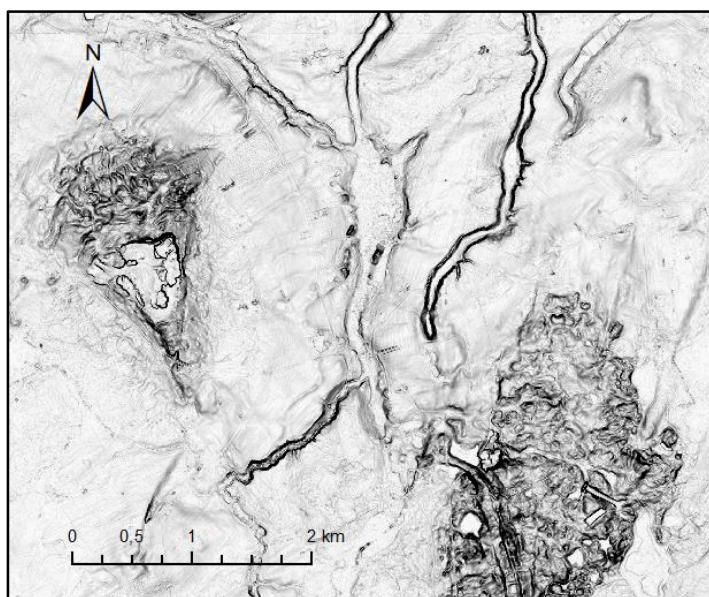
$$\text{Põhja - lõuna gradient} = H = \frac{(-Z_2 + Z_8)}{2\Delta y}$$

Z ₁	Z ₂	Z ₃
Z ₄	Z ₅	Z ₆
Z ₇	Z ₈	Z ₉



$$\text{Kaldenurk (kraadides)} = \alpha \tan \sqrt{(G^2 + H^2)} \left(\frac{180}{\pi} \right)$$

Joonis 10. 4 piksli meetodi illustatsioon. (Joonis „DEM Surface Tools“ kasutusjuhendist)



Joonis 11. Näide nõlvakalde rastrist. Nõlvakalle tasasest (hele) kuni järskude nõlvadeni (tume).

4.2.2.1.1 Kaldenurga alusel oru piiritlemine

Meetodiga prooviti määratleda oru serva tulenevalt maksimaalsest nõlvakaldest. Tööriist *Slope* abil loodi absoluutkõrguse rastrist kaldenurkade raster väärtusvahemikuga 0 kuni 90 kraadi (Joonis 11). Reljeefirastris olid paratamatult väiksed mõõtmiste ebatäpsused sees, mis kunstlikult tegid ka siledad pinnad (näiteks veekogude pinnad) ebatasaseks. Nõlvakalle on matemaatiliselt kõrguse muutumise kiirus ehk kõrgusväärtuste tuletis. Seetõttu mõjutab iga piksel oma nelja naaberpiksli kaldenurga väärtust, ning kaldenurga rastril on pind veelgi ebatasasem, kui algsel absoluutkõrguse rastril. Visuaalseks analüüsiks kujutab nõlvakalde raster väga hästi orge ja nende piirjooni. Esmalt katsetati lävendväärtusest suurema kaldenurgaga piirkondade (oru nõlvade) eristamist ülejäänust. Näiteks seati lävendväärtuseks 5 kraadi, ning selekteeriti pikslid, mille väärtus oli 5 ja enam kraadi. Moodustusid pikslite grupid, mis oru laia nõlva puhul katsid suuri alasid. Kuna soov oli määratleda nõlva joonega

kasutati tööriista *Thin*, mis piksligrupid kitsendas 1 piksli laiusteks. Kuna piksligruppides oli auke ehk üksikuid piksleid, mille väärtus oli alla 5 kraadi, tekkis kitsendamisel ühest piksligrupist palju 1 piksli laiusi jooni. Seega tuli nende piksligrupi aukude kohale genereerida naaberpikslitest tulenevalt väärtused, sest tööriist *Thin* õhendas piksligruppi nii, et grupis olevast august mööduks piksli laiune joon mõlemalt poolt. Õhendatud piksligruppidest sai omakorda luua vektoriseeritud jooned. Paraku asetused loodud jooned varasema piksligrupi telgjoonele, mitte maksimaalse nõlvakalde joonele. Samuti on nõlvad (ja seega genereeritud nõlvajooned) ka positiivsetel pinnavormidel, mis käesolevas töös huviorbiidis ei ole. Töös jõuti järeldusele, et ainult nõlvakalde kaudu ei ole võimalik orge piiritleda.

4.2.2.1.2 Hüdrolöögia tööriistade abil orgude piiritlemine

Teine meetod loomaks jooni, mis iseloomustavad nõlva maksimaalse kalde kulgemist oli analoogne positiivsete pinnavormide harjajoonte leidmise meetodikaga. Seda meetodit on varem kasutatud voorte harjajoonte (Ülem, 2015) ja retsensioonimereenide harjajoonte (Järveoja, 2012) tuvastamisel. Erinevus seisnes selles, et kõrgusrastri asemel kasutati sisendina nõlvakalde rastrit. Nõlvadel olevad suured kaldenurga väärtused asendavad harjadel olevaid kõrgeid absoluutkõrguse väärtusi. Nõlvakalde rastri pikslitele arvutati voolu suund (tööriist *Flow Direction*), mis kujutaks suundasid maksimaalse kalde joonest eemale. Järgnevalt leiti virtuaalne voolu akumulatsioon (tööriist *Flow Accumulation*), mis kasutab voolu suuna andmestiku sisendina. Maksimaalse kalde leidmisel kasutatakse piksleid, mille virtuaalne voolu akumulatsioon on null ehk nende pikslite kaldenurga väärtused on suuremad, kui naaberpikslitel. Null akumulatsiooni-väärtusega on ka palju piksleid, mis asuvad tasastes piirkondades ja need tuleb andmetest kõrvaldada. Null akumulatsiooniga pikslite hulgast filtreeriti välja need, mis on kohakuti reljeefirastri pikslitega, mille väärtus on 5 ja enam kraadi. Neile kahele tingimusele vastamine kõrvaldab tasastel aladel olevad piksleid, mis samuti vastanuks voolusuuna ja akumulatsiooni tingimustele. Ilmneb, et oru nõlvadele kujuneb välja mitu pikslite ahelat kuna nõlvad on muutliku kaldenurgaga. Meetod toob hästi esile järskude nõlvadega oruperved, kuid ühest piiri orule määrata ei õnnestunud. Samuti ei suudetud meetodiga tuvastada orgude laugeid nõlvu, sest 5 kraadise piirväärtuse langetamisega kaasnes väga palju müra ebatasastelt aladelt, kus orge tegelikult pole.

4.2.2.2 Kaldesuund

Kaldesuuna leidmiseks kasutati ArcGIS tarkvara laienduse *DEM Surface Tools* tööriista *Aspect*. Tööriist määras igale pikslile kaldesuuna lähtudes eelpool kirjeldatud 4 pikslit meetodist, mida kasutati kaldenurga määramisel. Kuna igal pikslil on 8 naaberpikslit, on ka kaldesuunal 8 võimalikku väärtust. Teoorias võiks valdavalt liustiku liikumisega paralleelsetes orgudes ilmnedu kaldesuunad, mis on oruga risti. Reaalsuses on aga 5m lahutusega reljeefirastril oru nõlvad väga komplitseeritud pinnad ning kaldesuuna rastrist märkimisväärseid seaduspärasusi ei ilmne. Kaldesuuna seaduspärasused ilmnevad paremini madalama lahutusega või kunstlikult silutud rastril, kuid sellist rastrit kasutades tuleks andmete kvaliteedis teha järeleandmisi. Kuna kaldesuunda omavad kõik pikslid (millest suure enamiku kaldenurk on nullilähedane), siis kaldesuund iseseisva parameetrina ei ole kuigivõrd kasulik. Määrates kaldesuunda pikslitele, mille kaldenurk ületab ettemääratud lävendväärtust on tulemuseks raster, mis kujutab vaid arvestatavate kaldenurkadega alade kallakussuundasid, kuid ka selline raster ei kajasta väga laugete nõlvadega orge.

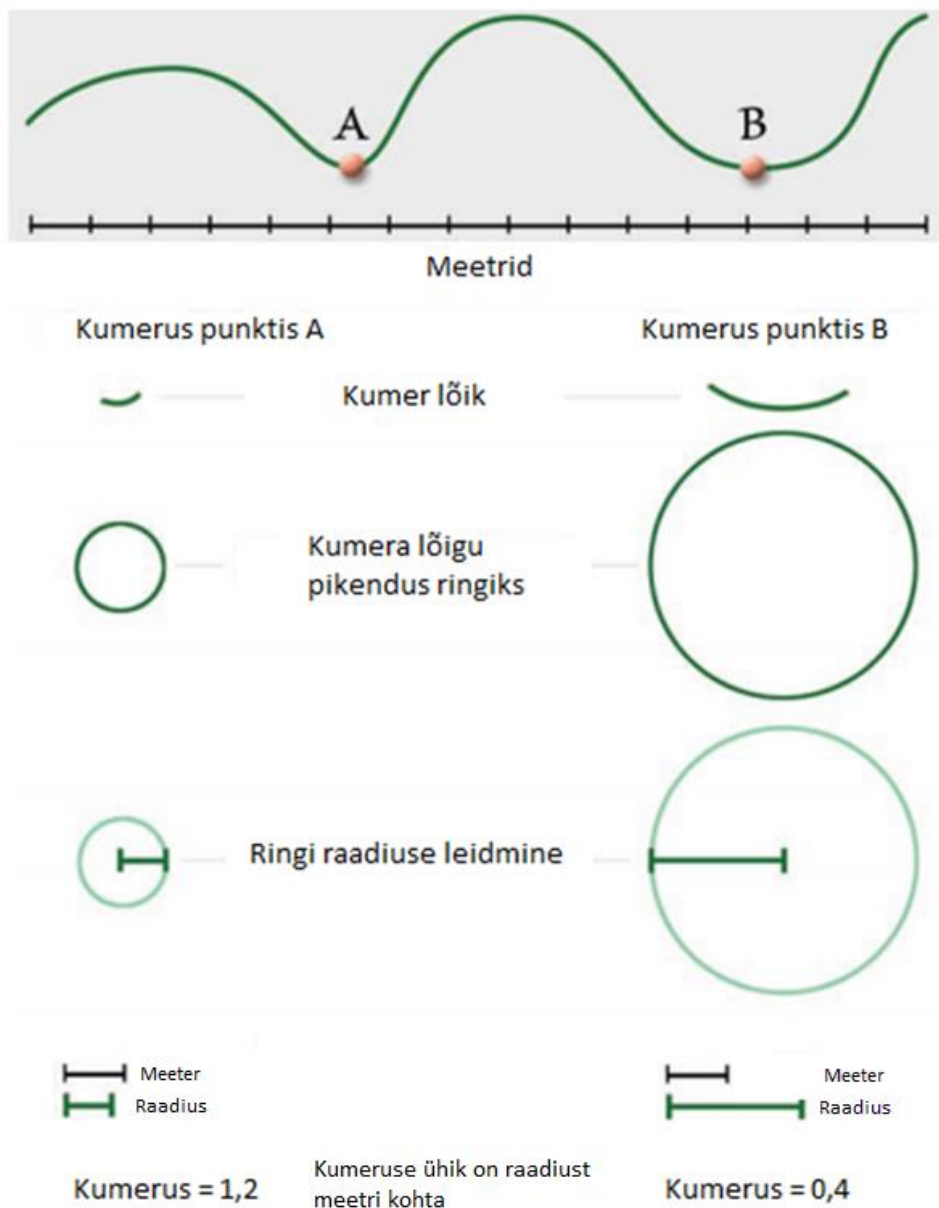
4.2.2.3 Pinna kumerus

ArcGIS tarkvara laienduse *DEM Surface Tools* tööriist *Curvature* võimaldab tuvastada reljeefi kumerusi, nõgususi ja tasasusi (edaspidi mainitud üldistavalt kui kumerusi) mitmel teljel ja mitme algoritmiga. Meetodi rakendamise eesmärk oli leida oru nõlva ülemine kumer (*convex*) ja alumine nõgus (*concave*) osa, mida kasutada oru piiritlemiseks. Teoreetiliselt on igal nõlval olemas kumer ülaosa ja nõgus jalam ning neist loodud jooni saaks kasutada oru piiritlemiseks.

Tööriist kasutab kumeruste leidmiseks Evans'i meetodit (Evans, 1979), mida eelistatakse (Florinsky, 1998b) teisele laialt levinud Zevenbergen & Thorne'i meetodile (Zevenbergen & Thorne, 1987). Eelistena nimetab Florinsky Evans'i meetodi omadust korrigeerida reljeefi rastris esinevaid juhuslikke vigasid, sest meetodi loodav pind ei pruugi alati läbida kõiki üheksat arvutusse kaasatud pikslit. Samuti on matemaatiliselt tõestatud (Florinsky, 1998a) Evans'i meetodi suurem täpsus võrreldes Zevenbergen & Thorne'i meetodiga. *Curvature* tööriista lihtsustatud põhimõte on pikslile kumeruse väärtuse leidmiseks luua 3x3 pikslit hõlmav kumerpind, mis läbib üheksat pikslit, ja seejärel väljendada loodud pinna kumeruse suurust ja suunda arvuliselt. Kumeruse väärtuse leidmist selgitab lihtsustatult Joonis 12.

Käesolevas töös pakkus huvi maksimaalsel kallakussuunal paiknevad kumerused, mida väljendab algoritm *Profile Curvature*. Kumera pinna puhul on väärtus negatiivne, nõgusa

pinna puhul positiivne ning tasapinna puhul null. Käesolevas töös soovitakse kumeruse väärtust kasutada oru piiritlemiseks ning seetõttu on kumeruse märk olulisem kui suurus.



Joonis 12 Kumeruse väärtuse leidmine.

Kumeruse määramisel on samad probleemid, mis kaldesuuna määramisel, sest kumerust määratakse pikki kaldesuunda. Kuna kaldesuunad on väga varieeruvad ka kitsamas piirkonnas, vahelduvad ka kumeruse väärtused. Probleemile pakub leevendust silutud reljeefirastri kasutamine, kuid see tekitab infokao. Kuna kumerad pinnad esinevad kõikjal reljeefis, siis vähemalt automaatse reljeefivormi piiritlemise parameetrina on nende potentsiaal madal.

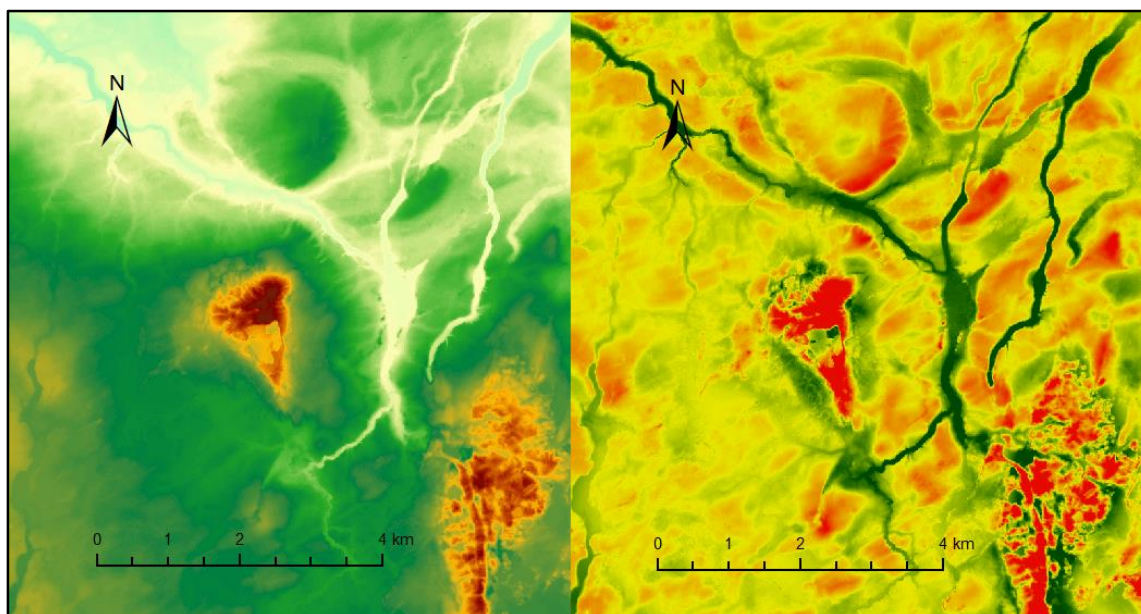
4.2.3 Topograafiline asend

Topograafiline asend võib omada mitmesugust sisu, kuid põhimõtteliselt on tegemist punkti (piksli) asukohaga mingi muu punkti või piirkonna suhtes.

4.2.3.1 Suhteline kõrgus

Käesolevas töös käsitleti topograafilist asendit kui suhtelist kõrgust. Töös kasutati ArcGIS tarkvara laienduse *Land Facet Corridor Tools* tööriista *Topographic Position Index* (Weiss, 2001). Suhtelise kõrguse raster kujutab piksli absoluutkõrguse väärtuse erinevust naabruskonna keskmisest absoluutkõrguse väärtusest. Naabruskonna kuju ja ulatust saab tööriista seadetest määrata. Piksli positiivse väärtuse korral on maapind kõrgemal- ja negatiivse piksli väärtuse korral madalamal kui ümbruskonna keskmine absoluutkõrgus. Suhtelise kõrguse ühikuks on käesolevas töös meeter. Suhtelise kõrguse kasutamine annab võimaluse panna iga piksel oma naabruskonna suhtes konteksti.

Käesolevas töös on kasutatud naabrusena ringikujulist ala ja selle raadiuse parameetrit. Näiteks 500 meetri raadiuses (alana 785000 m² / 0,785 km²) olevate pikslite keskmise ja tsentraalse piksli absoluutkõrguse vahet (Joonis 13).



Joonis 13. Vasakul absoluutkõrguse raster ja paremal suhtelise kõrguse raster (500 m naabruskonna raadiusega arvatud), milles punased väärtused on positiivsed, rohelised negatiivsed ja kollased on nullilähedased.

Tööriista kasutamisel on oluline hinnata, kui ulatusliku naabruskonna suhtes seda rakendada. Katse-eksituse meetodil prooviti 125, 250, 500, 1000 ja 2000 meetri raadiuse põhjal loodud suhtelise kõrguse rastreid. Ilmnes, et väikse raadiuse korral tulevad esile ainult väikevormid.

Suure raadiuse korral kujutatakse nii väike- kui suurvorme, kuid suurvormid domineerivad neis asuvate väikevormide üle. Varasemas töös (Prass, 2014) mõõdeti tõenäoliselt liustikualustes tingimustes tekkinud orgude laiuks 50 kuni 1500 m (keskmine 208 m) ja tõenäoliselt surveta vee poolt kulutatud orgude laiuks 200 kuni 1800 m (keskmine 725 m). Lähtudes eelnevast infost ja katsetuste tulemustest osutus huvipakkuvate orgude tuvastamiseks sobivaimaks 500 m raadiusega loodud suhtelise kõrguse raster, milles tulevad hästi esile nii väikesed, kui ka keskmisest suuremad, kuni 1000 m laiused orud. Suhtelise kõrguse rastri visuaalsel lugemisel tuleb saadud tulemust tähelepanelikult mõtestada, sest seda mõjutab kasutatud ümbruskond. Nimelt näivad väga laiade orgude, mille laius on vähemalt 2 korda suurem kui kasutatud raadius, keskosad välja üldisest reljeefist eristamatud (suhtelise kõrguse väärtused on nullilähedased). Meetodi tugevuseks on see, et meetod toob väga kontrastselt esile järsud muutused reljeefis.

4.2.3.1.1 Suhtelise kõrguse alusel klassifitseerimine

Üheks variandiks suhtelise kõrguse rastrist orgude identifitseerimiseks on kasutada elimineerimist. Tulenevalt suhtelise kõrguse rastri väärtuste olemusest (positiivsed ja negatiivsed), on lihtne positiivsed väärtused asendada naabruskonna keskmise väärtuse ehk null-väärtusega, mille suhtes nende suhtelise kõrguse väärtus määrati. Paraku on väikeste orgude ka piirkondades, kus suhtelise kõrguse väärtused on positiivsed, ning need orud lähevad andmestikust kaotsi positiivsete väärtuste asendamisel. Samuti ei ole negatiivne suhteline kõrgus ilmtingimata oru tunnuseks.

Uuringuala orud kaardistati pool-automaatselt kasutades 500 meetrise naabruskonna raadiuse põhjal loodud suhtelise kõrguse rastrit. Orge kujutavate polügoonide saamiseks loodi suhtelise kõrguse rastrile isojooned (suhtelise kõrguse samakõrgusjooned).

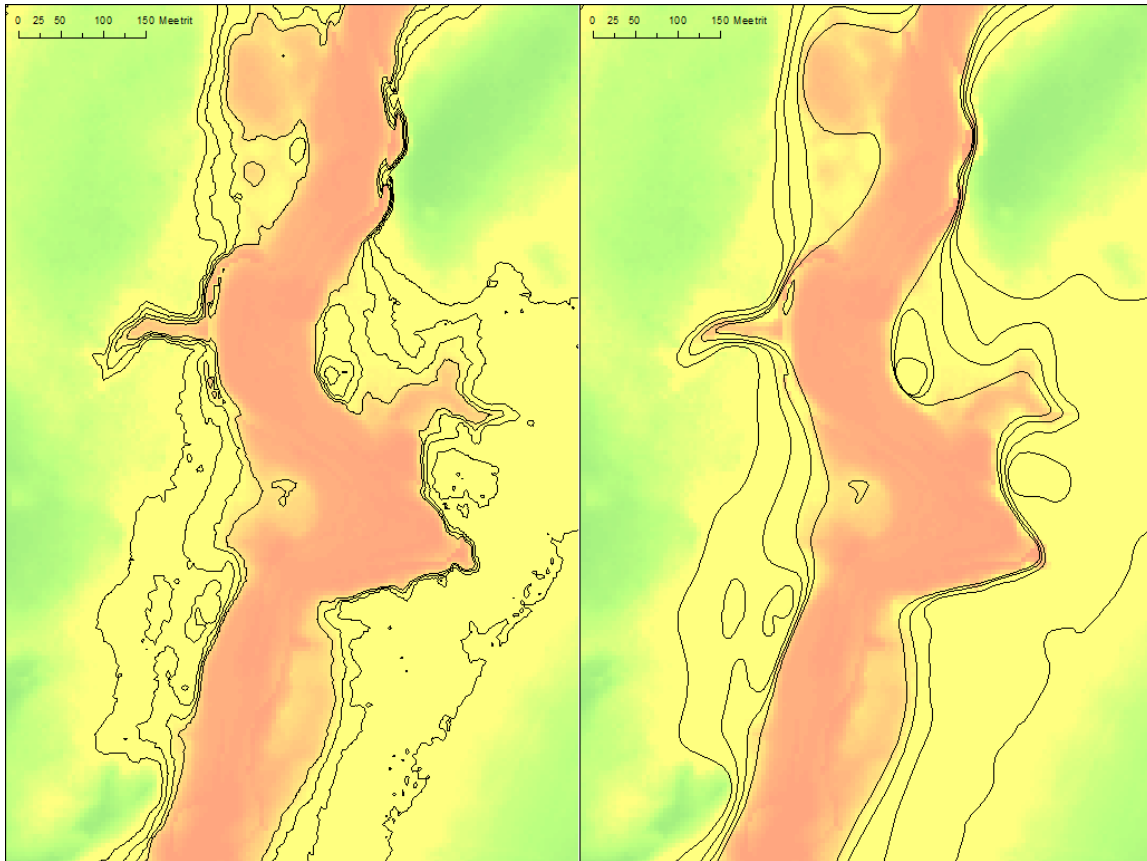
Kontuuride loomise põhietapid:

- 1) *Spatial Analyst > Contour* tööriist loob suhtelise kõrguse rastrile kontuurjooned (Joonis 15).
- 2) *Add Geometry Attributes* tööriist mõõdab ja lisab kontuuridele atribuuditabelisse pikkused.

- 3) *Select by Attributes* tööriist valib vähemalt 100 m pikkused kontuurijooned (lühikesi kontuurjooni genereeritakse väga palju, ning neist pole praktilist kasu) ja salvestab need eraldi kihiks.
- 4) *Smooth Line* tööriist silub väga sakilised kontuurijooned saavutamaks esteetilisema ja loomulikuma väljanägemisega kontuurijooni (Joonis 15 parem pool). Silumine toimub *Polynomial Approximation with Exponential Kernel* algoritmiga (Joonis 14). Silumise tolerantsuse seadeks on 100 meetrit.



Joonis 14 PAEK silumine. Sinine joon on silumata ja punane silutud joon.



Joonis 15 Suhtelise kõrguse samakõrgusjooned (0, -1, -2 ja -3 meetrit) pärast esimest etappi (vasakul) ja pärast neljandat etappi (paremal). Taustaks suhtelise kõrguse raster, mille punane toon kujutab negatiivseid suhtelisi kõrgusi.

Suhtelise kõrguse isojooned annavad konkreetse matemaatilise aluse, mille järgi orgu piiritleda. Praktikas selgub, et 0 väärtusega suhtelise kõrguse samakõrgusjoon ühtib üldjuhul hästi oru nõlvaga, seda eriti hästi järsunõlvaliste orgude puhul. Kuid erandjuhtudel võib nulljoon oru servast olulisel määral erineda. Nendeks on piirkonnad, kus orgude tihedus on väga suur, mis tingib nulljoone paiknemise pigem oru põhjas, mitte nõlval. Tuleb ette olukordi, kus väiksem org on suurema reljeefinõo põhjas, mistõttu nulljoon paikneb väljaspool tegelikku orgu. Sellises situatsioonis, kus nulljoon ei paikne oru nõlval, saab kasutada suhtelise kõrguse samakõrgusjooni väärtustega näiteks -2, -1, 1 või 2 meetrit. Sellised erandjuhtumid on tingitud suhtelise kõrguse meetodi kontekstipõhisusest (vt. peatükk „Meetodi kontekstipõhisusest tingitud klassifikatsioon“).

Orud piiritleti käsitsi polügoonidega, mille loomisel kasutati ära loodud suhtelise kõrguse isojooni, mis ühtisid või olid lähedased maksimaalse nõlvakaldega oru nõlval. Vaevu aimatavate orgude puhul piiritleti need käsitsi ilma matemaatilisi algoritme kasutamata. Saadud polügoone kasutati hiljem võrdlusmaterjalina.

4.2.3.1.2 Suhtelise kõrguse ja nõlvakalde alusel klassifitseerimine

Sõltuvalt vajadusest on suhtelist kõrgust võimalik kombineerida ka teiste parameetritega. Katsetati suhtelise kõrguse ja nõlvakalde kombinatsioone tuvastamiseks oru nõlvasid ja põhja. Selleks loodi kombinatsioonide tabel (Tabel 2), milles kasutatakse ainult negatiivseid suhtelisi kõrgusi ja nõlvakallet.

Tabel 2 Jaotustabel üheksasse klassi nõlvakalde ja suhtelise kõrguse alusel. Rohelised lahtrid vastavad orule, punased ei vasta orule ning kollase puhul on org olemine ebaselge.

Suhteline kõrgus (meeter)/Kaldenurk (kraad)	Kuni 0,5 kraadi Tasane	0,5-2,5 kraadi Lauge nõlv	Üle 2,5 kraadi Järsk nõlv
-0,5 kuni 0 m	1 Tasane ala (Lavamaa)	2 Lauge nõlv	3 Järsk nõlv/nõlva ülaosa
-2,5 kuni -0,5 m	4 Keskmise sügavusega oru põhi	5 Keskmise sügavusega oru lauge nõlv	6 Keskmise sügavusega oru järsk nõlv
Vähem kui -2,5 m	7 Sügava oru põhi	8 Sügava oru lauge nõlv	9 Sügava oru järsk nõlv

Kasutades neid kahte parameetrit on hõlpsasti määratletavad sügavate järsunõlvaliste orgude nõlvad ja põhjad. Madalate laugenõlvaliste orgude puhul, kus nõlvakalded on samas suurusjärgus ümbruskonna maastikul väärtustega, ei õnnestunud selle meetodiga orgude tuvastamine. Meetod tulemus ei olnud rahuldav ning selle tulemust ei kasutatud võrdluseks.

4.2.3.1.3 Kahe erineva suhtelise kõrguse alusel klassifitseerimine

Oluline on mõista eri mastaabiga pinnavorme ja nende vahelisi suhteid. Eelpool kirjeldatud suhtelise kõrguse meetod hindab pinnavorme korruga ühes suhteliselt kitsas mõõtkavas. Minnes suhtelise kõrguse meetodi kasutamisega edasi ning kombineerides kahte erinevat suhtelise kõrguse rastrit on võimalik tuua välja erinevas mõõtkavas pinnavorme ja nende omavahelisi suhteid.

Näiteks eelpool kasutatud 500 m raadiusega suhtelise kõrguse rastri asemel kasutati kombinatsiooni poole suurema (1000 m) ja poole väiksema (250 m) raadiusega arvatud suhtelise kõrguse rastritest. Kaks suhtelise kõrguse rastrit kombineeriti (tööriistaga *Combine*) üheks, mille igal pikslil on kaks väärtust (üks väärtus kummastki sisendrastrist).

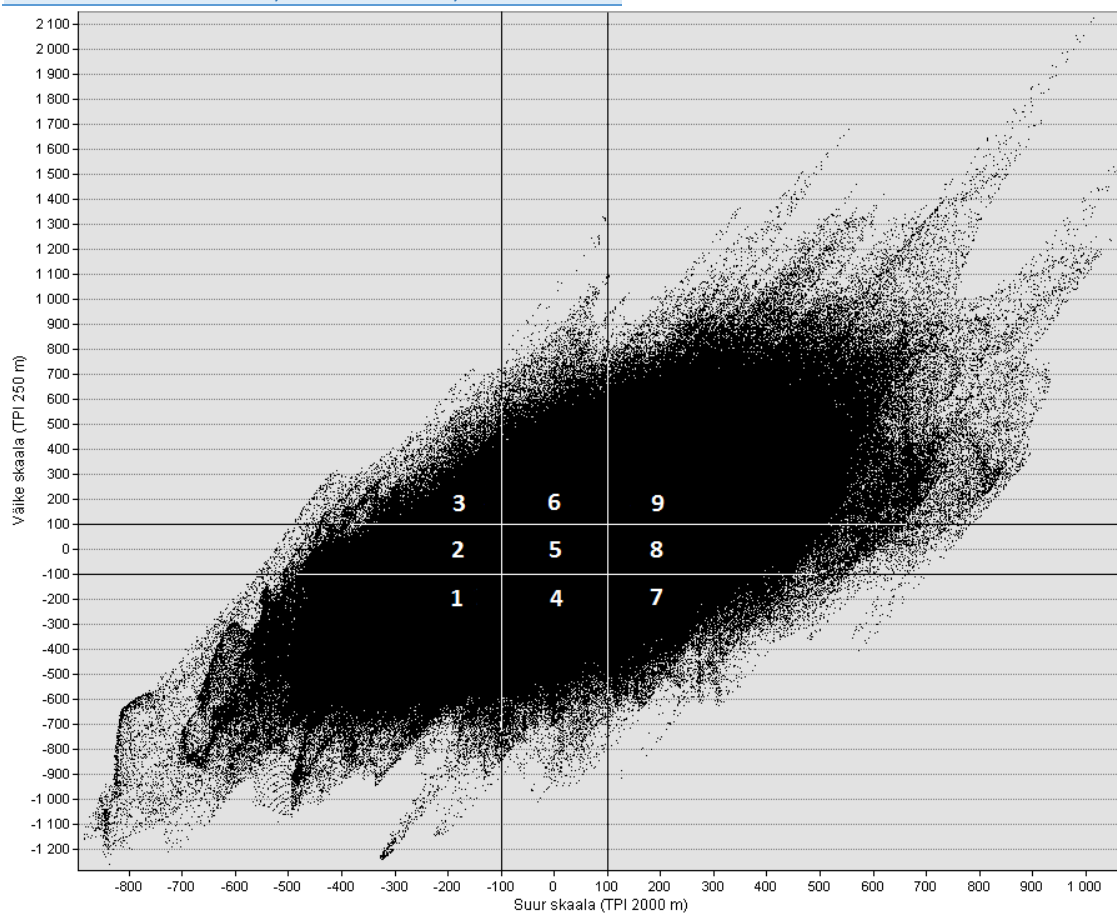
Andmaks klassifitseerimiseks statistilist alust standardiseeriti mõlemast kasutatavast rastrist pärinevad väärtused teineteisest eraldi tööriistaga *Raster Calculator* kasutades valemit $Int(((\text{„sisend_raster“} - \text{rastri_keskmine_pikslil_väärtus}) / \text{rastri_standardhälve}) * 100)$. Standardiseerimise järgselt on mõlema rastri väärtuste keskmine 0 ja standardhälve 100. Pikslite jagunemisel klassidesse (Joonis 16) on klasside vahelisteks piirideks +/- üks standardhälbe väärtus. Standardiseerimata kujul klassifitseerides tuleks mõlema rastri standardhälbe väärtusi kasutada vastaval teljel klasside vahelise piirina.

Hindamiseks kasutatavate rastrite naabruskonna parameetrite mõju kombineeriti lisaks 250 ja 1000 m raadiusega arvatud suhtelise kõrguse rastritele ka 250 ja 2000 m raadiusega rastrid.

Ootuspäraselt selgus, raadiuse parameetrite teineteise vahelise erinevuse suurenemisel nende vaheline korrelatsioon väheneb. Korrelatsiooni vähenemisest tulenevalt väheneb klassidesse 1, 5 ja 9 liigitatud pikslite hulk (Tabel 3). Põhiline erinevus puudutab neid piksleid, mille suhteline kõrgus 1000 m raadiusega naabruskonna puhul ei väljunud standardhälve piiridest, kuid 2000 m raadiusega naabruskonna puhul väljub. Sellised pikslid klassifitseeritakse klassist 1, 5 või 9 mõnda muusse klassi kasutades 250 ja 2000 m naabruskonna raadiuste klassifikatsiooni. Klassifikatsiooni muutus leiab valdavalt aset pinnavormide osas, mille mõõtkava on laiuses ca 2 kuni 4 km. Pikslite jagunemine klassidesse on toodud tabelis 3 ning 250 ja 2000 m naabruskonna raadiuste puhul on punktide klassidesse jagunemine kujutatud joonisel 16.

Tabel 3 Klassifikatsioonides kasutatavate naabruskonna raadiuse parameetrite teineteisest erinevuse suurendamine neljalt korralt kaheksale korrale põhjustab korrelatsiooni vähenemist skaalade vahel ja seega osakaalude muutumist klasside 1, 5 ja 9 kahjuks.

Naabruskonna raadiused	1000 m / 250 m	2000 m / 250 m
Klass 1	5,21%	4,16%
Klass 2	5,02%	6,67%
Klass 3	0,08%	0,02%
Klass 4	3,51%	4,28%
Klass 5	72,05%	69,07%
Klass 6	3,52%	4,41%
Klass 7	0,14%	0,45%
Klass 8	5,19%	6,67%
Klass 9	5,28%	4,27%



Joonis 16. Punktide jaotus klassidesse. Klassi piirideks on +/- 1 standardhälve keskmisest.

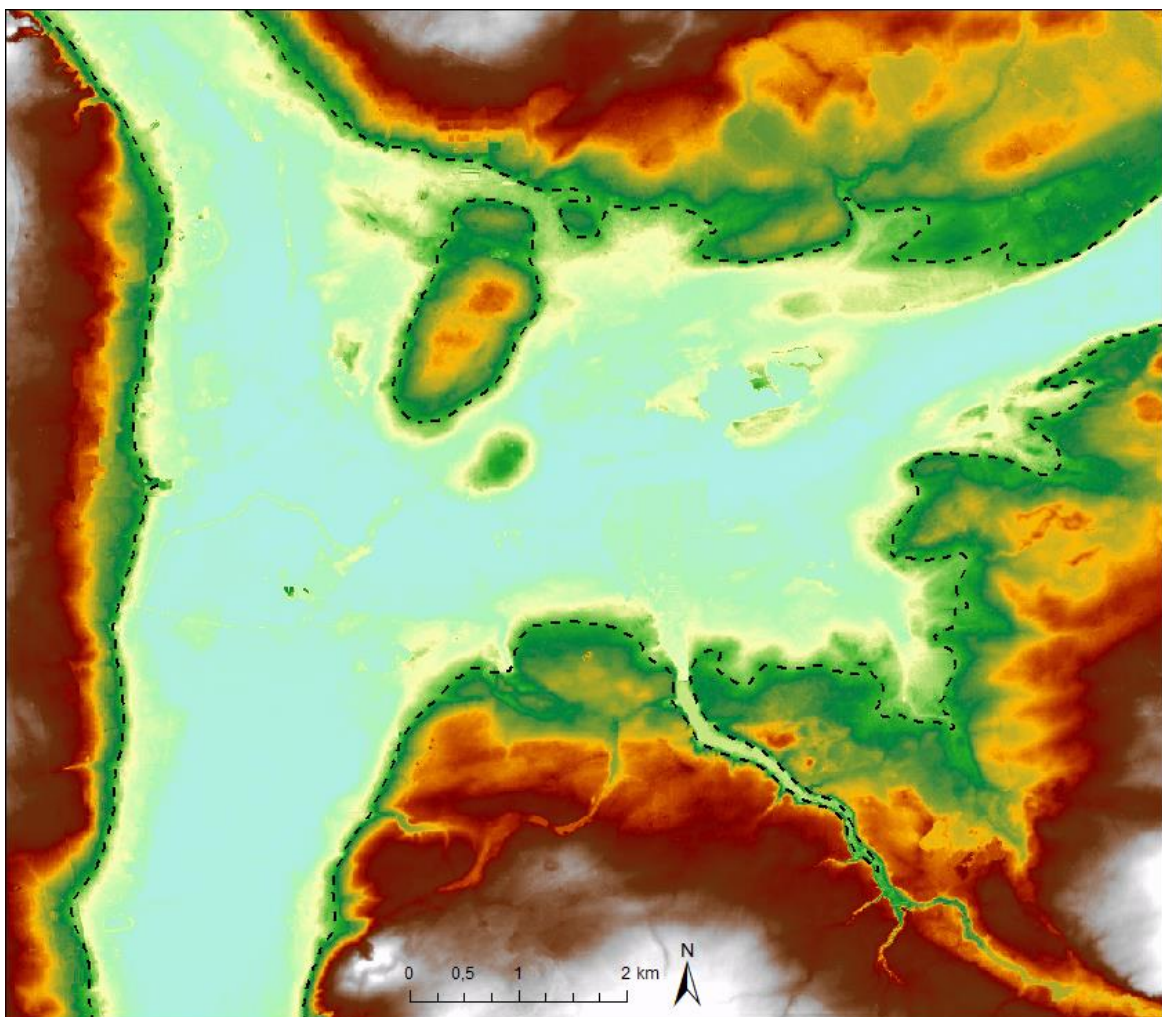
Kahest kombinatsioonist otsustati kasutada seda, milles on kasutatud 250 ja 2000 m raadiusega naabruskondi. Seda seetõttu, et 1000 m raadiusega naabruskond on liiga väike klassifitseerimaks mõningaid suuremaid kuni 4 km laiuseid orge, mis uuritud alal eksisteerivad (vt. peatükk „Naabruskonna raadiuse mõju klassifitseerimise tulemustele“). Tulenevalt rastri pikslit kujutava punkti asetusest joonisel 16 määrati igale pikslile klassi värv ja klassi number

Jooniste keskne piirkond klassifitseeritakse suurel skaalal negatiivseks piirkonnaks alles 10 km ulatusega suure skaala kasutamisel (Joonis 21).

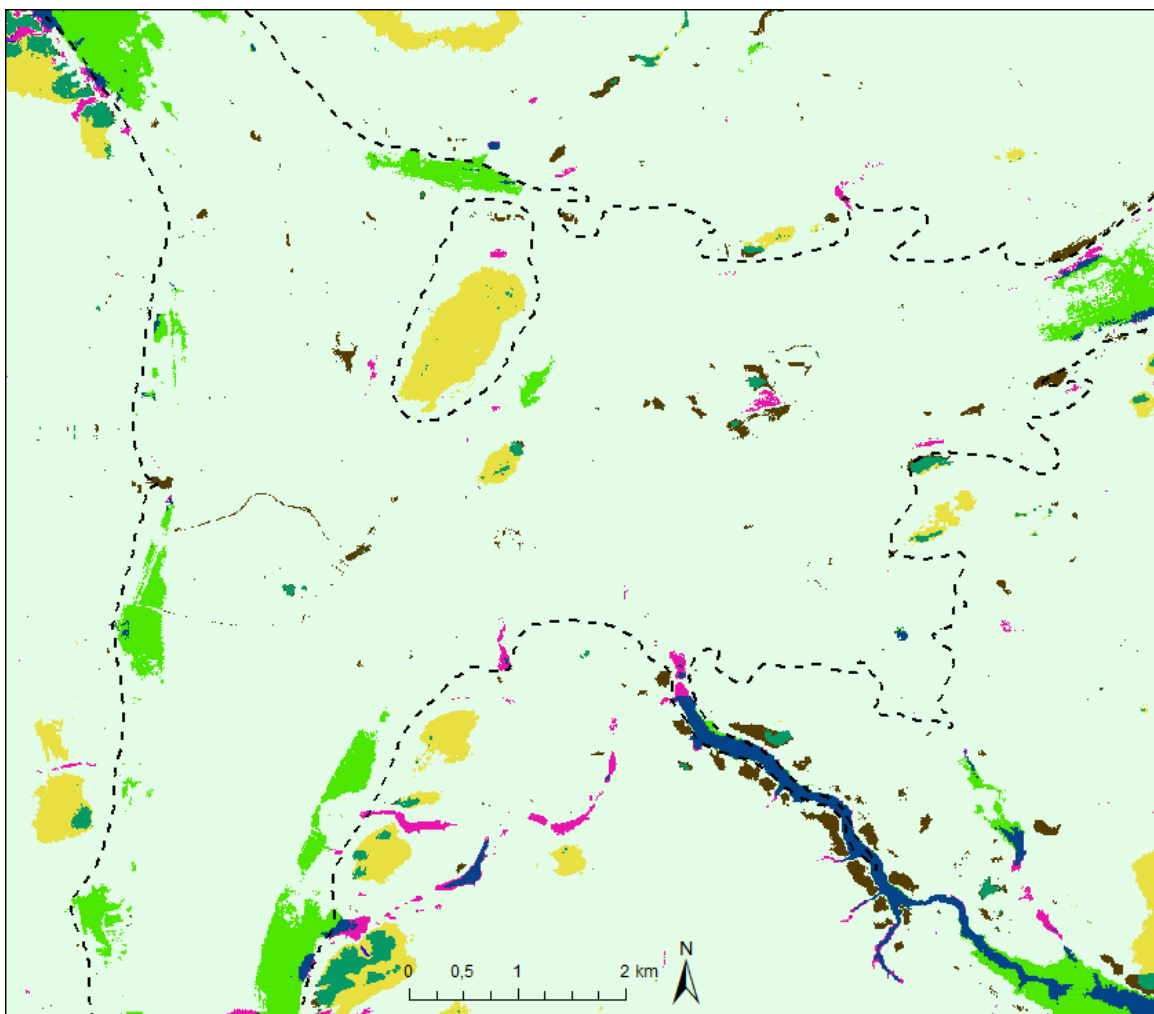
Meetodist tulenevalt ei ole minimaalset oru suurust, millest väiksemaid orge meetod ei tuvastaks. Seda tingimusel, et suhtelise kõrguse arvutamiseks kasutatud naabruskonna raadius on suurem, kui väikseim huvi pakkuv pinnavorm.

Väikse (250 m raadiusega naabruskond) ja suure (2000 m raadiusega naabruskond) skaala suhtelise kõrguse rastril kajastuvad vastavalt kuni 250 m (max 500 m) ja kuni 2000 m (max 4000 m) mõõtkavas pinnavormid.

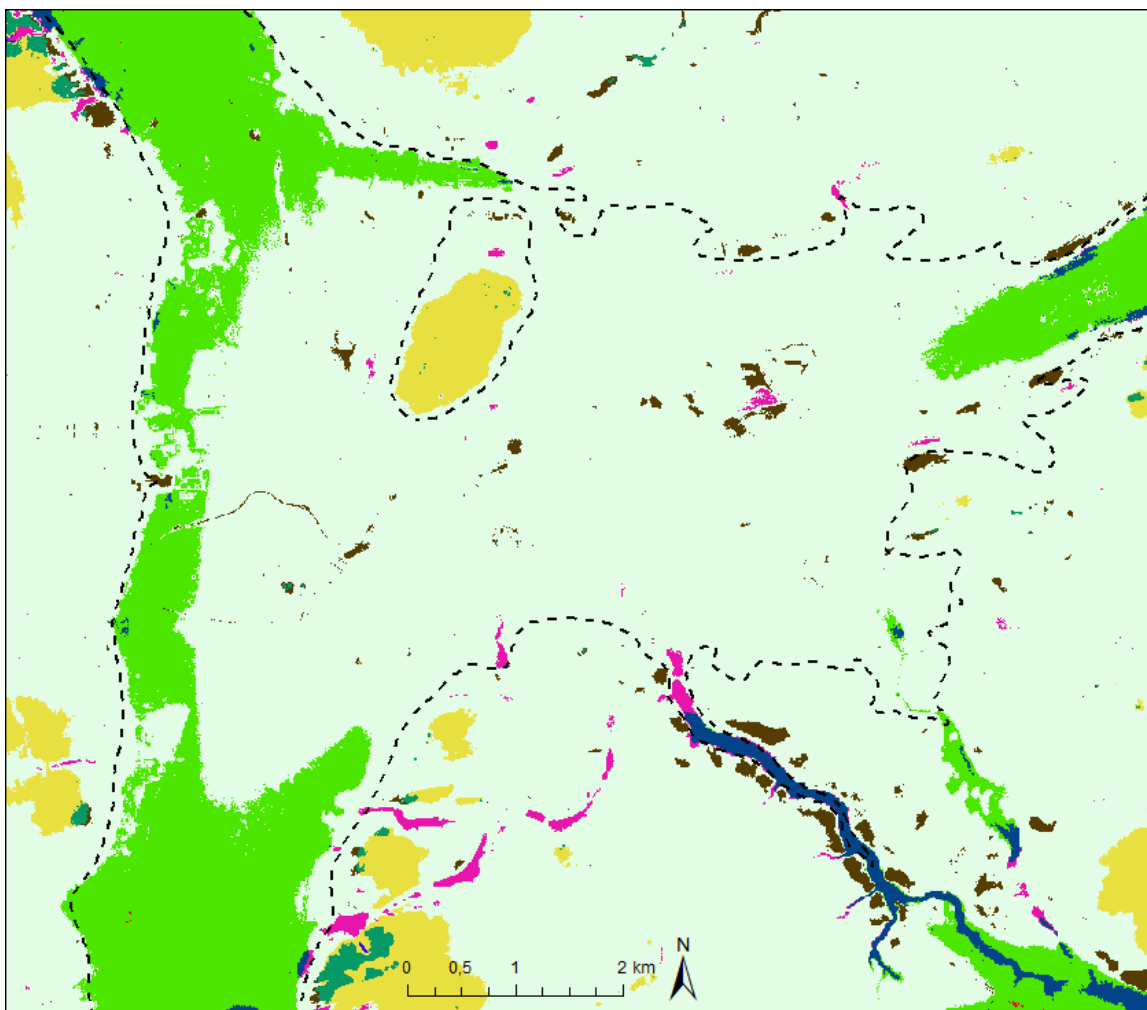
Rakendatud parameetrid on valitud tuvastamiseks lavamaa tüüpi piirkonnast 50 kuni 1500 meetri laiuseid orge. Selline laiusvahemik tuleneb varasemast (Prass, 2014) käitsi läbi viidud orgude kaardistamisest ning laiuste mõõdistamisest.



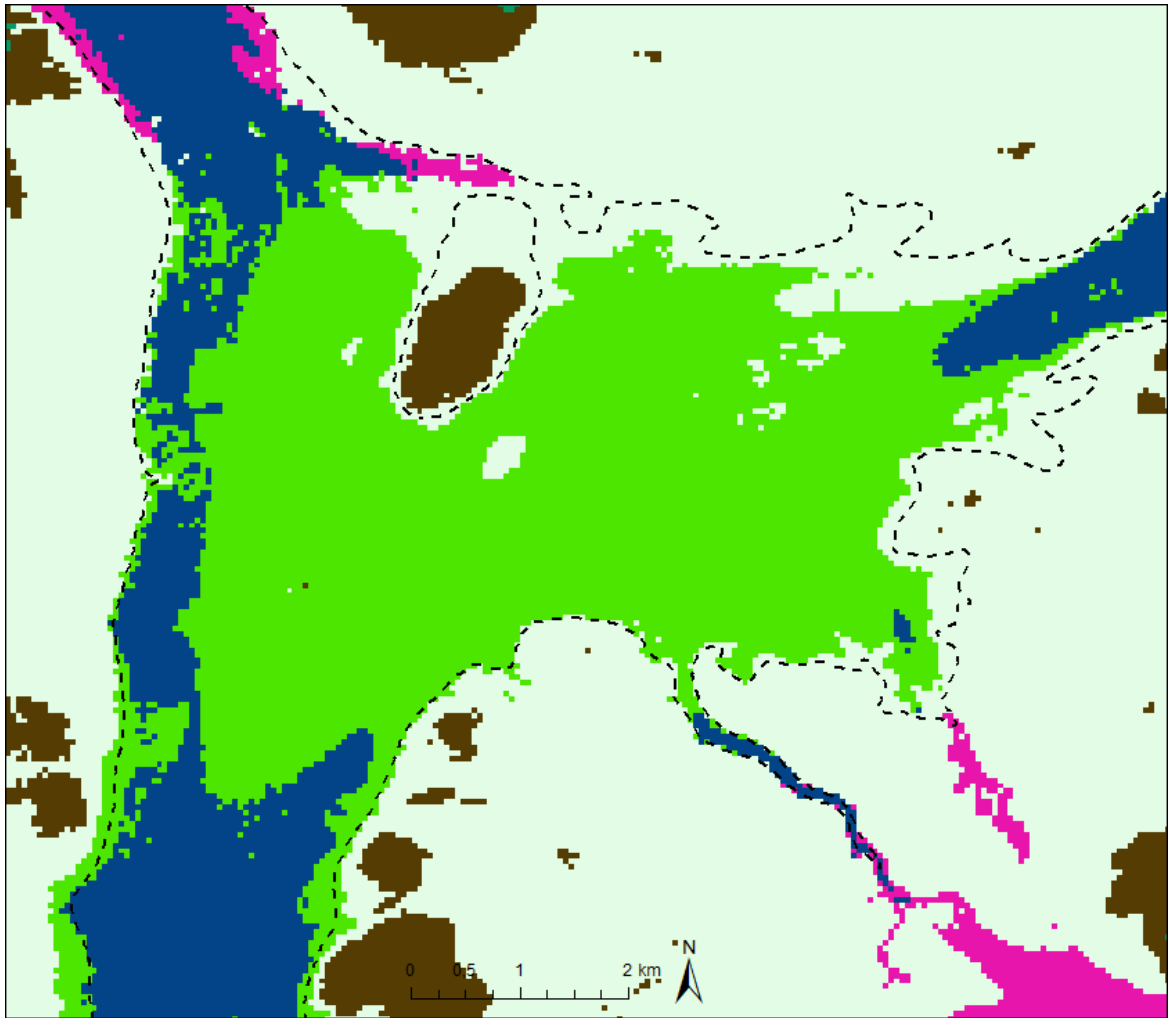
Joonis 18. Reljefimudel väga laiade orgude ristumise piirkonnast. Katkendjoon markeerib orgu piiritlevat 39 m.ü.m.p. samakõrgusjoont.



Joonis 19. Klassifikatsioon 1000 m ja 250 m raadiusega naabruskondade põhjal. Katkendjoon markerib orgu piiritlevat 39 m.ü.m.p. samakõrgusjoont. 1000 m naabruskonna raadiusena pole piisav klassifitseerimaks oruks ida, lõuna ja loode suunas paiknevaid 1,5 – 2 km laiuseid orge.



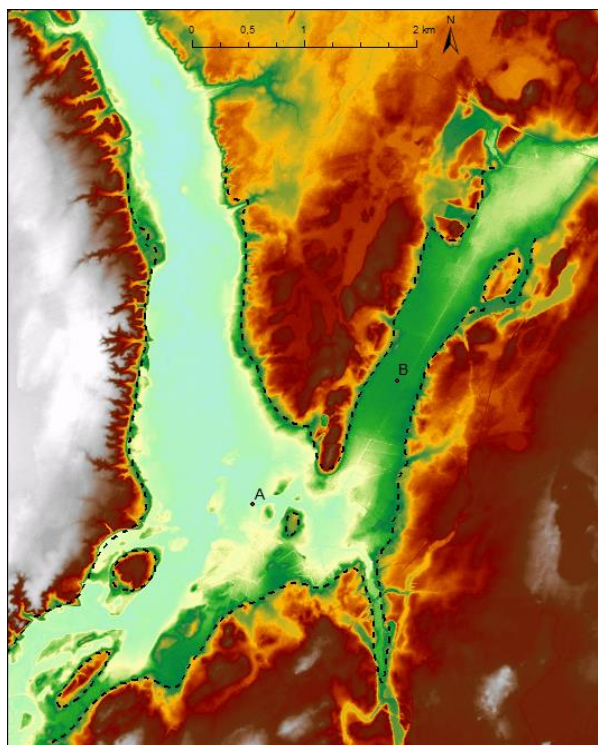
Joonis 20. Klassifikatsioon 2000 m ja 250 m raadiusega naabruskondade puhul. Katkendjoon markeerib orgu piiritlevat 39 m.ü.m.p. samakõrgusjoont. 2000 m naabruskonna raadiusena klassifitseerib alla 2 km laiused orud klassi 2. Sama klassifikatsioon terve uuringuala kohta on toodud lisas 2.



Joonis 21. Klassifikatsioon 10 km ja 2 km raadiusega naabruskondade puhul. Katkendjoon markerib orgu piiritlevat 39 m.ü.m.p. samakõrgusjoont. 10 km raadiusega naabruskond on piisav terve oru korrektseks klassifikatsiooniks. Piksli suurus 50 x 50 m.

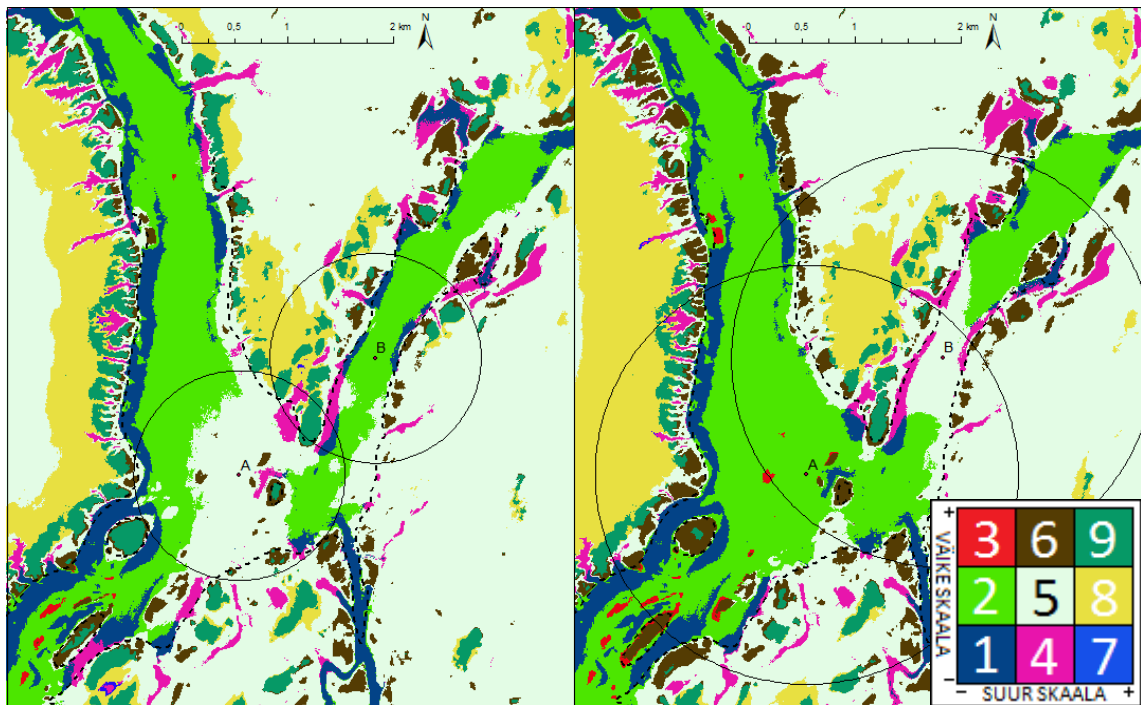
4.2.3.1.3.2 Meetodi kontekstipõhisusest tingitud klassifikatsioon

Kuna ülal kirjeldatud orgude identifitseerimise meetod on kontekstipõhine (tugineb punkti naabrussuhetel) võib esineda piirkondi, mis näiliselt klassifitseeritakse valesti. Sellisteks piirkondadeks on ennekõike alad, kus kohtuvad või on lähestikku mitu suurt orgu (Joonis 22). Joonis 23 vasak pool kujutab situatsiooni, kus punkt A ja selle lähiümbrus klassifikatsiooni järgi ei erine kummalgi skaalal keskmisest enam kui standardhälbe võrra. See tuleneb sellest, et punkti A piirkonnas on org peaaegu 2 km lai ning punktist 1 km raadiusesse jääb valdavalt oru põhi. Punkti B lähiümbrus seevastu on



Joonis 22. Reljeefimudel. Katkendjoon kujutab 43 m.ü.m.p. samakõrgusjoont, mis orgu piiritleb.

klassifitseeritud klassi 2, mis tähendab, et suurel skaalal (ringijoone piires) on tegemist negatiivse piirkonnaga. Joonis 23 parem pool kujutab samasid punkte klassifitseerituna vastupidiselt. Punkt A klassifitseerub suurel skaalal negatiivseks, sest 2 km raadiusesse jäävad ka oru perved. Punkt B asetub aga klassi 5 ehk ei erine kummalgi skaalal keskmisest enam kui ühe standardhälbe võrra. Seda seetõttu, et sellest 2 km raadiusesse jääb lisaks orule, kus asub punkt B ise, ka teine org. Teise oru asumine naabruskonnas tingib naabruskonnale keskmise kõrguse väärtuse, millest punkti B väärtus ei erine oluliselt.



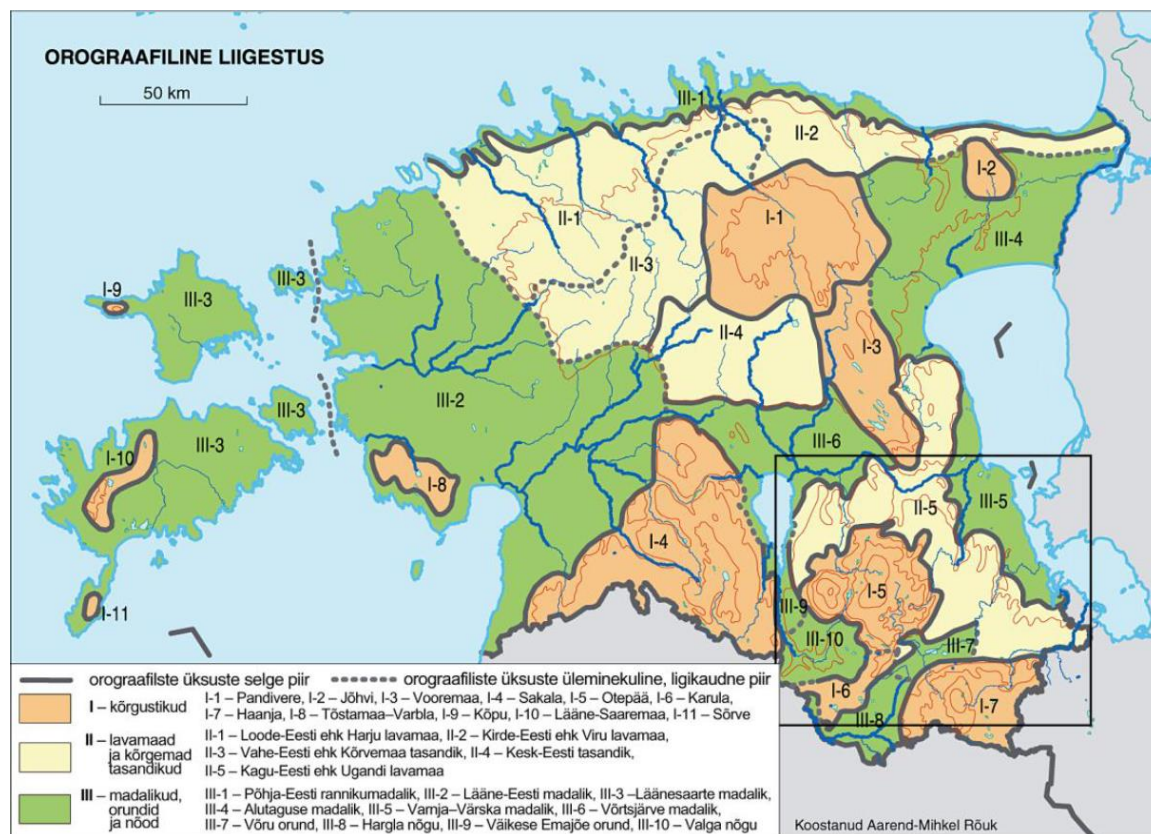
Joonis 23. Vasakul klassifikatsioon 1000 ja 250 m naabruskonna raadiustega. Paremalt klassifikatsioon 2000 ja 250 m naabruskonna raadiustega. Katkendjoon kujutab 43 m.ü.m.p. samakõrgusjoont, mis orgu piiritleb. Ringid kujutavad suurema naabruskonna raadiusesse jäävat ala.

4.2.3.2 Suhteline nõlvakalle

Orgude piiritlemiseks katsetati maastiku klassifitseerimist suhtelise nõlvakalde alusel. Meetod on analoogne suhtelise kõrguse leidmisele, kuid kasutab sisendina absoluutkõrguse rastri asemel nõlvakalde rastrit. Meetod toob esile pikslite kaldenurga erinevuse naabruskonna keskmisest kaldenurgast. Meetodi tugevuseks on omadus adapteeruda vastavalt reljeefi intensiivsusele. Näiteks väga ebatasases piirkonnas eristuvad alad, mis on veelgi ebatasasemad (või tasasemad) kui ümbruskond. Samuti töötab meetod väga tasaste alade puhul, kus eristuvad natukenegi vähemtasased piirkonnad. Keskmisest suuremad kalded on oru nõlvadel ning keskmisest väiksemad suure kaldega alade ehk nõlvade ümbruses. Suhtelisest nõlvakaldest võib mõne maastiku elemendi klassifitseerimisel palju abi olla. Käesoleva töö orgude tuvastamisel ei leitud sellele sobivat rakendust, sest nõlvakalle pole hea orgu iseloomustav tunnus.

4.2.4 Topograafiline/orograafiline kontekst

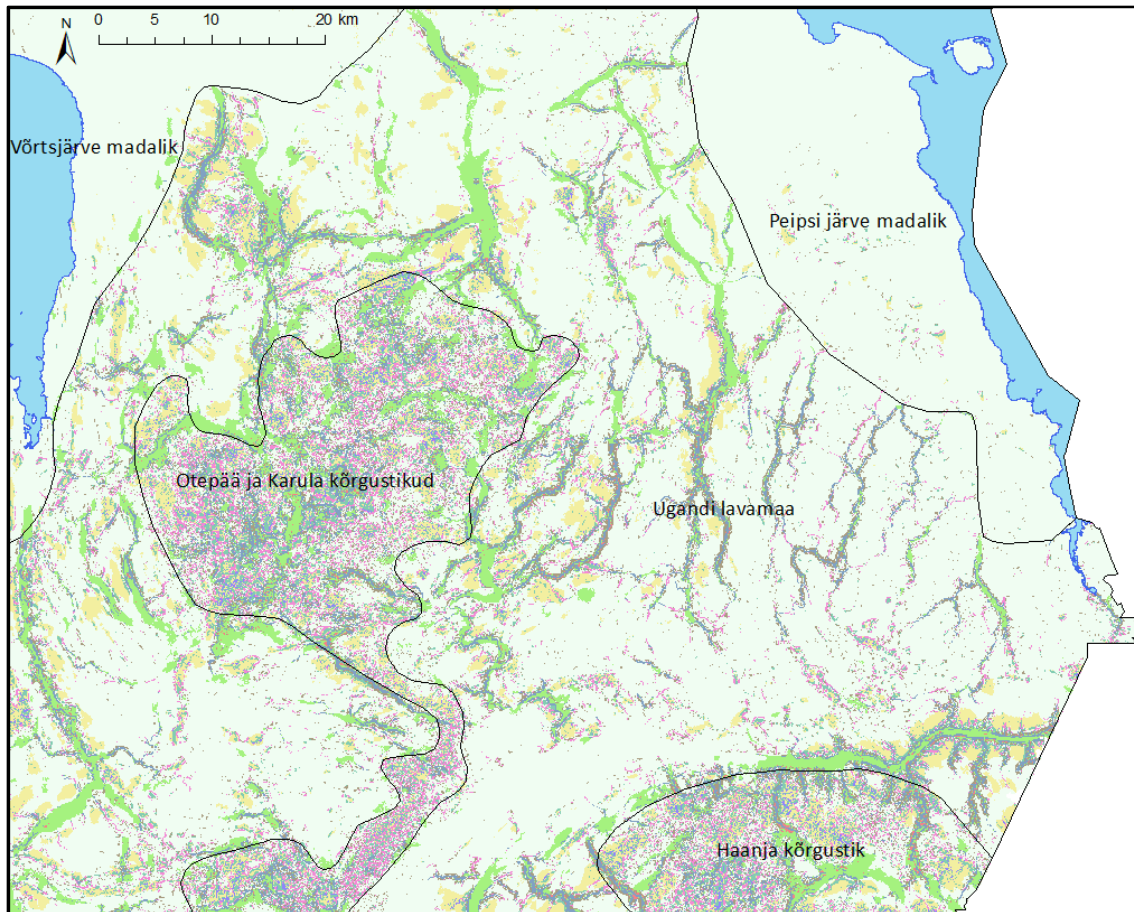
Orograafiline liigestus põhineb piirkondade ainulaadsel tekkel ja sellest kujunenud pinnamoel (Joonis 24). Orograafiline üksus on tervikuna sarnase tekkeloo ja maastikuga. Üksuse piires on sama tüüpi pinnavormid omavahel võrreldavad ja nende põhjal saab teha piirkondlike üldistusi.



Joonis 24. Eesti oroograafiline liigestus Aarend-Mihkel Rõugu järgi. Ristkülikuga on piiritletud käesolevas töös uuritav piirkond.

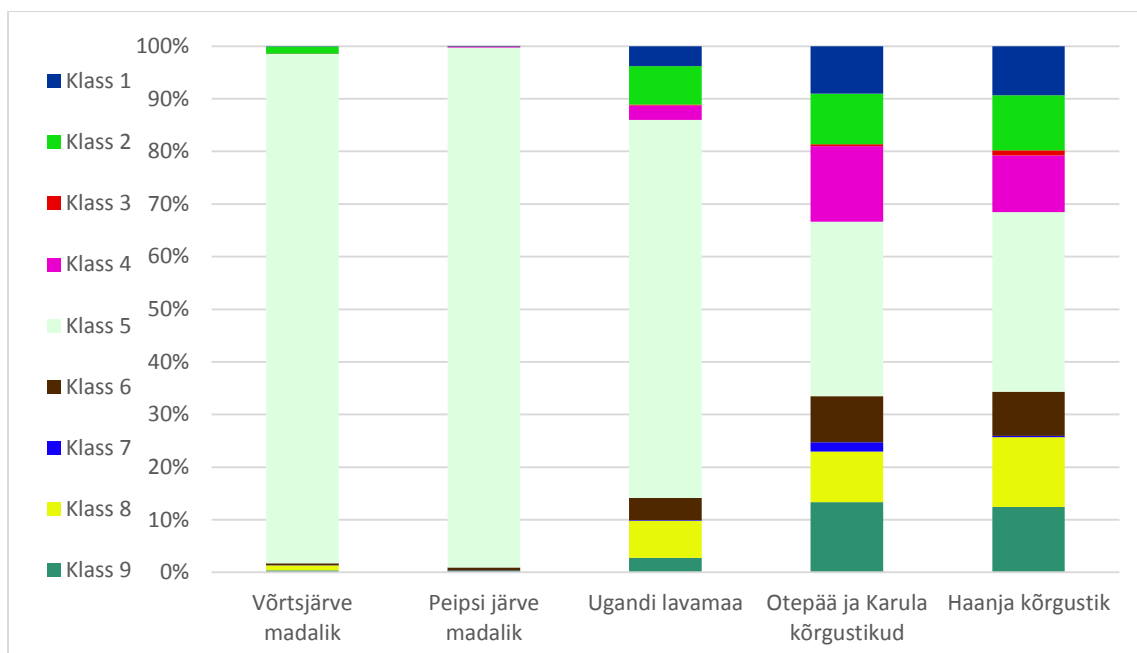
Käesoleva töö uuringuala iseloomulikud oroograafilised piirkonnad on järgnevad (Joonis 25):

- Haanja, Otepää ja Karula kõrgustikud, kuhu akumulatsioon surnud jääd ja selles olnud setet. Tänapäeval aluspõhi paksu settekihi all.
- Liustiku vooluteed, milles liustik liikus suhteliselt kiiresti, ning voolis maapinna lainjaks tasandikuks (lavamaaks), millel Kvaternaari setteid on õhukesed ning orud pole täielikult mattunud.
- Jääjärvede nõod, mida pärast liustiku taandumist kattis vesi, ning mille kunagised negatiivsed pinnavormid on suurel määral või täielikult täitunud setetega.



Joonis 25. Lihtsustatud orograafiline liigestus käesoleva töö klassifikatsiooni alusel ja autori nägemusel. Taustaks klassifikatsioon 2000 ja 250 m skaaladel, mis on toodud ka lisas 2.

Klassifitseerimisele eelnevalt suhtelised kõrgused standardiseeriti kasutades terve uuringuala standardhälve väärtust. Sellest tingituna on uuringuala keskmisest erinevad madaliku- ja kõrgustikualad vastavalt ala- ja ülehinnatud levikuga (Joonis 26 ja Tabel 4). Madalike alaklassifitseerimine väljendub selles, et klass 5 osakaal on väga suur (üle 96%). Madalike piirkonnas on samuti orge. Need orud on niivõrd madalad, et uuringuala tervikuna vaadeldes jäävad need klassifikatsiooni lävendile (+/- 1 standardhälve keskmisest) alla. Väga tasaste alade pinnavorme tuleks klassifitseerida eraldiseisvalt teistest aladest. Rakendades algoritmi ainult madalike aladele, kujuneks ka sinna standardhälve jaotusest tingituna protsentuaalselt sarnane klasside jaotus nagu on tervel uuringualal keskmiselt. Käesolevas töös alasid üksteisest eraldi ei käsitletud, sest see oleks eeldanud nende piiritlemist, mis oleks olnud subjektiivne.



Joonis 26 Klasside jaotus orograafilises kontekstis.

Tabel 4 Maastiku klasside jaotus orograafiliste piirkondade kaupa. Väärtused protsentides

	Võrtsjärve madalik	Peipsi järve madalik	Ugandi lavamaa	Otepää ja Karula kõrgustikud	Haanja kõrgustik
Klass 1	<0,1	<0,1	3,8	9	9,3
Klass 2	1,4	<0,1	7,3	9,6	10,5
Klass 3	<0,1	0	0,2	0,4	1
Klass 4	<0,1	0,3	2,7	14,4	10,7
Klass 5	96,9	98,8	71,8	33,2	34,1
Klass 6	0,4	0,5	4,2	8,8	8,4
Klass 7	<0,1	<0,1	0,2	1,8	0,2
Klass 8	1	<0,1	7	9,6	13,2
Klass 9	0,4	0,4	2,8	13,3	12,5

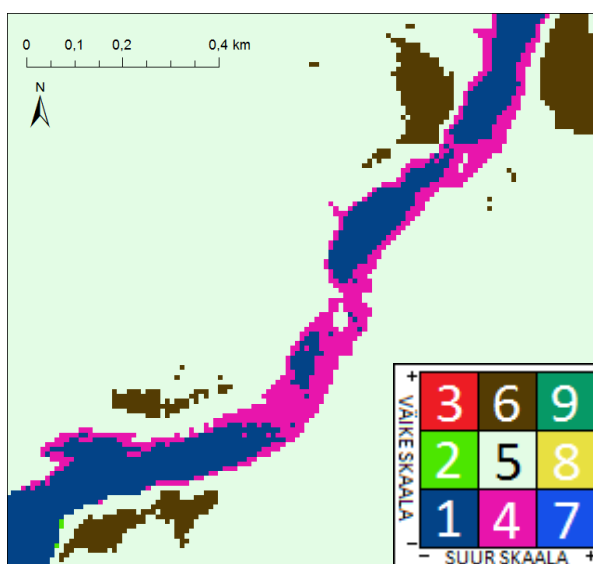
4.3 Polügoonide klassifitseerimine naabrussuhete alusel

Klassifitseerimise tulemusena jagunesid kogu uuringuala pikslid üheksasse klassi. Sama klassi väärtusega pikslid grupeeriti ja neist loodi polügoonid. Loodud polügoonid omavahel ei kattu, samuti pole nende vahel vahesid. Polügoonid ei kata Võrtsjärve ja Peipsi järve. Loodud 9 klassi polügoonid klassifitseeriti omakorda orgudeks või mitte-orgudeks lähtudes nende vahelistest naabrussuhetest.

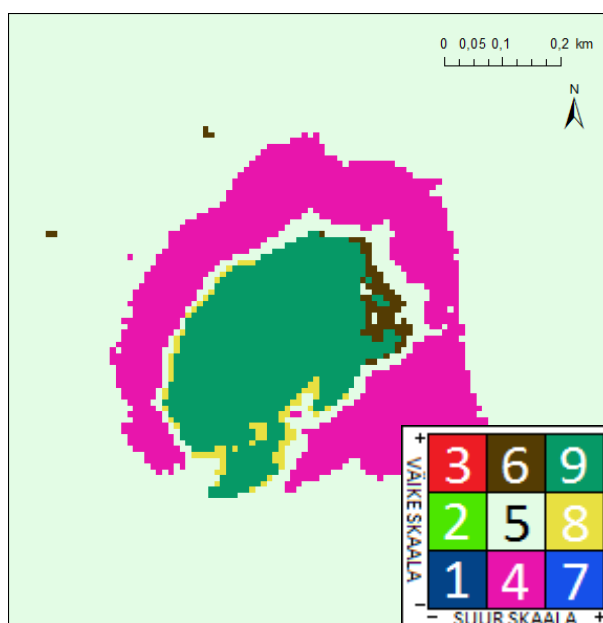
Klass 1 polügoonid, mis kujutavad mõlemal skaalal keskmisest vähemalt ühe standardhälbe võrra madalamaid piirkondi tõlgendati orgudena. Kirjeldavalt vastavad klass 1 polügoonid kitsastele ja keskmise laiusega orgudele. Samuti laiade orupõhjade servaaladele.

Klass 2 polügoonid kirjeldavad laiade orupõhjade keskosasid ning laiu madalaid orgusid, mis erinevad keskmisest enam kui standardhälbe võrra ainult suuremal kasutatud skaalal. Samuti vastavad klass 2 polügoonidele ka lavamaal (klass 5 piirkonnad) paiknevad laugete nõlvadega nõod, mis ei ole orud. Tulenevalt sellest nimetati kõik klass 2 polügoonid, mis on klass 1 polügoonidele naabriks, orgudeks. Klass 2 kokku 9292st polügoonist 8526 polügooni on naabriks klass 1 polügoonile.

Klass 4 polügoonid kirjeldavad väikseid negatiivseid pinnavorme, mis erinevad keskmisest enam kui standardhälbe võrra ainult väiksemal kasutatud skaalal. Sellisteks on päris orgude servad ja madalamad osad

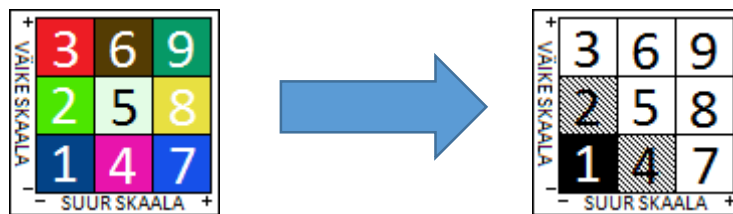


Joonis 27 Näide päris orgu kujutavast klass 4 piirkonnast (lilla), mis on vahetuks naabriks orgu kujutavale klass 1 piirkonnale.



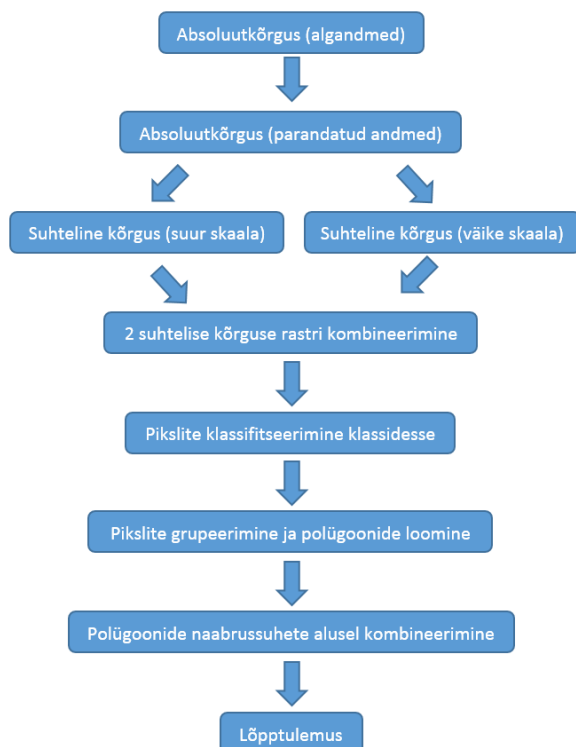
Joonis 28 Näide pseudo-nõost (klass 4, lilla) ümber tasasel alal (klass 5, heledam roheline) asuva positiivse pinnavormi (klass 9, tumedam roheline). Pseudo-nõgu ei ole vahetuks naabriks klass 9 alale.

(Joonis 27) ja pseudo-nõod positiivsete pinnavormide ümbruses (Joonis 28). Pseudo-nõo tüüpi klass 4 polügoonid ei ole vahetuks naabriks positiivsetele pinnavormidele (klassid 6, 8 ja 9), mis ei tee võimalikuks nende tuvastamist sellise naabrussuhte alusel. Küll aga on päris orge kujutavad klass 4 polügoonid vahetuks naabriks klass 1 polügoonidele, mis teeb nende tuvastamise selle naabrussuhte alusel võimalikuks. Seetõttu nimetati oruks need klass 4 polügoonid, mis on naabriks klass 1 polügoonidele. Kõik ülejäänud polügoonid ei ole orud vastavalt eeltoodud klassifikatsioonile. Klassifikatsiooni lõpptulemuseks on kaksikjaotus org või mitte-org. Naabrussuhete alusel ümberklassifitseerimist illustreerib Joonis 29.



Joonis 29. Üheksa polügoonide klassi ümberklassifitseerimine orgudeks ja mitte-orgudeks. Klass 1 polügoonid kujutavad orge. Klass 2 ja 4 polügoonid kujutavad orge, kui nad on naabriks klass 1 polügoonile.

Kokkuvõtvalt on kasutatud meetodi ülesehitus ja põhietapid toodud joonisel 30.



Joonis 30 Andmetöötluse põhietapid algandmetest lõpptulemuseni.

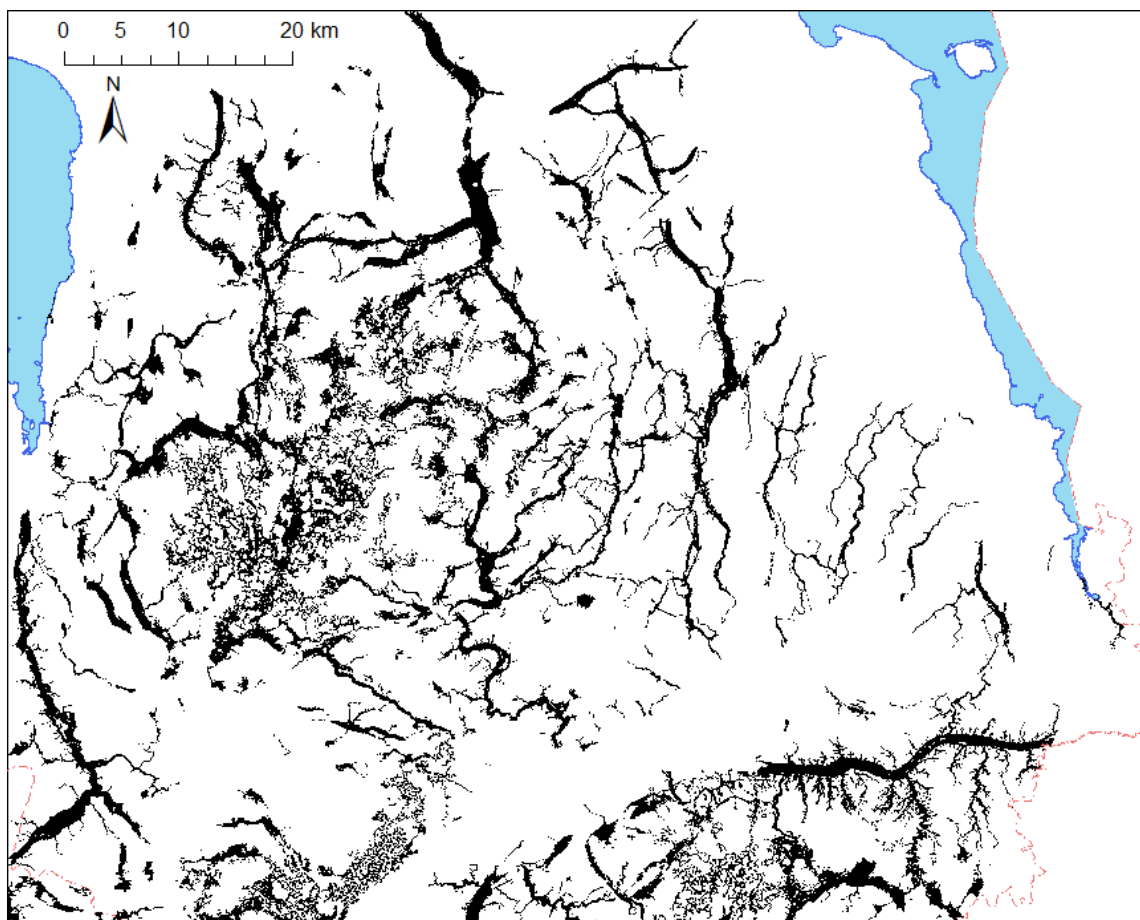
5 Tulemused

Meetodi rakendamise tulemusena loodi uuringupiirkonnast kaart (Joonis 31, Lisa 3), millel mustalt kujutatud alad vastavad ühele järgnevalt toodud kolmest tingimusest.

Tingimus 1. Piksli suhteline kõrgus 250 ja 2000 m naabruskonnas on madalam kui -1 standardhälve keskmisest.

Tingimus 2. Piksli suhteline kõrgus on ainult 250 m naabruskonnas madalam kui -1 standardhälve keskmisest. See piksel asub grupis teiste samale tingimusele vastavate pikslitega. Piksligrupp omakorda on vahetuks naabriks esimesele tingimusele vastavale piksligrupile.

Tingimus 3. Piksli suhteline kõrgus on ainult 2000 m naabruskonnas madalam kui -1 standardhälve keskmisest. See piksel asub grupis teiste samale tingimusele vastavate pikslitega. Piksligrupp omakorda on vahetuks naabriks esimesele tingimusele vastavale piksligrupile.



Joonis 31. Klassifikatsiooni lõpptulemus. Mustana on kujutatud kõik oruks klassifitseeritud alad.

6 Arutelu

Teoreetiliselt kirjeldavad oru kulgemist 7 joont, mida käesolevas töös püüti erinevate meetoditega tuvastada. Need jooned on pikki oru põhja kulgev telgjoon, oru mõlema nõlva jalamil paiknevad maksimaalset nõgusust iseloomustavad jooned, oru mõlemal nõlval paiknevad maksimaalse kaldenurga jooned ja oru mõlemal nõlval paiknevad maksimaalse kumeruse jooned. Need jooned võimaldaksid ideaalis automaatselt mõõta mitmeid orgu kirjeldavaid parameetreid nagu näiteks orulõigu pikkus ja laius. Kõigi joonte puhul selgus, et praktikas on org väga komplitseeritud pinnaga vorm, ning neid jooni pole üheselt võimalik oru piiritlemiseks määrata. Lisaks segab asjaolu, et nõlvaelemente iseloomustavad jooned on olemas ka positiivsetel pinnavormidel.

Rohkem edu oli oru määramisel alana, mida org ka on. Esimene rahuldav klassifikatsioon õnnestus, kasutades suhtelise kõrguse leidmist ühel skaalal. Ühel skaalal klassifitseeriti edukalt orud, mis olid kasutatava skaala ulatusega samas suurusjärgus. Lisades nõlvakalde parameetritele oli võimalik eelnevalt klassifitseeritud negatiivsed pinnavormid jaotada kalde alusel osadeks (järsud nõlvad, lauged nõlvad, tasased põhjad jne). Probleemiks jäi liiga kitsas mastaapide vahemik (nii suhtelise kõrguse kui nõlvakalde suhtes), millel meetod edukalt rakendus.

Edukaimaks osutus kahe erineva mastaabiga naabruskonna põhjal arvatud suhteliste kõrguste kombineerimine. Sellise meetodiga õnnestus saavutada klassifikatsioon, mille metoodika on piisavalt lihtne, kuid samas andis hea tulemuse laias orumastaapide vahemikus.

Eelneva edasiarendusena saaks rakendada kolmanda mõõtme (suhtelise) nõlvakalde näol eristamiseks terviklikust orust selle eri osasid. Lisades kolmandaks mõõtmeks suhtelise kõrguse väga suure naabruskonna (10 kuni 20 km) raadiuses lisanduks täiendav info üldisest paiknemisest maastikul. Kolmas parameeter tingiks klassifikatsiooni klasside arvu mitmekordse suurenemise. Käesolevas töös ei peetud kolmanda mõõtme lisamist otstarbekaks, sest soovitud lõpptulemus õnnestus saavutada kahe mõõtme kasutamisega.

6.1 Meetodi head-vead, tugevused-nõrkused

Algoritmi kasutamise üks põhilisi põhjuseid on inimese tööaja kokkuhoid. Sobilike parameetrite leidmine võib olla inimtöötunde nõudev, kuid muud klassifitseerimise etapid vajavad ajaliselt vähe sekkumist inimese poolt. Suhtelise kõrguse väärtuste arvutamine suure resolutsiooni ja suure naabruskonna parameetriga on küllaltki aeganõudev isegi võimekamale arvutile (Võrrand 1). Naabruskonna raadiuse suurendamisel 2 korda kasvab arvutuseks kuluv aeg 4 korda. Näiteks terve uuringuala 5 x 5 m pikslisuurusega rastri ja 1000 m naabruskonna raadiuse puhul on arvutusaeg ca 30 tundi. 2000 m naabruskonna raadiuse puhul juba 120 tundi. Aja kokkuhoiuks võeti käesoleva töö lõplikus klassifikatsioonis kasutusele 10 x 10 m piksliga rastrid, mis võimaldavad võrreldes 5 x 5 m piksliga rastritega teha samad arvutused 16 korda kiiremini. 16 kordne ajavõit tuleneb sellest, et piksli pindala suurenemisel 4 korda jääb piksleid kokku 4 korda vähemaks. Samuti on sama raadiusega naabruskonnas 4 korda vähem piksleid, mis tähendab kokku 16 korda vähem tehteid.

Võrrand 1 Suhtelise kõrguse rastri arvutamise ajakulu leidmine.

Valem: $t = a * n / v$

Milles,

t – ajakulu sekundites

a – rastri pikslite koguarv

n – naabruskonda jäävate pikslite arv

v – arvuti kiirus (tehet/s)

Näide: Käesoleva töö uuringuala suurus on ca 80 mln (10 x 10 m) pikslit. 2000 m raadiusega naabruskonda jääb 125600 pikslit. Intel Pentium G3258 protsessori kiirus on ca 400 mln tehet/s.

$80 \text{ mln} * 125600 / 400 \text{ mln} = 25120$ sekundit ehk ca 7 tundi.

Algoritmi kasutamine tagab, erinevalt orgude käsitsi kaardistamisest, lõpptulemuse kvaliteedi ühtluse. Algoritmil on parameetrid fikseeritud ning seetõttu puudub ebaühtlust põhjustav subjektiivne inimfaktor.

Polügoonide orgudeks/mitte-orgudeks ümberklassifitseerimisel jäävad mõned madalatele orgudele vastavad polügoonid oruks klassifitseerimata. See probleem puudutab muust

oruvõrgustikust isoleeritud klass 4 polügoone, mida ümbritseb täielikult klass 5 polügoon, ning millel puudub naabrus klass 1 polügooniga.

Algoritmi kasutatud parameetritega pole võimalik tuvastada väga madalaid orge, mille suhteline sügavus ei erine keskmisest enama kui ühe standardhälbe võrra. Sellised madalad orud paigutuvad klassi 5, kuigi nende väärtused on lähedased klasside 4 ja 5 vahelisele piirile. Lahendus oleks sellised väga madalate orgudega tasaseid piirkondi käsitleda eraldiseisvalt. Sellisel juhul oleks standardhälve väärtus väiksem ning rohkem pikselid klassifitseeritaks mujale, kui viiendasse klassi.

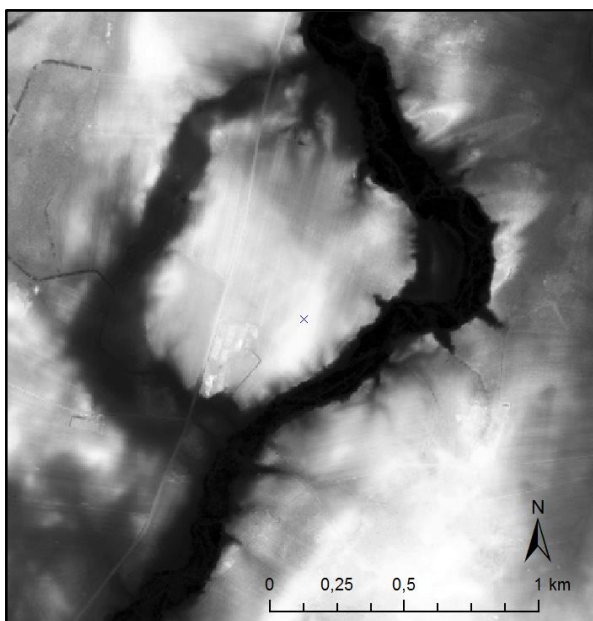
6.2 Hüdrololoogiline ja geoloogiline situatsioon

Tervel uuringualal moodustab aluspõhja liivakivi, mille pealispinna üldine vorm (lavamaad, nõod ja kõrgustikud) kujunes juba enne Kvaternaari ajastut. Jääkilbi all kulutas liustik aluspõhja pealispinda veelgi. Mandrijää õhenemisel ja selle piiri taandumisel Lõuna-Eestisse kujunesid aluspõhja lavamaadele ja nõgudesse liustikukeeled ning aluspõhja kõrgustikele surnud jää ja moreeniga alad. Liustikukeelte pideva voolu tõttu ei saanud liustiku voolukoridoridesse akumulieruda paksu pinnakatet (välja arvatud mattunud orgudesse). Tulenevalt liustiku taandumise aegsest dünaamikast kujunes välja Lõuna-Eesti sellisena nagu me seda tänapäeval tunneme. Liustiku sulaveed kujundasid suured ürgorud ning jääjärvedest said hiljem madalikud ja Eesti suurjärvede nõod. Kaardistatud orgudest ja maastikust lähtudes kujunesid välja kolm maastiku regiooni põhitüüpi.

- Lavamaade lainjad tasandikud, kus pinnakate on suhteliselt õhuke ja mattumata orge suhteliselt palju.
- Madalikud/nõod, kus mattumata orud praktiliselt puuduvad, kuid kohati on aimata peaaegu täielikult mattunud orge. Nõgude ja madalike aladele on liustiku sulavete poolt kantud palju setteid, mis on orud täitnud.
- Saarkõrgustikel oli eeldatavasti enne surnud jää ja setete akumulierumist liustikualune hüdrololoogiline süsteem olemas. Hilisemal irdjää akumulierumisel ja sulamisel vabanenud setted on kunagised tunnelorud täielikult matnud. Kõrgustike nõ. kuppelmaastikul algoritmi kasutatud parameetriga rakendades ei klassifitseerita välja orge, vaid küngaste vahelisi piirkondi. Kõrgustikel paiknevad orud on väga väikesed ning pärast-jääaegset päritolu.

6.3 Oruvõrgustiku vorm

Uuringuala orgude võrgustik koosneb pikkadest terviklikest orgudest (pikim ca 50 km), millesse suubuvad ja millest hargnevad teised orud. Palju on ka orgude omavahelisi ristumisi, mille puhul on ilmne, et tegemist on eriaegsete orgudega. Laialt on levinud ka lühikeste orulõikude ahelad ning üksikud isoleeritud orujupid. Üldpilt meenutab anastomooset võrgustikku (Joonis 32), kuigi selles võrgustikus on palju katkestusi, mille kohal on org ilmselt mattunud.



Joonis 32. Anastomoosne oruvõrgustik. Noorem ja vanem org.

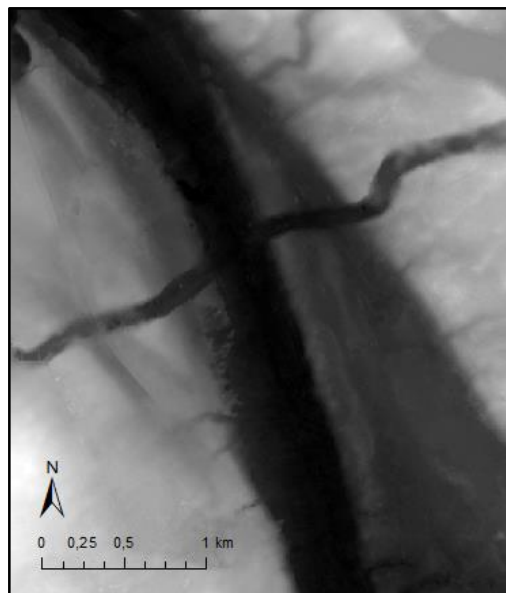
6.4 Mudelid/orgude tüübid

Eri autorid on liustikualust hüdroloogiat selgitanud erinevate mudelitega. Mudelite ühisosaks on jäässe kujunenud R-kanalite (Röthlisberger, 1972) või aluskivimisse kujunenud N-kanalite (Nye, 1976) olemasolu ning erinevusteks vee kanalitesse jõudmise mehhanismid. Värskemates uurimustes (Boulton, G.S., Caban, P.E., van Gijssel, 1995), (Piotrowski, 1997), (Flowers & Clarke, 2002) ja (Boulton et al., 2009) järeldatakse, et domineerivaks vee kanalitesse jõudmise meetodiks on läbi aluskivimi filtreerumine ehk kanalid toituvad valdavalt põhjaveest. Uuringupiirkonna aluskivimiks olev liivakivi on hea veejuht, mistõttu oli kanalite toitumine põhjaveest reaalne.

N- ja R-kanalite esinemise kohta on võimalik kinnitada N-kanalite olemasolu praeguste mattumata orgude näol. R-kanalite kunagist olemasolu ei saa kinnitada ega ümber lükata, sest pärast liustiku sulamist ei jää nende eksistentsist märkimisväärsed tõendeid alles. Võttes arvesse liivakivi ja moreeni head erodeeritavust on R-kanalite kunagine eksisteerimine uuringualas vähetõenäoline.

6.5 Vanusest

Liustikualuste orgude vanus on keeruline küsimus. Käesoleva töö valmimise käigus ilmnes, et oruvõrgustik koosneb mitmete generatsioonide orgudest. Generatsioonide erinevus avaldub olukordades, kus noorem org on erodeeritud läbi vanema oru. Sellistel orgude ristumisel on sageli võimalik hinnata nende suhtelisi vanuseid (Joonis 33). Absoluutse vanuse määramine võib kõne alla tulla vaid Hilis-Weichseli ajaperioodi aktiivsete orgude kohta, mis on hästi säilinud ja lõppevad kunagisel liustiku serval uhtekoonuse või suudmedeltaga. Nende liustikualuste orgude eluea



Joonis 33 Erineva vanusega orud, suhtelise vanuse määramine on võimalik.

lõppu saab otseselt seostada liustiku serva asendiga ja seeläbi määrata vanust. Samasugusele järeltulele suhtelistest ja absoluutsetest vanustest on jõutud ka Taani orgude puhul (Jørgensen & Sandersen, 2006).

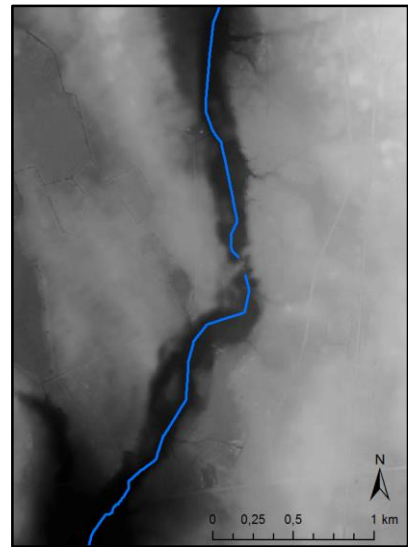
6.6 Põhjused, miks kaardistatud oruvõrgustik pole täielik

- Algoritmi poolt klassifitseerimata orud, mis on reljeefis nähtavad. Põhjuseks oru väike suhteline sügavus (alla 1 standardhälve keskmisest mõlemal skaalal) või eraldiseisva klass 4 klassifitseeritud orulõigu puhul naabrussuhte puudumine klass 1 polügooniga.
- Täielikult mattunud orud (setet, turvast või vett täis), mida polegi võimalik reljeefist tuvastada.
- R-kanalid, millest ei jäägi pinnamoodi orgu. R-kanalite kunagise eksisteerimise kohta pole tõendeid.

6.7 Tõendid liustikualusest veevoolust

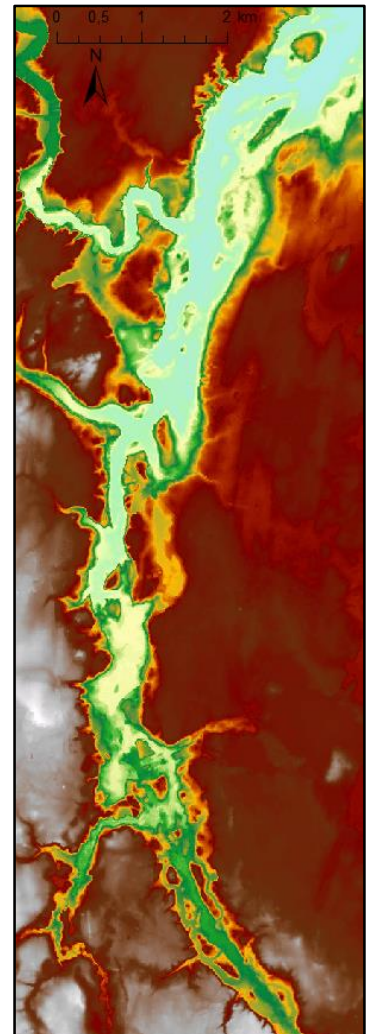
Keeruline on otseselt kinnitada oru kujunemist liustiku all, kuid on võimalik tuua toetavaid argumente sellele väitele. Samuti on argumente, mis välistaksid väidetavate liustikualuse tekkega orgude pärastjääaegse vabaveelise tekke.

Liustikualust teket toetab mõne oru puhul pikiprofiil, milles oru põhi kulgeb üle kõrgemate kohtade. Sellise pikiprofiili kujunemine gravitatsiooni jõul toimuva voolu puhul on võimatu. Kõrgemat kohta ületava pikiprofiiliga orud tulevad esile tänapäeva vooluvete võrgustiku veelahete näol (Joonis 34).



Joonis 34. Veelahete tänapäevases vooluvete võrgustikus paikneb keset orgu.

Teine nähtus, mida vabaveelise voolu tingimustes ei moodustu on oru põhjas asuvad „saared“ (positiivsed pinnavormid) (Joonis 35). Selliste „saarte“ teket võiks seletada episoodiline vee vool liustiku all. Vooluepisoodide vahel täitus org jää ja setetega ning uue vooluepisoodi korral erodeeris vesi endale uue voolutee, mis võis eelnevatest vooluteedest erineda, ning seega on „saared“ kahe voolutee vahelised alad.

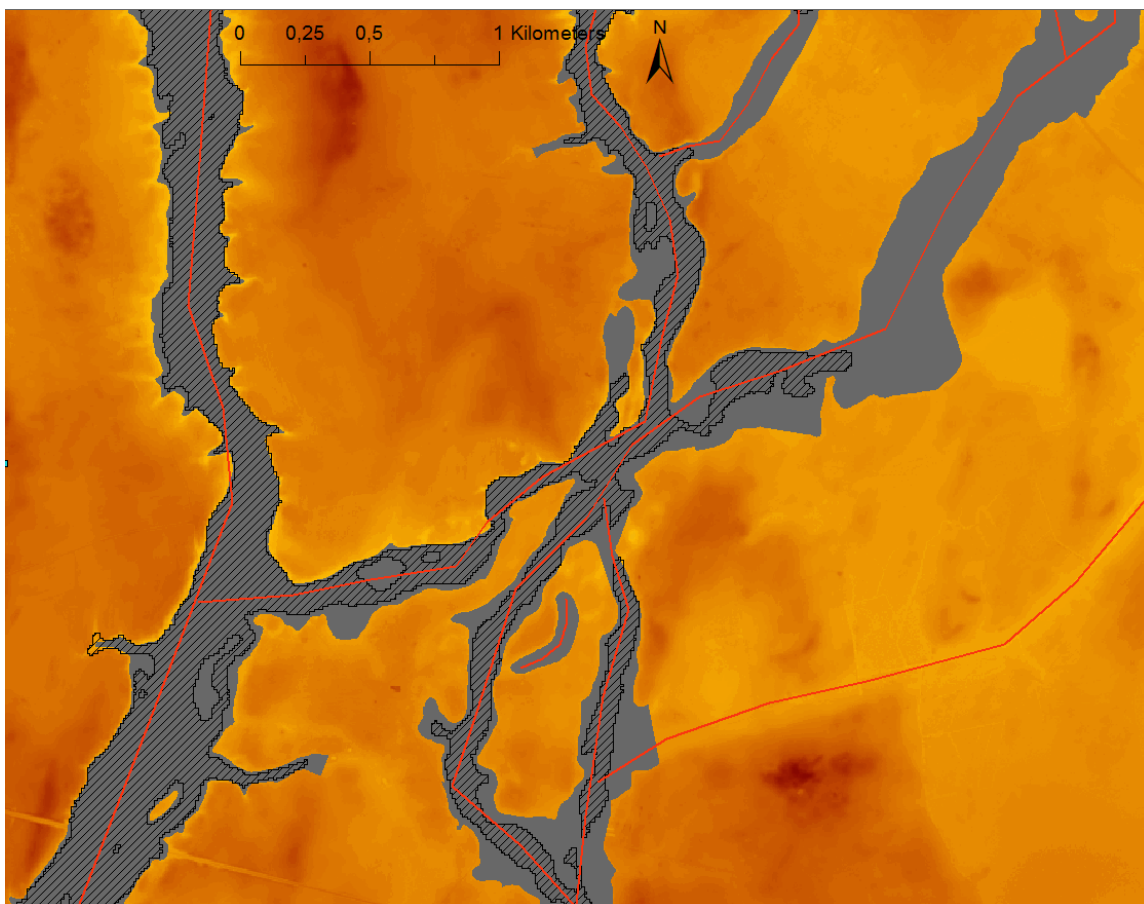


Joonis 35 Orus paiknevad nõ. „saared“, mis võivad olla moodustunud perioodilise voolu tingimustes eri vooluteede vahele

6.8 Meetodite võrdlus

Võrdluses on kolm autori poolt kaardistuseks kasutatud meetodit (Joonis 36).

- Käsitsi joonobjektidena kaardistatud oruvõrgustik (Prass, 2014).
- Käesoleva töö raames pool-automaatselt 500 m raadiuses arvutatud suhtelise kõrguse isojoonte alusel piiritletud alad.
- Käesoleva töö algoritmi (Joonis 30) alusel klassifitseeritud alad.



Joonis 36 Võrdlus kolme kaardistuse vahel. Punase joonega käsitsi kaardistatud (Prass, 2014) orud, hallilt käesoleva töö pool-automatne kaardistus ja viirutusega käesoleva töö kahe suhtelise kõrguse põhine kaardistus.

Käsitsi kaardistatud joonobjekte võrrelda selle töö kaardistusega pole korrektne, sest käsitsi läbi viidud kaardistusel puudub matemaatiline alus. Käsitsi püüti kaardistada orgude telgjooni. Käsitsi kaardistus oli väga aeganõudev, subjektiivne ja ebatäpne.

Võrreldavad on kaks selle töö raames toimunud kaardistust. Poolautomaatse kaardistuse puhul otsustas autor subjektiivselt iga orulõigu puhul eraldi, milline suhtelise kõrguse isojoon, seda kõige paremini iseloomustab ja piiritleb oru alana selle joone põhjal. Valdavalt kasutati piiriks suhtelise samakõrguse 0 väärtusega joont. Täis-automatne kaardistus kasutas 0

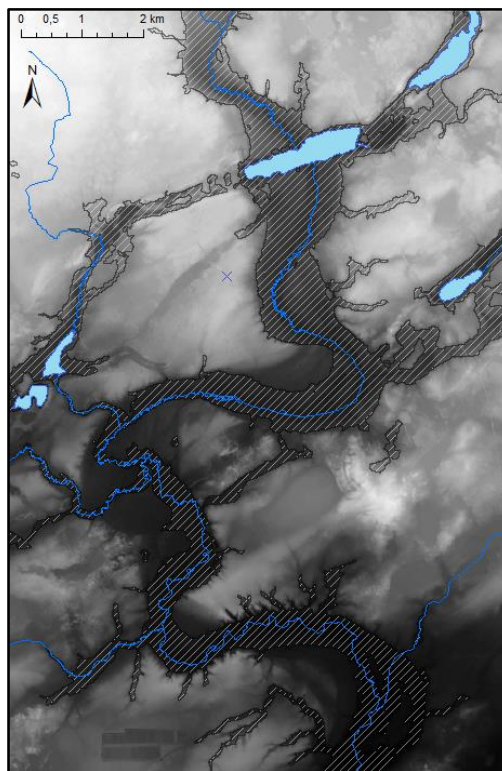
väärtusega joone asemel klasside vahelise piirina ühe standardhälbe piiri. Standardhälved 250 ja 2000 m naabruskondade suhteliste kõrguste puhul olid vastavalt 2,16 ja 5,94 m. Tulenevalt sellest erinevusest on pool-automaatne klassifikatsioon oruks liigitanud suuremad alad ja loonud terviklikuma oruvõrgustiku. Pool-automaatse meetodi suureks nõrkuseks on siiski selle subjektiivsus ja suur ajakulu.

7 Järeldused

Uuringualal nähtava mattumata orgude võrgustiku kujunemise etapid:

- Liustikualuse tekkega orud. Mitu eri vanuselist ja eri orientatsiooniga generatsiooni. Terviklikku arusaama vanematest orgudest on raske käesolevas töös kasutatud andmete ja meetoditega luua, sest vanemad orud on ilmselt enamjaolt täielikult mattunud. Reljeefis nähtavad liustikualuse tekkega orud kuuluvad ilmselt valdavalt noorimasse generatsiooni, mis olid aktiivsed liustiku taandumise viimases etapis, ning omavad ka vastavat orientatsiooni. Kõige paremini on liustikualuse oru tunnustele vastavad orud esindatud Otepää kõrgustikust idas Põlvamaale vastavas piirkonnas. Selles piirkonnas on mitmeid pikki katkestusteta orge, millel on sarnane kirde-edela suunaline orientatsioon. Liustiku all voolas neis orgudes vesi langeva rõhu mõjul liustiku serva suunas ehk edelasse, tänapäeval gravitatsiooni mõjul enamasti vastupidises kirde suunas Peipsi nõtku.

- Liustiku taandumise ajal kujunesid välja suured jääjärvi ühendanud orgude (Piusa, Võhandu ülemjooks, Mustjõgi, Luutsna, Emajõgi), mis on ka tänapäeval nähtavad. Sellised jääjärvede vahelised orud on oma ilmselt selgepiirilised ja väga sujuvate loogetega, kohati isegi meandreeruvad (Joonis 37). Jääjärvede vaheliste orgude sujuvad vormid eristavad neid oma ilmselt liustikualustest orgudest, mis on pigem ebasujuva ilmega. Jääjärvede vahelised orud ilmselt omavad algeid mõne varasema Kvaternaari eelse või liustikualuse oru näol, mida vabaveeline liustiku sulavesi ümber kujundas. Samal ajaperioodil kandis vesi liustikust vabanenud setet reljeefis olnud settebasseinidesse, millesse settides täitsid settid täielikult sealsed liustikualused orud.



Joonis 37. Hilis-glatsiaalne vabaveeline meandreeruv org Otepää kõrgustikult Võru-Hargla nõtku. Tänapäeval Võhandu jõe ülemjooks. Sinisega kujutatud tänapäevased voolu- ja seisuveekogud (ETAK andmebaasist), viirutusega kujutatud algoritmiga oruks klassifitseeritud alad. Org ei ole laiemates kohtades tervenisti viirutatud, sest org on laiem kui kasutatud parameetrid klassifitseerida võimaldavad.

Sellised reljeefsed nõod (Võrtsjärve madalik, Varnja-Värska madalik ja Valga nõgu, vt. Joonis 24) korreleeruvad hästi mattumata orgudest vabade piirkondadega.

- Tänapäevane vooluvete võrgustik hakkas oma väljanägemist omandama pärast jääpaisjärvede alanemist ja suurte koguste sulavete lõppemist. Võrreldes varasemate orgudega on tänapäevastel jõgedel väikesed sängid. Nende sängid asuvad enamasti varem välja kujunenud orgude põhjades. Täiesti uue jõesäangi (või selle lõigu) välja kujunemine pärast-jääaegsel ajal on pigem erandlik nähtus.

Kõikides etappides kujunenud orgude puhul on levinud varem mattunud orgude taas erodeerimine, sest pude sete allub erosioonile hõlpsamini kui aluskivim.

Käesolevas töös kasutatud meetodit saaks eeldatavalt rakendada terve Eestis esineva Devoni avamuse piirkonnal orgude tuvastamiseks.

8 Kokkuvõte

Reljeefimudelilt glatsiaalsete pinnavormide ära tundmine visuaalselt on nende omadusi teadvale inimesele lihtne. Nende piiritlemine käsitsi on aga subjektiivne tegevus, ning suure ala puhul ka väga aeganõudev töö. Käesolev töö püüab leida meetodit, mis tuvastaks reljeefimudelilt pinnavorme algoritmi-põhiselt. Selline meetod oleks matemaatilisel defineeritud ning seetõttu objektiivne. Samuti võimaldab arvuti kasutamine pinnavormide kaardistamiseks palju aega kokku hoida. Töö püüab leida matemaatilised tunnused, mis reljeefimudelil vastavad orule ning analüüsida sellise kaardistuse vastavust käsitsi kaardistamisele. Töö kitsam fookus on Lõuna-Eesti maastikul asuvad orud, mis hüpoteesi kohaselt on tekkinud liustiku alla sulavee poolt.

Liustikualused orud on tekkinud liustiku serva lähedal. Nende orientatsioon on sarnane liustiku voolusuunale. Sellistes orgudes voolab vesi madalama rõhuga ala suunas. Rõhu toimel voolamise tõttu on võimalik liustikualuste orgude kulgemine üle positiivsete pinnavormide. See omadus ja orientatsioon on põhilised tunnused tundmaks ära liustikualuseid orge.

Töös kasutati algandmetena Maa-ameti poolt mõõdistatud kõrgusinfot, millelt eemaldati tehislikud lineaarsed pinnavormid (raud)teetamid ja (pea)kraavid. Orgu kirjeldavate parameetrite leidmiseks katsetati pinda iseloomustavate tunnustega nagu nõlvakalle, kallakussuund ja kumerus, kuid nendega rahuldavalt orge tuvastada ei õnnestunud. Edukamad olid katsed suhtelise kõrgusega, millest arenes välja kahe erineva suurusega naabruskonna põhjal määratud suhtelisel kõrgusel baseeruv meetod. Loodud meetodiga klassifitseeriti kogu uuringuala esmalt üheksat klassi kujutavateks polügoonideks. Järgnevalt klassifitseeriti polügoonid omavaheliste naabrussuhete ümber orgudeks või mitte-orgudeks.

Töös arutleti leitud meetodi tugevusi ja nõrkusi. Võrreldi algoritmi-põhist kaardistust pool-automatse ja käsitsi kaardistusega. Eristati mitmel ajaperioodil tekkinud orge ja kirjeldati orograafilist liigestust.

Järeldati, et loodud meetod on sobivate parameetritega kasutatav orgude tuvastamiseks.

9 Summary

Algorithm based identification and analysis of valleys in southern Estonia

Identifying landforms from digital terrain model is relatively easy for a competent person. Manually mapping landforms is subjective and time consuming process. This study tries to find an algorithm-based method for identifying landforms from terrain model. Such method would be mathematically defined and therefore objective. Study tries to find mathematical parameters which describe valleys and compares the results to manual mapping. Special interest is on valleys with supposed subglacial origin. Study area is Southern-Estonia, where valleys in landscape are abundant.

Subglacial valleys are formed under glacial ice near the ice margin. Their orientation is roughly parallel to the flow of glacier. Water in such valleys flows from areas under thick ice towards the ice margin. The driving force for water flow is pressure. High water pressure under thick ice forces the water to move towards area with lower pressure and ultimately to the ice margin with no water pressure. Because the flow is induced by pressure, not gravity, the flow over positive subglacial landforms is possible. This results in valleys, which could not form if the flow would be caused by gravity. Such valleys and orientation of valleys are two main indicators for subglacial valley identification.

This study uses digital terrain model created by Estonian Land Board. Linear man-made landforms like embankments and ditches are removed from model prior to identification experiments. Variety of methods based on slope, aspect and curvature are used without success. Identification based on relative height proves to be the method of choice. Final method is based on combining relative heights calculated with different neighborhood radius parameters. The method classifies the study area into polygons representing 9 types of landscape. Polygons are then reclassified based on their neighboring relations to valleys or not valleys.

Discussion describes the strong and weak points of the method. Algorithm based identification is compared to half-automatic and manual mappings of the study area. Valleys of different origin and landscape regions are described.

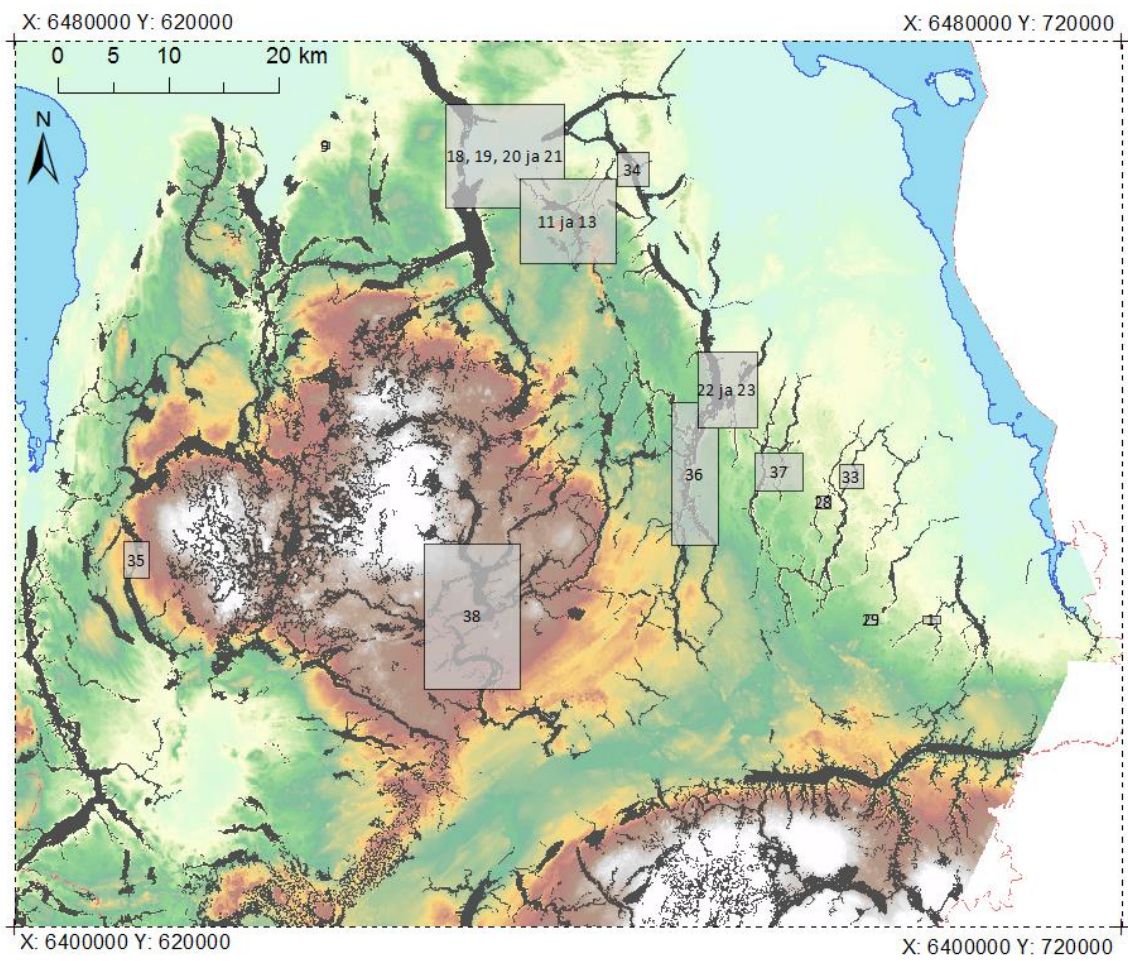
Conclusion finds the method to be suitable for valley identification.

10 Kasutatud kirjandus

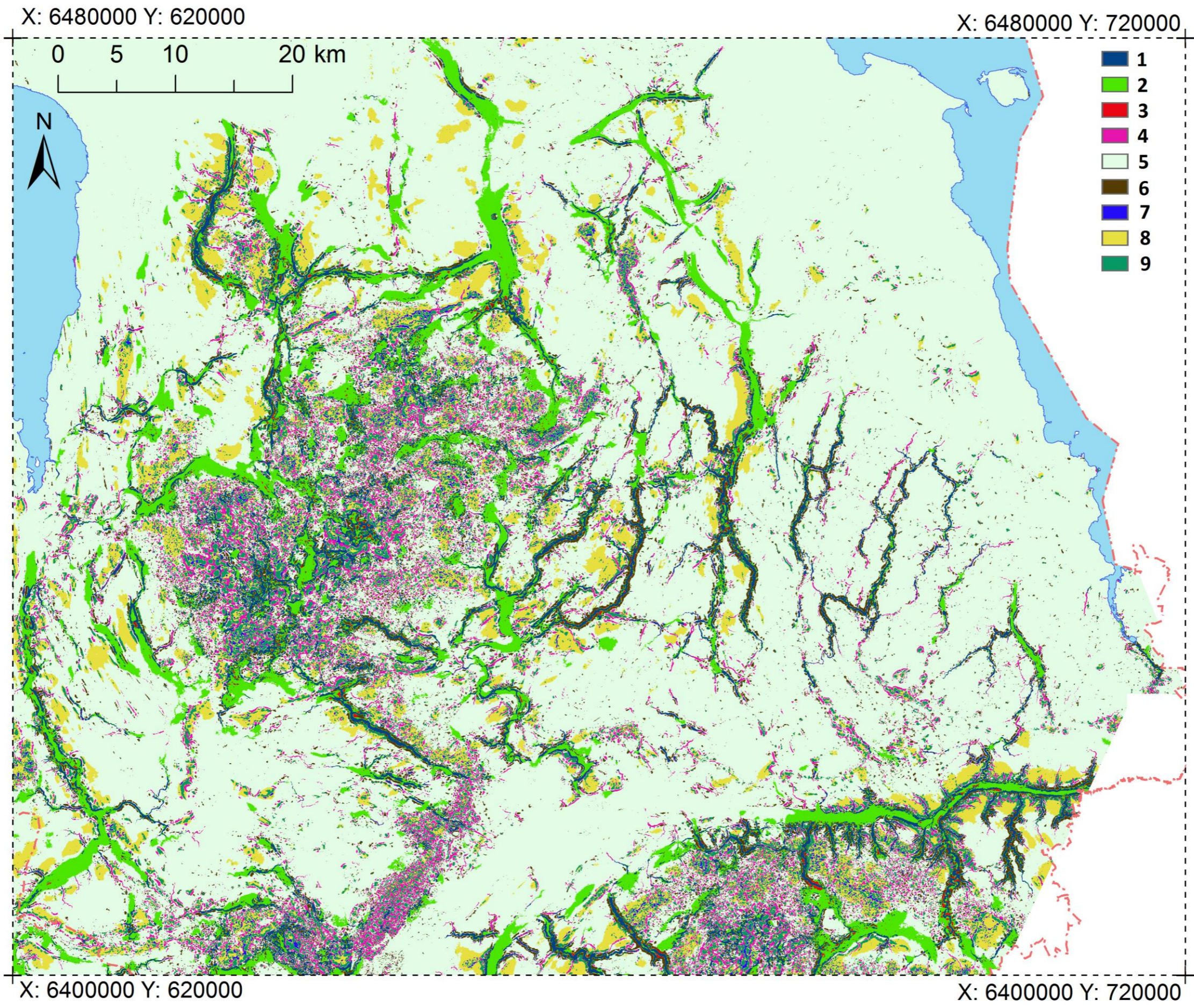
- Boulton, G. S., Hagdorn, M., Maillot, P. B., & Zatsepin, S. (2009). Drainage beneath ice sheets: groundwater-channel coupling, and the origin of esker systems from former ice sheets. *Quaternary Science Reviews*, 28(7-8), 621–638.
- Boulton, G. S., Lunn, R., Vidstrand, P., & Zatsepin, S. (2007a). Subglacial drainage by groundwater-channel coupling, and the origin of esker systems: Part 1—glaciological observations. *Quaternary Science Reviews*, 26(7-8), 1067–1090.
- Boulton, G. S., Lunn, R., Vidstrand, P., & Zatsepin, S. (2007b). Subglacial drainage by groundwater–channel coupling, and the origin of esker systems: part II—theory and simulation of a modern system. *Quaternary Science Reviews*, 26(7-8), 1091–1105.
- Boulton, G.S., Caban, P.E., van Gijssel, K. (1995). Groundwater flow beneath ice sheets: Part I – Large scale patterns and Part II – Its impact on glacier tectonic structures and moraine formation. *Quaternary Science Reviews*, 14, 545–587.
- Deng, Y. (2007). New trends in digital terrain analysis : landform definition, representation, and classification. *Progress in Physical Geography*, 31(4), 405–419.
- Evans, I. S. (1979). *An integrated system of terrain analysis and slope mapping*. Durham, England.
- Fleming, M. D., Hoffer, R. M., & Lafayette, W. (1979). Machine Processing of Landsat MSS Data and DMA Topographic Data for Forest Cover Type Mapping.
- Florinsky, I. V. (1998a). Accuracy of local topographic variables derieved from digital elevation models. *International Journal of Geographical Information Science*, 12(1), 47–61.
- Florinsky, I. V. (1998b). Derivation of topographic variables from a digital elevation model given by a spheroidal trapezoidal grid. *International Journal of Geographical Information Science*, 12(8), 829–852.
- Flowers, G. E., & Clarke, G. K. C. (2002). A multicomponent coupled model of glacier hydrology, 1, Theory and synthetic examples. *Journal of Geophysical Research* 107, 107, 2287–2304.
- Huuse, M., & Lykke-Andersen, H. (2000). Overdeepened Quaternary valleys in the eastern Danish North Sea : morphology and origin, 19, 1233–1253.
- Jones, K. H. (1998). A comparison of algorithms used to compute hill slope as a property of the DEM. *Computers and Geosciences*, 24(4), 315–323.
- Jørgensen, F., & Sandersen, P. B. E. (2006). Buried and open tunnel valleys in Denmark—erosion beneath multiple ice sheets. *Quaternary Science Reviews*, 25(11-12), 1339–1363.
- Järveoja, M. (2012). *Võimalike retsessioonimoreenide esinemine Alutagusel*. University of Tartu.
- Kehew, A. E., Ewald, S. K., Esch, J. M., & Kozlowski, A. L. (2013). On the origin of tunnel valleys of the Saginaw Lobe of the Laurentide Ice Sheet; Michigan, USA. *Boreas*, 42(2), 442–462.
- Kirsch, R., Rumpel, H.-M., Scheer, W., & Wiederhold, H. (Eds.). (2006). *Groundwater*

- Resources in Buried Valleys*. Hannover: Leibniz Institute for Applied Geosciences (GGA-Institut).
- Lillesand, T. M., & Kiefer, R. W. (1994). *Remote Sensing and Image Interpretation*. New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore: John Wiley & Sons.
- Maa-amet. (n.d.). LiDAR kõrguspunktid.
- Nye, J. F. (1976). Water flow in glaciers; jökulhlaups, tunnels, and veins. *Journal of Glaciology*, 17, 181–207.
- Piotrowski, J. A. N. A. (1997). Subglacial hydrology in north-western Germany during the last glaciation: groundwater flow, tunnel valleys and hydrological cycles, 16(96), 169–185.
- Prass, E. (2014). *Glatsiofluviaalsete kulutusvormide kaardistamine ja analüüs Otepää kõrgustiku piirkonnas*. University of Tartu.
- Röthlisberger, H. (1972). Water pressure in intra- and subglacial channels. *Glaciology*, 11, 177–203.
- Shaw, J. (1983). Drumlin formation related to inverted melt-water erosional marks. *Journal of Glaciology*, (29), 461–479.
- Zevenbergen, L. W., & Thorne, C. R. (1987). Quantitative analysis of land surface topography. *Earth Surface Processes and Landforms*, 47–56.
- Weiss, A. D. (2001). Topographic position and landforms analysis. San Diego, CA: ESRI Users Conference.
- Wright, H. E. J. (1973). Tunnel valleys, glacial surges, and subglacial hydrology of the Superior lobe, Minnesota. *Geological Society of America Memoir*, (136), 251–276.
- Ülem, R. (2015). *Võimalikud viisid voorte tuvastamiseks GIS-tarkvaraga LIDAR'i kõrgusmudelilt*. University of Tartu.

11 Lisad



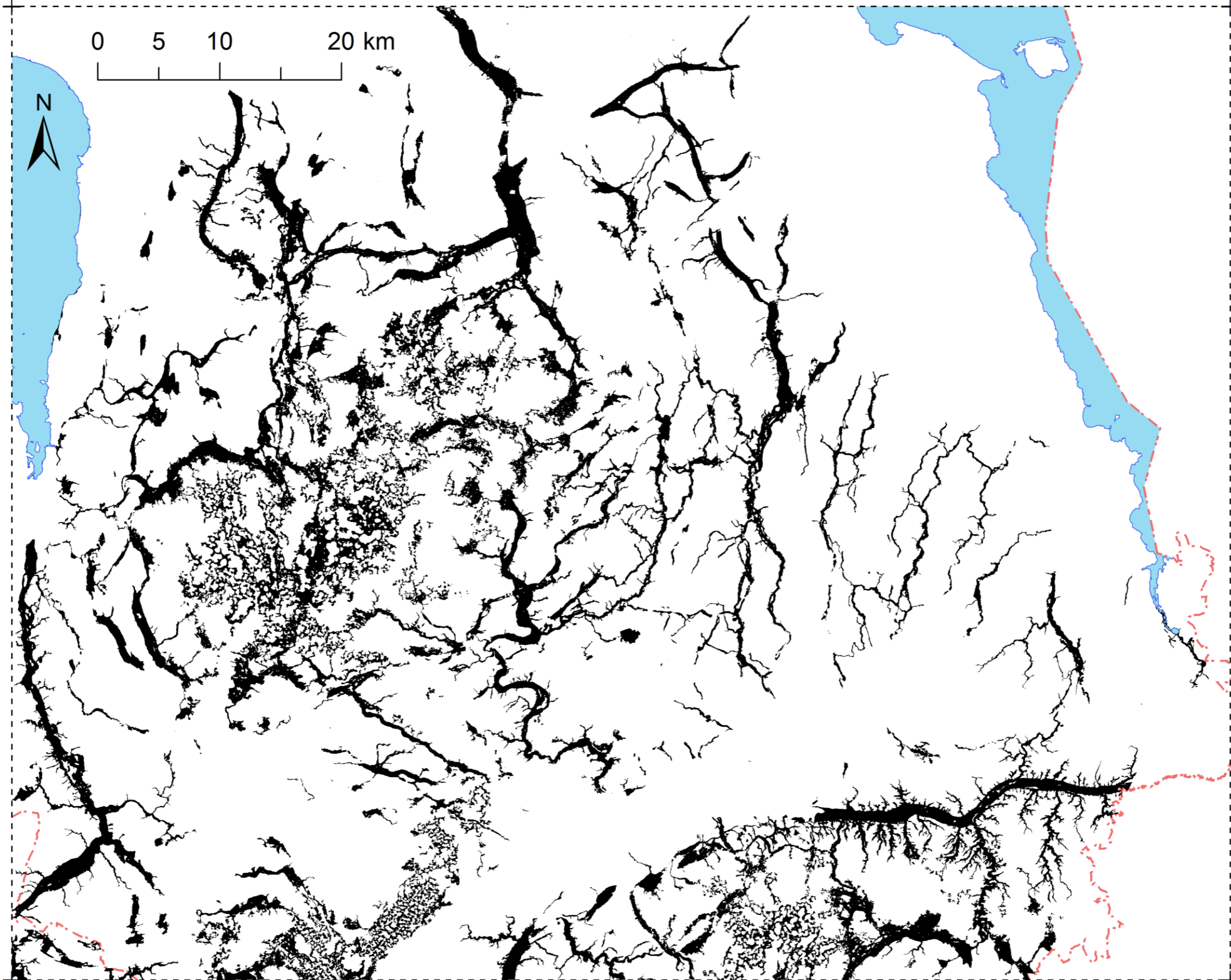
Lisa 1 Jooniste asukohad uuringualal.



Lisa 2 Üheksaklassiline klassifikatsioon kasutades naabruskonna raadiustena 250 ja 2000 meetrit

X: 6480000 Y: 620000

X: 6480000 Y: 720000



X: 6400000 Y: 620000

X: 6400000 Y: 720000

Lisa 3 Algoritmiga orgudena identifitseeritud alad.

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina Edgar Prass (sünnikuupäev: 20.04.1988)

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Lõuna-Eesti orgude algoritm-põhine tuvastamine ja analüüs”, mille juhendaja on Argo Jõelett,
 - 1.1. reprodutseerimiseks säilitamise ja üldsusele kättesaadavaks tegemise eesmärgil, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace-is lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
 - 1.2. üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tartu Ülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace'i kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.
2. Olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Tartus, 20.05.2016