

Tartu Ülikool
Loodus- ja tehnoloogiateaduskond
Ökoloogia ja Maateaduste Instituut
Geograafia osakond

Bakalaureusetöö geoinformaatikas ja kartograafias
Reljeefi keerukuse mõju Eesti põhikaardi kvaliteedile

Ainar Härm

Juhendajad: PhD Raivo Aunap
MSc Kiira Mõisja

Kaitsmisele lubatud:

Juhendaja:

Osakonna juhataja:

Tartu 2014

SISUKORD

Sissejuhatus	4
1. Teoreetiline ülevaade	5
1.1. Ruumiandmete kvaliteet.....	5
1.1.1. Ruumiandmete kvaliteedi haldamine ISO standardite alusel.....	5
1.1.2. Eesti põhikaardi kvaliteediuuringud	6
1.2. Reljeefi modelleerimine	6
1.2.1. Reljeefi digitaalne esitamine	7
1.2.2. Digitaalsed kõrgusmudelid	7
1.2.3. Rastermudel	8
1.2.4. Digitaalsete kõrgusandmete hankimine	8
1.2.4.1. LiDARi kõrgusandmed.....	9
1.2.5. Kõrgusandmete mõõtkava ja generaliseerimine	9
1.2.6. Kõrgusandmete analüüs liikuva akna alusel.....	10
1.3. Reljeefi keerukus	11
1.3.1. Reljeefi keerukuse ja kareduse näitajad.....	11
1.3.2. Kohalik või piirkondlik	12
1.3.3. Statistilised näitajad	12
1.3.3.1. Reljeefi kõrgusväärtused	13
1.3.3.2. Maapinna kareduse indeks.....	14
1.3.3.3. Topograafiline jääkpind.....	14
1.3.3.4. Lokaalne reljeef.....	15
1.3.3.5. Vektorite hajuvus.....	15
1.3.3.6. Samakõrgusjoonte tihedus.....	16
1.3.4. Geomeetrilised näitajad.....	16
1.3.4.1. Kallakuse standardhälve.....	16
1.3.4.2. Kõverus.....	16
1.3.4.3. Kaldpinna suhe.....	17
1.3.4.4. Horisontaalide looklevu.....	18
1.3.4.5. Fraktaal geomeetria.....	18
1.3.5. Muud näitajad.....	19
1.3.5.1. Reljeefi keerukuse koordineks.....	19
1.3.5.2. Reljeefi visuaalne hindamine.....	19
1.4. Eesti põhikaart	20
2. Andmed ja meetodika	22
2.1. Kontrolli- ja uurimisalad	22
2.2. Kõrgusandmed.....	24
2.3. Välikaardistuse kvaliteedikontrolli andmed	25
2.3.1. Vigade andmestik.....	25
2.3.2. Kvaliteedinäitajad.....	25
2.4. Uurimistööks sobivad reljeefi keerukuse näitajad.....	26
2.4.1. Sobivate reljeefi keerukuse näitajate valimine.....	26
2.4.2. CTCI	27
2.5. Kõrgusandmete generaliseerimine	27

2.6.	Keerukuse näitajate arvutamise meetodika	28
2.6.1.	<i>Samakõrgusjoonte tihedus</i>	28
2.6.2.	<i>Kallakuse standardhälve</i>	28
2.6.3.	<i>Visuaalne hinnang</i>	28
2.7.	Välikaardistuse kvaliteedi ja reljeefi keerukuse vaheliste seoste leidmine	29
3.	Analüüs ja tulemused	31
3.1.	Uurimisalade reljeefi keerukus	31
3.1.1.	<i>Samakõrgusjoonte tihedus</i>	31
3.1.2.	<i>Kallakuse standardhälve</i>	32
3.1.3.	<i>Visuaalne hinnang uurimisaladele</i>	34
3.1.4.	<i>CTCI tulemus</i>	35
3.2.	Välitööde kvaliteedikontrolli näitajate analüüs	35
3.3.	Reljeefi keerukuse ja välikaardistuse vigade vahelised seosed	36
4.	Arutelu	39
4.1.	Reljeefi andmete ruumiline lahutus	39
4.2.	Reljeefi keerukuse ja välikaardistuse vigade vahelised seosed	40
	Kokkuvõte	42
	Summary	44
	Tänuavaldused	46
	Kasutatud kirjandus	47
	LISAD	51

SISSEJUHATUS

Maapinna reljeef ehk maakoore pealispinna kuju mõjutab looduslikke protsesse ja seeläbi inimtegevust. Reljeefi tõttu toimub näiteks suurima energiaallika – päikese valguskiirguse ebahühtlane jaotumine. Seetõttu eristuvad looduslikult soodsamad tingimused, mis olid eelistatud algse inimtegevuse arenguks. Kõikidest reljeefi poolt põhjustatud protsessidest tulenevalt on mõjutatud taime- ja loomaliikide levikud (Blaszczynski 1997). Erineva reljeefiga aladel tegutsemiseks vajavad inimesed, kuid eelkõige ehitusinsenerid, geoloogid jt teadlased sarnase metoodika ja kvaliteediga informatsiooni reljeefi kohta (Li *et al.* 2005).

Reljeef on nähtus, mis koosneb pinnavormide hulgast, kujust, suurusel, asetusest ja nendevahelistest suhetest. Ideaalselt tasast või täiesti horisontaalset pinda on topograafias võimatu leida (Deng 2007). Seda, kui reljeefina pinda tajutakse, määrab vaatedasand. Reljeefseid pindasid eristab teineteisest ebakorrapärasuste esinemise määr ehk keerukus.

Eesti on kogu planeedi taustal võrdlemise tasane ehk puuduvad mäestikud, kanjonid jt silmapaistvad pinnavormid. Lokaalselt vaatedasandilt on aga Eestis üsnagi mitmekesine pinnamood, mille alusel on eristatud tosinkond maastikurajooni. Piirkondade erisuste leidmiseks on vajalik luua ühtsetel alusel andmestik, mis kajastab reljeefi ja teisi geograafilisi nähtusi. Ruumiandmete kogumisega on tegeletud aastakümneid. Tänapäevase tehnoloogia taustal toimub näiteks reljeefi lausaline kaardistamine kordades väiksema ajakuluga. Välikaardistus on asendunud kaugseire ja digitaalsete kaardistusmeetoditega, sest välitööd on liigselt ressursi ja ajamahukad. Teatud määral on jätkunud välikontrollid, et anda hinnangut kaardistuse kvaliteedile.

Käesoleva töö eesmärgiks on analüüsida reljeefi keerukuse mõju Eesti põhikaardi välikaardistuse kvaliteedile. Töös antakse ülevaade Eesti põhikaardi tootmisprotsessist ja ruumiandmete sisulise kvaliteedi hindamisest ning kirjeldatakse peamisi reljeefi keerukuse hindamise meetodeid. Reljeefi keerukuse näitajate ja kaardiandmete temaatilise õigsuse ning täielikkuse vahelisi seoseid analüüsitakse kokku 81 uurimisalal.

Uurimistöo hüpoteesina väidetakse, et keerukama reljeefiga aladel on rohkem välikaardistamise vigu.

1. TEOREETILINE ÜLEVAADE

1.1. Ruumiandmete kvaliteet

Ruumiandmete kvaliteedile on pakutud erinevaid tähendusi, kuid antud töö kontekstis rõhutatakse andmete vastavust looduses eksisteerivale. Topograafiliste andmete kvaliteedi ja kaartide täpsuse mõõtmisemeetodikate uurimisega on tegeletud pingsalt alates 1950ndatest (Devillers *et al.* 2010). Ruumiandmete kvaliteedi mõistele pöörati suuremat tähelepanu koos GISi kasutusele võtuga 1980ndatel. Algselt käsitleti ruumiandmete kvaliteeti GISi allteemana, kuid 1980ndate lõpust alates on valdkond olnud iseseisev teadusharu. Olulisteks saavutusteks valdkonna 30 aasta jooksul on olnud kvaliteedinõuete loomine ja täiendamine ruumiandmete haldamiseks.

1.1.1. Ruumiandmete kvaliteedi haldamine ISO standardite alusel

Rahvusvahelise Standardiorganisatsiooni (ISO) poolt on välja töötatud ruumiandmete kvaliteedi haldamiseks kvaliteedistandardid. ISO nõuetes on alternatiividega võrreldes kirjeldatud rohkem erinevaid ruumiandmete kvaliteedi aspekte (Wang, Huang 2007). Arvatakse, et kõige rohkem positiivset mõju on ruumiandmete haldamisele avaldanud just ISO19113 ja ISO19114 kvaliteedistandardid (Devillers *et al.* 2010).

ISO19113 standardi alusel kirjeldatakse ruumiandmete kvaliteeti järgmiste kvaliteedielementidega :

- Täielikkus – mõõdetakse puuduvaid ja liigseid nähtusi.
- Loogiline õigsus – mõõdetakse vastavust andmestruktuuri, atribuutide ja seoste loogilistele reeglitele. Allelementideks on kontseptuaalne, topoloogiline ning formaadi õigsus.
- Asukohatäpsus – mõõdetakse nähtuse asukoha määramise täpsust. Hinnata saab absoluutset, suhtelist ja võrkandmete täpsust.
- Ajakohasus – mõõdetakse nähtuste ajalist õigsust või nähtuste omavaheliste ajaliste suhete õigsust. Allelementideks on määramise täpsus, ajaline õigsus ja ajaline kehtivus.
- Temaatile õigsus – hinnatakse nähtuste klassifitseerimise korrektsust, kvalitatiivsete atribuutide korrektsust ja kvantitatiivsete atribuutide täpsust.

Lisaks kvaliteedistandardi põhielementidele on võimalik ISO19113 järgi kvaliteeti hinnata ka lisanduvate kriteeriumitega, milleks on vale asukoht ja vale mõõt.

1.1.2. Eesti põhikaardi kvaliteediuringud

Ruumiandmete hankimine ja kvaliteedihaldamine on seotud protsessid, millest sõltub andmekogu sisu. Ruumiandmekogude väljundiks on sageli erinevat laadi kaardid ehk reaalsuse lihtsustatud mudelid. Ruumiandmekogude koostamisel üritatakse saavutada vastavalt eesmärkidele võimalikult kvaliteetset tulemust, kuid tavaliselt pole see ideaalselt kunagi võimalik. Põhjuseks võib olla ruumiandmetega töötavate välitöötajate ja digitaliseerijate kaardistusjuhendist lähtuvad tõlgendused reaalsusest. Eesti põhikaardi näitel on leitud, et kaardikvaliteedil võib olla seos kaardistusjuhendi eripärade ja puudustega (Mõisja, Pauts 2005).

Eesti põhikaardi lehtede sisulise keerukuse mõju ruumiandmete kvaliteedile on magistritöös uurinud Spuul (2011) ja leidnud, et sisult keerukamatel kaardilehtedel puudub seos välikaardistamise nõrgema kvaliteediga. Vastupidiselt tões Spuul (2011) negatiivse tendentsi olemasolu, mille järgi kaardistamise kvaliteet paranes keerukamatel kaardilehtedel.

Gauk on (2008) bakalaureusetöös võrrelnud kaardikvaliteeti erinevatel aastatel tehtud kaardistusega ning järeldanud, et kaardistusaegade ja kaardistamise vigade vahel korrelatsiooni ei ole. Lisaks on Gauk (2008) oletanud, et kaardi sisu kvaliteedile on pigem mõju avaldanud suurest asustustihedusest tulenevat inimeste tegevusmaastike ja eluruumide ümberkujundamine.

Käesolevas töös keskendutakse ruumiandmete kvaliteedi ja reljeefi keerukuse uurimisele. Oletatakse, et reljeef võib mõjutada välikaardistuse kvaliteeti, mida kirjeldatakse täielikkuse ja temaatilise õigsusega.

1.2. Reljeefi modelleerimine

Kõrgusandmete esitamiseks on kasutatud erinevaid meetodeid ning tavaliselt täidavad kõrgusandmete esitusmudelid andmete talletamise funktsiooni. Varasemad maapinna reljeefi kujutamise meetodid olid pigem kirjeldavad, jäädes üsna primitiivseteks. Need ei kajastunud detailset informatsiooni pinnavormide kõrguse, asetuse jt atribuutide kohta.

Detailsema kõrgusliku informatsiooni talletamine algas eelkõige reljeefi kriipsutuse ja samakõrgusjoonte kasutuselevõttuga (Imhof 1982). Seevastu tänapäeva infotehnoloogia ajastul on *de facto* reljeefi kujutamise meetodiks kujunenud digitaalsed kõrgusmudelid ning sealhulgas eelkõige korrapärased rastervõrgustikud (Wilson 2012). Reljeefi kujutamise areng

on seega liikunud inimeste poolt joonistatud kujutistest arvutite abil interpoleeritavate mudeliteni.

Reljeefi modelleerimine on jõudnud arengujärku, kus ollakse võimelised reljeefi üsna täpselt ja detailselt kujutama. Tehnoloogiliselt on võimalik kujutada kõrgusmudelites üha väiksemaid pinnavorme ja mikroreljeefe, kuid alati ei pruugi olla kõige detailsem kujutis reljeefist ideaalseks andmestikuks analüüsimisel. Seetõttu kerkib küsimus: kuidas optimeerida reljeefimudelit vastavalt lähteülesandele ning kas kõige detailsem kujutis on alati kõige paremaks andmestikuks?

1.2.1. Reljeefi digitaalne esitamine

Reljeefi digitaalseks kujutamiseks on kasutatud mitmeid viise. Üldiselt on digitaalsete kõrgusmudelite põhimõistena käsitletud DTMi (ingl k *Digital Terrain Model*), mis on sisuliselt igasugune digitaalselt ja numbriliselt kujutatav kõrgusmudel. DTM on sageli toodetud digitaalsetest andmetest, näiteks LiDARi (ingl k *Light Detection and Ranging*) punktipilvest või GPSi mõõdistatud kõrguspunktidest. Samuti võib DTM olla topograafilistelt kaartidelt digitaliseeritud andmetel põhinev kujutis (Li *et al.* 2005).

Samakõrgusjoontega ehk hüpsomeetriselt on kõrgusandmeid kujutatud juba sajandeid ning meetodit kasutatakse laialt tänapäeval reljeefi esitusmudelina eelkõige trükikaartidel (Li *et al.* 2005). Digitaalsete kõrgusmudelite laia kasutuse tõttu on GIS tarkvarades levinud samakõrgusjoontest digitaalsete kõrgusmudelite interpoleerimise vahendid. Samakõrgusjoontest interpoleeritud kõrgusmudelite morfoloogilise õigsuse tagamiseks lisatakse digitaliseeritud andmetena juurde vooluveekogude jooned (Wilson, Gallant 2000).

1.2.2. Digitaalsed kõrgusmudelid

Digitaalseid kõrgusmudeleid on käsitletud erinevate mõistetega, mis tulenevad peamiselt mudelil kujutatavast pinnast. DEM (ingl k *Digital Elevation Model*) on üks enam levinud kõrgusmudeli tüüpe, mis kujutab maapinnareljeefi korrapärase rastervõrgustikuna. Sarnaseks, kuid oluliselt vähem levinud mõisteks on DGM (ingl k *Digital Ground Model*). DSM (ingl k *Digital Surface Model*) on seevastu kõrgusmudel, mis kajastab maapinda, seal asetsevad objektid, ehitised ja taimestikku. DHT (ingl k *Digital Height Model*) on samuti vähem levinud mõiste kõrgusmudeli kohta, tähendades praktiliselt sama kui DTM (Li *et al.* 2005). Mõistete kasutus on varieerunud riigiti, kuid käesoleva töö kontekstis on tähtsam nendest kohalik praktika Eesti Maa-ameti näitel, kes on käsitletud enda toodetud LiDAR andmete põhiseid kõrgusmudeleid DEMidena (Maa-amet 2014).

Lisaks ülalpool nimetatutele kasutatakse reljeefi kujutamiseks ja analüüsimiseks ebakorrapärastest kolmnurkadest koostatud kõrgusmudeleid TIN (ingl k *Triangular Irregular Network*). TINi eeliseks rasterkujutiste ees on oluliselt väiksem andmemaht, kuna andmed kujutatakse vektoritena, kuid puuduseks on ebakorrapärase struktuuri tõttu ka keerukamad tötlusalgoritmid (Gao 1998). TINi spetsiifilist arvutusalgoritmi Delaunay triangulatsioon kasutatakse korrapäraste kõrgusmodelite pinna loomisel, mida on näiteks teinud Maa-amet. TIN ja DEM metoodikate ühist kasutamist on nimetatud reljeefi hübriidseks modelleerimiseks (Li *et al.* 2005).

1.2.3. Rastermudel

DEMid on sagedasemad digitaalsete reljeefimudelitena kasutatavad maapinna kõrgusinformatsiooni andmestikud. Viimaseid on hinnatud just erinevates morfoloogilistes uuringutes ja GIS rakendustes eelkõige arvutusliku lihtsuse ja suure detailsuse tõttu (Wilson 2012).

DEMina käsitletakse korrapärase võrgustikuga rasterkujutisi, mis kajastavad maapinna kõrgusi ning selle kaudu reljeefi (Wilson, Gallant 2000). Kõrgusinfo kajastub võrgustiku moodustavate pikslitena. Tavapäraselt on DEM kujutatud kahe mõõtme (x, y) abil, mis moodustavad võrgustiku, ning pikslite värvigamma alusel, et kujutada kõrgusi.

DEMide levik 1990ndatel ja lai kasutuspõld tulenevad peamiselt mudeli ruutvõrgustiku ülesehituse lihtsusest (Moore, Davey 1991). Seetõttu on DEMi töötlevate algoritmide konstrueerimine lihtne ja üheselt mõistetav. DEMide puudusteks on peetud suurt arvutusressursi ja andmemahu nõudlikkust ning korrapärase struktuuri tõttu suutmatust registreerida järske muutusi reljeefis (Moore *et al.* 1991).

Nimetatud andmete käsitlemisega seotud probleemide lahendusteks on tehnoloogia arengu tõttu saavutatud arvutusliku jõudluse kasv ja talletatava andmemahu suurenemine. Viimasest tulenevalt on võimalus kasutada suurema ruumilisema lahutusega kõrgusmudeleid, mis võimaldavad täpsemaid kujutisi maastikest ja reljeefist (Wilson 2012).

1.2.4. Digitaalsete kõrgusandmete hankimine

Digitaalsete reljeefimodelite koostamiseks saab kasutada erinevaid kõrgusandmeid, kuid antud töö kontekstis keskendutakse laser või muul valguskiirgusel põhinevale tehnoloogiale, kuna nimetatud meetodil on toodetud töös kasutatud andmed. Tegemist on globaalselt kiiresti areneva tehnoloogiaga suure lahutusega kõrgusandmete tootmisel (Bernard, Amable 2009). Lasermõõdistuste tulemuseks saadakse mõõdistuspunktide kogud, mida sageli nimetatakse

punktipilvedeks. Viimaste spetsiifilise järeltöötuse tulemusena on võimalik saada kõrgusmodelid, mis on aluseks reljeefi või maapinnal toimuvate protsesside uuringutele (Heritage, Large 2009).

Eesti näitel on suure ruumilise lahutusega DEMide koostamiseks kasutatud lasertehnoloogial põhinevat mõõdistamist ehk LiDAR tehnikat. LiDAR-mõõtmisi on võimalik teostada lennukitelt ehk aerolaserskaneerimise käigus, nagu seda on tehtud Eestis (Maa-amet 2014).

1.2.4.1. LiDARi kõrgusandmed

LiDARi tööpõhimõte seisneb maapinnapunktide absoluutsete kõrguste salvestamises geograafiliselt määratletud ruumis. Aerolaserskaneerimise, mis on vaste õhusõidukilt tehtavatele LiDAR-mõõdistustele, käigus positioneeritakse LiDAR-tehnikat kandev õhusõiduk globaalse positioneerimissüsteemi GPSi (ingl k *Global Positioning System*) ja navigatsioonisüsteemi INU (ingl k *Internal Navigation Unit*) alusel ning viiakse läbi maapinnapunktide kõrguste salvestamine. Objektiivse positioneerimise ja asukoha täpsuse saamiseks parandatakse tulemusi maapealse liikumatu GPS jaama signaaliga (Heritage, Large 2009).

1.2.5. Kõrgusandmete mõõtkava ja generaliseerimine

Topograafiliste andmete eripäraks on omada mõõtkavalist atribuuti, mida muutes asendatakse senine detailsuse aste vastavalt kas täpsemaks või üldisemaks. Näiteks kõrgusmodelina rasterkujutise mõõtkava vähendades kuvatakse järjest vähem väiksemaid pinnavorme ning seega on jälgitav ainult reljeefi üldine vaade. Käesoleva näite põhjal toimub andmete üldistamine rasterkujutise kuvamise reeglite järgi, mis tegelikult ei oma erilist tähtsust andmeid analüüsides.

Kõrgusandmeid töödeldes on oluline mõista, mis mõõtkavas opereeritakse ja kui suurt ala üks kõrgusmodeli ühik kujutab. Samuti on kõrgusandmete mõõtkava defineerimine oluline, et tagada ühtne arusaam andmete atribuutidest.

DEMide puhul on näiteks Wilson (2000) eristanud ruumilise lahutuse järgi neli mõõtkava, mille alusel kõrgusandmeid klassifitseerida (vt tabel 1). See mõõtkava ei ole kindlasti ainuke millest tuleks kindlasti lähtuda, kuid põhilised iseloomulikud tasemed on ruumilise lahutuse järgi jäänud samaks. Suurema detailsusega kõrgusandmete tootmise võimekuse suurenemine on tähtsamaks muutnud suure ruumilise lahutusega mõõtkava tasemete defineerimise. Erinevalt näitena toodud mõõtkavast on täpse toposkaala asemel defineeritud mikroskaalat, mis hõlmab kasutatava tehnoloogia järgi toodetud kõrgusmodeli kõige väiksemaid vorme.

Mõõtkava teiseks äärmuseks on väga väikese ruumilise lahutusega DEMid, mis saadakse tavaliselt satelliitidelt kogutud andmete alusel.

Tabel 1. DEM mõõtkava tasemete jaotus Wilsoni (2000) järgi.

Mõõtkava nimetus		Ruumiline lahutus
toposkaala	täpne	5 - 50 m
	jäme	50 - 200 m
mesoskaala		200 m - 5 km
makroskaala		5 – 500 km

Suure ruumilise lahutusega DEMide üldistamine resolutsioonilt väiksemaks on üks kõrgusmudelite generaliseerimise viise. Kõrgusandmete üldistamiseks on võimalik kasutada mitmeid meetodeid.

Ruumilise lahutuse muutuse juures on märgatud lisanduvate vigade teket reljeefi parameetrite, sealhulgas kallakuse, tulemustes (Chow, Hodgson 2009). Seega ei ole antud meetod soovitatav, kui eesmärgiks on analüüsida kõrgusandmeid või kui on võimalik kasutada alternatiivseid meetodeid.

Kõrgusandmete silumiseks saab kasutada väärtusi keskmistavat liikuvat akna töötlust, mis ei muuda rasterkujutise ruumilist lahutust. Seda võtet tuntakse madalpääsu (ingl k *low pass*) filtrina. Silumisvõtte käigus muudetakse rasterkujutise pikslite väärtusi liikuvasse aknasse mahtuva naabruskonna järgi. Seega on silutud DEMid ühtlasemaks muudetud väärtustega kõrgusmudelid, mis ei pruugi reaalselt loodust algandmetega võrreldes täpselt kajastada.

Algsetest andmetest üldistatud mõjuga analüüsi tulemuste saamiseks on võimalik rakendada töötlust suurema liikuva akna kohta. Seega oleks DEMi ühe pikslit töötlusesse kaasatud suurem naabruskond ning üksikute erisuste mõju on väiksem kui väiksema liikuva akna puhul. Tavalisest 3 x 3 liikuvast aknast, mis on ühtlasi väikseim võimalikust, suurema suuruse kasutamine tagab töötlusele või arvutusele üldistavat mõju.

Kokkuvõtvalt võib öelda, et üldistamise puhul tuleks eelkõige lähtuda konkreetsest lõppeesmärgist, mis kas soosib või välistab generaliseerimist.

1.2.6. Kõrgusandmete analüüs liikuva akna alusel

DEMi kasutatavatele reljeefi modelleerimisülesannetele on väga sagedane liikuva akna meetodi kasutamine. Liikuv aken töötleb keskmesse jääva objekti väärtust naabriks olevate objektide

väärtuste alusel. Rasterkujutiste puhul leitakse pikslitele töödeldud väärtusi naabruskonna pikslite alusel. Reljeefianalüüsid on tavaliselt liikuva akna suuruseks 3 x 3 (Wilson 2012).

1.3. Reljeefi keerukus

Reljeefi keerukusena (ingl k *terrain complexity*) käsitletakse maastikul esinevate pinnavormide korrapäratust või ebaühtlust (Li *et al.* 2005). Reljeefi hindamiseks kasutatakse erinevaid maapinna atribuutide või parameetrite töötusi ja tuletisi (Wilson, Gallant 2000).

Reljeefi keerukuse analüüsid viidatakse sageli kareduse näitajate teooriale (Li *et al.* 2005). Reljeefi kareduse näitajaid (ingl k *terrain roughness, surface roughness* või *terrain ruggedness*) on käsitletud ühe meetodina, millega analüüsida pinnavormide paiknemise tõttu maastikul toimuvaid geomorfoloogilisi protsesse (Grohmann *et al.* 2011).

Reljeefi uurimise ja modelleerimise printsiibid on muutunud tänu arvutusliku võimsuse kasvule ja kõrgusandmete lihtsamale kättesaamisele. Universaalset keerukuse hindamise meetodikat siiani kasutusse võetud ei ole (Lu 2008). Hilisemates uuringutes on reljeefi keerukuse digitaalseks hindamiseks kasutatud varasematest pisut erinevaid lähenemisviise. Tähelepanu on pööratud komplekssematele algoritmidele (Hani *et al.* 2012) või erinevatest reljeefi parameetritest loodud kombinatsioonidele (Lu 2008).

1.3.1. Reljeefi keerukuse ja kareduse näitajad

Reljeefi keerukuse ja kareduse näitajate leidmiseks kasutatakse tavaliselt topograafiliste tunnuste töötusi, mis jagunevad primaarseteks ja teisesteks. Esimesse kategooriasse kuuluvad kõrgusandmetest arvatud parameetrid, mis iseloomustavad otseselt reljeefi omadusi, nagu karedus, ning teisesed näitajad on primaarsete kombineeritud sünteesid või töötused, mida kasutatakse reljeefist tulenevate protsesside uurimiseks (Wilson, Gallant 2000).

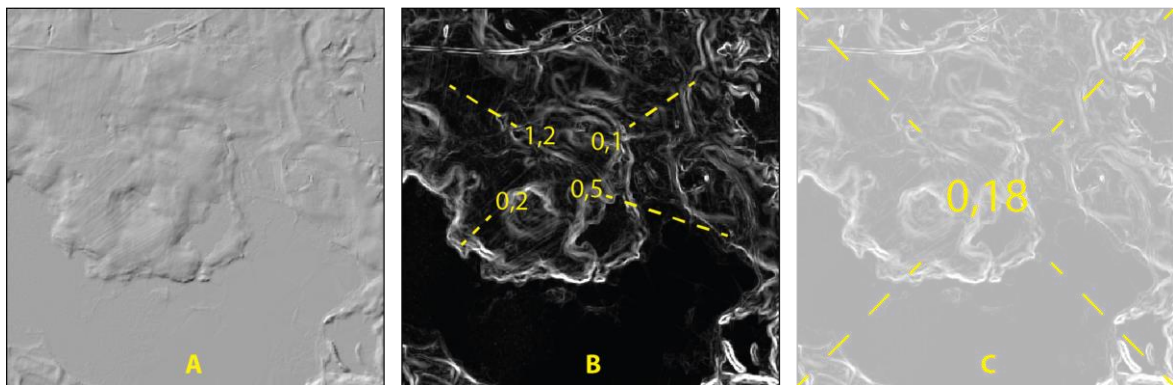
Käesolevas töös käsitletakse peamiselt primaarsetest atribuutidest leitud näitajaid, kuna reljeefi keerukus on selgelt pinnamoe omadus, mitte sellest põhjustatud protsess. Andmaks paremat ülevaadet reljeefi keerukusega seotud näitajatest on mõistlik näitajad klassifitseerida ühise tunnuse alusel. Lu (2008) näitel, mis käesoleva uurimistöö jaoks osutus kõige sobivamaks, on eraldatud näitajad kahte põhigruppi: statistilised ja geomeetrilised parameetrid. Lisanduvalt on käsitletud visuaalselt tunnetuslikku lähenemist reljeefi keerukuse hindamiseks. Järgnevates peatükkides on välja toodud kõige sagedamini kasutatavad reljeefi keerukust iseloomustavad näitajad, milledest suurem osa käsitlevad eelkõige karedust. Näitajad on jagatud eelpool nimetatud klassifikatsiooni eeskujul.

1.3.2. Kohalik või piirkondlik

Reljeefi parameetrite arvutustes on oluline eristada, kas valitud näitaja on lokaalse ehk kohaliku või regionaalse ehk piirkondliku ulatusega (Grohmann *et al.* 2011). Erineva ulatuse mõju väljendub näitaja tulemustes.

Kohaliku näitaja aluseks on reljeefi rasterkujutise (DEM) pikslite teisendused töötluse akna naabruskonna väärtuste kaudu (Florinsky 1998). Töötluse tulemuseks on uute väärtustega kujutis ning näitaja tulemused on pikslitepõhised. Tavapärast on liikuva akna meetodikat kasutavad reljeefi parameetrid või näitajad kohalikku laadi (Wilson 2012). Joonisel 1 on näidatud, kuidas pärast töötlust kajastab lokaalne näitaja tulemusi pikslitepõhiselt ning regionaalne näitaja ala kohta üldiselt. Lokaalse näitaja tulemusi on võimalik üldistada regionaalseks, kasutades näiteks uurimisala keskmisi arvutavaid statistikuks.

Regionaalseteks ehk piirkondlikeks näitajateks saab pidada meetodeid, mis iseloomustavad uurimisala tervikuna. Uuritavale maastikuüksusele leitakse üks näitaja väärtus ning seetõttu pole võimalik teha edasisi detailseid analüüse reljeefi kohta. Regionaalsed näitajad on sobilikud analüüsiks, kus on tähtis leida üks üldiselt iseloomustav näitaja uurimisala kohta. Käesolevas töös on regionaalseks suuruseks üks põhikaardilehe neljandik.



Joonis 1. Näited regionaalsest ja kohalikust parameetrist. A – töötlemata DEM, B – lokaalse näitaja tulemus, C – regionaalse näitaja tulemus.

1.3.3. Statistilised näitajad

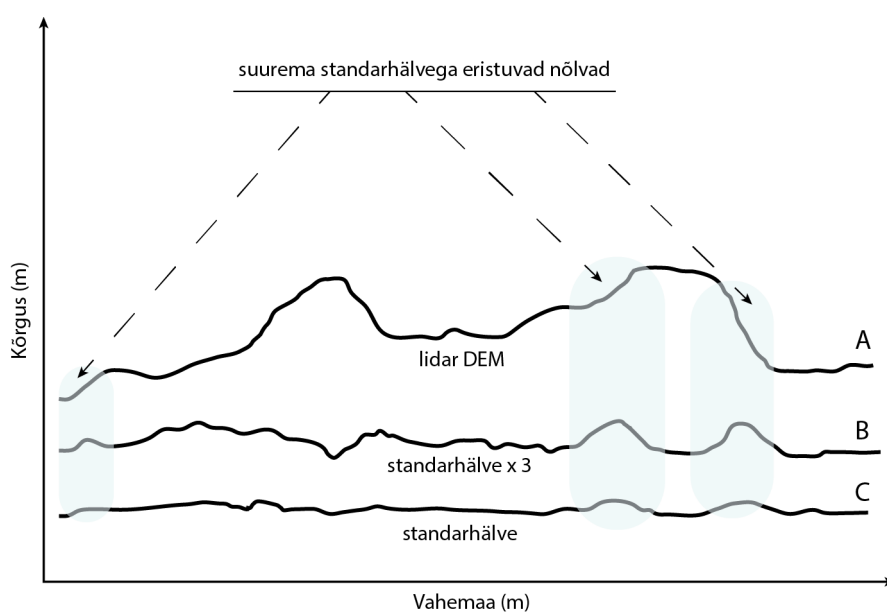
Statistiliste näitajate leidmise meetodika põhineb kõrgusväärtuste võrdlemisel statistiliste võtetega (Lu 2008), millele võib eelneda vastav kõrgusmudeli töötlus. DEMi näitel leitakse pikslitevahelised erinevused liikuva akna naabruskonna järgi või rakendatakse töödeldud rasterkujutiste väärtuste vahelisi arvutustehteid.

Juhised erinevate reljeefi näitajate arvutamiseks ArcGIS tarkvaraga on toodud lisa 1.

1.3.3.1. Reljeefi kõrgusväärtused

Reljeefi kõrgusväärtuste standardhälve (ingl k *standard deviation of elevation* või *local standard deviation*) on üks lihtsamini leitavaid näitajaid, millega on hinnatud reljeefi keerukust (Gao 1998; Lu 2008). Parameetri tulemust on peetud eelkõige kareduse näitajaks, mis märgib DEMi piksli kõrgusväärtuse muutlikkust standardhälve alusel naaberpikslite väärtustest (Grohmann *et al.* 2011).

Näitaja leidmiseks DEMist arvutatakse liikuva akna abil igale rasterkujutisse kuuluvale pikslile standardhälve väärtus naaberpikslite kõrgusväärtuste alusel. Standardhälve väärtus märgib pikslite väärtuste trendi muutust. Seega on ühtlased tasandikud või nõlvad madalate väärtustega ning nõlvade jalamid või tipud suure väärtustega. Joonisel 2 on kujutatud standardhälve väärtused sõltuvalt kõrgusväärtustest vastavate profiilide näol.



Joonis 2. A – profiil kõrgusväärtustest, B – profiil võimendatud standardhälve väärtustest ja C – profiil standardhälve väärtustest.

Kõrgusväärtuste standardhälve eeliseks teiste reljeefi keerukuse näitajate ees on arvutuslik lihtsus ja minimaalne kõrgusandmete töötlus. Esile on tõstetud näitaja head võimekust märkida reljeefi katkestusi, kuid näitaja puuduseks on tulemuste liigne sõltuvus liikuva akna suuruselt ja ruumilisest lahtusest (Grohmann *et al.* 2011) ehk mõõtkava mõjudest.

1.3.3.2. Maapinna kareduse indeks

Kareduse indeks TRI (ingl k *Terrain Ruggedness Index* või *Terrain Roughness Index*) väljendab topograafilist heterogeensust ja seega reljeefi keerukust (Riley *et al.* 1999). Sarnaselt eelmisele parameetrile arvutatakse TRI kõrgusväärtust standardhälve kaudu.

Metoodikaks on liikuva akna kõrgusväärtuste, DEMi puhul pikslite, standardhälbe väärtuste ruutu tõstmine ning antud summast ruutjuure leidmine (Riley *et al.* 1999):

$$TRI = \sqrt{\sum \sigma^2},$$

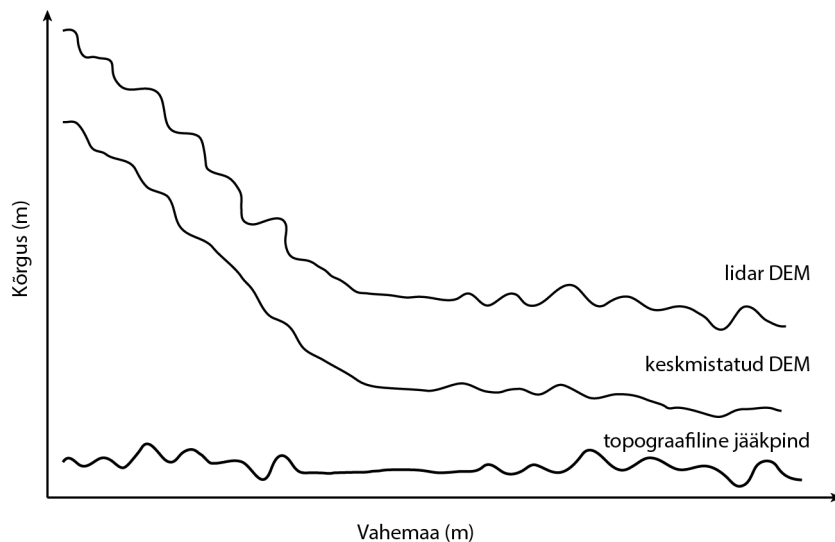
kus σ tähistab standardhälvet.

Tulemuseks saadakse kareduse rasterkujutis. Piirkondliku üldise tulemuse leidmiseks on võimalik leida statistilise töövahendiga ala keskmine väärtus.

TRI meetodiga ei ole võimalik eristada erineva sagedusega pindasid ning näitaja sobib üksnes sama mõõtkava astmega töötlustele (Hani *et al.* 2012).

1.3.3.3. Topograafiline jääkpind

Samuti käsitletakse statistilise reljeefi keerukuse näitajana standardhälvet DEMi jääkpinnast (Grohmann *et al.* 2011). Topograafilise jääkpinnana mõistetakse antud kontekstis algseid kõrgusandmeid sisaldava DEMi ja liikuva akna kaudu keskmistatud DEMi aritmeetilist vahet (Cavalli *et al.* 2008). Topograafilise jääkpinna tulemus kajastab pinnavorme ja muutusi reljeefis. Topograafilise jääkpinna moodustumist originaal DEMist kujutab joonis 3. Näitaja töötluste vaheastmena on joonisel näidatud DEMi keskmistatud profiil.



Joonis 3. Topograafilise jääkpinna moodustamine DEMist (Allikas: Cavalli *et al.* 2008, täiendatud).

Näitaja väärtused on sõltuvad liikuva akna suuruselt ja ruumilisest lahutusest. Olenemata ruumilisest lahutusest on keerukuse näitaja tulemustel tendents suureneka kuni 21 x 21 piksli

suurusega liikuva aknani. Näitaja tulemused on lokaalsed ega kajasta regionaalset ehk üldist reljeefi (Grohmann *et al.* 2011).

1.3.3.4. Lokaalne reljeef

Eelmisele näitajale sarnane on lokaalne reljeef (ingl k *local relief*), mida kasutatakse samuti maapinna heterogeensuse hindamiseks. Näitaja leitakse aritmeetilise vahena liikuva aknaga pikslile arvutatud maksimaalsest ja minimaalsest väärtusest (Gao 1998). Liikuva akna maksimaalse töötuse käigus muutub töödeldava piksli suurus naabruskonna kõige suurema piksli väärtuse järgi. Minimaalse töötuse puhul vastupidi – kõige väiksema väärtuse järgi. Töödeldud pikselite aritmeetiline vahe näitab jääkpinda ehk erinevust reljeefi madalamate ja kõrgemate kohtade vahel. Lokaalne reljeef kujutab seega ilma absoluutkõrgusteta kihti või lõiget, kus eristuvad pinna ebatasasused.

1.3.3.5. Vektorite hajuvus

Reljeefi iseloomu hindamiseks on kasutatud vektoritel põhinevat analüüsi (Hobson 1972). Vektorite hajuvust VRMi (ingl k *Vector Ruggedness Measure*), mida kasutatakse reljeefi keerukuse meetodina, on nimetatud vektorite keerukuse määraks (Sappington *et al.* 2007).

Näitaja leidmise meetodika põhineb vektorite konstrueerimisel pinnaühikute normaalidena. Arvutuste käigus määratakse vektorite muutlikkust uurimisalal kallakuse (ingl k *slope*) ja aspekti (ingl k *aspect*) suhtes (McKean, Roering 2004). Vektorite eeliseks, võrreldes teiste näitajatega, on kallakuse ja aspekti ehk nõlva suuna parameetri ühine esitamine. Uurimistöodes on kasutatud erinevaid viise vektorite kaudu reljeefi iseloomustamiseks, kuid kõige sagedasem on vektorite hajuvuse hindamine pinnaühikul.

Vektorlahendusel põhineva näitaja tulemused on mõjutatud mõõtkavast ruumilise lahutuse ja liikuva akna suuruse valiku kaudu. Näitaja järgi kasvab reljeefi keerukus ruumilise lahutuse vähenedes ja liikuva akna suuruse suurenedes. Grohmann *et al.* (2011) järgi sobib meetod eelkõige suure ruumilise lahutusega andmetele.

1.3.3.6. Samakõrgusjoonte tihedus

Piirkondliku reljeefi keerukuse näitajana kasutatakse sagedamini samakõrgusjoonte tihedust ehk horisontaalide summaarset pikkust pindalaühiku kohta (Gao 1998). Samakõrgusjoonte tiheduse näitaja järgi reljeefi keerukuse hindamine on meetodikalt lihtne – tasase reljeefi esitamiseks topomudelil on vaja vähem samakõrgusjooni kui vastupidiselt väga heterogeense reljeefi jaoks, kus horisontaale on tarvis rohkem (Gao 1998).

Samakõrgusjoonte tiheduse näitaja ei ole mõjutatud mõõtkavast ning samuti on võimalik näitajat kasutada ainult topomudeli alusel. Viimase rakenduseks võib olla reljeefi keerukuse hindamine orienteerumiskaartidel või ajalooliste kõrgusandmete puhul ilma interpoleerimisvõtteid kasutamata.

1.3.4. Geomeetrilised näitajad

Erinevalt eelmisest reljeefi näitajate rühmast, mis käsitles kõrgusandmete statistilisi eripärasid, on reljeefi karedust ja keerukust võimalik hinnata geomeetriliste indeksite kaudu, mis rõhutavad pinnavormide geomeetriast tulenevaid eripärasid (Lu 2008).

Geomeetrilised reljeefinäitajad käsitlevad kõrgusandmetest tulenevaid parameetreid. Kui statistiliste näitajate seas on levinud DEMi naaberpikselite võrdlemine ja erinevuste väljatoomine, siis geomeetriliste näitajate seas leitakse üksikute pikslite ülesed parameetrid, nagu kõverused või kallakused.

1.3.4.1. Kallakuse standardhälve

Kallakuse (ingl k *slope*) standardhälvet on kasutatud reljeefi keerukuse määramisel erinevates uurimustes (Frankel, Dolan 2007; Luo, Stepinski 2011). On väidetud, et kallakuse standardhälve on kõige efektiivsem reljeefi kareduse näitaja eelkõige seetõttu, et parameetri leidmine on arvutuslikult lihtne, annab objektiivselt edasi regionaalset reljeefi ehk üldist pinnamoodi ja toimib sarnaselt erinevatel mõõtkavadel (Grohmann *et al.* 2011).

Lihtsustatult märgib kallakus igasuguste pinnavormide vertikaalseid muutusi. Standardhälve kallakuse mudelist tõstab esile nõlvade jalamid ja tipud, kus on suur kallakuse väärtuste erinevus naaberpikselite vahel. Nimetatud tulemus on sarnane reljeefi profiili kõverusele, kuid erineb viimasest arvutusalgoritmi poolest.

1.3.4.2. Kõverus

Kõveruse näitajad (ingl k *curvature*) on teiseseid tuletised pinnast (Wilson, Gallant 2000), mida on kasutatud pinna kareduse hindamiseks (Li *et al.* 2005). Erinevat liiki kõverusi on defineeritud palju (Porres, Pardo 2002), kuid reljeefi iseloomustavate kõveruste seas on rohkem kasutatud nelja kõverust: profiili-, plaani-, koond- ja üldkõverust (Wilson, Gallant 2000). Kõverused saavad olla nõgusa (ingl k *concave*) või kumera (ingl k *convex*) kujuga ning vastavalt liigist on seega kas positiivse või negatiivse väärtusega (Grohmann *et al.* 2011).

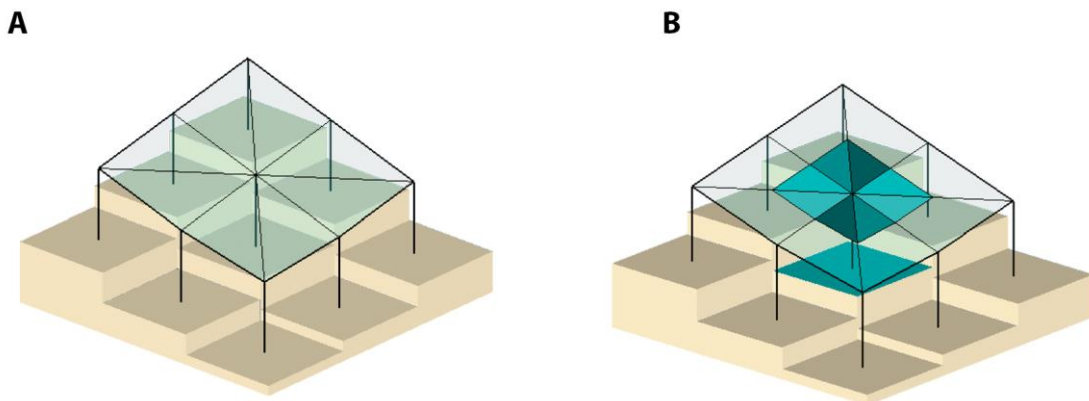
Profiilikõverus (ingl k *profile curvature*) on reljeefil esinevate kallakuste ehk gradientide muutus. Plaani (ingl k *plan curvature*) kõverus kirjeldab reljeefi tasapinna horisontaali kõverusi (Moore *et al.* 1991).

Koondkõverus (ingl k *total curvature*) erineb eelpool nimetatud kõverustest, kuna kindla joone või sihi asemel iseloomustatakse mingit teatud ala (Wilson, Gallant 2000). Üldine kõverus (ingl k *general curvature*) on sarnaselt koondkõverusele ala iseloomustav näitaja (Moore *et al.* 1991). Erinevus koond- ja üldise kõveruse vahel seisneb asjaolus, et koondkõverus märgib kõverusi ainult positiivsete väärtusega ning üldine kõverus eristab kumerad ja nõgusad kõverused vastavalt positiivsete ja negatiivsete väärtusega (Moore *et al.* 1991).

1.3.4.3. Kaldpinna suhe

Reljeefi kaldpinna suhet selle alla jääva tasandi pindalasse (ingl k *area ratio või rugosity*) on samuti rakendatud reljeefi kareduse hindamiseks (Jenness 2013). Pindalade suhe näitab kaldus maapinna, mis on pindalalt alati suurem, ja selle tasapinnalise projektsioonpinna pindalade arvulist suhet (Hobson 1972).

Kaldus pinna, DEMi puhul piksli, pindala leitakse pikslite kõrgusväärtustest konstrueeritud kolmnurkade abil (joonis 4).



Joonis 4. Kaldpinna leidmine pikslite kõrgusväärtustest konstrueeritud kolmnurkade kaudu.

A – kolmnurkade genereerimine aluspinnast, B – projektsioonpinna moodustamine aluspinna naabruskonna pikslite järgi.

Grohmann *et al.* (2011) kareduse näitajate uurimusest selgub, et antud parameetri tulemused on liikuva akna ja ruumilise lahutuse suurusest vähe mõjutatud ja seega töötab meetod üheselt erinevates mõõtkavades.

1.3.4.4. Horisontaalide looklevus

Kirjanduses vähem levinud reljeefi iseloomustav parameeter on pinnavormide kuju näitaja. Põhjuseks võib olla üldine geomorfomeetriliste uuringute suundumine horisontaalidega talletatud kõrgusandmetelt rasterkujutiste põhilistele analüüsidele.

Horisontaalide looklevuse alusel hinnatakse reljeefi keerukust SCI (ingl k *Shape Complexity Index*) näitaja kaudu (Hengl *et al.* 2003). Näitaja leitakse valemist:

$$SCI = \frac{P}{2r\pi},$$

,kus P on hulknurga ümbermõõt, r on hulknurga pindalaga võrdse ringi raadius.

1.3.4.5. Fraktaal geometria

Reljeefi võib vaadelda kui looduslike protsesside entroopia tulemust, mida on üritatud mõõta mittelineaarse füüsikaga ehk fraktaalse geomeetria näol. Esmakordselt sidus fraktaalse geomeetria loodusteadustega Benoit B. Mandelbrot, nimetades fraktali iseendaga lõpmatult sarnaseks struktuuriks. Teooria alusel on defineeritud *self-similarity* ehk lõputu sarnanemise printsiip, millest lähtuvalt saab omakorda defineerida reljeefi keerukust.

Fraktaalteooria seost reljeefiga nähakse sarnaselt keeruka reljeefi vaatlustasandi defineerimises. Vaatlustasandit suurendades on võimalik näha keerukat mikroreljeefi väga väikestes mõõtkavades ning sarnane struktuur kordub vaatlustasandit vähendades, kuni liiga kaugelt vaadeldes kaob reljeefi struktuursus täiesti. Seega on püütud leida vaatlusala kohta efektiivset vaatlustasandit, mis kajastaks määratletud keerukusega reljeefi.

Li *et al.* (2005) järgi on pinna või joone keerukus väljendatud fraktaalsuse kaudu, kasutades efektiivse mõõtme lähenemist, mida on kirjeldatud järgnevalt.

Teoreetiliselt võib vaadelda planeeti Maa väga kaugelt tasandilt ning tõdeda, et Maa on punkt, millel pole ruumilisi mõõtmeid. Vaatetasandit lähemale tuues on Maa näha kerana, millel on kolm mõõdet, kuid mille pind on sile. Suurendades pilti veel muutub tajutavaks Maa reljeefsus, kuid kaob ära ruumiline efekt ning kolmas mõõde kui vaadeldav pind horisondini ulatub. Vaadeldes reljeefi maapinnalt on selgesti tunda selle keerukus ja enam kui ainult kahe

mõõtmeline ruum. Seega võib pinna fraktaalsust iseloomustada teise ja kolmanda mõõtme vahelise suhtarvuna (Li *et al.* 2005).

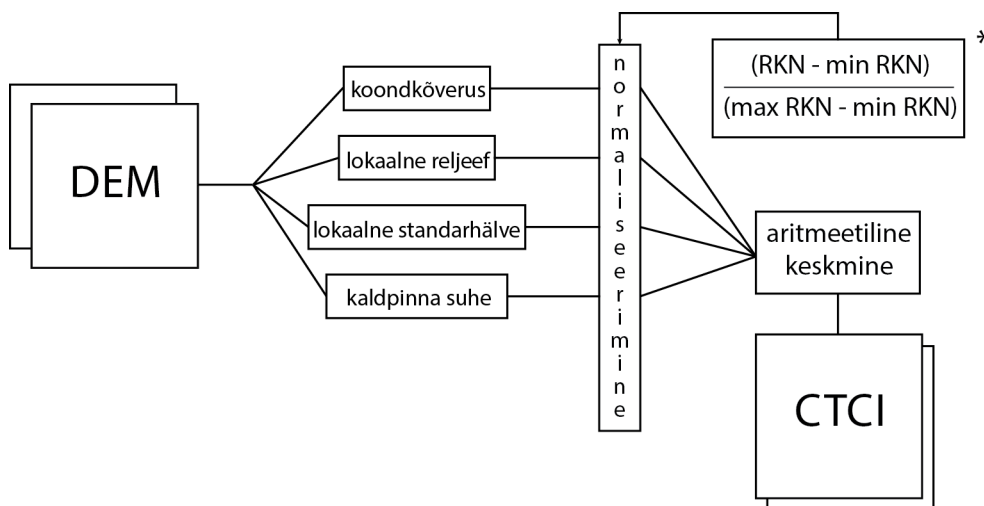
Fraktaalteooriat on rakendatud pinna keerukuse hindamisel (Glenn *et al.* 2006). Samas leitakse, et fraktaalteooria lähenemine on reljeefi keerukuse hindamiseks filosoofiliselt kohmakas, võrreldes teiste kareduse näitajatega (Lu 2008). Sealjuures väidetakse, et keerukuse leidmine fraktaalse geomeetria teooria kaudu pole otstarbekas liiga jämeda ehk väikese ruumilise lahutusega kõrgusandmete korral (Hani *et al.* 2012).

1.3.5. Muud näitajad

Lisaks eespool nimetatud näitajatele on reljeefi keerukuse hindamiseks pakutud kahte eelnevatesse klassifikatsioonidesse mitte sobivat reljeefi keerukuse indeksit. Erinevalt statistilistest või geomeetristest näitajatest iseloomustavad järgnevad näitajad reljeefi keerukust kompleksemalt ja üldisemalt.

1.3.5.1. Reljeefi keerukuse koondindeks

Reljeefi keerukuse koondindeks CTCI (ingl k *Compound Terrain Complexity Index*) on pinnamoe heterogeensust mõõtev meetod, mis moodustatakse nelja näitaja tulemustest: koondkõverus, lokaalne reljeef, lokaalne standardhälve ja kaldpinna suhe (joonis 5). Indeksi tulemuse saadakse näitajate normaliseeritud väärtuste aritmeetilises keskmises (Lu 2008).



Joonis 5. Reljeefi keerukuse koondindeksi arvutamise skeem. Joonisel on tärniga (*) tähistatud reljeefi keerukuse näitaja (RKN) normaliseerimise valem.

1.3.5.2. Reljeefi visuaalne hindamine

Erinevalt kõikidest eelnevalt nimetatud näitajatest on reljeefi keerukusele visuaalse hinnangu andmine kvalitatiivne meetod. Näitaja meetodikaks on kõrgusmudelilt reljeefi keerukuse

visuaalne hindamine. Seega sõltub objektiivne hinnang ehk tulemus reljeefi keerukusest suuresti vaatlustingimustest ja vaatleja isiklikest kogemustest pinnamoe tunnetamisel (Lu 2008).

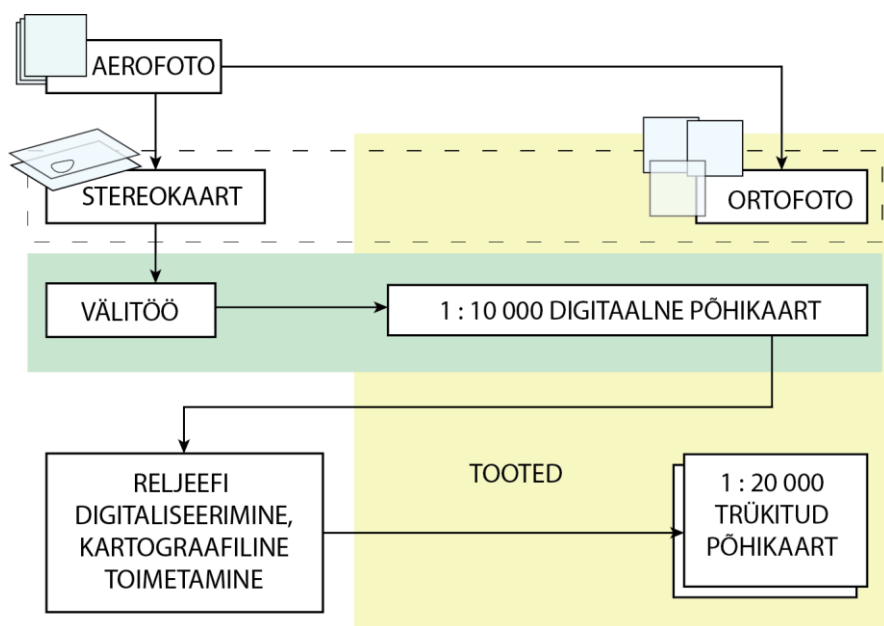
1.4. Eesti põhikaart

Eesti põhikaart (EPK) on suuremõõtkavaline topograafiline kaart, mis kujutab detailset informatsiooni looduses esinevate objektide kohta. Põhikaardi eesmärgiks on anda edasi iga päevaselt vajalikku teavet taristute, kommunikatsioonivõrkude, asustuse, hüdrograafia, pinnamoe, kohanimedega ja maakasutuse kohta (Maa-amet 2014).

EPK tootmine ja Eesti ruumiandmete haldamine on olnud pidevalt arengus ja muutused on alati mõjutanud mõlemaid. Üheks olulisemaks muutuseks on olnud ressursi ja ajamahukate välitööde asendumine efektiivsemate digitaalsete lahendustega. Välitööde vähenenud mahu tõttu ei ole võimalik kontrollida kaardistamise kvaliteeti varasemaga võrdväärset mahus. Seetõttu on ruumiandmete kvaliteedi haldamiseks oluline tõsta välikontrolli efektiivsust. Välikontrolli ressursside paremaks kasutamiseks oleks seega vajalik välja selgitada kaardistusvigade peamised põhjused.

EPK funktsioon topograafiliste andmete esitusmeetodina on aastakümnete jooksul säilinud, kuid muutunud on Eesti ruumiandmete haldamise kord. EPK nime all on topograafilisi andmeid toodetud kuni 2006. aastani, kui loodi Eesti topograafiline andmekogu (ETAK). Alates 2007. aastast on ETAK olnud põhiliseks ruumiandmete allikas, mille alusel on toodetud EPK ja teisi kaarte. EPK on seega muutunud ruumiandmete allikast ETAKi väljundiks (Maa-amet 2014). EPK tootmisprotsessi erinevad etapid on kajastatud joonisel 6.

EPK koostamiseks on pidevalt kogutud topograafilisi andmeid aerofotomöödistamise ja välikaardistamise käigus. Samuti kasutatakse olemasolevaid arhiivandmeid ning statistilisi andmeid teistest ametkondadest (Maa-amet 2013). Erinevalt teistest riikidest teostati Eestis kuni 2006. aastani lausalist välikaardistamist, kuid välitööde ressursside vähenemise tõttu tehakse seda järjest vähem. Seega on välikontrolli efektiivsuse tõstmiseks oluline leida just kaardistamise vigade tekkepõhjused.



Joonis 6. EPK tootmisskeem (Allikas: Maa-amet 2014, täiendatud)

Põhikaardi koostamist alustati Maa-ametis 1991. aastal ning kuni 1995. aastani koostati kaarti manuaalmeetodil. Digitaalset põhikaarti on toodetud alates 1996. aastast ning 2009. aastal koostati põhikaart esmakordselt ETAKi andmetest. 2006. aastal muutus Eesti ruumandmete haldamise ja kaardistamise kord. Loodi ETAK ning alustati topograafiliste andmete uuendamist kahel viisil. Jätkati lausalise kaardistamisega valitud piirkondades, kuid vähemal määral ning alustati topograafiliste andmete uuendamist kaardikihtide kaupa.

2014. aastaks on Maa-amet hallanud põhikaarti 23 aastat. Pikaajalise tootmisprotsessi käigus on vahetunud kaardistamise hangete teostajad, välikaardistajad ning on muudetud kaardistamiseks kasutatavaid juhendeid (Maa-amet 2013). Perioodi jooksul on kaardistamise kvaliteedi tõstmiseks pidevalt täiendatud ja täpsustatud kaardistamise nõudeid. EPK kvaliteediküsimustele on pööratud tähelepanu varasemate kvaliteedi analüüside põhjal (Mõisja, Pauts 2005).

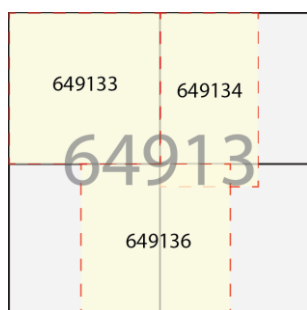
2. ANDMED JA METOODIKA

Uurimistöo hüpotees on, et keerukam reljeef mõjutab välikaardistamise kvaliteeti, põhjustades vigade teket. Hüpoteesist tulenevalt püstitati järgmised uurimisküsimused:

- Millist tüüpi näitajad sobivad reljeefi keerukuse hindamiseks topograafilise kaardistamise kvaliteedijuhtimisel?
- Kas keerukama reljeefiga aladel esineb rohkem välikaardistuse vigu kui vähemkeeruka reljeefiga aladel?

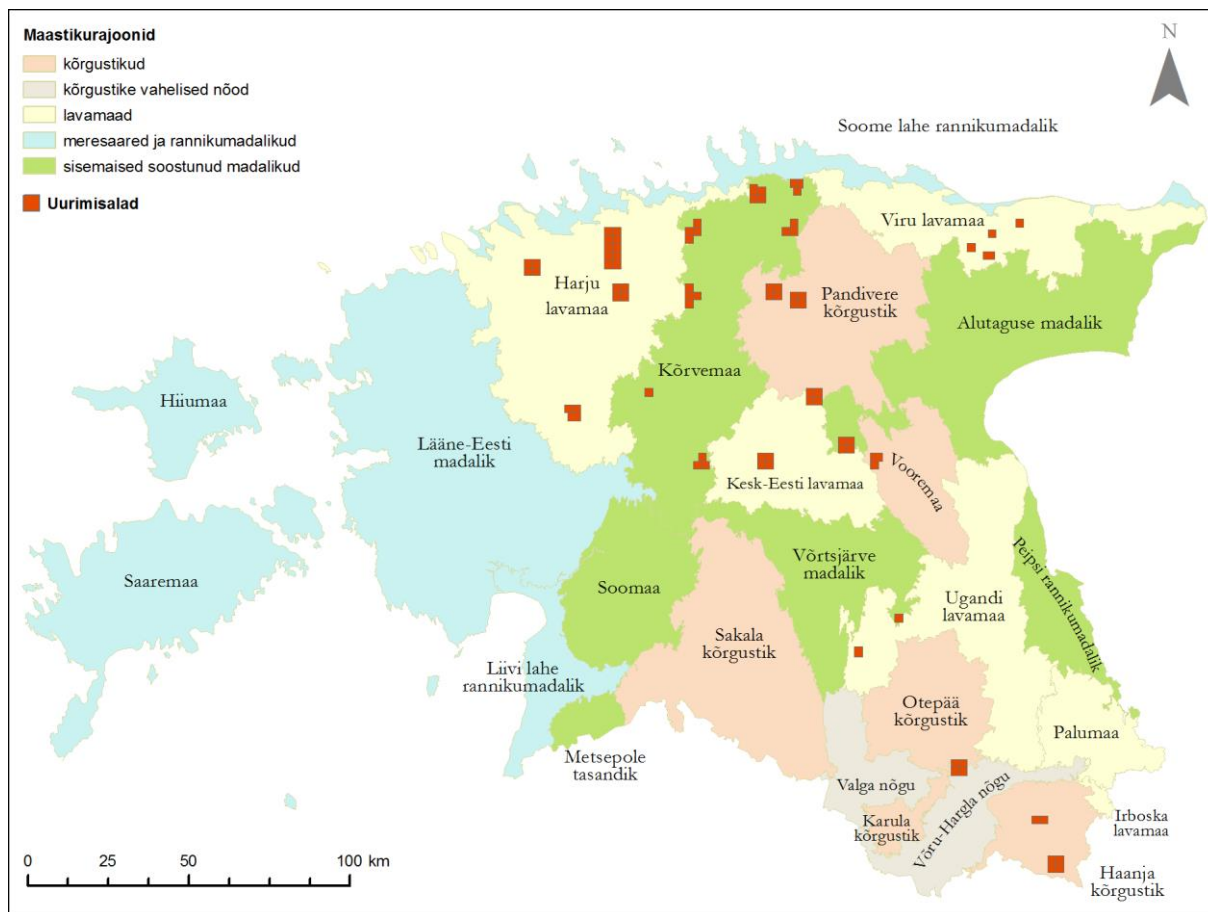
2.1. Kontrolli- ja uurimisalad

Uurimisaladena kasutati peamiselt Maa-ameti 1:10 000 EPK kaardilehti, mis olid jaotatud neljaks. Uurimisalade valimi koostamisel lähtuti aladest, kus oli varasemalt teostatud välikaardistuse kvaliteedikontroll. Üks neljandik põhikaardi ruudust on vähim ala, mida kaardistab 1 välitöötaja. Seega võib ühte põhikaardilehte olla kaardistanud 1-4 erinevat välitöötajat. Juhul, kui välikaardistuse kontrollala ulatus neljandiku servast üle, suurendati uurimisala erandkorras. Seetõttu esineb valimis üksikute eranditena kaardilehe neljandikke, mille mõõdud erinevad kaardilehe ruudukujulisest neljandikust (joonis 7).



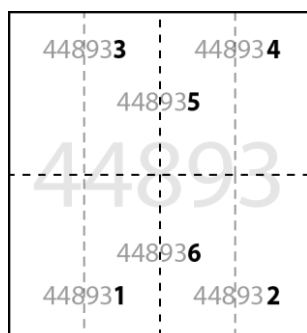
Joonis 7. Neljandikust erineva mõõduga (649134) kontrollalade näidis.

Töö hõlmab 81 uurimisala, mis pindalaliselt katab 520,06 km² suuruse ala Eestist (joonis 8). Uurimisaladeks valitud EPK kaardilehtede neljandike esinduslikkust välikaardistamise ja välikontrolli jaoks on uurinud ja tõestanud Spuul (2011) oma magistritöös.



Joonis 8. Uurimisalade paiknemine maastikurajoonide järgi.

Uurimisalade nomenklatuur põhineb EPK 1:10 000 kaardilehtedel. Uurimisalade identifitseerimisel lähtuti põhikaardi nomenklatuuri loogikast, mille järgi kaardilehede numbrid kasvavad lõunast põhja ja läänest itta (Maa-amet 2013). Neljandike tähistamiseks lisati kaardilehe numbrile üks lisanumber. Seega on 1:10 000 EPK kaardilehe vasakusse alla neljandikku jääva uurimisala identifitseerimiseks lisatud vastava kaardilehe numbrile 1 ning kaardilehe üles paremale jäävale neljandikule 4. Uurimisalad, mis asusid põhikaardi lehtede all keskel said identifikaatori 6 ja üleval keskel 5 (joonis 9).



Joonis 9. Uurimisalade nomenklatuuri skeem.

Iga uurimisalakohta on kasutatud kahte tüüpi andmestikku:

1. Kõrgusandmed – uurimisalade reljeefi keerukuse näitajate leidmiseks,
2. Välikaardistuse kvaliteedikontrolli andmed – kvaliteedikontrolli käigus kogutud vigade põhjal arvutatud kvaliteedinäitajad.

Uurimisalade esmase taustainformatsiooni saamiseks iseloomustati alade paiknemist maastikurajoonide kaudu, sest maastikurajoonide eristamisel on reljeefil ja pinnavormide rohkusel olnud väga suur osatähtsus. Näiteks uurimisalad, mis jäävad Haanja kõrgustiku piirkonda, on tõenäoliselt keerukama reljeefiga kui need, mis asuvad Kesk-Eesti lavamaal. Uurimisalade jaotamisel lähtuti Ivar Aroldi eristatud maastikurajoonidest ja paiknemise määramiseks kasutati TÜ geograafia instituudi poolt välja antud maastikurajoonide kaarti. Jagunemine maastikurajoonidesse oli kasutuses kaudse kontrollmeetodina reljeefi keerukuse näitajatele. Uurimisalade jagunemine maastikurajoonidesse kaardilehtede järgi on toodud lisa 2.

2.2. Kõrgusandmed

Kasutatavad DEMid on formaadilt korrapärase võrgustikega rasterkujutised. Kõik kasutatud kõrgusandmed pärinevad Maa-ametist ning on koostatud aerolaserskaneerimise meetodil.

DEMide tootmisel on Maa-ametis lähtutud järgnevatest tegevustest:

- mõõdistatud punktidele ei lisata uusi juurde, vaid parandatakse olemasolevate klassifikatsiooni võrdlusandmete järgi,
- kõrgusmodeli põhi koostatakse Delaunay triangulatsiooni teel,
- DEMide kokkusobivus tagatakse ülekatte kasutamise teel,
- DEMide morfoloogiline õigsus kontrollitakse hallvarjutus kaudu,
- DEMide kontrolliks kasutatakse fotogrammeetrilist kõrgusmodelit ja varasemaid LiDAR mõõtmise tulemusi.

Kõrgusandmete sisuks on 5 m ruumilise lahutusega digitaalne rasterkujutis Eesti maapinna reljeefist. Iga piksel katab 25 m^2 suuruse osa maapinnast ja kujutab vastava koha kõrgust merepinnast. DEMid on GeoTIFF formaadis, omades geograafilist asukoha ja projektsiooni informatsiooni. DEMide küljepikkus on 1000 pikslit, mis katab 5 km looduses ning seega on DEMi kogumahuks 1 000 000 pikslit ehk 25 km^2 . DEMide keskmiseks andmemahuks on 4 MB.

2.3. Välikaardistuse kvaliteedikontrolli andmed

Kvaliteediuuringu eesmärgiks oli hinnata põhikaardi sisulist kvaliteeti. Vigade eristamiseks kasutati ISO19113 defineeritud ruumiandmete kvaliteedielemente: temaatiline õigsus ja täielikkus.

Uurimistöö kaardikvaliteedi andmestiku moodustavad 2003.-2006. aasta põhikaardi välikaardistuse kvaliteedikontrolli andmed. Kvaliteedikontrolli teostajateks oli Maa-ameti kartograafia büroo ja palgatud lepingulised eksperdid. Kvaliteedikontrolli käigus kontrolliti kaardi vastavust juhendile ning erilist tähelepanu pöörati aladele, kus esines erinevusi ortofoto ja põhikaardi või varasema kaardistuse ja põhikaardi vahel (Mõisja 2004). Kvaliteedikontrolli töö hulk uurimisalade kaupa oli tehtud sarnases mahus, kvaliteedi kontrollija läbis uurimisalal umbes 14 km pikkuse trassi. Vigadena registreeriti ainult objektid, millega välikaardistaja nõus oli. Samade välikontrolli andmetega on kaardikvaliteedi temadel kaitsnud diplomitöid Gauk (2008) ja Spuul (2011).

2.3.1. Vigade andmestik

Vigade andmestik on saadud välitööde kvaliteedikontrolli käigus registreeritud vigadest. Välikaardistuse kvaliteedikontrolli käigus leitud vead jaotati järgmisteks veatüüpideks ehk kvaliteedi alamelementideks: vale koht, liigne objekt, puudulik objekt, vale mõõt ja vale klass. Veatüüpide klassifikatsioon on toodud lisas 3. Pindobjektide puhul eristati ainult klassifitseerimise vigasid, sest pinnad moodustavad kaardil 100% katte, seega ei saa pindobjektid puududa, olla liigsed või asuda vales kohas.

Uurimistöös kasutatud kvaliteedikontrolli andmestik pärines juhendaja Kiire Mõisjalt. Andmestikule lisati juurde 10 Haanja ja Otepää kõrgustikul asuva uurimisala kvaliteedikontrolli tulemused. Lisatud alasid ei ole varasemates uuringutes välikontrolli andmestikuna kasutatud.

Täiendavate välikontrolli alade lisamine toimus järgmiste etappidena:

- registreeritud vigade ruumikujude konverteerimine MicroStation'i DGN formaadist ArcGIS SHP formaati,
- vigade ruumikujudele atribuutide (kirjelduste) lisamine,
- uurimisaladele kvaliteedinäitajate arvutamine.

2.3.2. Kvaliteedinäitajad

Kvaliteedi alamelementidele arvutati välja järgmised kvaliteedinäitajad:

- veasumma – joonobjektidel vigaste joonte kogupikkus, pindobjektidel vigaste pindade kogupindala, punktobjektidel vigaste objektide summa uurimisalal,
- vigade arv – erinevat tüüpi vigade hulk uurimisalal,
- veaprotsent – erinevate objektide ja veatüüpide esinemise suhtarv uurimisalal.

2.4. Uurimistööks sobivad reljeefi keerukuse näitajad

2.4.1. Sobivate reljeefi keerukuse näitajate valimine

Uurimisalade reljeefi keerukuse väärtuste leidmiseks otsustati valida välja mitu näitajat. Mitme erineva näitaja kasutamine tõstab oluliselt uurimistöö analüüsi usaldusväärsust, kuna välistatud on sõltuvus ühe meetodi tulemustest, mis võivad olla vigased.

Keerukuse näitajate valikul lähtuti käesoleva uurimistöö iseloomust, mahust ja eesmärkidest ning seetõttu välistati liialt keerulise meetodikaga näitajad, mille tulemused ei ole kasutatud kirjanduse põhjal üheselt mõistetavad. Eelistati näitajaid, mille tulemus oli üldistatav uurimisalale, mida defineeriti kui uurimistöö kõige väiksemat osa.

Reljeefi keerukust iseloomustavate näitajate valiku esimeseks etapiks oli katsetada, kas kirjanduses leitud meetodite rakendamist on võimalik kasutada laialt levinud ArcGIS tarkvaras ja detailsete DEMide põhjal. Näitajate valiku eel formuleeriti kolm olulist kriteeriumit, mis aitasid leida uurimistööks sobivaimad reljeefi keerukuse hindamise meetodid:

1. Näitaja rakendamise lihtsus - üheselt mõistetav ja lihtne meetodika vältimaks juhuslikke vigasid,
2. Näitaja sõltumatus mõõtkava mõjust, sealhulgas ruumilise lahutuse ja liikuva akna suurusest,
3. Esinduslikkus kaardilehe neljandiku kohta.

Uurimisalade reljeefi keerukuse leidmiseks valiti välja seega kolm näitajat, mis iseloomustasid maapinda erineva meetodika alusel: samakõrgusjoonte tihedus, kallakuste standardhälve ja kõrgusmudeli visuaalne hindamine. Valiku mõjuvaks kriteeriumiks oli näitaja arvutuslik lihtsus ja selge meetodika, kuna viimaseid on hinnatud reljeefi modelleerimise meetodikaid käsitlevas kirjanduses (Lu 2008; Grohmann *et al.* 2011).

2.4.2. CTCI

Lisaks välja valitud reljeefi keerukuse näitajatele katsetati CTCI indeksit, kuna teoreetiliselt kattus antud võtte metoodika kõige enam uurimistöö pinnamoe analüüsi eesmärgiga. Katsetuse sisuks oli näitaja rakendamine uurimistöös kasutatud andmete alusel. Järgmiseks üldistati olemasolevaid andmeid ja uuriti, kas üldistatud andmed muudavad näitaja tulemusi. Põhjuseks peetakse asjaolu, et näitaja metoodikat käsitlevas kirjanduses kasutati kõrgusandmetena 30 m ruumilise lahutusega samakõrgusjoontest interpoleeritud DEMi 30 m (Lu 2008).

Kõrgusandmete üldistamiseks genereeriti kõrgusmudelidest samakõrgusjooned ja siluti horisontaale *simplify line* töövahendiga. Järgnevalt interpoleeriti silutud samakõrgusjoonte alusel DEM, mille ruumiline lahutus jäeti algsete andmetega samaks (5m). Katsetuste objektiivseks tulemuseks otsustati hinnata rasterkujutist, millelt oleks selgesti arusaadav reljeefilt keerukamata pindade eristamine.

2.5. Kõrgusandmete generaliseerimine

Esialgsete arvutused näitasid, et kasutatavad Maa-ameti 5 m lahutusega DEMid olid eelkõige lokaalsete reljeefi parameetrite leidmiseks, liiga detailsed, kajastades mikroreljeefi vorme. Tulemustes ilmnisid kareduse ja keerukuse suured väärtused kohtades, kus oli tegemist üldiselt homogeensete aladega. Seega otsustati parandada metoodikat ja üldistada kõrgusandmeid selliselt, et kajastuks LiDAR mõõtmise teel saadud kõrgusandmete täpsus, kuid kaoks ära mikroreljeefist tekkiv müra.

Juhindudes käesoleva uurimistöö lähteülesandest, milleks oli selgitada välja välikaardistamise vigade hulk ja reljeefi keerukus välikaardistamise kontekstis, rakendati näitajate arvutustes üldistava mõju võtteid. Põhjuseks oli vajadus vähendada mikroreljeefi müra mõju. DEMi töötlemist müra vähendamise eesmärgil on käsitletud E. Hirv enda magistritöös (Hirv 2013).

Samakõrgusjoonte tiheduse näitaja arvutustes generaliseeriti horisontaalide kõverusi, mitte algseid kõrgusandmeid. Niimoodi oli võimalik tagada horisontaalide võimalikult täpset asukohta kõrgusmudelil. Kallakuse standardhälve näitaja tulemuse leidmiseks kasutati näitaja arvutusel 5 x 5 piksli suurust liikutavat akent. Lihtsast 3 x 3 piksli suurusest liikutavast aknast suurema 5 x 5 kasutamine kaasab arvutusprotsessi umbes 2,7 korda enam pindala. Suurema ala järgi liikuva akna keskse piksli töötlemine vähendab mikroreljeefi müra mõju tulemustele.

2.6. Keerukuse näitajate arvutamise meetodika

Reljeefi keerukuse näitajad arvutati kasutades GIS tarkvarapaketi ArcMap 10.2 *spatial analyst* laiendusi. DEMide ruumiliste ülevaatlike kujutiste genereerimiseks kasutati ArcScene 10.2. Töös loetletud reljeefi näitajate rakendamist ArcGIS tarkvara võimaluste järgi on kirjeldatud lisa 1.

2.6.1. Samakõrgusjoonte tihedus

Samakõrgusjoonte tiheduse arvutamiseks genereeriti DEMist horisontaalid *contour* töövahendiga. Horisontaalide löikevaheks määrati 2,5 m. Leiti, et see löikevahe on optimaalne kajastamiseks suuremaid muutusi reljeefis piisavalt hästi võrdlemisi tasasel Eesti maapinnal.

Järgnevalt rakendati üldistamisvõtet, mis muutis horisontaalide kõverusi laugemaks või kaotas järsud nurgad üldse, vähendades seega mikroreljeefi müra mõju. Generaliseerimine teostati ArcGISis *simplify line* töövahendiga ning tulemuseks saadi kartograafiliselt korrektne digitaalne kõrgusmudel. Seejärel leiti uurimisalale jäävate samakõrgusjoonte summaarne pikkus (m) ja tihedus (m/ha).

2.6.2. Kallakuse standardhälve

Näitaja leidmiseks koostati mitmest töövahendist koosnev mudel, mis sisaldas DEMist kallakuse rasterkujutise loomist, eelneva tulemusest pikslite standardhälvete arvutamist ja uurimisalale keskmise tulemuse leidmist (vt lisa 4).

Kallakuse rasterkujutis leiti *slope* töövahendiga ning järgnevalt arvutati kallakuste standardhälve tulemused, kasutades 5 x 5 piksli suurust liikuvat akent. Suurema ala kaasamine pikslite töötlusesse kajastas tulemustes kaugemale jääva reljeefi üldistavat mõju. Viimaseks leiti uurimisalade keskmised väärtused, kasutades *zonal statistics* töövahendit.

2.6.3. Visuaalne hinnang

Viimase reljeefi keerukuse näitajana kasutati visuaalset hinnangut kõrgusmudeli reljeefi keerukusele ning klassifitseeriti uurimisalad viide gruppi. Vastavate reljeefi keerukuse tasemete eristamiseks töötati välja lihtne meetodika, mis lähtub uurimisaladel selgelt eristuvate pinnavormide hulgast ja ulatusest.

Tabel 2. Reljeefi keerukuse visuaalse hindamise kriteeriumid. Erinevaid tasemeid iseloomustavad näited on toodud lisas 5.

Reljeefi keerukuse tase	Uurimisala iseloomustus	Eristuvate pinnavormide hulk uurimisalal
I – tasane	Uurimisalal puuduvad täiesti või esinevad üksikud nõrgalt eristuvad pinnavormid.	Vähem kui neljandikul esinevad üldisest reljeefist eristuvad pinnavormid.
II – peamiselt tasane	Uurimisalal esinevad mõned üldisest reljeefist eristuvad pinnavormid.	Vähemalt neljandikul, kuid vähem kui poolel uurimisala pinnast esinevad üldisest reljeefist eristuvad pinnavormid.
III – kohati keerukas	Uurimisalal esineb pinnavormide tõttu ala liigestatus tasaseks ja keerukamaks.	Umbes poolel uurimisala pinnast eristuvad üldisest reljeefist erinevad pinnavormid.
IV – keerukas	Uurimisala esineb palju hajusaid pinnavorme, mis moodustavad ühtse terviku või mis jaotavad ala erineva reljeefiga osadeks.	Üle poole, kuid alla terve uurimisala on kaetud erinevate pinnavormidega.
V – väga keerukas	Uurimisalal esineb palju erinevaid pinnavorme, mis moodustavad tuntavalt keeruka koosluse.	Uurimisala on praktiliselt terves ulatuses kaetud teineteisest erinevate pinnavormidega.

2.7. Välikaardistuse kvaliteedi ja reljeefi keerukuse vaheliste seoste leidmine

Välikaardistuse vigade ja uurimisalade keerukuse vahelisi seoseid uuriti Spearmani ρ astakorrelatsioonikordaja alusel. Spearmani ρ on sobilik mitteparameetriliste seoste uurimiseks, võimaldades leida monotoonset seost ehk ühe tunnuse kasvu järgi teise tunnuse suurenemist (Remm *et al.* 2012).

Korrelatsioonikordaja leidmiseks kasutati Statistica 12 tarkvara. Usaldusväärsete korrelatsioonide tingimusteks seati p -väärtus $> 0,005$.

Esimeseks uuriti välikaardistuse vigade ja reljeefi keerukuse vahelisi seoseid arvatud keerukuse näitajaid tulemuste, samakõrgusjoonte tihedus ja kallakuste standardhälve, alusel.

Teiseks analüüsiti visuaalse hinnangu põhjal leitud klasside ja välikaardistuse vigade vahelist seost. Visuaalse hinnangu alusel leitud klasside seoste uurimiseks välikaardistusega kasutati lisaks Spearmani ρ korrelatsioonikordajale veel *point-biserial* korrelatsiooni. Viimane võimaldab Spearmani ρ tulemusi leida klassidesse jaotatud juhtumite järgi.

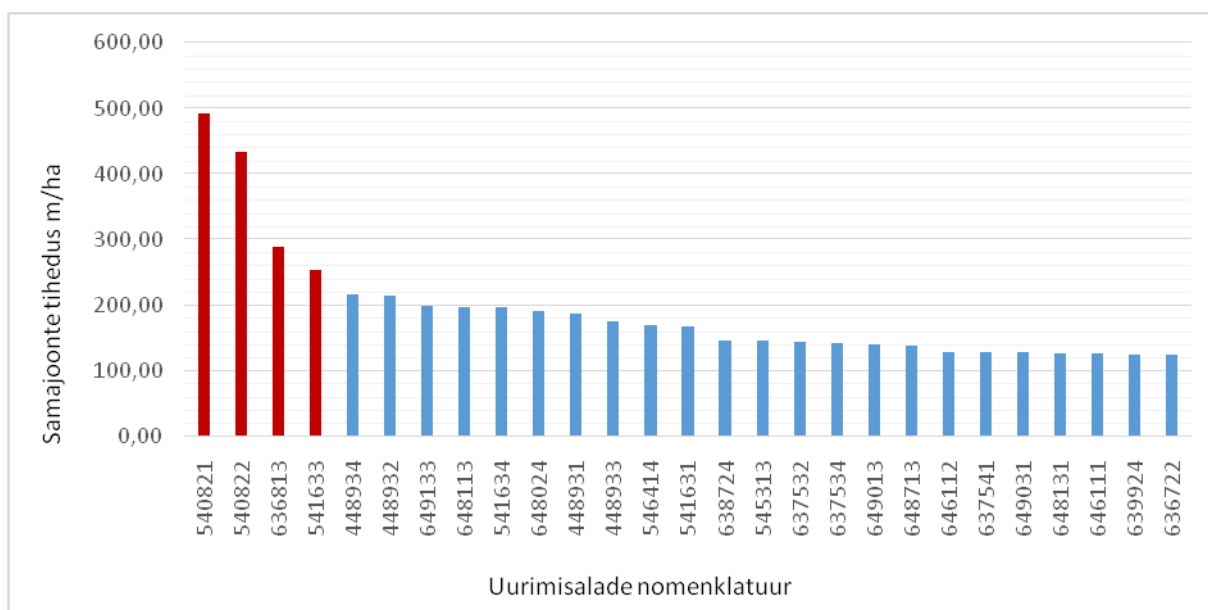
3. ANALÜÜS JA TULEMUSED

3.1. Uurimisalade reljeefi keerukus

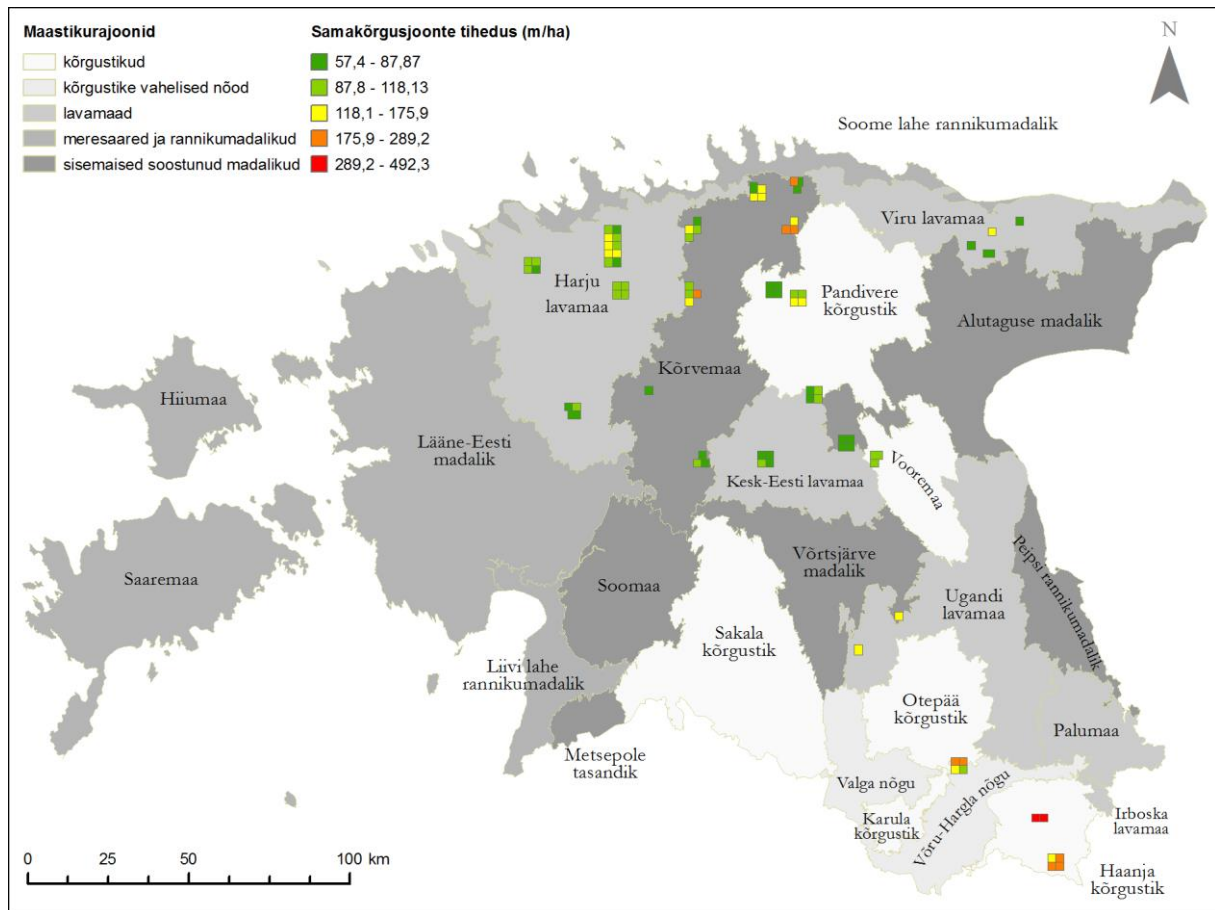
3.1.1. Samakõrgusjoonte tihedus

Uurimisalade samakõrgusjoonte keskmine tiheduse oli 122,8 m/ha. Keskmisest suurema näitajaga oli 27 uurimisala, kuid teistest märgatavalt suurema tulemusega saab eristada nelja järgmist uurimisala: 540821, 540822, 636813, 541633. Kõige väiksema näitajaga oli 639942 – 57,4 m/ha (joonis 10). Uurimistöös arvatatud reljeefi keerukuse näitajad on esitatud koondtabelis lisa 6.

Esimese kahe puhul on tegemist on kõrvuti asuvate Haanja uurimisaladega, kus esineb selgelt reljeefi keerukus väga künkliku ala puhul. Viimased näited keeruka reljeefiga aladelt kuuluvad vastavalt Kõrvemaale ning Võru-Hargla nõo ja Otepää kõrgustik piirile, kus esineb üht uurimisala tugevalt liigendav pinnavorm. Antud näited keeruka reljeefiga aladelt kattuvad ootustega, mida võiks maastikulise jaotuse järgi teha. Uurimisalade asukohad samakõrgusjoonte tiheduse näitaja alusel on toodud joonisel 11.



Joonis 10. Keskmisest suurema samajoonte tiheduse tulemusega uurimisalad järjestatuna suuremast väiksemaks. Punasega on välja toodud teistest selgelt eristunud uurimisalad.

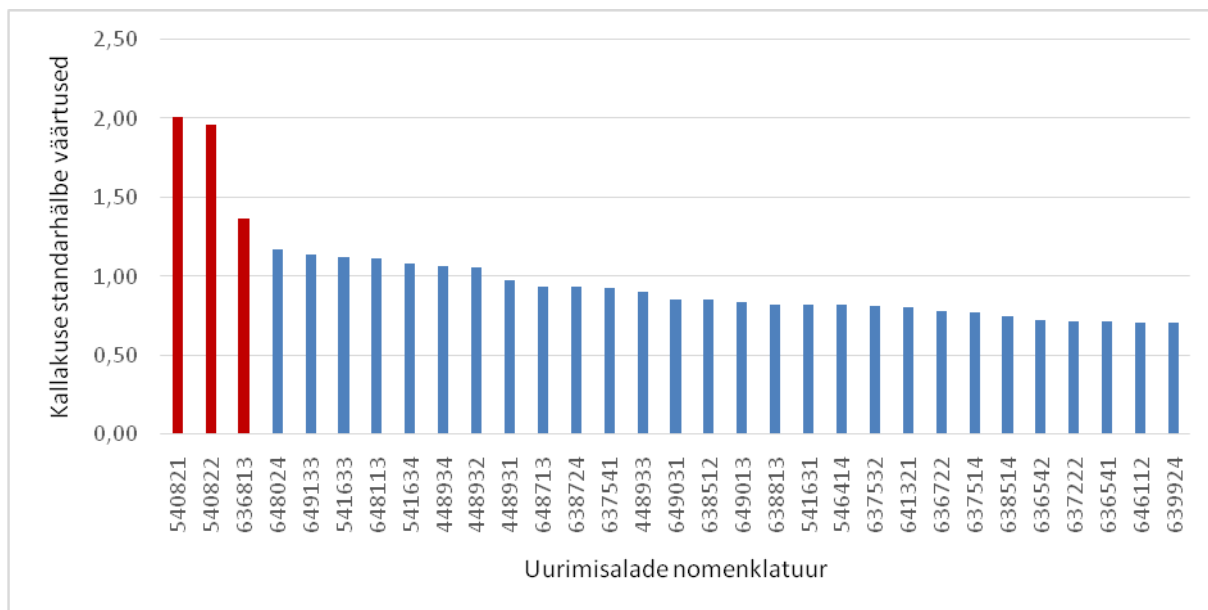


Joonis 11. Uurimisalade paiknemine samakõrgusjoonte tiheduse näitaja alusel.

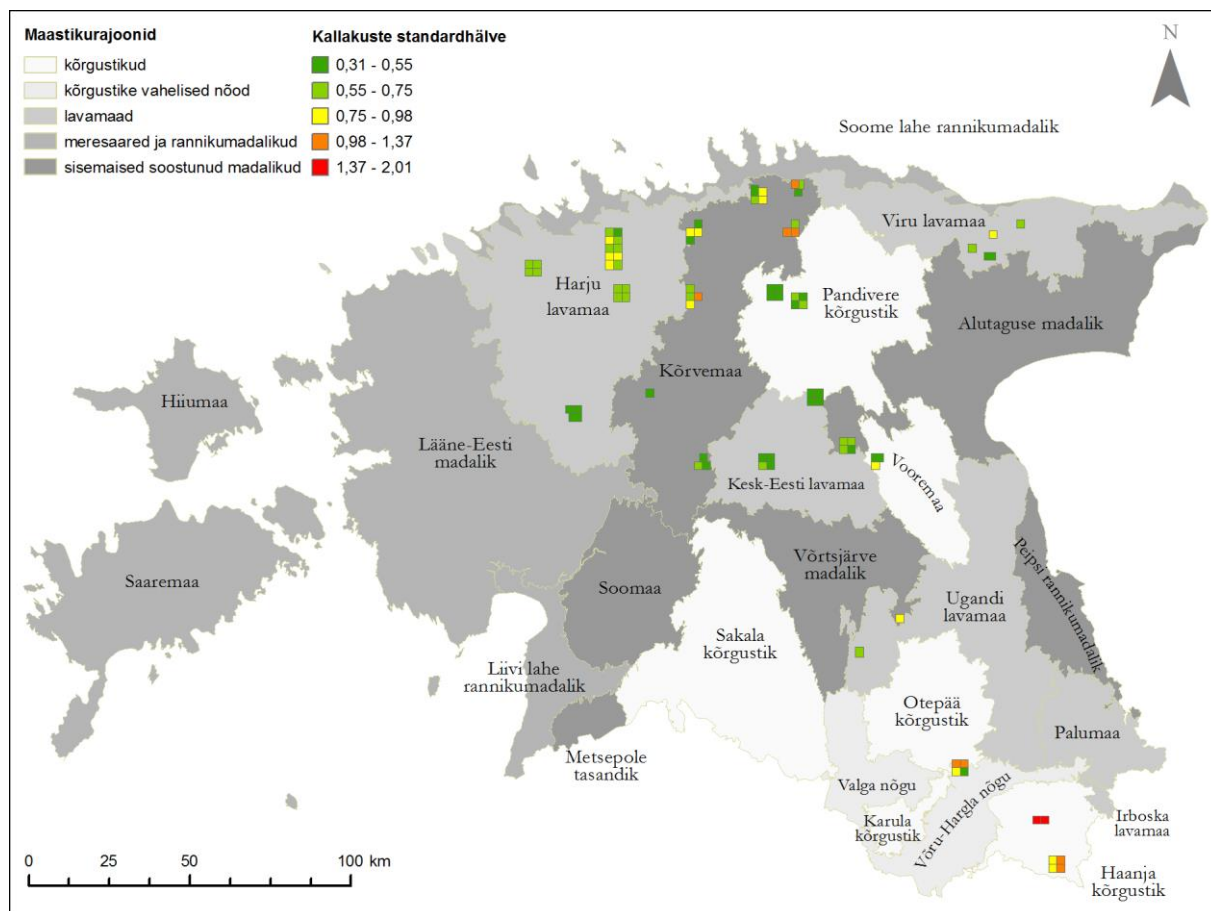
3.1.2. Kallakuse standardhälve

Kallakuste standardhälve näitaja tulemused olid üldiselt sarnased samakõrgusjoonte tiheduse näitajaga. Näitaja tulemustes kajastusid suurema reljeefi keerukusega samad uurimisalad. Näitaja keskmine tulemust oli $0,71^\circ$ ja keskmisest suurema väärtusega uurimisalad olid 31 (joonis 12). Kõige väiksema tulemus oli uurimisala 641012 väärtusega $0,31^\circ$.

Näitaja tulemustes eristusid rohkete pinnavormidega uurimisalad Haanjas 540821 ja 540822 ning 636813 Kõrvemaal. Uurimisalade asukohad kallakuse standardhälve näitaja alusel on toodud joonisel 13.



Joonis 12. Keskmisest suurema kallakuse standardhälve tulemusega järjestatuna suuremast väiksemaks. Punasega on välja toodud teistest selgelt eristunud uurimisalad.



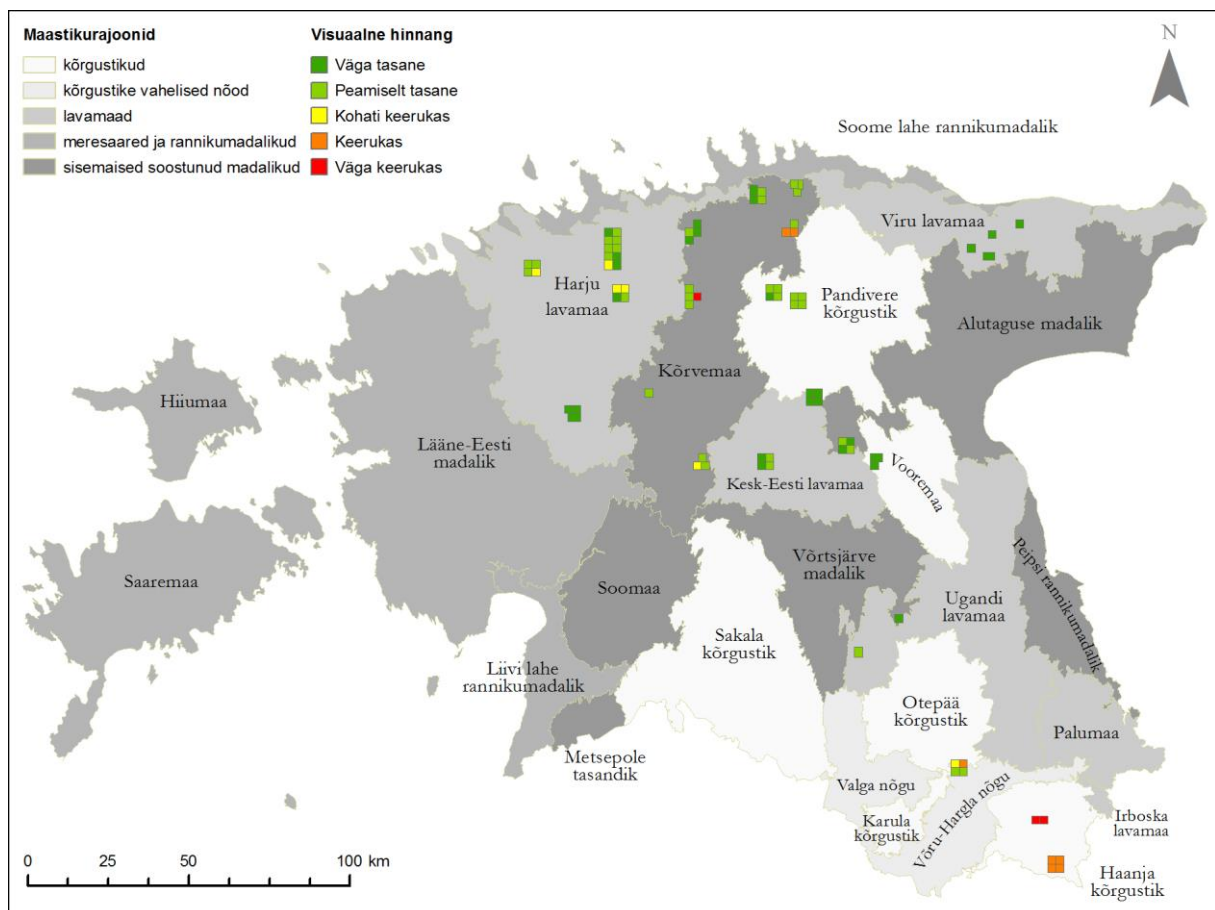
Joonis 13. Uurimisalade paiknemine kallakuse standardhälve näitaja alusel.

3.1.3. Visuaalne hinnang uurimisaladele

Visuaalse hinnangu järgi eristus kolm väga keeruka reljeefiga uurimisala. Enamik uurimisalasid jäi keerukuse tasemelt II klassi (vt tabel 3). Joonisel 14 on näha klassidesse jaotumine uurimisalade kaupa maastikurajoonide taustal.

Tabel 3. Uurimisalade jaotumine visuaalse hinnangu tulemusel.

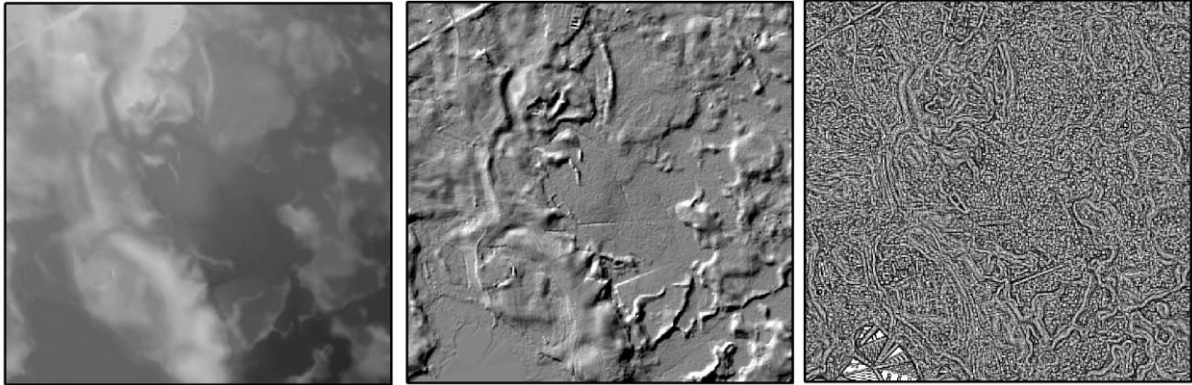
Hinnang	Uurimisalade arv
V – väga keerukas	3
IV – keerukas	7
III – kohati keerukas	6
II – peamiselt tasane	37
I – väga tasane	28



Joonis 14. Uurimisalad klassides Eesti kaardil.

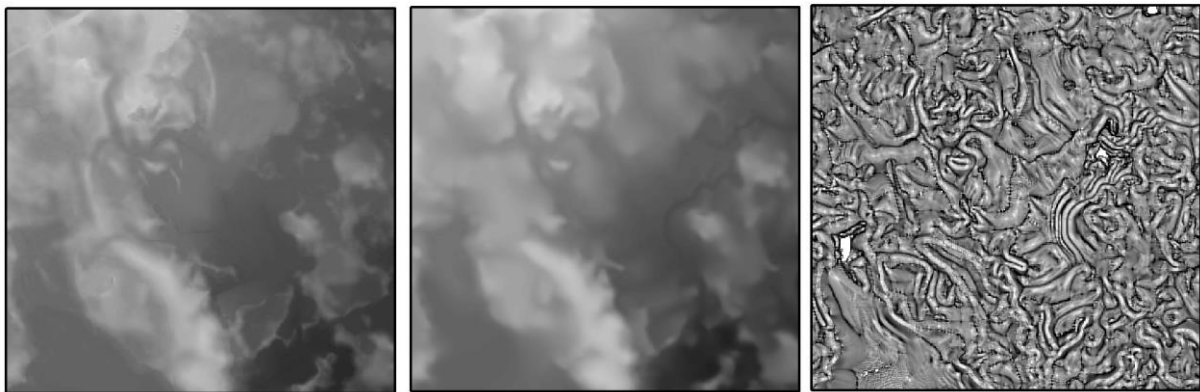
3.1.4. CTCI tulemus

Reljeefi keerukuse koondindeksi katsetuste tulemuseks algsete kõrgusandmete alusel saadi väga mürarikas rasterkujutis (joonis 15), kus ei eristu keerukama reljeefiga alad pinnavormideta tasandikest.



Joonis 15. Fragment 44893 kaardilehe kõrgusmudelist – vasakul algne DEM, keskel nõlvavarjutusega DEM ja paremal CTCI tulemus algsete andmete põhjal.

Üldistatud kõrgusmudeli põhjal leitud CTCI näitaja tulemus on oluliselt selgem, kuid mitte piisavalt arusaadav (joonis 16).

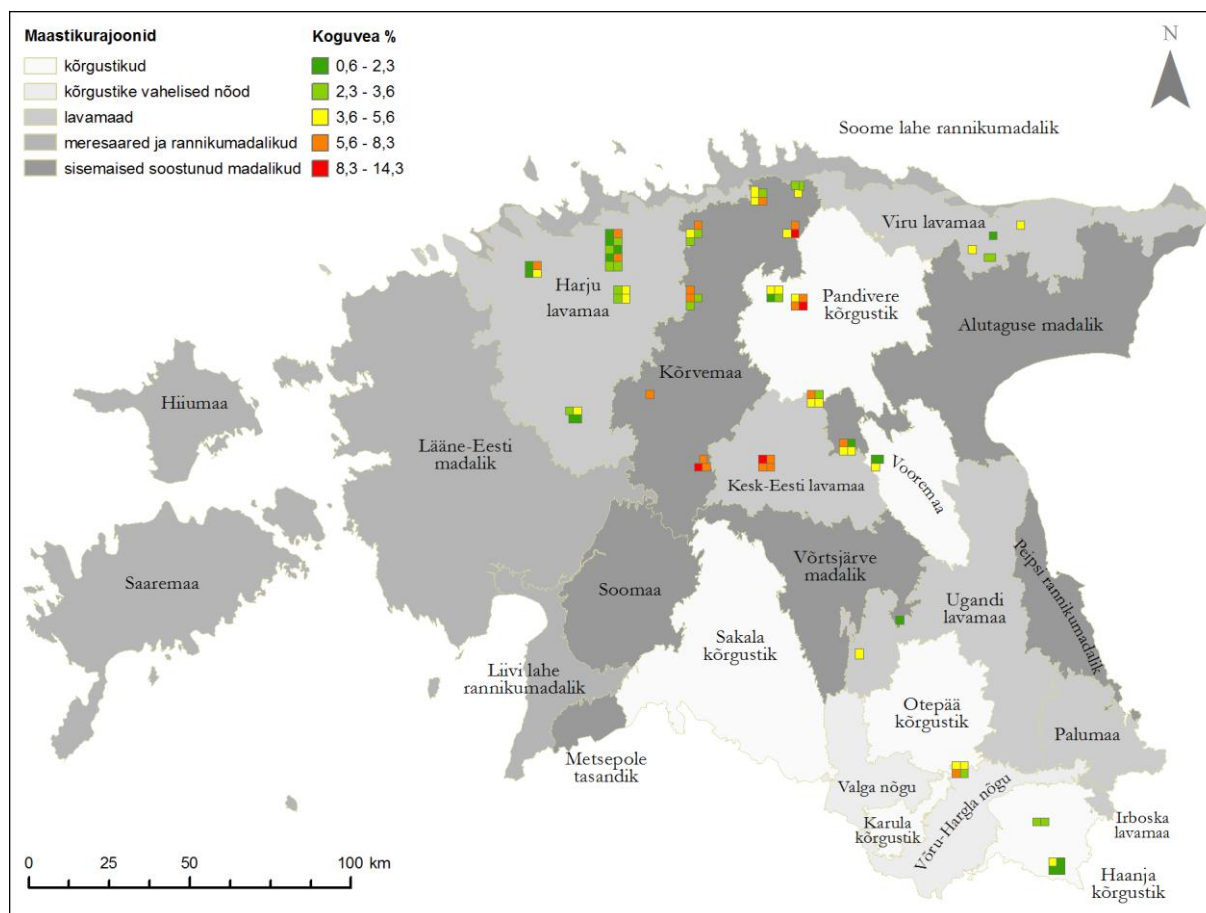


Joonis 16. Fragment 44893 kaardilehe kõrgusmudelist – vasakul algne DEM, keskel üldistatud DEM ja paremal CTCI tulemus üldistatud andmete põhjal.

3.2. Välitööde kvaliteedikontrolli näitajate analüüs

Uurimistöös on kasutatud erinevaid veatüüpe ja nende näitajaid. Vigade jaotusest ülevaate saamiseks uurimisalade vahel, on analüüsitud koguvea protsenti, mis näitab kõigi uurimisalade vigade osakaalu kõikidest esinenud objektidest. Suurima koguvea protsendiga oli uurimisala 641013, kus olid 14,3% kaardistatud objektidest vigased. Uurimisalade

keskmine koguviga oli 4,5% ning standardhälve 2,6%. Uurimisalade paiknemine koguvea protsendi alusel on toodud joonisel 17.

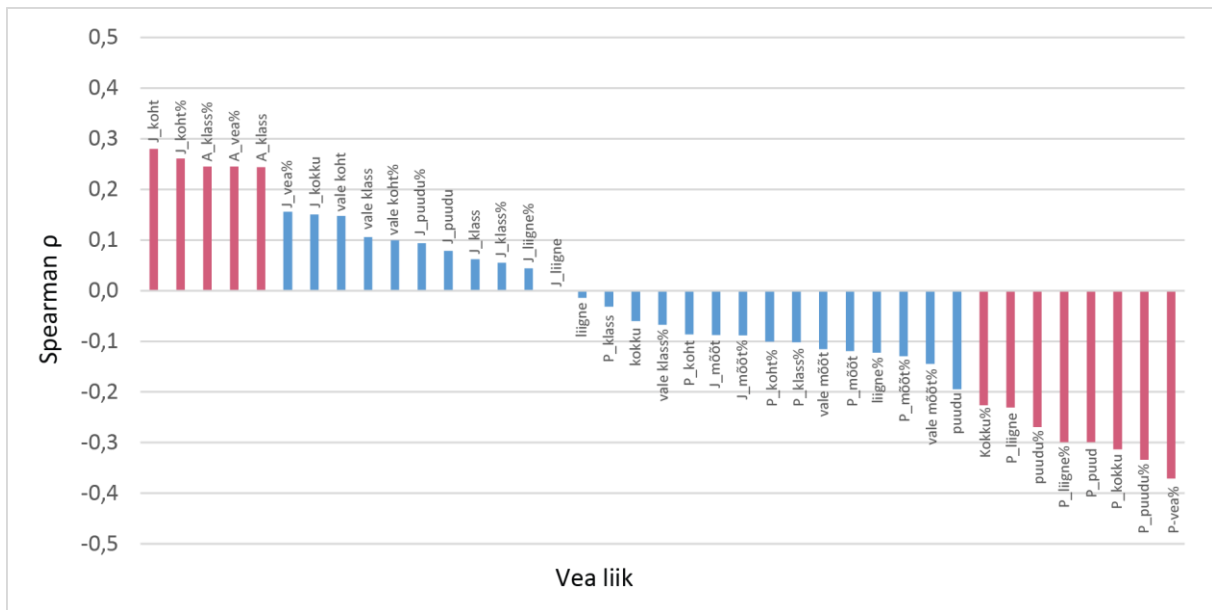


Joonis 17. Uurimisalade paiknemine koguvea alusel.

3.3. Reljeefi keerukuse ja välikaardistuse vigade vahelised seosed

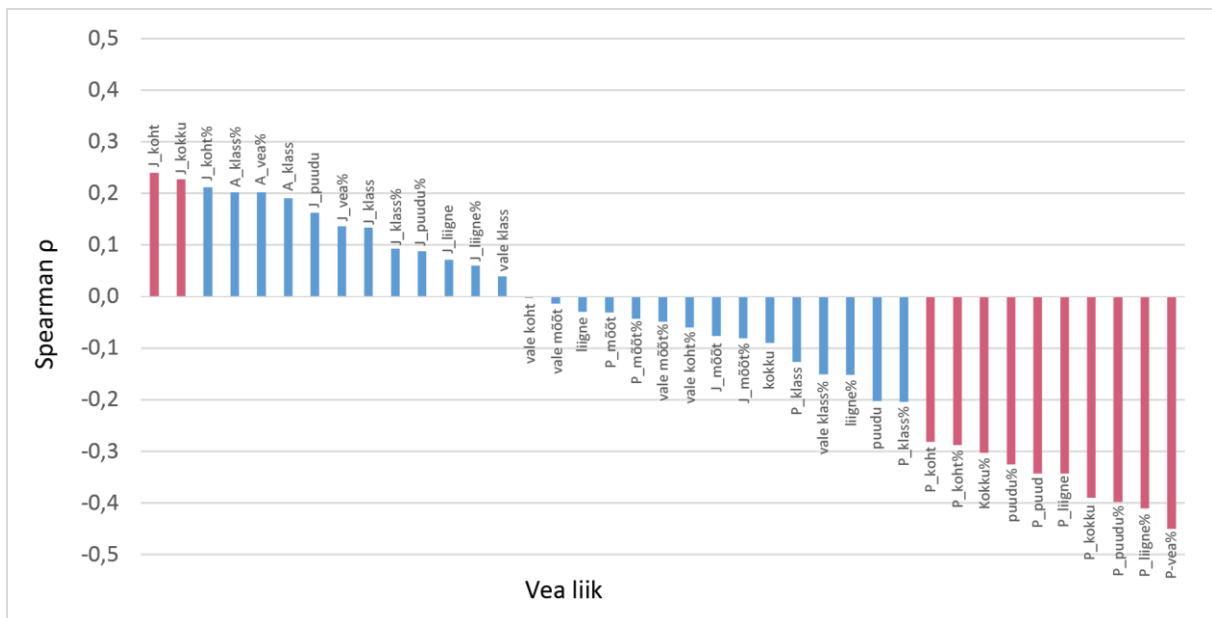
Esiteks leiti uurimisaladel välikaardistuse vigade korrelatsioon samakõrgusjoonte tihedusega. Suurim positiivne korrelatsioon välikaardistuse vigade ja reljeefi keerukuse vahel on 0,28 ning negatiivne -0,37 (joonis 18). Antud juhtudel on tegemist väga nõrkade seostega välikaardistuse vigade ja reljeefi keerukuse vahel. Lisaks võib märkida, et statistiliselt usaldusväärsete negatiivsete korrelatsioonide hulk ja ulatus on suurem kui positiivsetel.

Positiivsete korrelatsioonide puhul on tegemist reljeefi keerukuse suurenedes välikaardistuse vigade kasvuga ning negatiivsete korral vastupidise olukorraga.



Joonis 18. Välikaardistuse vigade ja samakõrgusjoonte tiheduse vahelised seosed Spearmani ρ järgi. Punasega on tähistatud statistilised olulised seosed.

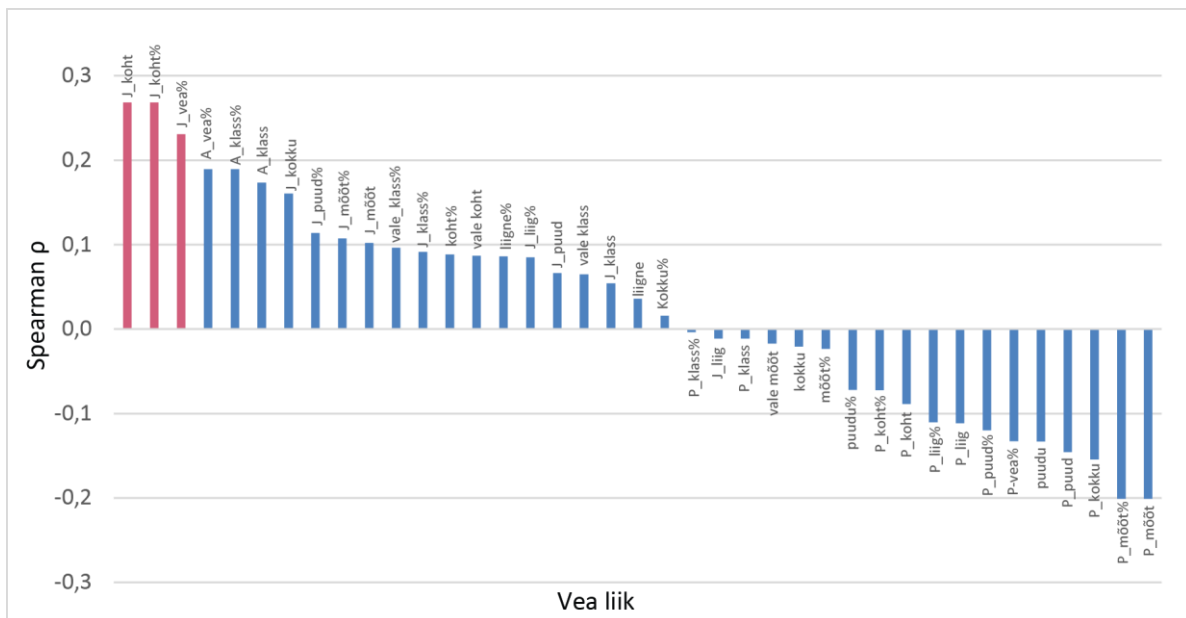
Teiseks vaadeldi kallakuse standardhälve seost välikaardistuse vigadega. Kallakuse standardhälve ja välikaardistuse vigade korrelatsioonidest ilmneb negatiivsete seoste märgatavalt suurem osakaal (joonis 19). Suurim positiivne korrelatsioon on vale asukohaga määratud joonobjektide ja reljefi keerukuse vahel (0,24), kus on tegu väga nõrga seosega.



Joonis 19. Välikaardistuse vigade ja kallakuse standardhälve vahelised seosed Spearmani ρ järgi. Punasega on tähistatud statistilised olulised seosed.

Suurimad negatiivsed korrelatsioonid on punktobjektide vigadel: koguvea protsendil (-0,45), liiasuse protsendil (-0,41) ja puudumise protsendil (-0,40). Viimasel juhul esindavad negatiivsed korrelatsioonid nõrkasid seoseid reljeefi keerukuse ja välikaardistuse vigade vahel.

Lisaks eelnevatele uuriti välikaardistuse seoseid reljeefi keerukusega ka visuaalse hinnangu tulemusena saadud klasside alusel. Korrelatsioonanalüüsi tulemustest (joonis 20) on näha, et ainukesed usaldusväärsed positiivsed seosed olid joonobjektide vale koha ja koguvea vahel. Tegemist on väga nõrkade seostega, ulatudes maksimaalselt 0,27 vale kohaga joonobjektide vigade ja reljeefi keerukuse vahel.



Joonis 20. Välikaardistuse vigade ja visuaalse reljeefi keerukuse hinnangu vahelised seosed. Punasega on tähistatud statistilised olulised seosed.

Kõikide veatüüpide ja reljeefi keerukuse vahelistest korrelatsioonidest saab esile tuua järgnevad seosed:

- **väga nõrk** positiivne seos joonobjektide vale asukoha ja reljeefi keerukuse vahel,
- **nõrgad** negatiivsed seosed punktobjektide koguvea, liiasuse ja puudumise protsendi ning mõlema reljeefi keerukusega näitaja, kuid eelkõige kallakuse standardhälve vahel.

Vigade ja reljeefi keerukuse näitajate vaheliste korrelatsioonide koondtabel on toodud lisa 7.

4. ARUTELU

4.1. Reljeefi andmete ruumiline lahusus

Reljeefi keerukuse ja välikaardistuse vaheliste seoste uurimisega võrdväärselt oluliseks osutus käesoleva uurimistöö kontekstis suure ruumilise lahutusega kõrgusandmete analüüsimise ja generaliseerimise temaatika.

Reljeefi detailseid eripärasid käsitlevates analüüsides tõstab suure ruumilise lahutusega kõrgusmodelite kasutamine analüüsi tulemuste usaldusväärsust. Mida detailsem on kõrgusmodel, seda väiksemaid pinnavorme, kuni mikroreljeefi tasandini, saadakse eristada. Teisalt, uurides reljeefi mõju välikaardistamisele on oluline jätta kõrvale mikroreljeef ja vaadata maapinda inimese vaatevälja perspektiivist ning seega rakendada teatud määral kõrgusmodelit üldistavat võtet. Sobiva metoodika valik suure ruumilise lahutusega kõrgusandmete üldistamiseks on küsimus, millele lihtsat vastust ei leidu. Põhjuseks võib olla asjaolu, et suure ruumilise lahutusega ja lausalise ulatusega kõrgusandmed on veel võrdlemisi vähe levinud.

Reljeefi keerukuse metoodikate võrdlemine tõi välja, et paljud käsitletud näitajatest iseloomustavad kõrgusmodelit ainult ühe parameetri kaudu. Reljeef aga koosneb pinnavormidest, millel on mitu parameetrit. Seega ei ole kõigi eelpool käsitletud näitajate puhul võimalik leida kompleksset reljeefi keerukuse tulemust.

Kasutatud reljeefi keerukuse näitajate tulemused olid suures osas kattuvad. Keerukamat reljeefi esindavad uurimisalad kattusid näitajate tulemusi võrreldes peaaegu täpselt. Samakõrgusjoonte tihedus ja kallakuste standardhälve sobib reljeefi keerukuse hindamiseks, kuna eksisteeris sarnasus visuaalse hinnangu tulemustega.

Uurimistöös käsitletud näitajatest eristub reljeefi keerukuse koondindeks – CTCI. Näitajale on iseloomulik metoodika, mille järgi saadakse tulemus nelja erineva normaliseeritud reljeefi näitajate aritmeetilisest keskmisest (Lu 2008). Seega on esindatud neli erinevat maapinna atribuuti. CTCI rakendamine käesolevas uurimistöös kasutatavatele LiDAR kõrgusandmetele objektiivseid tulemusi ei andud. Tulemused olid mürarikkad ega sarnanenud meetodit rakendanud autori näidetega.

Põhjuseks võib olla näitaja sobimatus toimida detailsete LiDAR kõrgusandmetega, kuna Lu (2008) näite järgi leiti indeksi tulemus samakõrgusjoontest interpoleeritud DEMist, mille

ruumiline lahutus oli 30 m. Seega moodustavad näites kasutatud andmed sisult oluliselt lihtsama kõrgusmodeli kui käesoleva uurimistöö jaoks kasutatud DEM.

Üks võimalus näitaja rakendamiseks LiDARi kõrgusmodelile oleks kasutada üldistatud DEMi interpoleerimist samakõrgusjoontest. Vastavate näidetena on toodud üldistamisvõttega DEM ja LiDARi algne DEM (joonis 16).

Suure ruumilise lahutuse ja mikroreljeefi müra mõju vähendamiseks kasutati uurimistöös järgmisi generaliseerimise võtteid: samakõrgusjoonte tiheduse puhul horisontaalide järskude nurkade silumist ning kallakuse standardhälve arvutustel 5 x 5 pikslit liikuva akna valimist.

Kasutatud generaliseerimise võtted täitsid uurimistöös eesmärgi, kuid sõltuvad otseselt reljeefi keerukuse näitajate omadustest. Seega tuleb üldistamiseks rakendada näitajate metoodikast tulenevaid võtteid. Seevastu vajab uurimist küsimus, kuidas üldistada kõrgusmodelit ühtselt ja analüüsi või näitajate metoodikatest sõltumatult ja tagades reljeefi olulisemate komponentide säilimist?

Vastuse viimasele küsimusele võib anda üldistatud mudeli loomine algetest kõrgusandmetest interpoleeritud samakõrgusjoonte järgi. DEMist interpoleeritud samakõrgusjooned jaotavad kõrgusmodeli näiliselt teatud lõikevahedega osadeks, mille vahel puudub müra tekitavaid andmed. Põhjuseks on samakõrgusjoonte omadus mööda horisontaali kujutada rohkem infot kui risti (Hutchinson, Gallant 2000). Generaliseerimise mõju ja ulatust on selles protsessis võimalik kontrollida samakõrgusjoonte lõikevahe muutmise ja horisontaalide kõveruste silumise teel. Üldistamisvõtte tulemuseks oleks seega piisavalt objektiivne kõrgusmodel, kus on vähendatud mikroreljeefi mõju.

4.2. Reljeefi keerukuse ja välikaardistuse vigade vahelised seosed

Uurimistöö korrelatsioonanalüüsi tulemustel ei leitud märkimisväärseid seoseid välikaardistuse kvaliteedinäitajate ja reljeefi keerukuse vahel. Kõige suurem positiivne seos oli väga nõrk korrelatsioon, kajastades vale asukohaga märgitud joonobjektide sagedasemat esinemist keerukama reljeefiga aladel.

Vastupidiselt hüpoteesile leiti nõrk negatiivne seos punktobjektide täielikkuse ja reljeefi keerukuse vahel. Samuti on sarnase iseloomuga negatiivse seose leidnud Spuul (2011) kaardilehe keerukuse ja välikaardistamise vigade vahel. Leitud seos viitab välikaardistusel tekkivate punktobjektide liiasuse ja puudumise vigade väiksemale hulgale reljeefi keerukuse

suurenedes. Põhjuseks võib olla välikaardistaja oskustest tulenevalt suurem tähelepanulikkus keerukama reljeefiga aladel tegutsedes, sest kaardistusala on pinnamoelt heterogeensem ja seetõttu raskem mõista. Olukorras, kus kaardistusülesanne on raskem, pingutab välikaardistaja rohkem. Võib oletada, et keerukama reljeefiga ala, kus on palju korrapäratuma kujuga vaatevälja täitvaid pinnavorme, kaardistamine nõuab rohkem tähelepanu ja seega ka aega, kuid tehtud töö kvaliteet on parem. Välikaardistuse vigade hulk lihtsamatel kaardistusaladel võib olla põhjustatud välikaardistaja subjektiivsetest ja intuiivsetest otsustest kontrollida teatud hulka kaardistatavaid objekte suurema tähelepanuga kui teisi. Põhjenduseks on asjaolu, et lihtsama reljeefiga aladel on osa objekte paremini nähtavad kui teised, põhjustades seega vale arusaama uurimisalast tervikuna. Samuti võib distantsilt kaardistamisel eksida kergemini objektide klassifitseerimises. Oletuste kontrolliks tuleks teha veel täiendavaid uuringuid, näiteks andmete olemasolu korral uurida välikaardistusele kuuluva aja ja tulemuse suhet erineva reljeefi keerukusega uurimisaladel.

Lisaks võib välikaardistuse vigasid põhjustada ka kaardistusala kasutusiseloome, mis võib sõltuda reljeefi keerukusest. Lihtsama reljeefiga alad võivad olla intensiivsemalt kasutatud, sest nende ümberkujundamine inimtegevuseks on kergem. Lihtsama reljeefiga alad võivad olla sagedamini põllustatud või mingi muu eesmärgi jaoks lagedaks muudetud ning kaardistusülesanne on seega näiliselt lihtsam. Keerukama reljeefiga alad on inimeste poolt passiivsemalt kasutatud ning seetõttu on enamasti metsasemad. Keeruka reljeefiga metsase ala kaardistamine on raskem ülesanne kui lagedate või pinnamoelt homogeensete alade korral. Viimase põhjenduse kontrolliks tuleks lisaks uurida, kas keerukama reljeefiga alade maakasutus on erinev pinnamoelt lihtsamatest aladest.

Käesoleva töö korrelatsioonanalüüsis leiti vaid nõrgad seosed, mis võivad esindada juhuslikkust või muid kvaliteeti mõjutavaid tegureid, näiteks välikaardistajate professionaalsust. Seega ei saa käesoleva töö näitel öelda, et välikaardistajad teevad keerukama reljeefiga aladel rohkem vigu, kui tasasel alal.

KOKKUVÕTE

Globaalsed arengud ruumiandmete kogumise ja haldamise meetodikates on muutnud Eesti põhikaardi tootmist. Tegeletud on tootmisprotsessi optimeerimisega ning arendamisega digitaalsete ja automatiseeritud kaardistamise meetodite suunas. Samuti on pidevat täiustatud Eesti ruumiandmete haldamist ja järgitud kvaliteedistandardite nõudeid. Lisaks on oluliselt vähendatud välitööde mahtu ja ressursse, millest tulenevat on tähtsamaks muutunud välikontrolli efektiivsuse tõstmine. Viimasest tulenevalt oli käesoleva töö eesmärgiks analüüsida, kas reljeefi keerukus mõjutab välikaardistamise sisulist kvaliteeti.

Suure ruumilise lahutusega kõrgusandmete analüüsimine on ressursi - ja ajamahukas töö, mille objektiivne tulemus sõltub sageli sobiva meetodika kasutamisest. Reljeefi iseloomustava analüüsi objektiivse tulemuse saamiseks on oluline hinnata ka näitajate sobivust vastavalt kõrgusandmete kujule ja detailsusele. Levinud on mitmed reljeefi iseloomustavad näitajad, mis pärinevad erinevatest teadusvaldkondadest, olles tavaliselt korraga orienteeritud vaid ühe maapinna atribuudi esindamisele.

Uurimistööks kasutatud LiDAR-tehnoloogiaga toodetud DEMide suur ruumiline lahusus (5m) lisas kindlust, et kõrgusandmed kajastavad maastikul esinevat reljeefi võimalikult objektiivselt. Siiski esines detailsel kõrgusmudelil maapinna mikrovorme, mis sugugi ei olnud analüüsile vajalikud ja põhjustasid näitajate tulemustes vaid müra. Analüüsi eesmärgist lähtuvalt hinnati reljeefi keerukuse mõju välikaardistamise kvaliteedile inimese vaatevälja perspektiivist, mis tekitas vastuolu tööks kasutatavate kõrgusandmete detailsuse suhtes ning seetõttu pöörati uurimistöös tähelepanu ka kõrgusandmete generaliseerimise küsimusele.

Töö reljeefi modelleerimise osaks oli 81 uurimisalale reljeefi keerukuse väärtuste leidmine. See ülesanne oli aeganõudev protsess, mis hõlmas näitajate võrdlemist, katsetamist ja valitud parameetrite rakendamist arvutusprotsessi kõigi uurimisalade kohta.

Uurimistöö aluseks oli hüpotees, mille kohaselt reljeefi keerukuse suurenedes kasvab nendes kohtades ka välikaardistuse vigade hulk ja seega langeb kaardistamise kvaliteet. Erinevalt püstitatud hüpoteesist ei leitud korrelatsioonanalüüsi tulemustena positiivseid seoseid suurema reljeefi keerukuse alade ja välikaardistuse vigade hulga kasvu vahel. Analüüsi tulemustest paistis välja vaid nõrk seos vigade hulga vähenemise ja reljeefi keerukuse suurenemise vahel. Leitud seose alusel ei saa püstitatud hüpoteesi ümber lükata ja väita, et keeruka reljeefiga aladel oleks välikaardistamise kvaliteet parem.

Välikaardistuse kvaliteedi ja reljeefi keerukuse vaheliste seoste edasist uurimist tuleks teha tuginedes rohkem vigade paiknemisele maastikul. Samuti võiks reljeefi keerukuse arvutustes kaaluda koondnäitajate kasutamist, mis käesolevasse töösse suure mahu tõttu ei sobinud.

SUMMARY

The Influence of Terrain Complexity on Estonian Basic Map Quality

Estonian basic map appears to be an important representation of local spatial data, which aims to provide routinely used information about infrastructure, communication networks, settlement, hydrography, surface form, land usage and toponyms.

Continuous development in methodology of collecting and managing spatial data has changed the way Estonian basic map is currently produced. The optimizing and developing of the production process by using digital solutions and automated technologies for mapping is currently being dealt with. The management of Estonian spatial data has continuously been improved in accordance with international quality standards. In addition to, the amount of field mapping and resources has been substantially decreased consequently leading to the importance of raising the efficiency of the selective field inspection.

Deriving from the latter, the current thesis intends to analyse whether the terrain complexity affects the quality of field mapping or not. The basis of the research is formed by the hypothesis, according to which by increasing the terrain complexity the amount of mapping errors is growing as well, causing the reduction of mapping quality.

Using high resolution LiDAR altitude models for terrain analysis is time and resource consuming task, which results depend often on methods used. The way to achieve objective results of terrain characteristic analysis depends on the assessment of matching the used terrain indices and methods according to the nature of surface data. There are numerous terrain characteristic methods, which originate from different fields of nature sciences, though most of them represent only one surface parameter at time.

The present study focused to find the model value parameters of terrain complexity for 81 study areas in Estonia. Modelling terrain complexity and roughness was time consuming task, which consisted of evaluation, testing and application of chosen indices in raster calculation process. Three complexity indices were chosen for further analysis: contour density, standard deviation of slope and visual evaluation/rating of DEM complexity. Complexity results of all study areas represented only a few cases of high surface heterogeneity. Most of the terrain complexity results did not vary according to different calculation methods.

On the contrary to set hypothesis, there was no positive correlation found between areas of higher terrain complexity and greater amount of mapping errors. The results indicated only a

slight negative correlation existing between the increase of complexity and the decrease of mapping errors. The correlation was still too weak to disprove set hypothesis and claim that mapping in areas of higher terrain complexity represents higher spatial data quality. Further research in particular field should be carried out in more detailed scale to examine mapping error in high terrain complexity situations. As well using the compound terrain complexity indices (not being used in current thesis) should be considered while calculating the terrain complexities.

TÄNUAVALDUSED

Töö autor on tänulik järgmistele inimestele: juhendajatele Raivo Aunapile ja Kiira Mõisjale; Tõnu Ojale, kes võimaldas kasutada LiDARi andmeid; Aira Meitusele ingliskeelse keelekorrektuuri eest. Lisaks tänab autor lähedasi ja sõpru, kes olid suureks toeks käesoleva töö valmimisel.

Täna Teid!

KASUTATUD KIRJANDUS

- Bernard, D., Amable, G. (2009). Airborne LiDAR: instrumentation, data acquisition and handling. In Heritage, G., Large, A. (Ed.), *Laser Scanning for the Environmental Sciences*. John Wiley & Sons, 49-66.
- Blaszczynski, J. S. (1997). Landform characterization with geographic information systems. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, vol. 63(2), 183-191.
- Cavalli, M., Tarolli, P., Marchi, L., Fontana, G. D. (2008). The effectiveness of airborne LiDAR data in the recognition of channel-bed morphology. *Catena*, vol. 73(3), 249-260.
- Deng, Y. (2007). New trends in digital terrain analysis: landform definition, representation, and classification. *Progress in Physical Geography*, vol. 31(4), 405-419.
- Devillers, R., Bedard, Y., Fisher, P., Stein, A., Chrisman, N., Shi, W. (2010). Thirty years of research on spatial data quality: achievements, failures, and opportunities. *Transactions in GIS*, vol. 14(4), 387-400.
- Florinsky, I. V. (1998). Accuracy of local topographic variables derived from digital elevation models. *Geographical Information Science*, vol. 12(1), 47-61.
- Frankel, K. L., Dolan, J. F. (2007). Characterizing arid region alluvial fan surface roughness with airborne laser swath mapping digital topographic data. *Journal of Geophysical Research*, vol 112(2), 1-14.
- Gao, J. (1998). Impact of sampling intervals on the reliability of topographic variables mapped from grid DEMs at a micro-scale. *International Journal of Geographical Information Science*, vol. 12(8), 875-890.
- Glenn, N. F., Thackray, G. D. (2006). Analysis of LiDAR-derived topographic information for characterizing and differentiating landslide morphology and activity. *Geomorphology*, vol. 72, 131-148.
- Grohmann, C. H., Smith, J. M., Riccomini, C. (2011). Multiscale analysis of topographic surface roughness in the Midland Valley, Scotland. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, vol. 49(4), 1200-1213.

- Hani, A. F. M., Dinesh, S., Vijanth, S. A. (2012). Computing surface roughness of individual cells of digital elevation models via multiscale analysis. *Computers & Geosciences*, vol. 43, 136-146.
- Heritage, G., Large, A. (2009). Laser scanning - evolution of the discipline. In Heritage, G., Large, A. (Ed.), *Laser Scanning for the Environmental Sciences*. John Wiley & Sons, 1-20.
- Hobson, R. (1972). Surface roughness in topography: a quantitative approach. In Chorley, R. J. (Ed.), *Spatial Analysis in Geomorphology*, Methuen & Co., London, 221-245.
- Hutchinson, M. F., Gallant, J. C., (2000). Digital elevation models and representation of terrain shape. In Wilson, J. P., Gallant, J. C. (Ed.), *Terrain Analysis: Principles and Applications*, John Wiley & Sons, 29-50.
- Imhof, E. (1982). *Cartographic Relief Presentation*, Walter de Gruyter & Co., Berlin.
- Li, Z., Zhu, Q., Gold, C. (2005). *Digital Terrain Modelling: Principles and Methodology*, CRC Press.
- Lu, H. (2008). Modelling terrain complexity. In Zhou, Q., Lees, B., Tang, G. (Ed.), *Advances in Digital Terrain Analysis, Lecture Notes in Geoinformation and Cartography*, 159-176.
- Luo, W., Stepinski, T. F. (2011). Flow-length difference as a measure of topographic roughness/incision. In Hengl, T., Evans, I. S., Wilson, J. P., Gould, M. (Ed.), *Geomorphometry 2011*, 75-78.
- McKean, J., Roering, J. (2004). Objective landslide detection and surface morphology mapping using high-resolution airborne laser altimetry. *Geomorphology*, vol. 57, 331-351.
- Moore, D. L., Davey, S. (1991). A new method for predicting vegetation distributions using decision tree analysis in a geographic information system. *Environmental Management*, vol. 15(1), 59-71.
- Moore, I. D., Grayson, R. B., Ladson, A. R. (1991). Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications. *Hydrological Processes*, vol. 5(1), 3-30.

- Mõisja, K. (2004). Eesti põhikaardi kvaliteedijuhtimine. *Geodeet*, nr. 28(52), 10-14.
- Mõisja, K., Pauts, L. (2005). Nähtuste kaardistamisest Eesti põhikaardil. *Geodeet*, nr. 30(54), 12-17.
- Porres, D. L., Pardo, P. J. (2002). Comparison between the different curvature models of terrain for determining the degree of soil humidity. In Sobrino, J. A. (Ed.), *Recent Advances in Quantitative Remote Sensing*, Universitat de Valencia, 238-245.
- Remm, K., Remm, J., Kaasik, A. (2012). *Ruumiliste loodusandmete statistiline analüüs*. Tartu Ülikooli Ökoloogia ja Maateaduste Instituut, Tartu.
- Riley, S. J., DeGloria, S. D., Elliot, R. (1999). A terrain ruggedness index that quantifies topographic heterogeneity. *Intermountain Journal of Sciences*, vol 5(1-4), 23-27.
- Sappington, J. M., Longshore, K. M., Thompson, D. B. (2007). Quantifying landscape ruggedness for animal habitat analysis: a case study using desert bighorn sheep in the Mojave Desert. *Journal of Wildlife Management*, vol. 71(5), 1419-1426.
- Wang, F., Huang, Q. (2007). A methodology for definition and usage of spatial data quality rules. *Proceedings of SPIE. Geoinformatics 2007: Geospatial Information Science*, vol. 6753, 1-12.
- Wilson, J. P. (2012). Digital terrain modelling. *Geomorphology*, vol. 137, 107-121.
- Wilson, J. P., Gallant, J. C. (2000). *Terrain Analysis: Principles and Application*. John Wiley & Sons.

Käsitajalised materjalid

- Gauk, M. (2008). Eesti põhikaardi täielikkuse ja temaatilise õigsuse muutmine nelja kaardilehe näitel. Tartu Ülikooli Geograafia osakond, Tartu. [bakalaureusetöö]
- Hengl, T., Gruber, S., Shrestha, D. P. (2003). Digital terrain analysis in ILWIS. International Institute for Geo-information Science and Earth Observation (ITC), Enschede. [lecture notes]
- Hirv, E. (2013). Topograafilistel kaartidel kajastatud reljeef LiDARi andmestiku võrdluses. Tartu Ülikooli Geograafia osakond, Tartu. [magistritöö]

Spuul, G. (2011). Kaardilehtede keerukuse ja põhikaardi välikaardistuse kvaliteedinäitajate omavaheline seos Eesti põhikaardi 1:10 000 näitel. Tartu Ülikooli Geograafia osakond, Tartu. [magistritöö]

Internetiallikad

ArcGIS. (2014). How Filter works.

http://help.arcgis.com/en/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#/How_Filter_works/009z000000r5000000/ [28.03.2014]

Jenness, J. (2013). DEM surface tools. http://www.jennessent.com/arcgis/surface_area.htm [24.03.2014]

Jenness, J. (2013). Manual: DEM surface tools for ArcGIS.

http://www.jennessent.com/downloads/DEM%20Surface%20Tools%20for%20ArcGIS_A4.pdf [13.05.2014]

Maa-amet. (2013). Põhikaardistuse ajalugu. <http://geoportaal.maaamet.ee/est/Andmed-ja-kaardid/Topograafilised-andmed/Eesti-Pohikaart-110-000/Pohikaardistuse-ajalugu-p113.html> [10.03.2014]

Maa-amet. (2013). Kaardilehtede süsteemid. <http://geoportaal.maaamet.ee/est/Andmed-ja-kaardid/Koordinaatsüsteemid-ja-kaardilehtede-jaotused/Kaardilehtede-susteemid-p224.html> [10.03.2013]

Maa-amet. (2014). Eesti Põhikaart. <http://geoportaal.maaamet.ee/est/Andmed-ja-kaardid/Topograafilised-andmed/Eesti-Pohikaart-110-000-p30.html> [10.03.2014]

Maa-amet. (2014). Eesti Põhikaart 1:10 000. <http://geoportaal.maaamet.ee/est/Andmed-ja-kaardid/Topograafilised-andmed/Eesti-Pohikaart-110-000-p30.html> [11.05.2014]

Maa-amet. (2014). Kõrgusandmed. <http://geoportaal.maaamet.ee/est/Andmed-ja-kaardid/Topograafilised-andmed/Korgusandmed-p114.html> [10.03.2014]

LISAD

Lisade nimistu

Lisa 1. Erinevate reljeefi keerukuse ja kareduse näitajate leidmine ArcGIS tarkvaraga.

Lisa 2. Uurimisalade jagunemine maastikurjaoonide järgi.

Lisa 3. Veatüübid ning nende näitajad.

Lisa 4. Kallakuste standardhälbe leidmise mudel ArcGIS tarkvaraga.

Lisa 5. Reljeefi keerukuse visuaalse hinnangu tasemete näited.

Lisa 6. Reljeefi keerukuse näitajate tulemuste koondtabel.

Lisa 7. Vigade ja reljeefi keerukuse näitajate vahelised korrelatsioonide koondtabel.

Lisa 1. Erinevate reljeefi keerukuse ja kareduse näitajate leidmine ArcGIS tarkvaraga.

Näitaja nimetus:	Näitajate leidmise võtted ArcGIS tarkvaras:
Reljeefi kõrgusväärtuste standardhälve (ingl k <i>standard deviation of elevation</i>)	Standardhälve leidmiseks rasterkujutisest on võimalik kasutada <i>spatial analyst</i> laienduse töövahendit <i>focal statistics</i> . Töövahendi parameetri tüübiks peab olema märgitud standardhälve (STD). Lisaks on töövahendi parameetrina valitav ka liikuva akna suurus, mis vaikimisi on 3 x 3 pikslit. Võimalik on leida standardhälve väärtused ka eelnevalt defineeritud tsoonide kaupa sarnaste töövahenditega <i>zonal statistics</i> ja <i>zonal statistics as table</i> . Viimane leiab tsooni üldistavat väärtust.
Kallakuse standardhälve (ingl k <i>standard deviation of elevation</i> või <i>local standard deviation</i>)	Kallakus arvutamiseks on kasutatav <i>spatial analyst</i> laienduse <i>slope</i> töövahend. Piksli kallakuse väärtuseks on suurim naabruskonnas esinev kaldenurk. Olenevalt töövahendi valikust on kaldenurka võimalik leida, kas kraadides või protsentides. Järgnevalt leitakse standardhälve väärtused <i>focal statistics</i> või tsoonide kaupa <i>zonal statistics</i> töövahendiga. Sarnaselt eelmisele näitajale tuleb valida arvutuse tüübiks standardhälve ja liikuva akna suurus.
Topograafiline jääkpind (ingl k <i>residual topography</i>)	Topograafilise jääkpinna arvutamiseks algsest DEMist keskmistatud väärtustega rasterkujutis. Keskmistatud rasterkujutis luuakse <i>focal statistics</i> töövahendiga. Parameetriks tuleb valida MEAN, mis muudab liikuva akna kesket pikslit naabruskonna keskmiseks väärtuseks. Järgnevalt leitakse originaal DEMi ja keskmistatud rasterkujutise vahe töövahendiga <i>raster calculator</i> .

Järg lisale 1.

<p>Vektorite kareduse määr VRM (ingl k <i>vector ruggedness measure</i>)</p>	<p>Vektorite kareduse määra leidmiseks on võimalik kasutada samanimelist ArcGIS laiendust, mis on kättesaadav tarkvara tugikeskkonnas. Keerukuse näitaja arvutamisel leitakse vektorite hajuvust määratud suurusega naabruskonnas. Tulemuseks saab olla keerukuse määr 0 – 1.</p>
<p>Samakõrgusjoonte tihedus (ingl k <i>contour density</i>)</p>	<p>Samakõrgusjoonte tiheduse leidmiseks tuleb DEMist genereerida horisontaalid <i>contour</i> töövahendiga. Horisontaalide leidmisel on parameetrimina võimalik valida lõikevahe laiust. Saadud horisontaale saab vajadusel generaliseerida <i>simplify</i> või <i>smooth</i> töövahenditega. Näitaja teiseks osaks on horisontaalide tiheduse arvutamine. Vastavalt valikule saab tihedust leida, kas rasterkujutisena, kasutades <i>line density</i> töövahendit või uurimisala üldiselt. Viimase korral on vajalik arvutada horisontaalide kihi atribuutide tabelis samakõrgusjoonte pikkused. Järmiseks leitakse kõigi samakõrgusjoonte summaarne pikkus kasutades <i>summary statistics</i> töövahendi.</p>
<p>Kõverused (ingl k <i>curvatures</i>)</p>	<p>Kõveruste rasterkujutise leidmiseks saab kasutada <i>curvature</i> töövahendit.</p> <p>Lisaks on võimalik kõveruste leidmiseks kasutada ArcGISi kõrvalist laiendust DEM Surface Tools, kus on leitav suurem hulk kõverusi.</p>
<p>Pindalade suhe (ingl k <i>area ratio</i> või <i>area rugosity</i>)</p>	<p>Näitaja leidmiseks kasutatakse ArcGIS laienduse DEM Surface Tools samanimelist töövahendit.</p>

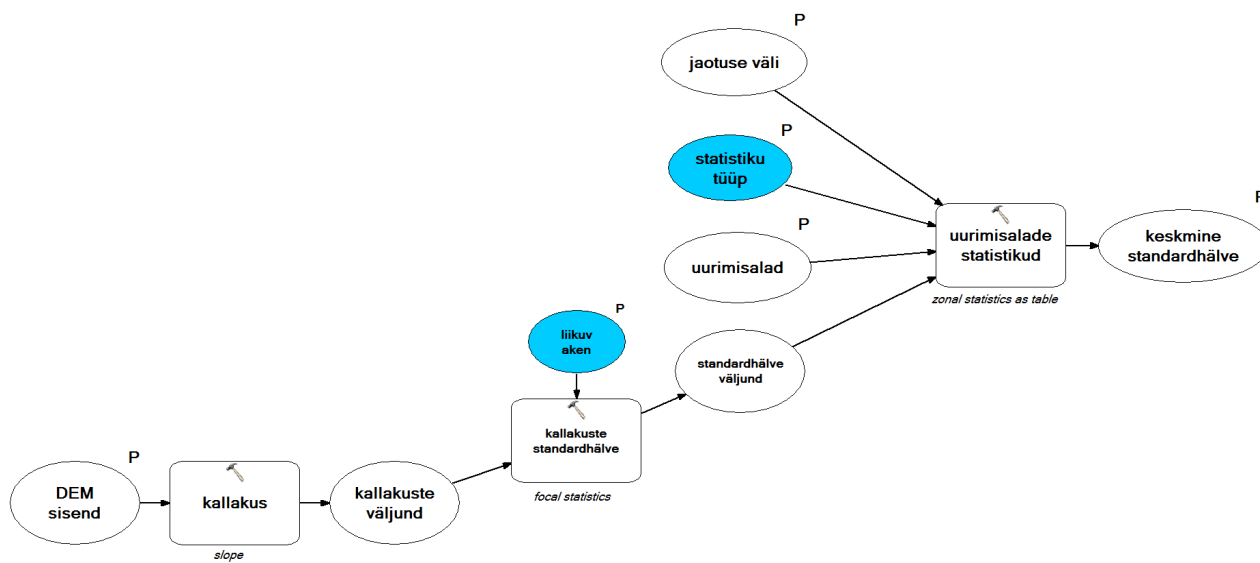
Lisa 2. Uurimisalade jagunemine maastikurjaoonide järgi.

Maastikurajooni nimetus	Uurimisalade arv	EPK 1:10 000 kaardilehe number
Haanja kõrgustik	6	44893, 54082, 54163
Võru Hargla nõgu	2	54163
Otepää kõrgustik	2	54163
Ugandi Lavamaa	1	54531
Võrtsjärve madalik	1	54641
Vooremaa	2	64132
Kesk-Eesti lavamaa	8	64101, 64124, 64312
Alutaguse madalik	2	64124
Viru Lavamaa	4	64764, 64773, 64871, 64883
Pandivere kõrgustik	10	64312, 64611, 64601, 64604
Kõrvemaa	21	63181, 63362, 63672, 63681, 63674, 63872, 63881, 63883, 64802, 64811, 64813, 63992, 64901, 63994, 64903, 64913,
Harju Lavamaa	22	63243, 63722, 63731, 63652, 63654, 63751, 63752, 63753, 63754, 63753, 63754, 63851, 63852, 63851, 63852
KOKKU	81	

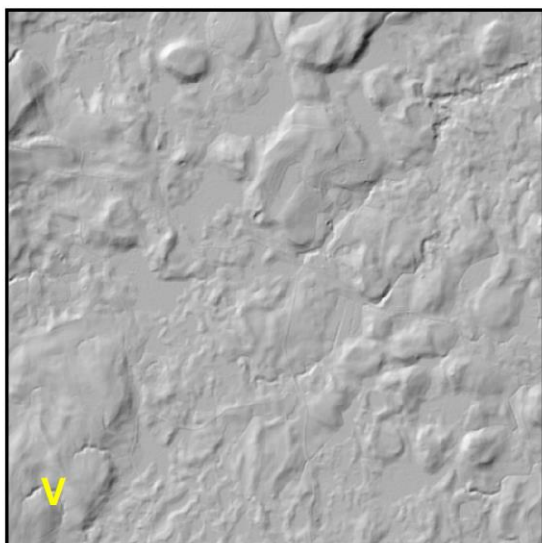
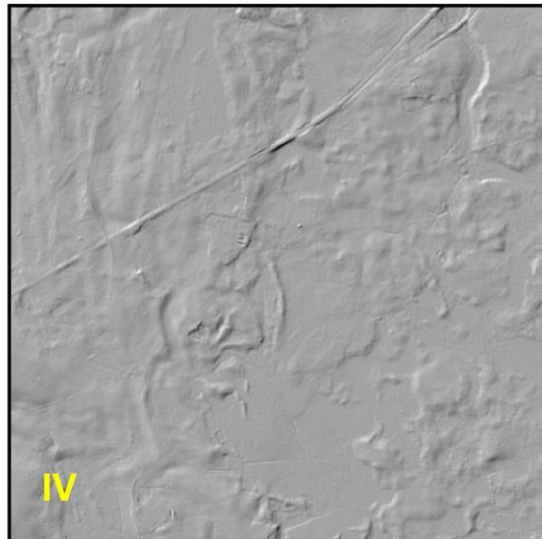
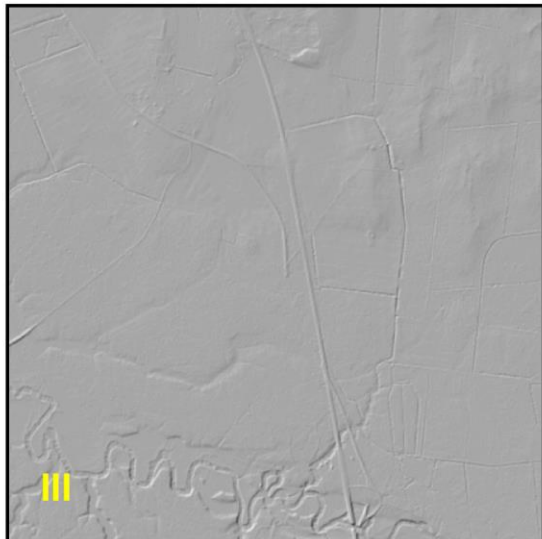
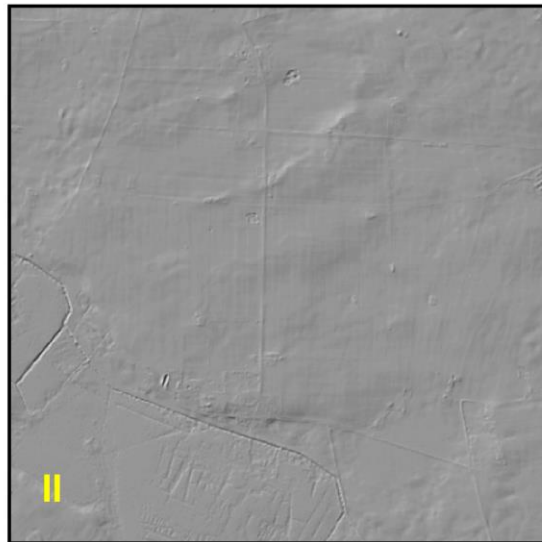
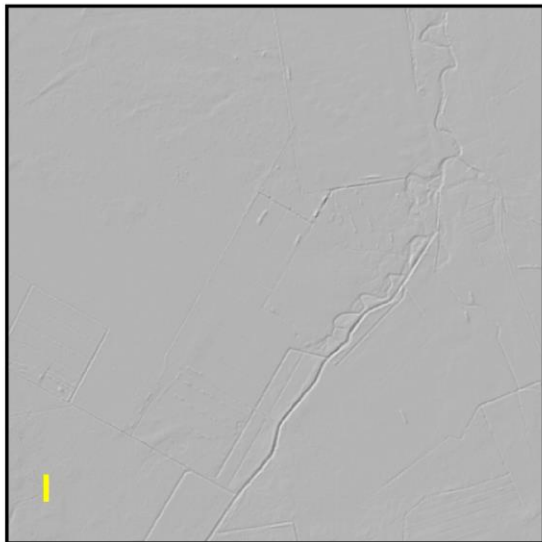
Lisa 3. Veatüübid ning nende näitajad

Veasumma	Selgitus
A_klass	vale klassiga pindobjektide pindala
J_koht	vale kohaga joonobjektide pikkus
J_klass	vale klassiga joonobjektide pikkus
J_mõõt	vale mõõduga joonobjektide pikkus
J_puudu	puuduolevate joonobjektide pikkus
J_liigne	liigsete joonobjektide pikkus
J_kokku	kõikide joonobjektide pikkus
P_koht	vale kohaga punktobjektid
P_klass	vale klassiga punktobjektid
P_mõõt	vale mõõduga punktobjektid
P_puudu	puuduvad punktobjektid
P_liigne	liigsed punktobjektid
P_kokku	kõik vigased punktobjektid
Vigade arv	Selgitus
vale koht	kõikide vale kohaga vigade summa
vale klass	kõikide vale klassi vigade summa
vale mõõt	kõikide vale mõõduga vigade summa
puudu	kõikide puudu vigade summa
liigne	kõikide liigne vigade summa
kokku	kõikide vigade summa
Veaprotsent	Selgitus
A_klass%	vale klassiga pindobjektide osakaal kõigist pindobjektidest
A_vea%	vigaste pindobjektide osakaal kõigist pindobjektidest
J_koht%	vale kohaga joonobjektide osakaal kõigist joonobjektidest
J_klass%	vale klassiga joonobjektide osakaal kõikidest joontest
J_mõõt%	vale mõõduga joonobjektide osakaal kõigist joonobjektidest
J_puudu%	puuduolevate joonobjektide osakaal kõikidest joonobjektidest
J_liigne%	liigsete joonobjektide osakaal kõikidest joontest
J_vea%	kõikide vigaste joonobjektide osakaal kõigist joonobjektidest
P_koht%	vale kohaga punktobjektide osakaal kõigist punktobjektidest
P_klass%	vale klassiga punktobjektide osakaal kõigist punktobjektidest
P_mõõt%	vale mõõduga punktobjektide osakaal kõikidest punktobjektidest
P_puudu%	puuduvate punktobjektide osakaal kõikidest punktobjektidest
P_liigne%	liigsete punktobjektide osakaal kõikidest punktobjektidest
P_vea%	kõikide vigaste punktobjektide osakaal kõikidest punktobjektidest
vale koht%	kõikide vale kohaga objektide osakaal kõikidest objektidest
vale klass%	kõikide vale klassiga objektide osakaal kõikidest objektidest
vale mõõt%	vale mõõduga objektide osakaal kõikidest objektidest
puudu%	vale mõõduga objektide osakaal kõikidest objektidest
liigne%	liigsete objektide osakaal kõikidest objektidest
Kokku%	kõikide vigaste objektide osakaal kõikidest objektidest

Lisa 4. Kallakuste standardhälbe leidmise mudel ArcGIS tarkvaraga.



Lisa 5. Reljeefi keerukuse visuaalse hinnangu tasemete näited.



I – tasane

II – peamiselt tasane

III – kohati keerukas

IV – keerukas

V – väga keerukas

Lisa 6. Reljeefi keerukuse näitajate tulemuste koondtabel.

Juurimisala	Visuaalne hinnang	Samakõrgusjoonte tihedus	Kallakuse standardhälve		Juurimisala	Visuaalne hinnang	Samakõrgusjoonte tihedus	Kallakuse standardhälve
448931	4	188,35	0,98		638523	2	87,80	0,54
448932	4	214,91	1,06		638722	1	94,79	0,51
448933	4	175,98	0,90		638724	2	147,16	0,94
448934	4	216,35	1,06		638813	1	108,15	0,82
540821	5	492,39	2,01		638831	1	75,17	0,53
540822	5	433,92	1,96		639924	1	125,79	0,71
541631	2	167,82	0,82		639942	1	57,41	0,41
541632	2	92,96	0,50		641011	1	92,92	0,64
541633	3	253,90	1,13		641012	2	63,93	0,31
541634	4	196,64	1,08		641013	1	67,27	0,43
545313	2	146,17	0,68		641014	2	73,51	0,41
546414	1	169,79	0,82		641241	1	76,83	0,57
631811	3	93,17	0,63		641242	2	77,43	0,48
631812	2	81,55	0,45		641243	2	60,36	0,62
631815	2	78,59	0,47		641244	1	80,76	0,66
632433	1	80,36	0,43		641321	1	105,73	0,80
632434	1	90,27	0,40		641323	1	110,81	0,55
632436	1	71,02	0,43		643121	1	68,46	0,41
633623	2	68,78	0,47		643122	1	89,56	0,44
636523	1	108,70	0,60		643123	1	87,87	0,41
636524	2	108,33	0,69		643124	1	94,88	0,43
636541	3	99,46	0,72		646014	1	71,76	0,54
636542	3	107,05	0,73		646023	2	83,62	0,49
636722	2	125,57	0,78		646032	2	77,42	0,40
636724	2	115,16	0,61		646041	2	70,31	0,45
636742	2	107,54	0,62		646111	2	126,36	0,55
636813	5	289,24	1,37		646112	2	129,33	0,71
637222	2	106,74	0,72		646113	2	118,13	0,66
637224	2	115,47	0,67		646114	2	108,85	0,47
637311	3	87,12	0,64		647643	1	70,75	0,60
637313	2	95,58	0,58		647731	1	61,42	0,54
637514	3	97,47	0,77		648024	4	192,38	1,18
637523	1	82,40	0,65		648113	4	197,85	1,12
637532	2	144,17	0,81		648131	2	127,66	0,69
637534	2	141,83	0,70		648713	1	139,22	0,94
637541	1	128,91	0,93		648831	1	83,74	0,68
637543	2	99,63	0,62		649013	2	140,26	0,84
638512	2	122,68	0,86		649031	2	128,63	0,86
638514	1	111,78	0,75		649133	2	198,41	1,14
638521	2	115,57	0,58		649134	2	74,93	0,59
638523	2	87,80	0,54		649136	2	74,70	0,43

Lisa 7. Vigade ja reljeefi keerukuse näitajate vahelised korrelatsioonide koondtabel.

vea liik	samajoonte tihedus	kallakuse standardhälve	visuaalne hinnang
A_klass	0,24	0,19	0,17
J_koht	0,28	0,24	0,27
J_klass	0,06	0,13	0,05
J_mõõt	-0,09	-0,08	0,10
J_puudu	0,08	0,16	0,07
J_liigne	0,00	0,07	-0,01
J_kokku	0,15	0,23	0,16
P_koht	-0,09	-0,28	-0,09
P_klass	-0,03	-0,13	-0,01
P_mõõt	-0,12	-0,03	-0,20
P_puudu	-0,30	-0,34	-0,15
P_liigne	-0,23	-0,34	-0,11
P_kokku	-0,31	-0,39	-0,15
vale koht	0,15	0,00	0,09
vale klass	0,11	0,04	0,06
vale mõõt	-0,12	-0,01	-0,02
puudu	-0,19	-0,20	-0,13
liigne	-0,01	-0,03	0,04
kokku	-0,06	-0,09	-0,02
A_klass%	0,24	0,20	0,19
A_vea%	0,24	0,20	0,19
J_koht%	0,26	0,21	0,27
J_klass%	0,05	0,09	0,09
J_mõõt%	-0,09	-0,08	0,11
J_puudu%	0,09	0,09	0,11
J_liigne%	0,04	0,06	0,08
J_vea%	0,16	0,14	0,23
P_koht%	-0,10	-0,29	-0,07
P_klass%	-0,10	-0,20	0,00
P_mõõt%	-0,13	-0,04	-0,20
P_puudu%	-0,33	-0,40	-0,12
P_liigne%	-0,30	-0,41	-0,11
P-vea%	-0,37	-0,45	-0,13
vale koht%	0,10	-0,06	0,09
vale klass%	-0,07	-0,15	0,10
vale mõõt%	-0,14	-0,05	-0,02
puudu%	-0,27	-0,33	-0,07
liigne%	-0,12	-0,15	0,09
Kokku%	-0,23	-0,30	0,02
punaselt märgitud tulemused täidavad tingimust $p > 0,005$			

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Ainar Härm

(sünnikuupäev 28.02.1991)

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

Reljeefi keerukuse mõju Eesti põhikaardi kvaliteedile,

mille juhendajad on Raivo Aunap ja Kiira Mõisja,

- 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, 19.05.2014