

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

Magistritöö geoinformaatikas ja kartograafias

**Topograafilistel kaartidel kajastatud reljeef LiDARi andmestiku  
võrdluses**

Eleri Hirv

Juhendaja: PhD Raivo Aunap

Kaitsmisele lubatud:

Juhendaja:

Osakonna juhataja:

Tartu 2013

# Sisukord

<b>Sissejuhatus.....</b>	<b>4</b>
<b>1. Reljeefi kujutamine topograafilistel kaartidel.....</b>	<b>6</b>
<b>2. Reljeef Eesti topograafilistel kaartidel.....</b>	<b>8</b>
2.1. Esimesed pinnavormide ja kõrgussuhete kaardid .....	8
2.2. Topograafilise mõõdistamise algus .....	8
2.3. Kartograafia Eesti Vabariigis 1918–1940. ....	9
2.4. Kartograafia Nõukogude Eestis .....	10
2.4.1. Reljeefiandmete täpsusest Nõukogude Liidu topograafilistel kaartidel.....	12
2.5. Peale taasiseseisvumist valminud topograafilised kaardid .....	13
2.5.1. Eesti Põhikaart .....	13
2.5.2. Eesti Baaskaart.....	15
2.5.3. NATO eeskirjade kohane topokaart 1: 50 000 .....	16
<b>3. Kõrgusandmete mõõdistusviisid .....</b>	<b>17</b>
3.1. Mensulmõõdistamine .....	17
3.2. Aerofototopograafiline mõõdistamine.....	18
3.2.1. Stereotopograafiline mõõdistamine.....	18
3.2.2. Kontuur–kombineeritud mõõdistamine.....	18
3.3. LiDARi andmestik .....	19
3.3.1. LiDARi andmete täpsus.....	19
<b>4. Andmed ja metoodika.....</b>	<b>21</b>
4.1. Uurimisalad.....	21
4.2. Andmed.....	22
4.2.1. Topograafilistel kaartidel kajastatud reljeefi andmed .....	22
4.2.2. LiDARi andmed.....	23
4.3. Välitööd .....	23

4.4.	Andmete võrdlemine .....	24
4.4.1.	Samajoontest kõrgusmodeli loomine .....	25
4.4.2.	LiDARi andmetest kõrgusmodeli loomine .....	27
<b>5.</b>	<b>Kõrgusandmete võrdlemine ja analüüs .....</b>	<b>28</b>
5.1.	Kõrguselised erinevused .....	28
5.1.1.	Suurte kõrguserinevuste põhjused.....	30
5.2.	Taimestiku mõju kõrguste erinevusele .....	34
5.2.1.	CORINE andmete järgi .....	34
5.2.2.	ETAK andmete järgi .....	35
5.3.	Pinnavormide kuju erinevused.....	36
5.3.1.	Morfoloogiliste erinevustega piirkondade leidmine .....	37
5.3.2.	Nõlvakalde mõju morfoloogiliste erinevuste rohkusele.....	45
5.3.3.	Erinevused pinnavormide ekspositsioonis.....	46
5.3.4.	Mudelitest arvatatud voolujoonte erinevused .....	48
5.3.5.	Pinnavormide kuju erinevused reljeefijoonisel.....	51
5.4.	Välitööde tulemused.....	52
<b>6.</b>	<b>Arutelu .....</b>	<b>55</b>
	<b>Kokkuvõte.....</b>	<b>61</b>
	<b>Summary.....</b>	<b>62</b>
	<b>Tänuavaldused.....</b>	<b>64</b>
	<b>Kasutatud allikad .....</b>	<b>65</b>
	Kirjandus .....	65
	Internet .....	68
	<b>Lisad.....</b>	<b>70</b>

## Sissejuhatus

Maapinna kuju tõepärane esitamine kaartidel on läbi aegade olnud keeruline, töömahukas ning täpsust nõudev ülesanne. Maamõõtmise tehniline ja instrumentaalne tase on käinud käsikäes loodusteaduste arenguga. Aja jooksul on muutunud nii kaartide valmistamisel kasutatud instrumendid kui teoreetilised teadmised. Mõõtmistulemustesse on see kaasa toonud kõrgusandmete täpsuse suurenemise.

Lisaks pinnavormide ja kõrgussuhete väljendamisele kaartidel on kõrgusandmed oluliseks algallikaks mitmesuguste atmosfääri, geomorfoloogiliste, hüdroloogiliste ja ökoloogiliste protsesside modelleerimisel. Digitaalseid kõrgusmudeleid on geo-teadustes kasutatud juba alates 1950ndatest. Viimase 25 aasta jooksul on aga oluliselt muutunud nii andmete kogumine, mudelite modelleerimine kui ka maapinda iseloomustavate suuruste arvutamine. Kuivõrd modelleerimise tulemus sõltub eelkõige algandmetest, siis on esmatähtis, et teatakse kasutatud kõrgusandmete täpsust (Wilson 2012).

Nõukogude Liidu aegsed topograafilised kaardid on pikka aega olnud kõige detailsemaks tervet Eestit katvaks reljefialase informatsiooni algallikaks. Nendelt pärit kõrgusandmeid on kasutatud mitmel trükitud topograafilistel kaartidel: Eesti Põhikaart, Eesti Baaskaart, NATO eeskirjade kohane topokaart 1: 50000. Samuti on Nõukogude Liidu aegsed topograafilised kaardid rohkesti kasutust leidnud kõrgusalase informatsiooni allikana erinevatel uuringutel (kas otse või läbi eelpool nimetatud kaartide) nt paleo-rannajoonte modelleerimisel (Teiter 2000, Randma 2001, Rosentau jt 2007, Kuningas 2010) ja maakasutuse uurimisel (Koppel 2005). Vaatamata suurele kasutusele pole nende reljefiandmete täpsust põhjalikult uuritud. Topograafilise kaardistamise juhend oli ühine terves Nõukogude Liidus – seega ei arvestanud see meie suhteliselt tasasele maastikule iseloomulike reljefivormidega. Lisaks on välja tulnud, et kohati ületavad kõrgusandmete vead topokaartidel instruksioonis kehtestatud täpsusnõudeid väga tõsiselt (Raid 1999).

Praeguseks on peaaegu terve Eesti kohta olemas detailsem ning eeldatavasti oluliselt täpsem kõrgusalase informatsiooni algallikas – LiDARi andmestik. Sellest on saanud tähtis alusmaterjal paljudele loodus- ja inseneriteaduste rakendustele. Nii on siinseid LiDARi andmeid kasutatud pinnavormide tuvastamiseks (Järveoja 2012), paleogeograafilistel rekonstruktsioonidel (Habicht 2012), orienteerumiskaartide reljefijoonise täpsuse hindamisel (Karm 2012), valglate modelleerimisel (Hiimaa 2011). Ühtlasi võimaldavad uued kõrgusandmed välja selgitada, millisel määral võisid varasemates uuringutes Nõukogude

Liidu topograafilistelt kaartidelt pärit reljeefiandmed saadud tulemustele mõju avaldada. Samas ei tohi LiDARi andmestiku juures ära unustada, et tegu on kaugseire andmetega, kus tulemused on saadud kohapeal käimata. Seetõttu peab ka nende andmete kasutamisel arvestama mõningate puudustega.

Käesoleva töö eesmärgiks on hinnata Nõukogude Liidu aegsetel 1:10000 mõõtkavas topograafilistel kaartidel kajastuvate reljeefiandmete täpsust võrreldes neid LiDARi kõrgusandmetega. Lähtuvalt teadaolevatest teoreetilistest faktidest võib oletada, et uuritavatel kaartidel esineb vigu pinnavormide kõrguste määramisel; mõnedes piirkondades on reljeefi kujutatud liialt üldiselt, s.t et puudub mitmeid olulisi ja väikseid reljeefivorme; esineb kohti, kus pinnavormid on valesti kaardistatud. Magistritöö eesmärgi saavutamiseks on püstitatud järgmised ülesanded:

- kontrollida LiDARi andmete õigsust välitöödel;
- luua mõlemast andmestikust kõrgusmodelid;
- erinevate meetodiliste võimaluste kasutamine, mis aitaksid loodud kõrgusmodelite erinevusi välja tuua ja seeläbi topograafiliste kaartide kõrgusinfo täpsust hinnata;
- hinnata nii kvantitatiivselt erinevuste suurust ja rohkust kui ka kvalitatiivselt erinevuste iseloomu ja nende põhjuseid;
- uurida taimestiku mõju kõrgusandmete täpsusele.

# 1. Reljeefi kujutamine topograafilistel kaartidel

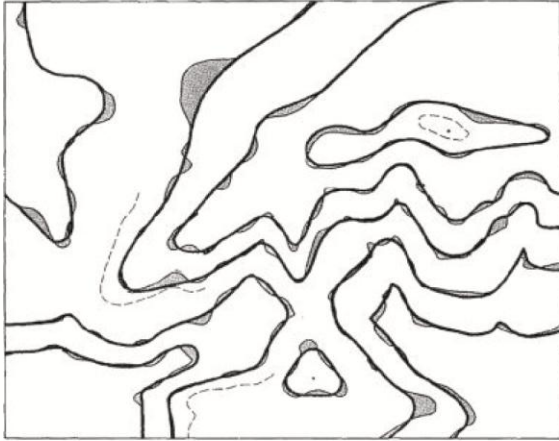
Topograafiline kaart ehk topokaart on maapinna füüsilisi omadusi peegeldav suuremõõtkavaline kaart. Topokaardi iseloomulikuks omaduseks on reljeefi, asulate, vetevõrgu, teede, taimkatte jms kujutamine (Jagomägi 1999).

Reljeef ehk pinnamood on maastiku tähtsamaid füüsilis-geograafilisi elemente (Tšebotarjov 1959). Selle moodustavad erineva kõrguse, ulatuse, koostise, vanuse, tekke- ja arengulooga pinnavormid. Reljeefi kujunemisel on oluline osa geoloogilistel sise- ja välisjõududel, kosmilistel ja bioloogilistel teguritel ning inimtegevusel.

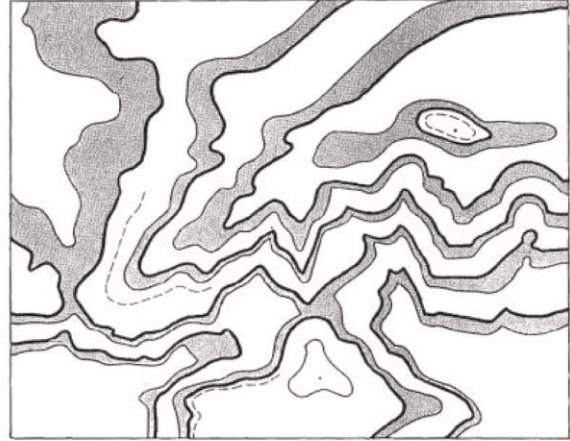
Reljeefi kujutamise viisid on kaartidel läbi aja palju muutunud. Algselt esitati pinnavorme mitmesuguste piktograafiliste vormidega, mille suurimaks puuduseks oli perspektiivikonflikt. Hiljem hakati kasutama erinevaid reljeefikriipsutusi, mis andsid küll hea ülevaate maastikust, ent ei loonud matemaatiliselt täpset kujutist maastiku profiilist. Praegu kasutatakse topograafilistel kaartidel reljeefi kujutamiseks põhiliselt samakõrgusjooni (horisontaalid, isohüpsid). Need on ainsad graafilised elemendid, millega saab kirjeldada nii geomeetriselt reljeefivorme kui anda edasi maastiku üldist ilmet (Imhof 1982). Horisontaalidel puudub aga plastilisus. Et visuaalselt oleks reljeefivorme kergem tajuda, kasutatakse samakõrgusjooni tihti koos reljeefivarjutusega (Tšebotarjov 1959). Veelgi paremini tajutava pildi annab reljeefivarjutuse ja kõverusrastrate (*curvature*) kombineerimine suunatud ja hajusa valgustusega (Kennelly 2008).

Nazarov (1952) toob Geodeesia õpperaamatus välja, et reljeefi kujutamisel kaartidel nõutakse eelkõige näitlikust, et esimesest pilgust saaks otsustada reljeefi üldise iseloomu üle. Lisaks peaks kujutise järgi olema võimalik määrata üksikute punktide kõrgusi, nõlvade järskust ja suunda. Kala (2001) „Kartograafia aluste“ järgi on reljeefi kujutamisel oluline maastiku morfoloogiliste iseärasuste õige kajastamine, horisontaalse ja vertikaalse liigestatuse iseärasuste esitamine, reljeefitüüpide ja nõlva kallete näitamine. Tšebotarjov (1959) rõhutab et horisontaalidega kaardistamisel ei vaja me horisontaale endid, vaid ülesandeks on võimalikult täielikult ja võimalikult täpselt kujutada maastiku reljeefi kõigi tema iseärasustega, kõigi temale omaste seaduspärasustega. Horisontaalid pole eesmärk vaid abinõu reljeefi kujutamisel.

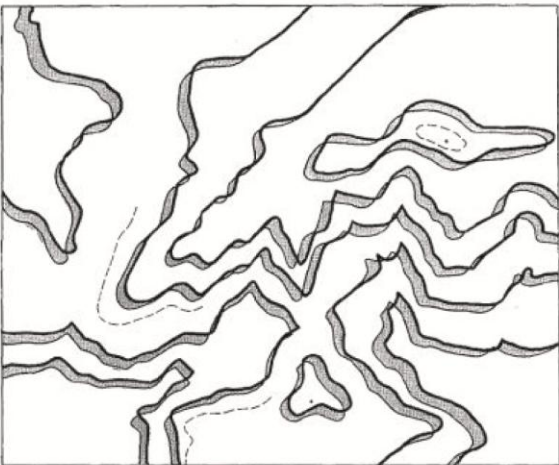
Reljeefijoonte täpsus kaardil sõltub mitmesugustest teguritest: horisontaalide lõikevahe valik, mõõtmistäpsus, kaardi mõõtkava, joonte jämedus (Imhof 1982). Põhilised vead, mis horisontaalide kasutamisel võivad esineda, on näidatud joonisel 1.



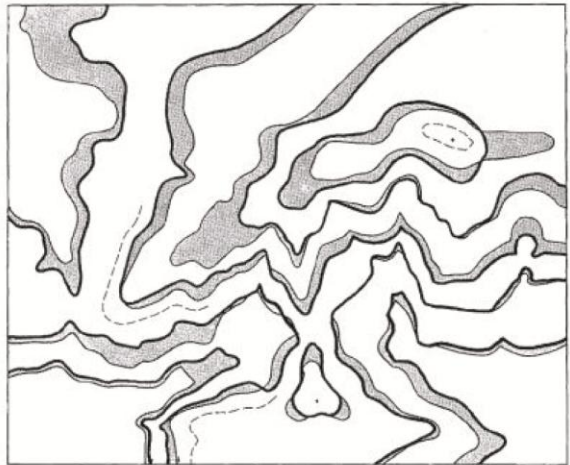
1. Juhuslik viga



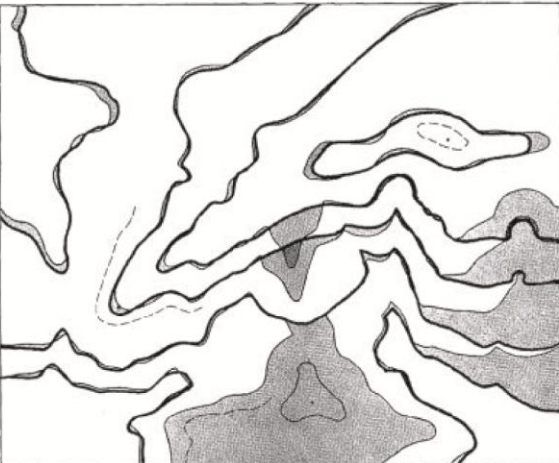
2. Süsteemiline kõrgusnihke viga



3. Süsteemiline positsiooninihke viga



4. Kalde viga



5. Jäme viga



6. Kombinatsioon erinevatest vigadest

**Joonis 1.** Erinevat tüüpi topograafilistel kaartidel esinevad samakõrgusjoonte vead. Kaarti on suurendatud ligikaudu kolm korda (algne mõõtkava oli 1:25000). „Õiged“ (vigadeta) horisontaalid on peenema joonega, ebatäpsed kõrgusjooned on näidatud jämedamalt (Imhof 1982 järgi).

## **2. Reljeef Eesti topograafilistel kaartidel**

### **2.1. Esimesed pinnavormide ja kõrgussuhete kaardid**

Esimesed andmed maapinnapunktide kõrguste määramisest Eesti alal pärinevad trigonomeetrilise mõõdistamisviisi kasutuselevõtmisest. Teadaolevalt tegeles siin esimesena maapinnapunktide kõrguste määramisega 19. sajandi algul astronoom-geodeesiaprofessor Wilhelm Struve. Olulist osa kõrgussuhete kajastavate kaartide valmimisel omavad Liivimaa triangulatsiooni teostamine 1816–1819 ja Tartu meridiaankaare mõõtmistööd 1821–1827. Esimene Liivimaa kubermangu kõrgussuhete (hüpsomeetriline) kaart on koostatud Struve poolt 1844. aastal; esimese Baltimaade pinnavormide (orograafilise) kaardi koostas 1852. aastal Tallinna gümnaasiumi geograafiaõpetaja Carl Albert Rathlef (Potter, Treikelder 2011).

### **2.2. Topograafilise mõõdistamise algus**

Geodeetiliselt põhistatud topograafilist mõõdistamist ja kaartide koostamist alustati Eestis Liivimaal 1855. aastal. Esimesena koostati mensulmõõdistamise andmete järgi kolmeverstane kaart (1:126000), kus reljeefi kujutati viirutusega. See oli Walbecki 1819 ellipsoidile sobitatud Bonne'i pseudokoonilises õigepindses projektsioonis. Eesti ala katvad 26 kaardilehte trükiti 1860. aastatel (Potter, Treikelder 2011).

Suuremõtkavalise kaardistamisega alustati 1894. aastal, selleks kasutati mensulmõõdistamist. Kaardistustööde tulemusena valmis üheverstane (1:42000) topograafiline põhikaart (joonis 2), millel oli tähtis roll Esimeses maailmasõjas ja Vabadussõjas. Põhikaart koostati Besseli 1841 ellipsoidile sobitatud polüeedrilises projektsioonis, Pulkovo lähtemeridiaaniga. Verstane kaart oli üsna halvasti loetav, sest enamiku lehtede puhul ei koostatud generaliseeritud trükioriginaali, vaid trükiti kaks korda vähendatuna otse mõõdistusplanšettide järgi, mis olid pooleverstases (1:21000) mõõtkavas. Reljeefi kujutamiseks kasutati samakõrgusjooni, lõikevahega 2 süllda (süld=2,1336m), Lõuna-Eestis 4 süllda (Potter, Treikelder 2011).





**Joonis 2.** Fragment üheverstasest (1:42000) topograafilisest kaardist (Maa-ameti kaardiserver).

### **2.3. Kartograafia Eesti Vabariigis 1918–1940.**

Eesti geodeesia ja kartograafia sünniks võib pidada Vabadussõja aega, kui moodustati Kaitseväge Staabi Topo-hüdrograafia osakond. Pärast sõda kaeti viimased „valged laigud“ Petseri- ja Võrumaa lõunapoolsetel aladel verstaste kaartidega ja selle tulemusena oli kogu Eesti ala kohta olemas verstakaart (Potter, Treikelder 2011). Üheverstastele kaardilehtedele tehti vajalikul hulgal järeltrükke. Osal trükitud kaardilehtedel asendati venekeelsed kohanimed eestikeelsetega. Need Vene kaartide koopiad olid esimesed eestikeelse tekstiga topograafilised kaardid (Treikelder 2001).

Vaadeldaval perioodil alustati topograafilise põhikaardi (1:25000), taktikalise (1:50000) ja ülevaatekaardi (1:200000) koostamist (joonis 3). Kaardid olid Lamberti-Gaussi konformses koonilises projektsioonis. Täiesti uue põhikaardi koostamiseks vajalikke mõõdistustöid alustati 1923. aastal, ent need katkestati 1935. aastal. Selleks ajaks oli kaardistatud vaid 20% riigi haldusalast. Taktikalise ja ülevaatekaardi koostamiseks rekognostseeriti Vene üheverstalist kaarti ja olemasolevatel aladel uut põhikarti. Kohati kasutati ka aerofotodel põhinevat fotogramm-meetrilist mõõdistusviisi (Treikelder 2001, Potter, Treikelder 2011). Süllamõõdulised reljeefijooned interpoleeriti meetriteks (Potter 2012). Taktikalisest kaardist ilmus 1940. aasta suveks 133 kavandatud kaardilehest 75. Ülevaatekaardi kõik 12 kaardilehte valmisid aastal 1939. Peale nimetatud kaardiseeriade valmis sel perioodil veel mitmeid üksikuid kaardilehti erinevate asutuste väljaandel (Treikelder 2001, Potter, Treikelder 2011).



**Joonis 3.** Fragment taktikalisest topograafilisest kaardist (1:50000) (Maa-ameti kaardiserver).

## 2.4. Kartograafia Nõukogude Eestis

Nõukogude ajal võisid topograafilis-geodeetilisi ja kartograafilisi töid teostada vaid NSV Liidu keskasutused: Geodeesia ja Kartograafia Peavalitsus (GKP), Relvajõudude Kindralstaabi Sõjatopograafiateenistus ning Okeanoloogia ja Mereväe Peavalitsus. Maadearvestuse ja maakorralduse otstarbel võis kaardistamist teha ka Üleliiduline Põllumajanduslike Aerofotogeodeetiliste Uurimustööde Instituut (VISHAGI) (Potter, Treikelder 2011).

Kõige laialdasema topograafilise kaardistamisega mõõtkavas 1:10000 (joonis 4) alustati Eesti alal aastal 1954, ja see kestis väiksemate vahedega aastani 1995 (Potter 1995a, 1995b, 1999, Potter, Treikelder 2011). Ulatuslike ja suuremahuliste kaardistustööde ajendiks olid peamiselt poliitilised (sotsialistlik maareform), koloniaalmajanduslikud (riiklik maakorraldus ja maade arvestus) ja militaarsed (sõjaväe topokaart) eesmärgid (Potter 1995a). Ülevaade neil aastail toimunud vertikaalmõõdistamisest ja topograafilisest kaardistamisest on toodud tabelis 1. Tasastel aladel oli reljeefi mõõdistamise lõikevaheks 1 m, liigestatud reljeefiga aladel 2 m. Kasutati 1942. a ja 1963. a koordinaatsüsteeme: kaardid tehti Gauss-Krügeri projektsioonis, kasutades Krassovski referentsellipsoidi.

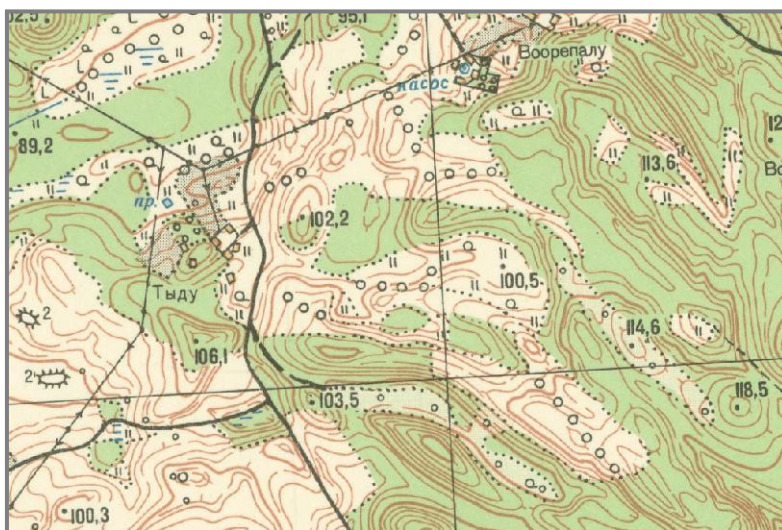
**Tabel 1.** Ülevaade vertikaalmõõdistamisest ja topograafilisest kaardistamisest (Potter 1999 järgi).

Tööde periood	Lehtede arv	Tellijaja teostaja	Kartograafiline süsteem ja h	Kaardistamisviis	Tiraazid
1. 1954 - 1965	750	ENSV Põllumin Selhozaerosjomka	1942 koordin süsteem, 2/1 m	kontuurkombineeritud	287 lehte
		1968. a asuti esmakordselt Eesti alal ulatuslikule stereo- topograafilisele kaardistamisele mõõtkavas 1: 10 000			
2. 1969 - 1972	30	ENSV Põllumin VISHAGI	1963 koordin süsteem, 2m	Stereotopograafiline	–
3. 1970 - 1984	1667	NSVL Valitsus GKP eksp 184	1963 koordin süsteem, 1/2m	Stereotopograafiline	Kõik
4. 1982 - 1986	176	sama	1963 koordin süsteem, 1 m	Hüdrograafiline	Kõik
5. 1986 - 1995	705	sama	1942 koordin süsteem, 2/1 m	Stereotopograafiline	–

Märkused: kaardistatava ala ulatuseks on kalkuleeritud 50 000 km<sup>2</sup>; h – reljeefi löikevahe meetrites

Kokku kaardistati:

1. perioodil – vertikaalmõõdistamine (kontuur-kombineeritud viisil) 12 000 km<sup>2</sup> (27%)
  2. –5. perioodil – stereotopograafiline kaardistamine (sh metsa-alade kontuurkombineeritud mõõdistamine) 43 000 km<sup>2</sup> (83%), sh 6000 km<sup>2</sup> vertikaalmõõdistamise andmete uuendamist ja 3000 km<sup>2</sup> suuruste järvede hüdrograafilist mõõdistamist.
1995. aastaks oli kaardistatud 49 000 km<sup>2</sup>, mis moodustab 98% kaardistatavast alast.



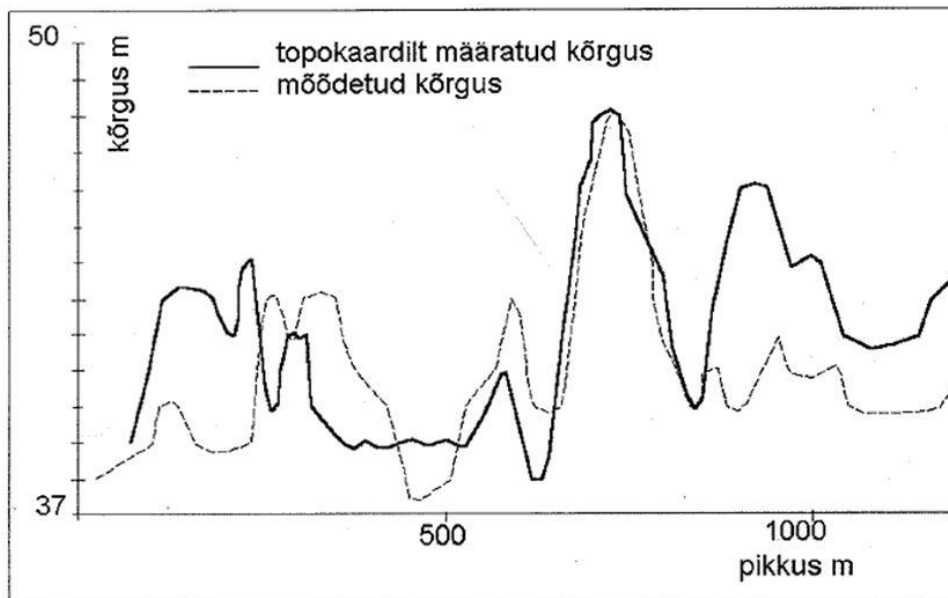
**Joonis 4.** Fragment Nõukogude Liidu topograafilisest kaardist (1:10000). Leht C-55-27-G-b-1, 1973. a (Maa-ameti kaardiserver).

Kaardid mõõtkavas 1:10000 katsid igaüks 3'45"×2'30" piirkonna. Samal ajavahemikul valmisid terve Eesti kohta topograafilised kaardid mõõtkavades 1:25000, 1:50000, 1:100000, 1:200000, 1:300000, 1:500000 ja 1: 1000000 (Mardiste, Jagomägi 2004).

Kasutatud mõõdistusviisid olid aerofototopograafiline (stereotopograafiline, kontuur–kombineeritud) ja mensulmõõdistamine (Potter 1999). Mahukate kaardistustööde tulemusena valminud topograafilised kaardid olid salajased ja seetõttu oli nende kasutamine tollal piiratud (Mardiste, Jagomägi 2004).

#### 2.4.1. Reljeefiandmete täpsusest Nõukogude Liidu topograafilistel kaartidel

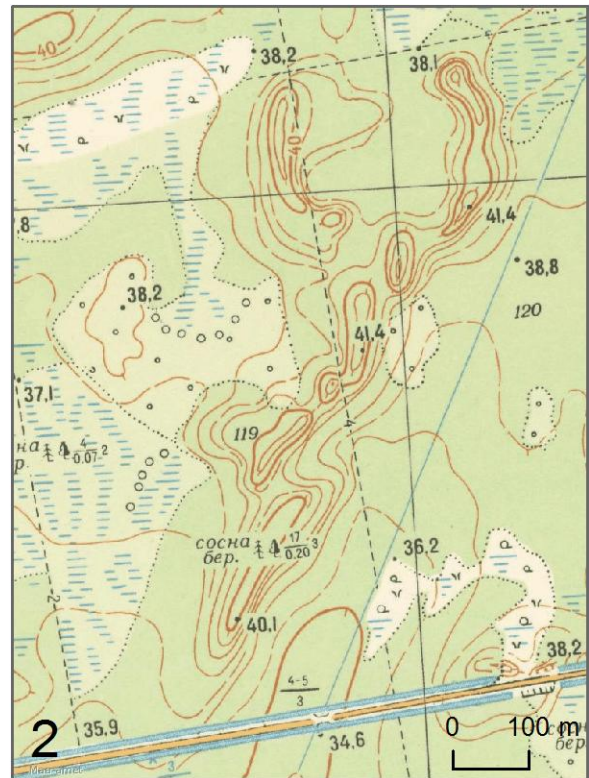
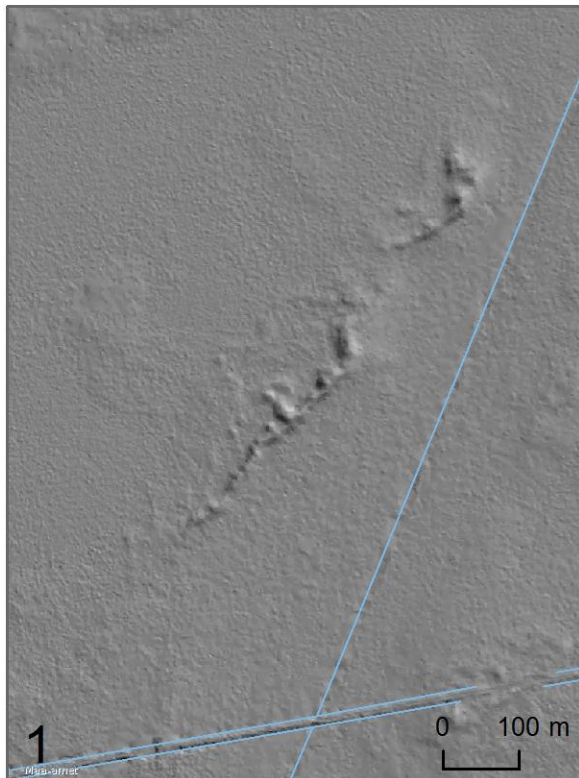
Juhendi järgi oli Eesti oludes, kus maapinna kaldenurgad on valdavalt  $2^{\circ}$ – $6^{\circ}$ , lubatud kõrgusjoone veaks tõelise asukoha suhtes  $1/3$  (avatud aladel) kuni  $2/3$  (metsaaladel) lõikevahest (Topograafilise mõõdistamise eeskiri 1974). Tõnu Raidi (1999) poolt läbi viidud mensul- ja kõrguslikel mõõdistamisel orienteerumiskaartide valmistamiseks tehtud välitöödel (1977–1995) selgus, et vead kaartidel ületavad mitmetes kohtades NSV Liidu instruksioonis kehtestatud täpsusnõudeid. Joonisel 5 on toodud Harku mägedes tehtud 1200 m pikkune reljeefiprofilide võrdlus. Sealt on näha, et stereokujutiselt interpreteeritud reljeef on ka suhteliselt väikestel reljeefivormidel üsna suurte vigadega. Kuigi üldvormid on sarnased, esineb detailides, nende asukohtades ja nõlvade kujus suuri erinevusi.



**Joonis 5.** Reljeefiprofilide võrdlus Harku mägedes (Raid 1999 järgi).

Jämedaid vigu pinnavormide kaardistamisel on avastatud mujalgi. Joonisel 6 on toodud Ida-Virumaal Agusalu soo lõunaosas asuva Bandiidi kriiva vale kujutamise Nõukogude Liidu aegsel topograafilisel kaardil. Topokaardil asub loodeosas kungas, mis LiDARi andmestiku reljeefimudelilt puudub. Lisaks ulatub vaadeldav kriiva topokaardil märgatavalt kaugemale lõunasse kui LiDARi kõrgusmudelil.





**Joonis 6.** Näide jämedast veast Nõukogude Liidu topograafilisel kaardil. 1. LiDARi kõrgusandmete reljeefivarjutus (mõõdistatud 2010). 2. Fragment Nõukogude Liidu topograafilisest kaardist mõõtkavas 1:10000 (h 1 m), leht C-58-29-Vv-2, 1980. a (Maa-ameti kaardiserver).

## 2.5. Peale taasiseseisvumist valminud topograafilised kaardid

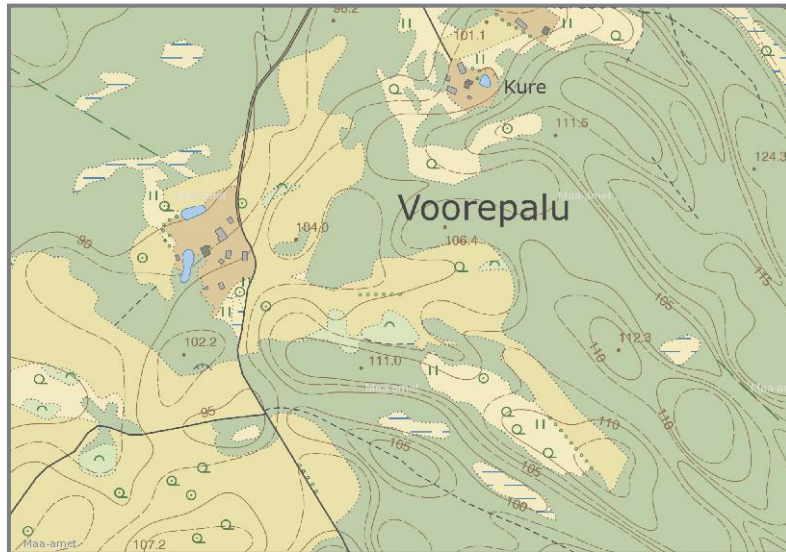
### 2.5.1. Eesti Põhikaart

Eesti Põhikaart on suuremõõtkavaline topograafiline kaart, mida tehakse Eesti topograafilise andmekogu (ETAK) andmetest. Põhikaardi tootmisel kasutatakse L-EST tasapinnalist ristkoordinaatsüsteemi (Maa-amet 2011).

Põhikaardistuse projekt töötati välja ja kinnitati 1991. aastal. Projekti algusaastail 1991–1995 valmistati kaardid käsitsi ilma arvutit kasutamata. 1996. aastal alustati põhikaardi digitaalkaardi tootmist. Alates 1997. aastast on kogu põhikaardi tootmisprotsess olnud digitaalne (Maa-amet 2010). Põhjaliku ülevaate põhikaardistuse algusaastatest annab oma bakalaureusetöös Riin Kadarik (2011). Eesti põhikaardi mõõtkava digitaalkujul on 1:10 000 (joonis 7) ja trükiväljaandes 1:20000 (joonis 8).

Alates käesoleva aasta aprilli keskepaigast on digitaalkaart kogu Eestimaa ulatuses kaetud aerolaserskaneerimise algandmetest loodud samakõrgusjoonte, iseloomulike kõrguspunktide

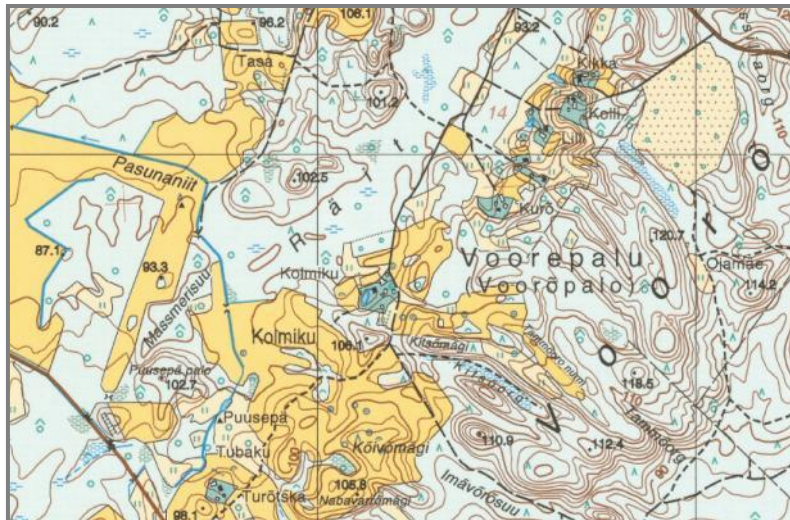
ning geoportaalis kõrguste paremaks visuaalseks tajumiseks ka reljeefvarjutusega. Varasemalt digitaalkaardil reljeefinfo puudus. Samakõrgusjoonte kujutamisel on kasutatud 2,5 meetrist lõikevahet (Maa-amet 2013).



**Joonis 7.** Fragment digitaalsest Eesti põhikaardist (1:10000) (Maa-ameti kaardiserver).

Trükikaardi (1:20 000) valmistamiseks on siiani kasutatud NSVLi 1:10 000 topograafilistelt kaartidelt saadud reljeefi. Looduses pole Eesti põhikaardi reljeefi jaoks välitöid tehtud (Lankots 2001). Et neil kaartidel on reljeefi lõikevahed erinevad, siis on põhikaardiks sobilikud horisontaalid (h 2,5m) genereeritud digitaliseeritud kõrgusjoontest ja kõrguspunktidest saadud mudelite abil. Hiljem on kõrgusjooni korrigeeritud vooluvete, teetammide, karjäärade, tõngermaade jms suhtes, et need vastaksid praegusele situatsioonile. Keeruliseks teevad olukorra juhtumid, kus kõrvutiasetsevate topograafiliste kaardilehtede kõrgusjooned ei ühti servades omavahel. Lõpptulemusena peavad reljeefi elemendid moodustama kaardil ühtse terviku, ei tohi katkeda ebasobivates kohtades, ning peavad olema teiste nähtuste suhtes loogilised (Staškevitš 2005, Jürgens 1999).

Maa-amet plaanib edaspidi ka Eesti põhikaardi trükiversioonile luua reljeefikihi aerolaserskaneerimisest saadud andmeid kasutades.



**Joonis 8.** Fragment Põhikaardist (1:20000). Leht 5446, 2001. a (Maa-ameti kaardiserver).

### 2.5.2. Eesti Baaskaart

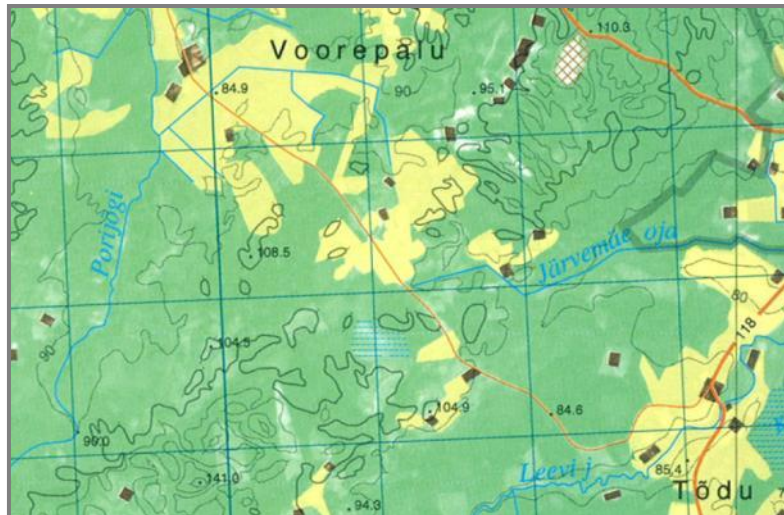
Baaskaardi projekti eesmärgiks oli kiiresti luua põhilist Eesti ruumiinfot sisaldav digitaalkaart (Maa-amet 2009), rakendades selleks olemasolevat kaardiinformatsiooni ja digitaalseid andmebaase koos värskete satelliidandmetega (Kask jt. 1997). Eesti Baaskaart (joonis 9) ja selle digitaalne andmebaas valmis koostöös Rootsi kosmosekorporatsiooniga Satelliitbild ja kartograafiaettevõttega LM Kartor, kes varustasid Eesti poolseid partnereid kosmosepiltidega ning teostasid töötajate väljaõpet. Eesti poolseks partneriks oli Maa-amet, projekti elluviijaks AS Eesti Kaardikeskus. Baaskaardi projektiga alustati 1993. aastal ning digitaalse andmebaasi loomine lõppes aastal 1996, baaskaardi trükiversiooni viimased lehed ilmusid 1998. aastal. Alates sellest ajast ei ole baaskaardi infot uuendatud (Maa-amet 2009).

Eesti Baaskaart loodi mõõtkavas 1:50 000 ja kasutati TM - BALTI projektsiooni. Sarnase eesmärgi, sisu ning ülesehitusega kaardid loodi samal ajaperioodil ka Lätis ja Leedus (Maa-amet 2009).

Baaskaardi valmistamisel kasutati alusmaterjalina vanu topograafilisi kaarte kõrgusjoonte, kõrguspunktide ja haldusüksuste piiride digitaliseerimiseks. Kõrgus- ja sügavusjooned digitaliseeriti 1:25000, kõrguspunktid 1:50000 mõõtkavas topograafilistelt kaartidelt (Kask jt. 1997).

Praegu on Maa-ametil valmimas uus kaarditoode mõõtkavas 1:50 000 ja sellel kasutatakse reljeefialase informatsiooni algallikana aerolaserskaneerimisest saadud andmeid.

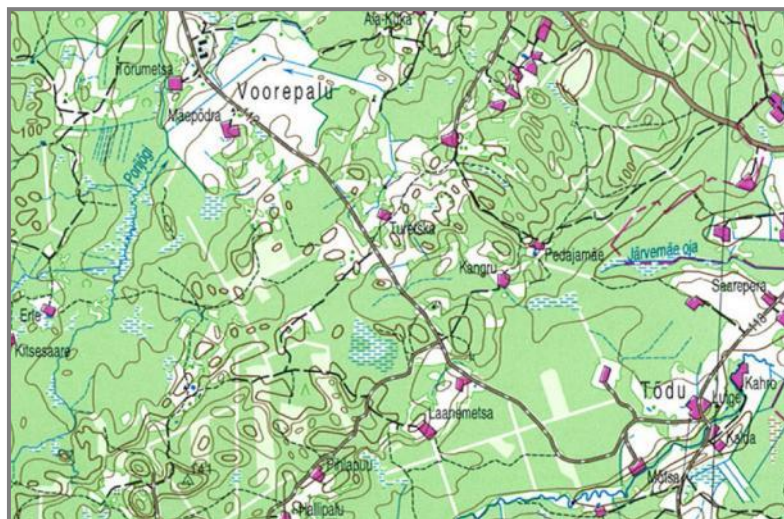




**Joonis 9.** Fragment Baaskaardist (1:20000). Leht 5423 Kanepi, 1996. a.

### 2.5.3. NATO eeskirjade kohane topokaart 1: 50 000

1995. aastal alustati USA kaitsekaardistamise agentuuri abiga NATO eeskirjadele vastava uue 1: 50 000 mõõtkavas kaitseväge topograafilise kaardi koostamist (joonis 10). Eesti poolseks peaettevõtjaks ja tootjaks sai Eesti Kaardikeskus AS. Eestit kattev 112 kaardilehest koosnev sari valmis aastaks 2004. Reljeefikihi valmistamiseks kasutati vanu Vene topokaarte (Potter 2012).



**Joonis 10.** Fragment NATO eeskirjade kohasest topokaardist (1:50000). Leht O-35-66 Kambja, 1999. a.



### 3. Kõrgusandmete mõõdistusviisid

Kõrgusandmete täpsuse määrab paljuski nende saamiseks kasutatud mõõdistusviis. Selleks et paremini mõista reljeefiandmete vigade põhjusi, suurust ning iseloomu, on kõigepealt toodud lühike ülevaade Nõukogude Liidu aegsete topograafiliste kaartide valmistamiseks kasutatud mõõdistusviisidest, milleks olid aerofototopograafiline (stereotopograafiline, kontuur-kombineeritud) ja mensulmõõdistamine (Topograafilise mõõdistamise eeskiri 1974). Sellele järgneb ülevaade LiDARi kõrgusandmete saamisest ja täpsusest.

#### 3.1. Mensulmõõdistamine

Mensulmõõdistamist hakati siinmail rakendama alates 18. sajandist ja see leidis väga laialdast kasutamist, omades suurt osatähtsust kuni aerofotomõõdistamisele üleminekuni 20. sajandi kahekümnendatel aastatel. Edaspidi kasutati mensulit täiendavalt vaid seal, kus mingisugustel põhjustel ei olnud võimalik või kasulik rakendada aerofotomõõdistamist (Nazarov 1952).

Mensulmõõdistamine ehk graafiline mõõdistamine seisneb joonte ja nurkade horisontaalprojektsioonide määramises ja kandmises plaanile. Seda tehti vahetult maastikul. Mensulmõõdistamisel kasutati joonestuslauda (mensulit), mis pidi olema varustatud riistadega horisonteerimiseks (nivelleerimiseks), tsentreerimiseks, orienteerimiseks ja viseerimiseks. Mensul koosneb lauast (mille peale kleebiti paber), statiivist (mille abil instrument seati üles maapinnale) ja alusest (mis oli vajalik planšeti ning statiivi ühendamiseks). Mensuli tsentreerimiseks kasutati harki, orienteerimiseks bussooli või kompassi, horisonteerimiseks vesiloodi. Viseerimisseadeldisena tarvitati joonestuslual kas dioptritega alidaadi või kippreeglit (Tšebotarjov 1959).

Reljeefi joonestamiseks pidi teostama mõõdistused kõigist iseloomulikest selgesti nähtavatest reljeefipunktidest, et pärast oleks naaberpunktide vahele võimalik interpoleerida horisontaale. Vilunud mõõdistajad joonestasid reljeefi palju silma järgi, toetudes võrdlemisi väikesele määratud kõrgusega punktide arvule (Nazarov 1952).

Mensulmõõdistamise täpsust on iseenesest hinnatud küllaltki suureks. Suurimaks summaarseks teoreetiliseks veaks, millesse on arvestatud tsentreerimis-, horisonteerimis-, viseerimis-, orienteerimis- ja joonestusvead, on määratud 8'. Mõõdistamisel mõõtkavas 1:10000 on suurimaks lubatud mõõdetavaks kauguseks 300 m (Nazarov 1952).

Mensulmõõdistamise suurimaks miinuseks on selle keerukus. Töö on aeganõudev ja mahukas, lisaks nõuab see teostajatelt palju teadmisi ning suurt füüsilist vastupidavust.

## **3.2. Aerofototopograafiline mõõdistamine**

Aerofotograafiline mõõdistamine seisneb maapinna pildistamisel lennukilt või mõnelt muult õhusõidukilt (Liba 2005). Selle eeliseks võrreldes eelnevalt laialt kasutuses olnud mensulmõõdistamisega on kiirus, kontuuride detailsem ja täpsem mõõdistamine, lisaks saab pilte teha kohtadest, kuhu ligipääs mõõdistajale on piiratud või lausa võimatu (Nazarov 1952).

Aerofotodel esineb moonutusi, mis on tingitud põhiliselt fotode kaldenurgast, reljeefist, fotomaterjali deformatsioonist, optilistest faktoritest jm. Eelnevalt loetletud moonutuste kõrvaldamiseks või vähendamiseks lubatud suurusteni kasutatakse transformeerimist (Liba 2005). Transformeeritud aerofotode tööpindade kokkumonteerimisega saadakse etteantud kaardimõõtkavas ja kaardilehe formaadis maapinna terviklik fotokujutus – fotoplaan (Maaamet 2003).

Aerofototopograafilisel mõõdistamisel saadi maastiku reljeef aerofotodel ja fotoplaanidel kas stereotopograafia või mensuli kasutamisel. Aeropildistamine fotoplaanide valmistamiseks toimus mõõtkavas 1:25000 – 1:30000 ja reljeefi stereomõõdistamiseks mõõtkavas 1:12 000 (Potter 1995a).

Reljeefi joonistamisel fotoplaanide ja aerofotode järgi põhjustavad probleeme tumedad laigud, mida tekitavad tihedad metsad ja maastiku reljeefist tingitud varjud jm (Tšebotarjov 1959).

### **3.2.1. Stereotopograafiline mõõdistamine**

Osaliselt kattuvatest aerofotodest saab tugipunktide abil stereofotogramm-meetria seadmeid kasutades moodustada kattuva ala kohta maastiku stereomudeli. Stereomudeli abil saab mõõta maastikupunktide kõrgusi ja joonestada horisontaale (Liba 2005).

Stereomudeli püst-ja külgasendi nihutamine, kallutamine, väänamine ja mõõtkava vead võivad stereotopograafilisel kaardistamisel põhjustada eelnevalt kirjeldatud vigu 1.2, 1.3 ja 1.4 (Imhof 1982).

### **3.2.2. Kontuur-kombineeritud mõõdistamine**

Aladel, kus reljeefi stereomõõdistamine polnud võimalik, kasutati kontuur-kombineeritud viisi (Potter 1995a). Sellisel juhul teostati reljeefi mõõdistamine mensuliga fotoplaanil. Et enamiku punktide asukohad sai fotoplaanilt välja lugeda, pidi peamiselt tegelema vaid punktide kõrguse määramisega, mis vähendab oluliselt välitööde mahtu (Nazarov 1952).

### 3.3. LiDARi andmestik

Alates laserskaneerimise algusest 1960. aastal on sellest saanud kõige efektiivsem meetod kõrge resolutsiooniga maapinna kolmemõõtmeliste andmete kogumiseks. LiDAR (*Light Detection And Ranging*), kasutatakse veel väljendit LADAR (*Laser Detection and Ranging*), on aktiivne kaugseiretehnika, mida võib läbi viia nii õhusõidukilt (aerolaserskaneerimine) kui maapinnalt. Aerolaserskaneerimise tööpõhimõte seisneb aja mõõtmisel, mis kulub väljasaadetud laserimpulsil teekonna läbimiseks pinnani ja tagasi (Large & Heritage 2009).

Aerolaserskaneerimise (ALS) süsteem koosneb kolmest põhilisest osast: GPS-süsteem (antenn ja vastuvõtja), IMU (*Inertial Measurement Unit*) ja laser koos skaneerimismehhanismiga. Lisaks on lennuk varustatud arvuti, andmeserveri jm kaasneva elektroonikaga, ning vajalik on vähemalt ühe maapealse GPS-baasjaama olemasolu. Mõõdistamiseks on oluline GPS-signaali ühendus 5–6 satelliidiga (Baltsavias 1999).

Maa-ametis on teostatud mõõdistusi LiDAR-seadmega Leica ALS50-II. Laserpunktide asukoht on arvatud L-EST97-süsteemis, punkti kõrgused on arvatud süsteemi BK77, kasutades geoidi mudelit EST-GEOID2003 (Maa-amet 2012). Praeguseks on peaaegu terve Eesti territooriumi kohta olemas LiDARi andmed, mis on saadud 2400 m kõrguselt (puudub Venemaa piiriäärne ala Kagu-Eestis). Lisaks on tiheasustusaladel teostatud mõõdistusi 1500 m kõrgusel (Maa-amet 2012).

#### 3.3.1. LiDARi andmete täpsus

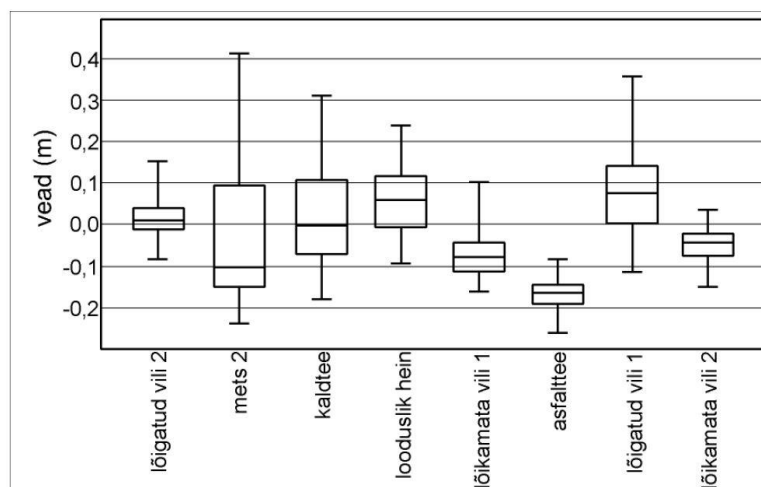
LiDARi andmete täpsust mõjutavad kolm põhilist tegurit: kauguse määramise täpsus, mis sõltub lasersüsteemist; asukohatäpsus, mis sõltub GPS- süsteemist; orientatsioonitäpsus, mis sõltub INS-süsteemist (Baltsavias 1999). GPS-andmed on neist ainukesed, mida kasutaja saab töödelda, võttes välja „halvad satelliidid“ ning kasutades sobivaimat horisondinurka (Vain 2011). Kuna saadud tulemused on tavaliselt WGS84-süsteemis, sõltub lõpptulemus veel geoidimudeli täpsusest ning transformeerimisest kohalikku koordinaatsüsteemi (Baltsavias 1999).

Maa-ametist saadud 2400 m kõrguselt mõõdistatud LiDARi andmete kõrguslik täpsus on vahemikus 0,07–0,12 meetrit (vertikaalne täpsushinnang kontrollmõõtmistel jäi vahemikku +/- 0,34 m). Laserpunkti läbimõõt maapinnal (*illuminated footprint diameter*) on 54 cm (Maa-amet 2012).

Taimestik määrab oluliselt LiDARI andmete kvaliteeti, kuna see takistab laserimpulsi jõudmist maapinnani. Seda, kas viimane tagasihajumine on toimunud maapinnalt või madalama taimestiku pealt, on keeruline öelda. Nii võib tihe pilliroog või võsa takistada laseripulsi jõudmist maapinnale, ning LiDARI maapinna punktid võivad asuda seetõttu „õigest“ maapinnast kõrgemal (Vain 2008, 2011).

Maa-ametist saadud LiDARI andmestik on automaatselt klassifitseeritud. See tähendab et seadme poolt salvestatud kõrguspunktile on automaatselt omistatud väärtus, mis näitab, kas tegemist on maapinna või mõne muu nähtusega (Maa-amet 2012). Maapinna punktide klassifitseerimiseks kasutatakse erinevaid algoritme, mille tulemus sõltub situatsioonist. Osad töötavad paremini nt tiheda taimestiku korral, teised on paremad suurte nõlvakalde muutuste juures (Tinkham jt 2011). Nii on teada, et Maa-ametist saadud andmestiku juures võib esineda kohti, kus järsud nõlvad pole klassifitseeritud maapinnaks (Vain 2011).

LiDARI andmete täpsust metsaaluse reljeefi kirjeldamisel uuris oma bakalaureusetöös Solnask (2008), kasutades võrdlemiseks tahhümeetrilisest mõõdistamisest saadud andmeid. Sellest uurimusest ilmnnes, et vähem erinevusi oli kuusikus ja männikus ning kõige suuremad olid need kaasikus. Põhjalikumalt kasutas välimõõdistusi Vain (2008, 2011) LiDARI andmetest saadud kõrgusmodelite hindamiseks. Erinevused olid väiksemad niidetud heinamaadel ja õuemaal, rohkem probleeme tekitasid tiheda võsastikuga alad ning looduslikud heinamaad (erinevus kuni 100 cm) (Vain 2008). Joonisel 11 on toodud välja välimõõdistuste ja LiDARI andmete võrdlus Emumäe piirkonnas. Suurimad erinevused on metsas, mis erineb tugevalt normaaljaotusest. Heaks indikaatoriks LiDARI andmete täpsuse hindamiseks on asfalttee (Vain 2011).

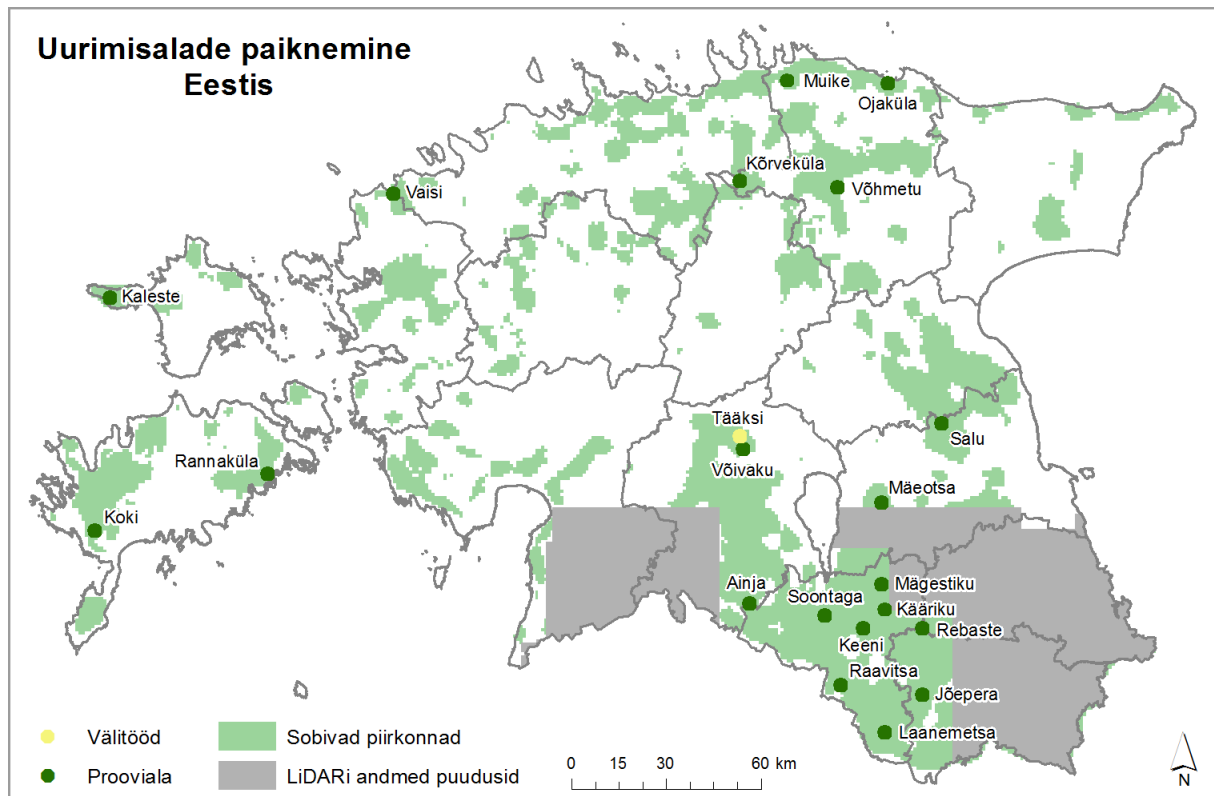


**Joonis 11.** Tahhümeetrilisel mõõdistusel saadud andmete võrdlus LiDARI andmetega Emumäe piirkonnas 2010. aastal (Vain 2011 järgi).

## 4. Andmed ja meetodika

### 4.1. Uurimisalad

Topograafilistel kaartidel kajastuva reljeefi ja LiDARi andmestiku võrdlemiseks valiti 20 ühe ruutkilomeetri suurust ala üle Eesti, mis lähtuvad 1:2000 Eesti Põhikaardi lehtedest (joonis 13, lisa 1). Uurimisala nimi kajastab küla nime, mille territooriumil uuritav piirkond või enamik sellest asub.



**Joonis 12.** Uurimisalade paiknemine Eestis (haldusjaotuse andmed Maa-ametist seisuga 10.02.2013).

Uurimisalade valikuks, samuti hilisemaks andmetötluseks kasutati programmi *ArcGIS v.10*. Alade valikul oli oluliseks tingimuseks see, et need poleks tasased. Tööriista *Line Density* abil leiti piirkonnad, kus reljeefijoonte tihedus on suurem (joonisel 12 kujutatud rohelisega). Selleks kasutati baaskaardi kõrgusjooni. Et alade valik tehti 2012. aasta veebruaris, seadis olulisi piiranguid LiDARi andmete puudumine suures osas Lõuna-Eestis (joonisel 12 kujutatud halliga). Sobilikuks osutunud piirkonda genereeriti 20 juhuslikku punkti, minimaalse vahekaugusega 10 km (*Create Random Points*). Iga punkti ümbrusest püüti leida 5 km raadiuses uurimuse jaoks sobivaim ala. Sobivuse hindamiseks kasutati ortofotosid ning topokaarte. Eelistati metsasemaid (metsaaladel on reljeefi keerulisem kaardistada) ning

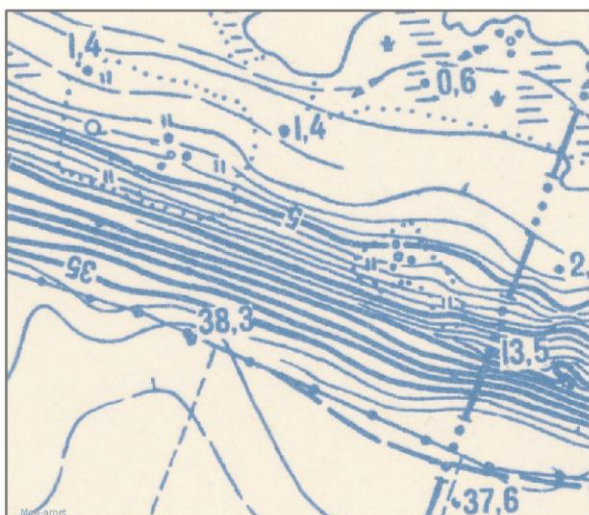
mitmekesisema reljeefiga (eeldati et keerulisema reljeefiga piirkondades võib esineda rohkem vigu) alasad, lisaks jälgiti taimkatte kaardile tuginedes (Eesti atlas lk 18), et valikusse satuks erineva taimkattega piirkondi.

## **4.2. Andmed**

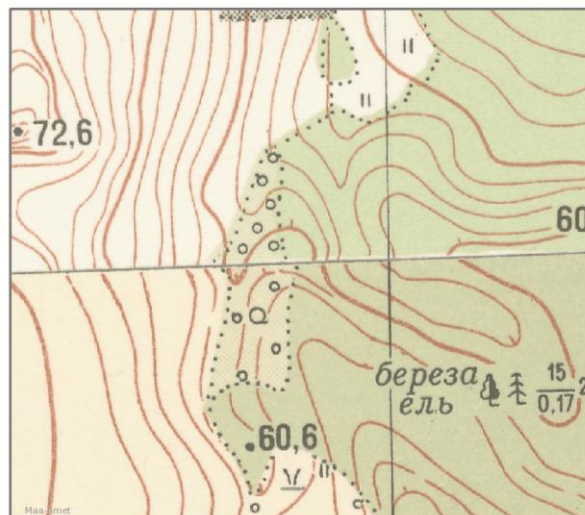
### **4.2.1. Topograafilistel kaartidel kajastatud reljeefi andmed**

Nõukogude Liidu topograafilistelt kaartidelt kõrgusandmete digitaliseerimisel kasutati läbi avaliku WMS-teenuse Maa-ameti ajalooliste kaartide kaardirakendust. Selles kasutati kaarte mõõtkavas 1: 10 000, mis sõltuvalt piirkonnast on kas 1942. a koordinaatsüsteemis (välja antud 1946–1989) või 1963. a koordinaatsüsteemis (välja antud 1966–1987). Käesolevas töös valituks osutunud alasad katvad kaardilehed on välja antud ajavahemikul 1961–1988 (lisa 1). WMS- teenuses on kaardid transformeeritud L-EST ristkoordinaatide süsteemi, mis teeb nende kasutamise mugavaks. Enamik kasutatud kaartidest olid värvilised, mõned sini-valged (joonis 13). Kaartidelt digitaliseeriti kõrgusjooned (põhihorisontaalid, abihorisontaalid, juhthorisontaalid), veekogude kaldajooned, kõrguspunktid, voolujooned. Kõrgusinfo digitaliseerimine kaartidelt oli väga ajamahukas töö. Ühe uurimisala peale (1 km<sup>2</sup>) kulus sõltuvalt reljeefijoonte tihedusest 2,5–4,5 tundi.

Nõukogude Liidu topograafilistelt kaartidelt kõrgusjoonte digitaliseerimisel tekitasid probleeme järsud nõlvad, kus kõrgusjooned üksteisega kokku sulandusid, vahepeal ära katkesid ja siis uuesti välja ilmusid (joonis 13.1). Väga suure nõlvakalde korral olid välja joonistatud vaid juhthorisontaalid. Sellises olukorras pidi hoolsalt jälgima ümbritsevaid kõrguspunkte, et kõrgusjoonte saaksid määratud õiged kõrgused. Katkenud kõrgusjooned ühendati omavahel. Mäeotsa uurimisalal said kokku kaks erineval ajal ja erineva horisontaalide lõikevahega valminud kaarti, kus kõrgusjooned ei ühtinud hästi omavahel (joonis 13.2). Selles ja veel mõnes keerulisemas ettetulnud olukorras püüti reljeefi kaardilt joonistada nii, et see moodustaks ühtse terviku.



1. Ojaküla uurimisala. Kõrgusjooned sulanduvad kokku ja kaovad ära.



2. Mäeotsa uurimisala. Kõrvuti asetsevatel kaardilehtedel ei lähe kõrgusjooned kokku.

**Joonis 13.** Sini-valge ja värviline fragment Nõukogude Liidu 1:10000 topograafilistelt kaartidelt. Kaarte on suurendatud kaks korda (Maa-ameti kaardiserver).

#### 4.2.2. LiDARi andmed

Aerolaserskaneerimise andmed saadi Maa-ametist xyz-failidena (ASCII tekstifail) ühe ruutkilomeetri suuruste kaardilehtedena. Mõõdistused valitud alade kohta on teostatud ajavahemikul 2008–2010 (lisa 1). Väljastatud failid sisaldasid iga mõõdetud punkti kohta järgmisi andmeveerge: punkti klass, x-koordinaat, y-koordinaat, kõrgus merepinnast, laserimpulsi intensiivsus, punkti tüüp.

#### 4.3. Välitööd

Välitööd viidi läbi 2012. aastal ajavahemikul 13.–18. juuni. Profiilimõõdistamisi teostasid õppeaines „LOOM.02.008 Topograafia välipraktika“ osalenud üliõpilased käesoleva töö autori näpunäidete ja valvsa pilgu all (joonis 14). Mõõdistamisel kasutatud töövahendid olid diginivelliiri Sokkia SDL50, 3 m triipkoodiga teleskooplatt, RTK GPS Sokkia GSR 2700 ISX ja väliarvuti Allegro. Profiili mõõdistamisel jaotati nivelleeritav joon osadeks. Sidepunktide asukohtade mõõtmiseks ja nivelleerimise tulemuste sidumiseks geoidimudeliga kasutati RTK mõõdistust. Kahe sidepunkti vahel mõõdeti nivelliiriga iseloomulike reljeefipunktide (vahepunktide) kõrguskasvud ja kaugused sidepunktist. Kokku mõõdistati 13 sidepunkti (lisa 6) ja 138 vahepunkti. Saadud andmete põhjal koostati profiilijoonis pikkusega 435 m.





**Joonis 14.** Üliõpilased profiili mõõdistamas.

#### **4.4. Andmete võrdlemine**

Topograafilistelt kaartidelt digitaliseeritud reljeefi andmete ja LiDARi andmestiku võrdlemiseks loodi neist digitaalsed kõrgusmodelid. Laiemas mõttes on digitaalne kõrgusmodel (*Digital Elevation Model - DEM*) igasugune reljeefi pidev digitaalne esitus ruumis. Kitsamas mõttes käsitletakse DEMi kui rastermodelit. Järgnevalt DEMist rääkides peetaksegi silmas just rastermodelit. Pinna digitaalse esitusviisi tähendusena on kasutusel veel mõisted „digitaalne maapinnamudel“, mille all mõeldakse maapinda kirjeldavat mudelit (*Digital Terrain Model - DTM*) ja „digitaalne pinnamudel“, mis hõlmab endas maapinda koos taimestiku ja hoonestusega (*Digital Surface Model - DSM*).

Levinuimad kõrgusmodelite esitusviisid on TIN ja DEM. TIN (*Triangulated Irregular Network*) on vektoripõhine pinnaesitusviis, mis esitab pinda ebakorrapäraste kolmnurksete tahkudena. See võimaldab asetada kolmnurga tipud algsetele andmepunktidele või nende vahetusse lähedusse, peegeldades niimoodi hästi lähteandmeid (Jagomägi 1999). Sagedaseim viis kolmnurkade ühendamiseks on Delaunay triangulatsioon, mis tähendab, et suvalise kolmnurga tipust läbi tõmmatud ringjoone sisse ei tohi jääda teisi punkte (Krusberg 1998).

DEM-mudeli moodustab korrapärane võrgustik, mille iga silm näitab maapinna kõrgust vastavas punktis. DEM-mudelite saamiseks kasutatakse erinevaid interpoleerimismeetodeid (Jagomägi 1999). Rastermodel on geoinformaatilistes rakendustes sagedaseim reljeefi



esitamise viis. Ka käesolevas töös valiti kõrgusmodelite tüübiks rastermodel, sest kolmnurkmudeli ebakorrapärasus teeb mitmete parameetrite arvutamise ja mudelite võrdlemise keerulisemaks. Edaspidi kõrgusmodelitest rääkides peetakse silmas just rastermodelit. Rastri külje pikkuseks valiti mudelitel kaks meetrit.

Sarnaselt käesolevale magistritööle on kõrgusmudeleid kasutatud erinevast andmeallikast saadud kõrgusandmete võrdlemiseks mitmetes uurimistöodes (Hopkinson jt 2009, Vaze 2010, Karm 2012,).

Digitaalne kõrgusmodel mõjutab oluliselt sellest arvatud parameetreid, seetõttu peaks see võimalikult täpselt kirjeldama reaalselt maastikku. Modelleerimise tulemus sõltub eelkõige algandmetest, mille puudujääke võivad modelleerimisvahendid võimendada (Wilson 2012). Modelleerimiseks on kasutusel mitmeid interpoleerimismeetodeid ja tehnikaid. Valik, millist meetodit kasutada sõltub nii lähteandmete täpsusest ja olemusest kui ka oodatavast lõpptulemusest (Kikas 2005). Interpoleerimismeetodi valik mõjutab tulemuseks saadud mudeli täpsust ja seeläbi mudelist arvatud näitajaid (Straus 2001, Kikas 2005, Wise 2007). Sestap püüti kirjanduse põhjal leida parim lahendus mõlema andmestiku modelleerimiseks.

#### **4.4.1. Samajoontest kõrgusmodeli loomine**

Samajooned on peamine kõrgusmodeli esitusviis paberkaartidel, ent pole kõige sobivam pinna esitamiseks arvulisel kujul. Kõrgusjoonte käänupunktid ei moodusta reljeefi kui välja esinduslikku valimit: mööda kõrgusjoont on andmeid väga palju ja risti kõrgusjoontega on neid liiga vähe (Hutchinson, Gallant 2000). Horisontaalid on eelkõige pinna visualiseerimise vahend, neid üldistatakse ning materjali täpsus kaardi valmimise käigus (ümberjoonistamised, trükkimine) kahaneb (Krusberg 1998). Siiski on see oluliselt odavam paljudest teistest meetoditest ning leidnud seetõttu rohkelt kasutamist (Hutchinson, Gallant 2000).

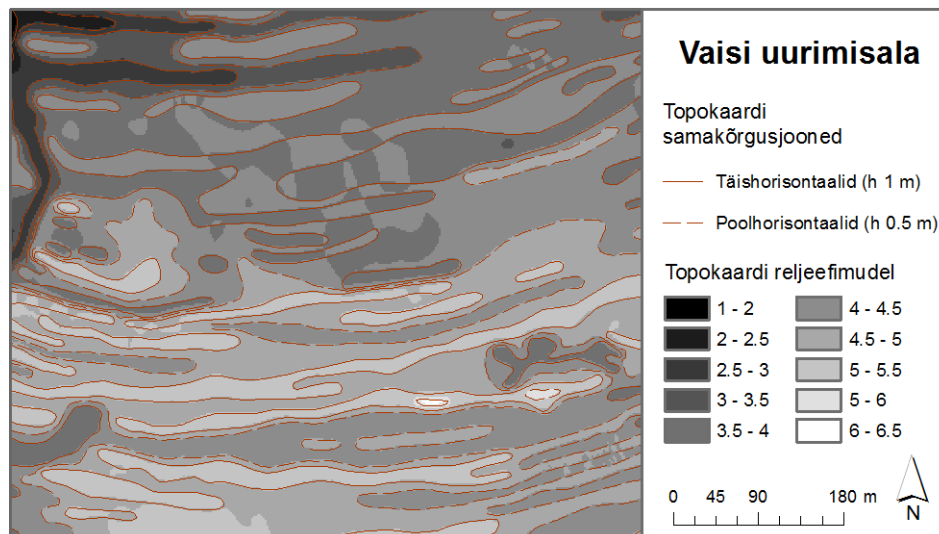
Töös kasutati digitaliseeritud samakõrgusjoontest, kõrguspunktidest, veekogude kaldajoontest ja voolujoontest kõrgusmodeli loomiseks tööriista *Topo-to-Raster*, mis võimaldab luua samajoontest hüdroloogiliselt korrektse kõrgusmodeli. See interpoleerimismeetod kasutab polünoomset pinda (*discrete thin plate spline*), mis on pandud järgima harja ja voolujooni. Meetod põhineb Hutchinson'i (1989) loodud programmil ANUDEM (ArcGIS v.10 Help).

Loodud kõrgusmodelite kvaliteedi hindamiseks kasutati Carara et al. (1997) poolt välja toodud võimalusi:

- algsete kõrgusjoonte läheduses peavad loodud mudelil olema samad väärtused;

- loodud kõrgusmudelil peavad väärtused olema vahemikus, mille määravad seda ümbritsevad samakõrgusjooned;
- kõrgusmudeli väärtused peavad muutuma peaaegu lineaarselt kahe samakõrgusjoone vahel;
- kõrgusmudel peab peegeldama reaalselt pinnakuju;
- vigu tohib andmekogumisse jääda minimaalselt.

Üldiselt peegeldasid valminud mudelid kenasti lähteandmeid. Väiksemaid vigu aitas parandada katkevate pooljoonte pikemaks interpoleerimine ja üksikute kõrguspunktide lisamine. Ühe ala puhul (Vaisi) ei sobinud kasutatud interpoleerimismeetod mudeli loomiseks. Vaisi uurimisalal on topokaardilt joonistatud reljeefijoonte tihedus suur, ent suhtelised kõrguste erinevused on väga väikesed. Tulemuseks saadi kõrgusmudel, mis sisaldas palju vigu (joonis 15). Kuigi kõrgusmudelite modelleerimiseks on võimalik kasutada mitmeid teisigi lahendusi (nt Birgit Kuningas (2010) kasutas Nõukogude Liidu topograafilistelt kaardid saadud kõrgusandmetest mudeli loomiseks edukalt spline interpoleerimismeetodit), otsustati probleemne ala seekord uurimusest välja jätta.



**Joonis 15.** Fragment Vaisi uurimisalast.

Samajoontest loodud kõrgusmudelist rääkimisel kasutatakse edaspidi töös mõistet **topomudel**.

Kõrgusmudeleid luues lõigati neilt välja pinnana kujutatud veekogud (Muike ja Võhmetu uurimisaladel) ja karjäärid (Muike ja Võivaku uurimisaladel). Kumbki töös kasutatud kõrgusandmestik ei sisalda informatsiooni veealuse reljeefi kohta ning karjäärialad pole aktiivse inimtegevuse tõttu võrreldavad. See kahandas kogu uuritava ala pindala 0,3

ruutkilomeetrit. Sama suured alad eemaldati ka järgnevalt LiDARi andmestikust loodud kõrgusmodelilt.

#### **4.4.2. LiDARi andmetest kõrgusmodeli loomine**

Andmete esmaseks töötluks kasutati vabavaralist programmi *LAStools*. Tööriista *txt2las.exe* abil loodi igast uurimisalast las-formaadis fail, mis on andmemahult oluliselt väiksem ja seda on mugav importida teistesse GIS-programmidesse. Tööriista *lassort.exe* abil eraldati andmetest maapinnapunktid (klass 2 – maapind ja klass 8 – maapinna hõrendatud punktid). Kõrgusmodelite loomiseks vajalike maapinnapunktide arv oli sõltuvalt uurimisalast vahemikus 86213–222284 (lisa 1).

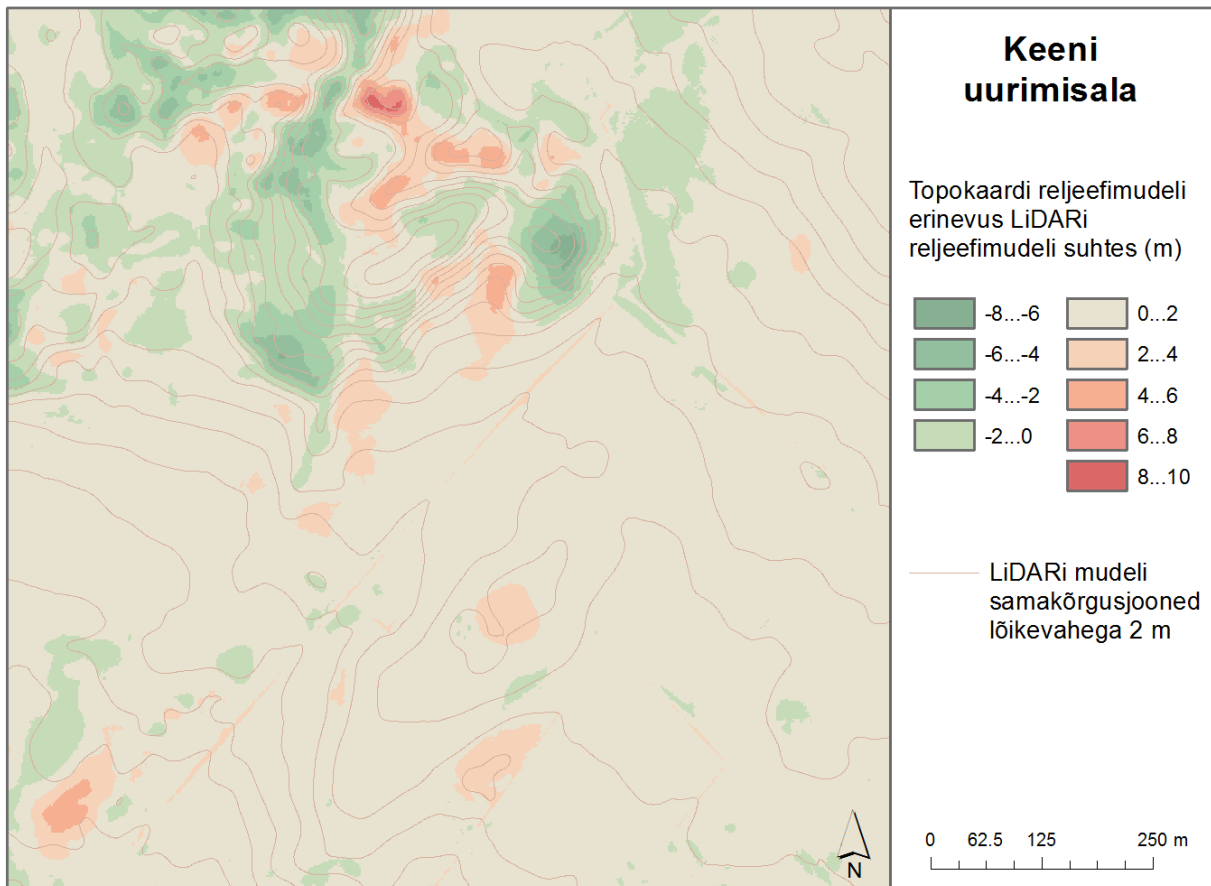
Edasi kasutati mudeli loomiseks tarkvara *ArcGIS v.10*. Tööriista *LAS to Multipoint* abil imporditi LAS-failid uude geoandmebaasi ja neid kasutati *Terrain*-tüüpi mudeli loomisel. *Terrain*-tüüpi mudel on olemuselt vektoripõhine hierarhiline reljeefiesitus, mis on sobilik suurte andmekogudega töötamiseks, nagu seda on LiDARi andmestik (*ArcGIS v.10 Help*). Mudeli loomiseks arvutati tööriista *Point File Information* abil igale alale keskmine kõrguspunktide vaheline kaugus. Edasi interpoleeriti *Terrain*-tüüpi mudelist tööriista *Terrain to Raster* abil rastermudel, kasutades selleks lähima naabri (*Natural Neighbour*) meetodit.

LiDARi andmetest loodud kõrgusmudelist rääkimisel kasutatakse edaspidi mõistet **LiDARi mudel**.

## 5. Kõrgusandmete võrdlemine ja analüüs

### 5.1. Kõrguselised erinevused

Mudelite kõrguserinevuste tuvastamiseks lahutati topomudelist tööriista *Raster Calculator* abil LiDARi mudel. Tulemuseks saadi rasterkiht, kus positiivsed väärtused tähistavad kõrgemaid kohti topomudelil ja negatiivsed väärtused kõrgemaid kohti LiDARi mudelil (joonis 16).



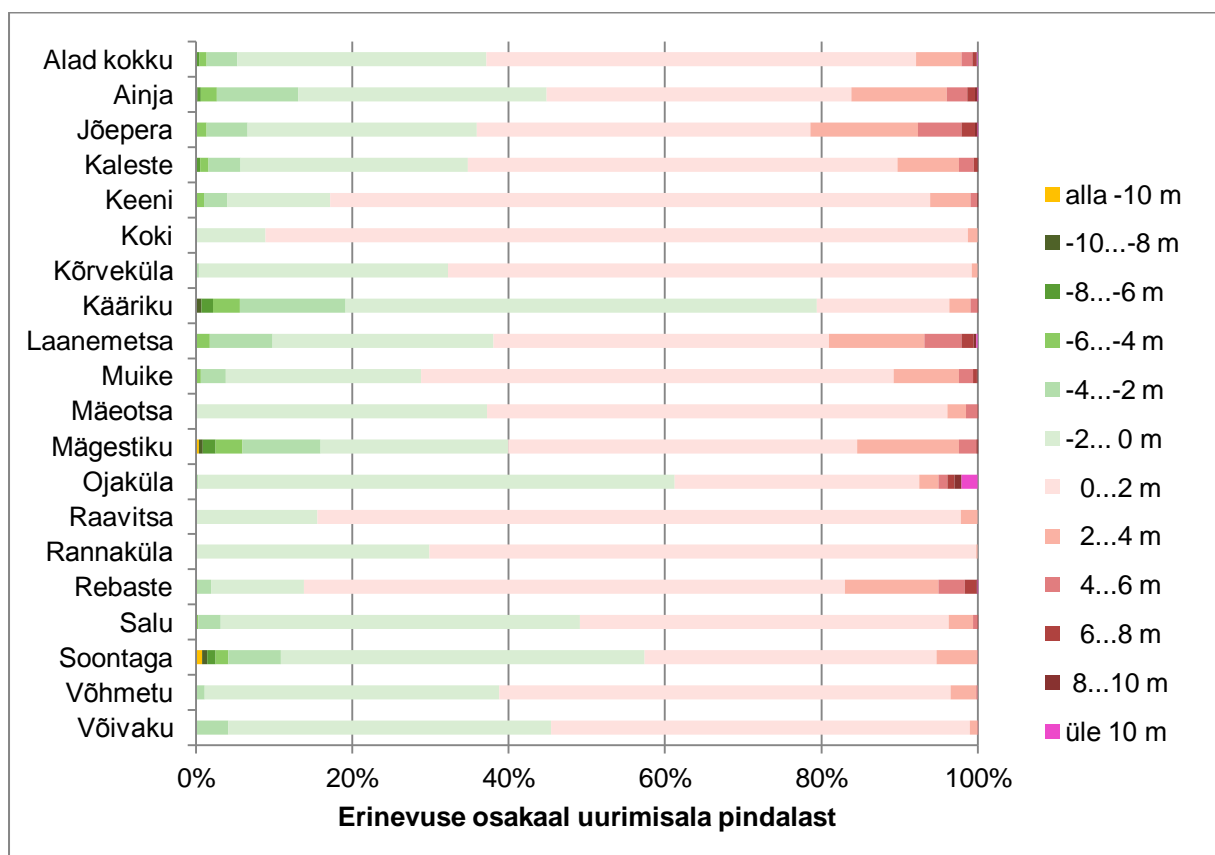
**Joonis 16.** Topokaardi kõrgusmudeli erinevus LiDARi mudeli suhtes koos LiDARi mudeli samakõrgusjoontega (h 2 m) Keeni uurimisala näitel.

Sellisel mudelite kõrgusväärtuste võrdlemisel võivad ka väikesed pinnavormide vahelised horisontaalsuunalised nihked põhjustada mudelitel väga suuri erinevusi vertikaalsuunas, eriti kui on tegemist järskude nõlvade ja suurte suhteliste kõrgustega. Seetõttu toob loodud kõrguserinevuste rasterkiht lisaks kõrguserinevustele välja piirkondi, kus pinnavormid erinevad asukoha ja kuju poolest.

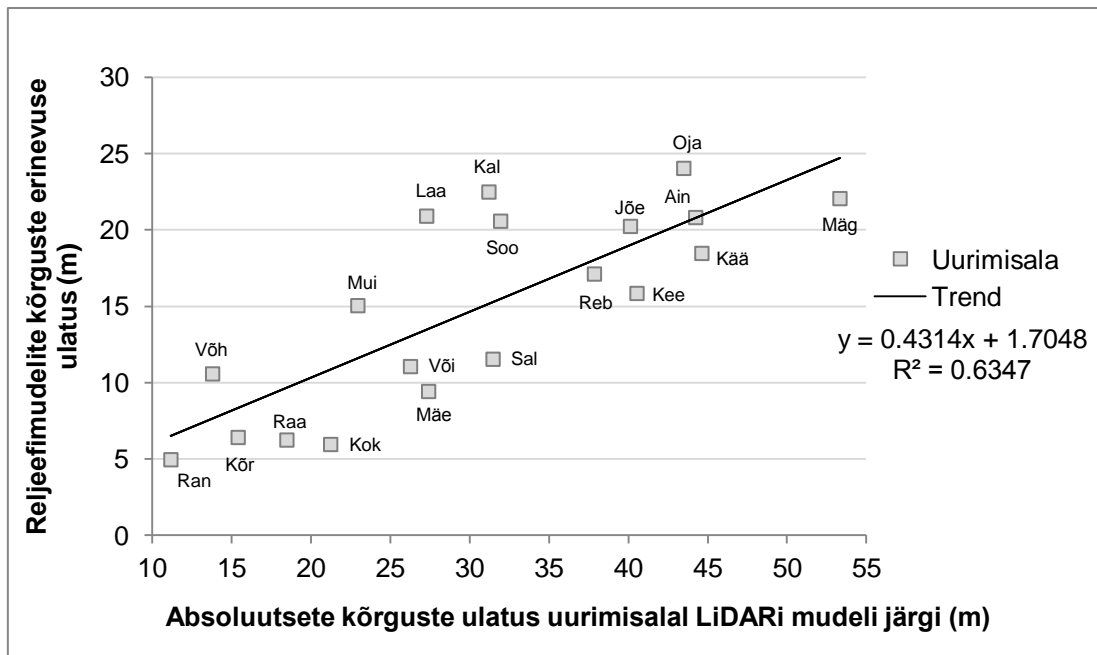
Üle kõigi uurimisalade on topokaartide põhjal saadud kõrgusmudel LiDARi mudelist keskmiselt 0,29 m kõrgem (lisa 2). Kõige kõrgem on topomudel LiDARi mudeli suhtes

Rebaste uurimisalal (keskmiselt 1,09 m), kõige madalam Kääriku uurimisalal (keskmiselt 1,01 m). Topomudel on süsteemselt madalam kolmel uurimisalal (Kääriku, Ojaküla, Soontaga), ülejäänud aladel on olukord vastupidine (joonis 17). Kui vaadata kõrguste kõikumist mudelitel, mis on suurimad Ojaküla uurimisalal (ulatus 24,04 m) ja väikseimad Rannaküla uurimisalal (ulatus 4,96 m), selgub et suurema absoluutsete kõrguste ulatusega uurimispiirkondades esineb mudelite omavahelises kõrguste võrdluses rohkem erinevusi (joonis 18, lisa 3).

Kõigil uurimisaladel jääb enamik erinevuste väärtusi (68,60–99,76%) vahemikku -2...+2 m (joonis 17, lisa 2). LiDARi mudelist kõrgemat topomudelit illustreerib hästi 0...2 m väärtuste suurem osakaal, kuna see klass ei sisalda suuri pinnavormide erinevusi. Absoluutväärtuse poolest üle 2 m suurusi kõrgusväärtuste erinevusi esineb kõige rohkem Mägestiku (31,40%), Ainja (29,27%), Laanemetsa (28,82%) uurimisaladel. Sellised suured kõrgusväärtuste erinevused uurimisaladel ei peegelda erinevusi ainult pinnavormide kõrguses, vaid ka nende kujus ja asukohas. Rannaküla uurimisalal on taolisi kõrgusväärtuste erinevusi kõigest 0,24%. Rannaküla on üsna tasane uurimisala ja absoluutsete kõrguste kõikumine on uurimispiirkonnas väike, sestap ei saagi seal esineda väga suuri kõrgusväärtuste erinevusi.



**Joonis 17.** Topokaardi kõrgusmudeli erinevus LiDARi kõrgusmudeli suhtes uurimisaladel.

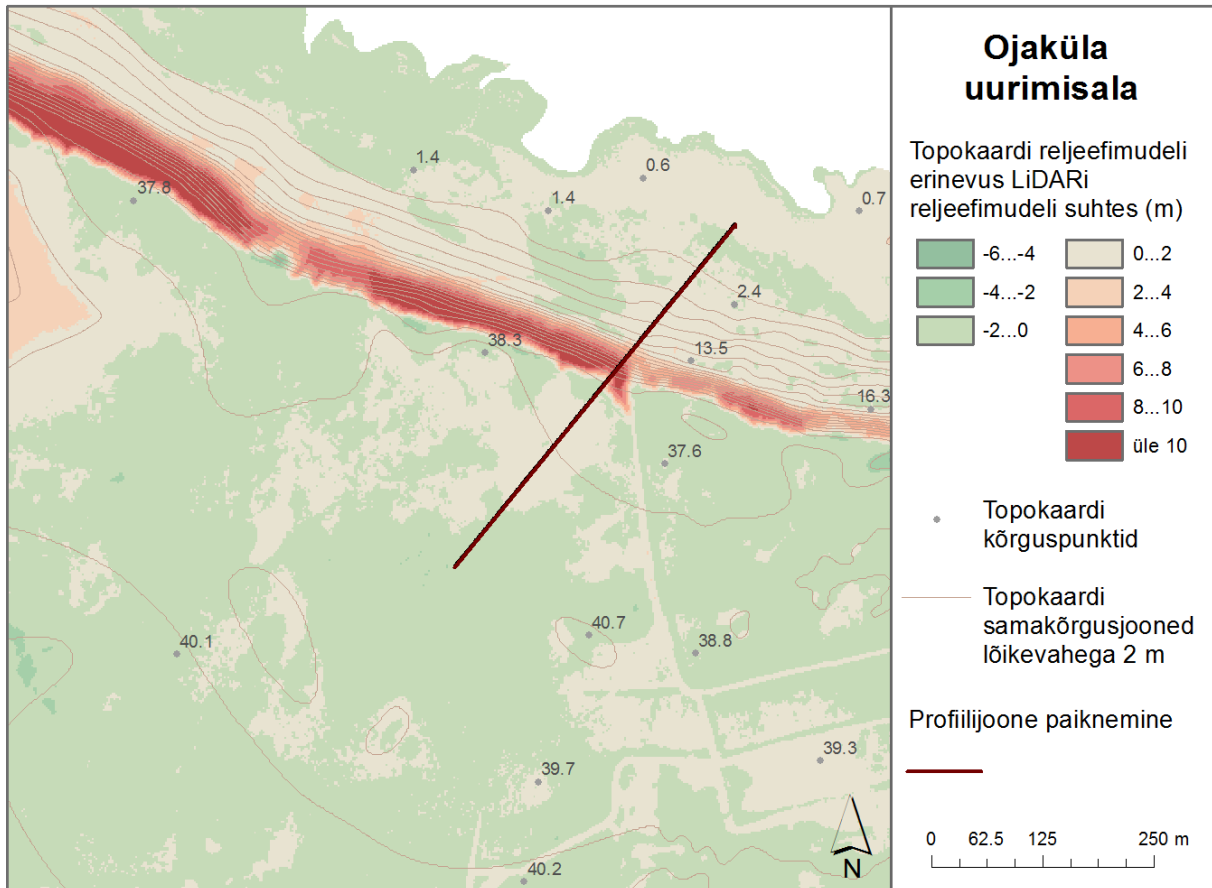


**Joonis 18.** Reljeefimudelite kõrguste erinevuse ja absoluutsete kõrguste ulatuse (LiDARi mudeli järgi) omavaheline seos uurimisaladel.

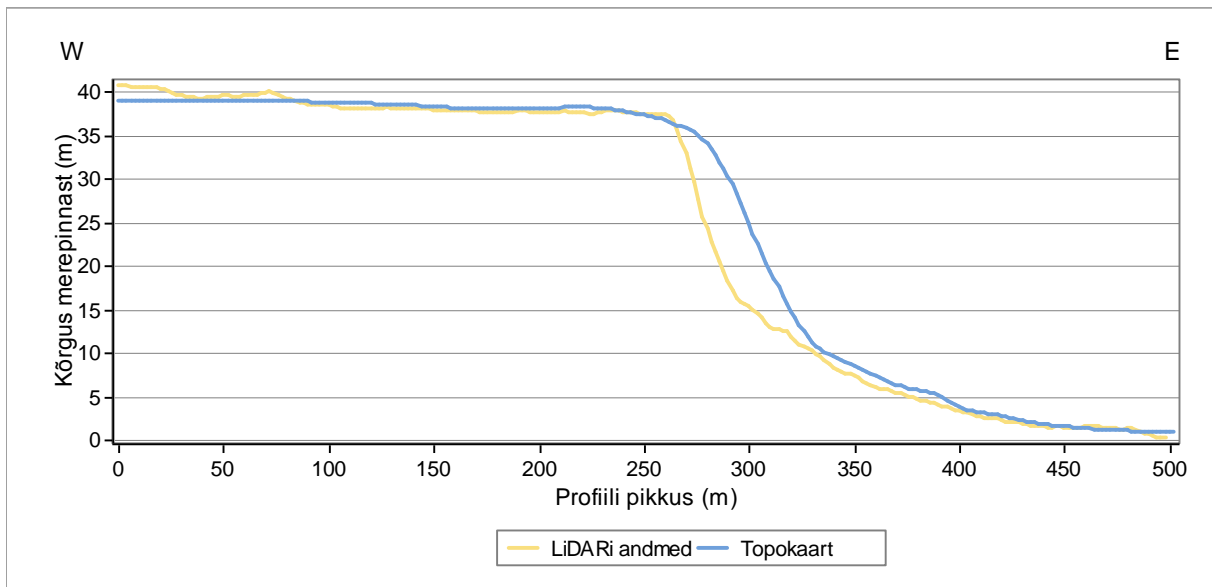
### 5.1.1. Suurte kõrguserinevuste põhjused

Mudelite kõrguste võrdlemisel eristus kolm uurimisala, kus esineb teistest piirkondadest rohkem suuri kõrgusväärtuste erinevusi. Positiivseid ekstreemseid (üle 10 m) kõrgusmudelite erinevusi asub kõige rohkem Ojaküla uurimisalal (2,09%), negatiivseid Soontaga (0,80%) ja Mägestiku (0,39%) uurimisaladel (joonis 17, lisa 2).

Ojaküla uurimisalal on suurema erinevuse põhjuseks piirkonna põhjaosas asuv hääbunud pank. Tegemist on Põhja-Eesti klindi osaga, mis kuulub Lääne-Viru klindilõiku. Järsu nõlva ülemine osa on reljeefimudelitel paarkümmend meetrit nihkes (joonis 19, joonis 20). Tasane ala klindi ülemises ja alumises osas läheb mudelitel üsna hästi kokku. Seega võib erinevuste põhjuseks lugeda topokaardi väiksemat asukohatäpsust. Ülejäänud alal on mudelite vahelised erinevused väikesed. Ojaküla on üks neist kolmest uurimisalast, kus LiDARi mudel on topomudelist valdavalt madalam.



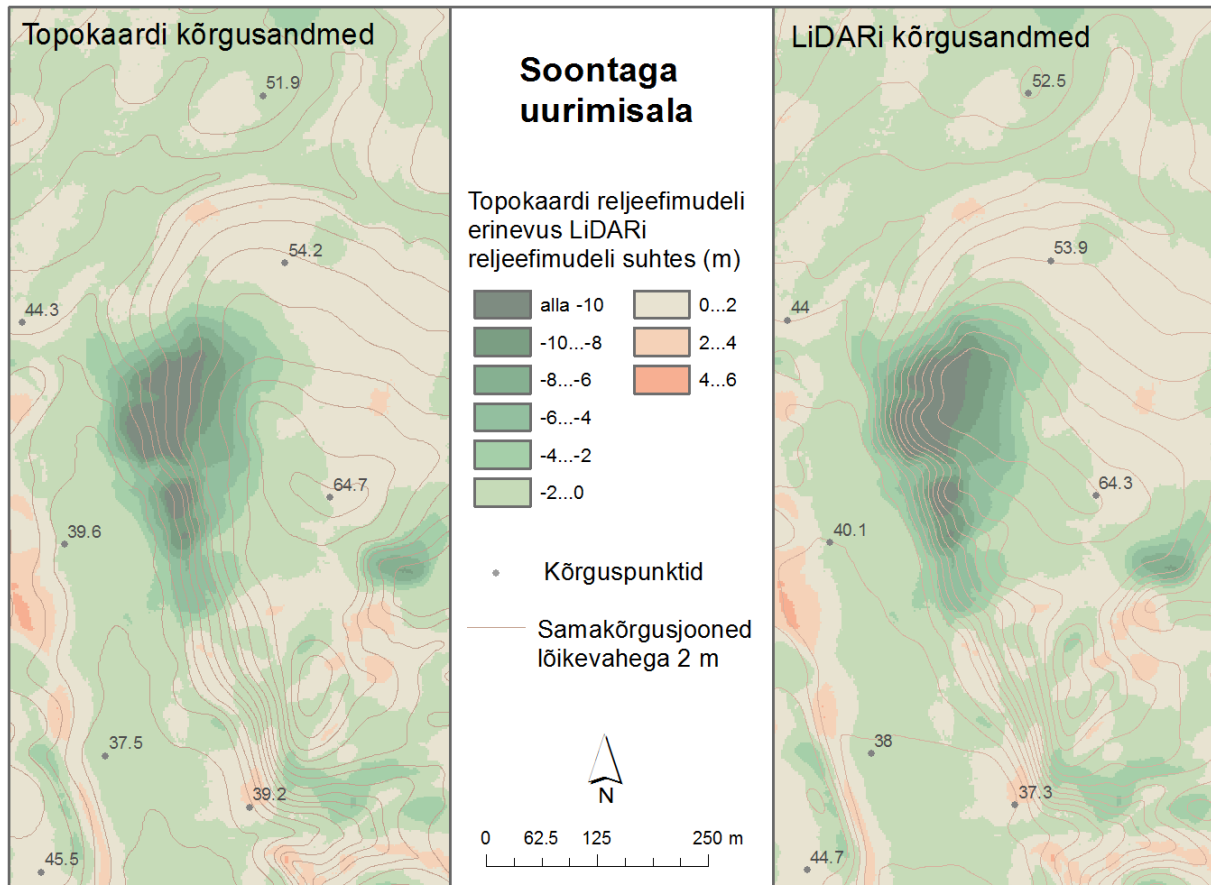
**Joonis 19.** Ojaküla uurimisala. Topokaardi reljeefimudeli erinevus LiDARi reljeefimudeli suhtes koos topokaardi samakõrgusjoonte ja kõrguspunktidega ning profiiljoone asukoht.



**Joonis 20.** Ojaküla uurimisala profiiljoonis (asukoht joonisel 19).

Soontaga uurimisalal asuvat suure erinevusega kõrgusmodelite (üle 10 m) piirkonda on kujutatud joonisel 21. Ka siin on Ojaküla uurimisalale sarnaselt reljeefimudelid omavahel

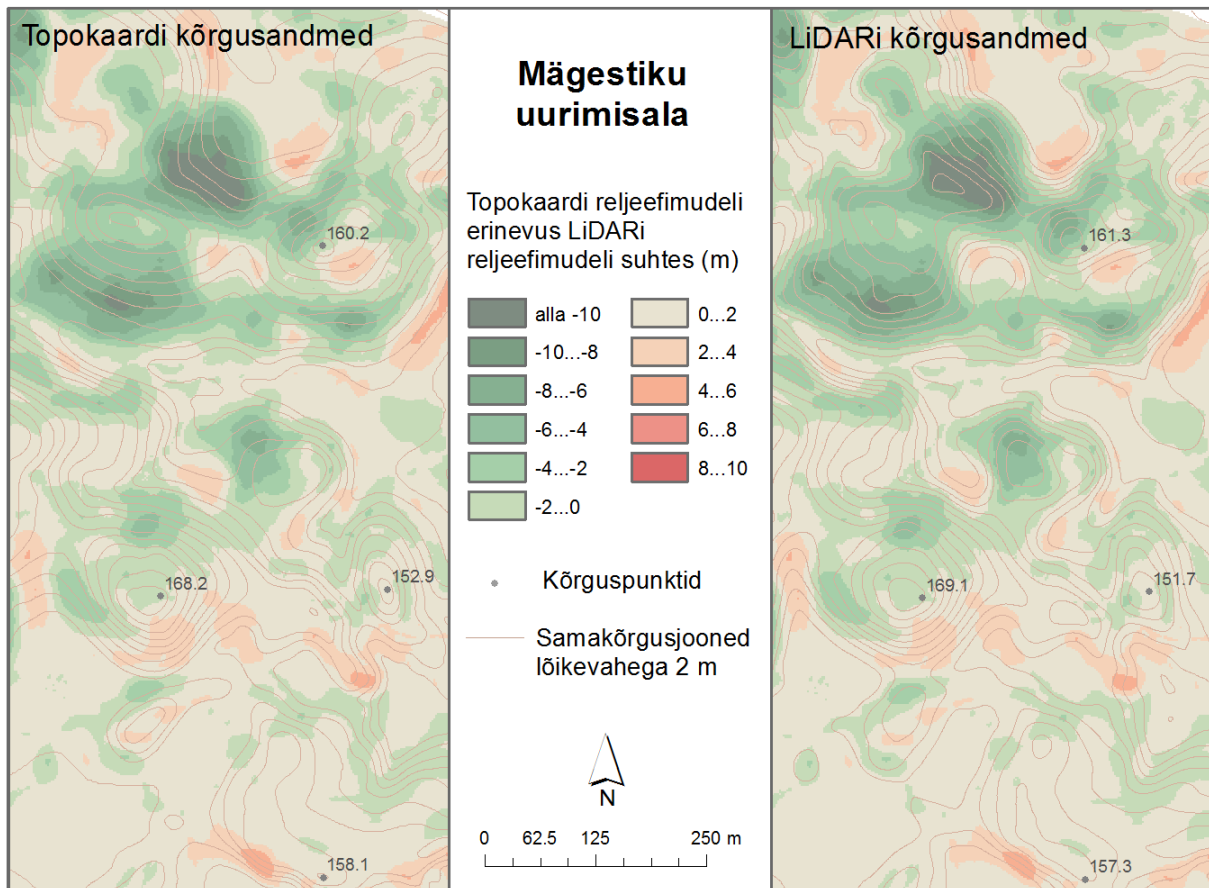
nihkes, peale selle esinevad suured erinevused vaadeldava künka kujus. LiDARi mudeli järgi on erinevuste piirkonnas asuv nõlv järsem ja künkalagigi ulatub loodesuunas märgatavalt kaugemale. Lisaks puuduvad topomudelilt mitmed väikesed orvandid, mis LiDARi mudelil esile tulevad. Soontaga on samuti üks neist kolmest uurimisalast, kus LiDARi mudel on valdavalt topomudelist madalam.



**Joonis 21.** Fragment Soontaga uurimisalast. Topokaardi reljeefimudeli erinevus LiDARi reljeefimudeli suhtes koos samakõrgusjoonte ja kõrguspunktidega.

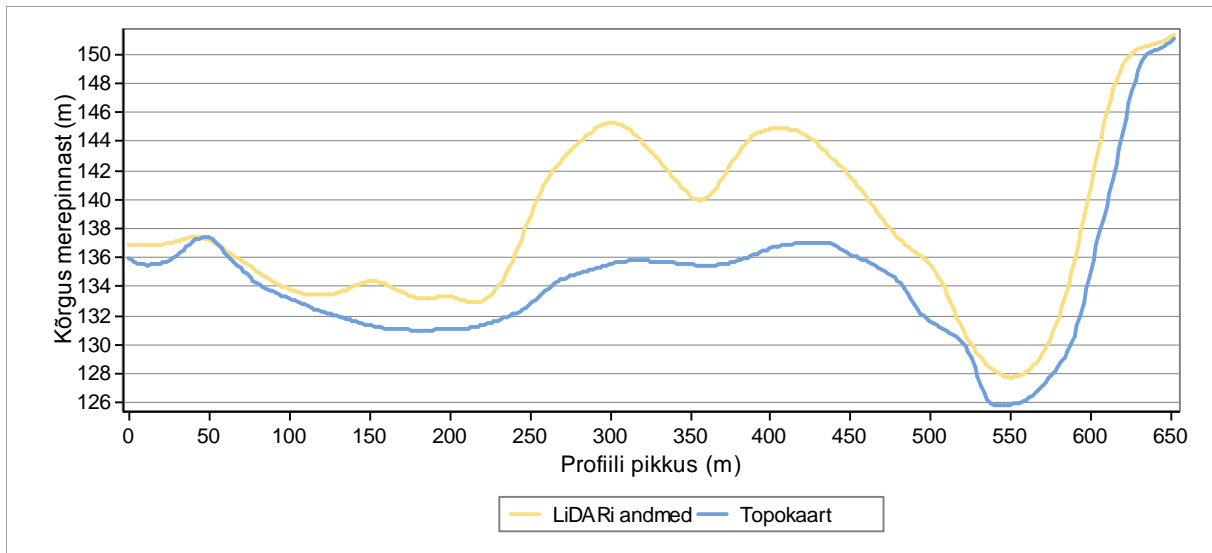
Mägestiku uurimisalal asuv suur kõrgusmodelite erinevus tuleneb eelkõige pinnavormide kuju erinevusest uurimisala põhjaosas (joonis 22). Topokaardi järgi ühe tipuga kungas omab LiDARi andmete järgi kaht tippu ning on olulisel määral suurema ulatusega. Selle probleemse piirkonna pinnavorme on topokaardil valesti kaardistatud.





**Joonis 22.** Fragment Mägestiku uurimisalast. Topokaardi reljefimudeli erinevus LiDARI reljefimudeli suhtes koos samakõrgusjoonte ja kõrguspunktidega.

Eelpool välja toodud kolme näite põhjal selgus, et topokaartidel esineb probleeme asukohatäpsusega ja leidub mitmeid vigu pinnavormide kujutamisel. Süvenedes põhjalikumalt ka teistel uurimisaladel välja joonistunud kõrguserinevustesse, leiti lisaks mitmeid suuri eksimusi pinnavormide kõrguste määramisel. Näiteks on Kääriku uurimisalal ühe künka tipp topokaardil kujutatud üheksa meetrit madalamana kui LiDARI kõrgusandmed näitavad (joonis23).



**Joonis 23.** Profilijoonis Kääriku uurimisalalt.

## 5.2. Taimestiku mõju kõrguste erinevusele

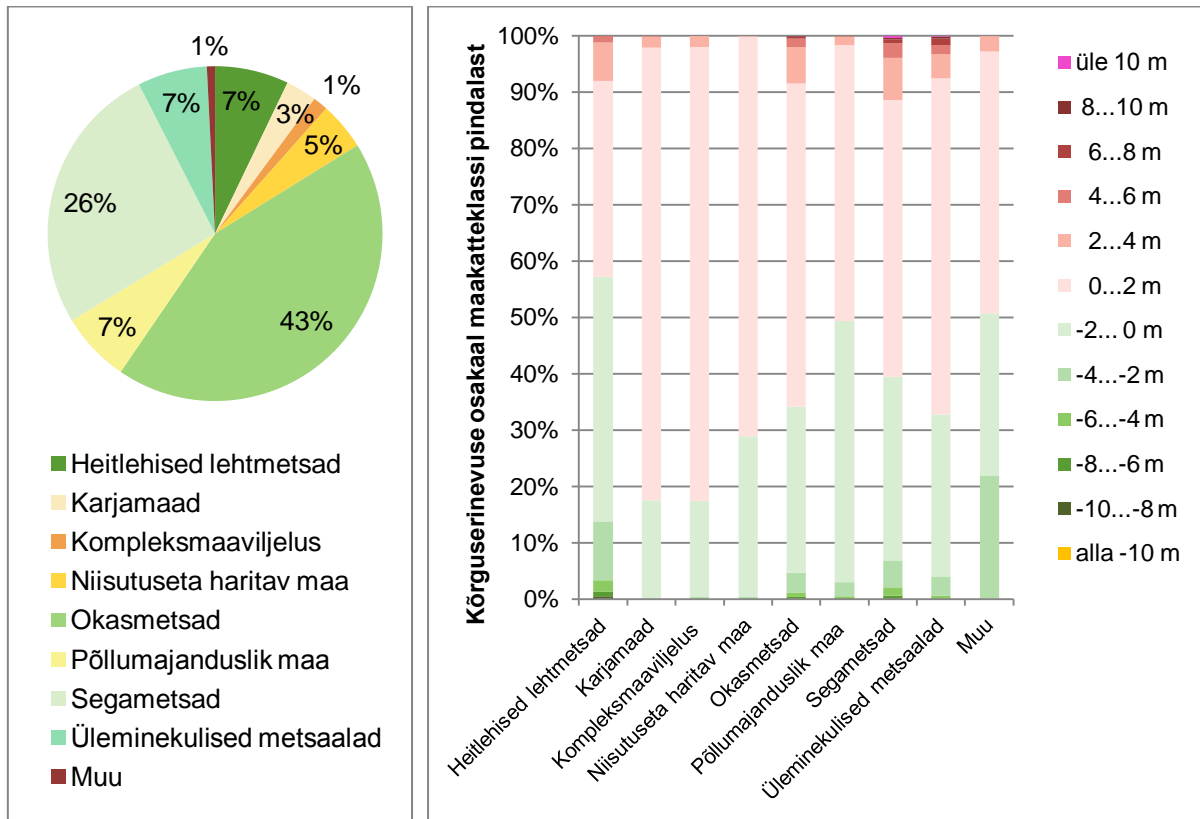
### 5.2.1. CORINE andmete järgi

Taimestiku mõju olulisust kõrguste erinevusele püüti välja selgitada CORINE maakatteklasse kasutades (CORINE 2000 andmed). Maakatteklassid, mis moodustavad uurimisalast alla 1%, ühendati klassi muu (kalda- ja rannikuroostikud; hõredalt hoonestatud alad; loopealsed põõsastikud, nõmm, nõmmraba; puhkealad, pargid, kalmistud). Joonisel 24 ja lisa 3 on maakatteklasside „põllumajanduslik maa (<75%) loodusliku taimkatte osalusega“ ja „kompleksmaaviljelus (haritavat maad > 75%)“ nimetusi lühendatud.

CORINE andmete järgi on enamik uuritava ala pindalast kaetud metsaga (joonis 24, lisa 3), suurima osakaaluga maakatteklass on okasmets (43%). Vaadates kõrguserinevuste jaotumist CORINE maakatteklasside vahel, paistab silma et metsaga kaetud aladel on suuri kõrgusväärtuste erinevusi rohkem kui avatud aladel. Seda võib põhjendada taimestiku segava mõjuga maapinna kaardistamisel. Kui vaadata erinevuste jaotumist erinevate metsatüüpide vahel, eristub vigade suurem osakaal segametsaga kaetud aladel (absoluutväärtuselt üle 2 meetri suuruste kõrgusväärtuste erinevusi 18,38%). Kõige vähem esineb vigu klassis niisutuseta haritav maa (absoluutväärtuselt üle 2 meetri suuruste kõrgusväärtuste erinevuste osakaal 0,56%). Tegu on avatud alaga, mistõttu on seda lihtsam kaardistada. Lisaks on haritavad maad enamasti tasasema pinnamoega, mis samuti lihtsustab reljeefi mõõdistamist.

Maakatteklassis heitlehelised lehtmetsad on LiDARi mudel topomudelist valdavalt kõrgem (erinevalt teistest maakatteklassidest). Tulemus võib olla kokkusattumus, samas võib see

viidata LiDARi andmete väiksemale täpsusele vaadeldavas maakatteklassis (taimestiku punkte on klassifitseeritud maapinnapunktideks).



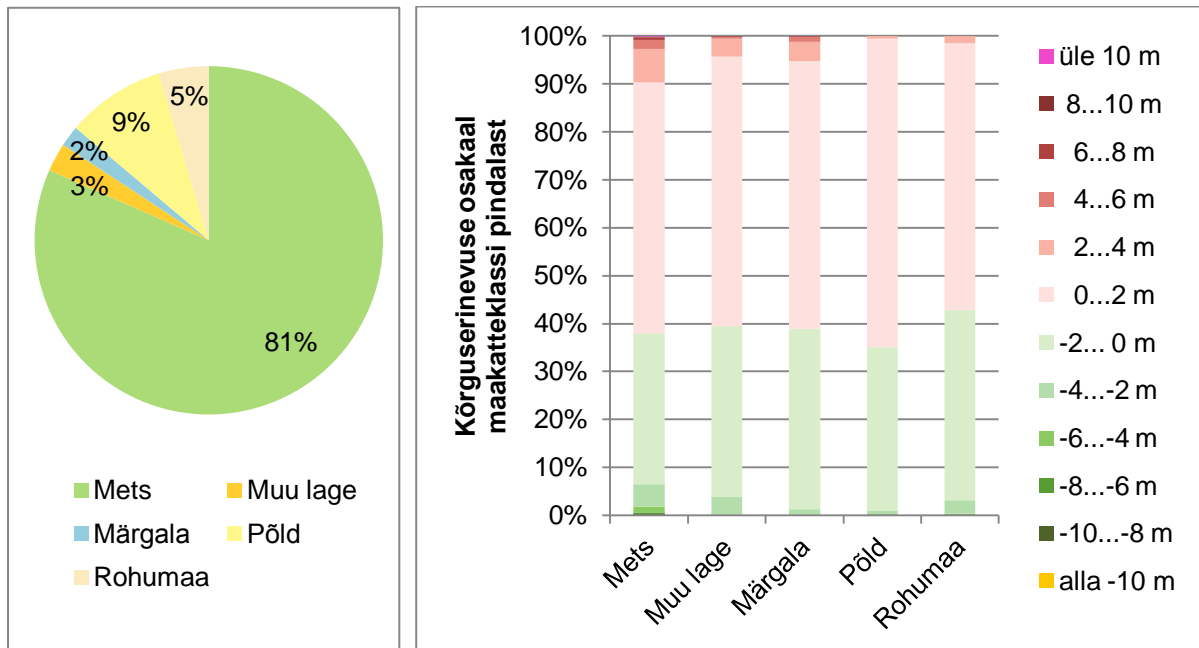
**Joonis 24.** Vasakul CORINE maakatteklasside jaotumine üle kõigi uurimisalade. Paremalt kõrguserinevuste osakaal uurimisaladel CORINE maakatteandmetest lähtudes.

### 5.2.2. ETAK andmete järgi

Järgnevalt vaadeldi taimestiku mõju kõrgusandmete täpsusele ETAK (Eesti topograafiline andmekogu) andmetest lähtudes (allikas Maa-amet, väljavõte 28.04.2011). Maakatteklassid, mille piires kõrguserinevuste jaotumist vaadeldi, on toodud joonisel 25 ja lisa 4. Välja jäeti teed, platsid, õuealad ja hoonestuse alla kuuluvad alad, mida suure inimõju tõttu pole mõtet uurida. Kokku moodustasid need uuritavatest piirkondadest 6 %. Klass märgala sisaldab endas maakatteid madal soo, raba, raba puudega, raskestiläbitav soo. Alla 1% osakaaluga maakatteklass põõsastik liideti klassiga mets.

Kui vaadata suurte kõrguserinevuste jaotumist erinevate maakatteklasside vahel, paistab silma nende suurem osakaal maakatteklassis mets (absoluutväärtuselt üle 2 meetri suurusi kõrgusväärtuste erinevusi 16,13%). Ühtlasi on mets ka kõige suurema osakaaluga maakatteklass uurimisalal (81%). Silma paistab kõrgusandmete suurem täpsus avatud aladel. Kõige parem on see klassis põld, kus on absoluutväärtuselt üle 2 meetri suuruste

kõrgusväärtuste erinevuste osakaal kõigest 1,52%. Kõigis maakatteklassides on topomudel valdavalt kõrgem LiDARi mudelist.



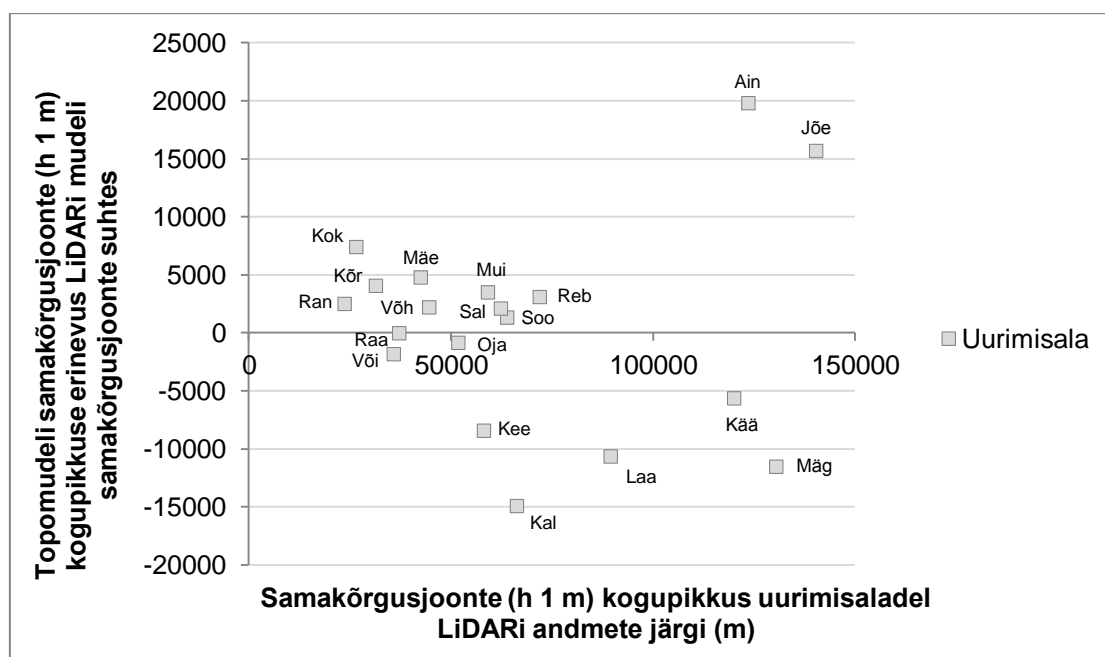
**Joonis 25.** Vasakul ETAK maakatteklasside jaotumine üle kõigi uurimisalade. Paremal kõrguserinevuste osakaal uurimisaladel ETAK maakatteandmetest lähtudes.

### 5.3. Pinnavormide kuju erinevused

Reljeefi kujutamisel on oluline maastiku morfoloogiliste iseärasuste õige kajastamine. Digitaalsete reljeefimudelite põhjal saab leida mitmeid morfomeetrilisi näitajad, millega pinna kuju iseloomustada: nõlva ekspositsioon, nõlvakalle, voolujoonte pikkused, profiili-, tangentsiaalsed, kontuuri- ja pikisuunalised kõverused, valglate ja alamvalglate identifitseerimine, topograafiline indeks jt (Wilson 2012). Morfomeetrilised parameetrid kirjeldavad mingit protsessi, nt kõrgus määrab potentsiaalse energia, nõlvakalle voolukiiruse, tangentsiaalne kõverus viitab koonduvale või lahknevale voolule jne (Straus 2001). Enamik morfomeetrilisi näitajaid on sõltuvuses kõrgusmudeli täpsusest ja lahtusest (Florinski 1998, Vaze jt 2010).

Kahe andmestiku vaheliste pinnakujude erinevuste välja selgitamiseks tuli LiDARi mudeleid üldistada. Esialgsel kujul olid need detailse andmestiku tõttu üleliia karedad, ning ei olnud seetõttu topomudelitega võrreldavad. Kõrgusmudeli puhul omab generaliseerivat rolli nii lahtusvõime muutmine kui ka silumine. Käesolevas töös kasutati teist võimalust, sest vastasel juhul oleks pidanud ka topokaartidest loodud mudelitel piksli suurust muutma. Võrreldavate mudelite saamisel lähtuti, et neist arvatud samakõrgusjoonte (lõikevahega 1

m) summa oleks mudelitel sarnane. Liigsete ja ebanormaalsete konaruste tasandamiseks kasutati lähiumbruses liikuva aknaga algsest kõrgusrastrist keskmise väärtuse arvutamist (tööriist *Focal Statistics*). Akna suurusest sõltub, kui kaugeid naaberpiksleid kasutatakse uue väärtuse arvutamiseks. Topomudeliga võrreldava tulemuse andis 12×12 suuruse akna kasutamine (mudelist arvutatud samakõrgusjoonte pikkused on toodud lisa 3). Mudelite silumisel lähtuti eeldusest, et topokaardid on kõik ühesuguse üldistusastme ja kvaliteediga. Ehkki kasutatud topokaardid on valminud erinevatel aastatel, on nende valmistamisel lähtunud teoorias samadest kaardistamisreeglitest. Tasasemate alade korral andis sellise akna suuruse kasutamine tulemuseks küllaltki sarnase samakõrgusjoonte kogupikkuse, reljeefsemate alade puhul jäid erinevused suuremaks (joonis 26, lisa 3).



**Joonis 26.** Topomudelist ja LiDARI mudelist arvutatud samakõrgusjoonte (h 1 m) kogupikkuse erinevus.

### 5.3.1. Morfoloogiliste erinevustega piirkondade leidmine

Leidmaks üles kohad, kus pinnavormid kahel andmestikul üksteisest erinevad ja hindamaks nende rohkest, kasutati pinna kareduse võrdlemist. Tasastel aladel on pinna karedus väike. Mida liigestatuma reljeefiga piirkond, seda suurem on karedus. Karedusrastreid omavahel võrreldes saab leida piirkonnad, kus mudelid üksteisest erinevad.

Maastiku ebahütluse iseloomustamiseks on kasutusel mitmeid erinevaid mooduseid. Seda saab teha läbi samakõrgusjoonte tiheduse, mis oli käesolevas töös oluline näitaja uurimisalade valimisel. Rohkem võimalusi pakuvad kareduse iseloomustamiseks kõrgusmudelistest leitavad

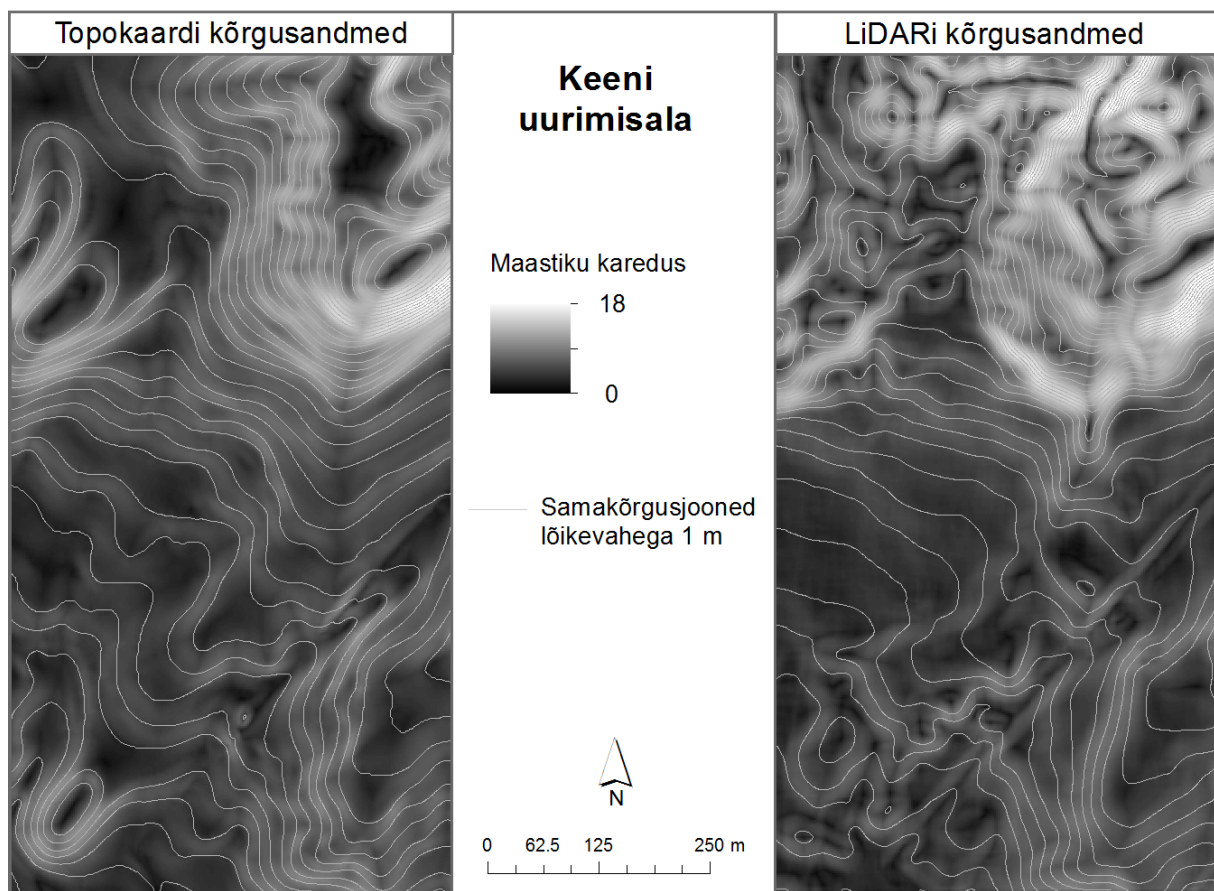
indeksid. Sõltuvalt eesmärgist kasutatakse nende arvutamiseks nõlvakallet, nõlvakalde erinevust lähiümbruses, ekspositsiooni erinevust lähiümbruses, kõrgemat järku kõverusi, kõrguse erinevust lähiümbruses jm. Karedusrastrite arvutused on resolutsioonitundlikud (Cooley 2003).

Käesolevas töös kasutati morfoloogiliste erisuste tuvastamiseks Riley *et al.* (1999) poolt välja töötatud maastiku kareduse indeksit (*Terrain Ruggedness Index*), mis põhineb piksli väärtuse ja kaheksapikslises naabruses selle keskmise väärtuse erinevusel.

Maastiku kareduse indeksi leidmiseks arvutati mudelitest lähiümbruses 3×3 liikuva aknaga algsest kõrgusrastrist maksimaalse (3 × 3<sub>max</sub>) ja minimaalse (3 × 3<sub>min</sub>) väärtusega uued rasterkihid (tööriist *Focal Statistics*). Seejärel leiti karedusraster (tööriista *Raster Calculator* abil), kasutades valemit:

$$\sqrt{(Abs((3 \times 3_{max})^2 - (3 \times 3_{min})^2))}$$

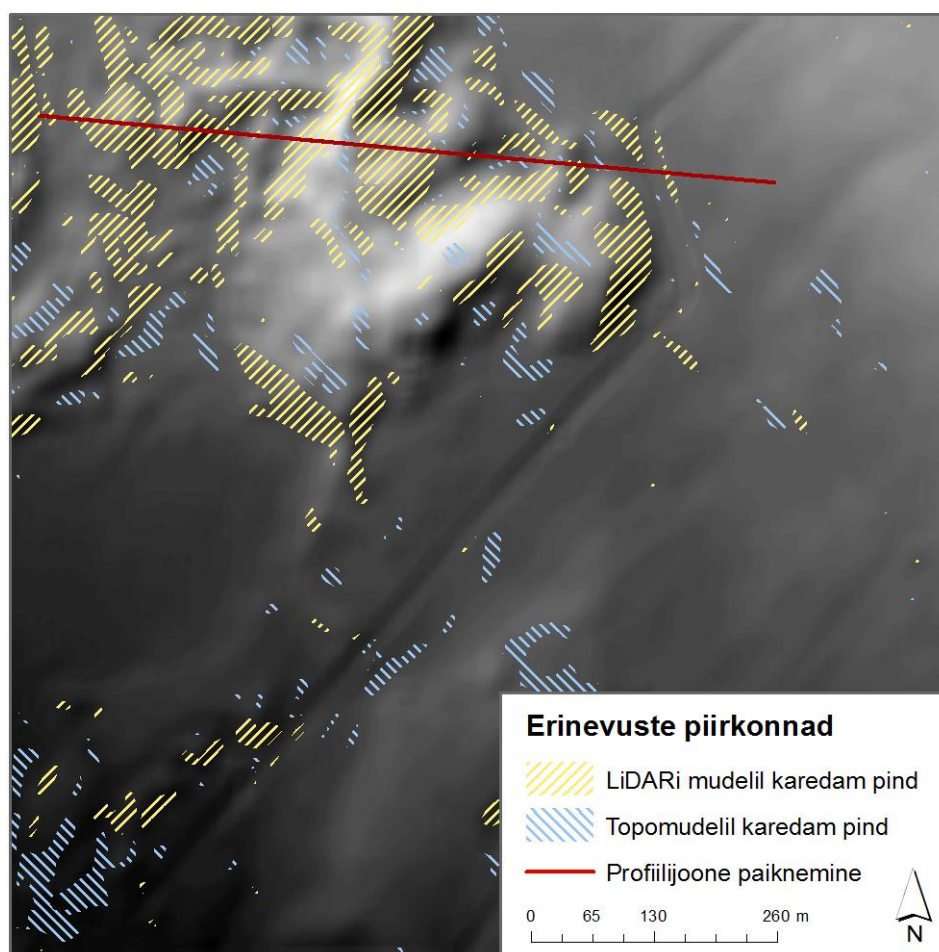
Tulemuseks saadi rasterkiht, kus piksliväärtus 0 tähistab täielikult tasast pinda, ning vastavalt maapinna kareduse suurenemisele suurenevad ka pikslite väärtused (joonis 27).



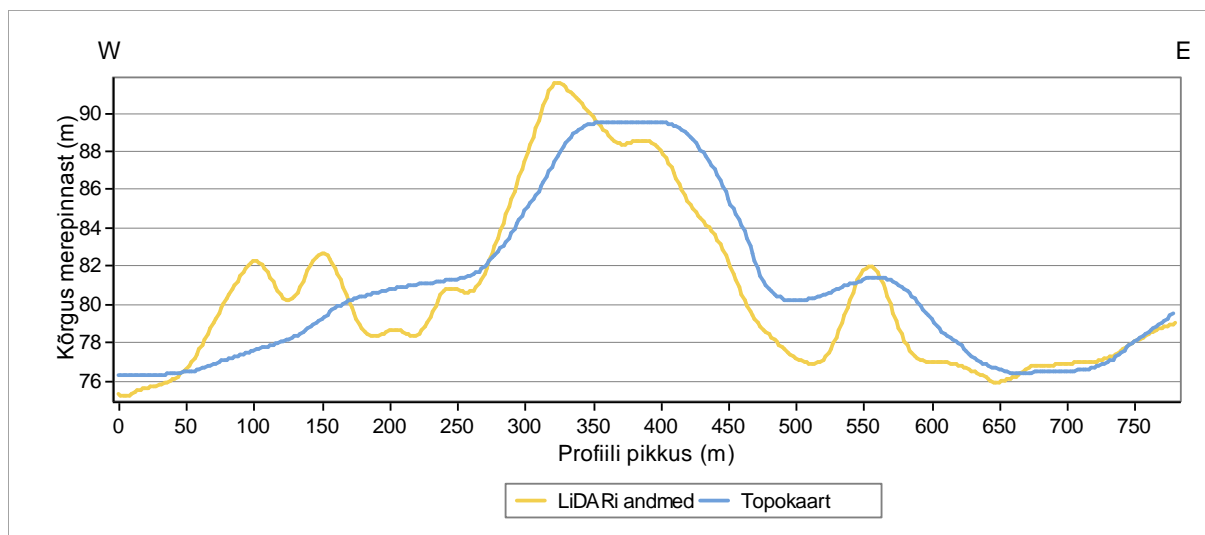
**Joonis 27.** Karedusrastrid koos samakõrgusjoontega (Keeni uurimisala näitel).



Leidmaks üles kohad, kus pinnavormid üksteisest erinevad, lahutati topokaardi karedusrastrist LiDARi andmestiku karedusraster. Tulemuseks saadud rasterkihil omavad karedamad kohad LiDARi mudeli järgi negatiivseid väärtusi ja topomudeli järgi positiivseid väärtusi. Oluliseks peeti erinevust, mille absoluutväärtus on suurem arvust kolm. Peale klassifitseerimist eristusid piirkonnad, kus esineb kahel mudelil olulisi pinnavormide kuju või asukoha erinevusi (joonis 28). Joonisel 29 on toodud profiiljoonis, mis illustreerib joonisel 28 esile tulnud kareduserinevusi. Topokaardi profiiljoonis on üsna üldine ja ei näita kohale iseloomulikke künkaid, mis LiDARi mudelil põhjustavad karedama pinna.



**Joonis 28.** Karedusrastrite järgi leitud piirkonnad, kus mudelitel esineb olulisi pinnavormide erinevusi Keeni uurimisala näitel. Taustaks on LiDARi mudelist reljefivarjutus koos hüpsomeetrilise värvinguga.

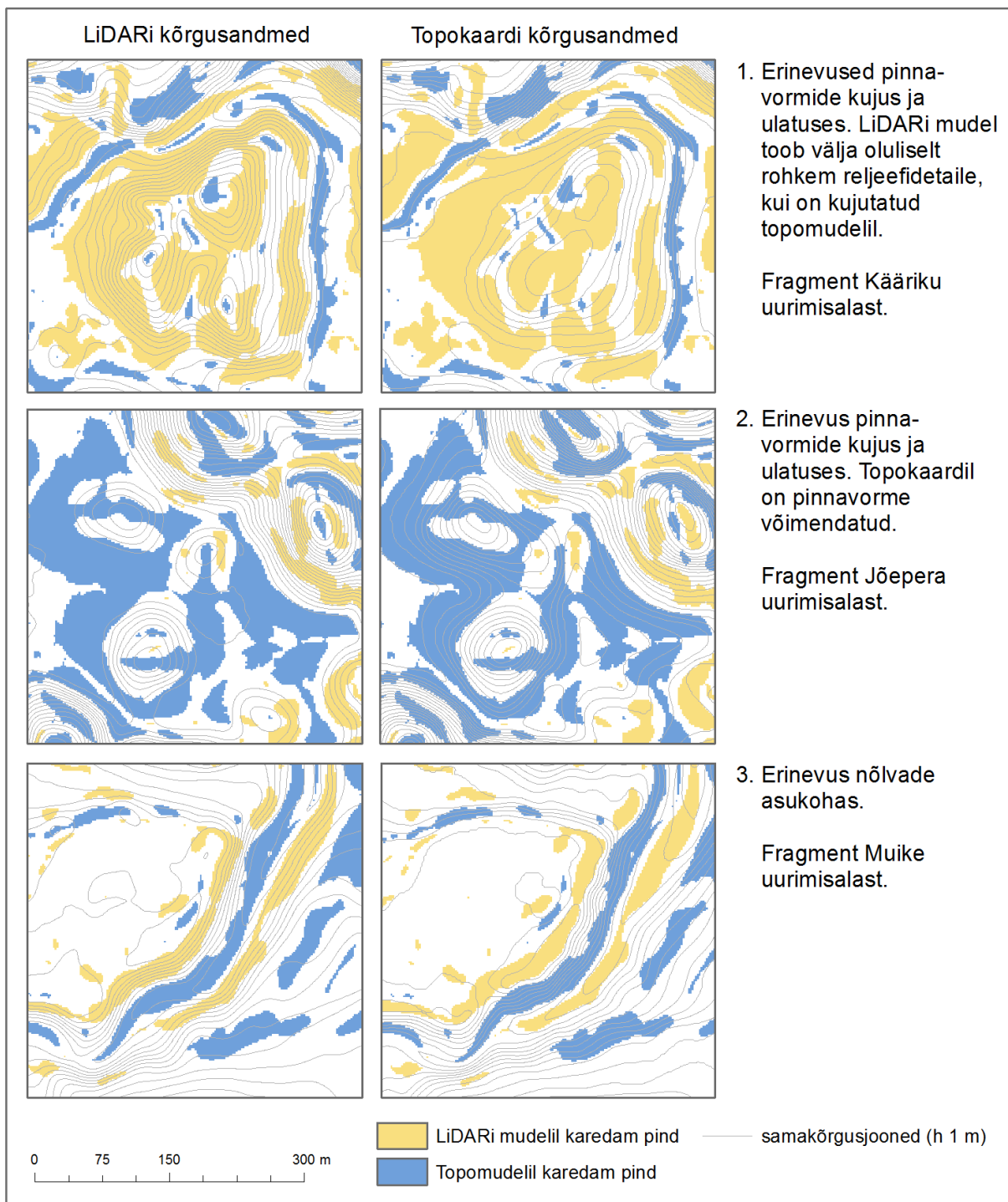


**Joonis 29.** Profiilijoonis Keeni uurimisalalt (asukoht joonisel 28).

Leitud erinevuste piirkondi on kolme tüüpi (joonis 30).

1. Piirkonnad, kus LiDARi mudel on topomudelist karedam (joonis 30.1). Peamiselt põhjusel, et topomudelilt puuduvad mitmed reljefielemendid (künkad, orvid, ninad, lohud), mis LiDARi mudelil selgelt esile tulevad. Lisaks kaju erinevusele iseloomustavad need kohad pinnavormide erinevat ulatust.
2. Piirkonnad, kus topomudel on LiDARi mudelist karedam. Peamiselt põhjusel, et topomudelil on pinnavorme võimendatud (joonis 30.2). Eristusid kohad, kus reljefielemendid on topomudelil kujutatud suuremana kui LiDARi mudelil või need üldse puuduvad viimaselt.
3. Piirkonnad, kus asuvad kõrvuti ribadena eelnevalt välja toodud erinevuste tüübid 1 ja 2, viitavad eelkõige erinevusele nõlvade asukohas (mitte pinnakujus). Selliseid asukoha vigu esineb mudelitel üsna palju ja üldiselt pole need süstemaatilised, s.t et ühel uurimisalal võivad nõlvad olla nihkes erinevates suundades.

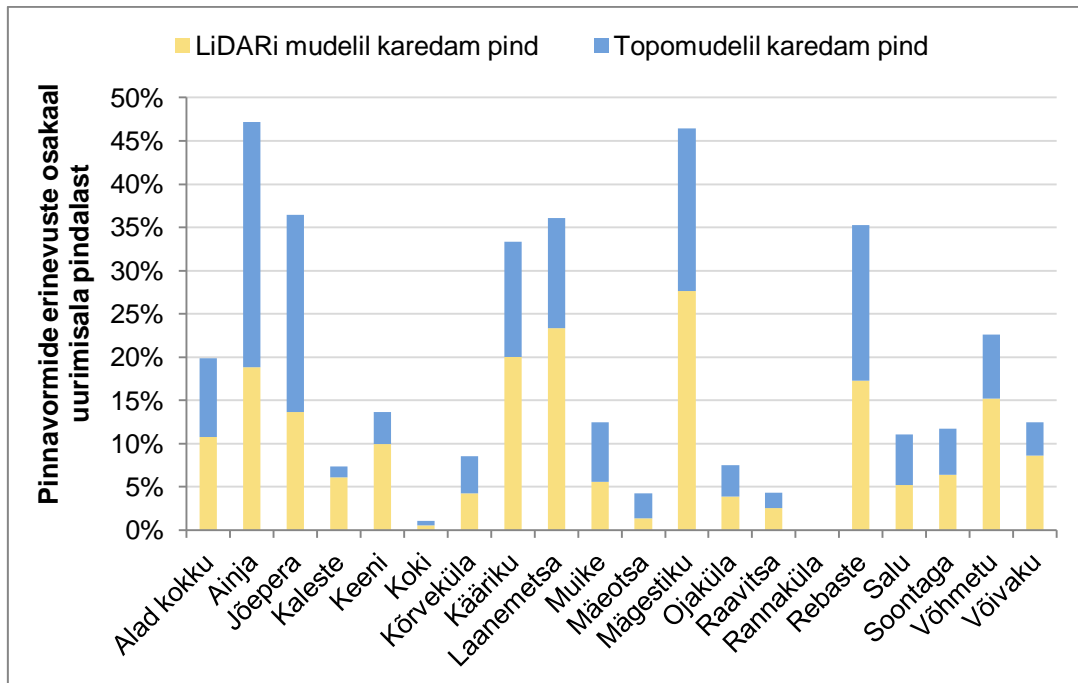




**Joonis 30.** Kareduspindade võrdlemisel saadud erinevuspriirkondade tüübid.

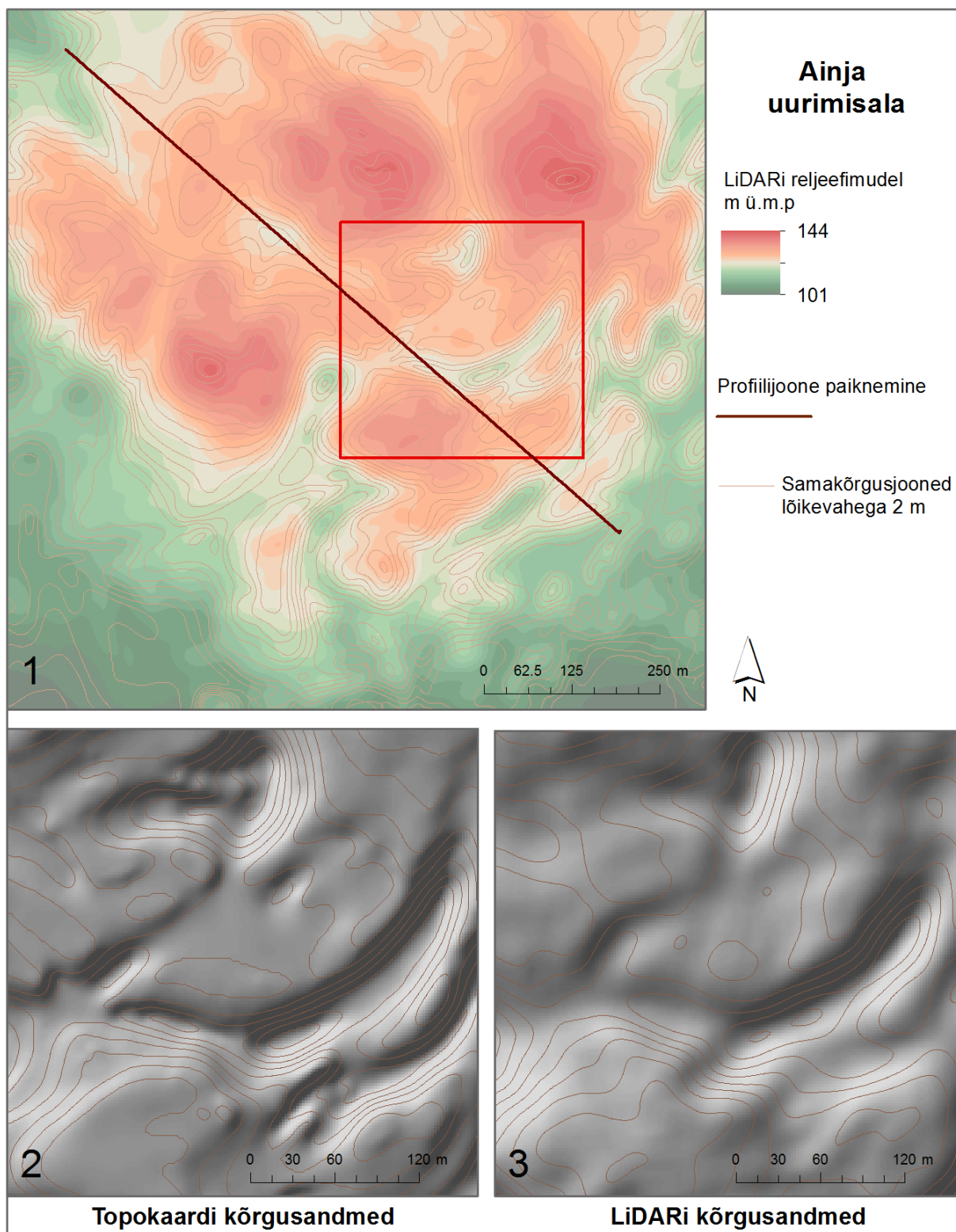
Pinnavormide erinevuste osakaal uurimisala kogupindalast on suurim Ainja (47.22%) ja Mägestiku (46.42%) uurimisaladel, samas kui Rannaküla uurimisalal olulisi erinevusi ei ilmne (joonis 31). Enamikul uurimisaladel on selliseid piirkondi rohkem, kus LiDARi mudeli järgi on pind karedam (topokaardil on reljeefi kujutatud üldisemalt). Silma paistsid kaks ala (Ainja ja Jõepera), kus olukord on vastupidine (topokaardi järgi on pind karedam). Mõlemas piirkonnas on mitmetes kohtades topokaardil reljeefiobjekte võimendatud (sarnaselt joonis

30.2 toodud näitele). Topokaardi suuremale karedusele neil aladel viitasid juba tulemused, mis saadi reljefi joonte kogupikkusi arvutades (joonis 26). Mõlemad alad eristusid teistest piirkondadest oluliselt suurema topokaardilt arvutatud samakõrgusjoonte summaga (võrreldes LiDARi mudeliga).

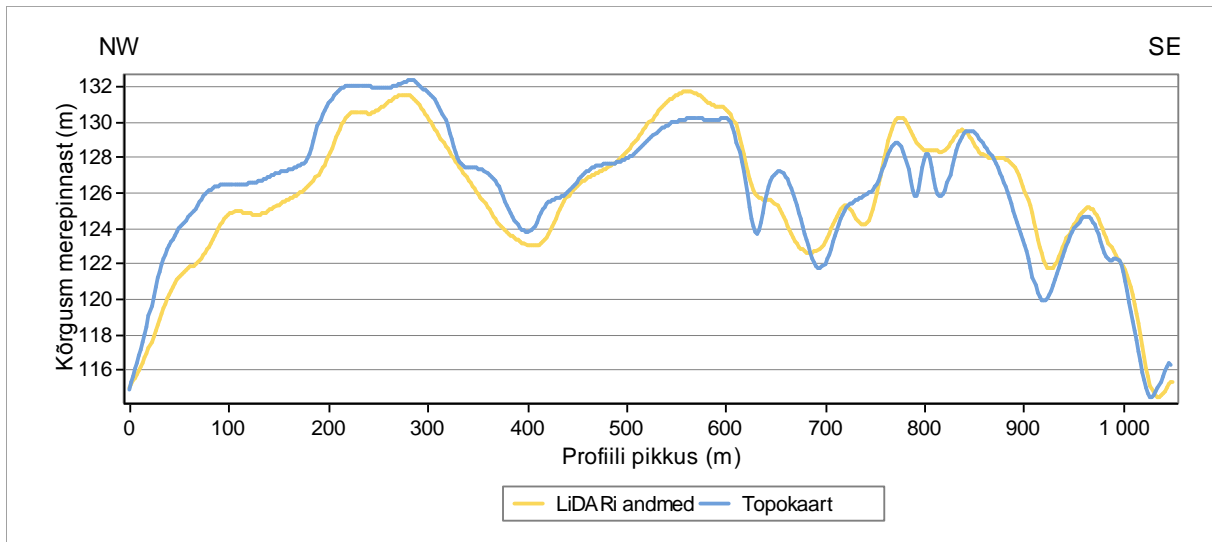


**Joonis 31.** Karedusrastrite võrdlemisel ilmnenu erinevuste osakaal uurimisala pindalast.

Ülevaate pinnakuju erinevusest Ainja uurimisalal annavad joonised 32 ja 33. Visuaalselt hakkab silma, et kuigi suurtes vormides on pinnakujud küllaltki sarnased, esineb palju erinevusi detailides. Ainja uurimisalal on üks topokaardi järgi karedam koht toodud suuremalt joonisel 32 (32.2 ja 32.3) ja selle läbilõige eristatav joonisel 33 (alates kaugusest 500 m). Reljefivarjutusega topomudelil joonistub välja mitu teravat nina, mis kõrvaloleval LiDARi joonisel silma ei paista. Ka mitmete nõlvade suurem järskus piirkonnas on topomudelil visuaalselt jälgitav.

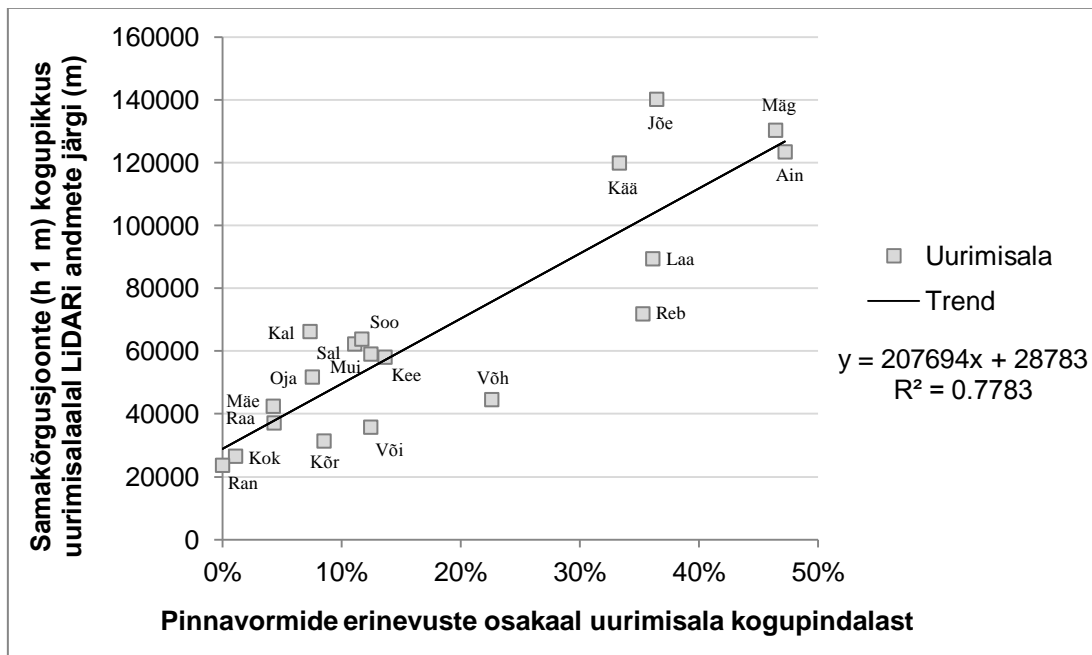


**Joonis 32.** Pinnavormide kuju erinevused Ainja uurimisalal. 1. LiDARi reljefimudel koos topokaardi samakõrgusjoontega ja profiiljoone paiknemine. 2. Fragment Ainja uurimisalalt topomudeli reljefivarjutuse ja samakõrgusjoontega. 3. Fragment Ainja uurimisalalt LiDARi mudeli reljefivarjutuse ja samakõrgusjoontega.



**Joonis 33.** Profiiljoonis Ainja uurimisalalt (asukoht joonisel 31).

Tegelikult näitab juba mudelitest arvatud samakõrgusjoonte kogusumma, kui palju võib piirkonnas esineda vigu pinnavormide kujus. Mida pikem on samakõrgusjoontest arvatud reljeefijoonte kogusumma, seda rohkem esineb piirkonnas vigu pinnavormide kujutamisel (joonis 34). Sisuliselt iseloomustab samakõrgusjoonte kogusumma reljeefi liigestatust piirkonnas. Seega saab väita, et liigestatuma reljeefiga piirkondades esineb vigu rohkem.



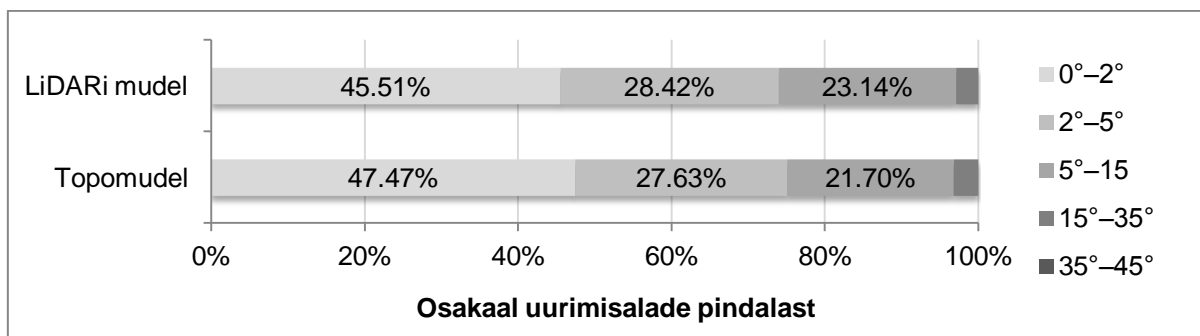
**Joonis 34.** LiDARi mudeli järgi arvatud samakõrgusjoonte (h 1 m) kogupikkuse ja pinnavormide erinevuste osakaalu omavaheline seos uurimisaladel.

### 5.3.2. Nõlvakalde mõju morfoloogiliste erinevuste rohkusele

Nõlv on reljeefielement. Nõlva kallakut saab väljendada nii kraadides kui ka protsentides tõusu suhtena kallaku pikkusesse. Nõlvakallete arvutamiseks kasutati tööriista *Slope*, kus arvutatakse iga piksli kallak seda ümbritsevate piksli väärtuste järgi 3×3 suuruse libiseva aknaga (ArcGIS v.10 Help).

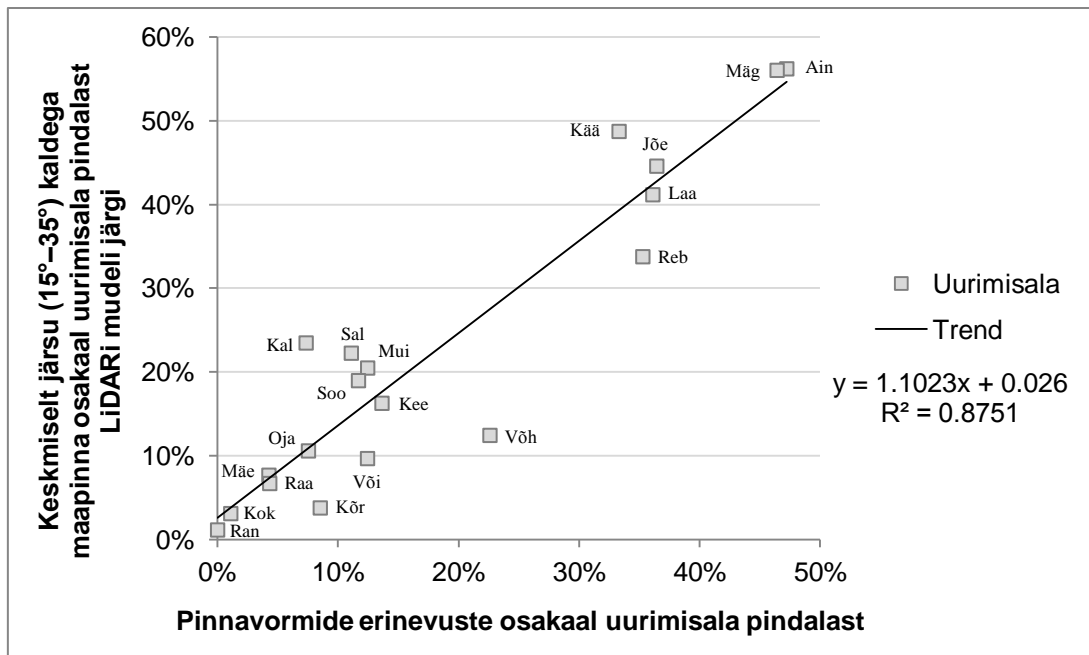
Käesolevas töös kasutati nõlvakallete iseloomustamiseks kraade, mille põhjal loetakse nõlvaks suurema kui 2° kallakusega pinda. Nõlva kaldenurga suuruse järgi jaotatakse neid: 2°–5° väga laused, 5°–15° laused, 15°–35° keskmiselt järsud, 35°–45° järsud, 45°–60°, väga järsud, 60°–80° varingulised, 80°–90° vertikaalsed, üle 90° rippuvad.

Kõiki uurimisalasid koos vaadates oli LiDARi mudeli järgi tasast pinda vähem kui topomudelil ning selle võrra oli laugete ning järsemate pindade osakaal LiDARi mudelil veidi suurem (joonis 35). Saadud tulemus viitab taaskord topomudeli mõnevõrra väiksemale liigestatusele, samuti topomudeli väiksemale vertikaalsele lahutusele.



**Joonis 35.** Erineva kaldega pindade osakaal uurimisaladel.

Keskmiselt järsu kaldega pinna ja morfoloogiliste erinevuste osakaalu omavahelise seose uurimine (joonis 36) viitab topokaardi kõrgusandmete ebatäpsemale kujutamisele liigestatud reljeefiga aladel (piirkondades, kus esineb rohkem keskmiselt järsu kaldega maapinda, tuvastati rohkem pinnavormide morfoloogilisi erinevusi).



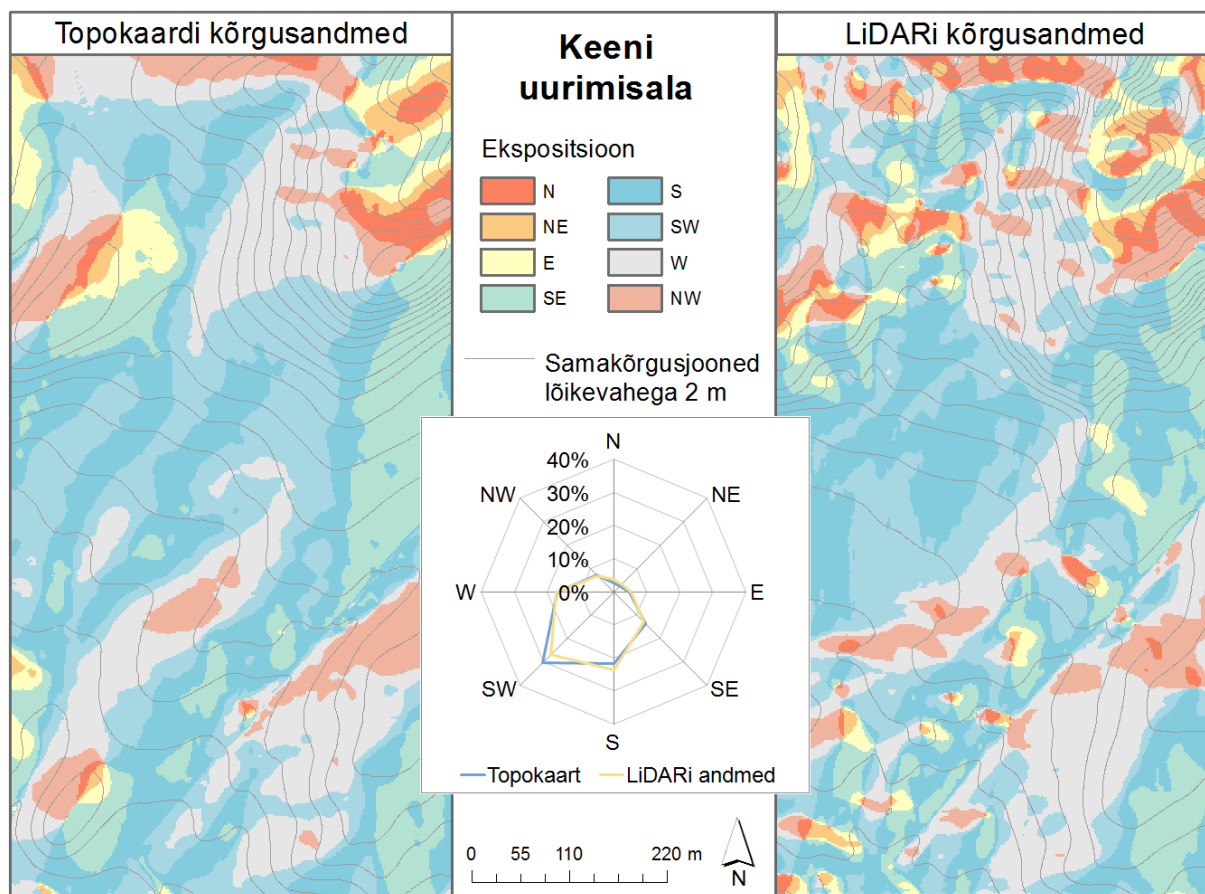
**Joonis 36.** Keskmiselt järsu kaldega maapinna ja pinnavormide erinevuste osakaalu vaheline seos uurimisaladel.

### 5.3.3. Erinevused pinnavormide ekspositsioonis

Nõlva orientatsiooni ilmakaarte suhtes nimetatakse nõlva ekspositsiooniks või ka nõlva aspektiks. Ekspositsiooni arvutamiseks kasutati tööriista *Aspect*, kus iga piksli suund arvutatakse seda ümbritsevate piksli väärtuste järgi 3×3 suuruse libiseva aknaga. Arvutamise aluseks on iga piksli ja tema naaberpikslite suurim negatiivne kõrguste vahe (ArcGIS v.10 Help). Ekspositsiooni tähistatakse kraadides loetuna päripäeva põhjasuunast (0°– 360°).

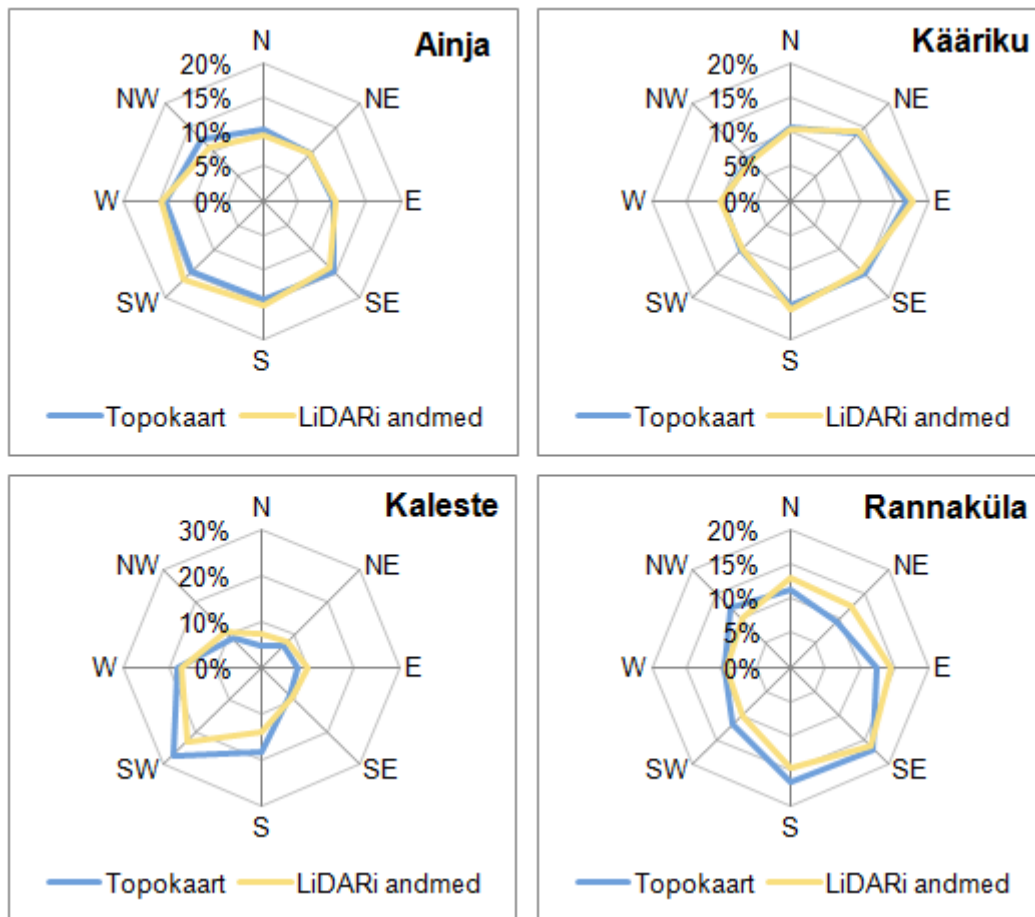
Ekspositsiooni arvutuse tulemused on sõltuvuses kõrgusandmete vertikaalsest resolutsioonist. LiDARi mudelitest arvutatud pilt on tunduvalt detailsem, sest madalama vertikaalse resolutsiooniga topoandmed jätavad mikroreljeefi iseärasused arvestamata. Näide arvutatud ekspositsioonirastritest on toodud joonisel 37. Võrreldes uurimisaladel LiDARi mudeli ja topomudeli pinnavormide ekspositsioone (mõned näited on toodud joonisel 38), ilmneb et piirkondades, kus asuvad suuremad pinnavormid (Kääriku ja Ainja), langevad ekspositsiooni väärtused paremini kokku kui tasasematel aladel (Kaleste ja Rannaküla). Piirkondades, kus on ümara põhiplaani pinnavormid (Kääriku), on ekspositsioonirastrite kokkulangevus kahel mudelil parem kui pikliku põhiplaani pinnavormide korral (Ainja). Aladel, kus on üks valdav pinnavormide suund (Keeni, Kaleste), on LiDARi mudeli korral pikslite väärtused jagatud rohkemate suundade vahel kui topomudelil (joonis 37, joonis 38). Ekspositsiooni analüüsist uurimisaladel võib järeldada, et topomudel annab võrdlemisi korralikult edasi

maastiku üldist aspekti, ent detailsel analüüsil (eriti tasasematel aladel) hakkab topomudelite üldisem reljeefijoonis ja mitmete väikeste pinnavormide puudumine tulemusi mõjutama.



**Joonis 37.** Ekspositsioonirastrid koos samakõrgusjoontega Keeni uurimisala näitel.





**Joonis 38.** Topomudeli ja LiDARi mudeli nõlvade ekspositsiooni analüüs radardiagrammidel.

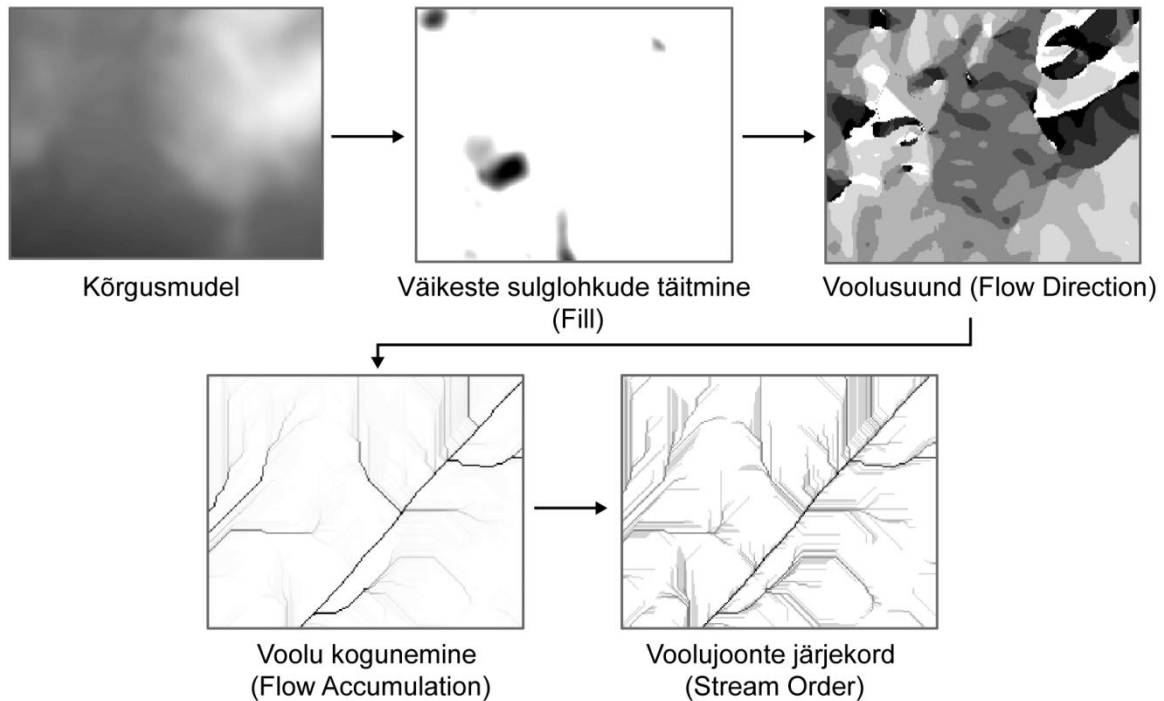
#### 5.3.4. Mudelist arvutatud voolujoonte erinevused

Maastiku reljeef on tihedalt seotud maastiku hüdrograafiaga. Loodusmaastikul on reljeefist otseselt mõjutatud vooluveekogude paiknemine, voolu hulk, selle kõikumine ja energetiline potentsiaal.

Võrdlemaks kui hästi peegeldavad topokaart ja LiDARi andmed voolujooni, kasutati ArcGISis olevaid hüdroloogia (Hydrology) tööriistu, mille abil on võimalik määrata veelahkmeid ja pinnaveevoolu kogunemisalasid. Voolujoonte loomiseks kasutatud tööprotsess on toodud joonisel 39. Kõigepealt kasutati tööriista *Fill*, täitmaks väikesed pinnakonarused (augud, väärlohud), et ei tekiks ebaloomulikke voolu katkemiskohti. Seejärel loodi tööriistaga *Flow Direction* uus rasterpilt, mis sõltuvalt naaberpikslitest näitab iga piksli voolusuunda. Teoreetiliste voolu kogunemiskohtade leidmiseks kasutati tööriista *Flow Accumulation*. Et mõlemast andmestikust saadud voolujooni oleks võimalik võrrelda samadel alustel, loodi tööriistaga *Stream Order* Strahler'i meetodit kasutades voolujoonte järjestus. Selle kohaselt saavad kõige kõrgemalt algavad voolusegmentid väärtuse 1. Nende segmentide



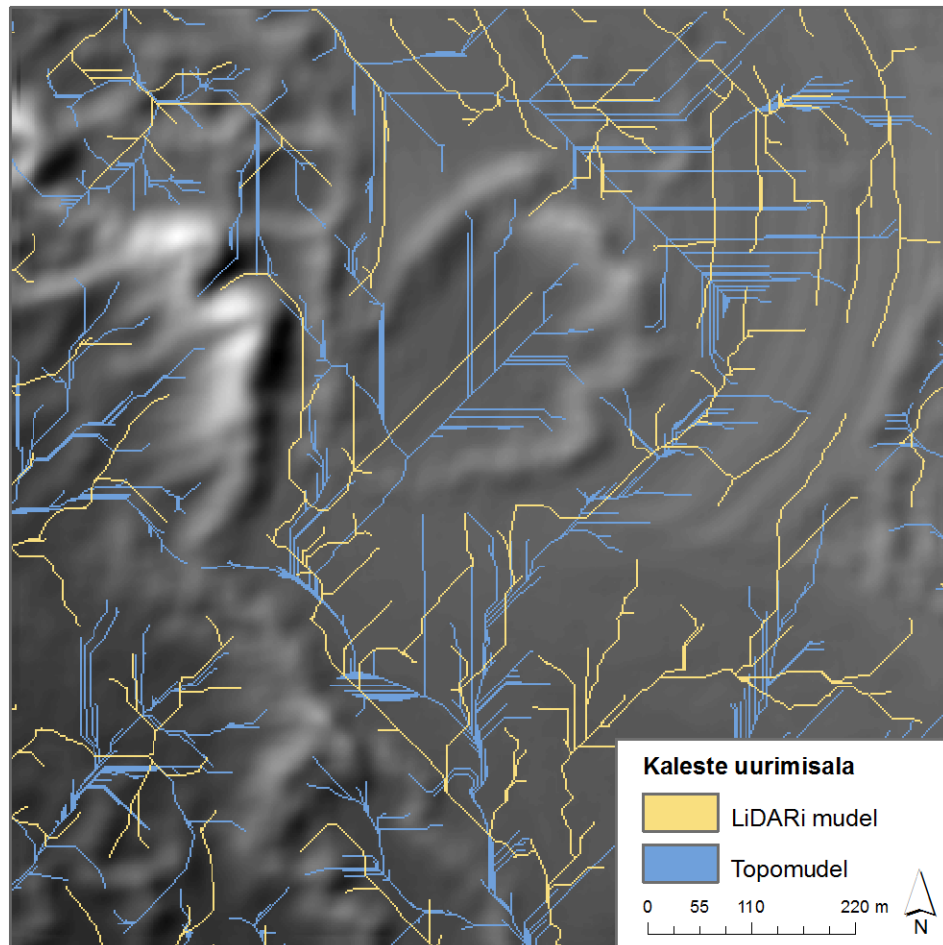
kogunemiskohad saavad väärtuse 2 jne (ArcGIS v.10 Help). Enamiku alade puhul eristus topomudelilt seitse voolujoonte järjestust ja LiDARi mudelilt kaheksa järjestust, mis viitab taaskord LiDARi mudeli suuremale detailsusele. Võrdlemiseks kasutati mõlemal andmestikul põhilisi voolu kogunemiskohti ehk viit viimast klassi.



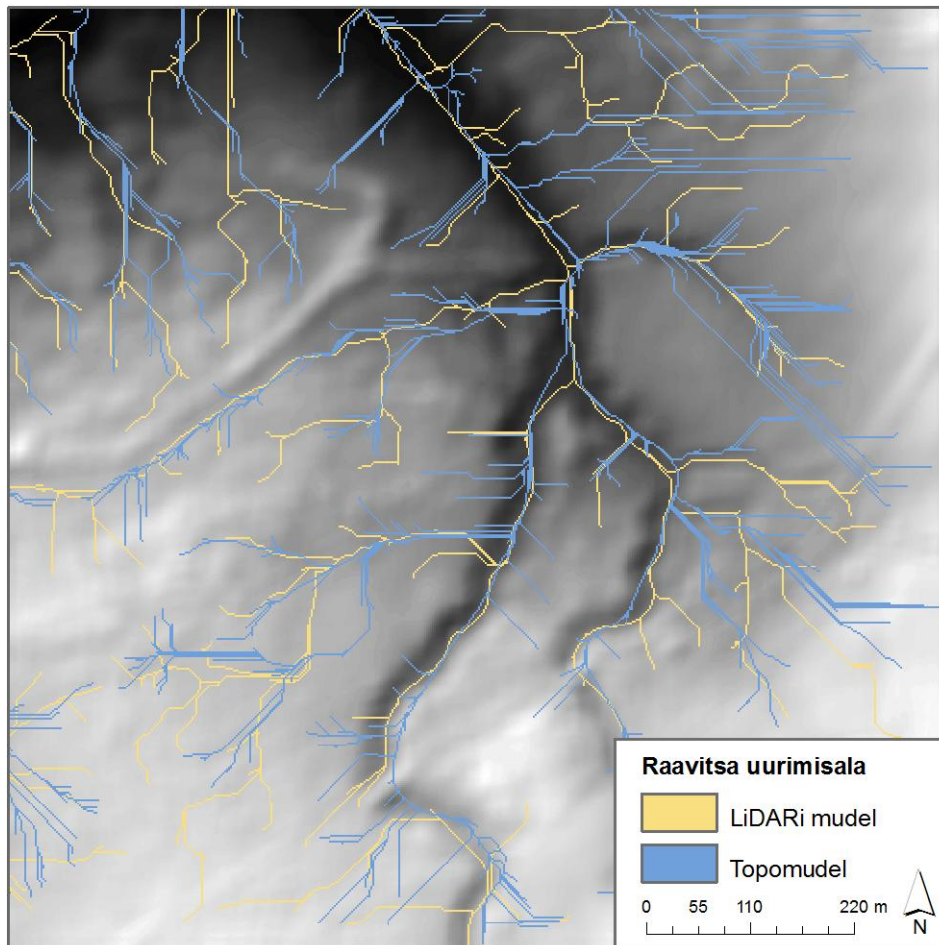
**Joonis 39.** Voolujoonte loomiseks kasutatud tööprotsess.

Näitena on töös toodud valdavalt tasase maastikuga Kaleste uurimisala voolujooned (joonis 40) ja juba reljeefis välja kujunenud iseloomulike voolunõvadega Raavitsa uurimisala voolujooned (joonis 41). Kohati on suhteliselt tasastel maastikuosadel (joonis 40) voolujoonte erinevused väga suured, kuna ka väikesed erinevused reljeefis võivad olulist mõju avaldada nõlvakaldele ning läbi selle voolujoonte asukohale. Elementaarurujoonte asukohtade erinevused ulatuvad tasastel aladel 60 meetrini. Mitmetes piirkondades ei saa neid aga asukoha poolest võrrelda, sest joonistuvad välja väga erinevad voolujoonte süsteemid. Reljeefsematel aladel langevad arvatavad voolu kogunemise kohad paremini kokku, kuid esineb nihkeid nende asukohas, mis viitab nõlvade asukohtade erinevusele algandmestikes (joonis 41). Elementaarurujoontes jäävad suuremad nihked vahemikku (20–30 m). Kõrgemalt algavatel voolusegmentidel on erinevused suuremad kui elementaarurujoontel. Nende kuju ja asukohta mõjutavad väiksemad reljeefivormid, mis kahe kõrgusmudeli juures erinevad rohkem. Voolujooned toovad esile, et üldvormides langevad kaks kõrgusandmestikku kenasti kokku, suuremad erinevused esinevad väiksemates reljeefivormides. Paralleelsed voolujooned

viitavad tasastele maastikuosadele ja neid ilmneb rohkem just topomudeli põhjal arvatud voolujoontes. Voolujoonte detailsus sõltub paljuski algandmete horisontaalsest lahutusest.



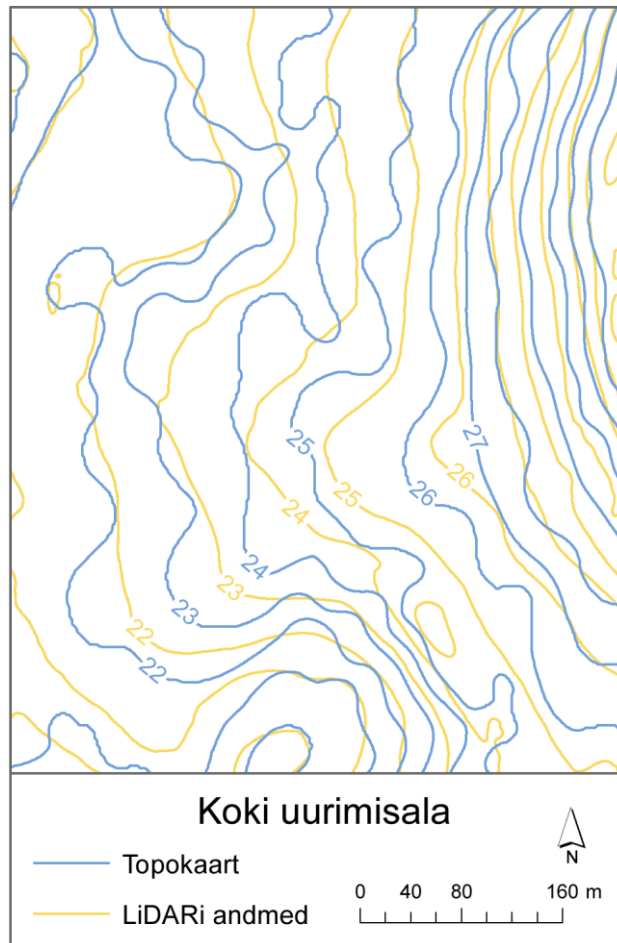
**Joonis 40.** Voolu kogunemise kohad Kaleste uurimisalal. Taustaks on LiDARi mudelist loodud reljeefivarjutus koos hüpsomeetrilise värvinguga.



**Joonis 41.** Voolu kogunemise kohad Raavitsa uurimisalal. Taustaks on LiDARi mudelist loodud reljeefivarjutus koos hüpsomeetrilise värvinguga.

### 5.3.5. Pinnavormide kuju erinevused reljeefijoonisel

Lisaks juba kirjeldatud pinnavormide kuju erinevusele paistis reljeefijooniste visuaalsel võrdlemisel mitmetel tasastel aladel silma topokaardi samakõrgusjoonte suur looklevus. Seda esineb eelkõige väikese nõlvakaldega piirkondades (joonis 42). Kõrguste ja pinnavormide kvantitatiivsel võrdlemisel selline erinevus välja ei tule, sest mudelite kõrgus ja üldine nõlva kuju on uurimisalal mõlemal mudelil sarnane. Ometi ei saa saa paljusid topokaardi reljeefijoonisel olevaid lamedaid orvandeid, ninasid LiDARi andmete järgi mingilgi viisil põhjendada. Selliste looklevate reljeefijoonete tõttu oli ka mudelite üldistamisel topomudeli järgi arvutatud samakõrgusjoonte kogusumma tasasematel uurimisaladel suurem LiDARi mudelist arvutatud reljeefijoonete kogupikkusest (joonis 26).



**Joonis 42.** LiDARi andmete ja topokaardi reljeefijooniste erinevused Koki uurimisalal.

#### 5.4. Välitööde tulemused

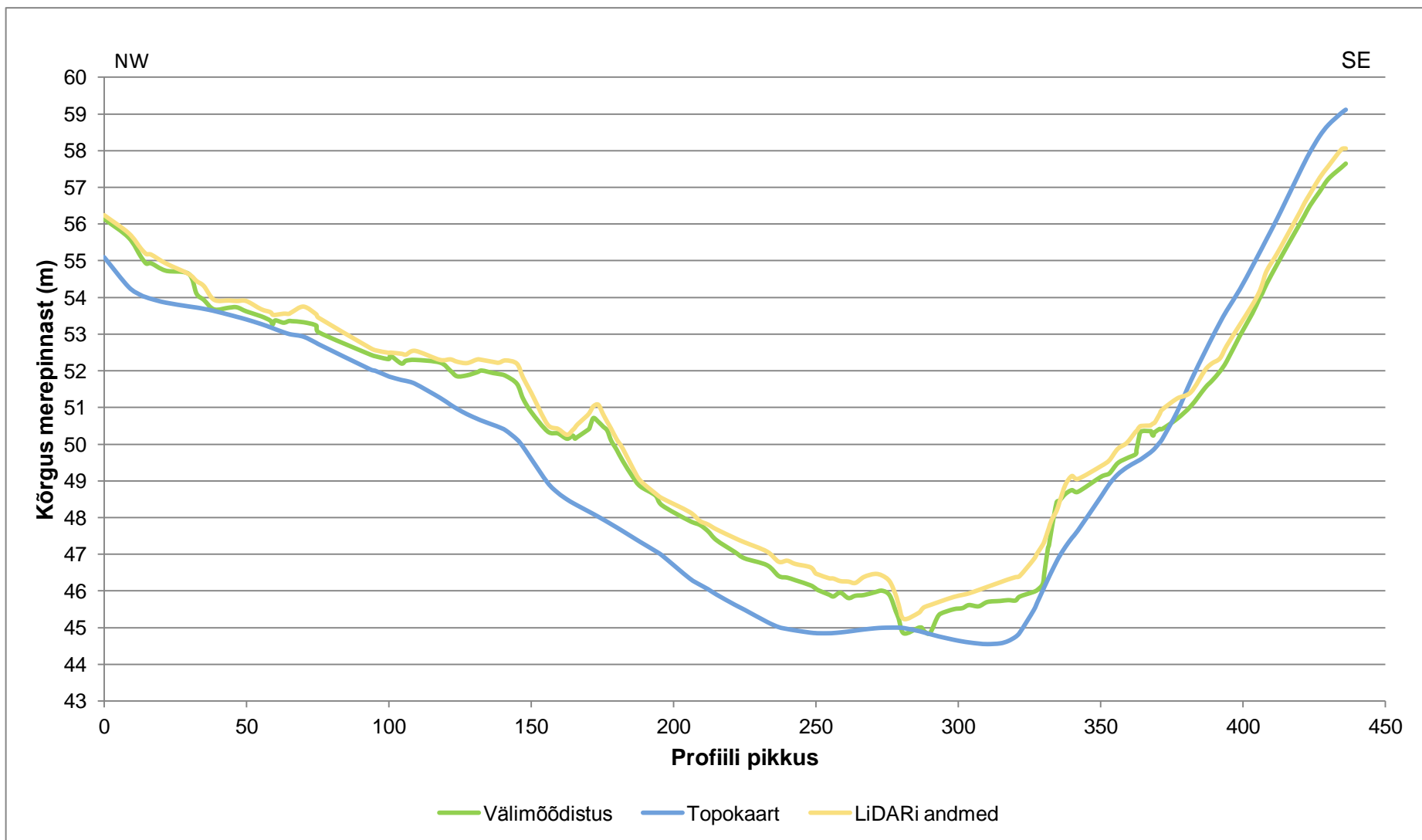
Mõõdistatud profiil asus suures osas heinamaal, vahepeale jäi kaks väikest põllulappi. Kõige madalamas osas ületas profiilijoon Tääksi oja, sellele järgnes vahemikus 280m-330m võsane piirkond (joonis 43).

Kõige madalamas profiiliosas olid erinevused (keskmiselt 40 cm) LiDARi andmestiku ja välitööl mõõdistatud kõrgusandmete vahel suurimad (joonis 44, lisa 6). Ilmselt pole tihedate põõsaste tõttu laseriimpulss „õige“ maapinnani jõudnud ja seetõttu asub LiDARi mudel tegelikust maapinnast kõrgemal. Ka ülejäänud profiilijoonel on LiDARi andmete järgi maapind kõrgemal, kuigi erinevused on väiksemad (valdavalt paarkümmend sentimeetrit).

Oluliselt suuremad erinevused ilmnevad mõõdistatud ja topomudelilt saadud profiilijoonete vahel (kuni 2,5 m). Profiili alguses on topomudel mõõdistatud andmetest madalam, lõpuosas vastupidi pisut kõrgem. Topomudeli profiilijoon annab edasi küll üldise pinnakuju ülevaate, ent detailides on erinevusi palju.



**Joonis 43.** 1. Profiili asukoht maastikul. 2. Fotol vaade kagusse.



Joonis 44. Kõrgusprofiilide võrdlused (profiilijoone asukoht on toodud joonisel 43).

## 6. Arutelu

Kõrgusandmed on oluliseks algallikaks mitmesuguste protsesside uurimisel ja modelleerimisel, mõjutades nii oluliselt lõpptulemust (Wilson 2012). Käesolevas töös lähtuti, et erinevatest kõrgusmudelitest arvatud suuruste omavaheline võrdlemine annab võimaluse hinnata algsete kõrgusandmete täpsust ja tuua välja nende erinevusi.

LiDARi andmete kasutamisel Nõukogude Liidu aegsete topograafilistelt kaartidelt pärit kõrgusandmete täpsuse hindamisel ei nähtud nende usaldusväärsuses probleeme, sest välitöödel teostatud profiilimõõdistamisel kirjeldasid LiDARi andmed võrdlemisi hästi reaalsel maapinda (joonis 43, joonis 44). Pealegi pole kahe andmestiku võrdlemine nii detailne, et võimalikud vead võiksid tulemustele märkimisväärset mõju avaldada.

Reljeefi kirjeldamisel on raske leida ühte universaalset karakteristikut, mis iseloomustaks seda kogu tema mitmekülguses (Wilson, Gallant 2000). Seetõttu püüti kõrgusandmete võrdlemisel pinnamoe erinevaid omadusi iseloomustavaid suurusi kasutada. Deng (2007) toob välja, et topograafilise pinna määrab kuus faktorit: pinna kõrgus, pinna kuju, topograafiline paiknemine, topograafiline kontekst, ruumiline mõõtkava ja pinnavorm. Mõningaid omadusi saab iseloomustada parameetritega, teisi mitte.

Kvantitatiivselt erinevuste piirkondade välja toomiseks kahe andmestiku vahel kasutati kõrguserinevuste arvutamist ja karedusrastrate võrdlemist.

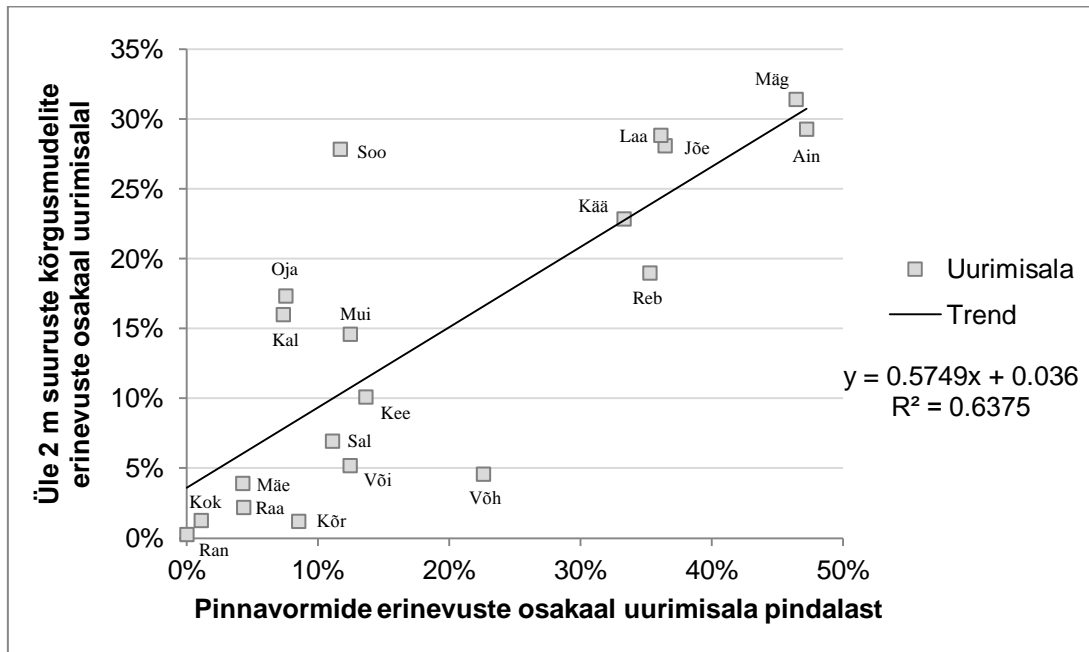
Kõrguste võrdlemine tõi välja, et oluliste kõrgusväärtuste erinevuse (absoluutväärtuselt üle 2 m suuruste erinevuste) osakaal uurimisaladel varieerub vahemikus 0.24–31.40% (lisa 2). Lisaks avastati kahe andmestiku vahel esinev kõrgusnihe, mille põhjuse välja selgitamine vajaks täiendavat uurimist. Nimelt on topomudelite järgi maapind valdavalt kõrgem LiDARi omast (keskmiselt 0.29 m) (joonis 17, lisa 2).

Ehkki mudelite kõrguste võrdlemine toob kõrguserinevustele lisaks küllaltki hästi välja pinnakuju erinevuste piirkondi, on tulemustes raske neid üksteisest eristada. Seetõttu kasutati morfoloogiliste erinevuste välja selgitamiseks mudelitest arvatud kareduspindade võrdlemist. Leitud oluliste pinnakujude erinevuste osakaal varieerub uurimisaladel vahemikus 0.00–47.22% (joonis 30).

Võrreldes kahe erineva meetodi järgi leitud kõrgusandmete vigade piirkodi, selgus et kuigi kõrguserinevuste piirkonnad kirjeldavad suures osas ära morfoloogiliste erinevuste



piirkonnad, erinevad mõnedel uurimisaladel saadud tulemused üksteisest siiski üsna palju (joonis 45). Mõlemad meetodid andsid uurimistöö seisukohast olulist informatsiooni.



**Joonis 45.** Üle 2 m suuruste kõrguserinevuste ja pinnavormide erinevuste osakaalu omavaheline seos uurimisaladel.

Kasutades mudelitest arvatud samakõrgusjoonte kogusummat ja keskmiselt järsu kaldega maapinna osakaalu uuringualadel reljeefi liigestatuse indikaatorina, ilmneb et keerukama reljeefiga aladel esineb rohkem vigu pinnavormide kuju esitamisel (joonis 34, joonis 36).

Nõlvakalde, ekspositsiooni ja voolujoonte arvutused toovad esile topomudeli väiksema vertikaalse lahutuse. Osaliselt saab seda põhjendada asjaoluga, et peeneid mikroreljeefi detaile, mida ei saa mõõtkavaga 1:10000 iseloomustada, topograafilistel kaartidel ei mõõdistata (Tšebotarjov 1959). Teisalt ei vasta Nõukogude Liidu aegsed topograafilised kaardid ka sellele detailsusele, mida kasutatud lõikevahe juures eeldatakse (reljeefsetel aladel enamasti h 2 m, tasasematel h 1 m). Mida väiksem on reljeefi lõikevahe, seda täpsemini on vaja selle detailid välja mõõdistada ja kaardil kujutada (Tšebotarjov 1959).

Suurematel pinnavormidel on arvatud nõlvade ekspositsioon üsna sarnane, tasasematel aladel hakkab tulemusi mõjutama topomudeli väiksem detailsus (joonis 36, joonis 37). Reljeefivaestes piirkondades avaldavad juba väikesed vead kõrgusmudelis suurt mõju neist arvatud parameetritele (Florinsky 1998). Sarnasele järeldusele jõuti ka arvatud voolujooni võrreldes. Reljeefsematel aladel langevad voolujooned paremini kokku, erinevusi esineb peamiselt nende asukohas (joonis 39). Tasasematel aladel hakkab juba väike erinevus reljeefis



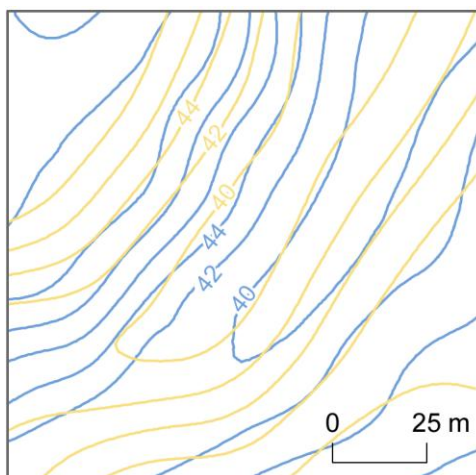
mõjutama nõlvakallet ning läbi selle voolujoonte asukohta (joonis 40). Järeldusele, et topokaartide kasutamine ei anna voolujoonte loomiseks alati väga häid tulemusi, on sarnaselt käesoleva tööga jõutud mitmetes teistesgi uurimustes (Hopkinson jt 2009; Murphy jt. 2008). Siiski ei peegelda LiDARi mudel kõigis detailides reaalset maapinda õigesti, sest sellel esineb samuti üleliigseid ja puuduvaid pinnakonarusi.

Kokkuvõtlik ülevaade põhilistest vigadest pinnavormide kuju esitamisel, millega Nõukogude liidu aegsete topograafiliste kaartide reljefiandmete kasutamisel tuleks arvestada, on toodud joonisel 46. Palju erinevusi mudelite vahel on tingitud reljefivormide nihkest horisontaalsuunas (joonis 19, joonis 20, joonis 30.3, joonis 46.1), mis iseloomustavad topokaartide väiksemat asukohatäpsust. Levinud on veel pinnavormide liigne üldistamine (joonis 46.3), võimendamine (joonis 30.2, 32, 33, 46.2) ja esineb täiesti vale kujuga pinnavorme (joonis 22, 23, 30.1, 46.4). Imhofi klassifikatsiooni järgi (joonis 1), tuleks enamik käsitletud vigadest paigutada klassi juhuslik viga, sest mingit süsteemsust neis välja tuua ei saa. Täiesti vale kujuga pinnavormid sobiksid klassi jäme viga.

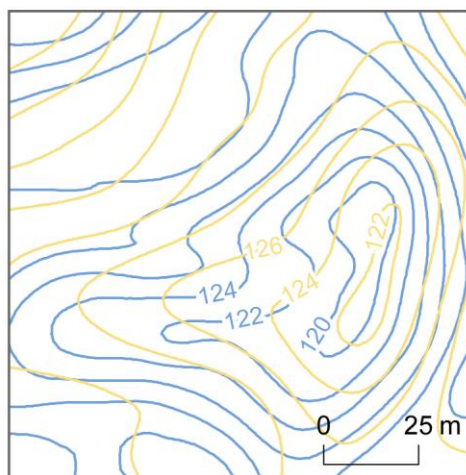
Topograafilise mõõdistamise eeskirja järgi (1974) oli reljefi kujutamisele kehtestatud järgmised nõuded:

- üksikasjalikult ja täpselt peavad olema kujutatud maastiku liigestatust iseloomustavad ebataasused: nõlvade suunad ja vorm, nende järskus ja selle muutus;
- loetavalt peavad olema esile tõstetud orograafilised reljefipunktid: tipud, nõod, astangud, voolunõvad jne;
- õigesti ja ilmekalt peavad edasi antud olema maastiku reljefi tüüpilised jooned ja iseärasused;
- Oluline on reljefi kujutise kooskõlastatus maastiku teiste elementidega (hüdrograafia, taimkate, pinnas jne).

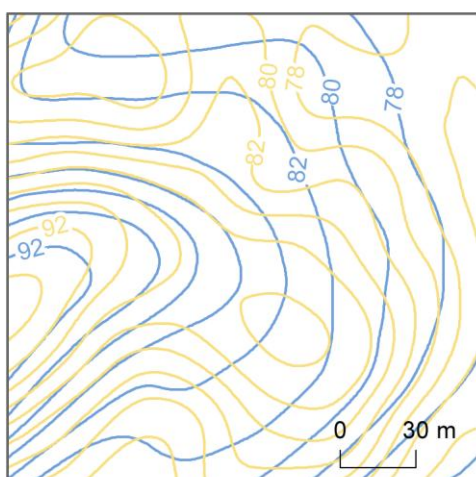
Töös hinnati vastavust kolmele esimesele ja kokkuvõtvalt võib öelda, et kuigi Nõukogude Liidu aegsed topokaardid annavad hästi edasi maastiku üldist ilmet, ning suured pinnavormid on sarnased, esineb LiDARi andmetega võrreldes hulgaliselt erinevusi detailides, asukohas ja nõlva kujus.



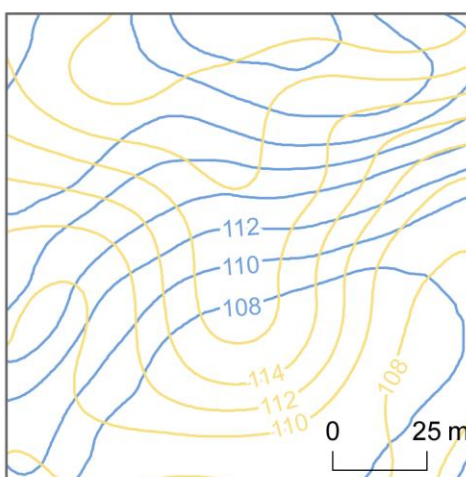
1. Erinevused asukohas  
(fragment Muike uurimisalast)



2. Topokaardil on pinnavorme  
võimendatud  
(fragment Ainja uurimisalast)



3. Topokaardil on pinnavorme  
liialt üldistatud  
(fragment Keeni uurimisalast)



4. Topokaardil on pinnavormil  
vale kuju  
(fragment Ainja uurimisalast)

— LiDARi andmed — Topokaart

**Joonis 46.** Näited põhilistest vigadest Nõukogude Liidu topograafilistel kaartidel. Vigade illustreerimiseks kasutatud samakõrgusjoonte lõikevahe on 2 m.

Taimestiku mõju olulisuse hindamiseks kõrgusandmete täpsusele kasutati CORINE ja ETAK maakatte andmeid. Mõlemad andmestikud tõid välja topokaartidel kajastatud reljeefiandmetes vigade suurema osakaalu metsaga kaetud aladel ja oluliselt parema täpsuse avatud aladel (joonis 24, joonis 25). Kahjuks ei võimaldanud kumbki andmestik taimestiku mõju olulisust eriti põhjalikult uurida.

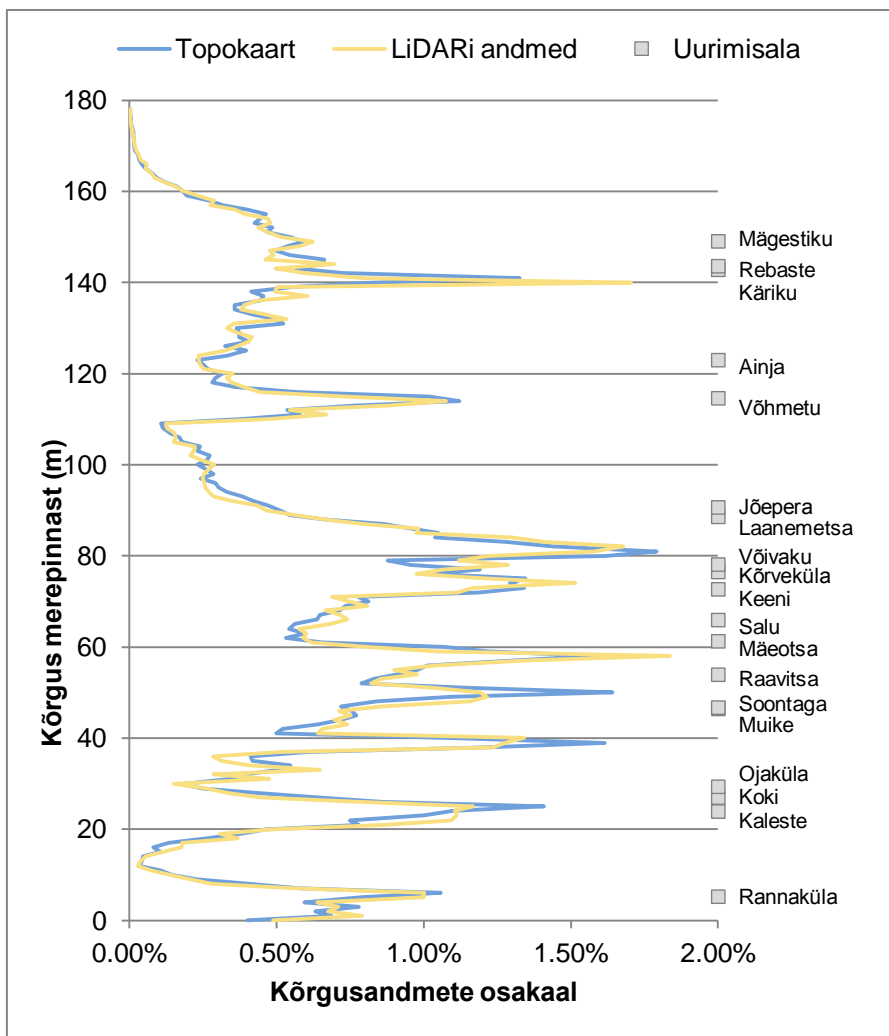
CORINE andmete kasutamisel on suurimaks puuduseks käesoleva töö seisukohast selle liiga suur üldistus. CORINE maakatte kaardistamine toimub mõõtkavas 1:100000, minimaalne

kaardistusühiku suurus on 25 ha ja minimaalne laius 100 m (Keskkonnateabe Keskus). Seetõttu annab andmestik maakatte kohta väga üldise ülevaate.

ETAK andmed on kaardistatud käesoleva uurimistöo jaoks piisava detailsusega (1:10000), kuid väheste maakatteklasside olemasolu jätab pildi uuritavast teemast üsna üldiseks. Ei ole võimalik välja tuua nt erinevusi erinevate metsatüüpide vahel, sest kogu metsaga kaetud ala on koondatud ühte maakatteklassi (mets).

Käesolevas töös kasutati topokaartide reljeefiandmete täpsuse hindamiseks 19 uurimisala. Seda ei ole ülemäära palju, et ära kirjeldada suuremat osa Eestit kattev reljeefiandmestik, ent üldise ülevaate andmetest ja neist leiduvatest puudustest see siiski annab. Lähtuvalt uurimisalade valikust iseloomustati kõrgusandmete täpsust eelkõige keerukama reljeefiga metsaga kaetud piirkodades. Samas illustreerisid analüüsi tulemused hästi, et avatud ja tasastel aladel esinebki reljeefi kujutamises vigu vähem.

Joonisel 47 on võrreldud andmed esitatud hüpsomeetriliste kõveratena, millest nähtub, et kohati langevad kaks andmestikku üsna hästi kokku, kuid esineb rohkelt piirkondi kus erinevused on suured. See, kui palju need vead võivad kõrgusandmete kasutamisel häirida, sõltub paljuski andmete kasutamise eesmärgist. Paberkaardiga maastikul liikudes segavad ilmselt kõige rohkem erinevused pinnavormide kujus, samas kui nihkeid pinnavormide asukohas ja väiksemaid kõrguste erinevusi ei pruugi märgata, mõningane pinnavormide võimendamine võib kaardi loetavust isegi parandada. Kasutades neid andmeid kõrgusalase algallikana modelleerimisel, võivad neis sisalduvad vead hakata tulemusi oluliselt mõjutama, eriti kui on tegemist suuremõõtkavalise ja detailse analüüsiga.



**Joonis 47.** Topokaardi ja LiDARi andmete kõrguslik erinevus üle kõigi uurimisalade. Uurimisalad on toodud joonisel keskmise absoluutse kõrguse järgi alal.

## Kokkuvõte

Antud töö käsitleb kõrgusandmete kvaliteeti. Kõrgusalase informatsiooni algallikana palju kasutust leidnud Nõukogude liidu aegsetelt topograafilistelt kaartidelt, mille reljeefiandmed ilmestavad siiani mitmeid olulisi trükitud Eesti topograafiliste kaartide seeriaid (Eesti põhikaart, Eesti baaskaart, NATO eeskirjade kohane topokaart 1: 50 000), on suuri vigu avastatud pinnavormide kujutamisel. Käesolevas töös püüti uue ja täpsema kõrgusalase informatsiooni allika – LiDARi andmestiku valguses välja selgitada, kui suurel määral esineb kahe andmestiku vahel erinevusi ning millisel kujul need avalduvad.

Andmete võrdlemiseks kasutati 19 uurimisala üle Eesti, kogupindalaga 18,7 ruutkilomeetrit, lisaks teostati välitöödel profiili mõõdistamine. Nii LiDARi andmestikust kui topograafilistelt kaartidelt saadud kõrgusandmetest loodi kõrgusmodelid, mida võrreldi vahetult üksteisega (kõrguste erinevused), taimestikust lähtudes ja mudelitest arvatud näitajate läbi (reljeefi joonte pikkus, kareduspinnad, nõlva kalle, pinnavormide ekspositsioon, voolujooned).

Välitöödel teostatud profiilimõõdistamisel saadi kinnitust oletusele, et LiDARi andmed kirjeldavad maapinda piisavalt hästi, et avalduksid topokaartidel olevad vead.

Kõrgusmodelite võrdlemisel leiti, et topograafiliste kaartide järgi asub maapind enamasti LiDARi andmete kõrgusmodelist süsteemselt mõnikümmend sentimeetrit kõrgemal. Suureks probleemiks on Nõukogude Liidu topograafilistel kaartidel asukohatäpsus, lisaks esineb hulgaliselt vigu pinnavormide kuju, kõrguse ja detailide kirjeldamises. Enamasti on pinnavormide kuju kaartidel liialt üldistatud, vähemal määral esineb pinnavormide võimendamist või nende täiesti vale kuju. Eksimusi kõrgusandmete täpsuses esineb rohkem keerulisema reljeefiga piirkondades. CORINE ja ETAK andmete järgi näitasid reljeefiandmete vead suuremat osakaalu metsaga kaetud aladel.

Topograafilistel kaartidel olevad ebatäpsused põhjustavad reljeefi kirjeldamisel vigu ka nende põhjal arvatud parameetrites, mida andmete kasutamisel peab kindlasti arvestama, eriti kui on tegemist suuremõõtkavaliste ja detailsete analüüsidega. Vertikaalses lahtuses jäävad topokaardi kõrgusandmed märkimisväärselt alla LiDARi andmetele. Pealegi ei vasta need sellele detailsusele, mida neil kasutatud reljeefi lõikevahe (tasastel aladel h 1 m, reljeefsemates piirkondades h 2 m) juures nõutakse.

Vaatamata suurele vigade arvule annavad Nõukogude Liidu topograafilistel kaartidel kajastatud kõrgusandmed võrdlemisi hästi edasi maastiku üldist iseloomu, tuues esile põhilised pinnavormide kujud ja omavahelise asetuse.

## Summary

### **Relief on Topographic Maps Compared with LiDAR Dataset**

This thesis examines the quality of elevation data. The topographic maps created at the time of the Soviet Union, which have been widely used as primary source of elevation information and the relief data of which still illustrates many relevant printed series of Estonian topographic maps (Estonian Basic Map, Estonian Base Map, 1: 50,000 scale topographic map complying with NATO specifications), have been found to contain major errors concerning the representation of landforms. The aim of this thesis was to clarify in the light of LiDAR dataset – a new and more accurate source of elevation information – the extent to which the two datasets differ and the form of these differences.

The data of 19 research units, with the total surface area of 18.7 square kilometres, in all Estonia were compared; in addition, profile measurement was performed during fieldwork. The elevation data of both the LiDAR dataset and the topographic maps were used to create elevation models which were then directly compared to each other (elevation differences) based on vegetation and via the parameters calculated from the models (length of contour lines, terrain ruggedness, slope angle, aspect of landforms, streamlines).

Profile measurements performed during fieldwork confirmed the hypothesis that LiDAR data describe the ground sufficiently well to reveal the errors on topographic maps.

The comparison of elevation models showed that based on the topographic maps, the ground mostly lies systematically some tens of centimetres higher than in case of the elevation model created with LiDAR data. Positional accuracy is a major problem of the topographic maps of the Soviet Union; in addition, they contain many description errors concerning the shape, height and details of landforms. In most cases, the shape of landforms is excessively generalized on the maps, but now and then landforms are amplified or have an entirely incorrect shape. There are more errors in elevation data accuracy in areas of more complex relief. According to CORINE and ETAK data, relief data errors showed a higher percentage in areas under forests.

Inaccuracies on topographic maps also cause errors in the parameters calculated on the basis of them when describing the relief, which certainly has to be considered when using the data, especially in case of large-scale and detailed analyses. In view of vertical resolution, the elevation data of the topographic maps are significantly poorer than the LiDAR data.

Furthermore, they are not as detailed as required for the used contour interval (in level areas h 1 m, in more raised areas h 2 m).

Although the topographic maps of the Soviet Union contain a large number of errors, their elevation data describe relatively well the general character of the terrain, reflecting the basic shapes of the landforms and their position to each other.

## **Tänuavaldused**

Soovin tänada Raivo Aunapit innustava suhtumise, asjalike paranduste, kriitiliste märkuste, positiivsete mõtete ja kannatliku meele eest käesoleva magistritöö juhendamisel. Samuti tänan topograafia välipraktikumis osalenud üliõpilasi abi eest profiili mõõdistamisel ja Annelit eesti keele grammatika alaste nõuannete eest.

Aitäh!



# Kasutatud allikad

## Kirjandus

**Baltsavias, E.P.**, 1999. Airborne laser scanning: basic relations and formulas. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 54: 199-214.

**Carara, A., Bitelli, G., Carla, R.**, 1997. Comparison of techniques for generating digital terrain models from contour lines. *International Journal of Geographical Information Science* 11: 451-473.

**Deng, Y.**, 2007. New trends in digital terrain analysis: landform definition, representation, and classification. *Progress in Physical Geography*, 31:405-419.

Eesti atlas. 2011. Aunap, R. (koost.). BIT & TÜGI. 55 lk.

**Florinsky, I.V.**, 1998. Accuracy of local topographic variables derived from digital elevation models. *International Journal of Geographical Information Science*, 12: 47-62.

**Habicht, H-L.**, 2011. LiDAR-kõrgusandmete kasutamine Läänemere paleogeograafiliste rekonstruktsioonide koostamisel Tolkuse-Rannametsa piirkonna näitel. Tartu Ülikool, Geograafia osakond.

**Hiiemaa, H.**, 2011. Selisoo hüdroloogiline uuring. Magistritöö. Tartu Ülikool, Geograafia osakond.

**Hopkinson, C., Hayashi, M., Peddle, D.**, 2009. Comparing alpine watershed attributes from LiDAR, Photogrammetric, and Contour-based Digital Elevation Models. *Hydrological Processes*, 23:451-463.

**Hutchinson, M.F.**, 1989. A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits. *Journal of Hydrology*, 106: 211-232.

**Hutchinson, M.F., Gallant, J.C.**, 2000. Digital Elevation Models and Representation of Terrain Shape. In: Wilson, J.P., Gallant, J.C. (Eds.), *Terrain Analysis: Principles and Applications*. John Wiley & Sons, INC. pp. 29-50.

**Imhof, E.**, 1982. Cartographic Relief Presentation. Walter de Gruyter & Co. 389 lk.

- Jagomägi, T.**, 1999. Geinfosüsteemid praktikule. Regio. 191 lk.
- Järveoja, M.**, 2011. Võimalike retsessioonimoreenide esinemine Alutagusel. Magistritöö. Tartu Ülikool, Geograafia osakond.
- Kadarik, R.**, 2011. Eesti põhikaardi koostamine 1991-1997. Bakalaureusetöö. Tartu Ülikool, Geograafia osakond.
- Kala, V.**, 2001. Kartograafia alused. TTÜ Kirjastus. 148 lk.
- Karm, M.**, 2012. LIDAR-i mõõdistuste ja orienteerumiskaardi reljeefimudelite analüüs ja võrdlus. Bakalaureusetöö. Tartu Ülikool, Geograafia osakond.
- Kask, R., Krusberg, P., Sagris, V., Vard, A.**, 1997. Eesti 1 : 50 000 Baaskaardi projekti aruanne. Eesti Kaardikeskus, Tallinn. Maa-ameti andmekogude arhiiv.
- Kennelly, P.J.**, 2008. Terrain maps displaying hill-shading with curvature. *Geomorphology*, 102: 567-577
- Kikas, T.**, 2005. Automaatne valglate ja vooluveekogude leidmine Saaremaa ja Muhu DEM mudelilt. Magistritöö. Tartu Ülikool, Geograafia Instituut.
- Koppel, K.**, 2005. Maakasutuse uurimise meetodika Kasaritsa uurimisala (Rõuge kihelkond) 17.- 19. Sajandi külamaastike kujunemise näitel. Magistritöö. Tartu Ülikool, Ajaloo osakond.
- Kuningas, B.**, 2010 Kõrgusmudeli kasutamine Holotseeni rannamoodustiste morfogeneesi uurimisel Narva-Jõesuu piirkonnas. Magistritöö. Tartu Ülikool, Geograafia osakond.
- Krusberg, P.**, 1998. Eesti digitaalne kõrgusmudel. *Geodeet*, 15: 15-20.
- Lankots, J.**, 2001. Eesti põhikaardi otstarve. *Geodeet*, 24:6–9.
- Large, A.R.G., Heritage, G.L.**, 2009. Laser Scanning–Evolution of the Discipline. In: Heritage, G.L., Large, A.R.G. (Eds.), *Laser Scanning for the Environmental Sciences*. Blackwell Publishing, pp. 1-20.
- Liba, N.**, 2005. Fotogramm-meetria alused. Tartu. 303 lk.
- Mardiste, H., Jagomägi, J.**, 2004. Kartograafia areng Eestis viimase 60 aasta jooksul. *Publicationes Instituti Geographici Universitetas Tartuensis*, 89:174-194.

**Murphy, P.N.C., Ogilvie, J., Meng, F-R., Arp, P.,** 2008. Stream network modelling using lidar and photogrammetric digital elevation models: a comparison and field verification. *Hydrological Processes*, 22: 1747-1754.

**Nazarov, N.A,** Geodeesia. Eesti riiklik kirjastus. Tallinn. 577 lk.

**Potter, H., Treikelder, I.,** 2011. Geodeesia ka kartograafia läbi aegade. Maa-amet. Tallinn. 263 lk.

**Potter, H.,** 1995a Kaardistamistödest Eesti NSV-s. *Geodeet*, 7: 25-34.

**Potter, H.,** 1995b Kaardistamistödest Eesti NSV-s. *Geodeet*, 8: 23-27.

**Potter, H.,** 1999. Topograafilise kaardistamise reljeefiandmed ja nende kasutamine. *Geodeet*, 18: 33-35.

**Potter, H.,** 2012. Topograafiline kaart läbi aegade II. *Kaitse Kodu*, 8: 28-33.

**Raid, T.,** 1999. Kõrguslik andmebaas. *Geodeet*, 19: 9-11.

**Randma, L.,** 2001. Kõpu poolsaare digitaalse reljeefimudeli rakendamine paleogeograafilise rannajoone modelleerimisel. Bakalaureusetöö. Tartu Ülikool, Geograafia instituut.

**Riley, S.J., DeGloria, S. D., Elliot, R.,** 1999. A Terrain Ruggedness Index That Quantifies Topographic Heterogeneity. *Intermountain Journal of Sciences*, 5: 23-27.

**Rosentau, A., Vassiljev, J., Saarse, L., Miidel, A.** 2007. Palaeogeographic reconstruction of proglacial lakes in Estonia. *Boreas*, 36: 211-221.

**Solnask, S.,** 2008. LIDARi kasutamine metsaaluse maapinna reljeefi kirjeldamisel. Bakalaureusetöö. Tartu Ülikool, Geograafia osakond.

**Staškevitš, A.,** 2005. Eesti põhikaart 1 : 20 000. *Geodeet*, 30: 6-9.

**Straus, Ü.,** 2001. Morfomeetriliste näitajate ja peamiste reljeefielementide sõltuvus interpoleerimismeetodist (Porijõe valgla näitel). Bakalaureusetöö. Tartu Ülikool, Geograafia instituut.

**Teiter, K.,** 2000. Pärast-jääaegsete rannajoonte modelleerimine nüüdisaegse kõrgusmudeli põhjal (Edele-Eesti näitel). Magistritöö. Tartu Ülikool, Geograafia instituut.

**Tinkham, W.T., Huang, H., Smith, A.M.S., Shrestha, R., Falkowski, M.J., Hudak, A.T., Link, T.E., Glenn, N.F., Marks, D.G.** 2011. A Comparison of Two Open Source LiDAR Surface Classification Algorithms. *Remote Sensing* 3:638-649.

Topograafilise mõõdistamise eeskiri mõõtkavades 1:10 000 ja 1:25 000. 1. osa, Välitööd, 1974. Tallinn. 200 lk.

**Treikelder, I.**, 2001. Eesti topograafilised kaardid aastatel 1919...1940. *Geodeet*, 24: 15-19.

**Tšebotarjov, A.**, 1959. Geodeesia. Eesti riiklik kirjastus. Tallinn. 663 lk.

**Vain, A.**, 2008. Aerolaserskanneerimisest saadud maapinna kõrgusmudeli hindamine. *Geodeet*, 36: 38-41.

**Vain, A.**, 2011. Aerolaserskanneerimise tööprintsip ja vigade päritolu – lühike kokkuvõte. *Geodeet*, 41: 77-80.

**Vaze, J., Teng, J., Spencer, G.**, 2010. Impact of DEM accuracy and resolution on topographic indices. *Environmental Modelling & Software* 25: 1086-1098.

**Wilson, J.P., Gallant, J.C.**, 2000. Digital Terrain Analysis. In: Wilson, J.P., Gallant, J.C. (Eds.), *Terrain Analysis: Principles and Applications*. John Wiley & Sons, INC. pp. 1-26.

**Wilson, J.P.**, 2012. Digital terrain modeling. *Geomorphology*, 137: 107-121.

**Wise, S.M.**, 2007. Effect of differing DEM creation methods on results from a hydrological model. *Computers & Geosciences*, 33: 1351-1365.

## **Internet**

**Cooley, S.W.** 2013. Terrain Roughness – 12 Ways. GIS4Geomorphology.  
<http://gis4geomorphology.com/roughness-topographic-position/> [20.05.2013]

**Gruno, A.** 2012. Aerolaserskanneerimise andmed ja kasutamise perspektiivid.  
[http://geoportaal.maaamet.ee/docs/pohikaart/2012\\_LIDAR\\_esitlus\\_teabepaev.pdf?t=20121108143443](http://geoportaal.maaamet.ee/docs/pohikaart/2012_LIDAR_esitlus_teabepaev.pdf?t=20121108143443) [20.05.2013]

**Jürgens, U.**, 1999. Eesti põhikaardi reljeefi digitaliseerimisest.  
<http://www.geo.ut.ee/kartool/seminar99/jyrgens.htm> [20.05.2013]

**Keskkonnateabe Keskus.** CORINE Land Cover

<http://www.keskkonnainfo.ee/main/index.php/et/meist/projektid/corine-land-cover>  
[20.05.2013]

**Maa-amet.** 2009. Eesti Baaskaart 1:50 000.

<http://geoportaal.maaamet.ee/est/Andmed-ja-kaardid/Topograafilised-andmed/Eesti-Baaskaart-150000-p31.html> [20.05.2013]

**Maa-amet.** 2011. Eesti Põhikaart 1:10 000.

<http://geoportaal.maaamet.ee/est/Andmed-ja-kaardid/Topograafilised-andmed/Eesti-Pohikaart-110-000-p30.html> [20.05.2013]

**Maa-amet.** 2003. Fotoplaanid NSVL 1963. a. koordinaatsüsteemis.

[http://marja.maaamet.ee/index.php?lang\\_id=1&page\\_id=150&menu\\_id=45](http://marja.maaamet.ee/index.php?lang_id=1&page_id=150&menu_id=45) [20.05.2013]

**Maa-amet.** 2012. Kõrgusandmed

<http://geoportaal.maaamet.ee/est/Andmed-ja-kaardid/Topograafilised-andmed/Korgusandmed-p114.html> [20.05.2013]

**Maa-amet.** 2010. Põhikaardistuse ajalugu

<http://geoportaal.maaamet.ee/est/Andmed-ja-kaardid/Topograafilised-andmed/Eesti-Pohikaart-110-000/Pohikaardistuse-ajalugu-p113.html> [20.05.2013]

**Maa-amet.** 2013. Valminud on digitaalse Eesti põhikaardi 2013. aasta versioon.

[http://www.maaamet.ee/index.php?lang\\_id=1&news\\_id=895&page\\_id=1&menu\\_id=1&no\\_cache=1367944745](http://www.maaamet.ee/index.php?lang_id=1&news_id=895&page_id=1&menu_id=1&no_cache=1367944745) [20.05.2013]

**Lisad**

**Lisa 1.** Andmed uurimisalade kohta (jätkub järgmisel lehel).

		Andmed topokaartide kohta			Andmed LiDARi andmete kohta			
Uurimisala	Maakond	Kaardilehe nr 1:2000	LiDAR möödistuse aasta	LiDAR maapinna punktide arv	Kaardilehe nr 1:10000	Kaardistamise aeg	Koordinaatsüsteem	Kõrgusjoonte lõikevahe (m)
Ainja	Viljandimaa	434597	2009	100645	C5525Vg2	1985	Pulkovo-1963	2
Jõepera	Võrumaa	405652	2009	135989	C5427Va4	1970	Pulkovo-1963	2
Kaleste	Hiiumaa	531394	2008	209935	C5718Ab4	1985	Pulkovo-1963	2
Keeni	Valgamaa	426633	2009	210763	C5426Ba1 C5426Ba2	1984	Pulkovo-1963	1
Koki	Saaremaa	457389	2008	157446	O3469Av2 O3469Ag1	1988	Pulkovo-1942	2
Kõrveküla	Lääne-Virumaa	568594	2009	105927	C5825Ab4	1983	Pulkovo-1963	2
Kääriku	Valgamaa	432640	2009	120910	C5526Gg3 C5526Gg4	1984	Pulkovo-1963	2
Laanemetsa	Valgamaa	393640	2009	185246	C5426Gg3	1986	Pulkovo-1963	2
Muike	Lääne-Virumaa	600609	2009	219887	C5925Bg2 C5925Bg4	1984	Pulkovo-1963	2
Mäeotsa	Tartumaa	466639	2010	127799	C5526Bb1 C5526Bb2 C5626Gg3 C5626Gg4	1974	Pulkovo-1963	2 1 1 1
Mägestiku	Valgamaa	440639	2009	86213	C5526Gb3	1984	Pulkovo-1963	2
Ojaküla	Lääne-Virumaa	599641	2009	189525	C5927Av3	1970	Pulkovo-1963	1
Raavitsa	Valgamaa	408626	2009	222284	C5426Vb1 C5426Vb2	1985	Pulkovo-1963	1
Rannaküla	Saaremaa	475444	2008	167592	O3459Va3 O3459Vv1	1987	Pulkovo-1942	2
Rebaste	Põlvamaa	426652	2009	177483	C5427Ab1 C5427Aa2	1985 1986	Pulkovo-1963	2



		Andmed topokaartide kohta			Andmed LiDARi andmete kohta			
Uurimisala	Maakond	Kaardilehe nr 1:2000	LiDAR mõõdistuse aasta	LiDAR maapinna punktide arv	Kaardilehe nr 1:10000	Kaardistamise aeg	Koordinaatsüsteem	Kõrgusjoonte lõikevahe (m)
Soontaga	Valgamaa	430621	2009	101384	C5526Vv4	1975	Pulkovo-1963	2
Vaisi	Harjumaa	564484	2008	226539	O3436Ag2	1961	Pulkovo-1942	1
Võhmetu	Lääne-Virumaa	566625	2009	268501	C5826Ag2 C5826Bv1	1976 1985	Pulkovo-1963	1
Võivaku	Viljandimaa	483595	2010	143030	C5625Ag3 C5625Ag4 C5625Vb1 C5625Vb2	1975	Pulkovo-1963	1
Tääksi	Viljandimaa	487594	2010	178970	C5625Ag3	1975	Pulkovo-1963	1

**Lisa 2.** Topokaardi kõrgusmodeli erinevus LiDARi kõrgusmodeli suhtes uurimisaladel.

Uurimisala	Ainja	Jõepera	Kaleste	Keeni	Koki	Kõrveküla	Kääriku	Laanemetsa	Muike	Mäetsa
Maksimaalne	10.89	12.06	9.01	9.03	3.64	3.01	6.35	12.63	9.77	6.27
Minimaalne	-9.93	-8.18	-13.48	-6.82	-2.32	-3.41	-12.12	-8.28	-5.28	-3.16
Keskmine	0.21	0.73	0.37	0.59	0.55	0.29	-1.01	0.54	0.57	0.30
Ulatus	20.82	20.24	22.49	15.85	5.96	6.42	18.47	20.91	15.05	9.43
alla -10 m	0.00%	0.00%	0.07%	0.00%	0.00%	0.00%	0.14%	0.00%	0.00%	0.00%
-10...-8 m	0.20%	0.01%	0.12%	0.00%	0.00%	0.00%	0.58%	0.00%	0.00%	0.00%
-8...-6 m	0.43%	0.14%	0.37%	0.08%	0.00%	0.00%	1.48%	0.14%	0.00%	0.00%
-6...-4 m	2.03%	1.25%	1.03%	0.97%	0.00%	0.00%	3.44%	1.61%	0.61%	0.00%
-4...-2 m	10.40%	5.24%	4.14%	2.93%	0.01%	0.43%	13.53%	8.05%	3.19%	0.05%
-2... 0 m	31.80%	29.29%	29.03%	13.22%	8.90%	31.82%	60.25%	28.27%	24.98%	37.20%
0...2 m	38.93%	42.64%	54.98%	76.70%	89.85%	67.00%	16.91%	42.91%	60.44%	58.90%
2...4 m	12.25%	13.76%	7.82%	5.20%	1.23%	0.75%	2.77%	12.20%	8.33%	2.29%
4...6 m	2.61%	5.59%	1.91%	0.78%	0.00%	0.00%	0.88%	4.70%	1.80%	1.52%
6...8 m	1.00%	1.72%	0.51%	0.10%	0.00%	0.00%	0.02%	1.55%	0.53%	0.03%
8...10 m	0.32%	0.30%	0.02%	0.03%	0.00%	0.00%	0.00%	0.39%	0.11%	0.00%
üle 10 m	0.02%	0.07%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.17%	0.00%	0.00%

Uurimisala	Mägestiku	Oja-küla	Raavitsa	Ranna-küla	Rebaste	Salu	Soontaga	Võhmetu	Võivaku	Alad Kokku
Maksimaalne	8.46	18.97	3.69	3.11	11.50	6.02	5.21	5.04	5.34	18.97
Minimaalne	-13.60	-5.07	-2.56	-1.85	-5.62	-5.52	-15.37	-5.54	-5.72	-15.37
Keskmine	0.03	0.39	0.62	0.26	1.09	0.04	-0.43	0.23	0.05	0.29
Ulatus	22.06	24.04	6.25	4.96	17.12	11.54	20.58	10.58	11.06	34.34
alla -10 m	0.39%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.80%	0.00%	0.00%	0.07%
-10...-8 m	0.53%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.68%	0.00%	0.00%	0.11%
-8...-6 m	1.57%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	1.05%	0.00%	0.00%	0.28%
-6...-4 m	3.47%	0.01%	0.00%	0.00%	0.26%	0.33%	1.62%	0.14%	0.04%	0.89%
-4...-2 m	10.01%	0.31%	0.03%	0.00%	1.68%	2.84%	6.74%	0.98%	4.08%	3.96%
-2... 0 m	24.01%	60.91%	15.53%	29.85%	11.86%	45.92%	46.53%	37.68%	41.35%	31.84%
0...2 m	44.59%	31.27%	82.29%	69.91%	69.17%	47.16%	37.30%	57.75%	53.48%	54.96%
2...4 m	13.01%	2.47%	2.15%	0.24%	11.99%	3.12%	5.17%	3.25%	1.03%	5.77%
4...6 m	2.21%	1.13%	0.00%	0.00%	3.34%	0.64%	0.11%	0.19%	0.03%	1.46%
6...8 m	0.21%	0.91%	0.00%	0.00%	1.52%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.43%
8...10 m	0.01%	0.91%	0.00%	0.00%	0.15%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.12%
üle 10 m	0.00%	2.09%	0.00%	0.00%	0.02%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.12%

**Lisa 3.** Kõrguserinevuste osakaal uurimisaladel CORINE maakatteandmetest lähtudes.

	Heitlehised lehtmetsad	Karjamaad	Kompleksmaaviljelus	Niisutuseta haritav maa	Okasmetsad	Põllumajanduslik maa	Segametsad	Üleminekulised metsaalad	Muu
alla -10 m	0.10%	0.00%	0.00%	0.00%	0.11%	0.00%	0.08%	0.00%	0.00%
-10...-8 m	0.39%	0.00%	0.00%	0.00%	0.11%	0.01%	0.14%	0.00%	0.00%
-8...-6 m	0.77%	0.00%	0.00%	0.00%	0.22%	0.10%	0.47%	0.03%	0.00%
-6...-4 m	2.09%	0.00%	0.00%	0.00%	0.74%	0.38%	1.40%	0.58%	0.04%
-4...-2 m	10.41%	0.01%	0.40%	0.39%	3.54%	2.50%	4.85%	3.38%	21.83%
-2... 0 m	43.43%	17.54%	17.04%	28.52%	29.48%	46.45%	32.56%	28.75%	28.86%
0...2 m	34.80%	80.35%	80.61%	70.92%	57.38%	48.96%	49.06%	59.69%	46.57%
2...4 m	6.81%	1.96%	1.94%	0.17%	6.52%	1.47%	7.58%	4.41%	2.67%
4...6 m	1.14%	0.14%	0.00%	0.00%	1.40%	0.13%	2.55%	1.55%	0.02%
6...8 m	0.05%	0.00%	0.00%	0.00%	0.40%	0.01%	0.67%	1.18%	0.00%
8...10 m	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.09%	0.00%	0.23%	0.26%	0.00%
üle 10 m	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.00%	0.40%	0.16%	0.00%

**Lisa 4.** Kõrguserinevuste osakaal uurimisaladel ETAK maakatteandmetest lähtudes.

	Mets	Muu lage	Märgala	Põld	Rohumaa
alla -10 m	0.10%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
-10...-8 m	0.15%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
-8...-6 m	0.36%	0.01%	0.00%	0.00%	0.01%
-6...-4 m	1.13%	0.11%	0.00%	0.15%	0.33%
-4...-2 m	4.74%	3.72%	1.25%	0.80%	2.74%
-2... 0 m	31.54%	35.59%	37.69%	34.14%	39.78%
0...2 m	52.33%	56.24%	55.83%	64.33%	55.70%
2...4 m	6.97%	3.83%	4.02%	0.57%	1.40%
4...6 m	1.85%	0.41%	1.08%	0.00%	0.05%
6...8 m	0.55%	0.06%	0.06%	0.00%	0.00%
8...10 m	0.15%	0.04%	0.06%	0.00%	0.00%
üle 10 m	0.15%	0.00%	0.01%	0.00%	0.00%

**Lisa 5. Kõrgusmodelite minimaalne ja maksimaalne kõrgus ning mudelitest arvatatud samakõrgusjoonte kogupikkus.**

	Topomudel				LiDARi mudel			
	Minimaalne kõrgus (m ü.m.p)	Maksimaalne kõrgus (m ü.m.p)	Ulatus (m)	Kõrgusjoonte pikkus h 1m (m)	Minimaalne kõrgus (m ü.m.p)	Maksimaalne kõrgus (m ü.m.p)	Ulatus (m)	Kõrgusjoonte pikkus h 1m (m)
Võivaku	59.48	87.46	27.98	33883	61.05	87.32	26.27	35740
Võhmetu	108.98	123.58	14.60	46692	109.58	123.38	13.8	44517
Soontaga	33.68	65.15	31.47	65098	34.08	66.03	31.95	63799
Salu	52.25	83.95	31.70	64322	53.84	85.31	31.47	62249
Rebaste	127.07	164.9	37.83	74913	126.86	164.72	37.86	71845
Rannaküla	1.31	12.20	10.89	26064	0.97	12.14	11.17	23590
Raavitsa	42.60	61.43	18.83	37033	42.52	61.00	18.48	37091
Ojaküla	-0.57	42.43	43.00	50834	-0.14	43.35	43.49	51711
Mägestiku	125.62	178.95	53.33	118799	126.76	178.64	51.88	130353
Mäeotsa	49.51	75.47	25.96	47167	48.09	75.50	27.41	42414
Muike	33.05	56.72	23.67	62507	32.39	55.34	22.95	59041
Laanemetsa	79.98	107.30	27.32	78721	80.09	107.38	27.29	89394
Kääriku	124.59	167.33	42.74	114260	124.68	169.31	44.63	119927
Kõrveküla	72.03	88.28	16.25	35358	71.52	86.93	15.41	31322
Koki	18.64	39.31	20.67	33856	17.94	39.18	21.24	26480
Keeni	56.73	95.73	39.00	49595	55.96	96.50	40.54	58048
Kaleste	12.73	44.64	31.91	51273	13.36	44.57	31.21	66215
Jõepera	80.16	119.23	39.07	155874	80.58	120.71	40.13	140218
Ainja	99.27	145.25	45.98	143234	100.87	145.11	44.24	123462

**Lisa 6. Profiili sidepunktide kõrgused**

Sidepunkt	Kaugus	Välimõdistus	LiDARi andmed	Topokaart
1	0	56.13	56.24	55.10
2	49.92	53.62	53.90	53.40
3	95.2	52.40	52.56	52.00
4	150.04	50.87	51.40	49.59
5	188.34	48.85	49.01	47.33
6	224.96	46.89	47.32	45.49
7	279.07	45.25	45.62	45.00
8	314.71	45.73	46.23	44.57
9	331.88	47.25	47.72	46.38
10	356.02	49.48	49.87	49.17
11	389.12	51.73	52.20	52.90
12	426.96	56.88	57.26	58.40
13	436.14	57.64	58.06	59.12

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

Mina Eleri Hirv (*autori nimi*)

(sünnikuupäev: 18.06.1988)

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

Topograafilistel kaartidel kajastatud reljeef LiDARi andmestiku võrdluses (*lõputöö pealkiri*), mille juhendaja on Raivo Aunap (*juhendaja nimi*),

1.1. reprodutseerimiseks säilitamise ja üldsusele kättesaadavaks tegemise eesmärgil, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace-is lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2. üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tartu Ülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace'i kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Tartus, 20.05.2013 (*kuupäev*)