

Tartu Ülikool

Loodus- ja täppisteaduste valdkond

Ökoloogia ja Maateaduste instituut

Geograafia osakond

Magistritöö geoinformaatikas ja kartograafias 30 EAP

## **Jääsoodes toimuvate muutuste analüüsimine LiDAR andmetel**

**Ott Toomsalu**

Juhendajad: Ain Kull, PhD

Raivo Aunap, PhD

Kaitsmisele lubatud:

Juhendaja:

Osakonna juhataja:

Tartu 2019

## **Annotatsioon**

### **Jääksodes toimuvate muutuste analüüsimine LiDAR andmetel**

Käesoleva uurimistöö eesmärk on uurida jääksoo pinnase tihenemise, mineraliseerumise ning erosiooni tõttu toimuvaid maapinna kõrguse muutusi. Töö eesmärkide saavutamiseks kasutatakse LiDAR andmeid, et visualiseerida ja analüüsida jääksodes toimuvaid muutuseid. LiDAR andmetega analüüsiti uurimustöös viite jääksood: Ess-soo, Kildemaa, Kõima, Laiuse, Maima. Jääksoid võrreldi LiDARi kolme ringi mõõdistuste põhjal (2008-2011, 2012-2015, 2017-2020) ning LiDARi andmete usaldusväärsuse analüüsiks kasutati lisaks RTK andmeid. Tulemused näitasid LiDARi andmete usaldatavust ning et korrapärase mõõdistamisintervalliga LiDAR andmeid on võimalik kasutada analüüsivaks jääksoo pinnal toimuvaid kõrguse muutusi ning analüüsida endiste turbakaevandamisalade seisundit.

**Märksõnad:** jääksoo, aerolaserskanneerimine, LiDAR, profiilijoon

**CERCS:** P510 kartograafia

### **Analyzing changes in peatland surface using LiDAR data.**

The purpose of the study was to investigate the changes in surface height that take place in peatlands affected by peat extraction due to compaction of peat, peat mineralization or decomposition and erosion. To accomplish the purpose of this study, airborne laser scanning LiDAR data was used to visualize and analyze the changes in abandoned milled peat production areas. Airborne LiDAR data was used on five abandoned milled or block cut peatlands: Ess-soo, Kildemaa, Kõima, Laiuse, Maima. Peatlands were analyzed based on three rounds of LiDAR surveys (2008-2011, 2012-2015, 2017-2020). To investigate the reliability of LiDAR data, the RTK *in situ* measurement data was used. As a results, we can conclude that LiDAR data is reliable and regular LiDAR surveys can be used to detect the changes on a peatland surface for assessing the elevation and to analyze condition in abandoned milled peat extraction sites.

**Keywords:** peatland, airborne laser scanning, LiDAR, surface profile

**CERCS:** P510 cartography

# Sisukord

<b>Kasutatud lühendite loetelu.....</b>	<b>5</b>
<b>Sissejuhatus.....</b>	<b>6</b>
<b>1. Teoreetiline ülevaade.....</b>	<b>8</b>
1.1. Sood.....	8
1.2. Turba kaevandamine .....	9
1.3. Jääksood .....	11
1.4. Kõrgusandmed .....	12
1.4.1. LiDAR .....	12
1.4.2. ALS mõõdistused Eestis.....	14
<b>2. Materjal ja meetodika.....</b>	<b>16</b>
2.1. Uurimisalade iseloomustus .....	16
2.1.1. Ess-soo .....	17
2.1.2. Kildemaa.....	18
2.1.3. Kõima.....	19
2.1.4. Laiuse .....	20
2.1.5. Maima .....	21
2.1.6. Ilmastikutingimused.....	22
2.2. LiDAR andmestik .....	22
2.2.1. Kõrgusmudelid .....	23
2.2.2. Profiilid ja tsoonid.....	24
2.2.3. Erinevuste mudelid ja usaldusväarsuse kontroll RTK andmetel .....	25
<b>3. Tulemused ja arutelu .....</b>	<b>26</b>
3.1. Ess-soo .....	26
3.1.1. Kõrguse muutus Ess-soo erineva kuivendusintensiivsusega aladel 2011-2015 .....	26
3.1.1. Kõrguse muutus Ess-soo erineva kuivendusintensiivsusega transektidel 2011-2015 .....	27
3.1.2. LiDARi andmete võrdlus RTK mõõtmistega Ess-soo 2015. aasta andmetel .....	29
3.2. Kildemaa .....	29
3.2.1. Kõrguse muutus Kildemaa erineva kuivendusintensiivsusega aladel 2010-2014.....	29
3.2.2. Kõrguse muutus Kildemaa erineva kuivendusintensiivsusega aladel 2014-2017.....	30
3.2.3. Kõrguse muutus Kildemaa erineva kuivendusintensiivsusega aladel 2010-2017.....	31
3.2.4. Kõrguse muutus Kildemaa erineva kuivendusintensiivsusega transektidel 2010-2017 .....	32
3.2.5. LiDARi andmete võrdlus RTK mõõtmistega Kildemaa 2017. aasta andmetel.....	33
3.3. Kõima .....	34
3.3.1. Kõrguse muutus Kõima erineva kuivendusintensiivsusega aladel 2010-2012.....	34
3.3.2. Kõrguse muutus Kõima erineva kuivendusintensiivsusega aladel 2012-2017.....	35
3.3.3. Kõrguse muutus Kõima erineva kuivendusintensiivsusega aladel 2010-2017.....	36
3.3.4. Kõrguse muutus Kõima erineva kuivendusintensiivsusega transektidel 2010-2017.....	36

3.3.5.	LiDARi andmete võrdlus RTK mõõtmistega Kõima 2017. aasta andmetel .....	37
3.4.	Laiuse .....	38
3.4.1.	Kõrguse muutus Laiuse erineva kuivendusintensiivsusega aladel 2010-2014 .....	38
3.4.2.	Kõrguse muutus Laiuse erineva kuivendusintensiivsusega aladel 2014-2018 .....	39
3.4.3.	Kõrguse muutus Laiuse erineva kuivendusintensiivsusega aladel 2010-2018 .....	39
3.4.4.	Kõrguse muutus Laiuse erineva kuivendusintensiivsusega transektidel 2010-2018 .....	40
3.5.	Maima .....	41
3.5.1.	Kõrguse muutus Maima erineva kuivendusintensiivsusega aladel 2010-2014 .....	41
3.5.2.	Kõrguse muutus Maima erineva kuivendusintensiivsusega aladel 2014-2017 .....	42
3.5.3.	Kõrguse muutus Maima erineva kuivendusintensiivsusega aladel 2010-2017 .....	42
3.5.4.	Kõrguse muutus Maima erineva kuivendusintensiivsusega transektidel 2010-2017 .....	43
3.5.5.	LiDARi andmete võrdlus RTK mõõtmistega Maima 2017. aasta andmetel .....	44
3.6.	Erinevuse pindade üldised tendentsid .....	53
3.7.	Profiiljoonte üldised tendentsid .....	53
	<b>Kokkuvõte .....</b>	<b>55</b>
	<b>Summary .....</b>	<b>57</b>
	<b>Tänuavaldused .....</b>	<b>59</b>
	<b>Kasutatud allikad .....</b>	<b>60</b>
	<b>Lisad .....</b>	<b>66</b>

## Kasutatud lühendite loetelu

ALS – aerolaserskanneerimine

ArcGIS – *Arc Geographic Information System*, geoinfotarkvara

BK77 – Balti 1977. aasta kõrgussüsteem

DEM – *Digital Elevation Model*, digitaalne kõrgusmudel

EH2000 – Euroopa kõrgussüsteem

ETAK – Eesti topograafia andmekogu

GPS – *Global Positioning System*, üleilmne asukoha määramise satelliitnavigatsiooni süsteem

IDW – *Inverse Distance Weighting*, kaugusega kaalutud interpoleerimismeetod

IMU – *Inertial Measurement Unit*, inertsiaalandur

L-EST97 – Eesti riiklik tasapinnaliste ristkoordinaatide süsteem

LiDAR – *Light Detection And Ranging*, laserskanneerimine või laserskanneerimisseade

LAS – andmeformaad *LiDAR* andmetele

LAZ – andmeformaad pakitud kujul *LiDAR* andmetele

RMK – Riigimetsa Majandamise Keskus

RTK – *Real Time Kinematic*, tehnoloogia, mille abil suurendatakse satelliitidel põhinevate positsioneerimissüsteemide täpsust

WGS84 – *World Geodetic System 1984*, rahvusvaheline geodeetiliste koordinaatide süsteem

## Sissejuhatus

Ökosüsteemide aastatuhande aruande (*Millennium Ecosystem Assessment*) kohaselt on soodel, kui ökosüsteemidel, väga oluline roll kliimamuutuste reguleerimisel ning leevendamisel, sidudes endas atmosfääris olevat kasvuhoonegaasi, süsinikku (*Millennium Ecosystem Assessment, 2005*). Euroopas on umbes 60 % soodest mõjutatud turba kaevandamisest või metsanduse, põllumajanduse ning energiamajanduse jaoks kraavidega kuivendamisest, põhjustades soode kui ökosüsteemide ulatusliku hävimise või degradeerumise (Haapalehto et al., 2011; Holden et al., 2004). Blankenburg ja Tonnis (2004) on leidnud, et endised turbakaevandamisalad ei ole enamasti iseseisvalt suutelised taastama oma algset funktsiooni ning sooökosüsteemile omapäraseid omadusi. Maha jäetud turbatootmisaladest saavad jääksood, mis ei taastu või taastuvad väga aeglaselt, mõjutades ümberkaudseid alasid madala veerežiimi tõttu (Mioduszewski et al., 2013).

Maakatte uurimise traditsioonilised meetodid, nagu kohapealsed mõõtmised ning fotogramm-meetria, annavad küll väga täpseid tulemusi, kuid on aega nõudvad ning väga töömahukad (Liu, 2008). Kaugseire andmed annavad võimaluse hinnata toimunud muutusi ruumiliselt ning vähendavad traditsiooniliste meetoditega seotud raskusi. Haghghi et al. (2018) uuris Soome näitel kuivendamise ning kaevandamise hilisemat mõju nii kaevandatud alale kui ka ümbritsevale alale. Haghghi kasutas Landsat satelliidi andmeid resolutsiooniga 30 m ning leidis, et 100 hektari suuruse ala jaoks oli resolutsioon piisav, kuid väiksemate alade uurimiseks on vaja parema resolutsiooniga andmeid. Inglismaal Wedholme Flow turbaalal kombineeriti erinevaid kaugseiremeetodeid, kus nuuhulgas kasutati LiDARi andmed, mis olid olulised allikad ala mikroreljeefi andmete kogumisel, tänu oma suuremale resolutsioonile võrreldes satelliitandmetega (Milton et al., 2005). LiDARi andmed pakuvad alternatiivse lahenduse täpsete ja tihedate kolmemõõtmeliste andmete kogumiseks, mis on saanud üheks tähtsamaiks allikaiks digitaalsete andmete kogumiseks maastikelt (Raber et al., 2007). Kuna kuivendamise mõju on pikaajaline, siis on võimalik LiDAR andmetega uurida ning analüüsida edasisi muutusi jääksoodes ning kõrvalasuvatel aladel. Inglismaal läbi viidud uurimustöö kohaselt uuriti turbakihi paksust, kasutades lisaandmetena LiDARi maapinna mudelit 1x1 m suuruse resolutsiooniga (Gatis et al., 2019). Eestis on Lode ja Leivits (2011) testinud LiDARi DEM andmete erinevaid resolutsioone Nigula raba näitel, et leida sobiv lahutus topohüdroloogiliseks analüüsiks.

Käesoleva töö eesmärk on uurida jääksoo pinnase tihenemise, mineraliseerumise ja erosiooni tõttu kraavilähedases tsoonis ning turbatootmisaladel toimuvaid maapinna kõrguse muutusi. Hüpoteesina väidetakse, et kraavilähedases tsoonis toimub maapinna alanemine, aga selle sesoonne kõikumine on väiksem kui kraavitusest mõjutamata alal. Mahajäetud turbatootmisaladel on maapinna kõrguse muutumist kõige enam mõjutavaks teguriks erosioon. Maapinna kõrguse arvutamiseks kasutatakse antud töö käigus aerolaserskanneerimise seadme LiDAR andmeid, mis on teostatud terve Eesti kohta kolme mõõdistusringi jooksul: 2008-2011, 2012-2015 ning 2017-2020.

Jääksoo pinnal, eelkõige freesitud jääksoo pinnal, on turbalasund tihenened ning eelduse kohaselt peaks jääksoo pinna kõrgus kahe mõõdistusperioodi jooksul vaid vähesel määral varieeruma. Jääksoo kõrval asuval alal, mis võib olla samuti kuivenduskraavist mõjutatud, võib eeldada suuremat erinevust kõrgusmudelite vahel, kui võrreldakse kolme mõõdistusringi.

Uurimustöö eesmärkide saavutamiseks uuritakse Ess-soo, Kildemaa, Kõima, Laiuse ja Maima jääksood. Tulemuste saamiseks tehakse maapinna rasterkõrgusmudelitest erinevuse pinnad. Kõrguspunktide saamiseks jääksoo pinnal luuakse maapinna profiilijooned ning tsoonid, seejärel analüüsitakse tulemusi.

# 1. Teoreetiline ülevaade

## 1.1. Sood

Soo on märgala, kus alalise veerohkuse, anaeroobse ja toitainetevaese keskkonna tõttu pidevalt ladestub turvas, mis koosneb lagunenuid taimejäänustest ja huumusest, kuid kui soos on kuivenduse tõttu turbateke lakanud, siis on tegemist turbaalaga (Joosten and Clarke, 2002; Moen, 1995). Sood võivad esineda erinevates kliimaatilistes tingimustes, kuid on eelkõige iseloomulikud jaheda kliima kui ka tasase pinnasega aladele, mis on moodustunud mandrijää liikumise ja sulamise tagajärjel moodustades 4,23 miljoni km<sup>2</sup> (2,84%) suuruse ala maakera pinnast (Gorham, 1991).

Soode ökoloogilised funktsioonid mõjutavad ümbritsevat keskkonda otseselt ja kaudselt olles olulised ökosüsteemiteenuste pakkujad nii inimestele kui teistele elusolenditele. Otseselt avaldavad sood mõju veevarude säilitamise, filtreerimise ja varustamisega, leevendades seejuures üleujutusi ja hoides ära erosiooni ning põua teket (Harenda et al., 2018). Samuti hoiavad sood endas 10% Maa mageveevarudest ning pakuvad veevarusid teistele ökosüsteemidele (Harenda et al., 2018; Joosten and Clarke, 2002). Kaudselt avaldavad sood mõju toitainete ringe reguleerija ja süsiniku salvestajana (Harenda et al., 2018). Globaalse soojenemise tingimustes on soodel oluline roll süsinikuringes akumulierides endas atmosfääris olevat süsinikku ning seejuures vähendada kliimamuutuste mõju Maale (Limpens et al., 2008), sest soodes on talletatud 1/3 Maa mullastikust leiduvast süsinikust (Joosten and Clarke, 2002). Soodel on varustava funktsioonina tähtsal kohal turba tootmine, mis on kasutuses energiakandjana nii kütte kui elektri tootmise jaoks ning kasvusubstraadina (Paal, 2007). Omapärase ja spetsiifilise elukeskkonnana pakub soo elupaiku nii taime- kui linnuliikidele, mis on olulisel kohal bioloogilise elurikkuse tagamisel. Kultuurilise väärtusena, pakuvad sood esteetilist ning rekreatsioonilist väärtust võimaldades korraldada matku, tegeleda fotograafiaga, toetada loodushariduse kui ka teaduse arengut (Kimmel, 2009; Kosk ja Lõhmus, 2011).

Pakkudes keskkonnale olulisi teenuseid, on soo habras ökosüsteem olles väga tundlik keskkonnamuutustele nagu õhusaaste, karjatamine, tulekahjud, kunstlikud äravoolud, metsastamine, infrastruktuuri ning kliimaga seotud muutustele (Noble et al., 2018; Parry et al., 2014). Sood on tundlik ka kliimaatilistele teguritele nagu vihmaperioodid ning põuad. Vihmaperioodidel, kui soo imab endasse palju vett, tõuseb soo pind, sest turbapoorid



täituvad veega. Põua ajal, kui vett pole piisavalt, muutuvad pealmise turbakihi poorid veevaesemaks ning soo pind madalamaks (Glaser et al., 2004).

1950. aastatest alates on uuritud Eesti soid, et hinnata nende pindala ja analüüsida muutusi (Kimmel et al., 2010). Orru (1992) leidis uurimuse tulemusena, et Eesti turbaalade pindala on 1 010 000 hektarit, mis on kahanenud inimtegevuse tagajärjel. Metsamajandus ning põllumajandustegevus on oluliseks faktoriks soode hävimisel, kuid eelkõige turba kaevandamine soode kuivendamise näol. 2000. aastal Natura2000 soode inventeerimisel oli soode ja turbaalade hulk vähenenud 900 000 hektari peale (Kimmel et al., 2010). 2013. aastal Eestimaa Looduse Fondi poolt tehtud inventuuri tulemusena hinnati soode (lage- ja puissoode) suurus vaid 240 000 hektarini, kuhu juurde võib lisada veel soometsad 85 000 hektari suurusel (Paal and Leibak, 2013). Soode pindala on vähenenud rohkem kui poole võrra umbes 70 aasta jooksul.

Esimesed andmed turba kasutamisest kütusena pärinevad Eestis Sindi tekstiilitehasest 1860. aastast (Ilomets et al., 1995). 20. sajandil suurenes turba kasutamine nii elektritootmisel kui ka kütuse kasutamisel, millest sai 1920. aastaks peamine kütteallikas Eestis. Kui 20. sajandi keskpaigaks oli kaevandusalade pindala umbes 9 000 hektarit, siis 2010. aasta andmete põhjal on see kasvanud 20 000 hektarini. Nüüdseks on turvas teine kõige tähtsam energiaallikas Eestis põlevkivi järel. Turvast loetakse küll kui taastuvaks energiaallikaks, siis ülekaevandamise ning aeglase taastumisaja tõttu jäävad turbavarude ammendumisel kaevandustest maha jääksood, mille arv kasvab sarnaselt kaevandusalade suurenemisega (Kimmel et al., 2010). 2010. aastal oli jääksood suurus Eestis umbes 9400 hektarit, mis kokkuvõttes teeb umbes 30 000 hektarit kahjustunud soid (koos kaevandustega) Eestis. Kuna kaevandamine mõjutab ka kõrvalasuvaid alasid, võib rikutud alade suurus olla kahekordne (Paal, 2011).

## **1.2. Turba kaevandamine**

Kuna turba kaevandamise käigus avatakse soo erinevad kihid järk-järgult, siis muutuvad ka soo füüsikalised ja keemilised esialgsed omadused (Paal, 2007). Kaevandamise üheks etapiks on turbalasundi kuivendamine, mille jaoks rajatakse kraavid tulevase kaevandusala ümber (Holden et al., 2004). Kraavide ülesanne on koguda kokku ning ära juhtida vesi, alandades seejuures veetaset ning niiskusesisaldust soodes (Kohv et al., 2015). Soode kuivendamine ei mõjuta ainult seda ala, millelt juhitakse vesi ära, vaid ka ümberkaudsete

alade veerežiimi, toitainete sisaldust ning elustikku. Niiskusesisalduse vähenemisel ülemise turbakihi poorides, täituvad need õhuga, mis soodustab mikroorganismide elutegevust ning orgaanilise aine lagunemiskiirust (Holden et al., 2004). Selle tulemusena vajub turba ülemine kiht kokku ja toimub rabapinnase vajumine. Turba alumises kihis, kus poorid on väiksemad, toimub samuti tihenemine (Price et al., 2003). Uuringute kohaselt mõjutab kuivendamine tugevasti kraavist 100 meetri ulatusse jäävat ala ning nõrk mõju avaldub umbes 300 meetri kaugusele (Kull, 2013). Sama tendentsi täheldasid ka Minkinen ja Laine (1998) oma uurimuses, et kraavide läheduses toimub turba vajumine. Price et al. (2003) leidsid, et kuivenduse ja ülemise turbakihi eemaldamisel võib turba vajumine koheselt olla kuni 3.7 cm aastas meetri kohta ning edaspidi 0.3 cm aastas meetri kohta oksüdeerumise tõttu.

Conway ja Millar (1960) uurisid hüdroloogilisi muutusi soodes kahe loodusliku äravooluga aladel ja kahe tehiskraaviga aladel. Uurimise tulemusena nad järeldasid, et äravool turbaaladelt oli kiirem, kus olid süvendatud kunstlikud kraavid. Tugevate sadude korral oli äravool kraavidega aladelt varasem ja suurem kui looduslike ojadega aladelt, kus vee äravool oli aeglasem ja pikema viibeajaga. Kaevandatud turbaaladel on veetase sageli rohkem kui meetri sügavusel, mistõttu on turbaalad halva veemahutavusega. See põhjustab vihmaperioodidel üleujutusi ning põuaperioodidel võib põhjustada täielikku läbikuivamist (Price et al., 1998). Vee juhtimine kraavidesse mõjutab samuti ümberkaudseid kaeve alandades nendes veetaset. Jões ja allikad muutuvad tundlikumaks põuale ning turbamaardlatest väljavoolav vesi muutub happeliseks sisaldades palju humiinaid ja tahkeid turbaosakesi, mis veekeskkonnas olevatele organismidele pole elutegevuseks sobiv (Riigikontroll, 2005).

Turbaalade kuivendamisel toimub turbapoorides hapniku tõttu ka mineraliseerumine ja toitainete vabanemine. Kui rabad oma looduslikus olekus olid üheks olulised süsiniku neelajaks fotosünteesi käigus, siis kuivendamise ning taimkatte puudumise mõjul muutub turbaväli süsiniku ning muude kasvuhoonegaaside (süsihappegaas, diämmastikoksiid, metaan) emiteerijaks (Leifeld and Menichetti, 2018). CO<sub>2</sub> eraldumine on tingitud hapniku juurdepääsust turba kihtidesse, mis soodustab mikroorganismide elutegevust, mineralisatsiooni ning mikroorganismide ja taimestiku lagunemist (Holden et al., 2004).

Turba kaevandamisel jäävad ka suured alad lagedaks, mis on avatud tuultele, põhjustades tuuleerosiooni ning turba pinnase kandumist lähedal olevatele aladele (Foulds and

Warburton, 2007). Erosiooni võib põhjustada ka vesi, uuristades turbakihti käike ning samuti võivad erosiooni käigus kukkuda kokku kraavide kaldad (Li et al., 2018). Kuna turba kaevandamine muudab turba pinnase kuivaks, siis on suur lage ala ka eriti vastuvõtlik tule levimisele kuival perioodil (Joosten and Clarke, 2002).

Looduslikud sood on elupaigaks ning kasvukohaks mitmetele spetsiifilistele taime- ja loomaliikidele (Triisberg et al., 2011). Soodes enimlevinud samblaliik *Sphagnum*, mis on turba produtseerijaks, on väga tundlik kuivendamise mõjule ning seetõttu kaotab oma looduslike elupaiku. Kuivendamise käigus alaneb samuti veetase ning taimede juured ei ulatu saama vett ning toitained põhjaveest (Stivrins et al., 2017). Kõige suuremat mõju avaldavad ümbritsevale keskkonnale freesturbaväljad, kus kihid avatakse kiht-kihi haaval väga suurtel aladel ning eemaldatakse kogu seemnepank. Freesimise käigus aga eemaldatakse rabade pealmised kihid ning lisaks taimeliikidele, hävinevad loomaliikide elupaigad (Triisberg et al., 2011).

### **1.3. Jääksood**

Jääksooks peetakse endiseid turbakaevandamisalasid, kus kaevandamine on lõppenud, sest turbalasundi paksus ei võimalda enam masinatega kaevandada või pole majanduslikult otstarbekas ja turbalasundi paksus jääb tihti 10 kuni 50 cm vahele (Paal, 2007). Uuringute järgi on Eestis 98 jääksood suurusega 9371 hektarit, millest väga väike osa on taastaimestunud (Ramst and Orru, 2009).

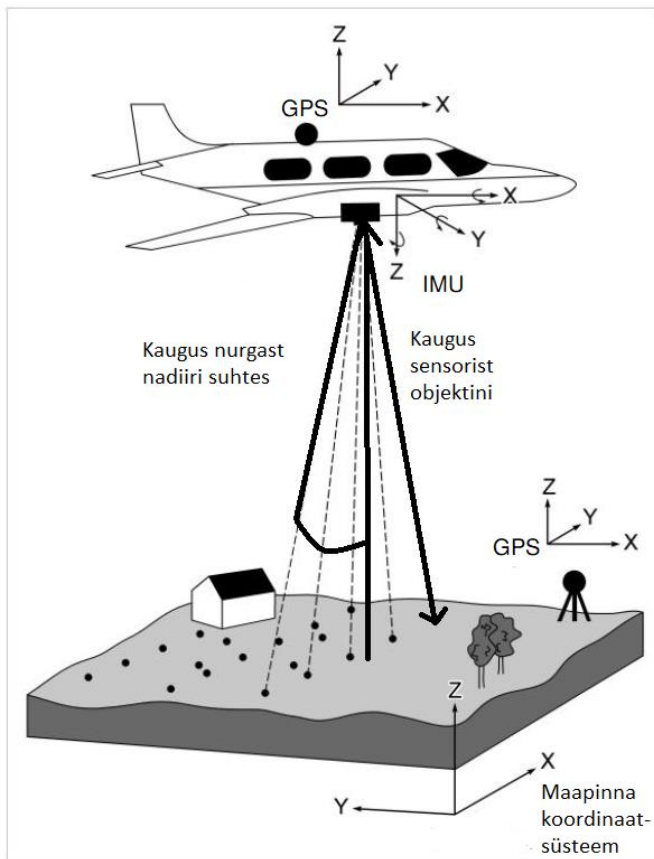
Kuna jääksoode looduslik taastaimestumine on väga aeganõudev protsess – esialgne looduslik kooslus ei ole võimeline enam kasvama lõhutud pinnasel ning jääksood on ümbritsevale keskkonnale negatiivse mõjuga, siis on hakatud tegelema jääksoode korrastamisega ning turba kaevandamise piiramisega. See on reguleeritud säästva arengu-, maapõue- ja kaevandamiseseadusega. Säästva arengu seadus reguleerib turba, kui taastuva loodusvara säästlikku kasutamist (Eesti Vabariigi valitsus, 1995), kaevandamiseseadus reguleerib kaevanduste ohutu toimimise keskkonnale (Eesti Vabariigi valitsus, 2003) ning maapõueseadus rikutud maa hilisemat korrastamist ja taastamist. Maapõueseaduse kohaselt on kaevandajal kohustus korrastada kaevanduspiirkond ning ala rekultiveerida. Ala tuleb kohandada metsamaaks, veekoguks, mõneks muuks tarbimisväärtuslikuks alaks või tunnustatud väärtusega alaks, mis peab sobima ümberkaudsesse maastikku (Eesti Vabariigi valitsus, 2004).

Jäaksoode taimestumise kiirendamiseks on oluline tõsta turbalasundis veetaset ja seda hoida, et taimed saaksid juurtega ligipääsu veele (Price et al., 2003). Taimestumise kiirendamist aitab väetamine fosfori- ja kaaliumväetistega ning lupjamine kaltsiumisisalduse tõstmiseks. Hüdroloogiliste protsesside taastamiseks tuleks sulgeda kraavid ning mitmekesistada mikroreljeefi (Paal, 2007).

## **1.4. Kõrgusandmed**

### **1.4.1. LiDAR**

LiDAR on laserskaneerimise seade, millega mõõdetakse ajavahemikku laserimpulsi tee läbimisel objektini ja tagasi seadmesse. ALS on kaugseire meetod, kus LiDAR on kasutusel õhusõiduki platvormil (lennuk, helikopter vm) ning kust laserimpulss saadetakse välja valguskiirusel (300 000 000 m/s), et genereerida kolmemõõtmelisi andmeid maapinna kohta (Novero et al., 2019). ALS süsteemil on kolm peamist komponenti andmete moodustamiseks: GPS- platvormi asukoha täpseks tuvastamiseks maapealse baasjaama suhtes WGS84 süsteemis; IMU- kiirusvektori ja kaldenurga arvutamiseks maapinna suhtes ning laserskaneerimisseade- maapinna kauguse arvutamiseks võttes arvesse väljasaadetud laserimpulsi kaldenurka ning kaugust maapinnani (Lefsky et al., 2002; Liu, 2008). Saadud andmetele arvutatakse X, Y, Z koordinaadid, mis kogutakse kogumitesse ehk punktipilvedesse edasise analüüsi eesmärgil (Pirotti et al., 2012) (Joonis 1). Punktipilve suurus, tihedus ja kvaliteet sõltub platvormi kõrgusest maapinnast ning platvormi kaugusest mõõdetavast objektist (Eesti Maaülikool, 2016).



**Joonis 1.** LiDARi tööpõhimõte (Allikas: Lillesand, Kiefer, ja Chipman 2008)

Kuna ALS mõõtmine on kaugseire meetod, siis toimub mõõtmine mittekontaktisel meetodil läbi atmosfääri, mis võib tekitada mõõtmistulemustes ebatäpsusi. Näiteks võib punktipilvest andmete genereerimisel ekslikult maapinna kõrguse asemel saada maapinna kõrguse koos alustaimestikuga. Selle vältimiseks valitakse lennuaeg varakevadel või sügisel, vastavalt tärkamata või lamandunud taimede esinemisel (Maa-amet, 2019a). Parim aeg mõõdistuste tegemiseks on õhukese lumekattega maapinnalt, sest lumi peegeldab laserimpulssi väga hästi tagasi, tagades väga täpsed tulemused (Vain, 2008). Teiseks oluliseks faktoriks on ilmastikutingimused, sest laserimpulss peab läbima atmosfääri. Pilvistes või vihmastes tingimustes toimub laserimpulsi hajumine pilve/vihmaosakestelt põhjustades punktipilves ebatäpsusi (Vain, 2011). Klassifitseerimisalgoritmidest tulenevad klassifitseerimisvead on sõltuvuses algoritmide sisendparameetritest, mis omakorda sõltuvad mõõdistatava ala omadustest. Näiteks lauge ala algoritmidel on keeruline identifitseerida järskke maapinna muutusi, sest sobivad väärtused on muutunud ja algoritm ei tööta täpselt. Kuna ALS puhul toimub mõõtmine õhus, siis ebatäpsusi võib tekitada platvormi kõrguse ning asukoha määramine. Nende ebatäpsuste vähendamiseks teostatakse kontrollmõõtmisi ning võrdlusi maapinnalt (Maa-amet, 2019a).

LiDARi andmete visualiseerimiseks kasutatakse võrgustik-tüüpi kõrgusmudeleid DEM, kus interpoleerimise teel tekitatakse algandmete põhjal kõrguspunktid (Maa-amet, 2019a). DEM andmete täpsust mõjutavad algandmete täpsus, tihedus ning jagunemine, algoritmid, mida kasutati interpoleerimiseks ning DEM andmete resolutsioon (Liu, 2008).

#### 1.4.2. ALS mõõdistused Eestis

Maa-ameti ALS mõõdistused Eesti ala kohta on teostatud aastatel 2008-2011 (esimene ring), 2012-2015 (teine ring) ning 2017-2020 (kolmas ring toimumas). Vastavalt Tabelile 1 on esimese ja teise ringi mõõdistused toimunud samadel tingimustel, kuid kolmanda ringi mõõdistused toimuvad uue LiDARi seadmega, mis parandab punktihedust ning andmete kvaliteeti.

**Tabel 1.** Maa-ameti tehtud ALS mõõdistused Eesti ala kohta LiDARiga (Allikas: Maa-amet 2019)

	Periood	LiDARi seade	Lennukõrgus (m)	Koordinaatsüsteem	Kõrgus-süsteem	Geoidi mudel	Keskmine punkti-tihedus (p/m <sup>2</sup> )
Esimene ring	2008-2011	Leica ALS50-II	2400	L-EST97	BK77	EST-GEOID2003	0,45
Teine ring	2012-2015	Leica ALS50-II	2400	L-EST97	BK77	EST-GEOID2011	0,45
Kolmas ring	2017-2020	RIEGL VQ-1560i	2600	L-EST97	EH2000	EST-GEOID2017	2,1

Kõik punktipilved läbivad automaatse algoritmpõhise klassifitseerimise. Esimese ringi punktipilvede klassifitseerimisel kasutati viite erinevat klassi, samal ajal kui teisel ringi lisandusid juurde klassid, mis on toodud Tabelis 2 rohelisega. Teise ringi klassifitseerimisel teostati lisaks manuaal-visuaalne korrigeerimine, et tagada võimalikult täpne maapinna punktide klassifikatsioon. Lisaks teostati ka aeropildistamine, mistõttu on lisaandmetena olemas ortofotod.

**Tabel 2.** Maa-ameti ALS mõõdistuste esimese ja teise ringi klassifikatsioon ning seletus. Teise ringi lisandunud klassid on märgitud rohelisega (Allikas: Maa-amet 2019)

Klass	Seletus
1	Klassifitseerimata
2	Maapind, mis ei sisaldu klassis 8
5	Esimesed ja keskmised peegeldused (valdavalt puistud)
6	ETAK ehitise ruumikujude sisse langevad punktid
7	Müra
8	Maapinna iseloomulikud punktid (plaaniline kaugus >20 või kõrgusvahemik +/- 0,3)
9 (14)	ETAK veekogude ruumikujude sisse langevad algselt maapinnaks klassifitseeritud punktid)

Kolmanda ringi klassifitseerimisel muutusid klasside numbrid, mis lähtuvad *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing* klassifitseerimise spetsifikatsioonist (Tabel 3). Lisaks toimus 01.01.2018 üleminek Amsterdami nullist sõltuvale kõrgussüsteemile EH2000, kusjuures esimese ja teise ringi andmed arutati ümber samasse kõrgussüsteemi (Maa-amet, 2019a).

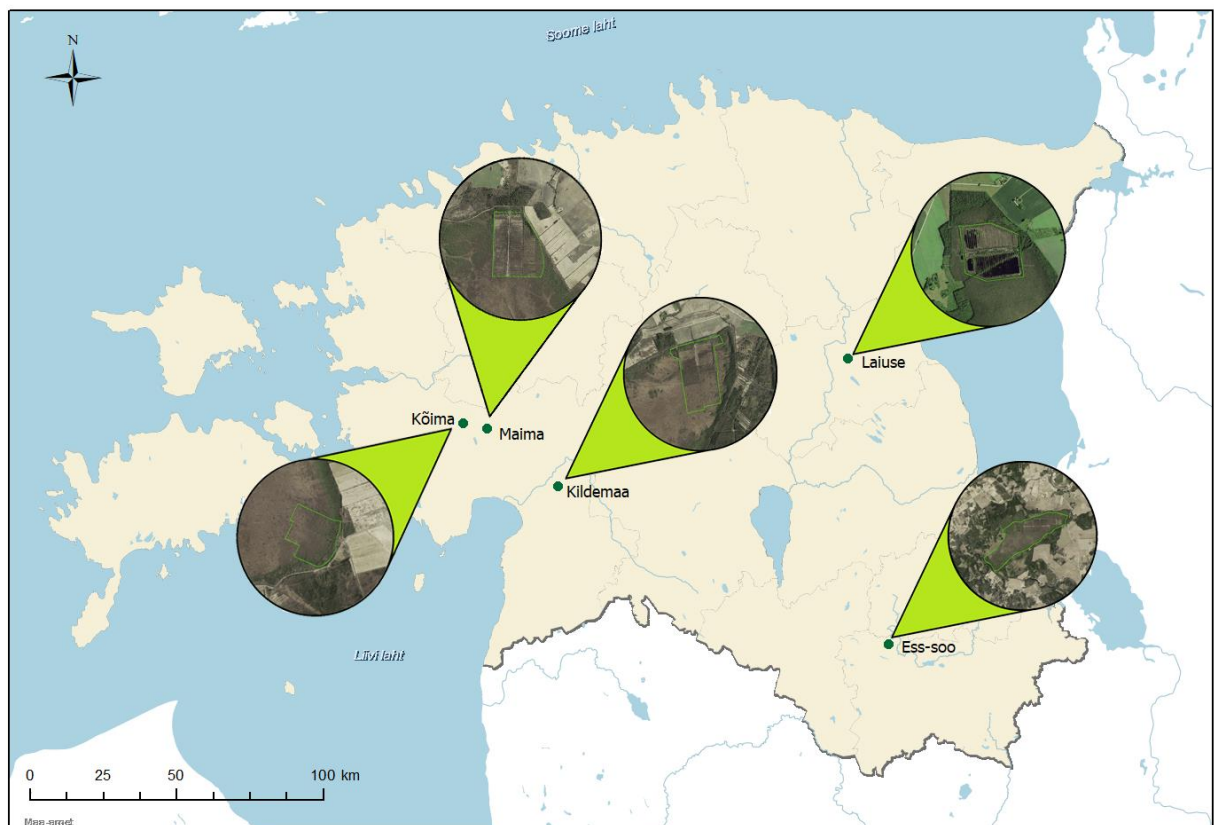
**Tabel 3.** Maa-ameti ALS mõõdistuste kolmanda ringi klassifikatsioon ning seletus (Allikas: Maa-amet 2019)

Klass	Seletus
1	Klassifitseerimata punktid
2	Maapind
5	Multipeegeldusel tekkinud esimesed ja vahepeegeldused
6	Ehitised
7	Anomaalsed maapinnast madalamad punktid
9	Veekogud <sup>2</sup>
17	Mitmetasandiliste ristmike teise tasandi maapinna punktid <sup>2</sup>
18	Anomaalselt kõrged punktid
keypoint bit	Maapinna iseloomulikud punktid (plaaniline kaugus >20 või kõrgusvahemik +/-0,3)
overlap bit	Ülekattuvusala punkt

## 2. Materjal ja metoodika

### 2.1. Uurimisalade iseloomustus

Uurimisaladeks olid viis jääksood Eestis: Laiuse, Ess-soo, Kildemaa, Kõima ja Maima (Joonis 2). Valiku tingimuseks oli erinevat tüüpi turbatootmisalade esinemine jääksoodes, kus esineks erinev taimestumise astmega ja erineva kuivenduse intensiivsusega alasid. Kuna need jääksood kuuluvad projekti „Ammendatud turbamaardlate veerežiimi taastamise kompleksuuringu metoodika väljatöötamine ja uuringu läbiviimine“ raames montooringuprogrammi, siis on nende jääksoodde kohta rohkem andmeid saadaval ja see võimaldab lisaandmete olemasolu tõttu hinnata LiDAR andmete kasutatavust muutuste hindamiseks.

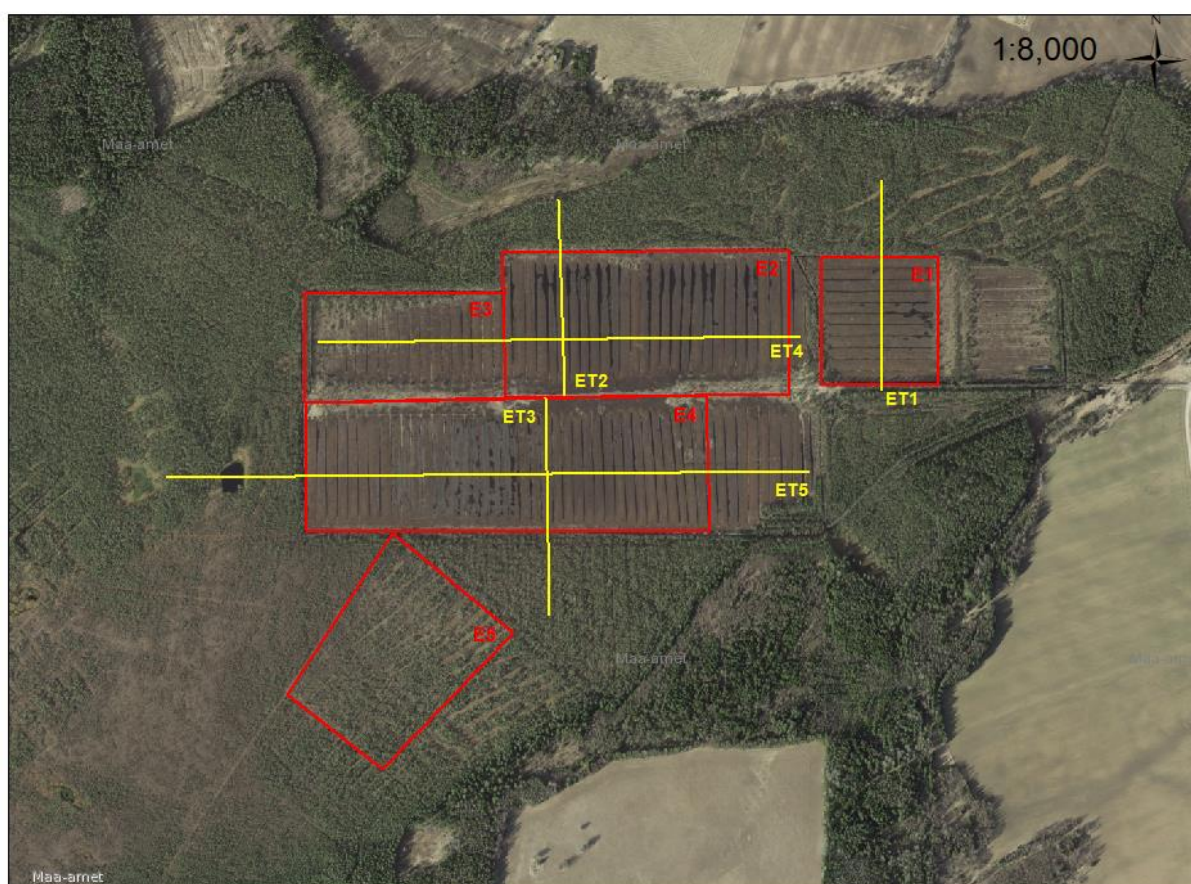


**Joonis 2.** Uurimusse kaasatud jääksoodde asukoht Eestis: Kõima, Maima, Kildemaa, Laiuse, Ess-soo (Aluskaart:Maa-amet, 2019b)



### 2.1.1. Ess-soo

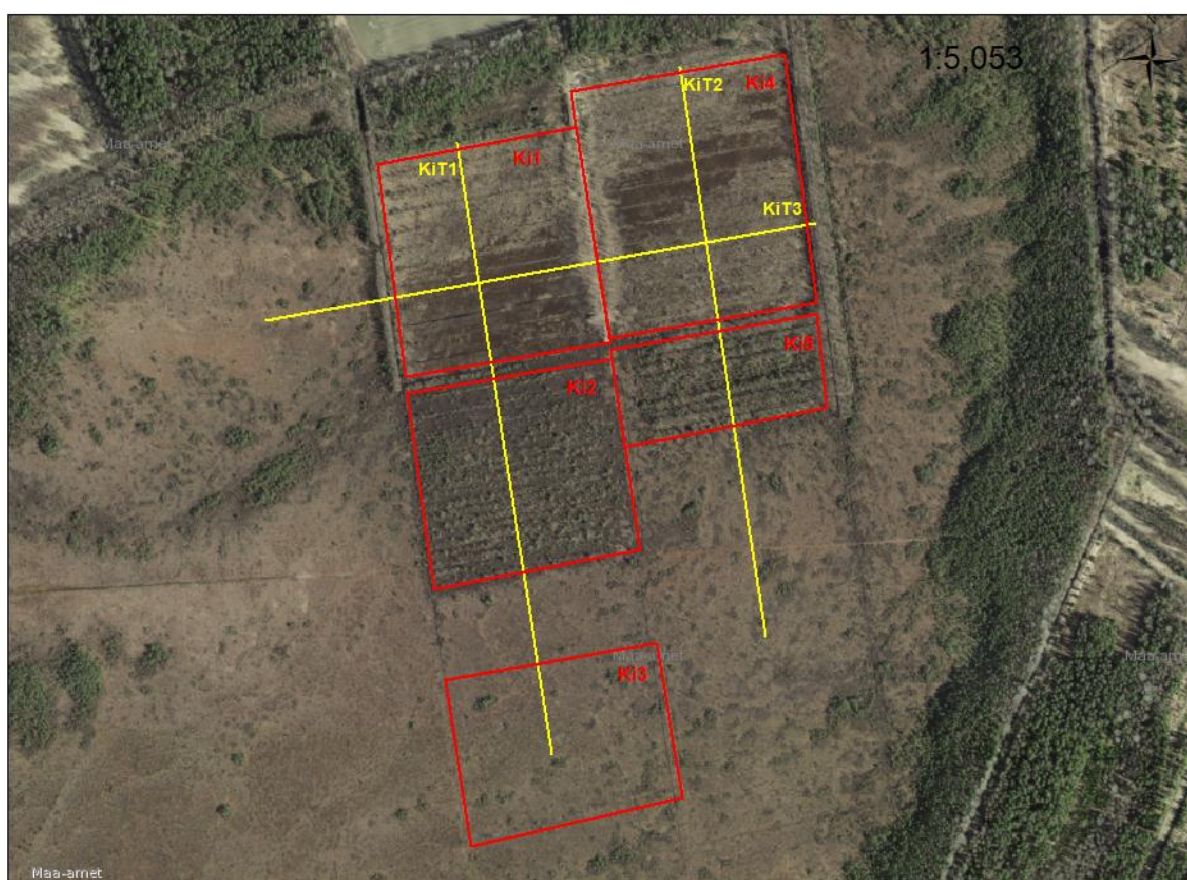
Ess-soo jääksoo asub Võrumaal Antsla vallas ning asub osaliselt Ess-soo maastikukaitsealal (Joonis 2). Ess-soo jääksoo jaguneb kaevandamisviiside poolest kaheks, freesturbaväljaks ja labidaga kaevandatud alaks (Joonis 3). Turba keskmine paksus freesturbaväljal on 2,52 meetrit ning labidaga kaevandatud ala turba keskmine paksus on 2,8 meetrit (Lode et al., 2015). Ess-soo on tekkinud järve kinnikasvamisel ning turvast on kaevandatud 1930ndate teisest poolest saati. Kuivendusvõrk koosneb soopinda ümbritsevatest väiksematest kuivenduskraavidest ja labidaturba kaevandamise kohtadest. Turba kaevandamine toimus kuni 1994. aastani (Lode et al., 2015; Vaguri, 2017a).



**Joonis 3.** Ess-soo jääksoo asukohaskeem ortofoto alusel, kuhu on märgitud punaste ristkülikutega uuritavad tsoonid (E1, E2, E3, E4, E5) ning kollaste joontega transektid (ET1, ET2, ET3, ET4, ET5) (Alus: Maa-amet, 2019b)

### 2.1.2. Kildemaa

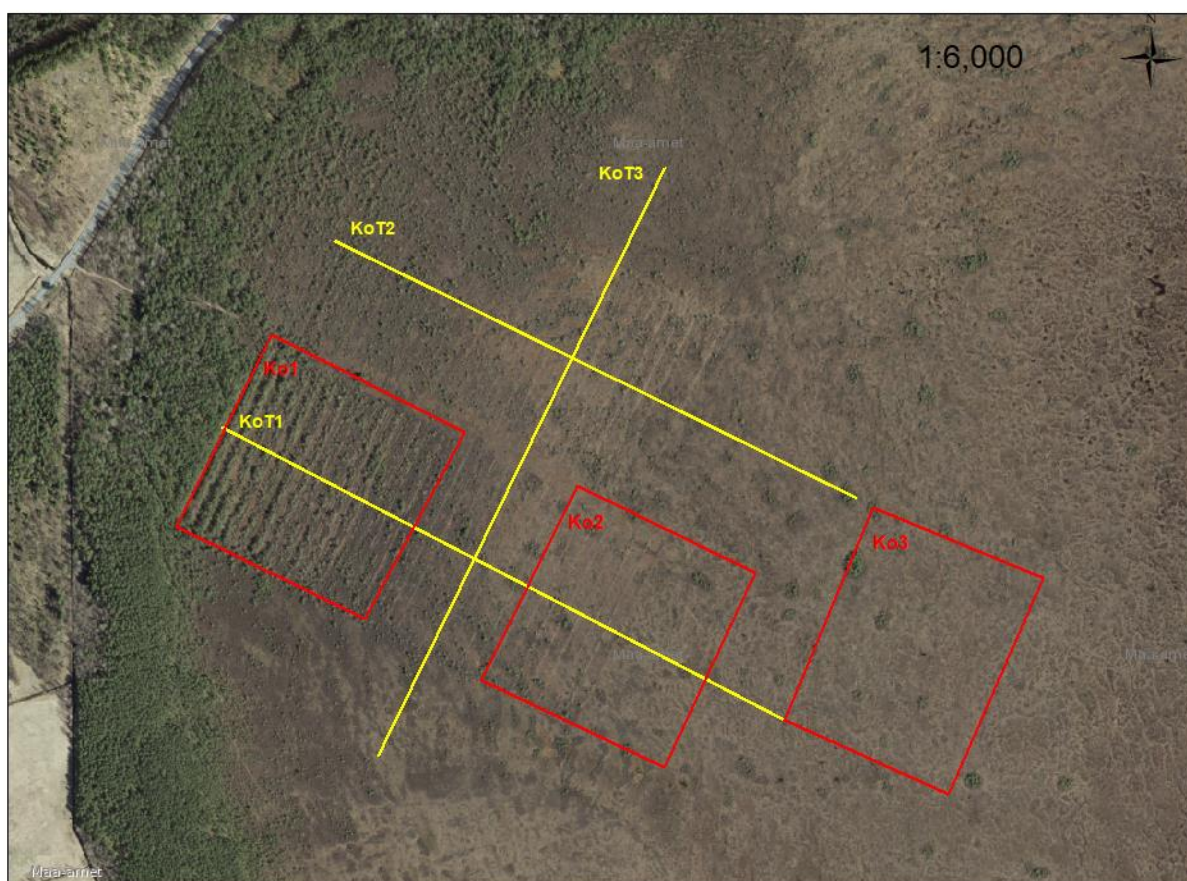
Kildemaa jääksoo asub Pärnu maakonnas Tori vallas Kildemaa külas, mis on osa Kõrsa maardlast (Joonis 2) (Maa-amet, 2019a). Soo on tekkinud veekogu kinnikasvamisel Pärnu madalikul ning andmeid kaevandamise aja kohta ei ole, kuid eeldatavalt kaevandati sealt alusturvast majanditele. Freesväljade kasutamine lõpetati arvatavasti 1980ndatel. Jääksoo on ümbritsetud kraavidega ning ala sees olevad kraavid ja endine teenindustee jagavad ala neljaks plokiks (Joonis 4). Põhjapool on tee poolt eraldatud freesturbaväljad ning lõunapoolsed osad on kraavidega ümbritsetud, kuid maapinna freesimiseni ei jõutud (Lode et al., 2015).



**Joonis 4.** Kildemaa jääksoo asukohaskeem ortofoto alusel, kuhu on märgitud punaste ristkülikutega uuritavad tsoonid (Ki1, Ki2, Ki3, Ki4, Ki5) ning kollaste joontega transektid (KiT1, KiT2, KiT3) (Alus: Maa-amet, 2019b)

### 2.1.3. Kõima

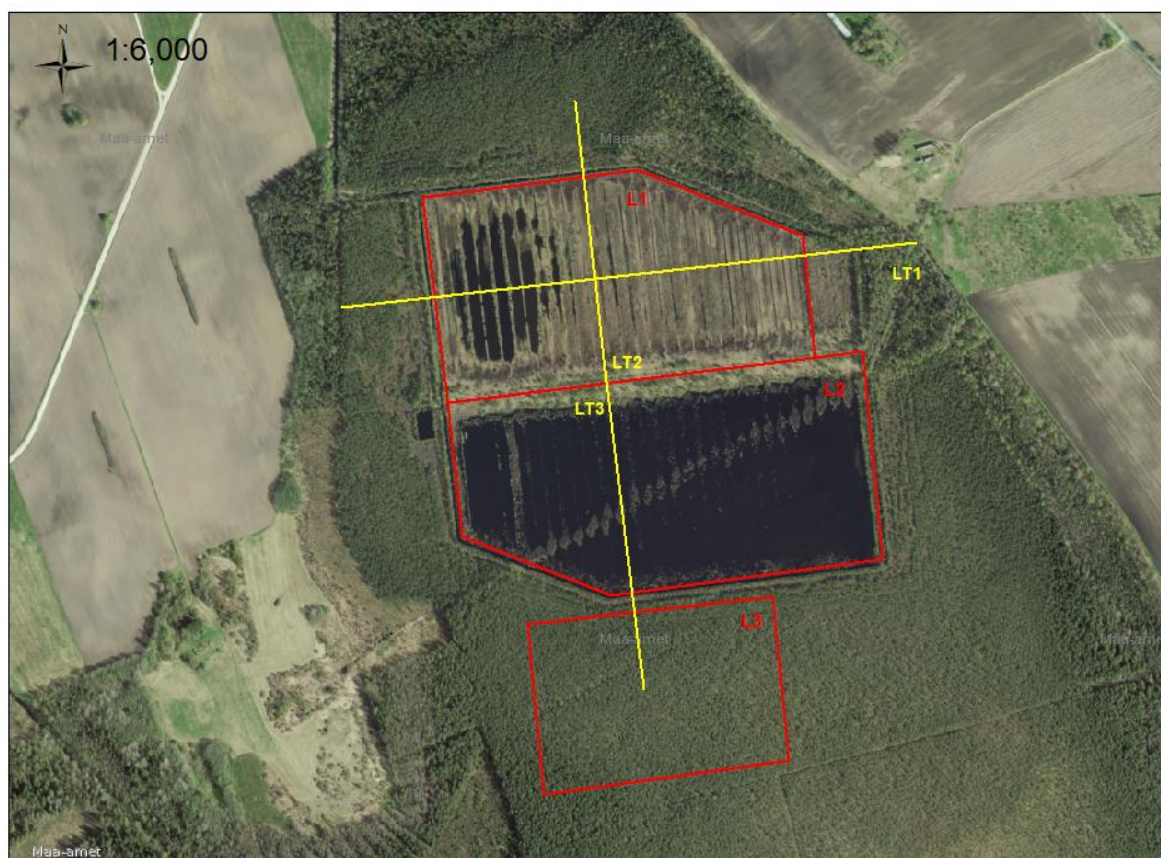
Kõima jääksoo asub Pärnu maakonnas Koonga vallas Hõbeda külas. Kõima asub Lavassaare turbamaardla loodeosas (Joonis 2). Jääksoo asub Lavassaare hoiualal, mis kuulub ka Natura 2000 alade hulka Lavassaare linnu- ja loodusalana (Maa-amet, 2019a). Kaevandusala on turbatootmiseks ettevalmistatud, kuid turba freesimiseni ei ole jõutud. Jääksoos asub lõplikult välja ehitamata teenindustee ning turvast on labidaviisiliselt kaevandatud soo põhjaosas (Lode et al., 2015). Kõima jääksoo piiride sees asub kaks kuivenduskraavi (Joonis 5), kuid nende mõju on marginaalne. Suurem mõju soopinnale on soo põhjaosas asuval kraavil. Turbakaevandamist on Kõimas teostatud enne 1961. aastat ning plokkturba kaevandamine toimus kuni 1980. aastani. Põhjusel, et kuivendusvõrk on välja ehitamata ja turbavõtu kohad on madalad, siis võib eeldada, et turbakaevandamine antud piirkonnas ei toimunud väga pika-ajaliselt (Vaguri, 2017b).



**Joonis 5.** Kõima jääksoo asukohaskeem ortofoto alusel, kuhu on märgitud punaste ristkülikutega uuritavad tsoonid (Ko1, Ko2, Ko3) ning kollaste joontega transektid (KoT1, KoT2, KoT3) (Alus: Maa-amet, 2019b)

#### 2.1.4. Laiuse

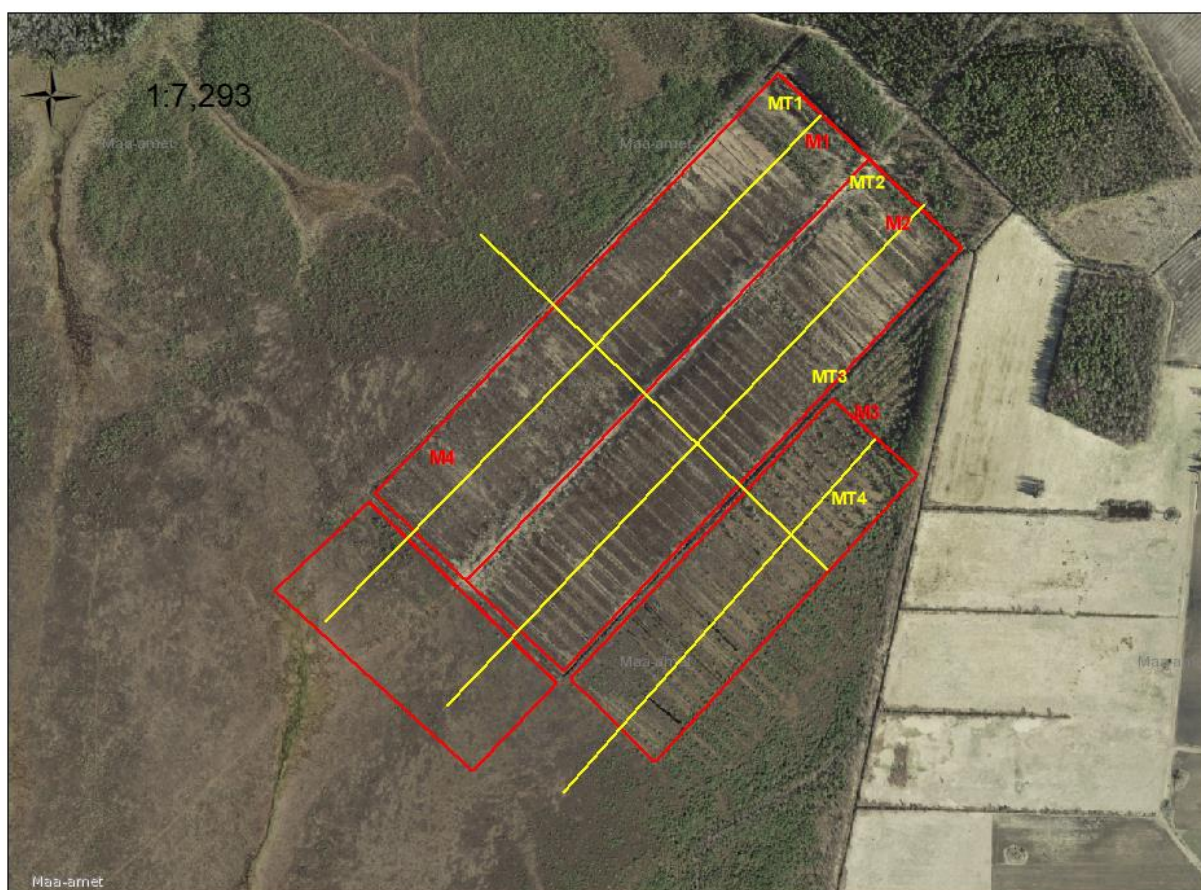
Laiuse jääksoo asub Jõgevamaal, Laiusevälja külas ning on osa Kivijärve turbamaardlast (Joonis 2). Freesturbaväljal on turba keskmine paksus 2,8 meetrit ja looduslikult alal on turba keskmine paksus 2,3 meetrit (Maa-amet, 2019a). Jääksoo asub voortevahelises nõos, mida võib mõjutada survepine põhjavesi (Lode et al., 2015). Ettevalmistused turba kaevandamiseks tehti Laiusel 1930ndatel. Laiuse jääksood ümbritsevad kraavid ning jääksood poolitab endine teenindustee (Joonis 6), mis on ida-lääne suunaline ning teest lõunas olevat osa läbib teine kunagi kasutusel olnud kirde-edela suunaline talitee. Jääksoo lõunapoolne osa on tihti üleujutatud ning säilinud kuivendusvõrk rajati enne 1969. aastat (Vaguri, 2017c). Turba kaevandamine lõppes 1996. aastal vähelagunenud turba kihi ammendumise tõttu (Ramst et al., 2005).



**Joonis 6.** Laiuse jääksoo asukohaskeem, kuhu on märgitud punaste ristkülikutega uuritavad tsoonid (L1, L2, L3) ning kollaste joontega transektid (LT1, LT2, LT3) (Alus: Maa-amet, 2019b)

### 2.1.5. Maima

Maima jääksoo asub Pärnumaal ning kuulub Lavassaare maardlasse, kuid täpsem asukoht on Põhja-Pärnumaa vallas, Perekülas (Joonis 2) (Maa-amet, 2019a). Maima jääksood ümbritseb kolmest küljest Natura 2000 Lavassaare linnu- ja looduskaitseala. Kuivendusvõrk asub endiste freesturbaväljade ümbruses ning lisaks on kraavid jääksoo piirist väljaspool vahetus läheduses (Lode et al., 2015). Jääksood läbib kirde-edela suunaline endine teenindustee, mis poolitab kahte endist freesturbavälja (Joonis 7). Karjääriviisiliselt alustati kaevandamistega 1950ndate lõpus ning freesimise teel kaevandamist alustati 1960ndate teises pooles (Vaguri, 2017d). Turba kaevandamine lõpetati 1990. aastal vähelagunenud turba kihi ammendumise tõttu (Ramst et al., 2007).



**Joonis 7.** Maima jääksoo asukohaskeem ortofoto alusel, kuhu on märgitud punaste ristkülikutega uuritavad tsoonid (M1, M2, M3, M4) ning kollaste joontega transekid (MT1, MT2, MT3, MT4) (Alus: Maa-amet, 2019b)

## 2.1.6. Ilmastikutingimused

Ilmastikutingimusi arvestatakse igale jääksoole kõige lähema ilmajaama andmestikust (Riiklik Ilmateenistus, 2019). Laiuse jääksoole lähim ilmajaam asub Jõgeval. Kildemaa, Kõima ja Maima jääksoode lähim ilmajaam asub Pärnus ja Ess-soo puhul asub Võrus. Kasutatud ilmastiku andmed hõlmavad märtsi, aprilli ja mai keskmist temperatuuri (°C) ja vastavate kuude sademete summat (mm) (Tabel 4). Nende kuude andmeid on kasutatud seetõttu, et LiDAR mõõdistamise ülelennud tehakse kevadel enne puude lehtimist, seega konkreetse ülelennu ajal soodes esinevat veetaset kirjeldavad kõige enam märtsi, aprilli ja mai andmed.

**Tabel 4.** Kuu keskmine õhutemperatuur ja kuu sademete summa Jõgeva, Pärnu ja Võru ilmajaama andmetel (Allikas: Riiklik Ilmateenistus 2019).

	Kuu keskmine õhutemperatuur (°C)			Kuu sademete summa (mm)		
	Märts	Aprill	Mai	Märts	Aprill	Mai
	<b>Jõgeva ilmajaam (Laiuse)</b>					
<b>2010</b>	-2,7	5,5	12,4	60	35	49
<b>2014</b>	2,0	5,9	11,7	34	10	64
<b>2018</b>	-4,3	6,2	14,5	20	52	17
	<b>Pärnu ilmajaam (Kildemaa, Kõima, Maima)</b>					
<b>2010</b>	-2,1	5,4	12,3	46	30	81
<b>2012</b>	0,0	4,7	11,4	63	88	82
<b>2014</b>	2,1	6,4	11,6	38	26	42
<b>2017</b>	1,0	3,0	10,1	60	43	13
	<b>Võru ilmajaam (Ess-soo)</b>					
<b>2011</b>	-1,2	7,0	11,9	16	12	86
<b>2015</b>	3,0	5,9	11,3	19	71	58

## 2.2. LiDAR andmestik

LiDAR andmestikuna on kasutatud Maa-ameti Geoportaali ETAK kevadise ülelennu kõrguspunkte (Maa-amet, 2019a). Kõigil jääksoodel on ülelennud toimunud kõigi kolme mõõdistusringi perioodil, välja arvatud Ess-soo jääksoo kohta, kust kolmandat ringi pole veel jõutud teostada. Ülelendude ajad on toodud Tabelis 5. Mõõdistusringide parameetrid on eelnevalt toodud peatükis 1.4.2 Tabelis 1.

**Tabel 5.** Kasutatud LiDARi mõõdistuste andmete aastad Ees-soo, Kildemaa, Kõima, Laiuse ja Maima soo kohta

	<b>Esimene ring</b>	<b>Teine ring</b>	<b>Kolmas ring</b>
Ess-soo	2011	2015	-
Kildemaa	2010	2014	2017
Kõima	2010	2012	2017
Laiuse	2010	2014	2018
Maima	2010	2014	2017

### **2.2.1. Kõrgusmudelid**

Maa-ameti LiDAR andmed saadi LAZ-formaadis ning kasutamiseks ArcGIS programmis konverteeriti failid ümber LAS-formaati. Konverteerimine teostati vabavaralise programmi LAStools töövahendiga LAS2LAS. Kõrgusmudelite loomisel kasutati programmi ArcGIS v.10.3.1. LAS-failidest tehti LAS andmekogumid töövahendiga Create LAS Dataset. LAS andmekogumist filtreeriti välja maapinna punktid andmekogumi seadetest (Layer Properties) ning filtriga valiti välja ainult punktid klassidest 2 ja 8 (maapinna punktid). Rastermudelid loodi töövahendiga LAS Dataset to Raster. Kõikide alade kohta loodi digitaalne rasterkõrgusmudel (DEM), kus mudeli võrgustiku iga piksel näitab maapinna kõrgust. Antud töös valiti interpoleerimiseks loomuliku naabri (Natural Neighbours, NN) meetod rastri lahutusega 1 meeter. Lahutuse määramisel lähtuti Lode ja Leivits (2011) poolt tehtud uurimusest, kus võrreldi 4 erineva lahutusega (1×1 m, 2×2 m, 5×5 m, 10×10 m) DEM ala ning leiti, et 1 m ja 2 m piksli suurusega DEM andmed on kõige sobilikumad soo mikroreljeefi kirjeldamiseks. Selleks, et kasutada parimat lahutust ja täpsemaid andmeid, valiti 1x1 m ala. Andmete töötlemiseks loodi polügoonid hõlmamaks töös uuritavat ala. Polügoonidest lõigati välja tootmisaladest välja jäävad kraavid ja piirdekraavid, sest erinevatel mõõdistusringide jooksul võib LiDARiga mõõdetud mõõtepunkt mõõta maapinda samas pikslis erinevatest kohtadest (kraavi kallakult või kraavi põhjast), mis omakorda võib tähendada märgatavat maapinna tõusu või langust ainult mõõtepunkti asukoha erinevusest tulenevalt. Kasutades töövahendit Clip lõigati välja eelnevalt loodud rastermudelist tööks uuritav osa. Rastermudeli kõrgusväärtuseta alade täitmiseks (varasemalt kraavide kõrguspunktide asukohad) kasutati

funktsiooni Elevation Void Fill Function, mis loob uue rastermodeli. Funktsioon kasutab Plane Fitting/IDW meetodit. Esimesel puhul arvutakse kaheksa naaberpikslit keskmise ja luuakse kõrgusväärtuseta alade täitmiseks uus piksel. Suuremate tühimike puhul kasutatakse IDW algoritmi, mille puhul arvutatakse tühimike pinnad eeldusel, et lähemal asuvad väärtused on tihedamalt seotud väärtuseta alaga, kui kaugemal asuvad väärtused (GISGeography, 2018). Saadud kõrgusmodelid iseloomustavad ala pinda ilma tootmisaladest kaugemal asuvate kraavideta.

### **2.2.2. Profiilid ja tsoonid**

Maapinna kõrguse muudu uurimiseks jääksoos ja sellega piirnevatel aladel loodi soo pinnale transektid ja tsoonid (Joonised 3, 4, 5, 6, 7). Transektide asukohta valiku kriteeriumiteks igal alal oli luua üks transekt piki tootmisväljakut (ehk kahe kraavi vahelt peenra pealt) ja teine alati risti dreneažkraavidega ja tootmisväljakutega. Transektid asetsevad üle jääksoo pinna ning lõppevad looduslikul alal, et uurida kahe erineva kraavidest mõjutatud pinnase aastatevahelisi muutusi. Transektid loodi eeldusega, et oleks võimalik hinnata tootmisala ümbritsevate kraavide mõju maapinna kõrguse muutusele vastavalt kauguse suurenemisele (ja kuivenduse intensiivsuse kahanemisele) kraavist. Profiilijoonete saamiseks loodi joone interpoleerimisega transektid ning töövahendiga Interpolate Shape loodi iga rasterkõrgusmodeli põhjal transektidele kõrgused ja saadi profiilijooned. Profiilijooned on iga mõõdistuskäigu andmete puhul identsetes asukohtades. Profiilijoonete tulemuste analüüsimiseks kasutati töövahendi 3D Analysti rakendus Profile Graph. Saadud profiilijoonetel kasutatakse 10 meetrise libisevat keskmist, et tulemused oleksid paremini arusaadavamad ja lihtsamalt analüüsitavad. Analüüsimaks muutusi loodusliku alade ja tootmisalade vahel, loodi igale alale tsoonid mis iseloomustavad erineva kuivendusastmega soos toimuvaid muutusi. Tsoonide loomise kriteeriumiks oli igal alal võimalusel luua lageda freesturba tootmisvälja-, taimkatttega karjääriviisilise kaevadamise tootmisvälja ja turbatootmiseta loodusliku ala tsoon. Tsoonide loomiseks loodi polügoonid Feature Class - Polygon Feature töövahendiga ning tsoonid loodi 5 meetri kaugusele tootmisala ümbritsevatest kogujakraavidest. Soode transektidele ja tsoonidele loodi töövahendiga Zonal Statistics statistikud. Töövahend arvutab joone ja ala suuruse, miinimum- ja maksimum kõrguse, miinimum -ja maksimum kõrguse amplituudi, keskmise väärtuse, standardhälbe ja summa. Ruumilise info



tõlgendamiseks kasutati täiendavalt Maa-ameti ortofotosid kogu perioodist, millal ülelennud on tehtud.

### **2.2.3. Erinevuse mudelid ja usaldusvääruskontroll RTK andmetel**

Iga soo kohta loodi kõrgusmodelite erinevuse pind, mis näitab kahe mõõdistusringi vahel toimunud muutusi. Ess-soo puhul loodi erinevuse pind lahutades 2015. aasta kõrgusmodel 2011. aasta kõrgusmodelist. Kildemaa jääksool loodi erinevuse pind 2014. ja 2010. aasta vahel, 2017. ja 2014. aasta vahel ja 2017. ja 2010. aasta vahel. Sarnaselt Kildemaale loodi samade aastate erinevuse pinnad ka Maima jääksoo kohta. Kõima puhul loodi 2012. ja 2010. aasta erinevus, 2017. ja 2012. aasta erinevus ning 2017. ja 2010. aasta erinevuse pind. Laiuse jääksoo erinevuste pinnad loodi 3 mõõdistuskäigu vaheliste LiDAR andmete põhjal, kui loodi erinevuse pind 2014. ja 2010. aasta vahel, 2018. ja 2014. aasta vahel ja 2018. ja 2010. aasta vahel. Erinevuse andmekiht loodi töövahendiga Minus ning lahutati uuema mõõdistusringi kõrgusmodelist varasema mõõdistusringi kõrgusväärtused.

LiDAR mõõdistuste kõrgusandmete usaldusvääruskontroll teostati luues programmis ArcGIS seos RTK mõõdistuse ja rasterkõrgusmodelite vahel. Võrreldi 2018.a. välitöödel mõõdistatud RTK punkti kõrgust ja rasterkõrgusmodeli piksli väärtust, millele RTK punkt langes. Saadud vastavustest loodi iga ala kohta korrelatsioonigraafik. Erinevuse pindadele puhul arvutati tsoonide aastatevahelise ruumilise varieeruvuse hindamiseks pindade ulatuses pikslite vahel korrelatsioon.

### 3. Tulemused ja arutelu

Tulemused on grupeeritud uuritud 5 jääksoo põhjal ning erinevuse pindade joonised asuvad peatüki 3.1 lõpus.

#### 3.1. Ess-soo

##### 3.1.1. Kõrguse muutus Ess-soo erineva kuivendusintensiivsusega aladel 2011-2015

Ess-soo jääksoo puhul võrreldi 2015 aasta kõrgusmudelit 2011 aasta kõrgusmudeliga, kuna kolmanda mõõdistusringini pole veel jõutud. Ess-soo jääksool kaevandamise lõppemisest on möödas 25 aastat ning ala on jäänud peale seda kasutuseta. Jooniselt 8 on kõige selgemini näha maapinna vajumist (0-(-0,4) m) endise tootmisala pinnal, mis võib olla põhjustatud kraavide jätkuvast kuivendamise mõjust (mineraliseerumine ja pinnase eriosioon, nii tuule- kui vee-erosioon). Kraavides, mis asuvad endise tootmisala pinnal, on näha pinnase tõusu (0-0,1 m), mis võib olla põhjustatud eriosiooniga kraavidevahelistelt peenardelt kantud pinnasest, taimestumisest või kõrgemast veetasemest 2015. aasta kevadel. Põhjapoolsetes kraavides, mis asuvad endise tootmisala äärtes, on näha eriti suurt muutust (0,8-3 m), mis võib olla samuti põhjustatud suuremast veehulgast kraavides, sest LiDAR käsitleb veepinna punkte sarnaselt maapinna punktidele. Tabeli 4 järgi oli 2011. aasta sademete hulk Võru ilmajaamas aprillis 12 mm, kui samal ajal 2015. aasta sademete hulk oli 71 mm, põhjustades nii suure erinevuse kahe aasta veetaseme vahel. Temperatuur on mõlema aastakäigu jooksul olnud sarnane. Tabelis 6 on näha maapinna ühtlast tõusu 2015. aastal kõikides tsoonides. Kui 2011. aastal oli madalaimad punktid tsoonides E1 ja E2 vastavalt 117.9 m ja 117.8 m, siis 2015. aastal on vastavad kõrgused 118,1 m ja 118,2 m. Sarnast tõusu on näha ka teistes tsoonides. Looduslikul soosal on näha suuremat erinevust, sest kuivendamise mõju väheneb ning olulist rolli hakkavad mängima looduslikud protsessid ning ilmastikuolud. Tsoonis E1, milles lõpetati kaevandamine varem, on näha kraavides väiksemat muutlikkust, kuna kraavid võivad olla juba kinni kasvanud ning veehulga mõju ei ole nii määrav. Tsoonid E2, E3, E4 on sarnase muutusega, kuid tsoonis E4 on näha maapinna kõrguse kasvu ala läänepoolses osas. Ortofotot vaadates on see ala mõjutatud üleujutusest, eriti 2015. aastal. Nende tsoonide suuremat muutust keskmisest toetab suurem standardhälve mõlema aasta piltidel (>0,58) (Tabel 6). Tsoon E5, mis on varasemalt karjääriviisiliselt kaevandatud ning on hakanud taimestikuga kattuma (ortofotod), on koheva turbasamblaga kaetud turbaaukudes veetaseme muutuse mõju eriti intensiivne, mida näitab ka kõrguse kasv 2015. aastal (0-0,4

m). Karjääriviisiliselt kaevandatud turbatootmisaladel hakkab rabataimestik optimaalsema veerežiimi tõttu kiiremini taastuma, kuid on eriti tundlik veetaseme kõikumise suhtes. Tsoon E1 ja E5 väikest muutlikkust toetab Tabelis 6. madal standardhälve (<0,34), kuna maapinna kõrgus on keskmisega võrreldes ühtlasem. Ala lääneosas asub ka rabajärv, milles on näha kõrguse kasvu (0-0,3 m). Kuna rabajärved toituvad sademeteveest, siis see kinnitab suurenenud sademete hulgast tingitud maapinna kõrguse kasvu turbasammaldega kaetud aladel 2015. aastal.

**Tabel 6.** Ess-soo tsoonide E1, E2, E3, E4 ja E5 pikslite minimaalne väärtus meetrites (m), maksimaalne väärtus m, vahe m, keskvärtus m ja standardhälve aastatel 2011 ja 2015.

Tsoon	Minimaalne väärtus (m)	Maksimaalne väärtus (m)	Ulatus (m)	Keskvärtus (m)	Standardhälve
<b>2011</b>					
E1	117,9	120,6	2,7	119,2	0,34
E2	117,8	122,5	4,7	119,7	0,70
E3	118,3	122,3	3,9	120,3	0,73
E4	119,0	122,4	3,3	120,6	0,58
E5	122,0	123,9	1,9	123,2	0,24
<b>2015</b>					
E1	118,1	120,5	2,5	119,2	0,32
E2	118,2	122,4	4,2	119,7	0,70
E3	118,5	122,3	3,9	120,3	0,73
E4	119,1	122,4	3,3	120,6	0,58
E5	121,9	124,0	2,1	123,3	0,24

### 3.1.1. Kõrguse muutus Ess-soo erineva kuivendusintensiivsusega transektidel 2011-2015

Ess-soo pinnale loodi viis transekti, millest ET2 (Lisa 2) ja ET3 (Lisa 3) on piki tootmisväljakut ning ET1 (Lisa 1), ET4 (Lisa 4) ja ET5 (Lisa 5) on tootmisväljakutel asetsevate kraavidega risti (Joonis 3). ET2 ja ET3 transektid on algusega tootmisala keskel asuva teenindustee pealt, mille kõrgus ei ole graafikute põhjal aastate jooksul muutunud. Mõlema transekti puhul on märgata 2015. aasta profiilijoone järgi maapinna alanemist tootmisala peal kuni kogujakraavideni. ET2 puhul on märgata suurt erinevus loodusliku ala ääres piirdekraavis, kus LiDAR on tõenäoliselt jätnud reaalsed maapinna punktid kraavi kaldal kasvavate puude tõttu võtmata. LiDAR ei pruugi alati kõiki reaalseid maapinna muutusi adekvaatselt kajastada ning võivad esineda vead, mille põhjusteks võib olla taimestiku kasv kahe mõõdistusringi jooksul või puuvõra vari, mis takistab erineva lennutrajektoori korral LiDAR punktidel maapinnani jõudmist. ET2 ja ET3 transektide

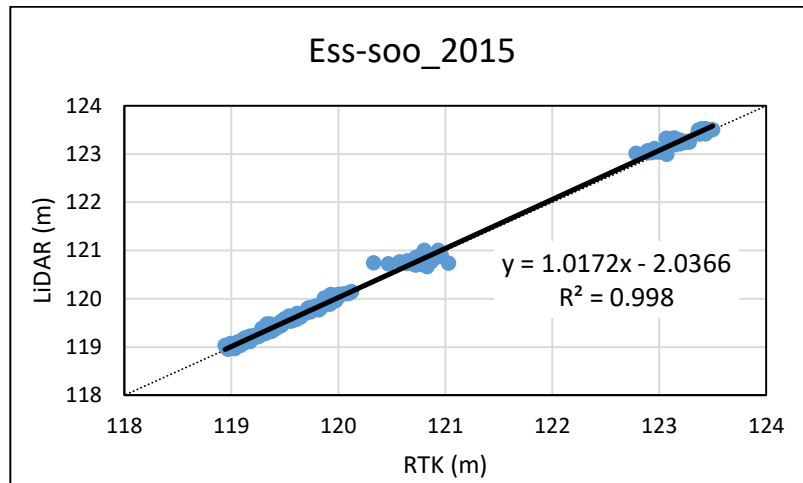
puhul on looduslikul alal kõrguse varieeruvus suurem kui tootmisalal, mis tuleneb kraavist kaugenedes looduslike protsesside võimendumisest. ET1 ja ET4 transektide põhjal tuleb välja, et suure tõenäosusega esineb mõlemal tootmisväljakul erosioon, mis vee ja tuule toimel kuhjab peenardelt ärakantava turba kraavidesse. Peenardel on märgata 2015. aastal maapinna alanemist ja kraavidel on märgata maa- või veepinna tõusu. Transektil ET5 on samuti idapoolses osas märgata erosiooni mõju tootmisala peenarde alanemise ja kraavide kõrguspunktide tõusmisega. 500-700 m kaugusel transekti alguspunktist on 2015. aasta profiilijoon kõrgemal, kui 2011. aasta profiilijoon, mis on tingitud 2015. aasta suuremast sademete hulgast (Tabel 4), tekitades üleujutuse tsooni E4 lääneosas. 2015. aasta sademete mõju on märgata ka freesturbaväljalt looduslikule alale üleminekul, kus kogumiskraavis veetase on hilisemal moodsusel kõrgem võrreldes 2011. aasta sama piirkonnaga. ET5 transekti lääneossa jääb rabajärv, mille kõrgus on graafiku põhjal 2015. aastal 0,2 meetrit kõrgemal, kui eelneva moodsuse jooksul. Aladel, mille profiil jääb nii tootmisala kui ka loodusliku ala peale (ET1, ET2, ET3, ET5), on varieeruvus suurem, kui nendel aladel, mis jäävad ainult ühe režiimiga aladele. Suurem varieeruvus on iseloomulik freesturbavälja üleminekul looduslikuma taimekattega alaks, kus looduslikuma alaga külgnev kraavi perv on freesturbaväljast kõrgemal. Suuremat varieeruvust kinnitab ka transektide ET1, ET2, ET3 ja ET5 standardhälve, mis mõlema moodsustamisaasta puhul jääb 0,9-1,14 piirdesse (Tabel 7). Transektil ET4, mis jääb ainult freesturbavälja piirdesse on muutus keskmisest väärtusest väiksem >0,34.

**Tabel 7.** Ess-soo transektide ET1, ET2, ET3, ET4 ja ET5 pikslite minimaalne väärtus meetrites (m), maksimaalne väärtus m, vahe m, keskvärtus m ja standardhälve aastatel 2011 ja 2015.

Transekt	Minimaalne väärtus (m)	Maksimaalne väärtus (m)	Ulatus (m)	Keskvärtus (m)	Standardhälve
<b>2011</b>					
ET1	118,4	121,3	2,9	119,8	0,90
ET2	118,4	122,1	3,6	120,4	0,93
ET3	120,7	123,6	3,0	121,8	1,12
ET4	118,6	120,4	1,8	119,6	0,34
ET5	118,5	122,9	4,4	120,6	1,06
<b>2015</b>					
ET1	118,6	121,2	2,6	119,8	0,91
ET2	119,3	122,1	2,9	120,5	0,93
ET3	120,7	123,8	3,2	121,8	1,14
ET4	118,7	120,4	1,7	119,6	0,34
ET5	118,6	123,1	4,5	120,6	1,12

### 3.1.2. LiDARi andmete võrdlus RTK mõõtmistega Ess-soo 2015. aasta andmetel

Usaldusväarsuse kontrolliks on kasutatud 2015. aasta Ess-soo andmeid võrldemaks neid RTK andmetega. Korrelatsioonianalüüs näitab kõrget korrelatsiooni ( $R^2 = 0.998$ ) LiDAR andmestiku põhjal loodud kõrguste ja kohapealsete RTK mõõtmiste vahel (Joonis 9). Hajuvus keskmisest on väga väike ning punktid asetsevad 1:1 joonel. Seetõttu saab LiDARi mõõdetud kõrguse väärtusi Ess-soo näitel usaldusväärseteks pidada.



**Joonis 9.** RTK ja LiDARi andmete (meetrites) võrdlus Ees-soo kohta. Punktiirjoon märgib 1:1 joont ning must tume joon trendijoont RTK ja LiDARI andmete vahel.

## 3.2. Kildemaa

### 3.2.1. Kõrguse muutus Kildemaa erineva kuivendusintensiivsusega aladel 2010-2014

Kildemaa jääksoole loodi kolm kõrgusmodelite erinevuste pinda, millest esimene on 2014 aasta kõrgusmodeli ja 2010 aasta kõrgusmodeli erinevus. Terve soo ulatuses on märgata maapinna alanemist ja seda kinnitab ka tsoonide Ki2-Ki5 keskvaartuste vähenemine (Tabel 8). Joonisel 10 on märgitud tsoonid Ki1-Ki5, millest Ki1 ja Ki4 asuvad lagedatel freesturbaväljadel. Tsoonides Ki1 ja Ki4 on märgata peamiselt maapinna alanemist (0-(-0,2) m), mis võib olla põhjustatud jätkuvast kuivenduse mõjust endisele turbatootmisalale. Tsoonid Ki2 ja Ki5 iseloomustavad alasid, kuhu on rajatud ala kuivendamiseks kraavid, kuid mille freesimiseni ei jõutud. Mõlema tsooni puhul on maapinna kõrguspunktide erinevus suurem kui Ki1 ja Ki4 tsoonidel, mis võib olla mõjutatud ka Ki2 ja Ki5 tsoonides kasvavast taimestikust. Tihe taimestik takistab LiDARi punktidel maapinnani jõudmast, mis võib tekitada valesid maapinna kõrgusväärtuseid. Tsoonis Ki5 on toimunud maapinna

tõus kuni 0,9 meetrit ning samal ajal ka 0,8 meetrine maapinna alanemine, mis on eeldatavalt tingitud taimestiku kasvust ja sellest tingitud ebatäpsest maapinna kõrgusest antud tsoonis. Ortofoto põhjal on märgata lehtpuid terve ala ulatuses ning LiDAR võib pidada taimestiku kõrguseid, mida kiir ei läbi maapinna punktideks ning seetõttu on erinevuste mudeli põhjal toimunud ala sees suur kõrguste varieeruvus. Looduslikule alale jääva tsooni Ki3 pinnal ei ole suuremaid erinevusi märgata. Üheks põhjuseks võib olla sarnased ilmastikutingimused 2014. ja 2010. aastal (Tabel 4). Mõlema aasta puhul oli sademete hulk kevadperioodil sarnane ning sademetevee mõju soole sarnane, kuid üldise trendina võib esile tõsta, et maapinna kõrguse suurenemine oli valdavam looduslikul soosal ja kahanemine kraavitusest mõjutatud aladel. Tsooni Ki3 väheseid erinevusi näitab ka mõlema aasta kõrgusmudeli madal standardhälve, mis on 2014. aastal 0,13 ja 2010. aastal 0,12. Seega maapinna pikslite erinevused võrreldes keskmisega pole suurel määral muutunud (Tabel 8).

### **3.2.2. Kõrguse muutus Kildemaa erineva kuivendusintensiivsusega aladel 2014-2017**

Teine, kolmest loodud kõrgusmudelite erinevuse pinnast, on 2017. aasta ja 2014. aasta kõrgusmudelite erinevus (Joonis 11). Terve soo kohta on toimunud maapinna tõus, mille peamiseks põhjuseks võib olla 2017. aasta kevadperioodi sademete hulga suurus (Tabel 4). Seda kinnitab ka tsoonide Ki2, Ki3 ja Ki5 suurenenud keskväärtus. Tsoonide Ki1 ja Ki4 keskväärtus on jäänud samaks, kuid need alad on kraavitusest ka rohkem mõjutatud (Tabel 8). Märtsi ja aprilli sademete summa on 2017. aastal 39 mm suurem, kui 2014. aastal. Maapinna langust on märgata tsoonide Ki1 ja Ki4 pinnal. Mõlemat maapinda on freesitud ning seetõttu on kraavituse mõju suurem, kui kõrvalasuvatel freesimiseks ettevalmistatud, kuid freesimata aladel (Ki2, Ki5). Maapind on alanenud 0-(-0,1) meetrit ning alanemine on peamiselt toimunud tootmisala peenardel. Maapinna tõus mõlema tsooni sees on peamiselt toimunud kraavide kohal, mis võib olla tingitud erosiooniga pinnase ärauhumisest peenralt kraavi põhja. Tsoonides Ki2 ja Ki5 on toimunud peamiselt maapinna tõus. Ki2 ala maapinna tõus jääb vahemikku 0-0,4 meetrit ning ala Ki5 maapinna tõus jääb vahemikku 0-0,9 meetrit. Sarnaselt 2014 ja 2010 aasta kõrgusmudelite erinevuse pinnale võib ka siin tegemist olla LiDARi ebatäpsusega taimestikuga alal, mis näitab tiheda taimestiku tõttu kõrguspunkte kõrgematena kui nad reaalsuses on. Kuivenduskraavidest eemal asetsev Ki3

tsoon on kõrgusmodelite erinevuse pinna suhtes vähem varieerunud, kuid sarnaselt teistele aladele on ka selles tsoonis märgata maapinna tõusu (kuni 0,3 meetrit), mille eeldatavalt on põhjustanud 2017. aasta suurem sademete hulk.

### **3.2.3. Kõrguse muutus Kildemaa erineva kuivendusintensiivsusega aladel 2010-2017**

Kolmas kõrgusmodelite erinevuste pind on 2017. aasta ja 2010. aasta kõrgusmodelite kohta (Joonis 12). Antud kõrgusmodelite erinevuste pind näitab jääksoodes toimuvaid muutusi 7 aasta vahel. 7 aasta jooksul on maapind tsoonides Ki1 ja Ki4 vähenenud, mis võib olla põhjustatud jätkuvast kraavitatuse mõjust jääksõole. Taimestikuga aladel Ki2 ja Ki5 on märgata maapinna tõusu, eriti idapoolses Ki5 tsoonis. Kogujakraavid, mis ümbritsevad tsoone Ki1, Ki4 ja Ki5 on 7 aasta jooksul tõusnud kuni 1,6 meetrit, mille peamiseks põhjustajaks on eeldatavalt taimestiku esinemine kraavide ümbruses. Kraavide peal kasvavad taimed takistavad LiDAR seadmelt jõuda maapinnani, ning seetõttu võib punktide kõrgused nii suurel määral erineda. Kraavitusest kaugemal alal (Ki3) on tsooni keskosas toimunud pinnase alanemine (kuni -0.3 m) ning ida- ja lääneküljel on toimunud maapinna tõus (kuni 0,3 m). Sooala lõunaosas on 7 aasta jooksul toimunud kraavide kohal maapinna tõus (kuni 0,5 m). Maapinna tõusu põhjusteks soo lõunaosas, kus on võrreldes freesturbaväljaga looduslikumad tingimused, võib olla kraavide täitumine vee ja rabataimedega.

**Tabel 8.** Kildemaa tsoonide Ki1, Ki2, Ki3, ja Ki4 pikslite minimaalne väärtus meetrites (m), maksimaalne väärtus m, vahe m, keskväärtus m ja standardhälve aastatel 2010, 2014 ja 2017.

Tsoon	Minimaalne väärtus (m)	Maksimaalne väärtus (m)	Ulatus (m)	Keskvärtus (m)	Standardhälve
<b>2010</b>					
Ki1	15,8	18,0	2,3	16,8	0,28
Ki2	16,2	17,8	1,6	17,1	0,20
Ki3	17,3	18,4	1,1	17,9	0,13
Ki4	15,9	18,1	2,2	16,8	0,28
Ki5	15,9	18,0	2,1	17,1	0,30
<b>2014</b>					
Ki1	15,7	18,0	2,3	16,8	0,27
Ki2	16,1	17,7	1,6	17,0	0,20
Ki3	17,3	18,7	1,4	17,8	0,12
Ki4	15,9	18,0	2,1	16,7	0,28
Ki5	16,0	17,8	1,9	17,0	0,28
<b>2017</b>					
Ki1	15,8	18,0	2,2	16,8	0,27
Ki2	16,1	17,9	1,8	17,1	0,21
Ki3	17,4	18,3	1,0	17,9	0,12
Ki4	15,9	18,2	2,3	16,7	0,28
Ki5	15,9	17,9	2,1	17,2	0,28

### 3.2.4. Kõrguse muutus Kildemaa erineva kuivendusintensiivsusega transektidel 2010-2017

Kildemaa jääsoo pinnale loodi 3 transekti, millele loodi kõrgusprofiilid (Joonis 4). Kõrgusprofiilid KiT1 (Lisa 6) ja KiT2 (Lisa 7) on turbatootmisalal asetsevate kraavidega risti ning profiil KiT3 (Lisa 8) on kraavidega paralleelselt, kui läbib kokkuveoted ja kogujakraavi (Joonis 4). Profiilide KiT1 ja KiT2 puhul on märgata 2017. aastal ja 2014. aastal maapinna kõrguse alanemist turbatootmisalal võrreldes 2010. aasta profiiljoonega. Maapinna alanemine freesturbavälja kraavide peenardel võib olla põhjustatud erosioonist, mille tulemusena kantakse osa peenra peal olevast pinnasest kraavidesse. 2014. aastal on kraavide kõrgused madalamad, kui teiste aastate profiiljoontel ning selle põhjuseks on eeldatavalt sademete hulga vähesus. 2014. aastal oli võrreldes 2017. ja 2010. aastaga kuivem kevadperiood, mis mõjutas ka veetaset kraavides (Tabel 4). KiT1 ja KiT2 kõrguse profiil tõuseb lähenedes looduslikule alale ning kraavituse mõju väheneb. Kõrgusprofiilil KiT3 on samuti 2010. aastal kõrgemad väärtused, kui teistel aastatel. Kõrguse muutus on märgatav ka KiT3 kahe freesturbavälja poolitava teenindustee peal, kus on 2010. aastal on



olnud tee pind kõrgemal. Tee pinna kõrguse alanemist võib olla mõjutatud erosioonist või mineraliseerumisest, mille tagajärjel maapinna kõrgus alaneb. Freesitud ala ja loodusliku turbaala poolitava kraavi pind on 2017. ja 2014. aasta mõõdistuste järgi alanenud. 2014. aasta kraavi pinna alanemise põhjuseks on eeldavasti sademete hulga vähesus sellel aastal, kuid 2017. aastal on sademeid rohkem, siis kraavi pinna alanemine võib olla tingitud täpsemast LiDAR mõõdistusest, mis teostati 2017. aasta puhul uue LiDAR seadmega. Seeläbi on kraavi pind täpsemalt märgitud. 2014. aasta madalama profiilipinna põhjuseks võib olla ka lisaks sademete vähesusele kõrgemad temperatuurid, mis soodustavad aurumist ja soola maapinna kõrguse vähenemist. KiT3 profiiljoonte looduslikul alal on märgata suuremat varieeruvust, sest looduslik ala on kuivendusest vähem mõjutatud ja ilmastiku muutused mängivad suuremat rolli.

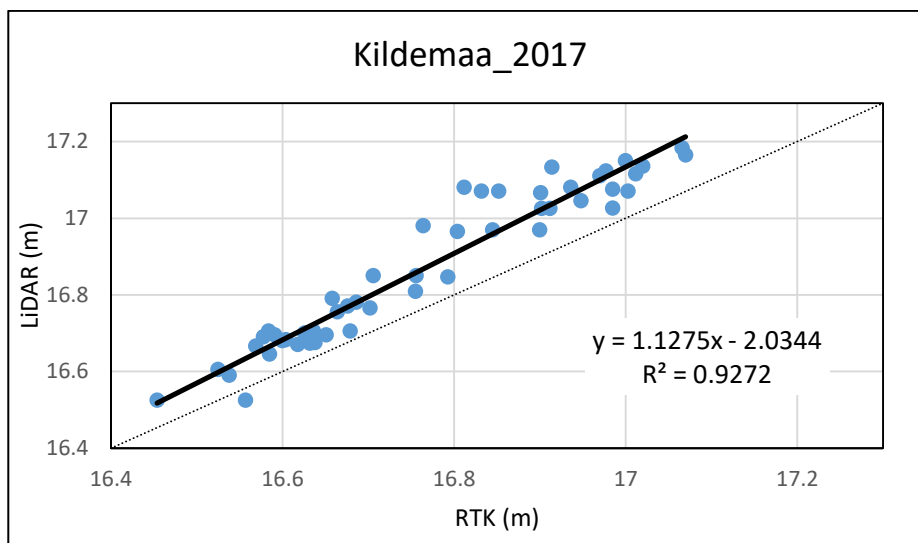
**Tabel 9.** Kildemaa transektide KiT1, KiT2 ja KiT3 pikslite minimaalne väärtus meetrites (m), maksimaalne väärtus m, vahe m, keskvärtus m ja standardhälve aastatel 2010, 2014 ja 2017.

Transekt	Minimaalne väärtus (m)	Maksimaalne väärtus (m)	Ulatus (m)	Keskvärtus (m)	Standardhälve
<b>2010</b>					
KiT1	16,2	17,9	1,7	17,1	0,43
KiT2	16,1	18,3	2,2	17,2	0,61
KiT3	16,3	17,9	1,7	17,0	0,34
<b>2014</b>					
KiT1	15,8	17,9	2,1	17,1	0,45
KiT2	16,0	18,3	2,3	7,2	0,61
KiT3	15,5	17,8	2,2	16,9	0,36
<b>2017</b>					
KiT1	16,0	18,0	2,1	17,1	0,45
KiT2	16,1	18,3	2,2	17,2	0,63
KiT3	15,4	17,8	2,4	17,0	0,37

### 3.2.5. LiDARi andmete võrdlus RTK mõõtmistega Kildemaa 2017. aasta andmetel

Usaldusväarsuse kontrolliks on kasutatud 2017. aasta Kildemaa LiDARi andmeid võrdlemaks neid RTK andmetega. Korrelatsioonianalüüs näitab kõrget korrelatsiooni ( $R^2 = 0.9272$ ) LiDAR andmestiku põhjal loodud kõrguste ja kohapealsete RTK mõõtmiste vahel, kuid graafikult on näha LiDAR andmete ülehindamist (Joonis 13). See on vastavuses ka profiilikõrgusjoontega, kus 2017. aastal esinesid kõrgemad väärtused, kui eelnevatel aastatel (ka teepind oli kõrgemal). Hajuvus keskmisest on suurem kui Ess-soo korral, mis võib olla tingitud tihedamast taimestikust tulenevast LiDARi mõõtmiste ebatäpsustest.

Jääksoo pinnal võib esineda mättaid või RTK mõõtmiste ajal oli pinnas pehme ning mõõteseade võis pinnasesse vajuda.



**Joonis 13.** RTK ja LiDARi andmete (meetrites) võrdlus Kildemaa kohta. Punktiirjoon märgib 1:1 joont ning must tume joon trendijoont RTK ja LiDARI andmete vahel.

### 3.3. Kõima

#### 3.3.1. Kõrguse muutus Kõima erineva kuivendusintensiivsusega aladel 2010-2012

Kõima jääksool võrreldi kolme ülelennu LiDAR andmeid. Esimesena võrreldi 2012. aasta ja 2010. aasta erinevuse pinda (Joonis 14). Soo pinnale loodi kolm tsooni (Ko1-Ko3), mis esindavad erineva režiimiga alasid. Terve ala ulatuses on ülekaalus olnud maapinna kõrguspunktide kasv. Seda kinnitab kõikides tsoonides toimunud keskmise väärtuse kasv 2012. aastal (Tabel 10). Maapinna kõrguskasvu üheks peamiseks põhjuseks võib olla sademetest tingitud turbapooride veega täitumine ja maapinna tõus. 2012. aastal oli kolme kuu sademete hulk 76 mm võrra suurem, kui 2010. aastal (Tabel 4). Tsoonis Ko1 on loodud kuivendusvõrk, kuid turvast freesitud ei ole. Kaevandatud on vaid karjääriviisiliselt. Ko1 tsoonis on osaliselt kraavidega paralleelsel osal toimunud maapinna osaline alanemine (0-(-0,3) m), mis võib olla tingitud kraavituse mõjust, sest ülejäänud aladel (k.a. kraavides) on toimunud maapinna tõus (0-0,4 m), sest kraavides on kasvamas kohev turbasammal, mis reageerib väga kiiresti veetaseme muutustele. Maapinna tõusu peamiseks põhjuseks on suurenenud sademete hulk 2012. aastal. Tsoonides Ko2 ja Ko3 on toimunud peaaegu terve tsooni ulatuses maapinna tõus vahemikus 0-0,4 meetrit, mis

sarnaselt Ko1 maapinna tõusule on ka seotud sademete hulga suurenemisele. Kõige vähem varieerub maapind tsoonis Ko3, mis on looduslikul alal ning kuhu kuivendamise mõju on kõige väiksem. Väikseim varieerumine on kirjeldatud ka mõlema aasta tsooni Ko3 standardhäbes, mis jääb  $>0,10$ . Tsoonidest väljapoole on maapinna tõusu ja languse varieeruvus suurim ala loodeosas, mis on taimestikuga kaetud ning võib tuua välja LiDARi probleemi tihedama taimestikuga aladel välja lugeda maapinna punkte. Lisaks on märgata ala lõunaosas sirget ida-läänesuunalist maapinna kõrguse kasvu. Sarnast tendentsi on märgata 2012. aasta kõrgusmodeli pealt, kuid mitte 2010. aasta kõrgusmodelilt. Põhjuseks võib olla LiDARi ülelennul tekkinud kõrguste erinevus, mis annab lõunapoolsele alale suuremad kõrgusväärtused, kui põhjapoolsele.

### **3.3.2. Kõrguse muutus Kõima erineva kuivendusintensiivsusega aladel 2012-2017**

Teine Kõima jääksoo kõrgusandmete erinevuse pind on loodud 2017. aasta kõrgusmodeli ja 2012. aasta kõrgusmodeli kohta (Joonis 15). Sarnane viga 2012. aasta kõrgusmodelile on ka 2017. aasta LiDARi punktide loodud kõrgusmodelil. Erinevalt 2012. aasta kõrgusmodeli veast on 2017. aastal viga põhja-lõunasuunaliselt, kus maapinna läänepoolsed punktid on idapoolsetest madalamad. Ainus ala, mis jääb mõlemast veast välja on turbatootmisaladest välja jääv tsoon Ko3. Selle tsooni ulatuses on toimunud nii -0,1 meetrilist maapinna alanemist kui ka 0,1 meetrilist maapinna tõusu. Selline varieeruvus on omane loodusliku alaga rabapinnasele, kus aastatevaheline varieeruvus on tsooni lõikes mitmekesine. Kuigi 2017. ja 2012. aasta erinevuse pind iseloomustab läänepoolset ala madalamana, siis tsooni Ko1 piires on kraavide pinnal toimunud maapinna tõus (kuni 1 meetri). 2012 oli sademete poolest rikkam ning seega oleks iseloomulik terve sool maapinna alanemine, siis kraavide lähedal asuva maapinna tõus tsoonis Ko1 võib olla põhjustatud taimestikust, mis kasvab tsoonis Ko1. Ortofotodel on märgata puurindeid, mis võivad LiDAR punktide jõudmist maapinnale takistada. Sarnaselt 2012. ja 2010. aasta erinevuse pinnale on ka siin kõige väiksem varieeruvus tsoonis Ko3, kus hajuvus keskmisest (standardhäve) on alla 0.1 (Tabel 10).

### 3.3.3. Kõrguse muutus Kõima erineva kuivendusintensiivsusega aladel 2010-2017

Kõima jääksoo kolmas erinevuse pind, mis on 2017. aasta erinevus 2010. aastast (Joonis 16). Seitsme aastase vahemikuga on maapind Kõima jääksoos tõusnud. Jällegi on märgata 2017. aasta andmetest tulenevat viga, kus toimub kas idapoolse ala kõrguspunktide ülehindamine või läänepoolse ala kõrguspunktide alahindamine. Sarnaselt 2017. aasta ja 2014. aasta kõrgusmodelite erinevusele on märgata ka selle erinevuse pinnal tsooni Ko1 maapinna punktide tõusu. Maapinna tõusu peamiseks põhjuseks võib sarnaselt eelmisele erinevuse pinnale olla taimestiku punktide liigitamine maapinna punktideks LiDARi poolt.

**Tabel 10.** Kildemaa tsoonide Ko1, Ko2 ja Ko3 pikslite minimaalne väärtus meetrites (m), maksimaalne väärtus m, vahe m, keskvärtus m ja standardhälve aastatel 2010, 2014 ja 2017.

Tsoon	Minimaalne väärtus (m)	Maksimaalne väärtus (m)	Ulatus (m)	Keskvärtus (m)	Standardhälve
<b>2010</b>					
Ko1	16,9	19,5	2,6	18,3	0,45
Ko2	19,4	20,7	1,3	20,0	0,23
Ko3	20,1	20,9	0,8	20,4	0,09
<b>2012</b>					
Ko1	17,1	19,6	2,6	18,4	0,46
Ko2	19,5	20,8	1,3	20,2	0,22
Ko3	20,0	21,0	1,0	20,6	0,10
<b>2017</b>					
Ko1	17,0	20,4	3,4	18,5	0,46
Ko2	19,6	20,9	1,2	20,2	0,24
Ko3	20,3	21,1	0,8	20,6	0,09

### 3.3.4. Kõrguse muutus Kõima erineva kuivendusintensiivsusega transektidel 2010-2017

Kõima jääksoo pinnale loodi 3 transekti, millele loodi kõrgusprofiilid (Joonis 5). Kõrgusprofiilid KoT1 (Lisa 9) ja KoT2 (Lisa 10) loodi dreanažkraavidega risti ning KoT3 (Lisa 11) loodi paralleelselt kuivenduskraavidega. Kõikidel profiiljoonistel on kõige vanema moodsustsüklilise tulemustel tehtud kõrgusjooned madalamate tulemustega. Madalamate tulemuste põhjused võib olla tingitud väiksemast sademete hulgast või väiksemast keskmisest temperatuurist (Tabel 4). 2010. aastal oli märtsikuu keskmised temperatuurid alla nulli, mis tähendas võimaliku lumikatte pikemat esinemist. Profiiljoonte KoT1 ja KoT2 puhul on märgata kauguse suurenedes kuivendusala suureneb ka maapinna kõrgus. See on tingitud kuivenduskraavide kuivendava mõju

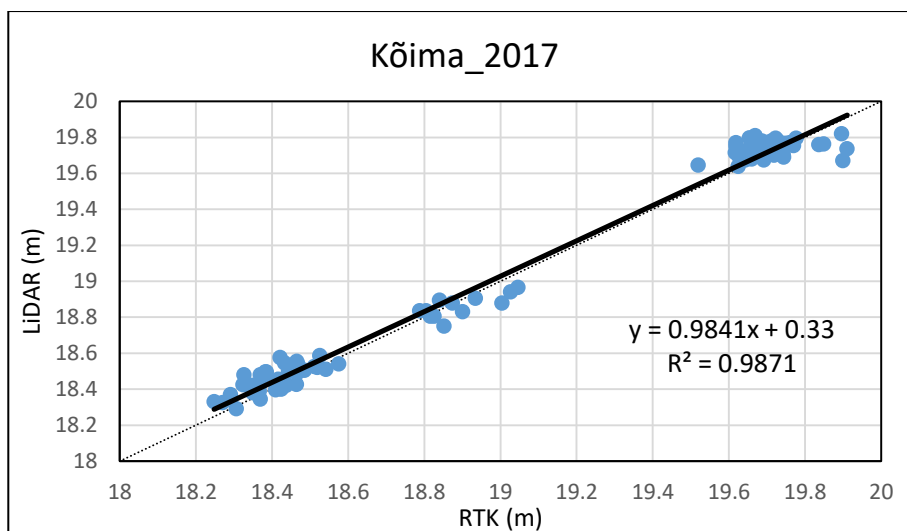
väheneb ning looduslike rabaprotsesside suurenemisest. Kuivenduskraavides kaugemal toimub maapinna tihenemine aeglasemalt, mis soodustab soopinna varieeruvust. Suurem varieeruvus on kinnitatud ka KoT ja KoT2 suuremast muutlikusest võrreldes keskmist kõrgust (standardhälve). Profiilijooned KoT3 puhul on kõige suurtemate väärtustega 2012. aasta tulemustel loodud profiilijoon. 2012. aasta suuremad väärtused võivad olla tingitud suuremast sademete hulgast (Tabel 4), mis tekitab muutusi turbaaladel. KoT3 kõrgusprofiilil järgivad erinevate aastate kõrgusjooned olenemata erinevast kõrgusest sarnast tendentsi. Seda kinnitab iga aasta profiilijooned standardhälve (Tabel 11). See jääb alla 0,12, mis näitab väikest muutlikkust võrreldes keskväärtusega. Kahe teise kõrgusprofiili muutlikus jääb suuremaks, kuid seda põhjustavad erinevate veerežiimidega alad. Kaevandamiseks ettevalmistatud alade peal jääb muutlikkus väiksemaks, kui loodusliku ala peal.

**Tabel 11.** Kildemaa transektide KoT1, KoT2 ja KoT3 pikslite minimaalne väärtus meetrites (m), maksimaalne väärtus m, vahe m, keskväärtus m ja standardhälve aastatel 2010, 2014 ja 2017.

Transekt	Minimaalne väärtus (m)	Maksimaalne väärtus (m)	Ulatus (m)	Keskvärtus (m)	Standardhälve
<b>2010</b>					
KoT1	17,3	20,6	3,3	19,4	0,89
KoT2	18,4	20,8	2,4	19,6	0,52
KoT3	19,2	19,8	0,6	19,5	0,12
<b>2014</b>					
KoT1	17,4	20,8	3,3	19,5	0,93
KoT2	18,5	20,8	2,3	19,7	0,53
KoT3	19,3	20,0	0,6	19,7	0,11
<b>2017</b>					
KoT1	17,4	20,8	3,4	19,5	0,92
KoT2	18,4	20,8	2,4	19,7	0,56
KoT3	19,3	20,0	0,7	19,6	0,11

### 3.3.5. LiDARi andmete võrdlus RTK mõõtmistega Kõima 2017. aasta andmetel

Usaldusväärsuse kontrolliks on kasutatud 2017. aasta Kõima LiDARi andmeid võrdlemaks neid RTK andmetega. Korrelatsioonianalüüs näitab kõrget korrelatsiooni ( $R^2 = 0.9871$ ) LiDAR andmestiku põhjal loodud kõrguste ja kohapealsete RTK mõõtmiste vahel. Hajuvus keskmisest on väga väike ning punktid asetsevad 1:1 joonel. Seetõttu saab 2017.a. LiDARi mõõdetud kõrguse väärtusi Kõima näitel usaldusväärselt pidada.



**Joonis 17.** RTK ja LiDARi andmete (meetrites) võrdlus Kõima kohta. Punktiirjoon märgib 1:1 joont ning must tume joon trendijoont RTK ja LiDARI andmete vahel.

### 3.4. Laiuse

#### 3.4.1. Kõrguse muutus Laiuse erineva kuivendusintensiivsusega aladel 2010-2014

Laiuse jääksoos lõpetati turba kaevandamine 23 aastat tagasi ning antud töös võrreldi kolme aasta kõrguse muutusi erinevuse pindadelt alates 2010. aastast, kuni 2018. aastani.. Esimene erinevuse pind on aastate 2014 ja 2010 vahel (Joonis 18). Turbatootmisalade peal on toimunud 2014. aastal võrreldes 2010. aastaga maapinna tõus. Maapinna tõusu põhjuseks on 2014. aastal Laiuse freesturbaalade kattumine veega. 2014. aasta ortofotodelt on näha lõunapoolse osa (L2) suurem kattumine veega, kui 2010. aastal. Lisaks lõunapoolse osa veega kattumisele on kattunud ka põhjapoolse freesturbaala (L1) läänepoolse osa on veega (ortofoto). Tsoon L3 asub loodusliku alal, kus kraavituse mõju soo pinnale ei ole nii suur kui freesturbaväljal. Loodusliku ala pind L3 on peamiselt tõusnud ning sellist trendi kinnitab keskmise väärtuse muutuse kasv, mis 2014. aasta puhul on 1 m kõrgemal, kui 2010. aastal (Tabel 12). Turbatootmisalad ümbritsevate kraavite kõrgus on kahe aasta võrdluses suurenenud, mis on sarnaselt lõunapoolsele alale põhjustatud jääksoo pinna veega täitumisest ning kraavide kinnikasvamisest.

### 3.4.2. Kõrguse muutus Laiuse erineva kuivendusintensiivsusega aladel 2014-2018

Laiuse jääksoo teine erinevuse pinna kaart on loodud 2018. ja 2014. aasta võrdluses (Joonis 19). Enim eristub lõunapoolse freesturbavälja (L1) maapinna tõus (kuni 0,9 m). 2018. aastal oli tsooni L2 üleujutatud, mida võib näha ka ortofotodelt, mistõttu ongi maapindade erinevus suur. Freesturbavälja põhjapoolse osa (L1) pinnal on toimunud nii maapinna tõusu kui langust. Maapind on tõusnud tsooni keskosas (0-0,2 m) ja langenud ida- ning lääneservas. Laiuse loodusliku ala tsoonis L3 on maapind peamiselt tõusnud. Turbatootmisala põhjaossa jäävates kraavides on maapinna punktid tõusnud, kui selle põhjuseks võib olla sarnaselt tsoonile L2 suurenenud veetaseme mõju soole.

### 3.4.3. Kõrguse muutus Laiuse erineva kuivendusintensiivsusega aladel 2010-2018

Laiuse kolmas erinevuse pinna kaart on loodud kõige uuema (2018) kõrgusmudeli ja kõige vanema (2010) kõrgusmudeli erinevustest (Joonis 20). Sarnaselt 2018. aasta ja 2014. aasta erinevuse pinnast, on ka 2018. ja 2010. aasta erinevuse pinnal freesturbavälja lõunapoolne ala ehk tsoon L2, suure kõrguse kasvuga (kuni 1,3 meetrit). Selle põhjustab tsooni L2 üleujutus 2018. aasta andmetel, mis on näha ka ortofotodelt. Teistes tsoonides (L1, L3) on samuti toimunud maapinna kõrguse kasv, kuid seda väiksemal määral, kui alas L2. Erinevuse pinna kaardilt tuleb välja, et jääksoo äärealadest kaugemal on toimunud pinnase alanemine, kuid jääksoo läheduses maapinna tõus.

**Tabel 12.** Laiuse tsoonide L1, L2 ja L3 pikslite minimaalne väärtus meetrites (m), maksimaalne väärtus m, vahe m, keskvärtus m ja standardhälve aastatel 2010, 2014 ja 2018.

Tsoon	Minimaalne väärtus (m)	Maksimaalne väärtus (m)	Ulatus (m)	Keskvärtus (m)	Standardhälve
<b>2010</b>					
L1	84,5	85,9	1,3	85,4	0,19
L2	83,2	86,2	3,0	84,1	0,50
L3	83,1	86,3	3,1	84,0	0,48
<b>2014</b>					
L1	84,6	85,9	1,4	85,4	0,19
L2	83,3	86,3	2,9	84,2	0,45
L3	83,4	86,3	2,8	84,2	0,42
<b>2018</b>					
L1	84,7	86,0	1,3	85,5	0,19
L2	83,5	86,3	2,8	84,2	0,46
L3	84,5	86,3	1,8	85,1	0,21

### **3.4.4. Kõrguse muutus Laiuse erineva kuivendusintensiivsusega transektidel 2010-2018**

Laiuse jääksoo pinnale loodi 3 transekti ning transektidele loodi profiilijooned, mis näitavad maapinna kõrgust profiilijoonel ulatuses (Joonis 6). Profiilijoonest LT1 (Lisa 12) asub alguse ja lõpuga loodusliku ala peal ning on üle freesturba tootmisala dreenitavate kraavide risti. Profiilijooned LT2 (Lisa 13) ja LT3 (Lisa 14) asuvad paralleelselt turbatootmisala kraavidega ning on asetatud peenra peale, mitte kraavi. LT2 asetseb üle põhjapoolse freesturbaala ning LT3 asetseb üle lõunapoolse freesturbaala. Profiilijoonelt LT1 on märgata aastatevahelist kaevandusala tõusu, kus iga aastaga on freesitud osa maapind tõusnud. Põhjuseks võib olla rabapinna erodeerumine rabanõlvadelt freesitud ala peale, kuna see on kõige madalam pind. Teiseks põhjuseks võib olla ka taimestiku kasv. Rabataimestik on hakanud kasvama ja moodustanud mättaid, mis LiDAR punktide põhjal arvestatakse maapinna sisse. Profiili LT1 varieeruvus keskmisest on 0,72, mis on põhjustatud profiilis olevate erinevate veerežiimiga osade tõttu. Profiil algab tehisluku tootmistee pinnal ja lõppeb loodusliku ala peal. Profiil LT2 iseloomustab tihti üleujutatud freesturbavälja lõunapoolse osa tsooni L2 ala. Profiili algus on samuti tootmistee pinnal, mille kõrgus ei varieeru aastate lõikes, kuid turbatootmisala pinnal varieerub graafiku osa suuresti. Varieeruvuse põhjuseks on veetaseme tõus tootmisalal. Veetaseme tõus tuleb välja nii ortofotodel kui ka erinevuste pindadel. 2018. aastal oli Laiuse lõunapoolne freesturbaala üleujutatud ja seetõttu on kõige uuema mõõtmise maapinna joon teistest märgatavalt kõrgemal. Freesturbaalal teeb profiilijoon meetrise kõrguskasvu tootmisala keskel, kus on vana teenindustee, kuid kõrguskasvu põhjuseks on eeldatavalt taimestiku punktid antud pinnasel. Neid taimestiku punkte ei ole suutnud LiDAR välja sõeluda ja kasutas neid kui maapinna punkte. Profiili LT2 looduslikul alal (alates 350 meetrist) toimub maapinna alanemine kraavist kaugenedes, mis viitab kraavi kuivendavale ja tihendavale mõjule ka loodusliku ala pinnal. Loodusliku ala maapinna punktid on suurem varieeruvusega, kui tootmisala peal. Kõrgusprofiil LT3 on tootmisalal kraavidega risti ning graafikult on märgata, et kui turbatootmisala pinnal toimuv varieerumine on enamasti kindlas suunas, siis loodusliku ala peal on varieeruvus juhuslikum. Juhuslikum varieeruvus näitab loodusliku ala väiksemat mõjustatust kraavidest ja pinnas ei ole tihenenud. 2018. aasta kevad oli niiske ning seetõttu veetase kõrge. Sademeid on 2018. aastal üle keskmise ning lisaks oli märtsikuus temperatuur alla nulli, mis võis tähendada, et kui LiDARi



ülelend oli aprillis, siis oli soo mõjutatud lume sulamisel tekkivast veest. Kõrgem veetase mõjutas nii tootmisala pinda kui ka loodusliku ala pinda.

**Tabel 13.** Laiuse transektide LT1, LT2 ja LT3 pikslite minimaalne väärtus meetrites (m), maksimaalne väärtus m, vahe m, keskvärtus m ja standardhälve aastatel 2010, 2014 ja 2018.

Transekt	Minimaalne väärtus (m)	Maksimaalne väärtus (m)	Ulatus (m)	Keskvärtus (m)	Standardhälve
<b>2010</b>					
LT1	83,4	86,1	2,6	84,3	0,72
LT2	83,8	85,8	2,1	84,5	0,75
LT3	83,5	85,9	2,4	84,5	0,77
<b>2014</b>					
LT1	83,7	86,0	2,3	84,4	0,66
LT2	83,8	85,8	2,1	84,6	0,72
LT3	83,8	85,9	2,0	84,6	0,71
<b>2018</b>					
LT1	83,6	86,1	2,5	84,5	0,68
LT2	83,7	85,9	2,2	84,6	0,72
LT3	86,0	86,0	1,3	85,2	0,38

### 3.5. Maima

#### 3.5.1. Kõrguse muutus Maima erineva kuivendusintensiivsusega aladel 2010-2014

Maima endisel turbatootmisalal lõpetati kaevandamine 19 aastat tagasi. Esimene andmestik pärineb 2010. ja 2014. aastast (Joonis 21). Joonisel 21 on näha kogu alal ühtlast kõrguse kasvu (0-0,4 m). Kõrguse kasvu on näha ka endise turbatootmisala kraavides (0,4-0,8 m), mis võib olla põhjstatud kraavidesse sattunud erodeeritud mullast või kõrgemast veetasemest. Kuna kaevandamine lõpetati umbes 20. aastat tagasi võib kõrguse kasvu muutus olla tekkinud endise turbatootmisalale tekkinud mätastest või madalast taimestikust. Kuna Tabeli 4 järgi, suurenenud sademete hulka ei ole võimalik täheldada, siis ilmastikuoludest tõenäoliselt ei ole maapinna tõus tingitud. Kildemaa näite puhul oli näha ka LiDAR andmetest tekkivaid ebatäpsusi, mis võivad olulist rolli mängida ka siin. Kõige suurema muutlikkusega Tabeli 14 järgi on alad M1 ja M2, mis olid endised freesturba kaevandamise alad (standardhälve > 0,35). M3 alalt teostati karjääriviisilist turba kaevandamist ning M4 on looduslik ala, kus endise turba kaevandamise mõju ei ole nii suur.

### 3.5.2. Kõrguse muutus Maima erineva kuivendusintensiivsusega aladel 2014-2017

Teine andmestik pärineb 2014. aasta ning 2017. aasta võrdlusest (Joonis 22). Jooniselt 22 on näha vastupidiselt Joonisele 21 maapinna langust. Eriti on maapinna langust näha tsoonides M1 ja M2 (0-(-0,2)), mis on iseloomulik endisele freesturba alale, et toimub pinnase tihenemine kuivendamise tõttu. M3 tsoonis on näha kraavides pinna tõusu, mis võib olla tingitud turbasammalde kasvust kraavides.

### 3.5.3. Kõrguse muutus Maima erineva kuivendusintensiivsusega aladel 2010-2017

Seitsme aasta võrdluses 2017. ja 2010 aasta põhjal on näha tugevat maapinna tõusu (0-0,5 m), mis on sarnane 2014. ja 2010. aasta andmete võrdlusega (Joonis 23). Kuna muutus on kogu vaadeldavas alas ühtlane, isegi kõrvalistel aladel, siis see võib olla tingitud suurenenud sademete hulgast või LiDARi andmete ebatäpsusest. Tabeli 4 järgi ei ole 2010. aastal olnud suuremat sademete hulka kui 2014.aastal. Kuna kaevandamisest on möödas 20 aastat, võib eeldada, et endisele turbatootmisalale on tekkinud mättad või madal taimestik, mida LiDARi andmed näevad kui kõrgema maapinnana.

**Tabel 14.** Maima tsoonide M1, M2, M3 ja M4 pikslite minimaalne väärtus meetrites (m), maksimaalne väärtus m, vahe m, keskvärtus m ja standardhälve aastatel 2010, 2014 ja 2017.

Tsoon	Minimaalne väärtus (m)	Maksimaalne väärtus (m)	Ulatus (m)	Keskvärtus (m)	Standardhälve
<b>2010</b>					
M1	17,3	20,3	3,0	18,2	0,38
M2	17,3	20,5	3,2	18,4	0,40
M3	19,0	20,3	1,3	19,5	0,22
M4	19,5	20,8	1,3	20,3	0,16
<b>2014</b>					
M1	17,6	20,2	2,7	18,4	0,35
M2	17,6	20,5	2,9	18,5	0,39
M3	18,9	20,5	1,6	19,7	0,21
M4	19,7	20,9	1,2	20,4	0,15
<b>2017</b>					
M1	17,8	20,3	2,5	18,4	0,36
M2	17,8	20,5	2,7	18,5	0,38
M3	19,2	20,7	1,5	19,7	0,22
M4	19,6	20,9	1,3	20,4	0,15

### **3.5.4. Kõrguse muutus Maima erineva kuivendusintensiivsusega transektidel 2010-2017**

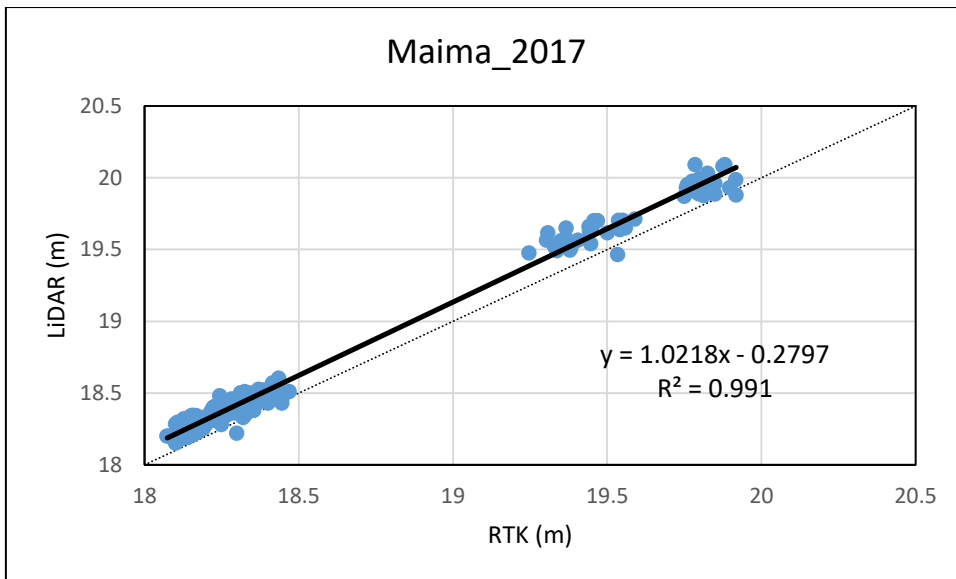
Maima aladele loodi neli transekti ja nende põhjal profiilijooned (Joonis 7). Profiilijooned MT1 (Lisa 15), MT2 (Lisa 16) ja MT3 (Lisa 17) loodi algusega jääksoo pinnalt ning ulatusega üle looduslikule alale. Kõik kolm transekti on valitud drenivate kraavidega risti. MT1 ja MT2 asuvad hilisemalt freesitud aladel. MT3 asub vanema kaevanduse osal, kus kaevandati karjääriviisiiselt labidaturvast. Neljas profiilijoon (MT4) (Lisa 18) on loodud transektile, mis ulatub üle kolme nimetatud tootmisala ning ka loodusliku osa. Transekti loodi kuivenduskraavidega paralleelselt mööda peenart. Profiilidel MT1 ja MT2, mis on mõlemad freesturbaväljade peal, on märgata, et 2010. aasta profiili maapinna kõrguspunktid on madalamal kui teistel aastatel. Madalam kõrgus võib olla tingitud veerežiimi muutustest, tingituna ilmastikust (Tabel 4) Maima piirkonnas kevadisel ajal. Profiilijoonel MT3, mis asub karjääriviisiliselt kaevandatud alal on maapinna kõrguspunktide erinevus sarnane MT1 ja MT2 profiilijoonetele, kus kõige madalamad maapinna kõrguspunktid asuvad 2010. aasta profiilijoonel. Profiilijoon MT4 iseloomustab kuivenduskraavidega paralleelselt asetsevat transekti profiilijooni. Profiilijoonel ulatuses on selgelt märgata nelja ala: karjääriviisiliselt kaevandatud ala, kus on märgata äärealade kõrgemat pinda ning kaevandusala keskel madalamat pinda. Seejärel on kaks freesturbaala, mis asuvad ülejäänud alast madalamal ning maapinna varieeruvus on maapinna tihendumise tõttu freesitud alal väiksem. Kahte freesturbaala poolitab teenindustee, mis aastate jooksul ei ole suurel määral varieerunud. Neljas ala on looduslik ala, kus toimub kraavi kaldalt kaugenedes maapinna alanemine, mis iseloomustab kraavituse mõju looduslikule alale.

**Tabel 15.** Maima transektide MT1, MT2, MT3 ja MT4 pikslite minimaalne väärtus meetrites (m), maksimaalne väärtus m, vahe m, keskvärtus m ja standardhälve aastatel 2010, 2014 ja 2017.

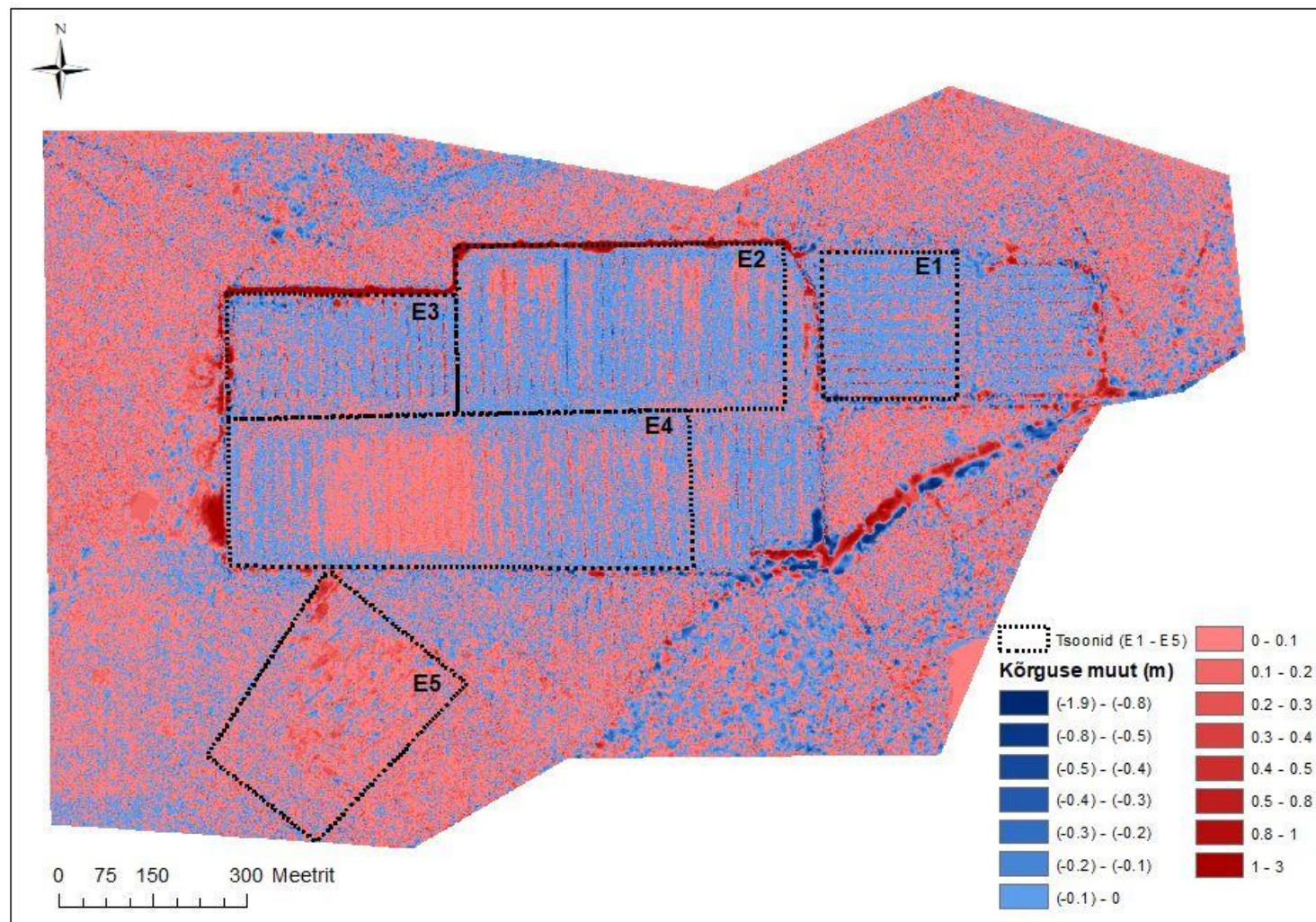
Transekt	Minimaalne väärtus (m)	Maksimaalne väärtus (m)	Ulatus (m)	Keskvärtus (m)	Standardhälve
<b>2010</b>					
MT1	17,5	20,5	2,9	18,5	0,81
MT2	17,5	30,6	3,1	18,5	0,77
MT3	19,1	20,7	1,6	19,7	0,40
MT4	17,7	20,7	2,9	19,0	0,87
<b>2014</b>					
MT1	17,9	20,7	2,8	18,6	0,80
MT2	17,8	20,8	3,0	18,6	0,75
MT3	19,3	20,8	1,5	19,8	0,39
MT4	17,9	20,8	2,9	19,2	0,88
<b>2017</b>					
MT1	18,9	20,7	2,8	18,7	0,80
MT2	17,9	20,8	2,9	18,9	0,76
MT3	19,3	20,9	1,6	19,9	0,38
MT4	17,9	20,9	3,0	19,2	0,89

### 3.5.5. LiDARi andmete võrdlus RTK mõõtmistega Maima 2017. aasta andmetel

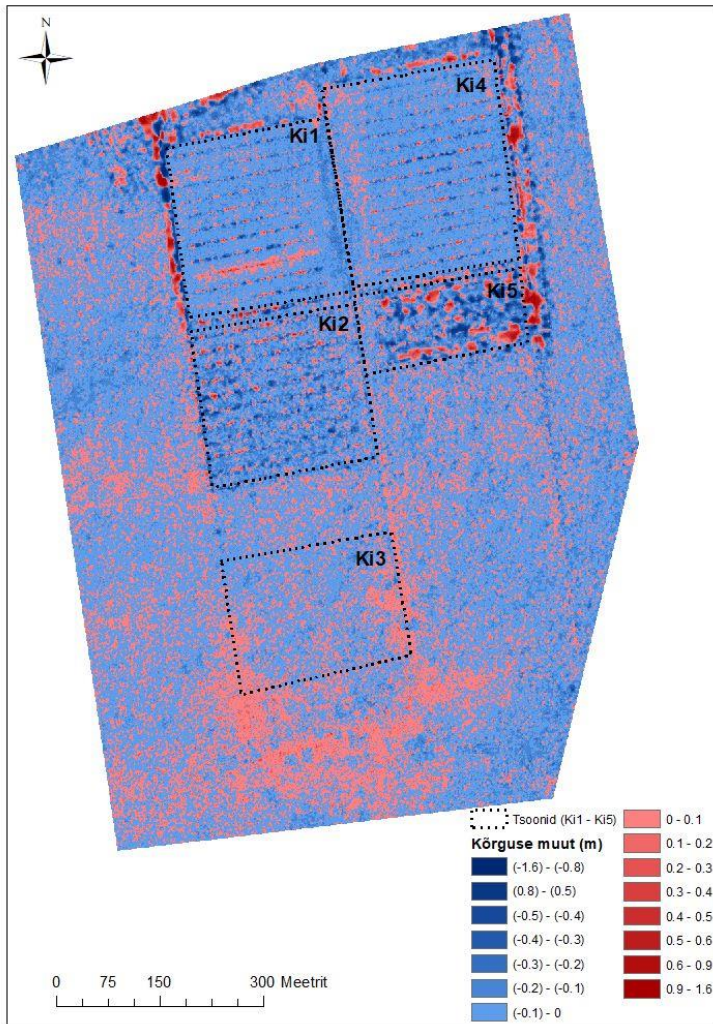
Usaldusväärsuse kontrolliks on kasutatud 2017. aasta Maima LiDARi andmeid võrdlemaks neid RTK andmetega (Joonis 24). Korrelatsioonianalüüs näitab kõrget korrelatsiooni ( $R^2= 0.991$ ) LiDAR andmestiku põhjal loodud kõrguste ja kohapealsete RTK mõõtmiste vahel. Jooniselt 24 on näha LiDARi andmete ülehindamist, mida oli võimalik täheldada ka Kildemaa andmetelt. Tegu võib sarnaselt olla LiDARi mõõdistamise ebatäpsusega. Jääksoo pinnal võib esineda mättaid või RTK mõõtmiste ajal oli pinnas pehme ning mõõteseade võis pinnasesse vajuda.



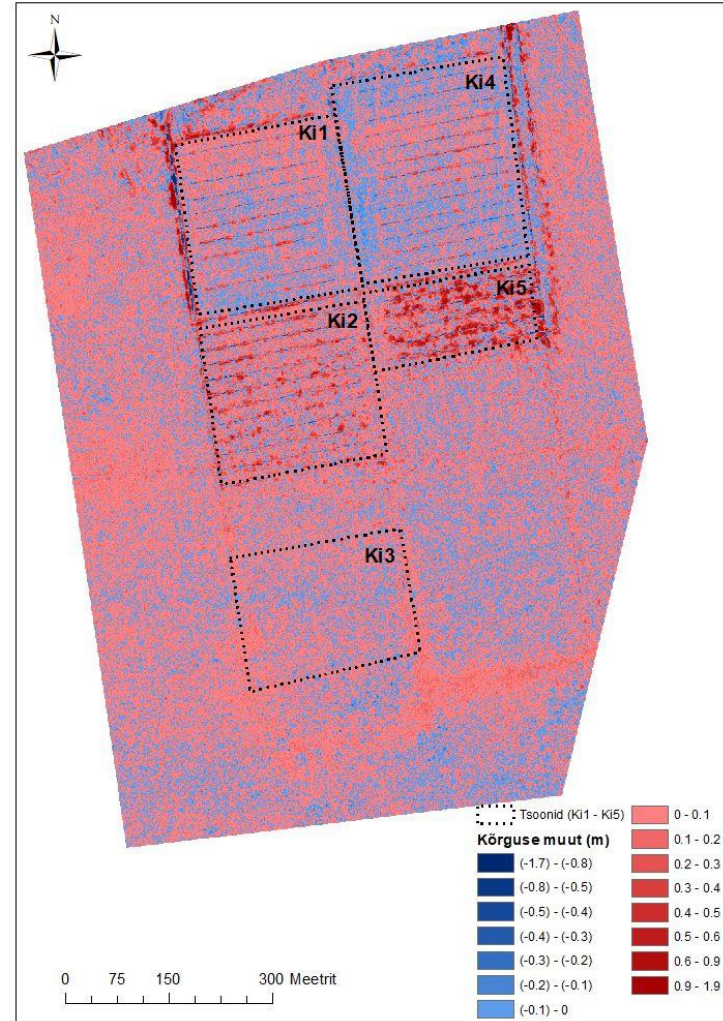
**Joonis 24.** RTK ja LiDARi andmete (meetrites) võrdlus Maima kohta. Punktiirjoon märgib 1:1 joont ning must tume joon trendijoont RTK ja LiDARI andmete vahel.



**Joonis .8.** Kõrguse muutus Ess-soo tsoonides E1, E2, E3, E4 ja E5 2015. aasta ja 2011. aasta vahel. Punastes toonides on kujutatud maapinna kõrguse kasvu ning sinistes toonides maapinna langust. Punktiiridena on kujutatud uuritavaid tsoone.



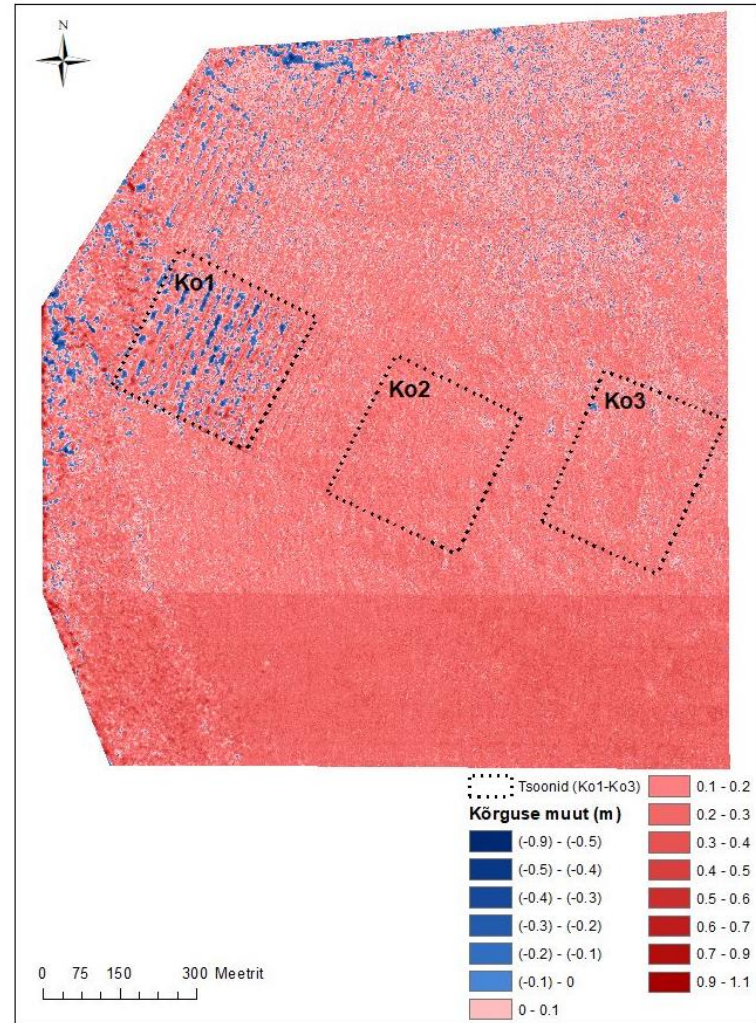
**Joonis 10.** Kõrguse muutus Kildemaa tsoonides Ki1, Ki2, Ki3, Ki4 ja Ki5 2014. aasta ja 2010. aasta vahel. Punastes toonides on kujutatud maapinna kõrguse kasvu ning sinistes toonides maapinna langust. Punktiiridena on kujutatud uuritavaid tsoone.



**Joonis 11.** Kõrguse muutus Kildemaa tsoonides Ki1, Ki2, Ki3, Ki4 ja Ki5 2017. aasta ja 2014. aasta vahel. Punastes toonides on kujutatud maapinna kõrguse kasvu ning sinistes toonides maapinna langust. Punktiiridena on kujutatud uuritavaid tsoone.

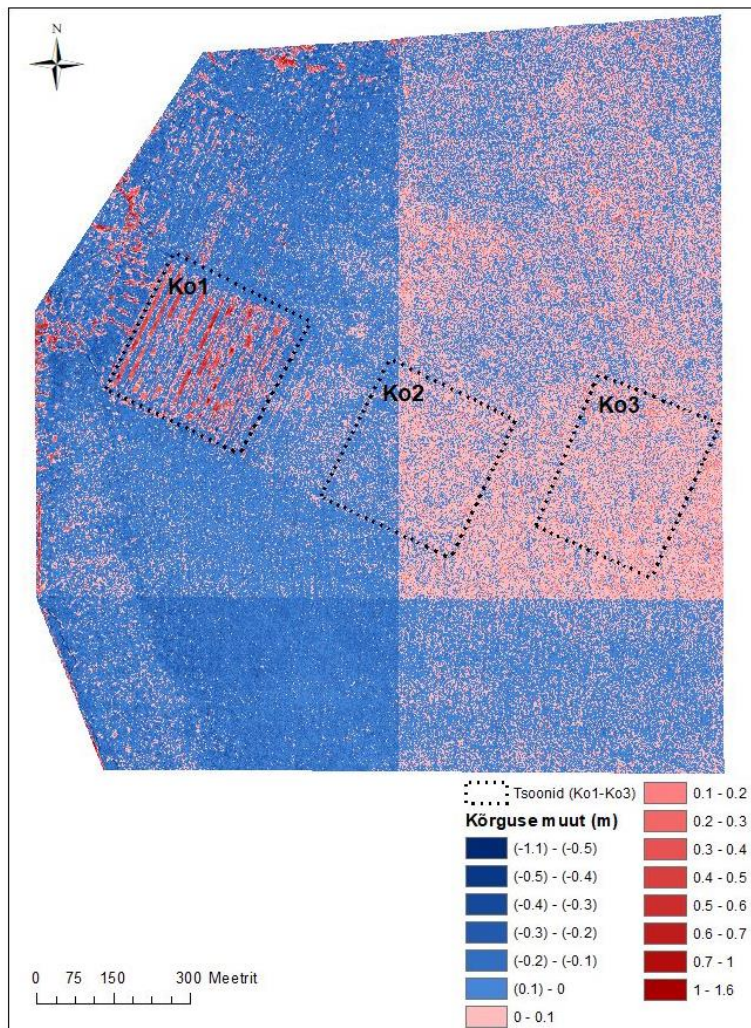


**Joonis 12.** Kõrguse muutus Kildemaa tsoonides Ki1, Ki2, Ki3, Ki4 ja Ki5 2017. aasta ja 2010. aasta vahel. Punastes toonides on kujutatud maapinna kõrguse kasvu ning sinistes toonides maapinna langust. Punktiiridena on kujutatud uuritavaid tsoone.

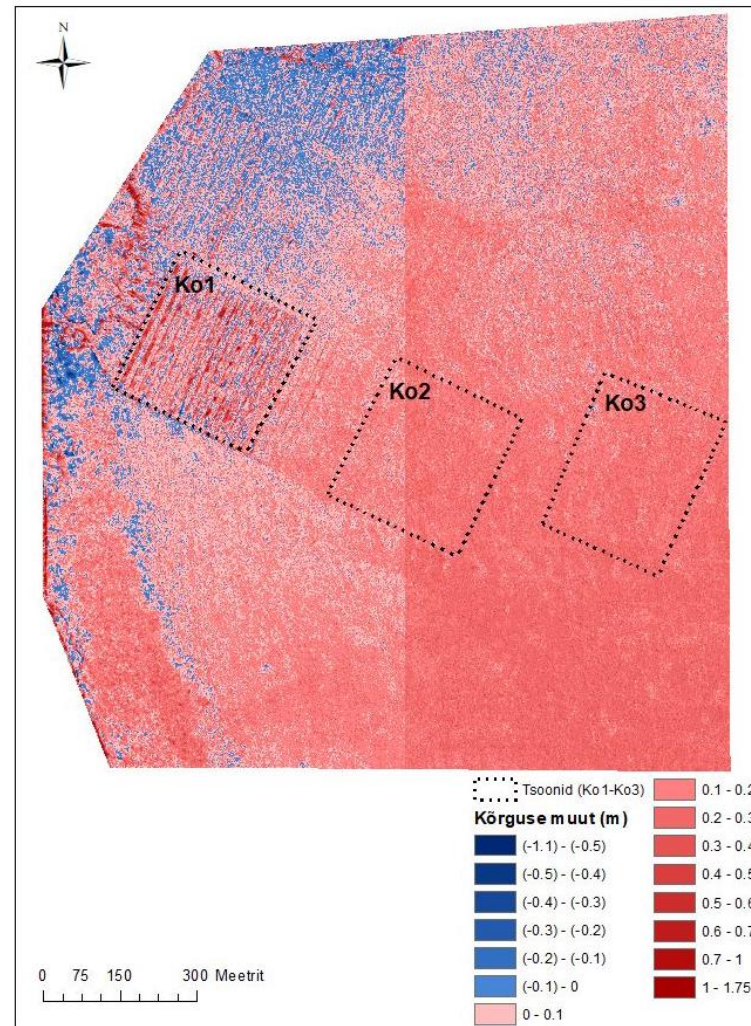


**Joonis 14.** Kõrguse muutus Kõima tsoonides Ko1, Ko2 ja Ko3 2012. aasta ja 2010. aasta vahel. Punastes toonides on kujutatud maapinna kõrguse kasvu ning sinistes toonides maapinna langust. Punktiiridena on kujutatud uuritavaid tsoone.

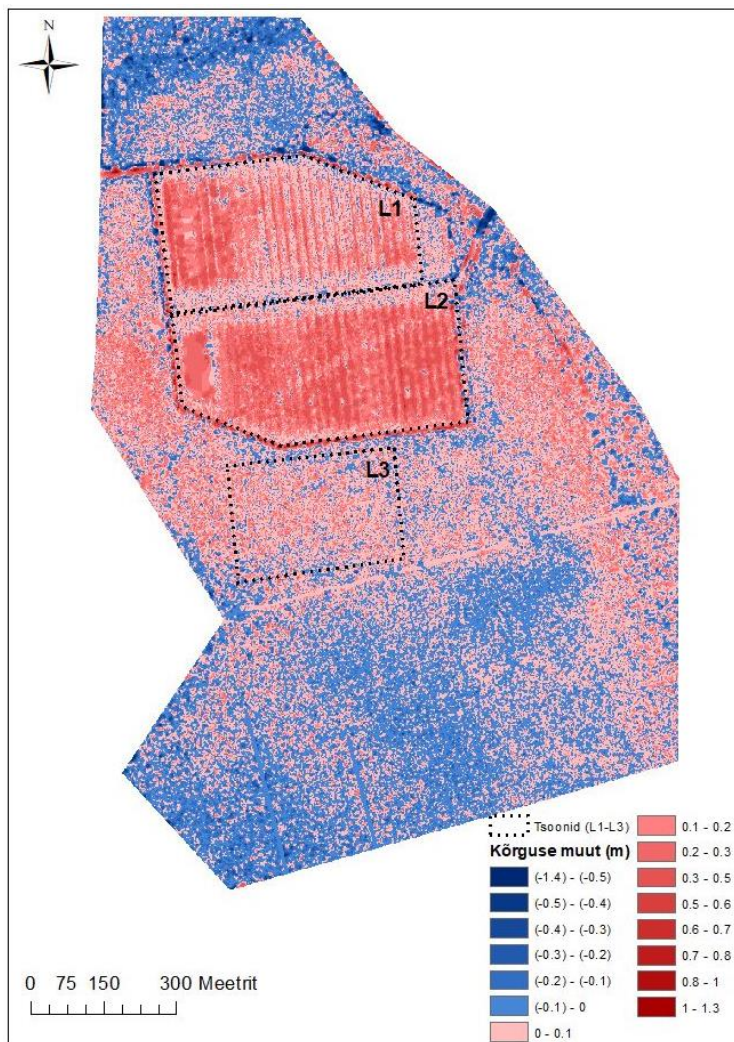




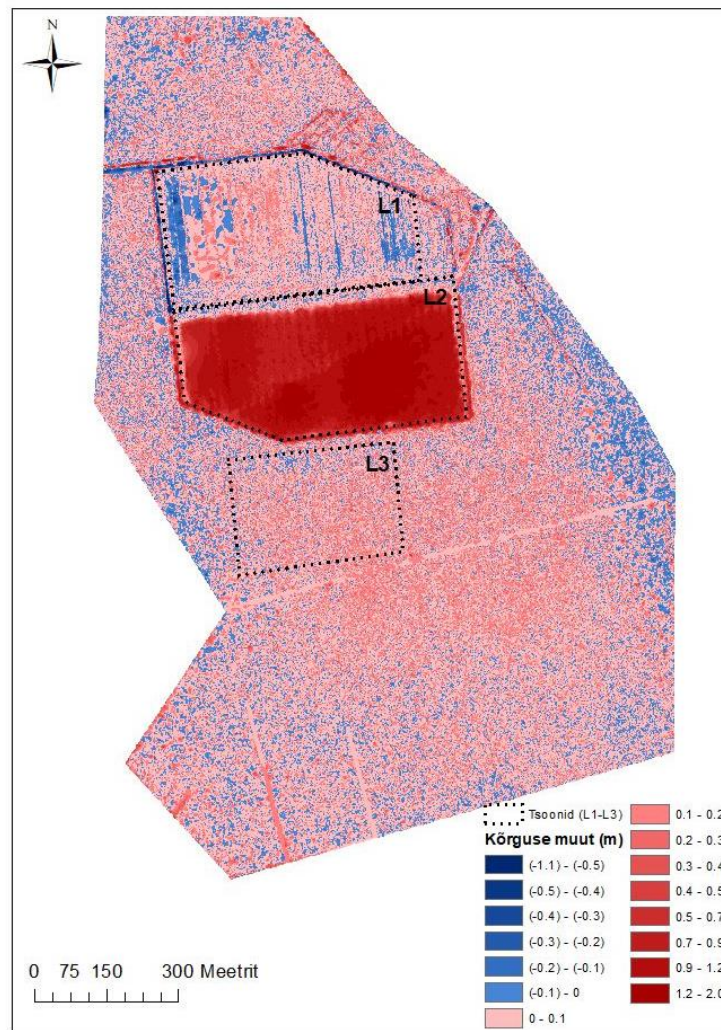
**Joonis 15.** Kõrguse muutus Kõima tsoonides Ko1, Ko2 ja Ko3 2017. aasta ja 2012. aasta vahel. Punastes toonides on kujutatud maapinna kõrguse kasvu ning sinistes toonides maapinna langust. Punktiiridena on kujutatud uuritavaid tsoone.



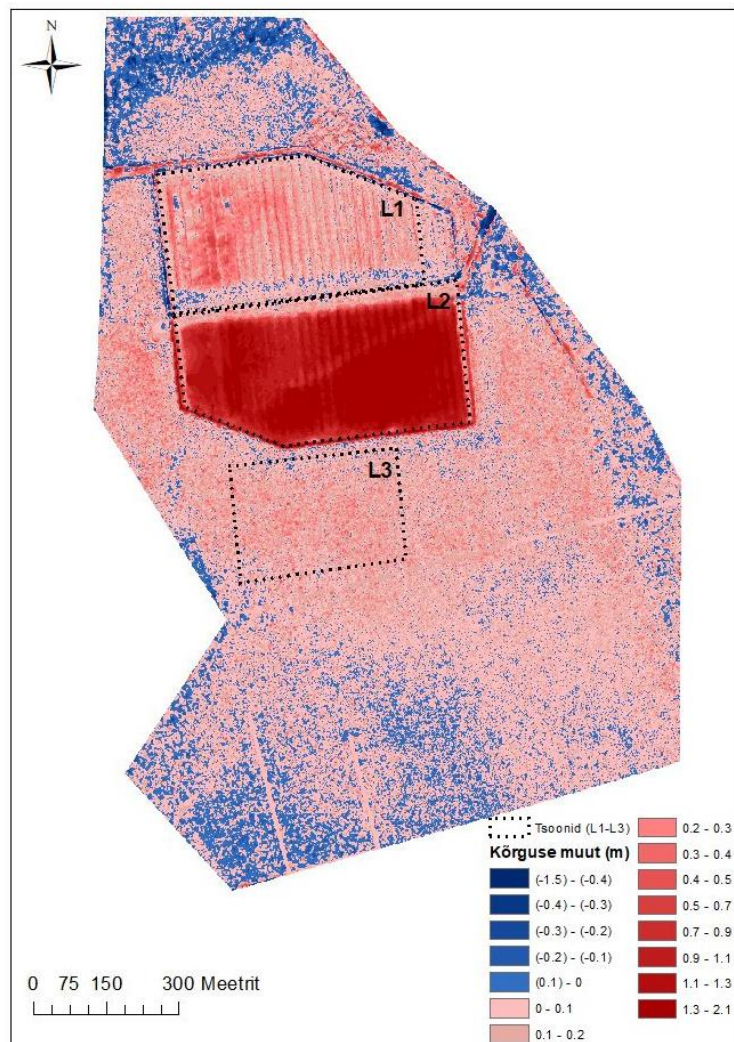
**Joonis 16.** Kõrguse muutus Kõima tsoonides Ko1, Ko2 ja Ko3 2017. aasta ja 2010. aasta vahel. Punastes toonides on kujutatud maapinna kõrguse kasvu ning sinistes toonides maapinna langust. Punktiiridena on kujutatud uuritavaid tsoone.



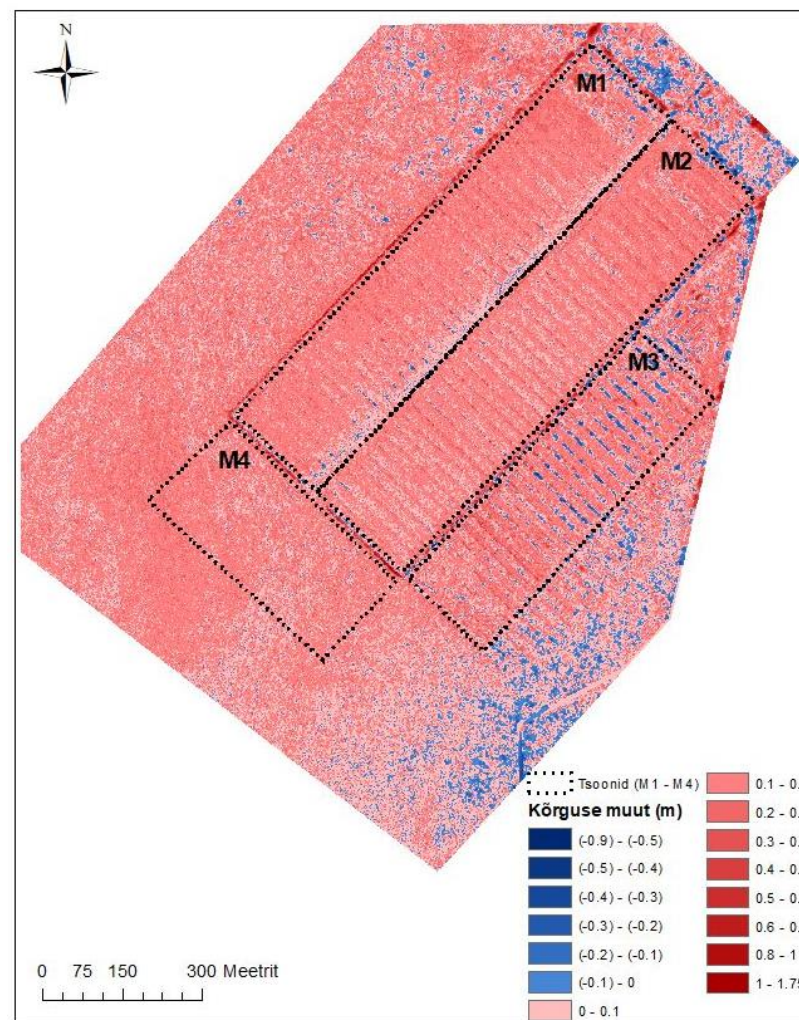
**Joonis 18.** Kõrguse muutus Laiuse tsoonides L1, L2 ja L3 2014. aasta ja 2010. aasta vahel. Punastes toonides on kujutatud maapinna kõrguse kasvu ning sinistes toonides maapinna langust. Punktiiridena on kujutatud uuritavaid tsoone.



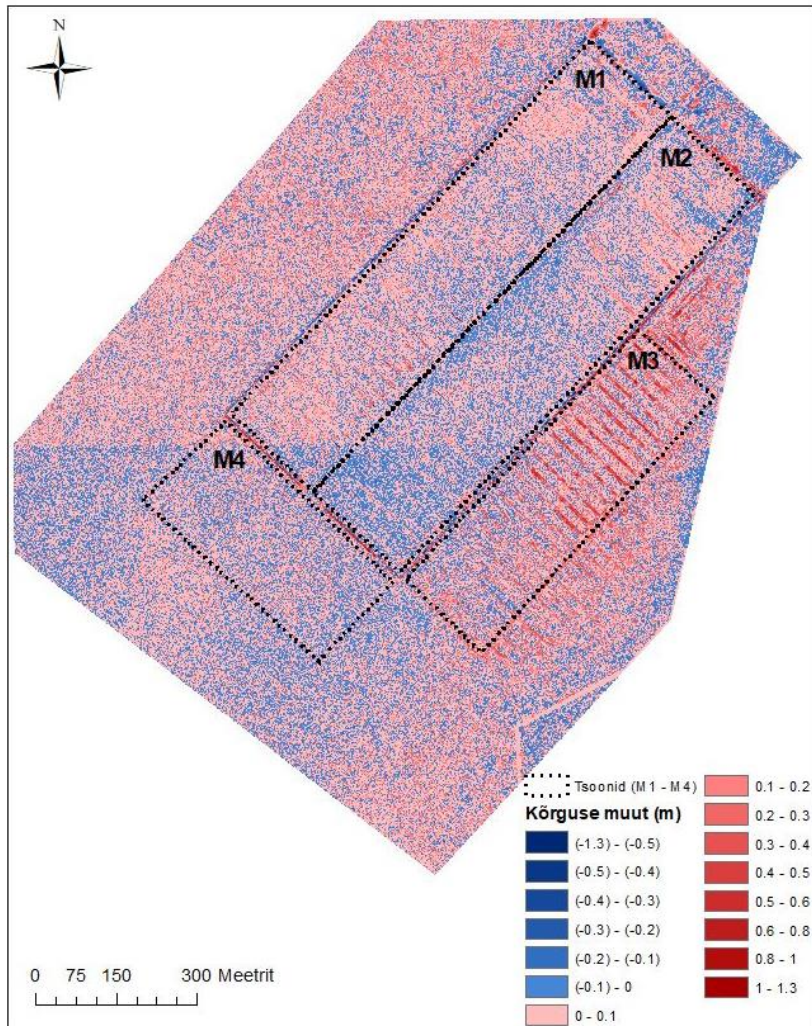
**Joonis 19.** Kõrguse muutus Laiuse tsoonides L1, L2 ja L3 2018. aasta ja 2014. aasta vahel. Punastes toonides on kujutatud maapinna kõrguse kasvu ning sinistes toonides maapinna langust. Punktiiridena on kujutatud uuritavaid tsoone.



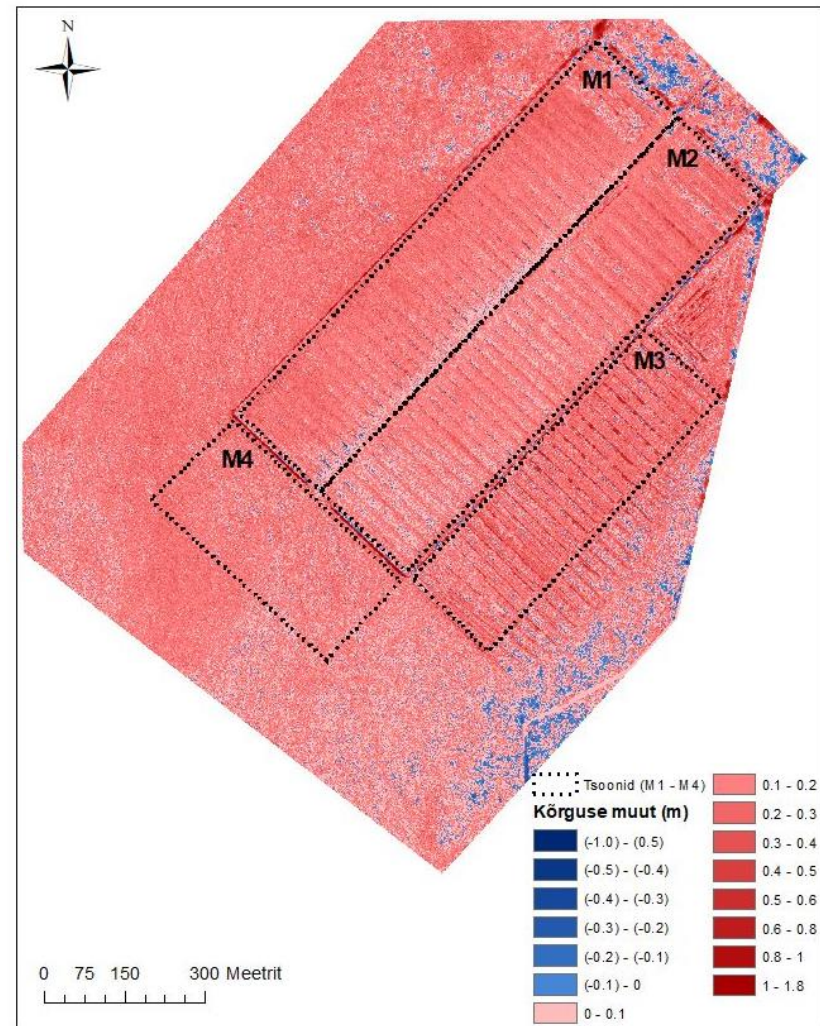
**Joonis 20.** Kõrguse muutus Laiuse tsoonides L1, L2 ja L3 2018. aasta ja 2010. aasta vahel. Punastes toonides on kujutatud maapinna kõrguse kasvu ning sinistes toonides maapinna langust. Punktiiridena on kujutatud uuritavaid tsoone.



**Joonis 21.** Kõrguse muutus Maima tsoonides M1, M2, M3 ja M4 2014. aasta ja 2010. aasta vahel. Punastes toonides on kujutatud maapinna kõrguse kasvu ning sinistes toonides maapinna langust. Punktiiridena on kujutatud uuritavaid tsoone.



**Joonis 22.** Kõrguse muutus Maima tsoonides M1, M2, M3 ja M4 2017. aasta ja 2014. aasta vahel. Punastes toonides on kujutatud maapinna kõrguse kasvu ning sinistes toonides maapinna langust. Punktiiridena on kujutatud uuritavaid tsoone.



**Joonis 23.** Kõrguse muutus Maima tsoonides M1, M2, M3 ja M4 2010. aasta ja 2017. aasta vahel. Punastes toonides on kujutatud maapinna kõrguse kasvu ning sinistes toonides maapinna langust. Punktiiridena on kujutatud uuritavaid tsoone.

### **3.6. Erinevuse pindade üldised tendentsid**

Erinevuse pindade puhul oli märgata maapinna kõrguste kasvu uuema LiDAR andmestikuga tehtud arvutusel võrreldes kõige varasema andmestikuga. Sellist tendetsi oli märgata Laiuse, Ess-soo, Maima ja Kõima soode puhul. Peamiselt tõusis pinnakõrgus taimestikuga kaetud looduslikul alal, kus kraavide kuivenduslik mõju on väiksem. Kildemaal on toimunud pinnase alanemine, eriti jääksoo pinnal. Jääksoo pinnal toimuvat alanemist on märgata ka Ess-soo freesturbaväljadel. Turba kaevandamise aladel tulid kõrguste erinevused välja nii kraavides kui ka kraavide vahele jäävatel tootmispeenardel. Kui ei olnud tugevasti veetasemest mõjutatud pind (nt. Laiuse üleujutus), siis oli märgata kraavide pinnal mõnikümne sentimeetrist kõrguse kasvu, mis annab aimu nii erosioonist kui ka taimestiku kasvust kraavides. Sarnane nähtus esines Ess-soo, Maima ja Kõima aladel. Lisaks oli märgata LiDARi puudujääke erinevuste pinna arvutamisel. Kõrgema taimestikuga mõjutatud aladel (puistu, roostik) oli LiDAR punktide ebatäpsus suurem. Näiteks Kildemaa tsoonis Ki5, millel esineb ülejäänud maapinnast oluliselt kõrgemaid punkte. Freesturbaväljasid ümbritsevate kogujakraavide puhul on toimunud kraavi maapinna punktide tõus Ess-soo, Kildemaa, Laiuse ja Maima aladel. Kraavide pind on tõusnud rohkem, kui ülejäänud turbaaladel. Karjääriviisiliselt labidaturba kaevandamisalal (E5) Ess-soo näitel on eristunud kaevandatud maapind, mis hilisema moodsustusringi jooksul on eeldatavalt täitunud veega ning koheva turbasambлага lausaliselt kaetud alal on kõrguse muut suurem võrreldes ülejäänud aladega tsooni E5 sees.

### **3.7. Profiiljoonte üldised tendentsid**

Profiiljoonte puhul on töös käsitletud kahte tüüpi profiiljooni: ühed on dreanažkraavidega risti ning teised on dreanažkraavidega paralleelselt peenra pinnalt. Dreanažkraavidega risti asetsevate profiiljoonte puhul on märgata vanema LiDAR andmestiku profiiljoone madalamaid kõrgusväärtusi võrreldes uuema LiDAR andmestikuga loodud profiiljoonte puhul. Sellist tendentsi on märgata transektide ET1, ET4, ET5, KiT1, KiT2, MT1, MT2 ja MT3 puhul. ET1, ET4, ET5, KiT1, KiT2 transektidel tuleb välja eeldatav erosiooni mõju freesturbaväljadele, kus kraavide vahelise peenra kõrgus alaneb uuema moodsustusringi

jooksul. Oli märgata ka kraavide kõrguspunktide kasvu, mis selgitab tuule- ja vee-erosiooni mõjul peenra pealt ärauhutava pinnase sattumist kõrval asuvasse kraavi. Kraavi pinna kõrgus suureneb ja kraavi mõju väheneb. Kuivenduskraavidega paralleelsetel profiilijoontel on LT1, LT2 ja MT4 puhul märgata tootmisala keskmise osa kasvu. Keskmise osa maapinna kõrguse kasv on peamiselt tingitud erosiooni tõttu täitunud turbaga, mis on pärit freesturbaväljade äärealadelt. Tootmisala keskmise osa langust on märgata ET2, ET3 ja KiT3 profiilijoonistelt. Languse põhjuseks võib olla samuti erosioon, kuid antud erosioon toimub kuivenduskraavide mõjul, kus pinnas uhutakse kõrval asuvasse kuivenduskraavi (nt. ET4, kus on märgata kõrguse alanemist peenral ning kõrguse kasvu kraavi pinnal). Teine põhjus võib olla mineraliseerumine, mille tõttu maapinna kõrgus langeb. Profiilijoontel saab eristada ka erineva režiimidega alasid ja nende üleminekuid. Üleminekul looduslikult alalt tootmisalale ja vastupidi on märgata maapinna järsku tõusu kõikidel profiilijoonistelt, mis on kuivenduskraavidega risti ning toimub üleminek looduslikule alale. Üleminekul looduslikule alale toimub järsk maapinna tõus, mille aastate vaheline varieeruvus on väike. Profiilipildid esitavad veerežiimist vähem mõjutatud alasid (nt. teenindustee) üldjuhul ühesuguse kõrgusena. Profiilijooniste ET2, ET3, LT1 ja LT2 saavad alguse teenindustee pinnalt ning tee kõrguse varieeruvust on aastate lõike minimaalselt. Profiilijoontelt on märgata ka sooladel LiDAR andmestiku kasutamise miinused. Suure veana on ET2 profiilijoonel 2015. aasta profiilijoon esitatud kraavi pinnalt ühtlase üleminekuga kraavi servale. Tegelikuses on alal toimiv kraav, mis ei ole täiesti üleujutatud või kinnikasvanud. Profiilijoontel LT2 on märgata kahte miinuskohta: esiteks esitab LiDAR üleujutatud ala maapinnana ehk maapinna tegelikku kõrgust LiDARi andmetel teada ei saa, teiseks on 2018. aasta profiilijoonel tootmisväljaku keskel järsk maapinna tõus. 2018. aastal oli LT2 profiilijooone ala üleujutatud ja järsk maapinna tõus on seletatav vaid taimestiku esinemisega piirkonnas. Taimestik segab LiDARi punkti täpset asetsemist maapinnale ning seetõttu võivad tulla valed maapinna kõrgused, mis tegelikult on võetud taimestikult.

## Kokkuvõte

Sood mängivad olulist rolli kliimamuutuste reguleerimisel akumulierides atmosfääris olevat süsinikku. Lisaks on sood olulised ökosüsteemiteenuste pakkujad nii inimestele kui taime- ja loomaliikidele. Turba kasutamine kütteallikana tõstis 20. sajandi keskel turba kaevandamise mahtu, eriti freesturbaväljade näol. Hiljem suurenes turba tootmine põllumajanduslikel ja aianduslikel eesmärkidel. Turba kaevandamise jaoks rajati kuivenduskraavid, mis avaldasid mõju nii kaevandusalale kui ka ümberkaudsele soole. Turba kuivendamise käigus turbakiht tihenes tänu vee turbapooridest välja juhtimisele ning pinnas mineraliseerus. Turba ammendumisel jäid maha jääksood, mis avaldavad mõju siamaani.

Kohapealsel mõõtmisel pole võimalik näha kogu ala ruumilist kõrguse muutumist. Kaugseire andmete ruumiline lahutus ei ole piisav, et analüüsida muutusi turbaala mikroreljeefis. LiDARi andmed aga võimaldavad kasutada 1m suuruse resolutsiooniga andmeid, et näha endistes turbatootmisalades toimunud muutusi. Eestis on teostatud kolm ringi LiDARi mõõdistamisi: 2008-2011 (esimene ring), 2012-2015 (teine ring) ning 2017-2020 (kolmas ring toimumas), mis võimaldavad uurida Eesti jääksoodes toimuvaid pikaajalisi muutusi.

Viie Eesti jääksoo Ess-soo, Kildemaa, Kõima, Laiuse ning Maima jääksoodede puhul on LiDARi andmetelt võimalik analüüsida jääksoodes toimuvaid muutusi. Endistel freesturbaaladel on märgata suuremaid muutusi võrreldes eelnevate mõõdistusringidega. Näha on maapinna kõrguse alanemist, mis on tingitud kraavidest tuleneva kuivendamise mõjuga, sest pinnas tiheneb ning mineraliseerub, kuna turbapooridesse tuleb vee asemel õhk ning mikroorganismide elutegevus kiireneb. Freesturbaaladel olevates kraavides on näha pinnase tõusu lahtise turba näol, mis on tingitud tuule- ja vee-erosioonist. Lahtine peenardelt ärakantud turbakiht kuhjub kraavipõhja muutes kraavi madalamaks. Kraavipindade tõusu võib märgata ka suurema sademete- ning lumesulavete hulgaga aastatel, mis tähendab, et LiDAR tuvastab veepinna kraavipõhja pinnana.

Profiiljoontelt oli märgata mitme ala puhul toimuvat mineralisatsiooni ja erosiooni, mille tulemusena kahe kraavi vahelise turbapinna kõrgus vähenes ning kraavide pind tõusis, mis kinnitab hüpoteesi, et erosioon on freesturbaväljakute kõrgust oluliselt mõjutav tegur. Kuivenduskraavidega paralleelselt loodud profiiljoontel oli mitmel puhul näha maapinna

kasvu freesitud ala keskel, mille põhjuseks on kõrgematelt tootmisväljakute otstelt tuule- ja vee-erosiooniga keskele madalamale tootmisväljaku osasse kokku uhitud pinnas.

Profiiljoontelt ja arvatud kõrguse erinevuse pindadelt oli märgata ka LiDAR andmestiku probleeme taimestunud turbaalade puhul. LiDARil on taimestikuga alal probleeme jõudmaks maapinnani, et saada täpne maapinna kõrguspunkt. Sellest tulenevalt oli märgata maapinna punktide asemel taimestiku punkte. Lisaks, on probleemiks kraavide kujutamine, sest LiDARi punkt võib sattuda erinevate moodsustusringide jooksul kas kraavi põhja, pervele või kaldale, mis võib tähendada suurt juhuslikku laadi kõrguste erinevust kitsas tsoonis. Probleemiks võib kujuneda ka üleujutatud pindade kujutamine, kui eesmärgiks on saada ainult maapinna punkte. LiDAR käsitleb üleujutatud pinda kui maapinda, siis võib sademeterikkal perioodil moodsustades sattuda maapinna punkti asemel pinna kõrguseks ajutiselt üleujutatav ala veepinna punkt.

LiDAR kõrguspunktide usaldusväärsuse kontrollis RTK mõõtmistega oli alade puhul korreleerivus suur. Kõima ja Kildemaa puhul oli LiDAR kõrguspunkte ülehinnanud, kuid ülehindamine toimus ühtlasele kogu ala kohta.



# Analyzing changes in peatland surface using LiDAR data

Ott Toomsalu

## Summary

Bogs are playing an important role in climate changes for accumulating carbon from the atmosphere. In addition, bogs are important for supplying ecosystem services for humans, animals and plant species. Using peat as an energy source, peat extraction increased in the middle of the 20th century, especially milled peatland extraction. For drainage of the peatlands, ditches were constructed, which influenced the peatland and surface over the peatland. During the drainage of the peatland, peat was tightened because of the water outflow from the peat pores and mineralization of the peat.

Local measurements are not providing spatial elevation change. The resolution of remote sensing data is not enough for analyzing changes on the peatland surface micro-relief. LiDAR data give opportunity to use 1m resolution data for analyzing changes in the former milled peatlands. In Estonia, three LiDAR surveys have been performed: 2008-2011 (first survey), 2012-2015 (second survey) and 2017-2020 (third survey is happening), which allow us to analyze long-term changes in Estonian peatlands.

It is possible to analyze changes in the peatlands based on five Estonian peatlands: Ess-soo, Kildemaa, Kõima, Laiuse and Maima. Changes have been seen in former milled peatlands comparing different surveys. It is seen, that elevation of the peatland has been decreased, which is caused by the drainage of the peatlands, because the surface is mineralized and tightened. Rised elevation in milled peatlands shows that due to erosion the surface ends up in drainages, causing elevation rise in the drainage.

From the analyze it showed problems that might occur using LiDAR data. It had some problems reaching to the ground points when there was vegetation on the field. Also it has difficulties to representing drainage, as the LiDAR point might end up to bottom, in the middle or in the top of the ditch. This may vary elevation points. Also it shows water level as ground points, so if the purpose is to get only ground, then it might fail.

To check reliability comparisons with RTK measurements were made and showed high correlation between each other. There were slight overestimation in Kõima and Kildemaa but it was homogeneous.

## **Tänuavaldused**

Soovin tänada oma juhendajaid, Ain Kulli ja Raivo Aunapit, asjaliku tagasiside, pühendatud aja ja kiire reageerimise eest. Ave Ansperit töö valmimisele kaasa aitamises ja sisukate küsimuste esitamises. Samuti soovin tänada lähedasi, kes olid abiks töö valmimisel.

## Kasutatud allikad

- Blankenburg J, Tonnis W, 2004, “Guidlines for wetland restoration of peat cutting areas. – Results of the BRIDGE-PROJECT”, Bremen
- Conway V M, Millar A, 1960, “The hydrology of some small peat-covered catchments in the northern Pennines” *Journal of the Institute of Water Engineers* **14** 415–424
- Eesti Maaülikool, 2016, “Maastikuseire kava perioodiks 2016-2025, seire tulemuste analüüs ja meetoodika täiendamine” (8317)
- Säästva arengu seadus. Vastu võetud 22.02.1995, RT I 1995, 31, 384. Viimane redaktsioon RT I, 10.11.2016, 16
- Kaevandamise seadus. Vastu võetud 29.01.2003, RT I 2003, 20, 118. Viimane redaktsioon RT I, 10.11.2016, 21
- Maapõu seadus. Vastu võetud 27.10.2016, RT I, 10.11.2016, 1. Viimane redaktsioon RT I, 12.12.2018, 53
- Foulds S A, Warburton J, 2007, “Significance of wind-driven rain (wind-splash) in the erosion of blanket peat” *Geomorphology* **83**(1–2) 183–192
- Gatis N, Luscombe D J, Carless D, Parry L E, Fyfe R M, Harrod T R, Brazier R E, Anderson K, 2019, “Mapping upland peat depth using airborne radiometric and lidar survey data” *Geoderma* **335**, 78–87
- GISGeography, 2018, “Inverse Distance Weighting (IDW) Interpolation”, Kättesaadav: <https://gisgeography.com/inverse-distance-weighting-idw-interpolation/> (26.05.2019)
- Glaser P H, Chanton J P, Morin P, Rosenberry D O, Siegel D I, Ruud O, Chasar L I, Reeve A S, 2004, “Surface deformations as indicators of deep ebullition fluxes in a large northern peatland” *Global Biogeochemical Cycles* **18** (1)
- Gorham E, 1991, “Northern peatlands: role in the carbon cycle and probable responses to climatic warming” *Ecological Applications*
- Haapalehto T O, Vasander H, Jauhiainen S, Tahvanainen T, Kotiaho J S, 2011, “The effects of

- peatland restoration on water-table depth, elemental concentrations, and vegetation: 10 years of changes” *Restoration Ecology*
- Haghighi A, Menberu M W, Darabi H, Akanegbu J, Kløve B, 2018, “Use of remote sensing to analyse peatland changes after drainage for peat extraction” *Land Degradation and Development* **29**(10) 3479–3488
- Harenda K M, Lamentowicz M, Samson M, 2018, “Interdisciplinary Approaches for Sustainable Development Goals”, in *GeoPlanet: Earth and Planetary Sciences*, pp 169–187
- Holden J, Chapman P ., Labadz J ., 2004, “Artificial drainage of peatlands: hydrological and hydrochemical process and wetland restoration” *Progress in Physical Geography* **28**(1) 95–123
- Ilomets M, Animägi J, Kallas R, 1995 *Estonian peatlands, a brief review of their development, state, conservation, peat resources and management*. (Ministry of Environment, Tallinn)
- Joosten H, Clarke D, 2002 *Wise Use of Mires and Peatlands - Background and Principles including a Framework for Decision - Making* (International Mire Conservation Group and International Peat Society. ISBN)
- Kimmel K, 2009 *Ecosystem services of Estonian wetlands*, University of Tartu
- Kimmel K, Kull A, Salm J O, Mander Ü, 2010, “The status, conservation and sustainable use of Estonian wetlands” *Wetlands Ecology and Management* **18**(4) 375–395
- Kohv M, Salm J, Jakobson L, Niitlaan E, 2015, “Turba kaevandamise hüdrooloogilise mõju vähendamine”
- Kosk A, Lõhmus L, 2011 *Ülevaade Eesti rabade ökosüsteemi teenustest ja nende majanduslike väärtuste hindamisest* Eesti Maaülikool (Tartu)
- Kull A, 2013, “Soode ökoloogilise funktsionaalsuse tagamiseks vajalike puhvertsoonide määratlemine pikaajaliste häiringute leviku piiramiseks või leevendamiseks (Project report in Estonian)”

- Lefsky M, Cohen W, Parker G, Harding D, 2002, "Lidar Remote Sensing for Ecosystem Studies" *Bioscience* **52**(1) 19–30
- Leifeld J, Menichetti L, 2018, "The underappreciated potential of peatlands in global climate change mitigation strategies" *Nature Communications* **9**(1)
- Li C, Grayson R, Holden J, Li P, 2018, "Erosion in peatlands: Recent research progress and future directions" *Earth-Science Reviews* **185**(November) 870–886
- Lillesand T M, Kiefer R W, Chipman J W, 2008 *Remote sensing and image interpretation* Sixth Edit (John Wiley & Sons.)
- Limpens J, Berendse F, Blodau C, Canadell J G, Freeman C, Holden J, Roulet N, Rydin H, Schaepman-Strub G, 2008, "Peatlands and the carbon cycle: From local processes to global implications - A synthesis" *Biogeosciences* **5**(5) 1475–1491
- Liu X, 2008, "Airborne LiDAR for DEM generation": *Progress in Physical Geography* **32**(1) 31–49
- Lode E, Leivits M, 2011, "The LiDAR-based topo-hydrological modelling of the Nigula mire, SW Estonia" *Estonian Journal of Earth Sciences* **60**(4) 232
- Lode E, Sepp K, Truus L, Ilomets M, Pajula R, 2015, "Korrastatavate jääsoode valik", Tallinn
- Maa-amet, 2019a, "Maa-ameti Geoportaal"
- Maa-amet, 2019b, "Maa-ameti kaardirakendus", Kättesaadav :<https://xgis.maaamet.ee/maps> (26.05.2019)
- Millennium Ecosystem Assessment, 2005, "Millennium Ecosystem Assessment: Ecosystems and Human Well-being, Synthesis report"
- Milton E J, Hughes P D, Anderson K, Schulz J, Lindsay R, Hill B S, T. K C, 2005, "Remote Sensing of Bog Surfaces"
- Minkkinen K, Laine J, 1998, "Long-term effect of forest drainage on the peat carbon stores of pine mires in Finland" *Canadian Journal of Forest Research* **28**(9) 1267–1275

- Mioduszewski W, Kowalewski Z, Wierzba M, 2013, “Impact of peat excavation on water condition in the adjacent raised bog” *Journal of Water and Land Development* **18**(9) 49–57
- Moen A, 1995, “Introduction: regionality and conservation of mires” *Gunneria* **70** 11–22
- Noble A, Palmer S M, Glaves D J, Crowle A, Brown L E, Holden J, 2018, “Prescribed burning, atmospheric pollution and grazing effects on peatland vegetation composition” *Journal of Applied Ecology* **55**(2) 559–569
- Novero A U, Pasaporte M S, Aurelio R M, Madanguit C J G, Tinoy M R M, Luayon M S, Oñez J P L, Daquiado E G B, Diez J M A, Ordaneza J E, Riños L J, Capin N C, Pototan B L, Tan H G, Polinar M D O, Nebres D I, Nañola C L, 2019, “The use of light detection and ranging (LiDAR) technology and GIS in the assessment and mapping of bioresources in Davao Region, Mindanao Island, Philippines” *Remote Sensing Applications: Society and Environment* **13**(April 2018) 1–11
- Orru M, 1992, *Eesti turbavarud* (RE Eesti Geoloogiakeskus, Tallinn)
- Orru M, Übner M, Orru H, 2011, “Chemical properties of peat in three peatlands with balneological potential in Estonia” *Estonian Journal of Earth Sciences* **60**(1) 43
- Paal J, 2007, *Jääksoode korrastamise käsiraamat* (Tartu)
- Paal J, 2011, *Jääksood, nende kasutamine ja korrastamine* (Eesti Turbaliit, Tartu)
- Paal J, Leibak E, 2013, *Eesti soode seisund ja kaitstus* (Eesti Looduse Fond, Tartu)
- Parry L E, Holden J, Chapman P J, 2014, “Restoration of blanket peatlands” *Journal of Environmental Management* **133** 193–205
- Pirotti F, Grigolato S, Lingua E, Sitzia T, Tarolli P, 2012, “Laser scanner applications in forest and environmental sciences” *European Journal of Remote Sensing* **44**(1) 109–123
- Price J, Heathwaite A L, Baird A, 2003, “Hydrological processes in abandoned and restored peatlands” **11** 65–83
- Price J, Rochefort L, Quinty F, 1998, “Energy and moisture considerations on cutover peatlands: Surface microtopography, mulch cover and Sphagnum regeneration”

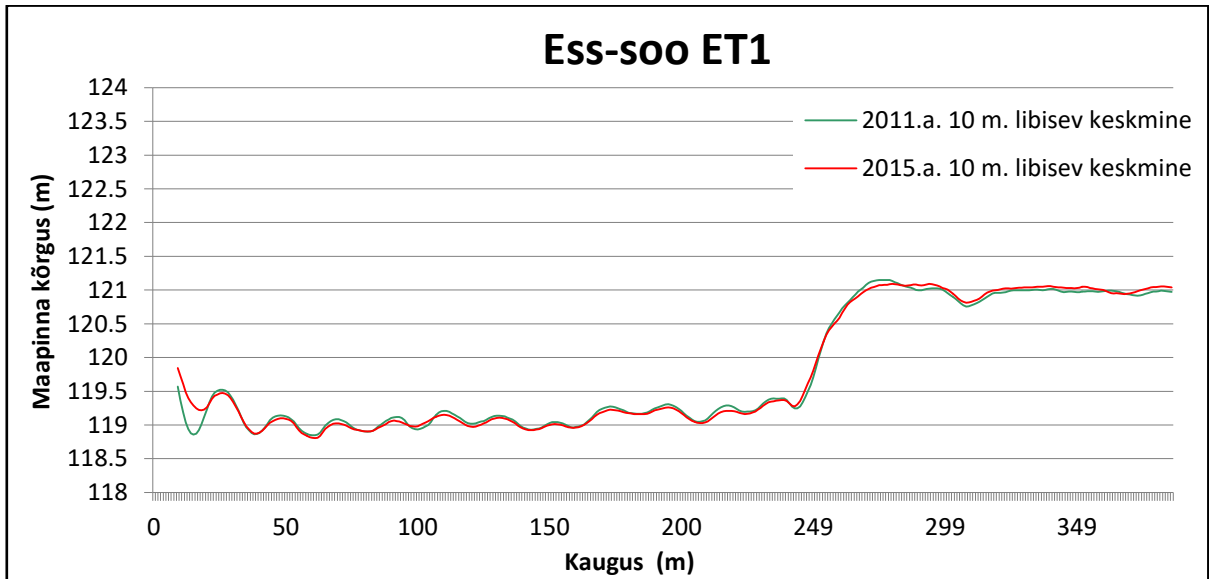
- Raber G T, Jensen J R, Hodgson M E, Tullis J A, Davis B A, Berglund J, 2007, “Impact of Lidar Nominal Post-spacing on DEM Accuracy and Flood Zone Delineation” *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* **73**(7) 793–804
- Ramst R, Orru M, 2009, “Eesti mahajäetud turbatootmisalade taastaimestumine” *EESTI PÕLEVLOODUSVARAD JA -JÄÄTMED* **1**(2) 6–7
- Ramst R, Orru M, Halliste L, 2005, “Eesti mahajäetud turbatootmisalade revisjon. 2. etapp. Ida-Viru, Lääne-Viru, Jõgeva, Järva ja Tartu maakond”, Tallinn,
- Ramst R, Orru M, Salo V, Halliste L, 2007, “Eesti mahajäetud turbatootmisalade revisjon. 3. etapp. Viljandi, Pärnu, Saare ja Hiiu maakond”, Tallinn
- Riigikontroll, 2005, “Kontrollaruanne: Turbavarude kasutamine”, Tallinn
- Riiklik Ilmateenistus, 2019, “Ilmateenistuse kliimakaardid”, Kättesaadav: <https://www.ilmateenistus.ee/kliima/kliimakaardid/sademed/> (26.05.2019)
- Stivrins N, Ozola I, Gaška M, Kuske E, Alliksaar T, Andersen T J, Lamentowicz M, Wulf S, Reitalu T, 2017, “Drivers of peat accumulation rate in a raised bog: impact of drainage, climate, and local vegetation composition” *Mires and Peat* **19**
- Triisberg T, Karofeld E, Paal J, 2011, “Re-vegetation of block-cut and milled peatlands: an Estonian example” *Mires and Peat* **8**(05) 1–14
- Vaguri E, 2017a, “Ess-soo jääksoo veerežiimi taastamistöde uurimistö. Käsikirjaline materjal”, Tallinn
- Vaguri E, 2017b, “Kõima jääksoo veerežiimi taastamistöde uurimistö. Käsikirjaline materjal”, Tallinn
- Vaguri E, 2017c, “Laiuse jääksoo veerežiimi taastamistöde uurimistö. Käsikirjaline materjal”, Tallinn
- Vaguri E, 2017d, “Maima jääksoo veerežiimi taastamistöde uurimistö. Käsikirjaline materjal”, Tallinn



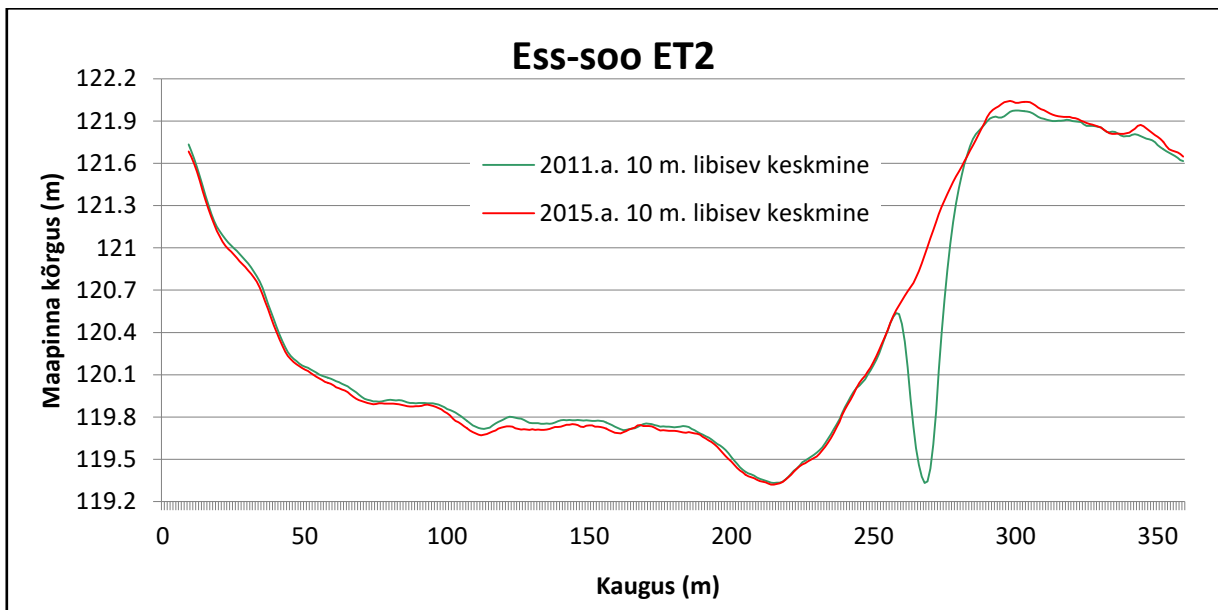
- Vain A, 2008, “Aerolaserskaneerimisest saadud maapinna kõrgusmudel täpsuse hindamine.”  
*Geodeet* **36** 38–41
- Vain A, 2011, “Aerolaserskaneerimise tööprintsip ja vigade päritolu – lühike kokkuvõte”  
*Geodeet* **41** 77–80
- Xu J, Morris P J, Liu J, Holden J, 2018, “PEATMAP: Refining estimates of global peatland distribution based on a meta-analysis” *Catena*

**Lisad**

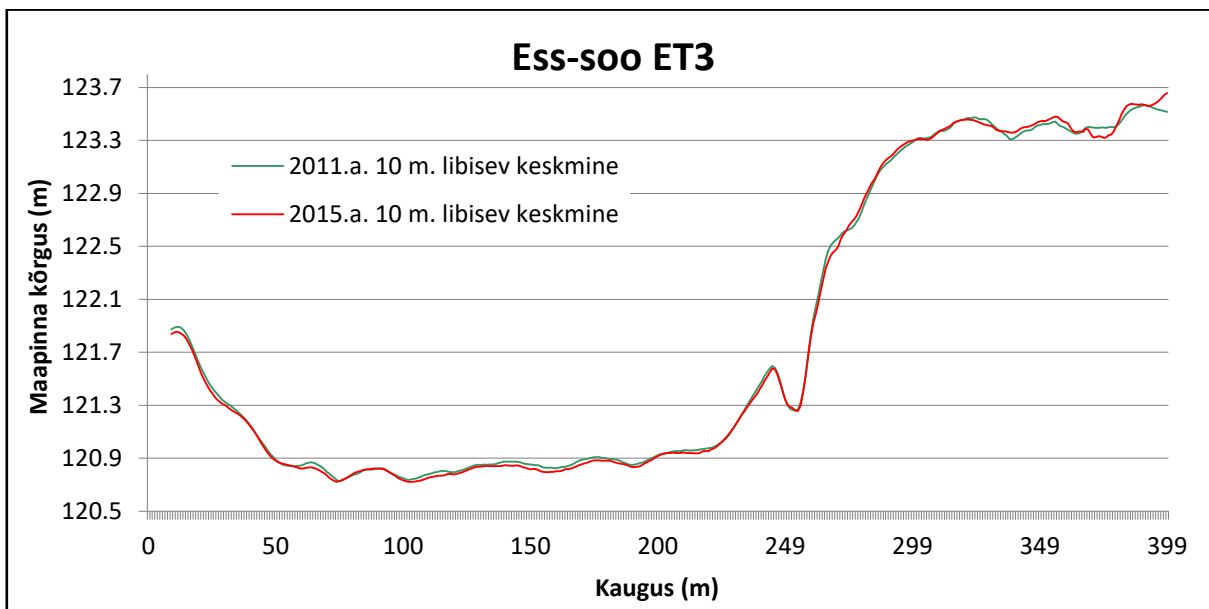
**Lisa 1.** Ess-soo transekt ET1 2011. ja 2015. aasta 10 m libisev keskmine



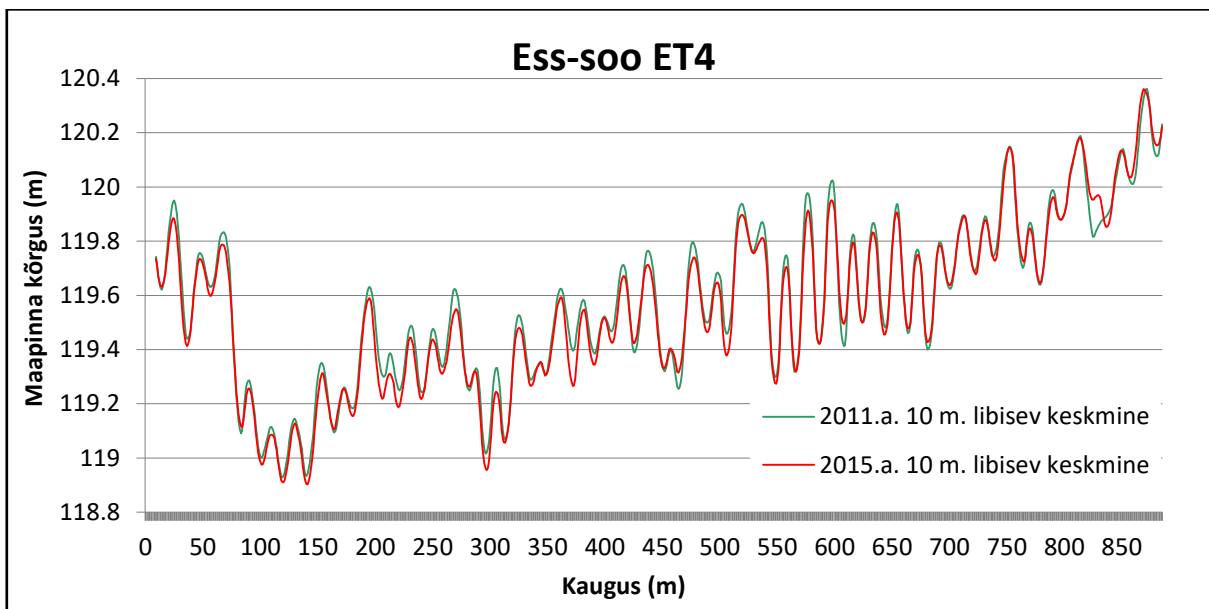
**Lisa 2.** Ess-soo transekt ET2 2011. ja 2015. aasta 10 m libisev keskmine



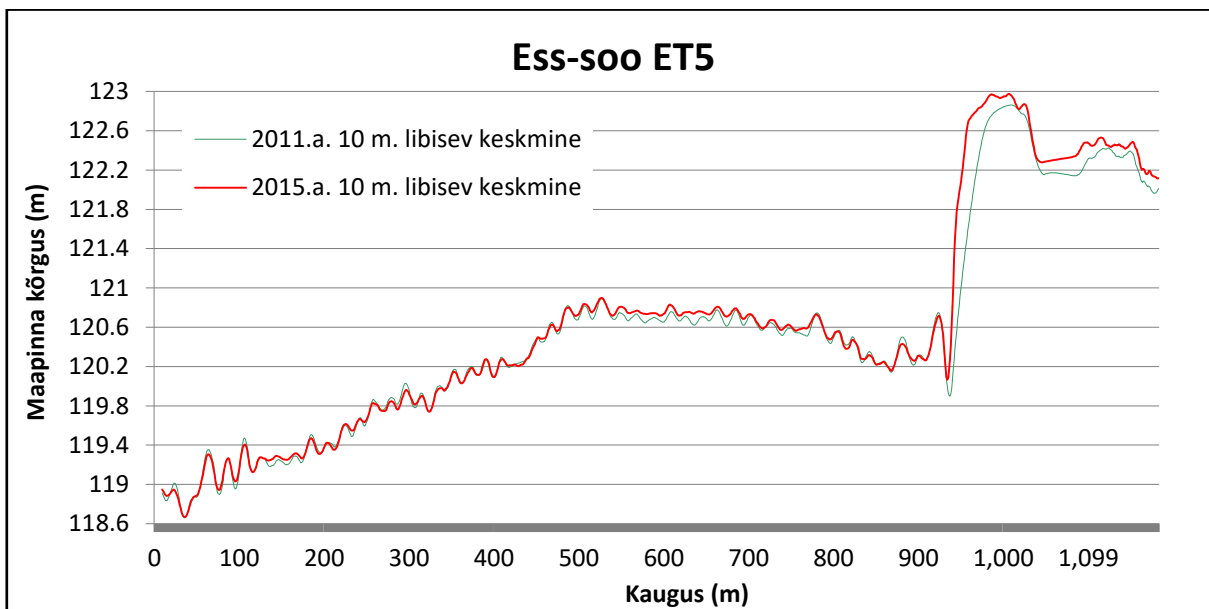
**Lisa 3.** Ess-soo transekt ET3 2011. ja 2015. aasta 10 m libisev keskmine



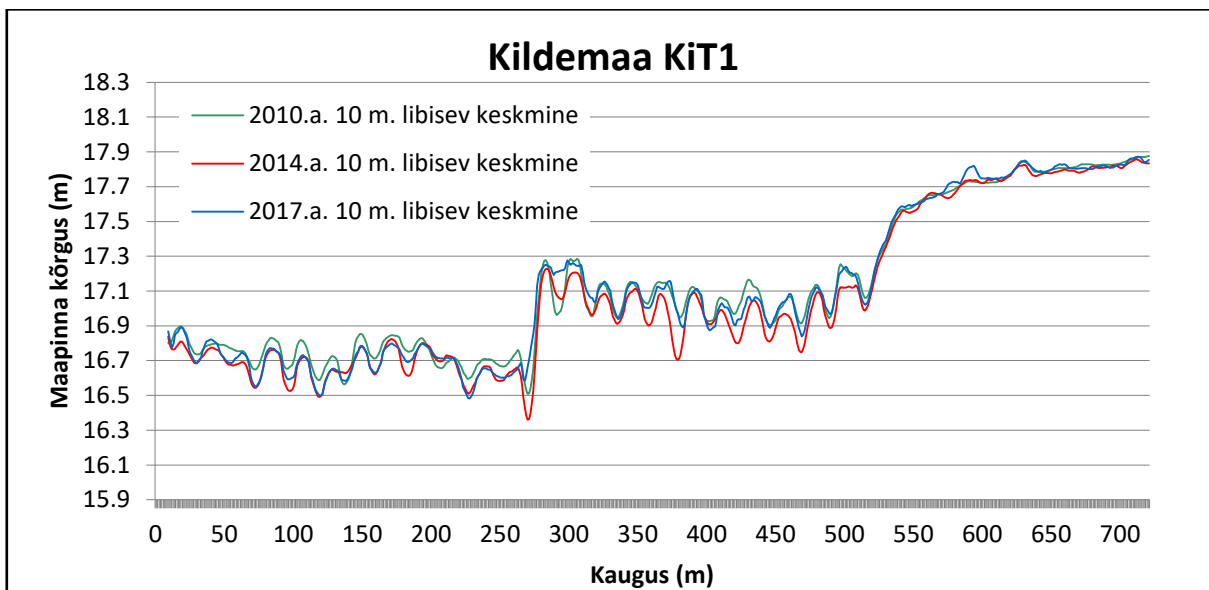
**Lisa 4.** Ess-soo transekt ET4 2011. ja 2015. aasta 10 m libisev keskmine



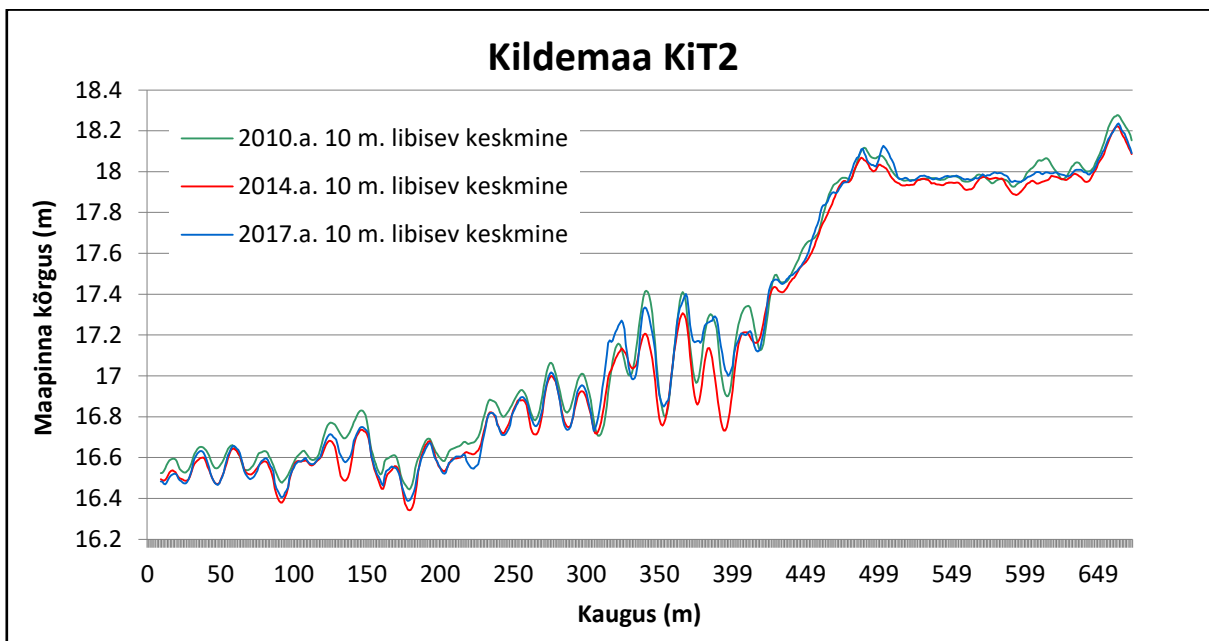
**Lisa 5.** Ess-soo transekt ET5 2011. ja 2015. aasta 10 m libisev keskmine



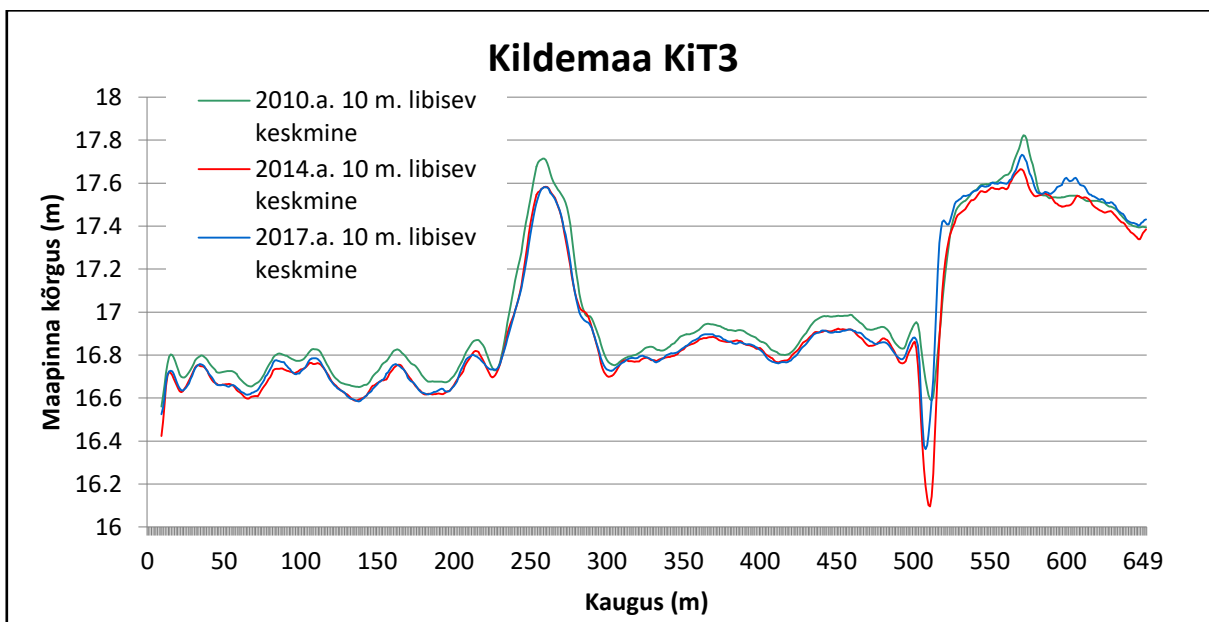
**Lisa 6.** Kildemaa transekt KiT1 2010., 2014. ja 2017. aasta 10 m libisev keskmine



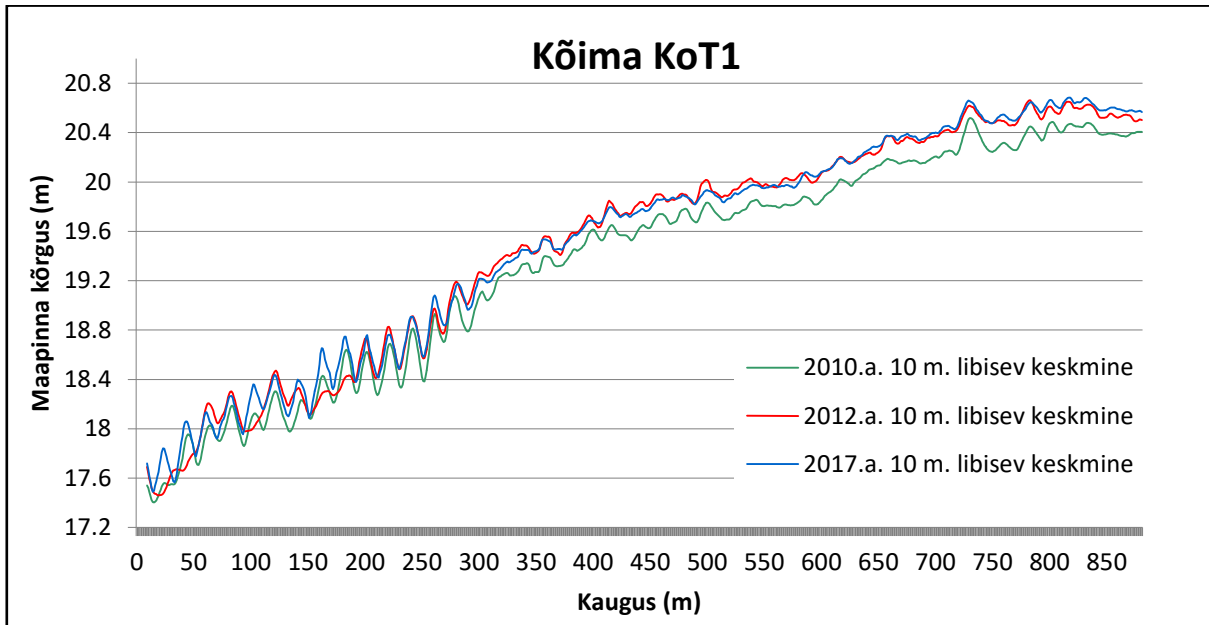
**Lisa 7.** Kildemaa transekt KiT2 2010., 2014. ja 2017. aasta 10 m libisev keskmine



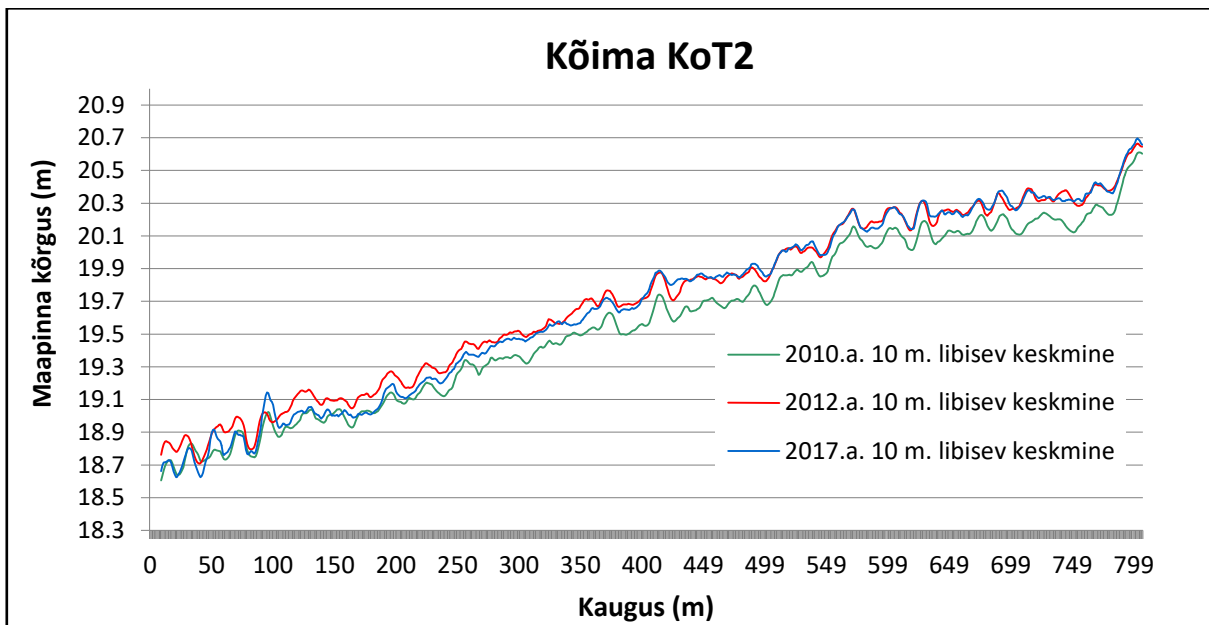
**Lisa 8.** Kildemaa transekt KiT3 2010., 2014. ja 2017. aasta 10 m libisev keskmine



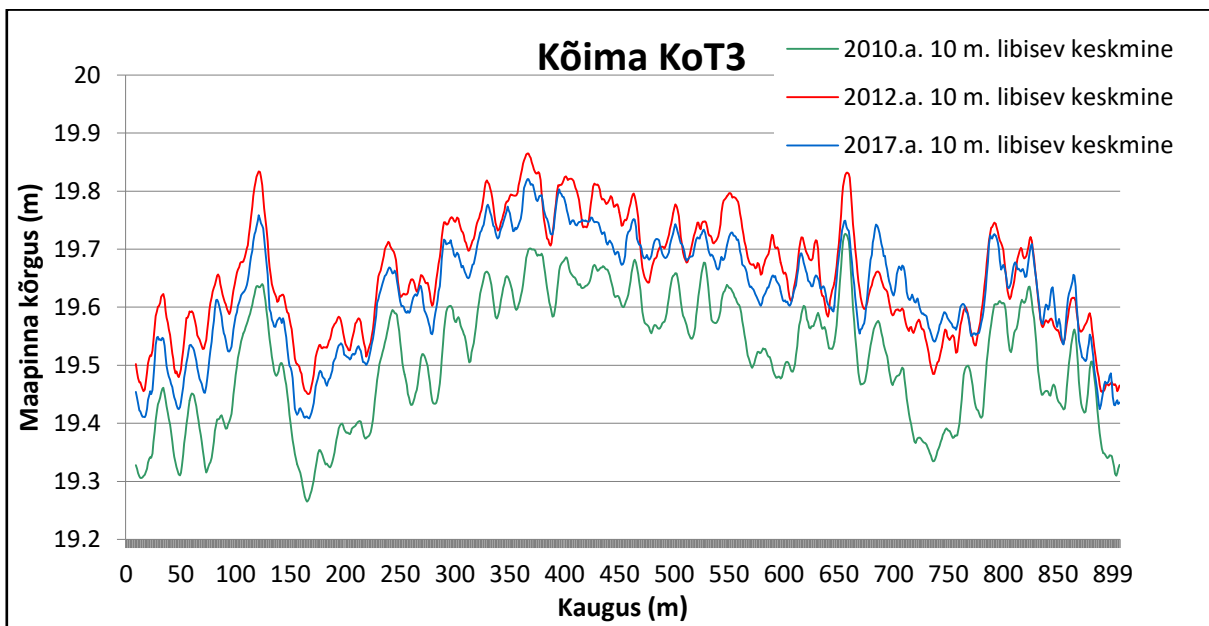
**Lisa 9.** Kõima transekt KoT1 2010., 2012. ja 2017. aasta 10 m libisev keskmine



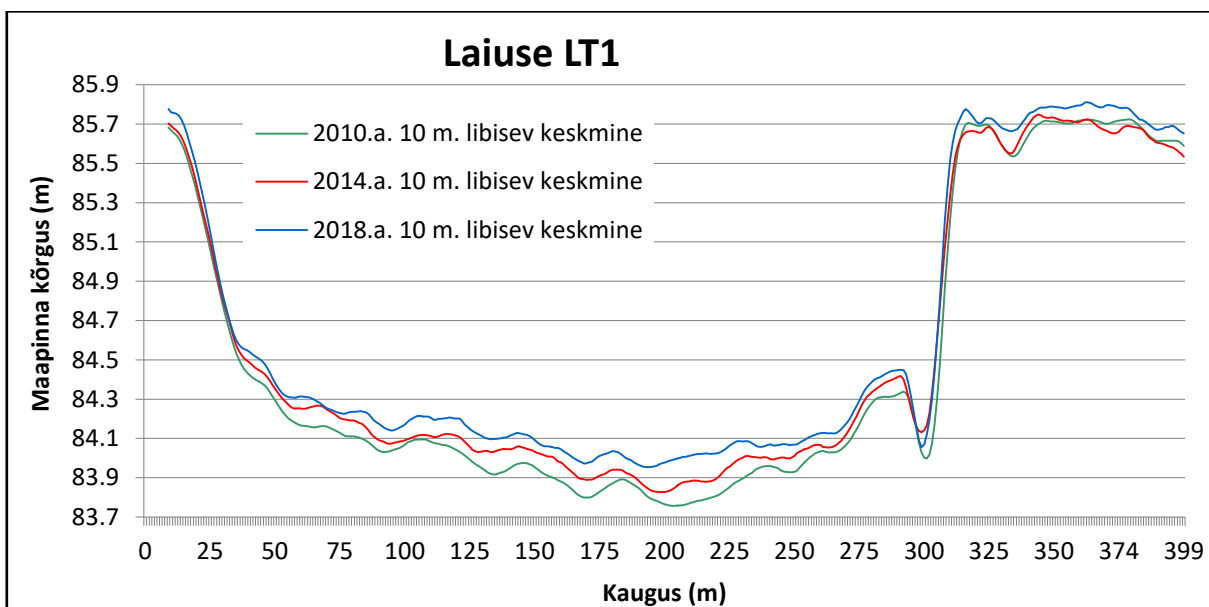
**Lisa 10.** Kõima transekt KoT2 2010., 2012. ja 2017. aasta 10 m libisev keskmine



**Lisa 11.** Kõima transekt KoT3 2010., 2012. ja 2017. aasta 10 m libisev keskmine

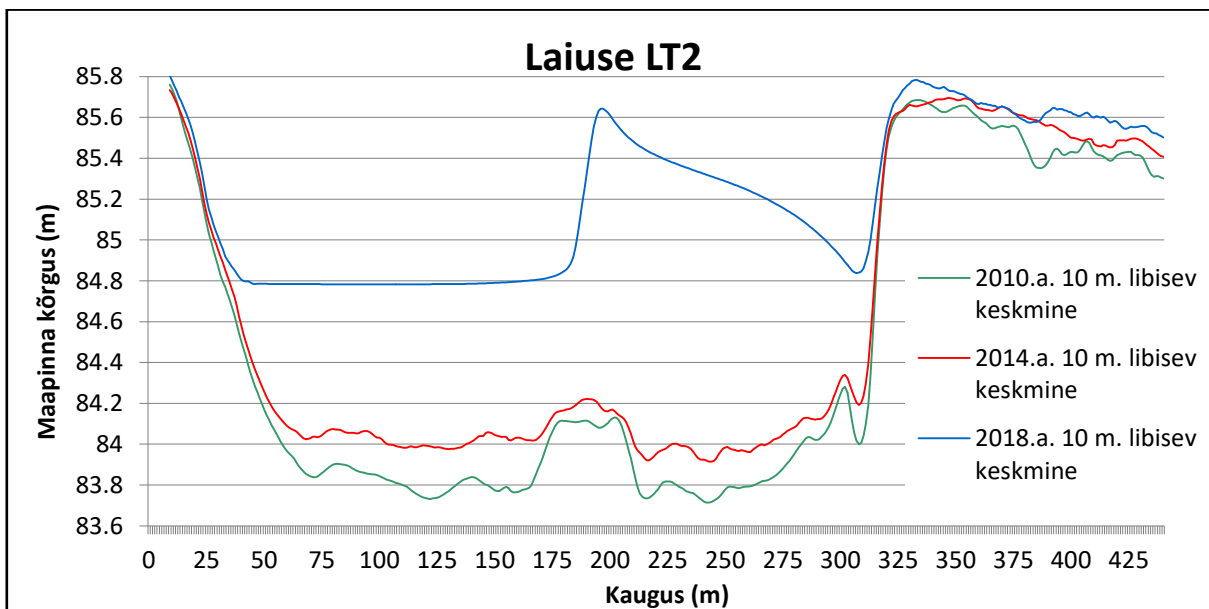


**Lisa 12.** Laiuse transekt LT1 2010., 2014. ja 2018. aasta 10 m libisev keskmine

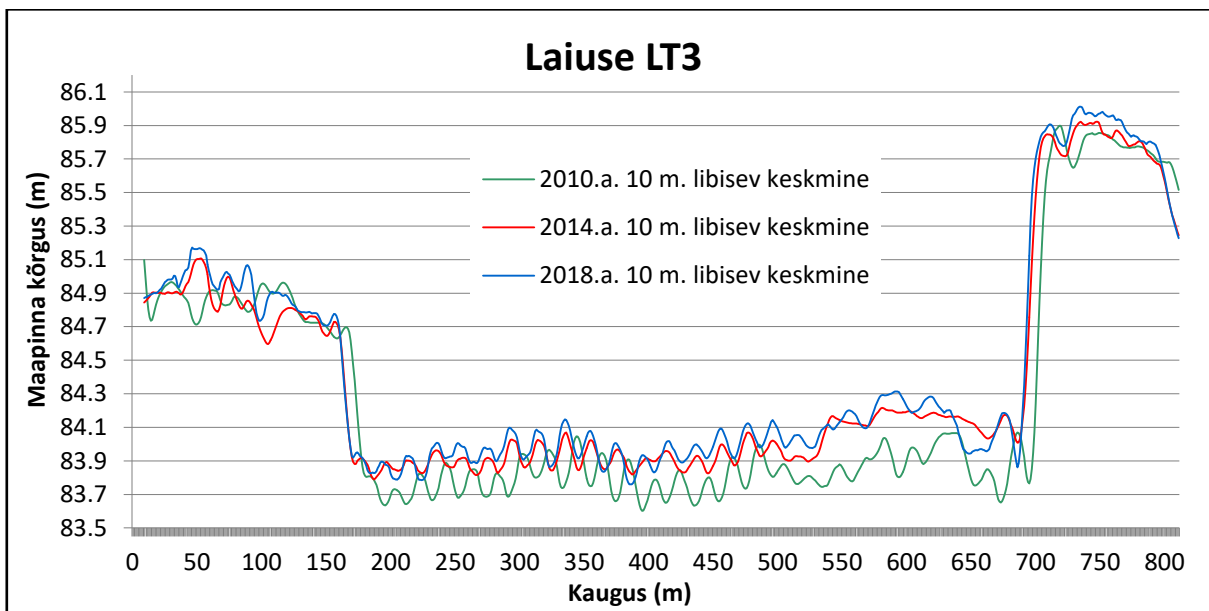




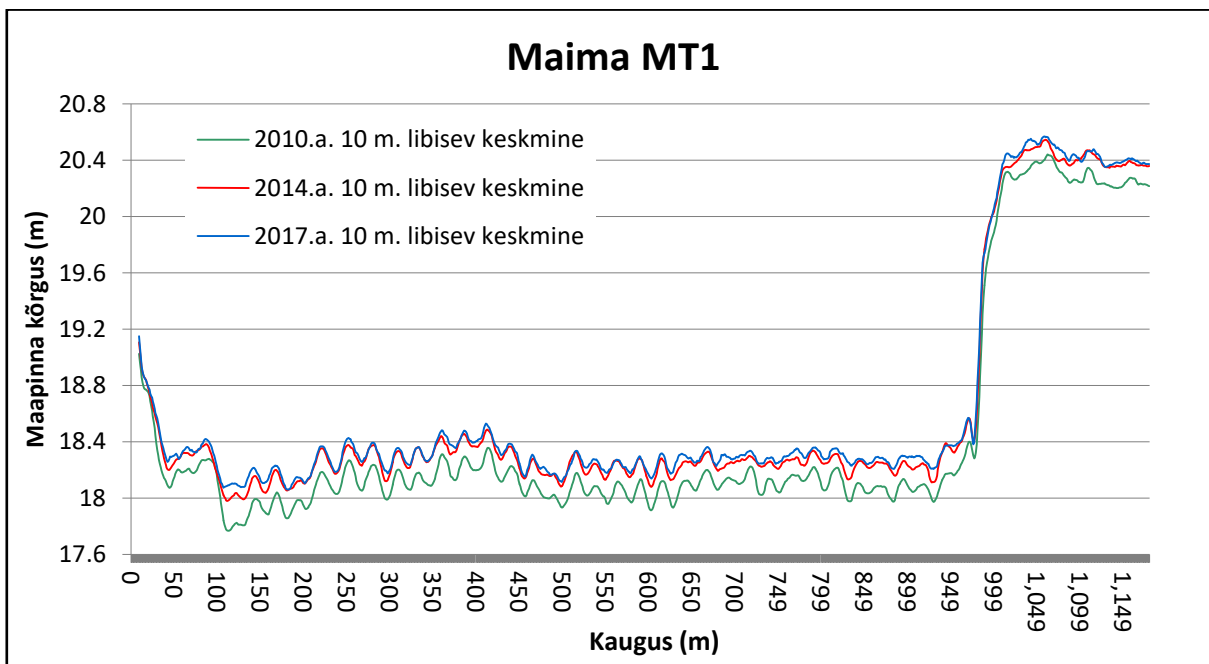
**Lisa 13.** Laiuse transekt LT2 2010., 2014. ja 2018. aasta 10 m libisev keskmine



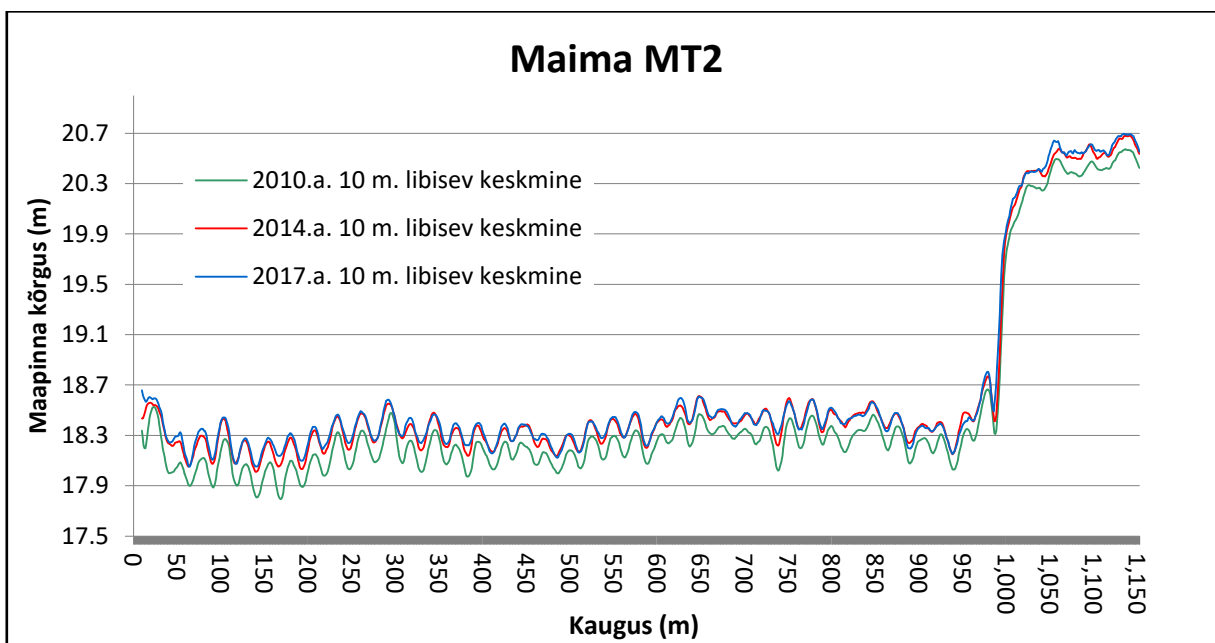
**Lisa 14.** Laiuse transekt LT3 2010., 2014. ja 2018. aasta 10 m libisev keskmine



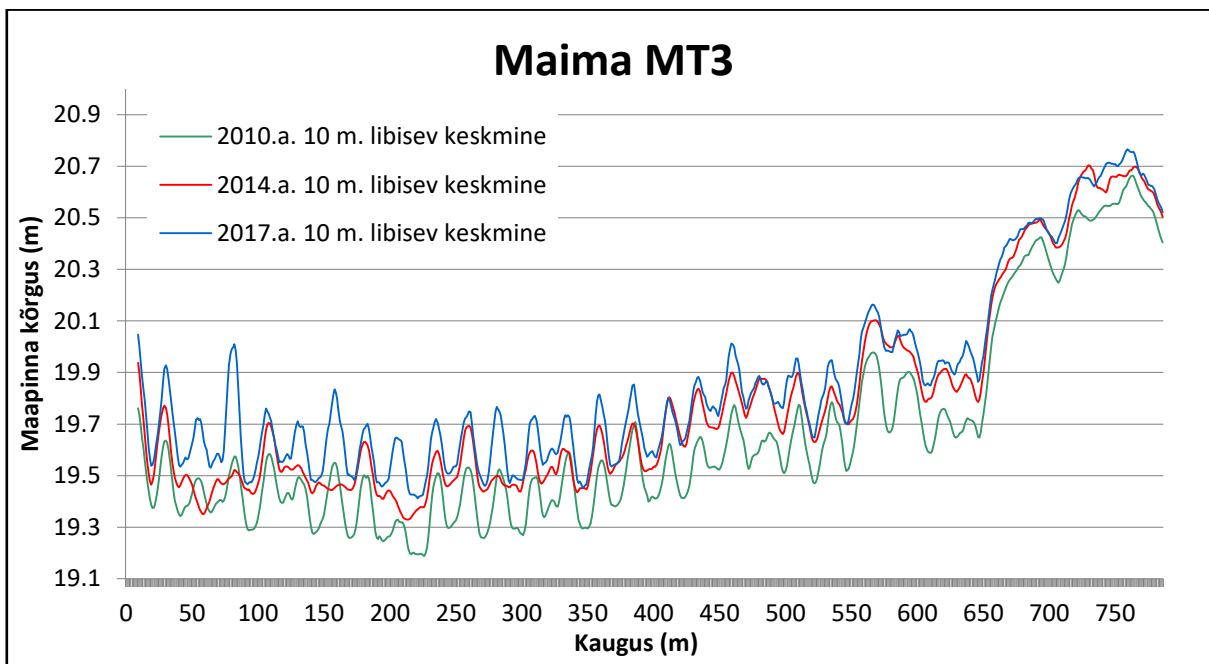
**Lisa 15.** Maima transekt MT1 2010., 2014. ja 2017. aasta 10 m libisev keskmine



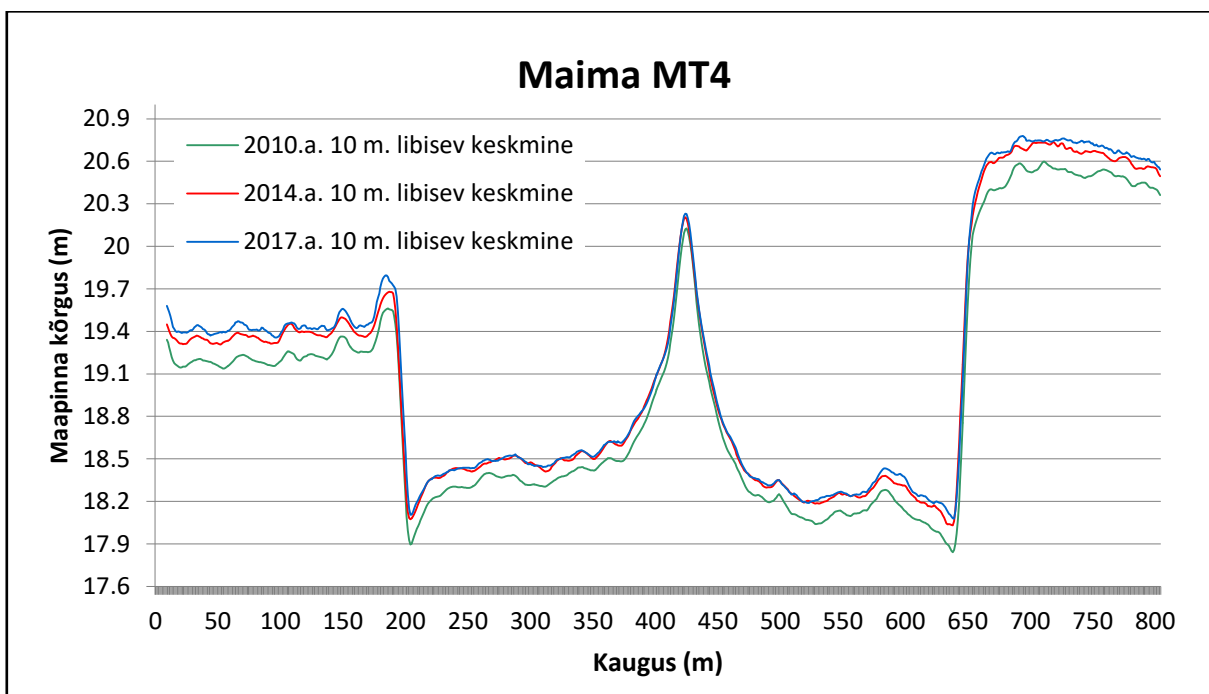
**Lisa 16.** Maima transekt MT2 2010., 2014. ja 2017. aasta 10 m libisev keskmine



**Lisa 17.** Maima transekt MT3 2010., 2014. ja 2017. aasta 10 m libisev keskmine



**Lisa 18.** Maima transekt MT4 2010., 2014. ja 2017. aasta 10 m libisev keskmine



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

Mina, Ott Toomsalu,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Jääksoode toimuvate muutuste analüüsimine LiDAR andmetel“, mille juhendajateks on Ain Kull ja Raivo Aunap.
  - 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 õigus jäävad alles ka autorile.
3. kinnitan, et lihtlitsenti andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomadi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Tartus, 27.05.2019