

Tartu Ülikool  
Loodus- ja täppisteaduste valdkond  
Ökoloogia ja Maateaduste instituut  
Geograafia osakond

Magistritöö geoinformaatikas ja kartograafias (30 EAP)

**Lumikatte paksuse kaardistamine ja lume omaduste mõju  
UAV-LiDAR mõõdistustäpsusele mitmekesisel maastikul**

Tii-Linda Purge

Juhendajad: PhD Raivo Aunap  
PhD Marko Kohv

Tartu 2024

## **Annotatsioon**

### **Lumikatte paksuse kaardistamine ja lume omaduste mõju UAV-LiDAR mõõdistustäpsusele mitmekesisel maastikul**

Lume moodustavad jääkristallidest ja nende kogumitest koosnevad tahked sademed, mis olulise hajumise komponendi poolest erinevad taimestiku ja maapinna peegeldusnäitajatest. Seetõttu on täppismõõtmise puhul vaja teada, missuguseid hälbeid lumikate põhjustab. Käesoleva magistritöö eesmärk on hinnata UAV-LiDAR-i täpsust lumikatte paksuse mõõdistamisel mitmekesise reljeefi- ja taimkattega maastikul, seejuures arvestades lume omadustega. Koht- ja LiDAR mõõdistuse vahelistele nihete võrdlemiseks kasutati ruutkeskmise vea hinnangut ning hajuvusdiagramme, lumeolude mõju hinnati korrelatsioonanalüüsiga. Töös tulemusel selgus, et UAV-LiDAR suudab määrata lumikatte pinna oluliste kadudeta. Mõõdistusvead ei korreleerunud lumikatte omadustega, ent statistiliselt oluline negatiivne korrelatsioon ilmnis vigade ja lumikatte paksuse vahel.

**Märksõnad:** Lumikatte paksus, lume omadused, UAV-LiDAR, punktipilv

**CERCS kood:** T181 Kaugseire

## **Abstract**

### **Mapping snow cover depth and the effect of snow properties on UAV-LiDAR survey accuracy in diverse terrain**

Snow is formed by solid precipitation consisting of ice crystals and their aggregates. Snow reflectance in remote sensing differs from vegetation and ground in terms of a significant volume scattering component. Therefore, in the case of precise measurement, it is necessary to know what kind of deviations are caused by the snow cover. The aim of this master's thesis was to evaluate the accuracy of UAV-LiDAR in measuring the thickness of the snow cover in a landscape with diverse relief and vegetation, taking snow characteristics into account. The RMSE value and boxplot diagrams were used to evaluate the offsets between *in-situ* and LiDAR measurements. Effect of snow properties was evaluated with correlation analysis. The work revealed that UAV-LiDAR can determine the surface of the snow cover without significant losses. Measurement errors did not correlate with snow cover properties, but a statistically significant correlation was found between errors and snow cover thickness.

**Keywords:** Snow depth, snow properties, UAV-LiDAR, pointcloud

**CERCS code:** T181 Remote sensing

# Sisukord

<b>Sissejuhatus</b>	<b>5</b>
<b>1. Teoreetiline ülevaade ja varasem uuritus</b>	<b>7</b>
1.1. Lumikatte mõõtmine	7
1.1.1. Lume mõõtmise tähtsus	7
1.1.2. Lumikatte omadused ja mõõtmise meetodid	8
1.1.3. LiDAR tehnoloogial baseeruvad varasemad uuringud	11
1.2. LiDAR tehnoloogia ja aerolaserskaneerimise	14
1.2.1. Aerolaserskaneerimine	14
1.2.2. Aerolaserskaneerimise parameetrid	15
1.2.3. Aerolaserskaneerimise andmeid iseloomustavad vead	16
<b>2. Andmed ja metoodika</b>	<b>19</b>
2.1. Uurimisala	19
2.2. Välitööde metoodika	19
2.2.1. Kasutatud aparatuur	21
2.2.2. Välitööd	22
2.3. Andmetöötluse metoodika	23
2.3.1. Lumekarakteristikud	23
2.3.2. Pinnamudelite modelleerimine ja statistiline analüüs	24
2.4. Töödeldud punktipilved	27
<b>3. Tulemused ja arutelu</b>	<b>29</b>
3.1. Punktipilvede kolmemõõtmeline asukohatäpsus	29
3.1.1. Markerid	29
3.1.2. Asukoht stabiilsete kontrollpunktide järgi	29
3.2. Kohtmõõtmistest saadud lumeandmed	30
3.2.1. Lumepaksus	31
3.2.2. Lumekarakteristikud	33
3.3. Lume paksuse erinevused	35
3.3.1. Kõrguste erinevus	35
3.3.2. Seosed lumekarakteristikutega	37
3.3.3. Seosed maakattega	38
3.3.4. Seosed reljefiga	40
3.3.5. Maakatte ja reljefi koosmõju	40
3.4. Anomaaliad	41
<b>Kokkuvõte</b>	<b>46</b>
<b>Summary</b>	<b>47</b>

<b>Tänuavaldused</b>	<b>49</b>
<b>Kasutatud kirjanduse loetelu</b>	<b>50</b>
<b>Lisad</b>	<b>56</b>
Lisa 1. Markerid M1–M4	56
Lisa 2. YellowScan Surveyor Ultra tehnilised karakteristikud	57
Lisa 3. Enterprise DJI Matrice 300 RTK	58
Lisa 4. Trimble R12	59
Lisa 5. Lumekarakteristikud 20240111	60
Lisa 6. Lumekarakteristikud 20240222	63
Lisa 7. Tartu kliimadiagramm	65

## Sissejuhatus

Lumeks nimetatakse jääkristallidest või nende kogumitest koosnevaid tahkeid sademeid, mis tekivad jääkristallidest ja allajahtunud veepiiskadest koosnevates pilvedes. Kui temperatuur madalamates õhukihtides on alla külmumispunkti, siis jõuab lumi maapinnani tahkel kujul ning akumulcerudes moodustab lumikatte (Jaagus, Frey 2014b), mis kõrgematel kõrgustel ja laiuskraadidel on tavapärane fenomen.

Lumikatte ja selle omaduste ajalis-ruumiline kaardistamine on oluline nii teaduslikel kui praktilistel eesmärkidel. Näiteks on lumikatte geograafiline ulatus oluline kliimamuutuste indikaator, mõjutades aluspinna albeedot ja kiirgusbilanssi. Lumikatte varajane kadu soodustab päikesekiirguse neeldumist ning maapinna temperatuuri tõusu eriti varakevadisel perioodil, mil kiirgusvoog on suur (Tooming, Kadaja 1995). Samuti eeldatakse, et ulatuslik lumekadu jätkub kliimamuutuste tõttu pea kõigis kliimatingimustes (Thackeray *et al.* 2019). Muutused mõjutavad ka erinevaid ökosüsteeme (Jones 1999; Keller *et al.* 2005), aineringlust (Brooks, Williams 1999) ja vegetatsiooni (Morgner *et al.* 2010), kujundades ümber pikaajaseid elu- ja keskkonnatingimusi. Lisaks on lumi oluline veereservuaar, mille sulavesi tõstab seisu- ja vooluveekogude veetaset ning võib perioodiliselt muuta nende dünaamikat. Hüdroloogilise modelleerimise seisukohast on lumi keeruline nähtus, sest lumekihi omadused võivad ka väga väikesel territooriumil suuresti varieeruda. Lumemahtude täpsem mõõtmine aitab hinnata kevadise suurvee mahtude jaotumist, ennustada vee-eelarvet hüdroenergiajaamades ning pakkuda üldist teavet piirkondlike veereservide kohta. Eriti kriitiline on lume mõõtmine mägistes piirkondades, kus see on sisendiks lumelaviini ohtlike alade kaardistamiseks ning vastavate meetmete rakendamiseks (Birkeland *et al.* 2017; Prokop *et al.* 2008).

Ajalooliste lumeolude kohta leiame teavet eelkõige kroonikatest ja reisikirjadest, kuid sealsed kirjeldused on tihtipeale subjektiivsed, süsteemitud ning ei kata terviklike alasid. Eesti ilmajaamades on lumikatet süstemaatiliselt mõõdetud alates 1891. aastast (Tarand jt. 2013) ning tänapäeval toimub see automaatselt kahekümne seitsmes vaatlusjaamas üle Eesti (Keskkonnaagentuuri internetilehekülj 2024). Üleriigiline lumekaart on interpoleeritud, andes ülevaate üldistest piirkondlikest lumeolude erinevustest, ent soov muutuseid tuvastada suuremal ruumilisel skaalal, seejuures piisava täpsusega, on viinud otsima uusi tehnoloogiaid. Kvaliteetsed ja detailirohked lumekaardid, koos lume tiheduse andmetega, aitavad täpsemini modelleerida piirkondlike veeresursse ja hüdroloogilisi protsesse. Perspektiivika meetodina on end kaugseire valdkonnas tõestanud LiDAR (ingl k *Light detection and ranging*)

tehnoloogia (Deems *et al.* 2013; Harpold *et al.* 2014; Kirchner *et al.* 2014), mis paigaldatuna mehitamata õhusõidukile (ingl k *UAV, Unmanned aerial vehicle*), on paindlik ning võimeline tootma tihedaid punktipilvi mitmekesisel maastikul. UAV-LiDAR-i eelis mehitatud lennuvahendite ees on operatiivsus, kulutõhusus ja võimekus muutliku lumikatet kiiresti kaardistada. Meetodile pakuvad väljakutseid eelkõige keskkonna faktoritest tingitud piirangud, näiteks mitmekülgne ja tiheda taimkattega maastik, ilmastikuolud ning lume, kui tavapäratu mõõdistusobjekti, omadused. Lumikatte albeedo on kõrge ehk suur osa sellele langevast valgusest peegeldub. Ebaregulaarsete suurustega jääkristallid ja veepiisad hajutavad valgust mitmes suunas, kuid tõenäosuslik on peegelduse registreerimine ka sensoris. Ebatäpsete mõõtetulemusteni võib viia signaali registreerimine lumikatte sügavamast kihist ja lume kare pind, mis võib signaali tagasipeegeldust moonutada.

Magistritöö eesmärk on hinnata mehitamata õhusõidukile paigaldatud LiDAR-süsteemi perspektiivi ning täpsust lumikatte paksuse mõõdistamisel mitmekesise reljeefi- ja taimkattega maastikul. Soovitakse hinnata lumekarakteristikute võimaliku mõju mõõdistustäpsusele ning mõista ebatäpsusi põhjustavaid mehhanisme. Lisaks ei ole töö autorile teadaolevalt Eestis varasemalt tehtud katsetusi lumikatte paksuse mõõdistamiseks droon-LiDAR-iga.

Peamised uurimisküsimused:

1. Kui täpne on lumikatte paksuse mõõdistamine UAV-LiDAR-iga erinevate taimkatte kõrguse ehk vertikaalsete vaateväljade ja reljeefi tingimuste juures?
2. Milline on lume omaduste mõju mõõdistustäpsusele ehk kas lumepinna kõrguste määramisel esineb tootja poolt esitatud tehnilise täpsuse hinnangutest oluliselt erinevaid asjaolusid?

# 1. Teoreetiline ülevaade ja varasem uuritus

## 1.1. Lumikatte mõõtmine

### 1.1.1. Lume mõõtmise tähtsus

Lumikate katab kesktalvel ligikaudu 30–50% põhjapoolkerast (Lemke *et al.* 2007), muutes selle levinud fenomeniks suurematel laiuskraadidel. Hõlmates mitmeid funktsioone, nii lokaalsel kui globaalsel skaalal, avaldab lume eksistents mõju rekreatsiooni tegevustest kuni globaalse kliimasüsteemini. Euroopa ilmajaamades kogutakse andmeid lume füüsiliste omaduste kohta eelkõige klimatoloogilistel, meteoroloogilistel, hüdrooloogilistel ja veemajanduslikel eesmärkidel (Pirazzini *et al.* 2018). Usaldusväärsete andmete kogumine ja säilitamine on kriitiline valdkondades, kus lumikatte ulatus ja omadused võivad mõjutada inimesi, keskkonda ja majandust.

Lumikatet ja selle geograafilist ulatust peetakse ülimalt tundlikuks kliimamuutustele, mistõttu on lume kaardistamine muutunud kriitiliseks mitmetes piirkondades üle maailma. Detailine ülevaade lumeoludest aitab asjakohastada kliimamudeleid ja mõista lume rolli maakera kiirgusbilansis, eriti globaalse soojenemise tingimustes. (Zhao, Fernandes 2009) Lumel on oluline roll maakera albeedos ehk maapinnalt peegeldunud ja sellele langenud kiirgusenergia suhtes (Jaagus, Frey 2014a). Enamike taimekoosluste peegeldumisnäitajad varieeruvad vahemikus 0,1–0,2, kuid värskelt sadanud puhta lume korral võib see küündida kuni 0,9-ni (Kaasik 2011). Kliima soojenemine ja lumikatte vähenemine, millelt valguskiirgus tagasi peegelduks, vähendab maapinna albeedot ja tõstab pinnatemperatuuri, mis omakorda viib lumikatte kiirema sulamiseni varakevadelisel perioodil (Tooming, Kadaja 1995). Üksteist võimendavate protsesside kaardistamine on oluline eeskätt kliimadünaamika mõistmiseks.

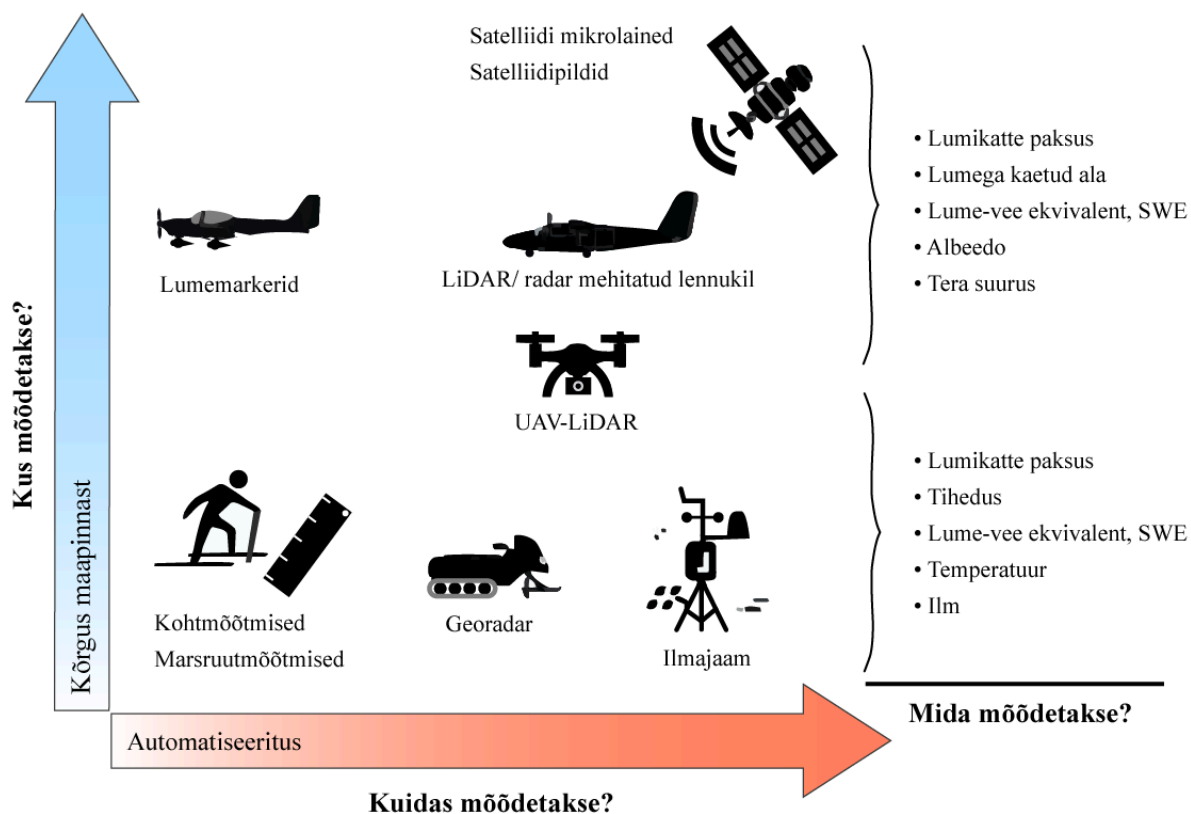
Vee kättesaadavus jõgedes, järvedes ja maapinnal on peamiselt seotud sademete hulgaga. Külmas või hooajaliselt külmas kliimas sajab talveperioodil enamik sademeid tahkel kujul ning akumulereub lumikattes. Püsiv lumikate vähendab äravoolu ning põhjaveekihtide uuenemist. Öhu- ja maapinna temperatuuri tõusmisel lume veesisaldus suureneb, see sulab ning lumme akumulereunud vesi liitub suhteliselt lühikese aja jooksul hüdrooloogilise tsükliga, toites seis- ja vooluveekogusid ning suurendades äravoolu kevadel ja varasuvel. Lumikatte sulamist initseerivad peaaesjalikult meteoroloogilised tingimused ning maapinna ja -katte füüsilised omadused, näiteks nõlva suund, taimkate tihedus jms (Fayad *et al.* 2017). Hüdrooloogilise seire ja modelleerimise seisukohast on lumikate keeruline nähtus, sest selle omadused võivad ka väikesel territooriumil ja lühikese aja jooksul suuresti varieeruda.

Lisaks on lumikate ja selle erinevad omadused sisendiks mitmetele teaduslike valdkondade, näiteks aineringluse, vegetatsiooni ja ökoloogilistele, uuringutele. Brooks and William (1999) on leidnud, et lumikate mõjutab lämmastikuringlust hooajaliselt lumega kaetud valgalades. Morgner *et al.* (2010) uurisid lumikatte paksuse mõju Teravmägede taimestikutüüpidele ning märkisid lume paksuse, kõrgema pinna temperatuuri ja ökosüsteemi hingamise vahel olulist positiivset seost, tuues välja lumikatte kui maapinna isoleerija. Ökoloogilised ja biogeograafilised uurimused, mis keskenduvad erinevatele taksonoomilistele kategooriatele, hindavad keskkonnagradiendide mõju isendite ruumilisele jaotumisele. Hein *et al.* (2014) uurisid ämblikuliste levikut alpi tundra kliimat esindavates maastikutes, seejuures hinnates ökoloogilistes nišside mõju, liikide ruumilisi tunnuseid ja elupaikade eelistusi tingimustes, kus lumikate varieeruvus on suur.

Lumikatet käsitlevad teadustööd on Eestis ja teistes Balti riikides (Rimkus *et al.* 2018; Viru 2020) uurinud lumikatte kestust, maksimaalset lume paksust ning nende seost õhutemperatuuri, sademete ja geograafiliste teguritega. Pikaajaliste ja detailsete meteoroloogiajaamade ilma andmete põhjal on leitud, et lumikatte paksusele avaldab enim mõju õhutemperatuur. Lisaks on uurimisperioodil (1961–2015) täheldatud lumikattega päevade arvu üldist vähenemist.

### **1.1.2. Lumikatte omadused ja mõõtmise meetodid**

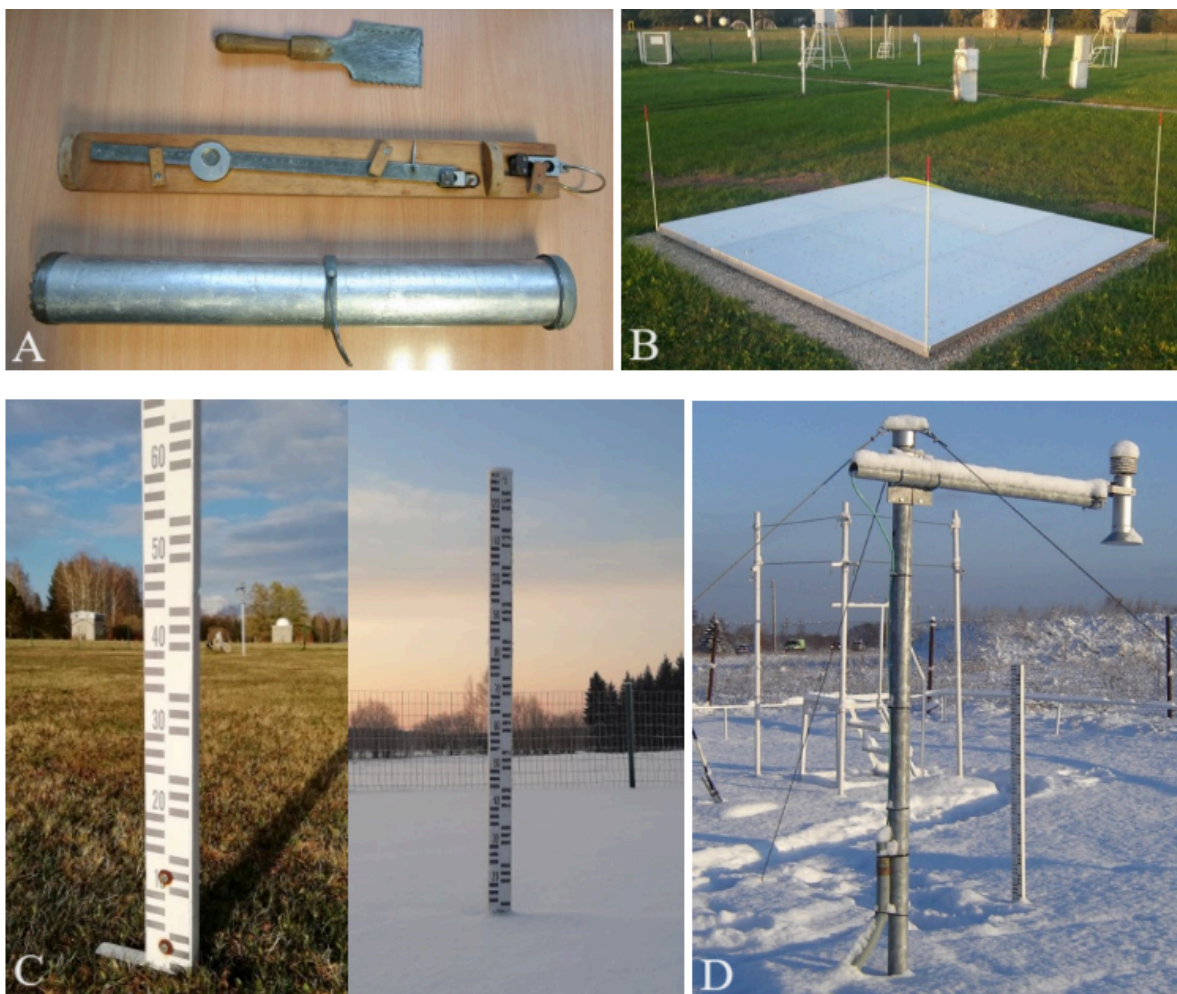
Ajalooliste lumeolude kohta leiame teavet kroonikatest ja reisikirjadest, kus neid kirjeldati ennekõike seoses ekstreemumite, kaubanduse ja transpordi, maatööde ning sõjakäikudega. Kirjeldustel puudus ühtne süsteem ja ajalis-ruumiline katvus. Vajadus ilma andmeid adekvaatselt koguda ja säilitada viis Eesti ilmajaamad 1891. aastal süstemaatilise lumikatte mõõtmiseni (Tarand jt. 2013) ning tänapäeval on see osa meteoroloogilise seire programmist, mida teostab Keskkonnaagentuur. Lumikatte paksuse ja omaduste mõõtmiseks on erinevaid praktilisi võtteid. Käesolevas peatükis keskendutakse neljale, ka Euroopa ilmajaamades kõige sagedamini mõõdetavatele lume omadustele (Pirazzini *et al.* 2018), milleks on lumikatte paksus, lumega kaetuse aste, lume-vee ekvivalent ja tihedus. Vastavad mõõtetehnikad võib jagada kaheks – manuaalsed ja automaatsed kohtmõõtmised (*in situ*) ning kaugseire võimalused (joonis 1).



**Joonis 1.** Lume mõõtmise meetodid ja platvormid. (U.S. Department of the Interior 2021) SWE - Snow water equivalent (Eestindatud autori poolt)

Läbi ajaloo on Eestis praktiseeritud erinevaid mõõtemetodeid- ja vahendeid (joonis 2), millest saab kokkuvõtliku ülevaate Eesti meteoroloogia aastaraamatust (2021) (Keskkonnaagentuur 2022). Traditsiooniliselt on lumikatte paksust mõõdetud meteoroloogilistel vaatlusväljakutel ja marsruutmõõtmistel ühe sentimeetri täpsusega. Vaatlusväljakutel arvutatakse lume paksus kolme, võrdhaarse kolmnurga tippudes paikneva, lumelati keskmisena (joonis 2 pilt C). Seejuures on latid statsionaarsed ning paigutatud enne püsiva lumikatte kujunemist, lattide kaugus üksteisest peab olema vähemalt 10 meetrit. Marsruutvaatlustel mõõdetakse lume paksust kaasaskantava lumelatiga, kusjuures marsruut valitakse enne talve saabumist nii, et see iseloomustaks ümbritsevat maastikut kõige paremini. Sõltuvalt maastiku avatusest sooritatakse mõõtmisi kindlaksmääratud vahemaa tagant ning mõõtmistulemuste põhjal arvutatakse keskmine lumikatte paksus. Nähtava ümbruse lumega kaetust hindab vaatleja visuaalselt 10-palli skaalal (Keskkonnaagentuur 2019), kusjuures 10 palli märgitakse kui kogu nähtav ümbrus on lumega kaetud, 5 palli kui kaetud ligikaudu 50% ning 0 punkti kui lumi moodustab tühise osa kogu vaateväljast (Tammets 2012). Lume veevaru iseloomustab veekihi paksust millimeetrites, mis tekiks vett mitteläbilaskvale horisontaalsele pinnale kui lumesammas selle kohal täielikult sulaks.

Arvutuslikult on tegemist lume vertikaalkihi paksuse ja tiheduse korrutisega. Lume tihedust mõõdetakse lumekaaluga, mis koosneb silindrilisest mahutist ja kaalust (joonis 2 pilt A). Tihedus arvutatakse lume vertikaalsamba massi suhena ruumalasse. Tänapäeval on Eesti ilmajaamades kasutusele võetud automatiseeritud lahendused eelkõige lume paksuse ja veesisalduse mõõtmiseks. Lumikatte paksuse mõõtmiseks kasutatakse ultraheliandurit USH-9 (Sommer Messtechnik, Austria, Koblach) (joonis 2 pilt D). Sensor genereerib ultraheli impulsi, suunab selle aluspinna poole ning mõõdab aega, mille jooksul signaal lumepinnalt tagasi peegeldub. Anduri mõõtetäpsus on üks sentimeeter. Alates 2018. aastast on üksteist püsिमõõtejaama varustatud lumekaaluga SSG-2 (Sommer Messtechnik, Austria, Koblach) (joonis 2 pilt B), mis arvutab lumeveevaru. Kaal koosneb seitsmest 80 x 120 cm suurusest alumiiniumplaadist, lumikatte massi ja veevaru kaalumine toimub keskmisel plaadil, ülejäänud plaadid on stabiliseeriva otstarbega. Kombineerides andmeid lumikatte paksuse andmetega saavutatakse veevaru mõõtetäpsuseks 0,1 mm.



**Joonis 2.** Ülemises reas lume kaalumise vahendid - (A) traditsiooniline lumekaal ja (B) automatne lumekaal SSG-2. Alumises reas lumikatte paksuse mõõtmise vahendid - (C) statsionaarne lumelatt ja (D) ultraheliandur USH-9. (Keskkonnaagentuur 2022)

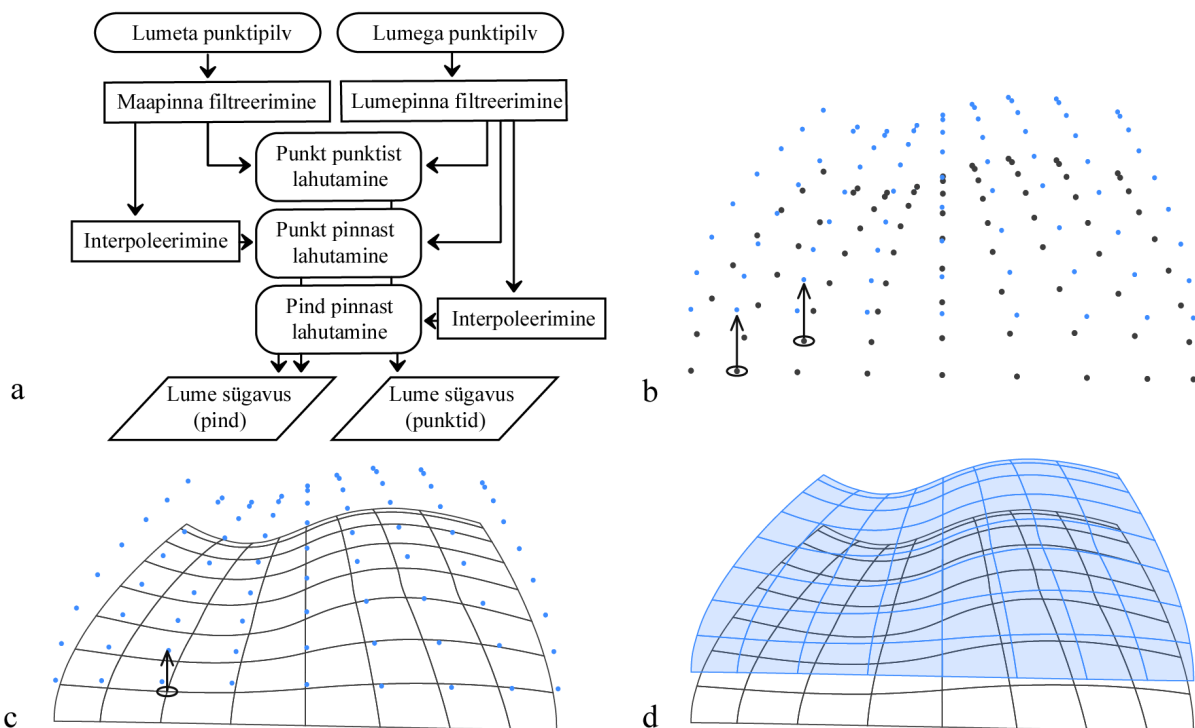
Kaugseire, satelliidid ja neile paigaldatud sensorid, on pakkunud võimalusi lumikatte kaardistamiseks alates 1960-ndatest aastatest, võimaldades katta suuri ja raskesti ligipääsetavaid alasid ning pakkudes suurt ruumilist katvust (Dietz *et al.* 2011). Satelliitseire suurimaks puudujäägiks on madal eraldusvõime, mis ei ole võimeline tabama kohalikke lume mustreid ning seetõttu välistab kasutatavuse väga väikeste uurimisalade korral. Eberhard *et al.* (2021) on leidnud, et kõrge eraldusvõimega satelliitpiltide põhjal loodud lume sügavuskaartide ruutkeskmise viga (RMSE, ingl k *Root mean square error*) jääb vahemikku 0,5–1,0 meetrit. Lumemahu ja veesisalduse otsesest kaardistamist võimaldavad vaid sensorid, mille lainepikkused jäävad mikrolaine sagedusvahemikku (0,001–1 m) ehk impulss on võimeline lumesambast läbi tungima ning peegelduse registreerima nii lume- kui aluspinnalt (König *et al.* 2001). Üheks võimaluseks on tehisavaradar ehk SAR (ingl k *Synthetic aperture radar*), mille näol on tegemist aktiivse kaugseire instrumendiga. Sensori antenn genereerib raadiolainete vahemikus impulse, suunates need seiratava objekti poole. Tagasipeegeldus registreeritakse ning hilisemas andmetöötles, kasutades interferomeetrilisi meetodeid, tagasihajumise mõõtetulemusi ja faaside erinevusi, on võimalik hinnata lume paksust ja massi, ning seeläbi ka veesisaldust. (Ma *et al.* 2020; U.S. Department of the Interior 2021) Enamik satelliitseire lahendusi suudavad lume ruumilist varieeruvust hinnata kuni ruutkilomeetrise eraldusvõimega, kuid kõrgusandmete integreerimine ja konvolutsiooniliste närvivõrkude kasutamine andmetöötles võimaldavad kuni 10 meetrist eraldusvõimet (Daudt *et al.* 2023). Juhul kui sensori tööpiirkond on spektri nähtavas piirkonnas, on mahtude hindamiseks vaja täiendavat lisateavet, sest peegeldus registreeritakse vaid lumepinnalt (König *et al.* 2001). Pinnamudelite koostamiseks on võimalik kasutada mitmeid fotogramm-meetrilisi võtteid (Eberhard *et al.* 2021; Eker *et al.* 2019) ja aerolaserskaneerimist (Jacobs *et al.* 2021).

### **1.1.3. LiDAR tehnoloogial baseeruvad varasemad uuringud**

Mitmed uuringud leiavad (Harder *et al.* 2016; Harpold *et al.* 2014; Jacobs *et al.* 2021; Deems *et al.* 2013; Kirchner *et al.* 2014), et aerolaserskaneerimisel (lüh. ALS) kui kaugseire meetodil on märkimisväärne potentsiaal lume kaardistamiseks nii mehitatud kui ka mehitamata õhusõidukitelt. LiDAR sensori paigaldamine mehitamata õhusõidukile võimaldab operatiivselt, paindlikult, võrdlemisi kulutõhusalt ja järjepidevalt kaardistada lume ulatuse ja paksuse ajalist ja ruumilist varieeruvust väikesel maa-alal. Pakkudes seega olulist

sisendit nii hüdrograafilistele, klimatoloogilistele kui ka ökoloogilistele uuringutele. (Jacobs *et al.* 2021)

Deems *et al.* (2013), olles spetsialiseerunud LiDAR-iga lume mõõdistamisele, on koostanud üksikasjaliku ülevaateartikli, mis keskendub mõõdistustehnikatele, süsteemi parameetritele, võimalikele vea-allikatele ning soovituste jagamisele tehnoloogia edukaks rakendamiseks. Autorid toovad välja laialt levinud meetodika, milleks on maapinna kõrgusmudeli lahutamine lumeperioodil kogutuid kõrgusmudelist (Deems *et al.* 2006; Hopkins *et al.* 2004). See on analoog maapinna kõrgusmuutuste tuvastamisele. Töövoogu toetavad spetsiaalsed tarkvarad, näiteks CloudCompare, mis võimaldavad andmeanalüüsi nii punkti- kui ka pinnapõhiselt. Tööluse esimeses faasis punktipilved klassifitseeritakse, säilitatamaks vaid maa- või lumepinnalt peegeldunud punktid, teises faasis ülelennud georefereeritakse referentspunktide, hoonete katuste või muu selgesti eristuva abil ning viimasena toimub punktipilvede või nendest interpoleeritud pindade omavaheline lahutamine (joonis 3).



**Joonis 3.** (a) Lume paksuse arvutamise töövood, (b) Punktist punkti lahutamine: maapinna kõrgusväärtuste lahutamine lähimatest lume kõrgusväärtustest, (c) Punkti lahutamine pinnast: maapinna kõrgusväärtused lahutatakse lume kõrguspunkti väärtusest, (d) Pinnast pinna lahutamine: maapinna kõrgusväärtused lahutatakse lumepinna kõrgusväärtustest. (Deems *et al.* 2013) (Eestindatud autori poolt)

Deems *et al.* (2013), leiavad, et lume mõõdistamisega seonduv problemaatika on eelkõige seotud impulsi ja pinna vahelises vastastikus mõjus, mis nõuab tavapärase kaugseire

objektiga võrreldes erinevaid kaalutlusi. Valguskiirguse läbilaskevõime mõõtmine lume pinnalähedases kihis, eriti lume kaugseires kasutataval lainepikkustel, on äärmiselt keeruline ning seetõttu on konkreetsetes valdkonnas teadmised piiratud ja avaldatud kirjandust vähe. Lume peegelduvusnäitajad sõltuvad lainepikkuse varieeruvusest, veesisaldusest, tera suuruslikust jaotusest, valguse langemise nurgast ja lisandkomponentide sisaldusest. Näiteks lähiinfrapunases piirkonnas (700–3000 nm) neeldub valgus jääkristallides ning lume peegeldusvõime on tundlik lume fraktsiooni suurusele, kusjuures tundlikkus on suurem vahemikus 900–1300 nm (Aoki *et al.* 2000). Tüüpilised tera suurused on ~50 µm värskel ja pehme ning kuni 1000 µm vana, märja ja klasterlunud lume korral (Lubin, Massom 2006). Nähtava valguse piirkonnas (400–700 nm) peegeldub suur hulk valgusest tagasi, kuid sellega kaasneb impulsi tungimine lumekihti. Perovich (2007) mõõtis spektromeetriga päikesekiirguse spektraalset läbilaskvust parasvöötme lumikattel lainepikkustel 400 kuni 1000 nm nii tahkes faasis kui sulamise tingimustes. Üldiselt täheldas ta madalaid valguse läbimise tasemeid ning leidis, et kõigil lainepikkustel peegeldus enam kui 80% signaalist vähem kui 2 sentimeetri sügavuselt.

Aerolaserskaneerimise täpsuse hindamise meetodika eeldab kohapealseid lumikatte paksuse mõõtmisi ehk valideerimisandmestiku olemasolu. Vertikaalsete ebatäpsuste määratlemiseks on kasutatud veastatistikat, mis aitab tuvastada ja koos taustmaterjaliga mõista vigade tekkimise loogikat ja mehhanisme. Varasemad uuringud on peaaesjalikult fokuseerunud tiheda taimestikuta aladele või täheldanud märkimisväärseid vigu taimestiku olemasolul, kuid vähe tähelepanu on pööratud lumikatte omadustele mitmekesisel maastikul. Näiteks Koutantou *et al.* (2022) uurisid droon-LiDAR-iga lume jaotuse dünaamikat metsastel nõlvadel, kus punktipilvedest (120 p/m<sup>2</sup>) genereeriti meetrise eraldusvõimega maapinnakõrgusmudelid. Piksli väärtuseks määrati võrgusilma langenud punktide keskmine. Manuaalsete ja LiDAR-mõõtmiste vaheline vastavus kvantifitseeriti ruutkeskmise veana. Leiti, et uurimisalal keskmise nõlvakaldega 20° jääb RMSE vahemikku 5–10 cm ning järsemas piirkonnas, keskmine nõlvakalle 35°, 4–20 cm. Harder *et al.* (2020) saavutasid avatud preerias ja metsas RMSE vastavalt 10 ja 13–17 cm. Jacobs *et al.* (2021) uurisid tulemuste kokkulangevust põllul (364 p/m<sup>2</sup>) ja metsas (90 p/m<sup>2</sup>), koostades erineva eraldusvõimega maapinnakõrgusrastrid ning saavutades RMSE väärtused vastavalt 1,2 ja 10 cm. Lisaks märgiti usaldusintervallide märkimisväärset laienemist enam kui 20° nõlvade korral. Siiski on erinevate uurimuste täpsuslike tulemusi, lumeolusid ja valideerimismeetodeid omavahel keeruline vahetult võrrelda.

## 1.2. LiDAR tehnoloogia ja aerolaserskaneerimise

### 1.2.1. Aerolaserskaneerimine

Aerolaserskaneerimine on LiDAR tehnoloogial põhinev kaugseire meetod, mille käigus kogutakse informatsiooni mitte-kontaktse meetodiga ehk mõõteseade ei ole huvipakkuva objektiga vahetus füüsilises kontaktis. Üldiseks kaugseire eelduseks on fakt, et iga keha kiirgab elektromagnetkiirgust, mille intensiivsus suureneb ja lainepikkus väheneb keha temperatuuri kasvades. Aerolaserskaneerimine põhineb aja mõõtmisel, mis kulub laserimpulsil seiratava objektini jõudmiseks ning sellelt tagasi peegeldumiseks (Maa-ameti Geoportaal 2023). Teades keskkonna murdumisnäitajat ning valguse levimise kiirust on võimalik tuletada peegelduse ja vastuvõtja vaheline kaugus (valem 1).

$$d = \frac{ct}{2} \quad (1)$$

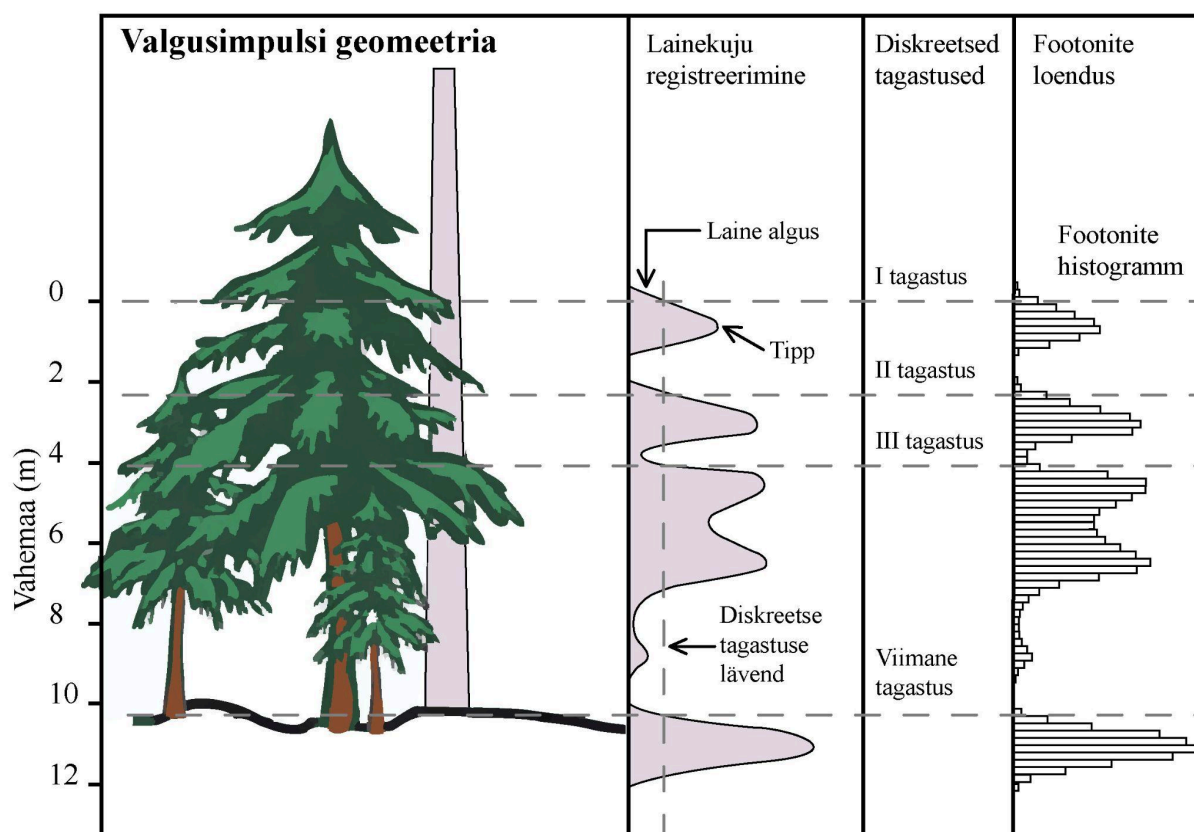
Vahemaa arvutamise valem Moussy (2020) järgi, kus  $c$  on valguse levimise kiirus (m/s) ning  $t$  (s) aeg, mis kulub objektilt tagasi peegeldumiseks.

Kuna andmehõive toimub liikuvalt platvormilt - droonilt, lennukist, satelliidilt - siis paralleelselt mõõdistustega fikseeritakse igal ajahetkel ka lasersüsteemi asukoht ruumis. Selleks peab süsteemi toetama POS (ingl k *Positioning and orientation system*) ehk positsioneerimise ja orienteerimise süsteem, mille komponentideks on GNSS (ingl k *Global navigation satellite system*) ja IMU (ingl k *Inertial measurement unit*). GNSS fikseerib sensori täpse asukoha x-, y- ja z-koordinaatides ning IMU kiirenduse ja nurkkiirenduse, et fikseerida seadme orientatsioon ja liikumine maapinna suhtes. Hilisem geokodeerimine ja andmete töötlus eeldab skaneerimise vahemike, IMU ja GNSS andmete sünkroniseerimist. Lisaks on oluline arvesse võtta ka mõningaid süstemaatilisi parameetreid (Wehr, Lohr 1999), mis tavaliseks mõõdetakse sensori installeerimisel lennuplatvormile, näiteks laserskanneri asend IMU ja GNSS andurite suhtes.

Aerolaserskaneerimise tulemuseks on kolmemõõtmeline punktide kogum ehk punktipilv, mis võimaldab hiljem, vastavates tarkvarades, objekte ja pindu rekonstrueerida ja analüüsida. Aerolaserskaneerimine, sealhulgas mõõdistustööde planeerimine ja hilisem andmetöötlus, on kompleksne protsess, mis mõjutab punktipilve kvaliteeti igas vaheetapis.

### 1.2.2. Aerolaserskaneerimise parameetrid

Laserimpulsi peegelduspinda maapinnal nimetatakse laseri jalajäljeks (ingl k *Footprint*) ning selle suurus sõltub vaatevälja nurgast ja laserkiire divergentsist konkreetsel lennukõrgusel. (Deems *et al.* 2013; Wehr, Lohr 1999) Harikumari (2019) järgi on jälje suurus mõõtmistäpsust mõjutav tegur, sest tagasipeegelduv signaal on jalajälje sees toimuvate peegelduste koguarvu keskmine. Peegelduspind maapinnal on tavaliselt üsna väike ning mitmekordne tagasipeegeldumine võimaldab tabada erinevaid vertikaalseid struktuure, näiteks puude üksikuid oksa ja metsa erinevaid rindeid (joonis 4).



**Joonis 4.** Laserimpulsi peegeldunud signaalid, kus peegeldused toimuvad erinevatelt pindadelt ning ühelt impulsilt registreeritakse mitu peegeldust. Koostatud Lefsky *et al.* (2002) järgi, täiendas Deems *et al.* (2013). (Eestindatud autori poolt)

Sensori kiirgamissagedus ehk PRF (ingl k *Pulse repetition frequency*) on peamine punktiheduse, ehk punktide arvu pindalaühiku kohta, määraja. Lisaks sõltub see sensori võimekusest mitmete peegelduste registreerimisel ning lennuplatvormi kiirusest maapinnal (Deems *et al.* 2013). Tihedam punkt pilv võimaldab suuremat detailitäpsust, paremaid objektide tuvastamise võimalusi ning suuremat paindlikkust andmete töötlemisel. Tihedama punkt pilve korral tuleb aga arvestada andmete suure mahu, ressursimahukate tööstusprotsesside ning rohke müraga.

Mõõdistustööde planeerimise etapis on oluline parameeter skaneerimise vaalu laius maapinnal (ingl k *Swath width*), mis sõltub vaateväljast (ingl k *FOV, field of view*) ja lennu kõrgusest. Vaalu suurendamine lennukõrguse tõstmise teel toimub laserimpulside vahekauguse suurenemise arvelt ning skaneerimisenurga laienemisel väheneb laserimpulsi läbitungimise tõenäosus tiheda taimkattega aladel. Sellest tulenevalt väheneb ka punktide täpsus skaneerimisvaalu äärealadel. (Deems *et al.* 2013) Kõrvuti paiknevad vaalud peavad kattuma, et tagada andmete parem kokkusobivus hilisema töötamise käigus. Soovitatav ülekate on vähemalt 20–30% (Latypov 2002). Laiemad skaneerimisribad on kulutõhusamad ja võimaldavad huvipakkuva territooriumi katta vähesemate ülelendudega, kuid andmetäpsuses kvaliteedile võib see keeruka reljeefi tingimustes negatiivset mõju avaldada.

Aerolaserskaneerimise käigus genereerib sensor tuhandeid kontrollitud energiaimpulsse sekundis ning suunab need korrapärase skaneerimismustrina maapinna poole. Impulsside suunamiseks kasutatakse mehhaaniliselt liikuvat peeglit. Sõltuvalt peegli kujust ning liikumise iseloomust võib skaneerimismuster olla nii paralleelne, siksakiline, elliptiline kui ka sinusoidne (Moussy 2021). Erinevaid mustreid iseloomustab punktide ebavõrdne jaotumine selle erinevates osades, näiteks võnkuva peegli korral akumulatsioonid punktid vaatevälja servaaladele laserkiirt suunava peegli aegustumise tõttu.

### **1.2.3. Aerolaserskaneerimise andmeid iseloomustavad vead**

Iga mõõdistustegevusega kaasnevad vead ning nende vältimiseks, minimeerimiseks ja võimalikult täpselt kirjeldamiseks on oluline mõista nende tekkemehhanisme. Ebatäpsuste tekkimise põhjuseid on mitmeid, näiteks sisemised, sõltudes sensori tehnilistest omadustest ning täpsusest, ja välised, sõltudes keskkonnast ning inimfaktorist andmete tootmise ja järeltöötamise käigus.

Richards ja Jia (2006) on koostanud ülevaate olulistest täpsuslikest vigadest, mis kohalduvad liikuvatele platvormidele, näiteks lennukile või droonile, paigaldatud sensoritele. Üheks selliseks on absoluutne kõrguslik täpsus, mille suurust mõjutavad nii ülemaailmse satelliitnavigatsioonisüsteemi asukoha määramise kvaliteet ja interpoleerimisviga, navigatsioonandmete järeltöötamise meetod kui ka registreeritavate punktide paiknemine lennuki suhtes. Vea mõju andmekvaliteedile suureneb lennukõrguse kasvades ja skaneerimisenurga suurenemisel (Baltsavias 1999). See tähendab, et impulsid levivad ka suure nurga all ning peegeldused registreeritakse objekti külgedelt. Kõige täpsem tulemus saavutatakse õhusõiduki nadiiris, mil impulsid tabavad seiratavat objekti näisnurga all.

Vigade minimeerimiseks arvutatakse lennuribade ülekatete omavahelised hälbed ning tasandatakse kas puhatalt tarkvaraliselt või siis maapealsete referentspunktide abil. Lisaks mõjutavad lennuplatvormi stabiilsust piloodi poolsed korrektuurid trajektooris ja turbulentsed õhuvoolud. Olulisteks orientatsiooni parameetriteks on rullimine (ingl k *roll*), kaldumine (ingl k *pitch*) ja lengerdus (ingl k *yaw*) ehk platvormi liikumine vastavalt enda piki-, põik- ja vertikaaltelje suhtes. Kõik muutused registreerib IMU ning hilisemas andmetöötluses liikumisest tingitud ebatäpsused eemaldatakse. Ajaline nihe sõltub sensori ja selle süsteemiosade täpsusest samaaegselt registreerida süsteemi positsioon, orientatsioon ja peegelduskaugus. Ebatäpsused suurenevad mõõtmiste intensiivsuse kasvades ning turbulentses lennutingimustes. Teadmatus mõõdistus nihke eksisteerimisest või ulatusest võib omakorda tekitada valetõlgendusi ja viia uute vigade tekkimiseni.

Höhle (2011) kirjeldab absoluutset plaanilist täpsust kui laserimpulsi divergentsist tulenevat hajumist konkreetsel lennukõrgusel ja skaneerimise nurga juures. Sellest tulenevalt võib laserkiir maapinnani jõudes endast kujutada mitmekümne sentimeetri suuruse läbimõõduga pinda. Näiteks võib 1000 meetri kõrguselt genereeritud laserimpulssi läbimõõt maapinnal olla ~20 sentimeentrit. Registreeritud peegelduse täpsus on kuni pool peegeldusjälje läbimõõdust, mis omakorda võib põhjustada kõrguslike ebatäpsusi järsematel nõlvadel ja keeruka reljefiga piirkondades.

Baltsavias (1999) peab täpsuslikest teguritest kõige keerulisemaks peegelduskaugust. See on mõjutatud süsteemiviivituste fikseerimise ja ajaintervalli loenduri täpsusest ning teistest piiravatest teguritest, näiteks visuaalne müra, signaali tugevus ja lävedetektori tundlikkus. Viga võimendub madala lennukõrguse ja väikese skaneerimisnurga juures ning seda mõjutavad oluliselt peegeldunud signaali amplituud ja vertikaalsed struktuursed objektid, näiteks mitmerindeline metsamaastik. Alustaimestiku tihedusega on seatud ka diskreetsusest tingitud vead, sest sensor registreerib mitu tagasipeegeldust ning erinevaid objekte ja pindasid tuvastav matemaatiline algoritm võib ekslikult alustaimestiku või osa sellest klassifitseerida maapinna osana. Vigade ennetamiseks on kriitiline lennuaja valik, näiteks maapinna mõõdistamiseks on sobilik lennata varakevadisel perioodil, mil taimestik ei ole veel tärganud või hilissügisel, mil taimestik on lamandunud.

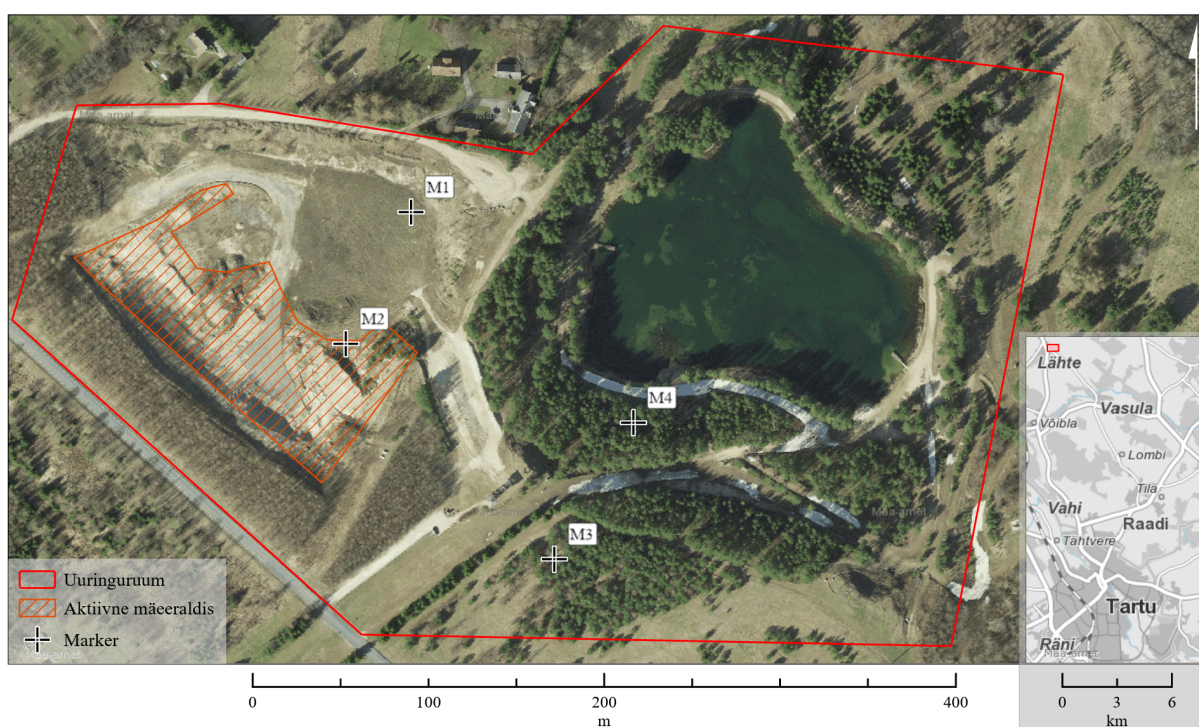
Klassifitseerimise käigus määratakse matemaatiliste algoritmide abil iga üksik punkt objektiklassi, mis esindab konkreetset objekti või pinda. Maapinda esindavate punktide tuvastamine on keeruline eelkõige, järskude nõlvade ja tiheda taimestikuga, geograafiliselt heterogeensetel maastikel, kus erinevad klassifitseerimise parameetrid võivad anda

kvalitatiivselt erinevaid tulemusi. Segmenteerimise kvaliteet mõjutab mudelite täpsust ning seeläbi analüüsi ja tulemuste tõlgendamist. Doneus *et al.* (2022) annavad ülevaade maapinna punktide filtreerimisele, millest saab interpoleerida kõrgusmudeli ehk DTM-i (ingl k *Digital terrain model*). Siinkohal on oluline teadvustada, et DTM on üks määramatust arvust maastiku kujutamise viisidest ning maastikul puudul „tõeline” ehk üheselt mõistetav pind. Seega peab segmenteerimise protsess olema otstarbekas ning lähtuma konkreetsest eesmärgist ja kasutaja vajadusest. Mitmed võrdlused on näidanud, et muutuvates topograafilistes ja vegetatsiooni tingimustes ei ole paljud algoritmid võimelised maapinna punkte kvaliteetselt eraldama (Štular *et al.* 2021). Lisaks keskkonnatingimustele on raskendavaks asjaoluks varieeruv punktihedus ning kuna heterogeensete keskkondade jaoks ei ole ühtset parameetrite komplekti, siis tuleb leppida kas kompromissiga või muuta eelkonfigureeritud töövoogu konkreetsele uurimisalale sobivamaks. Optimaalsete parameetrite leidmine nõuab tavaliselt katse-eksitus meetodit ning mitmete parameeterseeria testimist. Töövoo võib jagada neljaks – andmete ettevalmistamine ja ruumiline segmenteerimine, iga ruumilise segmendi jaoks filtri väljatöötamine, filtrite rakendamine segmentidele ning lõpliku maapinna mudeli vormistamine.

## 2. Andmed ja metoodika

### 2.1. Uurimisala

Käesoleva töö uurimisala paikneb Tartumaal Lähte alevikus Palalinna liivakarjääri endistel ja praegustel maa-aladel (joonis 5). Uuringuala kogupindala on 15,5 ha, millest ligikaudu 70% moodustab munitsipaalomand järve ja heakorrastatud rekreatsioonialadega. Kolmandiku alast moodustab eraomandis olev täiteliiva karjäär koos teenindusalaga, millest 1,17 ha on aktiivses kasutuses (Maa-ameti Geoportaal 2024a). Uuringuala valikul lähtuti reljeefsest ja maastikulisest mitmekesisusest, ligipääsetavusest ning puuduvatest drooni lennutamise eritingimustest.



**Joonis 5.** Palalinna karjääri uurimisala Läätel ja sidumispunktide paigutus. Aluskaardina on kasutatud Maa-ameti ortofotot (19.04.2023 ülelend) ja halltoonides kaarti (Maa-ameti Geoportaal 2024b).

### 2.2. Välitööde metoodika

Välitöödele eelnes kameraalne kaardianalüüs, mille käigus valiti erinevate mõõdistuslendude sidumispunktide ligikaudsed asukohad nii, et need esindasid võimalikult erinevaid maastikulisi tingimusi ning nähtavus oleks vastuvõetav (tabel 1). Kuna tegu on avalikult ligipääsetava alaga, osaliselt eramaaga, siis lume paksuse mõõtmiseks planeeriti luua

lahendus, kus mõõtmise ajaks püstitatakse fikseeritud lauakesed kindlatesse punktidesse kindla kõrgusega. Selliseid punkte nimetatakse antud töös **markeriteks**.

Marker koosnes kahest osast – maa sisse keeratud statsionaarsest maavaiaast ja horisontaalsest plaadist, mis oli märgistatud numbri ja põhja suunda osutava noolega (lisa 1). Lisaks sooritati mõõtmised plaadi ülemise horisontaalse serva keskpunkti ja lumevaba maapinna vahel.

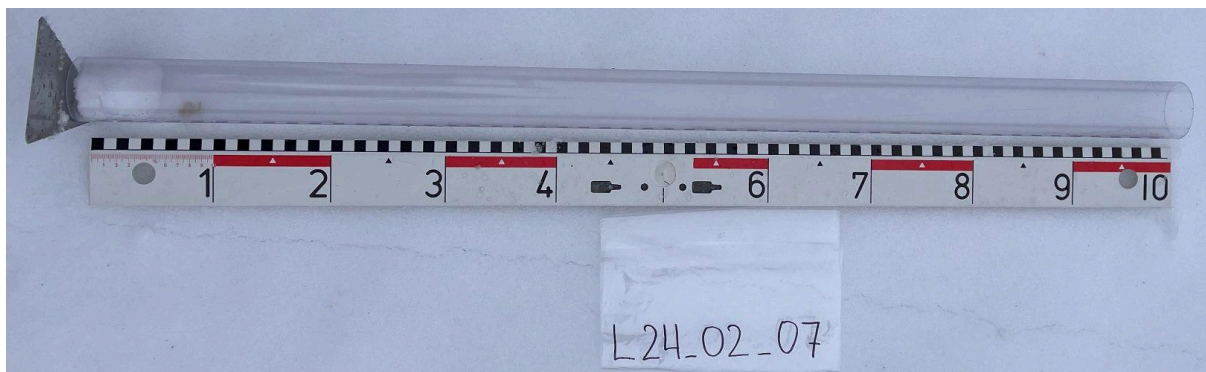
**Tabel 1.** Markerite asukohad ja kirjeldused kaardianaliüüsi põhjal.

Marker	Koordinaadid (L-EST97)	Kirjeldus
M1	x = 6487401,542; y = 656692,653	<b>Absoluutkõrgus:</b> 66,4 m <b>Reljeef:</b> tasane karjääri põhi, väga lauge nõlv (2°) <b>Maakate:</b> avatud rohumaa
M2	x = 6487326,705; y = 656655,487	<b>Absoluutkõrgus:</b> 67,3 m <b>Reljeef:</b> tasane nõlva alune, lauge (5°) kallakus põhjasuunda. <b>Maakate:</b> rohumaa, ümbruses leidub üksikuid kõrgemaid põõstaimi
M3	x = 6487204,253; y = 656774,115	<b>Absoluutkõrgus:</b> 84,8 m <b>Reljeef:</b> nõrgalt reljeefne hari, nõlv lauge (5°) kallakusega läänesuunda <b>Maakate:</b> Keskealine/ madalam männimets, võrade liitus visuaalsel hinnangul ~40%
M4	x = 6487281,885; y = 656819,118	<b>Absoluutkõrgus:</b> 68,5 m <b>Reljeef:</b> järsk nõlv (38°) kallakuga põhjasuunda <b>Maakate:</b> Vanem/ kõrgem männimets, võrade liitus visuaalsel hinnangul ~50%

Lennuplaani koostamisel kasutati tarkvara UgCS, kus ristuvate lennujoonega kaeti kogu uurimisala. Drooni lennukõrgus järgis reljeefset maastikku ning oli suhtelise kõrgusega 50 meetrit, mis tagas lennujoonte vahel küllaldase ülekatte. Drooni kiirus maapinna suhtes oli 5 m/s. Süsteem logis lennu ajal GNSS (ingl k *Global navigation satellite system*) toorandmed sagedusega 5 Hz ning IMU toorandmed sagedusega 200 Hz. Järeltöötuse esimeses etapis GNSS lennutrajektorid täpsustati ja siluti Applanix POSPac tarkvaras. Selleks kasutati lähima GNSS Tõravere püsijaama (TOR3) parandit. Järeltöötuse teises osas ühendati

GNSS, IMU ja skaneerimise andmed, millele järgnes punkt pilvede eksportimine .laz formaadis.

Lisaks sooritati **kohtmõõtmiseid** viiekümnes juhuslikkuse alusel valitud punktis kasutades traditsioonilisi mõõtemetodeid. Mõõtmiste eesmärk oli fikseerida lumeolud ning kaardistada referentsväärtused. Punktide genereerimiseks kasutati ArcGIS PRO tööriista *Create Random Points*. Kuna juhupunktide täpne mahamärkimine looduses oleks nõudnud liiga palju aega, siis proovivõtupunkti asukoht maastikul määrati kaardimaterjali pealt visuaalselt hinnates. Juhul kui lumi oli rikutud või mõõtmine raskendatud valiti lähiümbrusest uus esinduslik punkt. Esmalt lükati läbipaistev plastmassist toru maapinnani ja puhastati selle ümbrus lumest. Seejärel mõõdeti joonlauaga lumikatte paksus proovitoru kõrvalt, sest lumi võis torus mehaanilise mõjutuse tõttu kokku vajuda. Proovivõtukohta koordinaadid määrati GNSS RTK-tehnikaga (ingl k *Real time kinematic*) ning lumeproov võeti kaasa märgistatud proovikotis (joonis 6). See sulatati, sõeluti ja kaaluti hiljem laboris. Iga proovi kohta arvutati olulisemad lume karakteristikud, milleks on ruumala, tihedus, veevaru ja suhteline veesisaldus.



**Joonis 6.** Dokumenteeritud lumeprofiil. Veebruarikuise mõõtmise punkt number seitse.

### 2.2.1. Kasutatud aparatuur

Laserskanner Surveyor Ultra (YellowScan, Prantsusmaa, Saint Clément de Rivière) (joonis 7 A) on paigaldatav mitmetele platvormidele. Sensori tootjapoolne kinnitatud täpsus on 3 cm. Maksimaalne andmetootmise võimsus on 1 920 000 punkti sekundis. Surveyor Ultra töötab lähiihfrapunases piirkonnas, 905 nm, ning on võimeline aluspinnalt registreerima kuni kolm tagasipeegeldust. (YellowScan 2024) Olulisemad süsteemiparameetrid on esitatud lisas 2.

Laserskanner oli integreeritud mehitamata õhusõidukile DJI Matrice 300 RTK (DJI Enterprise, Hiina, Shenzhen) (joonis 7 B), mis on multirootori tüüpi. DJI Enterprise internetileheküljel (2024) esitatud dokumentatsiooni kohaselt on õhusõiduki diagonaalne

läbimõõt on 89,5 cm ning mass kahe akuga ligikaudu 6,3 kg. Maksimaalne õhkutõusmiskaal, koos lisaseadmetega, ulatub kuni 9 kilogrammini ning kiirus kuni 17 m/s. Olulisemad tehnilised karakteristikud on esitatud lisas 3.

Maapealseteks kontrollmõõtmisteks kasutati GNSS RTK seadet Trimble R12 (Trimble Geospatial, Ameerika Ühendriigid, Westminster (Colorado)) (joonis 7 C). See on globaalne satelliitnavigatsioonisüsteemi vastuvõtja, mis toetab kaheksat satelliitnavigatsioonisüsteemi. RTK režiimis on sensori maksimaalne horisontaalne täpsus 8 ning vertikaalne täpsus 15 mm. (Trimble Geospatial 2020) Olulisemad tehnilised karakteristikud on välja toodud lisas 4. Antenniga käib kaasas andmekoguja Trimble TSC7 (Trimble Geospatial, Ameerika Ühendriigid, Westminster (Colorado)), mis on varustatud välitöödel kasutatava tarkvaraga (joonis 7 D).



**Joonis 7.** Välitöödel kasutatud aparatuur – (A) aerolaserskanner YellowScan Surveyor (Vision Aerial internetilehekülg 2024), (B) droon DJI Matrice 300 RTK (DJI Enterprise internetilehekülg 2024), (C) GNSS süsteem Trimble R12 (Geosoft internetilehekülg 2024), (D) andmekoguja Trimble TSC7 (Trimble Geospatial 2022).

### 2.2.2. Välitööd

Välitööd planeeriti põhimõttega, et lendudega lumeperioodil saaks tabatud erinevad lumikatte omadused. Lisaks arvestati valitsevate ilmastikuoludega, tuule kiiruse ja sademetega, ning valiti sobilik aeg mõõdistuse teostamiseks. Tabelis 2 on kirjeldatud välitööde käiku ja ilmastikuolusid.

**Tabel 2.** Välitööde kirjeldus.

Kuupäev/ kellaeg	Objekt	Ilmastikuolud	Tegevused ja tähelepanekud
11.01.2024/ 11:15–16:00	Lumi	Õhutemperatuur -4°C kraadi Taevas üksikud rümpilved Sademed puuduvad	ALS ülelend 50 lume kohtmõõtmist

		Nõrk põhjakaare tuul, puhanguti 15 m/s	
22.02.2024 / 09:15–14:15	Lumi	Õhutemperatuur +3°C kraadi Taevast kõrgeid kihtpilved Sademed puuduvad Nõrk lõunakaare tuul	ALS ülelend 50 lume kohtmõõtmist Lumi tugevalt firnjas ning mõõtesilindri maapinnani lukkamine kohati võimatu. Lumekarakteristikud on esitatud mõõtesilindrisse jäänud läbilõike kohta
26.04.2024 / 09:00–10:00	Maapind	Õhutemperatuur +8°C Vahelduv pilvisus Sademed puuduvad Puhanguline loode tuul kuni 6 m/s	ALS ülelend

## 2.3. Andmetöötluse meetodika

### 2.3.1. Lumekarakteristikud

Otseste mõõtmiste kaudu saadi lumikatte paksus (cm) ja läbilõike mass (g), ülejäänud lumekarakteristikud - ruumala, tihedus ja vee-ekvivalent - on arvutuslikud. Lume vertikaalprofili suhteline veesisaldus on arvatud ülevaatliku pildi saamiseks. (valemid 2–5)

$$V = \pi r^2 SD \text{ (cm}^3\text{)} \quad (2)$$

Ruumala arvutamise valem, kus  $r$  on mõõtesilindri põhja raadius ning  $SD$  lumikatte paksus.

$$\rho = \frac{m}{V} \text{ (g/cm}^3\text{)} \quad (3)$$

Tiheduse arvutamise valem, kus  $m$  on lumeläbilõike mass ning  $V$  ruumala.

$$SWE = SD \cdot \rho \text{ (mm)} \quad (4)$$

Lume vee-ekvivalenti arvutamise valem, kus  $SD$  on lumikatte paksus ja  $\rho$  tihedus.

$$SWE_{suht} = \left(\frac{SWE}{SD}\right) \cdot 100 \text{ (%)} \quad (5)$$

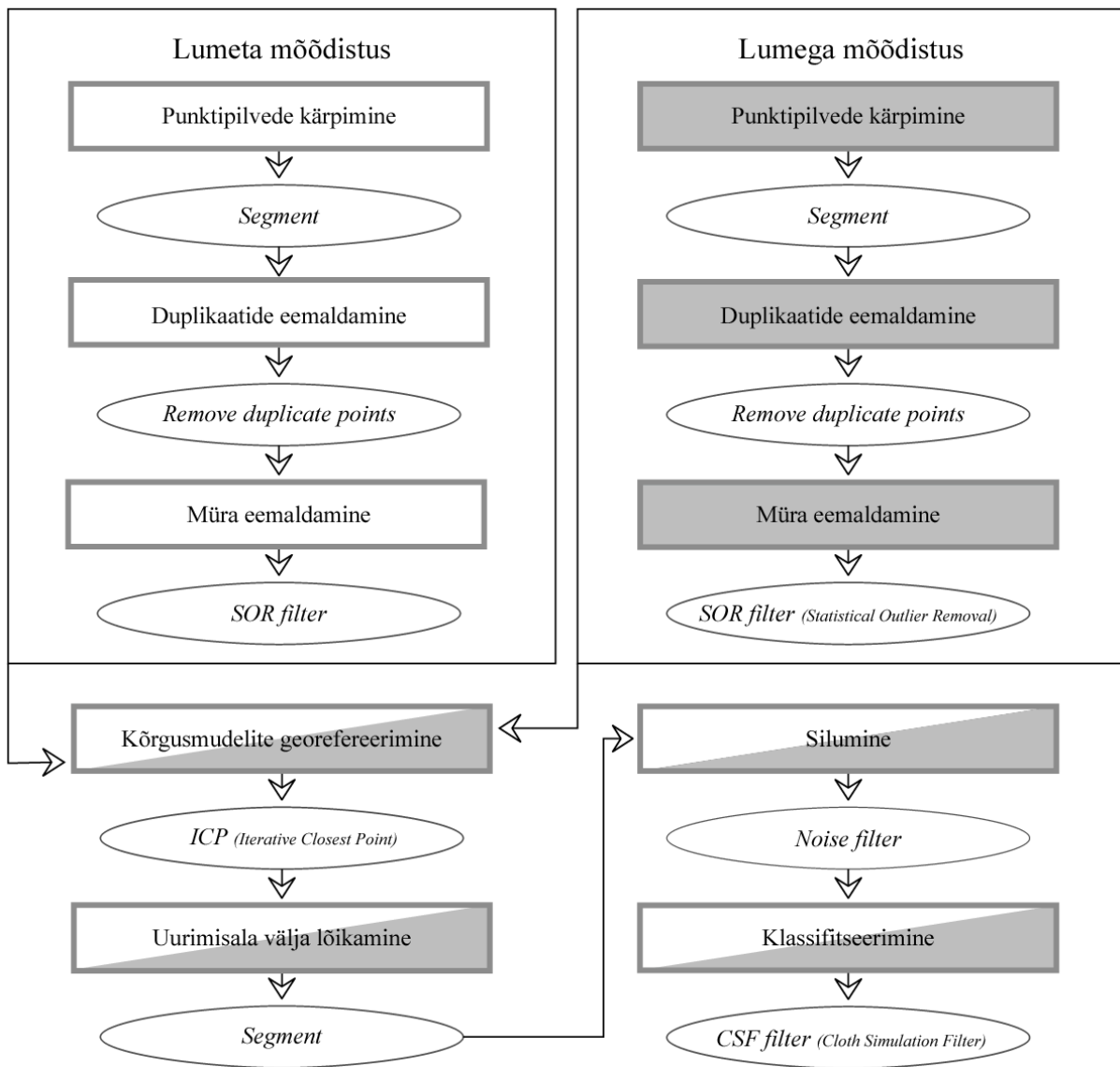
Suhtelise lume vee sisalduse valem, kus  $SWE$  on lume vee-ekvivalent ja  $SD$  on lumikatte paksus konkreetses punktis.

Oluline on märkida, et lume omadused vertikaalses profiilis võivad varieeruda, kuid käesolevas töös, lihtsustamise eesmärgil, võeti kogu läbilõiget homogeenne tervikuna. Tühimiku olemasolul lumesamba all eemaldati selle mõju arvutusest.

Vastavad arvutused teostati tarkvaras MS Excel ning pindade interpoleerimiseks kasutati ArcGIS Pro-s krigingut, mis geostatistiline interpoleerimise meetod.

### **2.3.2. Pinnamudelite modelleerimine ja statistiline analüüs**

Andmete eeltötluse käigus punktipilved kärbiti, puhastati ja georefereeriti. Punktipilve klassifitseerimisel kasutati CloudCompare-i puglinat CSF (ingl k *Cloth simulation filter*), mille on välja töötanud Zhang *et al.* (2016). Algoritm kätkeb endas virtuaalse kanga laotamise tagurpidi pööratud punktipilvele ning maapinna väärtuste genereerimist võrreldes LiDAR andmeid kasutaja poolt sätestatud parameetritega. Autorite hinnangul on meetodi oluliseks eeliseks füüsilise protsessi simuleerimine, lihtne parameetrite seadistamine ning algoritmi kasutatavus mitmekülgisel maastikul ilma keerukaid filtreerimisparameetrid määramata. ISPRS-i (*International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*) ehk Rahvusvahelise Fotogrammeetria ja Kaugseire Ühingu töörühma valideerimisandmestiku põhjal annavad katsetulemused keskmiseks koguveaks 4,58%. Optimaalsemaks stsenaariumiks kujunes reljeefne maastik, kanga jäikus parameeter kaks ja järsu reljeefi sobitavus teguri rakendamine koos nõlva töötamise protsessidega. Virtuaalse kanga resolutsioon käesolevas töös on 0,25 m, 1000 simulatsiooni kordust ja klassifitseerimise lävend 0,15 m. Punktipilvedest pinnamudelite genereerimise töövoog on esitatud joonisel 8.



**Joonis 8.** Pinnamudelite genereerimise (eraldatud kastikes) ja võrreldavale kujule viimise töövoog CloudCompare-is.

Punktipilvede georefereerimise ehk asukohatäpsuse kvaliteedistatistikuna kasutati ruutkeskmist viga, millega hinnati hälbeid referentsi suhtes. Referentsmodelina kasutati 26.04.2024 sooritatud mõõdistuslennu puhastatud, ent klassifitseerimata, punktipilve. RMSE väärtused arvutati erinevates punktides üle uurimisala ning need iseloomustavad horisontaalse ja vertikaalse täpsuse koosmõju.

Lumikatte paksuse arvutamisel lähtuti varasematest praktikatest, kus lumeperioodil kogutud andmetest lahutati lumevabal perioodil kogutud andmed. Seejuures rakendati Deems *et al.* (2013) poolt välja pakutud meetodilist võtet, kus lumikatte paksuse tuvastamine oli punktipõhine. Kuna erinevate mõõdistuste punktihedus ja jaotus oli erinev, kasutati

maapinna punktile vastava väärtuse genereerimiseks k-lähima naabri regressiooni algoritmi ( $k = 3$ ), kus virtuaalse punkti väärtuseks määratati lähimate naabrite väärtuste keskmine. Koht- ja LiDAR-möödistuse võrreldavale kujule viimiseks ekstraheeriti punktipilvest lähima naabri väärtus. Hinnang lumikatte paksusele järvel on antud igas punktis eraldi. Aluspinna andmetena kasutati kohtmöötmistel GNSS-süsteemiga registreeritud kõrgusinfot.

Vertikaalse vaatevälja ehk taimkatte kõrguse mõju hindamiseks klassifitseeriti maakate viieks klassiks - järv, lage ala (kõrreliste levik), mets ning lehtpuu- ja okaspuumets eraldi. Lehtpuumetsa peapuuliigiks oli arukask (*Betula pendula*) ning okasmetsas harilik mänd (*Pinus sylvestris*). Klassifitseerimisel juhinduti uusimast Maa-ameti metsanduslikust ortofotost ja kohapealsetest vaatlustest. Klasside defineerimisel lähtuti eeldusest, et möödistustäpsus ja vigade jaotus võivad klasside võrdluses varieeruda. Nõlva kaldenurga mõju hindamiseks loodi lumevaba maapinna kõrgusmudeli põhjal ühemeetrise eraldusvõimega nõlva kaart ning nõlvad jaotati kolme, piirkondlike reljeefseid tingimusi hästi iseloomustavasse, klassi -  $0-3^\circ$ ,  $4-10^\circ$  ja  $11^\circ+$  (joonis 9). Vigade iseloomu hindamiseks kasutati RMSE-d ja hajuvusdiagramme.

LiDAR- ja kohtmöötmise vahelise nihke ja lumeolude vahelisi seoseid hinnati läbi korrelatsioonanalüüsi, mis iseloomustab tunnuste vahelist seost, suunda ja tugevust. Vastavust normaaljaotusele kontrolliti tõenäosuspaberi ja Shapiro-Wilki ning Lillieforsi testiga. Juhul kui tunnused vastasid normaaljaotusele, kasutati Pearsoni korrelatsioonikordajat. Kui vähemalt üks tunnus oli statistiliselt erinev normaaljaotusest ja selle normaliseerimine ei olnud edukas, rakendati mitteparameetrilist Spearman korrelatsioonianalüüsi. Testi eeliseks on tundlikkuse puudumine erindite suhtes. Seoseid hinnati nii visuaalselt kui analüütiliselt. Seoste tugevuse hindamisel juhinduti reaalteadustes kasutatavatest kokkuleppelistest piiridest, kus korrelatsioonikordaja  $|r| \leq 0,3$  – nõrk seos;  $0,3 < |r| < 0,7$  – keskmine seos ja  $|r| \geq 0,7$  – tugev seos. Korrelatsiooni statistilise olulisuse hindamiseks kasutati p-väärtust.



**Joonis 9.** Maakate ja maapinna reljeef uurimisalal.

Punktipilvede visualiseerimiseks, töötlemiseks ja analüüsimiseks kasutati tarkvara ArcGIS PRO ja CloudCompare, statistiliseks analüüsiks tarkvara RStudio.

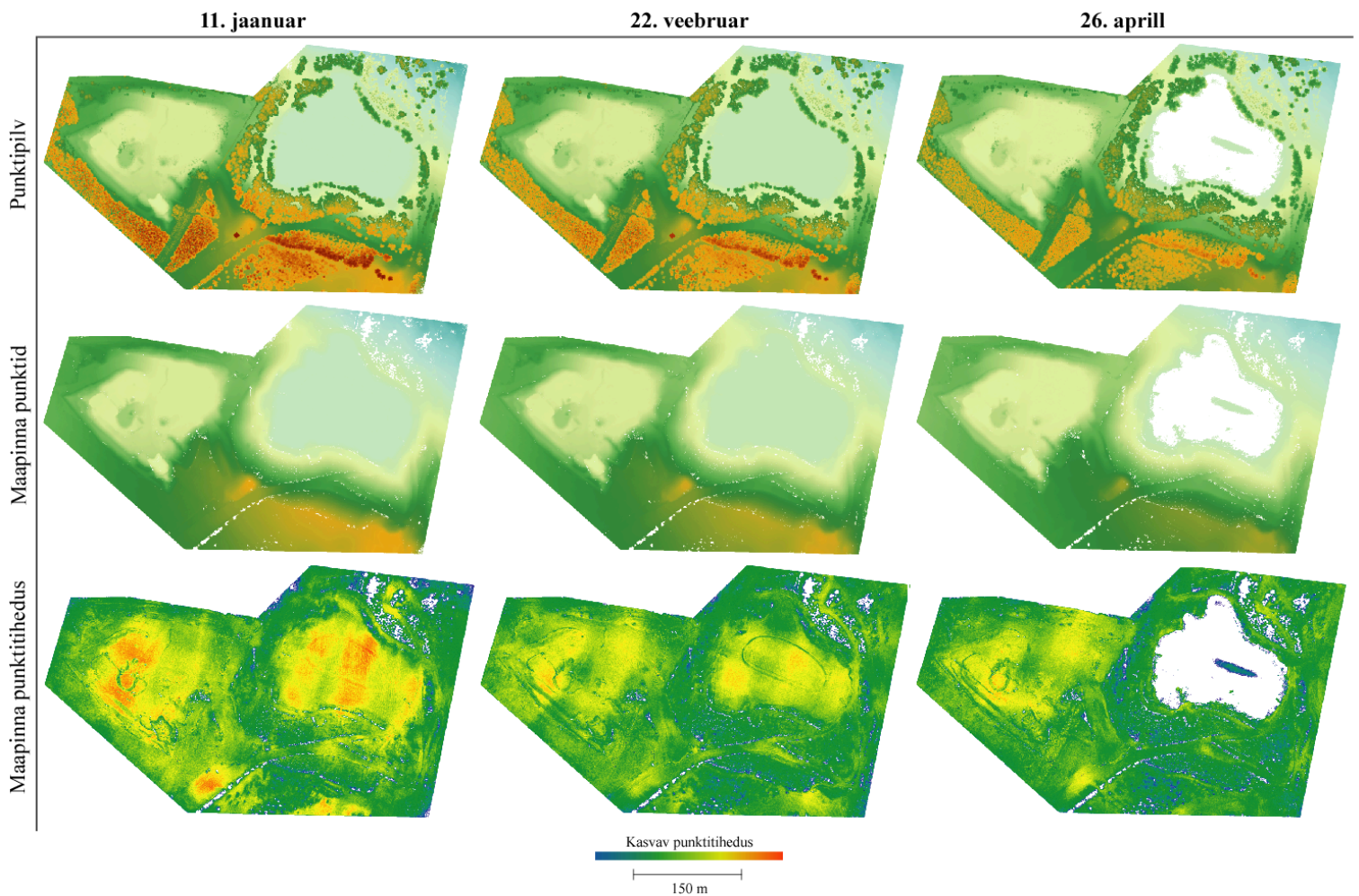
## 2.4. Töödeldud punktipilved

Eeltöötuse läbinud ja klassifitseeritud punktipilvi iseloomustavad parameetrid on esitatud tabelis 3. Mõlema lumega ja lumeta mõõdistuslennu keskmine punktitiheus oli vastavalt 123 ja 119 p/m<sup>2</sup>, kuid tiheduse jagunemine lageda ja metsase ala vahel oli ebavõrdne.

**Tabel 3.** Ülevaade eeltöödeldud punktipilvedele.

Mõõdistuslend (objekt_kuupäev)	Punktide arv uuringualas	Maapinnana klassifitseeritud punktide arv (v.a. järv)	Maapinna keskmine punktitiheus (p/m <sup>2</sup> )		
			Lage	Lehtpuumets	Okaspuumets
Lumi_240111	35 917 638	15 173 987	138	124	108
Lumi_240222	36 624 877	15 103 296	136	126	101
Maapind_240426	33 148 968	14 372 108	134	115	95

Hõredat ja kohati lausaliselt puuduvat punktitiheidust võis märgata igihaljastes, tiheda ja madala taimestikuga metsa osades, kus impulsi maapinnani jõudmine oli takistatud. (joonis 10) Lisaks olid sensori vaatevälja piiravaks faktoriks läheduses asuvad kõrgemad puud ja takistused. Probleemaatilised olid ka üksikud igihaljad ja madalavõralised puud, näiteks harilikud kuused. Kõrgema ja avatuma metsa korral oli andmetiheidus esinduslikum. Keskmisest suurem punktitiheidus oli avatud väljadel ning kaevanduse tasastel, taimkatteta aladel. Lisaks taimestiku puudumisele soosisid tihedat punktivilve mitmed paralleelsed ja lõikuvad lennujooned ning tugev ülekatte.



**Joonis 10.** Klassifitseerimata punktivilved, maapinnana klassifitseeritud punktid ning maapinna punktitiheidus. Punktivilvede ja maapinna punktide värviskaala juhindub suhtelisest kõrgusest.

### 3. Tulemused ja arutelu

#### 3.1. Punktipilvede kolmemõõtmeline asukohatäpsus

##### 3.1.1. Markerid

Mõõdistuslendude omavaheline georefereerimine üksnes uurimisalale püstitatud markerite sidumisel osutus liialt ebatäpseks. Markerid olid küll punktipilvest eristatava ruumikujuga, kuid nende pidev liigutamine ja sulamise-külmumise perioodidest tingitud maavaiade jäätumine tekitas georefereerimise täpsust mõjutava horisontaalse ja vertikaalse nihke. Näiteks 11. jaanuaril, ilmnes, et markeri M1 maavai oli sulaveega täitunud ja põhjani läbi külmunud ning vajas sulatamist. Paarisentimeetrist nihet kinnitasid ka markerite kõrguste mõõtmised mõõdulindiga. Võimalike vigade ennetamiseks kasutati skaleermise ankurpunktidena ka teisi uurimisalasse jäävaid statsionaarseid kontrollpunkte. Markerite paremale kasutatavusele aitaks kaasa, nende statsionaarne paigaldamine uurimisalale enne püsiva lumikatte kujunemist, stabiilsed asukohad, hea nähtavus ning üle sidumispunktide planeeritud lennujooned.

##### 3.1.2. Asukoht stabiilsete kontrollpunktide järgi

Täpsustavate allikatena kasutati piirkonnas stabiilseid kontrollpunkte ja struktuure (joonis 11), milleks olid varjualused, alajaam ning Lähte vaatetorn. Tingituna vaatetorni eemaldamisest märtsi keskel georefereeriti lumeta lend markerite ja katuste sidumisel.



*Joonis 11. Markerid ja stabiilsed kontrollpunktid uurimisalal.*

Ruutkeskmised veahinnangud jäävad markerite võrdluses vahemikku 4–7 cm (tabel 4). Kui karjääri keskmises paiknevate markerite (M1 ja M2) erinevus hinnangud on stabiilsed (5 cm) siis metsasemas piirkonnas varieerus RMSE enam. Teiste stabiilsete kontrollpunktide suhtes oli RMSE väärtus stabiilselt 5–6 cm.

**Tabel 4.** RMSE (m) väärtused referentspunktide võrdluses. (referents → võrdlus)

Võrdluspind	240426 → 240111	240426 → 240222	240111 → 240222
M1	0,047	0,051	0,056
M2	0,051	0,048	0,041
M3	0,037	0,054	0,063
M4	0,047	0,070	0,039
Vaatetorni katus	x	x	0,043
Varjualune 1	0,065	0,062	0,047
Varjualune 2	0,047	0,046	0,047
Alajaam	0,046	0,046	0,050

Mitmetes varasemates uuringutes ei ole punktivilvede sidumiseks kasutatud maapealseid kontrollpunkte, vaid tuginetud on üksnes INS (ingl k *Inertial navigation system*) mõõtmistele (Harder *et al* 2020; Jacobs *et al.* 2021). Lisaks ei ole antud hinnangut georefereerimise ruumilisele täpsusele (Hopkins *et al.* 2004) või on RMSE väärtus ulatunud 7 cm-ni (Dharmadasa *et al.* 2022). Seega võib käesolevas töös saavutatud georefereerimise tulemustega üldiselt rahulduda.

### 3.2. Kohtmõõtmistest saadud lumeandmed

11. jaanuaril ja 22. veebruaril sooritatud lume traditsioonilistel meetoditel põhinevad kohtmõõtmised näitasid lume paksuse ja teiste füüsiliste karakteristikute varieeruvust uurimisalal. Täielikud lumemõõtmiste tulemused on esitatud vastavalt lisades 5 ja 6. Kriitiliselt tasub suhtuda ekstrapoleerimise tulemustesse, sest eeldatav sarnasuse trend ei pruugi väljaspool mõõtepunkte jätkuda ning võib tekitada valearusaama.

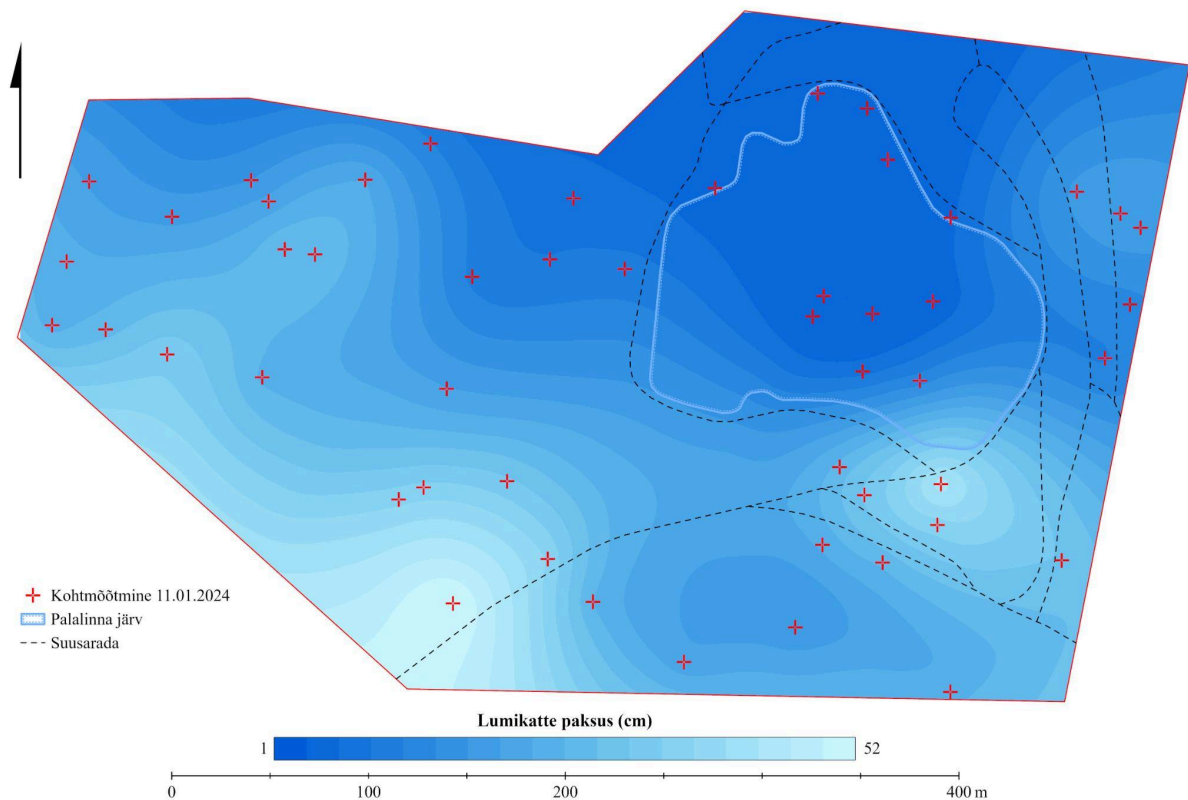
### 3.2.1. Lumepaksus

- *11. jaanuaril 2024*

Punktmõõtmiste põhjal interpoleeritud lumekaart on kujutatud joonisel 12. Palalinna järve jääl sooritati üheksa mõõtmist, millest kuus järve keskosa ning kaks põhjaservas. Järve keskosa kattis ühtlane lumikate paksusega 6 cm. Järvel oli eelnevalt lahti lükatud ka uisurada, mida kattis kuni sentimeetri paksune värske ja õhuline lumekiht. Põhjaservas oli lumekiht õhem (3–4 cm). Üldiselt oli lumikatte pealne kiht kerge ja jämedateraline, sügavamal vertikaalses läbilõikes leidis vanemat lund.

Lagedale alale, karjääri põhja ja rohumaale, sattus 21 mõõtepunkti. Lume paksus varieerus 7–40 cm-ni, kuid enamikel juhtudel jäi see 12 cm ümbrusesse. Kaheksas punktis küündis lume paksus üle 20 cm, peamiselt asusid need karjääri põhjas ja kõrgema taimestiku läheduses rohumaal. Kõige paksem lumi tuvastati suusaraja vahetus läheduses punktis 24 (40 cm). Õhema lumekihiga alad, alla 10 cm, paiknesid sarnaselt lumerohkemate kohtadega, karjääri põhjas või kõrgema puittaimestiku lähikonnas.

Tihedama taimkattega piirkondadesse sattus 19 mõõtepunkti, neist 6 oli kaasikus ja 14 männimetsas. Tihedasse kasemetsa sattunud punktide lume paksus varieerus vahemikus 6–22 cm. Männimetsas oli lumikatte paksusel varieeruvus suurem (6–52 cm), ulatudes kuni 15 sentimeetrini männinoorendikus ning järve naabruses. Kõige suurem lume paksus tuvastati rajääres punktis 28 (52 cm). Lisaks on oluline märkida, et lumeproovides esines kihilisust ja firnjat materjali maapinnaga kokkupuutel.



**Joonis 12.** Interpoleeritud lume paksus 11. jaanuaril 2024.

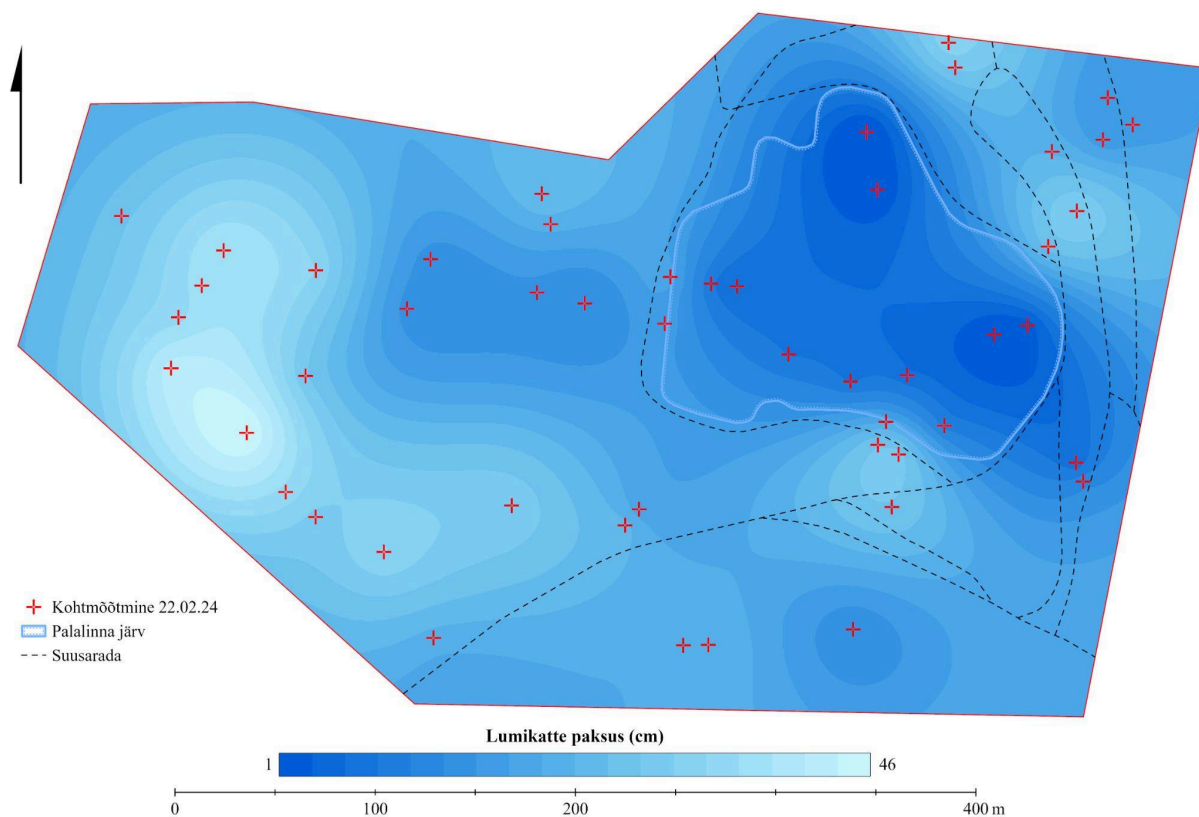
● **22. veebruar 2024**

Lumeolusid iseloomustav kaart on kujutatud joonisel 13. Palalinna järvel sooritati kümme mõõtmist ning lumikatte paksus varieerus 1–7 cm. Üldiselt oli järvel õhuke, kuid konkreetse piiriga lumikate. Järve põhjaosas olid kujunenud madalad tuisuvaalud, mis olid nähtavale toonud jää krobeline pinna. Järve keskel olevat uisurada kattis suures osas pool-sulanud lumi ja vesi. Lõunapoolses otsas oli lumikate pigem ühtlasem ja paksem.

Lagedale alale sattus 16 mõõtepunkti, millest enamik karjääri põhjas või servaaladel. Lumikatte paksus varieerus 11–46 cm, olles mediaanväärtusena 24 cm. Lisaks olid karjääri järsemad ja päikesele avatud lõunanõlvad suures osas lumeta. Karjääri keskpunktis olles oli nähtava ümbruse lumega kaetus 7/10-st. Karjääri kagunõlval, kus asub liumägi, oli märgata paljast jääd.

24 lume kohtmõõtmist sooritati metsas, millest kolm kaasikus ja 21 männimetsas. Lume paksus kaasikus varieerus vahemikus 22–31 cm ning männikus 2–31 cm. Kui õhem lumi paiknes pigem avatumates kohtades, siis paksema lumekihi paiknemisel, väljaspool

suusaradu, üldiseid visuaalseid seaduspärasid ei ilmnenud. Männimetsa alune lumekiht oli laigutine.



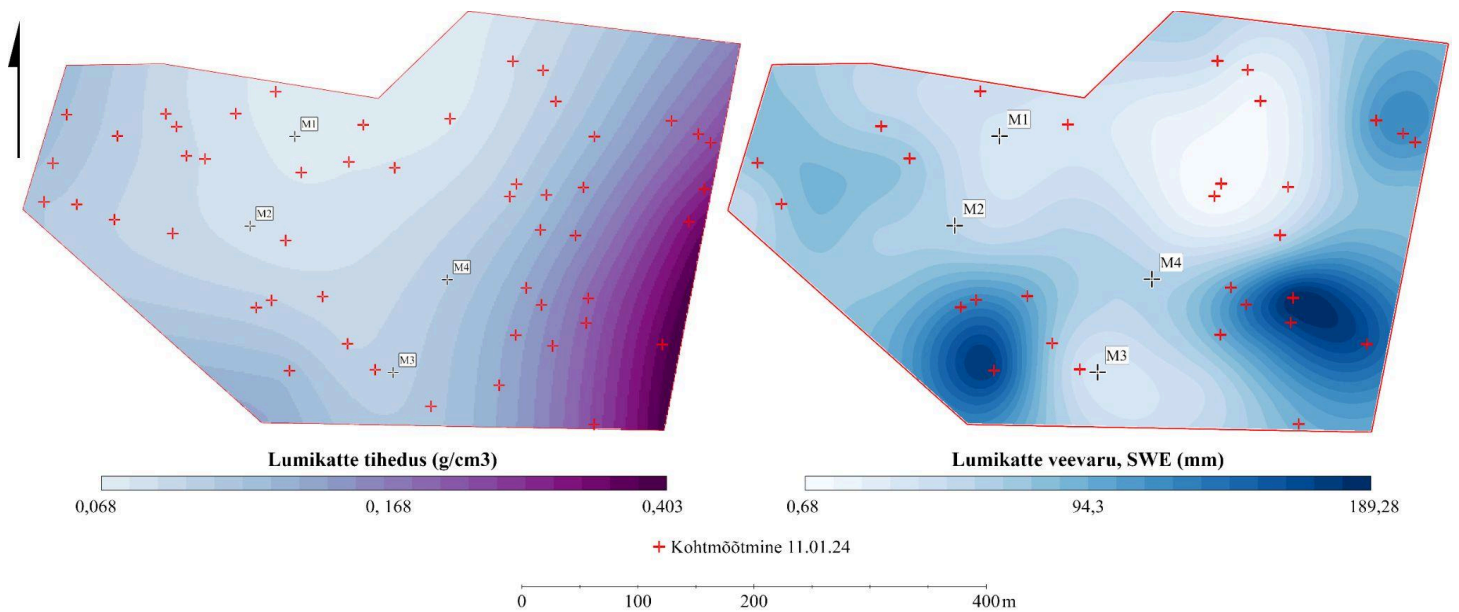
**Joonis 13.** Interpoleeritud lume paksus 22. veebruaril 2024.

### 3.2.2. Lumekarakteristikud

- **11. jaanuaril 2024**

Sarnaselt lume paksuse erinevustele varieerusid ka lume arvutuslikud karakteristikud nagu tihedus, veevaru ja suhteline veevaru (joonis 14). Suhtelist lume veevaru ei ole modelleeritud, sest selle ruumiline muster on sarnane tihedusele. Lume tiheduse ruumilises jaotuses ilmnes trend, kus tihedam lumikate oli kujunenud pigem metsases piirkonnas. Põhjuseid võib olla mitmeid, näiteks on metsas erinäoline mikrokliima, mis koosmõjus reljeefi efektiga kaitseb lumikatet sulamise ja ärakande eest. See soodustab lume kuhjumist ning tihenemist raskuse ja valitsevate ilmastikuolude toimet. Kunstlund toodetakse eeskätt suusaradadele, kus seda ka rajamasiinaga ka tihendatakse. Suusaradade iseärasused jäid kohtmõõtmistega tabamata. Keskmisest madalamad väärtused olid karjääri põhjaosas ja äärealadel. Peamiseks teguriks võib olla tunduvalt väiksem lumikatte paksus kui metsa all. Lumikatte vee-ekvivalent ehk veevaru ja tihedus on omavahel seotud, tihedam lumikate sisaldab rohkem vett. Seetõttu on aimatav seos ka

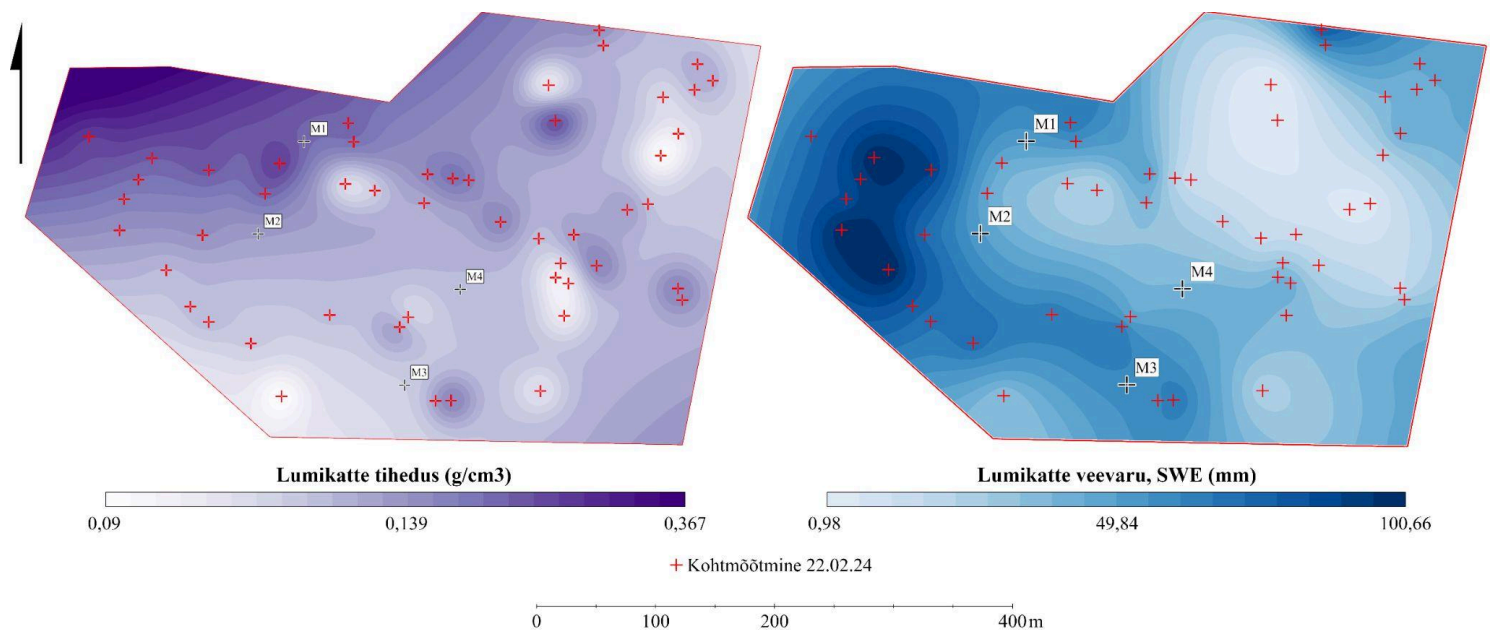
lume veevarul ja lumikatte paksusel. Siiski võib tunnuste vahel märgata mõningast varieeruvust, näiteks võib samasuguse paksusega lumekihi tihedus olla drastiliselt erinev.



*Joonis 14. Interpoleeritud lumikatte tihedus ja veevaru 11. jaanuaril 2024.*

- **22. veebruar 2024**

Lumekarakteristikute varieeruvus võrreldes jaanuari mõõtmistega oli märgatavalt suurem (joonis 15). Põhjuseks mõõtmiste vahelisel perioodil valitsenud ilmastikutingimused (lisa 7), mil õhutemperatuur oli üldiselt madal, kuid esinesid üksikud sulaperioodid. Sademetest domineeris lumi, kuid vähesel määral leidis ka vedelaid sademeid.



*Joonis 15. Interpoleeritud lumikatte tihedus ja veevaru 22. veebruaril 2024.*

Lumikatte tihedus ning veevaru olid suurimad karjääri põhja- ja loodeosas. Põhjuseks nõlvakalle lõuna suunal, millest tingituna saab sealne lumi enam päikesekiirgust. Madalam lumikatte tihedus on laiguline ning ruumiline muster raskesti tabatav. Suurem tiheduse hüppelisus on märgatav pigem järvejääl ning metsastel aladel. Suurel temperatuuri kõikumisel kogeb lumi korduvaid sulamise ja külmumise perioode. See tiheneb ja vee sisaldus kasvab. Suurema tihedusega kaasneb üldjuhul suurem vee-ekvivalent, kuid ka siin on näha mõningast varieeruvust.

### **3.3. Lume paksuse erinevused**

#### **3.3.1. Kõrguste erinevus**

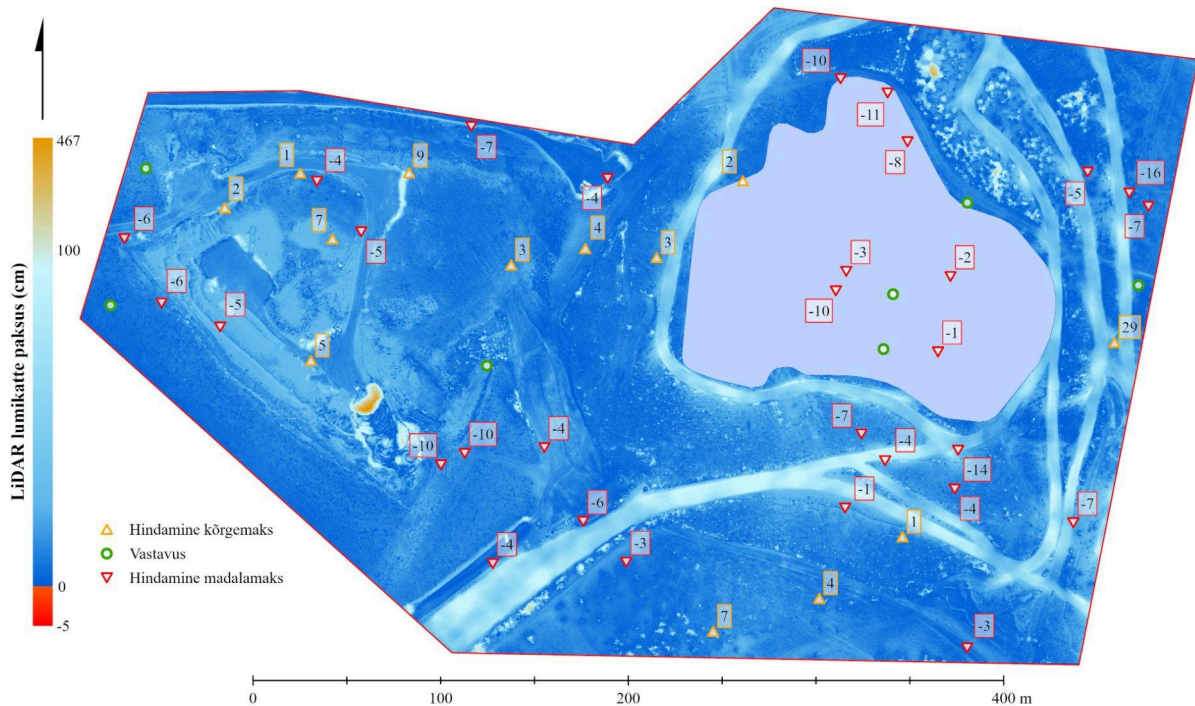
Täpsuste hindamisel on oluline arvestada ka mõõteseadmete omatäpsusega, milleks YellowScan LiDAR-il on 3 cm ja GNSS süsteemil 1,5 cm vertikaalis. Erinevused lisanduvad ka kohtmõõtmistel saadud mõõtetulemustest.

- **11. jaanuaril 2024**

Kõrguste erinevus 11. jaanuaril varieerus -5 kuni 467 cm-ni (joonis 16). Anomaalselt suurte paksuste taga karjääri lõunaosas on inimtegevusest tingitud maastikumuutused ning liiva kaevandamine aktiivse mäeeraldise piires. Tihedas metsases piirkonnas moonutavad tulemusi hõre punktitiheus ning üksikute alustaimestiku punktide klassifitseerimine maapinnana. Negatiivseid väärtuseid esines vähe ning need võisid olla tingitud väikesest lumikatte paksusest ning ebatäpselt klassifitseerimisest. Enamik lume paksuseid varieerus siiski sentimeetrist meetrini. Selgelt, ümbritsevast tunduvalt paksema lumikattega, joonistuvad välja kunstlumekattega suusarajad järve ümbruses ja uurimisala ida poolses osas ning teede ning parkimisalade äärsed lumevallid. LiDAR lumikatte kaart on detailirohke ning näitab, et on võimeline tuvastama paksuste erinevuseid ka väga väikeses ruumiosas, mida üksikud lume mõõtmised ei suuda kirjeldada. Seetõttu ei saa kasutada interpoleeritud kaarti pinnaliseks võrdluseks.

LiDAR-mõõdistuse ja kohtmõõtmiste vahelisi erinevusi on kujutatud joonisel 16. Positiivsed väärtused näitavad LiDAR-i lumikatte hindamist kõrgemaks ning negatiivsed madalamaks. Nihete varieeruvuste amplituud ulatus -14 kuni 29 cm-ni, kusjuures 60% (30 punkti) juhtudest LiDAR hindas lumikatte paksuse madalamaks. 14% (7) väärtustest osutus

identseks. Nihete koguarieeruvusest 22% (11) jäi ühe, 28% (14) kahe, 38% (19) kolme, 45% (27) nelja ning 62% (31) viie sentimeetri piiresse.



**Joonis 16.** 11. jaanuari LiDAR lumikatte paksus ja nihked võrreldes kohtmõõtmistega. Aluskaardina on kasutatud 10 cm eraldusvõimega lumerastrit.

- **22. veebruar 2024**

Kõrguste erinevus 22. veebruaril varieerus -3 kuni 480 cm-ni (joonis 17). Anomaalselt suurte väärtuste ruumiline jagunemine on sarnase jaanuarikuisele. Negatiivsed väärtused tuvastati samuti tihedama taimestikuga piirkondadest, kuid nende paiknemine oli hajutatum. Reaalse lumikatte paksuse varieerumine oli siiski väiksem ning enamik väärtuseid jäid alla 40 cm.

LiDAR-mõõdistuse ja kohtmõõtmiste vaheliste nihete võrdluses hindas LiDAR 40% (20) juhtudest lumikatte paksuse kõrgemaks ning 52% (26) kordades madalamaks. 8% (4) juhtudest erinevus puudus. Nihete varieeruvus oli väiksem ulatudes -16 kuni 11 cm-ni. Koguarieeruvusest 26% (13) jäi ühe, 34% (17) kahe, 42% (21) kolme, 54% (27) ning nelja 64% (32) viie sentimeetri piiresse.



oluline. Siiski on lume vee-ekvivalent otseses sõltuvuses lumikatte tihedusest ning selle korreleerumine nihetega olulist tähendust kannab. Korrelatsiooni tekkimine võib viidata enam lumikatte paksusel kui tihedusele.

**Tabel 5.** Korrelatsioonimaatriks.

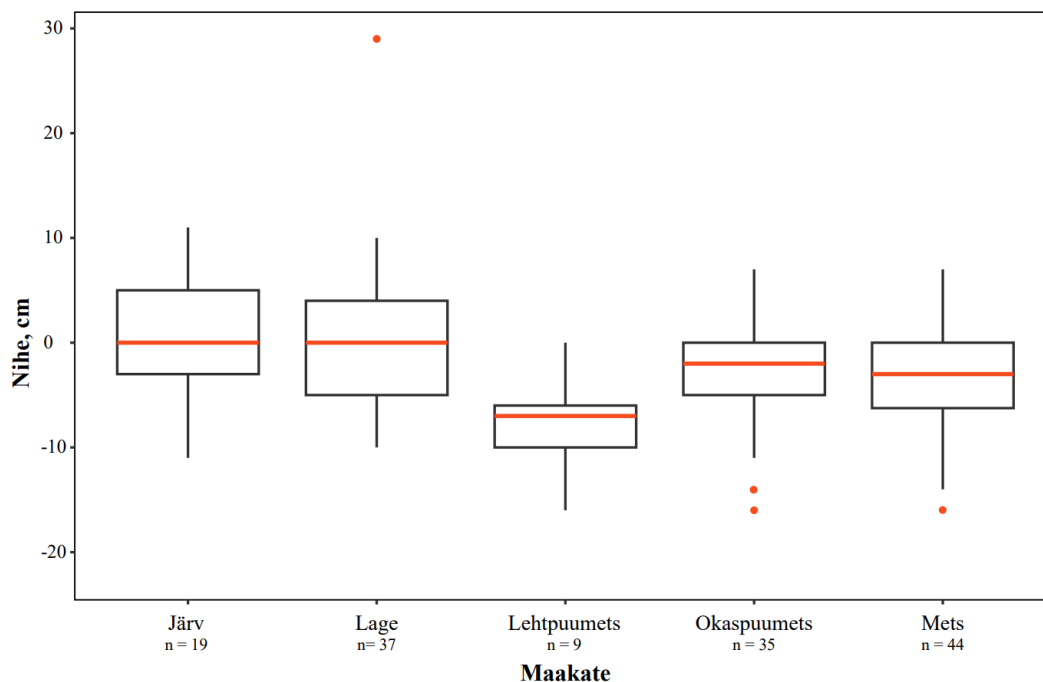
	11. jaanuar	22. veebruar
	Nihe	Nihe
Lumikatte paksus	-0,390***	-0,429***
Lume tihedus	-0,170	0,099
Lume vee-ekvivalent	-0,402**	-0,360**

\*p < 0,1; \*\*p < 0,05; \*\*\*p < 0,01

Andmestiku tõlgendamisel tasub teadvustada, et mõlemal päeval sooritati 50 referentsmõõtmist, mis ei pruugi anda täit ülevaadet. Täpsem lume karakteristikute mõju hindamine eeldab lumeprofiili pealmise kihi üksikasjalikku kirjeldamist, kontrollitud aluspinda ning inimfaktorist tingitud eksimuste vähendamist ja kvantifitseerimist.

### 3.3.3. Seosed maakattega

Nihete varieeruvus erinevatel maakatetel on esitatud joonisel 18. Järve ja lageda alal sooritatud mõõtmiste RMSE on võrdselt 7 cm, seejuures erinevuste kõikumine järvel vahemikus -11 kuni 11 cm ning lagedal -10 kuni 29 cm. Samuti on mõlema maakatte nihete mediaan ehk keskmine kvartiil nullilähedane, mis näitab, et üle- ja alahindamiste jaotus oli võrdne. Mõlema tunnuse haardest 50% jääb ligikaugu 8 cm sisse. Lehtpuumetsas sooritatud mõõtmiste erinevuse mediaanväärtus oli -7 cm ja selgelt domineerib LiDAR-i alahindamine. Nihke hajuvus, võrreldes teiste maakatetega, on väikesema haardega ning pooled mõõtmised jäävad 4 cm piiresse. Okaspuumetsas sooritati mõõtmisi lageda alaga võrdselt, ent erinevuste hajuvus on tunduvalt väiksema amplituudiga. Nihete mediaan on 2,5 cm ning pooled nihetest jäävad vahemikku 0 kuni -5 cm. Lehtpuu- ja okaspuumetsa ruutkeskmised vead on vastavalt 9 ja 6 cm. Mõlemas metsas tüübis kokku oli mediaanväärtus -3 cm ning 6 cm kirjeldas ära 50% kogu varieeruvusest. Erinevate maakatete võrdluses saavutati 7 cm suurune RMSE, nii metsas kui avatud väljadel, seejuures okaspuumetsa RMSE oli madalam kui lehtpuumetsas.

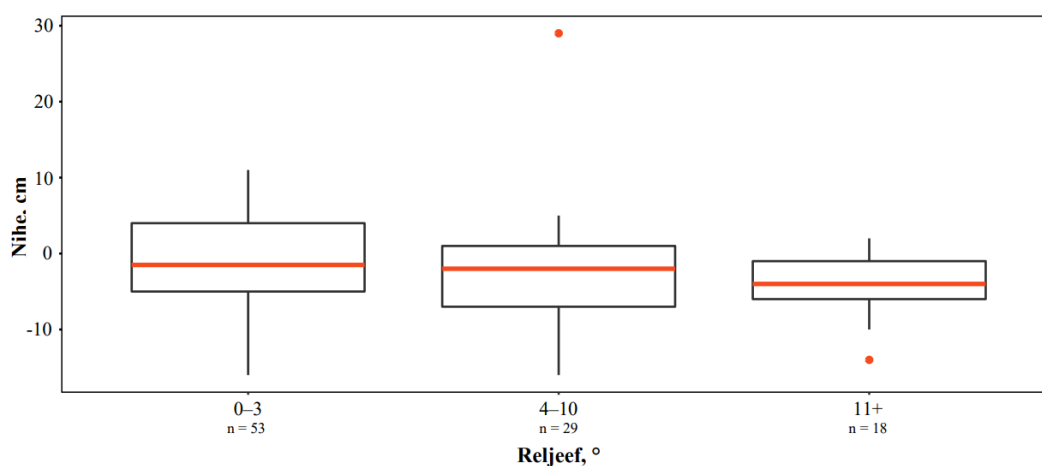


**Joonis 18.** Nihete varieeruvus erinevatel maakatetel. Karbi keskjoon näitab mediaani, alumine ja ülemine serv vastavalt 25% ja 75% protsentiile. Püstjoonte äärmusotsad näitavad kvartiilhaardest välja jäävate väärtuste ulatust ning punktid erindeid.

Üllatava tulemusena oli metsas, võrreldes avatud vaateväljaga maakatetega, võrdlemisi sarnane nihete hajuvus ning identne ruutkeskmise viga. Ilmselt on see tingitud küllaldasest ülekattest ja suurest punktitihedusest kohtmõõtepunktide läheduses. Lisaks toetas täpsust madala alustaimestiku vähesus/puudumine ning terviseradade olemasolu, mis lubas tagastusi paljudest skaneerimisenurkadest. Täpsust võivad parandada ka lumepinnale langenud okkad ja oksad, mis aitavad lume piirpinda paremini defineerida. Lehtpuumetsas sooritati võrreldes teiste maakatetega mõõtmisi vähem. Ilmselt tuleneb sellest ka väiksem nihete haare ja kontsentreeritus. Võrreldes okaspuumetsaga võib suuremat nihet soosida tihe taimkate ning maapinna klassifitseerimise keerukus, sest võrreldes männimetsaga on aluspind karedam ja heterogeensem. Keskmiste väärtuste suurem hajumine on avatud väljadel, järvel ja lagedal, kus laserkiire jõudmine maapinnani ei ole kas üldse või on vähesel määral füüsiliselt takistatud. Nihete tekkemehhanismid võivad olla tingitud laserkiire moonumisest lumikattes ja reljeefist või mõlema koosmõjust. Märkimisväärsed nihked ehk erindid võivad olla seotud ebatäpsustega valideerimise andmestikus. Võrreldes Harder *et al.* (2020) uurimusega on RMSE väärtused stabiilsemad ja lähemad nullile. Lagedal alal saavutati vastavalt 3 ning metsas 6–10 cm võrra parem täpsus. Siiski on erinevate uurimuste täpsuslikke parameetreid, eriti lume kaugseires, keeruline võrrelda.

### 3.3.4. Seosed reljeefiga

Mõõdistuste vahelised nihete varieeruvused jagatuna kolme reljeefiklassi on esitatud joonisel 19. Tasase reljeefiga aladel ( $0-3^\circ$ ) oli mõõdistuste vaheline RMSE 6 cm, nihete mediaan -1 cm ning koguhajuvus -16 kuni 11 cm. Võrreldes teiste reljeefiklassidega on hajuvus suurem ning põhjuseks ilmselt suurem kohtmõõtmiste arv. Kõige väiksem nihete ulatus oli järsul maastikul ( $11^\circ+$ ), kus RMSE väärtus oli 6 cm. Nihete varieeruvus oli vahemikus -10 kuni 2 cm, koos -14 cm erindiga. Reljeefsel maastikul ( $4-10^\circ$ ) varieerusid nihked vahemikus -16 kuni 5 cm, koos 29 cm erindiga. RMSE väärtus oli suurim, 8 cm.



*Joonis 19. Nihete varieeruvus erinevates reljeefiklassides.*

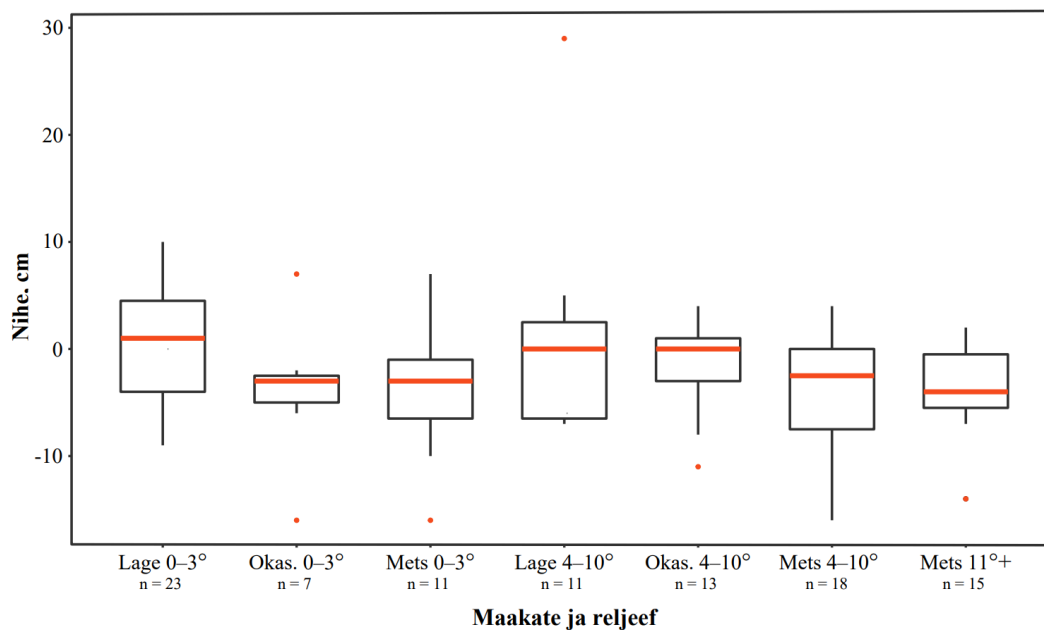
Suur erinevus punktmõõtmiste arvus tasase ja reljeefsete klasside vahel võib tulemusi moonutada. Enamate lume mõõtmiste korral on suurem hajuvus loomulik. Kui varasemates uuringutes (Harder *et al.* 2020; Koutantou *et al.* 2022) on täheldatud positiivset seost vigade ja nõlvakalde suurenemisel, siis käesolevas töös selget tendentsi välja ei joonistunud. Pigem tundus nihete jaotus juhuslik. Sarnaselt kõrgemale taimestikule on ka reljeef varjutava omadusega, kuid tihedad ja ristuvad skaneerimise vaalud võisid selle mõju vähendada.

### 3.3.5. Maakatte ja reljeefi koosmõju

Joonisel 20 on kujutatud nihete varieeruvust erineva taimkatte ja reljeefiga aladel. Mõõtepunktide arv proovialade lõikes on varieeruv ning võrdlusest on välja jäetud üksused, mille piirides pinnamood ei varieerunud või milles sooritati vähem kui viis mõõtmist ehk nihete amplituudile ei ole võimalik anda adekvaatset hinnangut.

Tasase pinnamoega aladel varieerus maakate kõige rohkem ning enam kui viis mõõtmist langes lagedale (RMSE = 5 cm), okaspuumetsa (RMSE = 7 cm) ja metsa (RMSE = 7 cm).

Kuigi mõõtmiste arv lagedal oli suurim siis nihete varieeruvus metsase alaga on peaaegu identne. Samuti oli lageda ala nihete mediaanväärtus lähemal nullile. Ruutkeskmise vea hinnang näitab, et lagedal tasasel alal on mõõtetäpsus parem kui tasasel metsasel alal. Reljeefse pinnamoega lage (RMSE = 10 cm), okaspuumets (RMSE = 4 cm) ja mets (RMSE = 7 cm) on omavahel paremini võrreldavad, sest kohtmõõtmiste arvu erinevus on väiksem. Nihete suurim hajuvus on metsasel alal, lagedal ja okaspuumetsas on need identsed. Siiski on nihete kontsentreeritus kõige suurem okaspuumetsas. Järsu reljeefiga metsas olid hajuvuspiirid kitsamad ja RMSE väärtus väiksem (6 cm) kui reljeefse ja tasase pinnamoega metsas. Üldiselt joonistub siiski välja trendid, kus rohkemate mõõtmistega piirkondades on hajuvuspiirid laiemad ning enim erindeid leidub sõltumata reljeefi iseloomust metsastel aladel. Erindite teket võivad põhjustada ebatäpsused klassifitseerimisel ning kohtmõõtmistel.

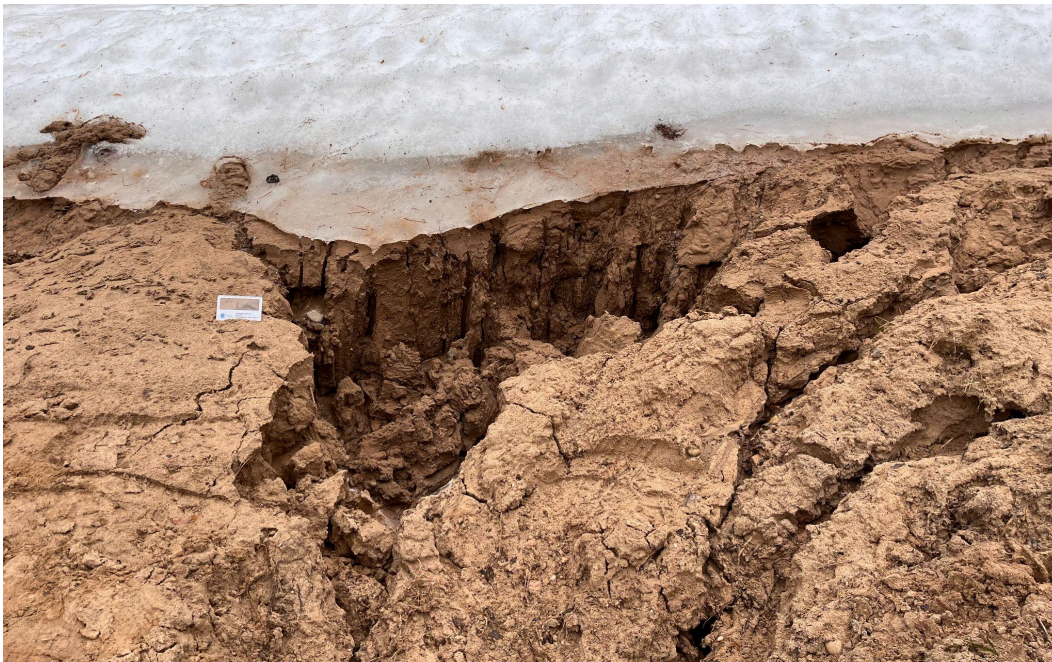


*Joonis 20. Nihete varieeruvus maakatte ja reljeefi koosmõjus.*

### 3.4. Anomaaliad

Veekogude olemasolu uurimisalal on lume paksust tuvastava kaugseire mõistes raskendav asjaolu. Veetase ning jää piirpind võivad ka talvisel perioodil kõikuda ning kohalikud sulamise-külmumise episoodid põhjustada jääpinna kõrguserinevusi ka järve erinevates osades. Seega ei ole võimalik ilma kohtmõõtmisteta anda täpset hinnangut lumekihi paksule.

Arvestada tuleb ka võimalusega, et maapind, mida kattis lumikate ei pruugi olla maapind, mida lumeta seisus mõõdistati. Juhul, kui andmetekorjete ajaline nihe on suur, võivad toimunud maastikumuutused mõjutada tulemusi ning levitada valearusaama käsitlevast probleemist. Suuremaid muutuseid, näiteks pinnase eemaldamist, tekitavad lumekaardile tugevaid lokaalseid anomaaliaid ning nende registreerimine on visuaalselt lihtne. Väiksemad muutused võivad siiski jääda tähelepanuta. Looduslikest teguritest on potentsiaalseimad nõlvaprotsessid ja erosioon ehk materjali ärakanne, mille iseloomu ja intensiivsust mõjutavad nii geoloogilised tingimused ja morfomeetria, kui ka välised tegurid, näiteks taimkate ja niiskustingimused. Joonisel 21 on kujutatud intensiivsel lumesula perioodil formuleerunud nõlvaerosiooni, kus liivane ja järsk nõlv on küllastunud veega ning raskuse toimel varisenud. Konkreetse varingu lähedusse kohtmõõtmisi ei tehtud, kuid anomaalia kajastub lumekaardil.

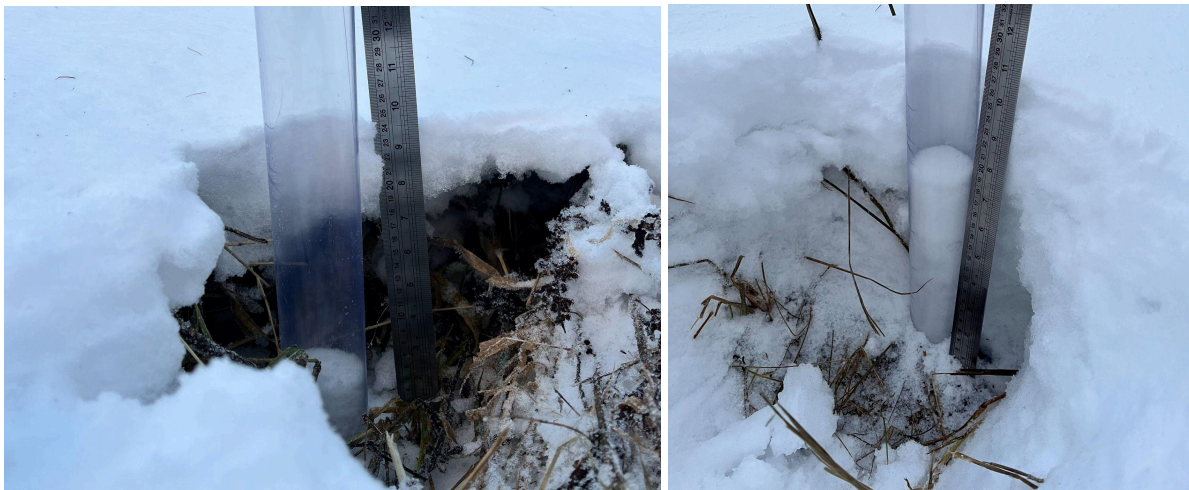


**Joonis 21.** Lumesulaveest tingitud nõlvaerosioon Lähte suusarajal. Mõõtkavalisteks võrdluseks lisatud kaardi suurus 8,5 x 5,5 cm. Pildistatud 2. aprill 2024 järve kagunurgas.

Uurimisalal, ümber Palalinna järve, paiknevad hooldatavad suusarajad, millele toodetakse ka kunstlund. Kohtmõõtmiste teostamine vastavate vahenditega oli võimatu, sest lumi suusaradadel oli paks, tugevalt tihenenud ning jäine. Lisaks ei soovitud rada lõhkuda. Tulenevalt kohapealsete mõõtmiste puudumisest ei olnud võimalik hinnata LiDAR mõõdistustäpsust konkreetsel pinnal.

11. jaanuaril sooritatud kohtmõõtmiste käigus ilmnnes, et kõrreliste lamandumine karjääri põhjas ja äärealadel on tekitanud tühimikke lumikatte alla (joonis 22). Lumikatte kõrgus

maapinnast võis ulatuda mitmekümne sentimeetrini, kuid tegelik lumesammas võis olla väiksem. Infrapuna piirkonnas töötav LiDAR ei suuda tuvastada selliste tühimike paiknemist ega mahtu, sest peegeldus registreeritakse vaid lumikatte pinnalt. See ilmestab asjaolu, et ka lumepinna täpsel mõõdistamisel säilib mahtude hindamisel ebamäärasus ning sügavushinnangud ja kevadine äravool võivad olla prognoositust väiksemad. Siinkohal on otseselt lumikatet läbival kaugseirel oluline eelis, sest impulsi lumes veedetud aja põhjal suudetakse hinnata lumikatte reaalselt paksust ja ka veesisaldust. Täpsema tulemuse ja laiendatud kasutusala võimaldab UAV-LiDAR-i integreerimine teiste sensoritega, näiteks lairiba radariga, mis võimaldab hinnata lumikatte tihedust (Jenssen and Jacobsen 2021). Seeläbi on drooni kaugseirega võimalik lisaks lumikatte paksusele hinnata ka lume tihedust ja vee-ekvivalenti.

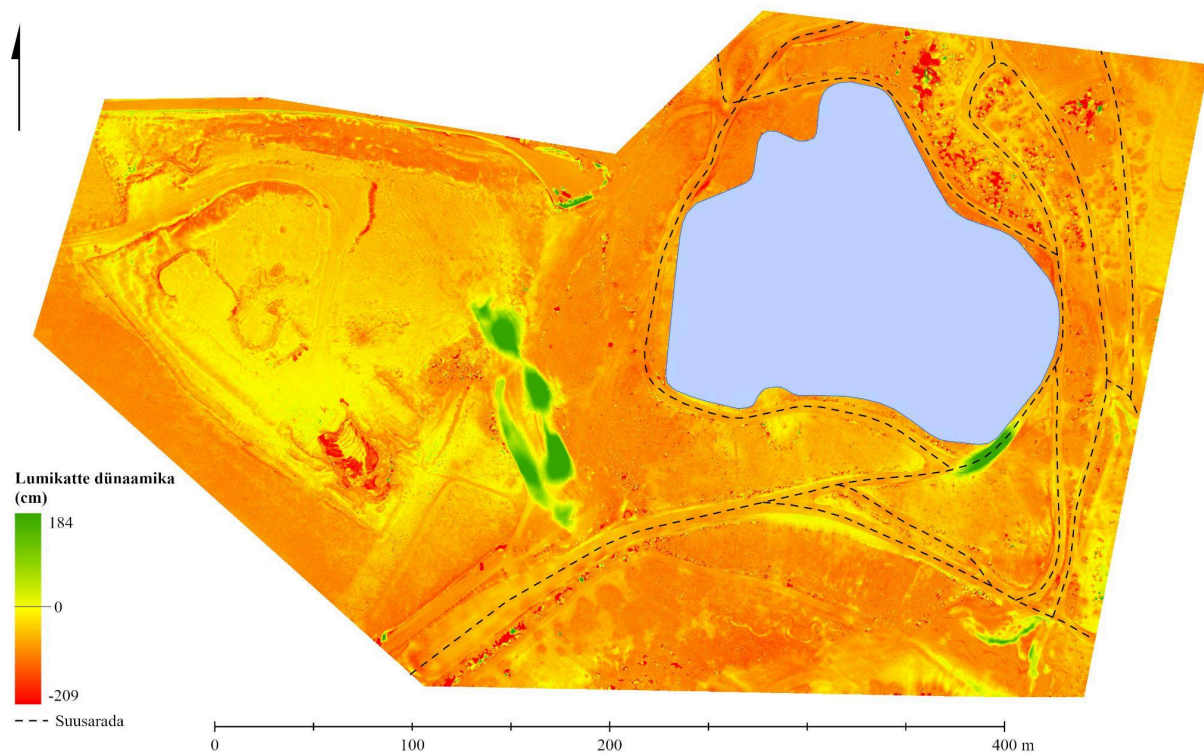


**Joonis 22.** Vasakpoolsel fotol proov nr 39 lumekihi aluse tühimikuga. Parempoolsel fotol proov nr 49, kus lumi vajub proovi võtmisel kokku. Pildistatud 11. jaanuar 2024.

Anomaalseid nihkeid kohtmõõtmiste ja LiDAR-mõõdistuste vahel võivad tekitada ka valideerimisandmete kogumise meetoodika ja täpsus. Kohtmõõtmised võivad olla raskendatud mitmete asjaolude tõttu. Näiteks sula- ja külmumisperioodide vaheldumine enne mõõtmistõid võib maapinnalähedase lumekiht veega küllastada ning järjekordel külmumisel moodustada tugeva firnja- või jääkihi. Jäise kihi olemasolu mõjutab oluliselt mõõtmisele kuluvat aega ja täpsust, sest mõõtevahend võib maapinnani jõuda vale nurga all ning moonutada lume paksuse mõõtmeid.

Mõõdistuslendude vaheline lumikatte dünaamika näitab, et üldiselt on lagedal alal lumikatte paksus jäänud samaks või kasvanud, metsastel aladel on lumikate pigem sulanud (joonis 23). Seda kinnitasid ka kohapealsed vaatlused. Piirkondlik sademete ja temperatuuri dünaamika oli lendude vahelise perioodi vältel muutlik. (lisa 7) Jaanuari teise poole alguses oli

lumesadudega päevi palju ning õhutemperatuur madal, küündides kuni -15 kraadini. Sellele järgnes väheste sademetega periood, mil õhutemperatuur oli püsivalt üle nullkraadi. Veebruaris oli sademeid jaanuariga võrreldes vähem ning õhutemperatuuri muutlikkus jätkus sarnase dünaamikaga. Perioodil on lumikatte paksuse anomaalset kasvu märgata lühikesel suusaraja lõigul järvest kagus, vaatetorni ja karjääri ühendaval teelõigul ning kelgurajal. Kohapealsete vaatluste põhjal esines konkreetsetes kohtades tüse jääkiht või firnjas lumi, mis on seletatav soojema perioodi ning lumesulavee valgumisega reljeefi madalamatesse kohtadesse. Reaalsest tüsedama lumikatte registreerimise põhjuseks võib olla intensiivne peegeldumine jää pinnalt, selle omadused ning laserimpulsi moondumine läbi laserkiire levimise kiiruse muutuse. Huvitava asjaoluna võib välja tuua ka vaatetorni lähedase parkla, mis oli samuti kaetud jääga, kuid anomaalset lume paksust seal ei tuvastatud. Põhjuseks võib olla pinna kaldenurk. Kõigis anomaalsetes piirkondades oli reljeefi kaldenurk viis või enam kraadi, parklas oli aluspind tasane.



**Joonis 23.** Lumikatte dünaamika 11. jaanuarist 22. veebruarini LiDAR mõõdistuste põhjal.

Negatiivsed väärtused on kujunenud lumikatte sulamisel. Anomaalselt suured väärtused on seostatavad hõreda punktiheduse või maastikumuutustega. Karjääri lõunaosas on anomaaliaid seletatavad järskudel nõlvadel toimunud materjali ümberpaiknemisega. Ka veebruarikuisel välitöödel täheldati varinguid ning liiva leidumist lumikatte peal.

Lisaks meteoroloogilistele tingimustele on lumikatte kujunemine, paksus ja dünaamika initsieeritud ka kohalikest reljeefsetest tingimustest. Näiteks sõltub see nõlvade ekspositsioonist ehk orientatsioonist ilmakaarte suhtes, mis mõjutavad nõlvale langeva päikesekiirguse hulka. Lõunapoolsed nõlvad saavad enam päikesekiirgust kui põhjapoolsed ning sealne lumi sulab varem. Nõlvad reguleerivad ka tuule lund ümber paigutavat toimet, näiteks võib lumi kuhjuda nii tuulepealsetel kui ka -alustel nõlvadel. Tuultele avatud nõlvade laed on tihti lumevaesed. Ühtlasi muudab ja puhverdab lumikatte dünaamikat oluliselt ka taimkate. Uurimisalal domineerivad kirdesuunalised männimetsaga nõlvad, kus lumikatte mediaanpaksus oli suurim ning ka lumikatte kestus, väljaspool suusaradu, pikim. Kõige kiiremini sulas lumi järskudel ja avatud karjääri lõunanõlvadel. Taimkatteta lääne ja loode nõlvadel oli üldjuhul väiksem lumikatte paksus kui mujal. Nõlvakallete aspektist oli kõige enam lund üldiselt tasaste või nõrgalt reljeefse pinnamoega piirkondades, vähem järsul reljeefil.

Alternatiivse meetodina on lumevaba maapinna andmestikuna võimalik kasutada Maa-ameti aerolaserskaneerimise klassifitseeritud kõrguspunkte või nendest tuletatud maapinna kõrgusmudelit, millest suurima eraldusvõimega on üks meeter. Kevadiste lendudega kaetakse veerand Eestit ( $2,1 \text{ p/m}^2$ , keskmine punktivahe  $0,72 \text{ m}$ ) ja tiheasustused ( $18 \text{ p/m}^2$ , keskmine punktivahe  $0,26 \text{ m}$ ) (Maa-ameti Geoportaal 2021), mis tähendab, et andmed ei pruugi kasutamise hetkeks enam ajakohased olla. Lisaks tasub ortofotodelt kontrollida, eriti varakevadiste lendude korral, kas maapind on täielikult lumevaba. Näiteks olid Maa-ameti mõõdistuslennu ajal Lähte suusarajad veel osalise lumikatte all. 1m eraldusvõimega Maa-ameti ja käesoleva töös kasutatud maapinna kõrgusmudeli võrdluses ilmes, et erinevused ulatusid  $-10$  meetrist kuni nelja meetrini. Suurimad erinevused olid karjääri aktiivse mäeeraldise piires, kus materjali oli eemaldatud ja ümber paigutatud. Keskmine erinevus kogu uurimisala peale on  $-0,30$  ja standardhälve  $0,59 \text{ m}$ . Olulised erinevused joonistuvad välja ka stabiilse ja taimestikuta aluspinna korral. Maa-ameti kõrgusrastri hinnanguline vertikaalne nihe võrreldes konkreetse töös kasutatuga on  $-0,14 \text{ m}$ . Eelmainitud asjaolust tingituna tuleksid arvutuslikud lume paksuse hinnangud oluliselt suuremad.

## Kokkuvõte

Lumikate kannab olulist rolli nii maakera kliima reguleerimises kui ka mitmetes keskkonnaprotsessides. See on olemuselt keeruline fenomen, sest lumikatte paksus ja muud omadused võivad ka väga väikeses ruumi osas oluliselt varieeruda. Lume punktmõõtmised meteoroloogiajaamades annavad hinnagu lumikatte paksusele konkreetses punktis, kuid muutuste tuvastamine suuremal ruumilisel skaalal, seejuures piisava täpsusega, on viinud otsima uusi tehnoloogiaid. Perspektiivika meetodina on end tõestanud LiDAR tehnoloogia, mis paigaldatuna mehitamata õhusõidukile annab võimaluse operatiivselt ja võrdlemisi kulutõhusalt lume kohta andmeid koguda.

Käesoleva magistritöö eesmärk oli hinnata mehitamata õhusõidukile paigaldatud LiDAR-süsteemi täpsust lumikatte paksuse mõõdistamisel mitmekesise reljeefi- ja taimkattega maastikul. Lisaks hinnati lumekarakteristikute võimalikku mõju koht- ja LiDAR mõõdistuste vahelistele nihetele.

LiDAR mõõdistustäpsuse hindamiseks sooritati kaks mõõdistuslendu üle lumega kaetud Lähte uurimisala. Tulemuste valideerimiseks sooritati kohtmõõtmised viiekümnes punktis. Lisaks arvutati lumikatte tihedus, lume vee-ekvivalent ja suhteline veesisaldus. Lumeta mõõdistuslend sooritati aprilli lõpus. Punktipilvede eeltötluse käigus pilved kärbiti, puhastati, georefereeriti ning klassifitseeriti. Seejärel lahutati lume perioodil lennatud pilvandmetest lumevaba punkt pilv. Nihete varieerumist hinnati erinevate maakatete, reljeefi ja lumeolude tingimustes.

Magistritöö tulemusel selgus, et UAV-LiDAR suudab määrata lumikatte pinna oluliste kadudeta. Mõõdistusvigadest 40% oli tootjapoolsete tehniliste karakteristikutega samas suurusjärgus. Üldine nihete varieeruvus jäi vahemikku -16 kuni 29 cm. Üldiselt hindab LiDAR lumikatte paksust võrdselt nii madalamaks kui kõrgemaks ning sõltumata lumetingimustest suudab sensor kuni viie sentimeetrise nihkega kirjeldada pisut enam kui 60% koguvarieeruvusest. Mõõdistusvead ei korreleerunud ei lume tiheduse ega vee-ekvivalendiga. Statistiliselt oluline ja keskmise tugevusega negatiivne korrelatsioon ilmnas lumikatte paksusega. Maakattel ja reljeefil on mõningane mõju lumepaksuse hinnangutele, kuid võrdväärselt olulist rolli mängivad ka konkreetse uurimisala taimkatte iseloom, aluspinna heterogeensus ja punktitihe. Samuti kinnitasid tulemused, et LiDARiga mõõdistatud lumikatte paksus pakub võrreldes interpoleeritud lumekaartidega ruumilisemalt täpsemaid andmeid piirkondlike lumeolude kohta.

# Mapping snow cover depth and the effect of snow properties on UAV-LiDAR survey accuracy in diverse terrain

Tiia-Linda Purge

## Summary

Snow cover plays an important role in regulating the earth's climate as well as in several environmental processes. For example, snow cover thickness data is an important input to several scientific disciplines like ecology, biogeography and hydrology. Snow cover is a complex phenomenon, as its thickness and other properties can vary significantly even over a very small area. Point measurements of snow at meteorological stations give an estimate of the thickness of the snow cover at a specific point, but the detection of changes on a larger spatial scale, with sufficient accuracy, has led to the search for new technologies. As a perspective method, UAV-LiDAR has proven itself. It provides an opportunity to collect snow data operationally and relatively cost-effectively.

The purpose of this master's thesis was to evaluate the accuracy of the UAV-LiDAR system in measuring the thickness of the snow cover in a landscape with varied relief and vegetation. In addition, the possible effect of snow characteristics on the offsets between *in-situ* and LiDAR measurements was evaluated.

Two survey flights were performed over the snow-covered Läfte research area to assess LiDAR surveying accuracy. To validate the results, *in-situ* measurements were performed. The snow cover density, snow water equivalent and relative water content were calculated. The survey flight without snow was performed at the end of April. During the preprocessing the clouds were cropped, cleaned, georeferenced and classified. Then, a snow-free point cloud was subtracted from the cloud data flown during the snow period, and the thickness of the snow cover was extracted. The variation of the offsets was evaluated under the conditions of different land covers, relief and snow conditions.

As a result of the Master's thesis, it was revealed that UAV-LiDAR can determine the surface of the snow cover without significant losses. 40% of the measurement errors were in the same order of magnitude as the manufacturer's technical characteristics. The overall offset variability ranged from -16 to 29 cm. In general, LiDAR estimates the thickness of the snow cover equally under and over, and regardless of snow conditions, the sensor can describe slightly more than 60% of the total variability with an offset of up to five centimeters. Measurement errors did not correlate with either snow density or water equivalent. A

statistically significant and moderately strong negative correlation appeared between errors and snow cover thickness. Land cover and relief have some influence on snow thickness estimates, but the nature of the vegetation cover of the specific study area, the heterogeneity of the surface and the point density also play an equally important role. The results also confirmed that LiDAR-measured snow cover thickness provides more spatially accurate data on regional snow conditions compared to interpolated snow maps.

## **Tänuavaldused**

Soovin tänada töö juhendajaid, Raivo Aunapit ja Marko Kohvi, pühendatud aja, asjatundliku juhendamise ja igakülge abi eest nii välitöödel kui ka töö sisulisel vormistamisel.

## Kasutatud kirjanduse loetelu

- Aoki, T., Aoki, A., Fukabori, M., Hachikubo, A., Tachibana, Y., Nishio, F. (2000). Effects of snow physical parameters on spectral albedo and bidirectional reflectance of snow surface. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 105, D8, 10219–10236. Doi: .1029/1999JD901122
- Baltsavias, E. P. (1999). Airborne laser scanning: basic relations and formulas. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54, 1994–214. Doi: 10.1016/S0924-2716(99)00015-5
- Birkeland, K. W., Hansen, K. J., Brown, R. L. (2017). The spatial variability of snow resistance on potential avalanche slopes. *Journal of Glaciology*, 41(137), 183–190. Doi: 10.3189/S0022143000017871
- Brooks, P. D., Williams, M. W. (1999). Snowpack controls on nitrogen cycling and export in seasonally snow-covered catchments. *Hydrological Process*, 13, 2177–2190. Doi: 10.1002/(SICI)1099-1085(199910)13:14/15<2177::AID-HYP850>3.0.CO;2-V
- Daudt, R. C., Wulf, H., Hafner, E. D., Bühler, Y., Schindler, K., Wegner, J. D. (2023). Snow depth estimation at country-scale with high spatial and temporal resolution. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 197, 105–121. Doi: 10.1016/j.isprsjprs.2023.01.017
- Deems, J., Fassnacht, S. R., Elder, K. (2006). Fractal distribution of snow depth from LiDAR data. *Journal of Hydrometeorology*, 7(2), 285–297. Doi: 10.1175/JHM487.1
- Deems, J. S., Painter, T. H., Finnegan, D. (2013). Lidar measurement of snow depth: a review. *Journal of Glaciology*, 59, 467–479. Doi:10.3189/2013JoG12J154
- Dharmadasa, V., Kinnard, C., Baraër, M. (2022). An accuracy assessment of snow depth measurements in agro-forested environments by UAV lidar. *Remote Sensing*, 14(7), 1649. Doi: 10.3390/rs14071649
- Dietz, A. J., Kuenzer, C., Gessner, U., Dech, S. (2011). Remote sensing of snow – a review of available methods. *International Journal of Remote Sensing*, 33(13), 4094–4134. Doi: 10.1080/01431161.2011.640964
- DJI Enterprise internetilehekülg. (2024). Matrice 300 RTK Specs. Külastatud 21.02.2024. <https://enterprise.dji.com/matrice-300/specs>
- Doneus, M., Hüfle, B., Kempf, D., Daskalakis, G., Shinoto, M. (2022). Human-in-the-loop development of spatially adaptive ground point filtering pipelines—An archaeological case study. *Archaeological Prospection*, 29, 503–524. Doi: 10.1002/arp.1873
- Eberhard, L. A., Sirguey, P., Miller, A., Marty, M., Schindler, K., Stoffel, A., Bühler, Y. (2021). Intercomparison of photogrammetric platforms for spatially continuous snow depth mapping. *The Cryosphere*, 15, 69–94. Doi: 10.5194/tc-15-69-2021

- Eker, R., Bühler, Y., Schlögl, S., Stoffel, A., Aydın, A. (2019). Monitoring of snow cover ablation using very high spatial resolution remote sensing datasets. *Remote Sensing*, 11(6), 699. Doi: 10.3390/rs11060699
- Fayad, A., Gascoin, S., Faour, B., López-Moreno, J. I., Drapeau, L., Le Page, M., Escadafal, R. (2017). Snow hydrology in Mediterranean mountain regions: A review. *Journal of Hydrology*, 551, 374–396. Doi: 10.1016/j.isprsjprs.2023.01.017
- Geosoft internetilehekülg. (2024). TRIMBLE R12. Külastatud 21.02.2024. <https://geosoft.ee/trimble-r12/>
- Harder, P., Pomeroy, J. W., Helgason, W. D. (2020). Improving sub-canopy snow depth mapping with unmanned aerial vehicles: lidar versus structure-from-motion techniques. *The Cryosphere*, 14(6), 1919–1935. Doi:10.5194/tc-14-1919-2020
- Harder, P., Schirmer, M., Pomeroy, J., Helgason, W. (2016). Accuracy of snow depth estimation in mountain and prairie environments by an unmanned aerial vehicle. *The Cryosphere*, 10, 2559–2571. Doi: 10.5194/tc-10-2559-2016
- Harikumar, A. (2019). Advanced methods for tree species classification and biophysical parameter estimation using crown geometric information in high density LiDAR data. Doctoral Thesis. University of Trento, Department of Information and Communication Technology. Doi:10.13140/RG.2.2.10395.69922
- Harpold, A., Guo, Q., Molotch, N., Brooks, P., Bales, R., Fernandez-Diaz, J., Musselman, K., Swetnam, T., Kirchner, P., and Meadows, M. W., Flanagan, J., Lucas, R. (2014). LiDAR-derived snowpack data sets from mixed conifer forests across the Western United States. *Water resources research*, 50(3), 2749–2755. Doi: 10.1002/2013WR013935
- Hein, N., Feilhauer, H., Finch, O.-D., Schmidtlein, S., & Löffler, J. (2014). Snow cover determines the ecology and biogeography of spiders (Araneae) in alpine tundra ecosystems. *ERDKUNDE*, 68(3), 157–172. Doi: 10.3112/erdkunde.2014.03.01
- Hopkinson, C., Sitar, M., Chasmer, L., Treltz, P. (2004). Mapping snowpack depth beneath forest canopies using airborne Lidar. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 70(3), 323–330. Doi: 10.14358/PERS.70.3.323
- Höhle, J. (2011). The assessment of the absolute planimetric accuracy of airborne laserscanning. *The International Archives of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 34, 10. Doi: 10.5194/isprsarchives-XXXVIII-5-W12-145-2011
- Jaagus, J., Frey, J. (2014a). Maakera kiirgusbilanss. Ü. Mander, Ü. Liiber (toim.), Üldmaateadus. *Õpik kõrgkoolidele* (236–245). Tartu: Eesti Loodusfoto.
- Jaagus, J., Frey, J. (2014b). Vesi atmosfääris. Ü. Mander, Ü. Liiber (toim.), Üldmaateadus. *Õpik kõrgkoolidele* (268–278). Tartu: Eesti Loodusfoto.
- Jacobs, J. M., Hunsaker, A. G., Sullivan, F. B., Palace, M., Burakowski, A., Herrick, C., Cho, E. (2021). Snow depth mapping with unpiloted aerial system lidar observations: a

- case study in Durham, New Hampshire, United States. *The Cryosphere*, 15, 1485–1500. Doi: 10.5194/tc-15-1485-2021
- Jenssen, R. O., Jacobsen, S. K. (2021). Measurement of snow water equivalent using drone-mounted ultra-wide-band radar. *Remote Sensing*, 13(13), 2610. Doi: 10.3390/rs13132610
- Jones, G. H. (1999). The ecology of snow-covered systems: a brief overview of nutrient cycling and life in the cold. *Hydrological Process*, 13, 2135–2147. Doi: 10.1002/(SICI)1099-1085(199910)13:14/15<2135::AID-HYP862>3.0.CO;2-Y
- Kaasik, M. (2011). Keskkonnaseire füüsikalised alused. E-kursuse materjalid. Külastatud 29.12.2023.  
<https://dspace.ut.ee/server/api/core/bitstreams/a750f2ab-5745-4dae-b05b-441c01cd1134/content>
- Keller, F., Goyette, S., Beniston, M. (2005). Sensitivity analysis of snow cover to climate change scenarios and their impact on plant habitats in alpine terrain. *Climatic Change*, 72, 299–319. Doi: 10.1007/s10584-005-5360-2
- Keskkonnaagentuur. (2022). *Eesti meteoroloogia aastaraamat 2021*. Tallinn: Keskkonnaagentuur.
- Keskkonnaagentuur. (2019). Meteoroloogilise seire allprogramm. Lisa 1.1. Kasutatud 12.01.2024. <https://keskkonnaagentuur.ee/media/741/download>
- Keskkonnaagentuuri internetilehekülg. (2024). Sademed ja lumi. Külastatud 10.01.2024. <https://www.ilmateenistus.ee/ilm/ilmavaatlused/sademed/lumekaart/>
- Kirchner, P. B., Bales, R. C., Molotch, N. P., Flanagan, J., Guo, Q. (2014). LiDAR measurement of seasonal snow accumulation along an elevation gradient in the southern Sierra Nevada, California. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18, 4261–4275. Doi: 10.5194/hess-18-4261-2014
- Koutantou, K., Mazzotti, G., Brunner, P., Webster, C., Jonas, T. (2022). Exploring snow distribution dynamics in steep forested slopes with UAV-borne LiDAR. *Cold Regions Science and Technology*, 200, id = 103587. Doi: 10.1016/j.coldregions.2022.103587
- König, M., J.-G. Winther., and E. Isaksson. (2001), Measuring snow and glacier ice properties from satellite. *Review of Geophysics*, 39(1), 1–27. Doi: 10.1029/1999RG000076
- Latypov, D. (2002). Estimating relative lidar accuracy information from overlapping flight lines. *ISPRS Journal of Photogrammetry. Remote Sensing*, 56(4), 236–245. Doi: 10.1016/S0924-2716(02)00047–3
- Lefsky, M. A., Cohen, W. B., Parker, G. G., Harding, D. J. (2002). Lidar Remote Sensing for Ecosystem Studies: Lidar, an emerging remote sensing technology that directly measures the three-dimensional distribution of plant canopies, can accurately estimate vegetation structural attributes and should be of particular interest to forest,

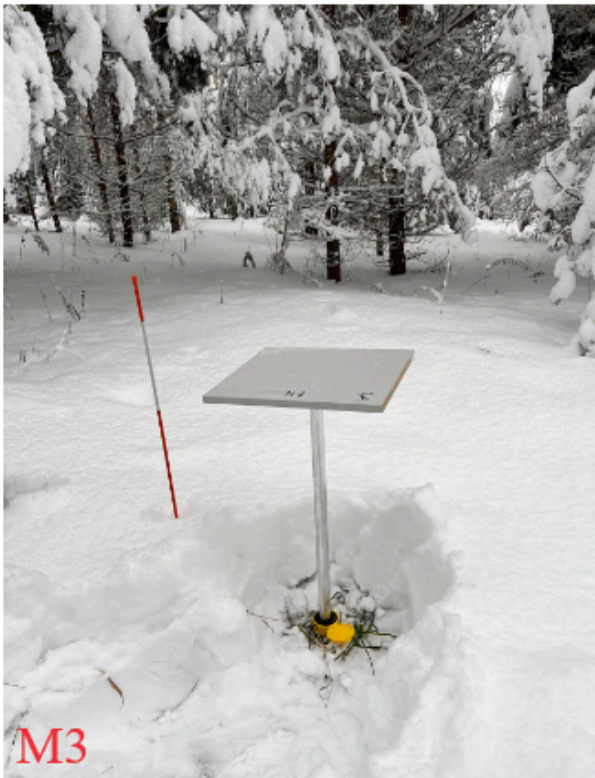
- landscape, and global ecologist. *BioScience*, 52(1), 19–30. Doi: 10.1641/0006-3568(2002)052[0019:LRSFES]2.0.CO;2
- Lemke, P., Ren, J., Alley, R. B., Allison, I., Carrasco, J., Flato, G., Fujii, Y., Kaser, G., Mote, P., Thomas, R. H., Zang, T. (2007). Observations: changes in snow, ice and frozen ground. In: *Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Lubin, D, Massom, R. (2006). *Polar remote sensing. Volume I: Atmosphere and oceans*. United Kingdom: Springer.
- Ma, W., Xiao, P., Zhang, X., Song, Y., Ma, T., Ye, L. (2020). Retrieving snow wetness based on surface and volume scattering simulation. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 169, 17–28. Doi: 10.1016/j.isprsjprs.2020.08.021
- Maa-ameti Geoportaal. (2021). ALS IV ring 2021-2024. Külastatud 22.05.2024. <https://geoportaal.maaamet.ee/geoportaal.maaamet.ee/est/ruumiandmed/korgusandmed/aerolaserskaneerimise-korguspunktid/als-iv-ring-2021-2024-p855.html>
- Maa-ameti Geoportaal. (2023). Aerolaserskaneerimise kõrguspunktid. Külastatud 11.01.2024. <https://geoportaal.maaamet.ee/est/Ruumiandmed/Korgusandmed/Aerolaserskaneerimise-korguspunktid-p499.html>
- Maa-ameti Geoportaal. (2024a). Maardlate kaardirakenduse. Külastatud 08.01.2024. <https://xgis.maaamet.ee/xgis2/page/app/maardlad>
- Maa-ameti Geoportaal. (2024b). WMS, WFS, WCS teenused. Külastatud 02.05.2024. <https://geoportaal.maaamet.ee/est/teenused/wms-wfs-wcs-teenused-p65.html>
- Morgner, E., Elberling, B., Strebel, D., Cooper, E. J. (2010). The importance of winter in annual ecosystem respiration in the High Arctic: effects of snow depth in two vegetation types. *Polar Research*, 29(1), 58–74. Doi: 10.1111/j.1751-8369.2010.00151.x
- Moussy, L. (2020). There are three different ways to determine distances using LiDAR. YellowScan internetilehekül, 24. november. Külastatud 15.12.2023. <https://www.yellowscan.com/knowledge/three-ways-to-determine-distance-using-lidar/>
- Moussy, L. (2021). What are the different scan patterns of LiDAR systems? YellowScan internetilehekül, 5. veebruar. Külastatud 17.12.2023. <https://www.yellowscan.com/knowledge/what-are-the-different-scan-patterns-of-lidar-systems/>
- Perovich, D. (2007). Light reflection and transmission by a temperate snow cover. *Journal of Glaciology*, 53, 201–210. Doi: 10.3189/172756507782202919
- Pirazzini, R., Leppänen, L., Picard, G., Lopez-Moreno, J.I., Marty, C., Macelloni, G., Kontu, A., Von Lerber, A., Tanis, C.M., Schneebeli, M., De Rosnay, P., Arslan, A. N.

- (2018). European in-situ snow measurements: practices and purposes. *Sensors*, 18(7). Doi: 10.3390/s18072016
- Prokop, A., Schirmer, M., Rub, M., Lehning, M., Stocker, M. (2008). A comparison of measurement methods: terrestrial laser scanning, tachymetry and snow probing for the determination of the spatial snow-depth distribution on slopes. *Annals of Glaciology*, 49, 210–216. Doi:10.3189/172756408787814726
- Richards, J.A., Jia, X. (2006). *Remote Sensing Digital Image Analysis. An Introduction*. 4th Edition. Berlin: Springer.
- Rimkus E., Briede A., Jaagus J., Stonevicius E., Kilpys J., Viru B. (2018). Snow-cover regime in Lithuania, Latvia and Estonia and its relationship to climatic and geographical factors in 1961–2015. *Boreal Environment Research*, 23, 193–208. Doi: 10.1007/s00704-019-03013-5
- Štular, B., Lozić, E., Eichert, S. (2021). Airborne LiDAR-derived digital elevation model for archaeology. *Remote Sensing*, 13, 1855. Doi: 10.3390/rs13091855
- Zhang, W., Qi, J., Wan, P., Wang, H., Xie, D., Wang, X., Yan, G. (2016). An easy-to-use airborne LiDAR data filtering method based on cloth simulation. *Remote Sensing*, 8(6), 501. Doi:10.3390/rs8060501
- Zhao, H., Fernandes, R. (2009). Daily snow cover estimation from advanced very high resolution radiometer polar pathfinder data over Northern Hemisphere land surfaces during 1982–2004. *Journal of Geophysical Research*, 114. Doi:10.1029/2008JD011272
- Tammets, T. (2012). Lumikate ja lumekoormus. A. Kallis (toim.), *Eesti ilma riskid* (89–94). Tallinn: Tallinna Raamatutrükikoda.
- Tarand, A., Jaagus, J., Kallis, A. (2013). *Eesti kliima minevikus ja tänapäeval*. Tartu: Tartu Ülikooli Kirjastus.
- Tartu Ülikooli Füüsika instituudi ilmajaama internetilehekülg. (i.a). Tartu Ülikooli Füüsika instituudi ilmajaam. Külastatud 15.05.2024. <https://meteo.physic.ut.ee/>
- Thackeray, C. W., Derksen, C., Fletcher, C. G., Hall, A. (2019). Snow and climate: feedbacks, drivers, and indices of change. *Current Climate Change Reports*, 5, 322–333. Doi: 10.1007/s40641-019-00143-w
- Tooming, H., Kadaja, J. (1995). Changes in snow cover and surface albedo in Estonia during the last 100 years. *Meteorologische Zeitschrift*, 4, 67–71. Doi: 10.1127/metz/4/1992/67
- Trimble Geospatial. (2020). Trimble R12 GNSS system. Datasheet. Külastatud 21.02.2024. [https://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-926322/022516-481C\\_Trimble%20R12%20GNSS%20Receiver\\_DS\\_A4\\_1020\\_LRsec.pdf](https://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-926322/022516-481C_Trimble%20R12%20GNSS%20Receiver_DS_A4_1020_LRsec.pdf)
- Trimble Geospatial. (2022). Trimble TSC7 controller. Datasheet. Külastatud 21.02.2024. [https://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-1039295/022516-365F\\_Trimble\\_TSC7\\_DS\\_USL\\_1022\\_LRsec.pdf](https://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-1039295/022516-365F_Trimble_TSC7_DS_USL_1022_LRsec.pdf)

- U.S. Department of the Interior. (2021). Technical appendix: snow measurement technology summaries. Emerging technologies in snow monitoring. Report to congress. November.
- Viru, B. (2020). Snow cover dynamics and its impact on greenhouse gas fluxes in drained peatlands in Estonia. Doktoritöö. Tartu Ülikool. Geograafia osakond.
- Vision Aerial internetilehekülg. (2024). YellowScan Surveyor Ultra. Külastatud 07.03.2024. <https://visionaerial.com/product/yellowscan-surveyor-ultra/>
- Wehr, A., Lohr, U. (1999). Airborne laser scanning—an introduction and overview. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 54, 68–82. Doi: 10.1016/S0924-2716(99)00011-8
- YellowScan. (2024). YellowScan Surveyor Ultra. Datasheet. Külastatud 07.03.2024 [https://www.yellowscan.com/products/surveyor\\_ultra/](https://www.yellowscan.com/products/surveyor_ultra/)

# Lisad

## Lisa 1. Markerid M1–M4



## Lisa 2. YellowScan Surveyor Ultra tehnilised karakteristikud

Allikas: YellowScan 2024

Laserskanner	Hesai XT32M2X
GNSS lahendus	SBG Quanta Micro
Täpsus (ingl k <i>accuracy</i> )	3 cm
Kordustäpsus (ingl k <i>precision</i> )	2,5 cm
Punktitihe, m <sup>2</sup> (h = 100 m, v = 10 m/s)	60
Max andmetootlus, p/s	1 920 000
Max tagastuste arv	3
Lainepikkus	905 nm
Vaateväli	360° x 40.3°
Max skaneerimise sagedus	20 Hz
Töötemperatuur	-10 to +40 °C
Dimensioonid (pikkus x laius x kõrgus)	153 x 113 x 117 mm
Kaal (ilma akuta)	0,98 kg

### Lisa 3. Enterprise DJI Matrice 300 RTK

Allikas: DJI Enterprise internetilehekülj 2024

Dimensioonid (pikkus x laius x kõrgus)	810 × 670 × 430 mm
Kaal ilma akudeta/ kahe TB60 akuga	~3,6 kg/ ~ 6,3 kg
Max õhukütõusmise kaal	9 kg
Max kiirus	17 m/s
Max tuule kiiruse takistus	12 m/s
Max lennuaeg ilma lisakoormuseta	55 min
Max signaali ulatus	8 km
Tõõtemperatuur	-20°C kuni +50°C

## Lisa 4. Trimble R12

Allikas: Trimble Geospatial 2020

Toetatavad GNSS-süsteemid	GPS, GLONASS, SBAS, Galileo, BeiDou, QZSS, NavIC, L-band
Positsioneerimise sagedus	1 Hz, 2 Hz, 5 Hz, 10 Hz, 20 Hz
Max täpsus (RTK)	8 mm H/15 mm V
Max täpsuse saavutamiseks kuluv aeg	2–8 s
Töötemperatuur	-40°C kuni +65°C
Dimensioonid (laius x kõrgus)	11,9 x 13,6 cm
Kaal (koos aku ja antenniga)	1,12 kg

## Lisa 5. Lumekarakteristikud 20240111

Pnt	X; Y	H	Lumikatte paksus (cm)	Ruumala (cm <sup>3</sup> ) (valem 2)	Mass (g)	Tihedus (g/cm <sup>3</sup> ) (valem 3)	Veevaru (mm) (valem 4)	Suhteline veesisaldus (%) (valem 5)	Kommentaar
1	6487411,208; 656749,4	72,177	11	261,341	27,154	0,104	11,44	10,4	9 cm torus; 1,5 cm jääd proovi põhjas
2	6487416,396; 656821,393	61,859	6	142,55	20,688	0,145	8,70	14,5	
3	6487464,418; 656873,529	61,146	16	380,133	78,818	0,207	33,12	20,7	maa ja vee piiril
4	6487456,822; 656898,6	60,944	4	95,033	16,317	0,172	6,88	17,2	järve jääl
5	6487430,814; 656909,194	60,937	3	71,275	12,035	0,169	5,07	16,9	järve jääl
6	6487401,46; 656941,131	61,908	8	190,066	30,15	0,159	12,72	15,9	
7	6487358,967; 656932,089	60,974	6	142,55	33,448	0,235	14,10	23,5	järve jääl
8	6487318,754; 656925,419	60,958	6	142,55	27,663	0,194	11,64	19,4	järve jääl
9	6487323,441; 656896,407	60,973	6	142,55	31,213	0,219	13,14	21,9	järve jääl
10	6487352,696; 656901,375	60,983	6	142,55	28,616	0,201	12,06	20,1	järve jääl
11	6487361,714; 656876,531	60,923	6	142,55	30,341	0,213	12,78	21,3	järve jääl
12	6487351,344; 656870,989	60,937	1	23,758	1,607	0,068	0,68	6,8	järve jääl, uisurada
13	6487414,613; 657005,193	60,249	18	427,649	119,433	0,279	50,22	27,9	kahekihiline - peal kohev
14	6487403,533; 657027,374	59,635	20	475,166	125,455	0,264	52,80	26,4	kahekihiline - peal kohev
15	6487396,336; 657037,562	59,507	15	356,374	80,242	0,225	33,75	22,5	
16	6487357,406; 657032,204	62,656	9	213,825	53,342	0,249	22,41	24,9	
17	6487330,147; 657019,49	66,994	7	166,308	67,066	0,103	28,21	40,3	
18	6487227,627;	77,492	23	546,441	179,027	0,328	75,44	32,8	22 cm torus;

	656997,507								1 cm jääd proovi põhjas
19	6487160,924; 656940,935	89,505	12	285,1	78,844	0,277	33,24	27,7	
20	6487193,665; 656862,136	87,356	7	166,308	30,968	0,186	13,02	18,6	
21	6487176,071; 656805,568	85,216	9	213,825	38,351	0,179	16,11	17,9	
22	6487206,606; 656759,317	84,122	7	166,308	21,127	0,127	8,89	12,7	
23	6487228,354; 656736,367	83,850	28	665,232	53,079	0,080	22,40	8	9 cm torus; 19 cm proovi põhjas firnjas
24	6487205,818; 656688,199	80,372	40	950,332	303,562	0,319	127,60	31,9	
25	6487235,49; 656875,928	79,822	15	356,374	82,551	0,232	34,80	23,2	0,5 cm jääd proovi põhjas
26	6487226,523; 656906,499	79,127	14	332,616	72,788	0,219	30,66	21,9	
27	6487245,581; 656934,345	71,581	13	308,858	69,447	0,225	29,25	22,5	
28	6487266,329; 656936,137	66,962	52	1235,431	450,264	0,364	189,28	36,4	
29	6487260,742; 656897,247	71,940	23	546,441	136,662	0,250	57,50	25	
30	6487274,971; 656884,641	70,106	19	451,408	87,778	0,194	36,86	19,4	
31	6487375,391; 656775,503	63,348	10	237,583	48,431	0,204	20,40	20,4	
32	6487380,288; 656737,463	72,545	9	213,825	47,019	0,220	19,80	22	
33	6487267,766; 656715,699	82,425	20	475,166	93,912	0,198	39,60	19,8	18 cm torus; 2 cm jääd proovi põhjas
34	6487264,644; 656673,266	80,977	22	522,682	108,144	0,207	45,54	20,7	
35	6487258,515; 656660,606	80,363	20	475,166	94,886	0,200	40,00	20	
36	6487314,648; 656685,01	79,991	13	308,858	32,888	0,106	13,78	10,6	8 cm torus; 5 cm jääd proovi põhjas
37	6487371,452; 656697,954	66,773	7	166,308	28,172	0,169	11,83	16,9	

38	6487438,97; 656676,756	74,186	11	261,341	50,193	0,192	21,12	19,2	
39	6487420,655; 656643,609	66,754	25	593,957	25,165	0,042	10,50	4,2	Tegelik lume paksus 14 cm, mille all 11 cm sügavune õhukamber lamandunud kõrrelistel
40	6487382,814; 656618,101	66,904	22	522,682	109,845	0,210	46,20	21	
41	6487385,371; 656602,758	66,353	24	570,199	60,221	0,106	25,44	10,6	Tegelik lume paksus 8 cm, mille all 17 cm sügavune õhukamber lamandunud kõrrelistel
42	6487409,724; 656594,521	66,433	13	308,858	62,757	0,203	26,39	20,3	
43	6487420,438; 656585,621	71,408	12	285,1	37,017	0,130	15,60	13	12 cm torus; 2 cm jääd proovi põhjas
44	6487401,928; 656545,437	74,496	12	285,1	56,842	0,199	23,88	19,9	
45	6487419,803; 656503,318	74,859	15	356,374	68,056	0,191	28,65	19,1	
46	6487379,17; 656491,9	74,781	18	427,649	96,025	0,225	40,50	22,5	
47	6487346,888; 656484,533	73,828	6	142,55	18,763	0,132	7,92	13,2	
48	6487344,746; 656511,732	74,636	15	356,374	76,729	0,215	32,25	21,5	
49	6487332,11; 656542,966	71,895	28	665,232	93,477	0,141	39,48	14,1	
50	6487320,497; 656591,282	68,405	9	213,825	37,117	0,174	15,66	17,4	

## Lisa 6. Lumekarakteristikud 20240222

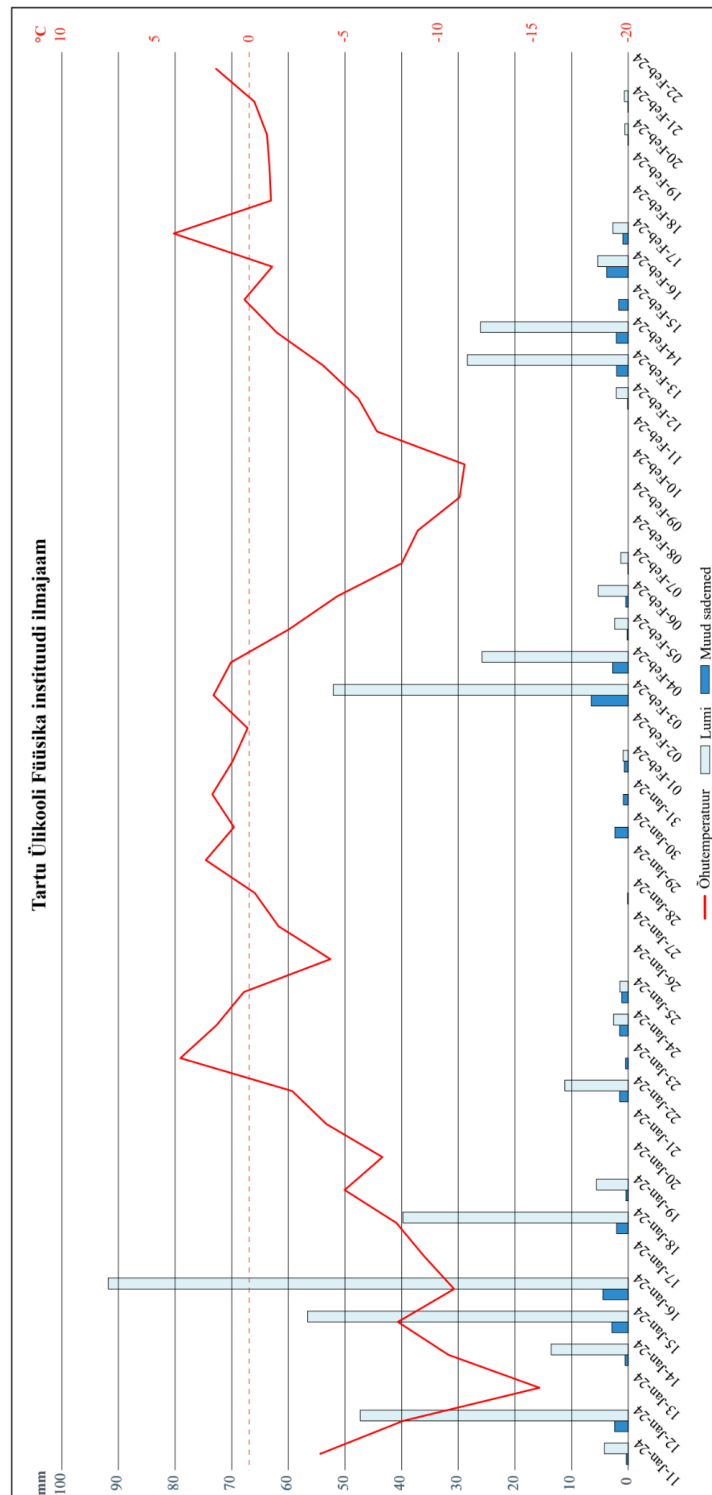
Pnt	X; Y	H	Lumikatte paksus (cm)	Ruumala (cm <sup>3</sup> ) (valem 2)	Mass (g)	Tihedus (g/cm <sup>3</sup> ) (valem 3)	Veevaru (mm) (valem 4)	Suhteline veesisaldus (%) (valem 5)	Kommentaar
1	6487416,416; 656728,479	72,237	24	570,199	156,409	0,274	65,83	27,4	
2	6487401,265; 656732,884	72,036	19	451,408	124,542	0,276	52,42	27,6	
3	6487367,214; 656726,118	73,114	16	380,133	51,373	0,135	21,62	13,5	11 cm torus; 5 cm jäist firmjat lund all
4	6487361,841; 656749,943	70,902	5	118,791	21,196	0,178	8,92	17,8	
5	6487351,696; 656789,875	61,715	19	451,408	100,81	0,223	42,43	22,3	
6	6487375,045; 656792,683	61,313	23	546,441	142,945	0,262	60,16	26,2	
7	6487371,625; 656813,073	61,09	5	118,791	35,231	0,297	14,83	29,7	järve jääl
8	6487370,241; 656825,992	61,086	3	71,275	19,263	0,270	8,11	27,0	järve jääl
9	6487336,441; 656851,691	61,039	7	166,308	49,067	0,295	20,65	29,5	järve jääl
10	6487322,957; 656882,663	61,06	4	95,033	20,373	0,214	8,58	21,4	järve jääl
11	6487326,049; 656911,042	61,049	5	118,791	31,207	0,263	13,14	26,3	järve jääl
12	6487300,981; 656929,469	61,082	5	118,791	37,544	0,316	15,80	31,6	järve jääl
13	6487346,259; 656954,35	61,072	2	47,517	13,34	0,281	5,62	28,1	järve jääl
14	6487350,873; 656971,068	61,093	2	47,517	9,93	0,209	4,18	20,9	järve jääl
15	6487418,421; 656896,028	61,078	2	47,517	17,459	0,367	7,35	36,7	
16	6487447,15; 656890,67	61,067	1	23,758	2,333	0,098	0,99	9,8	
17	6487491,611; 656931,621	57,99	31	736,507	209,233	0,284	88,07	28,4	pehme soomuld proovi põhjas
18	6487479,22; 656934,959	59,156	24	570,199	120,234	0,211	50,61	21,1	

19	6487390,128; 656981,403	63,298	25	593,957	54,532	0,092	22,95	9,2	10 cm torus; 15 cm jäist firnjat lund all
20	6487407,824; 656995,716	61,25	30	712,749	121,116	0,170	50,98	17,0	15 cm torus; 15 cm jäist firnjat lund all
21	6487437,367; 656983,273	59,612	19	451,408	82,366	0,182	34,67	18,2	10 cm torus; 9 cm jäist firnjat lund all
22	6487443,367; 657008,744	58,529	10	237,583	55,577	0,234	23,39	23,4	
23	6487450,788; 657023,601	57,598	17	403,891	102,963	0,255	43,34	25,5	
24	6487464,174; 657011,169	57,114	14	332,616	85,515	0,257	35,99	25,7	
25	6487273,16; 656998,843	71,853	19	451,408	114,988	0,255	48,40	25,5	16 cm torus; 3 cm jääd
26	6487282,516; 656995,371	70,333	2	47,517	14,657	0,308	6,17	30,8	
27	6487286,635; 656906,669	65,101	30	712,749	115,171	0,162	48,48	16,2	19 cm torus; 11 cm jäist firnjat lund all
28	6487291,4; 656896,339	65,434	26	617,716	88,282	0,143	37,16	14,3	14 cm torus; 12 cm jäist firnjat lund all
29	6487302,905; 656900,415	62,214	18	427,649	86,005	0,201	36,20	20,1	14 cm torus; 4 cm jääd all
30	6487260,44; 656903,3	71,172	23	546,441	74,134	0,136	31,20	13,6	13 cm torus; 10 cm jäist firnjat lund all
31	6487199,538; 656883,981	87,468	9	213,825	32,716	0,153	13,77	15,3	
32	6487251,343; 656770,085	83,843	24	570,199	179,175	0,314	75,42	31,4	17 cm torus; 7 cm jäist firnjat lund all
33	6487259,306; 656777,059	78,36	12	285,100	41,906	0,147	17,64	14,7	7 cm torus; 5 cm jäist firnjat lund all
34	6487191,588; 656799,14	85,484	17	403,891	94,927	0,235	39,96	23,5	
35	6487191,798; 656811,662	86,046	23	546,441	180,054	0,330	75,79	33,0	
36	6487195,254; 656674,422	79,738	18	427,649	49,49	0,116	20,83	11,6	10 cm torus; 8 cm jäist firnjat lund all
37	6487261,151;	82,667	27	641,474	148,867	0,232	62,66	23,2	22 cm torus;

	656713,475								5 cm jäist firnjat lund all
38	6487238,088; 656649,64	79,652	31	736,507	168,82	0,229	71,06	22,9	23 cm torus; 8 cm jäist firnjat lund all
39	6487255,482; 656615,533	78,56	22	522,682	127,742	0,244	53,77	24,4	
40	6487267,904; 656600,604	77,746	29	688,991	158,415	0,230	66,68	23,0	
41	6487297,393; 656581,134	72,2	46	1092,882	239,155	0,219	100,66	21,8	
42	6487329,558; 656543,336	71,998	38	902,815	221,313	0,245	93,15	24,5	
43	6487405,356; 656518,606	74,864	23	546,441	146,841	0,269	61,81	26,9	
44	6487354,905; 656547,046	66,561	25	593,957	150,835	0,254	63,49	25,4	
45	6487370,669; 656558,678	66,465	30	712,749	186,339	0,261	78,43	26,1	
46	6487388,138; 656569,589	66,405	35	831,540	221,862	0,267	93,38	26,7	
47	6487378,245; 656615,647	66,951	30	712,749	207,624	0,291	87,39	29,1	
48	6487325,712; 656610,513	68,014	20	475,166	122,023	0,257	51,36	25,7	
49	6487359,155; 656661,147	66,788	12	285,100	83,747	0,294	35,25	29,4	
50	6487383,817; 656672,952	66,786	11	261,341	84,887	0,325	35,73	32,5	

## Lisa 7. Tartu kliimadiagramm

Õöpäevased sademed ja kell 12:00 päeval mõõdetud õhutemperatuur Tartu Ülikooli Füüsika instituudi ilmajaamas, mis on Lähtelt linnulennult 15 km. (NB! Sadanud lume korral on tegemist tuletatud parameetriga). Andmed pärinevad Tartu Ülikooli Füüsika instituudi ilmajaama arhiivist (Tartu Ülikooli Füüsika instituudi ilmajaama internetileheküljel, külastatud 15.05.2024).



Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina,

**Tiia-Linda Purge**

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose  
**Lumikatte paksuse kaardistamine ja lume omaduste mõju UAV-LiDAR  
mõõdistustäpsusele mitmekesisel maastikul,**

mille juhendajad on **PhD Raivo Aunap ja PhD Marko Kohv**

reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada, sealhulgas lisada digitaalarhiivi DSpace kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.

2. Annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace kaudu Creative Commons'i litsentsiga CC BY NC ND 4.0, mis lubab autorile viidates teost reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.

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

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

Tiia-Linda Purge

27.05.2024