



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
EESTI MEREAKADEEMIA
merehariduskeskus

Andriana Pikulova

Pakri pankranniku muutuste analüüs lidar andmete põhjal

Lõputöö

Juhendaja: Dotsent Inga Zaitseva-Pärnaste

Tallinn 2023

Olen koostanud töö iseseisvalt.

Töö koostamisel kasutatud kõigile teiste autorite töödele,
olulistele seisukohtadele ja andmetele on viidatud.

Andriana Pikulova

(allkirjastatud digitaalselt, kuupäev digiallkirjas)

Üliõpilase kood: 192952VDVR

Üliõpilase e-posti aadress: anpiku@ttu.ee

Juhendaja Dotsent Inga Zaitseva-Pärnaste:

Töö vastab lõputööle esitatud nõuetele

(allkirjastatud digitaalselt, kuupäev digiallkirjas)

Kaitsmiskomisjoni esimees Dotsent Inga Zaitseva-Pärnaste

Lubatud kaitsmisele

(allkirjastatud digitaalselt, kuupäev digiallkirjas)

Sisukord

Annotatsioon.....	5
Kasutatud lühendid.....	6
Sissejuhatus	7
1 Ranniku muutuste seire ja meetodite kirjeldus.....	8
1.1 Ranniku muutuste seire Eestis ja välismaal.....	8
1.1.1 Ranniku seire välismaal.....	10
1.2 Ranniku muutuste seire meetodid.....	11
1.2.1 Fotogramm-meetria	11
1.2.2 Lidar	13
1.2.3 Lidari ja fotogramm-meetria võrdlus	14
1.3 Andmed ja tarkvarad	17
2 Lidari meetodika kasutamine Pakri pankranniku muutuste seireks	18
2.1 Pakri poolsaar ja selle iseloomustus	18
2.1.1 Objekti asukoht.....	18
2.1.2 Põhilised probleemid ja varasemad uuringud.....	19
2.2 Ajaloolised lidar andmed.....	20
2.2.1 Klassifitseerimise vead.....	22
2.2.2 Meta andmed	22
2.2.3 Andmetöötlus	23
2.2.4 Profiilid.....	27
2.3 Pankranniku muutuste analüüs	27
2.3.1 Aastate jooksul toimunud muutuste analüüs	27
2.3.2 Pikaajalised muutused	28
3 Tulemused	30
Kokkuvõte	38
Summary.....	39
Viidatud allikad	41
Lisa 1. Profiilide skeem.....	44
Lisa 2. 2009. ja 2012. aasta võrdluskaart	45
Lisa 3. 2012. ja 2016. aasta võrdluskaart	46
Lisa 4. 2016. ja 2018. aasta võrdluskaart	47
Lisa 5. 2018. ja 2020. aasta võrdluskaart	48

Lisa 6. 2020. ja 2021. aasta võrdluskaart	49
Lisa 7. 2021. ja 2022. aasta võrdluskaart	50
Lisa 8. 2009. ja 2022. aasta võrdluskaart	51
Lisa 9. Profiil 1 tabel	52
Lisa 10. Profiil 2 tabel	53
Lisa 11. Profiil 3 tabel	54
Lisa 12. Profiil 4 tabel	55
Lisa 13. Profiil 5 tabel	56
Lisa 14. Profiil 6 tabel	57
Lisa 15. Profiil 7 tabel	58
Lisa 16. Profiil 8 tabel	59
Lisa 17. Profiil 9 tabel	60
Lisa 18. Profiil 10 tabel	61
Lisa 19. Profiil 11 tabel	62
Lisa 20. Profiil 12 tabel	63

Annotatsioon

Käesolev lõputöö tutvustab lidar meetodi kasutust Pakri pankranniku erosiooni uurimiseks.

Töö eesmärgiks on analüüsida Pakri pankranniku muutusi lidar andmete põhjal. Ühtlasi annab see ülevaate aerolaserskaneerimise meetodi kasutusest ning selle täpsusest.

Antud lõputöö on jaotatud kolmeks osaks. Kõigepealt uuritakse ranniku seire kohta ning kirjeldatakse seiremeetodeid. Teises osas tutvustatakse Pakri poolsaart ja sealseid probleeme. Samuti töödeldakse aerolaserskaneerimise andmeid ning nende põhjal luuakse kaardid, mida ka analüüsitakse. Lisaks andmete täpsuses veendumiseks analüüsiti lähemalt rannikul uuritava ala profiile.

Tulemustes kajastati võrdluskaartide abil, kui palju oli rannik muutunud pindala poolest. Muutused mis rannikul toimusid oli keskmiselt 23 m² piires. Lisaks olid tehtud rannikule profiilid, et veenduda andmete täpsuses võttes arvesse väiksemat ala (50m). Ranniku ristlõigete põhjal loodud graafikute analüüsimisel tuli välja, et rannik on aastate (2009-2022) jooksul kulunud.

Tulemuste analüüsil tekkisid andmetes anomaaliaid, mis olid ilmselt põhjustatud ebatäpsete algandmete või vigase andmetöötluse tõttu.

Töö võib olla kasulik inimesele, kes sooviks rakendada ranniku uurimiseks lidar meetodit ning töödelda andmeid ArcGIS PRO tarkvaras. Samuti võib töö pakkuda huvi inimesele, kes soovib teada, mis mahus Pakri pankrannik taandub.

Lõputöö on kirjutatud eesti keeles ning sisaldab teksti 33 leheküljel, 3 peatükki, 16 tabelit, 27 joonist.

Märksõnad: *Pakri pankrannik, LiDAR, fotogramm-meetria, ArcGIS PRO, erosioon*

Kasutatud lühendid

ASL	Aerolaserskaneerimine
CAD	Arvutipõhine disain
Close range	Lähedalt
DTM	Digitaalne pinnamudel
GIS	Geograafiline infosüsteem
GNSS/INS	Globaalne satelliit navigatsiooni süsteem/ inertsiaalne navigatsiooni süsteem
GPS	Globaalne positsioneerimise sateliitnavigatsioon
HELCOM	Helsingi komisjon ehk Läänemere merekeskkonna kaitse komisjon
IMU	Inertsiaalne mõõtühik, seade mis suudab mõõta ja edastada selle objekti erikaalu ja nurkkiirust, mille külge on see kinnitatud.
LAS	laserskaneerimine
LAZ	Laserskaneerimise andmete vorming
LiDAR	Light detection and ranging ehk valguse tuvastamine ja ulatuse määramine
Medium	Sekkuv aine, näiteks õhk, mille kaudu mõjub või tekib mõju.
Sälk	Ranniku sisse raiutud või lõigatud väike kitsas süvend; V-kujuline koht ranniku sees, ääres
TOF	Vahemaa läbimiseks kuluva aja mõõtmine, et määrata kaugus, kiirus või omadused
UAV	Unmanned ariel vehicle/ Mehitamata õhusõiduk
WMS	Web Map Service

Sissejuhatus

Käesoleva lõputöö teemaks on Pakri pankranniku muutuste analüüs lidar andmete põhjal. Pakri pankranniku kulumine on viimastel aastatel olnud aktuaalne probleem ning sealse erosiooni tuvastamiseks on antud töös uuritud Maa-ameti lidar andmeid, et kirjeldada pankranniku pikaajalised muutused. Antud töö aitab anda ülevaate laserskaneerimise meetodi kasutamisest ja erosiooni suuruselt.

Pakri poolsaar (varasema nimega Leetse poolsaar) asub Mandri-Eesti loodeosas Põhjarannikul Pakri Lahe ja Lahepere lahe vahel. Poolsaar on üks Põhja-Eesti lavamaa merre ulatuvatest osadest. (Kuiva, 2023). See on avatud kolmest suunast (lääs, ida ja põhi), mis tähendab, et see on vastuvõtlikum tormidele ja merelainetusele. Eelmainitud ilmastikutingimused aga nõrgestavad panka, mille tulemusena muutub see varinguohtlikuks. Samuti poolsaarele ehitatud taristud on ohustatud pideva erosiooni tõttu.

Töö eesmärgiks on analüüsida Pakri pankranniku pikaajalisi muutusi lidar andmete põhjal. Samuti on eesmärgiks veenduda, kas kasutatav meetod on sobilik rannikute uurimiseks.

Esmalt kirjeldatakse lõputöös, kuidas uuritakse rannikute muutusi Eestis ja välismaal. Seejärel antakse ülevaade Pakri poolsaarest ning sealsetest probleemidest ja selle kohta tehtud varasematest uuringutest. Töös kirjeldatakse põhjalikult lidar andmete töötlemine kasutades ArcGIS Pro tarkvara ning selle tulemusel analüüsitakse loodud kaarte. Pankranniku muutuste tuvastamiseks uuritakse nii lidari põhjal koostatud DTM (digitaalne pinnamudel), kui ka DTM-le tekitatud profiile, mis olid tehtud mööda pankranniku kõige aktiivsema dünaamikaga äärt. Töö viimases peatükis tuuakse välja antud töö tulemused ja nendest tulenevad järeldused.

1 Ranniku muutuste seire ja meetodite kirjeldus

Antud peatükis annab autor ülevaate ranniku muutuste seirest nii Eestis kui ka välismaal, valitud meetoditest ja nende võrdlusest. Lisaks kirjutab autor andmetest ja andmetöötluseks kasutatavatest tarkvaradest.

1.1 Ranniku muutuste seire Eestis ja välismaal

Rannik on randla koos seda piirava maismaa ja merega. Rannikuid klassifitseeritakse tekke, pinnamoe ja rannajoone järgi, näiteks laheline ja laguunrannik. Ranniku maapoolseks piiriks loetakse lahepärasid ning merepoolseks piiriks poolsaarte tippe või rannikusaarestiku välissaari ühendavat joont. Rannikuks loetakse HELCOM-i andmetel ca 3 km pikkust maismaa- ning 300 m laiust rannikumere vöödet (Orviku, 2018).

Üks põhiliseks ning suurimaks ranniku mõjutajaks, nii maailmas, kui ka Eestis, on lainetuse intensiivsus, mis omakorda oleneb tsüklonite aktiivsusest. Tsüklonite järsu aktiivsuse kasvu on põhjustanud omakorda globaalne soojenemine (Orviku, 2018; Zaitseva-Pärnaste, 2013). Lainetuse mõjul toimuvad ranniku kulumisprotsessid, mida nimetatakse erosiooniks. (Zaitseva-Pärnaste, 2013). Ranniku erosioon on geoloogiline protsess, mis erinevate tegurite mõjul (näiteks lained, tuul, hoovused, merejää, inimtegevus ja taimestik) pidevalt kujundab ümber rannajoont (Keskkonnaamet, 2013). See geoloogiline protsess võib põhjustada märkimisväärset kahju hoonetele, infrastruktuuridele, kommunaalteenustele ja ökosüsteemidele (Yi-Chun Lin, 2019).

Eesti mererannik on umbes 4000 km pikk. Ranniku arengut mõjutab ning kujundab maakoore tõus, avatus lainetusele ning setete ja vana pinnamoe mitmekesisus. Eestis esineb 8 tüüpi randlaid: pank-, astangu-, pae-, moreen-, kruusa ja veeristiku-, liiva-, mölli- ning tehisrandla (Orviku, 2018; Entsüklopeedia, Eesti rand, rannik ja saared, 2023).

Eestit mõjutab Läänemere veetaseme tõus (ajuvesi) ning lainetus, mis on aastakümnete jooksul suurenenud (Orviku, 2018). Läänemerd iseloomustab tema suhteliselt väike pindala, keeruline geomeetria, vahelduv tuuleväli, aeg-ajalt karmid lainetingimused, spetsiifilised laine levimise omadused ja jääkate esinemine suurel osal aastast. Peamised lainevälja kujundajad Läänemerel on tuul ja selle geomeetria (Soomere & Zaitseva, 2007).

Rannikuid jälgitakse põhiliselt kaartide ja välitöödel kogutud andmete vaatlemis meetodiga. Klassikaline randla koosneb kahest suurest ning teineteisega tihedalt seotud piirkonnast, milleks on maismaaline rand ja merealune rannanõlv. Esmalt uuritakse maismaaosa, kuna see on dünaamiline ehk pidevalt muutuv ning kergesti ligipääsetav. Veealust põhja on aga keerulisem mõõdistada, kuna uurimisläve süvis on liiga suur madalmerre sõitmiseks. Maismaaosa vaatlemiseks kasutatakse erinevaid passiivseid ja aktiivseid seadmeid, millega teostatakse geomorfoloogilisi uuringuid. Esmalt kasutatakse mõõtmisaparatuuri nagu sateliitnavigatsioonisüsteeme, mis on seotud maapealsete baasjaamadega, mis tuginevad positsioneerivatele mõõteseadmetele (RTK-GPS). RTK-GPS-iga fikseeritakse maismaa väikseid muutusi nii horisontaal kui ka vertikaalskaalal. Passiivseteks seadmeteks on optilised ja laseroptilised seadmed (nivelliirid, teodoliidid, LIDAR ja digitaalkaamerad jm) ning aktiivseteks seadmeteks loetakse akustilisi seadmeid (nt. geolokaator ja külgvaatesonar) (Orviku, 2018; Kont Are, 2011).

Tänapäeval on kasutusel palju erinevaid meetodeid, mida rakendatakse rannikuala muutuste tuvastamiseks - näiteks pankrannikuid saab mõõdistada droonidega, mille küljes on optilised laserid või kaamerad. Eesti rannikut ja selle muutusi jälgitakse pidevalt, näiteks 2019. aastal uuriti Saaremaal kahte rannikut: Panga pank ja Ohessaare pank. Uuritavatel pankadel fikseeriti muutuste asukohta mobiilse GPS seadmega ja jäädvustati neid peegelkaameraga. Uuringu eesmärgiks oli hinnata mõlemat pank mõjutavate astangute murrutuste intensiivsust, inimeste ohutust, looduskaitse ja turismiga seonduvaid vaatenurki ning mõjutavate tegurite olulisust (inimtegevus ja loodusliktegevus). Kirjeldatud eesmärkide täitmiseks analüüsiti Maa-ameti aluskaarte WMS teenusena (ortofotod, reljeef, ajaloolised ortofotod ja kaardid) ja samuti tellija poolt saadud kaarte ning teaduskirjandust. Kaartide vaatluseks kasutati QGIS tarkvara. Lisaks peeti nõu geoloogi Kaarel Orvikuga (Hints, 2019).

Uuringute lõpus jõuti järelduseni, et Panga pank ei vaja erakordset hooldamist, kuid seal on keelatud majandustegevus ja loodusvarade kasutamine. Samuti ei tohi seal ehitada ning kaitseala valitseja loata on keelatud kivide, mineraalide ning sette- ja kivimproovide kogumine (Hints, 2019).

Ohessaare panga puhul on keelatud selle lõhkumine, kivimite ja mineraalide kogumine, majandustegevus, telkimine ning lõkete tegemine (Hints, 2019).

1.1.1 Ranniku seire välismaal

Välismaal kogub populaarsust lidar seadmetega ranniku uurimine, kuna see on vähem ajakulukas ning annab detailsemaid tulemusi taimestikust, hoonetest ning maapinnast. Lidar ehk laserskaneerimist saab rakendada kahel moel - on õhusõidukile kinnitatud lidar või maapealne lidar. Näiteks, 2019. aastal avaldatud artiklis (Yi-Chun Lin, 2019) kus hinnati rannikukeskkonna kaardistamist UAV-ga, millel oli lisaks laserskanner. Eesmärgiks oli tõestada mehitamata lidari võimet kaardistada erinevaid rannikuid ning võrrelda punktpilvede kvaliteeti pildipõhiste pilvedega. Artiklis kasutati UAV-põhist mobiilset kaardistamissüsteemi, mis kogus samaaegselt lidar-andmeid ja ortofotosid. Lende tehti droonile kinnitatud laserskanneriga ja kaameraga. Uuringud viidi läbi Türgis Dana saare rannikul ning Ameerika Ühendriikide, Indianas asuv Lõuna-Michigani järve rannajoonel, kuna seal on täheldatud kiireid ranniku muutusi, mis ohustavad randasid ning sealseid infrastruktuure. (Yi-Chun Lin, 2019)

Türgis, oleva saare rannajoone pikkuseks oli 1,7 km. Viie lennuga kogus UAV lidar andmeid, RGB pilte ning GNSS/INS trajektoore. (Yi-Chun Lin, 2019)

Lõuna-Michigani järve ääres seirati kahte randa: Dune Acres ning Beverly Shores, mille pikkuseks oli 450 meetrit ja 340 meetrit. Seitsme lennuga kogus UAV lidar andmeid, RGB pilte ning GNSS/INS trajektoore.

Andmeid töödeldi samas eritarkvaras, kasutades matemaatilisi valemeid. Tulemused näitasid, et lidar on parem meetod, mida kasutada ranniku seiramiseks, kuna skanneri kiired suudavad tungida läbi taimestiku. Samuti võimaldas lidar suurema pinna katta ning oli täpsem kui fotogrammeetria meetod (Yi-Chun Lin, 2019).

Maapealseid lidareid kasutatakse taimkatte ja biomassi hindamiseks, samuti ehitiste jälgimiseks. Rannikul saab selle seadmega jälgida kalju struktuuri muutusi. Eelnevalt on uuritud ülalpool väljatoodud protsessi vaatlusmeetodiga ning kaljudesse tekkinud sälkude suurusi on mõõdetud kaugusmõõtjaga või latiga. Kui pole võimalik rannikut uurida lähemalt siis toimub rannikute muutuste mõõtmine *in situ* meetodiga (Terefenko, Dalyot, Boski, & Pinheiro Lima-Filho, 2018).

2018. aasta artiklis (Terefenko, Dalyot, Boski, & Pinheiro Lima-Filho, 2018) uuriti maapealse laserskanneriga kivirannikutele tekkinud sälke ehk vertikaalseid sisselõikeid. Artikli eesmärk oli tuvastada kaljusse tekkinud sälkude tüüpe laserskanneri seadmega. Uuring viidi läbi Lõuna Portugalis, Algarve piirkonnas 200 meetri pikkusel rannikul, Carvalho rannas. Antud piirkond

valiti selletõttu, kuna seal leidub rannikukaljused, koopaid ning ranniku kulumist. Samuti seelses keskkonnas on lainete kõrgus 1,3 meetrit ning loodete ajal tõuseb laine kõrgus keskmiselt kolme meetrini. Mõõdistused uuritavast kaljust teostati Leica Scan Station 2 lasersüsteemiga. Sobiv kaugus valiti nii, et uuritav objekt jääks seadme vaatevälja terviklikult. Seade oli paigaldatud idapoolsesse kalju tippu statiiviga. Kasutatav skanner salvestas, klassifitseeris ja määras andmetel täpseid koordinaate. Kogutud andmetest loodi 3D mudelid GIS tarkvaras, et uurida lähemalt sisselõigete mõõtmeid. Tulemused näitasid, et isegi kui esineb maapealse skanneriga probleeme, suudab seade ikkagi klassifitseerida ning määrata täpsed parameetrid kaljus olevatele sälkudele. Kasutatav meetod suudab visualiseerida detailset infot antud sälkudest (suurus, kuju jne) ning jälgida selle muutust kogu sisselõike pikkuses (Terefenko, Dalyot, Boski, & Pinheiro Lima-Filho, 2018).

1.2 Ranniku muutuste seire meetodid

Ranniku seiramiseks kasutatakse tänapäeval kaugseire erinevaid tehnoloogiaid, kõige levinumad nendest on fotogramm-meetria, satelliit pildistamine ning laser skaneerimine (Lidar). Enne ranniku uurimist on vaja kindlaks teha, milline meetod sobib vaatluse all oleva objekti jaoks. Tihti neid meetodeid kombineeritakse, et saada uuritud objektist täpsemad tulemused.

Autori fookuses on kaks rannikumuutuste seire meetodit: fotogramm-meetria ja laserskaneerimine. Antud alapeatükis tuuakse välja mõlema meetodi positiivsed ja negatiivsed küljed.

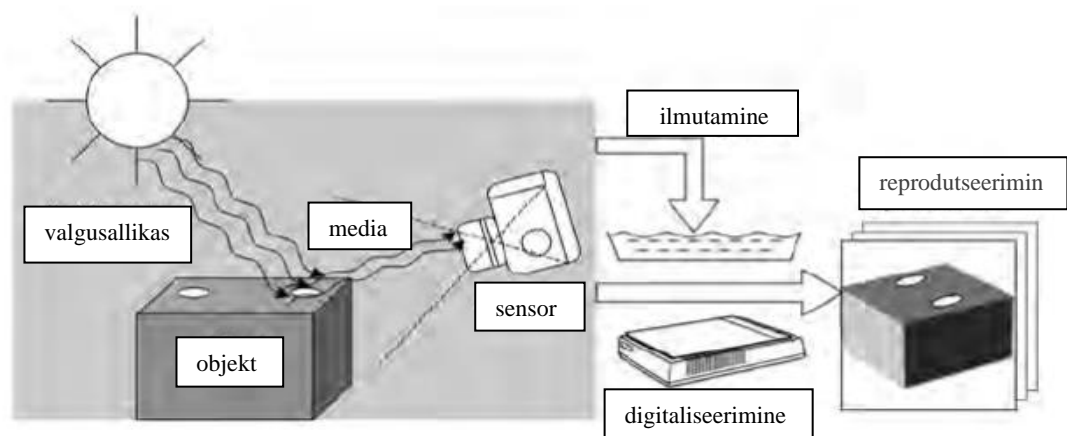
1.2.1 Fotogramm-meetria

Fotogramm-meetria on kunst ja teadus, mille abil eraldatakse piltidelt 3D andmeid (Autodesk, 2023). Seda meetodit kasutatakse mõõtmisteholoogias, matemaatikas, füüsikas, infoteaduses ning bioloogias. Samuti on fotogramm-meetria tihedalt seotud arvutigraafikaga, digitaalse pilditöötlemisega, arvutipõhiste projekteerimisega (CAD), geograafiliste infosüsteemidega (GIS) ja kartograafiaga. (Luhmann, 2006)

Info kogumise protsess hõlmab kattuvate fotode tegemist objektidest või struktuuridest, kui need võimaldavad fotograafilist salvestamist. Fotogramm-meetria võimaldab luua objektidest kahemõõtmelisi ja kolmemõõtmelisi mudeleid. Kahemõõtmeliste mudelite puhul kasutatakse kahte koordinaati (pildid, joonised ja kaardid) ning kolmemõõtmeliste mudelite puhul kolme koordinaati (koordinaadid ja geomeetriselised elemendid). Need objekti osad, mis puuduvad piltidel

pole võimalik rekonstrueerida. See võib olla tingitud varjudest, kontrasti puudumisest või suuruse piiramisest. Samuti põhjustavad objekti geomeetrilisi muutusi objekti kuju, kaamera kaugus objektist ning optilise läätse viga (Luhmann, 2006).

Tähtis on aru saada, enne objekti rekonstrueerimist pildiks või kujutiseks optilistest protsessidest, mille tõttu on pilt loodud. Selles protsessis osalevad valgusallikas; objekti pinna omadused; *medium*, mille läbi liigub valguskiirgus; sensor ja kaamera; pildi töötlus; filmi ilmutamine ja edaspidine töötlemine. Kirjeldatud protsess on kujutatud Joonis 1.



Joonis 1. Objektist pildiks loomise protsess (Luhmann, 2006).

Fotogramm-meetria on liigitatud erinevateks kategooriateks kaamera asukoha ja objekti kauguse liigituste järgi:

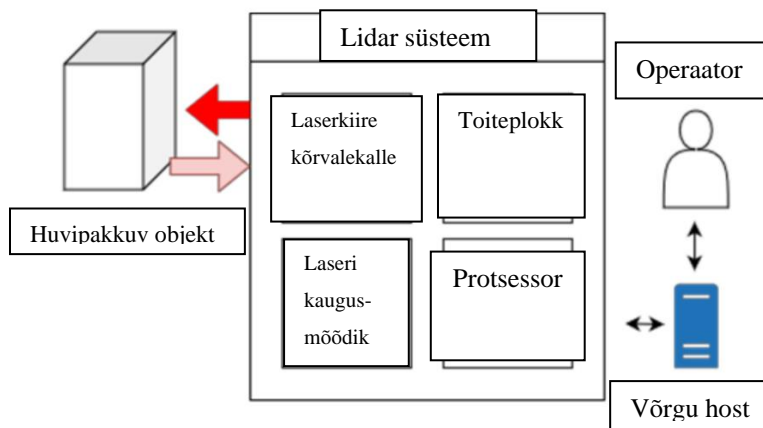
- Satelliit fotogramm-meetria – satelliit piltide töötlus, mõõdistus kaugus umbes 200 km (Luhmann, 2006);
- Aerofotogramm-meetria – aerofotode töötlemine, mõõdistus kõrgus umbes 300 m (Luhmann, 2006);
- Terrestrial fotogramm-meetria – mõõdistused teostatakse fikseeritud seisust (Luhmann, 2006);
- Close range fotogramm-meetria – mõõdistuse läbiviimise kõrgus/kaugus umbes 300 m (Luhmann, 2006);
- Makro fotogramm-meetria – pildi skaala > 1 (mikroskoopfotograafia) (Luhmann, 2006).

1.2.2 Lidar

LiDAR on kaugseire meetod, mida kasutatakse objektide või nähtuste info hankimiseks kasutades impulsslaserit. Põhiliselt mõõdetakse kaugust seadmest objektini, ehk seade mõõdab laseri väljumise ja tagasi peegeldumise ajakulu (Raj, Hashim, Huddin, Ibrahim, & Hussain, 2020).

Suure kasutus nõudluse tõttu uuendatakse pidevalt lidari süsteemi ning modifitseeritakse seadme disaini, suurust, kaalu ja seadme võimsust (Raj, Hashim, Huddin, Ibrahim, & Hussain, 2020). Kõige levinumad laserskanneriga kasutatavad lennubahendid on lennukid ning helikopterid. Instrument ise koosneb üldiselt laserist, skannerist ning GPS vastuvõtjast (NOAA, 2023).

Lidar-süsteem koosneb neljast peamisest süsteemplokist: laser kaugusmõõdik, laserkiire kõrvalekalle, toiteplokk ja protsessor. Süsteemi diagrammi on kujutatud Joonis 2.



Joonis 2. Lidar süsteemi plokkdiagramm (Raj, Hashim, Huddin, Ibrahim, & Hussain, 2020)

Kui üks nendest süsteem plokkidest ei tööta, kaotab lidar oma funktsionaalsuse ning andmeid ei edastata (Raj, Hashim, Huddin, Ibrahim, & Hussain, 2020).

Lidar seadmed on klassifitseeritud teabe tüüpide kogumise funktsioonide kaupa- ruumiline, spektraalne ja ajaline. Peamine funktsioon lidaril on ruumiandmete kogumine ning selle info saamiseks kasutatakse *time of flight* mõõtmist (TOF). TOF funktsiooniga mõõtmised võimaldavad koguda ruumiandmeid, mis suudavad luua kolme liiki tulemusi (ühemõõtmelised, kahemõõtmelised, kolmemõõtmelised). Ruumiandmete kogumine on tähtis täpse 3D-mudeli koostamisel (Raj, Hashim, Huddin, Ibrahim, & Hussain, 2020).

Lidari teise klassi instrumendid mõõdavad materjali spektraalset teavet, näiteks laseri tagasipeegeldumise intensiivsust. Laseri tagasipeegeldumise intensiivsus on peegeldus, mis on

tingitud lidar seadme edastatud impulsi lainepikkusest ja sihtmaterjali toimest. Sellele klassile on iseloomulik mõõta materjalitüüp (Raj, Hashim, Huddin, Ibrahim, & Hussain, 2020).

Viimaseks on ajaline klassifikatsioon - see võimaldab jälgida dünaamilisi protsesse, milleks on taimede kasv või pinnase erosioon (Raj, Hashim, Huddin, Ibrahim, & Hussain, 2020). Seda meetodit rakendatakse näiteks maapealses lidaris (*Terrestrial Lidar*). Maapealne lidar vajab XYZ-koordinaate eelnevalt valitud punktidest maapinnal, et leida kaugus seadmest mõõdetud punktini (Takashi Oguchi, 2011). Antud meetodiga mõõdetakse ja uuritakse põhiliselt vegetatsiooni ja seda millimeetri täpsusega. Seadme laser suudab tungida läbi taimkate kuni pinnani ning eristada puid ning lehti (Disney, 2019).

1.2.3 Lidari ja fotogramm-meetria võrdlus

Fotogramm-meetria ja lidar meetodil on ühine eesmärk, milleks on uuritava objekti täpsete ruumiandmete kogumine.

Fotogramm-meetria eesmärk on luua objektist kolmemõõtmeline digitaalne mudel, mis kasutab kolme koordinaati (koordinaadid ja geomeetrised elemendid) või kahemõõtmeline ehk graafiline mudel, mis kasutab kahte koordinaati (pildid, joonised, kaardid) (Luhmann, 2006).

Lidarid võimaldavad koguda ruumiandmeid, mis suudavad luua kolme liiki tulemust-ühemõõtmelised, kahemõõtmelised ja kolmemõõtmelised (Raj, Hashim, Huddin, Ibrahim, & Hussain, 2020).

Fotogramm-meetria ning Lidar võrdluse andmed kajastatakse Tabel 1.

Tabel 1. Fotogramm-meetria ja Lidari võrdlus (Terefenko, Dalyot, Boski, & Pinheiro Lima-Filho, 2018; Yi-Chun Lin, 2019; Torkan Masoud, 2023; Assenbaum, 2018; Pirotti, Piragnolo, Vettore, & Alberto, 2022; Doumit, 2021; Torres, 2023; MAPSCAPING, 2022)

Andmete kogumise meetod	Fotogramm-meetria	Lidar
Meetodi läbiviimise kirjeldus	Õhusõidukile paigaldatud kaamera; kaamera paigaldatakse statiivile või hoitakse ise käes.	Laserskannerit kasutatakse õhusõidukitel ning

		samuti maa peal, statiivile paigutades.
Kui suurt ala võimalik kaardistada ühe lennu jooksul [oleneb lendavast seadmest (lennuk, droon jne)]	10 km ²	10 km ² või 1000 km ²
Mis tehnikat vaja, et läbi viia mõõtmine	Kaamera, seade millele paigaldatakse (statiiv või õhusõiduk)	Laserskanner, GPS-vastuvõtja, õhusõiduk
Andmemaht ning tüüp	Andmeid on palju ning suuremahulised, mis koosnevad piltidest.	Andmeid on palju ning on laserpunktpilve kujul mis on seotud täpse asukohaga.
Tarkvara saadavus	Tarkvara valik suur ja avalik, lihtne kasutada Tasuta tarkvarad: Pix4D, PhotoScan, DroneDeploy, OpenDroneMap Tasulised tarkvarad: PIX4Dmapper, Agisoft Metashape	Tarkvara valik suur ja avalik, paremad tarkvarad on tasulised ning nende kasutamiseks on vaja väljaõpet. Tasuta tarkvarad: QGIS 3, Whitebox GAT, SAGA GIS Tasulised tarkvarad: ArcGIS Pro, LAStools
Andmete töötlemise kiirus (kiirus oleneb andmemahust)	Täiseraldusvõime saavutamiseks võtab töötlemine mitu tundi.	Olenevalt projekti suurusest võtab aega vähem kui tund või mitu päeva (suurema projekti puhul kui

		kasutatakse mehitamata õhusõidukit).
Täpsus (oleneb objekti suurusest, andmete kogumise kaugus):	Horisontaalne 1 cm Vertikaalne 2-3 cm	Horisontaalne 10 cm Vertikaalne 5 cm
Tundlikus keskkonna mõjudele	On tundlik varjude ja päiksekiirguse ning peegeldumise suhtes, mille tõttu võib jääda andmeid puudu.	Mõõtmisi saab läbi viia nii päeval kui öösel. Suudab kaardistada taimkate kõrge vertikaalse täpsusega.
Tulemus	Ortomosaiik, 3D mudel, ortofotod, georefereeritud rasterkaardid, mis kujutavad ainult pealt vaadet.	3D mudel, millel on kujutatud realistlik maapinna mudel (kontuuride sügavus ning objektide kuju).
Tehnika maksumus	20 000\$ – 30 000\$ Primitiivsete süsteemide maksumus algab 8 000\$ – 10 000\$	60 000\$– 120 000\$

Esiteks saab antud Tabel 1 põhjal järeldada, et mõlema meetodi läbiviimisel saab kasutada nii õhusõidukit kui ka statiivi. Ühtlasi on võimalik mõlema meetodiga kaardistada ca 10 km² kasutades õhusõidukit, näiteks drooni.

Teiseks, mõlema meetodi puhul oleneb andmemaht mõõdistatud objektist, kuid lidari algsed andmed on punktpilve kujul ning seotud juba täpse asukohaga. Fotogramm-meetria aga seda ei võimalda ning seetõttu on andmetöötluse poolest aeglasem.

Kolmandaks on mõlemal tehnoloogial suur valik andmeanalüüsi tarkvara lahendusi, kuid lidari tarkvarad on enamasti tasulised, sest need pakuvad suurema ja täpsema valikuga funktsioone.

Neljandaks saab Tabel 1, andmete põhjal järeldada, et fotogramm-meetria on täpsem kui lidar. Küll aga suudab lidar suure ala mõõdistamisel, mis on tihedalt kaetud taimedega, mõõta antud objektid detailsemalt.

Viiendaks on fotogramm-meetria tundlikum keskkonnamõjudele nagu päiksekiirgus või varjud. Nende tegurite tõttu võivad mõõdetud andmetel esineda defekte. Lidariga saab aga viia läbi mõõdistusi ööpäeva ringselt.

Viimaks võib Tabel 1 põhjal järeldada, et fotogramm-meetria meetodi läbiviimiseks on tehnika odavam kui lidar meetodil.

Antud töös uuritakse ainult lennukilt saadud lidar andmeid. Järgmistes uuringutes saab lisaks uurida ortofotosid ning võrrelda kahe meetodil saadud andmeid.

1.3 Andmed ja tarkvarad

Algsed lidar andmed, mis saadakse laserskannerist, on töötlemata 3D-punktpilved, mis võivad koosneda tuhandetest või miljonitest punktidest. Punktide maht oleneb skaneeritud ala suuruselt (Mapscaping, 2022).

Esmalt teisendatakse andmed 3D raamistikku, mis on aluseks järgnevatele andmeanalüüside etappidele. Lisaks on laserskannereid, mis määravad automaatselt punktpilvedes olevatele punktidele tekstuuri ja värviinfo. Tulemuseks on 3D andmed, kus on kombineeritud spektraalne ja ruumiline teave, mis on paindlikud kasutaja poolt teostatud muudatuste osas (Fernandes-Diaz, Caceres, Singhanian, & Starek, 2008).

Muutused või seaded, mida saab rakendada punktpilvedele on järgnevad: visualiseerimine, segmenteerimine, klassifikatsioon, filtreerimine ning transformatsioon (Fernandes-Diaz, Caceres, Singhanian, & Starek, 2008). Lidar andmete töötlemiseks on hetkel turul palju erinevaid tarkvarasid. Mõned populaarsemad tarkavarad on ArcGIS, QGIS, Whitebox Tools, Saga GIS, Grass GIS jne (Mapscaping, 2022).

Antud lõputöös kasutatakse andmete töötlemiseks ja võrdlemiseks ArcGIS PRO-d, kuna see on üks tarkvaradest, mis võimaldab lidari andmeid töödelda ja visualiseerida lihtsal kujul.

2 Lidari metoodika kasutamine Pakri pankranniku muutuste seireks

Antud peatükis annab autor ülevaate Pakri poolsaarest ja pankrannikust, samuti selle piirkonna probleemidest (pankranniku aktiivsest erosioonist). Teises pooles kirjeldab autor, kuidas töödeldakse ning analüüsitakse aerolaserskaneerimis andmeid, mis on saadud Maa-ameti kõrgusandmete portaalist.

2.1 Pakri poolsaar ja selle iseloomustus

Pakri poolsaar (varasema nimega Leetse poolsaar) asub Mandri-Eesti loodeosas Põhjarannikul Pakri Lahe ja Lahepere lahe vahel. Poolsaar on üks Põhja-Eesti lavamaa merre ulatuvatest osadest (Kuiva, 2023).

Pakri poolsaare pikkus on 12 km, laius üle 5 km ning pindala umbes 40 km². Kõrgeim poolsaare punkt ulatub 31 m üle merepinna ja poolsaart merest lahutav klindijärsak moodustab Pakri panga. Poolsaare tipp on avatud kolmest suunast merele (Entsüklopeedia, Pakri Poolsaar, 2011).

Pakri 1451 hektarit maastikuala kuulub alates 1998. aastast looduskaitse alla, kuna seal leidub haruldasi ja teadusliku väärtusega geoloogilisi objekte, taimi ning loomi (näiteks krüüsel). Looduskaitse alla kuuluvad poolsaare peakallas, rannatasandik ja piirnev lavamaa (Hella, 2011).

Poolsaare loodetippu on ehitatud Pakri tuletorn, mis märgistab põhjaranniku merepoolset serva. Samuti see tähistab laevateed ning on abiks orienteerumisel merel. Tuletorn rajati Peeter I ajal 1724. aastal vana rootsiaegse tulepaagi kohale. 1889 aastal ehitati uus kõrge 8-tahulise soklikorrusega punane kivitorn, mis on seinini säilinud. Uut tuletorni loetakse Eesti ranniku kõrgemaiks, kuna kõrgus on merepinnast 73 m, alumine läbimõõt on 7,4 m ning metallist laterna läbimõõt on 4,5 m. Peetri I rajatud tuletornist on alles esimene korrus ning oma asukoha pärast on geoloogid mures, et mingi hetk võib ajaloolise taustaga tuletorn ranniku kulumise tõttu merre kukkuda (Kuiva, 2023).

2.1.1 Objekti asukoht

Pakri poolsaare asub 25 km Tallinnast lääne pool 59°16'01" põhjalaiust 23° 43'50" idapikkust (Kuiva, 2023).

2.1.2 Põhilised probleemid ja varasemad uuringud

Pakri pankrannik on populaarne vaatamisväärsus, mida külastavad paljud inimesed. Seal käies peab olema ettevaatlik, kuna pank on varisemiseohtlik. Varingut põhjustavad looduslikud lõhed kivilasundis- seal olevad materjalid nagu liivakivi on kergelt mõjutatavad ilmastiku ning mere poolt. Nende tegurite tulemusena mureneb klindi alt liivakivi ning ülejäänud lubjakivi jääb alles. Samuti suurenevad ajaga praod lubjakivis, mille tõttu alles jäänud osa merre kukub. Ohus on ka poolsaare tippu ehitatud tuletorn, mis panga varisemisega võib kaasa minna (Loodus otsustab Pakri tuletorni saatuse, 2016). Hiljutine varing oli 2021. aastal, kui vana tuletorni lähedal varises suur klinditükk merre (Pilags, 2022).

Pakri pank on huvitav objekt nii geoloogidele kui ka ranniku uurijatele, kuna see on üks ainulaadsemaid ja problemaatilisi rannikuid.

2015. aastal uuriti Pakri pankrannikut kasutades fotogramm-meetria meetodit. Töö eesmärgiks oli luua piisavalt kvaliteetne 3D- mudel, mille abil saab ennustada edasisi varinguid ja jälgida tekkivaid pragusid (Kasepõld, 2015). Antud töö oli pankranniku seiramise alguseks.

2018. aastal tehtud lõputöös pealkirjaga „ Pakri pankranniku muutuste kvalitatiivne hinnang“ uuriti droon-möödistuste tehnoloogiat ja võrdlusmeetodeid. Töös oli kirjutatud fotogramm-meetria, lendavast seadmest, millega uuring teostati ning Pakri klindist. Teises peatükis kirjeldati andmeid ning kasutatavaid tarkvarasid. Mudeleid ja ortofotosid koostati programmis Agisoft Photoscan ning võrdlust teostati programmis CARIS. Töö käigus selgus, et kolme aasta jooksul on rannik erodeerinud. Samuti kontuuride põhjal oli autori poolt valitud alast näha, et seal on ka suur klindi tükk ära kukkunud (Karjalainen, 2018).

2020. aasta lõputöö eesmärgiks oli koostada fotogramm-meetria meetodi abil piisavalt kvaliteetne Pakri pankranniku 3D mudel, millel saab jälgida tekkivaid pragusid ning ennustada varinguid. Ühtlasi uuriti, kas piltide puhastamine teeb mudeli selgemaks. Kolmandaks eesmärgiks oli võrrelda 3D mudeleid ning välja tuua, mis tarkvarasid on maailmaturul nende loomiseks. Nelja mudeli loomiseks ja võrdlemiseks kasutati OpenDroneMap tarkvara. Antud töös järeldas autor, et 2015 aastal tehtud 3D mudel on kõige kvaliteetsem teistest (2017 ja 2018) ning seda saab kasutada järgnevateks uuringuteks (Mõsovski, 2020).

2021. aastal analüüsiti mittetulunduslikke tarkvarasid, mida saab kasutada tulevikus Pakri pankranniku modelleerimisel. Antud lõputöös tehti välitööd Laagna teel kasutades peegelkaamerat

ning analüüsi OpenDroneMap, COLMAP ning Meshlabi tarkvarasid. Parimaks tarkvaraks osutus OpenDroneMap, kuna see võimaldab luua täpset ja ilma suure andmekaotusteta mudelfaili ning georefererida kahel viisil, mille tulemusel saab avada mudelit ükskõik mis visualiseerimise rakenduses (Zingfeld, 2021).

2022. aasta lõputöös mõõdeti ja võrreldi erinevatel aastatel tehtud Pakri pankranniku 3D mudeleid CloudCompare tarkvaraga. Samuti võrreldi OpenDroneMap ning Meshroom tarkvarasid. Kogu lõputöö oli kirjutatud inglise keeles. Autori järeltule põhjal osutus Meshroom tarkvara parimaks, sest kasutatavas tarkvaras sujus 3D mudelite rekonstrueerimine probleemideta. Teiseks, oli autor leidnud, et kõik neli 3D mudelit olid kvaliteetsed ning kolme aasta jooksul on olnud kaks tugevat pankranniku varisemist. Lisaks näitas CloudCompare tarkvara, et võrreldavad 3D mudelid erinevad üksteisest maksimaalselt 1.5 cm võrra (Pilags, 2022).

2.2 Ajaloolised lidar andmed

Maa-amet kasutab aerolaserskaneerimis (ASL) meetodit, mis tähendab, et andmed on saadud õhusõidukilt, millele on paigaldatud laserskanner (Grünthal, 2021).

Rakendatav meetod põhineb aja mõõtmisel, mis kulub laserimpulsil tee läbimiseks laserist maapinnani ja tagasi. Skaneerimise ajal määratakse lennuki asukoht maapealse GNSS-baasjaama suhtes kogu trajektoori vältel, mis tähendab, et fikseeritakse täpne asukoht kui laserimpulss väljastatakse. Teades täpselt lennuki hetke asukohta (GNSS), asendit (IMU), impulsi lähetusnurka, impulsi kestust ja atmosfääri andmeid on võimalik välja arvutada laserpunkti peegelduse asukoht maapinnal (Grünthal, 2021).

ASL meetodiga tuvastatakse punktpilvedest erinevaid nähtusi, nagu maapind, taimestik jne, kasutades matemaatilisi algoritme. Laserskaneerimise punktide klassifitseerimist on kirjeldatud Tabel 2.

Tabel 2. Laserskaneerimis punktide klassifitseerimine (ASPRS, 2019).

Klassi number	Klass (kategooria)
0	Loodud, klassifitseerimata

1	Klassifitseerimata
2	Maapind
3	Madal taimestik
4	Keskmiist kasvu taimestik
5	Kõrge taimestik
6	Hoone (-d)
7	Müra
8	Murdejoone punkt
9	Vesi
10-11	Reserveeritud kohandatud kasutamiseks
12	Kattumispunkt (-id)
13-31	Reserveeritud kohandatud kasutamiseks

Kui tekib olukord, kus on tihe alustaimestik või tagasipeegeldus pole saadud maapinnalt vaid alustaimestiku pealt, siis süsteem genereerib selle automaatselt maapinnaks, näiteks taimestiku põhjustatud vigu vähendatakse lennuaja valikuga. Seega mööditud viiakse läbi varakevadel, kui taimestik pole veel hakanud kasvama, või sügisel, kui taimestik on lamandunud (Grünthal, 2021).

Punktpilve plaaniline täpsus on seotud lennukõrgusega, see tähendab, et laser genereerib koherentset signaali, mis on impulsi kuju siiski mingil määral koonus. Kui näiteks laserimpulss tabab objekti 3000 m kõrguselt, on selle läbimõõt ~ 80 cm. Seega asub registreeritud asukoht alas, mille läbimõõt on 80 cm. Sellest tulenevalt võib olla registreeritud peegelduse täpsus kuni pool

peegeldusjälje läbimõõdust, millele lisanduvad asukoha määrangust põhjustatud vead (Grünthal, 2021).

2.2.1 Klassifitseerimise vead

Klassifitseerimis vigadeks saab lugeda klassifitseerimise algoritmidest põhjustatud vigu, mis sisaldavad sisendparameetreid, mille järgi arvutatakse tulemus. Kasutatavad parameetrid on valitud empiiriliselt, mis peaks tagama parima tulemuse kogu ala kohta. Näiteks rakendatakse parameetreid Eesti maapinna andmete töötlemisel. Klassifitseerimisvigu reeglina parandatakse käsitsi, kaasates lisamaterjali või siis kasutatakse piiratud alal teisi liigitamise parameetreid (Grünthal, 2021).

Maa-amet teostab ka punktipilvede manuaal-visuaalset korrigeerimist, kus vajadusel muudetakse automaatse tulemuse klassifikatsioon. Maa-ameti kõrgusandmete baasist kättesaadavaid andmeid saavad kasutajad omal soovil või vajadusel muuta punktide klassi või filtreerida teatud punkte välja (Grünthal, 2021).

2.2.2 Meta andmed

Maa-ameti kodulehel, geoportaalis olevad kaardid on erinevas mõõtkavas (1:10000, 1:2000, 1:20 000, 1:50 000, 1:100 000, 1:200 000) ning jaotatud kaardilehtedeks. ASL andmed on kättesaadavad ainult kolmes mõõtkavas: 1:2000, 1:10000 ja 1:20000. Mõõdistusi on läbi viidud alates 2008 aastast kuni tänapäevani.

Tööks vajalikud andmed on jagatud parameetrite järgi, mis on kirjeldatud Tabel 3 ning need saadakse maa-ameti kõrgusandmete lehelt.

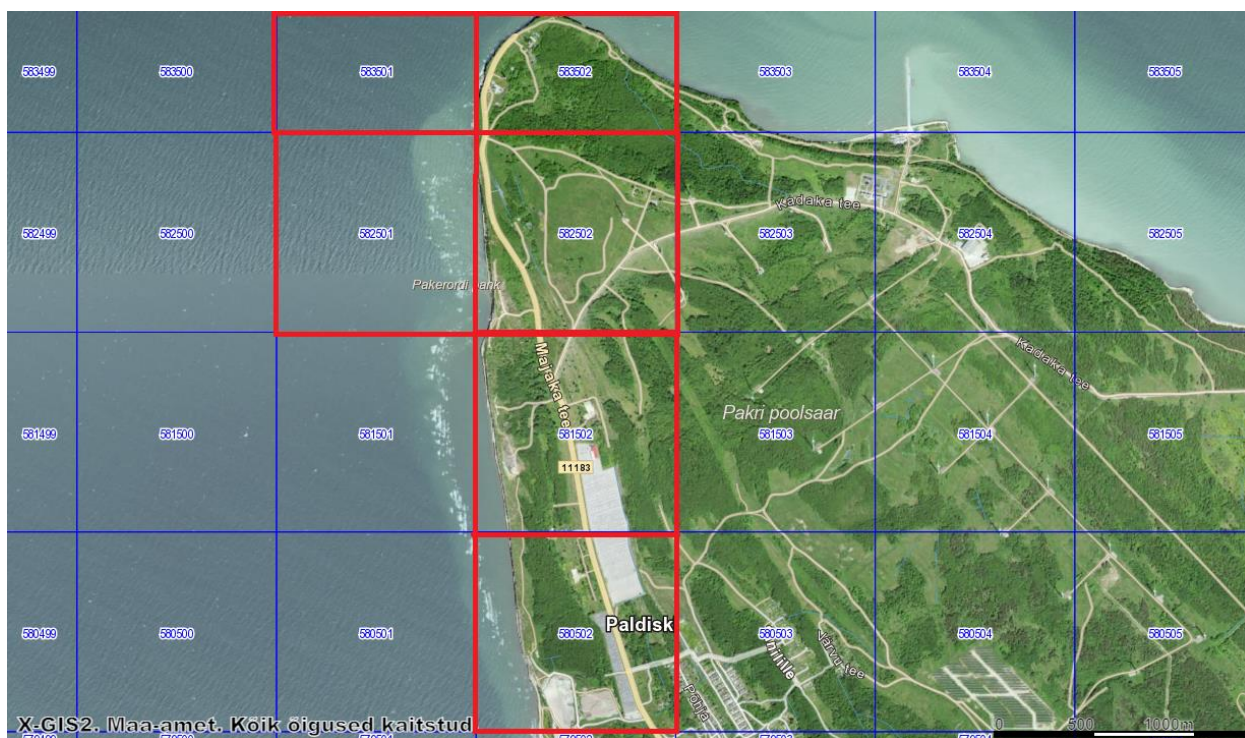
Tabel 3. Kõrgusandmete parameetrid (Maa-amet, 2021).

Mõõdistamise aasta	Millal mõõdistamine on läbiviidud	Lennukõrgus	Punktihedus	Seade, millega mõõdistusi läbi viidi
2008 – 2011	-	2400 m	0,45 p/m ²	Leica ALS50-II
2012 – 2015	-	2400 m	0,45 p/m ²	Leica ALS50-II

(2016) 2017 – 2020	Kevad	2600 m	2,1 p/m2	Riegl VQ-1560i
2021 – 2024	Kevad	2600 m	2,1 p/m2	Riegl VQ-1560i

2.2.3 Andmetöötlus

Antud töö läbiviimiseks kasutas autor 1:2000 mõõtkavas olevaid kaardilehti, mis on kujutatud Joonis 3. Spetsiifiliselt uuris üliõpilane järgnevalt nummerdatud kaardilehti: 583502, 582502, 581502, 580502, 583501, 582501. Konkreetseid andmed on kogutud 2023. aastal ning need aitavad uurida ning analüüsida rannikumuutusi.



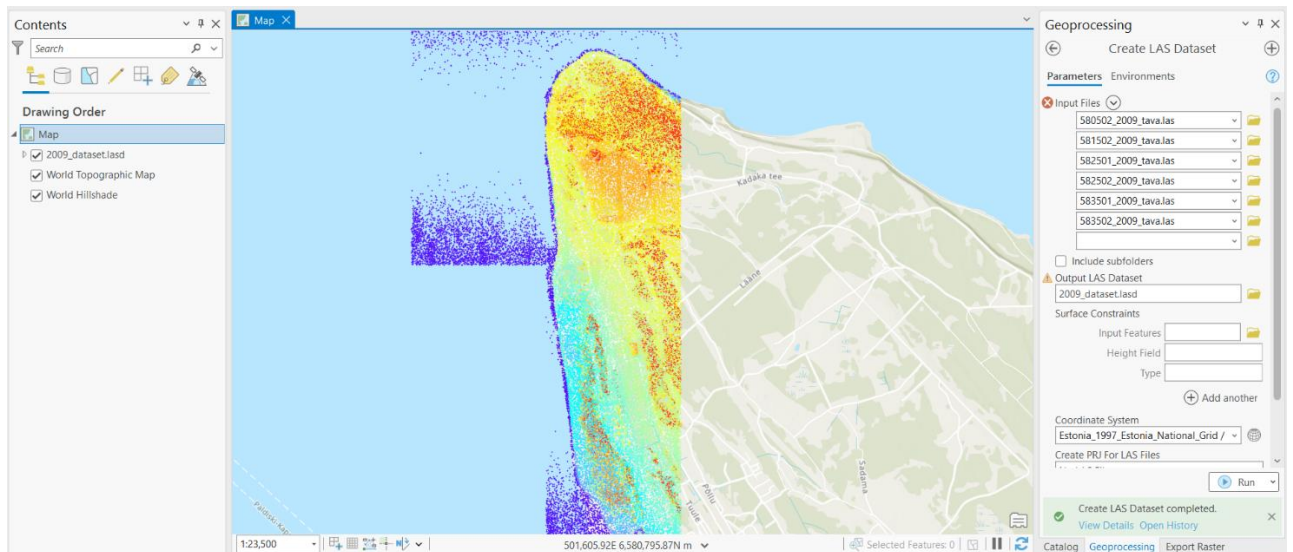
Joonis 3. Töös kasutatavad kaardilehed uuritavast alast (Maa-amet, Kõrgusandmed 2023)

Esimesed laserpunktpilved antud kaardilehtedest olid kogutud aastal 2009. Lisaks sellele olid kasutatud antud töös andmed aastatest 2012, 2016, 2018, 2020, 2021 ja 2022 kohta. Maa-ameti andmebaasis on eelnevalt nimetatud andmed salvestatud LAZ formaadis ning need on georefereeritud.

Andmetöötlus toimus ArcGIS PRO tarkvaras, sest see toetas lidar andmete töötlemist. Kogu andmetöötluse kirjeldus on tehtud 2009. aasta andmete näitel. Algselt ei avanenud rakenduses

kõrgusandmete andmebaasist alla laetud failid ning need tuli teisaldada LAS formaati. Seda saavutas autor kasutades seadet nimega *Convert LAS*. Peale teisaldamist oskas ArcGIS Pro näidata punktpilvi kaardil.

Järgmiseks oli vaja kõik eraldatud punktipilved kokku liita. See oli vajalik, et kaotada ära eraldusjooned ning koondada andmed ühte kihti. Seda tegi autor kasutades *Create LAS Dataset* käsklust. Tegevuse tulemusel tekkinud andmed on kuvatud Joonis 4.



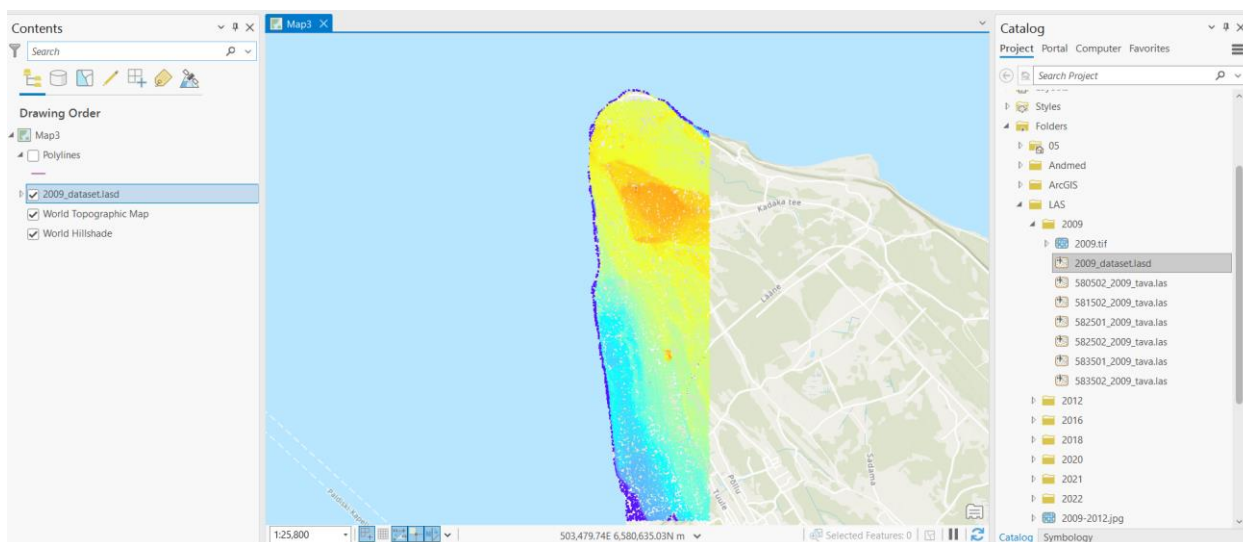
Joonis 4. Kokku liidetud punktipilved

Punktipilvedes olevatel punktidel oli kõigil oma klassifikaator, millele on määratud kindel number. Kasutatava punktipilve klassifikatsiooni saab näha Tabel 4.

Tabel 4. Maa-ameti punktpilve punktidele määratud klassifikatsioonid (Maa-amet, Kõrgusandmed 2023)

Klassi number	Klass (kategooria)
1	Klassifitseerimata
2	Maapind
7	Müra
8	Murdejoone punkt
9	Vesi

ArcGIS Pro's oli võimalik nende klassifikaatorite abil joonisel olevaid andmeid eraldada üksteisest. Selles töös vaatleb autor ainult maapinda (vt Joonis 5 **Tõrge! Ei leia viiteallikat.**).

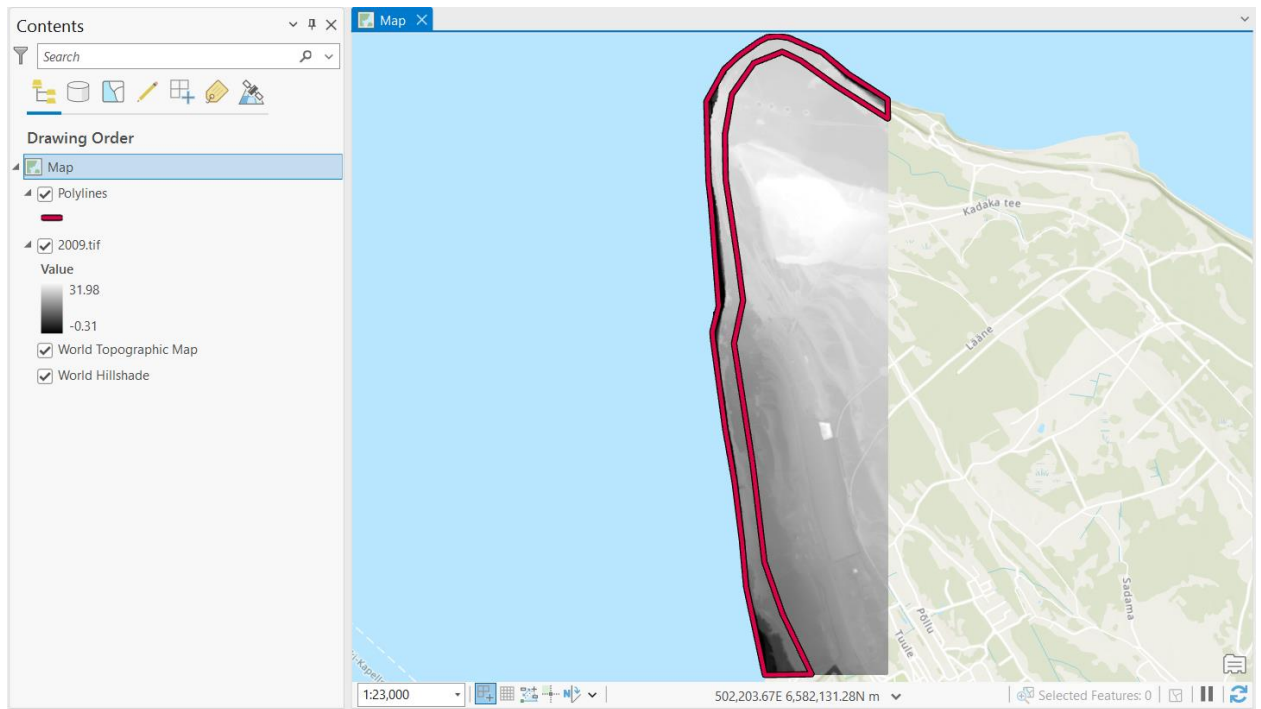


Joonis 5. Punktpilv, mille punktidele vastab ainult maapind

Kihtide võrdluseks oli vaja luua rasterkiht ehk DTM, seda tegi autor kasutades käsklust *LAS Dataset to Raster*. Selle tegevusega loodi dataset kihist rasterkiht ehk DTM. Rasterkiht on uus pildikiht, mis on pikslipõhine (Matthews, 2023).

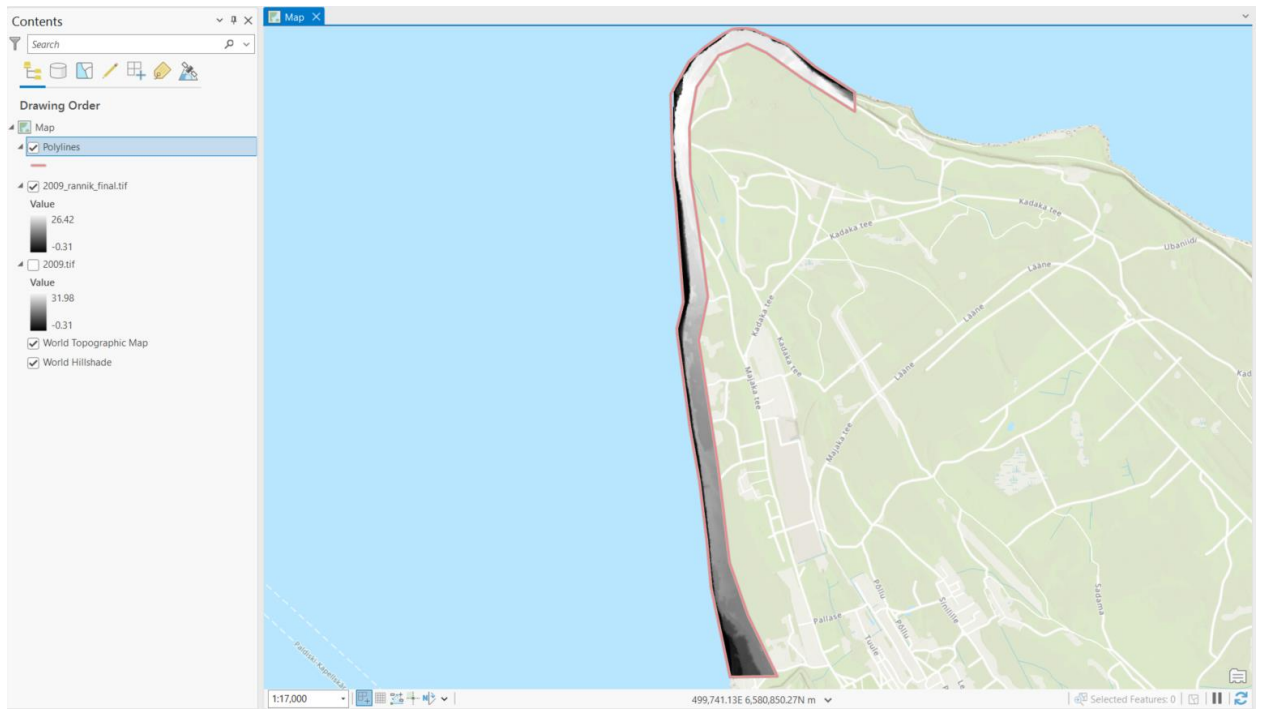
Kuna antud töö eesmärgiks on tuvastada ranniku muutust, siis on vaja välja selekteerida rannik lähemalt. Selleks pidi eraldi looma polügooni, mis lõikab välja ainult uuritava ranniku ala. Seda

tehti 2009 rasterkihi abil, kuna seal on algselt ranniku kulumine veel väike. Polügooni loomist on näha Joonis 6.



Joonis 6. Loodud polügoon ranniku välja lõikamiseks.

Rasterist antud ala välja lõikamiseks, on vaja valida *Data Management* tööriista kogust *Clip* seade. Tulemuseks lõikab tööriist ette antud polügooni sisse jääva ala välja, mis on kujutatud Joonis 7.



Joonis 7. Polügooni abil välja lõigatud uuritav ala

Selliseid raster polügoone tuli kokku seitse ning nendega saab teha võrdlusi. Järgnevalt viis autor läbi rasterkihtide võrdluse. Selleks kasutas autor *raster calculator* tööriista, kus lahutas hilisemast aastast varasema aasta rasterkihi.

2.2.4 Profiilid

Veelgi põhjalikumaks vaatluseks koostas autor profiilid (ristlõiked) ranniku alast, kus on esinenud kõige rohkem erosiooni. Profiile määrati ArcGIS Pro tarkvaras- toimus vaadeldava ala eraldamine ning iga 200 meetri tagant ristlõigete joonistamine. Profiilide pikkuseks on 50 m. Iga profiilile, mida tuli kokku 12, iga aasta kohta määrati nimi. Saadud andmed koondati Excelisse ja nende abil loodi graafikud, mille põhjal sai analüüsida mitu meetrit on rannik taandunud valitud distantsil. Vaadeldava ala profiilide skeemi on näha Joonis 20.

2.3 Pankranniku muutuste analüüs

Antud peatükis analüüsib autor *Raster Calculator*'i poolt genereeritud andmete erinevusi.

2.3.1 Aastate jooksul toimunud muutuste analüüs

Iga aasta kohta loodud DTM kihtidest on teostatud analüüs ja omavaheline võrdlus. Kasutatav tööriist *Raster Calculator* genereeris automaatselt kõrguste vahe ning määras värviskaala.

Värviskaalat ning kõrgusi oli võimalik muuta vastavalt vajadusele. Autor muutis seda igal võrdluskihil, tähistades erosiooni punase värviga, muutuseta pinna valge värviga ja akumulatsiooni sinise värviga. Kõikidel värviskaaladel olevad arvud näitasid kõrguste vahe kogu kihi ulatuses.

Joonis 21 on kujutatud aastate 2009 ja 2012 andmete võrdlus. Antud kihi värviskaala näitab, et kogu vaadeldava kihi ulatuses on esinenud erosiooni 24,14 m² ning akumulatsiooni 23,79 m². Kõige suuremad alad, kus on olnud kulumine on poolsaare tipp ning liikudes mööda rannikut lõuna suunas (tähistatud joonisel punaste kastidega).

Joonis 22 on kujutatud aastate 2012 ja 2016 andmete võrdlus. Kaardi värviskaala põhjal saab järeldada, et erosiooni on esinenud rannikul 24,17 m² ja akumulatsiooni 10,51 m². Suuremad alad, kus on olnud erosioon on poolsaare tipust liikudes mööda rannikut lõuna suunas. Samuti suur osa kulumisest on ka näha vana tuletorni ümbruses.

Joonis 23 on kujutatud aastate 2016 ja 2018 andmete võrdlus. Värviskaala näitab, et erosiooni on esinenud 19,53 m² ning akumulatsiooni 16,97 m² kogu kihi ulatuses. Erosiooni esineb rohkem poolsaare tipus ehk liikudes põhjast läände (muutused tähistatud punaste kastidega).

Joonis 24 on kujutatud aastate 2018 ja 2020 andmete võrdlus. Kaardi värviskaala näitab, et erosiooni on esinenud kogu kihi ulatuses 23,3 m² ja akumulatsiooni 9,34 m². Ranniku kulumist esineb rohkem poolsaare tipust ja liikudes mööda rannikut edela suunas.

Joonis 25 on kujutatud aastate 2020 ja 2021 andmete võrdlus. Kaardi värviskaala näitab, et erosiooni on esinenud 23,17 m² ja akumulatsiooni 23,34 m². Joonisel põhjal saab vaadelda, et kulumist esineb rohkem poolsaare tipust loode ja lääne suunal, samuti on antud erosiooni märgitud punaste kastidega.

Joonis 26 on kujutatud aastate 2021 ja 2022 andmete võrdlus. Kaardi värviskaala põhjal saab järeldada, et erosiooni esineb 22,96 m² ja akumulatsiooni 23 m² kogu kihi ulatuses. Ranniku kulumist on näha poolsaare tipust liikudes mööda rannikut alla lõuna suunas.

2.3.2 Pikaajalised muutused

Pikaajalised muutused on termin, mis iseloomustab protsesside muutust, mis toimuvad pikema aja jooksul, näiteks kliimamuutuste indikaator (Collins, 2023). Kliima muutused põhjustavad

meretaseme tõusu, intensiivsemaid torme ning temperatuuride tõusu, mis mõjutavad rannikute kiiremat ning suuremat muutust (EPA, 2023).

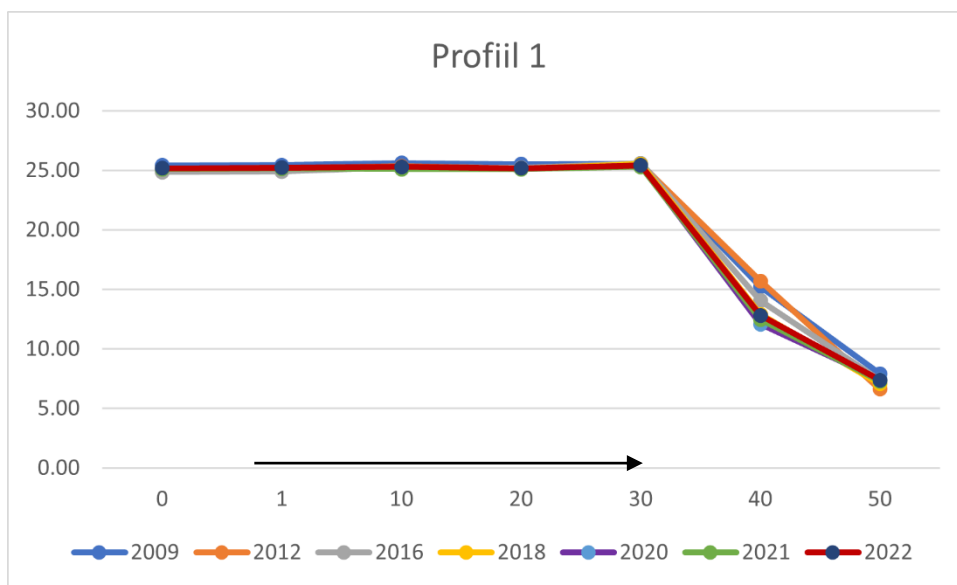
Pikaajalisi muutusi vaadeldakse rannikul see tõttu, et analüüsida, mis kliima tingimused on olnud antud aja vahemikus ning kui palju on nendest mõjutatud rannik. Samuti saab selle põhjal prognoosida edaspidiseid muutusi ja kulumise kiirust.

Joonis 27 on kujutatud aastate 2009 ja 2022 andmete võrdlus. Värviskaala põhjal on näha, et erosiooni on esinenud terve kihi ulatuses 23,56 m² ning akumulatsiooni 22,79 m². Pikaajalist muutust on näha poolsaare tipust ehk liikudes põhjast lääne suunas. Suuremat ranniku kulumise märke on ka näha vana tuletorni ümbruses.

3 Tulemused

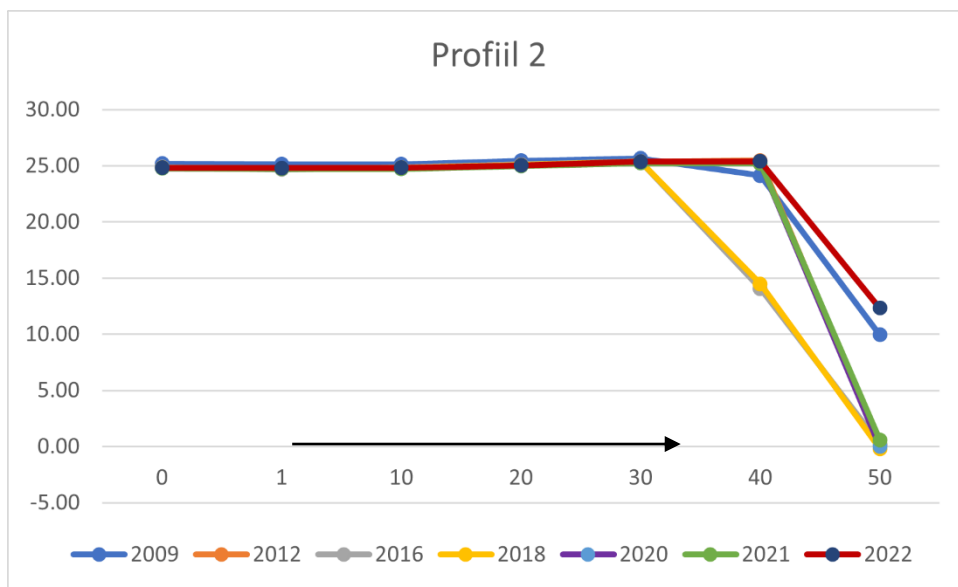
Eelmises peatükis loodud kaardid kujutavad palju ranniku muutusi on toimunud valitud aastatel. Samuti oli loodud rannikul valitud aladele profiilid, kus on esinenud rohkem erosiooni. Profiilide andmed on koondatud tabelisse ning kujutatud graafikutel. Graafikute skaala y- telg tähistab maapinna kõrgust ning x-telg profiili pikkust. Samuti on noolega näidatu, mis suunas liigub rannik mere poole. Kõige paremini saab vaadelda antud graafikutel pikaajalisi muutusi, mis on olnud aastate 2009 ja 2022 vahel. Tabelid, mille põhjal olid loodud graafikud on lisades 9 kuni 20.

Profiil 1 Joonis 8 ja Tabel 5 põhjal saab järeldada, et 30 meetrini on rannik olnud muutumatu, kuid mere poole liikudes hakkab ranniku äär kuluma. Ranniku ääre kulumist on näha 40-meetrisel distantstil, kus 2009. ja 2022. aasta kõrguste vaheks on 2,42 m.



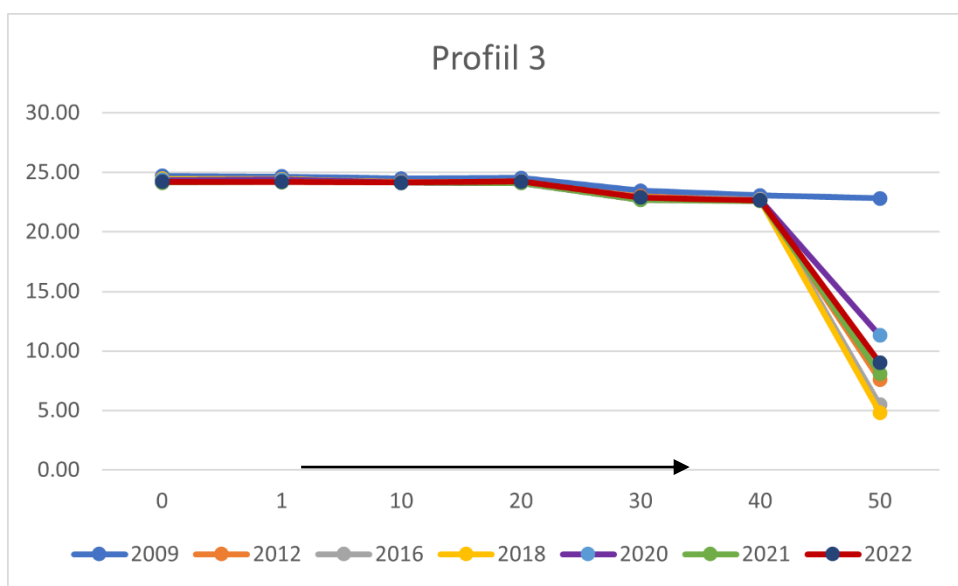
Joonis 8. Profiil 1 graafik

Profiil 2 Joonis 9 ja Tabel 6 põhjal saab järeldada, et rannik ei ole muutnud 30-meetri lõikes, kuid liikudes rohkem mere poole on kõrguste vahe suurenenud. Aastate 2018 ja 2016 andmed aga erinevad teistest andmetest liiga palju ning seetõttu ei saa nendega arvestada, nendel andmetel on esinenud vigu. Graafikul ja tabelil on näha 40 meetri juures, et 2009. ja 2022. aasta vahel on olnud ranniku tõus 1,28 m. Vaadeldes Lisa 8, kaardil sama ala, kuhu on tõmmatud profiil, on näha märke akumulatsioonist, samuti kajastub see info Tabel 6 ja Joonis 9.



Joonis 9. Profiil 2 graafik

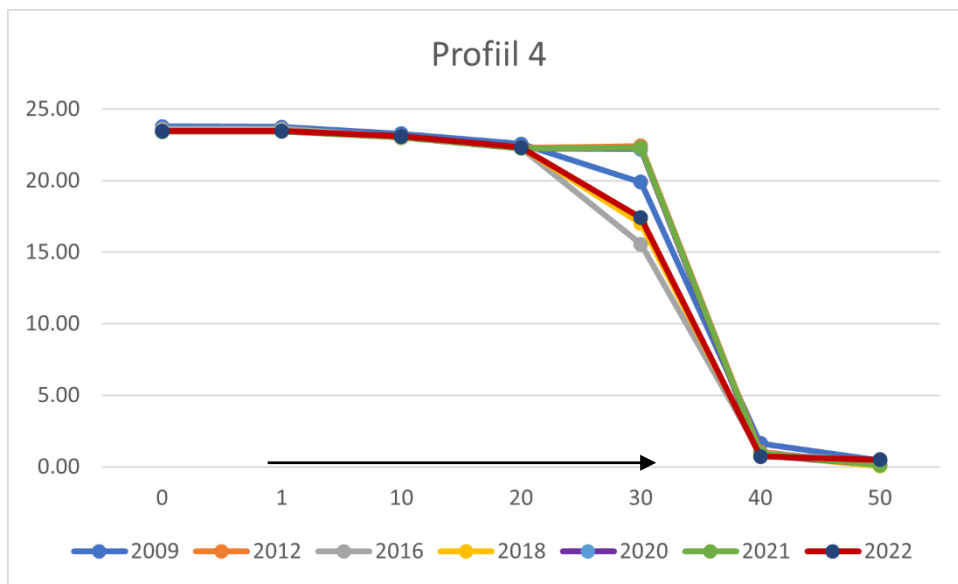
Profiil 3 Joonis 10 Joonis 10 ja Tabel 7 põhjal saab järeldada, et rannik ei ole muutunud 20 meetri lõikes, kuid liikudes mere poole on hakanud esinema kõrguste vahesid. 30-meetri juures on kõrguste vaheks 0,55 m ning 40-meetri juures 0,40 m, kuid sealt edasi on hakanud ranniku äär kuluma. Erosiooni tulemusel on rannik vahemikus 2009 – 2022 taganenud 13,82 m.



Joonis 10. Profiil 3 graafik

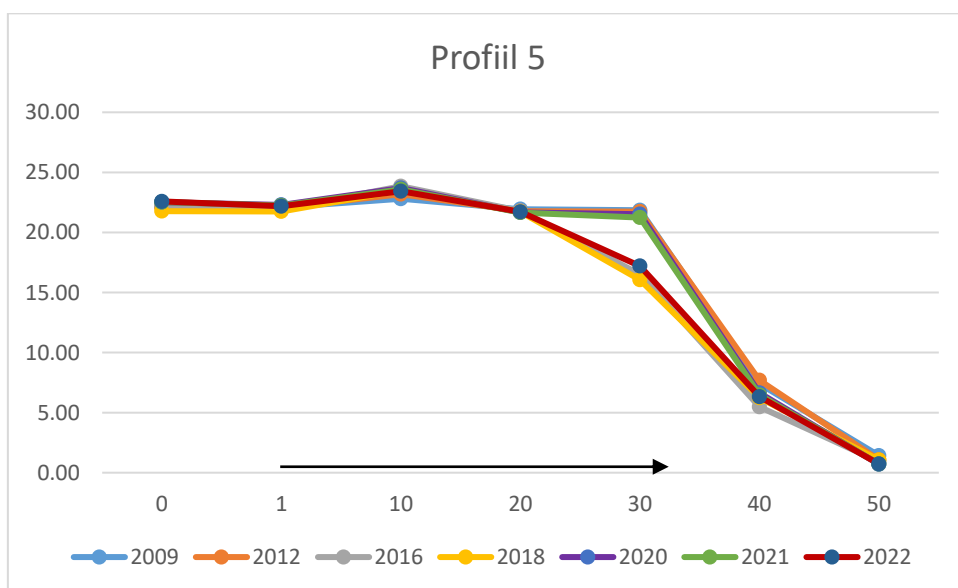
Profiil 4 Joonis 11 ja Tabel 8 põhjal saab järeldada, et rannik ei ole muutunud 20 meetri lõikes, kuid liikudes mere poole hakkab ranniku äär kuluma. 30 meetri juures on ranniku erodeerinud 2,5

meetrit ning 40 meetri juures 0,91 meetrit. Graafikul esineb ka mitte usaldusväärseid andmeid (anomaalne ranniku tõus), mida kujutavad 2012. ja 202. aasta jooned. See võib olla tingitud vigase andmetöötluse või algandmete tõttu.



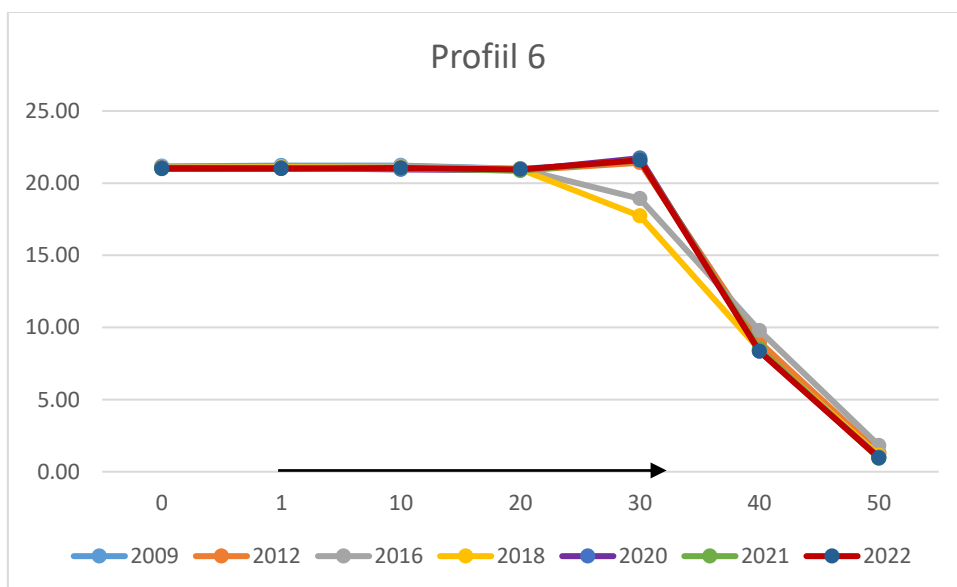
Joonis 11. Profiiil 4 graafik

Profiiil 5 Joonis 12 ja Tabel 9 põhjal saab järeldada, et rannikul on olnud väiksemad kõrguskasvud 10 meetri juures, kuid liikudes 20 meetri juurde, kõrgus väheneb. Ranniku ääre kulumine algab 20 meetri juurest ning 30 meetri juures on vahemikus 2009 - 2022 aastatel kõrgus vähenenud 4,43 m. Jällegi esinevad graafikul ja tabelis ebatäpsed andmed aastate 2012 ja 2021 kohta.



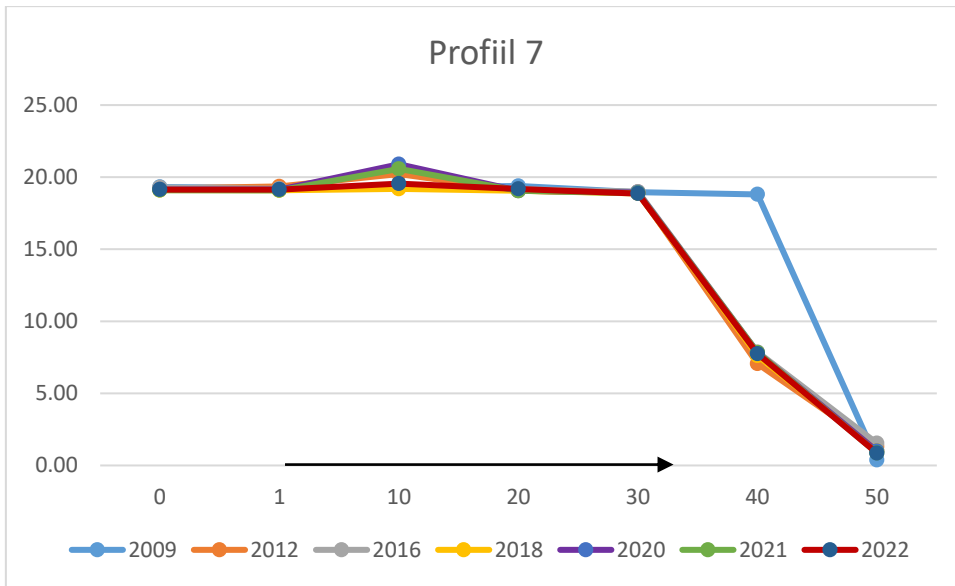
Joonis 12. Profiiil 5 graafik

Profiil 6 Joonis 13 ja Tabel 10 põhjal saab järeldada, et antud ranniku alal ei esine pikaajalisi muutusi. Graafikul esineb ka mitte usaldusväärseid andmeid (anomaalne ranniku langus), mida kujutavad 2016. ja 2018. aasta jooned.



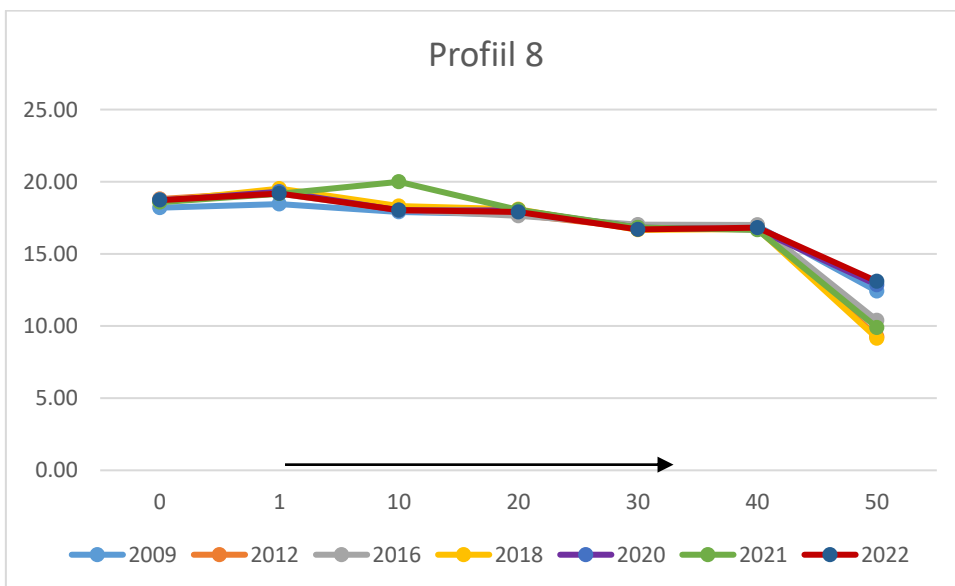
Joonis 13. Profiil 6 graafik

Profiil 7 Joonis 14 ja Tabel 11 põhjal saab järelda, et rannikul on toimunud väiksemad muutused 30 meetri lõikes. See võib olla tingitud seal asuvast teest ja selle ehitusest või andmed on olnud vigased. Liikudes edasi mere poole hakkab ranniku äär kuluma ning 40 meetri juures on 2009. ja 2022. aasta kõrguste vaheks 11,06 m.



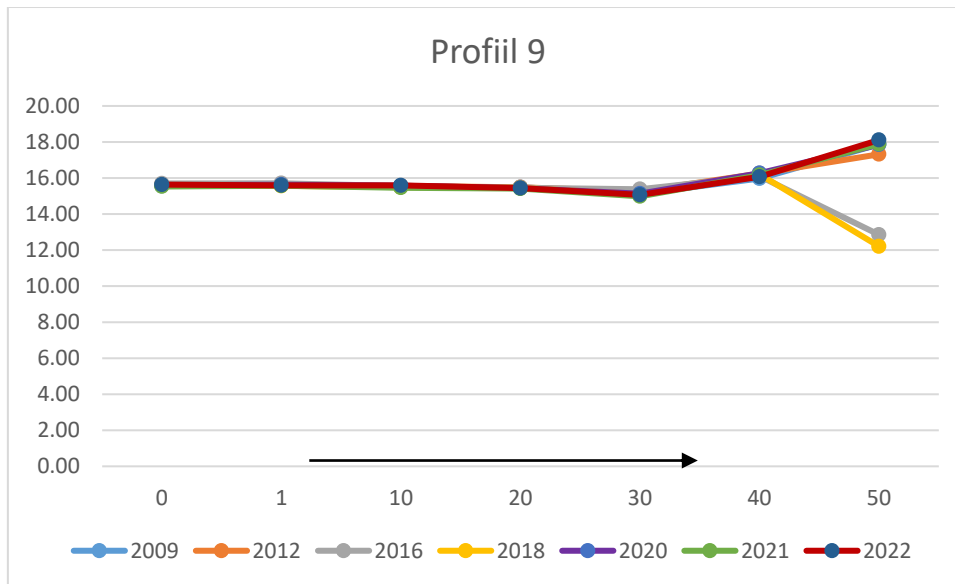
Joonis 14. Profiil 7 graafik

Profiil 8 Joonis 15 ja Tabel 12 põhjal saab järeldada, et rannik ei ole muutunud 40 meetri ulatuses. Sealt edasi on ranniku äär vähesel määral hakanud taganema. Küll aga on märgata mõningaid anomaaliaid 2021. aasta andmetes 10 ja 40 meetri juures. Lisaks on ka kummalised muutused toimunud 40-50 andmepunkti vahemikus aastatel 2016, 2018 ja 2021. Need andmed näitavad, et rannik on rohkem kulunud, kui aastal 2022. Ilmselt on need anomaaliad tekkinud vigaste algandmete või nende töötlemisel tekkinud vigade tõttu.



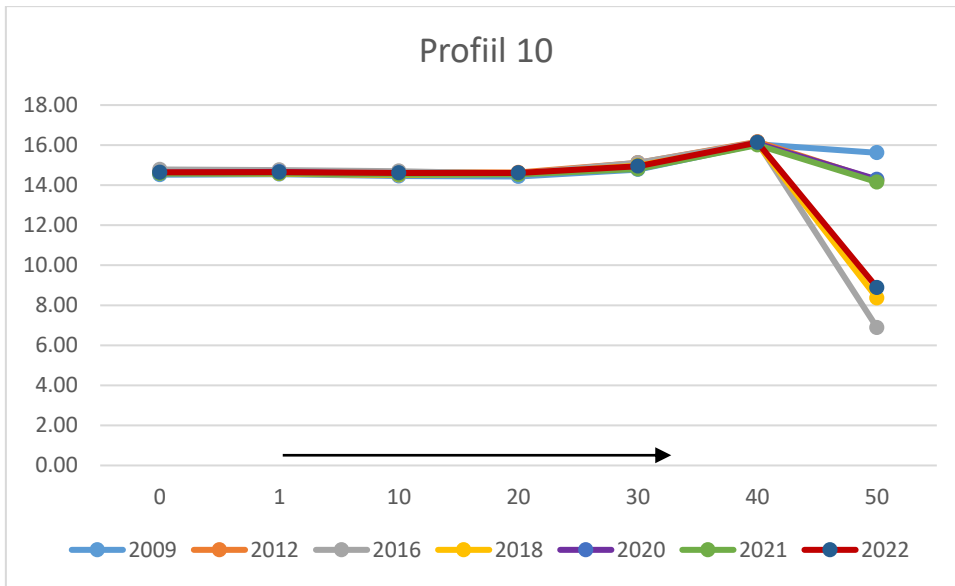
Joonis 15. Profiil 8 graafik

Profiil 9 Joonis 16 ja Tabel 13 põhjal saab järeldada, et rannik on olnud muutumatu terve ristlõike ulatuses. Aastate 2009 ja 2022 vahel on väikseid kõrguste erinevusi, kuid need ei ole nii silmapaistvad kui näiteks profiilil 7. Graafikul on näha aastate 2016 ja 2018 ranniku ääre kulumist, kuid autori arvates on andmete analüüsis või kogumisel olnud vigu.



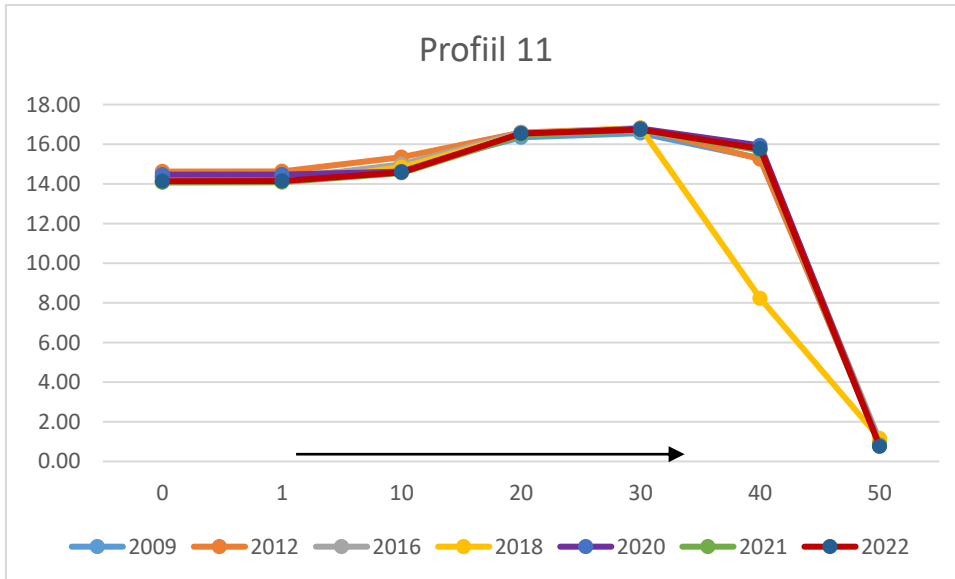
Joonis 16. Profiil 9 graafik

Profiil 10 Joonis 17 ja Tabel 14 põhjal saab järeldada, et 40 meetri lõikes pole toimunud muutusi. Ranniku äär on vahemikus 2009-2022 40 - 50 meetri vahel kulunud 6,74 m. Graafik näitab, et ranniku äär on enamvähem samal kiirusel kulunud, kuid ikka esineb andmete erinevusi, mida iseloomustavad 2018. ja 2016. aasta andmed.



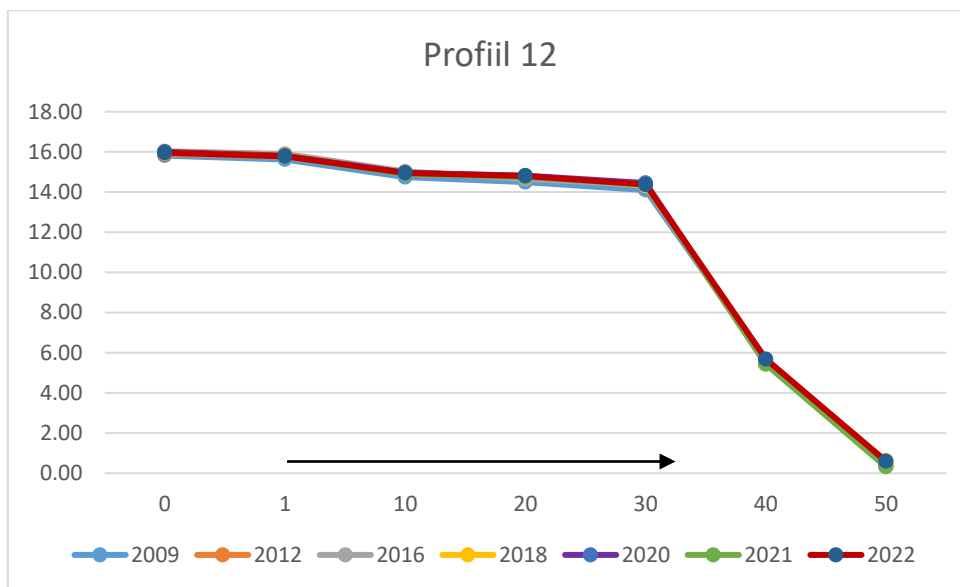
Joonis 17. Profiil 10 graafik

Profiil 11 Joonis 18 ja Tabel 15 põhjal saab järeldada, et rannikul on olnud väheseid muutusi, mis pole silmaga nähtavad. 2018. aasta joon näitab, et vahemikus 30-50 meetrit on rannik kulunud. Need andmed võivad olla vigased ning neid ranniku muutumise analüüsil ei arvestata.



Joonis 18. Profiil 11 graafik

Profiil 12 Joonis 19 ja Tabel 16 põhjal saab järeldada, et valitud ranniku alal pole olnud muutusi ning Tabel 16 põhjal on kõrguste vahed ka väga väikesed.



Joonis 19. Profiil 12 graafik

Profiilide ning kaartide analüüsimise tulemusel saab öelda, et lennukile paigaldatud lidari abil saadud andmeid ei piisa adekvaatsete pinnamudelite koostamiseks ning erinevate aastate pankranniku muutuste tuvastamiseks. Võimalik, et antud erinevused on põhjustatud sellega, et teatud aastatel kasutati andmete kogumisel erinevaid seadmeid. Aastatel 2009-2015 kasutati Leica ALS50-II, mis kogus andmeid 2400 meetri kõrguselt ning punktide tihedus oli 0,45 p/m². 2016 aastal aga kasutati sama seadet, kuid kõrguse kasvamisest muutus ka punktihedus. Aastatel 2017 kuni tänapäevani kasutatakse Riegl VQ-1560i, mis kogub andmeid 2600 meetri kõrguselt ning punkti tiheduseks on 2,1 p/m² (Grünthal, 2021).

Adekvaatse pankranniku muutuste tuvastamiseks on tähtis, et kõik andmed oleksid kogutud samalt kõrguselt ning ühesuguse punktihedusega. See muudab kogutud andmed usaldusväärsemaks. Samuti andmete erinevus võis seisneda andmetöötlemisel tehtud vigade tõttu. Peab ka arvestama, et lidari andmed ranniku alal on väikese resolutsiooniga (1m) ning loodud DTM-id ei kajasta pankranniku pinda ideaalselt.

Autor soovib kvaliteetsete DTM-ide loomiseks tihedamaid lidar andmeid ning võrrelda neid ortofotodega, kuna need näitavad visuaalselt, mis olukorras on valitud ala. Samuti kasutada mõnda paremat või tasuta tarkvara, mis toetab lidar andmete töötlemist. Valitud tarkvara võib töödelda andmeid ilma tõrgeteta ning kergemini.

Kokkuvõte

Lõputöö eesmärgiks oli analüüsida Pakri pankranniku muutusi lidar andmete põhjal. Samuti veenduda, kas kasutatav meetod on mõistlik rannikute uurimiseks. Töö annab ülevaate rannikute seisest, kasutatavatest uurimismeetoditest, Pakri pankrannikust ning sealsetest probleemidest, maa-ametist saadud lidar andmetest ning nende töötlemisest.

Töö esimeses osas tutvustati rannikute muutuste uurimist Eestis ja välismaal. Ühtlasi kirjutati põhjalikumalt valitud mõõtmismeetoditest ja viidi läbi nende vaheline võrdlus. Töö teises osas tutvustati Pakri pankrannikut, sealseid probleeme ning läbi viidud uuringuid, samuti kirjeldati andmetöötlust ja analüüsi valmis kaarte ja profiilide graafikuid. Viimases osas võeti kokku andmete analüüsi tulemused ning soovitusi, kuidas saada täpsemad tulemused.

Pakri pankranniku muutuste tuvastamiseks tehakse iga-aastaseid uuringuid. Selleks, et saada paremat ülevaadet selle erosioonist tuli läbi viia maa-ameti poolt saadud andmete töötlus ning nende analüüs. Tulemustes kajastati võrdluskaartide abil, kui palju oli rannik muutunud pindala poolest. Muutused mis rannikul toimusid oli keskmiselt 23 m² piires. Lisaks olid tehtud rannikule profiilid, et veenduda andmete täpsuses võttes arvesse väiksemat ala (50m). Ranniku ristlõigete põhjal loodud graafikute analüüsimisel tuli välja, et rannik on aastate (2009-2022) jooksul kulunud.

Tulemuste analüüsil tekkisid andmetes anomaaliaid, mis olid ilmselt põhjustatud ebatäpsete algandmete või vigase andmetöötluse tõttu.

Töö käigus viis autor läbi Pakri poolsaarel mõõdetud lidar andmete töötlemise ArcGIS Pro-s ning teostas andmete analüüsi. Selle käigus omandas autor teadmisi lidar andmete töötlemisest ja ArcGIS tarkvara kasutamisest. Töö kõige keerukamaks osaks peab autor ArcGIS Pro-s laserskaneerimise andmete töötlemist, kuna tal puudusid selles valdkonnas varasemad teadmised.

Antud teemat saab edasi arendada järgmiselt: võrrelda maa-ameti aerolaserskaneerimise andmeid drooni andmetega ning vaadata, kumma seadmega tulevad täpsemad tulemused. Lisaks saaks vaadelda ranniku muutusi, pannes kokku lidar ja fotogramm-meetria andmed. Need meetodid annaks parema ülevaate muutustest. Lõpuks saaks uuritavale rannikule rakendada ainult drooniga laserskaneerimist. Selle abil oleks võimalik andmeid koguda lähemalt ning nii pealt, kui ka külgvaates, andes seeläbi terviklikuma pildi muutustest.

Summary

The aim of the thesis was to analyze the changes in the Pakri cliff coastline based on lidar data, as well as to verify the suitability of the method used for coastal research. The thesis provides an overview of coastal monitoring, research methods used, the Pakri cliff coastline and its issues, lidar data obtained from the Land Board, and their processing.

The first part of the thesis introduced the study of coastal changes in Estonia and abroad. In addition, a more detailed description of the selected measurement methods was provided, and a comparison between them was conducted. The second part of the thesis presented the Pakri cliff coastline, its issues, and the conducted studies. It also described the data processing and analyzed the generated maps and profile graphs. The final part summarized the results of the data analysis and provided recommendations for obtaining more accurate results.

Annual surveys are conducted to detect changes in the Pakri cliff coastline. In order to gain a better understanding of its erosion, the data obtained from the Land Board needed to be processed and analyzed. The results were reflected through comparison maps, showing the extent of coastal changes in terms of area. The changes that occurred along the coastline were on average within 23 m². Additionally, profiles were created on the coastline to ensure data accuracy by considering smaller areas (50m). The analysis of the created profile graphs revealed that the coastline had eroded over the years (2009-2022).

During the analysis of the results, anomalies were found in the data, which were likely caused by inaccurate initial data or erroneous data processing.

During the study, the author processed lidar data measured on the Pakri Peninsula using ArcGIS Pro and conducted data analysis. This process enabled the author to acquire knowledge in lidar data processing and the use of ArcGIS software. The author considers the most challenging part of the thesis to be the processing of laser scanning data in ArcGIS Pro, as they lacked previous knowledge in this field.

This topic can be further developed by comparing the aerial lidar data from the Land Board with drone data to determine which device provides more accurate results. Additionally, the changes in the coastline can be observed by combining lidar and photogrammetry data, as these methods would provide a better overview of the changes. Finally, applying only drone-based laser scanning to the studied coastline could be considered. This would allow for data collection from a closer

distance and provide a more comprehensive view of the changes from both top-down and side perspectives.

The thesis is written in Estonian and contains text on 33 pages, 3 chapters, 16 tables, and 27 figures.

Viidatud allikad

ASPRS. (9. 07 2019. a.). asprs. Allikas: The imaging & geospatial information society:
https://www.asprs.org/wp-content/uploads/2019/07/LAS_1_4_r15.pdf

Assenbaum, M. (2018). Monitoring Coastal Erosion with UAV Lidar. GIM INTERNATIONAL.

Autodesk. (2023). Autodesk. Allikas: <https://www.autodesk.com/solutions/photogrammetry-software#:~:text=What%20is%20photogrammetry%3F,2D%20or%203D%20digital%20models.>

Collins. (2023). Long-term change. Allikas:
<https://www.collinsdictionary.com/dictionary/english/long-term-change#:~:text=Something%20that%20is%20long%2Dterm,long%20time%20in%20the%20future.>

Disney, M. (2019). Terrestrial LiDAR: a three-dimensional revolution in how we look at trees. rmt: A. M. Hetherington, New Phytologist Volume 222, Issue 4 (lk 1736-1741). John Wiley & Sons, Ltd.

Doumit, J. (2021). Lidar or Photogrammetry? Why Not Use Both). GIM INTERNATIONAL.

Entsüklopeedia, E. (2011). Pakri Poolsaar. Tallinn.

Entsüklopeedia, E. (08. 03 2023. a.). Eesti rand, rannik ja saared.

EPA, U. S. (2023). Climate Impacts on Coastal Areas.

Fernandes-Diaz, J. C., Caceres, J., Singhanian, A., & Starek, J. M. (2008). An overview of lidar point cloud processing software. Researchgate.

Grünthal, E. (16. 04 2021. a.). Aerolaserskaneerimise kõrguspunktid. Allikas:
Geoportaal.maaamet:
<https://geoportaal.maaamet.ee/est/Ruumiandmed/Korgusandmed/Aerolaserskaneerimise-korguspunktid-p499.html>

Hella, K. (2011). Pakri maastikukaitseala ja hoiuala. Eesti loodus.

Hints, O. M. (2019). Panga panga ja Ohessaare panga geoloogiline ja kaitsekorra otstarbekuse ekspertiis. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool, Geoloogia Instituut.

Horswell, J. (2013). Recording. rmt: P. J. Jay A. Siegel, Encyclopedia of Forensic Sciences (Second Edition) (lk 368-371). ScienceDirect.

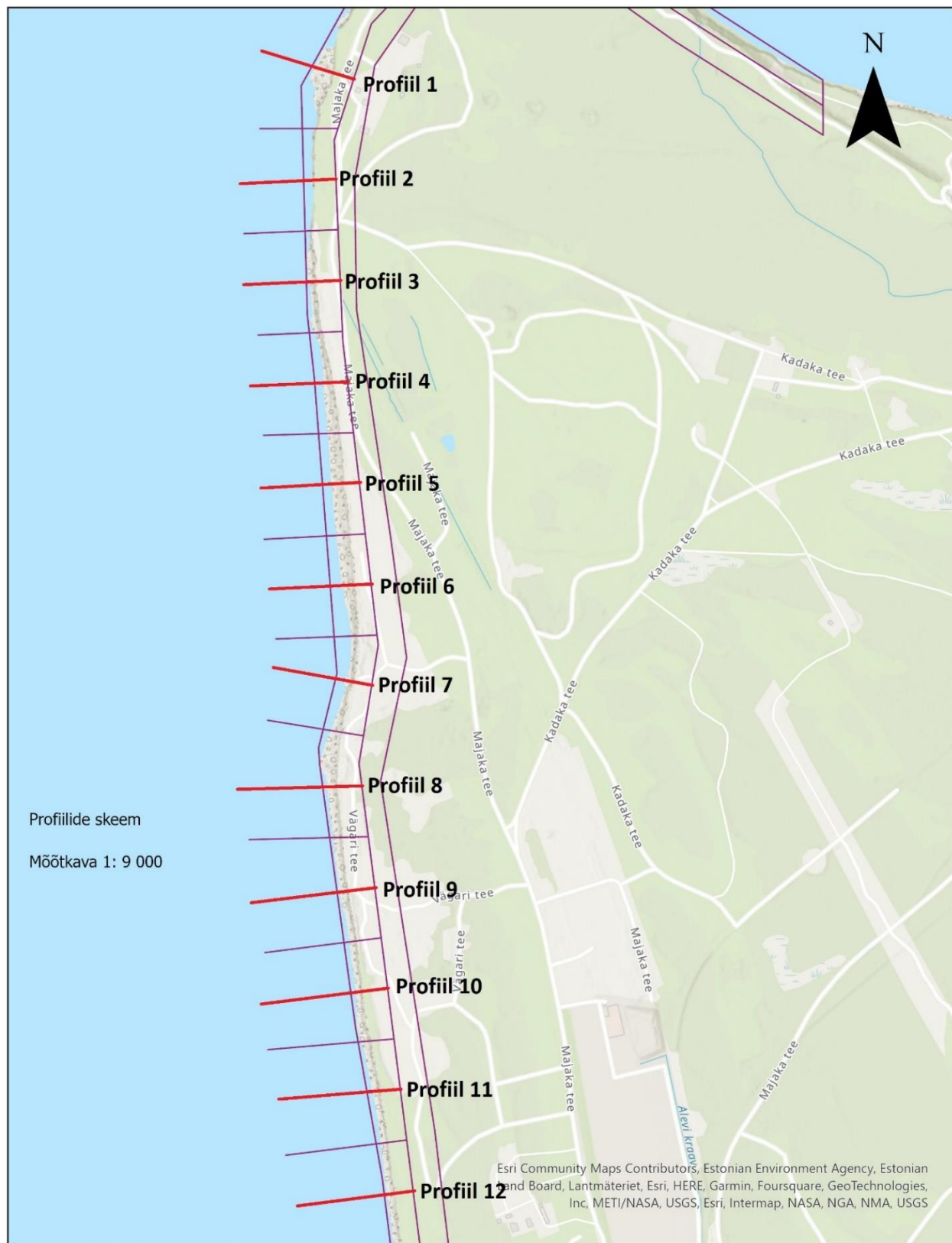
Karjalainen, A. (2018). Pakri pankranniku muutuste kvalitatiivne hinnang. Tallinn.

Kasepõld, K. (2015). PALDISKI PANKRANNIKU 3D MUDELI REKONSTUREERIMINE. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool.

- Keskkonnaamet. (2013). Tööleht: Mullateke/ erosioon. Eesti.
- Kont Are, O. K. (2011). EESTI RANNIKU UURIMINE JA PROBLEMAATIKA. rmt: N. T.-L. Soomere Tarmo, Teadusmõte Eestsi (VII) MERI. JÄRVED. RANNIK (lk 80-102). Tallinn: Eesti Teaduste Akadeemia.
- Kuiva, A. (05. 05 2023. a.). Pakri tule torn. Allikas: <http://www.pakritule torn.ee/ajalugu>
- Loodus otsustab Pakri tule torni saatuse. (2016). Harju elu, 1.
- Luhmann, T. (2006). Close Range Photogrammetry. Whittles Publishing Ltd.
- Maa-amet. (2023). Kõrgusandmed.
- Mapscaping. (14. 09 2022. a.). MAPSCAPING. Allikas: <https://mapscaping.com/lidar-data-and-lidar-tools-you-need/#:~:text=ArcGIS,2D%20and%203D%20visualization%20options>.
- Matthews, R. (04. 05 2023. a.). Working with layers and vector objects to construct frames for animated tutorials.
- Mõsovski, L. (2020). Pakri pankranniku 3D mudeli rekonstrueerimine kasutades ODM tarkvara. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool.
- NOAA. (20. 01 2023. a.). National Ocean Service. Allikas: <https://oceanservice.noaa.gov/facts/lidar.html>
- Orviku, K. (2018). Rannad ja Rannikud. Tallinn: TLÜ Kirjastus.
- Pilags, A. (2022). Assessing changes in Pakri cliff from 3D models using CloudCompare. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool.
- Pirotti, F., Piragnolo., M., Vettore, A., & Alberto, G. (05 2022. a.). Comparing accuracy of ultra-dense laser scanner and photogrammetry point clouds. Allikas: ResearchGate: https://www.researchgate.net/publication/360955347_COMPARING_ACCURACY_OF_ULTRA-DENSE_LASER_SCANNER_AND_PHOTOGAMMETRY_POINT_CLOUDS
- Raj, T., Hashim, F. H., Huddin, A. B., Ibrahim, M. F., & Hussain, A. (2020). A surevy on LiDAR Scanning Mechanisms. Microwave and Wireless Communications.
- Soomere, T., & Zaitseva, I. (2007). Estimates of wave climate in the northern Baltic Proper derived from visual wave observations at Vilsandi. Tallinn.
- Takashi Oguchi, .. T. (2011). Terrestrial Laser Scanning. rmt: P. P. Mike J. Smith, Geomorphological Mapping (lk 189-224). ScienceDirect.
- Terefenko, P. Z., Dalyot, S., Boski, T., & Pinheiro Lima-Filho, F. (24. 07 2018. a.). A High-Precision LiDAR-Based Method for Surveying and Classifying Coastal Notches. International Journal of Geo-Information.

- Torkan Masoud, U. L. (2023). Method to obtain 3D point clouds of tunnels using smartphone LiDAR and comparison to photogrammetry. ResearchGate.
- Torres, G. (27. 01 2023. a.). *Wingtra*. Allikas: https://wingtra.com/drone-photogrammetry-vs-lidar/?utm_medium=ppc&utm_source=adwords&utm_term=photogrammetry%20lidar&utm_campaign=Search+-+Google+Ads+-+English+-+001+-+2023+-+Q1&hsa_src=g&hsa_kw=photogrammetry%20lidar&hsa_mt=p&hsa_acc=4317485621&hsa_grp=1
- Yi-Chun Lin, Y.-T. C. (2019). *Evaluation of UAV LiDAR for Mapping Coastal Environments*. MDPI Open Access Journals.
- Zaitseva-Pärnaste, I. (2013). *Wave Climate and its Decadal Changes in the Baltic Sea Derived from Visual Observations*. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool.
- Zingfeld, A. (2021). *Avatud lähtekoodiga tarkava analüüs Pakri pankranniku 3D mudeli konstrueerimise jaoks*. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool.

Lisa 1. Profiilide skeem



Joonis 20. Uuritava ala profiilide skeem.

Lisa 2. 2009. ja 2012. aasta võrdluskaart



Joonis 21. Rasterkiht, mis kujutab 2009 ja 2012 aastate võrdlust

Lisa 3. 2012. ja 2016. aasta võrdluskaart



Joonis 22. Rasterkiht, mis kujutab 2012 ja 2016 aastate võrdlust

Lisa 4. 2016. ja 2018. aasta võrdluskaart



Joonis 23. Rasterkiht, mis kujutab 2016 ja 2018 aastate võrdlust

Lisa 5. 2018. ja 2020. aasta võrdluskaart



Joonis 24. Rasterkiht, mis kujutab 2018 ja 2020 aastate võrdlust

Lisa 6. 2020. ja 2021. aasta võrdluskaart



Joonis 25. Rasterkiht, mis kujutab 2020 ja 2021 aastate võrdlust

Lisa 7. 2021. ja 2022. aasta võrdluskaart



Joonis 26. Rasterkiht, mis kujutab 2021 ja 2022 aastate võrdlust

Lisa 8. 2009. ja 2022. aasta võrdluskaart



Joonis 27. Rasterkiht, mis kujutab 2009 ja 2022 aastate võrdlust

Lisa 9. Profiil 1 tabel

Tabel 5. Profiil 1 andmed

			Profiil 1					
Kaugus	2009	2012	2016	2018	2020	2021	2022	
0	25.41	25.05	24.87	25.13	25.16	25.12	25.17	
1	25.44	25.17	24.92	25.19	25.20	25.17	25.22	
10	25.62	25.34	25.24	25.16	25.16	25.11	25.29	
20	25.53	25.16	25.22	25.14	25.14	25.09	25.18	
30	25.58	25.50	25.60	25.55	25.40	25.30	25.42	
40	15.24	15.70	14.07	12.92	12.07	12.46	12.82	
50	7.92	6.62	7.39	7.07	7.42	7.28	7.39	

Lisa 10. Profiil 2 tabel

Tabel 6. Profiil 2 andmed

Kaugus	2009	2012	2016	2018	2020	2021	2022
0	25.19	24.84	24.89	24.83	24.79	24.77	24.83
1	25.13	24.76	24.67	24.75	24.76	24.73	24.80
10	25.15	24.80	24.86	24.82	24.76	24.72	24.83
20	25.45	25.13	25.12	25.07	25.02	25.00	25.04
30	25.67	25.36	25.38	25.37	25.26	25.26	25.38
40	24.12	25.49	14.08	14.49	25.22	25.22	25.40
50	9.95	0.17	0.22	-0.17	0.00	0.59	12.33

Lisa 11. Profiil 3 tabel

Tabel 7. Profiil 3 andmed

Kaugus	2009	2012	2016	2018	2020	2021	2022
0	24.70	24.40	24.41	24.45	24.37	24.15	24.21
1	24.65	24.40	24.34	24.42	24.37	24.19	24.22
10	24.48	24.21	24.13	24.14	24.17	24.14	24.13
20	24.53	24.11	24.25	24.18	24.12	24.10	24.25
30	23.45	22.99	22.86	22.84	22.70	22.71	22.90
40	23.05	22.66	22.74	22.65	22.67	22.61	22.65
50	22.82	7.59	5.48	4.82	11.30	8.07	9.00

Lisa 12. Profiil 4 tabel

Tabel 8. Profiil 4 andmed

Kaugus	2009	2012	2016	2018	2020	2021	2022
0	23.79	23.47	23.62	23.47	23.47	23.43	23.46
1	23.74	23.49	23.63	23.49	23.48	23.45	23.47
10	23.27	23.07	23.07	23.01	23.01	23.01	23.09
20	22.57	22.28	22.31	22.32	22.27	22.25	22.32
30	19.90	22.43	15.56	17.01	22.20	22.30	17.40
40	1.64	1.04	0.95	0.86	0.84	0.95	0.73
50	0.45	0.11	0.42	0.04	0.18	0.12	0.50

Lisa 13. Profiil 5 tabel

Tabel 9. Profiil 5 andmed

Kaugus	2009	2012	2016	2018	2020	2021	2022
0	22.15	22.12	22.23	21.77	22.52	22.52	22.58
1	22.09	22.05	21.93	21.74	22.29	22.24	22.18
10	22.81	23.19	23.84	23.50	23.70	23.58	23.43
20	21.93	21.77	21.78	21.72	21.66	21.65	21.72
30	21.84	21.73	16.51	16.06	21.52	21.24	17.21
40	7.39	7.69	5.48	6.24	6.64	6.47	6.32
50	1.42	1.06	0.91	1.05	0.69	0.73	0.72

Lisa 14. Profiil 6 tabel

Tabel 10. Profiil 6 andmed

Kaugus	2009	2012	2016	2018	2020	2021	2022
0	21.16	21.03	21.13	21.07	21.05	20.99	21.00
1	21.21	21.02	21.13	21.11	21.05	20.99	21.00
10	21.22	21.08	21.17	21.06	20.95	21.03	21.05
20	20.99	20.88	20.98	20.96	20.90	20.86	20.95
30	21.46	21.42	18.92	17.73	21.73	21.60	21.59
40	8.93	8.99	9.78	8.44	8.36	8.51	8.34
50	1.29	1.31	1.81	1.13	1.00	0.92	0.95

Lisa 15. Profiil 7 tabel

Tabel 11. Profiil 7 andmed

Kaugus	2009	2012	2016	2018	2020	2021	2022
0	19.32	19.21	19.28	19.10	19.14	19.10	19.14
1	19.26	19.36	19.20	19.09	19.13	19.08	19.14
10	19.28	20.22	19.39	19.18	20.90	20.57	19.55
20	19.39	19.05	19.17	19.06	19.06	19.05	19.18
30	18.96	18.97	18.99	18.87	18.93	18.89	18.86
40	18.81	7.06	7.86	7.61	7.82	7.83	7.75
50	0.37	1.31	1.54	1.01	1.00	0.86	0.86

Lisa 16. Profiil 8 tabel

Tabel 12. Profiil 8 andmed

Kaugus	2009	2012	2016	2018	2020	2021	2022
0	18.20	18.80	18.75	18.65	18.68	18.58	18.73
1	18.45	19.32	19.17	19.52	19.31	19.17	19.18
10	17.90	18.02	18.04	18.31	18.01	19.99	18.03
20	17.74	17.73	17.63	18.09	18.01	18.05	17.90
30	16.90	16.79	17.02	16.66	16.81	16.82	16.69
40	16.93	16.91	17.01	16.73	16.70	16.66	16.81
50	12.41	9.25	10.39	9.15	12.85	9.89	13.09

Lisa 17. Profiil 9 tabel

Tabel 13. Profiil 9 andmed

Kaugus	2009	2012	2016	2018	2020	2021	2022
0	15.56	15.64	15.69	15.59	15.60	15.53	15.63
1	15.63	15.65	15.71	15.56	15.63	15.57	15.59
10	15.51	15.56	15.55	15.49	15.57	15.46	15.59
20	15.49	15.48	15.46	15.45	15.44	15.41	15.44
30	15.12	15.27	15.38	15.11	15.13	14.98	15.07
40	15.97	16.25	16.10	16.21	16.27	16.16	16.07
50	17.87	17.32	12.85	12.21	17.85	17.89	18.11

Lisa 18. Profiil 10 tabel

Tabel 14. Profiil 10 andmed

Kaugus	2009	2012	2016	2018	2020	2021	2022
0	14.52	14.66	14.78	14.61	14.62	14.58	14.64
1	14.55	14.67	14.76	14.57	14.67	14.58	14.65
10	14.46	14.66	14.70	14.51	14.56	14.53	14.61
20	14.43	14.63	14.58	14.57	14.56	14.53	14.61
30	14.78	15.12	15.12	14.98	14.91	14.80	14.95
40	16.04	16.17	16.13	16.06	16.08	16.00	16.13
50	15.62	14.25	6.88	8.36	14.29	14.15	8.88

Lisa 19. Profiil 11 tabel

Tabel 15. Profiil 11 andmed

				Profiil 11			
Kaugus	2009	2012	2016	2018	2020	2021	2022
0	14.35	14.62	14.30	14.08	14.46	14.07	14.13
1	14.42	14.63	14.27	14.08	14.47	14.09	14.14
10	14.76	15.35	14.99	14.84	14.62	14.55	14.58
20	16.35	16.59	16.59	16.52	16.51	16.45	16.54
30	16.56	16.81	16.69	16.82	16.79	16.72	16.74
40	15.29	15.25	15.78	8.22	15.93	15.68	15.77
50	0.88	0.94	1.03	1.16	0.82	0.80	0.76

Lisa 20. Profiil 12 tabel

Tabel 16. Profiil 12 andmed

				Profiil 12			
Kaugus	2009	2012	2016	2018	2020	2021	2022
0	15.81	15.89	16.03	16.01	16.01	15.95	15.96
1	15.62	15.76	15.90	15.85	15.82	15.77	15.78
10	14.74	14.99	15.02	14.91	14.96	14.90	14.95
20	14.49	14.70	14.65	14.81	14.82	14.75	14.80
30	14.10	14.38	14.37	14.32	14.45	14.37	14.38
40	5.65	5.53	5.45	5.57	5.48	5.42	5.68
50	0.39	0.37	0.55	0.62	0.36	0.31	0.59

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina, /autori Eesnimi Perekonnanimi/:

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „/lõpu või magistritöö pealkiri/“, mille juhendaja on /juhendaja Eesnimi Perekonnanimi/:

1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

/kuupäev/

¹ Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loomingulise tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtjaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.