Tartu Ülikool
Loodus- ja täppisteaduste valdkond
Ökoloogia ja maateaduste instituut
Geoloogia osakond

Tiina Harak

Pakri poolsaare pankrannikust digitaalkaksiku loomine ja rannikumuutuste analüüs

Magistritöö geoloogias (30 EAP)

Juhendaja: Marko Kohv

Tartu 2024

Pakri poolsaare pankrannikust digitaalkaksiku loomine ja rannikumuutuste analüüs

Pakri poolsaare pank on osa Põhja-Eesti klindist, mis on omakorda osa Balti klindist. See on avatud mere mõjudele kolmest küljest ning seetõttu toimuvad pangal regulaarselt varingud. Antud töös kasutatakse kaugseire meetodina droonifotosid, et luua fotogramm-meetrilised mudelid Pakri pangast ning võrrelda ja uurida panga muutuste kulgu aastatel 2015-2024. Selleks kasutatakse Agisoft Metashape ning CloudCompare pilvetöötlus programme. Lisaks kasutatakse vanu aerofotosid ning droonifotodest loodud ortofotosid, määramaks ranniku kuju ja taandumise kiirust erinevate aastate lõikes. Selleks kasutatakse QGis programmi. Käesoleva magistritöö eesmärk on luua fotogramm-meetrilised mudelid Pakri pankranniku muutuste seireks ning kasutada orto- ja aerofotosid ranniku taganemise kiiruse hindamiseks.

Märksõnad: Pakri poolsaar, ranniku taganemise kiirus, kaugseire, 3D modelleerimine, Agisoft Metashape, CloudCompare, QGis

P510 Füüsiline geograafia, geomorfoloogia, pedoloogia, kartograafia, klimatoloogia. **T181** Kaugseire

Creating a digital twin of Pakri Peninsula cliff coast and analysing coastal changes

The Pakri Peninsula cliff is part of the North Estonian Klint, which in turn is part of the Baltic Klint. It is exposed to the effects of the sea from three sides, and therefore, collapses occur regularly on the cliff. In this study, drone photos are used as a remote sensing method to create photogrammetric models of the Pakri cliff and to compare and examine the changes in the cliff from 2015 to 2024. For this, Agisoft Metashape and CloudCompare cloud processing programs are used. Additionally, old aerial photos and orthophotos created from drone photos are used to determine the shape of the coastline and the rate of retreat over different years. For this, the QGIS program is used. The aim of this master's thesis is to create photogrammetric models for monitoring changes in the Pakri cliff coast and to use ortho- and aerial photos to assess the rate of coastline retreat.

Keywords: Pakri Peninsula, coastal retreat rate, remote sensing, 3D modeling, Agisoft Metashape, CloudCompare, QGis

P510 Physical geography, geomorphology, pedology cartography, climatology. **T181** Remote sensing

Sisukord

Lühendid 4
1. Sissejuhatus 5
2. Pakri panga asukoht ja uuringuala iseärasused 9
2.1. Pakri panga asukoht 9
2.2. Uuringuala iseärasused 10
3. Materjal ja meetodid 16
3.1. Droon 16
3.2. Droonide kasutamise reeglistik 16
3.3. Töös kasutatud droonid 17
3.4. Satelliitnavigatsioonisüsteem (RTK-GPS) ja maapealsed referentspunktid 17
3.5. Fotodest 3D-mudeli loomine, fotogramm-meetria 18
3.6. Ettevalmistus välitöödeks 19
3.7. Välitööd 19
3.8. Andmetöötlus Agisoft Metashape Professional programmis 20
3.9. Punktipilvede omavaheline analüüs 22
3.10. Ortofotode andmetöötlus 23
4. Tulemused 25
4.1. Panga 3D punktipilvede võrdluse tulemused 25
4.2. Panga aero- ja ortofotode tulemusel loodud võrdlused 28
5. Arutelu 31
6. Kokkuvõte 34
7. Summary 35
Tänuavaldused 37
Kasutatud kirjandus 38

Lühendid

CCD - *Charge Coupled Device*

GNSS - *Global Navigation Satellite System*

EMHI - Eesti Meteroloogia ja Hüdroloogia Instituut

GPS - *Global Positioning System*

RTK - *Real Time Kinematics*

IMU - *Inertial Measurement Unit*

EASA – *European Union Aviation Safety Agency*

RGB - *Red, Green, Blue*

UAV - *Unmanned Aerial Vehicles*

SOR - *Statistical Outlier Removal*

MALE - *Medium-altitude Long Endurance*

HALE - *High-altitude Long Endurance*

M3C2 - *Multiscale Model to Model Cloud Comparison*

WMS - *Web Map Service*

1. Sissejuhatus

Ranniku alad on üleminek maismaalisest merelisse keskkonda. Üle maakera on rannajoone pikkus 1,6 miljonit kilomeetrit. See pikk rannajoon on eriti haavatav muutustele, mida põhjustavad kliimamuutused. Globaalne kliima soojenemine tõstab ookeani temperatuuri, suurendab tormide arvukust ja tõstab merevee taset. Merevee tõus suurendab tormilaineid ja see omakorda kiirendab erosiooni ja suurendab üleujutuste ohtu. (Burke et al., 2001)

Erosiooni mõju ulatus ja intensiivsus on tihedalt seotud ranniku geoloogiliste omadustega. Erosiooni kiirust mõjutab palju ka ranniku geoloogia. Peeneteralisemad setted kantakse kergemini laiali, kõvematest kivimitest koosnevad rannad on püsivamad. Lisaks mängivad rolli ka kliima eripärad, tuulte tugevus, jõgede väljavoolu kiirus ning hoovuste ja lainete tugevus. (Masselink et al., 2014)

Rannikualade tähtsust rõhutab ka Melet (2020), kes toob esile nende mitmekülgsed kasutusvõimalused ja ohud. Nimelt on ranniku alad tihedamini asustatud kui sisemaa, seal on oluline infrastruktuur ning seal harrastatakse nii kalastust kui turismi. Samas on nad avatud ka paljudele looduslikele ja inimtekkelistele ohtudele. Kõrge riski tõttu on vajadus seire järele suur. Üheks võimaluseks rannikuid jälgida on kaugseire satelliitidelt. See võimaldab saada ülevaate üleujutustest, rannajoone muutustest, reostusest, vee kvaliteedist ja paljust muust (topograafia, maakoore liikumised). Satelliidid pakuvad suurepärast pikaajalist suhteliselt odavat andmestikku ning võimaldavad saada häid tulemusi mere seires, kuid rannikulähedasel alal (ligi 20 km) muudavad maismaalt tulevad setted ja toitained sensorilt tuleva andmestiku usaldusväärsust. Lisaks on rannikualadel atmosfääri mõju vähendavad geofüüsikalised parandid väiksema usaldusväärsusega, kuna veeaur, temperatuur ja aerosoolid muudavad elektromagnetlaineid, mis jõuavad satelliitide sensoriteni. (Melet et al., 2020)

Lisaks satelliitidele on rannikut võimalik seirata ka droonidelt. Viimastel aastatel on droonide kasutamine rannikuseirel muutunud aina populaarsemaks ja efektiivsemaks nii teadusmaailmas kui muudes valdkondades. Droonide kasutamine on kuluefektiivne ning võimaldab koos maapealsete kontrollpuntidega pikaajalisi mõõtmisi kergesti uuesti korrata. Lennates 50 meetri kõrguselt ülekattega 70-90%, on võimalik saada 2.5-4 cm kaardistamise täpsus. (Laporte-Fauret et al., 2019)

Siiski on droonide kasutamisel ka teatud piirangud, mis tulenevad tehnilistest ja keskkonnateguritest. Droonide kasutamist piirab seadmete hind, ilmastikuolud, akude kestvus, sensorite kvaliteet ja droonide kandevõime ning väike alade katvus ja kalibreerimata sensoritest tulenevad erinevused. (Novais et al., 2023)

Kuna drooniseire nõuab spetsiifilist varustust ning kohapealset andmete kogumist, võib selle asendada ka fikseeritud kaameraga. Fikseeritud kaamerad pakuvad pidevat ja automaatset andmekogumist, mis võib olla mugavam ja kuluefektiivsem lahendus. Nieto (2010) kasutas uuringumeetodina kolme CCD (*Charge Coupled Device*) kaamerat, mis automatiseeriti töötama päikese tõusust päikese loojanguni. Piltide töötlemiseks kirjutati avatud lähtekoodiga tarkvara Java programmeerimiskeeles. Tarkvara suudab hallata korraga mitut kaamerat, töödelda ja salvestada pilte ning edastada neid reaalajas. Piltide järeltöötlemise tarkvara paneb piltidele külge koordinaadid. Antud meetod sobib hästi teadlastele ja tudengitele, kuna pakutav tarkvara on tasuta kättesaadav. (Nieto et al., 2010)

Üheks meetodiks fotograafilise info töötlemiseks on fotogramm-meetria. See on soodne võimalus saada kõrge resolutsiooniga ruumilist infot alatest aastast 1940, kus fotograafia hakkas laialt levima. (Hanslow et al., 1997)

Fotogramm-meetria põhineb piltide töötlemisel, luues neist digitaalsed pinnamudelid, ortofotod ning 2D ja 3D mudelid. See võimaldab luua kaarte, 3D-vaateid ning animatsiooni. Erinevalt lidarskanneerimisest on fotogramm-meetria passiivne ehk ei saada välja signaale ning fotogramm-meetria ei võimalda näha taimestiku alla. Lidarskanneerimise ja fotogramm-meetria ühisjoonteks on GNSS (*Global Navigation Satellite System*) kasutamine, vigade filtreerimine, andmete hõrendamine ning digitaalse pinnamudeli loomine kujutiste analüüsiks. (Baltsavias, 1999)

Eesti ranniku seireks on oluline arvestada Läänemere geoloogia eripäradega, mis mõjutavad erosiooni ja rannikumuutusi. Soomere (2024) on andnud ülevaate Läänemere rannikust, mis on eri asukohtades muutustest erinevalt mõjutatud. Läänemere põhja- ja läänekallastel on vastupidav lubjakivi ja muu aluspõhi ning pärastjääaegne maakerge ületab merevee tõusu kiiruse. Läänemere ida- ja lõunakallas koosneb aga settekivimitest, mis on kergemini vastuvõtlik tormidele, iga-aastasele jääkatte vähenemisele ja lainetuse mõjudele. (Soomere, 2024)

Eesti rannajoon, oma spetsiifilise geomeetriaga, nõuab samuti erilist tähelepanu ja seiret. Eesti rannajoon on tänu oma geomeetriale hästi kaitstud, kuid on siiski tundlik tugevamatele tormidele

(Soomere, 2024). Tänu arvukatele poolsaartele, saartele ja lahtedele on Eesti rannajoone pikkuseks 3800 km. Eesti elanikkonnast elab 69% vähem kui 40 km kaugusel rannikust (Kull et al., 2007). Rannajoonel toimuvad nii tektoonilised kui isostaatilised kerked ning viimaste aastakümnetega on Läänemere tormisus oluliselt suurenenud, mida saab seletada globaalse kliima soojenemisega. See on seotud ka tugenevate läänetuultega ning Põhja-Atlandi tsüklonite aktiivsusega, mis on toonud kaasa Põhja-Euroopa soojemad talved ja Läänemere vähese jääkatte talviti. Enamik torme toimuvad oktoobrist märtsini. Suurem osa ranniku muutustest leiab aset tormistel perioodidel. (Orviku et al., 2013)

Rannajoone muutusi Eestis võib vaadelda Kiipsaare neeme näitel. See konkreetne näide toob esile, kuidas looduslikud ja inimtekkelised tegurid võivad mõjutada rannikuala morfoloogiat. Rivis (2024) andmetel on tugenevad tormid ning rannikuprotsessid muutnud neeme kuju kitsamaks ning liigutanud neeme tippu loodest kirde suunas, jättes ala pindalaliselt samaks. Viimase sajandi jooksul on neem nihkunud 105-125 meetrit. Kõige suuremad muutused on toimunud neeme lääneosas, kus pinnast on liigutatud viimase 20 aasta jooksul edasi-tagasi ligi 100 meetrit. (Rivis, 2004)

Teiseks märkimisväärseks sündmuseks, mis on mõjutanud Eesti rannikut, on 9. jaanuaril 2005 aset leidnud torm. 9. jaanuar 2005 aastal tabast Eestit tugev tormisündmus, kui tsüklon nimega Kudrun liikus Põhja-Atlandit mööda läbi Skandinaavia ja Soome Eestisse ning tõi Pärnus kaasa 275 cm kõrguse tormilaine. Tõnisson (2008) viis läbi ranna uuringud Saaremaal, et mõõdistada tsükloni pool tekitatud muutusi rannikule. Selleks kasutati EMHI (Eesti Meteroloogia ja Hüdroloogia Instituut) ilmajaamade andmeid, võrreldi erinevaid topograafilisi ja geomorfoloogilisi kaarte, kasutati 2000-2006 aasta GPS (*Global Positioning System)* seadmete andmeid ning tehti rannale topograafiline profileerimine. Tulemustest selgus, et mere tase tõusis Saaremaal kuni 207 cm ning tuule kiirus ulatus puhanguti 38 m/s. Kõige rohkem oli sellest aga mõjutatud Elba saar, kus erosioon kandis minema üle 3000 m^3 pinnast. Lisaks Elbale saare muutustele taganes ka Kiipsaares rannaastang 10-20 meetrit, laiendades ja tõstes rannikut. (Tõnisson et al., 2008)

Uuringud Eesti ranniku eri piirkondades on näidanud olulisi erinevusi erosiooni määras ja rannikuprotsessides. Orviku (2013) viis läbi ranna uuringud Osmussaarel, Pakri pangal, Kakumäe pangal, Järverannas ja Kiipsaarel Harilaius. Tööde teostamiseks kasutati kergesti äratuntavaid punkte rannikul ning punktid mõõdistati kasutades Leica DGPS GS09 geopositsioneerimise seadet

koos RTK (*Real Time Kinematics*) parandiga. Kõikides piirkondades kasutati ka ortofotosid aastast 1995-2011. Lisaks kasutati arhiivide andmeid Osmussaare majaka asukohast kuni 240 aastat tagasi ja Pakri tuletorni asukohast kuni 275 aastat tagasi. Töö tulemusel selgus, et suurim ranniku taganemine leidis aset Kiipsaarel (7 m/a). See tulenes otsesest avatusest lainetusele ja pehmetest setetest. Kaheksa korda aeglasem ranniku taganemine toimus Järve rannal (0.5 m/a). Kõige aeglasem taganemine toimus Osmussaarel, kus lubjakivi pank oli kõige vastupidavam kulutustele. Pakri rannik on erosioonile vastupidavam ning selle taganemise kiirus on 0.25 m/a. (Kaarel Orviku et al., 2013)

Pakri panga uuringud, mida on läbi viinud Tallinna Tehnikaülikooli üliõpilased, on samuti andnud väärtuslikku teavet ranniku muutuste kohta. Uuritud on nii ortofotosid, lidar andmeid kui ka fotogramm-meetriliste programmide sobivust panga morfoloogia muutuste uurimiseks. Uuritavad andmed on saadud nii käsitsi pildistades kui drooni fotodelt. Peatükis ''Uuringuala iseärasused'' on antud tööd lähemalt kirja pandud.

Käesoelva töö eesmärgid on:

1) Luua droonipiltidest fotogramm-meetrilised mudelid;
2) Kasutada mudeleid, hindamaks Pakri pankranniku varingute ulatust;
3) Kasutada aero- ja ortofotosid, et hinnata ranniku taganemise kiirust.

2. Pakri panga asukoht ja uuringuala iseärasused

2.1. Pakri panga asukoht

Pakri pank on Balti klindi mandriosa lõpp ning Pakri poolsaare ranniku kõrgeim lõik (kõrgus kuni 25 meetrit). Panga idaosas asub Pakri juga ning pangal asub ka Pakerordi lademe tüüppaljand. Pank kuulub Pakri maastikukaitsealasse. ("Pakri Pank," 2003)

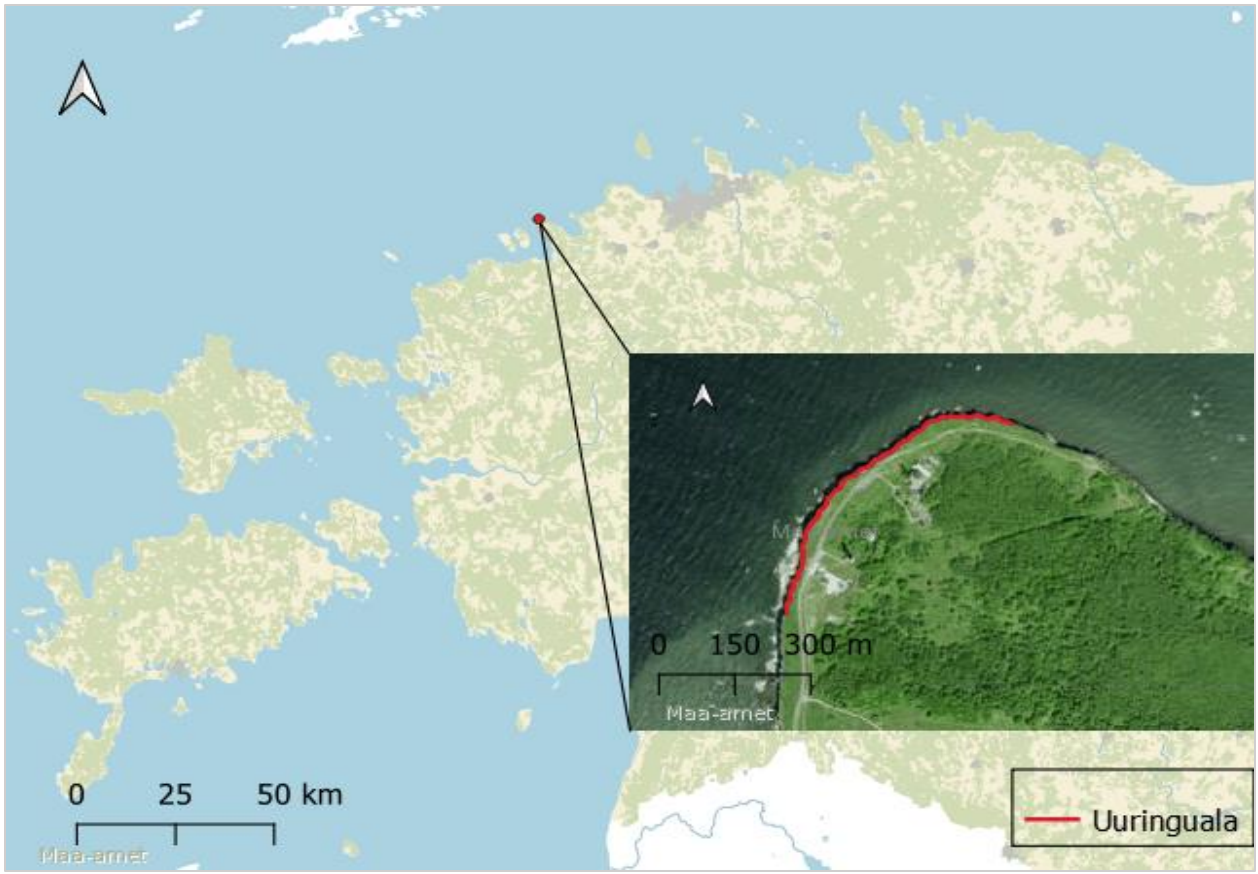
Soesoo ja Miidel (2006) kirjutavad oma töös, et Pakri pank on osa Põhja-Eesti klindist mis omakorda on osa suuremast Balti klindist (Joonis 1), mis algab Ölandi saarelt Rootsist ning ulatub läbi Läänemere Laadoga järveni Venemaal. Klindi pikkus on linnulennult 1200 km. Klindil on Kambriumi kuni Ordoviitsiumi vanusega kivimid (umbes 540-460 milj. aasta vanused). Läänepoolsem osa on Ölandi klint (pikkus 150 km), sellele järgneb Läänemere klint (ligi 500 km), seejärel on järgnev maismaaline osa Põhja-Eesti klint, mis asub Osmussaare ja Narva vahelisel alal, ligi 300 km. Narvast ida poole on klint enamasti mattunud ning seda osa kutsutakse Ingeri klindiks. (Soesoo & Miidel, 2006)

Täpsema kirjelduse klindi kohta saab lugeja Tuuling & Flodén (2016) artiklist. Balti klint on suures osas Läänemere pool üleujutatud terrassiline kompleks. Klint jagatakse struktuurse osa järgi (kilbi ja platvormi üleminek) kaheks:1) Fennoskandia kilbi lõunanõlval on Balti homoklinaal ning Gotlandi saarest Ölandi lõunatipuni kilbi osa. Põhja-Eestis on platvorm kuesta reljeefiga, ehk 0,1–0,2° kallutatud lõuna suunas. Platvormi pealmise järsu serva moodustavad Ordoviitsiumi lubjakivid mille all asuvad terrigeensed Ordiviitsiumi-Kambriumi kivimid. Eestis nõrgalt väljendunud lubjakivi terrassiline serv muutub silmapaistvaks Läänemere keskosas. (Tuuling & Flodén, 2016)

Joonis 1. Balti klindi asukoht. (Soesoo & Miidel, 2006)

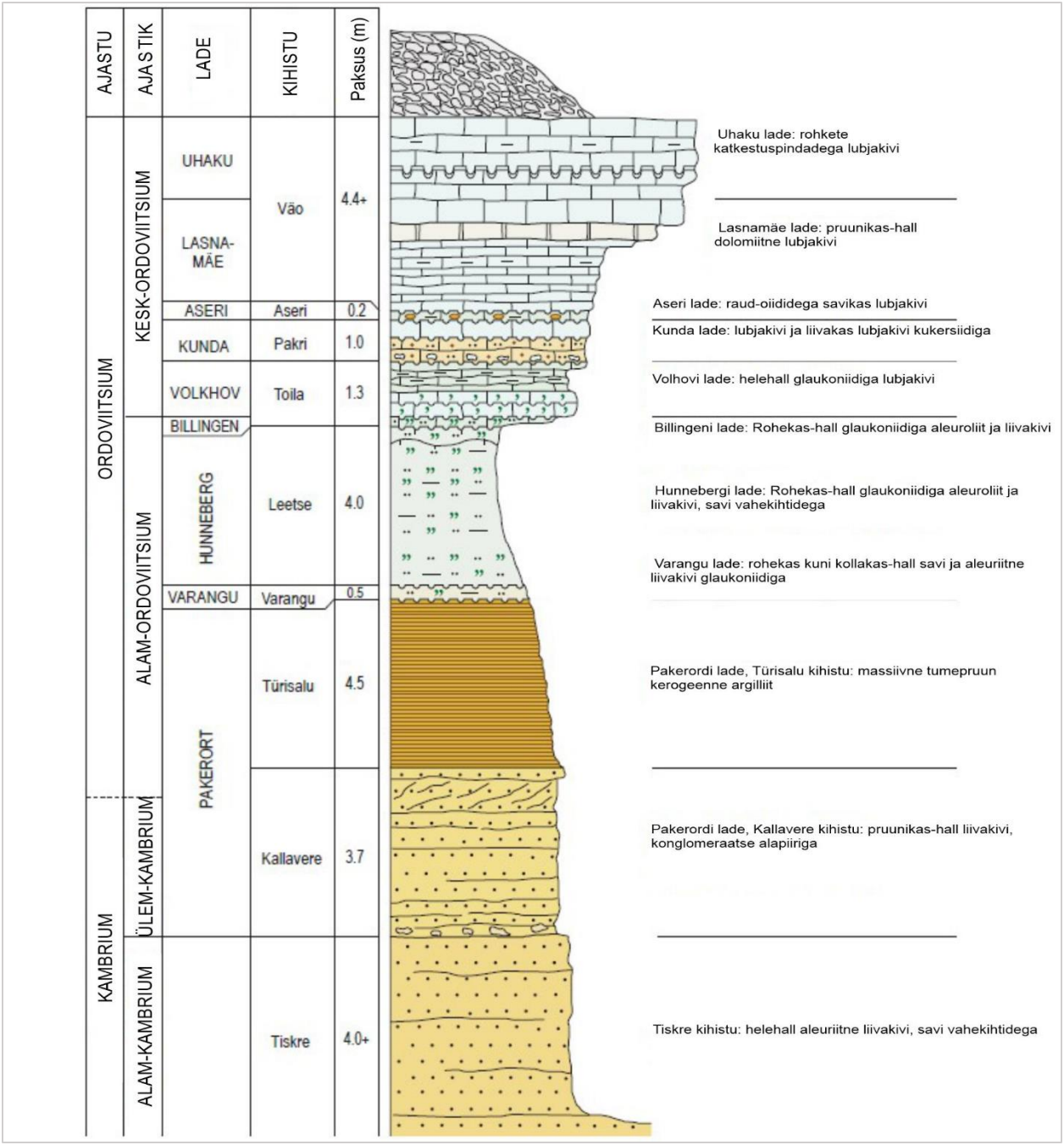
2.2. Uuringuala iseärasused

Pakri pank asub Balti klindi maismaalisel osal, Lääne-Eestis, Pakri poolsaarel, 1 km kaugusel Paldiski linnast põhja suunas (Tuuling et al., 2011). Antud töös uuriti linnulennult ligi 600 m pikkust ja piki rannikut liikudes ligi 700 m pikkust rannajoont (Joonis) koos klindiastanguga.



Joonis 2. Pakri panga uuringuala asukoht. (Aluskaart ja ortofoto: Maa-amet)

Pakri panga kivimite täieliku läbilõike saamiseks on loodud komposiit sektsioon (Joonis 3), mis ühendab endas Pakri neeme tipu osa, Leetse sektsiooni neeme idakaldal ja Uuga sektsiooni läänekaldal. Viimane on turistidele kõige kergemini ligipääsetav ning koosneb Alam-Ordoviitsiumi argilliidist kuni Kesk-Ordoviitsiumi lubjakivideni. Kambriumi ja Ordoviitsiumi piir on pangal litoloogiliselt eristamatu. Graptolliitide järgi argilliidis ja konodontide fossiilide järgi liivakivides peaks piir olema Kallavere kihistu liivakivi ülemises osas. Panga Kambriumi vanuseline osa koosneb liivakividest, Alam-Ordoviitsiumi osa argilliidist ja glaukoniidiga liivakividest ja aleuroliidist ja Kesk-Ordoviitsiumi osa glaukoniidiga lubjakividest, kukersiidiga lubjakividest ja dolomiitsetest või puhastest lubjakividest. (Tuuling et al., 2011)



Joonis 3. Pakri panga komposiit läbilõige Pakri neeme tipust (N59° 23’ 13.68″, E24° 2’7.52″), Leetse sektsioonist (N59° 21’ 33.82″, E24° 9’ 18.7″) ja Uuga sektsioonist ((N59° 22’ 16.33″, E24° 2’12.7″). (Tuuling et al., 2011)

Pakri neem lasub otse vette, mistõttu saab lainetuse piiril olev vesi kaldasse murrutuskulpaid uuristada. Panga alumine osa koosneb pehmetest liiva- ja savikivimitest ning selle peal lasub veelgi pudedam glaukoniitliivakivi. Panka läbistavad vertikaalsed lõhesüsteemid, mööda mida

pääseb sademevesi lubjakivi kihte lahustama. Lõhesüsteemid on kirde-edela ja loode-kagusuunalised. Lõhed järgnevad 3-5 kuni 8-10 meetri järel. Iga 50-150 meetri järel korduvad 1-3 meetri laiused rikkevööndid. Kui rannajoon ja lõhesüsteemid lõikuvad sarnase paralleelse nurga all, võib variseda mitmekümne meetrine lõik korraga. Varingud juhtuvad enamasti kevadeti, kui sulades muutub savi libedaks ja külmudes uhutakse pinnast veelgi sisse ja lõhed laienevad. Suurimad varingud on toimunud 2008, 2003 ja 1996 aasta. (Einasto, n.d)

Joonis 2. 01.2024 alla kukkunud vaateplatvorm Pakri neeme tipul. Foto: Tiina Harak.

Viimane suurem varing toimus jaanuaris 2024, kui kukkus alla Paldiski vaateplatvorm (Joonis 2). Peale varingut ütles Hints ERR-ile antud intervjuus, et varingute toimumist on raske ennustada, kuid keskmiselt liigub rannik 100 aastaga umbes 25 meetrit maismaa suunas ning seetõttu on ligi 300 aasta pärast ohus ka rannikul asuv Eesti kõrgeim tuletorn, mis asub 100 meetri kaugusel rannikust. (Hints, 2024)

Pakri tuletornidest on andnud ülevaate Orviku (2013). Tema andmetel ehitati 1724 aastal Pakri poolsaarele Peeter I käsul 15 meetri kõrgune tuletorn, mis asus rannajoonest 70 meetrit sisemaa

suunas. Samale asukohale rajati 1808 aastal 6 meetrit kõrgem tuletorn. 1889 aastal rajati vanast tuletornist 90 meetrit sisemaa poole uus tuletorn. 2008 aasta märtsis toimus suur varing, mis jõudis vana tuletorni vundamendini. 275 aastase perioodi järel oli rannajoon taandunud 70 meetrit, mis teeb taganemise kiiruseks 25 cm aastas. Taganemise kiirus ilma 2008 aasta varingut arvesse võtmata on 20 cm aastas. (Orviku et al., 2013)

Viimase kümnendi jooksul on pakri pangal toimuvaid protsesse peamiselt uurinud Tallinna Tehnikaülikooli üliõpilased. Järgnevalt on kokku võetud nende üliõpilaste uuringud Pakri panga kohta.

2015 aasta Tallinna Tehnikaülikooli lõputöö oli kirjutatud Kasepõld (2015) poolt. See oli esimene Pakri pankranniku seire alane töö, mis kasutas ranniku uurimisel droonipilte ja fotogramm-meetriat. Lõputöös tehti drooniga 81 pilti, mis laeti üles Autodesk Recap Photo programmi ning neist loodi 3D mudel pangast pealtvaates. Külgvaateks loodi eraldi mudel 95 foto abil. Tööst selgus, et pealtvaates mudelit on võimalik kasutada rannajoone kaardistamiseks ning külgvaate mudel võimaldab ohutult jälgida pragude asukohti. Töös kirjeldati ka põhjalikult pilditöötlusega tekkinud probleeme. (Kasepõld, 2015)

Viis aastat hiljem kirjutas Mõsovski (2020) Tallinna Tehnikaülikoolist lõputöö, kus rekonstrueeriti 3D mudelid droonifotodest, mis tehti aastatel 2015, 2017 ja 2018. Mudelid loodi OpenDroneMap tarkvaras. Töö käigus selgus, et kõige parem kvaliteet oli 2015 aasta mudelil ning seda saab kasutada edaspidisteks uuringuteks, et määrata panga taandumist. (Mõsovski, 2020)

2021 aastal valmis Zingfeld (2021) Tallinna Tehnikaülikooli lõputöö, kus võrreldi Pakri pankranniku uurimiseks kolme erinevat avatud lähtekoodiga tarkvara- OpenDroneMap, COLMAP ning Meshlabi. Kuna olude sunnil ei olnud võimalik Pakri pankrannikule pildistama minna, kasutati analoogina Laagna tänava paljandit. Pildistamiseks kasutati kaamerat Canon EOS 350d+. Töö tulemusel selgus, et kvantitatiivseks analüüsiks on parim OpenDroneMap ning kvalitatiivseks analüüsiks sobib paremini COLMAP. (Zingfeld, 2021)

Pilgas (2021) võrdles oma Tallinna Tehnikaülikooli uurimustöös OpenDroneMap ja Meshroom programme, luues 3D mudelid Pakri pangast. Mudelite omavaheliseks võrdluseks kasutati CloudCompare tarkvara. Võrdluseks kasutati 2015 ja 2018 aasta drooni fotosid, mis pildistati Eesti

Mereakadeemia õpilase poolt. Töö tulemusel selgus, et loodud mudelid on kvaliteetsed ja sobivad panga muutuste võrdlemiseks hästi, lisaks osutus Meshroom parimaks tarkvaraks. (Pilags, 2021)

2023 aastal valmis Mõsovski (2023) Tallinna Tehnikaülikooli magistritöö, kus uuriti Pakri pankranniku pikaajalisi rannajoone muutusi, kasutades ortofotosid aastast 2005-2022 ja ArcGis Pro tarkvara, lisaks uuriti hüdrometeoroloogilisi andmeid. Uuringu tulemusel leiti seos viimase 20 aasta temperatuuri soojenemise, 5-7 aastaste vahedega saabuvate tugevamate tormide ning iga 5-7 aasta järel tekkivate suuremate varingute vahel. Suurimad varingud toimusid vana tuletorni läheduses. Töö autor järeldab, et rannikumuutusi tuleb uurida pikema aja vältel ning varingute ulatust ja aega ei ole võimalik ette ennustada. Lisaks kirjutab autor, et ArcGIS proramm sobib hästi varingute kaardistamiseks. Autor mainib ka seda, et vanade ortofotode kvaliteet ei ole hea, kuid tööd lihtsustab Maa-ameti poolt juba refereeritud ortofotod, mis paigutavad fotod kaardile automaatselt. (Mõsovski, 2023)

Pikulova (2023) Tallinna Tehnikaülikoolist kasutas oma lõputöös lidar andmeid Pakri pankranniku muutuste uurimiseks aastatel 2009-2022. Andmeid töödeldi ArcGis Pro tarkvaras ning rannikule tehti ka 12 profiili, et veenduda tulemuste täpsuses. Töö tulemusel selgus, et rannik on nende aastate jooksul kulunud, kuid kuna lidariga saadud andmepunktid on liiga väikese tihedusega (kuni 2.1 punkti m^2 kohta) ning mõõdistamisel on kasutatud eri ajaperioodil erinevaid seadmeid ja mõõdistamise kõrguseid, siis tekkisid andmetöötlus vead ning andmed muutusid ebausaldusväärseks. (Pikulova, 2023)

3. Materjal ja meetodid

3.1. Droon

Droon on mehitamata õhusõiduk, mis lendab kas automaatselt või kaugjuhtimisega. Kaugjuhtimise ja navigatsiooni arengu tõttu on võimalik kasutada droone, et lennata kohtades, kus inimesel oleks keeruline või ohtlik viibida. Droone leidub erinevates kaalugategooriates, kus nanodroonid kaaluvad alla 200 g ning MALE (*Medium-altitude Long Endurance*) ja HALE (*High-altitude Long Endurance*) droonid üle 600 kg. Droone kategoriseeritakse lisaks kaalule ka tiiva laiuse, tiiva koormuse, maksimaalse kõrguse, kiiruse ja kalliduse põhjal. (Hassanalian & Abdelkefi, 2017)

Tänapäevased droonid on varustatud täpse positsioneerimissüsteemi GNSS-iga ja inertsiaalanduriga (IMU - *Inertial Measurement Unit*), mis koos võimaldavad drooni asukohta ja orientatsiooni jälgida ning mis annab droonile kõrge potentsiaali kaardistamiseks. Kaardistamisel saab kasutada nii lennuki tüüpi kui multirootori tüüpi droone – esimene võimaldab kaardistada suuremaid maa-alasid suurema lennukiiruse tõttu, viimane on aga parem manööverdamisel. (Madawalagama et al., 2016)

3.2. Droonide kasutamise reeglistik

Drooni käitleja on isik, kellele kuulub vähemalt üks mehitamata õhusõiduk. Käitlejaks peavad end registreerima kõik drooni omanikud, kelle droonil on kaamera või kelle droon kaalub üle 250 g. Kaugpiloot on isik, kes juhib mehitamata õhusõidukit. Kaugpiloodi tunnistus on kohustuslik kõigile isikutele, kes lendavad sõidukiga, mis kaalub üle 250 g (Kaugpiloodi Pädevus, n.d.). Pakri poolsaarel lendamisel eripiiranguid ei ole ning lubatud on lennata A1/A3 kategooria lennulubadega. Riskitaseme järgi on droonilubade kategooriad jagatud kolmeks: avatud kategooria on väikseima riskitasemega (A1, A2 ja A3), erikategooria nõuab enne lennutamist riskianalüüsi ja Transpordiameti luba ning sertifitseeritud kategoorias on riskitase nii kõrge, et lennutamiseks on tarvis Euroopa Liidu Lennuohutusameti (EASA) luba. Transpordiametis saab teha vaid avatud kategooria lubasid. (Droonide Lennutamine, n.d.)

3.3. Töös kasutatud droonid

Magistritöö fotogramm-meetriliste mudelite tegemiseks kasutati kolme drooni. 2015 aasta mudel tehti drooniga DJI Phantom 2 Vision, 2022 aasta mudel drooniga DJI Phantom 4 RTK (SDK) ja 2024 aasta mudel drooniga DJI Mavic 3M.

DJI Phantom 2 Vision on neljarootoriline droon, millel on üheteljeline vibratsioonivastane kaamera stabilisaator (*gimbal*). Lennuaeg on 25 minutit ja drooni kaal 1160 g. Maksimaalne lennukiirus on 15 m/s. Side kaugus avatud alal on 300 m. Kaamera resolutsioon on 14 mp, sensori suurus on 1/2.3". (Phantom 2 Vision Specs, n.d.)

DJI Phantom 4 RTK droon kaalub 1391 g ning maksimaalne lennukiirus on 16 m/s. Droonil on RTK GNSS (*Real-Time Kinematics*) vertikaalse positsioneerimistäpsusega 1.5 cm + 1 ppm ja horisontaalse positsioneerimistäpsusega 1 cm + 1 ppm. Kaamera resolutsioon on 20 mp, sensori suurus on 1". Droonil on 3-teljeline gimbal stabilisaator maksimaalse kallakusnurgaga 90° s. Infrapunasensori tööraadius takistuste leidmiseks on 0.2 - 7 meetrit. (Phantom 4 RTK Specs, n.d.)

DJI Mavic 3M droon kaalub koos propellerite ja RTK mooduliga 951 g. Maksimaalne lennukiirus sport režiimis on 21 m/s otselennul, külglennul 20 m/s ja tagurpidi lennul 19 m/s. Normaalrežiimis on maksimaalne lennukiirus 15 m/s. Lennata saab tuulega kuni 12 m/s. Lennuaeg tuulevaikse ilmaga on 43 minutit, tuulega 37 minutit. Kaamera resolutsioon on 20 mp, sensori suurus on 1/2.8". Droonil on RGB (*Red, Green, Blue*) ja multispektraalkaamera ning 3-teljeline gimbal stabilisaator. Töös kasutati ainult RGB kaamerat. Droonil on mitmesuunaline binokulaarne takistuste avastamissüsteem ning drooni põhjal infrapunasensor. (DJI Mavic 3M Specs, n.d.)

3.4. Satelliitnavigatsioonisüsteem (RTK-GPS) ja maapealsed referentspunktid

Viimastel aastatel on mikro ja mini droone (alla 5 kg) hakatud aina enam kaugseires kasutama. Seetõttu on suurenenud vajadus kogutud andmete georefereerimiseks. Seda saab teha, kasutades maapealseid kontrollpunkte või sõidukile paigaldatud GNSS sensoreid. Kuna maapealne refereerimine on aeganõudev, siis on suurenenud nõudlus sõidukile paigaldatud süsteemide järele, mida kasutatakse reaalajas georefereerimiseks. (Eling et al., 2015)

RTK tehnoloogiat kasutatakse droonide peal asukoha täpsuse parandamiseks. Mõõtmistulemusi parandatakse reaalajas, kasutades kas referentsjaama või virtuaalset jaama. Täpsus saadakse paari

sentimeetri ulatuses. Erinevalt satelliitandmetest ei mõjuta RTK-d ilmastik, mäed, insfrastruktuur ega ionosfäärilased moonutused. (Mis on Rtk Ja Mis See Droonile Juurde Annab, n.d.)

Andmete maapealseks georefereerimiseks kasutatakse maapealseid markereid ehk referentspunkte, mis mõõdetakse eraldi GNSS seadmega. Markerid peavad olema fotodelt hästi näha ning nad peavad selgelt keskkonnast välja paistma. Marker ei tohi hästi peegeldada. Protseduur on väga aeganõudev. Punktid peavad paiknema nii ala servades kui keskel, võiksid olla erinevatel kõrgustel ning ebakorrapärase ala puhul võiks punkte olla arvukamalt. (Kohv, 2023b)

3.5. Fotodest 3D-mudeli loomine, fotogramm-meetria

Fotogramm-meetria on teadus, mis annab meile usaldusväärset infot objekti või pinna kohta ilma füüsilise kontaktita (Schenk, n.d.). Fotogramm-meetria meetod pakub informatsiooni kvantitatiivsest andmestikust, ehk andmetest, mis ei ole otseselt mõõdetud. See võimaldab fotode kaudu mõõta kaugusi, teada saada koordinaate ning luua kaarte. Kui olemas on kaks või enam fotot, mis on pildistatud erinevate nurkade, on võimalik arvutada kolmemõõtmeline koordinaat kõigist mõlemal fotol olevast punktist. (Linder, 2003)

Fotogramm-meetria abil parandatakse fotode geomeetrilisi moonutusi, luuakse 3D-mudeleid ja ortofotosid. Fotogramm-meetria töövoog on järgnev:

1. Värvigradiente kasutades otsitakse fotodelt võtmepunkte (*key points*);
2. Omavahel kokku sobivad võtmepunktid ühendatakse, luues sõlmpunktid (*tie points*);
3. Matemaatilise mudeli abil korrigeeritakse piltide geomeetrilised moonutused, leitakse pildistamise suhtelised asukohad ja objektist luuakse hõre punktipilv (*sparse point cloud*);
4. Seejärel luuakse tihe punktipilv (*dense point cloud*), mida on võimalik klassifitseerida;
5. Tihedast punktipilvest luuakse katkematu 3D-pinnamude (*mesh*);
6. Pinnamudelite abil koostatakse ortofotomosaiik üksikutest aerofotodest.

Pildistatud objektid ei tohi olla liiga ühtlase tekstuuri või sarnase värviga, nt vesi, siledad ja peegeldavad objektid. Objekt ei tohi pildistamise ajal liikuda (nt sõitvad autod). Pildistamise ülekate võiks olla 70-90%, ehk ühte punkti peaks näha olema 3-5 erinevast asukohast. Mida rohkem on eri nurkade alt pildistatud, seda paremini saab parandada kaameramudelit. Vältida tuleb muutuvaid valgusolusid, mudelite koostamiseks on parim pilvine ilm. (Kohv, 2023a)

3.6. Ettevalmistus välitöödeks

Autor tegi enne planeeritavat lendu avatud kategooria drooni load A1/A3. Õppematerjalid olid kättesaadavad Transpordiameti kodulehel, kus sai teha ka drooni lubasid. Eksam koosnes 40-st valikvastustega küsimusest. Testis hinnati ohutut õhusõiduki käitlemise oskust. Kaugpiloodi avatud kategooria tunnistus kehtib 5 aastat. (Kaugpiloodi Pädevus, n.d.)

3.7. Välitööd

Esimesed välitööd tehti 2022 aastal, kui töö autor koos Marko Kohviga käis Pakri pangal tegemas teist droonilendu (esimene lend toimus 2015 aastal ilma autori kohaloluta). Teine välitöö toimus 2024 aasta märtsis. Mõlemal korral lendas Marko Kohv. Märtsis kasutati ka maapealseid mõõdistuspunkte (Tabel 1), kus töö autor laotas uuringualale kergesti väljapaistvad must-valged märgised ning mõõtis antud ala koordinaadid ja kõrguse HIPER Digital UHV 2 RTK-GPS-iga. Lisaks kasutati mõõdistamisel ka kergesti äratuntavaid ja ajas vähe muutuvaid objekte, nagu betoonplokid. See oli vajalik hilisemaks teiste mudelite georefereerimiseks.

Kuna märtsi mudel osutus ebausaldusväärseks mõõtmiste tegemisel seoses ulatusliku panga jäätumisega, läks töö autor 1. mail 2024 aastal uuesti Pakri rannikule droonimõõtmisi tegema. Mais toimunud drooni lennu tegi autor. Algselt planeeriti kasutada drooni peal olevat RTK seadet, kuid seade ei hakanud tööle. Seega lülitati see välja. Lend toimus päikesepaistelisel pilvitul päeval. Kokku tehti lende kolmel alal, esimesel alal tehti lend panga rannikuala kohal 20 meetri kõrgusel, teiseks alaks oli panga serva pildistamine astangust mere pool paari meetri kõrgusel. Viimasena tehti rannajoonest madalamal alal asuvad pildid. Selleks pidi drooni lennutama kolmest eri piirkonnast, kuna panga taha lennates kaotas droon kergesti side saatjaga. Lennates oli oluline arvestada nähtavusega – päikesepaistelise ilmaga on saatja jälgimine peegelduste tõttu raskendatud. Lisaks tuli arvestada panga kaldenurgaga, seetõttu pidi drooni lennates keerama vastavalt panga nurgale, et mitte panka sisse lennata. Lisaks tuli arvestada allakukkunud rusukaldega – kõige kõrgem rusu tükk oli 11 meetri kõrgusel merepinnast. Kui alustada lendu panga madalamast, 20 meetri kõrgusest osast ning lennata mere kohal 10 meetrit maapinnast madalamal, siis võib droon lennata rusukaldesse vaatamata sellele, et rannik kõige kõrgemal osal, Pakri vana tuletorni ääres, on 25.7 meetrit.

Tabel 1. Pakri poolsaare maapealsed mõõdistuspunktid

Pakri poolsaare maapealsed mõõdistuspunktid			
Punkti number	**X-koordinaat**	**Y-koordinaat**	**Kõrgus, m**
1	6583200	502030	24.61
2	6583199	502027	25.20
3	6583243	502045	25.19
4	6583320	502061	23.75
5	6583403	502102	23.17
6	6583418	502112	24.13
7	6583423	502114	24.18
8	6583443	502132	23.44
9	6583551	502488	22.64
10	6583577	502410	22.66
11	6583572	502347	23.24
12	6583567	502293	23.60
13	6583528	502253	24.23

3.8. Andmetöötlus Agisoft Metashape Professional programmis

2024 aasta märtsis pildistatud fotod laeti üles Agisoft Metashape Professional programmi. Kokku tehti 1230 RGB fotot. Fotode fookuskaugus oli 12.29 mm. Koordinaatide täpsus oli 10 m. Esmalt hinnati kõikide fotode kvaliteeti. Madalaima pildi kvaliteedi väärtus oli 0.74 ja kõrgemail 0.89. Automaatne koordinaatsüsteem oli WGS 84 (EPSG::4326). See konventeeriti ümber Eesti koordinaatsüsteemi *Estonian Coordinate System of 1997* (EPSG::3301). Fotod joondati, kasutades töövoos täpsust – kõrge. Muud parameetrid jäeti samaks. Mudelisse tekitati ligi 549 000 punktist koosnev punktipilv. Seejärel mudel puhastati, kasutades käsklust mudeli järkjärguline selekteerimine. Esmalt selekteeriti ja kustutati 10% punkte ümberprojektsiooni vigadega, siis 10%

punkte rekonstrueerimise vigadega ja seejärel allesjäänutest 10% punkte projektsiooni täpsuse vigadega. Mudelit puhastati ka käsitsi, valides eraldiseisvad punktid välja ning kustutades need. Seejärel optimiseeriti kaamerat ja uuendati mudelit.

Järgmisena toodi mudelisse sisse maapealsed mõõdistuspunktid. Punkte oli kokku 13, punktide mõõdustustäpsus oli 0.01 meetrit (täpsusviga kuni 0.16 meetrit). Esmalt aktiveeriti marker, seejärel selekteeriti mudelil markeri ümbruses olevad fotod ja asetati fotodel markerid õigetesse punktidesse käsitsi. Fotod reastati leitud markerite järgi. Fotodel leiti üles kõik markerid, iga marker oli projekteeritud nelja kuni 13-ne pildi peal. Peale iga markeri aktiveerimist optimiseeriti kaameraid ja uuendati mudelit. Mudelis jäeti peale fotode reastamist fotode koordinaadid kasutamata, kuna kõrgus oli vale. Selle asemel kasutati vaid paika pandud markerite koordinaate, mis oli mõõdetud RTK seadmega ja nende abil arvutati kogu mudelile õiged kõrguskoordinaadid.

Tiheda punktipilve loomisel kasutati kõrget kvaliteet ja arvutati ka punktidele usaldusväärsus. Kasutati mõõdukat sügavusfiltrit. See etapp oli kõige arvutusmahukam ja ajakulukam. Punktipilv filtreeriti usaldusväärsuse põhjal, kasutades filtri vahemikuks 0…1, filtreeritud punktid valiti ja kustutati. Antud tööriist selekteeris välja punktid, mis olid ülejäänud mudelist selgelt kõrgemal või madalamal. Lisaks kasutati tööriista – vabas vormis selekteerimine, et valida välja ja kustutada muud selgelt üldisest mudelist erinevad punktid.

Järgmisena arvutati mudelile pind, andmeallikana kasutati fotodest arvutatud sügavuse kaarte (*depth maps*) ja kvaliteediks määrati kõrge. Seejärel loodi pinnale tekstuur, kasutades vaikimisi seadistusi. Kõrgusmudeli loomiseks kasutati alusandmeteks punktipilve ja projektsiooniks EPSG::3301. Ortomosaiigi tegemisel kasutati aluspinnana kõrgusmudelit ja projektsiooniks valiti samuti EPSG::3301.

Pakri teine lend oli tehtud 22.10.2022. Pildid laeti üles Agisoft Metashape Professional tarkvarasse ning töövoog ja kvaliteedi parameetrid jäeti samaks 2024 aasta mudeliga. Piltide kvaliteet oli 0.75 kuni 0.83. Kaameraks kasutati DJI FC6310R, fookuskaugus 8.8 mm. Täpsus 0.01 meetrit. Fotosid oli kokku 711, millest ei joondunud 1, seega jäeti see mudelis kasutamata. Algselt oli mudelis ligi 627 000 punkti. Mudel puhastati kolmekordselt ja lisaks kasutati käsitsi eemalseisvate punktide kustutamist. Seejärel korrati eelmise mudeli töövoogu punktipilvede loomisest ortofotoni. Mudel georefereeriti 2024 aasta märtsi mudeli järgi.

Kõige varasemad fotod olid tehtud töö juhendaja Marko Kohvi poolt 16.05.2015. Pilte oli kokku 207. Pildikvaliteet varieerus 0.75 ja 0.78 vahel. Esmases mudelis oli ligi 118 000 punkti. Kaamerate asukohad ja mudeli parameetrid uuendati ning korrati sama töövoogu samade parameetritega, mis eelneval kahel mudelil. Piltide georefereerimiseks kasutati 2024 aasta märtsi mudelt. Selleks otsiti üles hästi äratuntavad kohad mõlema mudeli peal ning kopeeriti koordinaadid markeritena 2015 aasta mudelisse. Kokku leiti 4 markerit. Droonipiltide koordinaate kasutati vaid piltide esmasel joondamisel, täpsem georefereerimine tehti markerite abi.

Pakri viimane töös kasutatud lend tehti mais 2024 a. Kokku tehti 1027 pilti ning üldjoontes järgiti sama, juba kirjeldatud töövoogu. Esmases mudelis on ligi 662 000 punkti. Pildid töödeldi enne kasutamist juhendaja poolt, et vähendada ilmastikuoludest (ere päike ja tugevad varjud) tingitud kontraste. Mudel georefereeriti 2024 aasta märtsi mudeli järgi ning korrati eelnevate mudelitega sama tööprotsessi.

3.9. Punktipilvede omavaheline analüüs

Kõigi nelja mudeli punktipilved viidi üle Cloudcompare v2.13.1 tarkvarasse. Kuna antud programm muudab originaalfaili, siis tuli kõikidest esmastest failidest teha koopiad ning seejärel jätkati tööd loodud failidega. Kuigi mudelid olid eelnevalt Agisoft Metashape programmis refereeritud, tuli siiski välja mudelite nihe Cloudcompare programmis, seega tuli nad uuesti refereerida. Mudelite georefereerimiseks kasutati kõikidel mudelitel 2024 aasta märtsi mudelit. Kahe mudeli omavahelise täpsuse kontrollimiseks ruumis kasutati segmenteerimise tööriista ning lõigati välja kahel mudelil korraga selgelt äratuntavad kohad. Selleks, et paremini mudeleid käsitleda, lukustati vajadusel telgede rotatsioon. Selleks, et mõõta punktipilvede vahelist nihet, kasutati punkti valimise tööriista ning mõõdeti kaugust kahe punkti vahel.

2024 aasta mai mudel refereeriti 2024 aasta märtsi mudeli järgi, kuna drooni enda RTK ei hakanud tööle. Kuna mõlemad mudelid on tehtud sama drooniga, oli mudelite asukoht ruumis peaaegu identne, seega sai refereerimiseks kasutada täppis refereerimise tööriista (ICP- *iterative closest point*). Registreerimise ülekatteks oli 85%, kuna märtsi mudelil oli palju jäätumist. Zinßer (2005) tutvustab enda artiklis ICP algoritmi lähemalt. Nimelt võimaldab ICP algorütm leida mudelil kiiresti ühesuguseid punkte, igal sammul arvutatakse uuesti välja punktide täpsus. Kõiki andmepunkte kasutatakse kontrollpunktidena. Kui sobivad punktipaarid on leitud, lükatakse

ebasobivad punktid tagasi. Vigadeks loetakse vastavate punktipaaride kauguste ruudu summat, kui punktipaari kaugus on suurem kui selle standardhälve, lükatakse punktipaar tagasi.

Kuigi 2022 aasta mudeli loomisel kasutati erinevaid droone, oli mudelite paigutus praktiliselt identne, seega sai peale mudelite lõikamist segmenteerimise tööriistaga kasutada täppis refereerimist. Selleks kasutati 85%-list ülekatet. Kuna 2015 aasta mudel oli uuematest mudelitest väiksem, kasutati segmentimise tööriista, et lõigata mudelid ühesuurusteks. Mudeli refereerimiseks kasutati nii käsitsi nihutamist, kahe punktipaari kaupa nihutamist kui ka täppisrefereerimist.

Kõikide mudelite puhastamisel kasutati SOR (*Statistical outlier removal*) filtrit, mis eemaldas mudelis üksikud eemalseisvad punktid. Mudelite omavaheliseks võrdluseks kasutati M3C2 (*Multiscale Model to Model Cloud Comparison*) tööriista, millega arvutati mudelile normaalid ja loodi värviskaalas võrdlused eri aastate vahel, kus punane tähistas kuhjumist ja sinine kulutust. Referentsmudeliks kasutati uuemat mudelit. Normaalide ja projektsiooni diameetriks pandi 0.3 meeter, registreerimisveaks 0.05 meeter. Lague (2013) on oma töös välja toonud kolm head punkti antud algoritmi kasutamisel. Esiteks töötab algoritm otse punktipilvedel, teiseks jälgib ta kauguse arvutamisel pinna orientatsiooni variatsioone ja kolmandaks hindab ta kauguse usalduse mõõtmisel punktipilve registreerimisvigasid.

Järgnevalt tehti mudelitest uued koopiad, 2015 mudel värviti roheliseks, 2022 aasta mudel kollaseks ja 2024 aasta mai mudel roheliseks. Järgnevates võrdlustes 2024 aasta märtsi mudelit ei kasutatud, kuna jäätumise ulatus oli nii suur, et oleks andnud valesid võrdlustulemusi. Selleks, et mudelitel muutusi paremini visualiseerida, kasutati lõigete tööriista. Selleks lõigati kõigepealt mudeli huvipakkuvad kohad kääride tööriistaga väiksemaks. Seejärel lõigutati lõigatud alad osadeks ning mõõdeti kauguseid panga huvipakkuvatest osadest.

3.10. Ortofotode andmetöötlus

Selleks, et vaadelda rannajoone taandumist pikema aja jooksul, kasutati Maa-ameti ajaloolist fotoarhiivi (Aerofotode Digitaalarhiiv, n.d.). Pakri poolsaarest oli tehtud kokku 2 fotot enne sajandivahetust, aastatel 1959 ja 1992. Maa-ametist laeti fotod alla ning viidi edasi QGis programmi. Lisaks viidi programmi Maa-ameti 2010 aasta metsanduslik ortofoto ja 2024 aasta mais droonifotodest tehtud ortofoto.

Maa-ametis on võimalik kasutada rannajoone vaatlemisel ka ajaloolisi kaarte, kuid kuna rannajoone kuju on kaartidel enamasti tugevalt üldistatud, siis jäeti need antud töös kasutamata. Selleks, et fotod georefereerida, avati aluskaart, mille pealt leida ühiseid punkte fotodega. Selleks laeti WMS-iga (*Web Map Service)* alla põhikaart ja ortofoto. Seejärel avati raster menüü alt georefereerimise tööriist ning sisestati sinna refereerimata ajalooline foto, koordinaat süsteemiks kasutati kõikidel fotodel EPSG::3301. Georefereerija aknas valiti fotol hästi äratuntavad objektid ning samad objektid valiti ka kaardil, et saada fotole kaardi punktide järgi koordinaadid. 1992 aasta kaardil leiti 7 punkti, mis olid äratuntavad ka Maa-ameti kaasaegsel ortofotol. 2010 aasta metsanduslik ortofoto laeti alla Maa-ameti portaalist, kaardilehe numbriga 63801 mõõtkavas 1:10 000. Selleks, et tulemust paremini visualiseerida, kasutati tööriista *Map swipe tool*. 2010 aasta ortofoto jäeti täiendavalt refereerimata, sest vaikimis refereeringu täpsus oli autori sõnul piisav. Kuna 2024 aasta mudelist loodud ortofoto sobitus koordinaatidega samuti piisavalt täpselt Maa-ameti ortofoto külge (nihe jäi mitmete punktide võrdlemisel 20-40 cm piiresse, jäeti see samuti eraldi refereerimata.

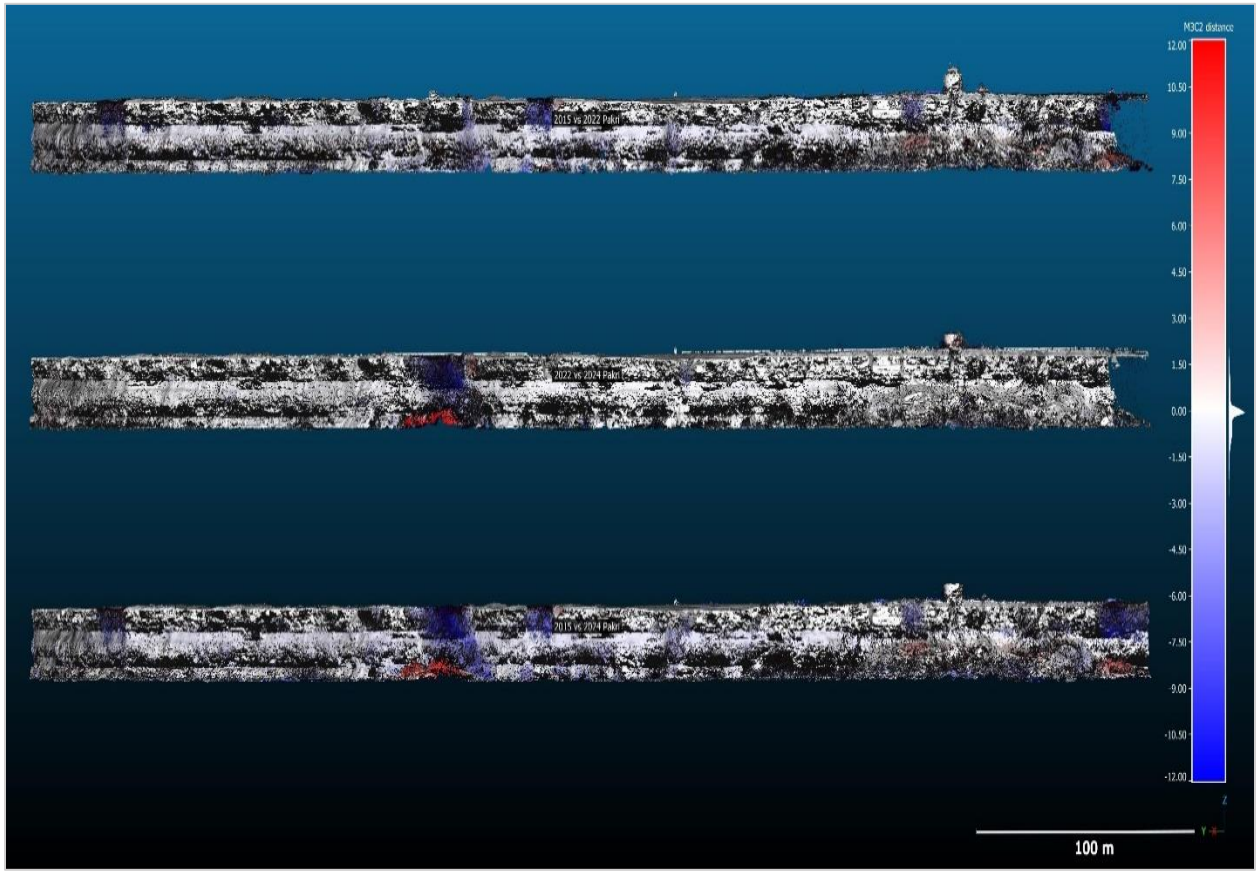
Seejärel loodi 4 geopaki (*geopackage)* kihti, geomeetria tüübiks valiti joon, koordinaatsüsteemiks EPSG::3301. Kõigi nelja valitud aasta rannajooned digiti joonena kaardile. Selleks kasutati editeerimise ja joone lisamise tööriista. Joone liigutamiseks kasutati verteks tööriista. Lisaks digiti viimane Maa-ameti ortofoto. Joonte lõikumispunktides sai kasutada alade mõõtmise tööriista, mis sidus ala lõikepunktide külge ja arvutas automaatselt pindala.

Selleks, et visualiseerida ja arvutada rannajoone taandumine 1959 aastast tänapäevani, kasutati geomeetria tööriista – ühenda vektor kihid. Sellega loodi virtuaalne kiht, kus mõlemad rannajooned olid ühes failis. Rannajoonte otsad ühendati joone lisamise tööriistaga. Seejärel kasutati tööriista – joonest polügooniks. Seejärel kasutati ala mõõtmise tööriista.

4. Tulemused

4.1. Panga 3D punktipilvede võrdluse tulemused

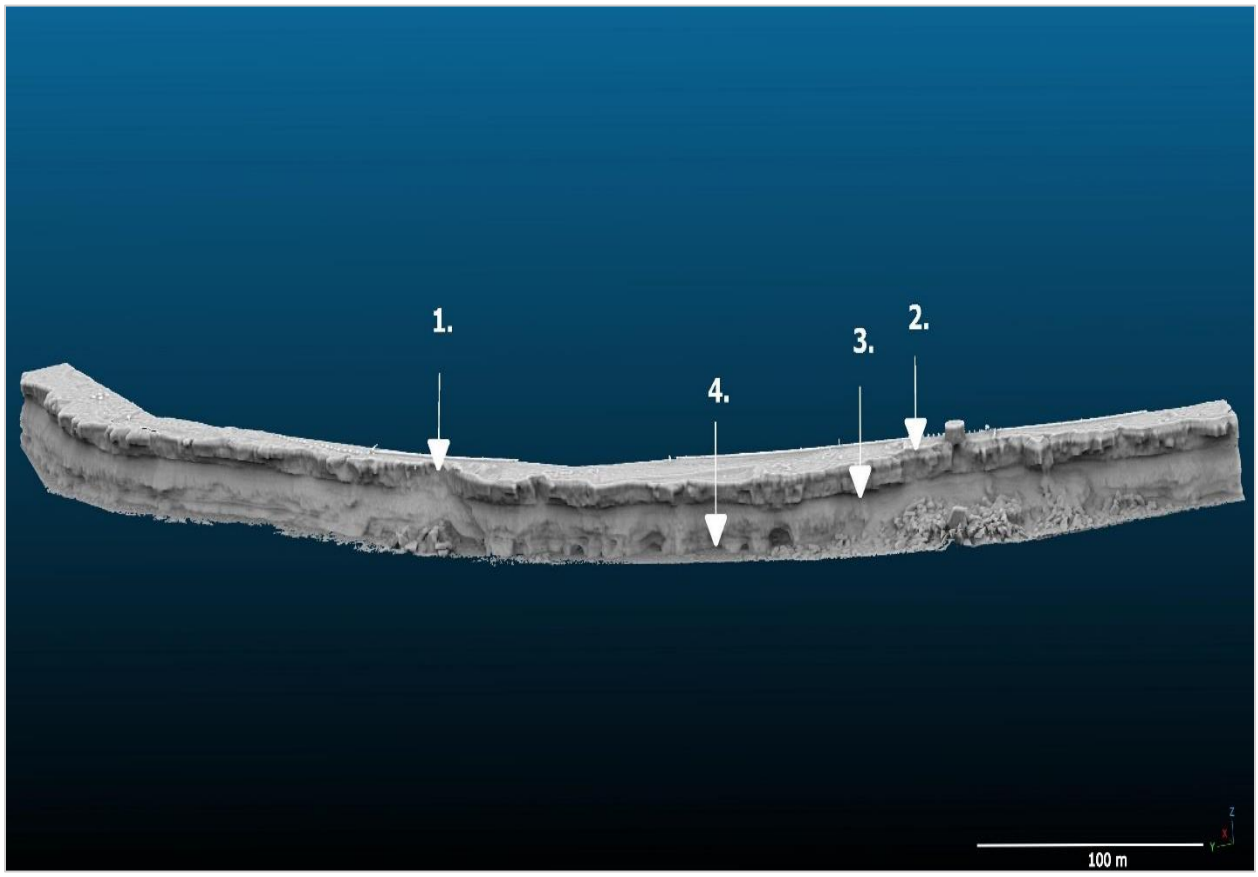
Töö tulemusel loodi kolm mudeli võrdlust (Joonis 3Joonis 3) , omavahel võrreldi 2022 mudeli muutuseid 2015 aasta suhtes, 2024 aasta muutusi 2022 suhtes ja 2024 aasta muutusi 2015 suhtes. Kõige suuremad muutused 2022 aasta mudelil võrdluses 2015 aastaga toimusid alla varisenud vaateplatvormist ligi 35 meetrit kagu suunas (koordinaatidega 6583435, 502117) ja vanast tuletornist 15 meetrit põhja suunas (6583281, 502045). Lisaks on osaliselt näha ka suur varing vanast tuletornist ligi 70 meetri kaugusel mudeli servas (6583192, 502022), kuid kuna 2022 aasta mudel oli teistest mudelitest lühem, siis ei ole varingu ulatus antud mudelite võrdluses täielikult paista.



Joonis 3. Ülevalt alla – 2022 aasta muutused 2015-ga, 2024 aasta muutused 2022-ga ja 2024 aasta muutused 2015-ga.

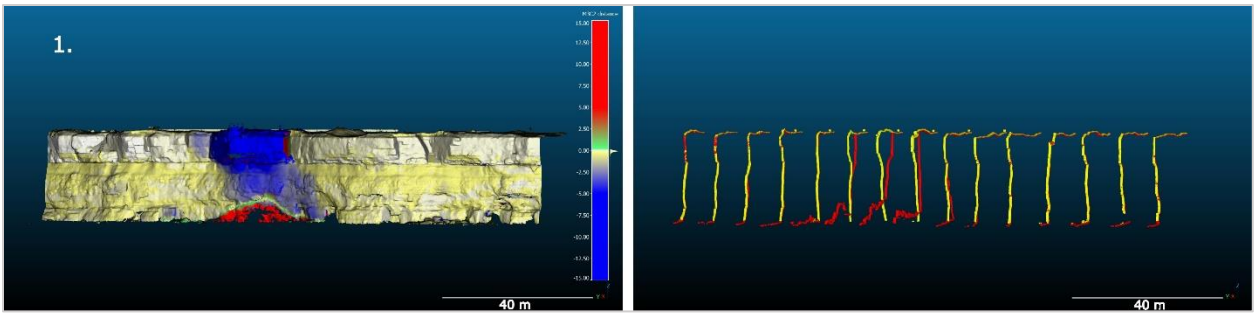
Suurim muutus 2024 aastal võrdluses 2022 aastaga toimus 2024 aasta jaanuaris alla varisenud vaateplatvormi asukohal (6583465, 502167). Viimasel mudelil (2024 aasta võrdlus 2015 suhtes) on näha ka mudeli serval oleva varingu ulatus.

Mudeleid vaadeldi põhjalikumalt neljast asukohast. Esimesena vaadeldi kõige suuremat muutust (Joonis 4, tähistatud numbriga 1.), milleks on 2024 aastal alla varisenud vaateplatvorm. Selleks vaadeldi lähemalt 2024 mudeli võrdlust 2022 mudeliga antud asukohast (Joonis 5). Allakukkunud platvormi alune tükk on kõige pikemas osas piki rannikut olnud 31 meetrit ja rannajoon on taandunud kuni 12 meetrit. Rusukalde kõrgus panga allosas on kuni 5 meetrit.

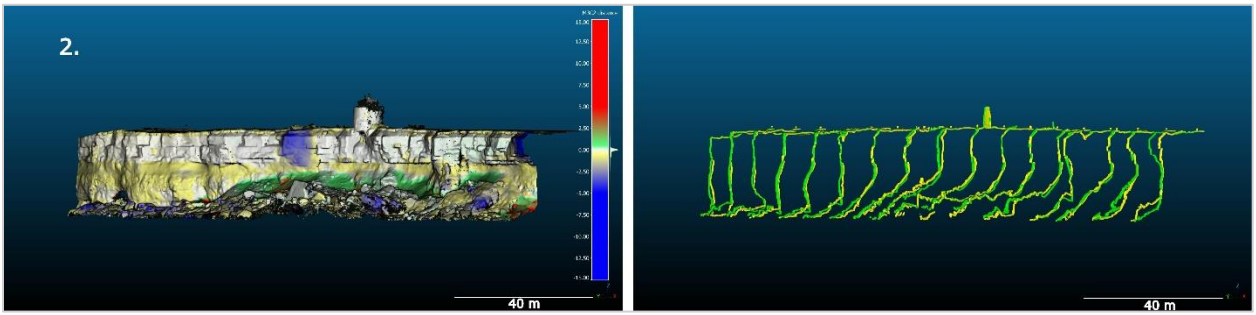


Joonis 4. Muutuste asukohad Pakri panga 2024 mai mudeli näitel. 1. – alla varisenud vaateplatvormi asukoht. 2. – lubjakiviplatoo varing. 3. – glaukoniitliivakivi pudenemine. 4. – Murrutuskulpad ja -koopad.

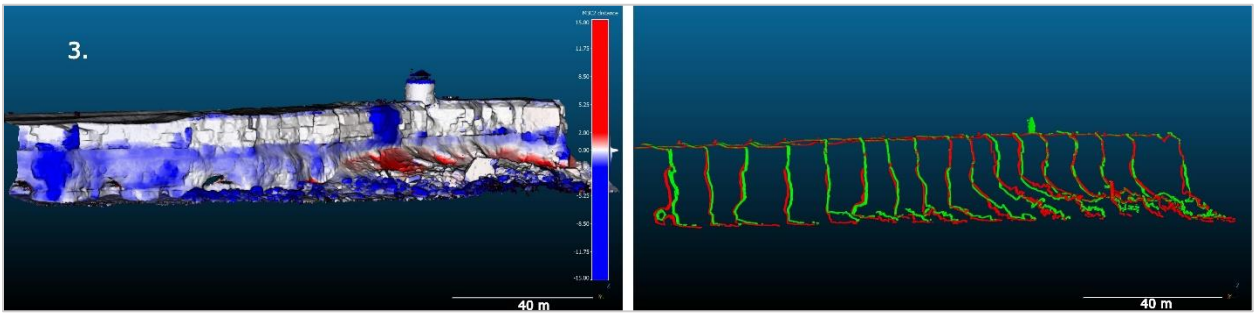
Seejärel võrreldi väiksemat muutust (Joonis 4, tähistatud numbriga 2), kus 2015 ja 2022 aasta vahel kukkus vana tuletorni kõrvalt alla lubjakiviplokk (Joonis 6). Lubjakiviploki laius oli ligi 10 meetrit, rannajoon on taandunud ligi 3 meetrit ja rusukalle on 1.5 meetrit kõrgenenud.



Joonis 5. Pakri vaateplatvormi alused muutused, 2024 aasta võrdluses 2022 aastaga (vasakul) ja platvormi muutused lõigetena (punane – 2024 aasta mudel, kollane – 2022 aasta mudel)



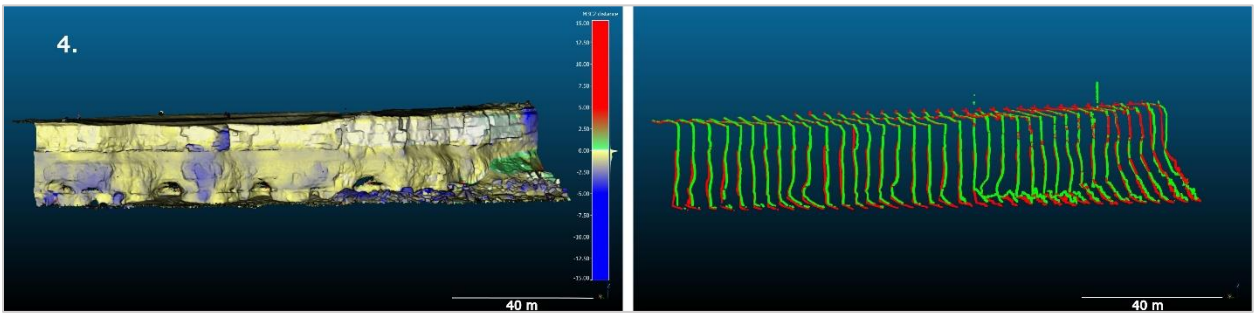
Joonis 6. Pakri vana tuletorni kõrval alla kukkunud lubjakivi plokk, 2022 aasta võrdluses 2015 aastaga (vasakul) ja platvormi muutused lõigetena (kollane – 2022 aasta mudel, roheline – 2015 aasta mudel)



Joonis 7. Pakri panga pudedate setete kadu, 2024 aasta võrdluses 2015 aastaga (vasakul) ja platvormi muutused lõigetena (punane – 2024 aasta mudel, roheline – 2015 aasta mudel)

Kolmandana võrreldi muutusi pudedamates settekivimites – glaukoniitliivakivis ja mustas kildas (Joonis 4, tähistatud numbriga 3.) Selleks vaadeldi 2024 aasta võrdlust 2015 aastaga (Joonis 7), kust paistab välja, et erinevalt lubjakividest, mis kukuvad alla plokkidena, on pudedate kivimite kulutus olnud võrdlemisi ühtlane kogu panga ulatuses. Väiksem kadu on olnud asukohtades, kus

rusukalle on kaitsenud panka lainetuse kulutuse eest. Keskmine kulumine on ligi 1 meeter, kulutatud setted on enamjaolt mere poolt minema kantud ning märgatavad rusukalded puuduvad.



Joonis 8. Pakri panga murrutuskulpad ja -koopad. 2024 aasta võrdluses 2015 aastaga (vasakul) ja platvormi muutused lõigetena (punane – 2024 aasta mudel, roheline – 2015 aasta mudel)

Viimasena vaadeldi lainetuse poolt uuristatud murrutuskulpaid ja -koopaid (Joonis 4, tähistatud numbriga 4.). Muutused skalaarväljal olid vähe eristatavad (Joonis 8). Suuremaid varinguid koobaste sees toimunud ei olnud, kuid koobaste põhja setetest oli ligi meetri jagu materjali mere poolt minema uhutud. Suuremate koobaste sügavus oli ligi 6 meetrit, väiksemad ligi 3 meetrit. Koopad on piki rannikut ligi 45° nurga all lõuna suunas.

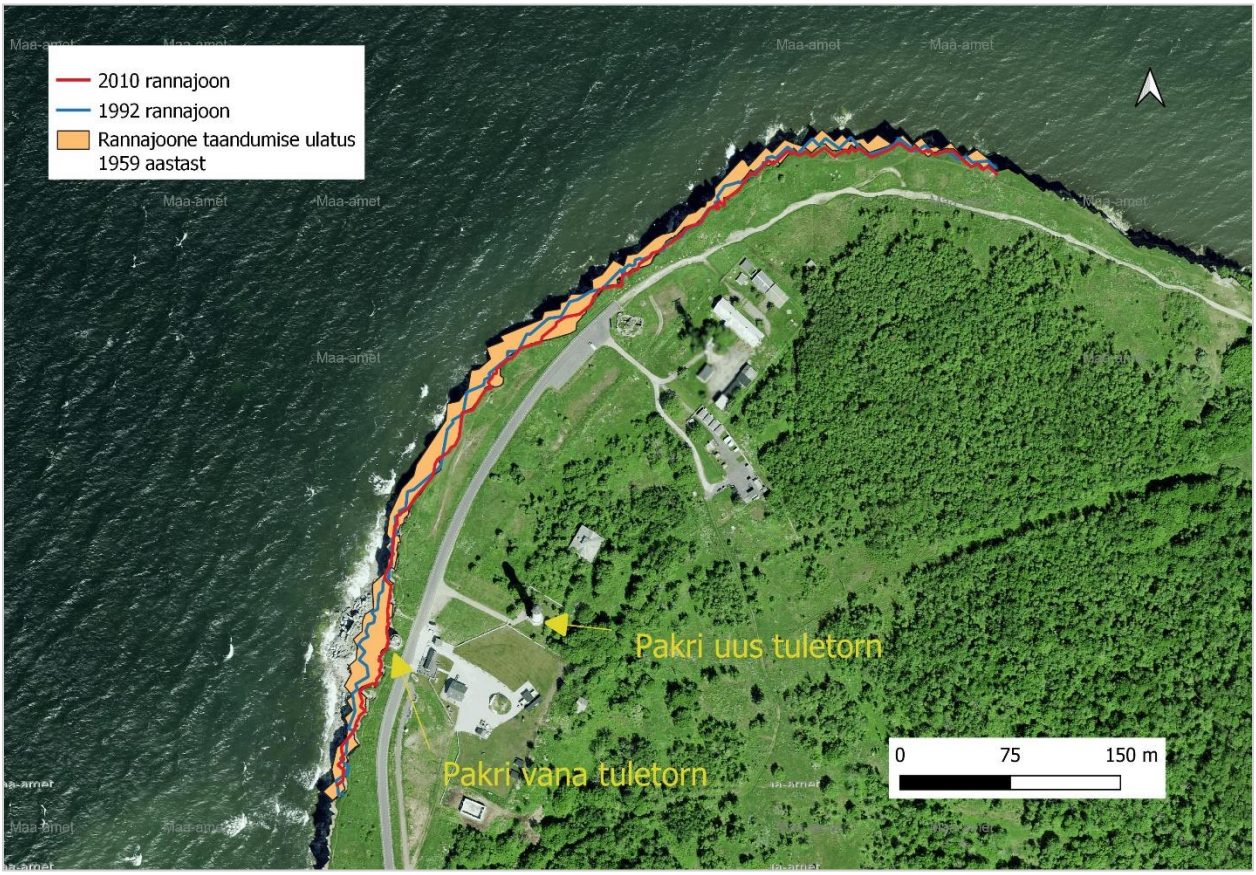
4.2. Panga aero- ja ortofotode tulemusel loodud võrdlused

Töö tulemusel loodi rannajoone profiilid (Joonis 9) aastatest 1959 kuni tänapäevani. Kuigi 1959 aasta ja 1992 aasta fotode kvaliteet on kehvem võrreldes tänapäevasega, on rannajoone kuju siiski äratuntav. 1992 aasta rannajoon lõikub vanema rannajoonega vaid ühes kohas mudeli äärealal Pakri poolsaare tipus. 2010 aasta rannajoon kattub paremini vana tuletorni ümbruses, kuid läheb nihkesse mudelite äärealal. 2024 mudelil on näha tänane rannajoon, mis muutus tänu Pakri vaateplatvormi varingule 2024 aasta jaanuaris.

Kasutades tänapäevase ortofoto (Ortofoto, n.d.) digitud joont ja 2024 aasta droonilennu ortofoto joonte lõikumispunkte, sai leida polügoni, mida sai kasutada alla kukkunud platvormi aluse lubjakivi pangase ligikaudse mahu määramiseks. Pangase pindala kaardil oli 226 m^2 ning lubjakivi paksus antud alal keskmiselt 6.5 meetrit. Seega oli allakukkunud lubjakivi maht ligikaudu 1470 m^3. Lubjakivi tihedus on 2.65-2.80 g/cm^3, mis teeb lubjakivi kaaluks ligikaudu 4000 tonni.

2010 aasta rannajoone võrdluses tänapäevasega leiti kaks väiksemat varingut, esimene neist poolsaare lääneosas (6583182, 502018) pindalaga 120 m^2 ning teine ligikaudu 260 meetrit poolsaare tipu poole (6583429, 502120), kus rannajoon oli taganenud 70 m^2.

Rannajoone pikkus mõõdistusalal on 2024 aasta ortofoto järgi 730 meetrit. Kogu rannajoone taandumise arvutamisel kasutati usaldusväärsemaid lõike 1992 aastast. 2024 ja 1959 (65 aastat) vahel on mõõdistusalal kadunud 6894 m^2 rannast, mis teeb keskmiseks rannajoone taandumise kiiruseks 9.4 meetrit ehk 14 cm aastas. Arvutuste tegemisel kasutati lõike, mis tundusid usaldusväärsemad rannajoone mõõdistamiseks. 2024 ja 1992 (32 aastat) vahel on mõõdistusalal kadunud 3265 m^2 rannast, mis teeb keskmiseks rannajoone taandumise kiiruseks 4.5 meetrit ehk 14 cm aastas. 2024 ja 2010 (14 aastat) vahel on mõõdistusalal kadunud 688 m^2 rannast, mis teeb keskmiseks rannajoone taandumise kiiruseks 0.9 meetrit ehk 6 cm aastas.



Joonis 9. Maa-ameti ortofotole lisatud rannajoone taandumise ulatus aastate lõikes.

Kolme tulemuse põhjal tuli aritmeetilise keskmise rannajoone taganemise kiiruseks 11 cm ja kaalutud keskmise taganemise kiiruseks 13 cm aastas.

Pakri vana tuletorni ees on rannik taandunud viimase 65 aastaga 20 meetrit. See teeb taandumise kiiruseks 30 cm aastas. Ka Pakri vaateplatvormi kohal on sama ajaga rannik 20 meetrit taandunud. Kõige intensiivsem taandumine on toimunud vaateplatvormi ja vana tuletorni vahelisel alal, muudel aladel jääb kulutus sama ajaga alla 10-ne meetri pikkuseks.

1992 aasta ortofoto lõikus mitmel pool tänapäevase rannajoonega. Samuti olid ajaloolised aerofotod madala kvaliteediga. Sellegipoolest on andmestik piisav mõõdistuste tegemiseks.

5. Arutelu

Ranniku protsesside uurimisel on tähtis pikaajalise kvaliteetse seireandmestiku olemasolu. Andmete kogumiseks on mitmeid eri viise alates satelliitide infost kuni rannikul GPS seadmetega info hankimist. Kui varasemalt pidi pikema ajaloolise andmestiku saamiseks kasutama arhiivide andmestikku erinevate maamärkide ja hoonete kauguste kohta rannikust, siis tänapäevane tehnoloogia areng võimaldab vanade aerofotode ja kaartide põhjal luua suure hulga koordinaatidega paika pandud maapinna infot, mida saab kasutada ranniku kaardistamiseks.

Vanade kaartide kasutamisest mõneti uuenduslikum võimalus on kasutada mehitamata õhusõidukitelt saadud informatsiooni. See võimaldab koguda ja töödelda kiiresti pikaajalist kvaliteetset andmestikku. Andmete töötlemiseks on kasutusel mitmeid erinevaid programme ning nad võimaldavad andmed siduda maapealsete koordinaatidega, mis omakorda annab võimaluse uurida protsesside ulatust mõne cm täpsusega.

Kui võrrelda erinevaid andmete kogumise viise, siis on drooni seirel mitmeid eeliseid. Kui Melet (2020) toob oma töös välja mitmed positiivsed aspektid satelliitide kaudu mere seirest, nagu andmete täpsus ja tasuta kättesaadavus, siis negatiivse aspektina toob ta välja andmete ebausaldusväärsuse maismaa läheduses rannalähedase settete sissekande tõttu merre. Drooniga saab ka pilves ilmaga seirata kõrge lahutusega objekte, millel on keeruline kuju. Erinevalt nivelliiriga mõõdistamisest pääseb drooniga ligi kohtadesse, kuhu inimene kergelt ligi ei pääseks, nt vertikaalseid seinasid mõõdistama. Kümne aastaga on lennuajad kahekordistunud ning kaamerate/fotode kvaliteet oluliselt paranenud, tulnud on RTK GNSS droonid, mis võimaldavad piltide otsest georefereerimist. Lisaks on droon üks kiiremaid ja paindlikumaid viise info kogumiseks, kus erinevalt Orviku (2013) nivelleerimismeetodiga seiramisele saadakse andmed mitmeid tunde või isegi päevi varem. Droonide ohutegurina saab välja tuua GPS signaalide segamise, tänu millele ei pruugi RTK signaali saada. Võimalus on küll hiljem järeltöötlus teha, kuid sellega läheb täpsus alla ning lisaks tuleb kasutada tarkvaralist refereerimist (ICP).

Kuid drooniga seiramisel on ka omad negatiivsed küljed. Novais (2013) toob välja droonide kalli hinna, mis piirab nende kättesaadavust. Lisaks limiteerib droonide akude kestvus lennuaega. Samuti on droon suuresti sõltuv ilmast, mis meie heitlikus kliimas on tähtis aspekt droonide kasutamisel. Nieto (2010) pakub välja kliimast ja hinnast vähem sõltuva alternatiivi – staatiliste

kaamerate paigaldamise rannikule, mis edastab andmed reaalajas kasutajale. Andmete töötlemiseks vajalik programm lisab piltidele juurde ka asukohainfo. Autor nõustub, et meetod nõuab vähem välitöödel käimist ning on soodsam, kui drooniseire, kuid see nõuab programmeerimise oskusi ning andmestik saadakse väiksema ala kohta. Selline seire toimiks hästi karjäärides ja jõgede kallastel, kus on võimalik kaamerad sobivalt paigutada, kuid püstloodis pankadele ei oleks kaamerate paigutamine mõeldav.

Selleks, et saada kiiret tasuta andmestikku, mis ei sõltu keskkonna teguritest, on võimalik kasutada vanasid aerofotosid ja kaarte. Meetod osutus heaks andmeallikaks nii Orviku (2013) kui ka autori töödes. Kuigi Mõsovski (2023) märgib, et ajalooliste fotode kvaliteet võiks olla parem ning ka autor nõustus sellega, siis on see hetkel siiski üks parimaid viise pikaajalise andmestiku kasutamiseks.

Pakri poolsaare kõige viimane varingusündmus toimus 2024 aasta jaanuaris. Autori tehtud droonilend ja sellest saadud andmed aitasid hinnata varingu ulatust. Kasutades fotogramm-meetriat ning mudelist loodud ortofotot ning pannes andmed kokku Maa-ameti ortofotoga, sai arvutada hinnangulise pangase kaalu, milleks oli 4000 tonni. Erinevate andmete ühendamine annab võimaluse näha nii ranniku laiust kui panga kõrgust ning saadud tulemustega arvutada umbkaudseid ruumalasid. Ruumalade korrutamine setete tihedusega võimaldab arvutada setete massi. Ruumalasid saab arvutada ka otse punktipilvedest, kuid see jäi käesoleva töö mahust välja. Lisaks saab punktipilvede kaudu kaardistada ka lõhesüsteeme ning teha nõlvapüsivusarvutusi.

Töös uuriti ka pudedate setete kadu 14 aasta jooksul. Kui Pikulova (2023) mainib enda töös lidar andmete kasutamise miinusena väikest andmepunktide tihedust, siis droonilt saadud andmete hulk on seevastu väga mahukas. See võimaldab teha väga detailseid uuringuid muidu raskemini märgatavate muutuste kohta. Lisaks võimaldab droon märgata muutusi kohtades, kus on väga piiratud ligipääs - see võimaldab pildistada läbi madalamate veekihtide, näha murrutuskulbaste sisemusse ning pildistada eendunud pangase plokkide kohal. Tänu sellele sai töös kirjeldada ka murrutuskoobaste muutusi ning setete ärakannet.

Töös oli nähtav kaks suuremat muutust – üks oli panga keskel asuva vaateplatvormi varingu piirkond ning teine oli mudeli ääreala. Mudeli ääreala varingut ei saa tõesena võtta kahel põhjusel. Esiteks on 2022 aasta mudelil sama servaala puudu ning 2015 aasta mudelil sellel alal väga vähe

andmepunkte. Teiseks on mudelite servadel mõningased objektiivist ja piltide vähesest ülekattest tulenevad moonutused. Seega jäeti antud andmed töös kasutamata.

Kindlasti üks olulisemaid punkte antud töös oli rannajoone taandumise kiiruse leidmine, tänu millele sai teada, kui kiiresti võiks hakata ranniku taandumine mõjutama sealset infrastruktuuri. Orviku (2013) märgib enda uurimuses, et Pakri panga taganemise kiirus, kasutades andmestikku 275 aasta pikkusest perioodist, on 25 cm aastas. Töö autor leidis, et keskmine ranniku taganemise kiirus uuringuala peale nii kui 32 kui 65 aasta lõikes oli 14 cm. Samas on teada, et ranniku lubjakivi plokkide osa ei tagane ühtlaselt, vaid murdub pangastena ning kõige suurem on taganemise kiirus poolsaare tipul, mis on asukohaks ka vanale tuletornile. Kui mõõta 65 aasta pikkuse perioodi ajal toimunud rannajoone taganemist vana tuletorni juurest, tuleb ranniku taganemise kiiruseks lausa 30 cm. Sellise kiirusega jõuab rannajoon uue tuletorni servani, mis asub vanast tornist 90 meetri kaugusel, 300 aastaga.

6. Kokkuvõte

Magistritöö eesmärk oli hinnata Pakri pankranniku taganemise kiirust ning varingute ulatust. Selleks kasutati droonifotosid aastatest 2015-2024, 2010 aasta ortofotot ning 1992 ja 1959 aasta ajaloolisi aerofotosid. Droonipiltidest loodi fotogramm-meetria abil Agisoft Metashape programmi kasutades 3D-mudelid ja ortofotod. 3D-mudelid viidi punktipilvedena üle CloudCompare programmi ning võrreldi mudelite muutusi aastate lõikes. 2024 aasta ortofoto viidi QGIS programmi, kuhu lisati ka 2010 aasta Maa-ameti ortofoto ja aerofotod.

Töö tulemusel selgus, et Pakri pankrannikul on toimunud olulisi muutusi. Kõige suurem Pakri pankranniku muutus vaadeldaval alal aastatel 2015-2024 toimus 2024 aasta jaanuaris, kus murdus alla ligi 4000 tonnine lubjakivi plokk. See tõi kaasa rannajoone taandumise 226 m^2 võrra ja kuni 12 meetrise taganemise maismaa poole. Pudedamate settekivimite kulumine lubjakivi all on olnud ühtlane kogu panga ulatuses ning keskmine kulumine 9 aasta jooksul on ligi 1 meeter.

Samuti ilmnes, et murrutuskulbastes toimunud muutused olid väikesed, kuid mere erosioon on olnud märgatav. Suuremaid muutusi murrutuskulbastes ei täheldatud, küll aga oli näha, et meri oli ligi meetri jagu setteid koobaste põhjast välja uhtunud.

Kuigi antud piirkonnast leidus vaid kaks vanemat aerofotot, osutusid nad küllaltki heaks abivahendiks rannajoone taandumise kaardistamisel. Vanemate aetofotode analüüs kinnitas, et rannajoone taandumine on olnud ajas erinev, kuid pikaajaliselt suhteliselt stabiilne. Nii 1959 kui 1992 aasta ortofotode põhjal loodud rannajoone pindalade muutused näitasid keskmist rannajoone taandumist 14 cm aastas. 2010 aasta rannajoone võrdlus 2024 aastaga näitas ranniku keskmist taandumist 6 cm aastas. Ranniku kõige suurema kulutuse – poolsaare tipu alal, oli kaardilt mõõdetud ranniku taganemise kiiruseks 65 aastaga 30 cm.

Tulevikuprognoosid viitavad sellele, et rannajoone edasine taandumine võib ohustada Pakri uut ja vana tuletorni. Pakri pankrannikul asub lisaks Pakri vanale tuletornile, mille vundamendini on nüüdseks rannajoon jõudnud, ka Pakri uus tuletorn, mis asub 90 meetrit vanast tornist sisemaa suunas. Võttes arvesse ranniku keskmist taandumist 14 cm aastas (kasutades pikemat andmestikku), on tõenäiline Pakri uue tuletorni varing merre ligi 600 aasta pärast. Kui aga arvestada poolsaare tipus mõõdetud rannajoone taandumist 30 cm aastas, on tõenäoline Pakri uue tuletorni varing 300 aasta pärast.

7. Summary

The aim of the master's thesis was to assess the rate of retreat and the extent of rockfalls of the Pakri cliff. For this purpose, drone photos from 2015-2024, an orthophoto from 2010, and historical aerial photos from 1992 and 1959 were used. Using photogrammetry in the Agisoft Metashape program, 3D models and orthophotos were created from the drone images. The 3D models were transferred as point clouds to the CloudCompare program, and changes in the models over the years were compared. The 2024 orthophoto was imported into the QGIS program, to which the 2010 orthophoto from the Estonian Land Board and the aerial photos were also added.

The results of the study revealed significant changes in the Pakri cliff. The most substantial change in the Pakri cliff within the study area from 2015-2024 occurred in January 2024, when a limestone block weighing nearly 4000 tons broke off. This resulted in the shoreline retreating by 226 m² and a landward retreat of up to 12 meters. The erosion of softer sedimentary rocks beneath the limestone has been uniform along the cliff, with an average erosion of nearly 1 meter over 9 years.

Furthermore, it was found that changes in erosion caves were minor, but marine erosion was noticeable. Major changes in erosion caves were not observed; however, it was evident that the sea had washed away about a meter of sediments from the cave bottoms. Although only two older aerial photos were available for this area, they proved to be quite useful in mapping shoreline retreat.

Analysis of the older aerial photos confirmed that shoreline retreat has varied over time but has been relatively stable in the long term. The changes in shoreline areas based on the 1959 and 1992 orthophotos showed an average shoreline retreat of 14 cm per year. Comparing the 2010 shoreline with that of 2024 showed an average shoreline retreat of 6 cm per year. The area with the highest erosion – the tip of the peninsula – had a measured shoreline retreat rate of 30 cm over 65 years.

Future projections suggest that continued shoreline retreat may endanger both the new and old Pakri lighthouses. In addition to the old Pakri lighthouse, whose foundation has now reached the shoreline, the new Pakri lighthouse, located 90 meters inland from the old lighthouse, is also at risk. Considering the average shoreline retreat of 14 cm per year (using the longer dataset), it is likely that the new Pakri lighthouse will collapse into the sea in about 600 years. However,

considering the measured shoreline retreat of 30 cm per year at the tip of the peninsula, it is likely that the new Pakri lighthouse will collapse in 300 years.

Tänuavaldused

Tänan oma juhendajat Marko Kohvi suure abi, toetuse, nõuannete ja usalduse eest eest. Lisaks tema abile juhendamisel usaldas ta mulle ka drooni, millega Pakri rannikut seirasin. Lisaks tänan Argo Jõelehte, kes usaldas mulle RTK-GPS seadme.

Kasutatud kirjandus

Aerofotode digitaalarhiiv. (n.d.). Maa-amet. https://geoportaal.maaamet.ee/est/Kaardirakendused/Fotoladu/Fotoladu-aerofotode-digitaalarhiiv-p545.html

Baltsavias, E. P. (1999). A comparison between photogrammetry and laser scanning. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, *54*(2–3), 83–94. https://doi.org/10.1016/S0924-2716(99)00014-3

Burke, L., Kura, Y., Kassem, K., Revenya, C., Spalding, M., & McAllister, D. (2001). *Pilot analysis of global ecosystems: Coastal Ecosystems*.

DJI Mavic 3M Specs. (n.d.). https://ag.dji.com/mavic-3-m/specs

Droonide lennutamine. (n.d.). Transpordiamet. https://www.transpordiamet.ee/lennundus-ja-lennuohutus/droonidmehitamata-ohusoidukid/droonide-lennutamise-reeglid

Einasto, R. (n.d.). Miks Pakri pank variseb? *Eesti Loodus*, *2008/4*.

Eling, C., Wieland, M., Hess, C., Klingbeil, L., & Kuhlmann, H. (2015). Development and evaluation of a UAV based mapping system for remote sensing and surveying applications. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *XL-1/W4*, 233–239. https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-1-W4-233-2015

Hanslow, D. J., Clout, B., Evans, P., & Coates, B. (1997). *MONITORING COASTAL CHANGE USING PHOTOGRAMMETRY*.

Hassanalian, M., & Abdelkefi, A. (2017). Classifications, applications, and design challenges of drones: A review. *Progress in Aerospace Sciences*, *91*, 99–131. https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2017.04.003

Hints, O. (2024, January 19). *Paldiski pankrannik liigub 100 aastaga umbes 25 meetrit maismaa poole.* [ERR]. https://menu.err.ee/1609227549/geoloog-paldiski-pankrannik-liigub-100-aastaga-umbes-25-meetrit-maismaa-poole

Kaarel Orviku, Hannes Tõnisson, Are Kont, Sten Suuroja, & Agnes Anderson. (2013). Retreat rate of cliffs and scarps with different geological properties in various locations along the Estonian coast. *Journal of Coastal Research*, *65*(sp1), 552–557. https://doi.org/10.2112/SI65-094.1

Kasepõld, K. (2015). *Paldiski pankranniku 3D mudeli rekonstrueerimine* [Diplomitöö]. Tallinna Tehnikaülikool. Eesti Mereakadeemia. Merehariduskeskus.

Kaugpiloodi pädevus. (n.d.). Transpordiamet. https://www.transpordiamet.ee/lennundus-ja-lennuohutus/droonidmehitamata-ohusoidukid/kaugpiloodi-padevused

Kohv, M. (2023a). *Fotogramm-meetria lühikirjeldus.* [Konspekt].

Kohv, M. (2023b). *Kaamera kalibreerimine ja georefereerimine* [Konspekt].

Kull, A., Idavain, J., Kull, A., Oja, T., Ehrlich, Ü., & Mander, Ü. (2007). The changing landscapes of transitional economies: The Estonian coastal zone. In Ü. Mander, H. Wiggering, & K. Helming (Eds.), *Multifunctional Land Use: Meeting Future Demands for Landscape Goods and Services* (pp. 327–340). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-36763-5_20

Lague, D., Brodu, N., & Leroux, J. (2013). Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: Application to the Rangitikei canyon (N-Z). *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, *82*, 10–26. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.04.009

Laporte-Fauret, Q., Marieu, V., Castelle, B., Michalet, R., Bujan, S., & Rosebery, D. (2019). Low-Cost UAV for High-Resolution and Large-Scale Coastal Dune Change Monitoring Using Photogrammetry. *Journal of Marine Science and Engineering*, *7*(3). https://doi.org/10.3390/jmse7030063

Linder, W. (2003). *Digital Photogrammetry*. https://doi.org/10.1007/978-3-662-06725-3

Madawalagama, S., Munasinghe, N., Dampegama, S., & Samarakoon, L. (2016). *LOW COST AERIAL MAPPING WITH CONSUMER-GRADE DRONES.*

Masselink, G., Hughes, M., & Knight, J. (2014). *Introduction to Coastal Processes and Geomorphology* (0 ed.). Routledge. https://doi.org/10.4324/9780203785461

Melet, A., Teatini, P., Le Cozannet, G., Jamet, C., Conversi, A., Benveniste, J., & Almar, R. (2020). Earth Observations for Monitoring Marine Coastal Hazards and Their Drivers. *Surveys in Geophysics*, *41*(6), 1489–1534. https://doi.org/10.1007/s10712-020-09594-5

Mis on rtk ja mis see droonile juurde annab? (n.d.). https://droon.ee/mis-on-rtk-ja-mis-see-droonile-juurde-annab/

Mõsovski, L. (2020). *Pakri pankranniku 3D mudeli rekonstrueerimine kasutades ODM tarkvara.* [Lõputöö]. Tallinna Tehnikaülikool. Eesti Mereakadeemia. Merehariduskeskus.

Mõsovski, L. (2023). *Pakri pankranniku pikaajalised muutused ja nende põhjused* [Magistritöö]. Tallinna Tehnikaülikool. Eesti Mereakadeemia. Merehariduskeskus.

Nieto, M. A., Garau, B., Balle, S., Simarro, G., Zarruk, G. A., Ortiz, A., Tintoré, J., Álvarez-Ellacuría, A., Gómez-Pujol, L., & Orfila, A. (2010). An open source, low cost video-based coastal monitoring system. *Earth Surface Processes and Landforms*, *35*(14), 1712–1719. https://doi.org/10.1002/esp.2025

Novais, J., Vieira, A., Bento-Gonçalves, A., Silva, S., Folharini, S., & Marques, T. (2023). The Use of UAVs for Morphological Coastal Change Monitoring—A Bibliometric Analysis. *Drones*, *7*(10). https://doi.org/10.3390/drones7100629

Ortofoto. (n.d.). Maa-amet. https://geoportaal.maaamet.ee/est/ruumiandmed/ortofotod-p99.html

Pakri pank. (2003). In *Eesti Entsüklopeedia*.

Phantom 2 Vision Specs. (n.d.). https://www.dji.com/ee/phantom-2-vision

Phantom 4 RTK Specs. (n.d.). https://enterprise.dji.com/phantom-4-rtk/specs

Pikulova, A. (2023). *Pakri pankranniku muutuste analüüs lidar andmete põhjal.* [Lõputöö]. Tallinna Tehnikaülikool. Eesti Mereakadeemia. Merehariduskeskus.

Pilags, A. (2021). *Assessing changes in Pakri cliff from 3D models using CloudCompare.* [Diplomitöö]. Tallinna Tehnikaülikool. Eesti Mereakadeemia. Merehariduskeskus.

Rivis, R. (2004). *Changes in shoreline positions on the Harilaid Peninsula, West Estonia, during the 20 th century*. *53*(3), 179–193.

Schenk, T. (n.d.). *Introduction to Photogrammetry*.

Soesoo, A., & Miidel, A. (2006). *Põhja-Eesti klint*.

Soomere, T. (2024). *Climate Change and Coastal Processes in the Baltic Sea*. Oxford University Press. https://doi.org/10.1093/acrefore/9780190228620.013.897

Tõnisson, H., Orviku, K., Jaagus, J., Suursaar, Ü., Kont, A., & Rivis, R. (2008). Coastal Damages on Saaremaa Island, Estonia, Caused by the Extreme Storm and Flooding on January 9, 2005. *Journal of Coastal Research*, *243*, 602–614. https://doi.org/10.2112/06-0631.1

Tuuling, I., Bauert, H., Willman, S., & Budd, G. (2011). *The Baltic Sea – geology and geotourism highlights*.

Tuuling, I., & Flodén, T. (2016). The Baltic Klint beneath the central Baltic Sea and its comparison with the North Estonian Klint. *Geomorphology*, *263*, 1–18. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.03.030

Zingfeld, A. (2021). *Avatud lähtekoodiga tarkava analüüs Pakri pankranniku 3D mudeli konstrueerimise jaoks.* [Lõputöö]. Tallinna Tehnikaülikool. Eesti Mereakadeemia. Merehariduskeskus.

Zinßer, T., Schmidt, J., & Niemann, H. (2005, January). Point set registration with integrated scale estimation. *Proceedings, Int. Conf. on Pattern Recognition and Information Processing*.

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Tiina Harak

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose „Pakri poolsaare pankrannikust digitaalkaksiku loomine ja rannikumuutuste analüüs“, mille juhendaja on 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 Commonsi 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.

Tiina Harak

27.05.2024