

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

Bakalaurusetöö geoloogias (12 EAP)  
**Balti Jääpaisjärve rannamoodustised nähtuna  
aerolaserskanneerimise kõrgusandmetest**

Georg Rudolf Sarap

Juhendaja: Prof. Alar Rosentau

Kaitsmisele lubatud .....

Juhendaja .....

*allkiri, kuupäev*

Tartu 2023

## **Annotatsioon**

Käesoleva bakalaaurusetöö eesmärk oli tuvastada LiDAR reljeefimudelilt Eesti aladel ligi 11 700 kal ka BP levinud Balti Jääpaisjärve viimase (BIII) taseme rannamoodustised ning modelleerida nende alusel paleo-veepind ning rannajoone paiknemine hindamaks pärastjääaegse maatõusu muutuseid. Uuringu tulemusena täienes Balti Jääpaisjärve (BIL) rannamoodustiste andmestik ning täpsustus rannavööndi paiknemine. BIII paleo-veepinna kiireima maatõusu asimuudiks saadi 321°, mis on heas kooskõlas varasemate uuringutulemustega. Paleo-veepinna tõusugradiendiks saadi 39 cm km<sup>-1</sup>, mis on ligi 7 cm km<sup>-1</sup> enam kui näitavad varasemad uuringud.

P510 Füüsiline geograafia, geomorfoloogia, mullateadus, kartograafia, klimatoloogia

Märksõnad: Balti Jääpaisjärv, GIS, LiDAR-kõrgusandmed, paleogeograafia, modelleerimine

## **Abstract**

This bachelor's thesis aimed to map and analyze Baltic Sea coastal landforms in Estonia during the Baltic Ice Lake stage (BIII) at about 11 700 cal BP using LiDAR elevation data. Also, to model the BIL water-level surface and evaluate the post-glacial land uplift changes. As a result of the study, the existing database and the reconstruction of the coastline of the Baltic Ice Lake (BIL) were improved. The calculated azimuth of the fastest tilting of BIII surface was 321°, which aligns well with prior studies. The calculated tilting of the B III water-level surface is 39 cm km<sup>-1</sup>, which is almost 7 cm km<sup>-1</sup> steeper than what was found in previous studies.

P510 Physical geography, geomorphology, pedology, cartography, climatology

Keywords: Baltic Ice Lake, GIS, LiDAR elevation data, paleogeography, modeling.

# Sisukord

Sisukord.....	3
Sissejuhatus .....	4
1. Balti Jääpaisjärve arengulugu ja pärastjääaegne maatõus .....	5
2. Balti Jääpaisjärve rannamoodustiste varasemad uuringud Eestis ja välismaal.....	6
3. Materjal ja Metoodika.....	7
3.1 Maa-ameti aerolaseskanneerimise (LiDAR) andmete kasutamine ja rannamoodustiste tuvastamine .....	7
3.2 Paleo-veepindade interpoleerimine .....	7
3.3 Paleogeograafiliste rekonstruktsioonide koostamine .....	9
4. Tulemused .....	10
4.1 Balti Jääpaisjärve BIII staadiumi rannamoodustised ja paleo-veepind .....	10
4.2 Balti Jääpaisjärve rannavööndi rekonstruktsioon.....	11
4.3 Veetaseme muutused Balti Jääpaisjärves ja Billingeni sündmus .....	12
5. Arutelu ja järeldused .....	17
5.1 Võrdlus varasemate BJP rekonstruktsioonidega .....	17
5.2 Järeldused.....	19
Kokkuvõte .....	20
Summary .....	21
Tänuavaldused.....	22
Kasutatud kirjandus .....	23

## Sissejuhatus

Mandrijää hakkas taanduma Läänemere nõo lõunaosast umbes 17 000 – 15 000 kal ka BP (kalibreeritud kalendriaastat tagasi), mille tulemusena kujunes liustikuserva ees Balti Jääpaisjärv (BJP) (Björck, 2008; Houmark-Nielsen & Henrik Kjær, 2003). Sellest ajast alates on Läänemeri ja selle rannad olnud pidevas muutuses. Need muutused on vanade rannamoodustiste näol jätnud tänapäeva maastikule kohati väga selgeid ja äratuntavaid jälgi (Björck, 2008). Vanade rannamoodustiste rööbistamine võimaldab analüüsida pärastjääaegse maatõusu muutuseid (Saarse et al., 2003) ning rekonstrueerida rannajoonte paiknemist ja selle muutumisi.

Tänapäevaks on Läänemere tekkelugu uuritud üle sajandi ja selle erinevate arengufaaside ruumiline ulatus on üsnagi hästi kogu Läänemere piires teada (Björck, 2008). Samas on geoinfosüsteemide ja kaugseire meetodite areng tekitanud uusi võimalusi paleogeograafiliste mudelite ja rekonstruktsioonide tegemiseks. Eriti aerolaserskanneerimise (LiDAR) mõõdistuste ja üha täpsemate maapinna kõrgusmudelite loomine on teinud võimalikuks suurtel aladel usaldusväärselt tuvastada ja kaardistada Läänemere erinevate arengufaaside ajal tekkinud rannamoodustisi (Bates et al., 2007), mille järgi on võimalik uurida glatsioisostaatilise maatõusu protsessi ning hinnata veetaseme muutusi. Eesti alal on BJP rannamoodustisi uuritud geoloogiliste välitööde ning topograafiliste kaartide interpreteerimise abil. Nende andmete alusel on koostatud vanade rannamoodustiste andmebaas (Saarse et al., 2003, 2007) ning on koostatud paleo-veepinna mudelid (Balti Jääpaisjärve staadiumid A1, A2, BI-BIII) ja paleogeograafilised rekonstruktsioonid (Saarse et al., 2007; Rosentau et al., 2009). Samas ei ole senini LiDAR kõrgusandmeid Balti Jääpaisjärve rannamoodustiste tuvastamiseks kasutatud.

Käesoleva bakalaaurusetöö eesmärk on uurida LiDAR-kõrgusandmete kasutusvõimalusi Balti Jääpaisjärve rannamoodustiste (rannavallid, lited, maasääred jne) tuvastamisel Eesti alal. Töös uuritakse Balti jääpaisjärve kõige viimase taseme (BIII) rannamoodustisi, mis kujunesid vahetult enne jääpaisjärve katastroofilist mahajooksu Põhjamere basseini (nn Billingeni katastroofi) ligi 11 700 kal ka BP (Andren et al., 2011).

Töö käigus tuvastati LiDAR kõrgusmudelist BJP viimase (BIII) taseme rannajoone fragmendid, interpoleeriti nende alusel BIII taseme paleoveepind ning hinnati veepinna tõusugradienti ja asimuuti. Samuti koostati BJP paleogeograafiline rekonstruktsioon ja võrreldi tulemusi varasemate uuringute tulemustega.

# 1. Balti Jääpaisjärve arengulugu ja pärastjääaegne maatõus

Läänemere muutumine järgnevalt liustike taandumisest on olnud kaua paljude Läänemerd uurivate kvaternaargeoloogide huviobjektiks. Põhilisteks Läänemere arengut mõjutavateks teguriteks on olnud Skandinaavia jääkilbi järkjärguline taganemine Läänemere basseinist Weichseli jäätumise lõpul 17 000 – 13 000 kal ka BP ja sellega kaasnenud glatsioisostaatiline maatõus ning teised keskkonnamuutused (Andrén et al., 2011; Houmark-Nielsen & Henrik Kjær, 2003). Läänemere hilises ja jääajajärgses ajaloos esines vähemalt kaks peamist magevee etappi (Balti Jääpaisjärv ja Antsülusjärv), mis vaheldusid kahe riimveelise etapiga (Joldiameri ja Litoriina meri) (Donner & Raukas, 1989; Svensson, 1991).

Esmalt tekkisid Läänemere nõos mitmed väiksemad jääjärved, mis hiljem sulavee kogunemisel ja liustiku taganemisel moodustusid üheks järveks – Balti Jääpaisjärv (Houmark-Nielsen & Henrik Kjær, 2003). Umbes 13 000 kal ka BP. kui liustik oli taganenud Billingeni mäest põhja poole, murdis järv endale läbi jää väljapääsutee Põhjamerre, mille tagajärjel kukkus Balti Jääpaisjärve veetase kuni 5 - 10 m, mõnede uuringute järgi isegi rohkem (Björck, 2008). Kuid ookeani sattunud külm magevesi ja üldisemad toleaeagsed klimatoloogilised sündmused põhjustasid ajutise külmaperioodi, mille tagajärjel 12 800 kal ka BP sulgus Balti Jääpaisjärve väljapääs ookeani ja veetase hakkas uuesti tõusma (Andrén et al., 2011). See algatas Balti jääpaisjärve viimase faasi (BI-BIII), kus veetase tõusis kuni 25 m ookeanist kõrgemale (Björck, 2008; Jensen et al., 1997). Eesti aladel on BI-BIII veetaseme muutuseid, peamiselt intensiivse maatõusu tõttu, hinnatud regressiivseteks (Saarse et al., 2007).

Kui Billingeni läbipääs ligi 11 700 kal ka BP uuesti avanes, langes Balti jääpaisjärve veetase 25 m kõigest 1 – 2 aasta jooksul (Andrén et al., 2008; Björck, 2008). Veetaseme languse peamiseks tagajärjeks oli suurte maa-alade vee alt vabanemine Läänemere rannikualadel, mis soodustas kiiret loomade ja taimede rännet põhjapoolsetele aladele (Björck, 2008). Seda sündmust tuntakse tänapäeval Billingeni katastroofi nimega ning see sündmus lõpetas Läänemere nõos Balti Jääpaisjärve staadiumi ning algas Joldiamere staadium (Heinrich et al., 2018).

## 2. Balti Jääpaisjärve rannamoodustiste varasemad uuringud Eestis ja välismaal

H. Munthe (1910) oli esimene teadlane Läänemere uurimisel, kes suutis tõestada suure mageveelise jääjärve olemasolu peale viimast (Weichseli) jäätumist. Ta tegi seda võrreldes Rootsi keskosas leitud vanu moreene läänepoolsete rannajoontega ehk võrreldes tollase Läänemere ja ookeani tasemete erinevusi (Munthe, 1910). Henrik Munthe nimetas selle uue järve Balti Jääpaisjärveks. (Donner & Raukas, 1989)

Ramsay (1917) jõudis sarnastele järeldustele kui uuris Soomes Salpauselkkä piirkonda, kus ta leidis, et Balti jääpaisjärve rannajooned olid kõige kõrgemal. Kuid Ramsay (1929) uuris hiljem rannajooni Eestis ja Ingerimaal ning leidis et ülemised rannad on vanemad kui BJP-i kaldad Soomes ja pakuti et need esindavad kohalike jääjärvede kaldaid. Sellest ajast saadik hilislistikuajalised rannajooned Eestis ja Loode-Venemaal jagati kohalike jääjärvede ja BJP vahel (Markov 1931, Pärna 1960, Kessel ja Raukas 1979). Algselt olid Balti Jääpaisjärv ja kohalikud jääjärved (Peipsi ja Võrtsjärv) sama veetasemega, aga hiljem eraldusid üksteisest 12 700 – 11 700 kal ka BP (Vassiljev et al., 2011).

Balti jääpaisjärve algseid uuringuid piiras heade kõrgusandmete puudumine, mis tänapeval on olemas. Seepärast oli neil raske koostada paleogeograafilisi rekonstruktsioone Balti Jääpaisjärve piiride paiknemistest ning nende koostatud kaardid olid pigem üldisemad ja piiratud detailsusega. Puudulikud olid ka uuringud maapõue glatsioisostaatiliseist maatõusust ning üldisemad tektoonilised liikumised olid halvasti teada (Donner & Raukas, 1989).

Eesti ja selle lähimas ümbruses tehtud uuringutest tehti 2007 kokkuvõte, kus võeti Eesti, Läti ja Loode-Venemaa (Ingerimaa) aladel eksisteerinud Balti Jääpaisjärve viite faasi (A1, A2, BI, BII ja BIII) kohta tehtud varasemate uuringute andmed (koordinaadid, kõrgus, pinnavormi tüüp) ja koondati ühte andmebaasi (Saarse et al., 2007). See andmebaas oli käesoleva bakalaaurusetöö oluliseks võrdluseks ja seda kasutati BIII taseme rannamoodustiste otsimisel ja võrdlemisel.

### 3. Materjal ja Metoodika

#### 3.1 Maa-ameti aerolaseskanneerimise (LiDAR) andmete kasutamine ja rannamoodustiste tuvastamine

Käesolevas uurimistöös kasutati BJP rannamoodustise tuvastamiseks geograafiliste infosüsteemide rakendust QGIS (“*Quantum GIS*”) versiooni 3.22.14 “białowieża”. QGIS valiti, sest see on vabavara, lisaks on sellel olemas paljud pistikprogrammid ja õpetused, mis lihtsustasid tehtud tööd. Valikut mõjutasid ka autori isiklikud eelistused.

Uurimistöös kasutati Maa-ameti poolt loodud LiDAR-andmestiku maapinnapunktidel põhinevat 1 meetrise lahutusega maapinna rasterkõrgusmudelit, mis oli Maa-ameti kõige täpsem kõrgusmudel. Need ruumiandmed on igaihele vabalt kasutatavad ja Maa-ameti geoportaali lehelt allalaaditavad (Maa-amet, 2023). Neid kõrgusmudeleid kasutades tuvastati Balti jääpaisjärve tekitatud kõige nooremad rannamoodustised. BIII taseme rannamoodustiste jalamid digitaliseeriti joonobjektidena. Kuna BIII tase oli jääpaisjärve kõige madalam tase enne Billingeni kaatastroofi, siis jälgiti rannamoodustiste kaardistamisel lisaks varasematele andmepunktile ka seda, et kaardistataks kõige madalamal paiknevat rannavööndit. Balti jääpaisjärve BIII taseme lõpus toimunud Billingeni katastroof jättis maastikule suure ja suhteliselt hästi äratuntava settelünga, mis aitas eristada Balti jääpaisjärve viimast faasi (BIII) jooksul kujunenud rannamoodustisi noorematest pinnavormidest.

Kuna BJP rannamoodustised ei ole tänapäeva reljeefis jälgitavad pideva vöödina, oli vaja rannamoodustite otsimiseks kasutada ka varasemate uuringute tulemusi. Selleks kasutati BJP rannamoodustiste andmebaasi (Saarse et al., 2007), mis sisaldab infot rannamoodustise kõrguse, koordinaatide, tekkeaja ja tüübi kohta. Nende andmete xy koordinaadid ja kõrguste väärtused kanti punktidenähtude kõrgusmudeli kaardilehele ning need näitasid ära üldise rannajoone asukoha, mille järgi otsiti järgnevat rannamoodustisi ja parandati leitud vigu. Seega oli käesolevas töös BIII taseme tuvastamisel oluliseks abiks varasemate BIII taseme punktide kasutamine, kuid lõplik tuvastamine toimus LiDAR mudeli põhjal, kus kaardistati BJP rannamoodustite seeria kõige madalamat vööndit. BIII taseme rannajoone fragmentide digimine toimus mõõtkavas ca 1:15 000, kuid pidevalt oli kasutuses ka suurenduse ja diminutsiooni kasutamine.

#### 3.2 Paleo-veepindade interpoleerimine

Balti Jääpaisjärve rannamoodustiste jalami absoluutkõrguste interpoleerimiseks kasutati programmi “GS Surfer”, et maapinna isostaatilise kerkimise üldist trendi interpoleerida. Esmalt konverteeriti digiteeritud BIII rannajoone fragmendid punktobjektideks, kasutades joone murdepunkte ja QGISi *Extract Vertices* töörista. Andmepunktile anti kõrgused kasutades

QGISi *Point Sampling Tool* pistikprogrammi, mis tegi seda automaatselt. Interpoleerimisel kasutati *Minimum Curvature* meetodit mis andis proovitud meetoditest kõige parema tulemuse. Võrgupinna ruudustiku suurus oli 1000 kuni 1000 m, mis andis mõistlikult täpse tulemuse ja kust oli lihtne tuvastada andmekogu ja interpoleeritud pinna mudeli erinevusi.

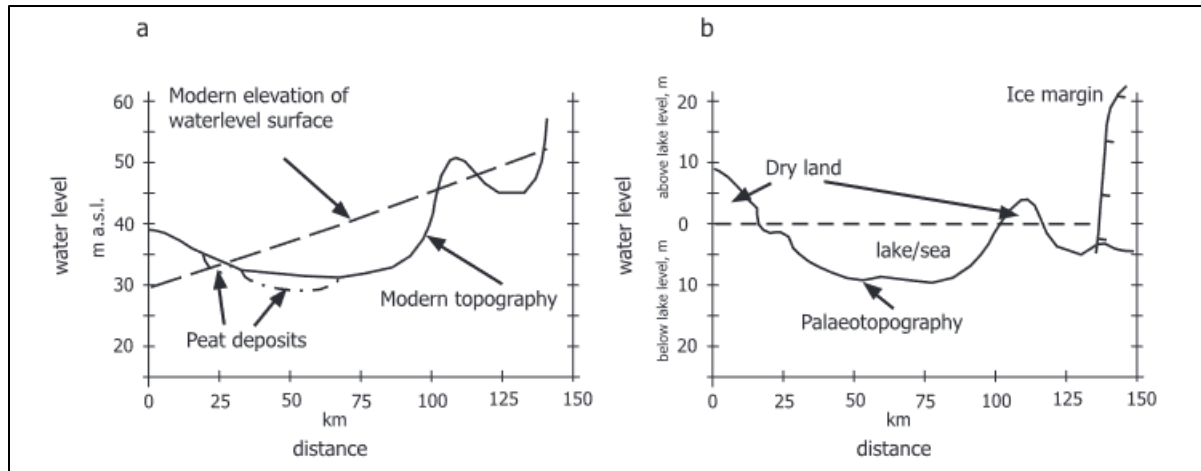
*Minimal Curvature* interpoleerimismeetodit ja tarkvara S. *Minimal Curvature* meetodiga tekitatud interpoleeritud pind on analoogne õhukese, lineaarselt elastse plaadiga, mis läbib kõiki andmeväärtusi minimaalse paindega. *Minimal Curvature* loob võimalikult sileda pinna, püüdes samal ajal alg-andmeid võimalikult täpselt austada. *Minimal Curvature* ei ole siiski täpne interpolaator. See tähendab, et andmeid ei austata alati täpselt. *Minimal Curvature* meetod tekitab ruudustiku, rakendades korduvalt võrrandit üle võrgu, püüdes võrku siluda. Iga ruudustiku läbimine loetakse üheks iteratsiooniks. Võrgusõlme väärtused arvutatakse ümber, kuni väärtuste järjestikused muutused on väiksemad kui maksimaalsete jääkide väärtus või saavutatakse maksimaalne iteratsioonide arv. (Goldensoftware, s.a.)

Paleo-veepinna modelleerimisel kasutati meetodikat (Saarse et al., 2003), kus järk-järgult eemaldati punkte, mille absoluutkõrgused on naaberpunktidega võrreldes anomaaliliselt kõrged (ei tabanud rannavormi jalamit vaid hoopis selle nõlva, luited, teetammid jms.) või madalad (nt kraavid). Esimese interpoleerimise põhjal arvutati kõikidele andmepunktidele jääkväärtused (*Residuals*). Nende leidmiseks kasutati Surferi tööriista *Grid Residuals*, mis arvutas interpoleeritud mudeli ja algandmetena kasutatud XYZ punktide erinevuse.

Eeldades, et suurte erinevustega punktid sisaldavad vigu, visati suurte jääkväärtustega punktid välja. Esmalt kõrvaldati kohad, mille erinevused olid suuremad kui  $\pm 1$  m. Seejärel korrati interpoleerimise ja erinevuste eemaldamise protsessi järelejäänud punktidega kuni olid eemaldatud kõik erinevused, mis olid suuremad kui  $\pm 0,5$  m. Erinevused eemaldati järjekorras kõigepealt kõik üle  $\pm 1$  m, siis kõik üle  $\pm 0,9$  m, siis kõik üle  $\pm 0,7$  m, ja lõpuks  $\pm 0,5$  m. Erinevusi eemaldati järk-järguliselt, sest ei tahetud eemaldada rohkem andmepunkte kui vaja oli. Selle tulemusena valmisalgsest oluliselt sujuvam veetaseme mudel, samuti vähenes modelleerimisel kasutatud punktide arv.

### 3.3 Paleogeograafiliste rekonstruktsioonide koostamine

Paleogeograafiliste rekonstruktsioonide koostamisel lahutati interpoleeritud BIII paleoveepind tänapäevases maapinna rasterkõrgusmudelist, kasutades QGIS'i *raster calculator* tööriista. Lahutamise eesmärk on saada lahti maatõususe gradiendist. Tänapäevane 1 x 1 m piksli suurusega maapinna kõrgusmudel saadi Maa-ameti geoportaalist. Selleks, et saadud tulemust kontrollida võrreldi seda Saarse (2008) loodud mudeliga. Loodud rannajoone paleogeograafilise rekonstruktsiooni kasutati ka algselt digitud joonobjektide kontrollimiseks. Rannajoone ja digitud rannamoodustiste erinevused näitasid ära, kus ja milliseid vigu tehti algse tuvastamise käigus. Samuti andis see võimaluse suuremate erinevuste käsitsi eemaldamiseks ja veepinna uuesti interpoleerimiseks.



**Joonis 1.** Paleogeograafilise rekonstruktsiooni koostamise näide, kus paleoveepind lahutatakse tänapäevasesst kõrgusmudelist. Tänapäeva topograafiline mudel (a), paleogeograafiline mudel järve/mere tekke ajal (b). (Rosentau et al., 2011)

## 4. Tulemused

### 4.1 Balti Jääpaisjärve BIII staadiumi rannamoodustised ja paleo-veepind

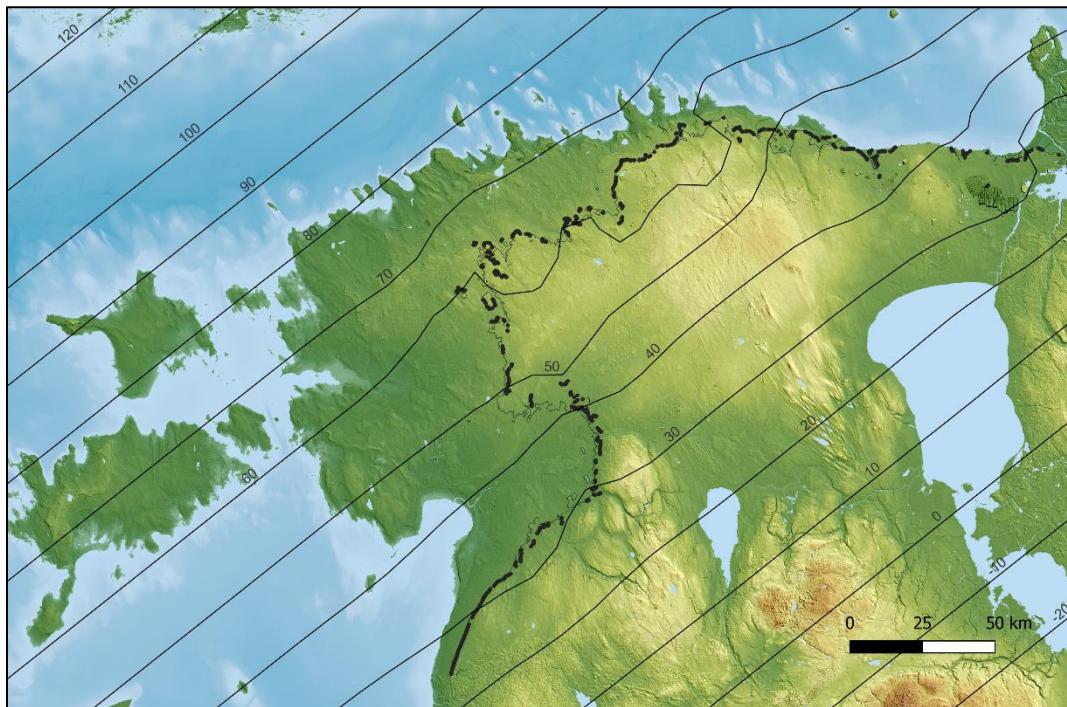
Digitaliseeritud Balti Jääpaisjärve viimase BIII staadiumi noorima rannajoone fragmendid paiknevad tänapäeva reljeefis absoluutkõrgustel 25 – 64 m ü.m.p, ning on uuringuala piires hästi jälgitavad nii LiDAR kõrgusmudelilt kui ka reljeefivarjutuse kaardilt (joonis 2). Kokku õnnestus BIII staadiumi rannavormide fragmente Eesti alal tuvastada kokku 328 km pikkusel lõigul (joonis 2, pärast joonobjektide konverteerimist punktobjektideks kokku 4311 andmepunkti).



**Joonis 2.** Digitaliseeritud BIII rannajoonte fragmendid (punased jooned) värvilisel Eesti reljeefkaardil (Maa-amet)

Paleo-veepinna interpoleerimisel lähtuti Saarse et al. (2003) meetodikast elimineerides järk-järguliselt andmepunktid, mille kõrgused erinesid oluliselt naabruses paiknevatest andmepunktidest. Ilmselt tulid paljud erinevused sisse kuna digitud punktid sattusid rannavallide nõlvadele või initsiaalsete pinnavormidele (kraavid, tee tammid jms), hakates seega oluliselt interpoleerimist segama. Kokku elimineeriti 2043 andmepunkti ehk 47.39% algselt digitaliseeritud punktidest.

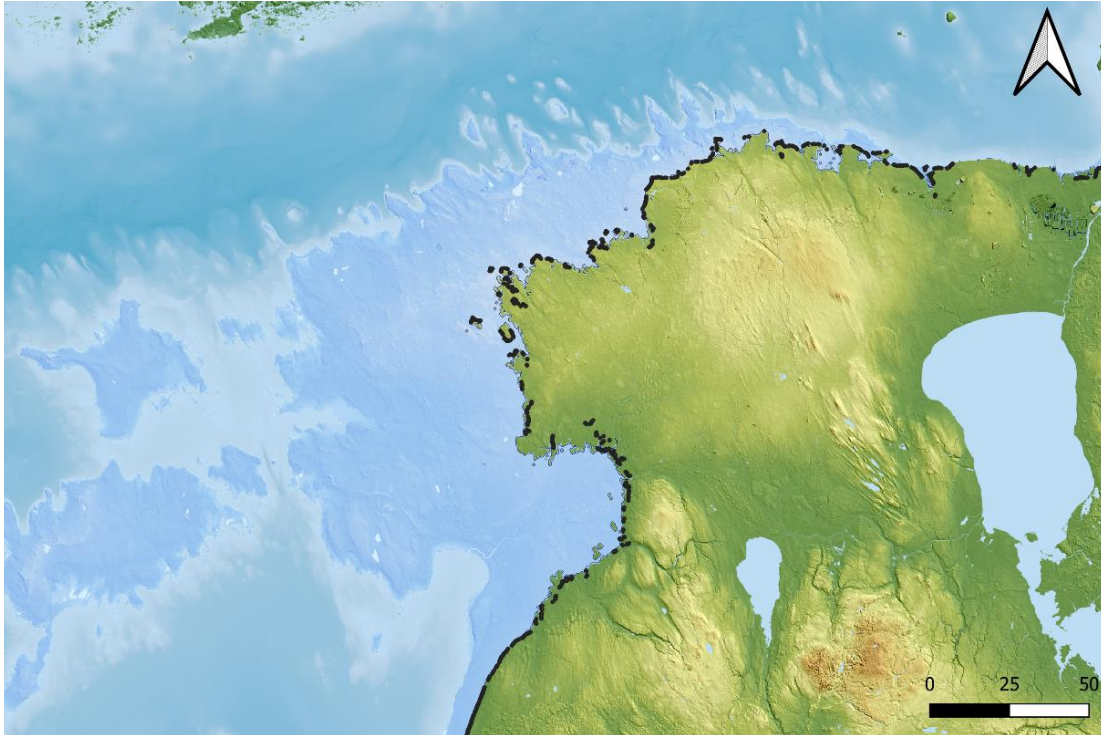
Interpoleerimise tulemusena valmis suhteliselt ühtlase suunalise trendiga paleo-veepind (joonis 3). Modelleeritud paleo-veepinna suurimad ebatasasused on uuringuala põhja ja loode osas u. 60 m ü.m.p. veepinna isobaaside ümbruses. Lääne-Eestis 40-50 m ü.m.p. on näha, et osad andmepunktid jäävad modelleeritud rannast kaugemale. Ilmselt tulenevad need erinevused pärastjääegse turba akumulatsioonist soodes, mis on mõjutanud mudelit. Veepinna isobaaside keskmine asimuut on  $141.5^\circ$  (kiireima maatõusu asimuut  $321.5^\circ$ ), kuid varieerus märgatavalt uuringuala piires. Paleo-veepinna keskmine tõusu gradient on  $38.6 \text{ cm km}^{-1}$ .



**Joonis 3.** BIII taseme Balti jääpaisjärve paleogeograafiline rekonstruktsioon, modelleeritud rannajoone, veepinna isojooned ja nende aluseks olnud punktid.

## 4.2 Balti Jääpaisjärve rannavööndi rekonstruktsioon

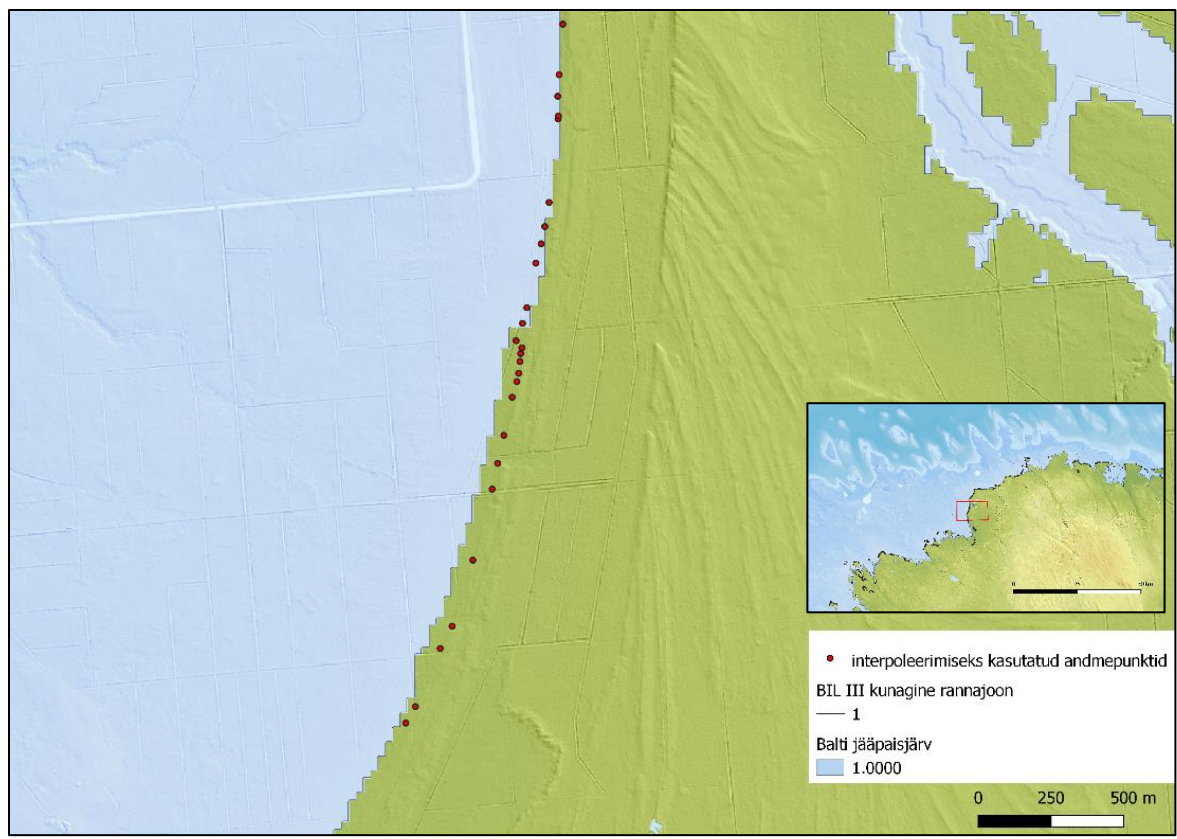
Interpoleeritud paleo-veepinna maapinna kõrgusmudelist mahalahutamise tulemusel valmis BJP BIII taseme rannajoone paleogeograafiline rekonstruktsioon (joonis 4). Valminud rekonstruktsioon on oma täpsusega piiratud interpoleeritud paleo-veepinna täpsusest. Siiski on valminud rekonstruktsioon piisavalt täpne, et uurida BIII taseme rannajoont lähemalt ja teha detailuuringuid (joonis 5, 6, 7, 8).



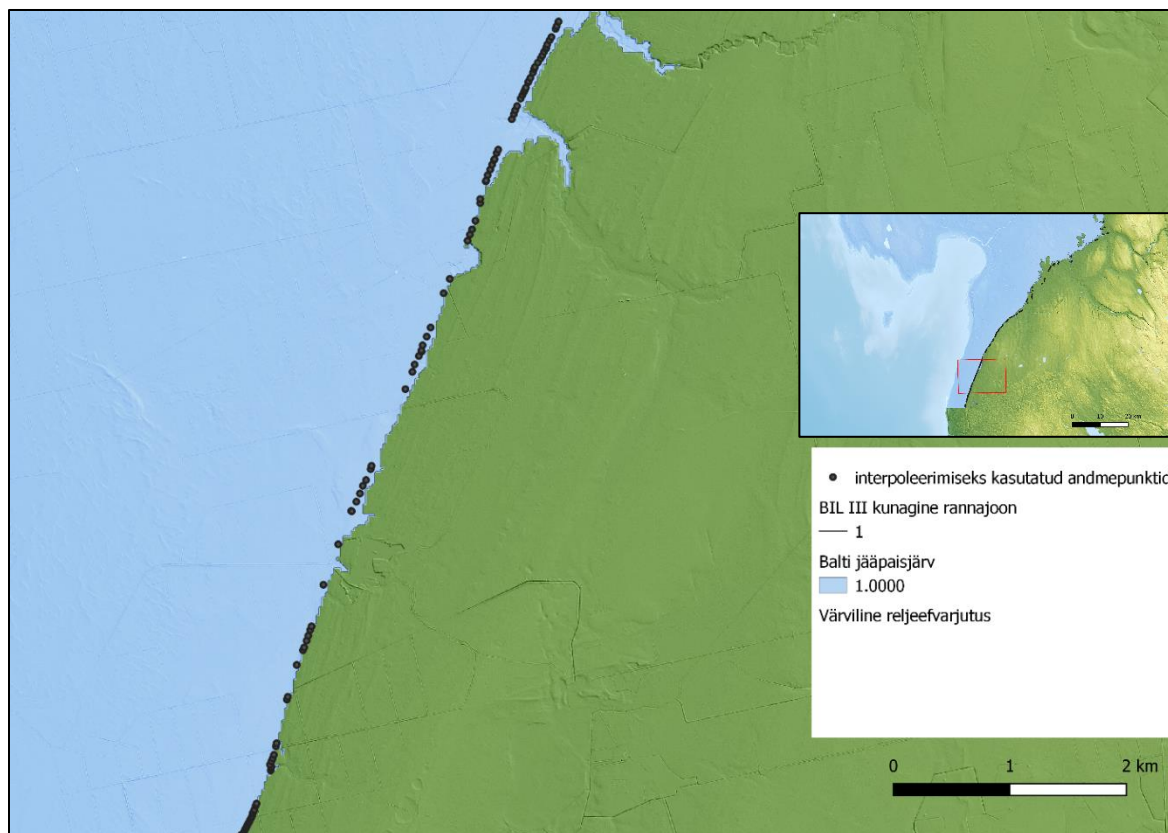
**Joonis 4.** BJP BIII taseme rannavööndi rekonstruktsioon koos rannamoodustiste punktidega värvilise reljefivarjundi peal.

### 4.3 Veetaseme muutused Balti Jääpaisjärves ja Billingeni sündmus

LiDAR kõrgusandmetest on näha ka BIII tasemest kõrgemal paiknevad BJP rannamoodustiste vööndid. Paiguti on LiDAR andmetest näha BJP arengu käigus toimunud transgressioonid, kus BJP veetase on tõusnud ja erodeerind varasemaid rannavorme (joonis 5).

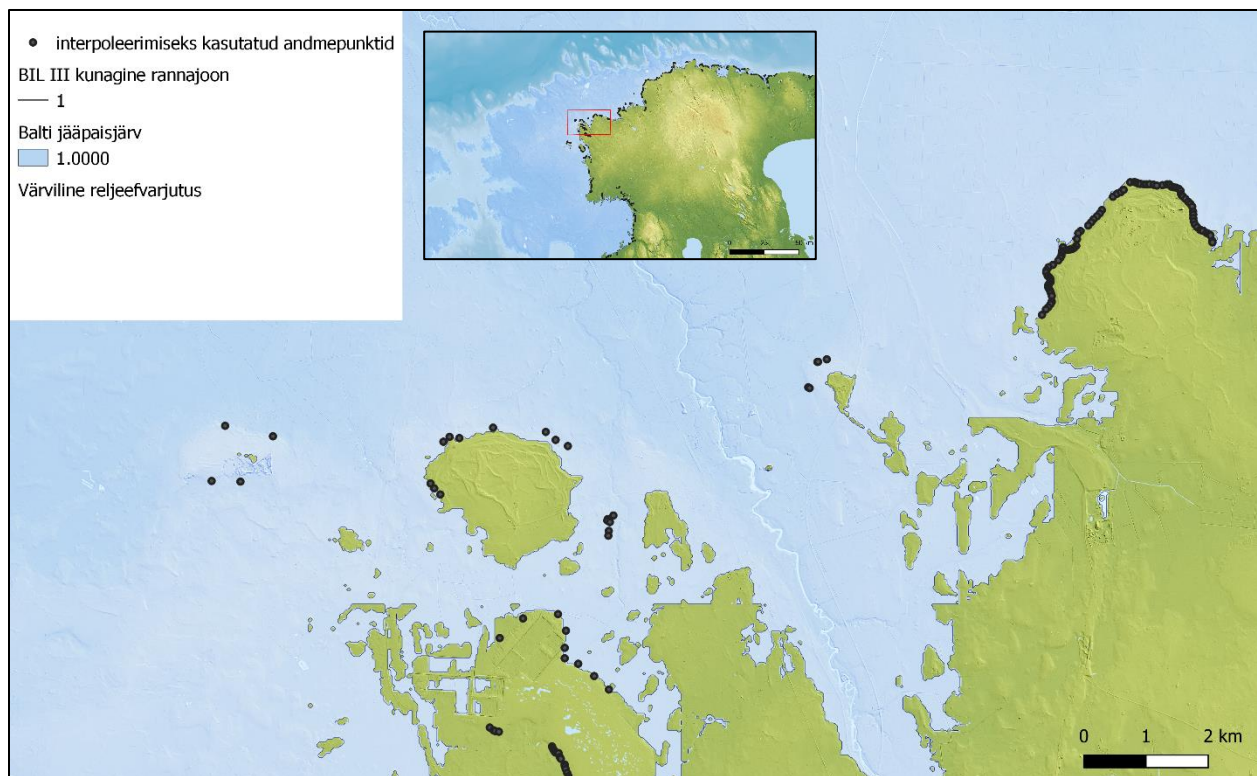


**Joonis 5.** Paleogeograafiline BIII rannajoone rekonstruktsioon koos rannamoodustiste punktidega värvilise reljefivarjutuse peal. Joonisel on näha kuidas kaks rannajoonte seeriat jooksevad üksteisega peaaegu risti, mis viitab sellele, et millalgi BJP arengu jooksul kulutas ta oma varasemaid rannajooni.



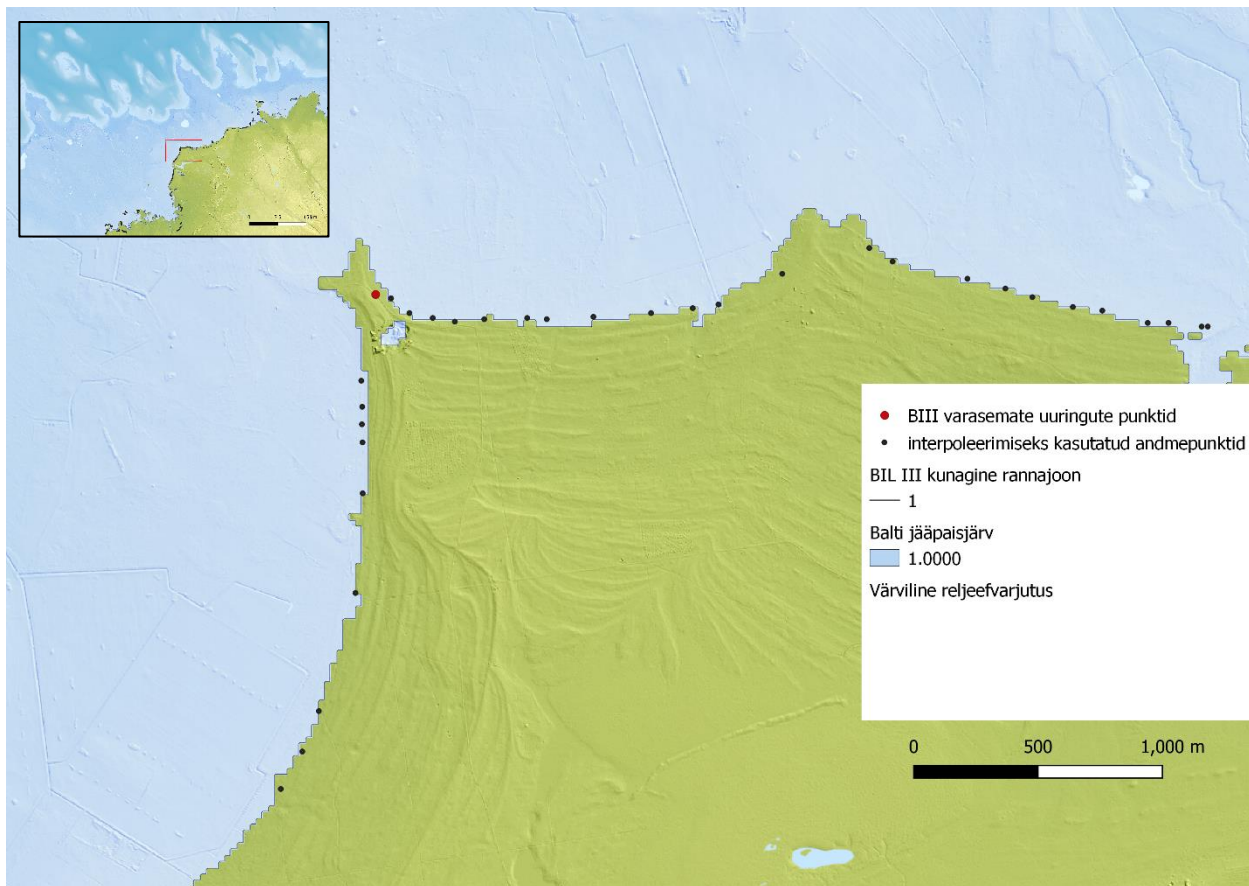
**Joonis 6.** Paleogeograafiline BIII rannajoone rekonstruktsioon rannamoodustiste punktidega värvilise reljefivarjundi peal, näha on ka eelnevate veetasemete rannavallide seeriad. Reljefilt on näha ka kaardistamist segavad teed, jõed ja liivakarjäär.

Ühed kõige paremini tuvastatavad rannavormid olid Lääne-Eesti esinevad BJP rannavallide seeriad, mis paiknevad BIII tasemest kõrgemal ja ulatuvad sellest mõned kilomeetrid sisemaa poole (joonis 6). Samuti tuleb siin hästi esile rannavallide puudumine peale BIII taset ja Billingeni katastroofi poolt tekitatud settelünk (joonis 6).



**Joonis 7.** Paleogeograafiline BIII rannajoone rekonstruktsiooni rannamoodustiste punktidega värvilise reljefivarjutuse peal. BJP Muinassaared Loode/Kesk-Eestis

Eesti loodeosas on rekonstruktsioonis nähtavad ka mitmed muinassaared (joonis 7), mis on kirjeldatud ka varasemas BJP uuringus (Rosentau et al., 2009). Muinassaared olid rannamoodustise tuvastamisel ka segavaks teguriks, sest saarte ümbruses tekkinud keerulised pinnavormid jooksid peamise BJP rannajoonega tihti risti ja muutsid BIII tasmele järgneva settelünga (BIII rannamoodustiste tuvastamise kõige tähtsam ja äratuntavam tegur) raskemini tuvastatavaks.



**Joonis 8.** Paleogeograafiline BIII rannajoone rekonstruktsioon koos värvilise reljefivarjutuse peal. Rannavallide seeriad Põhja-Eestis ja maasäär. Joonisel on märgitud ära (Saarse et al., 2007) andmebaasist võetud BIII punktid.nende võrdlemiseks LiDAR-kõrgusandmeid kasutades digitud punktidega.

Peamised erinevused Saarse (2007) andmebaasi ja töö käigus digitud punktide vahel tulevad välja kaardil (joonis 8), kus on selgelt näha andmebaaside suuruste erinevused. LiDAR-kõrgusandmetega digitud punktid on kõik digitud BIII viimase rannajoone lävele, samas kui vana punkt on märgitud kunagise maasääre kõige suurema ja järsema rannavalli lävele, mis aga ei ole tegelikult regressiivse seeria kõige viimane rannavall. Sellised pisivead olid Saarse (2007) andmebaasi punktides läbivad.

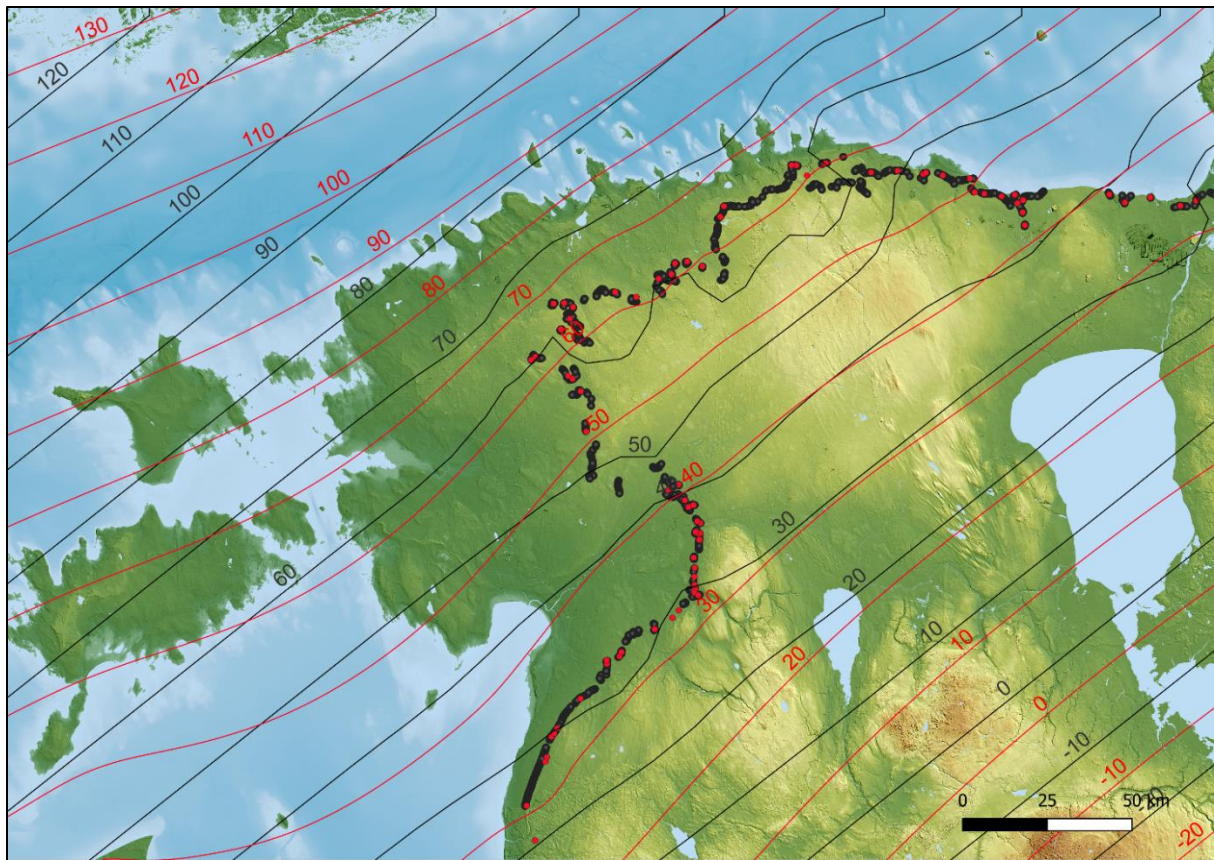
## 5. Arutelu ja järeldused

### 5.1 Võrdlus varasemate BJP rekonstruktsioonidega

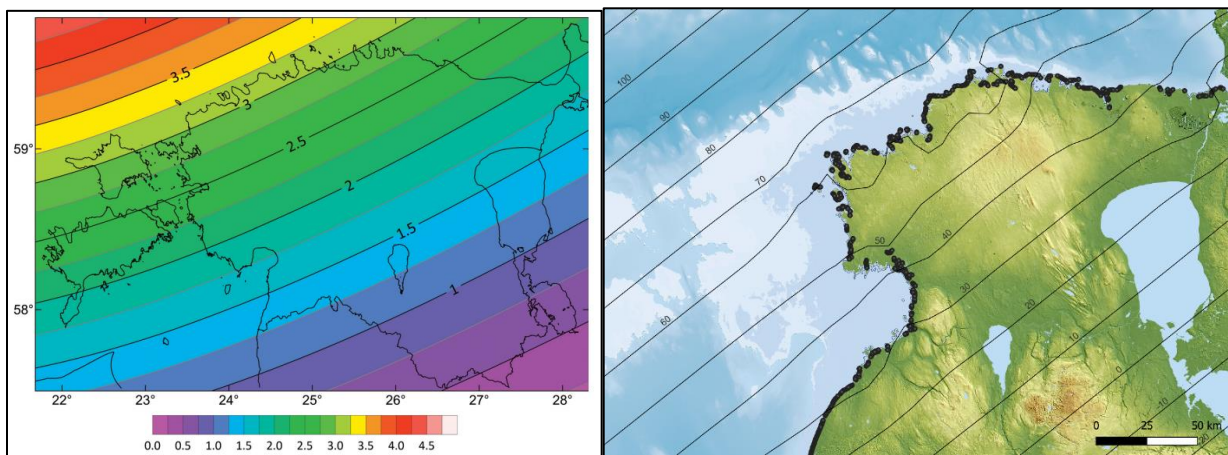
Detailne LiDAR-kõrgusmudel võimaldas Eesti alal tuvastada ja kirjeldada Balti Jääpaisjärve viimase BIII staadiumi käigus tekkinud pinnavorme, mida varasemates rekonstruktsioonidel ei olnud tuvastatud. Võrreldes varasemate töödega, eelkõige Saarse et al. (2003, 2007) võimaldas LiDAR kõrgusandmete kasutamine täpsustada ja täiendada olemasolevat BJP BIII taseme andmestikku. Eelkõige tihenes andmestik põhja ja edela Eestis (joonis 9). Uusi rannamoodustisi ja reljeefimustreid, mida vanas andmestikus ei olnud kirjeldatud, leiti aga ka teistest piirkondadest.

BIII paleo-veepinna isobaasid on suhteliselt sarnased võrrelduna Saarse et al. (2007) uuringuga (joonis 9). Mõningaid erinevusi on Edela-Eestis, kus LiDARi-põhine pind on ligi 7 m kõrgemal kui Saarse mudel. Arvatavasti tuleb see erinevus Läti BJP andmete kaasamisest Saarse mudelisse, mis keerab seda mudelit rohkem lääne poole. Peamised erinevused esinevad ikkagi nendes kohtades, kus LiDARi-põhiseid andmepunkte on oluliselt enam kui vanu (Edela- ja Põhja-Eesti). Veepinna isobaaside keskmine asimuut oli LiDAR andmete põhjal  $141.5^\circ$  (kiireima maatõusu asimuut  $321.5^\circ$ ), kuid varieerus märgatavalt uuringuala piires. Saarse et al (2003) töös on see  $140-150^\circ$ , mis on heas kooskõlas uute tulemustega. Paleo-veepinna keskmine tõusu gradient on  $38.6 \text{ cm km}^{-1}$ , Saarse et al. (2003) töös aga ligi  $7 \text{ cm km}^{-1}$  ( $32 \text{ cm km}^{-1}$ ) madalam. Selle põhjused ei ole teada. Erinevuste võimalikeks põhjusteks võivad olla Põhja-Läti ja Loode-Venemaa BIII rannamoodustiste kaasamisest andmebaasi või LiDAR poolt tuvastatud uued rannamoodustised

BJP BIII taseme rannajoone rekonstruktsioonilt on näha, et digitud punktid ja rannajoon on osades kohtades (Edela- ja Lääne-Eestis) erinevad. Illmselt tuleneb see erinevus turba akumulatsioonist soodes.



**Joonis 9.** Balti jääpaisjärve BIII taseme veepinna isobaasid koos punktidega, mida kasutati isobaaside interpoleerimiseks. Punases on märgitud varasema (Saarse et al., 2007) töös kasutatud punktid ja nendest *Point Kriging* meetodiga interpoleeritud isojooned. Mustas on käesoleva töö käigus digitud punktid ja nendest *Minimum Curvature* meetodiga interpoleeritud isojooned.



**Joonis 10.** Tänapäeva maatõusu gradiendi isojooned (Kall et al., 2021) (paremal) võrdluses alates BJP BIII toimund maatõusu isojoontega (vasakul).

Võrreldes tänapäeva maatõusu kiiruse mudeliga (Kall et al., 2021), on BJP on isojoonte orientatsioon üldjoontes sarnane (joonis 10). BJP veepinna isojoonte alusel on kiireima maatõusu asimuut  $321,5^\circ$ , tänapäeva maatõusu kiiruste mudeli puhul aga ligi  $20^\circ$  ( $340^\circ$ ) rohkem põhja suunas. Mõlemad mudelid peegeldavad pärastjäägse maatõusu dünaamikat, seda aga erinevates ajaskaalades. Kui tänapäeva maatõusu kiiruste mudel käsitleb viimaste aastakümnete keskmist kiirust, siis BJP mudel kirjeldab summaarset maatõusu viimase 11 700 aasta vältel. Asimuutide mõningase erinevuse põhjused ei ole teada. Võimalik, et see on seotud liustiku sulamise dünaamikaga.

## 5.2 Järeldused

Balti jääpaisjärve BIII taseme rannamoodustiste analüüsi põhilised järeldused on:

1. Täienes Balti jääpaisjärve BIII taseme rannamoodustiste andmestik, sealhulgas lisandusid rannamoodustiste andmed lõikudes, kus varasemad andmed puudusid.
2. LiDAR kõrgusmudelist tuvastatud BJP viimase (BIII) taseme rannajoone fragmentide alusel interpoleeritud paleo-veepinna keskmine tõusugradient on  $38.6 \text{ cm km}^{-1}$  ja kiireima maatõusu asimuut  $321.5^\circ$ . Viimane on väga sarnane varasemale hinnangule (Saarse et al., 2003), kuid tõusugradient on ligi  $7 \text{ cm km}^{-1}$  varasemast suurem.
3. LiDAR kõrgusandmetest on näha ka BIII tasemest kõrgemal paiknevad BJP rannamoodustiste vööndid. Paiguti on LiDAR andmetest näha BJP arengu käigus toimunud transgressioonid, kus BJP veetase on tõusnud ja erodeerind varasemaid rannavorme.
4. Balti jääpaisjärve andmete põhjal tuletatud kiireima maatõusu asimuut näitab tänapäeva maatõusu kiiruste mudeliga võrreldes asimuudi nihkumist ligi  $20^\circ$  põhja suunas, mis võib olla seotud liustiku sulamise dünaamikaga.
5. Kõrge detailsusega LiDAR-kõrgusandmed on sobilikud BJP paleogeograafiliste uurimuste läbiviimiseks, võimaldades uuritava ala reljeefist leida varasematest andmestikest täpsemalt ja mitte välja tulnud pinnavorme ja reljeefimustreid. LiDAR-andmestik sobib väga hästi just suurte alade paleogeograafiliste uurimuste läbiviimiseks, sest selle kasutamine on lihtne ja kiire.
6. QGIS kaardirakendus sobib paleogeograafiliste uurimuste tegemiseks ja pakub palju võimalusi kaartide ja rekonstruktsioonide tegemiseks.

## Kokkuvõte

Läänemere rannikuvöönd on pärastjääaegse arengu jooksul olnud pidevas muutuses, mis on jätnud jälje ka tänapäevasesse reljeefi. Käesolevas töös uuriti Balti Jääpaisjärve viimase staadiumi BIII paleorannajoone paiknemist Eestis, kasutades Maa-ameti LiDAR-kõrgusandmeid ja varasemate geoloogiliste uuringute andmeid. Uurimistöö käigus leiti, et kõrge detailsusega LiDAR-kõrgusandmed on sobilikud BJP paleogeograafiliste uurimuste läbiviimiseks, võimaldades uuritava ala reljeefist leida varasematest andmestikest täpsemalt ja mitte välja tulnud pinnavorme ja reljeefimustreid. Kokku tuvastati 328 km ulatuses rannamoodustisi, millest interpoleeriti paleo-veetaseme mudel kasutades *Minimum Curvature* meetodit ning koostati BJP paleogeograafiline rekonstruktsioon 11 700 kal ka BP, vahetult enne Billingeni katastroofi, eksisteerinud paleorannajoonest. LiDAR kõrgusandmetest on näha ka BIII tasemest kõrgemal paiknevad BJP rannamoodustiste vööndid sealhulgas jääjärve arengu käigus toimunud transgressioonid, kus veetase on tõusnud ja erodeerind varasemaid rannavorme. LiDAR kõrgusmudelist tuvastatud BIII taseme rannajoone fragmentide alusel interpoleeritud paleo-veepinna alusel hinnati kiireima maatõusu asimuuti ja tõusu gradienti.

Paleogeograafilise rekonstruktsiooni koostamisel kasutati QGIS'i ja *Surferi* kaardirakendusi, andmepunktide digimiseks ja interpoleerimiseks. Uurimistöö käigus omandati praktilised oskused töötamiseks QGIS'i rastermudelitega ning õpiti kasutama peamiseid analüüsimeetodeid, sealhulgas rastermudelite interpoleerimist ning rasterarvutuste tegemist.

Paleogeograafiliste rekonstruktsioonide koostamisel osutus väga vajalikuks varasemate uuringute andmepunktide ja kaartide kasutamine, kuna see võimaldas lihtsamini leida BIII paleoranna pinnavorme ja eristada neid teiste staadiumite rannavormidest.

## Summary

### **Baltic ice lake beach formations as seen from airborne laser scanning elevation data.**

The coastal zone of the Baltic Sea has been undergoing constant changes since the post-glacial period, which has also left its mark on the present-day relief. The following study researched the location of the BIII paleo-shoreline of the Baltic Ice Lake's (BIL) final stage in Estonia, combining the use of the Estonian Land Board's LiDAR elevation data and previous geological research data. During the study, it was found out that high-resolution LiDAR elevation data is suitable for conducting paleogeographical studies of the BIL, compared to earlier datasets it enabled for the more precise identification of previously unidentified landforms and relief patterns in the studied area. A total of 328 km of shoreline formations were identified, from which a paleo-sea level model was interpolated using the Minimal Curvature method, and a paleogeographical reconstruction of the BIII paleo-shoreline was created. The LiDAR elevation data also reveal zones of BIL shoreline formations located above the BIII level, including transgressions that occurred during the development of the ice lake, where the water level rose and eroded earlier coastal formations. Based on fragments of the BIII-level shoreline landforms derived from the LiDAR elevation model, the azimuth and gradient of the fastest land uplift were estimated using the interpolated paleo-water surface.

QGIS and Surfer mapping applications were used in the creation of the paleogeographical reconstruction, for data point digitization and interpolation. Practical skills were acquired during the study to work with QGIS raster models and to use the main analysis methods, including raster model interpolation and raster calculations.

The use of previous research data points and maps proved to be crucial in the creation of paleogeographical reconstructions, as it facilitated the identification of BIII paleo-shoreline landforms and differentiation from landforms of other stages.

## Tänuavaldused

Täna oma juhendajat Alar Rosentaud suure toetuse ja abi eest.

(Georg Rudolf Sarap)

## Kasutatud kirjandus

- Andrén, T., Björck, S., Andrén, E., Conley, D., Zillén, L., & Anjar, J. (2011). The Development of the Baltic Sea Basin During the Last 130 ka. J. Harff, S. Björck, & P. Hoth (Toim), *The Baltic Sea Basin* (lk 75–97). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-17220-5\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-642-17220-5_4)
- Andrén, T., Lindeberg, G., & Andrén, E. (2008). Evidence of the final drainage of the Baltic Ice Lake and the brackish phase of the Yoldia Sea in glacial varves from the Baltic Sea. *Boreas*, *31*, 226–238. <https://doi.org/10.1111/j.1502-3885.2002.tb01069.x>
- Bates, M., Bates, C., & Whittaker, J. (2007). Mixed method approaches to the investigation and mapping of buried Quaternary deposits: Examples from Southern England. *Archaeological Prospection*, *14*, 104–129. <https://doi.org/10.1002/arp.303>
- Björck, S. (2008). The late Quaternary development of the Baltic Sea basin. *Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin*, 398–407.
- Donner, J., & Raukas, A. (1989). ON THE GEOLOGICAL HISTORY OF THE BALTIC ICE LAKE. *Proceedings of the Academy of Sciences of the Estonian SSR. Geology*, *38*(3), 128. <https://doi.org/10.3176/geol.1989.3.06>
- Goldensoftware. (s.a.). *Surfer Tutorial*. Salvestatud 19. mai 2023, <https://surferhelp.goldensoftware.com/tutorial/tutorial-introduction.htm>
- Heinrich, C., Anders, S., & Schwarzer, K. (2018). Late Pleistocene and early Holocene drainage events in the eastern Fehmarn Belt and Mecklenburg Bight, SW Baltic Sea. *Boreas*, *47*(3), 754–767. <https://doi.org/10.1111/bor.12298>
- Houmark-Nielsen, M., & Henrik Kjær, K. (2003). Southwest Scandinavia, 40–15 kyr BP: Palaeogeography and environmental change. *Journal of Quaternary Science*, *18*(8), 769–786. <https://doi.org/10.1002/jqs.802>

- Jensen, J. B., Bennike, O., Witkowski, A., Lemke, W., & Kuijpers, A. (1997). The Baltic Ice Lake in the southwestern Baltic: Sequence-, chrono- and biostratigraphy. *Boreas*, 26(3), 217–236. <https://doi.org/10.1111/j.1502-3885.1997.tb00853.x>
- Kall, T., Oja, T., Kruusla, K., & Liibus, A. (2021). New 3D velocity model of Estonia from GNSS measurements. *Estonian Journal of Earth Sciences*, 70, 107. <https://doi.org/10.3176/earth.2021.08>
- Maa-amet. (s.a.). *Laadi kõrgusandmed alla*. Salvestatud 18. mai 2023, <https://geoportaal.maaamet.ee/est/Ruumiandmed/Korgusandmed/Laadi-korgusandmed-alla-p614.html>
- Munthe, H. (1910). Studies in the Late-Quaternary history of Southern Sweden. *Geologiska Föreningen i Stockholm Förhandlingar*, 32(5), 1197–1293. <https://doi.org/10.1080/11035891009442326>
- Rosentau, A., Vassiljev, J., Hang, T., Saarse, L., & Kalm, V. (2009). Development of the Baltic Ice Lake in the eastern Baltic. *Quaternary International*, 206(1), 16–23. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2008.10.005>
- Rosentau, A., Veski, S., Kriiska, A., Aunap, R., Vassiljev, J., Saarse, L., Hang, T., Heinsalu, A., & Oja, T. (2011). *Palaeogeographic Model for the SW Estonian Coastal Zone of the Baltic Sea* (lk 165–188). [https://doi.org/10.1007/978-3-642-17220-5\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-642-17220-5_8)
- Saarse, L., Vassiljev, J., & Miidel, A. (2003). Simulation of the Baltic Sea Shorelines in Estonia and Neighbouring Areas. *Journal of Coastal Research*, 19(2), 261–268.
- Saarse, L., Vassiljev, J., Rosentau, A., & Miidel, A. (2007). Reconstructed late glacial shore displacement in Estonia. *Baltica*, 20, 35–45.

Svensson, N.-O. (1991). Late weichselian and early holocene shore displacement in the central Baltic sea. *Quaternary International*, 9, 7–26. [https://doi.org/10.1016/1040-6182\(91\)90059-W](https://doi.org/10.1016/1040-6182(91)90059-W)

Vassiljev, J., Saarse, L., & Rosentau, A. (2011). *Palaeoreconstruction of the Baltic Ice Lake in the Eastern Baltic* (lk 189–202). [https://doi.org/10.1007/978-3-642-17220-5\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-642-17220-5_9)

Lihlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Georg Rudolf Sarap

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihlitsentsi) minu loodud teose

**Balti Jääpaisjärve rannamoodustised nähtuna aerolaserskanneerimise kõrgusandmetest**

mille juhendaja on Alar Rosentau

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

2. Annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace kaudu Creative Commons'i litsentsiga CC BY NC ND 4.0, mis lubab autorile viidates teost reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
3. Olen teadlik, et punktides 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
4. Kinnitan, et lihlitsentsi andmisega ei riku ma teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse õigusaktidest tulenevaid õigusi.

Georg Rudolf Sarap

*19.05.2023*