

Tartu Ülikool

Loodus- ja täppisteaduste valdkond

Ökoloogia ja maateaduste instituut

Geoloogia osakond

Magistritöö geoloogias (30 EAP)

Üleujutatud Holotseeni rannikumaastikud Pärnu lahes

Art Kristjan Olesk

Juhendajad: Alar Rosentau

Tiit Hang

Sten Suuroja

Tartu 2024

Üleujutatud Holotseeni rannikumaastikud Pärnu lahes

Käesoleva magistritöö eesmärgiks oli selgitada Pärnu jõe vana sängi kulgemine Pärnu lahe põhjas, jõe oru setete stratigraafia, genees ja vanus ning seosed merevee taseme muutustega Holotseenis. Uuringu käigus interpreteeriti kokku 96 km seismo-akustilisi profiile, tehti 24 settesondeerimist ning kasutati erinevaid laboratoorseid meetodeid. Töö tulemusena selgus, et Pärnu jõe vana säng on Pärnu lahe põhjas jälitatav 12 km pikkuses lõigus. Jõe oru vanemad setted on ladestunud Joldiamere madalseisu ja Antsülusjärve transgressiooni alguses ning nooremad setted Varajase Litorinamere madalseisu ja Litorinamere transgressiooni ajal. Joldiamere madalseisu ajal võis veetase Pärnu lahes olla u 7,8 m madalam kaasaegsest veetasemest.

Märksõnad: üleujutatud rannikumaastikud, Läänemeri, Holotseen, Pärnu jõgi, suhteline meretaseme muutus

P460 Sedimentoloogia; **P510** Füüsiline geograafia, geomorfoloogia, mullateadus, kartograafia, klimatoloogia

Submerged Holocene coastal landscapes in Pärnu Bay

The aim of this master's thesis was to investigate the continuation of the Pärnu River channel on the bottom of Pärnu Bay, the stratigraphy, genesis, and age of the channel infill, and their relationship with Holocene relative sea-level changes. During the study, a total of 96 km of seismo-acoustic profiles were run and interpreted, 24 sediment sequences were described, and various laboratory methods were used. The results revealed that the channel of the Pärnu River can be traced on the bottom of Pärnu Bay for a length of 12 km. The older sediments in the river valley were deposited during the lowstand of the Yoldia Sea and the onset of the Ancylus Lake transgression, while the younger sediments were deposited during the lowstand of the Initial Litorina Sea and the Litorina Sea transgression. During the lowstand of the Yoldia Sea, the water level in Pärnu Bay might have been ca 7.8 meters lower than the present-day water level.

Keywords: Submerged landscapes, Baltic Sea, Holocene, Pärnu River, relative sea-level change

P460 Sedimentology; **P510** Physical geography, geomorphology, pedology, cartography, climatology

Sisukord

Sissejuhatus.....	4
1. Taust ja varasem uuritus	6
1.1. Läänemere veetaseme muutused Holotseenis.....	6
1.2. Üleujutatud Holotseeni rannikumaastikud Läänemeres	6
1.3. Uuringuala geoloogia ja esiajalooline inimasustus Pärnu piirkonnas.....	8
2. Materjal ja meetodika	11
2.1. Seismo-akustiline pidevsondeerimine	11
2.2. Külgvaatesonari ja lehviksonari andmed	11
2.3. Merepõhja ja rannavööndi setete sondeerimine.....	12
2.4. Kuumutuskao ja lõimise analüüs	13
2.5. Setete vanuse määramine	13
3. Tulemused.....	14
3.1. Pärnu vana jõesängi setted Raeküla rannas	14
3.1.1. Setete stratigraafia ja vanus	14
3.1.2. Setete lõimis ja orgaanilise aine sisaldus	16
3.2. Pärnu vana jõesängi setted ja levik Pärnu lahe põhjas.....	17
3.2.1. Mattunud oru levik ja setted Pärnu lahe madalamas osas.....	18
3.2.2. Oru levik ja setted Pärnu lahe sügavamas osas.....	21
4. Arutelu ja järeldused	26
4.1. Pärnu jõe vana orgu täitvate setete kujunemine ja seosed meretaseme muutustega Holotseenis.....	26
4.2. Holotseeni maastike elementide säilimine Pärnu lahe põhjas ja seosed mesoliitilise asustusega Pärnu piirkonnas	27
4.3. Järeldused.....	29
Kokkuvõte.....	31
Summary	32
Tänuõnad	34
Kirjandus.....	35
Lisa 1.....	39

Sissejuhatus

Veetaseme muutused Läänemeres on olnud tänu isostaatilisele maatõusule ja eustaatilise meretaseme muutustele pärast viimast mandrijäätumist märkimisväärsed, olles olnud tänapäevasest meretasemest nii madalamal kui ka kõrgemal. Maatõusu erinevused Läänemere põhja- ja lõunaosa vahel ning eustaatiline meretaseme tõus on mõjunud suhtelise veetaseme muutustele Läänemere eri osades erinevalt. Kiire maakerkega Läänemere põhjaosas on toimunud pidev regressioon (Lindén *et al.*, 2006). Läänemere lõunarannikul on maatõus nullilähedane ja kohati ka negatiivne (Kierulf *et al.*, 2021), mille tõttu toimub alal pidev transgressioon. Lisaks on veel vahepealsed alad, kus maakerge ja eustaatiline meretaseme tõus konkureerivad omavahel, mille tulemuseks on regressiivsete ja transgressiivsete perioodide vaheldumine. Ajavahemikul 11 500 – 8000 kal a t (radiosüsinikumeetodi dateerimise põhine ajaskaala kalibreeritud aastat tagasi) oli meretase Läänemere lõunaosas oluliselt madalamal, tuues nähtavale ulatuslikke alasid, mis on nüüdseks mere all (Nilsson *et al.*, 2018). Need rannikualad pakkusid sobivaid tingimusi varajasele inimasustusele (Harff *et al.*, 2016). Läänemere põhjast on mitmeid näiteid kunagistest rannikumaastikest ja jälgi varajasest inimasustusest (Hansson, 2018; Larsson, 2017; Nilsson *et al.*, 2018), mis rõhutavad piirkonna geoloogilist ja arheoloogilist tähtsust.

Läänemere keskosa rannikualadel elanud inimesed pidid kohanema muutuva rannajoonega. Tänu Läänemere arengus esinenud regressiivsete ja transgressiivsete perioodide vaheldumisele on asustus liikunud kord maismaa, siis jälle mere suunas (Jöns, 2011). Seega on merevee taseme muutused oluliselt mõjutanud inimasustuse paiknemist ja migratsioone. Läänemere ääres elanud Vara- ja Kesk-Holotseeni inimeste elu sõltus suuresti veekeskonna lähedusest, mis oli oluline nii transpordiks kui ka elatusallikaks (Milner *et al.*, 2004; Boethius, 2016; 2018; Fischer *et al.*, 2007). Lääne-Eestis, Pärnu jõe suudmealal on leitud mitmeid eelajaloolisi asulakohti, mis on transgressioonietappide käigus nooremate setete alla maetud (Rosentau *et al.*, 2011) ja seeläbi konserveeritud ning kujutavad endast tänuväärset looduskeskkonna ja asustuse muutuste arhiivi.

Läänemere veetaseme muutused ja selle seosed esiajaloolise asustusega on nii Eesti rannikualadel (Vassiljev *et al.*, 2015; Rosentau *et al.*, 2020; Rosentau *et al.*, 2021; Nirgi *et al.*, 2020) kui ka mujal regioonis (Lübke, 2002; Lampe, 2005; Uścińowicz, 2006; Hansson *et al.*, 2019) suhteliselt hästi uuritud. Samas on oluliselt vähem teada mere alla jäänud varasest asustusest ja sellega seotud Holotseeni rannikumaastikest ja maismaa setetest, mis vahel

peidavad endas nii haruldasi arheoloogilisi (puidust kalapüünised ja võrgujäänused) kui ka loodusteaduslikke leide (uppunud metsad), mis maismaa aeroobsetes tingimustes on reeglina hävinenud (Hansson, 2018). Merepõhja maismaalistest maastikest Eesti vetes on varasemate uuringute põhjal teada vaid mereliivade alla mattunud Pärnu jõe sāngi setted rannajoone lähedal vanusega u 9000 kal a t (Nirgi *et al.*, 2020). Koostöös Eesti Geoloogiateenistusega on viimastel aastatel seismo-akustiliste meetoditega kaardistatud Pärnu lahe põhjaseteid, mille tulemused näitavad vana Pärnu jõe sāngi kulgemist oluliselt laialdasemal alal kui seni teada. Käesolev magistritöö keskendub Pärnu lahes kaardistatud seismo-akustilise andmestiku interpreteerimisele, selgitamaks välja Pärnu jõe sāngi täpsem kulgemine. Lisaks oli eesmärgiks setete detailisemate uuringute kaudu välja selgitada orgu täitvate setete stratigraafia ja vanus ning seosed suhtelise meretaseme muutustega Holotseenis. Uurimus panustab Holotseeni meretaseme muutuste uuringutega seotud grandiprojekti PRG1471 ning üleeuroopalisse mere alla jäänud maastike uurimisprojekti EMODnet Submerged Landscapes.

1. Taust ja varasem uuritus

1.1. Läänemere veetaseme muutused Holotseenis

Mandrijää taandumisega pärast viimast jääaega kadus raskus maakoorelt ja seni jää poolt alla surutud ala hakkas kerkima. Glatsio-isostaatiline maakerge on kiireim Läänemere põhjaosas Botnia lahe rannikul ja aeglasem Läänemere lõunarannikul, kus mõnes piirkonnas võib maapind ka langeda (Kierulf *et al.*, 2021). Maakerke erinevused Läänemere põhja- ja lõunaosas on seotud viimase mandrijää paksusega, mis oli maksimaalne Botnia lahe põhjaosas. Glatsio-isostaatilise maakerke regionaalsed erinevused ja eustaatiline meretaseme tõus on mõjunud suhtelise veetaseme muutustele Läänemere eri osades erinevalt. Sellest tulenevalt võib piirkonna jagada kolmeks (Rosentau *et al.*, 2021). Kiire maakerkega Läänemere põhjaosas, nagu Botnia lahe piirkond, on toimunud pidev regressioon (Lindén *et al.*, 2006) ja mere alla jäänud maastikud puuduvad. Läänemere lõunarannikul on maatõus nullilähedane või negatiivne (Kierulf *et al.*, 2021). Seetõttu toimub alal pidev transgressioon ja Holotseeni maastikud on jäänud vee alla (Harff & Meyer, 2011). Selline situatsioon on Taani, Saksamaa, Poola ja Leedu rannikutel. Kolmandaks on kompleksse situatsiooniga alad, nagu Eesti, Läti, Lõuna-Rootsi ja Lõuna-Soome, kus maakerge ja eustaatiline meretaseme tõus konkureerivad omavahel. Tulemuseks on regressiooni- ja transgressiooniperioodide vaheldumine, sõltuvalt sellest, kas eustaatiline meretaseme tõus on kiirem või aeglasem kui glatsio-isostaatiline maakerge.

Lisaks eustaatilisele veetaseme tõusule ja maakerkele on veetaseme muutuseid Läänemeres mõjutanud ka ühenduse olemasolu või selle puudumine maailmamerega. Läänemere arenguloos on teada kaks järvelist arengustaadiumit: hilisjääaegne Balti Jääpaisjärve staadium (16 000 – 11 700 kal a t) ja Holotseeni jääv Antsülusjärve staadium (10 700 – 9800 kal a t). Antsülusjärve algfaasis tõusis mandriliustiku sulavete mõjul veetase mitmel pool Läänemere rannikul sh Eestis märkimisväärselt, millele järgnes suhteliselt kiire veetaseme alanemine (Nirgi *et al.*, 2020).

1.2. Üleujutatud Holotseeni rannikumaastikud Läänemeres

Ajavahemikul u 11 500 – 8000 kal a t oli vähemalt 3500 km² praegusest Läänemere lõunaosast maismaa (Harff *et al.*, 2007). Merealuseid maismaalise päritoluga maastike fragmente on Läänemere regioonis tänaseks teada Taani, Saksamaa, Rootsi, Poola, Leedu ja Eesti vetest

(Rosentau, *et al.*, 2017). Nende maastikega seotud arheoloogilisi leide on teada Taani, Saksamaa, Rootsi ja Poola vetest (SPLASHCOS, 2024).

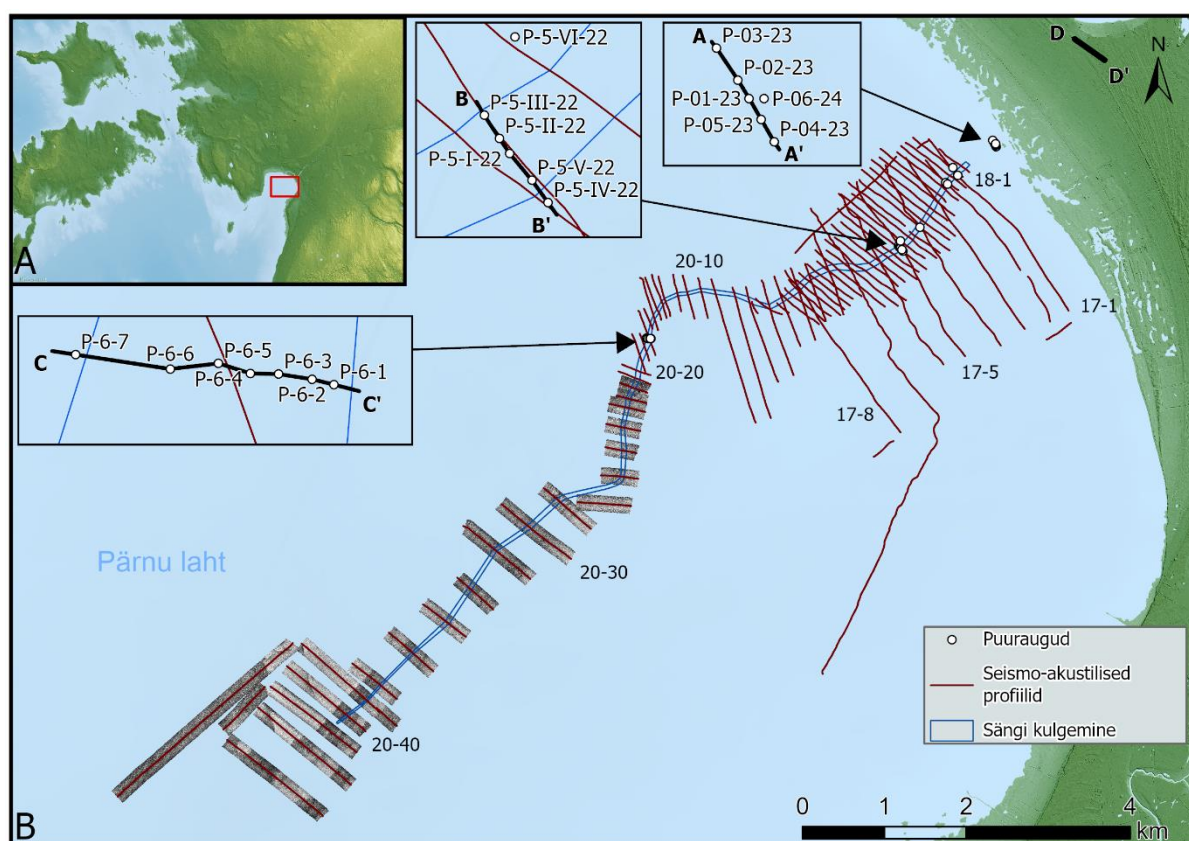
Taani (Bailey *et al.*, 2020), Saksamaa (Harff *et al.*, 2016), Poola (Uscinowicz *et al.*, 2011) ja Leedu (Žulkus & Girininkas, 2022) vetest on seismo-akustika ja sukeldumiste andmetest teada vanade juurdunud kändude (paleometsade) jäänuseid, samuti merepõhjas jätkuvate jõgede kaldafragmente ja setteid. Saksamaa rannikuvetest, Wismari lahest, on vanade jõgede kallastelt leitud mitmeid mesoliitilisi asulakohti (Lübke, 2002). Mesoliitilisi ja neoliitilisi asulakohti ja juhuleide on samuti teada Poola ja eriti suurel hulgal Taani (Fischer & Vang Petersen, 2018) rannikuvetest.

Aeglase maatõusuga ja kompleksse mereveetaseme muutustega piirkondadest on Lõuna-Rootsi vetes asuv Hanö laht Pärnu lahele sarnane. Hanö lahest on teada nii mere alla jäänud rannikumaastikke kui ka erinevaid arheoloogilisi leide (Hansson, 2018; Nilsson *et al.*, 2018). Havängi lähedal on Hansson (2018) kirjeldanud veealust jõesängi, mille settekompleksi paksus on kuni 4 m. Sängi kallastelt on 12 – 24 m sügavuselt leitud rohkelt puitu ja juurdunud kände ning mitmeid arheoloogilisi leide Joldiamere ja Varajase Litoriinamere perioodist. Veealune vana jõesäng koos arheoloogiliste leidudega on ka Havängist u 50 km põhjas (Nilsson *et al.*, 2020). Hanö lahest on leitud ka laguunisetteid (Hansson *et al.*, 2017). Lahe põhjaosas Blekinge regioonist on teada pealetungiva mere poolt maetud männi kände ja mitmeid arheoloogilisi leide (Holmlund *et al.*, 2017; Hansson *et al.*, 2019).

Põhjuseid, miks maismaa maastikud mere transgressioonide käigus säilivad, on uuritud mitmel pool maailmas, sh Läänemere piirkonnas (Bailey & Jöns, 2020; Rosentau *et al.*, 2017). Üks oluline põhjus on mattumine peeneteraliste setete alla, mis kaitsevad nii füüsilise lõhkumise kui ka bakteriaalse lagundamise eest, tekitades anaeroobsed tingimused (Bailey & Jöns, 2020). Setete alla mattumine samas raskendab uuringuid. Läänemere väike tõusu- ja mõõnavee tasemete vahe (Medvedev *et al.*, 2013) suurendab veealuste maastike säilimise tõenäosust veelgi (Bailey & Jöns, 2020). Samuti on oluline roll maastike säilimisel ka ranniku vähene avatus tormilainetusele, mis põhjustab maastike erosiooni. Viimasega võib seletada Taani rannikuvetes leiduvate esiajalooliste asulakohtade suurt arvu ja väga head säilivust (Rosentau *et al.*, 2017).

1.3. Uuringuala geoloogia ja esiajalooline inimasustus Pärnu piirkonnas

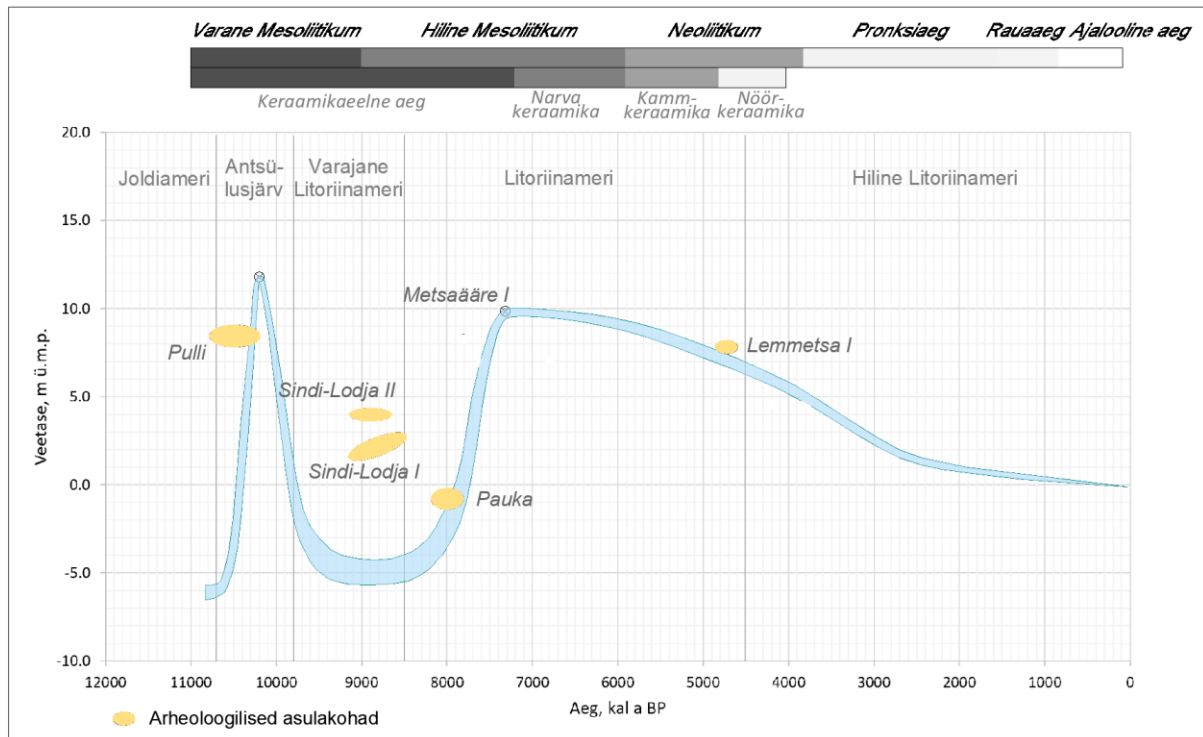
Uuringuala asub Läänemeres, Liivi lahe kirdeosas asuva Pärnu lahe idaosas (Joonis 1A). Pärnu laht on osaliselt suletud küllaltki madal veekogu, mille veesügavus jääb valdavalt alla kaheksa meetri ja suureneb lahe suudme suunas. Pärnu lahe põhjas uuringualal lasuvad vahetult moreenil kuni 10 m paksuselt jääjärvelised viirsavid, mille pealispind rannajoonel paikneb u -3 m ja lahe kaugemas osas u -8 m absoluutkõrgusel (Hang & Kohv, 2013). Viirsavi katavad lahe põhjas paiguti hajusat orgaanilist ainet sisaldavad merelised liivad ja aleuriidid. Viirsavide kujunemine toimus Balti Jääpaisjärves ja algas vahetult pärast mandrijää taandumist piirkonnast, ligi 14 000 kal a t (Vassiljev & Saarse, 2013). Viirsavide kujunemine lõppes jääpaisjärve katastroofilise veetaseme alanemisega u 11 700 kal a t, mis on tuntud väljavoolu asukoha tõttu ka kui Billingeni sündmus. Mereliste liivade ja aleuriitide settimine leidis aset arvatavasti Holotseeni nooremas osas.



Joonis 1. A – Uuringuala asukoht Pärnu lahe päras. B – seismo-akustiliste profiilide, sondeerimiskohtade ja läbilõigete paiknemine ning käesolevas töös kaardistatud Pärnu jõe sängi kulgemine lahe põhjas. D-D' Nirgi *et al.*, 2020.

Pärnu on üks kõige aeglasema maatõusuga rannikualasid Eestis ning seetõttu on sellest piirkonnast seni teada ka kõige madalamad Holotseeni merevee tasemed (Nirgi *et al.*, 2020). Tänapäevase pärastjääaegse maatõusu kiirus on Pärnu lahes u 1,6 mm/a (Vestøl *et al.*, 2019). Pärnu piirkonna veetaseme muutuste rekonstruktsiooni kohaselt on merevee tase olnud tänapäevasest nii madalamal kui ka kõrgemal (Joonis 2). Joldiamerega on seotud madalseis, kus veetase oli vähemalt 5,5 m tänasest tasemest madalamal (Nirgi *et al.*, 2020). Sellele järgnenud Antsülusjärve transgressioon algas u 10 700 kal a t ja jõudis oma maksimumini u 10 200 kal a t. Veetase tõusis Pärnu alal vähemalt 17,5 m keskmise kiirusega 35 mm/a (Nirgi *et al.*, 2020). Sarnast väga kiiret järve veetaseme tõusu on kirjeldatud ka Hanö lahe uppunud metsade dendrokronoloogiliste andmete alusel (Hansson, 2018). Transgressiooni käigus tõusis veetase Pärnu piirkonnas kõrguseni ligi 13 m ü.m.p. ujutades üle ka Pulli mesoliitilise asulakoha kultuurikihi (Rosentau *et al.*, 2011). Liustiku sulavete poolt toidetud Antsülusjärv leidis Taani väinade piirkonnas endale uue väljapääsu maailmamerre ning järve veetaseme tõus pidurdus ning hakkas seejärel järk-järgult alanema. Selle tulemusena asendus ligi 10 200 kal a t Pärnu piirkonnas transgressioon regressiooniga. Veetase langes absoluutkõrgusele u -4 m ja püsis sellel tasemel vahemikus 9000 – 8400 kal a t (Nirgi *et al.*, 2020). Sellel perioodil toimusid Taani väinade kohalt ka episoodilised soolase vee sissevoolud Läänemere nõkku, kuigi valdavalt oli tegemist magedaveelise basseiniga, mida tuntakse Varajase Litoriinamerena. Alles ligi 8500 – 8400 kal a t põhjustas ookeanivee sissevool basseini vee soolsuse märkimisväärse tõusu. Kuna maailmamere veetase tõusis tollal kiiresti, hakkas Läänemere veetase aeglasema maatõusuga piirkondades tõusma, mida tuntakse Litoriinamere transgressioonina ja mis saavutas oma maksimumi u 7300 kal a t (Nirgi *et al.*, 2020). Pärnu piirkonnas ujutas Litoriinamere transgressioon üle mesoliitilised Sindi-Lodja I ja II asulakohad.

Uuringualal hakkas maatõus globaalse meretaseme tõusu üle domineerima u 7300 kal a t, mille tõttu suhteline veetaseme tõus piirkonnas peatus ja hakkas seejärel aeglaselt alanema (Rosentau *et al.*, 2011).



Joonis 2. Pärnu piirkonna suhtelise veetaseme muutuste kõver (Nirgi *et al.*, 2020). Joonisel on toodud välja Läänemere arenguetapid (Andrén *et al.*, 2011) ja arheoloogilised perioodid (Hang *et al.*, 2020). Näidatud on ka tekstis käsitletud olulisemate esiajalooliste asulakohtade paiknemine.

Pärnu jõe kallastelt on leitud hulgaliselt kiviaegseid arheoloogilisi leide ning mitmeid vanu asulakohti. Pulli asulakoht Pärnu jõe kaldal on teadaolevalt vanim asulakoht Eestis, mis on dateeritud 11 300 – 10 200 kal a t ja mille kultuurkiht on kaetud Antsülusjärve liivadega (Veski *et al.*, 2005). Sindi-Lodja I ja II on vanuselt järgmised avastatud asulakohad Pärnu jõe kaldal, mis on dateeritud 9200 – 8800 kal a t ja mille kultuurkihid on kaetud Litorinamere liivadega. Pärnu jõe kaldalt Raekülas nn Pauka käärust on leitud ka mitmeid samast perioodist pärinevaid mesoliitilisi juhuleide (Nirgi *et al.*, 2020). Litorinamere regressiooniperioodist on piirkonnast teada veel teisigi kiviaegseid asulakohti, sh Sindi-Lodja III, Lemmetsa, Malda, mille vanused jäävad vahemikku u 6000 – 4500 kal a t ja mis paiknesid koos taanduva rannajoonega järkjärgult ümber madalamatele absoluutkõrgustele (Kriiska & Lõugas, 2009).

2. Materjal ja meetodika

2.1. Seismo-akustiline pidevsondeerimine

Seismo-akustilist pidevsondeerimist teostati Eesti Geoloogiateenistuse ja Tartu Ülikooli koostöös Pärnu lähel aastatel 2017, 2018 ja 2020. Kolmel aastal tehti kokku 96 km profiile eesmärgiga „jälitada” eeldatavat Pärnu jõe vana süngi.

Merepõhja vertikaalseks profileerimiseks kasutati madalsageduslikku Boomer-, keskmisageduslikku Chirp- ja kõrgsageduslikku Pinger-tüüpi setteprofilaatoreid. Kasutatud Boomer-tüüpi profilaatori saatjaks oli aastatel 2017 ja 2018 madalpingel töötav C-Boomer katamaraan ja vastuvõtjaks sama tootja hüdrofon C-Phone. 2020 aastal kasutati SIG France kõrgepingel töötavat saatjat Pulse S1 ja vastuvõtjatena hüdrofoni C-Phone ja SIG16. Saatjate impulsi lainepikkus oli sagedusvahemikus 0,4 kuni 4 kHz. Boomer-tüüpi saatjat ja vastuvõtjat pakseeriti 20 m kaugusel paadist, et vähendada paadi tekitatavat müra. Chirp-tüüpi profilaatorina kasutati seadet Neptune Sonar Limited Model T33, mille saatja muudetav sagedusvahemik oli 3 kuni 9 kHz. Seade paiknes uurimisaadi poordis 1 m allpool merepinda. Pinger tüüpi seadmeks oli Echotrac CV100, mille kasutatud sagedus oli 24 kHz. Seade asetseis paadi ahtrist 1 m tagapool ja väljaspool kiiluvett, et vähendada paadi tekitatavat müra. Asukoha määramiseks kasutati RTK-GPS GNSS seadet Trimble R8. Täpse asukoha saamiseks kasutati Maa-ameti GNSS püsijaamade võrku ESTPOS. Asukoha määratlemiseks merel tugineta ristkoordinaatide süsteemile L-EST97. Uuringuid teostati EGT uurimispaadiga VLP-398.

Magistritöö autor osales geofüüsikaliste andmete esmatöölusel ja andmete interpreteerimisel. Geofüüsikaliste andmete kogumiseks kasutati Soome firma Meridata tarkvara MDSC (*Meridata Collecting software*) ja kogutud andmete interpreteerimiseks tarkvara MDPS (*Meridata Processing software*). Interpreteerimisel sisestada eelnevalt laine leviku kiirus erinevates settekihtides, mis uuringualal hinnati olevat liivas 1850 m/s, viirsavis 1600 m/s, moreenis 1900 m/s. Profiilide interpreteerimisel olid abiks Eesti (Dr Sten Suuroja) ja Soome (Dr Aarno Kotilainen, Nikolas Sanila) geoloogiateenistuste teadlased.

2.2. Külgvaatesonari ja lehviksonari andmed

Samaaegselt seismo-akustiliste profiilide tegemisega aastatel 2018 ja 2020 kasutati merepõhja lateraalseks uurimiseks külgvaatesonarit. Kasutatud seadmeks oli firma Sonartech

kahesageduslik (400/900 kHz) mudel T 150A. Et saada suurema eraldusvõimega andmestik, kasutati kõrgemat sagedust (900 kHz). Külgvaatesonar annab parema ülevaate merepõhjasetete pindmisest osast ja on abiks vertikaalsel pidevsondeerimisel kogutud andmete interpreteerimisel. Lisaks toob külgvaatesonar välja ebatasasused merepõhjas ja sellega ka võimalikud setete alla mattumata sāngi jäänukid. Kasutatud 900 kHz sagedus võimaldab eristada merepõhjas kuni 0,1 m läbimõõduga objekte.

Lisaks külgvaatesonari andmetele kasutati uuringuala lõunaosas Transpordiameti hüdrograafilise mõõdistamise lehviksonari andmeid. Lehviksonari andmed annavad detailse ülevaate merepõhja reljeefist. Lisaks sügavusandmestikule võimaldab lehviksonari tagasipeegeldunud signaali (ingl *backscatter*) tugevus määrata kaudselt substraadi tüüpi.

2.3. Merepõhja ja rannavööndi setete sondeerimine

Pärnu lahe merepõhjas ja rannikuvööndis sondeeriti setteid kokku 24 asukohas, et selgitada vana Pärnu jõe sāngi setete stratigraafiat ning tõlgendada geofüüsikalise profileerimise tulemusi. Sondeeriti peamiselt käsitsi opereeritava elektrilise vibropuuri, kasutades aknaga ja aknata prooveid. Sõltuvalt sette iseloomust kasutati ka vene tüüpi turbapuuri ning tigupuuri. Raeküla rannas tehtud puuraukude korral kasutati käsitsi opereeritavat mootorpuuri esimese 4 meetri katvate liivade läbimiseks ja seejärel jätkati vibropuuri ja aknaga sondiga, et saada puurimisest rikkumata setete ülevaade. P-06-24 läbilõike puurimisel kasutati tigupuuri, mida opereeris IPT-Projektijuhtimine OÜ puuragregaat GM65 GTT. Tänu puuragregaadi suuremale võimekusele võrreldes käsitsi opereeritavate vibro- ja tigupuuriga õnnestus läbida ka orgu täitvad setted nende kogupaksuses. Sondeerimiskohtade asukohad määrati RTK-GPS GNSS seadmega Trimble R12i, kasutades Maa-ameti GNSS püsijaamade võrku ESTPOS, mis võimaldab asukohta määrata täpsusega 1 – 3 cm horisontaal- ja 1 – 5 cm vertikaalsuunal.

Setete sondeerimise käigus võeti proove setete täpsemaks laboratoorseks uurimiseks. Proove võeti kuumutuskaos ja lõimise analüüsiks ning dateerimiseks. Puurauk P-06-24 valiti täieliku sāngisette läbilõike tõttu välja detailsemaks uurimiseks ja seetõttu võeti antud puursüdamikust proove tihedamalt 5 kuni 20 cm intervalliga. Magistritöö autor osales välitöödel ja proovide kogumisel detailsemalt uuritud Raeküla ranna läbilõikel A-A' ja jäält puuritud geoloogilise ristprofiili C-C' uuringutes. Samuti koostati varasemale geoloogilisele andmestikule toetuv ristprofiil B-B' üle mattunud Pärnu jõe sāngi Pärnu lahes (Joonis 1B).

2.4. Kuumutuskao ja lõimise analüüs

Kogutud proovidest tehti TÜ geoloogia osakonna laboris kuumutuskao ja lõimise analüüsid. Kuumutuskao analüüsi eesmärgiks oli saada teada setete orgaanilise aine sisaldus. Kuumutuskao analüüs tehti kokku 40 proovist puuraugust P-06-24. Proovid kuivatati 24 tunni vältel 105 °C juures ja pandi seejärel 4 tunniks 550 °C juurde, et eemaldada proovist orgaanika (Heiri *et al.*, 2001). Proovid kaaluti pärast mõlemat kuumutamist.

Lõimiseanalüüs tehti samadele proovidele, millest oli eelnevalt eemaldatud orgaanika. Lõimise määramiseks kasutati kombineeritult sõelanalüüsi jämedama fraktsiooni (terasuurus >500 µm) ja laserdifraktomeetrit Mastersizer 3000 HydroEV peenosise (terasuurus <500 µm) leidmiseks. Sõelanalüüsil kasutati 8, 4, 2, 1 ja 0,5 mm silmaga sõelasid. Alla 0,5 mm terajämedusega materjali analüüsiks kasutati laserdifraktomeetrit, mis mõõdab erinevate fraktsioonide jaotust proovis (antud töös 250, 125, 63, 32, 16, 8, 4, 2, 1 ja 0,1 µm fraktsioonid). Terasuuruse statistikute leidmiseks kasutati programmi Gradistat, mis töötab Microsoft Exceli baasil (Blott & Pye, 2001), millega leiti terasuuruse jaotus, keskmine terasuurus, sorteeritus ja asümmeetria.

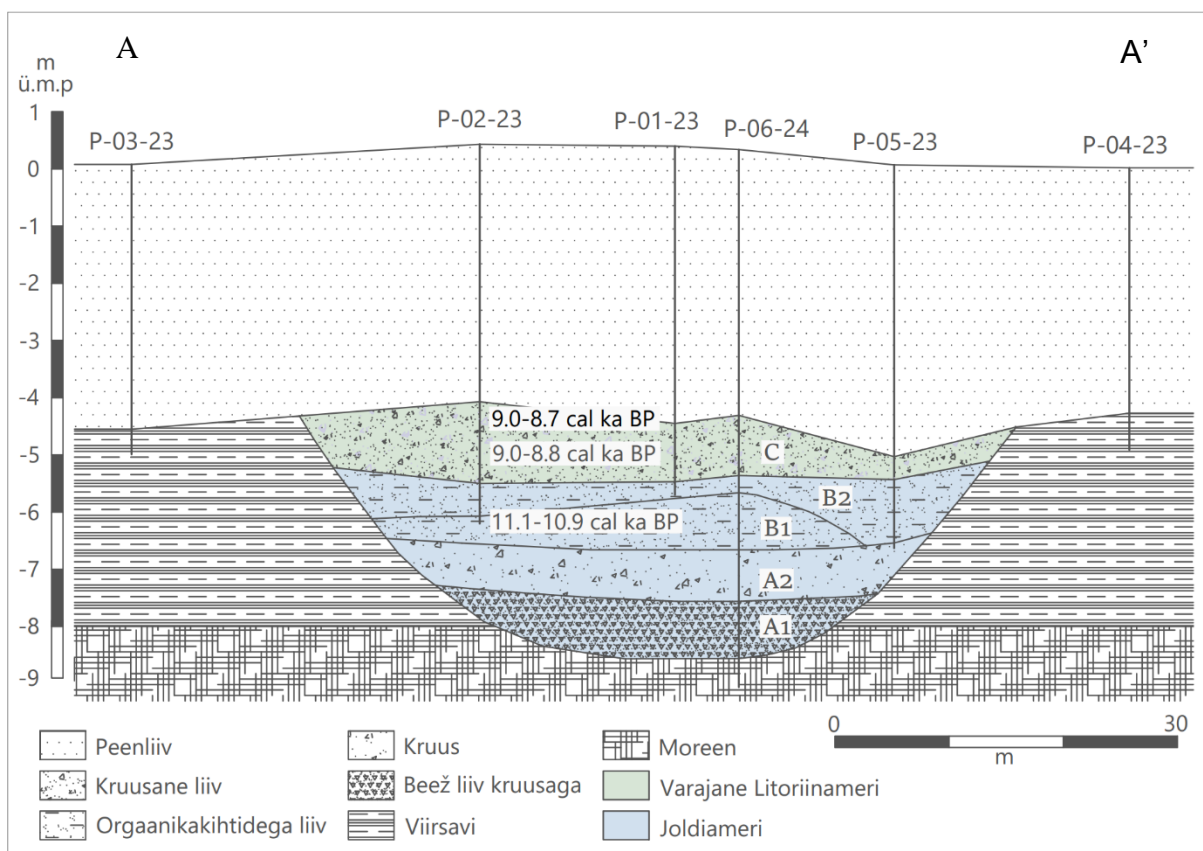
2.5. Setete vanuse määramine

Setete vanuse määramiseks radiosüsiniku meetodiga otsiti proovidest puidutükke ja maismaataimede seemneid. Kuigi seemneid leiti mitmest proovist, oli nende kogus dateerimiseks liiga väike ja seetõttu tehti dateeringud neljast erinevast puidutükist, mis kaalusid usaldusväärse proovi jaoks piisavalt. Neli vanusemäärangut tehti AMS laboratooriumis Vilnius Radiocarbon, kus kasutati analüüsimiseks madala energiaga kiirendit (LEA, Ionplus AG, Zürich) ja automatiseeritud grafitiseerimise seadet AGE-3 (Ionplus AG, Zürich). Vanused kalibreeriti kalibreerimiskõvera IntCal20 (Reimer *et al.*, 2020) suhtes, tõenäosusega 68,3 %.

3. Tulemused

3.1. Pärnu vana jõesängi setted Raeküla rannas

Pärnu jõe mattunud säng paikneb tänasest jõesuudmest ligi 5,3 km kaugusel kagu suunas, ristudes rannajoonega Raeküla ranna alal (Joonis 1B). Vana jõeoru laius on Raeküla rannas ligi 60 m ja sängi täitvad setted on seal säilinud kuni 4 m mattunud settekompleksina, millel lasub kuni 4,5 m paksune mereliivade kiht (Joonis 3). Raeküla ranna läbilõikes A-A' on Pärnu jõe vana säng lõikunud läbi viirsavide moreeni pinnani, kus sängi põhi paikneb absoluutkõrgusel -8,4 m.



Joonis 3. Loode-kagu suunaline geoloogiline läbilõige A-A' üle mattunud jõe sängi Raeküla rannas (asukoht Joonisel 1) koos tekstis kasutatud settekihtide indeksite ja ^{14}C AMS dateeringutega puursüdamikust P-02-23.

3.1.1. Setete stratigraafia ja vanus

Jõeoru settekompleks Raeküla rannas läbiti tehniliste võimekuste tõttu ainult puuraugus P-06-24 ja see jaguneb viieks settekompleksiks A1 – C (Joonis 3). Orgu täitva settekompleksi

alumise osa moodustab 1 m paksune beež peeneteralise kruusa ja jämeteralise aleuriidi sisaldusega peenliiv (kiht A1) (Lisa 1- fotod). Kihi siseselt suureneb kruusa sisaldus ülespoole. Kihil A1 lasub hall eriteraline orgaanikavaene kruus (kiht A2). Kiht läbiti puuraugus P-06-24 ja avati puuraugus P-05-23. Säangi loodepoolses osas puuraukudes P-02-23 ja P-06-24 lasub eriteralisel kruusal kuni 1 m paksune hästi kuni keskmiselt lagunenenud tumepruuni turba kiht, milles esinevad kruusa ja liiva vahekihid (kiht B1; Lisa 1 – foto). Kihi B1 alumises osas on vahekihid liivased ja ülemises osas kruusasisaldus vahekihtides suureneb. Kihi alumises 25 cm on turvas võrreldes ülemise osaga tumedam. Kihist B1 leitud puidutükk (P0-2-3) on dateeritud vanusega 11 100 – 10 800 kal a t (Tabel 1). Säangi kagupoolses osas puuraugus P-05-23 lasub kihi A2 peal õhukeste orgaanikarikaste vahekihtidega helebeež vilgu sisaldusega peenliiv (kiht B2) paksusega kuni 1,1 m. Kiht jätkub väiksemas paksuses (kuni 26 cm) ka turbakihi (kiht B1) peal. Peenliival lasub 0,4 kuni 1,17 m paksune hallikasbeež kruusakas keskmise- kuni jämeteraline liiv (kiht C). Kiht sisaldab kohati kuni 3 cm suuruseid veeriseid, orgaanika vahekihte ja lamelle ning kihis on ka üks läbiv kuni 5 cm paksune turba vahekiht. Kihi C alumisest osast leitud puidutükk (P0-2-2) on dateeritud vanusega 9000 – 8800 kal a t ning ülemisest osast leitud puidutüki (P0-2-1) vanuseks saadi 9000 – 8700 kal a t (Tabel 1; joonis 3). Viirsavi ja jõesetete kompleksi katab helebeež üksikute õhukeste orgaanika lamellidega peenliiv (Lisa 1 – fotod).

Tabel 1. Radiosüsiniku dateeringud Pärnu vana jõesäangi setetest. Vanused kalibreeriti kalibreerimiskõvera IntCal20 (Reimer *et al.* 2020) suhtes, tõenäosusega 68,3 %. *Varem publitseeritud Nirgi *et al.*, 2020.

Proov	Sügavus, m	C-14 vanus	Kalibreeritud	
			vanus, a t	Labori indeks
P6-1-1	6,85	9640 ± 40	11 173 – 10 826	FTMC-PX38-1
P0-2-1	4,35	7943 ± 35	8 977 – 8 650	FTMC-PX38-2
P0-2-2	4,93	8007 ± 35	8 998 – 8 780	FTMC-PX38-3
P0-2-3	6,09	9571 ± 42	11 075 – 10 770	FTMC-PX38-4
5K*	4,94	8070 ± 40	9 120 – 8 780	Beta-492458

3.1.2. Setete lõimis ja orgaanilise aine sisaldus

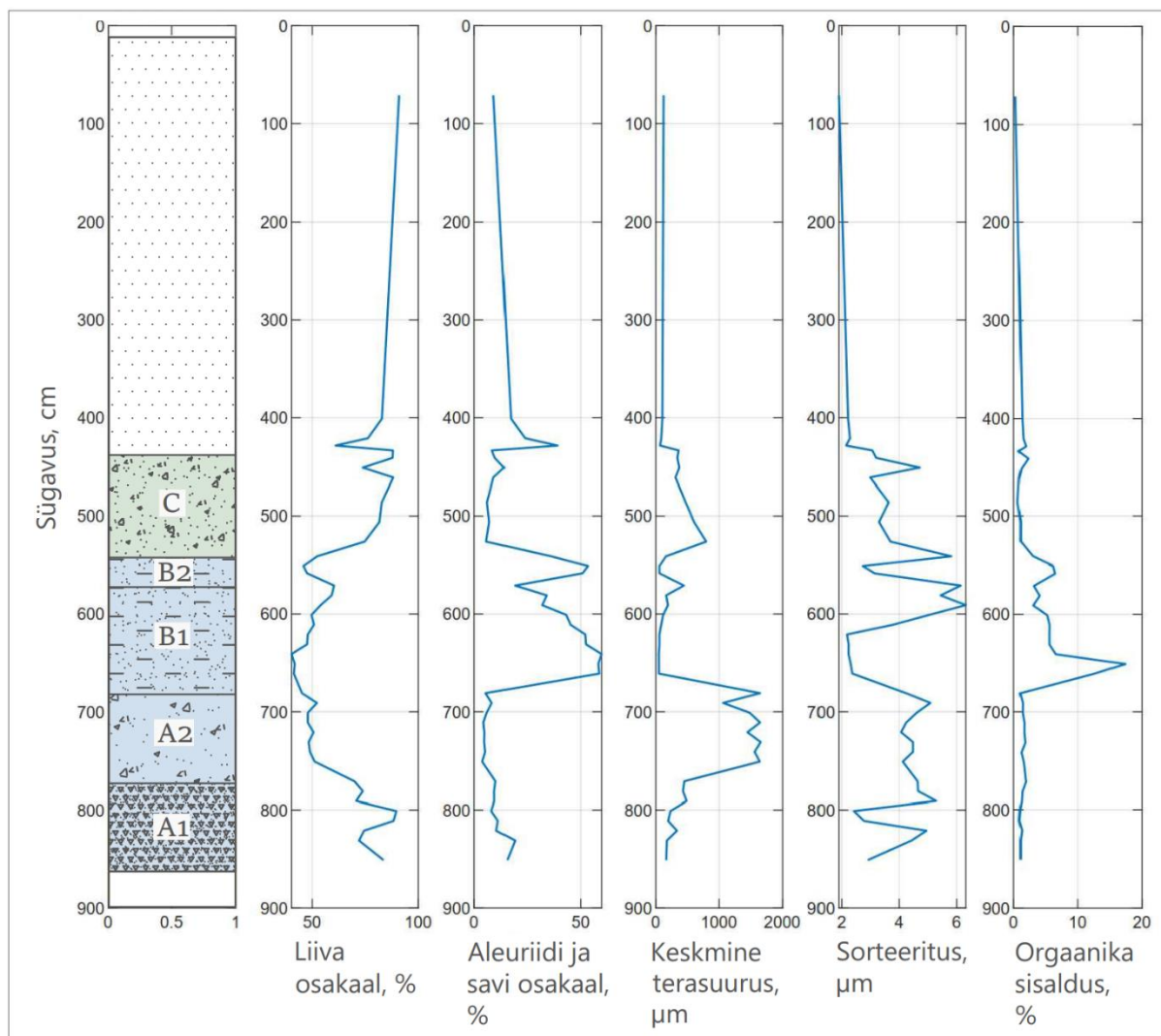
Raeküla rannas tehtud läbilõikes A-A' uuriti detailsemalt puursüdamiku P-06-24 setete lõimist ja orgaanilise aine sisaldust, mille tulemused on esitatud joonisel 4. Mattunud jõesetted (kihid A1 – C) esinevad uuritud puuraugus absoluutkõrgustel -4,31 m kuni -8,56 m.

Tulemused näitavad, et vana jõesängi põhja moodustava kihi A1 peenliiv on halvasti kuni väga halvasti sorteeritud, sisaldades nii peeneteralise kruusa kui ka jämeteralise aleuriidi fraktsioone (Joonis 4; Lisa 1 – fotod). Sorteeritus settes varieerub küllaltki palju, jäädes vahemikku 2,4 – 5,3 μm . Kihi keskmised terasuurused jäävad vahemikku 167 – 486 μm ja tera suurus suureneb ülespoole. Liiva orgaanikasisaldus on alla 2 % (Joonis 4).

Kihi A2 peenkruus on samuti väga halvasti sorteeritud, sisaldades alumises osas liiva fraktsiooni, kihi ülemises osas kohati ka jamealeuriiti. Kruusa sorteeritus jääb vahemikku 4,1 – 5,1 μm , keskmine terasuurus vahemikku 1446 – 1655 μm ja orgaanikasisaldus alla 2 %.

Kihi B1 näol on tegemist kihilise settega, kus liiva ja aleuriidi kihid vahelduvad turbaste vahekihtidega. Kihi alumises osas on mineraalsed vahekihid esindatud ülijämeteralise aleuriidi ja peenliiva ning ülemises osas kruusasisaldusega peenliiva kuni ülijämeteralise liivaga. Kihi B1 setete keskmine terasuurus väheneb sügavuse suunas, olles vahemikus 50 – 444 μm . Sorteeritus kihis on kehv kuni väga kehv (2,2 – 6,3 μm) ja paraneb sügavuse suunas. Orgaanikasisaldus kihis on vahemikus 3,0 – 17,4 % ja suuremad väärtused on sügavamas osas.

Kihi B2 ülijämeteraline aleuriit kuni ülipeenliiv on peenkruusa sisaldusega. Kihi keskmine terasuurus on väiksem sügavamas osas ja jääb vahemikku 58 – 162 μm , orgaanika sisaldus on 3,0 – 6,4 % ja suureneb sügavuse suunas. Sete on halvasti kuni väga halvasti sorteeritud (2,7 – 5,8 μm) ja halvemini on sorteeritud kihi ülemine osa. Kihil D lasub valdavalt halvasti, ühes proovis väga halvasti sorteeritud (3,0 – 4,7 μm) peenkruusa ja kohati jamealeuriidi sisaldusega kesk- kuni jämeliiv (kiht E) paksusega 1,05 m. Kihi orgaanikasisaldus on alla 3 % ja keskmine terasuurus on vahemikus 311 – 797 μm . Suurem keskmine terasuurus on kihi alumises osas. Vana orgu täitvaid setteid (kihid A1 – E) katavad ülipeen- kuni peenliivad ja kihi allosas on need liivad aleuriidi lisandiga. Katteliivad on keskmiselt kuni halvasti sorteeritud (1,9 – 2,3 μm) ja sorteeritus on kehvem kihi allosas. Keskmine terasuurus jääb vahemikku 69 – 124 μm ja väheneb sügavuse suunas. Orgaanikasisaldus on suurem kihi allosas ning jääb alla 2 %.

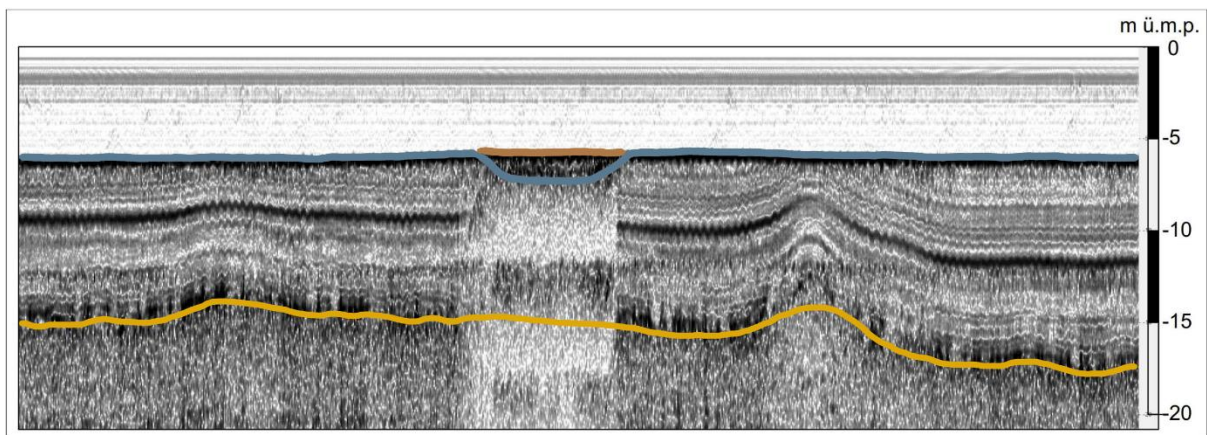


Joonis 4. Setete stratigraafia puuraugus P-06-24. Graafikul on esitatud setete keskmine terasuurus, sorteeritus, orgaanikasisaldus ning liiva ja peenosise (aleuriidi ja savifraktsioon) osakaal.

3.2. Pärnu vana jõesängi setted ja levik Pärnu lahe põhjas

Pärnu lahe põhjas on vana jõeorg puurimisega tuvastatud geoloogilistel läbilõigetel B-B' ja C-C', mis paiknevad vastavalt u 1,9 km ja 5,0 km kaugusel rannajoonest (Joonis 1B). Samuti on vana jõeorg jälgitav kokku 78 seismo-akustilisel profiilil ja üksikutes puuraukudes läbilõigete A-A' ja B-B' vahelisel alal (Joonis 1B). Pärnu jõe vana org on seismo-akustilistelt profiilidelt jälgitav kuni u 10,8 km kaugusele praegusest rannajoonest ja merepõhja sügavuseni 7,8 m (Joonis 1B). Chirp-tüüpi setteprofiilaatoriga saadud profiilidel on vana org nähtav alana, kus on tugev tagasipeegeldus ja signaali vertikaalne levik pärssitud, mis võib olla tekitatud nii

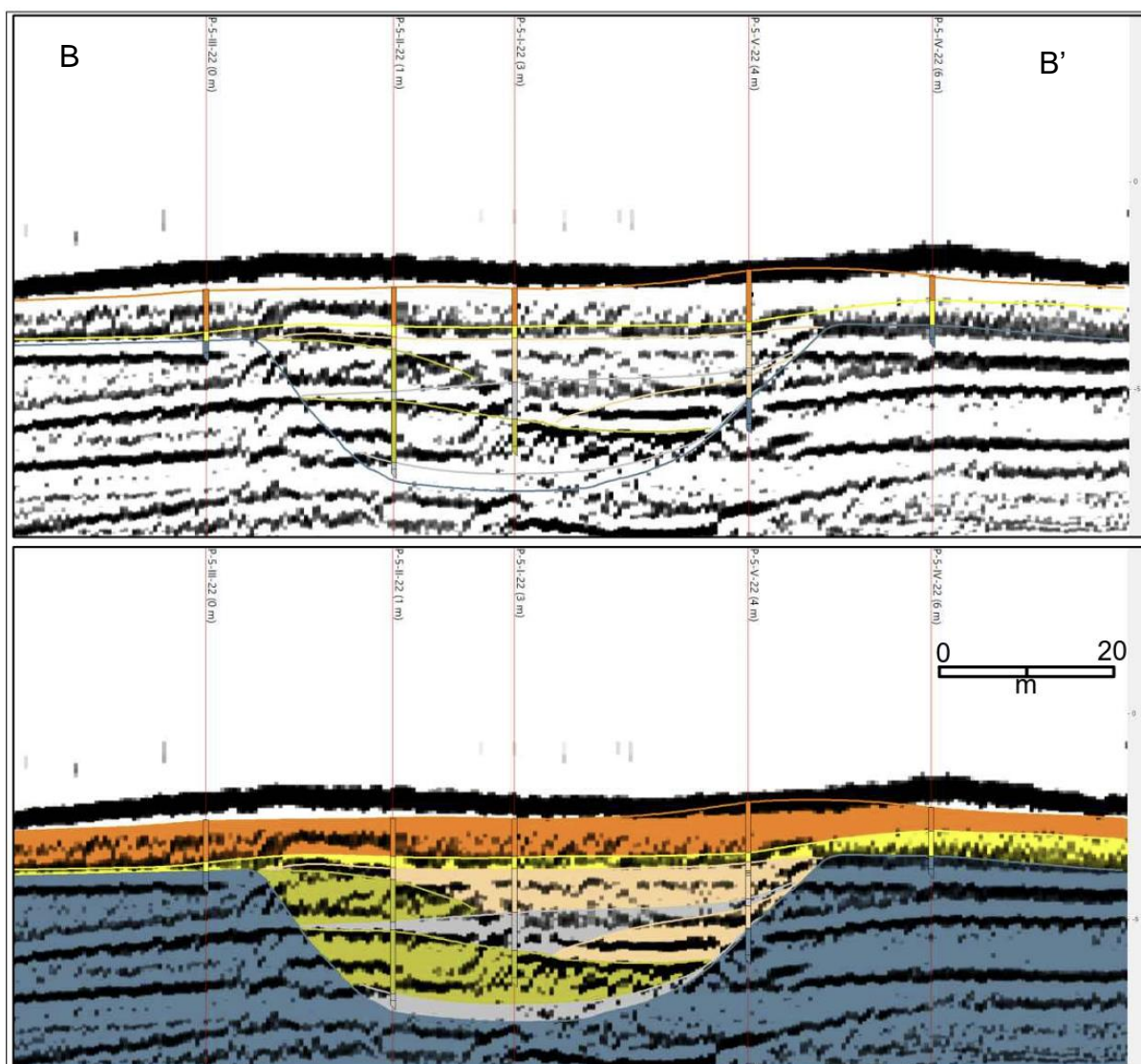
orgaanikat sisaldavatest kihtidest kui ka suure gradiendiga vahelduvatest erineva terajämedusega settekihtidest (Joonis 5). Sängi pikkus lahe põhjas on 12 km ja laius esimesed 3,5 km on valdavalt 60 – 80 m, järgmised 7 km 40 – 60 m ja viimased 1,5 km 20 – 40 m. Pärnu lahe madalamas osas on jõesängi setted mattunud nooremate mereliste liivade alla, avanedes sügavamal osas vahetult merepõhjas (Joonis 1B). Moreen asub vana sängi suudmealal absoluutkõrgusel -25 m ja kalda lähedases osas ulatub moreeni pind kohati kuni -8 m.



Joonis 5. Näide Chirp-profiilist üle jõeoru u 5,7 km kaugusel rannajoonest. Sinisega on näidatud viirsavi, oranžiga moreen ja pruuniga jõeorg.

3.2.1. Mattunud oru levik ja setted Pärnu lahe madalamas osas

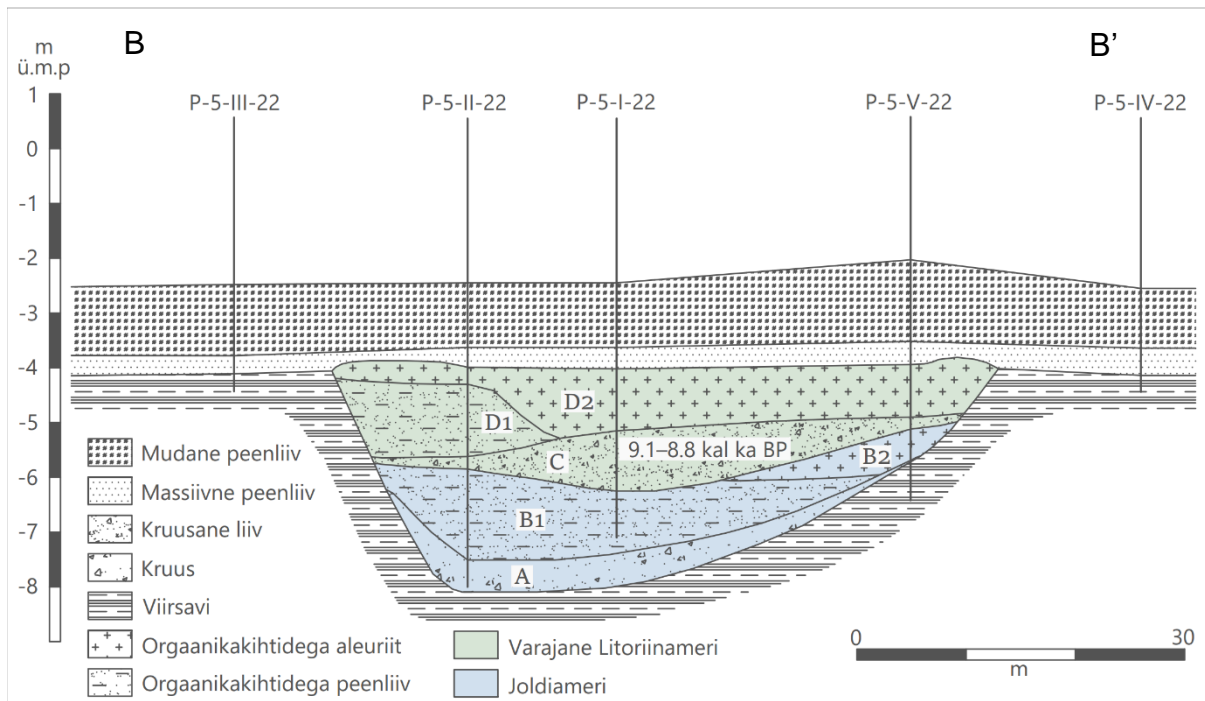
Boomeri profiililt tuleb välja sängis asetsevate liivade (kihid B ja E) pealispind, mis ühtib puuraukude infoga (Joonis 6). Sängi pervedel on Boomeri-profiilidel näha oru setetest paiguti kõrgemale ulatuvad hüperboolid, mis võivad viidata läbilõikega C-C' analoogsetele mattunud turbapangastele (Joonis 10), mis on ilmselt ülejäänud setetest erosioonile vastupidavamad. Sängi põhi ei ole seismo-akustilistelt profiilidelt nähtav ja selle ligikaudne absoluutkõrgus jääb sondeerimisandmete põhjal arvatavasti kõrgusvahemikku -8 kuni -9 m ü.m.p.



Joonis 6. Boomer-tüüpi põhjasetete setteprofiilaatoriga läbilõige B-B' koos puuraukude paiknemise (a) ja interpretatsiooniga (b). Sinine tähistab viirsavi, hall kruusa, roheline orgaanika kihtidega peenliiva, beež orgaanika kihtidega aleuriiti, kollane massiivset peenliiva ja oranž mudast peenliiva (asukoht Joonisel 1B).

Läbilõikes B-B' on säng lõikunud vähemalt 3 – 4 m ulatuselt viirsavisse (Joonis 7). Sängi põhi koosneb liivakast eriteralisest kruusast, mis oma koostise ja värvuse poolest võiks korreleeruda kihiga B läbilõikes A-A' (Joonis 3). Sondeerimisega kihti täielikult läbida ei õnnestunud, kuid selle paksus sängi põhjas on vähemalt 0,5 m. Kihi B peal lasub orgaanika vahekihtidega kihiline peenliiv (kiht B) paksusega kuni 1,7 m. Sängi kagupoolses puuraugus P-5-IV-22 on kruusa peal 0,6 m paksune hall turba vahekihtidega aleuriit (kiht B). Aleuriidi ja peenliivade peal lasub orgaanika vahekihtidega hästi sorteeritud kruus (kiht C), mille paksus sängi keskosas

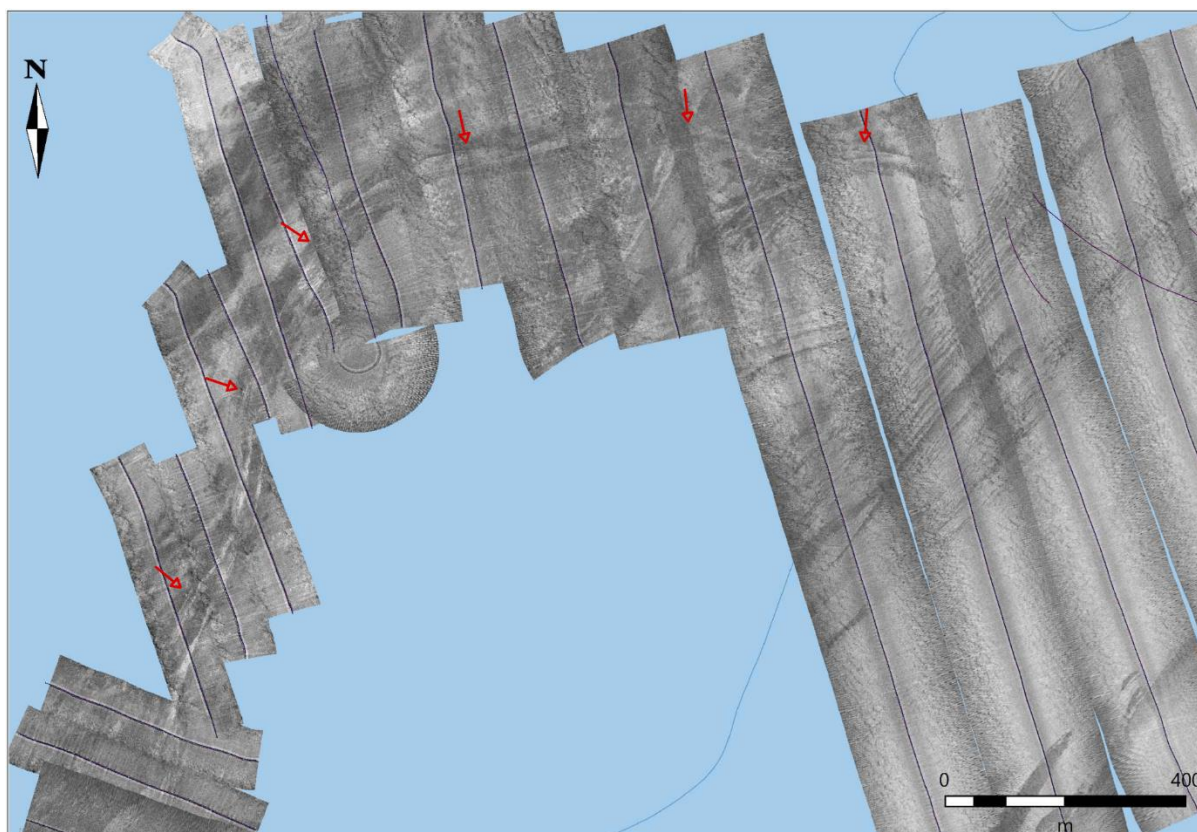
on 1,1 m ning sängi servades 0,2 m. Puuraugust P-5-I-22 (kiht C) varasemalt dateeritud puidutükk on vanusega 9100–8800 kal. a t (Tabel 1). Kruusakihil lasub sängi kirdepoolses osas puuraugus P-5-II-22 peeneteraline orgaanika vahekihtidega liiv (kiht D1) paksusega 1,3 m. Sängi keskel ja kagupoolses osas on kruusakihi peal 1,0 kuni 1,1 m paksune orgaanika vahekihtidega aleuriit (kiht G), mis jätkub ka puuraugus P-5-II-22 olevate peenliivade peal, kuigi märgatavalt õhema kihina (paksus 0,3 m). Väljaspool sängi lasub viirsavil massiivne vähese orgaanikasisaldusega helepruun kuni beež peenliiv, mis katab ka sängisetteid. Kihi paksus on ühtlaselt 0,27 – 0,5 m. Peenliival lasub 1,1 – 1,6 m paksune massiivne mustjaspruun karbidetriidi ja hajusa orgaanilise aine sisaldusega peenliiv.



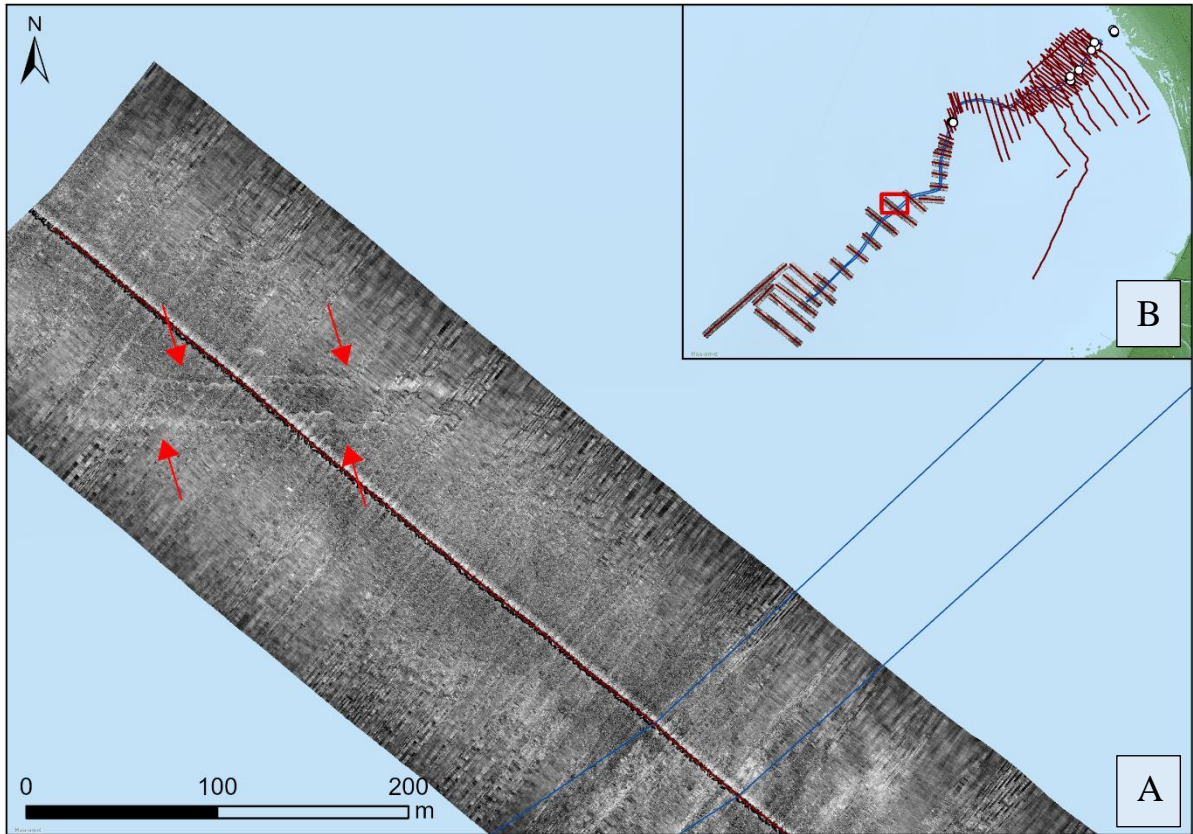
Joonis 7. Loode-kagu suunaline geoloogiline läbilõige B-B' Pärnu lahes üle mattunud sängi u 1.9 km kaugusel tänapäevasest rannajoonest koos 14C dateeringuga (Nirgi *et al.*, 2020). Läbilõike koostamisel on kasutatud sondeerimisandmeid ja Boomer-tüüpi põhjasetete profilaatori andmeid. Veesügavus on u 2.5 m. A – D2 on tekstis kirjeldatud setteintervallid. Asukoht joonisel 1B.

3.2.2. Oru levik ja setted Pärnu lahe sügavamas osas

Vana Pärnu jõe säng Pärnu lahe põhjas on seismo-akustilistel profiilidel jälgitav kuni 10,8 km kaugusele praegusest rannajoonest (Joonis 1B). Erinevalt lahe madalamast osast avanevad sängi setted lahe sügavamas osas lausa merepõhjas alates sügavusest 5,2 m ja u 3,7 km kauguselt rannajoonest. Külgvaatesonari andmetest on jälgitavad vana sängi perved, mis tulevad merepõhja profiilide mosaiikkujutises esile heledate nn varjuvöönditena (Joonis 8), mis ühtivad hästi Boomer ja Chirp-profilaatoritelt nähtava oru motiiviga. Sonari andmetest on paiguti näha nii jõesängi meandreerumist alates u 2,2 kuni 6,6 km kaugusel praegusest rannajoonest (Joonis 1B) kui ka võimalikku sängi hargnemist u 7.6 km kaugusel rannajoonest (joonis 9). Võimalik hargnemine tuleb välja kahe paralleelse ida-lääne suunalise heleda vööndina külgvaatesonari mosaiigist, aga mitte seismo-akustilistelt profiilidelt. Harujõe laius sonarimosaiigi järgi on u 20 m. Aeg-ajalt kaob säng sonarimosaiigis ka seda katvate liivade alla. Oru perved on jälgitavad kokku ligi 8 km pikkusel lõigul.



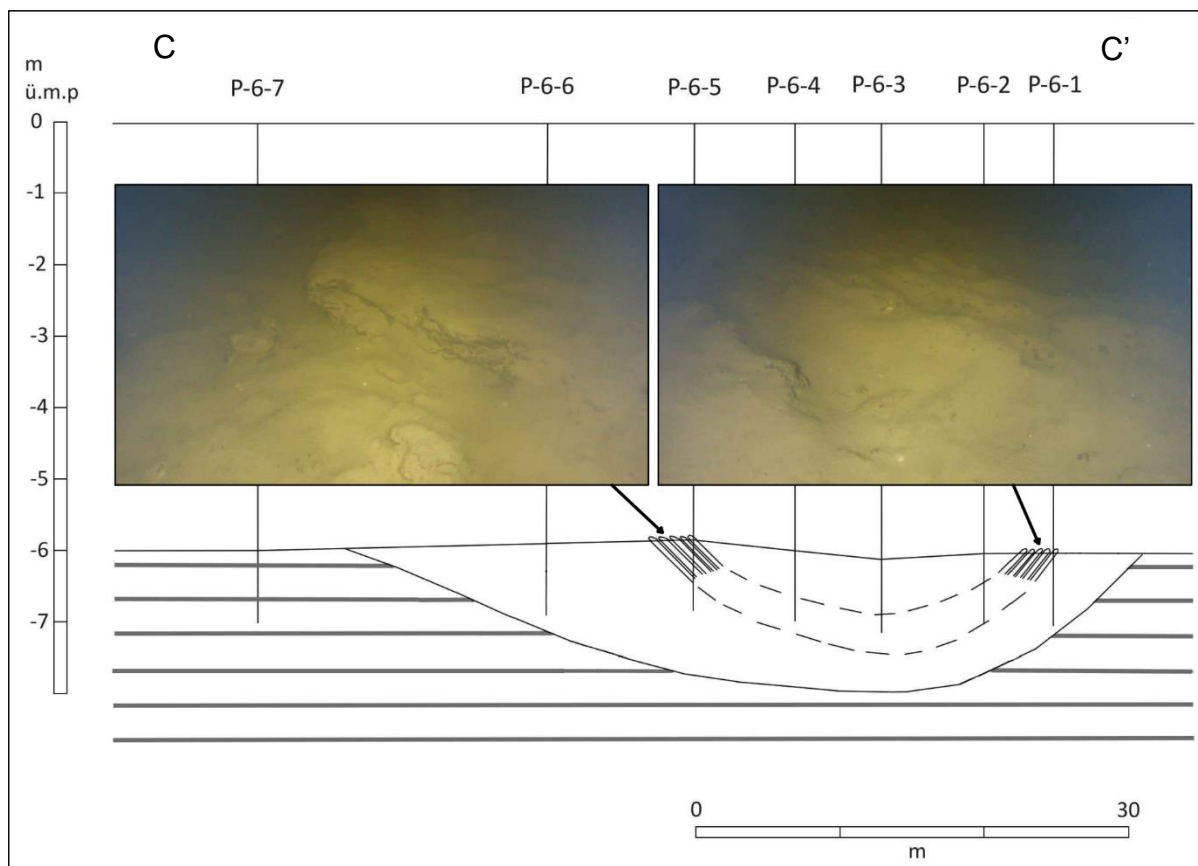
Joonis 8. Külgvaatesonari profiilide mosaiikkujutis. Sängi avanemine merepõhjas on näidatud nooltega.



Joonis 9. Külgvaatesonari mosaiikkujutis, kus on nooltega näidatud võimalikule oru hargnemisele (kaart A) ja selle asukoht (kaart B).

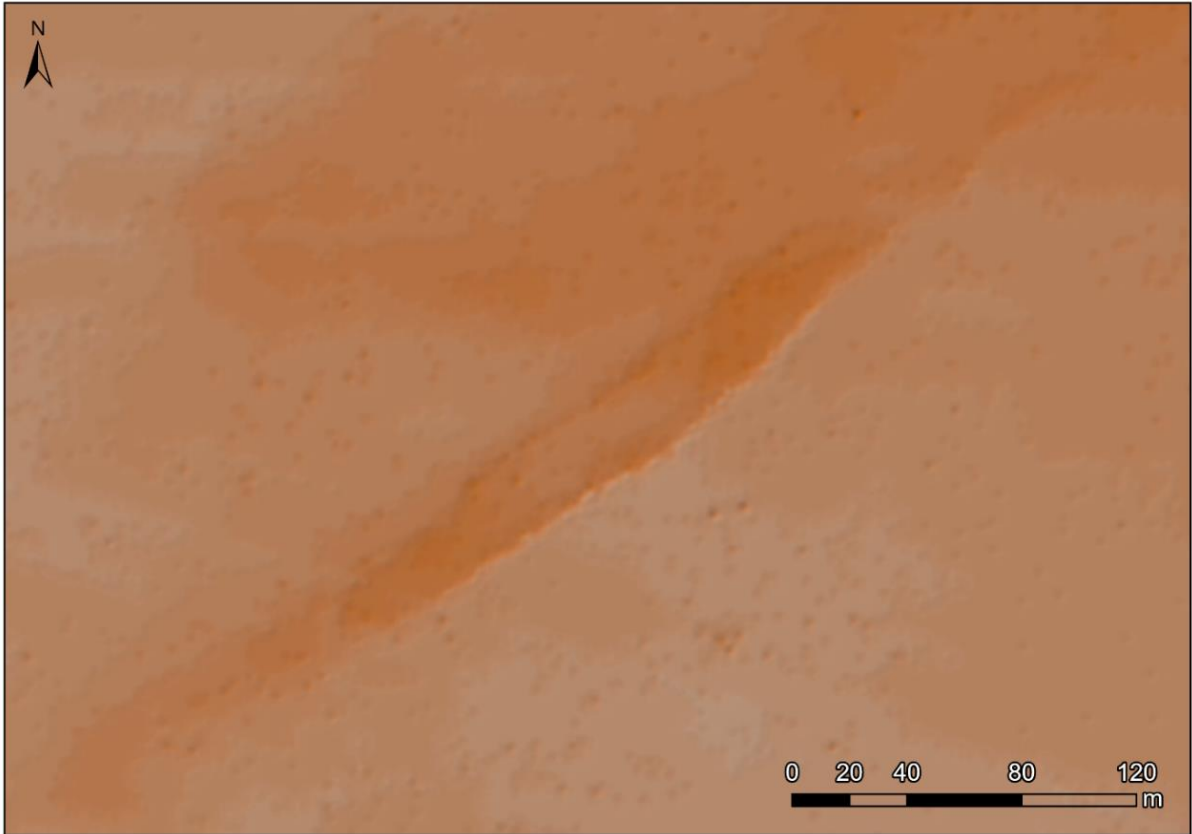
Merepõhjas avanevaid orupervi uuriti detailsemalt setete sondeerimise ja allveedrooniga filmitud videosalvestuste abil ligi 5 km kaugusel tänapäevasest rannajoonest, veesügavuses u 6 m. Org on siin lõikunud viirsavidesse, mis avaneb antud piirkonnas ka merepõhjas. Droonikaadrid ja sondeerimise tulemused näitavad, et merepõhjas avanevad oru keskosa suunas u 30 kraadi kaldu olevad turbakihid. Droonikaadritest on näha vähemalt neli sakilise servaga turbakihti, mis viitavad, et turbakihtide vahelised, nähtavasti liivakamad kihid, on enam erodeeritud (Joonis 10). Sette sondeerimisel samas kohas selgus, et sängisetete ülemise meetri moodustab valdavalt liivakas turvas peenliiva vahekihtidega, ulatudes sängi keskel puuraugus P-6-3 kuni sügavuseni -7,11 m. Kihid on kaldu puuraukudes P-6-2 ja P-6-5, mis asetsevad sonarimosaiigis välja tulnud oru pervedel. Puuraugus P-6-1 algab turvas sügavusel -6,18 ja lõppeb sügavusel -6,63 m, pärast mida on südamikus 10 cm tühimik ja sügavusel -6,73 m kuni -6,95 m on turba vahekihtidega peenliivad. Peenliivadest leitud puidutükk (P-6-1-1) on dateeritud 11 200 – 10 800 kal a t (Tabel 1). Läbilõike lähedal tehtud Chirp-profiilidelt on näha signaali kadu, mis viitab orgaanika jätkumisele ka väljaspool

külgvaatesonari mosaiigist nähtud turbaseid oru pervi. Seda kinnitab ka puuraugus P-6-6 esinenud horisontaalkihiline peenliiva vahekihtidega turvas.

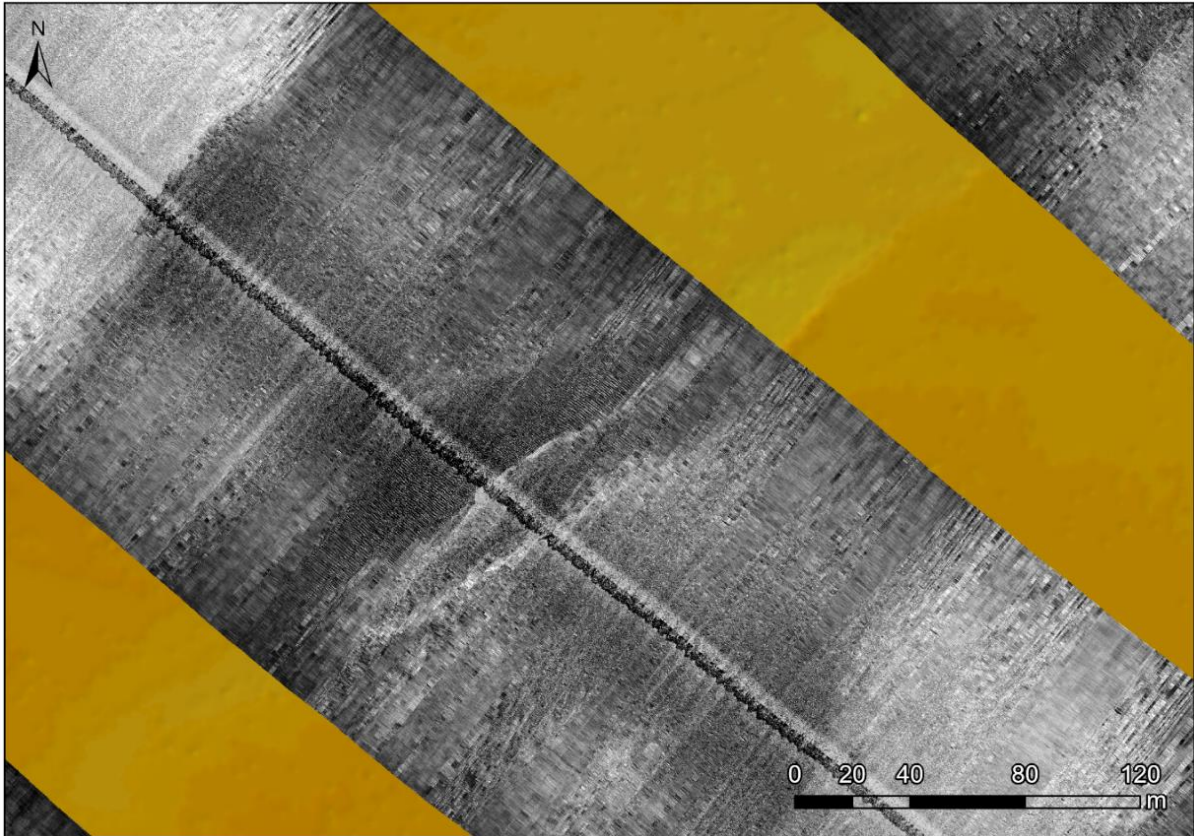


Joonis 10. Oru ristlõike mudel läbilõikes C-C' u 5 km kaugusel tänapäevasest rannajoonest. Mudelis on näidatud viirsavide sisse lõikunud süng koos merepõhjast kõrgemale ulatuvate süngi telje suunas kaldu olevate turbakihtidega. Lisatud on droonifotod (fotod: Maili Roio, Muinsuskaitseamet) merepõhjas näha olevatest turbapangastest, vertikaalsete joontega näidatud sondeerimiskohtade asukoht.

Lehviksonari andmed on olemas uuringuala sügavamast osast, ligikaudu 11 km kaugusel rannajoonest, kus jõesängi perved ulatuvad ligi 40 cm ümbritsevast reljeefist kõrgemale (Joonis 11). Lehviksonari andmed ühtivad külgvaatesonari mosaiikkujutises nähtavate pervedega (Joonis 12). Seismo-akustiliste profiilide ja lehviksonari andmete alusel on Pärnu jõe vana org jälgitav kuni veesügavuseni 7,8 m.



Joonis 11. Sängi suudmeala merepõhja reljeef leviksonari andmete põhjal u 10,5 km kaugusel tänapäevastest rannajoonest. Säng tuleb esile u 40 cm kõrguse positiivse pinnavormina, mille servad on kõrgemal ja keskosa madalamal.



Joonis 12. Merepõhja reljeef leviksonari andmete põhjal (oranžid vööndid) võrdluses külgvaatesonari andmetega vana jõe suudmealalt u 10,5 km kaugusel tänapäevasest rannajoonest. Külgvaatesonari mosaiigist tulevad välja sängi perved valgete vöönditena, mis ühtib reljeefikaardil kõrgema alaga.

4. Arutelu ja järeldused

4.1. Pärnu jõe vana orgu täitvate setete kujunemine ja seosed meretaseme muutustega Holotseenis

Käesoleva uuringu tulemused näitavad, et Pärnu jõe vana org ja seda täitvad setted on merepõhjas säilinud vähemalt 12 km pikkusel lõigul, ulatudes rannajoonest kuni 10,8 km kaugusele ja kuni 7,8 m veesügavuseni. Kahe seni uuritud geoloogilise läbilõike (Joonised 3, 7) setete lõimise ja dateeringute põhjal eristuvad Pärnu lahe madalama osa läbilõigetes kaks settekompleksi. Alumise settekompleksi moodustavad kihid A1 – B, mille vanuseks on kihis B1 dateeritud 11 100 – 10 800 kal a t. Ülemise settekompleksi moodustavad kihid C – D2, mille vanused jäävad kihis C kolme dateeringu alusel vahemikku 9100 – 8700 kal a t.

Alumise settekompleksi alumise osa (kihid A1 ja A2) setete näol on tegemist halvasti sorteeritud liivade ja kruusadega, mis on tõenäoliselt alluviaalse päritoluga sängifaatsiese setted ning mis kujunesid Joldiamere madala veetaseme perioodil ligikaudu 11 tuhat aastat tagasi. Beež peenliiv kruusa ja aleuriidiga kihis A1 moodustab sängisetete basaalse osa. Materjal pärineb tõenäoliselt moreenist, mis on sarnase värvusega ja kuhu säng on sisse lõikunud ning vool on peenosise välja pesnud. Kihil A1 lasuva kihi A2 moodustav liivane ülipeen- kuni peenkruus viitab tugevamale voolule. Kruusakaid setteid katavad horisontaalkihilised setted (kihid B1 ja B2), kus liiva ja aleuriidikihid vahelduvad orgaanika vahekihtidega. Kihist B1 dateeritud puidu vanus on 11 100 – 10 800 kal a t, mis paigutab selle kihi kujunemise samuti Joldiamere madala veetaseme perioodi. Sarnaseid kihitatud setteid on kirjeldatud Pärnu jõe paljanditest Paikuse piirkonnas (Veski *et al.*, 2005) ning nende kujunemist on seostatud Antsülusjärve transgressiooni algusega, kus tõusva veetaseme tingimustes setitati ümber varasemaid orgaanikat sisaldavaid setteid.

Ülemine settekompleks algab samuti halvasti sorteeritud kruusakate keskmise- kuni jämeteraliste liivadega (kiht C; Joonised 3, 4, 7), mis on tõenäoliselt alluviaalse päritoluga sängisetted ja mis kujunesid Varajase Litoriinamere madala veetaseme perioodil vahemikus u 9100 – 8700 kal a t. Kruusakaid setteid katavad uuesti horisontaalkihilised setted (kihid D1 ja D2), kus liiva ja aleuriidikihid vahelduvad orgaanika vahekihtidega. Orgaanikaga kihitatud liivad on väga sarnased kihtidega B1 ja B2 ning nende kujunemist on piirkonnas seostatud Litoriinamere transgressiooniga, mis algas Pärnu piirkonnas u 8 500 kal a t (Nirgi *et al.*, 2020).

Pärnu lahe sügavamas osas esinevad orutäites vaid eespool kirjeldatud varasema perioodi (u 11 000 kal a t) setted, mis on esindatud vähemalt 1 m tuseduse liivaka horisontaalkihilise arvatava lammiturba kihiga ning orgu täitvate ja oru telgjoone suunas kaldu liiva ja orgaanika kihtidega. Kuna setteid sondeeriti antud asukohas ainult ülemisest meetrist, puudub info alumiste setete kohta ning nende stratigraafia ja genees vajab veel täiendavaid uuringuid.

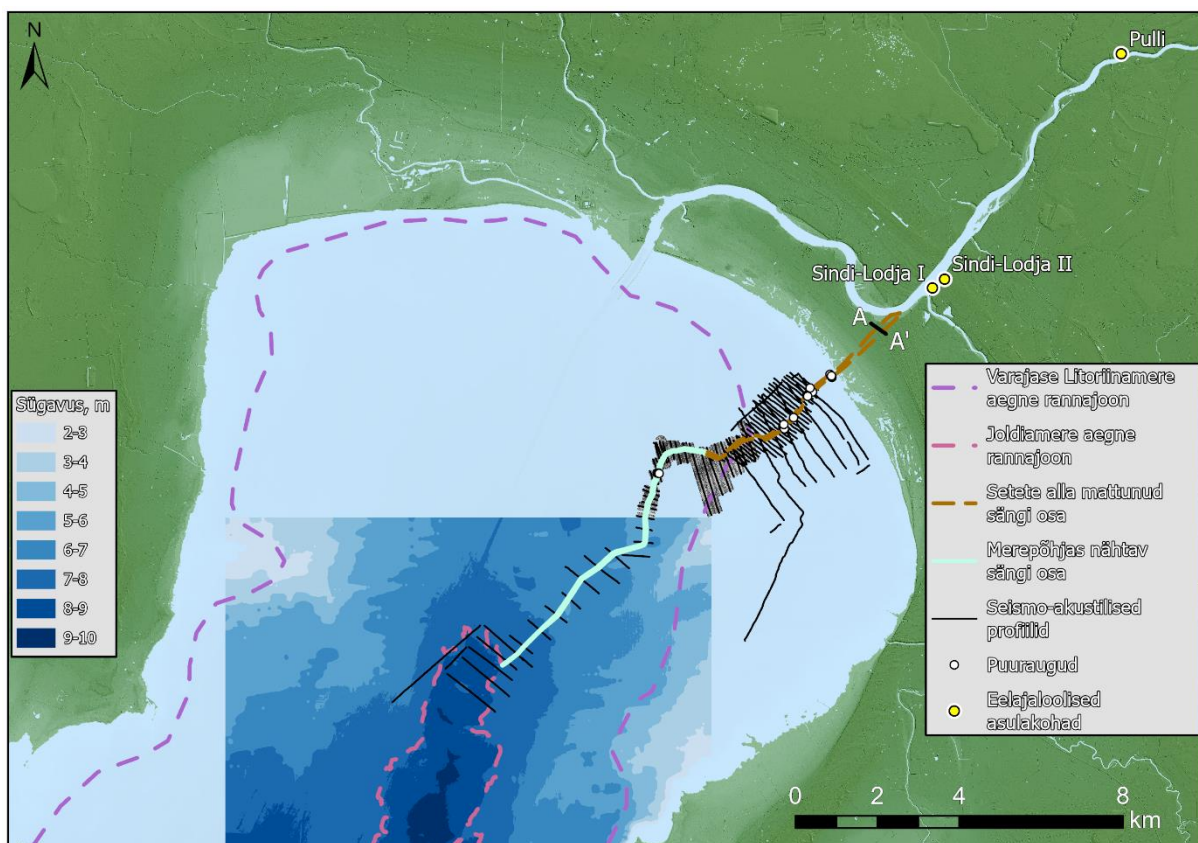
4.2. Holotseeni maastike elementide säilimine Pärnu lahe põhjas ja seosed mesoliitilise asustusega Pärnu piirkonnas

Erinevate Holotseeni maastike elementide, sh jõeoru fragmentide säilimine Pärnu lahe põhjas on huvipakkuv ka esiajaloolise kultuuripärandi seisukohast. Pärnu vana jõeoru setete dateeringud näitavad, et oru kujunemine jääb kahte veetaseme madalseisu perioodi, mis on mõlemad piirkonnas esindatud mesoliitiliste kultuuridega. Joldiamere madalseisu ja Antsülsjärve transgressiooni alguse perioodist on Pärnu jõe paremkaldalt teada Antsülsjärve liivadega kaetud Pulli asulakoha kultuurikiht vanusega 11 100 – 9900 kal a t (Kriiska & Lõugas, 2009). Varajase Litoriinamere perioodist on Pärnu jõe vasakkaldalt teada Litoriinamere liivadega kaetud Sindi-Lodja I ja II asulakoha kultuurikihid vanusega 9200 – 8700 kal a t (Kriiska & Lõugas, 2009).

Seisomo-akustilise profileerimise tulemused ja setete dateeringud näitavad, et Antsülsjärve transgressiooni eelsel perioodil u 11 tuhat aastat tagasi, ulatus Pärnu jõgi vähemalt 10,8 km kaugusele tänasest rannajoonest ning jõe suudmeala paiknes absoluutkõrgusel -7,8 m (Joonis 13). Seega üle 2 m madalamal, kui on näidanud varasemad uuringud (Nirgi *et al.*, 2020). Antsülsjärve transgressiooni eelne ja Pulli asulakoha aegne vana jõesäng avaneb merepõhjas u 8 km lõigul, kus paljanduvad nii turbapangased kui ka lammiturba alad. Uuritud turbapangased on sängi servaaladel kaldu ja keskosas horisontaalsed. Kaldus turbakihid tekitavad merepõhja reljeefis kuni 0,4 m kõrgused positiivsed pinnavormid (Joonis 11) ja on nähtavad alates veesügavusest 5,2 m kuni sängi kulgemise lõpuni sügavusel 7,8 m. Allveedrooniga tehtud fotodelt ja videotest nähtub vähemalt neli sängi keskosa suunas kaldu ja ilmselt õhukese liivakihi eraldatud turbakihti. Sarnaseid sängi keskosa suunas kaldu olevaid turbaseid kihte on leitud mere alla jäänud jõesängi kallastelt ka Hanö lahes (Hansson, 2018). Nilsson *et al.* (2020) on neid kirjeldanud erodeeritud maastikuna, kus on alles jäänud ümbritsevatest setetest vastupidavamad turbakihid. Kaldus turbakihtide pangased tulevad esile Boomer'i profiilidel hüperboolidena sängi servaalal. Sellised hüperboolid on näha ka

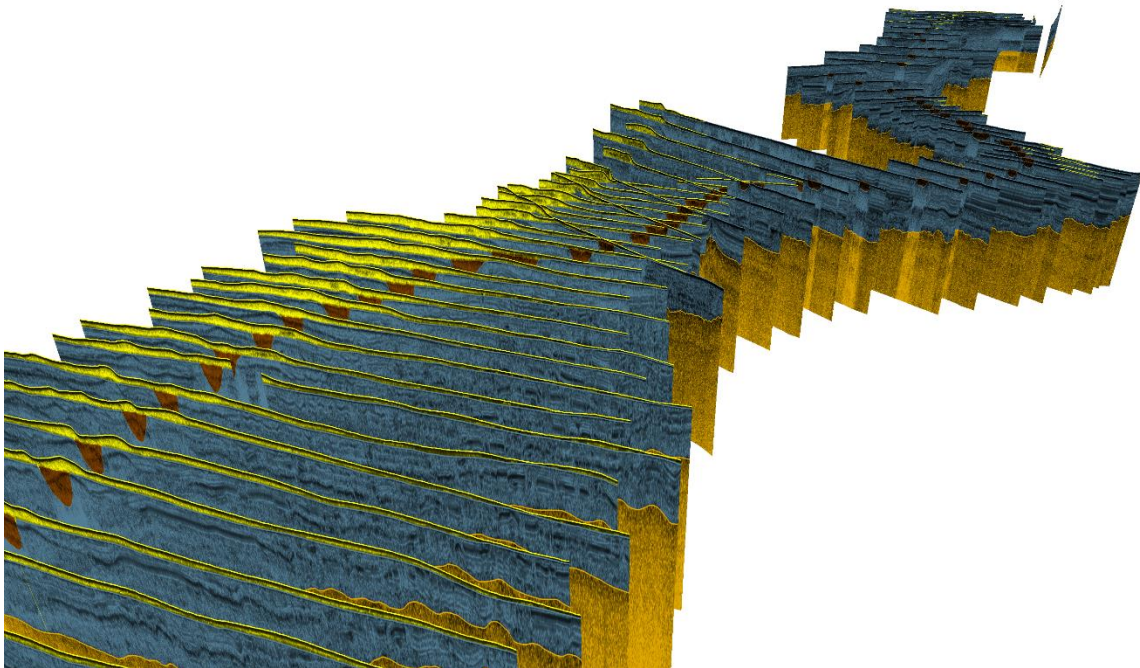
kaldapoolsetel profiilidel, kus sängi ennast merepõhja reljeefist näha pole, mis viitab sarnastele peenliivade alla mattunud turbapangastele ka kaldalähedases osas. Väljaspool sängi pervi on settinud horisontaalsed turbakihid, mis viitavad jõe lammile. Lammisetete olemasolust annab märku ka Chirp-profiilides tugeva tagasipeegeldumisega ja vertikaalsuunal hajuv signaal, mis ulatub kaldus turbakihtidega sängi pervedest väljapoole ja võib viidata orgaanilise materjali sisaldusele setetes.

Seismo-akustilise profileerimise ja setete uuringute tulemused näitavad samuti, et Sindi-Lodja I ja II asulakohtade aegne Pärnu jõe org on täies ulatuses mattunud nooremate mereliivade alla, mis teeb keerulisemaks jõega seotud mere alla jäänud võimalike asulakohtade avastamise (Joonis 13; Bailey & Jöns, 2020). Samas avaneb Pulli asulakoha aegne jõeorg suures osas Pärnu lahe põhjas ja pakub seega paremaid tingimusi arheoloogiliste leidude avastamiseks. Sängi kulgemine Pärnu lahe põhjas on kujutatud joonisel 14, kus on näha nii liiva alla mattunud kui ka merepõhjas avanev osa.



Joonis 13. Joldiamere (ligikaudu 11 000 kal a t) ja Varajase Litorinamere (ligikaudu 9000 kal a t) veetaseme madalseisude aegsed rannajoonte rekonstruktsioonid. Varajase

Litoriinamere rannajoone rekonstruktsioon on Nirgi *et al.* (2020) andmetel. Joldiamere rekonstruktsiooni aluseks on uuritud oru levik sügavuseni 7,8 m ja merepõhja reljeefikaart (Transpordiametamet, 2024) lahe lõunapoolses osas. Eraldi on välja toodud kunagise Pärnu jõe sängi kulgemine katvate setete all ja avanemine merepõhjas.



Joonis 14. 3D mudel Pärnu jõe vana sängi merealusest osast vaatega kaldalt mere poole. Vana säng on märgitud pruuniga, liiv kollasega, viirsavi sinisega ja moreen oranžiga. Jooniselt on näha vana sängi katva liivakihi väljasuidumine lahe keskosa suunas. Mudeli koostamiseks kasutati programmi MDPS.

4.3. Järeldused

- Pärnu lahe põhjas kaardistati Pärnu jõe vana org 12 km pikkusel lõigul, millest madalamas vees 4 km pikkuses osas on säng mattunud nooremate mereliivade alla ja lahe sügavamal osas 8 km pikkusel lõigul avaneb säng merepõhjas.
- Orgu täitvad setted on esindatud kahe eri vanuses settekompleksina, mis kujunesid Läänemere veetaseme madalseisude ajal u 11 000 ja 9000 a t. Mõlemad settekompleksid on esindatud alluviaalsete kruusade ja liivadega ning neid katvate transgressioonide (Antsülusjärve ja Litoriinamere transgressioonid) käigus kuhjunud kihiliste orgaanikarikaste setetega.

- Chirp-tüüpi setteprofiilaatori profiilidel on vana jõesäng ja lammiala nähtav gaasirikka vööndina, kus signaali levik on pärsitud. Boomer-tüüpi setteprofiilaatori profiilidel tulevad välja süngi pervi markeerivad kõrgemad turbapangased ja kohati on näha ka süngi osalist sisestruktuuri.
- Külgvaatesonari mosaiigist ja lehviksonari reljeefikaardilt on süngi näha selle avanemisel merepõhjas. Külgvaatesonari andmetest on jälgitavad vana süngi perved, mis tulevad merepõhja sonarimosaiigis esile heledate varjuvöönditena. Lehviksonari andmetest on süng näha positiivse nõgusa struktuurina, mille servad on ümbritsevast merepõhjast kõrgemal ja keskosa madalamal.
- Merepõhjas avaneb vana jõeorg alates sügavusest 5,2 m ja u 3,7 km kaugusel tänapäevasest rannajoonest. Süng tuleb külgvaatesonari mosaiigis esile heledate vöönditena ja seda tekitavad oru keskosa suunas kaldu olevad turbakihid, mis tulevad merepõhjas välja positiivse pinnavormina.
- Uuringu tulemused lubavad väita, et Antsülusjärve transgressiooni eelne veetase oli Pärnu lahes u 11 000 a t ligikaudu 7,8 m madalam ning rannajoon ligi 10,8 km kaugusel tänapäevasest. Litoriinamere transgressiooni eelne veetase Pärnu lahes u 9000 a t oli tänapäevasest ligi 4 m madalamal.
- Antsülusjärve transgressiooni eelsed ja ligikaudu Pulli mesoliitilise asulakoha aegsed Pärnu jõe oru fragmendid avanevad lahe põhjas vähemalt 8 km pikkusel lõigul, pakkudes uusi võimalusi varase esiajaloolise veealuse kultuuripärandi uuringuteks. Litoriinamere transgressiooni eelsed ja ligikaudu Sindi-Lodja I ja II mesoliitiliste asulakohtade aegsed oru fragmendid on täies ulatuses mattunud nooremate mereliivade alla, mistõttu on selles lõigus veealuse kultuuripärandi otsingud ja uuringud raskendatud.

Kokkuvõte

Pärnu lahe pärastjääaegses arenguloos on teada kaks suuremat veetaseme tõusu perioodi, mis on seotud Antsülusjärve ja Litoriinamere transgressioonidega ligi 11 000 ja 9000 aastat tagasi. Nendele eelnesid madala meretasemega perioodid, kus veetase oli Pärnu piirkonnas tänapäevasesest madalamal, võimaldades maismaaliste maastike kujunemist ka tänase lahe põhjas. Varasemate uuringute põhjal on Pärnu lahe põhjas teada mereliivade alla mattunud Pärnu jõe sängi setted ligikaudu 5 km pikkusel lõigul, setete vanusega u 9000 kal a t (Nirgi *et al.*, 2020). Käesolevas magistritöös uuriti Pärnu jõe vana sängi jätkumist Pärnu lahe põhjas, selle setteid ja nende vanust. Töö eesmärgiks oli setete detailsemate uuringute kaudu välja selgitada orgu täitvate setete stratigraafia, genees ja vanus ning seosed merevee taseme muutustega Holotseenis. Uuringu käigus interpreteeriti kokku 96 km seismo-akustilisi profiile, tehti 24 settesondeerimist Pärnu lahe põhjas ja rannavööndis ning kasutati erinevaid laboratoorseid meetodeid setete kujunemise seletamiseks.

Töö tulemusena selgus, et Pärnu jõe vana säng Pärnu lahe põhjas on seismo-akustilistelt profiilidelt jälitav 12 km pikkuses lõigus, millest 4 km pikkuses osas on säng mattunud katvate liivade alla ja 8 km pikkusel lõigul avanevad orgu täitvad setted merepõhjas. Sängi nähtavas osas on iseloomulik oru servaaladel esile tulevad kaldus turbakihid. Jõe oru setetest on eristatav kaks eri vanuses kompleksi. Vanem osa settis Joldiamere madalseisu ja Antsülusjärve transgressiooni ajal olles ligikaudu samaaegsed Pulli mesoliitilise asulakoha vanusega. Töö käigus leiti, et Joldiamere madalseisu ajal võis tollane rannajoon Pärnu lahes olla u 7,8 m sügavusel kaasaegsest veetasemest. Noorem osa setteid on ladestunud Varajase Litoriinamere madalseisu ja Litoriinamere transgressiooni ajal. Dateeringud sängisetete nooremast osast on sarnase vanusega Sindi-Lodja I ja II mesoliitiliste asulakohtade dateeringutega. Varajase Litoriinamere rannajoon oli sügavusel u 4 m. Sindi-Lodja I ja II asulakoha aegne Varajase Litoriinamere sängi osa on kogu ulatuses kaetud liivadega, mis muudab võimalikud arheoloogilised uuringud tulevikus keeruliseks. Pulli asulakoha aegne Joldiamere sängi osa avaneb merepõhjas peaaegu täies ulatuses ja selles osas on küllaltki head tingimused võimalikeks veealusteks arheoloogilisteks uuringuteks.

Submerged Holocene coastal landscapes in Pärnu Bay

Art Kristjan Olesk

Summary

There are a number of examples of submerged landscapes in the southern part of the Baltic Sea, such as river channels lagoon sediments, paleoforests, with often associated archaeological finds and prehistoric settlement sites (Hansson, 2018; Larsson, 2017; Nilsson *et al.*, 2018). Several archaeological finds and settlement sites are known from the Pärnu area eastern Baltic Sea and the back of the Pärnu Bay, such as Pulli, Sindi-Lodja I, and II (Kriiska & Lõugas, 2009). The Pärnu Bay has undergone complex sea-level changes during the post-glacial development of the Baltic Sea, due to the relatively slow glacio-isostatic land uplift in the area. Consequently, there have been two low sea-level periods and two transgressive periods in the Pärnu area, which provide the opportunity for ancient landscapes to be buried and preserved underwater.

Previous studies have only identified sediments of the Pärnu River channel buried under marine sands in Estonian waters, dating to approximately 9000 cal a BP (Nirgi *et al.*, 2020). This master's thesis investigated the continuation of the Pärnu riverbed in the bottom of the Pärnu Bay, its sediments, and their age. The aim of the work was to determine the stratigraphy, genesis, and age of the valley-filling sediments through more detailed studies and to establish their relationship with Holocene relative sea-level changes. A total of 96 km of seismo-acoustic profiles were interpreted during the study, 24 sediment cores were taken from the bottom of the Pärnu Bay and the coastal zone, and various laboratory methods were used to explain the formation of the sediments.

The results revealed that the former Pärnu River channel in the Pärnu Bay can be traced in a 12 km long section using seismo-acoustic profiles, of which a 4.3 km section is buried under covering sands, and an 8.5 km section of the valley-filling sediments exposed on the seabed. In the visible part of the riverbed, sloping peat layers characteristic of the valley edges are exposed. Two different age complexes can be distinguished from the valley infill. The older part was deposited during the Yoldia Sea lowstand and the beginning of the Ancylus Lake transgression, and the sediment datings are similar to the age of the Pulli settlement site. The study found that during the Yoldia Sea lowstand, the water level in the Pärnu Bay could have been ca 7.8 m below the current sea-level. The younger part of the sediments was deposited

during the Initial Litorina Sea lowstand and the Litorina Sea transgression. The datings of the younger part of the riverbed sediments are similar to the datings of the Sindi-Lodja I and II settlement sites. The shoreline of the Initial Litorina Sea was at a depth of ca 4 m. The Initial Litorina Sea riverbed part of the Sindi-Lodja I and II settlement sites is entirely covered by sands, which will complicate possible archaeological studies in the future. The Yoldia Sea riverbed riverbed sediments which are simultaneous with the Pulli settlement site is almost entirely visible on the seabed, providing relatively good conditions for potential underwater archaeological studies.

Tänuõnad

Töö autor tänab oma juhendajaid Alar Rosentaud, Sten Suuroja ja Tiit Hangu. Soome Geoloogiateenistuse teadlasi Dr Aarno Kotilainen, Nikolas Sanila abi eest seismo-akustiliste andmete interpreteerimisel. Samuti Maili Roiot Muinsuskaitseametist, kes oli abiks veedrooniga pildistamisel ja IPT Projektijuhtimine OÜ kollektiivi, kes olid abiks puurimistöodel.

Kirjandus

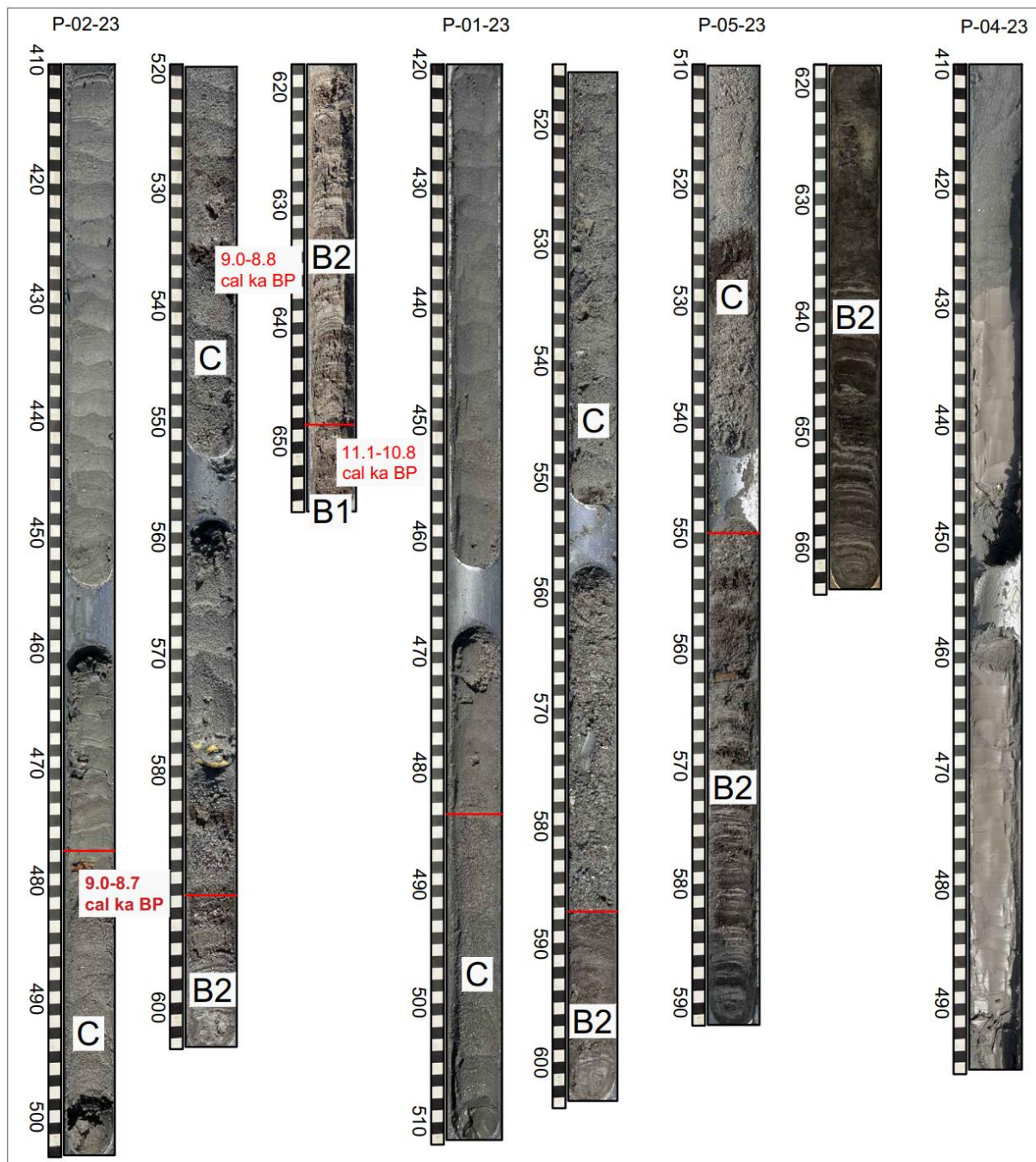
- Andrén, E., Andrén, T., & Sohlenius, G. (2000). The Holocene history of the southwestern Baltic Sea as reflected in a sediment core from the Bornholm Basin. *Boreas*, 29(3), 233-250.
- Andrén, T., Björck, S., Andrén, E., Conley, D., Zillén, L. & Anjar, J. (2011). The development of the Baltic Sea Basin during the last 130 ka. *The Baltic Sea Basin*, 75-97.
- Bailey, G., Andersen, S. H., & Maarleveld, T. J. (2020). Denmark: Mesolithic coastal landscapes submerged. *The archaeology of Europe's drowned landscapes*, 39-76.
- Bailey, G., & Jöns, H. (2020). The Baltic and Scandinavia: Introduction. *The archaeology of Europe's drowned landscapes*, 27-38.
- Blott, S.J., Pye, K. (2001). Gradistat: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26, 1237–1248.
- Boethius, A. (2016). Something rotten in Scandinavia: the world's earliest evidence of fermentation. *Journal of Archaeological Science*, 66, 169-180.
- Boethius, A. (2018). The use of aquatic resources by Early Mesolithic foragers in southern Scandinavia. *The Early Settlement of Northern Europe*, 1, 311-334.
- Fischer, A., Olsen, J., Richards, M., Heinemeier, J., Sveinbjörnsdóttir, Á. E., & Bennike, P. (2007). Coast-inland mobility and diet in the Danish Mesolithic and Neolithic: evidence from stable isotope values of humans and dogs. *Journal of Archaeological Science*, 34(12), 2125-2150.
- Fischer, A., & Vang Petersen, P. (2018). Denmark—a sea of archaeological plenty. In *Oceans of Archaeology* (pp. 68-83). *Jutland Archaeological Society*.
- Hang, T., & Kohv, M. (2013). Glacial varves at Pärnu, south-western Estonia: a local varve chronology and proglacial sedimentary environment. *GFF*, 135(3-4), 273-281.
- Hang, T., Veski, S., Vassiljev, J., Poska, A., Kriiska, A., & Heinsalu, A. (2020). A new formal subdivision of the Holocene Series/Epoch in Estonia. *Estonian Journal of Earth Sciences*, 69(4).
- Hansson, A., Björck, S., Linderson, H., Rundgren, M., Nilsson, B., Sjöström, A., & Hammarlund, D. (2017). Early Holocene landscape development and Baltic Sea history based on high-resolution bathymetry and lagoonal sediments in the Hanö bay, southern Sweden. *Under the sea: Archaeology and palaeolandscapes of the continental shelf*, 197-209.
- Hansson, A. (2018). Submerged landscapes in the Hanö Bay. *Early Holocene shoreline displacement and human environments in the southern Baltic Basin. Lundqua Thesis*, 85, 146.
- Hansson, A., Hammarlund, D., Landeschi, G., Sjöström, A., & Nilsson, B. (2019). A new early Holocene shoreline displacement record for Blekinge, southern Sweden, and implications for underwater archaeology. *Boreas*, 48(1), 57-71.

- Harff, J., Lemke, W., Lampe, R., Lüth, F., Lübke, H., Meyer, M., Tauber, F. & Schmölcke, U. (2007). The Baltic Sea coast—A model of interrelations among geosphere, climate, and anthroposphere.
- Harff, J., & Meyer, M. (2011). Coastlines of the Baltic Sea—Zones of competition between geological processes and a changing climate: Examples from the southern Baltic. *the Baltic Sea basin*, 149-164.
- Harff, J., Bailey, G. N., & Lüth, F. (2016). Geology and archaeology: submerged landscapes of the continental shelf: an introduction. *Special Publications*, 411(1), 1-8.
- Heiri, O., Lotter, A. F., & Lemcke, G. (2001). Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: reproducibility and comparability of results. *Journal of paleolimnology*, 25(1), 101-110.
- Holmlund, J., Nilsson, B., & Rönby, J. (2017). Joint explorations of the sunken past: examples of maritime archaeological collaboration between industry and academia in the Baltic. *Under the sea: archaeology and palaeolandscapes of the continental shelf*, 53-63.
- Jöns, H. (2011). Settlement development in the shadow of coastal changes—Case studies from the Baltic Rim. *The Baltic Sea Basin*, 301-336.
- Kierulf, H. P., Steffen, H., Barletta, V. R., Lidberg, M., Johansson, J., Kristiansen, O., & Tarasov, L. (2021). A GNSS velocity field for geophysical applications in Fennoscandia. *Journal of Geodynamics*, 146, 101845.
- Kriiska, A., & Lõugas, L. (2009). Stone Age settlement sites on an environmentally sensitive coastal area along the lower reaches of the River Pärnu (south-western Estonia), as indicators of changing settlement patterns, technologies and economies. *Mesolithic Horizons*, 1, 167-75.
- Lampe, R. (2005). Lateglacial and Holocene water-level variations along the NE German Baltic Sea coast: review and new results. *Quaternary International*, 133, 121-136.
- Larsson, L. (2017). Submerged settlement in the Öresund, western Scania, southernmost Sweden. *Under the sea: Archaeology and palaeolandscapes of the continental shelf*, 165-175.
- Lindén, M., Möller, P. E. R., Björck, S., & Sandgren, P. E. R. (2006). Holocene shore displacement and deglaciation chronology in Norrbotten, Sweden. *Boreas*, 35(1), 1-22.
- Lübke, H. (2002). Submarine Stone Age settlements as indicators of sea-level changes and the coastal evolution of the Wismar Bay area. *Greifswalder Geographische Arbeiten*, 27, 202-210.
- Maa-amet. (2024). Kaadirakendused. <https://geoportaal.maaamet.ee/est/Kaadirakendusedp2.html>. (Viimati vaadatud 20.05.2024).
- Medvedev, I. P., Rabinovich, A. B., & Kulikov, E. A. (2013). Tidal oscillations in the Baltic Sea. *Oceanology*, 53, 526-538.

- Milner, N., Craig, O. E., Bailey, G. N., Pedersen, K., & Andersen, S. H. (2004). Something fishy in the Neolithic? A re-evaluation of stable isotope analysis of Mesolithic and Neolithic coastal populations. *Antiquity*, 78(299), 9-22.
- Nilsson, B., Sjöström, A., & Persson, P. (2018). Seascapes of stability and change: the archaeological and ecological potential of the early mesolithic seascapes with examples from Haväng in SE Baltic, Sweden. In *Ecology of Early Settlement in Northern Europe Conditions for Subsistence and Survival The Early Settlement of Northern Europe, Volume 1* (pp. 335-352). Equinox Publishing.
- Nilsson, B., Hansson, A., & Sjöström, A. (2020). Sweden: submerged landscapes of the early mesolithic. *The Archaeology of Europe's Drowned Landscapes*, 77-93.
- Nirgi, T., Rosentau, A., Habicht, H.-L., Hang, T., Jonuks, T., Jõelet, A., Kihno, K., Kriiska, A., Mustasaar, M., Risberg, J., Suuroja, S., Talviste, P., & Tõnisson, H. (2020). Holocene relative shore-level changes and Stone Age palaeogeography of the Pärnu Bay area, eastern Baltic Sea. *The Holocene*, 30(1), 37-52.
- Reimer, P. J., Austin, W. E. N., Bard, E., Bayliss, A., Blackwell, P. G., Bronk Ramsey, C., et al. 2020. The IntCal20 Northern Hemisphere Radiocarbon Age Calibration Curve (0–55 cal kBP). *Radiocarbon*, 62(4), 725–757.
- 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. *The Baltic Sea Basin*, 165-188.
- Rosentau, A., Bennike, O., Uścińowicz, S., & Miotk-Szpiganowicz, G. (2017). The Baltic Sea Basin. *Submerged landscapes of the European continental shelf: quaternary paleoenvironments*, 103-133.
- Rosentau, A., Nirgi, T., Muru, M., Bjursäter, S., Hang, T., Preusser, F., Risberg, J., Sohar, K., Tõnisson, H. & Kriiska, A. (2020). Holocene relative shore level changes and Stone Age hunter-gatherers in Hiiumaa Island, eastern Baltic Sea. *Boreas*, 49(4), 783-798.
- Rosentau, A., Klemann, V., Bennike, O., Steffen, H., Wehr, J., Latinović, M., Bagge, M., Ojala, A., Berglund, M., Becher, G. P., Schoning, K., Hansson, A., Nielsen, L., Clemmensen, L. B., Hede, M. U., Kroon, A., Pejrup, M., Sander, L., Stattegger, K., Schwarzer, K., Lampe, R., Lampe, M., Uscinowicz, S., Bitinas, A., Grudzinska, I., Vassiljev, J., Nirgi, T., Kublitskiy, Y. & Subetto, D. (2021). A Holocene relative sea-level database for the Baltic Sea. *Quaternary Science Reviews*, 266, 107071.
- SPLASHCOS. (2024). SPLASHCOS viewer. <http://splashcos.maris2.nl/>. (Viimati vaadatud 23.05.2024).
- Žulkus, V., & Girininkas, A. (2022). Changes in Baltic sea relict coasts and the subsistence economy in Lithuania in the Late Pleistocene and Early Holocene. In *Lithuanian Baltic sea coasts during the Holocene: sea level changes, environmental developments and human adaptations*/edited by Algirdas Girininkas, Valdas Žulkus (pp. 15-40). BAR Publishing.

- Uścińowicz, S. (2006). A relative sea-level curve for the Polish Southern Baltic Sea. *Quaternary International*, 145, 86-105.
- Vassiljev, J., & Saarse, L. (2013). Timing of the Baltic Ice Lake in the eastern Baltic. *Bulletin of the Geological Society of Finland*, 85.
- Vassiljev, J., Saarse, L., Grudzinska, I., & Heinsalu, A. (2015). Relative sea level changes and development of the Hiiumaa Island during the Holocene. *Geological Quarterly*, 59(3).
- Transpordiamet. (2024). Avalik HIS. <https://his.vta.ee:8443/HIS/Avalik?REQUEST=Main&WIDTH=1432&HEIGHT=778>. (Viimati vaadatud 21.05.2024).
- Veski, S., Heinsalu, A., Klassen, V., Kriiska, A., Lõugas, L., Poska, A., & Saluäär, U. (2005). Early Holocene coastal settlements and palaeoenvironment on the shore of the Baltic Sea at Pärnu, southwestern Estonia. *Quaternary International*, 130(1), 75-85.
- Vestøl, O., Ågren, J., Steffen, H., Kierulf, H., & Tarasov, L. (2019). NKG2016LU: a new land uplift model for Fennoscandia and the Baltic Region. *Journal of Geodesy*, 93, 1759-1779.

Lisa 1



Lisa 1. Fotod puursüdamikest P-01-23, P-02-23, P-04-23 ja P-05-23 Raeküla ranna läbilõikest A-A' koos dateeringutega. Vertikaalteljel suhteline kõrgusskaala cm (puuraukude asukohad joonisel 1B).

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Art Kristjan Olesk,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose „**Üleujutatud Holotseeni rannikumaastikud Pärnu lahes**”, mille juhendajad on Alar Rosentau, Tiit Hang ja Sten Suuroja, reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada, sealhulgas lisada digitaalarhiivi DSpace kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
2. Annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace kaudu Creative Commons'i litsentsiga CC BY NC ND 4.0, mis lubab autorile viidates teost reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
3. Olen teadlik, et punktides 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
4. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei riku ma teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse õigusaktidest tulenevaid õigusi.

Art Kristjan Olesk

27.05.2024