

Tartu Ülikool

Loodus- ja täppisteaduste valdkond

Ökoloogia ja maateaduste instituut

Geoloogia osakond

Magistritöö geoloogias (30 EAP)

**Randade erosioon tulevikukliima tingimustes ja nende
tagasitäitmise võimalused Valgeranna näitel**

Katre Rohumägi

Juhendaja: Alar Rosentau

Tartu 2025

Randade erosioon tulevikukliima tingimustes ja nende tagasitäitmise võimalused

Valgeranna näitel

Magistritöö eesmärgiks on hinnata Valgeranna uuringuala näitel randade erosiooniga seonduvaid probleeme tänase ja tulevikukliima tingimustes ning analüüsida randade tagasitäitmise võimalusi rannikumere jõesuudmetesse kuhjunud setetega. Uuringu käigus võeti 71 liiva setete proovi Valgerannast ja Pärnu jõe kuhjekeha pinnalt ning ühest puuraugust. Lisaks sellele analüüsiti profiile aastate 2010-2025 vahel ning määrati kuhjekeha maht ja asend kasutades MapInfo programmi. Töö tulemusena selgus, et Valgeranna ligi 2 km erosioonialalt on kulutatud 34 000 m³ liiva. Valdavalt on rannas ülemises 20 cm kihis keskliiv ning sellest sügavamal peenliiv. Töö käigus uuritud Pärnu jõe kuhjekeha mahuks on umbes 21000 m³ ning sellest kasulikku materjali on umbes 16000 m³. Lõpp tulemusest selgus, et ülemine osa kuhjekeha liivast sobib Valgeranna tagasi täitmiseks.

Märksõnad: rannikualade erosioon, rannikumere maavarad, suhteline meretaseme muutus

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

Erosion of beaches under future climate conditions and possibilities of their nourishment using the example of the Valgeranna study area

The aim of this master's thesis was to investigate the erosion-related problems using the example of the Valgeranna study area under current and future climate conditions and to analyze the need for backfilling beaches with sediments accumulated in coastal sea estuaries. During the study, 71 sand sediment samples were taken from Valgeranna and the surface of the Pärnu River pile body and from one borehole. In addition, profiles between the years 2010-2025 were analysed. The volume and position of the pile body was determined using the MapInfo program. The work revealed that approximately 34,000 m³ of sand has been eroded in the 2 km erosion area of Valgeranna. The beach is predominantly medium sand in the upper 20 cm layer and fine sand in the deeper layers. The volume of the pile body studied during the work is approximately 21,000 m³ and the useful material from it is approximately 16,000 m³. The final results showed that the embankment sand is suitable for backfilling Valgeranna.

Keywords: coastal erosion, coastal marine mineral resources, relative sea level change

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

Sisukord

Sisukord.....	3
Sissejuhatus	5
1 Merevee taseme tõus ja rannikute erosioon Eestis ja Pärnus	8
2 Liiva ja kruusa kaevandamine Euroopa merealadel ja randade tagasitäitmine.....	10
2.1 Holland.....	10
2.1.1 Zandmotor`i projekt	11
2.2 Suurbritannia	13
2.3 Taani.....	14
2.4 Saksamaa.....	15
2.5 Belgia	16
2.5.1 Ostende piloot projekt	17
3 Liiva ressursid ja selle kaevandamine Eesti rannikumeres.....	18
3.1 Naissaare liivamaardla.	18
3.1.1 Kaevandamise tingimused.....	19
3.2 Nasva maardla ja mäeeraldis.....	19
3.3 Kuradimuna maardla	21
3.4 Kõpu maardla	22
3.5 Hiiumadala maardla ja mäeeraldis	23
3.6 Letipea maardla ja mäeeraldis.....	23
3.7 Liiva potentsiaalsed leiukohad jõgede suudmetes	25
4 Merepõhjast kaevandamise ja randade tagasitäitmise mõju keskkonnale.....	26
4.1 Liiva ja kruusa kaevandamise süsniku jalajälg	26
4.1.1 Randade tagasitäitmise keskkonnamõjud.....	27
5 Materjal ja meetodika.....	29
5.1 Uuringuala üldiseloomustus	29
5.2 Välitööd.....	30

5.3	Lõimiseanalüüs.....	31
5.4	Profiilid, pindalalised muutused ja mudeldamine	32
6	Tulemused	34
6.1	Setete akumulatsioon ja erosioon Valgerannas aastatel 2010-2025.....	34
6.1.1	Akumulatsiooni ja erosiooni alade jaotus aastatel 2010-2024.....	34
6.1.2	Ranniku muutused liDAR ja RTK-GPS andmetel põhinevatel profiilidel	35
6.2	Rannaliivade lõimis Valgerannas	39
6.3	Pärnu jõesuudme Liivamadala kuhjekeha ehitus ja kvaliteet.....	40
6.3.1	Liivamadala setted	41
6.3.2	Liivamadala reljefimudel ja liiva mahu hinnang.....	45
7	Arutelu ja järeldused	48
7.1	Merevee taseme muutused Pärnu lahes, rannikute erosioon ja randade tagasitõimise vajadus Valgerannas.....	48
7.2	Valgeranna liivade lõimis ja tagasitõimiseks sobivate liivade kvaliteedinõitajad...	49
7.3	Valgeranna tagasitõimimine	50
7.4	LiDAR kõrgusandmete kasutamine randade seires	51
7.5	Järeldused	52
	Kokkuvõte	53
	Summary	55
	Tänuõnad	57
8	Kasutatud kirjandus.....	58
9	Lisad.....	64
9.1	Lisa 1 Profiil 2.....	64
9.2	Lisa 2 Profiil 3.....	64
9.3	Lisa 3 Profiil 6.....	64

Sissejuhatus

Euroopas on viimastel aastakümnetel hoogustunud liiva ammutamine merepõhjast. Hollandis moodustab see 19%, Taanis ja Belgias vastavalt 15% ja 5% kogu kaevandatavast liivast (F.Velegakis et al., 2010). Seal juures on tõusvas trendis merepõhja liiva kasutamine rannikute erosiooni tõttu kahjustatud randade tagasitaitmiseks. Süvenevaks probleemiks on kliimamuutuste tõttu järsult kiirenenud merevee taseme tõus, mille mõju on jõudmas ka Eesti rannikule. Põhjameres ja Läänemere lõunaosas on rannikute erosiooni tõttu teostatud suures mahus randade tagasitaitmist merepõhja liivaga. Hollandis kulub ligi pool merepõhjast ammutatud liivast randade tagasitaitmiseks. Merevaatluste andmereal näitavad, et Eesti rannikualadel on kiirenenud meretaseme tõus ületamas maatõusu kiirust ning, et erosiooniga seotud probleemid, millega Läänemere lõunaosas on juba aastakümneid tegeldud, hakkavad jõudma Eesti aladele .

Ilma kohanemiseta seisab Euroopa silmitsi märkimisväärse maakaotuse ja rannikualade üleujutuste ja erosiooni suurenemisega. Malta ja Kreeka on eriti haavatavad, kusjuures Malta võib kaotada 12% oma maismaast. Majanduslikud kahjud on märkimisväärsed, eriti Poolas ja Saksamaal, kus prognoositavad kahjud on vastavalt 483 miljonit ja 391 miljonit dollarit. (Bosello et al., 2012). Rannikulinnad, näiteks Makaroneesia saartel ja Lissaboni piirkonnas, on merepinna tõusu ja äärmuslike ilmastikunähtuste suhtes väga vastuvõtlikud (Rocha et al., 2020) . Ka Läänemere piirkond seisab silmitsi suurenenud üleujutuste ja rannikuerosiooni riskiga (Hofstede, 2011). Tõhusate kohanemisstrateegiate hulka kuuluvad tammide kõrguse suurendamine, randade toitmine ja integreeritud rannikualade majandamise (ICZM) rakendamine (Hinkel et al., 2010). Merepinna tõusuga kohanemine hõlmab oluliste ebakindlustega toimetulekut seoses tuleviku tingimustega ja sotsiaalmajanduslike mõjudega (Hurk et al., 2022). Tõhus kohanemine nõuab terviklikku lähenemisviisi, mis ühendab ennetamise, kaitse, valmisoleku, hädaolukorrale reageerimise, taastumise ja hindamise (Hofstede 2011).

Eestis ei ole seni olnud merevee taseme tõusu probleem niivõrd aktuaalne, kui näiteks Saksa või Poola rannikul, kuna merevee taseme tõus on siin kompenseeritud pärasjääaegse maakerkega (Kapsi et al., 2023). Tulevikuprognoosid näitavad siiski olukorra muutust ning vajadust kohanemiseks. Erinevad stsenaariumid viitavad Eesti vastavalt geograafia kuni 1 meetrit (Suursaar & Kall, 2017).

Lisaks merevee taseme tõusule mõjutavad erosiooni ulatust ja intensiivsust rannikute geoloogiline ehitus ja setete levik. Peenteralisemad setted kantakse kergemalt laiali ning kõvematest kivimitest koosnevad rannad on palju püsivamad. (Masselink et al., 2014). Sellistest randadest, mis on silmapaistvalt mõjutatud erosiooni poolt on üheks näiteks Pärnu lahes asuv Valgerand, mille erosiooni ulatust on töö autor oma bakalaureuse töö raames varasemalt uurinud (Rohumägi, 2022).

Nagu eelnevalt mainitud on randade tagasi täitmine (toitmine) üks võimalusi kaitsta randa ja seal paiknevat infrastruktuuri ja väärtuseid puhkealana. Randade tagasitäitmise üheks peamiseks eesmärgiks on hoida kontrolli all randade erosioon, stabiliseerida rannajoone asend ning kaitsta ranniku infrastruktuure erosiooni ja tormide eest. Lisaks säilitab või suurendab randade toitmine piirkonna rekreatiivset ja ökoloogilist väärtust ning tõstab sellega turismipotentsiaali (Santos et al., 2020). Liivarandade tagasitäitmisel paigutatakse liiva tavaliselt rannandõlva ülemisele osale ja lastakse sellel lainete toimel loomulikult liikuda, kuigi ökoloogilise mõju minimeerimiseks kaalutakse ka alternatiivseid meetodeid, näiteks liiva paigutamist rannandõlva madalasse veealusesse tsooni (Schlacher et al., 2012). Kasutatava liiva terasuurus ja puhtus on ranna püsivuse, esteetika ja ökoloogilise sobivuse säilitamiseks üliolulised (Pranzini et al., 2018).

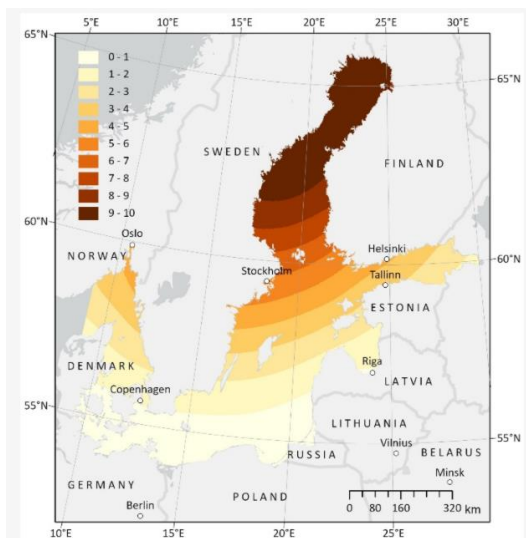
Ranna toitmine võib põhjustada olulisi lühiajalisi ökoloogilisi häireid, näiteks põhjaselgrootute mattumist ja sette koostise muutusi. Rannaökosüsteemide taastumine on erinev, mõned piirkonnad taastuvad osaliselt kuude jooksul, samas kui teised võivad võtta kauem aega, olenevalt toitumistehnikast ja keskkonnatingimustest. (Speybroeck et al., 2006) Vaja on integreeritud uuringuid, mis arvestavad rannaalade toitmise kombineeritud füüsikaliste, ökoloogiliste ja sotsiaal-majanduslike mõjudega, et arendada välja jätkusuutlikumaid tavaid (Schipperet et., 2021).

Peale selle on kliimamuutustega kohanemiseks oluline leida randade toitmiseks keskkonnasõbralikumad ja säästlikud lahendused toormaterjali leidmiseks. Merepõhja kaevandamisel on väidetavalt väiksem keskkonnamõju võrreldes maismaakaevandamisega, eriti metsade hävitamise ja kogukondade ümberasustamise vältimise osas (Gilron & Smith, 2022). See sõltub aga tõhusast keskkonnajuhtimisest ja -seirest. Oluline aspekt on materjalide transpordi CO₂ jalajäljes. Seda mõjutab transportimiseks vajalik teekond ning vahend, millega tarnitakse. Üle mere võib transportimisel olla 10 korda väiksem CO₂ emissioon tonni kohta kui mööda maad (Cargo, 2016).

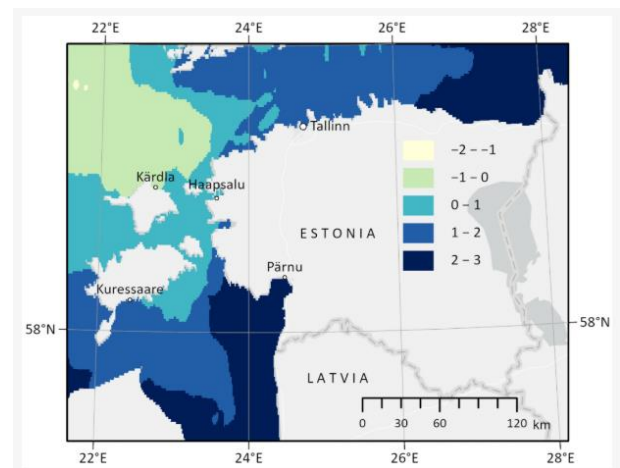
Eesti on randade tagasitäitmiseks (nt Pirita ja Narva-Jõesuu) varasemalt kasutatud maismaalt pärinevat liiva (Orviku, 2018). Kuna randade tagasitäitmiseks on liiva kogused sageli suhteliselt suured ja maismaatransport arvestatava süsinikuheite ja muu keskkonnamõjuga, siis on randade toitmiseks oluline võtta kasutusele ka rannikumerre või jõesuudmetesse kuhjunud liivad. Käesolevas magistritöös keskendutakse Pärnu jõesuudmes paikneva Liivamadala kuhjekeha setete leviku, kvaliteedi ja mahu uurimisele, et hinnata selle ressursi potentsiaali ligi 5 km lääne suunas asuva Valgeranna tagasitäitmiseks ja erosiooni pidurdamiseks. Magistritöö eesmärgiks on hinnata Valgeranna uuringuala näitel randade erosiooniga seonduvaid probleeme tänase ja tulevikukliima tingimustes ning analüüsida randade tagasitäitmise võimalusi rannikumere jõesuudmetesse kuhjunud setetega. Uurimus on seotud projektiga PRG1471 „Tormisuse ja meretaseme muutuste rekonstrueerimine Läänemere Holotseeni rannamoodustiste põhjal ja randade arengutsenaariumide analüüs tulevikukliima tingimustes“ (2022-2026) ning arendab edasi KIK-i projektiga „Metoodika väljatöötamine laevateedele kuhjuvate rannasetete mahu ja kvaliteedi määramiseks ning kasutamiseks randade taastamisel Pärnu sadama ja seda ümbritsevate randade näitel“ alguse saanud merepõhja sekundaarsete resursside väärindamise metoodikat (Tõnisson jt. 2023).

1 Merevee taseme tõus ja rannikute erosioon Eestis ja Pärnus

Eesti pikk rannajoon ja madal rannikuala muudavad riigi meretaseme tõusu suhtes haavatavaks, kusjuures ekstreemsete prognooside kohaselt võib meretase aastaks 2100 tõusta 1 meeter, kui kohanemist ei võeta (Suursaar & Kall, 2017). Eesti suhteline meretase võib 21. sajandi lõpuks prognooside kohaselt tõusta 20–60 cm võrra, olenevalt erinevatest kliimamuutuste stsenaariumidest. (Suursaar & Kall, 2018). Meretaseme trendi muutmise mehhanism võib viia meretaseme maksimumide järsemaks muutumiseni ja kõrgemate kvantiilide trendideni saja-aastastes aegridades. (Lagemaa et al., 2011).



Joonis 1 Jääaja järgne maakerge mm/aastas (Kapsi et al., 2023)



Joonis 2 Suhteline mereveetaseme tõus mm/a 1995-2019 (Kapsi et al., 2023)

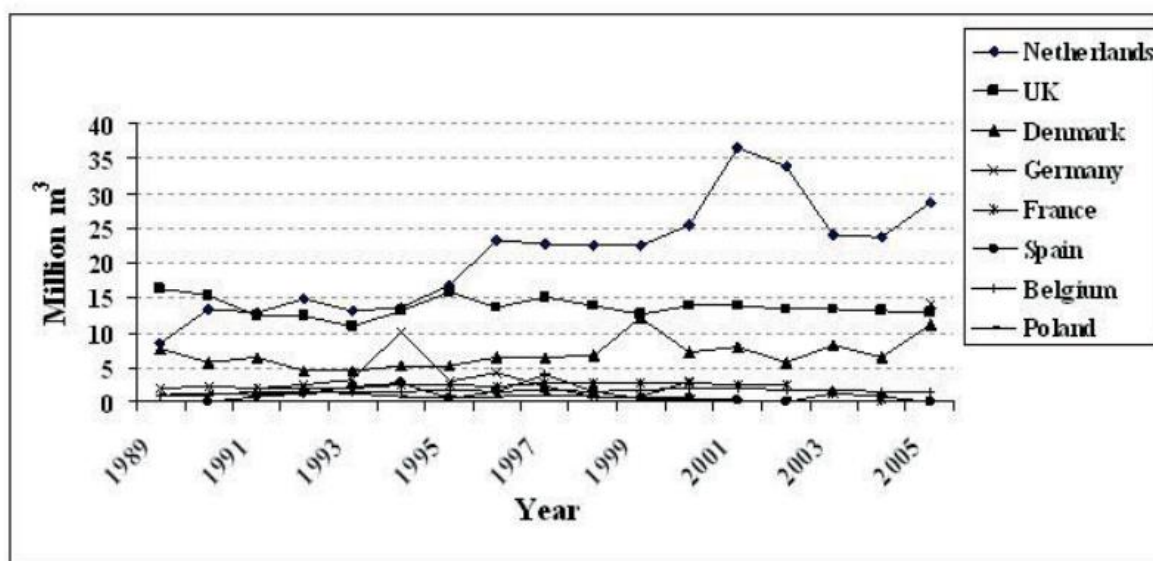
Kui hetkel on maakerge ja suhtelise mereveetaseme tõus tasakaalus (Joonis 1. ja 2.) ja eelnevalt on maakerge ületanud merevee tasemetaseme tõusu, siis kolm erinevat Läänemere merevee taseme prognoosi näitavad erinevaid hinnanguid suhtelise merepinna tõusu kohta aastaks 2100. Need prognoosid rõhutavad, et lõunapoolsed rannikualad on suurima riskiga. Kõigi stsenaariumide kohaselt jääb prognoositav suhteline merepinna tõus nendes piirkondades vahemikku 0,3–0,7 m. Seevastu põhjapoolseid piirkondi suhteline merepinna tõus oluliselt ei ohusta, kuna prognoosid näitavad nendes piirkondades vahemikku –0,6 kuni –0,3 m. (Kapsi et al., 2023).

Meretaseme muutusi soodustavad keskkonnategurid nagu suuremahulise atmosfääriringluse muutused, sealhulgas tsüklonaalse aktiivsuse suurenemine ja Atlandi tormirada nihkumine põhja poole. Need on mõjutanud rannikumere ja kaldaprotsesse Eestis. (Kapsi et al., 2023). Läänemere jääkate vähenemist on peetud suuremate lainete põhjuseks, mis aitab kaasa meretaseme tõusule piirkonnas. (Lagemaa et al., 2011). Meretaseme tõusu potentsiaalsed

mõjud Eestile hõlmavad rannikualade üleujutusi, liivarandade erosiooni ja sadamarajatiste hävimist, mis ohustab väärtuslikke looduslikke ökosüsteeme ja puhkeotstarbelisi liivarandu. (Suursaar. & Kullas, 2009).

2 Liiva ja kruusa kaevandamine Euroopa merealadel ja randade tagasitäitmine

Euroopa suurimad liiva ja kruusa merepõhja kaevandajad on Hollandis, Suurbritannias, Prantsusmaal, Saksamaal (joonis 3). Viimastel aastakümnetel on kõige enam kasvanud merepõhja kaevandamine Hollandis, 2001 aasta kaevandamise maht ületas 35 miljonit m³ liiva. Stabiilselt 13-15 miljonit m³ merepõhja liiva ja kruusa kaevandavad Ühendkuningriigid.



Joonis 3 Mereagregaatide tootmine 8 ELi liikmesriigis aastal (Velegrakis, et al., 2010)

2.1 Holland

Alates 1989. aastast on merealuste täitematerjalide tootmine Hollandis kasvanud, kus 2001. aastal küündis kaevandamise maht 36,5 miljonit m³ liivani. Kasv oli seotud suurenenud nõudlusega täitematerjalide ja randade täiendamiseks kasutatavate materjalide järele. 2005. aastaks oli tootmine vähenenud ligikaudu 29 miljoni kuupmeetriini. Põhjamere Hollandi sektoris pole kruusavarusid kaevandamiseks saadaval, mistõttu Madalmaad toetuvad oma kruusavajaduste rahuldamiseks impordile – umbes 2 miljonit kuupmeetrit aastas, peamiselt Ühendkuningriigist. Holland on palju investeerinud Rotterdami sadama kaasaegsetesse rajatistesse. Need kaid on mereagregaatide lossimisel ja töötlemisel üliolulised, peegeldades riigi*- jätkuvat üleminekut maismaalt merepõhiste agregaatide allikatele. (Velegrakis, et al., 2010)

2013-2016 aastal kaevandati üle 25 miljoni m³ liiva Põhjamerest ja Waddeni merest. Praegu on aga Hollandi Wadden Sea'is liiva kaevandamine lubatud vaid laevateede regulaarsete hooldustööde kõrvaltootena. Kaubanduslik liiva kaevandamine on täielikult üle viidud Põhjamerre, sügavusele üle 20 m (Põhjamerre poliitikadokument 2016-2021). Lisaks otsustatakse lähiaastatel vähendada liiva kaevandamist Hollandi Waddeni meres järk-järgult nullini, kuna liiva kaevandamine lähirannikul on vastuolus praeguse rannikukaitsepoliitikaga. Seoses kliimamuutustega on eesmärgiks säilitada rannikuvööndis olemasolevad setted, et tulla toime meretaseme tõusuga. (Schultze & Nehls, 2017)

Randade täitmine on kriitilise tähtsusega strateegia, mida Madalmaades kasutatakse ranniku erosiooni vastu võitlemiseks ja rannajoone terviklikkuse säilitamiseks. Randade tagasitäitmiseks kulub aastas keskmiselt 12 mln m³, mis lisandub igal aastal vaid 432 km pikkusele rannajoonele (Brand et al., 2022). Näiteks on kasutatud praktikat Amelandis (Achete & Luijendijk, 2012), Egmond aan Zee's (Duin et al., 2004), Delfandi rannikul (Meulen et al., 2014) ja ida Scheldt'is (van der Werf et al., 2019).

2.1.1 Zandmotor'i projekt

Liivamootor (Zandmotor) on 2011. aastal ellu viidud teedrajav megatäitmisprojekt, mis hõlmab 21,5 miljoni kuupmeetri liiva lisamist, et luua suur tehispoolsaar (Stive et al., 2013) (Escudero et al., 2020) (Schipper et al., 2016). Eesmärgiks oli uurida, kuidas suur mahuline liiva täide – nn *mega feeder nourishment* – võiks looduslike protsesside abil tugevdada rannikut pikaajaliselt ja säästvalt. Projekt algas 2011. aastal, kui umbes 21,5 miljonit kuupmeetrit liiva paigutati Hollandi Delflandi rannikule, moodustades kuni 1 kilomeetri pikkuse merre ulatuva ja mitme kilomeetri pikkuse kunstliku poolsaare. Selline lähenemine erines traditsioonilistest rannatäite meetoditest, kus väiksemaid liivakoguseid lisatakse regulaarselt rannajoonele – eesmärk oli lubada loodusel ise seda liiva levitada ja rannikut kujundada.

Projekti kontseptsioon tugines ideele, et looduse enda jõud – eelkõige tuul, lained ja hoovused – suudavad liiva aeglaselt ja pidevalt mööda rannikut transportida, toites sel moel randu ja luidete süsteeme looduslikul ja ökonoomsel viisil. Selline strateegia pidi vähendama vajadust sagedaste sekkumiste (randade tagasitäitmise) järele, pakkudes samal ajal tugevat kaitset merevee tõusu ja tormide vastu.

Esimese 18 kuu jooksul pärast projekti elluviimist tehti põhjalikke mõõtmisi ja seireid, et hinnata liiva leviku mustreid ja projekti toimimist. Nende seirete tulemused näitasid, et muutused randades toimusid väga kiiresti – suur osa rannajoone ümberkujunemisest toimus

esimese kuue kuu jooksul. Poolsaare välisperimeeter taandus kohati kuni 300 meetrit, keskmiselt aga umbes 150 meetrit. See näitas, et liiv hakkas kiiresti laiali kanduma, nagu projekti algselt oligi planeeritud.

Projekti oluliseks tulemuseks oli see, et umbes 72% poolsaarest kadunud liivast – ligikaudu 1,8 miljonit kuupmeetrit – ei olnud kaotatud, vaid oli looduslikult edasi kantud naaberrandadele ja luidetele, tugevdades neid piirkondi. See "toitev mõju" oli projekti üks põhieesmärke ja esialgsed tulemused kinnitasid selle toimimist. Eriti aktiivne oli liiva levik tormiperioodidel, mil tugevad lained põhjustasid sette märgatavat liikumist piki rannikut. Vaiksematel kuudel liikus liiv pigem rannikule lähemale või mere poole tagasi, mis viitab sellele, et lainetuse intensiivsus mõjutab leviku suunda – tugevamad lained soodustavad piki-rannikut liikumist, samas kui nõrgemad tingimused põhjustavad liikumist risti rannaga. (Stive et al., 2013)

Lisaks geomeetrilistele muutustele – näiteks rannajoone taandumisele ja poolsaare kuju ümberkujundamisele – täheldati ka lainemurdja tsooni muutumist. Lainete murdumise vöönd tasandati kiiresti tagasi projektieelsele tasemele, mis näitab, et rannakuju kohandus üsna kiiresti looduslike protsesside mõjul. Samuti muutus liivakeha plaaniline kuju – esialgu üsna ebakorrapärane poolsaare vorm hakkas järk-järgult omandama sümmeetrilisemat, Gaussi jaotusele sarnanevat kuju, mis on tüüpiline looduslikult kujunenud randadele.

Viis aastat pärast projekti algust tehtud uuringud näitasid, et liiv oli levinud algselt 2,2 km pikkuselt alalt laiali umbes 5,8 km ulatuses. See tõestas, et suures mahus rannatäide ei toimi mitte ainult lühiajaliselt, vaid võib tõepoolest pakkuda pikaajalist rannakaitset, kusjuures loodus teeb suurema osa tööst ise. (Stive et al., 2013)

Lisaks geomorfoloogilistele muutustele kaasnesid projektiga ka ökoloogilised mõjud. Ranniku laienemine ja uute rannamaastike tekkimine loid uusi elupaiku lindudele, taimestikule ja mereorganismidele. Samuti kasvas piirkonna rekreatiivne väärtus – uus liivariba meelitas ligi külastajaid, rannasportlasi ja loodusehuvilisi. See näitas, et õigesti kavandatud rannatäide võib lisaks rannakaitsele tuua kasu ka ühiskonnale laiemalt. (Bergen et al., 2021)

Kokkuvõttes tõi Sand Engine pilootprojekt esile uue ja paljutõotava lähenemise rannakaitsele. Suurmahuline, strateegiliselt paigutatud liiv võimaldas loodusel teha seda, mida inimesed tavaliselt teevad masinatega ja korduvate sekkumistega. Uuringu tulemused näitavad, et sellised suuremahulised randade tagasitäitmise projektid võivad olla tõhus ja keskkonnasõbralik alternatiiv traditsioonilistele meetoditele, aidates lahendada ranniku

erosiooni ja merevee taseme tõusuga seotud probleeme pikaajaliselt ja jätkusuutlikult. (Stive et al., 2013).

2.2 Suurbritannia

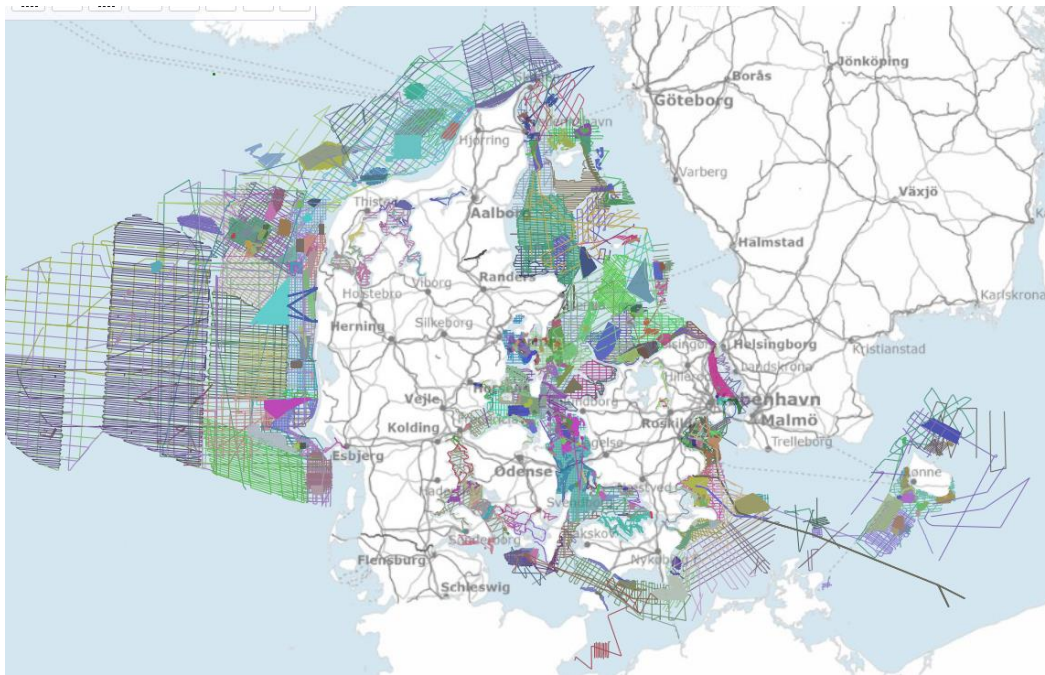


Joonis 4 Proovide kogumikud ümber Suurbritannia saare, millest on loodud andmete kogum hindamaks merepõhja sette seal hulgas liiva kvaliteeti. (T.Bide, Balson, Mankelow, & Selby, 2016)

Ühendkuningriik on koostanud riigile kuuluva mandrilava (UKCS) jaoks põhjaliku merepõhja liiva ja kruusa andmebaasi (Joonis 4). See koondab geoloogilisi andmeid ja merepõhja proove, et esile tõsta nende ressursside koostist ja paiknemist meres, aidates kaasa tõhusale ja säästvale merakasutuse haldamisele. (Bide et al., 2016)

Tootmine saavutas Suurbritannias haripunkti 1989. Aastal, kui suurte Londoni infrastruktuuriobjektide tarbeks kaevandati 16,9 miljonit kuupmeetrit merepõhja liiva ja kruusa. Pärast seda langes merepõhja liiva ja kruusa kaevandamine 1993. aastaks 10,8 miljoni m³. Alates 1993. aastast on toodang taas pidevalt kasvanud, püüdes keskmiselt umbes 13 miljonit m³ juures aastas. Viimaste aastakümnete kasv merepõhja liivade ja kruusa kaevandamises on eelkõige seotud randade tagasitaitmise projektide ja ekspordi suurenemisega (F.Velegrakis, et al., 2010).

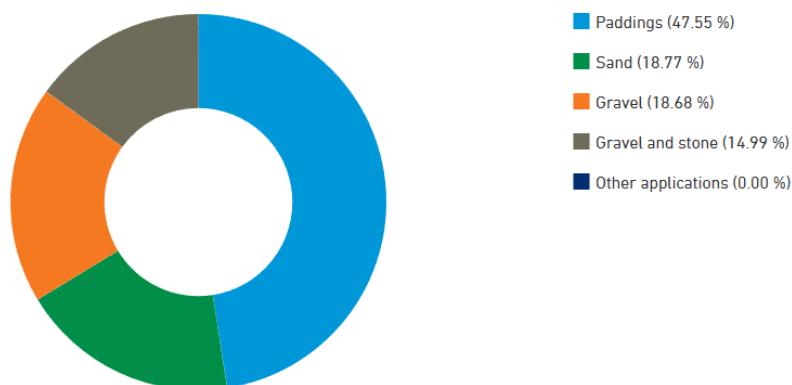
2.3 Taani



Joonis 5 Kaart kujutamaks merelised toormaterjalide uuringuid Taanis. (Geology., 2025)

Taani on loonud andmebaasi, mis sisaldab erinevaid uuringuid ning raporteid, mis sisaldavad nii geoloogilisi kui ka bioloogilisi uuringuid (Joonis 5.) Sellest saab leida iga uuritud ala kohta detailse ülevaate (Geology., 2025). Viimase kümne aasta jooksul on meresetete kaevandamine ehituse ja randade toitmise eesmärgil olnud Põhjamere Taani osal enam-vähem stabiilne, kaevandamismahud on alla 12 miljoni m³ aasta ning 2023 aastal oli see 9.7 milj m³, mis moodustab 25% kogu kaevandatavast maavarast Taanis (Denmark, 2025). 2023 aastal moodustas liiv 18,77% kogu kaevandavatest maavaradest vees. 10–15 % sellest pärineb hooldus- ja süvendustöödest (Schultxe & Nehls, 2017). See liiv moodustab olulise osa rannikukaitseks, ehituseks ja täiteks kasutatavast materjalist.

Time: 2023:



Joonis 6 Veest kaevandamine tooraine tüübi järgi (Denmark, 2025)

Merepõhjast kaevandatakse täitematerjale sh liiva, kruusa ja ka kivimeid (Joonis 6). Tegevus toimub peamiselt Põhjamerest, Øresund ja Läänemeri. (Denmark, 2025). Taani Waddeni meres ei ole setete kaevandamine äriksel eesmärkidel lubatud. Küll aga võib anda loa setete kaevandamiseks rannikukaitse eesmärgil, kui sobivat materjali ei ole võimalik koguda tammi maismaapoolselt ega koos laevateede süvendamisega. Viimastel aastatel ei sobinud Waddeni mere seest süvendatud materjal rannikukaitseks. Sellegipoolest toimub kaevandustegevus väljaspool Taani Waddeni merd, kuid selle vahetus läheduses, mis võib mõjutada Wadden mere ökosüsteemi. Kokku on need alad, mis on kõik Taani Loodusagentuuri (Naturstyrelsen) volitatud, pindala umbes 40 km². Alates 2007 kuni 2017. aastast on nendest kohtadest äriksel eesmärkidel kaevandatud rohkem kui 730 000 m³ setet (ligikaudu 81 000 m³ aastas). (Schultze & Nehls, 2017)

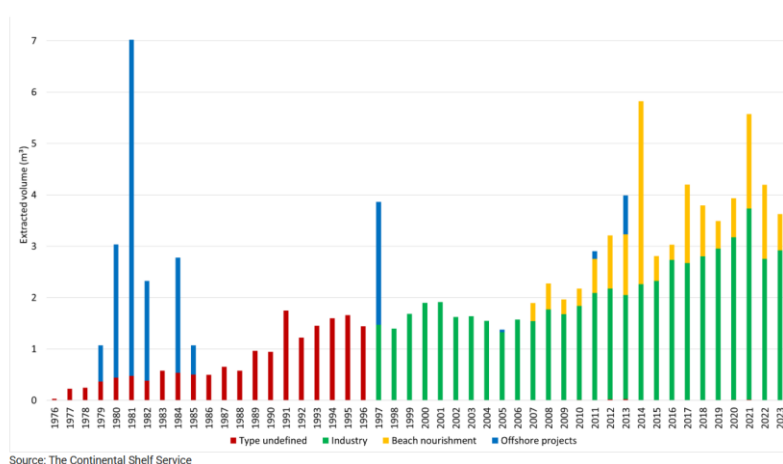
2.4 Saksamaa

Viimaste aastate märkimisväärseim projekt on olnud JadeWeserPort projekt, mille tarbeks kaevandati 2009. aastal kokku 19,05 miljonit m³ liiva. Alates 2010. aastast on kaevandatud kogused taas langenud stabiilsele tasemele, moodustades ligikaudu 1 miljon m³ aastas. Saksamaa Wadden Sea rahvusparkides ei ole kaubanduslik setete kaevandamine lubatud. Siiski toimub Alam-Saksimaal ja Schleswig-Holsteinis setete kaevandamine, tavaliselt rannikukaitse või sellega seotud ehituseesmärkidel. Alam-Saksimaal on neli kaevandamiskohta. Kõik need asuvad Nordergründe lähedal, Weseri suudme lähedal. Kokku hõlmavad need kaevandamiskohad nimega Delphin, HBH 1, Brewaba 1 ja Nordsee 2 umbes 26,7 km² pindala ja kattuvad rahvusparkiga vaid vähesel määral. Veel on aktiivne vaid kaevandamiskoht 'Brewaba 1', kuid siiani pole sealt setteid kaevandatud. Rannakaitserajatiste korrashoid ja randade toitmine saartel nõuab ka meresetteid. Viimastel aastatel on Wangerogge ja Juisti

saartel toimunud väikesemahulised setete ümberpaigutused. Ka Schleswig-Holsteini Waddeni meres, Wattimere saarte ja mandri vahel, toimub meresetete kaevandamine ikka veel mitmes kohas, ainult rannikukaitse või sellega seotud meetmete eesmärgil Halligeni ja Wadden Sea saartel. Nendel aladel on lubatud kaevandada alla 15 000 m³ aastas. Nendeks tegevusteks on otse loa andnud Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein (LKN-SH) (§ 6 Abs. 3 Nr. 3 Nationalparkgesetz). Oluliselt palju ulatuslikum kaevandamistegevus toimub Westerland III-s. Westerland III on üks maailma suurimaid liiva kaevandamiskohti (umbes 55 km²). See asub Syltist umbes 5 km läänes ja hõlmab endist kaevandamisala "Westerland II". Kuigi Westerland III asub väljaspool tegelikku Wattimere piirkonda, kuulub see Schleswig-Holsteini Wadden Sea rahvusparki ja Wadden Sea maailmapärandisse. Riigi Mäe-, Energeetika- ja Geoloogiaamet (LBEG) kiitis selle heaks 2010. aasta veebruaris ja aastani 2030 on kavas kaevandada Westerland III-st umbes 20–25 miljonit m³ liiva. Materjali kasutatakse ainult rannikukaitse ja randade toitmise projektides Syltil. Seoses kliimamuutuste ja meretaseme tõusuga on oodata, et ka Saksamaal kasvab nõudlus setete järele rannakaitseprojektide jaoks. Üks kõne all olnud meede rannikukaitse parandamiseks Saksamaa rannikul on Waddeni mere merepõhja taseme tõstmine. Seetõttu on plaanis vedada liiva Põhjamerre väliselt Waddeni merre. (Schultxe & Nehls, 2017)

2.5 Belgia

Belgias kaevandatakse merepõhja maavarasid Põhjamerest. Aastas kaevandatakse 3 kuni 4 miljonit m³, mis on umbes 75 % kogunõudlusest riigis. Lisaks randade täiteks, kasutatakse maavara ka tööstuses. (Economie, 2025)



Joonis 7 Kasutusalaad Belgias. Punane on teadmata; roheline on tööstus; kollane on randade toitmine; sinine on projektid avamerel.

Belgia on seiranud randade tagasitaitmise tõhusust, et vähendada hooldust ja pikendada rannatäitmise eluiga, ilma et see kahjustaks keskkonda. See hõlmab välimõõtmisi, numbrilist modelleerimist ja morfoloogiliste näitajate hindamist (Silva et al., 2016). Peamiselt kasutatakse kaevandatud liiva tööstuses ning alates 2007 a. ka randade toitmiseks (Joonis 7).

2.5.1 Ostende piloot projekt

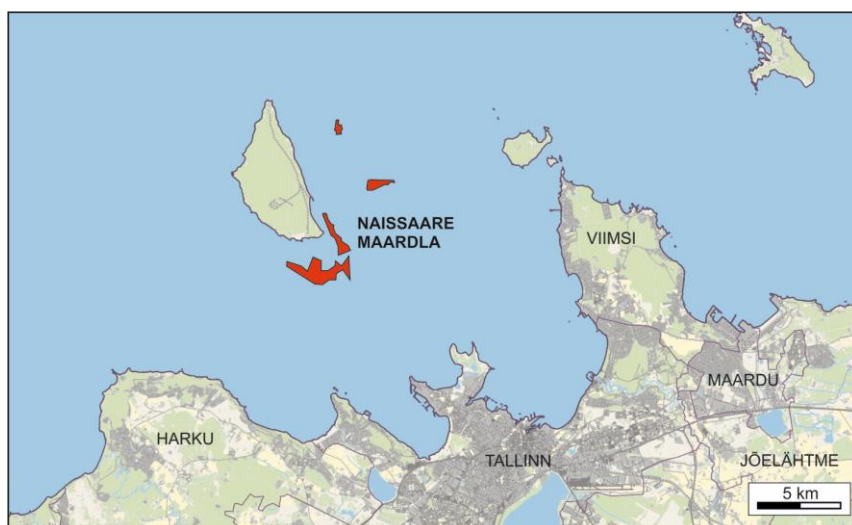
Flaami valitsus on seadnud eesmärgiks tugevdada kõik "nõrgad" rannikualad aastaks 2050, et need taluksid 1000-aastase korduvusajaga tormi. Selleks töötati välja rannakaitse üldkava ("Masterplan voor Kustveiligheid"), milles nähakse ette pehmete, looduslähedaste lahenduste kasutamist alternatiivina traditsioonilistele struktuuridele. (Silva et al, 2016)

Pilootprojekt viidi läbi Mariakerke rannikualal (Oostende), mis on üks Belgia ranniku "kuumadest kohtadest", kus rannavöönd on eriti vastuvõtlik erosioonile. Sellel alal on merepoolne tamm ulatunud edasi võrreldes naaberaladega, mis suurendab erosiooniohtu. Projekt hõlmas nii ranna toitmist (liiva lisamine otse randa) kui ka kaldapealse toitmist (liiva lisamine ranna veealusele osale) (Chen & Montreuil, 2023). Uuring hõlmas võrreldavat analüüsi: vaadeldi alasid, kus teostati ainult ranna liivatäide, ja alasid, kus kasutati kombinatsiooni rannatäitest ja veealusest täitest (nn shoreface nourishment). Seire põhines mitmetel mõõtmistel ja numbrilisel modelleerimisel. (Silva et al., 2016)

3 Liiva ressursid ja selle kaevandamine Eesti rannikumeres

Eesti rannikumere kõige detailsemalt uuritud liiva ja kruusavarud paiknevad kokku kuues maardlas (Naissaare, Nasva, Kuradimuna, Kõpu, Hiiumadala ja Letipea). Lisaks keskkonnaregistris arvelolevatele maardlatele on rannikumere geoloogilise kaardistamise käigus välja eraldatud mitmeid liiva leiukohti, samuti on huvipakkuvad rannikumere jõesuudmetesse ja muulide taha kuhjunud liivakehad (Tõnisson et al., 2023)

3.1 Naissaare liivamaardla.



Joonis 8 Asub Tallinna lahes, Naissaare kõrval

Maardla asub Tallinna lahe loodeosas (Joonis 8) lahusmaatükkidena Naissaarest lõuna- ja idapool. Naissaare kari ning Littegrundi madala piirkonnas. Suurusel on see 374,83 ha.

Geoloogilised otsingu-uuringutööd kruusa ja liiva esinemispiirkondade kindlaksmääramiseks toimusid 1994-1995 a. Eesmärk oli leida täite- ja ehitusliiva varu Muuga sadama jaoks. Lisaks sellele toimusid geoloogilised uuringud aastatel 2003 kuni 2005.

Kasulikku kihti on 0,3- 8,8 m ning see koosneb Litoriinamere ja Antsülusjärve eel settinud eriteralisest liivast, mis sisaldab kohati ka kruusa. See on kasutusele võetud kui ehitusliivana. Lõunapoolne materjal sobib täitepinnaseks ning omaduselt on ülipeeneteraline liiv.

Aruandes on esitatud andmed vana klassifikatsiooni järgi: liivafraktsioonid (5–0,05 mm) moodustavad maavarast 93,1–97,7%, kruusafraktsioonid (>5 mm) 1,0–6,6% ning savi- ja tolmuosakesed (<0,05 mm) 0,3–1,2%. Peensusmoodul on 1,7–2,2. Liiva koostises on määratud ka mitmete mikrokomponentide sisaldus. Ehitusliiv on kõlblik kasutamiseks ehitussegudes. Viimased andmed varu koguse kohta pärinevad 31.12.2017, mil aT oli 4924,8 tuh m³.

(Geoloogiateenistus, 2018)

3.1.1 Kaevandamise tingimused

Vastavalt vee sügavusele kaevandatakse kahe erineva võimsuse ja mahutavusega pinnase pumpsüvendajaga ning ilmastiku järgi valitakse kas ühe- või kahesuunaline kaevandamisskeem. Väljapumbatakse 0,3-0,4 m paksust kihti.

Levikuala on pidevas muutumises koos hüdrodünaamiliste tingimuste muutumisega, see tähendab et aktiivsematel perioodidel kuhjub jämedateralisem liiv, rahulikamal aga peeneteralisem liiv. Olulised piirangud kaevandamise piirkonnas puuduvad.

(Geoloogiateenistus, 2018)

Naissaare II liivakarjääri loa kehtivus on kuni 2031 aastani ning seda kasutatakse ehitusliivana (aT 3808 tuh m³) (Maa-amet, 2025)

3.2 Nasva maardla ja mäeeraldis



Joonis 9 Nasva liivakarjääri asukohta, Kuressaare kõrval Saaremaal

Nasva maardla ja selles paiknev mäeeraldis asub Saaremaal Kuressaare külje all (Joonis 9). Esimene ulatuslik kaardistamine tehti geoloogilis-hüdrogeoloogilise uuringu käigus, mille tulemused on avaldatud 1973. aastal (Perens jt.). Hilisematel aastatel on AS Maves korraldanud veekaitse skeemi koostamise ja põhjalikuma pinnakatte uuringu, mille tulemuseks on koostatud piirkonna pinnakatte paksuste kaart 1:25 000 mõõtkavas.

Samuti on Nasva sadama ehitusgeoloogiliste uuringute aruanne, mis sisaldab olulist geoloogilist informatsiooni, sealhulgas puuraukude kirjeldusi ja geoloogilisi läbilõike. Puuriti

kokku 18 auku, ulatudes sügavustesse 0,5 m kuni 6,3 m. Enamasti läbivad need aukud Kvaternaari setted ja annavad ülevaate aluspõhja ülemisest kihist. Analüüsiti ka 25 proovi, et uurida liiva lõimise omadusi ja kvaternaari setete litoloogilist koostist.

Hiljem on geoloogilised uuringud jätkunud, sealhulgas Nasva sadama sissesõidukanali ja suudmeala hüdrograafiline mõõdistamine, mille kaudu on täiendatud teadmisi piirkonna geoloogia ja maavarade kohta.

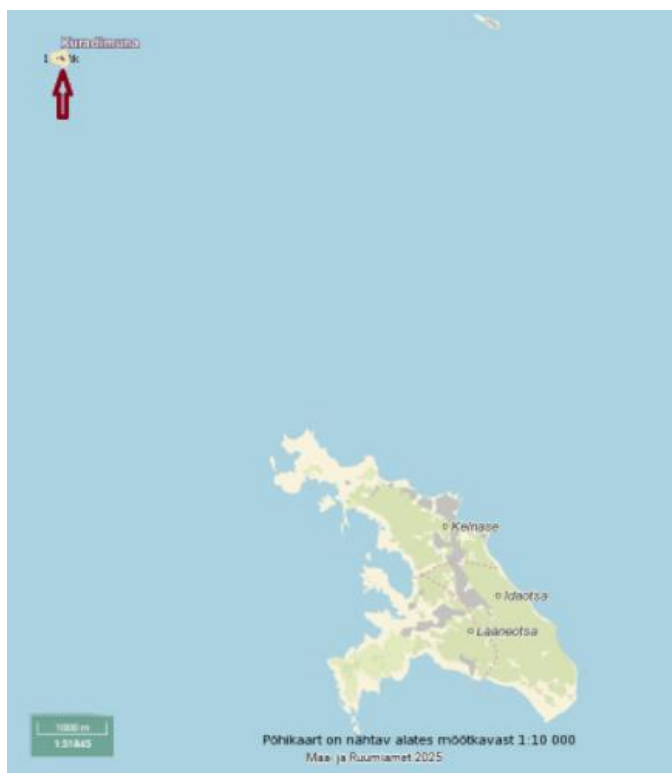
(Kupits, 2002)

2002. aasta AS Maves geoloogilise uuringu tulemusel koostati uuringuala topoplaan pindalaga 14,4 ha. Uuringualal tehti 3 kaevist ning võeti analüüse liiva lõimise määramiseks. Eesti Keskkonnauuringute Keskuse Geotehnikalaboris tehtud analüüside tulemusel ei saanud maa-aines maavarana kirja- ülipeene liiva peensusmoodul oli 0,91-0,96 (Kupits, 2002). Maa-ainese varu 160 tuh m³, millest seisuga 01.01.2010 on jääkvaru 73,5 tuh m³. (Rannik, 2010)

2010. aastal tehti geoloogiline uuring OÜ Inseneribüroo STEIGERI poolt Saare maakonna lõunaosas Kaarma vallas Nasva küla territooriumil – Nasva II uuringuruum teenindusala pindalaga 28,13 ha. Kõik uuritud liivakihid (ehitusliiv ja täiteliiv) on enamasti väga peeneteralised, ilma kruusateradeta, mis muudab need sobivaks täitematerjaliks, kuid mitte igasugusteks ehitusprojektideks, kus vajatakse jämedama teraga liiva. Kõikides plokkides on madal savi- ja tolmuosakeste sisaldus, mis on positiivne omadus, kuna see tähendab, et liiv on puhas ja kvaliteetsem. Liiva peensusmoodul jääb vahemikku 0,6–1,9, mis viitab, et liiv on peeneteraline ja sobib hästi näiteks täitematerjalideks, aga mitte alati ehitusmaterjalideks, kus oleks vaja jämedamaid teri. Lisaks on uuringus leitud, et uuringualas ei ole looduslike materjalide koostises murettekitavat taset üldnaftaproduktide või raskmetallide osas, mis teeb materjali ohutuks nii inimestele kui ka keskkonnale. (Rannik, 2010)

Nasva on aktiivne liivakarjäär alates 2013 kuni 2018 ning kasutatakse üldehituses ja täitematerjalina. (Maa-amet, 2025)

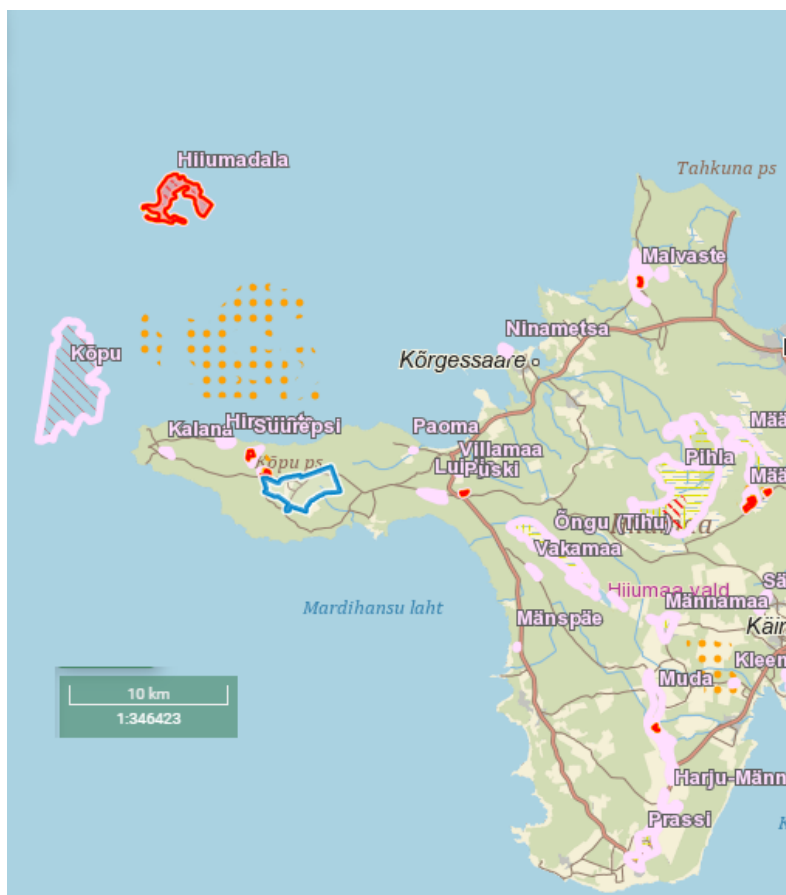
3.3 Kuradimuna maardla



Joonis 10 Kuradimuna maardla asukohta Soome lahes

Kuradimuna maardla asub Soome lahes Pranglis põhja pool (Joonis 10). Liivamaardla uuringute tulemuste põhjal kontuuriti ehitusliiva plokk pindalaga 2,28 hektarit, mille sügavus ulatub 10,7 m kuni 15,4 m. Aruandes on esitatud andmed vana klassifikatsiooni järgi. Uuritud liivalasundis on valdavalt ülijäme- ja jämeliiv, mis sisaldab kuni 33% kruusa. Savi- ja tolmuosakeste sisaldus on kõigis võetud proovides alla 10%, keskmiselt 1,06%, mis viitab sellele, et liiv on puhas ja sobib ehitusmaterjalideks. Liiva lõimis on kogu lasundi ulatuses ühtlane, mis tagab materjali kvaliteedi stabiilsuse. Ehitusliiva keskmine paksus on 1,08 m, ulatudes suurima paksuseni 2,20 m ja väikseim on 0,60 m. Raskemetallide sisaldus on madal ja inimesele ning keskkonnale ohutu. Naftaproduktide sisaldus on samuti enamasti madal, kuigi mõnes kohas on see rahuldaval tasemel. Hüdrodünaamilised tingimused, mis määravad mereliste liivade leviku, võivad aja jooksul muutuda, kuid kaevandamine ei mõjuta oluliselt merepõhja reljeefi ega hüdrodünaamilisi protsesse. Põhjaloostik kaevandataval alal hävib, kuid taastub 2–3 aasta jooksul pärast kaevandamisprotsessi lõppemist. Eesti Maavarade Komisjonile esitati kinnitamiseks Kuradimuna madala liivamaardla ehitusliiva varu 24 000 m³ pindalal 2,28 ha seisuga 01.11.2005. (Kask jt, 2005)

3.4 Kõpu maardla



Joonis 11 Kõpu maarlsa ja Hiiuumadala mäceraldise piirid

Kõpu maardla asub Hiiumaa kõrval Läänemeres (Joonis 11). Vastavalt 27. augusti 2007. aasta konsultatsioonilepingule, mis sõlmiti tellija AS Tallinna Sadam ja töö teostaja Tallinna Tehnikaülikooli Meresüsteemide Instituudi vahel, viidi 2007. ja 2008. aastal läbi geoloogilised uuringud Kõpu uuringuruumis, Kõpu poolsaare loodes. Liivaotsingutööd põhinesid Eesti Geoloogiakeskuse poolt määratud prognoosvarudel. Projekti alltöövõtjateks olid Tallinna Tehnikaülikooli Geoloogia Instituut, kes koostas käesoleva aruande, ning Riiasst pärit Geotehniline Teadus ja Uurimiskeskus UNICONE, kes vastutas välitööde teostamise eest.

Uuringud näitasid, et liivavarud on palju suuremad, kui varasemates liivaotsingu töödes oli prognoositud. Liivavarud arvutati kokku kolme ploki alusel: ehitusliiva tarbevaru (plokk 1), mille pindala on 1629,14 ha ja varu kogus 23 878 tuhat m³; täiteliiva tarbevaru (plokk 2), mille pindala on 145,18 ha ja varu kogus 2531 tuhat m³; ning täiteliiva tarbevaru (plokk 3), mille pindala on 93,67 ha ja varu kogus 1665 tuhat m³. Kokku sisaldab Kõpu maardlas liivavarusid 28 074 tuhat m³. (Kiipli, Soesoo, & Hade, 2009)

Aktiivne liivakarjäär üleriigilise tähtsusega Hiiu maakonnas. Põhimaavara kasutatakse sadamate ehitusel ehitussegudesse ja kaasnevat maavara kasutatakse eriotstarbeliseks täitepinnaseks. (Maa-amet, 2025)

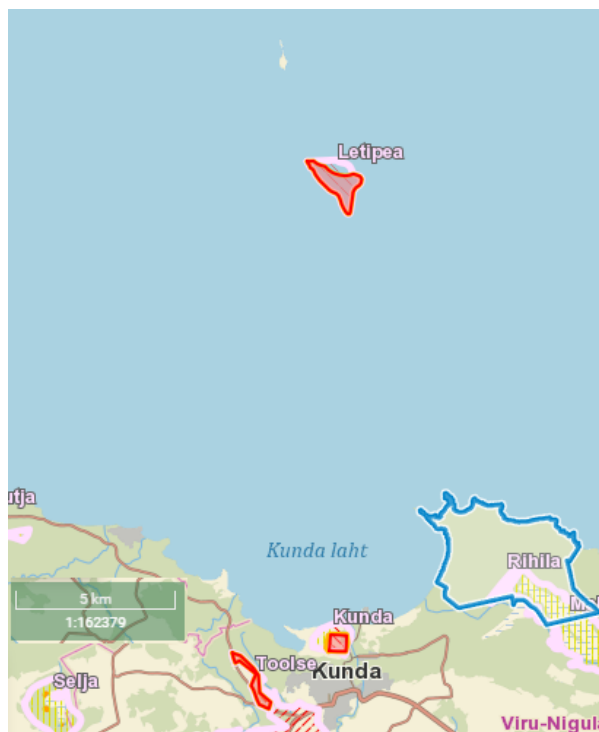
3.5 Hiiumadala maardla ja mäeeraldis

Asub Kõpu maardla kõrval (Joonis 11) Esmane uuring sooritati 1996 J. Kask, A. Talpas, T. Puurmann, S. Suuroja, M. Fiske poolt.). Täiendav geoloogiline uuring sooritati 2006 aastal. (Eesti Geoloogiateenistus, 2025)

Aktiivne liivakarjäär Kõpu lähedal. Maavara kasutatakse sadama rajatiste ehitusel täitematerjalina. Varu loa vormil ehitusliiv aT 3 995 tuh m³, täiteliiv aT 2 665 tuh m³. (Maa-amet, 2025)

Keskkonna mõju hindamine näitas, et heljumise tekkimise läbi kaasneks väheoluline negatiivne mõju vee kvaliteedile. Tekkinud süvendiga kaasneks väheoluline negatiivne mõju lainetusele, hoovustele ja setete liikumisele. Kaasneks oluline negatiivne mõju põhjaloomastikule. (Altakon, 2008)

3.6 Letipea maardla ja mäeeraldis



Joonis 12 Letipea liiva karjääri asukoht Soome lahes

Letipea liivakarjäär asub Soomelahtes, Kuna lahest põhja pool (Joonis 12). 2008. aastal tehtud üldgeoloogiliste uuringute, mis viidi läbi OÜ Eesti Ressurside tellimusel, tulemusel kontuuriti

liiva perspektiivala, mille pindala oli 169 ha ja varu 2 210 000 m³. Liiv oli enamjaolt ehitusliiva nõuetele vastav. Uuringuala asus Letipea neeme ja Lõuna-Uhtju (Sala) saare vahelises piirkonnas.

2013. aasta uuringud tehti Letipea neemes põhjas. Viidi läbi geofüüsikalised tööd, sh seisimokustiline profileerimine ja külguvaate sonariga profileerimine ning puurimistõid, mille põhjal määrati settematerjali lõimis ja filtratsiooni omadused. Kontuuriti kolm tarbevalu plokki:

- ehitusliiva varu 2 054 tuh m³ pindalal 82,95 ha (plokk 1),
- ehituskruusa varu 449 tuh m³ pindalal 28,57 ha (plokk 2),
- eriotstarbelise liiva varu 224 tuh m³ pindalal 21,64 ha (plokk 3).

3.7. Geoloogilise kaardistamise käigus uuritud leiukohad



Joonis 13 Kollase kontuuriga on märgitud geoloogilise kaardistamise käigus leitud liiva leiukohad.

Geoloogilise kaardistamise käigus on liiva leiukohtadena huvipakkuvad Väinameres paiknevad Soela, Suure-Väina ja Uisu leiukohad, Hiiumaast idas paiknevad Hari-Kurgu ja Saxby leiukohad, ja mitmed Soome lahes paiknevad liivade leiukohad, mille varu ja selle kvaliteet vajavad täiendavaid uuringuid (Joonis 13) (Maa-Ruumiamet, 2025).

3.7 Liiva potentsiaalsed leiukohad jõgede suudmetes

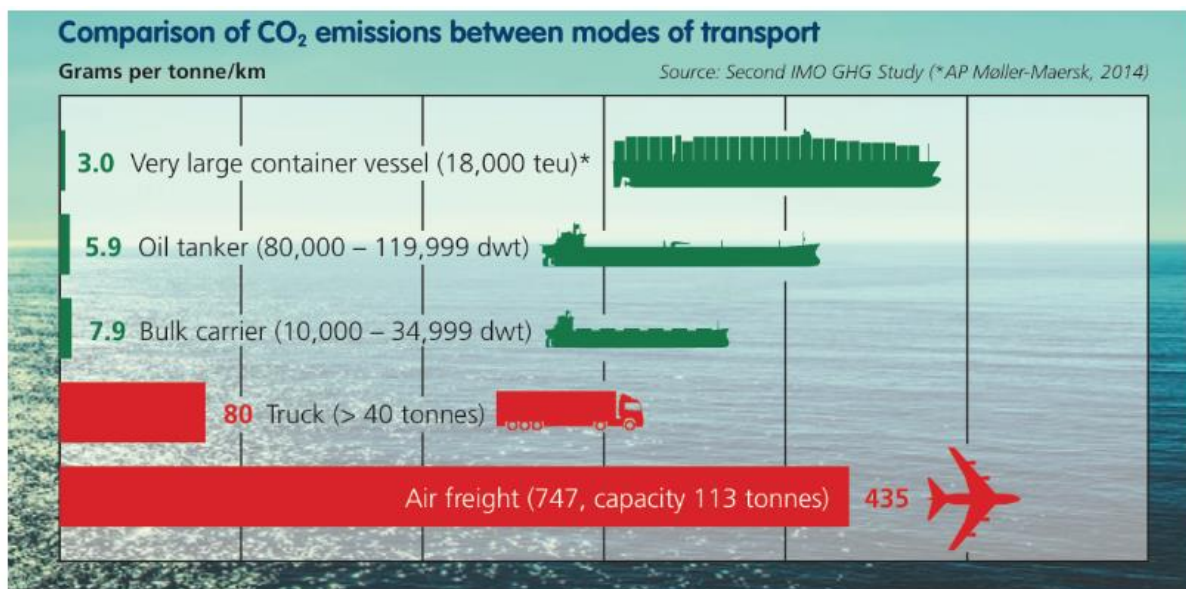
Lisaks keskkonnaregistris arvelolevatele maardlatele on rannikumere geoloogilise kaardistamise käigus välja eraldatud mitmeid liiva leiukohti sh Väinameres paiknevad Soela, Suure-Väina ja Uisu leiukohad, Hiiumaast idas paiknevad Hari-Kurgu ja Saxby leiukohad, ja mitmed Soome lahes paiknevad liivade leiukohad, mille varu ja selle kvaliteet vajavad täiendavaid uuringuid.

- Lehtma sadam- sadam on mitmeid kordi setetega täitunud, kuna põhjapoolne muul hoiab liiva kinni. Materjal on kaadatud rannast kaugele ning seega on see viidud süsteemist välja.
- Nasva sadamakai- lõunaküljele on tekkinud ulatuslik liivane kuhjekeha
- Andineeme sadam- sadama rajamisel ei arvestatud merepõhja intentsiivse liikuva peene liivaga. Seega hakkasid sadamasse kuhjuma liivad, mis paraku segunevad liialt orgaanikaga ja niisama olles, ei sobi taaskasutuseks.
- Narva jõgi- süvendustööde käigus saadud materjali saaks kasutada Narva-Jõesuu liivaranna täiteks.
- Liivamadala leiukoht Pärnu jõe suudmes (Tõnisson, et al., 2023)

4 Merepõhjust kaevandamise ja randade tagasitäitmise mõju keskkonnale

4.1 Liiva ja kruusa kaevandamise süsniku jalajälg

Tänapäeva globaliseerivas maailmas, kus loodusvarade säästlik kasutamine ja ökoloogilise jalajälje minimeerimine on muutunud keskseks teemaks, tuleb iga tarneahela etappi hinnata keskkonnakriteeriumite alusel. Eriti oluline on see suuremahuliste projektide puhul, nagu rannaalade täitmine või rannikuäärsete infrastruktuuride rajamine, kus kasutatakse märkimisväärses koguses looduslikke materjale. Strateegilisest vaatenurgast nähakse merelist kaevandamist kui võimalikku jätkusuutlikku lahendust, eriti seoses rohepöördega ja üleminekuga keskkonnasõbralikule majandusele. Kui kaevandamine toimub vastutustundlikult ning kaasneb tõhus keskkonnajuhtimine, võib see aidata vähendada survet maismaa ökosüsteemidele ja mitmekesistada toorainete allikaid (Leiva, 2024). Arvestades, et transpordi valik mõjutab otseselt projekti süsniku jalajälge, on mõistlik eelistada transpordiviise, mis põhjustavad väiksemaid CO₂ heitkoguseid ühe tonn-kilomeetri kohta. Uuringute kohaselt on meretransport sellistes olukordades üks keskkonnasäästlikumaid alternatiive, pakkudes oluliselt väiksemat heitmete taset võrreldes maismaa- või õhustranspordiga (Joonis 14).



Joonis 14 Erinevate transpordi liikide CO₂ emissiooni võrdlus (Cargo, 2016)

Merepõhja liiva- ja kruusaresurss on muutumas üha olulisemaks alternatiiviks, kuna nende ressursside kvaliteet on sageli kõrgem, mis tähendab, et vajatakse vähem töötlemist võrreldes maismaallikatega. Samuti on katendi puudumine või minimaalne esinemine üks mere kaevandamise suur eelis, võimaldades efektiivsemat materjalide hankimist (Petersen, 2016).

Maismaakaevandamine põhjustab sageli arvestatavat keskkonnakahju, sealhulgas jõgede degradatsiooni, muldade erosiooni ja põhjaveetaseme langust (Syah & Hartuti, 2018) (Johari et al., 2023) (Bhatawdekar et al., 2021) . Need muutused häirivad ökosüsteemide toimimist ning võivad viia ökosüsteemiteenuste kadumiseni, sealhulgas vee filtreerimine, elupaikade säilitamine ja põllumajanduslik tootlikkus (Johari et al., 2023) (Kowalska & Sobczyk, 2014). Kaevandamisega kaasneb ka elupaikade hävimine ja setete kuhjumine veekogude allavoolu, mis kahjustab vee kvaliteeti ning veelustikku. Sageli tekivad konfliktid kohalike elanike, kaevandajate ja valitsusasutuste vahel, eriti piirkondades, kus järelevalve on nõrk. Samuti on laialt levinud illegaalsed kaevandamised, mis viivad veelgi ulatuslikuma keskkonnavalase kahjustuseni ja raskendavad jätkusuutlikku haldust (Bhatawdekar et al., 2021).

Vaatamata eelistele võib meres kaevandamise keskkonnamõju olla samuti märkimisväärne. Merekeskkonna muutmine, sealhulgas põhjaelustiku häirimine, elupaikade kadumine ja setete liikumise muutused, võib põhjustada ökosüsteemide tasakaalu olulisi häireid ning elurikkuse vähenemist (Petersen, 2016). Veelgi enam, rahvusvahelistes vetes ja paljudes riikides on puudulik regulatsioon süvamere kaevandamise osas, mis suurendab kontrollimatu keskkonnakahju riski. Regulaatiivsete lünkade tõttu on keeruline tagada läbipaistvat ja jätkusuutlikku juhtimist (Barrie & Good, 2007). Lisaks on süvamere kaevandamise tehnoloogiline ja majanduslik teostatavus veel arendusjärgus. Tulevikus on vaja märkimisväärseid investeeringuid tõhusate, töökindlate ja madala keskkonnamõjuga tehnoloogiate arendamiseks (Petersen, 2016).

4.1.1 Randade tagasitaitmise keskkonnamõjud

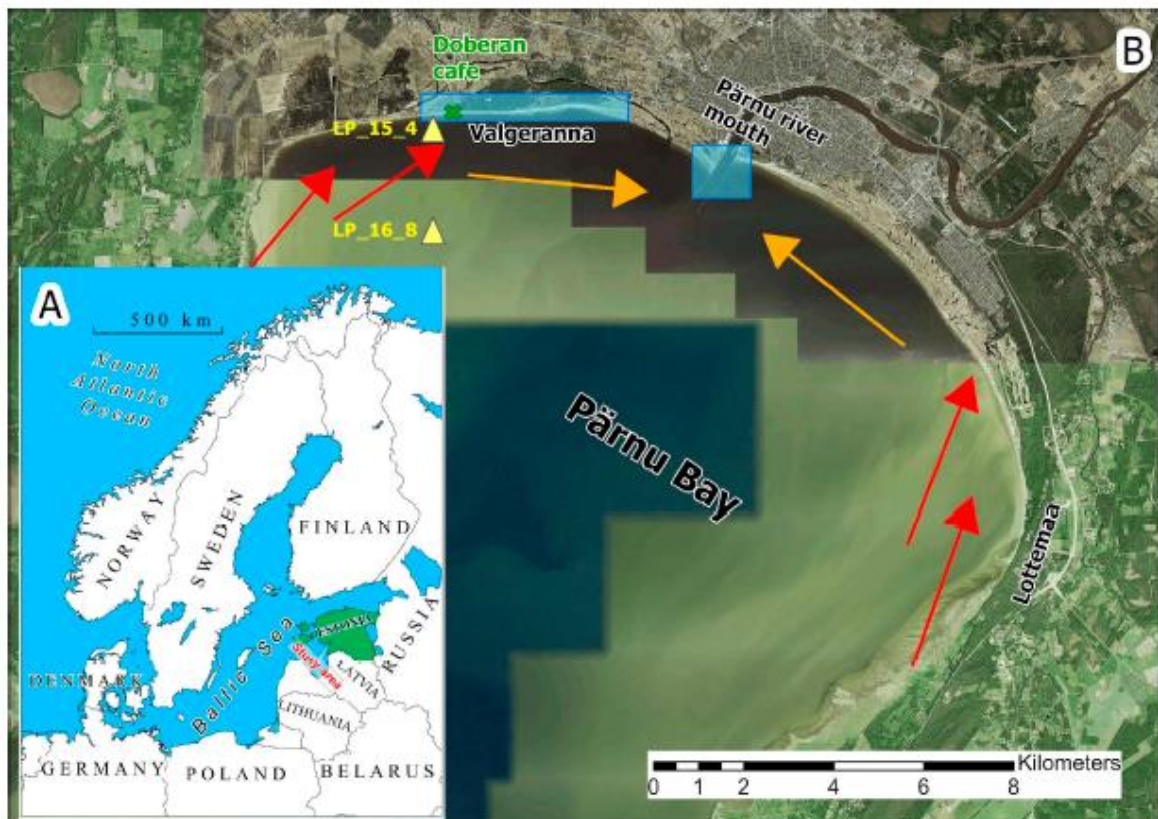
Kuigi randade toitmist peetakse sageli ökoloogiliselt jätkusuutlikumaks rannikukaitse meetodiks võrreldes kõva infrastruktuuriga, kaasneb selle rakendamisega mitmeid keskkonnariske, mis võivad kahjustada mere ökosüsteemide tervist ja stabiilsust. Setete kaevandamise, transpordi ja ladestamise protsessid – ranna toitumise põhikomponendid – võivad põhjustada olulisi lühiajalisi häireid ja mõnel juhul ka pikaajalisi keskkonnamõjusid. (F.Staudt et al., 2021)

Setete kaevandamiskohas rikub materjali eemaldamine avamere laenualadelt paratamatult põhjaelupaiku (Petersen, 2016). Süvendustööd põhjustavad põhjaelustiku struktuuris olulisi muutusi. Sageli kaob jämedama liivaga seotud liike ja suureneb peenemates setetes edenevate liikide arv. Madala loodusliku settekiirusega aladel on süvenduseelsete tingimuste taastamine ebatõenäoline ilma inimese sekkumiseta, näiteks jämeda materjali ladestamiseta algse elupaiga

taastamiseks. (Crowe et al., 2016). Põhjameres muutis liiva kaevandamine jämeda liivaga elupaiku mudaseks, kus tagasitäite kiirus oli väga aeglane ja süvenduseelsele tasemele naasmine võib võtta sajandeid. Oportunistlikud liigid kipuvad häiritud alasid uuesti asustama, mis viib koosluse koosseisu nihkumiseni. Seda täheldati nii USA kaguosas kui ka Põhjameres, kus peenemate setetega seotud liigid muutusid levinumaks. (Mielck et al., 2021).

5 Materjal ja metoodika

5.1 Uuringuala üldiseloostus



Joonis 15 Uuringualade asukohad Pärnu lahes on näidatud helesiniste kastidega.

Pärnu jõe suue asub Liivilahe kirde nurgas, kus setete liikumine on peamiselt lõunast põhja. Pärnu lahel on sagedased läänetuuled, tsüklonid ja tormid, mis mõjutavad setete liikumist. Pärnu lahe setted liiguvad mõlemal pool Pärnu jõe suuet ning kogunevad sinna. Sadama kanali ummistuse vältimist ehitati 1860. aastal kaks 2,2 km pikkus sadamasilda, mõlemale poole jõe suudmest. Sellest on saanud võimas settepuüdja, mis on takistanud setete normaalset liikumist ning märkimisväärne osa liiva on jäänud muuli taha lõksu. (Tõnisson et al., 2024)

Varasemad üldisemad hinnangud näitasid, et liiva koguneb umbes 3000 m³ igal aastal sadamasillade ümber ja nende vahele on kogunenud umbes 100 000 m³ setet. Pärnu sadamasillad. Muulide vahele kogunenud liivakeha laius on 115 m (Joonis 16) ja see on alates 1999. aastast kasvanud 85 m võrra. Ülejäänud meretee laius on 110 m laiune süvendatud kanal. Suur osa liivakehast jääb alla vesi (keskmise merepinna korral) ja ainult selle lääneosa tõuseb üle merepinna. Selle liiva kasvuala on umbes 3,5–4 hektarit. (Tõnisson et al., 2024)



Joonis 16 Liivamadala kuhjekeha kontuurid 1999 aastal aprillis (punasega) ja aprillis 2022 (valgega) (Tõnisson et al., 2024)

5.2 Välitööd

Välitööd teostati 3 erineval korral. Kõrguspunktide ja 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 kuumutuskao ja lõimise analüüsiks.

2024 aasta sügisel võeti proove lõimise määratlemiseks Pärnu jõe suudmesse kuhjunud kuhjekehalt 0-15 cm sügavuselt. Proove võeti veest 17 tükki ja maapinnalt 2. Lisaks sellele mõõdeti kuhjekeha absoluutkõrgust ja peamisi piire.

2025 aasta hilistalvel võeti 35 proovi Valgerannast kaheksast eelnevalt määratletud profiilidelt 0-50 cm sügavuselt. Sügavus oli määratud savikihi ilmumisega. Samadest profiilidest mõõdeti uued absoluutkõrguspunktid. 2025 aasta kevadel võeti ühest puuraukust 19 proovi Pärnu jõe kuhjekeha kõrgemast osast. Setteid sondeeriti Valgeve tüüpi soopuuriga ja käsitsi opereeritava elektrilise vibropuuriga kasutades aknaga proovelit.



Joonis 17. Pärnu jõesuudme Liivamadala uuringuala puursüdamiku intervall 0-105 cm.



Joonis 18. Pärnu jõesuudme Liivamadala uuringuala puursüdamiku intervall 105-205 cm.

5.3 Lõimiseanalüüs

Setete terasuuruse määramine on vajalik selleks, et välja selgitada, kui kergelt toimub rannasetete liikumine tuule ja vee mõjul. Mida suurem on terasuurus, seda rohkem nõuab see energiat, et seda liigutada/mõjutada. Sette lõimise määramisel kasutati Udden-Wentworth'i terajämeduse skaalat (Tabel 1).

Tabel 1 Udden-Wentworth'i terajämeduse skaala (Last, 2001)

Iseloomustav termin	Osakeste diameeter			Suurusklass
	Φ-ühikud	mm	µm	
Teralised setted	0	1-2	1000-2000	väga jäme
	1	0,5	500	jäme
	2	0,25	250	keskmise
	3	0,125	125	peen
	4	0,0625	62,5	väga peen
Peened mineraalsed setted	5	0,03125	31,25	väga jäme
	6	0,01563	15,63	jäme
	7	0,00781	7,63	keskmise
	8	0,00391	3,91	peen
	9	0,00195	1,95	väga peen
	14	0,00006	0,06	savi

Lõimise analüüsimine koosnes kolmest osast:

1. Proovide kuivatamine- proovide kuivatamine 12 h 105°C kraadi juures.
2. Proovide orgaanilise koguse määramine- proovide kuumutamine 550°C temperatuuril, kuna valdav enamus orgaanilisest aineist põleb ära 450-500°C. Vältimaks orgaanilise aine leegiga põlemist tõstetakse temperatuuri iga 20 min järel 100°C võrra kuni 550°C. Proove hoitakse saavutatud temperatuuril nelja tunni vältel (Heiri et al., 2001). Proovid jahutatakse eksikaatoris toatemperatuurini ja kaalutakse. Orgaanilise aine sisaldus arvutatakse kuumutamiseelse ja järgse kaalu vahena.
3. Proovide lõimise määramine- Proovide sõelumine 1000µm ja 2000 µm sõelaga (mis on ühtlasi mineraalaine suurusklasside piirideks (Tabel 1). Väiksema kui 100 µm (antud töös 250, 125, 63, 32, 16, 8, 4, 2, 1 ja 0,1 µm fraktsioonid) osakeste mõõtmine analüsaator Mastersizer 3000' ga.
4. Terasuuruse statistikute leidmiseks kasutati programmi Gradistat, mis töötab Microsoft Exceli baasil (Blott & Pye, 2001), millega leiti terasuuruse jaotus, keskmine terasuurus, sorteeritus ja asümmeetria.

5.4 Profiilid, pindalalised muutused ja mudeldamine

Aerolaserskaneerimine (ALS) on meetod, mida kasutatakse õhusõidukilt tehtud LiDAR-mõõdistuste kirjeldamiseks. Aerolaserskaneerimine põhineb aja mõõtmisel, mis kulub laserimpulsil tee läbimiseks laserist maapinnani ja tagasi. Määraes skaneerimise ajal lennuki positsiooni maapealse GNSS-baasjaama suhtes kogu trajektoori vältel, saadakse lennuki täpne asukoht momendil, mil laserimpulss teele lähetati. Teades täpselt lennuki hetke asukohta (GNSS), asendit (IMU), impulsi lähetusnurka, impulsi kestust ja atmosfääri andmeid on võimalik välja arvutada laserpunkti peegelduse asukoht maapinnal. Maapinna peegeldustest moodustatud punktipilv on kõrgusandmestik, mis võimaldab teha topograafilisi, hüdroloogilisi jt analüüse. (Maa- ja Ruumiamet, 2025)

Maa- ja Ruumiameti punktipilvi analüüsi aastatest 2010, 2014, 2018, 2019, 2020, 2022 ja 2024. MapInfos võrreldi LiDAR kihtide profiile ning neid omakorda enda mõõdetud kõrguspunktidega. LiDAR kihtidega loodi ka ruumalade võrdlus aastate 2024 ja 2010 vahel, et näha millises osas on kuhje ja erosiooni alad. Ruumalade leidmisel kasutati MapInfo Professional rasterarvutuste paketti *Volume*. Andmepilved lõppesid mõlema aasta puhul veepiiril, mis tähendab, et veetalused erosiooni ja kuhje alad sellest infost välja ei tule.

Rannaprofiili all mõeldakse ranna kõrguse (alates püsivalt kamardunud alast) ja vee sügavuse muutumist rannajoonest avamere suunas. Selle kujunemist mõjutavad destruktiivsed jõud ja konstruktiivsed jõud (nt lainete poolt randa toodavad setted). Pikaajalised vaatlused on viinud teadmiseni, et rannaprofiil mingis konkreetses kohas võib olla mõjutatud tormide jõust, kuid pikema aja jooksul mõõdistatud profiilide keskväärtus püsib enamjaolt konstantsena ka siis, kui rannajoone asend märgatavalt muutub.

Profiilide võrdlemine annab nägemuse, kuidas on liivasetete asetus ajas muutunud ning kas eelnevalt on olnud setete positsioon ajas stabiilne ning hiljem muutunud.

Lisaks sellele loodi MapInfos mudel Pärnu jõe kuhjekeha asukohast ja kujust ning arvutati liivakeha ruumala kasutades MapInfo Professional rasterarvutuste paketti *Volume*. Mudeldamiseks kasutati enda mõõdetud kõrguspunkte ja Eesti Transpordiameti leviksonari kõrgusandmeid jõe põhjareljeefi kohta.

6 Tulemused

6.1 Setete akumulatsioon ja erosioon Valgerannas aastatel 2010-2025

6.1.1 Akumulatsiooni ja erosiooni alade jaotus aastatel 2010-2024

Maa ja -ruumiameti LiDAR kõrgusandmete võrdlus näitab, et ajavahemikus 2010 kuni 2024 on Valgerannas toimunud märkimisväärsed muutused sh nii setete erosioon rannavööndi lääneosas kui setete akumulatsioon ranna idapoolses osas (Joonis 18).



Kõrguste muutused meetrites aastatel 2010- 2024



Joonis 19 Setete kuhjumine ja erosioon Valgerannas aastatel 2010-2024 kasutades LiDAR andmeid. Taustaks 2024 aasta ortofoto (Maa- ja Ruumiamet 2025)

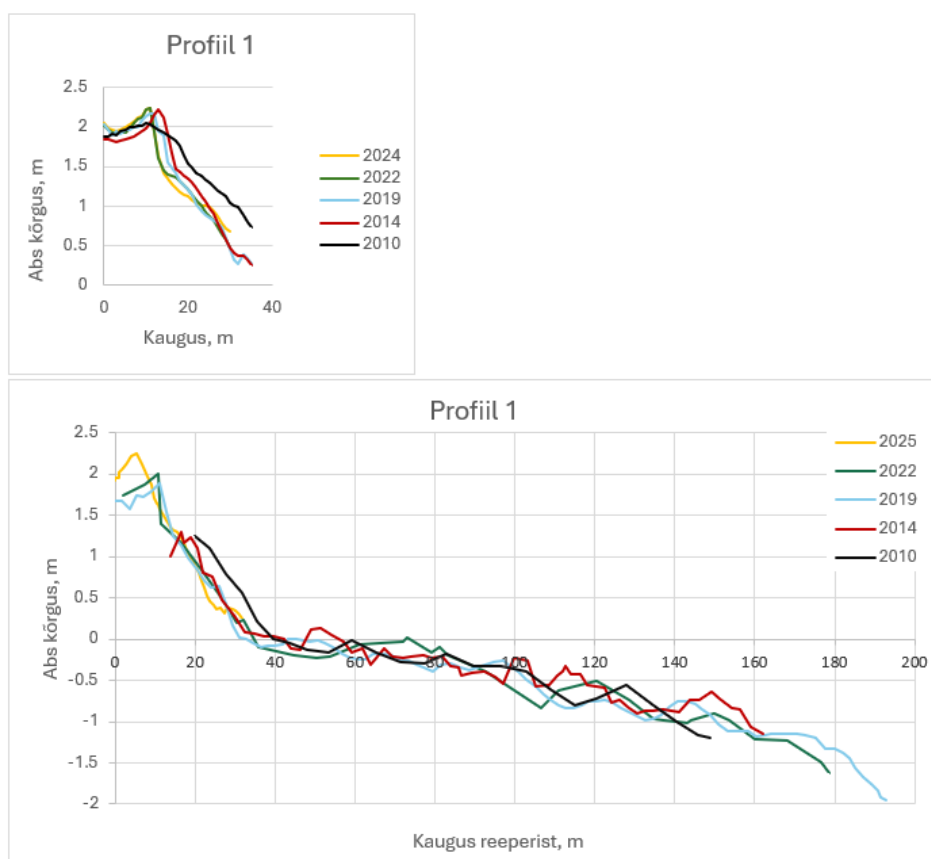
Setete erosiooniala jääb ranna läänepoolsele kahele kilomeetrile, kus erosiooni vertikaalne ulatus on maksimaalselt 3 meetrit. Peamiselt jääb erosiooni ulatus vahemikku -1,5 kuni 0 meetrit (Joonis 19, punased alad). Erosioonialast idas paikneb ligi 2 km pikkune pidev kuhje ala, kus setete akumulatsiooni ulatused küündivad kuni 2,7 meetrini (Joonis 19, sinised alad). Mudelarvutuse põhjal on läänepoolsel erosioonialal mahu kadu on $\sim 35\,000\text{ m}^3$ ning idapoolsele kuhje alale on kogunud $\sim 34\,000\text{ m}^3$ liiva. Mahuarvutuses on võetud arvesse muutuseid rannanõlval ja astangul ning esimesel luitevallil. Jooniselt 19 on samuti näha väiksemaid reljeefi muutuseid sisemaal, mis on arvatavasti tingitud setete kuhjest ja kulutusest eoolsete protsesside tulemusena ja paiguti ka inimtegevusest.

6.1.2 Ranniku muutused LiDAR ja RTK-GPS andmetel põhinevatel profiilidel

Valgeranna RTK-GPS mõõdistusprofiilid (profiilid 1-7) pärinevad aastatest 2010 kuni 2025 ning need mõõdistatud peamiselt (va profiil 4) uuringuala erosioonilisest lääneosast (Joonis 20) ning viimane idapoolsem profiilil muutub erosiooniline ala akumulatiivseks. Samadest asukohtadest on koostatud ka LiDAR andmetele tuginevad profiilid, mis on esitatud joonistel 21-24.



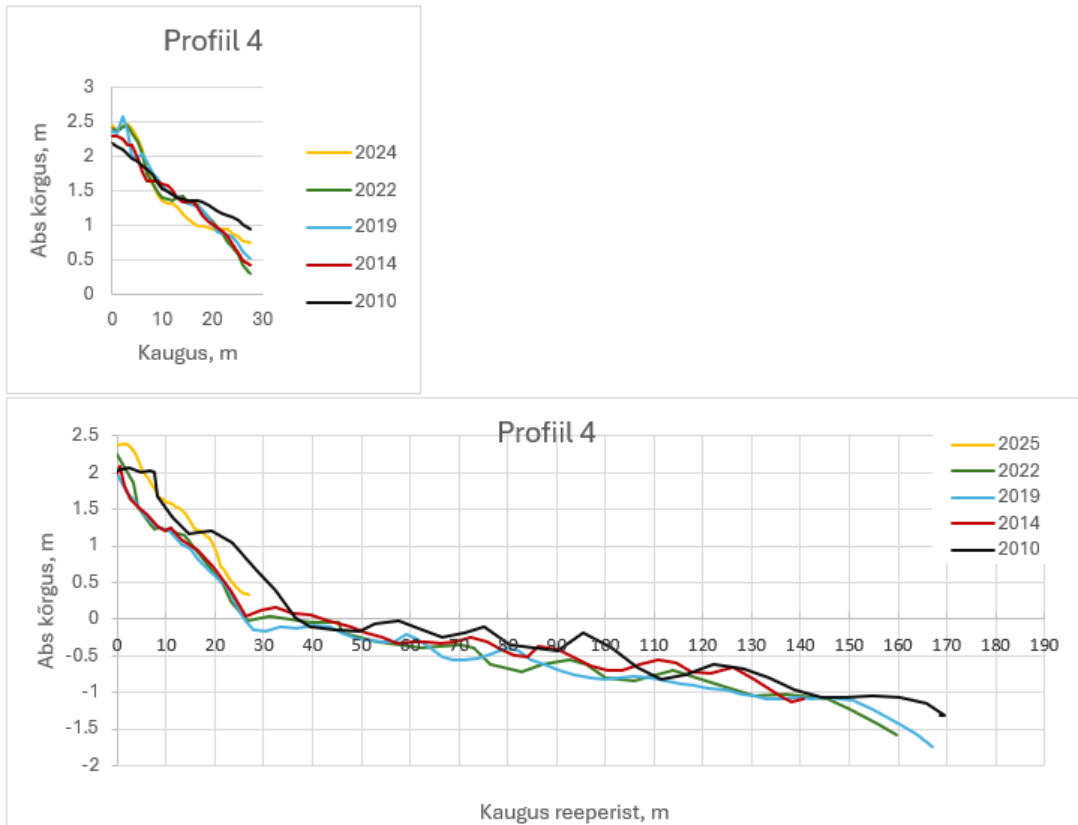
Joonis 20 Mõõdetud profiilide asukohad Valgerannas. Taustaks 2024 aasta ortofoto (Maa- ja Ruumiamet 2025)



Joonis 21 Valgeranna profiil 1. (a) Ülemisel joonisel on kasutatud LiDARi andmeid, alumisel (b) joonisel on kasutatud RTK GPS kõrguspunktide andmeid. Joonistel on näha rannaastangu taganemise trendi ning nõlva erosiooni.

Uuringuala kõige läänepoolsemas osas, profiilil 1, on LiDAR andmete põhjal 2 meetri absoluutkõrgusel paiknev rannaastangu nõlv taganenud aastatel 2010-2024 taganenud 1 meetri absoluutkõrgusel ligi 10 meetrit. Sama muutust viitab ka RTK-GPS'i andmete põhjal loodud

profiilid aastatel 2010-2025 (Joonis 21b). Mõlema andmepunktide põhjal on rannanõlva erodeerunud kihi paksus kuni 0.5 m. Jooniste 21-24 põhjal on näha, et leedseljaked alla 0 meetri absoluutkõrguse muutused on läbi aastate dünaamilised ning ei ole selget trendi.

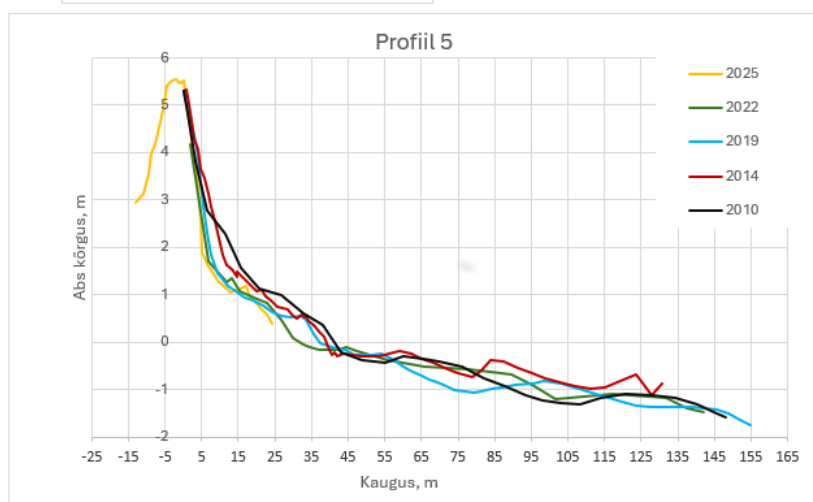
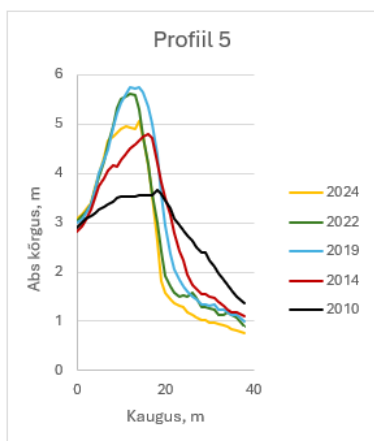


Joonis 22 Valgeranna profiil 4. (a) Ülemisel joonisel on kasutatud LiDARi andmeid, (b) alumisel joonisel on kasutatud RTK-GPS kõrguspunktide andmeid.

Profiil 4 asub idapool vahetult enne uuringualal asuva Dobermani kohviku jaoks loodud kaitsevalli. LiDAR andmete põhjal kuni 2.5 m absoluutkõrgusel paiknev rannaastang on taganenud aastatel 2010-2024 1 m absoluutkõrgusel ligi 10 meetrit ning astang on muutunud järsemaks. Samuti on profiililt näha astangu ees paikneva rannanõlva erodeerunud kihti 0,5 meetri ulatuses.

RTK-GPS andmetel tehtud joonis (Joonis 22b) näitab LiDAR andmete põhjal tehtud joonisest erinevat trendi. Täpsemalt seda, et kindel trend 2010 ja 2025 aasta vahel ei tule konkreetselt välja. Näha on rannanõlva taganemist 1 m absoluutkõrgusel ~5 m aastate 2010-2025 vahel ning maksimaalselt taganemissuurst 10 m aastate 2010-2022 vahel.

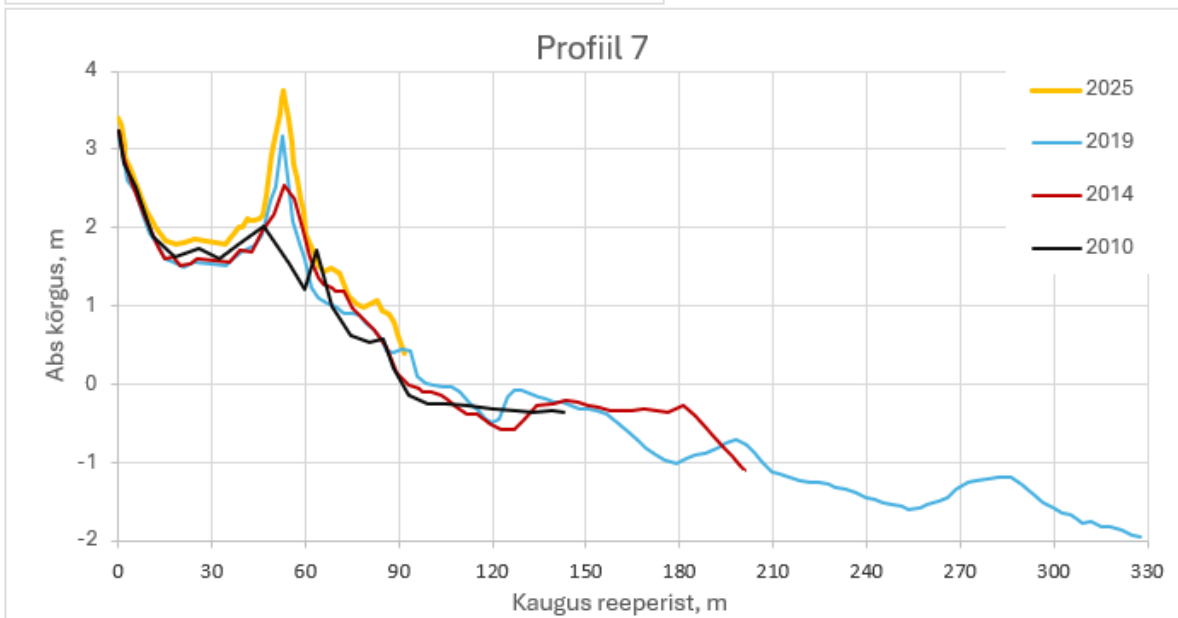
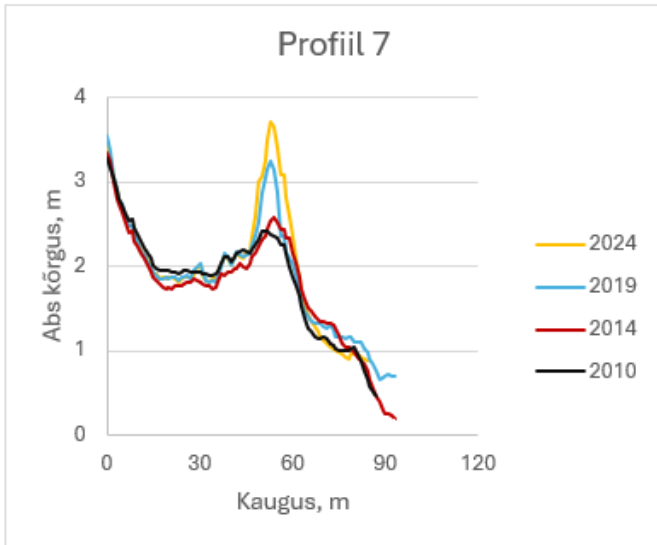
Kuigi LiDAR ja RTK GPS profiilide mõõdistused on toimunud mõnevõrra erinevatel aegadel on tulemused üsna hästi võrreldavad ja üksteist täiendavad.



Joonis 23 Valgeranna profiil 5. (a) Ülemisel joonisel on kasutatud LiDARi andmeid, alumisel (b) joonisel on kasutatud RTK GPS kõrguspunktide andmeid. Joonistel on näha rannaastangu taganemise trendi ning nõlva erosiooni. 2025 aastal on RTK GPS kõrguspunktide profiil eelnevate aastatega pikenenud.

Joonisel 23 on esitatud profiili 5 muutused 2010-2024 ja 2010-2025. Rannanõlva taganemine on LiDAR andmete põhjal 1,5 m absoluutkõrgusel ligi 20 meetrit. Erosiooni vertikaalne ulatus rannanõlval on kuni 1,5 m. LiDAR andmete järgi on luide kõrgenenud kuni 2 meetrit.

RTK-GPS punktide järgi on nõlva taganemine 1,5 m absoluutkõrgusel olnud 10 meetrit. RTK-GPS andmepunktid on põhja suunas liiga lühikesed, et näidata luide kõrguse arengut aastatel 2010-2025. Siiski tuleb joonisel 23b välja, et juba 2014 aastal oli luide absoluutkõrguseks 5,3 meetrit.

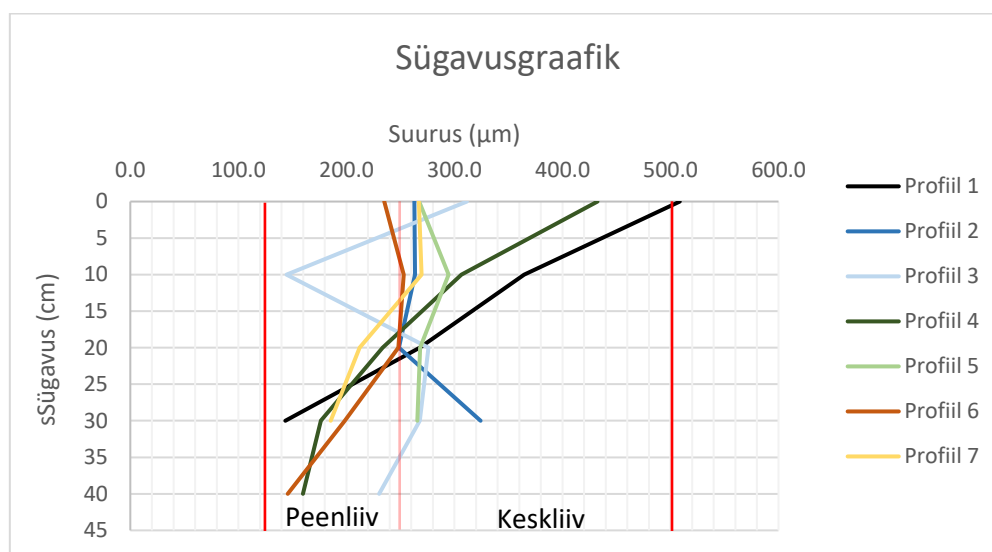


Joonis 24 Valgeranna profiil 7. (a) Ülemisel joonisel on kasutatud LiDARi andmeid, (b) alumisel joonisel on kasutatud RTK GPS kõrguspunktide andmeid. Joonisel on näha profiilil asuva luute kõrgenemist aastatel 2010-2025 ning nõlva ees toimuvat akumulatsiooni.

Profiili 7 andmetest on näha, et siin on rannanõlva erosioon (Joonis 21-23) asendunud akumulatsiooniga (Joonis 24). LiDAR andmetel põhinev joonis näitab aastate 2010-2024 vahel on rannikuluide kõrgenenud ligi 1 meetri. Rannanõlva nihe ei tule joonise 24a järgi välja.

RTK-GPS andmetel põhjenv joonis näitab aastate 2010-2025 vahel on rannikuluide kõrgenenud ligi 2 meetrit. Lisaks sellele on luute ees nõlv nihkunud lõuna (mere) suunas 1 meetri absoluutkõrgusel kuni 10 meetrit.

6.2 Rannaliivade lõimis Valgerannas



Joonis 25 Valgeranna rannandõlva setteproovide keskmised terasuused ja selle muutused sügavusprofiilidel.

Valgeranna rannandõlva setete keskmised terasuused ja selle muutused sügavusprofiilidel on esitatud joonisel 25. Jooniselt on näha, et rannaliivade terasuused vähenevad sügavuse suunal (Joonis 25). Seajuures eristuvad kaks rühma sügavusprofiile. Sügavusprofiilides 1 ja 4 on keskmise terasuuse muutuse kõige suuremad. Rannandõlva pindmise 5 cm osa moodustavad siin halvasti sorteeritud kesk- ja jämeliivad ($380\text{--}509\ \mu\text{m}$) ning profiili sügavamas osas (alates 25 cm sügavusest) on tegemist juba keskmiselt sorteeritud peenliivadega ($143\text{--}230\ \mu\text{m}$).

Sügavusprofiilides P 3,5,6,7 on terasuuste vähenemine sügavuse suunal väiksem ning P 2 suureneb keskmine terasuurus mõnevõrra sügavuse suunas.

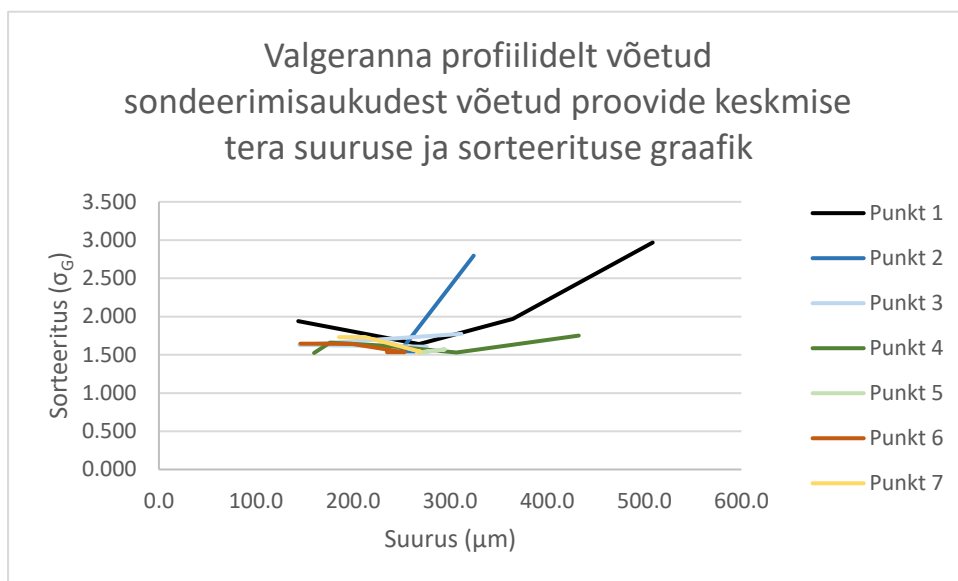
Sügavusprofiilil 3 puudub võrreldes teiste setteproovidega konkreetne trend, st kõige väiksem keskmine terasuurus on sügavusel 10 cm ja sealt edasi see suureneb $276\ \mu\text{m}$ -ni.

P6 ja P7 ülemises kuni 10 cm sügavuses kihis on terasuurus kuni $269\ \mu\text{m}$ ning peamiselt on tegemist peenliivaga, sejärel väheneb keskmine terasuurus sügavuse suunas kuni $150\text{--}185\ \mu\text{m}$ -ni.

Peamiselt on keskmise sorteeritusega liiv üksikute eranditega – P 2 kiht 30-40 cm ja P 7 kiht 30-40 cm.

Väiksemate kui $63\ \mu\text{m}$ osakeste (aleuriit ja savi) sisaldused olid märkimisväärsed sügavusprofiilil 1 30-40 cm sügavusel - 7,29% ning sügavusprofiilil 2 30-40 cm sügavusel - 3,05 %. Lisaks sellele on sügavusprofiilidel 5 ja 7 sügavusel 40-50 cm ja sügavusprofiilil 4 sügavusel 10-20 cm $<63\ \mu\text{m}$ sisaldus 1,5-2,2 % vahele. Ülejäänud kihtides jäi sisaldus alla 1%.

Orgaanilise aine sisaldused on kõikides Valgeranna proovides väga madalad, kus maksimumväärtused jäävad 1% juurde (P 2 sügavusel 30-40 cm). %.



Joonis 26 Valgeranna rannanõlva setteproovide keskmised terasuurused ja sette sorteeritus. .

Valgeranna liivad on keskmiselt või keskmiselt hästi sorteeritud, eranditega sügavusprofiilides 1 ja 2, kus suuremate terasuuruste puhul on sete halvasti sorteeritud. Üldjuhul ei varieerunud setete sorteeritus keskmise terasuurusega võrreldes (Joonis 26).

6.3 Pärnu jõesuudme Liivamadala kuhjekeha ehitus ja kvaliteet

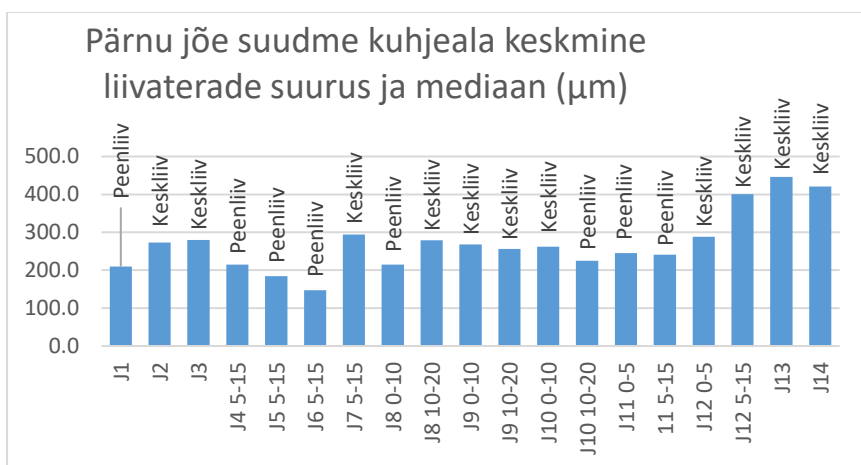
Pärnu jõesuudme liivakeha ehituse ja kvaliteedi määramiseks võeti proove pindmistest kihtidest (0-20 cm) ja ühest puuraugust (Joonis 27).

Mudeldamiseks kasutati LiDAR andmepilve, Transpordiameti andmeid ning RTK GPS'iga mõõdetud kõrguspunkte.

6.3.1 Liivamadal setted



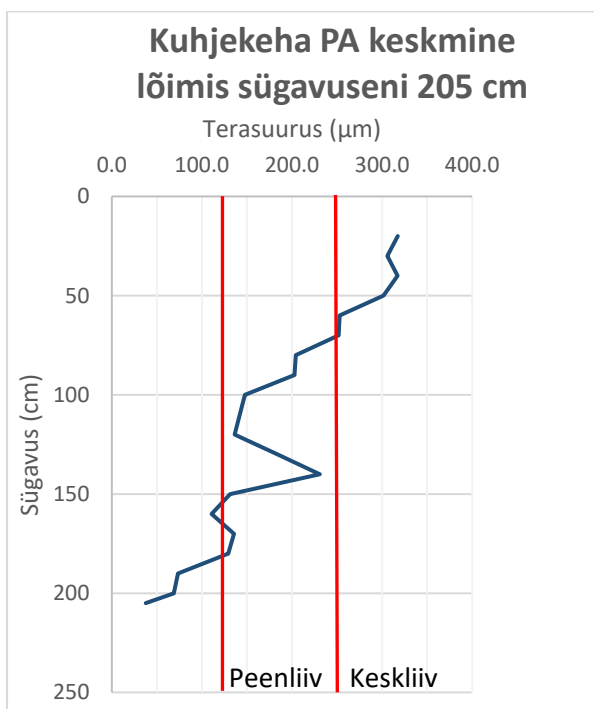
Joonis 27 Pärnu jõe Liivamadala kuhjeala reljeefi mõõdistuspunktid ja settproovide (J1-J10) asukohad Maa ja –Ruumiameti 2024. A. ortofoto taustal.



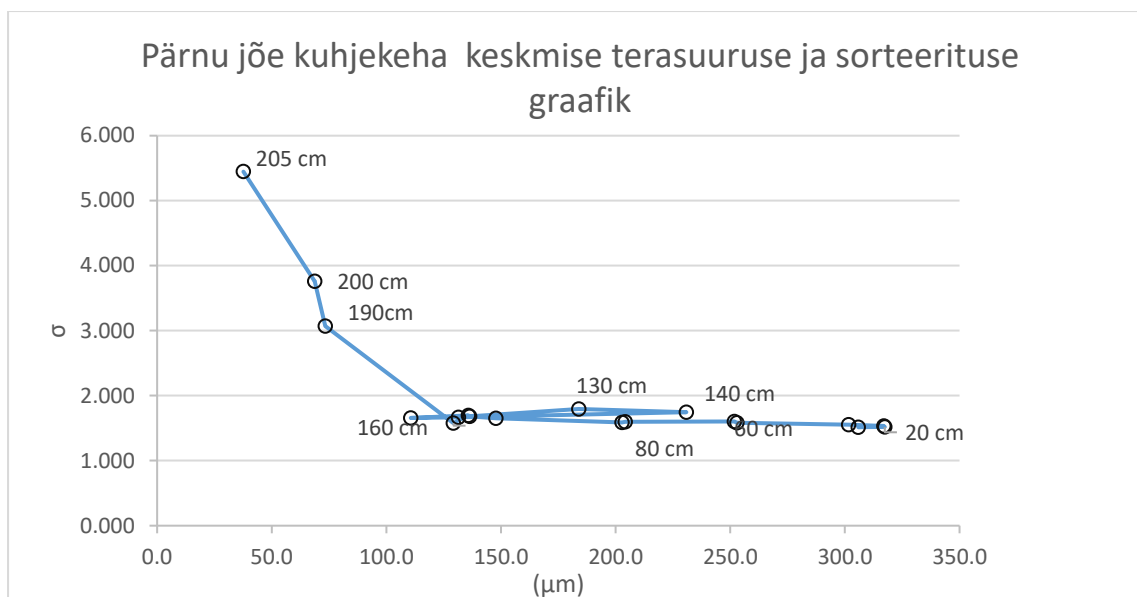
Joonis 28 Pärnu jõe Liivamadala kuhjeala setete keskmised terasuurused mikromeetrites. Proovid on võetud 0-20 cm sügavuselt.

Pärnu jõesuudme Liivamadala kuhjeala (Joonis 27) setete ülemise osa (0-20 cm) setete keskmised terasuurused on esitatud joonisel 28 ning liivade lamamini ulatunud sondeerimise

setete keskmised terasuured ja sorteeritus joonistel 29 ja 30. Liivamadala ülemise osa moodustavad suhteliselt ühtlase koostisega peen- ja keskliivad mille keskmised terasuured jäävad vahemikku 150-300 μm . Võrrelduna Liivamadalast läände jäävate rannasetetega (J 13-14) on Liivamadala liivade terasuurus mõnevõrra väiksem. Punktides J5 5-15 ja J10 0-10 on halva sorteeritusega liiv. Punktides J7 5-15, J8 10-20 ja J9 0-10 on keskmiselt hea sorteeritusega liiv. Ülejäänud punktides on keskmise sorteeritusega liiv. Kõige peenema fraktsiooniga liiv asub punktis J6 5-15, mis asub kuhjekeha rannapoolses osas, seal on vähem laine ja vee liikumist ning see tõttu püsivad väiksemad fraktsioonid paremini. Samadel põhjustel on punktis J1 ja J5 peenliiv.



Joonis 29 Pärnu jõe kuhjekeha puuraugust võetud proovide keskmine lõimis sügavuseni 205 cm. Viimase sügavuse määras savi ilmumine.



Joonis 30 Pärnu jõe kuhjekeha puuraugust võetud proovide sorteerituse võrdlus vastaval keskmise terasuurusega. Lisatud on proovide sügavused

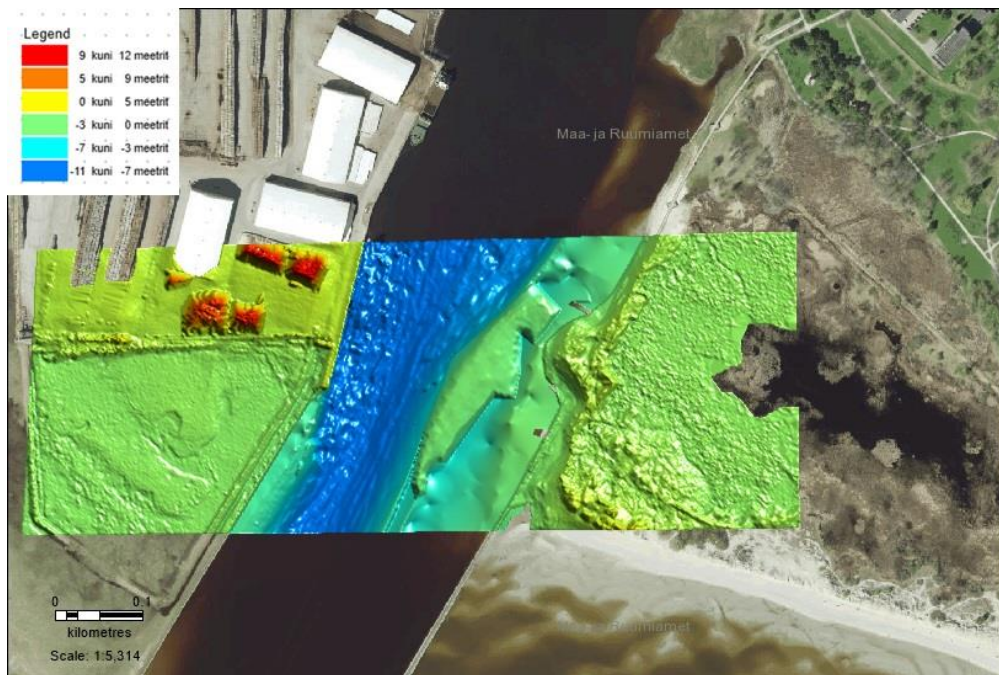
Puursüdamikust setteläbilõike kõige ülemise 50 cm osa moodustavad beezid kihitamata keskmiselt hästisorteeritud keskliivad mille keskmised terasuurused jäävad vahemikku 302 kuni 317 μm (Tabel 2, Joonis 30). Selle all, sügavusel 50-80 cm, lamavad hallikasbeezid keskmiselt hästisorteeritud mõningase orgaanika sisaldusega (1,8-2,6%) kihitatud kesk- ja peenliivad (Tabel 2). Sette keskmised terasuurused vähenevad selles kihis sügavuse suunas jäädes vahemikku 252-204 μm (Tabel 2). Järgmise settekihi (80- 140 cm) moodustavad orgaanikaga kihitatud ja keskmiselt sorteeritud hallikasbeezid peenliivad. Orgaanilise aine sisaldused vähenevad liivakihis üldiselt sügavuse suunas, jäädes vahemikku 2,3-0,1% (Tabel 2). Sügavusel 140 kuni 180 cm esinesid beezid, keskmiselt kuni keskmiselt hästi sorteeritud, kihitatud peene ja ülipeene teralised liivad keskmise terasuurusega 136 kuni 110 μm . Orgaanilise aine sisaldused vähenevad liivakihis sügavuse suunas, jäädes vahemikku 0,2-0,0% (Tabel 2). Selle all, sügavusel 180 kuni 200 lamavad beezid massiivsed aleuriitliivad keskmise terasuurusega 73 kuni 69 μm . Liivade lamamiseks (200-205 cm) on pruun jääjärveline viirsavi, kus vahelduvad savikad talvekihid ja aleuriitsed kevad-suve kihid.

Kogu uuritud läbilõike ulatuses vähenevad seega keskmised terasuurused sügavuse suunas (Joonis 29). Randade tagasi täitmiseks võiks eelkõige olla sobilik setteläbilõike ülemine 160 cm, kus tuleb aga arvestada liiva mõningase orgaanilise aine sisaldusega (1,8 –2,3%) sügavustel 50 kuni 90 cm (Tabel 2).

Tabel 2. Uuritud puursüdamikü kirjeldus koos lõimise ja kuumutuskaotuse analüüsi tulemustega.

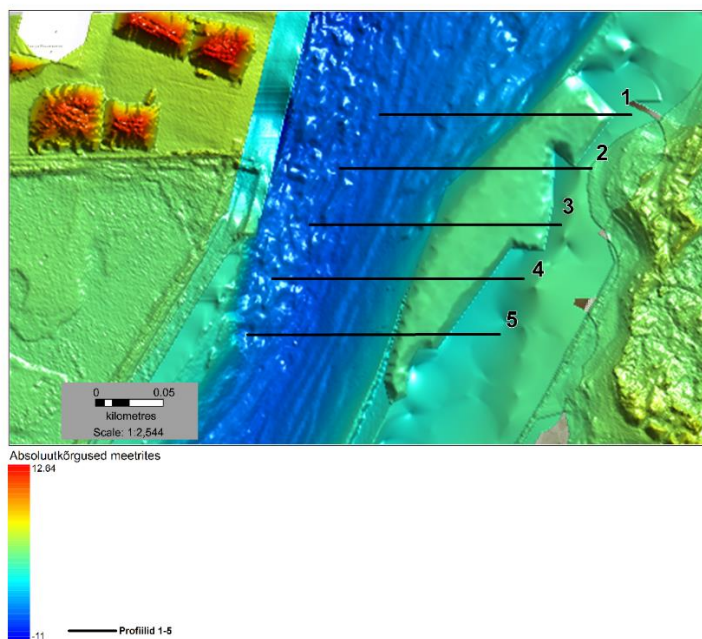
Sügavus (cm)	Keskmine terasuurus (µm)	Aleuriidi ja savi (< 63 µm) sisaldus, %	Sorteeritus	Org aine sisaldus, %	Settekihi sügavus ja kirjeldus
10-20	317,4	0,0	1,5	0,2	(0-50 cm) Beez keskmiselt hästisorteeritud keskliiv
20-30	305,8	0,0	1,5	0,2	
30-40	317,0	0,0	1,5	0,1	
40-50	301,7	0,0	1,6	0,1	
50-60	252,8	0,0	1,6	1,8	(50-80 cm) Hallikasbeez keskmiselt hästisorteeritud kihiline kesk- ja peenliiv orgaanikaga
60-70	251,8	0,1	1,6	2,3	
70-80	204,1	0,0	1,6	2,6	
80-90	145,2	1,8	1,7	2,3	
90-100	147,8	1,7	1,7	1,3	(80-140 cm) Hallikasbeez keskmiselt sorteeritud peenliiv kihitatud orgaanikaga
100-110	136,4	3,9	1,7	0,7	
120-130	183,9	1,0	1,8	1,4	
130-140	230,8	0,9	1,7	0,1	
140-150	131,5	4,5	1,7	0,2	(140-180 cm) Beez peene- ja ülipeeneteraline liiv, keskmiselt kuni keskmiselt hästi sorteeritud
150-160	110,6	9,5	1,7	0,2	
160-170	135,7	4,9	1,7	0,0	
170-180	129,2	3,3	1,6	0,0	
180-190	73,3	27,5	3,1	0,0	(180-200 cm) Beez massiivne aleuriitliiv
190-200	68,7	26,3	3,8	0,0	
200-205	37,6	41,6	5,4	0,0	(200-205 cm) Pruun viirsavi

6.3.2 Liivamadala reljeefimudel ja liiva mahu hinnang



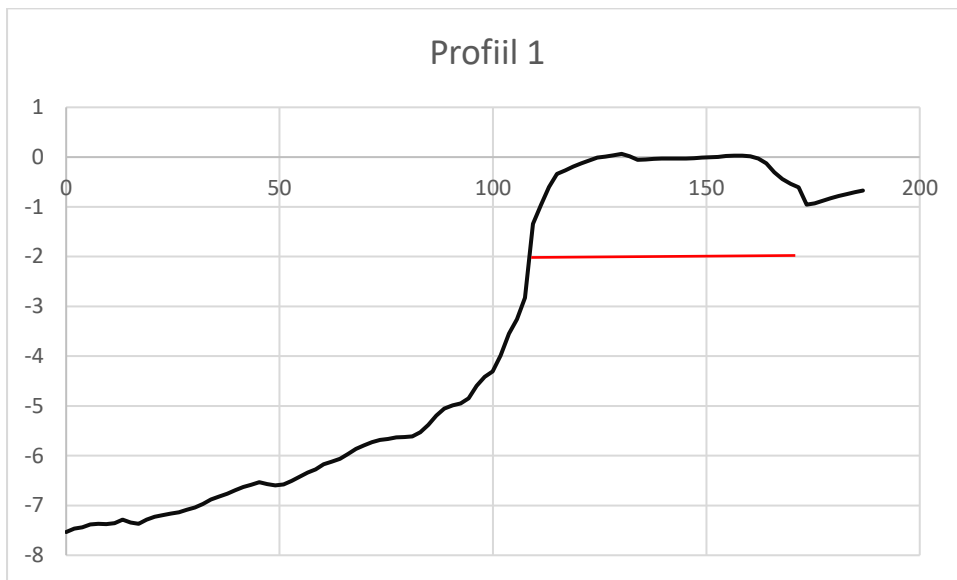
Joonis 31. Liivamadala kuhjekeha reljeefimudel.

Uuringuala reljeefimudel, kus Liivamadala RTK-GPS mõõdistusandmed (Joonis 31) on kombineeritud jõepõhja lehviksonari ja LiDAR andmestikega on esitatud joonisel 31 ja 32 ning reljeefiprofiilid üle Liivamadala kuhjekeha joonistel 33-35. Kuhjekeha pikkus on 260 m ja keskmine laius 57 m. Kuhjekeha idaosa on märkimisväärselt süvendatud ning reljeef langeb siin järsult ulatudes jõe keskosas sügavuseni - 8 m.

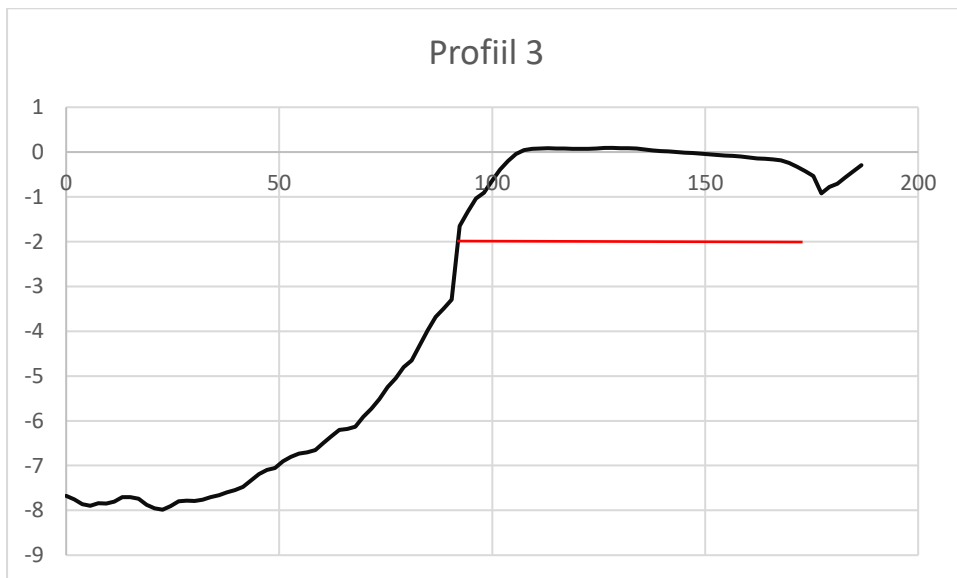


Joonis 32 MapInfos liivakehast mõõdetud profiilide asukohad

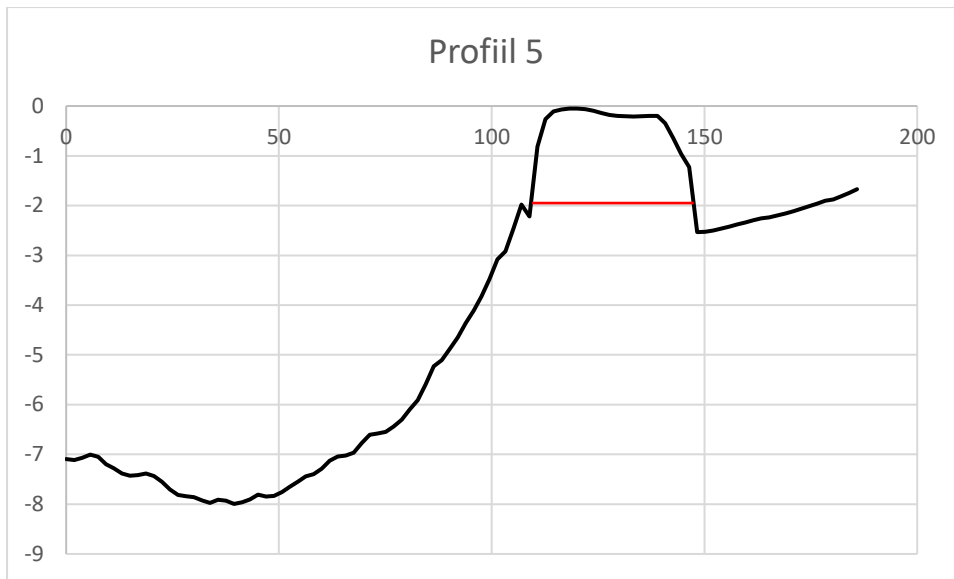
Liivamadala kuhjekeha sondeerimise tulemusel paikneb selle lamam absoluutkõrgusel - 2 m ü.m.p. ning liivade lamamiks on jääjärveline viirsavi. Liivakeha maht on 20676 m³ ning see on arvutatud kuni viirsavi ülemise pinnani. Kuhjekeha kõrgem pool asub veetee poolses osas (läänepool) ning on kuni 20 cm kaldu ida poole ning sellele järgneb süvendatud ala. Profiilidelt 1-5 (Joonised 33-35) on näha läänepoolset järsku langust. Kui arvestada, et kasulikku kihti oli ligi 160 cm, siis täiteliivana on kasutatav maht ligi 16000 m³



Joonis 33 Liivamadala kuhjekeha profiil 1 koos lamami paiknemisega.



Joonis 34 Liivamadala kuhjekeha profiil 3 koos lamami paiknemisega.



Joonis 35 Liivamadala kuhjekeha profiil 3 koos lamami paiknemisega.

7 Arutelu ja järeldused

7.1 Merevee taseme muutused Pärnu lahes, rannikute erosioon ja randade tagasitaimise vajadus Valgerannas

Pärnu lahes on viimase sajandi jooksul merevee taseme tõus ületanud maakerke kiirust umbes 20 cm võrra. Samas, kui eelnevatel sajanditel on suhteline meretase siin ja ka mujul Eesti rannikualadel alanenud (Kapsi et al., 2023). See tähendab, et piirkonnas suurenevad üleujutus- ja erosiooniriskid, seda eriti tormide ajal. Merepinna tõusuga seotud probleemid, mida seni on rohkem seostatud Läänemere lõunarannikul, on nüüd aktiivselt jõudmas ka Pärnu lahe piirkonda, tõstatades vajaduse erosiooni poolt mõjutatud randade tagasitaitmiseks (Tõnisson et al., 2023). Valgeranna seiretulemuste analüüs näitas, et ranna lääneosas on aastatel 2010-2024 rannajoon taganenud keskmiselt 0,8 m aastas ning et sellel ajavahemikul on rannast ära erodeeritud ligi 35 000 m³ liiva. Paiguti on rannanõlva veealusest osast liivakad setted sootuks kadunud ning paiguti paljandub merepõhjas moreenikiht (Tõnisson et al., 2023). Samas on ranna idaosas ajavahemikul 2010 kuni 2024 näha liivade akumulatsiooni nii rannanõlvale kui ka eesluitesse. Merevee taseme tulekuprognoosid näitavad, et Pärnu lahes võib veetase sajandi lõpuks tõusta ligi 60 cm, mis arvatavasti suurendab oluliselt erosiooni nii Valgerannas, kui ka teistes Pärnu lahe liivarandades.

Valgerand on populaarne puhkeala, mille kadumine mõjutaks tugevalt piirkonna turismi ja kohalikku majandust, mistõttu on oluline võtta kasutusele meetmeid Valgeranna lääneosa rannavööndi tagasitaimiseks. Üheks võimaluseks ranna kaitsmisel on välja pakutud eskiisprojekt buunide rajamiseks ja ranna tagasitaitmiseks (Tõnisson et al., 2023), mis näeb ette ranna tagasitaitmiseks vajalikud liiva kogused, mis peaksid olema sarnased erosiooni poolt kulutatava liiva kogustega. Käesolevas töös hinnati erodeeritud liiva kogumahuks aastatel 2010-2024 35 tuhat m³, mis teeb aastaseks erosioonimahuks keskmiselt 2,5 tuhat m³. Seega kui arvestada tagasitaitmise intervalliks ~5 a (Valgerannale sobiva intervalli leidmiseks on vaja teha täpsemaid arvutusi) (Kribel, 2008) oleks ühe tagasitaitmise mahuks ligi 12,5 tuhat m³. Eskiisprojekti kohaselt on ranna taastamiseks vajamineva liiva hinnanguline kogus 30 tuhat m³ (Tõnisson jt., 2023). Kõige olulisem on just taastada Dobermani kohvikust lääne poole jäävad alad, kus erosiooni tõttu hävineb mets ning merepõhjas paljanduvad moreenikihid. Kuid tagasitaitmine võib olla ajutine kohanemine kliimamuutuste mõjudele, kui ei otsita püsivamaid lahendusi. Ilma pideva hoolduseta võib liiv taas kaduda ning „liiva pumpamine“ muutub kulukaks ja lõputuks protsessiks. Selleks, et projekt oleks tõhus, on hea leida näiteid Lääne-

Euroopast, kus on vaeveldud merevee tõusuga ligi sada aastat. Suured projektid nagu Zandmotor ja Oostende, kus on rakendatud randade täiendamist, et taastada rannajoont ja kaitsta infrastruktuure tõusva meretaseme ja tormide eest. Nendes projektides on kasutatud jätkusuutlike meetodeid, näiteks looduse enda jõudu ning loodussõbralikke tehnikaid ranniku säilitamiseks. Liiva on lisatud strateegiliselt, et toetada looduslikku setete liikumist ning rannavallide teket, mis toimivad looduslike tõketena.

7.2 Valgeranna liivade lõimis ja tagasitõitmiseks sobivate liivade kvaliteedinäitajad

Valgeranna täitmise kvaliteedi hindamiseks on oluline analüüsida mitmeid tegureid, mis mõjutavad liiva ja teiste täitematerjalide sobivust ranniku kaitseks ja erosiooni vähendamiseks.

Tagasitõitmiseks kasutatava liiva keskmine terasuurus peaks olema sarnane rannas leiduva loodusliku liivaga, et tagada vastupidavus ja vähendada selle ära kandumist (Hannes et al., 2023). Väiksemad terad ranna merepoolses osas ja suurema lõimisega rannajoonel võivad stabiliseerida ja minimeerida erosiooni probleemi. Valgeranna veepealselt rannanõlvalt kogutud ja analüüsitud liivaproovid näitavad, et rannanõlva pindmises osas (0-25 cm) esinevad peen- kuni keskliivad, kus valdavalt jääb keskmine terasuuruse vahemikku 200-300 μm (üksikutes proovides ka 400-500 μm), ning et sügavamas osas väheneb keskmine terasuurus mõnevõrra, jäädes c. 200 μm ümbrusse. Savi ja aleuriidiosakeste sisaldused on rannasetetes väga madalad, jäädes reeglina alla 2 %.

Võrreldes Valgeranna ja Pärnu jõesuudmes paikneva Liivamadala liivade lõimiseid võib öelda, et mõlemad on üsna sarnase keskmise terasuurusega. Samas vähenevad Liivamadala kuhjekeha keskmised terasuurused sügavuse suunas oluliselt, jäädes sügavusetel 1-1,5 m vahemikku 125-160 μm . Kogu Liivamadala kuhjekeha liivasid ei saa kasutada, kuna alumistes kihtides (160-205 cm) on liiga peene liiv. Ebapiisavalt valitud täitematerjalid või valed täidete paigutamise meetodid võivad põhjustada tõsiseid keskkonnaprobleeme, sealhulgas liiva ebahühtlane jaotumine, mis võib kahjustada kohalikke liike ja nende elupaiku. Näiteks, kui liiv ei vasta looduslike setete koostisele, võib see muuta randade mikrokliimat ja vähendada sobivust taimedele ning loomadele, kes on sõltuvad looduslikest tingimustest, näiteks kui orgaanika sisaldus on liiga suur. Orgaanikasisalduse osas on kuhjekeha liiv piisavalt puhas, maksimaalsed väärtused jäävad all 2% (valdavalt alla 1%) Lisaks sellele näitavad kuhjekeha keemilised analüüsid, et setted piirkonnas on väga puhtad. Mõõdetud oli keemilistest elementidest Cd, Cr, Ni, Pb; Sr, Zn, Cu. Peale selle mõõdeti saasteaineid nagu antratsiin,

atsenaften; atsensfüleen; naftaleen, püreen jne (Tõnisson , et al., 2023). Peale selle on oluline aspekt savi ja aleuriidiosakeste sisaldus liivas. Kui liiva võetakse merest, siis võib süvendamisel uue liiva hulka sattuda saviosakesi, mis rannale sattudes häirivad sealset ökoloogilist tasakaalu (Tõnisson et., 2023). Pärnu kuhjekeha väiksemate kui 63 µm suuruste osakeste osakaal kuni 150 cm sügavuseni alla 1 %.

Kokkuvõtteks saab Valgeranna tagasitäitmiseks kasutada kuhjekeha pealmist, kuni 1,6 meetrist settekihti, liiva ruumalaga 16 000 m³-ni (kogu liivakeha ruumala on ligi 20600 m³). Arvestades erosiooni ulatust Valgerannas piisaks sellest materjalist ligi 6 aasta vajaduseks (2500 m³).

Liivamadala kuhjekeha on kujunenud Pärnu jõe suudmesse viimase ligi 25 a jooksul (Joonis 16) ning selle ülemise 1,6 m kihi eemaldamisel jätkuks arvatavasti selle settekeha taastumine nii üle Pärnu jõe muuli liikuvate eolsete, kui ka Pärnu jõest tulevate setetega.

Liivamadala jätkuv toitumine võimaldaks sellest liiva ammutada ka edaspidi, kuid arvutused näitavad, et Valgeranna täielikuks toitmiseks võib olla sealne varu ja selle taastootmine olla ebapiisav.

7.3 Valgeranna tagasitäitmine

Nagu eelnevalt mainitud, siis umbkaudne vajaminev kogus Valgeranna täitmiseks on 35 000 m³ liiva ning kuhjekehas on vastavalt käesolevale uuringule kasulikku mahtu 16 000 m³. KIK'i poolt rahastatud projekti (Tõnisson et al., 2023) tulemuseks oli ligi 50 000 m³, kuid selles projektis ei ole arvestatud kaitseala ja vana muuliga ning kuna töid teostati tigupuuriga, siis selle meetodi puhul on suurem risk reostuseks, mille käigus ülemised kihid võivad langeda alla poole. Seega võib reaalne liiva ja savi piir erineda tegelikkusest, mis tähendab, et liivakeha vertikaalne ulatus on tulemustest väiksem.

Üheks võimaluseks on Valgeranna toitmiseks vajaliku liiva toomine kaugematelt aladelt, kuid see võib-olla kulukam ning keskkonnakahjulikum, arvestades transportimise jalajälge, mistõttu kohalik ressurss on kindlasti parem lahendus. Võimaluseks oleks uurida ka Audru jõe suudmesse tekkinud settekeha. Lisaks selle kui liiv on pärit sama piirkonna looduslikest vooludest ja setetest, siis ei too see ökosüsteemile suuri häireid. Kuigi Pärnu jõe suudme piirkond võib olla elupaik paljudele liikidele, siis liiva liigse kuhjumise tõttu võivad tekkinud alad olla keskkonnale ebameeldivad. Seega võib liiva kasutamine ranna tagasitäitmiseks aidata tasakaalustada liiva kogunemise probleemi ja aitab kasutada loodusesse sattunud liiva õigemal

viisil. Valgerannas on näiteks palju väikseid rannakarpe, mis eelistavad peenemat vähese orgaanikaga ainet, mis tähendab, et kuhjekeha liiv ei mõjutaks nende elutegevust palju.

Tänases hetkes on mööda vett transportimine kulukam kui mööda maad (Hannes et al. 2023). Üks võimalusi oleks kasutada pinnasepumpsüvendajat, mille settebasseini maht on 12 000 m³. Kaevandamine pinnasepumpsüvendajaga toimub järgmiselt: pinnasepumpsüvendaja sõidab töö piirkonda, kus ta laseb vette torustiku, mille otsas on süvenduspea. Vee survesüsteemi abiga lõikab ning kulutab süvenduspea pinnasekihti ning pumpab selle läbi torustiku settebasseini. Korruga pumbatava kihi paksus on 0,3 kuni 0,4 meetrit. Settebasseinis pinnas settib ning vesi eemaldatakse ülevoolusüsteemi abil. Peale laeva täislaadimist tõstetakse süvenduspea üles ning laev sõidab soovitud pinnase paigalduskohta (laeva liikumiskiirus täislastis 13 sõlme), kus avatakse settebasseini põhi ning pinnas kaadatakse või pumbatakse torustiku kaudu soovitud alale. Kui settebassein on tühi, naaseb laev kaevandamiskohta ning jätkab tööd. (Altakon, 2008). Sellise meetodi puhul peaks tegema kaks otsa pinnasepumpsüvendajaga või kasutama lisaks pumpamisele 40 veokit.

Eestis on uuritud veel mitmeid rannikumere maardlaid, millest Nasvas, Kõpus ja Hiiumadalas on ka enamjaolt täiteliiva tingimusi täitev materjal. Lisaks sellele on põgusalt uuritud ka teiste leiukohtade ja kuhjealade kasutusperspektiive (Tõnisson et al., 2023), kus tulevikus saaks kasutada sama metodoodikat ja lahendusi randade tagasitaitmiseks.

7.4 LiDAR kõrgusandmete kasutamine randade seires

Käesolevas töös kasutatud LIDAR-kõrgusandmed on väärtuslik tööriist rannikuprotsesside, sealhulgas erosiooni ja setete liikumise seireks, võimaldades hinnata ranna geomeetrisi ja mahulisi muutusi ajas. Valgeranna piirkonnast on olemas Maa ja Ruumiameti andmed aastate 2010, 2014, 2017, 2019, 2021 ja 2023, kusjuures aastate 2018-2024 kohta on olemas ka kõrgema täpsusklassiga (18 p/m²) tiheasustusosalade andmed.

Kuid Valgeranna kontekstis on oluline rõhutada, et LIDAR-andmed katavad ainult maismaa ala. Kuna erosioon ja akumulatsioon toimuvad olulisel määral just veepiiri lähedal ja madalal rannanõlval, on veealuse osa andmed rannikuprotsesside mõistmiseks vältimatud.

Kuigi RTK-GPS profiilid (nt profiilid 1–7) võimaldavad ajas jälgida rannajoone ja rannaastangu muutusi, annavad just veealust osa hõlmavad mõõdistused täpsema pildi setete liikumisest ning erosiooni/akumulatsiooni ulatusest. Seetõttu on oluline täiendada LIDAR-andmeid kas sonaripõhise batümeetria või veealuse LIDAR-iga (nt topo-bathy LIDAR), et saada täielik ja usaldusväärne ülevaade kogu rannaprofiili arengust.

Kokkuvõttes saab öelda, et olemasolevad LIDAR-andmed on kasulikud kuivale jäävate alade muutuste analüüsimiseks, kuid terviklikuks seireks ja meetodiliselt täpseks hinnanguks on vajalik ka veealuse osa katmine, ilma milleta jääb rannaprotsesside dünaamika osaliselt kirjeldamata.

7.5 Järeldused

- Valgeranna läänepoolses osas on aastatel 2010 kuni 2025 toimunud märkimisväärne erosioon ja rannaastangu taganemine ligi 7-10 m ulatuses. Samal ajal on toimunud idapoolses osas aset leidnud luidete kasvamine ligi 2 m ja rannanõlva liivakihi paksuse suurenemine. LiDAR andmetele tugineva mudelarvutuse põhjal on läänepoolsel erosioonialal liiva mahu kadu olnud aastatel 2010-2024 ~35 000 m³ ning idapoolsele kuhje alale on kogunenud selle ajaga ~34 000 m³ liiva.
- Valgeranna veepealsel rannanõlval levivad peen- ja keskliivad mille terasuurused jäävad valdavalt vahemikku 200-300 µm. Valgeranna erosiooniala tagasitaitmiseks võiksid sobida Pärnu suudmes paikneva Liivamadala kuhjekeha ülemise osa (kuni 160 cm) peen ja keskliivad, mis on sarnase terasuurusega. Liivamadala alumise osa (160-205 cm) ülipeened liivad ei ole aga randade tagasitaitmiseks sobilikud.
- Liivamadala piires leiduva peen- ja keskliiva maht on ligi 16 tuh m³, mis moodustab ligi poole sellest kogusest, mida oleks vaja Valgeranna tagasitaitmiseks. Lähimad merepõhja maardlad ja leiukohad asuvad Valgerannast 100 km kaugusel ning on seetõttu vähe perspektiivsed ranna tagasitaitmiseks vajaliku liiva hankimisel. Valgeranna tagasitaitmiseks on vajalik lisaks Liivamadala leiukohale otsida uusi randade tagasitaitmiseks sobilikke leiukohti. Üheks võimaluseks on kasutada selleks Valgeranna idaserva, Audru jõe suudmesse kuhjunud liivasid, mille kasutatavus randade täiteks vajab täiendavaid uuringuid.
- Keskkonnasõbralikum oleks CO₂jalajälje suhtes transportida liiva üle vee, kuid tänased lahendused võivad tekitada liiga palju heljumit ning kuna hetkel vastavaid aluseid Eestis ei ole, siis töö osutub palju kallimaks.
- Valgeranna juba erodeeritud ala on tuleviku tingimustes veelgi suurema surve all. Senine trend näitab rannanõlva taganemist kuni 0,8 m aastas ning merevee tõusuga (kuni 0,6 m), hakkab see taganema veel kiiremini.
- LiDAR koos RTK-GPS andmetega koos annavad hea võimaluse analüüsida ranna arengut.

Kokkuvõte

Kliimamuutuste tõttu merepinna tõus kiireneb, ületades osades piirkondades, sh Eestis, maatõusu kiiruse. Tulemuseks on süvenev rannikuerosioon, mis ohustab rannikut, sealhulgas infrastruktuuri ja elurikkust. Lahendusena on randade toitmise (tagasitaitmine) muutunud üha olulisemaks meetmeks rannikualade kaitsmisel. Kui eelnevalt ei ole Eesti tänu geograafilisele asukohale merevee taseme tõusu pärast muretsema, siis tuleviku prognoosid viitavad stsenaariumitele, kus merevee tase võib tõusta Pärnu lahe ümbruses sajandi lõpuks ligi 60 cm.. Randade erosiooniprobleemiga on tegelenud Lääne-Euroopa juba pikemalt ning nad on leidnud lahendusi, mida saab Eesti näitena võtta. Lisaks sellele on teised Euroopa riigid, nt Holland ja Belgia, hakanud maavarana kasutama ka merepõhja liiva- ja kruusa varusid. Eestis on ajalooliselt kasutatud maismaa liiva, kuid transpordi CO₂-jalajälg ja ökoloogiline jalajälg on suuremad. Siiski on üksikuid piirkondi, kus on maavarana arvele võetud rannikumere ressursse.

Magistritöö eesmärgiks on hinnata Valgeranna uuringuala näitel randade erosiooniga seonduvaid probleeme tänase ja tulevikukliima tingimustes ning analüüsida randade tagasitaitmise võimalusi rannikumere jõesuudmetesse kuhjunud setetega. Analüüsides Maa-ja Ruumiameti LiDAR andmeid aastate 2010-2024 ning enda mõõdetud RTK-GPS kõrguspunktide andmeid selgus Valgeranna läänepoolse erosiooniala ulatus (ligi 2 km) ja ranna idapoolsel alal toimunud liivade akumulatsioon.. Mudelarvutuste kohaselt on erosiooni maht suurem kui akumulatsiooni maht - läänepoolsel erosioonialal on mahu kadu ~35 000 m³. Viimase 15 aasta jooksul on erosiooni alal rannajoon nihkunud kuni 8 meetrit maismaa suunas ning on tekkinud kõrged rannaastangud.

Uuringu tulemusena selgus, et Valgeranna veepealsel rannanõlval levivad peen- ja keskliivad mille terasuurused jäävad valdavalt vahemikku 200-300 µm. Valgeranna erosiooniala tagasitaitmiseks võiksid sobida Pärnu suudmes paikneva Liivamadala kuhjekeha ülemise osa (kuni 160 cm) peen ja keskliivad, mis on sarnase terasuurusega. Liivamadala alumise osa (160-205 cm) ülipeened liivad ei ole aga randade tagasitaitmiseks sobilikud. Lähimad merepõhja maardlad ja leiukohad asuvad Valgerannast 100 km kaugusel ning on seetõttu vähe perspektiivsed ranna tagasitaitmiseks vajaliku liiva hankimisel. Valgeranna tagasitaitmiseks on vajalik lisaks Liivamadala leiukohale otsida uusi randade tagasitaitmiseks sobilikke leiukohti. Valgeranna juba erodeeritud ala on tuleviku tingimustes veelgi suurema surve all. Senine trend

näitab rannanõlva taganemist kuni 0,8 m aastast ning merevee tõusuga (kuni 0,6 m), hakkab see taganema veel kiiremini.

Erosion of beaches under future climate conditions and possibilities of their nourishment using the example of the Valgeranna study area

Katre Rohumägi

Summary

Due to climate change, sea level rise is accelerating, exceeding the rate of land rise in some regions, including Estonia. The result is worsening coastal erosion, which threatens the coast, including infrastructure and biodiversity. As a solution, beach nourishment (backfilling) has become an increasingly important measure for protecting coastal areas. While Estonia has not previously had to worry about rising sea levels due to its geographical location, future forecasts indicate scenarios where sea levels could rise by up to 1 meter. Western Europe has been dealing with this problem for a long time and has found solutions that can be taken as an example in Estonia. In addition, other European countries, such as the Netherlands and Belgium, have also started to use seabed sand and gravel reserves as a mineral resource. Historically, Estonia has used land-based sand, but the CO₂ footprint and ecological footprint of transport are larger. However, there are a few regions where coastal marine resources have been recorded and used as a mineral resource.

During the study, 71 sand sediment samples were taken from Valgeranna and the surface of the Pärnu River pile body and from one borehole. Data was analysed with GRADISTAT software via Microsoft Excel. In addition, profiles between the years 2010-2025 were analysed. For that data from Republic of Estonia Land and Spatial Development Board collected elevation data covered by LiDAR and RTK-GPS data was used. The volume and position of the pile body was determined with RTK-GPS elevation data analysed with the MapInfo program.

The work revealed that approximately 35,000 m³ of sand has been eroded in the 2 km erosion area of Valgeranna. The beach is predominantly medium sand in the upper 20 cm layer and fine sand in the deeper layers. The volume of the pile body studied during the work is approximately 21,000 m³ and the useful material from it is approximately 16,000 m³. The final results showed that the embankment sand is suitable for backfilling Valgeranna.

The results of the analysis revealed that Valgeranna mainly has medium sand with a very low organic content (up to 1%). Finer-grained beaches are more sensitive to erosion, and therefore, with stronger storms and waves, the erosion rate may accelerate in the future compared to the

current trend. Over the past 15 years, the coastline in the erosion area has shifted up to 8 meters landward and high coastal terraces have emerged where trees have already fallen.

Therefore, it is also important to use material with similar parameters to backfill the beach.

The volume of useable fine and medium sand found within the Liivamadaala is nearly 16 thousand m³, which is nearly half of the amount that would be needed to backfill Valgeranna. The nearest seabed deposits are located 100 km away from Valgeranna and are therefore not very promising for obtaining the sand needed to backfill the beach. In order to backfill Valgeranna, it is necessary to look for new deposits suitable for backfilling the beaches in addition to the Liivamadaala deposit. One option is to use the sand accumulated on the eastern edge of Valgeranna, at the mouth of the Audru River, the usability of which for backfilling the beaches requires additional research.

Tänuõnad

Avaldan tänu juhendajale Alar Rosentaule ja tunnustust asjatundliku juhendamise, väärtuslike nõuannete ning toe eest kogu töö koostamise protsessi vältel. Hindan kõrgelt Teie aega, teadmisi ja tagasisidet, mis aitasid mul saavutada paremaid tulemusi ning süvendada arusaamist käsitletud teemast.

8 Kasutatud kirjandus

- Achete, F., & Luijendijk, A. (2012). Applying an analogue for a conceptual model for the development of a mega nourishment.
- Altakon. (2008). *HIUMADALA LIIVAMAARDLA HIUMADALA MÄEERALDISEST KAEVANDAMISE KESKKONNAMÕJU HINDAMINE*.
- Barrie, J. V., & Good, T. M. (2007). Marine mining and habitat. rmt: *Special Paper - Geological Association of Canada* (lk 381-387).
- Bergen, J. v., Mulder, J., Nijhuis, S., D.Poppema, Wijnberg, K., & Kuschnerus, M. (2021). Urban dunes towards BwN design principles for dune formation along urbanized shores. *Research in Urbanism Series*, 101-127.
- Bhatawdekar, R. M., Singh, T. N., Tonnizam, E. M., Amraghani, D. J., Binti, H. A., & Dayang, Z. (2021). River Sand Mining Vis a Vis Manufactured Sand for Sustainability. rmt: *International Conference on Innovations for Sustainable and Responsible Mining*.
- Bosello, F., Nicholls, R. J., Richards, J., Roson, R., & Tol, S. R. (2012). Economic impacts of climate change in Europe: Sea-level rise. *Climatic Change*, 63-81.
- Cargo, U. (2016). *Universalcargo*. Allikas: <https://www.universalcargo.com/air-freight-vs-ocean-shipping-8-round-flight-which-will-win-your-cargo/>
- Chen, M., & Montreuil, A.-L. (2023). Improving Adaptive Capacity for Integrated Coastal Safety Management. *Proceedings of the IAHR World Congress*, (lk 1044-1048). Vienna.
- Crowe, S. E., Bergquist, D. C., Sanger, D. M., & Dolah, R. F. (2016). Physical and Biological Alterations Following Dredging in Two Beach Nourishment Borrow Areas in South Carolina's Coastal Zone. *Journal of Coastal Research*, 875-889.
- Denmark, S. (2025). *Statistics Denmark*. Allikas: <https://www.dst.dk/en/Statistik/emner/erhvervsliv/industri/raastofindvinding>:
<https://www.dst.dk/en/Statistik/emner/erhvervsliv/industri/raastofindvinding>
- Duin, M. v., Wiersma, N., Walstra, D., Rijn, L. v., & Stive, M. (2004). Nourishing the shoreface: Observations and hindcasting of the Egmond case, The Netherlands. *Coastal Engineering*, 813-837.

- E.Brand, Ramaekers, G., & Lodder, Q. (2022). Dutch experience with sand nourishments for dynamic coastline conservation – An operational overview. *Ocean and Coastal Management*.
- Economie*. (2025). Allikas: <https://economie.fgov.be/en/themes/enterprises/specific-sectors/offshore-sand-and-gravel>
- Escudero, M., Mendoza, E., & Silva, R. (2020). Micro sand engine beach stabilization strategy at Puerto Morelos, Mexico. *Journal of Marine Science and Engineering*.
- F.Staudt, Gijssman, R., Ganal, C., Mielck, F., J.Wolbring, Hass, H. C., . . . Holger Schüttrumpf, T. S. (2021). The sustainability of beach nourishments: a review of nourishment and environmental monitoring practice. *Journal of Coastal Conservation*.
- F.Velegrakis, A., Ballay, A., Poulos, S., Radzevicius, R., Bellec, V., & Manso, F. (2010). European marine aggregates resources: Origins, usage, prospecting and dredging techniques. *Journal of Coastal Research*.
- Garel, E., Bonne, W., Collins, M. B., & Peffer, C. (2019). Offshore Sand and Gravel Mining. *Encyclopedia of Ocean Sciences (Third Edition)* (lk 655-662). ScienceDirect.
- Geology., D. o. (2025). <https://data.geus.dk/>. Allikas: MARTA: https://data.geus.dk/geusmap/?mapname=marta#baslay=baseMapDa&optlay=&extent=-5394.8045267493,5929700.360082304,1231642.2325102875,6503762.860082304&layers=marta_lines&filter_0=txt_search.part%3D%26survey_aar%3D%26startdato.min%3D%26slutdato.max%3D
- Geoloogiateenistus, E. (2018). *Ehitusmaavarade levik, kaevandamine ja kasutamine Harju maakonnas*. Rakvere: Eesti geoloogiateenistus.
- Geoloogiateenistus, E. (2025). *Eesti Geoloogiateenistus*. Allikas: <https://fond.egt.ee/fond/egf/5330>
- Gilron, G., & Smith, S. (2022). Implications of deep-seabed mining on marine ecosystems—Introduction to a special series of papers. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 631-633.
- Heiri, O. L. (2001). . Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: reproducibility and comparability of results. . *Journal of Paleolimnology* 25, 101-110.

- Hofstede, J. (2011). Climate Change and the Need for Integrated Coastal Risk Management in the Baltic Sea. rmt: *Coastal Research Library* (lk 93-102).
- Hongshuai, Q., Shuting, Z., Min, C., Feng, C., Bingchen, L., & Shasha, L. (2024). Multi-scale impacts on beach ecosystem of beach nourishment: a review. *Haiyang Xuebao*, 12-26.
- Hurk, B. v., Bisaro, A., Haasnoot, M., Nicholls, R. J., Rehdanz, K., & Stuparu, D. (2022). Living with sea-level rise in North-West Europe: Science-policy challenges across scales. *Climate Risk Management*.
- I.Kapsi, T.Kall, & A.Liibusk. (2023). Sea Level Rise and Future Projections in the Baltic Sea. *Journal of Marine Science and Engineering*.
- J.J., v. d., P.L.M., d. V., P.L.M., d. V., T.J., B., A.J., N., R.A., S., . . . T., Y. (2019). An integral approach to design the Roggenplaat intertidal shoal nourishment. *Ocean and Coastal Management*, 30-40.
- Jochen, H., Nicholls, r. J., Vafeidis, A. T., Tol, R. S., & Avaginou, T. (2010). Assessing risk of and adaptation to sea-level rise in the European Union: An application of DIVA. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 703-719.
- Johari, N., Zaidin, N., Sulaiman, M., Sinnakaudan, S., Sathiamurthy, E., & Hamzah, A. (2023). Quick scoping review on the impact of sand mining activities on freshwater ecosystem, hydraulic regime and river morphology. *International Postgraduate Conference on Ocean Engineering Technology and Informatics 2021*,.
- Kask, A., Kask, J., Kornejev, V., & Dzilna, I. (2005). *Kuradimuna madala liivalasundi geoloogiline uuring*. Tallinna tehnikaülikooli Meresüsteemide Instituut; Geotehniline Teadus- ja Uurimiskeskus UNICONE.
- Kiipli, T., Soesoo, A., & Hade, S. (2009). *Liiva geoloogiline uuring Kõpu poolsaarest loodes*. Tallinn: TTÜ Geoloogia Instituudi rakendusuuringu peaspetsialist Atko Heinsalu .
- Kowalska, A., & Sobczyk, W. (2014). Negative and positive effects of the exploitation of gravel-sand. *Inzynieria Mineralna*, 105-109.
- Kribel, D. L. (2008). Probabilistic performance of beach nourishment projects. *Proceedings of the Coastal Engineering Conference*, (lk 2507-2518).
- Kupits, T. (2002). *Nasva sadama uuringuala liivavaru geoloogilise uuringu aruanne*. Tallinn: Eesti Geoloogiakeskus.

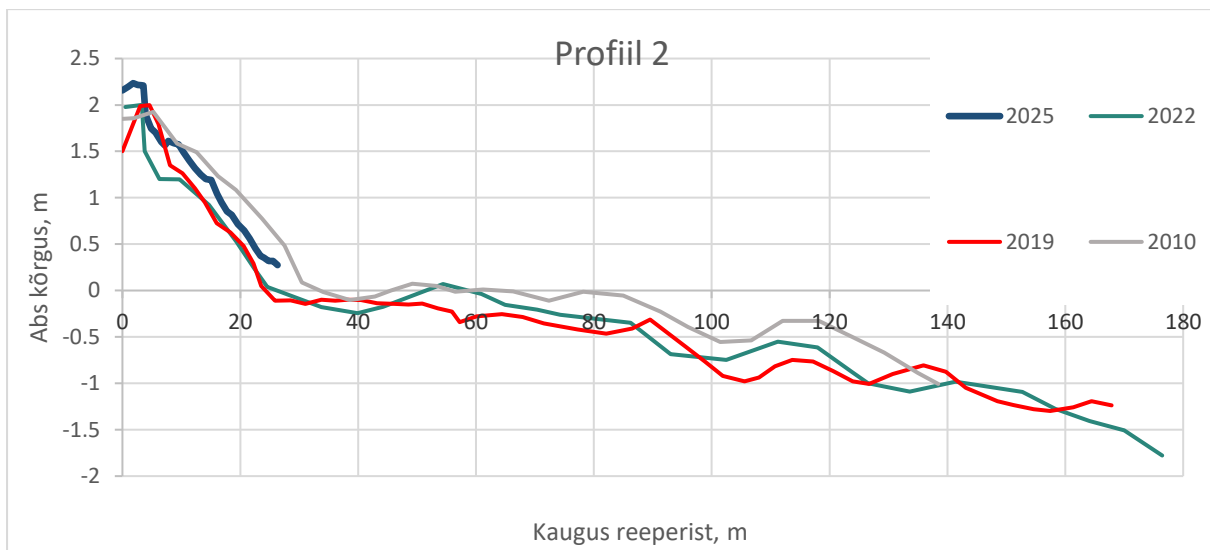
- Last, W. M. 2001. Mineralogical analysis of lake sediments. Tracking environmental change using lake sediments, 2, 143–187.
- Leiva, R. S. (2024). Discussing sustainability narratives in the literature on deep-sea mining and its configuration as resource frontier. *Finisterra*, 1-12.
- Maa-amet. (02 2025. a.). *Maa-amet*. Allikas: <https://xgis.maaamet.ee/xgis2/mod/0.0.1/maardlad/maeeraldis/946>
- Management, e. D., & Policy, D. M. (kuupäev puudub). *Policy Document on the North Sea 2016-2021*.
- Marriner, N., Kaniewski, D., Pourkerman, M., Vacchi, M., Melini, D., Seeliger, M., . . . Spada, G. (2023). Forecasted weakening of Atlantic overturning circulation could amplify future relative sea-level rise in the Mediterranean: A review of climate and tide-gauge data links. *Earth-Science Reviews*.
- Melet, A., Buontempo, C., Mattiuzzi, M., Salamon, P., Bahurel, P., Breyiannis, G., . . . Solari, L. (2021). European Copernicus Services to Inform on Sea-Level Rise Adaptation: Current Status and Perspectives. *Frontiers in Marine Science*.
- Meulen, F. v., Valk, B. v., Baars, L., Schoor, E., & hoerden, H. v. (2014). Development of new dunes in the Dutch Delta: nature compensation and ‘building with nature. *Journal of Coastal Conservation*, 505-513.
- Mielck, F., Michaelis, R., Hass, H. C., Hertel, S., Ganal, C., & Armonies, W. (2021). Persistent effects of sand extraction on habitats and associated benthic communities in the German Bight. *Biogeosciences*, 3565-3577.
- Orviku, K (2018). Rannad ja Rannikud. Tallinn: TLÜ kirjastus.
- P.Lagemaa, J.Elken, & T.Kõuts. (2011). Operational sea level forecasting in Estonia. *Estonian Journal of Engineering*.
- Peckenham, J. M., Thornton, T., & Whalen, B. (2009). Sand and gravel mining: Effects on ground water resources in Hancock county, Maine, USA. *Environmental Geology*.
- Petersen, S. (2016). Marine mineral resources. rmt: *Encyclopedia of Earth Sciences Series*. Springer Nature.
- Petersen, S. (2016). Marine mineral resources. rmt: *Encyclopedia of Earth Sciences Series*.

- Pranzini, E., Anfuso, G., & Botero, C. M. (2018). Nourishing tourist beaches. *Coastal Research Library*, 293-317. doi:10.1007/978-3-319-58304-4_15
- R.Silva, R., Sutter, D., & Delgado, R. (2016). Morphodynamic processes at Mariakerke: Numerical model implementation. *Sustainable Hydraulics in the Era of Global Change - Proceedings of the 4th European Congress of the International Association of Hydroenvironment engineering and Research, IAHR 2016*, (1k 346-355).
- Rannik, E. (2010). *Saare maakonna Kaarma valla Nasva II uuringuruumi geoloogilise uuringu aruanne*. Tallinn: OÜ Inseneribüroo STEIGER.
- Rocha, C., Antunes, C., & Catita, C. (2020). Coastal vulnerability assessment due to sea level rise: The case study of the Atlantic coast of Mainland Portugal. *Water (Switzerland)*.
- Santos, C., Andriolo, U., & Ferreira, J. (2020). Shoreline response to a sandy nourishment in a wave-dominated coast using video monitoring. *Water (Switzerland)*.
- Schipper, M. A., Ludka, B., Raubbenheimer, B., Luijendijk, A. P., & Schlander, T. A. (2021). Beach nourishment has complex implications for the future of sandy shores. *Nature Reviews Earth and Environment*, 70-84.
- Schipper, M. d., Vries, S. d., Ruessink, G., Zeeuw, C. R., Rutten, J., Gelder-Maas, C. v., & Stive, M. (2016). Initial spreading of a mega feeder nourishment: Observations of the Sand Engine pilot project. *Coastal Engineering*.
- Schlacher, T. A., Noriega, R., Jones, A., & Dye, T. (2012). The effects of beach nourishment on benthic invertebrates in eastern Australia: Impacts and variable recovery. *Science of the Total Environment*, 411-417.
- Schultze, M., & G.Nehls. (2017). *Extraction and dredging*. Allikas: <https://qsr.waddensea-worldheritage.org/reports/extraction-and-dredging>
- Speybroeck, J., Bonte, D., Courtens, W., Gheschiere, T., Grootaert, P., Maelfait, J., . . . Vincx, M. (2006). Beach nourishment: An ecologically sound coastal defence alternative? A review. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 419-435.
- Stive, M. J., Schipper, M. D., Luijendijk, A., Stefan, S. G., Gelder-Maas, C. V., Vries, J. S., . . . Ronasinghe, R. (2013). A new alternative to saving our beaches from sea-level rise: The sand engine. *Journal of Coastal Research*, 1001-1008.

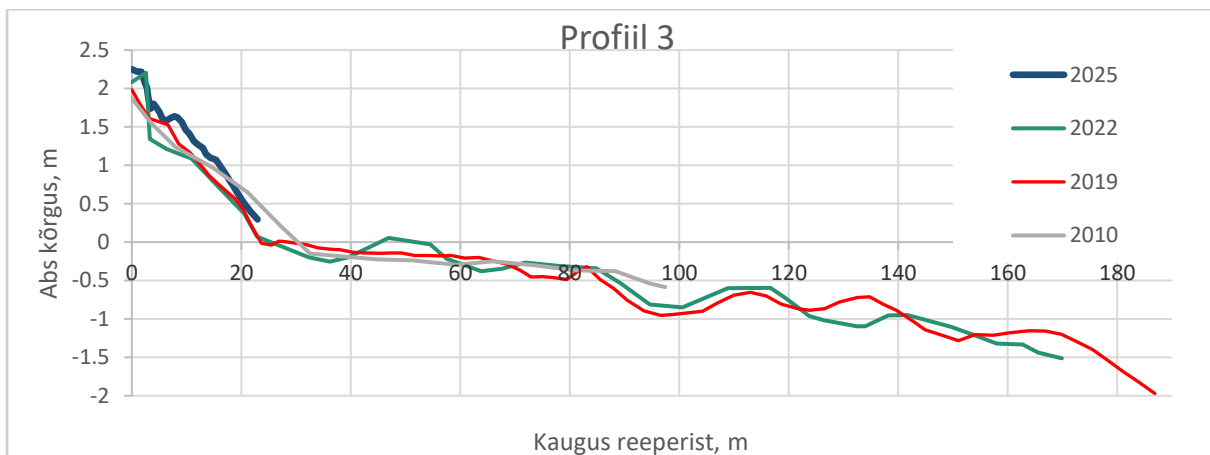
- Suursaar, U., & Kall, T. (2018). Decomposition of relative sea level variations at tide gauges using results from four estonian precise levelings and uplift models. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*.
- Suursaar, Ü., & T.Kullas. (2009). Decadal changes in wave climate and sea level regime: The main causes of the recent intensification of coastal geomorphic processes along the coasts of Western Estonia? *WIT Transactions on Ecology and the Environment*.
- Syah, P., & Hartuti, P. (2018). Land Use and River Degradation Impact of Sand and Gravel Mining. *E3S Web of Conferences*.
- T.Bide, Balson, P., Mankelow, J., & Selby, I. (2016). A new sand and gravel map for the UK Continental Shelf to support sustainable planning. *Resources Policy*, 1-12.
- Tõnisson, H., Männikus, R., Kont, A., Palginõmm, V., Alari, V., Suurorja, S., . . . Vilumaa, K. (2024). Application of Shore Sediments Accumulated in Navigation Channel for Restoration of Sandy Beaches around Pärnu City, SW Estonia, Baltic Sea. *Journal of Marine Science and Engineering*.
- Tõnisson, H., Männikus, R., Vaasma, T., Vandell, E., A.Kont, Alati, V., . . . Luik, K. (2023). *Metoodika väljatöötamine laevateedele kuhjuvate rannasetete mahu ja kvaliteedi määramiseks ning kasutamiseks randade taastamisel Pärnu sadama ja seda ümbritsevate randade näitel*. Tallinn: TLÜ Ökoloogia keskus.
- U.Suursaar, & T.Kall. (2017). Interpretation of relative sea level variations at tide gauges using results from four estonian precise levelings and land uplift models., (1k International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)).
- Ü.Suursaar, K.Luik, M.Mäll, J.Jaagus, & H.Tõnisson. (2025). Long-term variations in sea ice extent can influence trends in maximum sea level in the northeastern Baltic Sea. *Continental Shelf Research*.
- Ü.Suursaar, T.Kullas, & T.Kuusik. (2007). Possible changes in hydrodynamic regime in the Estonian coastal waters (the Baltic Sea) as a result of changes in wind climate. *Journal of Coastal Research*.

9 Lisad

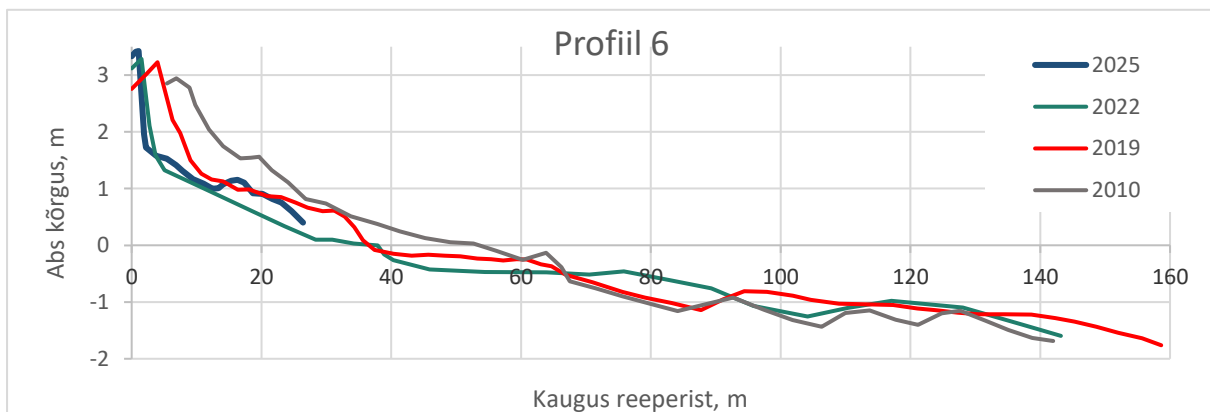
9.1 Lisa 1 Profii 2



9.2 Lisa 2 Profii 3



9.3 Lisa 3 Profii 6



Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Katre Rohumägi,

1. Annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu minu loodud teose , Randade erosioon tulevikukliima tingimustes ja nende tagasitäitmise võimalused rannikumere setetega Valgeranna uuringuala näitel, 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 lihtlitsentsi andmisega ei riku ma teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse õigusaktidest tulenevaid õigusi.

Katre Rohumägi

26.05.2025