

Tallinna Tehnikaülikool geoloogia instituut
Eesti Geoloogiateenistus



EESTI
GEOLOGIATEENISTUS

MEREPÕHJA GEOLOGIA: GEOFÜÜSIKALISED KAUGSEIRE MEETODID JA SETTEUURINGUD

(Deliverable 2.3.2. Seabed geological inventories: acoustic profiling and sediment survey)

Teostatud projekti "Eesti mereala keskkonna ja loodusväärtuste hindamise ja seire innovaatilised lahendused" raames

Leping: RITA1/02-60-01

Vastutav täitja: Atko Heinsalu

Aruande koostajad: Atko Heinsalu, Tiiu Alliksaar, Merlin Liiv, Toivo Kallaste, Kristjan Urtson, Vladimir Karpin, Sten Suuroja (EGT), Igor Tuuling (EGT), Anu Veski (EGT)

Tallinn 2021

Sisukord

Sisukord	2
Summary	3
1. Sissejuhatus	5
2. Uurimisalad ja meetodika	6
2.1 Merepõhja geofüüsikaliste uuringute pilootala ja põhjasetete keskkonnaseisundi hindamise proovivõtupunktid	6
2.2 Merepõhja geofüüsikaliste uuringute meetodid ja kasutatud aparatuur	12
2.2.1 Külgvaate sonar	14
2.2.2 Lehviksonar	15
2.2.3 Kõrgesageduslik setteprofilaator (<i>Pinger</i>)	16
2.2.4 Keskmisesageduslik setteprofilaator (<i>Chirp</i>)	16
2.2.5 Madalasageduslik setteprofilaator (<i>Boomer</i>)	16
2.3 Merepõhja kohtvaatlused: setete verifitseerimine ja keskkonnaseisundi hindamine	18
2.3.1 Setteproovide võtmine	18
2.3.2 Granulomeetria	19
2.4 Geokronoloogia ja settimiskiirus	20
2.5 Setete geokeemia	21
3. Tulemused	23
3.1 Uudepanga lahe idaosa meregeofüüsikaline mõõdistamine	23
3.2 Setteläbilõigete geokeemiline koostis ja vanus	36
3.2.1 Setteläbilõige AVA 4	36
3.2.2 Setteläbilõige AVA 6	42
3.2.3 Setteläbilõige SL 71	45
4. Hinnang geofüüsikaliste kaugseire meetodite kasutamisele merepõhja geoloogiliseks kaardistamiseks	50
5. Hinnang mere põhjasetete keskkonnaseisundile	51
5.1 Toiteelemendid	51
5.2 Toksilised raskmetallid	54
6. Kokkuvõte ja soovitused	55
7. Kirjanduse loetelu	56

Summary

The geology of the Estonian marine area is diverse, the main factors that have determined the geological character of the sea bottom include the pre-glacial crystalline and sedimentary bedrock surface, glacial erosion and deposition and postglacial sedimentary accumulation. Geological information is an essential component of marine spatial planning, coastline protection, offshore installation design (wind parks, pipelines, tunnels, dredging), environmental conservation and risk management, extraction of mineral resources etc.

This report details research carried out by Department of Geology at Tallinn University of Technology and Estonian Geological Survey in the frame of the programme “Innovative approaches to monitoring and assessing marine environment and nature values in Estonian sea area”, and subproject 2.3.2. “Seabed geological inventories: acoustic profiling and sediment survey”. The overall aim of the project was to evaluate: (1) ‘state of the art’ methodology for seabed seismoacoustic mapping techniques; and (2) methodology for assessing good environmental status for bottom sediments.

The pilot work for geophysical seabed mapping was conducted in the Uudepanga Bay, northwest Saaremaa Island, and included integrated application of the side scan sonar, multibeam echo sounding and different continuous sub-bottom profiling instruments (*Pinger*, *Chirp*, *Boomer*). Substratum sediment types interpreted by different seismoacoustic instruments were verified with laboratory grain size analysis of collected bottom sediment samples.

Sediment cores were recovered with Gemax-type sediment sampler in the offshore area west of the Saaremaa Island. Sediment cores were dated (^{210}Pb , ^{137}Cs , ^{241}Am method). For characterization of temporal vertical distribution of geochemical properties different geochemical analysis were applied (XRF, ICP-MS). Special emphasis was given to specific environmentally harmful microelements (Zn, Pb, Cd, Cu, Sn, Cr, Mo, U, Ni) and eutrophication indicators (organic matter, phosphorus) in bottom sediments.

The following conclusions and recommendations can be drawn from the results of this study:

Geophysical remote sensing for seabed mapping revealed that:

- simultaneously applied different seismoacoustic sub-bottom profiling instruments with a large variety of frequencies are complementary and allow to compile accurate vertical geological profiles. The integrated approach allows to pass through the sediments down to the bedrock surface and depending on the wavelength frequency implemented it is possible to separate sediment layers with the accuracy of 0.1 m.
- geophysical remote sensing techniques provides a robust approach to evaluate natural and human-induced processes in sediment dynamics, ie erosion, transport and accumulation. Repeated mapping after ca 3-5 years period permits determining the direction and volume of sea-bottom sediment movement.
- the lateral seabed surface mapping with the side scan sonar images and multibeam backscatter echo sounding combined with the verification of bottom sediment grain

size analysis enabled to distinguish different substrate types in the Folk sediment classification scheme. The side scan sonar can permit faster seafloor substrate mapping. However, the multibeam echo sounding backscatter images provide more detailed seabed substrate maps.

Geochemical research of the bottom sediments in the western Estonian offshore area indicated that:

- surface sediment organic matter content of the offshore sea areas can be suitable eutrophication indicator. The study showed that paleochemical approach can be applied to determine the good environmental status of organic matter content in bottom sediments.
- increasing phosphorus content in upper sediment layer is a common geochemical feature for Estonian offshore areas. The pilot investigation of different sediment phosphorus fractions would be necessary. This can give a better idea about the extent of phosphorus recycling in between the sediment and water column.
- the concentration of toxic heavy metals in the surface sediments of the Estonian offshore areas is relatively low, thus the bottom sediment environmental status is good. However, at about 5-25 cm sediment depth elevated concentrations of toxic heavy metals and radionuclide Cs were recorded. This must be considered planning offshore installation design (eg wind parks, pipelines, tunnels, dredging).

This study was financially supported by the European Regional Development Fund within the National Programme for Addressing Socio Economic Challenges through R&D (RITA).

1. Sissejuhatus

Eesti merealade geodiversiteet on mitmekesine. Peamised tegurid, mis määravad geoloogilise ehituse eripära, on aluskorra kristalsete kivimite ja aluspõhja settekivimite pinnamood, mandriliustiku kulutus ja kuhje ning pärastjääaegne settimine ja kulutus (Lutt ja Raukas, 1993).

Eesti kui mereriigi kohuseks on kindlustada meie territooriumile kuuluva Läänemere keskkonnasäästlik ja jätkusuutlik haldamine, tagada merealade loodusväärtused, elurikkus ja säilitada olemasolevad ökosüsteemid. Samas on Eesti riigil tekkimas üha suurenev vajadus kasutada merepõhja ressursse. Tegelikuseks on saanud või saamas mitmed merepõhja kasutust hõlmavad projektid: sadama-alade ja veeteede käigushoidmine, mereala süvendus- ja kaadamistööd, avamere tuulepargid, pumphüdroelektrijaamad, gaasi- ja sidekaablid, Saaremaa püsiühendus, Tallinna-Helsinki tunnel, avamere kala-, vetika- ja karbikasvatused, vajadus merepõhja maavarade järele. Seega on tekkinud reaalne vajadus Eesti mere- ja rannaalade ruumilise planeeringu koostamisele. Kõik see süvendab tarvidust usaldusväärsete meregeoloogiliste andmete järele, mis annaksid vajalikke alusteadmisi nii merepõhja elupaikade kaardistamiseks, merepõhja ressursside otsimiseks, kaardistamiseks ja kasutamiseks ning avamererajatiste projekteerimiseks ja riskijuhtimiseks (Tuuling jt, 2021).

Tehnoloogia arenguga on toimunud kiire geofüüsikaliste kaugseire meetodite arendamine ja uue aparatuuri kasutuselevõtt, võimaldades koguda merepõhja geoloogilisi andmeid oluliselt efektiivsemalt. Geofüüsikalised andmemudelid on alusinformatsiooniks erinevatele valdkondadele nagu merepõhja kaardistamiseks, mere- ja rannikualade planeerimiseks, kasutamiseks ja kaitsmiseks, merepõhja ressursside otsimiseks, avamererajatiste projekteerimiseks ning riskijuhtimise kaardistamiseks. Oluline on siinjuures andmete kogumise automatiseerimine ja standardiseerimine ning andmete koondamine rahvusvahelistele standarditele vastavatesse andmebaasidesse.

Uuringutöös kasutati komplekselt erinevaid geofüüsikalisi meetodeid merepõhja efektiivselt ja innovaatsivselt kaardistamiseks. Seismoakustilised mõõdistamised pilootalal ja andmete interpreteerimise teostas Eesti Geoloogiateenistus (EGT). Merepõhja geoloogilise läbilõike kaardistamiseks kasutati üheaegselt erinevaid setteprofiilaatoreid ning merepõhja pindalaliseks kaardistamiseks erinevaid sonareid (külgvaate- ja lehviksonar). Uuringu pilootalal kasutati geofüüsikalisi meetodeid koos põhjasete proovidest analüüsitud granulomeetrilise koostise tulemustega, et interpreteerida erinevaid merepõhja substraadi tüüpe ja setete litodünaamilisi protsesse. Rakendatud innovatiivne meetodika on sobilik merepõhja kaardistamiseks ja aitab efektiivselt koguda uusi alusandmeid, mis on vajalikud mereala keskkonnasäästlikuks ja jätkusuutlikuks kasutamiseks, tagades olemasolevate ökosüsteemide säilimise.

Merestrateegia raamdirektiivi (MSRD) kohaselt tuleb liikmesriikidel esmatähtsaks pidada merealade hea keskkonnaseisundi saavutamist/säilitamist ning edasise halvenemise ärahoidmist (EL direktiiv, 2008/56/EÜ). Merekeskkonna lahutamatu osa on ka merepõhi ja -setted. Ka Euroopa Liidu veepoliitika raamdirektiiv (VRD) sätestab liikmesriikidele eesmärgi saavutada veekogude hea keskkonnaseisund ning VRD nõuete kohaselt on hea

keskkonnaseisundi (HKS) määramise aluseks eri tüüpi veekogude nüüdisolukorra võrdlemine foonitingimustega, st looduslähedase intensiivsest inimõjust veel puutumatu seisundiga (EL direktiiv, 2000/60/EÜ). Et Eestis olemasolevad instrumentaalsed andmerekad nii kaugele minevikku ei ulatu, kui Läänemeri oli veel pristiinses või looduslähedases seisundis, võib VRD kohaselt HKS väljaselgitamiseks kasutada meresetete paleouuringuid, mis võimaldavad välja selgitada uuritavate keskkonnaparameetrite muutuste pikemaid aegridasid. Paleouuringutel määratakse meresetete koostis ja tänu sellele, et seal mitmesugune geokeemiline ja bioloogiline andmestik säilib, on need looduslikuks arhiiviks, kuhu talletub teave mereliste, kliimatiliste ja inimtekkeliste protsesside kohta nii Läänemeres kui ka selle valgjal (Björck, 1995; Zillén jt, 2008). Käesoleva projekti käigus määrati erinevate dateerimismeetodite (^{210}Pb , ^{137}Cs , ^{241}Am , fossiilsete kütuste põletamisel eralduvad lendtuhaosakesed) abil kolme setteläbilõike vanus ning rekonstrueeriti geokeemilise koostise põhjal viimaste sajandite vältel aset leidnud merekeskkonna kvaliteedi muutused. Eesti läänepoolsel avamerealal varasemad sellised setteuuringud puuduvad.

Uuringu tellis ja uuringut rahastab Eesti Teadusagentuur Euroopa Regionaalarengu Fondist toetatava programmi „Valdkondliku teadus- ja arendustegevuse tugevdamine“ (RITA) tegevuse 1 „Strateegilise TA tegevuse toetamine“ kaudu. Uuring valmis Keskkonnaministeeriumi eesmärkide elluviimiseks.

2. Uurimisalad ja meetodika

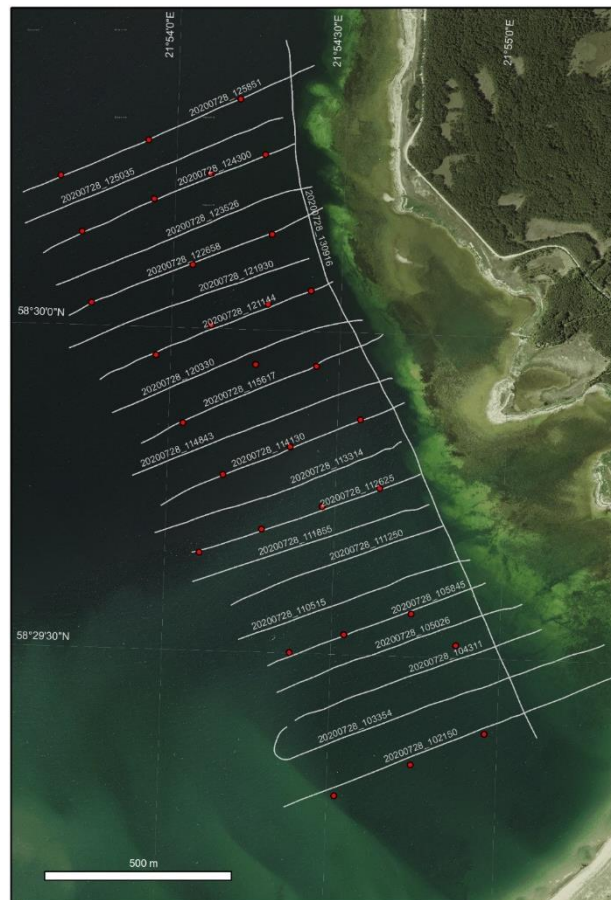
2.1 Merepõhja geofüüsikaliste uuringute pilootala ja põhjasetete keskkonnaseisundi hindamise proovivõtupunktid

Uurimaks tänapäevaste meregeofüüsikaliste (seismoakustiliste) meetodite kasutamise võimalusi merepõhja geoloogilise ehituse ja pindmiste setete substraadi hindamisel, valiti esmalt uurimisaladeks kaks mereala Saaremaa loodes. Need olid Vilsandi saarest loodes paiknev Rabina madal, mis on Siluri klindineemik ning kus sügavused on valdavalt alla 10 m ja sellest põhjapoolse jääv sügavam (> 50 m) avamereala Ordoviitsiumi platool. Mõlemal alal viidi läbi seismoakustiline profileerimine ning koguti põhjasete pinnaproove. Andmete interpreteerimisel selgus, et mõlema esialgselt väljavalitud ala merepõhja geodiversiteet on madal. Esimene ala koosnes valdavalt Siluri aluspõhjakiivimistest ning nende pangastest, munakatest ja veeristest. Teine ala osutus savi ja aleuriidi kuhjealaks, kus andmete interpreteerimise kvaliteeti halvendas oluliselt settesisese gaasi esinemine. Lõplikult valiti pilootuuringu alana välja Saaremaa loodeossa, Tagamõisa poolsaare tippu jääva Uudepanga lahe idakülg (joonis 1).



Joonis 1. Geofüüsikalise kaugseire pilootuuringu ala – Uudepanga lahe asukoht.

Pilootala hõlmab Uudepanga lahe idaosa ligi 2 km pikkust lõiku, mis kaeti iga 100 m tagant rannikuga ristuvate, ehk maismaast lahe keskosa suunas kulgevate, 600-800 m pikkuste profiilide võrguga (joonis 2). Seismoakustiliste profiilide paremaks interpreteerimiseks ja settetüüpide verifitseerimiseks koguti merepõhjast piki profiile haardkopaga kokku 32 setteproovi (joonis 3, tabel 1).



Joonis 2. Geofüüsikaliste profiilide ja granulomeetrilise koostise proovivõtupunktide asukohad Uudepanga lahes. Alus Maa-ameti ortofoto.



Joonis 3. Põhjasette proovide proovivõtupunktide asukohad Uudepanga lahes. Alus Maaameti ortofoto.

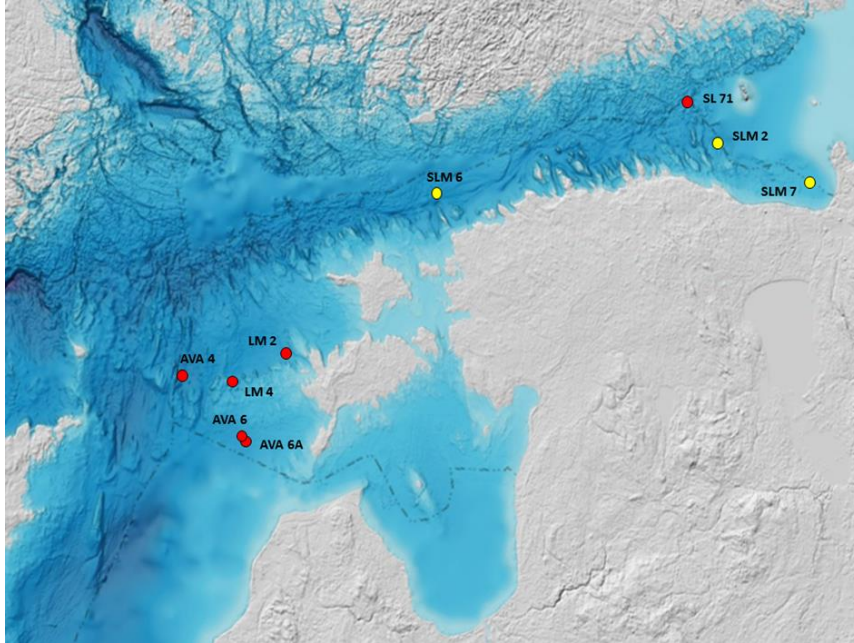
Tabel 1. Uudepanga lahe proovivõtupunktid setete granulomeetriselise koostise määramiseks.

Jaama nimetus	Koordinaadid	Vee sügavus, m	Proovid kogutud	Kirjeldus
UP20-01	58°29,2819' N 21°54,5139' E	8,5	kopp	liiv, kollakashall, mustad orgaanilise aine läätsed, karbidetriit
UP20-02	58°29,3299' N 21°54,7220' E	10,2	kopp	liiv, pinnalt kollane, all hall, mustad orgaanilise aine läätsed, karbidetriit
UP20-03	58°29,3774' N 21°54,9228' E	9,3	kopp	20 cm munakas, kristalne kivim karpidega, selle ümber läbipestud moreen
UP20-04	58°29,5042' N 21°54,8368' E	9,1	kopp	liiv, kollakashall, mustad orgaanilise aine läätsed, karbidetriit
UP20-05	58°29,5480' N 21°54,7108' E	11,4	kopp	liiv, pind kollane all hall, lausaline must orgaaniline aine, karbidetriit
UP20-06	58°29,5151' N 21°54,5274' E	13,6	kopp	liivakas aleuriit, pind kollane, all tumehall, mustad orgaanilise aine läätsed, karbidetriit
UP20-07	58°29,4870' N 21°54,3785' E	13,9	kopp	aleuriitne peenliiv, pind kollane, all tumehall, lausaline must orgaaniline aine, karbidetriit
UP20-08	58°29,7278' N 21°54,6138' E	9,5	kopp	aleuriitne liiv, tumehall, hajusalt tume orgaaniline aine
UP20-09	58°29,6990' N 21°54,4567' E	13,2	kopp	moreen läbipestud, kollakashall, kristalse kivimi ja lubjakivi veerised, karbidetriit

Jaama nimetus	Koordinaadid	Vee sügavus, m	Proovid kogutud	Kirjeldus
UP20-10	58°29,6639' N 21°54,2917' E	15,9	kopp	liivakas aleuriit, kollakashall, tume orgaaniline aine, karbidetriit
UP20-11	58°29,6276' N 21°54,1219' E	16,0	kopp	liiv, pind kollane, all tumehall, mustad orgaanilise aine läätsed, karbidetriit
UP20-12	58°29,9012' N 21°54,4295' E	11,1	kopp	kõva põhi, karbid
UP20-13	58°29,9013' N 21°54,2615' E	15,9	kopp	liiv, pind kollane, all tumehall, lausaline must orgaaniline aine, karbidetriit
UP21-15	58°30,1665' N 21°53,709' E	20,8	kopp	aleuriidikas peenliiv, hall, tumemustad läätsed, pinnal peenliiv ja karbid
UP21-16	58°30,221' N 21°53,943' E	16,9	kopp	aleuriidikas peenliiv, hall, tumemustad läätsed, pinnal peenliiv ja karbid
UP21-17	58°30,284' N 21°54,198' E	11,5	kopp	veerised kruusaga, valdab kristalne kivi, pooleldi ümardatud, karbid
UP21-18	58° 30,205' N 21° 54,271' E	9,7	kopp	veerised kruusa ja liivaga, valdab kristalne kivi, karbid
UP21-19	58°30,176' N 21°54,125' E	13,2	kopp	kopp tühi, natuke peenliiva
UP21-20	58°30,175' N 21°21,120' E	13,4	kopp	kruus ja liiv, karbid
UP21-21	58°30,136' N 21°53,968' E	17,2	kopp	aleuriidikas peenliiv, hall, tumemustad läätsed, pinnal peenliiv ja karbid
UP21-22	58°30,086' N 21°53,772' E	20,6	kopp	aleuriidikas peenliiv, hall, tumemustad läätsed, pinnal peenliiv ja karbid
UP21-23	58°29,984' N 21°53,804' E	20,0	kopp	aleuriidikas peenliiv, hall, tumemustad läätsed, pinnal peenliiv ja karbid
UP21-24	58°30,043' N 21°54,080' E	16,4	kopp	peen-keskliiv aleuriidiga, hall, pinnal karbidetriit
UP21-25	58°30,090' N 21°54,296' E	11,6	kopp	veerised, kruus, liiv, karbid
UP21-26	58°30,010' N 21°54,408' E	10,2	kopp	läbipeetud moreen, veerised, kruus, liiv, kollakashall, karbidetriit
UP21-27	58°29,989' N 21°54,291' E	13,1	kopp	karbid, liiv, kruus
UP21-28	58°29,956' N 21°54,136' E	16,5	kopp	aleuriidikas peenliiv, hall, mustad orgaanikaläätsed, pinnal kollane, karbidetriit
UP21-29	58°29,911' N 21°53,961' E	18,8	kopp	aleuriidikas peenliiv, hallikaskollane, hajusalt orgaanikaläätsed, karbidetriit
UP21-30	58°29,814' N 21°54,066' E	18,3	kopp	peenliiv aleuriidiga, hall, hajusalt tume orgaanika, karbidetriit, pinnal kollane liiv
UP21-31	58°29,826' N 21°54,555' E	10,4	kopp	veerised, kruus, liiv, karbidetriit
UP21-32	58°29,784' N 21°54,364' E	14,6	kopp	veerised, kruus, liiv, karbidetriit
UP21-33	58°29,741' N 21°54,181' E	17,6	kopp	aleuriit-liiv, hall, hajusalt orgaanikalaigud, pinnal kollane liiv, karbidetriit

Setteprofiilid põhjasetete keskkonnaseisundi hindamiseks ja HKS määramiseks koguti avamerel Saaremaast läänes uurimislaeval Salme 28-29. veebruaril 2020. a. kasutades Gemax proovivõtuseadet (joonised 4 ja 5, tabel 2). Eelnevalt tegime geofüüsikalisele andmestikule tuginedes kindlaks akumulatsioonialad. Selleks kasutasime Eesti Transpordiameti

hüdrograafia osakonna poolt Eesti mereala sügavusmöödistamise käigus kogutud andmeid. Näitena on toodud kaks seisreakustilist profiili, kus on näha, et avamere seirejaama 85 kohal on tegemist kulutuslaga ja selle vahetus ümbruses vahelduvad settimisalad kulutuslaga, seirejaam AVA 4 paikneb setete kuhjealal (joonis 6). Lisaks analüüsisime ühe varem kogutud setteprofiili (SL 71) Soome lahest avamere osast (joonis 4, tabel 3).



Joonis 4. Settepuursüdamikute asukohad. Läbilõiked AVA 4, LM 2, LM 4, AVA 6 ja AVA 6A on võetud uurimislaeva Salme ekspeditsioonil 28-29. veebruaril 2020.a. Läbilõige SL 71 on kogutud 2015. a projekti SedGoF raames. Eraldi tähistatud SedGoF projekti raames uuritud settepuursüdamikud SLM 2, SLM 6 ja SLM 7, mille andmestikku kasutatakse tulemuste analüüsil (kaardi alus: Baltic Sea Hydrographic Commission, 2013, Baltic Sea Bathymetry Database version 0.9.3. Laetud alla <http://data.bshc.pro/> 06.09.2021).



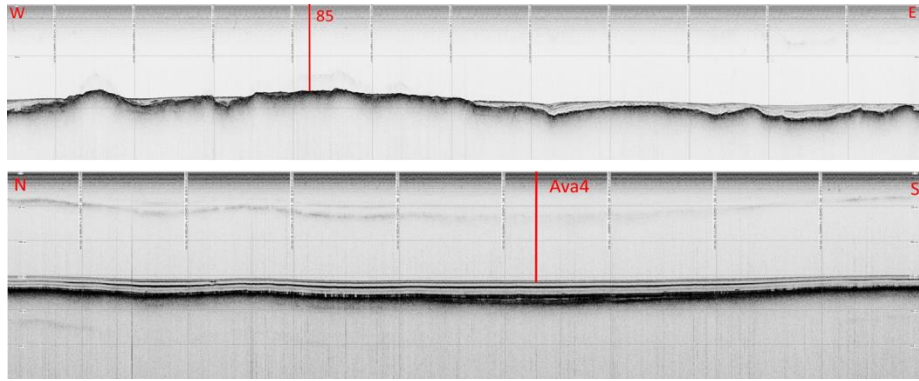
Joonis 5. Fotod uuritud setteläbilõigetest AVA 4 (vasakul) ja AVA 6 (paremal).

Tabel 2. Avamerel Saaremaast läänepool kogutud setteläbilõigete proovivõtijaamad.

Jaama nimetus	Koordinaadid	Vee sügavus, m	Setteprofiiili pikkus, cm	Proovid kogutud	Settekirjeldus
AVA 4	58°19'07 N 20°29'46 E	159	68	Gemax 2 toru	0-27 cm meremuda, must, vedel, orgaanilise aine rikas; 27-68 cm savialeuriit, hall, mustad orgaanilise aine rikkad läätsed/ vahekihid.
AVA 6	57°59'40 N 21°13'01 E	74	23	Gemax 2 toru	0-2 cm meremuda, rohekashall, kihiline, vedel; 2-8 cm aleuriit, kollakaspruun; 8-16 cm aleuriit, mustjaspruun tume; 16-23 cm aleuriit, rohekashall.
AVA 6A	57°58'76 N 21°11'22 E	77	32	Gemax 2 toru	0-6 cm meremuda, rohekashall vedel, kihiline, all katkestuspind sirge; 6-10 cm aleuriit kollakaspruun, all katkestuspind laineline; 10-32 cm savialeuriit, rohekashall.
LM 2	58°28'88 N 21°36'15 E	74	39	Gemax 2 toru	0-2 cm aleuriit, kollakaspruun; all katkestuspind; 2-37 cm savialeuriit, hall, tumehallid orgaanilise ainega läätsed/vahekihid.
LM 4	58°17'67 N 21°01'74 E	96	50	Gemax 2 toru	0-50 cm meremuda, rohekashall, orgaanikaga.

Tabel 3. Soome lahe setteprofiilide proovivõtijaamad. Proovid on kogutud projekti „Hinnangu andmine merekeskkonna ökosüsteemipõhiseks korraldamiseks Soome lahe merepõhja ja setete näitel“ (SedGoF) raames 2014-2015. aastal. Setteläbilõike SL 71 proovid analüüsiti käesoleva projekti käigus. SLM 2, SLM 6 ja SLM 7 andmestikku kasutatakse tulemuste analüüsil.

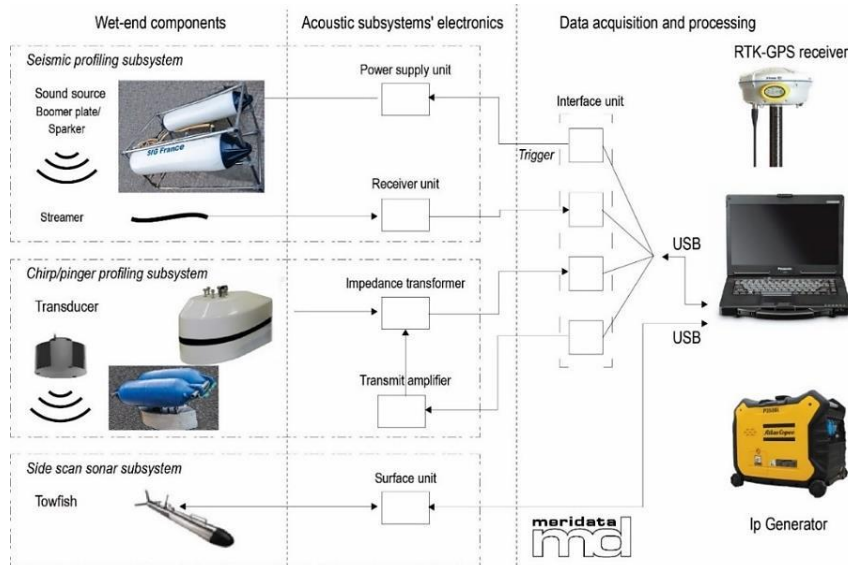
Jaama nimetus	Koordinaadid	Vee sügavus, m	Setteprofiiili pikkus, cm	Proovid kogutud	Settekirjeldus
SL 71	59°59,3390' N 26°17,5492' E	68	48	Gemax 2 toru	0-4 cm tumehall meremuda, kihiline, mustad orgaanilise ainega vahekihid; 0-28 cm tumehall muda; 28-48 cm savialeuriit hall.
SLM 2	59°46,5912' N 26°40,3512' E	84	50	Gemax 2 toru	0-4 cm tume meremuda, kihiline; 4-14 cm must muda; 14-17 cm hallikas muda; 17-50 cm must meremuda.
SLM 6	59°26,4195' N 23°20,2839' E	101	57	Gemax 2 toru	0-6 cm tume meremuda, kihiline; 6-20 cm must muda, savikas, kohati paks kihilisus; 20-57 cm savialeuriit hall.
SLM 7	59°33,9228' N 27°42,9420' E	35	35	Gemax 2 toru	0-10 cm tumehall savikas aleuriit, peal pruunikas kiht; 10-16 cm hall aleuriit; 16-35 cm savialeuriit, hall.



Joonis 6. Mõned seisreakustilised profiilid avamere alalt Saaremaast läänes. Lääne-ida suunaline seisreakustiline profiil avamere seirejaama 85 (58°27,5 N; 20°55,1 E; veesügavus 83 m) ümbruses (üleval). Põhja-lõuna suunaline seisreakustiline profiil avamere seirejaama AVA 4 (58°19,0 N; 20°29,5 E; veesügavus 160 m) ümbruses (all).

2.2 Merepõhja geofüüsikaliste uuringute meetodid ja kasutatud aparatuur

Geofüüsikalistel seiretöödel kasutati EGT uurimispaadilt kätatavaid erinevatel sagedustel töötavaid seisreakustilisi pidevprofileerimise seadmeid (saatjaid/vastuvõtjaid): vastavalt madalal ja keskmisel sagedusrežiimil töötavaid (*Boomer*) ja (*Chirp*) setteprofilaatoreid ning kõrgesageduslikku (*Pinger*) kajaloodi (joonis 7). Loetletud seadmete seisreakustiliste lainete sagedusvahemik töörežiimil oli setteprofilaatoril *Boomer* 0,4–2 kHz, setteprofilaatoril *Chirp* 3–9 kHz ning *Pingeril* 24 kHz. Põhjasetete tüüpide ja nende leviku piiride kaardistamiseks kasutati kahesageduslikku (400 ja 900 kHz) külguaate sonarit töörežiimil 900 kHz. Merepõhja reljeefi mõõdistamiseks ja substraadi tüübi määramiseks kasutati lehviksonarit *R2Sonic Sonic 2020*. Geofüüsikaliste profiilide paiknemise planeerimisel, hilisemal navigeerimisel merel ja geofüüsikaliste andmete kogumisel kasutati Meridata tarkvara MDCS (*Meridata Collecting software ver 5.2*). Geofüüsikaliste andmete interpreteerimisel kasutati Meridata tarkvara MDPS (*Meridata Processing software ver 5.2*).



Joonis 7. Geofüüsikalisteks uuringuteks kasutatud seadmete üldskeem.

Geofüüsikalistel mõõdistamistel käitati erinevaid setteprofiilaatoreid ja külgvaate sonarit üheaegselt, samas püüti paadi liikumiskiirust hoida stabiilselt optimaalse u 4 sõlme juures. Et vähendada paadimootori vibratsiooni/vindivee häirivat mõju pukseeriti madalsageduslikku *Boomerit* ja selle merepõhjast/kihipindadelt tagasi peegeldunud signaali vastuvõtjat (hüdrofoni) paadi ahtrist 15–20 m kaugusel (joonis 8). Ühes tükis olev *Chirp*-i saatja-vastuvõtja kinnitati uurimispaa di poordi külge (joonis 9). *Pinger* kajaloodi pukseeriti laeva taga (joonis 8). Külgvaate sonarit pukseeriti laeva poordist väljaspool ca 2 m sügavusel. Lehviksonariga mõõdistamised tehti peale teiste geofüüsikliste seadmetega mõõdistamist. Sonari kiirgur-vastuvõtja paigutati uurimispaa di pakpoordi, et vältida seadme purunemist võimalikul kokkupuutel merepõhjaga.



Joonis 8. Kõrgesageduslik kajalood (*Pinger*) pukseerituna siniste poide külge kinnitatuna (uurimispaa di ahtrist vasakul). Madalasageduslik setteprofiilaator (*Boomer*) (valged poid taamal paremal) ja selle vastuvõtja hüdrofon (vasakul) 20 meetri kaugusel ahtrist.



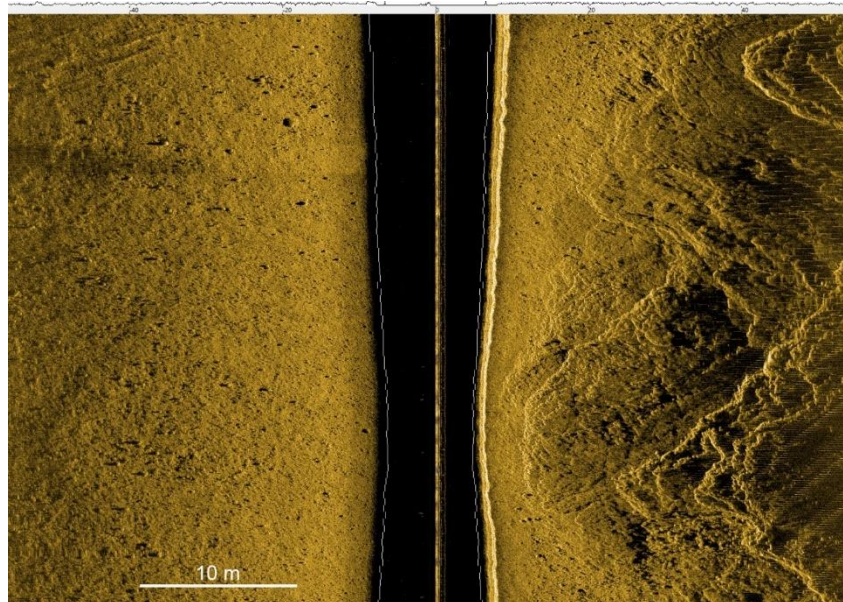
Joonis 9. EGT uurimispaa di ja setteprofiilaatori *Chirp* kiirgur-vastuvõtja uurimislava poordi külge kinnitatuna.

2.2.1 Külgvaate sonar

Merepõhja katvate setete pindmiseks uurimiseks kasutati kahel sagedusel 400 kHz ja 900 kHz töötavat (*Side Scan Sonar System*) külgvaate sonarit SonarBeam S-150A (joonis 10), mille lainelehviku nurga laius vertikaalsuunas eespool toodud sagedustel on vastavalt 10° ja 30°. Horisontaalsihis määratleti lainelehviku arvestatavaks möödumise laiuks mõlemal pool sonarit, nii vasak- kui ka parempoolsel ribal, 50 m (joonis 11), millega tagati profiileerimise käigus kõrvuti-asetsevate profiilide andmete piisav kattumine (profiilide intervall 40 m). Rannaseire käigus kasutati külgvaate sonaril töösagedust 900 kHz, mis lisaks merepõhja katvate setete detailidele (settetüüp, pinnareljeef, lainevired jmt) võimaldaks merepõhjas eristada ka kuni 0,2 meetrise läbimõõduga objekte. Sonari profiilide andmestik salvestati Meridata failiformaati (SSS). Aruandesse on lisatud profiilidest konverteeritud JPG failid ja mosaiik-kujutised.



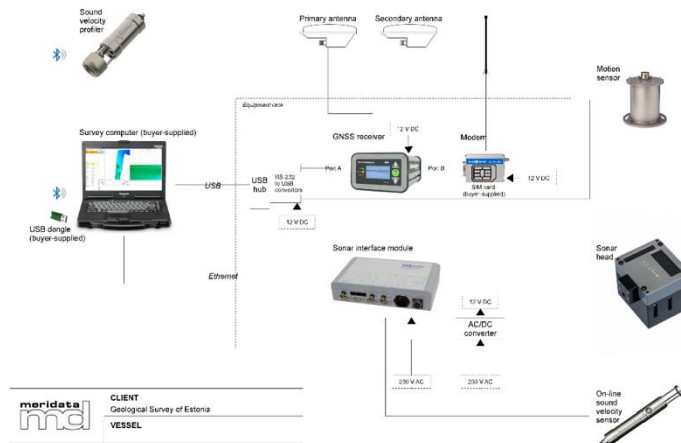
Joonis 10. Kahesagedusliku külgvaate sonari SonarBeam S-150A süsteemi aparatuur koosneb: kiirgur-vastuvõtja (üleval), andme-edastusseade (all vasakul), kaabel, arvuti.



Joonis 11. Detail külgvaate sonari profiilist.

2.2.2 Lehviksonar

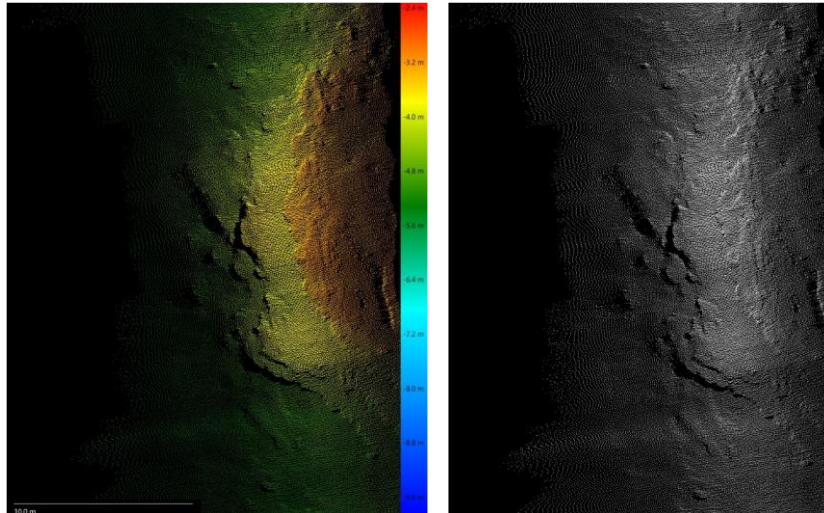
Merepõhja reljeefi mõõdistamiseks ja substraadi tüübi määramiseks kasutati lehviksonarit R2Sonic Sonic 2020 (joonised 12, 13). Sonari töösagedus varieerub 200 kHz kuni 450 kHz. Sonari lehvik koosneb 256 kiirest, mille nurka saab valida 10° kuni 130°. Lehviksonari andurvastuvõtja paigaldati uurimispaadi poordi. Madalas vees profileerimisel võimalikult kokkupuutel merepõhjaga tagatakse sellega võimalus seadme ülestõstmiseks. Kuna lehviksonariga mõõdetava ala laius on vastavuses merepõhja sügavusega, siis arvestades uuringuala suhteliselt suurt sügavuste muutlikust (3-18 m), tehti mõõdistusprofiilid pikki rannanõlva. Mõõdetava ala laius varieerus 10 meetrist madalamas vees kuni 65 meetrini pilootala sügavamas osas. Profiilide kaugused üksteisest arvestati selliselt, et oleks tagatud vähemalt nende minimaalne ülekattuvus. Lehviksonari mõõdistamiste navigeerimiseks ja andmete kogumiseks kasutati Meridata tarkvara MDCS (*Meridata Collecting software ver 5.2*) ning andmete interpreteerimiseks kasutati Meridata tarkvara MDPS (*Meridata Processing software ver 5.2*). Salvestati nii merepõhja sügavusandmestik kui tagasipeegelduva signaali tugevus (inglise keeles *backscatter*) (joonis 14).



Joonis 12. Lehviksonari seadmete üldskeem.



Joonis 13. Lehviksonari anduri monteerimine (vasakul) ja lehviksonariga mõõdistamine paadipoordi kinnitatult (paremal).



Joonis 14. Näide lehvikonari merepõhja sügavuse andmepildist (vasakul) ja merepõhja tagasipeegelduva signaali tugevuse (*backscatter*) andmepildist.

2.2.3 Kõrgesageduslik setteprofilaator (*Pinger*)

Kindlal impulsi lainesagedusel (24 kHz) töötav kõrgesageduslik setteprofilaator *Pinger*, mida mootori vindi müra vähendamiseks transporditi laeva ahtrist 2 m tagapool (joonis 8), kujutab endas piltlikult tavapärasest madalamal sagedusel töötavat kajaloodi, mida enamasti kasutatakse meresügavuse (põhjareljeefi) täpseks fikseerimiseks. Kuid sellise sagedusega seismoakustiline impulss võib tungida ka merepõhja katvatesse pehmetesse mudasetetesse, andes seega informatsiooni seal levivatest Läänemere noorima Limneamere staadiumi setetest. Profileerimise andmed salvestati Meridata failiformaadis (CV100). Andmeid kasutati veealuse rannanõlva batümeetrilise kaardi koostamisel.

2.2.4 Keskmisesageduslik setteprofilaator (*Chirp*)

Uurimispaadi poordi külge kinnitatud ja töörežiimil 1 m allpool merepinda paiknev 3–9 kHz sagedusel töötav setteprofilaator *Chirp* (joonis 9) on samaaegselt ka tagasipeegeldunud signaali vastuvõtjaks (üheskoos kiirgur-vastuvõtja). Võrreldes *Boomer*'iga läbis keskmisesagedusliku profilaatori signaal suurema impulsi sageduse tõttu enamasti ainult läbilõike ülaossa jäävaid muda-, savi- ja liivakihte; tungides seega enamasti üksnes moreeni pealispinnani. Samas annab selle impulsi suurem lahtusvõime (u 10 cm) aga sagedasti palju detailsema pildi Läänemere Holotseeni setete läbilõikest ja nende alla mattunud glatsiofluviaalsetest setetest/pinnavormidest. Seega täiendab *Chirp* profilaator *Boomer*-tüüpi aparatuuriga tehtud Läänemere setete läbilõigete salvestisi, andes vajadusel võimaluse üksikasjade täpsustamiseks. Profileerimise andmed salvestati Meridata failiformaati (HFC).

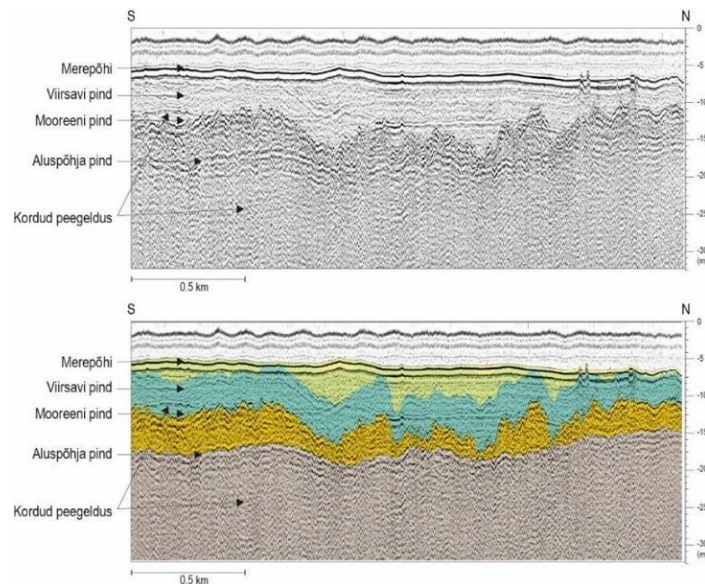
2.2.5 Madalasageduslik setteprofilaator (*Boomer*)

Et lisaks Läänemere setetele saada informatsiooni ka nende alla jäävast moreenikihist ja aluspõhja reljeefist, kasutati *Boomer*-tüüpi seismoakustilist setteprofilaatorit Sig-France (joonised 15, 16), mida käitati sagedusel 0,5–2 kHz ja mille signaali maksimaalne vertikaalne lahtusvõime on u 20 cm. Merepõhja/maapõue kihipindadelt tagasipeegeldunud *Boomeri*

impulsi vastuvõtmiseks kasutati plastvoolikust multi-element hüdrofoni C-Phone. Hilisemal interpreteerimisel sai Meridata tarkvara abil muuta/töödelda salvestatud *Boomeri* signaali/impulsi erinevaid parameetreid, mis võimaldab impulsi madalama/kõrgema sagedusega spektriosa valides saada informatsiooni vastavalt kas sügavamatest (aluspõhja ülaosast, moreenikihist) või pinnalähedasematest Holotseeni kihtidest. Seega võimaldab *Boomeri* madalama spektriosa signaal ainsana saada informatsiooni aluspõhjast ning sellel lasuvast moreenikihist. Läänemere pärastjääegse settekompleksi liigestamisel võib detailsuse huvides vajadusel eelistada kõrgema impulsi sageduse ja suurema lahutusvõimega setteprofiilaatori *Chirp* salvestusi. Profileerimise andmed salvestati Meridata failiformaadis (BMR).



Joonis 15. Madalasagedusliku *Boomer*-tüüpi setteprofiilaatori pukseeritav katamaraan ja selle alla kinnitatud metallplaatidest seisreaktiivse signaali tekitav kiirgur-saatja (vasakul) ning süsteemi kontrollseade (paremal).



Joonis 16. Madalasagedusliku *Boomer*-tüüpi setteprofiilaatori profiil ja selle interpretatsioon. Sügavuste väärtused on arvatud tuginedes seisreaktiivsete lainete keskmisele merevee levikukiirusele 1500 m/s.

2.3 Merepõhja kohtvaatlused: setete verifitseerimine ja keskkonnaseisundi hindamine

2.3.1 Setteproovide võtmine

Seismoakustiliste andmete täpsemaks interpreteerimiseks ja setete tüübi õigsuse kontrollimiseks koguti 2020. a 15. augustil ja 2021. a 23. mail läbiviidud välitööde käigus geofüüsikaliste uuringute pilootalalt Uudepanga lahes setteproovid Van-Veen tüüpi haardkopaga (joonis 17). Setteproovid kirjeldati kohapeal, pakiti markeeritud kilekottidesse ja säilitati laborisse jõudmiseni külmaelementidega varustatud külmakastides. Tallinna Tehnikaülikoolis säilitati proove külmruumis +4 °C juures; laboris määrati neist kuumutuskadu ja granulomeetiline koostis.



Joonis 17. Sette pinnaproovide võtmine Van-Veen tüüpi haardkopaga.

Setteprofiilid põhjasetete keskkonnaseisundi hindamiseks koguti kasutades Gemax-tüüpi proovivõtuseadet (joonis 18). Seade võimaldab võtta pindmisi, kuni 80 cm pikkusi setteprofiile ja on varustatud kahe paralleelse proovivõtutoruga. Võetud puursüdamikud fotografeeriti ja kirjeldati kohapeal, tükeldati 1 cm paksusteks settekihtideks, pakiti markeeritud kilekottidesse ning hoiustati laevareisil külmakastides. Hiljem säilitati setteproovid Tallinna Tehnikaülikooli geoloogia instituudi külmruumis (+4 °C), et ei toimuks muutusi sette keemilises koostises.



Joonis 18. Setteproovide võtmine Gemax-tüüpi proovivõtuseadmega.

2.3.2 Granulomeetria

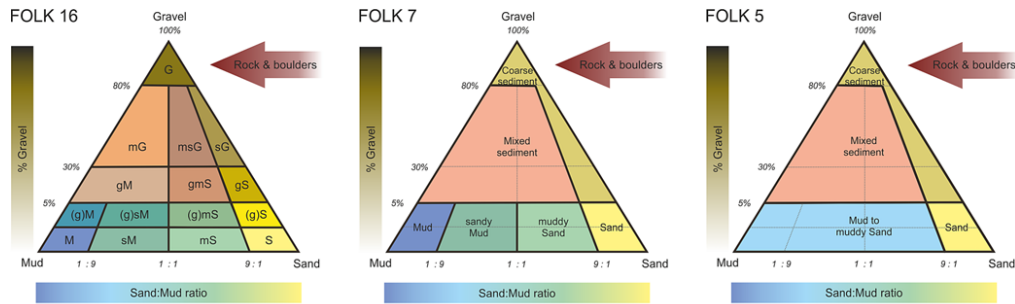
Lõimis ehk terasuurus ehk granulomeetria koostis näitab eri läbimõõduga mineraalosakeste suhtvahekorda põhjasetetes ja on oluline meresetete kirjeldamise tööriist. Meresetete purdosakeste terasuurus väljendab settimisprotsesse ning kasvupinnana on aluseks merepõhja elupaikadele ja nendega seotud bioloogilistele kooslustele. Osakeste suurus määratleb meresetete nimetuse, selleks on koostatud erinevaid terasuuruse klassifikatsioone (Udden, 1914; Wentforth, 1922; Folk, 1954). Setteproovide lõimise analüüsiks eemaldati eelnevalt proovidest orgaaniline aine. Selleks oksüdeeriti setteproove 30% vesinikülihapendiga (H_2O_2) umbes 8 tundi temperatuuril 80-90 °C, misjärel pesti proove mitu korda destilleeritud veega.

Liivafraktsioonist jämedamate fraktsioonide esinemise puhul proovid sõeluti. Selleks määrati kuivatatud proovi üldkaal ja pärast sõelumist eraldi fraktsioonide kaalud - veerised (>64 mm), kruusaosakesed (2-64 mm) ja liivaosakesed koos väiksemate fraktsioonidega (<2 mm) ning arvutati nende protsentuaalne sisaldus sõelumisele läinud materjali üldkogusest. Lõimise fraktsioonide määramiseks kasutati Udden-Wentworth'i terasuuruse klassifikatsiooni (Last, 2001).

Kruusaosakestest väikemate fraktsioonide granulomeetria analüüsiks kasutati laserdifraktomeetrit Horiba Partica LA-950V2, mis määrab proovis osakesed suurusvahemikus 10 nm kuni 2 mm. Enne analüüsimist lisati proovidele 0,1% naatriumpürofosfaadi ($Na_4P_2O_7 \times 10 H_2O$) lahust, et vältida väikeste osakeste kleepumist üksteise külge. Mõõtmistulemuseks on osakeste mahu protsentuaalne jaotus 93-s granulomeetria suurusklassis. Need suurusklassid summeeriti vastavalt Udden-Wentworth'i terasuuruse klassifikatsioonile vastavateks granulomeetria klassideks. Kui proov oli jämedamaterisem ja kasutati kombineeritud sõelumis-laserdifraktomeetria analüüsi, siis kahel erineval meetodil saadud tulemused summeeriti ja arvutati suuruseline jaotus kogu proovile.

Euroopa Komisjoni poolt 2006. a initsieeritud Euroopa merevaatlus- ja andmevõrgustiku EMODnet (European Marine Observation and Data Network) merepõhja ressursidega tegelev geoloogia alamprojekt (<https://www.emodnet-geology.eu/>) kasutab setete lõimise klassifitseerimiseks Folki klassifikaatoreid (Folk, 1954) ja seda põhjusel, et need on sedimentoloogiliste uuringute puhul rahvusvaheliselt kõige levinumad ja sobivad ka merepõhja elupaikade kaardistamisel.

Folki klassifikaatoreid on kolm, kus lõimise klasse on vastavalt kuusteist, seitse ja viis (Folk 16, Folk 7 ja Folk 5, joonis 19). Eelistatavalt kasutatakse kõige detailsemat klassifikaatorit (Kaskela jt, 2019), kuid sellelt on võimalik lihtsa mõnede klasside summeerimisega üle minna väiksema klasside arvuga klassifikaatoritele. Käesolevas töös teisendati Uudepanga lahe pindmiste setteproovide Udden-Wentworth'i terasuuruse klassid lisaks veel Folki klassidesse.



FOLK, 16 classes	FOLK, 7 classes	FOLK, 5 classes
Rock & Boulders	Rock & Boulders	Rock & Boulders
Gravel - G sandy Gravel - sG gravelly Sand - gS	Coarse sediment	Coarse sediment (Gravel \geq 80% or (Gravel \geq 5% and Sand \geq 90%))
muddy Gravel - mG muddy sandy Gravel - msG gravelly Mud - gM gravelly muddy Sand - gmS	Mixed sediment	Mixed sediment (Mud 95-10%; Sand < 90%; Gravel \geq 5%)
(gravelly) Mud - (g)M Mud - M	Mud (Mud \geq 90%; Sand < 10%; Gravel < 5%)	Mud to muddy Sand (Mud 100-10%; Sand < 90%; Gravel < 5%)
(gravelly) sandy Mud - (g)sM sandy Mud - sM	sandy Mud (Mud 50-90%; Sand 10-50%; Gravel < 5%)	
(gravelly) muddy Sand - (g)mS muddy Sand - mS	muddy Sand (Mud 10-50%; Sand 50-90%; Gravel < 5%)	
(gravelly) Sand - (g)S Sand	Sand (Mud < 10%; Sand \geq 90%; Gravel < 5%)	Sand

Joonis 19. Erinevad Folki setete granulomeetrilise koostise klassifikaatorid, mida kasutatakse andmevõrgustikus EMODnet (European Marine Observation and Data Network) Geology (Kaskela jt, 2019).

2.4 Geokronoloogia ja settimiskiirus

Setteläbilõigete võimalikult täpsete vanusemäärangute saamiseks kasutati üheaegselt erinevaid dateerimismeetodeid (^{210}Pb , ^{137}Cs , ^{241}Am , fossiilsete kütuste põletamisel emiteeritavad lendtuhaosakesed). Neist meetoditest ^{210}Pb , ^{137}Cs ja ^{241}Am mõõtmisi saab tellida vaid Eestist väljastpoolt (ühe setteläbilõike dateerimine orienteeruvalt 1500 EUR). Alternatiivse dateerimismeetodina kasutatavat lendtuhaosakeste analüüsi tehakse Tallinna Tehnikaülikooli geoloogia instituudis.

Setteproovidest analüüsiti Ukraina Hüdro meteoroloogia Instituudis (Radiometric Laboratory, Ukrainian Scientific and Research Institute for Hydrometeorology) ^{210}Pb , ^{226}Ra , ^{137}Cs ja ^{241}Am radioaktiivsel lagunemisel eralduv gamma-kiirgus kasutades ORTEC (Ametek) HPGe GWL seeria germaanium-detektorit. Nüüdisaegsete setete dateerimiseks kasutataksegi kõige enam plii loodusliku isotoobi Pb^{210} radioaktiivsel lagunemisel (poolestusaeg 22,26 aastat) põhinevat meetodikat (Appleby, 2001). Sette ^{210}Pb koguaktiivsus (Bq kg^{-1}) koosneb kahest komponendist: settes sisalduva ^{226}Ra lagunemise tekitavast "tasakaalulisest" ^{210}Pb fraktsioonist ning atmosfäärist pärinevast "mittetasakaalulisest" ^{210}Pb fraktsioonist. "Mittetasakaalulise" ^{210}Pb aktiivsus määrati igas proovis ^{226}Ra aktiivsuse lahutamisel ^{210}Pb koguaktiivsusest. ^{210}Pb radioaktiivse lagunemise kiirus (poolestusaeg) tagab selle, et radioaktiivne tasakaal ^{210}Pb koguaktiivsuse ja ^{226}Ra aktiivsuse vahel saabub umbes 150 aasta möödudes, mis tähistab selle meetodiga mõõdetavat setete alumist vanusepiiri. Külmuivatatud proovidest mõõdeti ^{210}Pb gamma-emissioon energiatasemel 46,5 keV, ^{226}Ra mõõdeti tema tütarisotoobi ^{214}Pb emissioonist energiatasemel 295 ja 352 keV hoides proove

kolm nädalat kinnistes konteinerites radioaktiivse tasakaalu saavutamiseks. Määrangutes kasutati teada aktiivsusega kalibreeritud standardeid ja setteproove (referentsaineid, toodetud NIST, IAEA ja NPL poolt). Tulemused korrigeeriti vastavalt analüüsitud sette koostisele (orgaanilise aine ja mineraalne sisaldus). Settekihtide radiomeetrilised vanused arvutati enamlevinud CRS (Constant Rate of Supply) ja CIC (Constant Initial Concentration) mudeleid kasutades (Appleby ja Oldfield, 1978).

Samadest proovidest mõõdeti ^{137}Cs ja ^{241}Am gamma-emissioon energiatasemetel 662 ja 59,4 keV. Need on kunstlikud tuumareaktsioonides tekitatud radionukliidid, millest ^{241}Am kõrgem aktiivsus vastavas settekihis tähistab atmosfääris läbiviidud tuumakatsetuste kõrgega 1963. a ja ^{137}Cs suurenenud aktiivsus lisaks eelnevale ka 1986. a Tšernobõli tuumajaama õnnetuse aega.

Tallinna Tehnikaülikooli geoloogia instituudis analüüsiti AVA 4 setteläbilõikest lendtuhaosakeste kontsentratsioon. Need on fossiilsete kütuste kõrgetemperatuurilisel põletamisel tekkivad mikroskoopilised osakesed, mis emiteeritakse atmosfääri koos põlemisgaasidega, sadenevad sealt maapinnale ja mille kontsentratsioon setetes järgib kütuste põletamise ajalugu vastavas regioonis (Alliksaar, 2000). Viimane on eelduseks, et lendtuhaosakeste jaotust setteprofiilis saab kasutada setteläbilõike vanuse määranguteks. Analüüsiks kaaluti väike kogus kuiva setet erinevatest settekihtidest ja töödeldi neid 30% vesinikülihapendiga (H_2O_2) 6-8 tundi temperatuuril 80-90 °C, et eemaldada orgaaniline aine ja seejärel 2,7M soolhappega (HCl) 2 tundi temperatuuril 80-90 °C, et vabaneda karbonaatainest. Et arvutada osakeste kontsentratsiooni arvutada lisati proovidele teada eoste arvuga *Lycopodiumi* tabletid. Preparaatidele kantud proovidest loendati lendtuhaosakesed koos *Lycopodiumi* eostega 250-kordsel suurendusel valgusmikroskoobi all. Tulemused esitati osakeste arvuna g sette kuivaine kohta.

Setteläbilõigete dateeringud settekihtidele vanuse määramiseks võimaldavad arvutada settimiskiiruse ja selle muutused vastavas puursüdamikus. Võttes arvesse sette koostist (veesisaldus, orgaanilise aine hulk) arvutatakse kas settimiskiirus sentimeetrit aastas (cm a^{-1}) või akumuleerunud kuivaine hulk grammides cm^2 kohta aastas ($\text{g cm}^2 \text{a}^{-1}$).

2.5 Setete geokeemia

Setteproovidest määrati veesisaldus ning kuumutuskaot meetodil orgaanilise aine ja mineraalne sisaldus (Heiri jt, 2001). Eelnevalt kaalutud märjad setteproovid kuivatati 105 °C juures õhkuivaks, kaaluti ja arvutati proovide veesisaldus. Orgaanilise aine sisalduse leidmiseks põletati kuivatatud setteproove muhvelahjus 550 °C juures 4 tundi ja kaaluti ning kaalukao alusel arvutati orgaanilise aine sisaldus settes. Mineraalne ehk terrigeense aine sisalduse hulka proovides markeerib muhvelahjus 550 °C juures põlemata jäänud aine kogus. Tulemused on esitatud protsentides kuivaine kaalust.

Setete orgaanilise aine elementkoostis (orgaaniline süsinik - C_{org} , üldlämmastik - $N_{\text{üld}}$) mõõdeti CHNSO-analüsaatoriga (Thermo Scientific FLASH 2000). 15 μg lüofilisaatoris külmuivatatud ning kuulveskis jahvatatud setet kaaluti hõbetopsikutesse. Anorgaanilise süsiniku eemaldamiseks lisati igasse topsikusse paar tilka soolhapet (4M HCl) ning seejärel kuivatati

proove 80 °C juures 4 tundi, et eralduks CO₂. Et analüsaatoris põlemisprotsessi intensiivistada pakiti hõbetopsid proovidega veel tinatopsikutesse. C_{org} ja N_{üld} määramisel kasutati standardina tsüstiini (ThermoFisher Scientific) ning referentsainena kõrge orgaanilise aine sisaldusega setet (IVA Analysentechnik e. K). Tulemused on esitatud protsentides sette kuivaine kaalu kohta.

Fosfori fraktsioonid määrati spektrofotomeetriliselt Radojević ja Bashkin (2006) molübdeensinise värvusreaktsiooni meetodil. Üldfosfori (P_{üld}) ja anorgaanilise fosfori (P_{anorg}) määramiseks kaaluti eraldi 0,5 g märga setet. P_{üld} proovid kuivatati ja põletati 550 °C juures 1 tund. Nii P_{üld} proovide põletusjäägi kui ka P_{anorg} proovide värse sette puhul kasutati fosforifraktsioonide lahusesse viimiseks 0,5M soolhappe lahust, milles proove loksutati automaatloksutis 3 tundi 160 rpm juures. Seejärel proovid filtreeriti läbi happekindla klaasfiltrini ning valmistati lahused askorbiinhappe- ja molübdaatreaktiividega fosforisisalduse spektrofotomeetriliseks mõõtmiseks. Mõõtmised viidi läbi spektrofotomeetriga SPECORD PLUS 250 (AnalytikJena) kasutades spetsiaalseid UV-küvette. Settefosfori sisalduste (nii P_{üld} kui P_{anorg}) määramiseks mõõdeti kompleksi neeldumist lainepikkusel 880 nm. Orgaanilise fosfori (P_{org}) kontsentratsioon leiti arvutuslikul teel, lahutades P_{üld} kogusest P_{anorg} koguse. Tulemused on esitatud ühikutes milligrammi fosforit grammis kuivaines (mg P g⁻¹ kuivas settes), samuti on P_{org} ja P_{anorg} fraktsioonide kogused esitatud protsentidena P_{üld} koguses.

Makroelementide ja mikroelementide analüüsiks röntgenfluorestsents (XRF) spektromeetriga kuivatati esmalt proovid 105 °C juures õhkuivaks ja jahvatati seejärel volframkarbiidist litterveskis. Põhikomponentide (Si, Ti, Al, Fe, Mn, Mg, Ca, Na, K, P) määramiseks kasutati proovide ettevalmistamisel sulatusmeetodit, kus põletatud proovijääk sulatati boraatide seguga sulatatud preparaadiks (vahekorras 1:10). Et sulatusmeetod ei võimalda määrata mikroelementide sisaldusi lahjenduse tõttu, siis määrati need ilma sideaineta kokkupressitud proovipulbri tabletist. Seetõttu analüüsiti kõigist proovidest nii sulatatud preparaadid kui ka pulbri pressitud tabletid. Röntgenfluorestsents analüüs teostati Bruker S4 spektromeetriga kasutades Rh anoodiga röntgentoru. Sulatatud preparaadid analüüsiti Brukeri eelkalibreeritud standardivaba meetodit kasutades, tulemusi täpsustati Geoanalüütikute Assotsiatsiooni laboritevaheliste võrdluskatsete tugiproovide baasil. Pulbri pressitud tablettide analüüsiks kasutati Brukeri eelkalibreeritud standardivaba meetodit. Saadud tulemused korrigeeriti tuginedes Geoanalüütikute Assotsiatsiooni võrdluskatsete settelistele tugiproovidele.

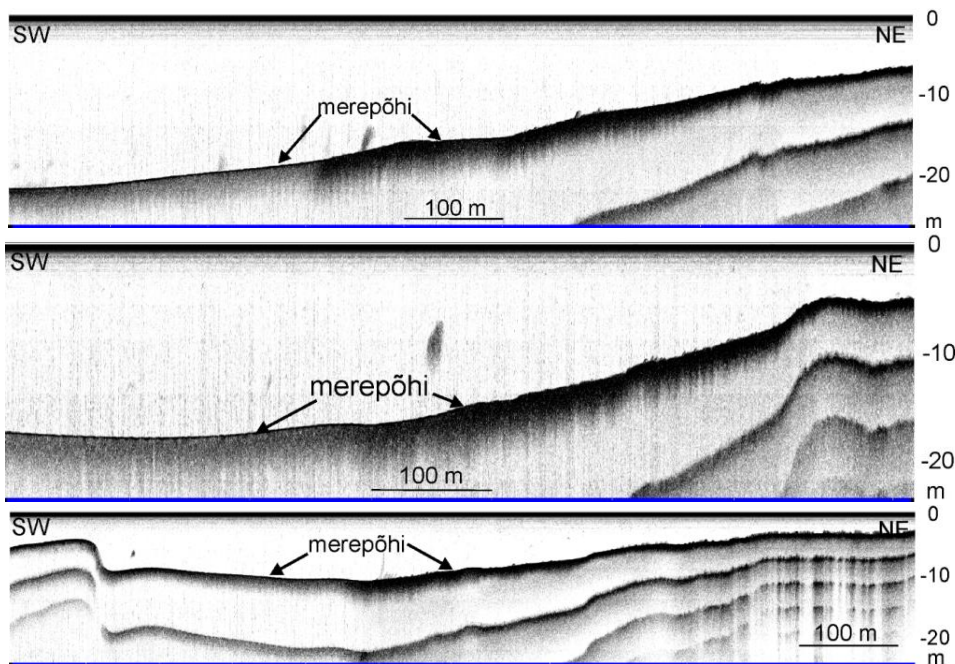
Mikro- ja jälgelementide määramiseks analüüsiti proovid Thermo X-series II induktiivplasma mass-spektromeetriga (ICP-MS). Eelnevalt proovid kuivatati ja põletati muhvelahjus 950 °C juures orgaanika ja väevli oksüdeerimiseks ning kuumutuskaotuse määramiseks. 0,1 g põletatud proovi segati 1 g liitiummetaboraadiga ning sulatati Claisse M4 sulatusaparaadis koos järgneva lahustamisega 50 ml 10% lämmastikhappes. Lahuseid analüüsiti kümnekordselt lahjendatuna. Seadme kalibreerimiseks kasutati 1, 10 ja 25 ppb kontsentratsiooniga multielement standardlahuseid. Referentsproovidena mõõdeti rahvusvahelise laborite võrdluskatse materjale SBC-1 ja SdAR-1 <http://www.geoanalyst.org/geopt-previous-rounds/>.

3. Tulemused

3.1 Uudepanga lahe idaosa meregeofüüsikaline mõõdistamine

Uudepanga lahe idakülje rannikumere veealuse nõlva geofüüsikalised mõõdistamised andsid hea ülevaate rannanõlva batümeetriast, eri tüüpi setete ja kivimite levikust. Kasutades erinevaid setteprofilaatoreid ja külgvaate sonarit, kaeti sealne u 2 km pikkune NW–SE orientatsiooniga rannikulõik sellega ristuvate NE–SW sihiliste profiilide võrguga (joonis 2). Kokku tehti u 100 m vahedega kakskümmend üks 600–1000 m pikkust profiili, kogupikkusega 17,3 km. Pilootprojekti käigus katsetati esmakordselt ka merepõhja setete/reljeefi uurimiseks hiljuti EGT soetatud lehvikonarit.

Kasutades *Pinger*-tüüpi seismoakustilise profilaatori andmeid (joonis 20), koostati seireala batümeetria kaart (joonis 21). Liikudes Undva neeme NW–SW sihilisest läänerrannikust piki profiile avamere suunas, laskub rannanõlv esmalt 350–400 m ulatuses ühtlase kuni u 15 m sügavuseni. Kaugemal rannast, Uudepanga lahe keskossa liikudes, hakkab batümeetria andmetel nõlva kallakus aeglaselt vähenema. NE–SW sihis ühtlaselt laskuv ning lahe keskosa suunas laugemaks muutuv merepõhi tuleb ilmekalt esile ka *Chirp*- ja *Boomer*-tüüpi seismoakustilistel profiilidel (joonised 22, 23, 24). Üksnes pilootuuringu ala lõunapoolses otsas, mis läheneb Uudepanga lahe madalamale päraosale ja kus rannajoont järgivad samasügavusjooned saavutavad NE–SW orientatsiooni, ilmneb NE–SE sihis sügavustrendi selge vähenemine juba alates 7–8 m sügavuselt (joonised 20, 21). Selline sügavuste vähenemine on selgelt tingitud seal aset leidvast tänapäevaste liivade kuhjumisest (joonis 24).

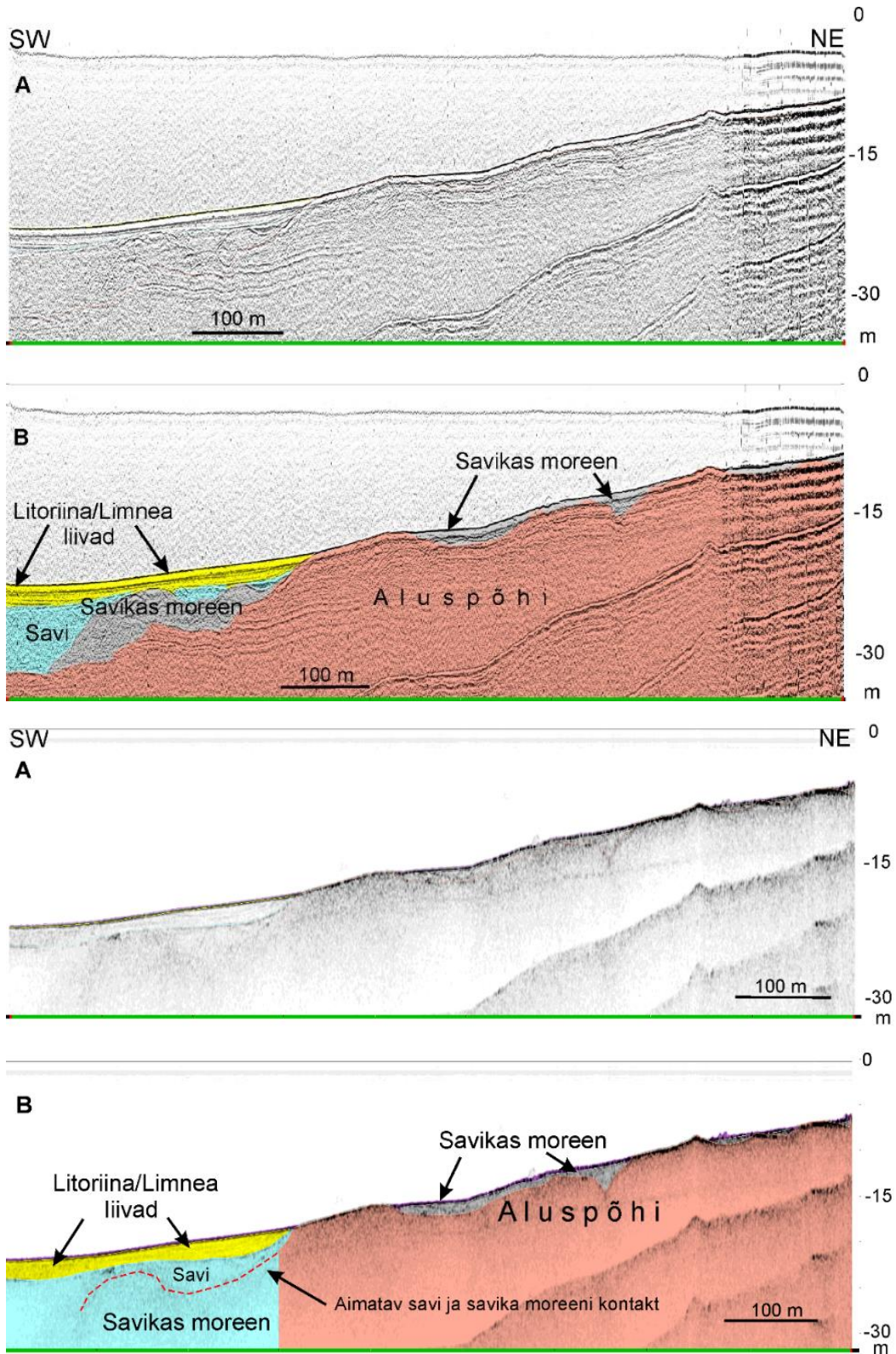


Joonis 20. Uudepanga lahe *Pinger*-tüüpi profiilid olid aluseks batümeetria kaardi joonistamisel: üleval profiil 125851 seireala põhjaosast, keskel profiil 114130 seireala keskosast ja all profiil 102150 seireala lõunaosast. Profiilide asukohta vaata joonis 2.

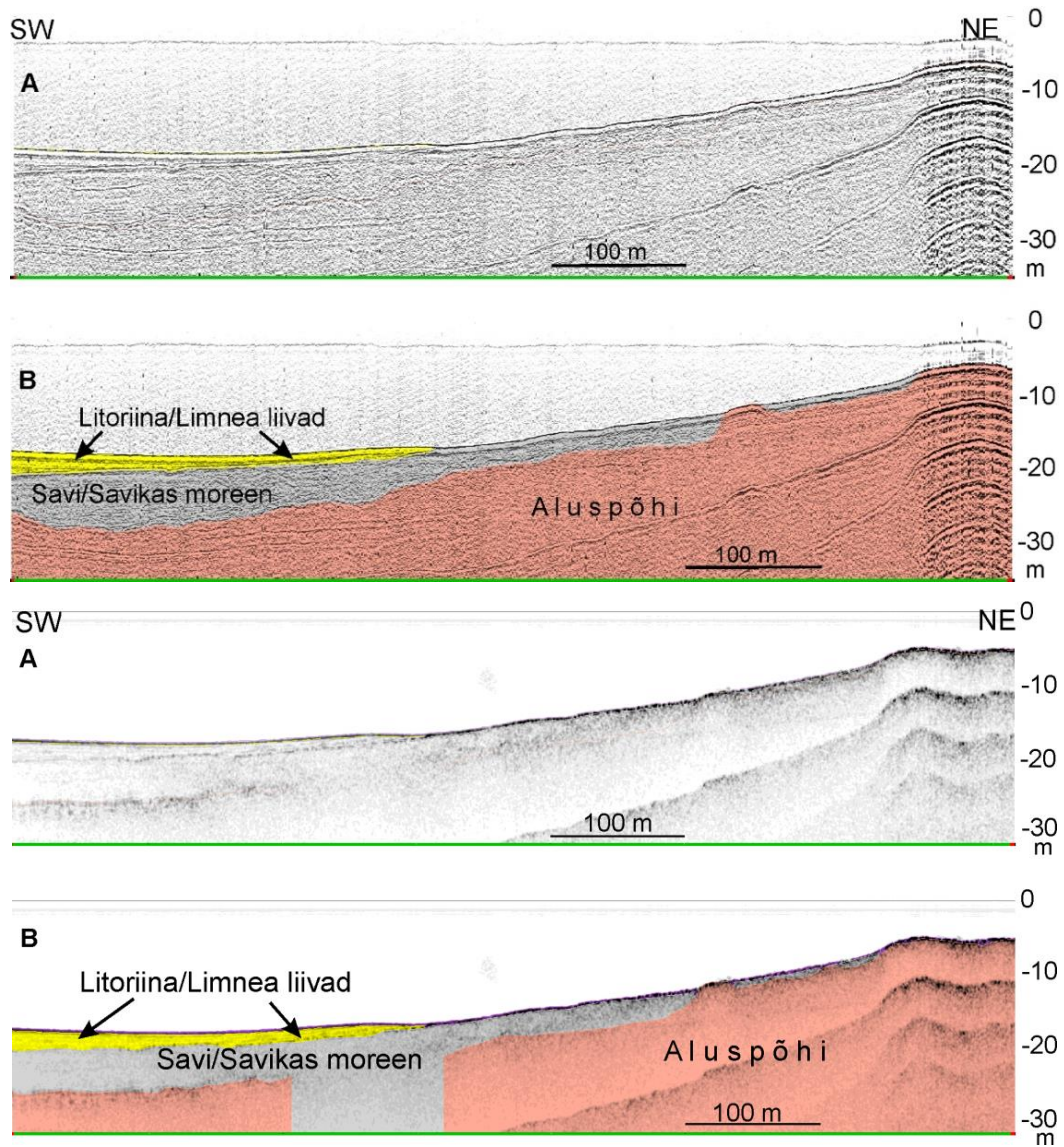


Joonis 21. Pingeri profileerimise andmetele tuginev Uudepanga lahe veealuse rannanõlva batümeetria kaart. Alus Maa-ameti ortofoto.

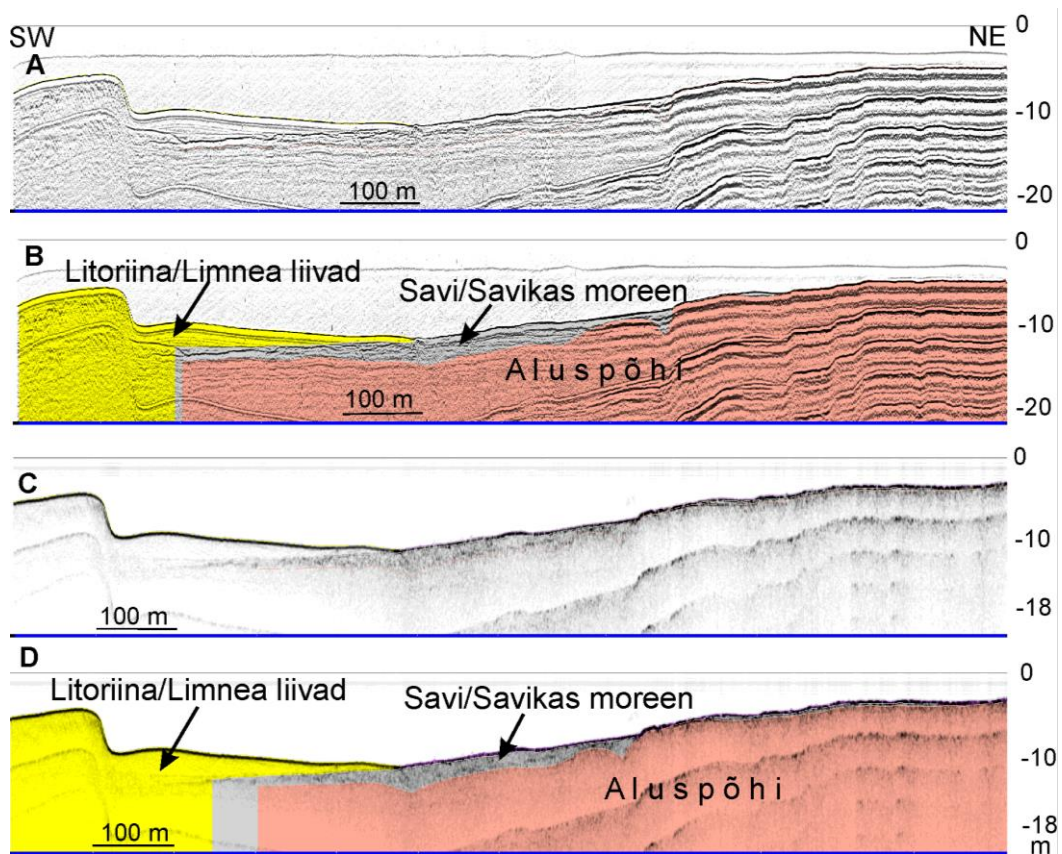
Uudepanga lahe seireala pinnakatte kõige esinduslikuma ja ühesemalt interpreteeritava seismoakustilise läbilõike andis *Boomer*-tüüpi profilaator (joonised 22, 23, 24), mis võimaldas enamasti jälgida kogu aluspõhjal lasuva pinnakatte kompleksi läbilõiget. Pinnakatte läbilõike ülaosa detaile võimaldasid täpsustada suurema lahutusvõimega *Chirp*-tüüpi seismoakustilised profiilid (joonised 22, 23, 24). Iseäranis efektiivne oli *Chirp*-tüüpi profiilide andmestik rannalähedasel, väga õhukese pinnakattega lõigul, kus aluspõhja ja pinnakatte kontakt *Boomer*-tüüpi profiilidel polnud eristatav. Siinjuures tuleb silmas pidada, et erinevaid, sügavamal merepõhjas esinevaid pinnakatte komplekse katab kõikjal enamasti õhuke tänapäevaste purdsetete kiht (põhjasetted), mis oma väikese paksuse tõttu pole eristatavad seismoakustilistel profiilidel, kuid mille olemasolu merepõhjas on *Chirp*-tüüpi profiilidel aimatav (joonised 22, 23, 24, tähistatud ülemise peenikese punaka kihina).



Joonis 22. Uudepanga lahe seireala põhjaosa *Boomeri* seisimokustilise profiil 125851 interpreteerimata (A) ja interpreteeritud (B) üleval ning sama profiili *Chirp*-tüüpi profilaatori interpreteerimata (A) ja interpreteeritud (B) versioon all. Profiili asukohta vaata joonis 2.

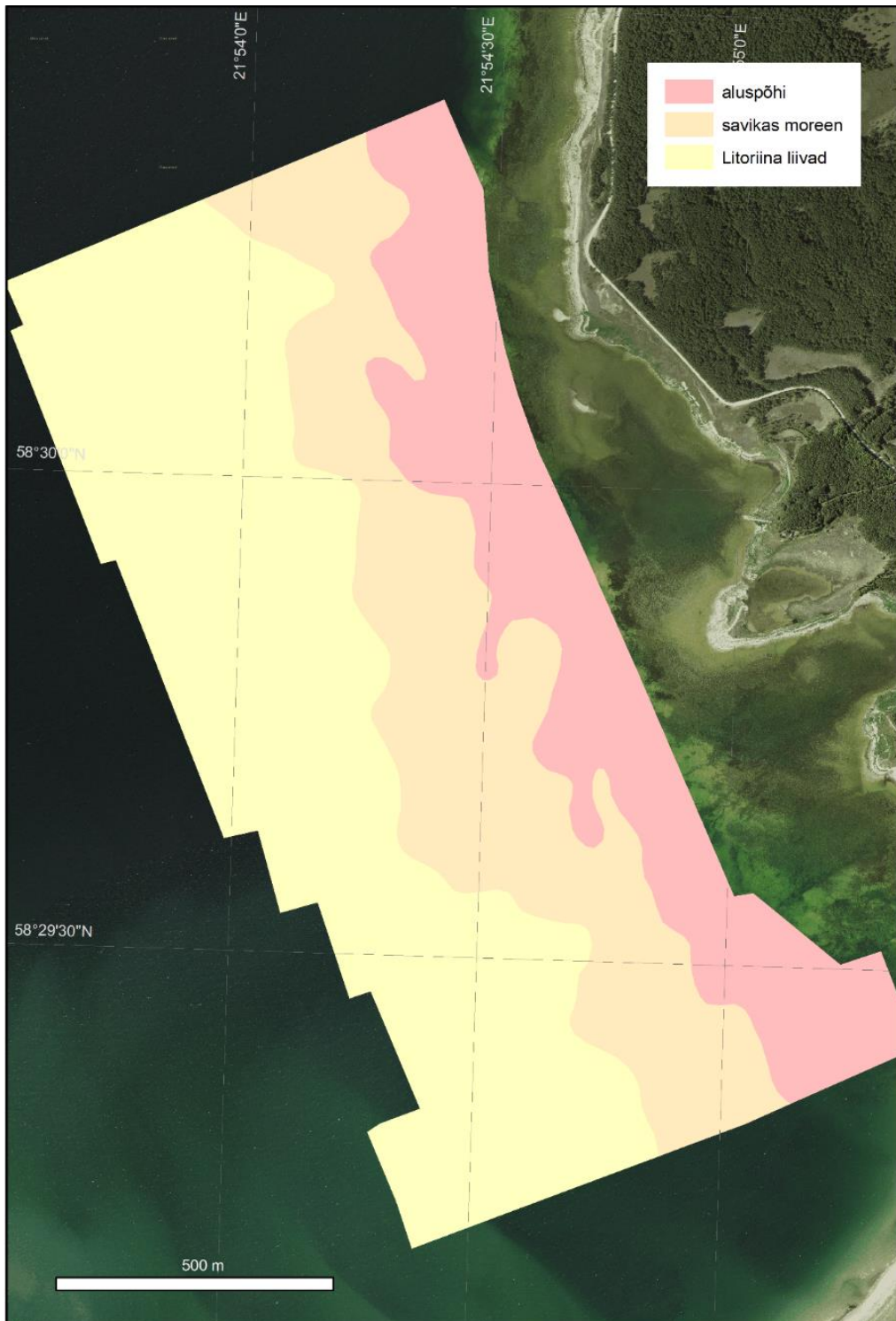


Joonis 23. Uudepanga lahe seireala keskosa *Boomeri* seisimokustilise profiil 114130 interpreteerimata (A) ja interpreteeritud (B) üleval ning sama profiili *Chirp*-tüüpi profilaatori interpreteerimata (A) ja interpreteeritud (B) versioon all. Profiili asukohta vaata joonis 2.



Joonis 24. Uudepanga lahe seireala lõunaosa *Boomer*-tüüpi seismoakustilise profiil 102150 interpreteerimata (A) ja interpreteeritud (B) üleval ning sama profiili *Chirp*-tüüpi profilaatori interpreteerimata (A) ja interpreteeritud (B) versioon all. Profiilide asukoht vaata joonis 2.

Seismoakustilistele läbilõigetele tuginedes koostati pinnakatte kaart (joonis 25). Kõikidel profiilidel tuleb selgelt välja rannikulähedane aluspõhja avamuse ala, mis siin-seal on kaetud erosioonilistesse taskutesse sadestunud rohkem või vähem kihitamata/sorteerimata setetega. Tuginedes põhjasetete granulomeetrilise analüüsi andmestikule (tabel 4) on tegemist kruusaka-savika moreenilaadse settega, mida interpreteeriti savika moreeni kihina (joonised 22, 23, 24).



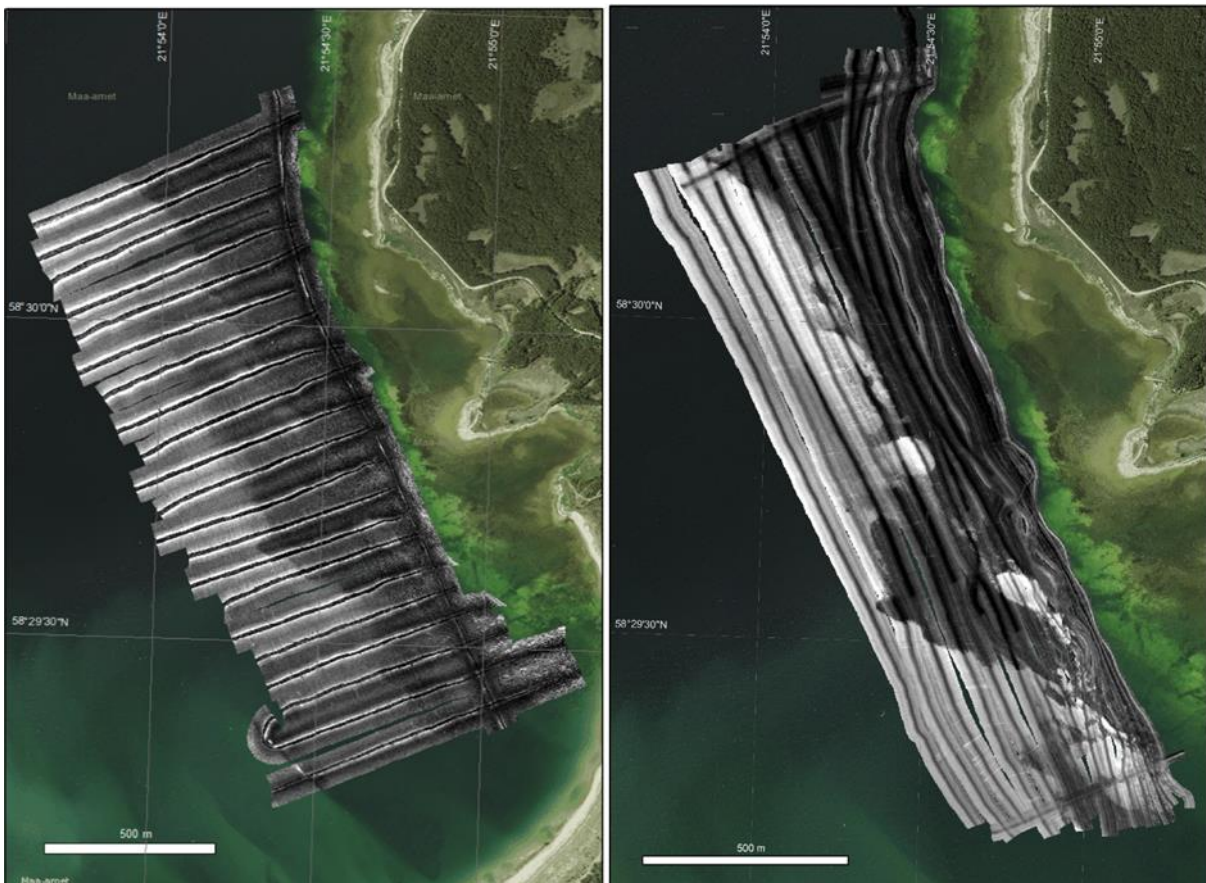
Joonis 25. Uudepanga lahe seireala merepõhja pinnakatte kaart.

Tabel 4. Uudepanga lahe setteproovide granulomeetriline koostis vastavalt Udden-Wentworth'i terasuuruse klassifikatsioonile.

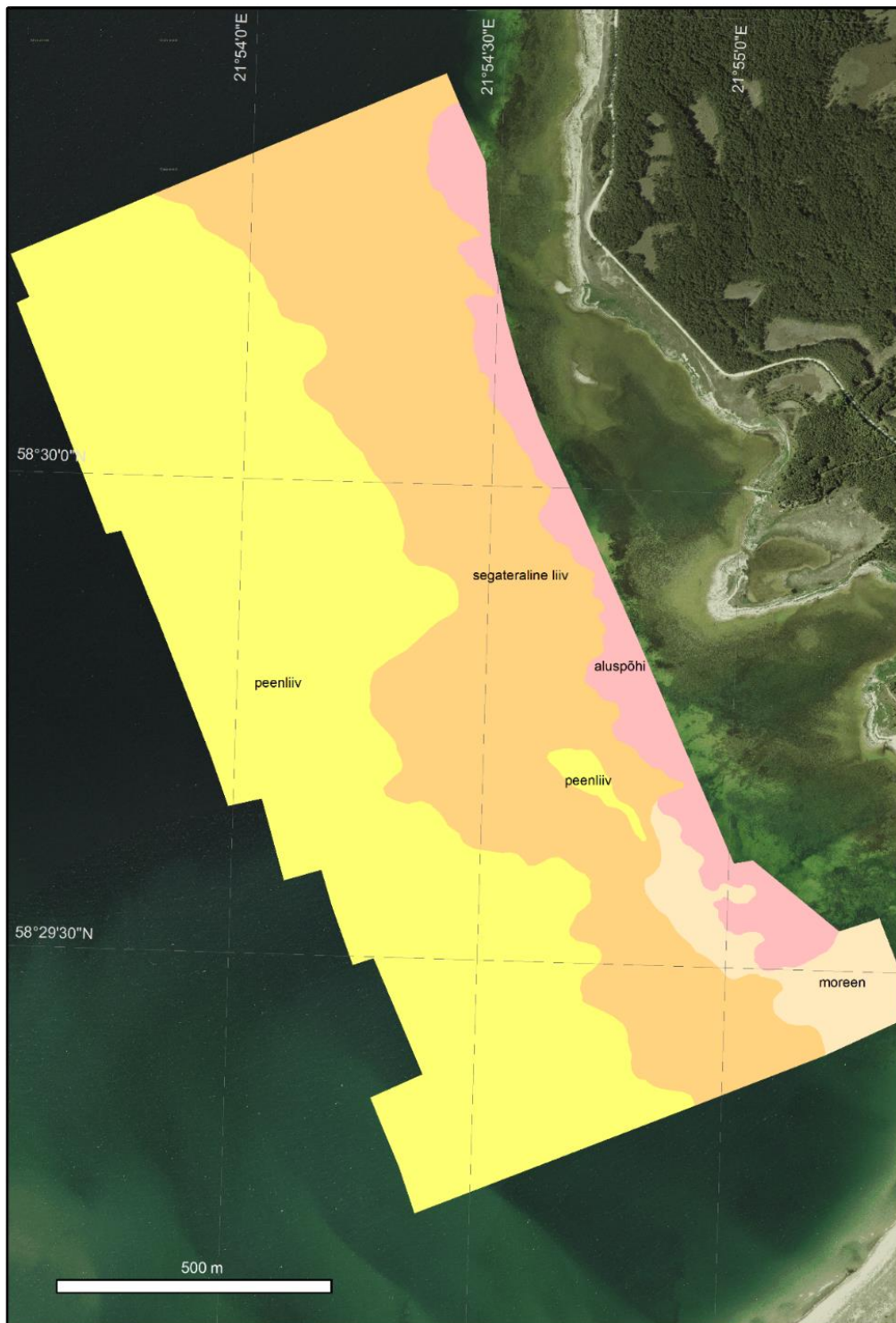
Jaama nimetus	Savi, %	Aleuriit, %	Liiv, %	Kruus, %
UP20-01		5,4	94,6	
UP20-02		6,5	93,5	
UP20-03	0,3	31,3	40,5	27,9
UP20-04		7,2	92,8	
UP20-05		18,8	81,2	
UP20-06	0,8	26,5	72,7	
UP20-07	0,7	24,5	74,8	
UP20-08		17,4	82,7	
UP20-09	4,2	15,6	15,9	64,3
UP20-10		28,4	71,6	
UP20-11		19,8	80,2	
UP20-12	Kõva põhi, karbid			
UP20-13	3,3	23,9	72,8	
UP21-15	0,7	23,3	76,0	
UP21-16	1,4	25,1	73,6	
UP21-17	Veerised kruusaga, valdab kristalne kivi, pooleldi ümardatud, karbid			
UP21-18	Veerised kruusa ja liivaga, valdab kristalne kivi, karbid			
UP21-19	Kopp tühi, natuke peenliiva			
UP21-20	Kruus ja liiv, karbid			
UP21-21		21,7	78,3	
UP21-22	1,2	24,5	74,3	
UP21-23	2,1	27,2	70,8	
UP21-24		13,9	86,1	
UP21-25	Veerised, kruus, liiv, karbid			
UP21-26	2,0	6,5	6,8	84,6
UP21-27	Karbid, liiv, kruus			
UP21-28	1,2	20,0	78,9	
UP21-29	2,2	25,3	72,5	
UP21-30	3,3	35,4	61,3	
UP21-31	1,0	9,5	18,6	70,8
UP21-32	4,3	11,7	27,5	56,5
UP21-33	1,7	46,2	52,2	

Avamere poole liikudes tuleb sügavamale laskuval aluspõhjal esile jämepurdsemast sorteerimata/kihitamata materjalist moodustunud, kohati enam kui 5 m paksune kiht, mille seismoakustiline pilt meenutab suuresti savikat moreeni. Selgem moreenile iseloomulike ja puhtamast savikast kompleksist erinevate tunnustega seismoakustiline pilt esineb seireala põhjaosas (joonis 22). Kaugemal rannikust ilmub moreenile sarnaneva kompleksi peale hästi kihitatud peenteralise sette kiht, mille seismoakustiline pilt sarnaneb Liivi lahe ja Suure väina pinnakatte ülaosas eristatud Litoriinamere liivakale settekompleksile. Arvestades tänapäevast setete liikumise suunda ja Uudepanga lahe Kiipsaare poolset küljel ja päraosas esinevaid luiteid/liivikuid võib suure tõenäosusega oletada, et Litoriinamere liivad on suuresti kaetud tänapäevaste Limneamere kihitamata liivakate setetega, mistõttu kogu seda üksust võib käsitleda Litoriinamere/Limneamere liivaka kompleksina.

Tuginedes suuresti külgvaate sonari profileerimise andmetele (joonis 26) koostati Uudepanga lahe põhjasetete ja nende leviku kaart (joonis 27). Et seireala rannavööndis paljandub maismaal suures osas aluspõhi, puudub ka selle veealuses rannalähedases vööndis peeneteralisemate liivakate/savikate setete sissekanne. Nimetatud vöönd tuleb tumedama rannalähedase ribana esile ka külgvaate sonari kaardil (joonis 26). Kohati kuni ligi paarisaja meetri laiusele veealusele aluspõhja avamusele järgneb avamere suunas sorteerimata jämepurdsema sette avamus. Umbkaudu 300–600 m kaugusel rannast, kus sügavuse suurenedes lainetuse mõju põhjasetete liigutamisele väheneb, katab merepõhja peeneteralise liiva kompleks, mis heledama alana tuleb selgelt esile ka külgvaate sonari kaardil (joonis 26). Nagu nähtub kaardilt, tuleb laialdane liiva ja liivakate setete levikuala esile Uudepanga lahe päraosas, iseäranis selle Harilaiu poolse külje veealusel nõlval. Siinne liiv pärineb ilmselt suuresti lahe läänekülge piiritlevalt Harilaiult. Sellist setete liikumist Uudelahe päraosa suunas on tõendanud ka Kiipsaare nukas teostatud detailsed kõrgusmõõdistamised (Suuroja jt, 2020). Külgvaate sonariga suuresti analoogiline põhjasetete leviku pilt ilmneb ka lehviksonari profiilide kaardipildis (joonis 26). Aga lehviksonari tagasipeegelduva signaali tugevuse andmete põhjal koostatud settetüüpide kaardi detailsus on võrreldes külgvaate sonariga parem.



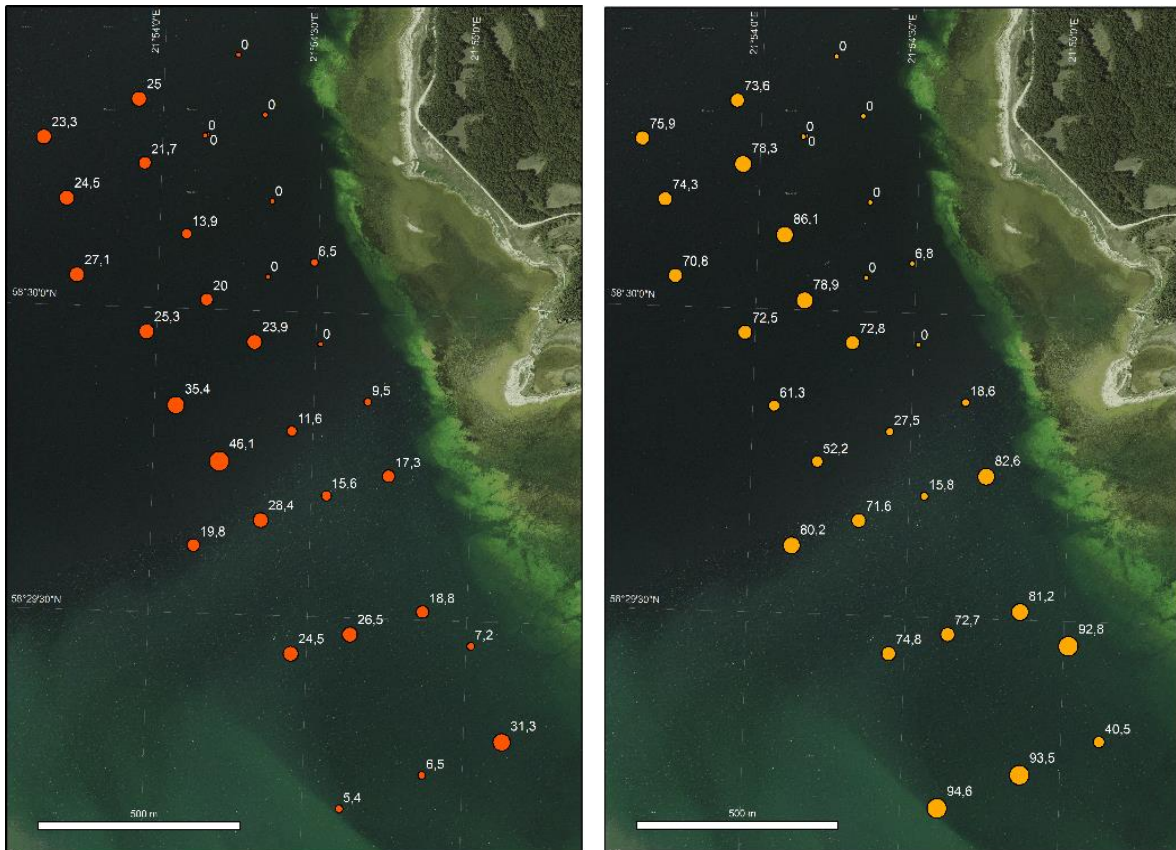
Joonis 26. Külgvaate sonari profiilide mosaiikkujutis (vasakul) ja lehviksonari tagasipeegelduva signaali tugevuse mosaiikkujutis (paremal) Uudepanga lahes. Heledama-tumedama ala piir tähistab jämedamate segateraliste põhjasetete ja peenemateraliste Litorinamere liivade leviku piiri. Alus Maa-ameti ortofoto.



Joonis 27. Külgvaate sonari andmetel põhinev Uudepanga lahe erinevate põhjasetete leviku kaart.

Paralleelselt geofüüsikaliste mõõdistustega koguti põhjasetete pinnaproovid ja määrati nende granulomeetriline koostis. Korralikud, lõimiseanalüüsiks piisava kogusega purdmaterjali proovid saadi pea et kogu uuringu alalt. Erandiks oli uuringuala kagunurk ja osaliselt keskosa, kus merepõhjas paljandub Siluri lubjakivi, mis siin-seal on kaetud õhukese jämeperdse

materjali kihiga. Vastavalt Udden-Wentworth'i terasuuruse klassifikatsioonile eristati proovides välja savi, aleuriidi, liiva ja kruusa fraktsioonid (tabel 4). Proovide granulomeetriline analüüs näitab, et savi- ja kruusafraktsiooni osakaal on enamasti uuringuala proovides marginaalne ning valdavaks on aleuriidi ja liiva fraktsioon. Aleuriidi- ja liivafraktsioonide protsentuaalse leviku kaartidel (joonis 28) ilmneb selgelt liivafraktsiooni osakaalu suurenemine kaldalähedases madalamaveelises hüdrodünaamiliselt aktiivsemas vööndis.



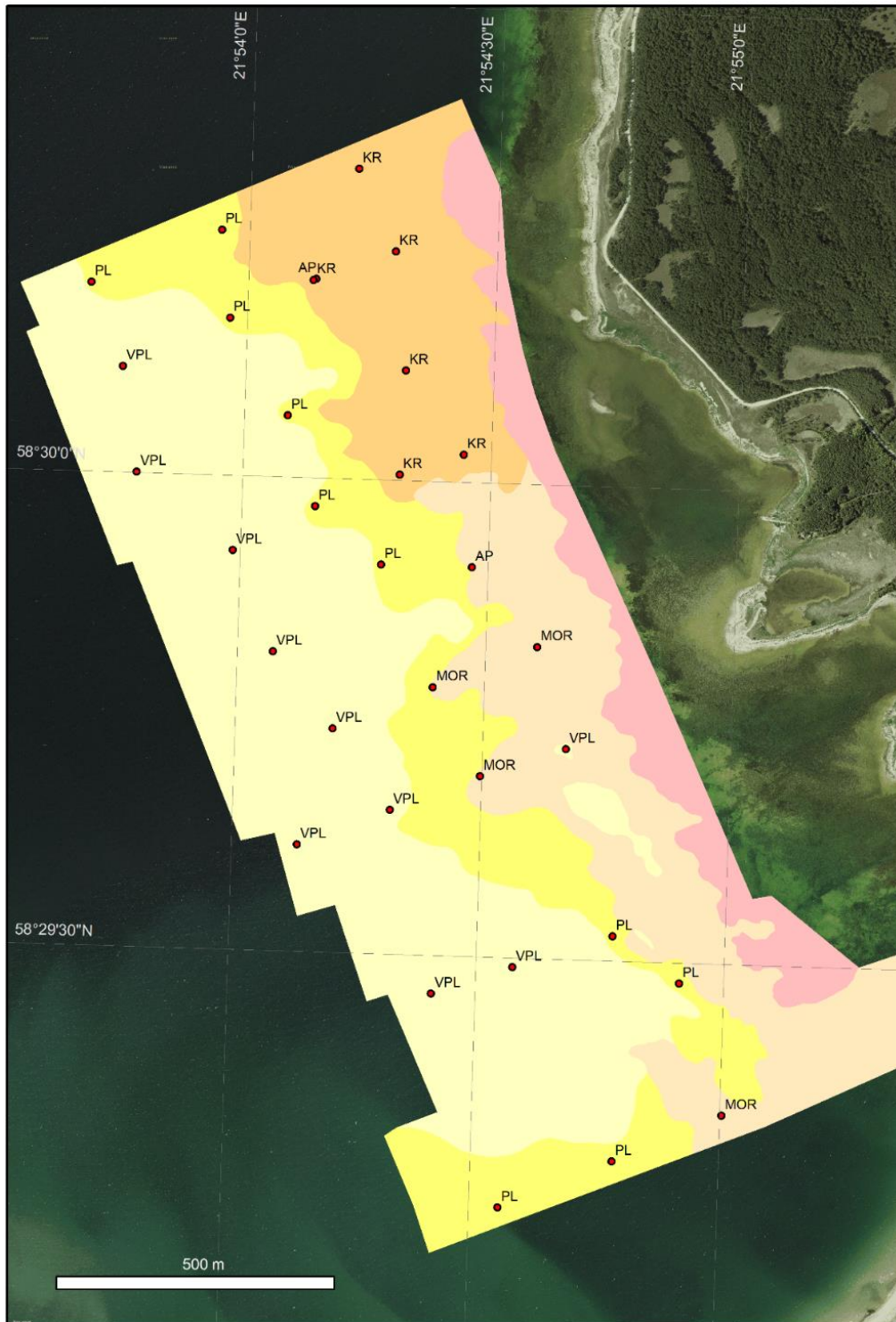
Joonis 28. Aleuriidi fraktsiooni (vasakpoolne) ja liiva fraktsiooni (parempoolne) protsentuaalne levik proovivõtupunktides Uudepanga lahes.

Uudepanga lahe setteproovide lõimimine teisendati Folk'i klassifikatsioonide klassidesse (tabel 5). Folk 5 klassifikatsioonis oli Uudepanga lahes esindatud kõik viis klassi. Uudepanga lahe proovide detailsematesse Folk-klassifikaatoritesse teisendades esindatud klasside arv oluliselt ei suurenenud. Folk 7 klassifikatsioonis oli lahes esindatud viis klassi, Folk 16 klassifikatsioonis kaheksa klassi.

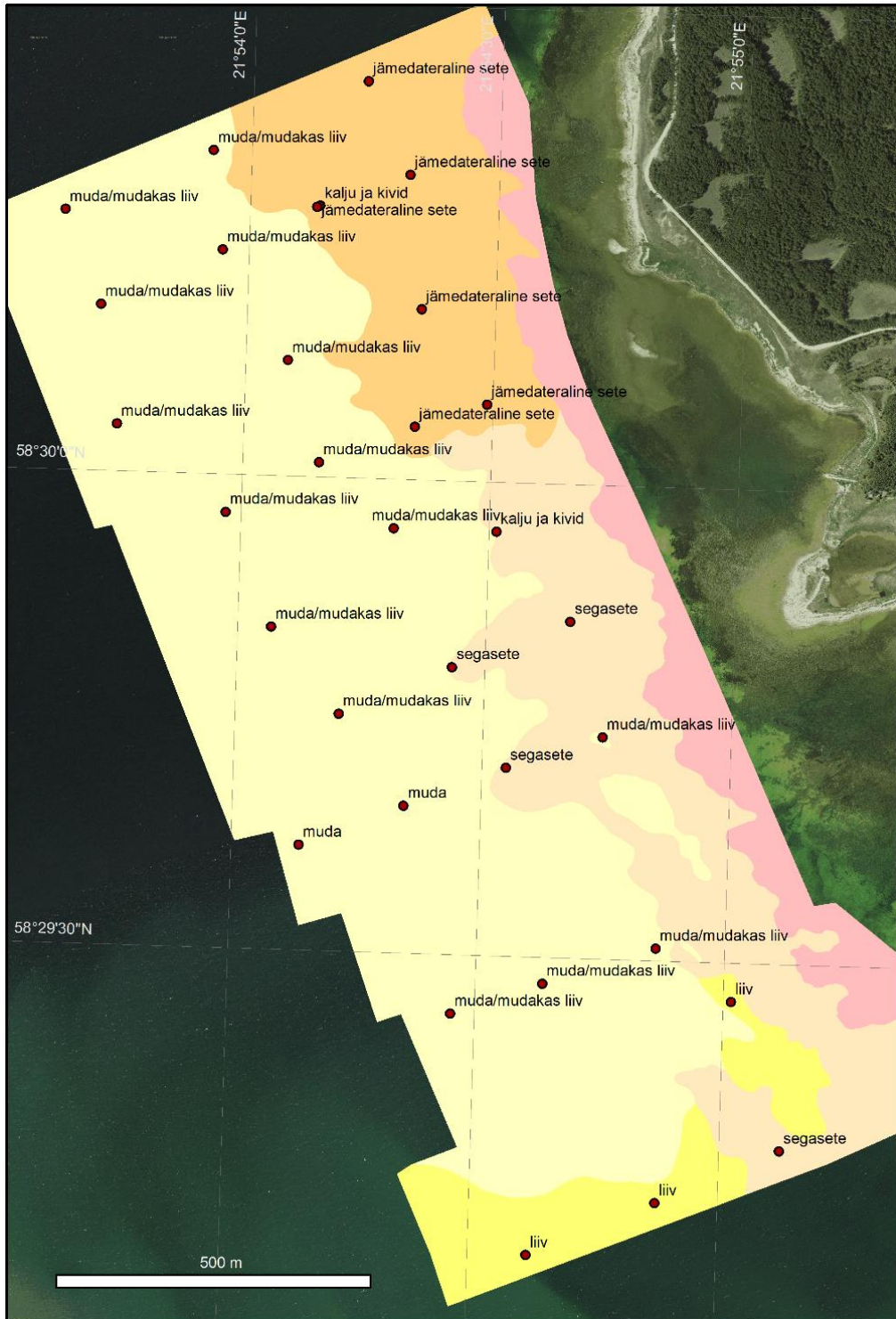
Tabel 5. Uudepanga lahe põhjasetete proovide granulomeetriline koostis teisendatuna Folk'i setete klassideks.

Jaam	FOLK 5	FOLK 7	FOLK 16
UP20-01	sand	sand	S
UP20-02	sand	sand	S
UP20-03	mixed sediment	mixed sediment	gmS
UP20-04	sand	sand	S
UP20-05	mud to muddy sand	muddy sand	mS
UP20-06	mud to muddy sand	muddy sand	mS
UP20-07	mud to muddy sand	muddy sand	mS
UP20-08	mud to muddy sand	muddy sand	mS
UP20-09	mixed sediment	mixed sediment	mG
UP20-10	mud to muddy sand	muddy sand	mS
UP20-11	mud to muddy sand	muddy sand	mS
UP20-12	rock & boulders	rock & boulders	rock & boulders
UP20-13	mud to muddy sand	muddy sand	mS
UP21-15	mud to muddy sand	muddy sand	mS
UP21-16	mud to muddy sand	muddy sand	mS
UP21-17	coarse sediment	coarse sediment	G
UP21-18	coarse sediment	coarse sediment	G
UP21-19	rock & boulders	rock & boulders	rock & boulders
UP21-20	coarse sediment	coarse sediment	sG
UP21-21	mud to muddy sand	muddy sand	mS
UP21-22	mud to muddy sand	muddy sand	mS
UP21-23	mud to muddy sand	muddy sand	mS
UP21-24	mud to muddy sand	muddy sand	mS
UP21-25	coarse sediment	coarse sediment	sG
UP21-26	coarse sediment	coarse sediment	sG
UP21-27	coarse sediment	coarse sediment	sG
UP21-28	mud to muddy sand	muddy sand	mS
UP21-29	mud to muddy sand	muddy sand	mS
UP21-30	mud to muddy sand	muddy sand	mS
UP21-31	mixed sediment	mixed sediment	msG
UP21-32	mixed sediment	mixed sediment	msG
UP21-33	mud to muddy sand	muddy sand	mS

Lehviksonari andmestik kombineerituna põhjasetete granulomeetria andmetega lubab oluliselt detailsemalt hinnata erinevate settetüüpide levikut ning täpsustada nende piire põhjasetete levikukaardil (joonis 29). Sellise info alusel ja kasutades Folk 5 klassifikatsiooni teisendatud põhjasetete proovide granulomeetrilist koostist, saab koostada kaarte (joonis 30), millel on vastavalt merepõhjas esinevale sette substraadile välja eraldatud Euroopa merestrategia raamdirektiivis toodud peamised elupaikade tüübid: kalju ja kivid (*rock and boulders*), muda (*mud to muddy sand*), jämedateraline sete (*coarse sediment*), liiv (*sand*), segasubstraat (*mixed sediment*).



Joonis 29. Proovivõtupunktide granulomeetriaie ning lehviksonari andmete tuginevad settepiirid Uudepanga lahe idaosa rannalähedases vööndis . VPL-väga peen liiv, PL-peenliiv, KR-kruus, MOR-moreen, AP-aluspõhi.



Joonis 30. Merepõhja elupaikade põhitüüpide leviku kaart Uudepanga lahes tuginedes Folk 5 merepõhja substraadi klassifikatsioonile.

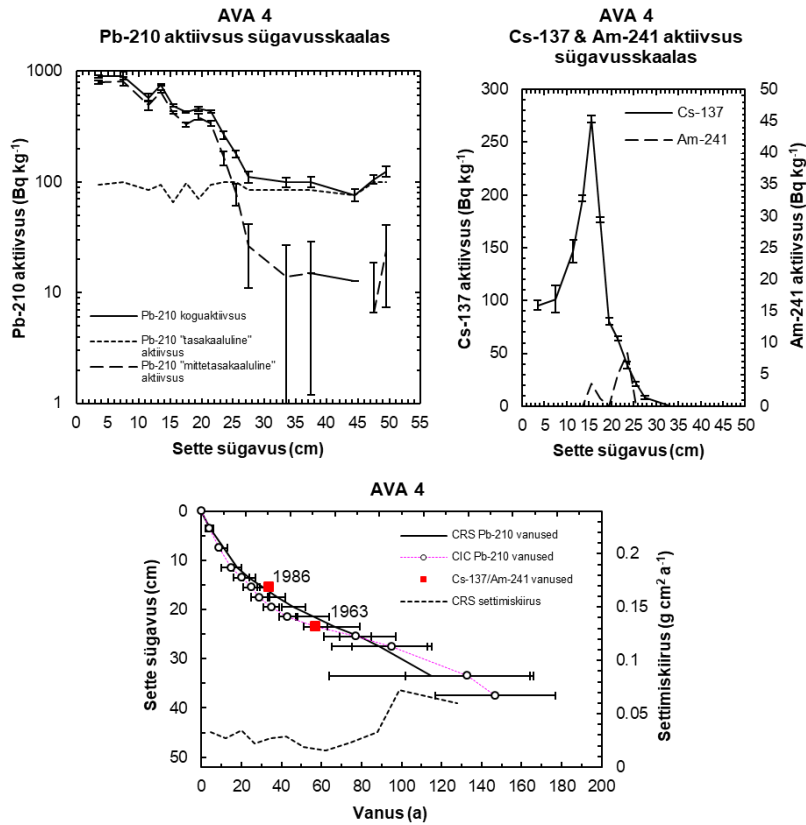
3.2 Setteläbilõigete geokeemiline koostis ja vanus

3.2.1 Setteläbilõige AVA 4

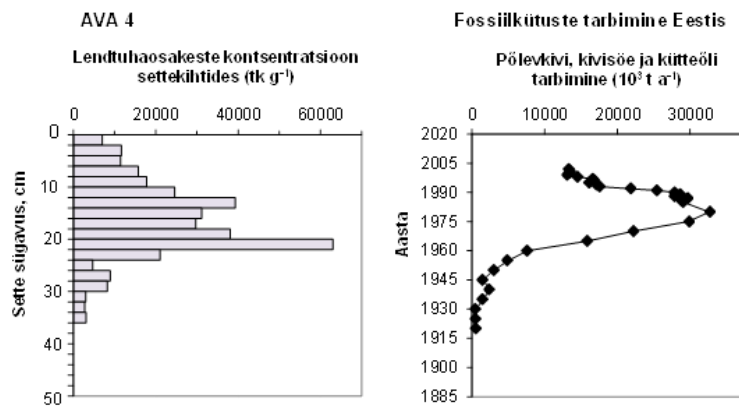
Setteläbilõige AVA 4 pärineb avamere alalt Saaremaast läänes (joonis 4, tabel 2), proovivõtu kohas on veesügavus 159 m. Gemax-tüüpi proovivõtjaga saadud puursüdamiku pikkus on 68 cm. Setteläbilõike ülemine 27 cm paksune osa koosneb visuaalselt musta värvi vedelast orgaanilise aine rikkast meremudast (joonis 5). Selle lamamiks on hall tumedaid läätsi ja vahekihte sisaldav savikas aleuriit (tabel 2).

Setteläbilõike vanuse määramiseks analüüsitud summaarne ^{210}Pb aktiivsus väheneb enamjaolt monotoonselt sette pinnakihi 880 Bq kg^{-1} aktiivsusest kuni u $90\text{-}100 \text{ Bq kg}^{-1}$ aktiivsuseni 30-35 cm sügavusel (joonis 31), kus saabub radioaktiivne tasakaal ^{226}Ra aktiivsusega ("tasakaaluline" ^{210}Pb komponent). See näitab, et suuri muutusi settimiskiiruses ei ole. Seetõttu eelistati vanuse arvutamisel CRS dateerimismudelit. Allapoole 35 cm settetasel vanused ekstrapoleeriti. Läbilõike ülemise osa ajaskaalat sai täpsustada mõõdetud ^{241}Am aktiivsusega, mille kõrgemad väärtused registreeriti 23,5 cm sügavusel ja mis tähistab 1960-ndate alguse atmosfääri tuumakatsetuste tippaega ja ^{137}Cs väga kõrge aktiivsusega settesügavusel 15,5 cm, mis on põhjustatud Tšernobõli aatomielektriijaama õnnetusest 1986. a (joonis 31). Settimiskiirus viimasel 80-90 aastal on olnud enamvähem ühtlane $0,02\text{-}0,03 \text{ g cm}^2 \text{ a}^{-1}$.

Et läbilõike ajaskaalat veelgi täpsustada, eriti selle alumist osa, kus ^{210}Pb dateeringud annavad suuremate veapiiridega tulemusi, analüüsiti settest lendtuhaosakeste jaotuskõver. Lendtuhaosakeste, mis tekivad fossiilsete kütuste põletamisel kõrgel temperatuuril, jaotusprofiilil setetes on täheldatud iseloomulikke tunnuseid, mis on regiooniti või isegi globaalselt muutumatud. Tuhaosakeste jaotuskõvera võrdlemisel sama regiooni kütuste kasutamise ajalooga või atmosfääri emiteeritavate saasteainete statistikaga ilmnevad sarnased ajalised muutused – iseloomulikud tunnused tuhaosakeste kontsentratsiooniprofiilis kattuvad suurte muutustega kütuste tarbimises, mis võimaldab osakeste jaotust kasutada kaudse kronoloogilise meetodina (Alliksaar, 2000). AVA 4 setetes on lendtuhaosakeste kontsentratsioon 31 cm sügavamal väga madal, ligikaudu 3000 osakest g^{-1} kuivas settes (joonis 32). Väiksele tõusutrendile järgneb järsk sisalduse tõus alates 25,5 cm sügavusest. Settevahemikus 13–22 cm ulatub osakeste kontsentratsioon 30000-60000 tk g^{-1} .



Joonis 31. Setteläbilõike AVA 4 radiomeetriliste mõõtmiste tulemused - sette ^{210}Pb aktiivsuse (Bq kg^{-1}) erinevad komponendid; ^{137}Cs ja ^{241}Am aktiivsus (Bq kg^{-1}) erinevates settekihtides; ja nende põhjal koostatud sügavus-vanus ajaskaala koos settimiskiirusega ($\text{g cm}^{-2} \text{a}^{-1}$).

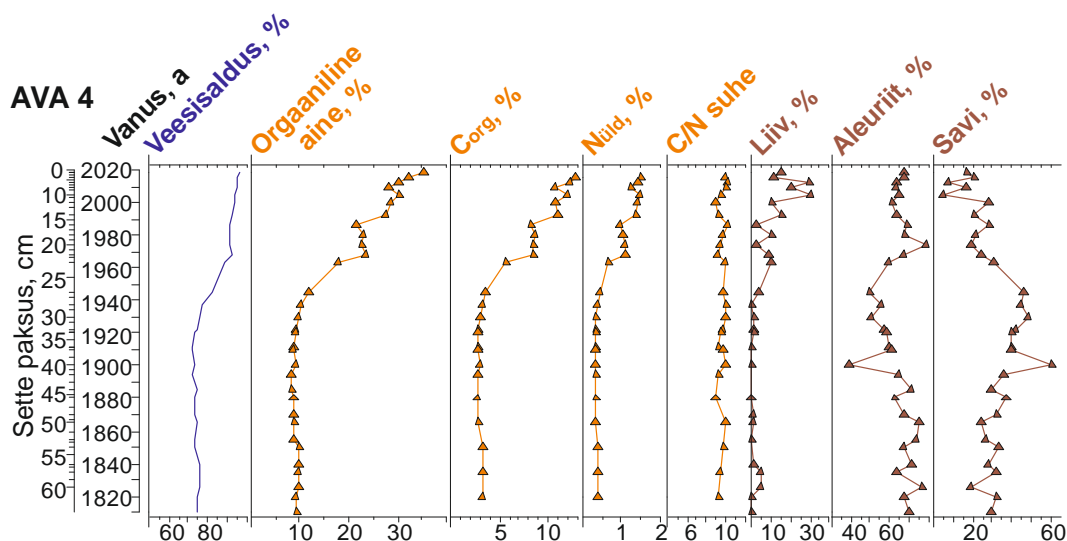


Joonis 32. Lendtuhaosakeste kontsentratsioon (tükki grammis kuivaines) setteläbilõikes AVA 4 võrrelduna fossiilsete kütuste tarbimisajalooa Eestis ($\times 10^3$ tonni aastas).

Pindmises u 12 cm paksuses kihis lendtuhaosakeste kontsentratsioon väheneb. Lendtuhaosakeste jaotust setetes kõrvutati Eestis kasutatud fossiilkütuste statistilise andmestikuga (joonis 32), need andmerekad on küllalt sarnased. Lendtuhaosakeste kontsentratsiooni järsku tõusu alates 25 cm sügavusest võib dateerida 1940-ndate teise poolede kui II maailmasõja järgselt suurenes järsult energiavajadus. Kütuste maksimaalne

tarbimine Eestis 1960–1980-ndatel vastab settevahemikule 13–22 cm. Energiatarbimise vähenemine 1990-ndatel a ja lisaks ka efektiivsemate tuhaarastusseadmete paigaldamine jõujaamadele on vähendanud sellest ajast saadik tuha emissiooni atmosfääri ja seega ka lendtuhaosakeste sissekannet setetes viimastel aastakümnetel. Muutused lendtuhaosakeste kontsentratsioonis järgivad päris hästi ^{210}Pb , ^{137}Cs ja ^{241}Am dateerimismeetodite põhjal koostatud ajaskaalat (joonis 31). Lendtuhaosakeste analüüs võimaldab täpsustada ajaskaalal 1940-ndaid aastaid ja sellele eelneva perioodi ajaskaalat, kus ^{210}Pb alusel arvatud CRS ja CIC vanusemudelid üksteisest väga oluliselt lahknevad ja neil on suured veapiirid. Lendtuhaosakeste esinemine settekihtides 26–34 cm, küll väikestes kogustes, viitab pigem 20. sajandi algusele kui üleelmisele sajandile. Seda arvesse võttes lähtuti pigem CRS mudeli ajaskaalast ja eeldades, et settimiskiirus pole muutunud ekstrapoleeriti vanused sügavamatele settekihtidele. Saadud ajaskaala järgi algas AVA 4 setteläbilõike moodustumine 1800-ndatel a (settesügavus 68 cm).

Sette põhikomponentide koostis on 20. saj keskpaigani ühtlane (joonis 33, tabel 6). Orgaanilise aine sisaldus (proovi põletamine kuumutuskaos meetodil 550 °C juures) on 10% piires, C_{org} ja $N_{\text{üld}}$ jäävad vastavalt 2,7–3,3% ja 0,35–0,4% vahemikku. Granulomeetrisel koostises moodustavad enamuse settest aleuriidiosakesed (kuni 75%), saviosakeste hulk jääb valdavalt alla 40%. 20. saj teisel poolel leiab settekoostises aset selge muutus. Järsult suureneb orgaanilise aine sisaldus, ulatudes pindmistes, tänapäeval akumulatsioon setetes 35%. Nii kõrget orgaanilise aine sisaldust pole varasemad uuringud Eesti mereala setetes täheldanud. C/N aatomsuhte väärtused vahemikus 9–10 viitavad, et orgaaniline aine on tekkinud valdavalt Läänemere vetikate biomassi lagunemise tagajärjel. Orgaanilise aine pidev suurenenud akumulatsioon setetes viitab Läänemere jätkuvale ülekoormatusele toitainetega ja eutrofeerumisele. Tähelepanuväärne on alates 1960-ndatest a peenliiva fraktsiooni (0,063–0,125 mm) sisalduse tõus.

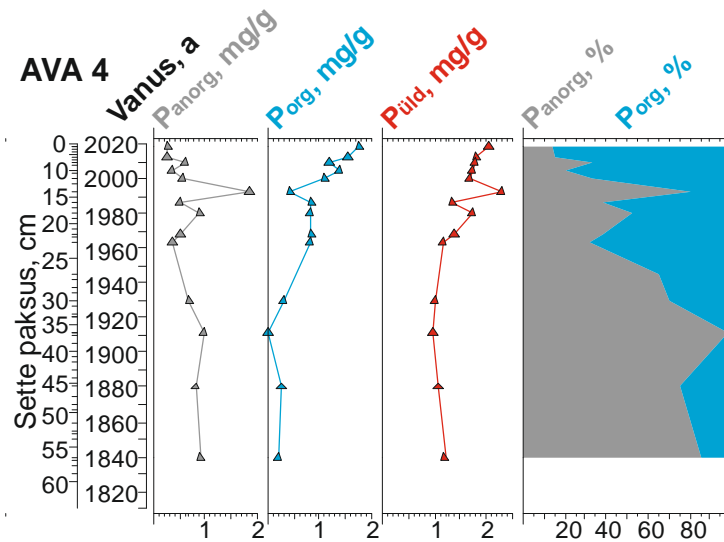


Joonis 33. Setteläbilõike AVA 4 vee-, orgaanilise aine, orgaanilise süsiniku, üldlämmastiku sisaldus, $C_{\text{org}}/N_{\text{üld}}$ aatomsuhe, liiva (terasuurus 0,063–2 mm), aleuriidi (terasuurus 0,002–0,063 mm) ja savifraktsiooni (terasuurus <0,002 mm) sisaldus. Vertikaalteljel on sette sügavus- ja vanuseskaala.

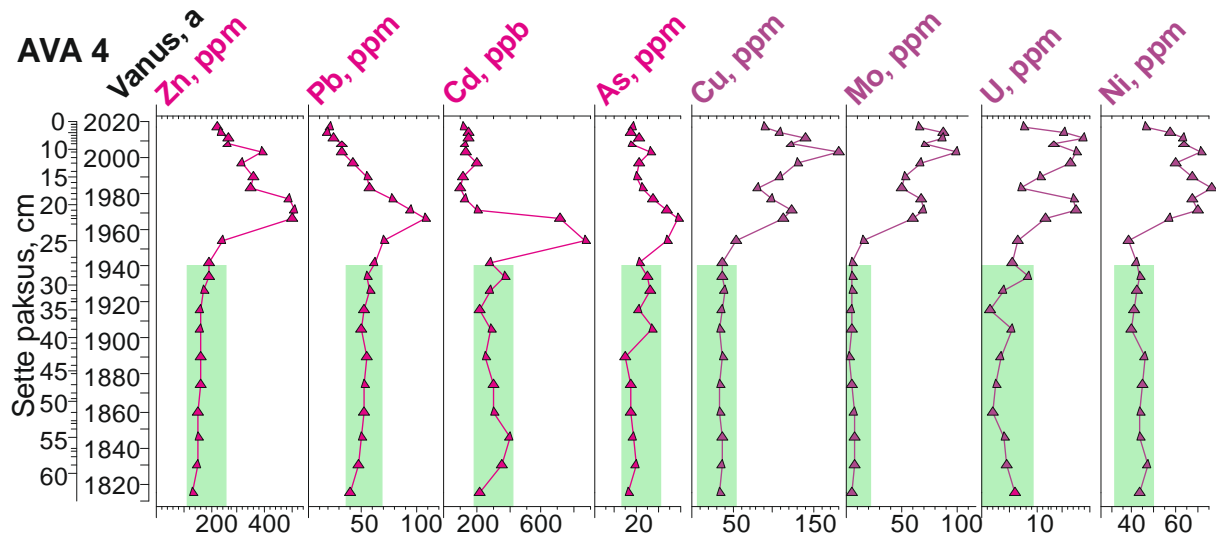
Tabel 6. Setteläbilõike AVA 4 keemilise ja granulomeetrilise koostise analüüsitulemused.

Sette sügavus, cm	Vanus, a	Org. aine, %	C _{org} , %	N _{üld} , %	P _{üld} , mg/g	P _{anorg} , mg/g	P _{org} , mg/g	P _{anorg} , %	P _{org} , %	Savi, %	Aleuriit, %	Liiv, %
2	2018	35,4			2,04	0,28	1,76	13,9	86,1	17,2	67,4	15,4
4	2016	32,3	12,8	1,5						20,9	67,4	11,7
6	2012	30,2	12,1	1,4	1,80	0,27	1,53	15,1	84,9	7,1	63,3	29,6
8	2009	28,3	10,6	1,2	1,77	0,60	1,18	33,6	66,4	16,6	63,0	20,4
10	2005	30,4	11,9	1,5	1,72	0,35	1,37	20,3	79,7	4,9	64,8	30,3
12	2000	28,5	10,7	1,4	1,66	0,56	1,10	33,6	66,4	28,2	61,3	10,5
14	1993	27,5	11,0	1,4	2,28	1,84	0,44	80,7	19,3	21,0	63,3	15,7
16	1986	21,6	8,2	0,9	1,35	0,51	0,84	37,9	62,1	28,7	68,8	2,5
18	1980	22,9	8,6	1,0	1,71	0,90	0,81	52,6	47,4	21,5	67,8	10,7
20	1974	22,7	8,5	1,1						19,3	78,2	2,6
22	1968	23,5	8,5	1,1	1,38	0,53	0,84	38,7	61,3	24,4	66,9	8,7
24	1963	17,8	5,7	0,7	1,16	0,37	0,80	31,5	68,5	30,5	59,3	10,2
26	1945	11,9	3,6	0,4	1,07	0,70	0,37	65,1	34,9	46,0	50,0	4,0
28	1938	10,1	3,2	0,4						44,3	55,4	0,4
30	1930	9,7	3,0	0,4	1,00	0,70	0,30	70,0	30,0	48,1	50,1	1,8
32	1922	9,1	2,9	0,3						41,6	57,1	1,3
34	1920	9,1	2,8	0,3						40,0	58,2	1,8
36	1912	8,8	2,9	0,4	0,97	0,96	0,14	98,5	1,5	40,0	59,6	0,5
38	1910	8,7	2,8	0,3						39,4	60,6	0,0
40	1900	9,1	2,9	0,3						60,5	39,0	0,5
42	1895	8,4	2,8	0,3						35,9	64,1	0,0
44	1885	8,5								29,4	70,6	0,0
46	1880	8,7	2,7	0,4	1,08	0,81	0,27	75,1	24,9	37,3	62,6	0,1
48	1870	8,8								32,4	67,0	0,7
50	1865	9,0	2,9	0,3						24,1	74,9	1,0
52	1855	8,9								26,6	73,0	0,4
54	1850	10,0	3,3	0,4						33,1	66,9	0,0
56	1840	9,8								27,5	71,2	1,3
58	1835	9,6	3,3	0,4						32,1	63,2	4,7
60	1825	9,8								18,8	76,6	4,6
62	1820	9,1	3,2	0,4						32,5	67,0	0,5
64	1810	9,5								29,6	69,9	0,6
66	1805	9,6	3,2	0,4						23,7	73,7	2,5
68	1795	9,5								24,8	74,2	1,0

Settefosfori jaotus AVA 4 vertikaalläbilõikes näitab samasugust seaduspärasust nagu sette põhikomponentide koostis. Enne 1960-ndaid a moodustunud setted on P vaesed, P_{üld} sisaldus jääb 1 mg/g kuivaines või sellest allapoole. Edaspidi setetega seotud P sisaldus on pidevalt suurenenud ulatutes pindmises settekihis >2 mg/g kuivaines. Settefosfori tõus vertikaalläbilõikes on seotud orgaanilise ainega seotud P_{org} tõusuga (joonis 34). Mineraalse fosfori (P_{anorg}) sisaldus setteläbilõikes on olnud ühetaoline (<1 mg/g kuivaines), va 1990-ndatel a moodustunud settekiht, kus sisaldus oluliselt suureneb.



Joonis 34. Setteläbilõike AVA 4 eri fosforifraktsioonide (anorgaaniline ja orgaaniline P), üldfosfori sisaldus ja eri fosforifraktsioonide protsentuaalne vahekord. Vertikaalteljel on sette sügavus- ja vanuseskaala.



Joonis 35. Setteläbilõike AVA 4 tsingi, plii, kaadmiumi, arseeni, vase, molübdeeni, uraani ja nikli sisaldus. Vertikaalteljel on sette sügavus- ja vanuseskaala. 19. sajandil ja 20. sajandi esimesel poolel akumuldeerunud raskmetallide ühtlane sisaldus (roheline taust) on elementide looduslähedane hea keskkonnaseisund.

Setteläbilõikes AVA 4 on tähelepanuväärne terve rea mikroelementide sisalduste jaotuste seaduspärasused (tabel 7, joonis 35). Raskmetallide Zn, Pb ja Cd ning As sisaldused on ühtlaselt madalad 20. saj keskpaigani ja seda vähemalt 100 a jooksul. 1950-ndatel a algab eelloetletud toksiliste metallide sisalduste tõus, mis kulmineerub 1960-1980-ndatel a. Eri elementidel on kontsentratsioonide kasv olnud 2-3 kordne. Nende toksiliste raskmetallide maksimaalsed kontsentratsioonid jäävad 20-25 cm sügavusele settepinna. On alust arvata, et selline toksiliste raskmetallide koguse tõus Läänemere avaosas on seotud inimtegevusega, seda nii tööstuslike heitmete kui ka põllumajandusliku hajureostusega. Setteläbilõike pindmises osas

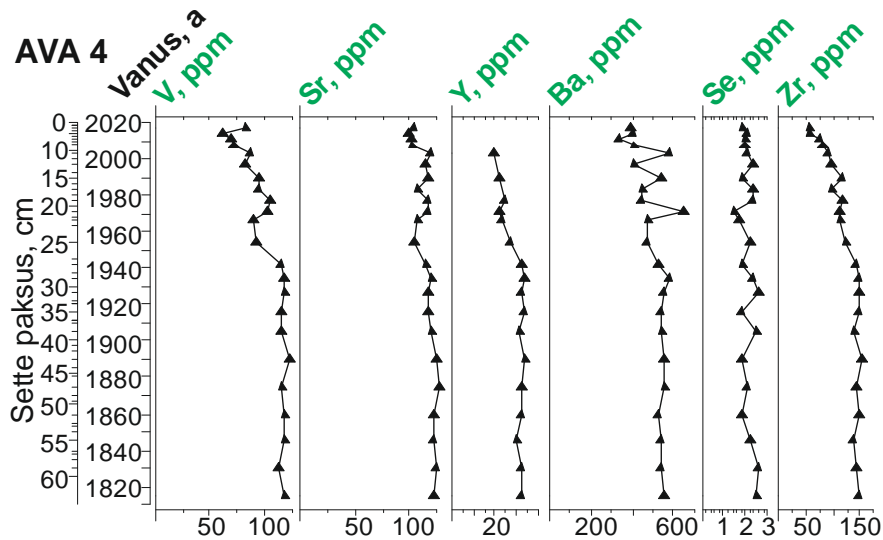
viimase 40 a jooksul moodustunud settekihtides on täheldatav Zn, Pb, Cd ja As sisalduste vähenemine 20. saj teise poole eelsele tasemele.

Mitmete mikroelementide nagu Cu, Mo, U ja Ni setteläbilõike jaotuskõver on veidi erineva ajalise jaotusega. Sarnaselt on ka nende toksiliste elementide sisaldused väiksed 20. saj keskpaigani. Seejärel toimub elementide sisalduse suurenemine 21. saj algusaastateni, kusjuures Cu puhul on tõus 5-kordne. Setteläbilõike pindmises viimase 20 a jooksul moodustunud settekihis on täheldatav eelnimetatud raskmetallide sisalduse vähenemine, kuid langus ei ulatu 20. saj teise poole eelsele tasemele.

Mitte kõikide setteläbilõike AVA 4 analüüsitud mikroelementide ajalised jaotuskõverad ei näita viimase poolsajandi jooksul kasvutrendi (joonis 36). Näiteks Sr, Ba ja Se sisaldused on suhteliselt püsivad, samas kui 20. saj teisest poolest alates näiteks V, Y ja Zr sisaldused vähenevad.

Tabel 7. Setteläbilõike AVA 4 geokeemilise koostise analüüsitulemused.

Sette sügavus, cm	Vanus, a	Zn, ppm	Pb, ppm	As, ppm	Cu, ppm	Mo, ppm	U, ppm	Ni, ppm	V, ppm	Sr, ppm	Cd, ppb
3	2017	222,0	20,6	17,8	89,7	66,4	7,9	46,1	83,0	103,0	122,5
5	2014	237,0	18,2	17,2	107,4	88,2	15,2	57,2	61,4	99,0	153,7
7	2011	265,0	23,9	20,9	139,7	87,3	18,7	63,1	69,4	101,0	151,0
9	2007	262,0	31,8	17,5	121,6	71,2	13,2	63,6	72,0	102,0	129,1
11	2003	392,0	31,3	26,4	180,9	100,0	17,6	71,8	86,1	118,0	134,4
13	1997	311,0	41,4	20,8	130,3	66,7	16,3	59,6	81,8	114,0	204,7
15	1990	356,0	55,9	20,0	107,9	53,6	10,9	67,7	94,5	117,0	116,0
17	1983	346,0	57,4	22,4	81,1	50,0	7,4	76,5	94,2	107,0	99,9
19	1977	485,0	78,4	27,2	98,1	67,3	17,0	67,4	105,6	116,0	130,1
21	1971	506,0	94,2	33,4	122,1	69,6	17,4	70,1	102,2	116,0	209,8
23	1966	501,0	108,9	39,3	112,8	59,8	11,7	56,9	89,6	107,0	712,5
25	1954	240,0	70,7	34,0	54,1	15,0	6,6	38,3	92,3	104,0	869,6
27	1942	194,0	61,1	21,3	37,2	4,6	5,6	41,6	114,5	115,0	279,4
29	1934	192,0	55,7	24,6	37,6	5,0	8,5	43,5	117,5	120,0	378,8
31	1926	175,0	57,7	25,8	39,7	5,1	3,9	41,9	118,6	117,0	278,9
35	1916	158,0	51,8	20,6	36,6	2,9	1,6	40,5	115,5	117,0	219,0
39	1905	160,0	49,3	35,2	35,3	4,1	5,5	39,5	115,4	120,0	293,2
43	1890	164,0	54,3	14,7	38,7	2,2	3,4	45,5	122,7	124,0	257,5
47	1875	162,0	53,3	16,8	35,6	4,1	2,7	44,3	116,6	127,0	306,3
51	1860	154,0	52,0	16,9	35,5	5,9	2,1	43,6	118,5	122,0	311,5
55	1845	155,0	50,4	17,8	37,1	6,9	4,3	43,6	119,2	121,0	400,7
59	1830	150,0	46,7	19,3	36,4	6,4	4,7	46,5	113,2	123,0	357,1
63	1815	137,0	39,8	16,3	35,3	4,2	6,1	43,1	119,1	122,0	219,6
67	1800	133,0	40,9	13,8	37,0	3,4	5,0	41,3	115,2	121,0	233,1

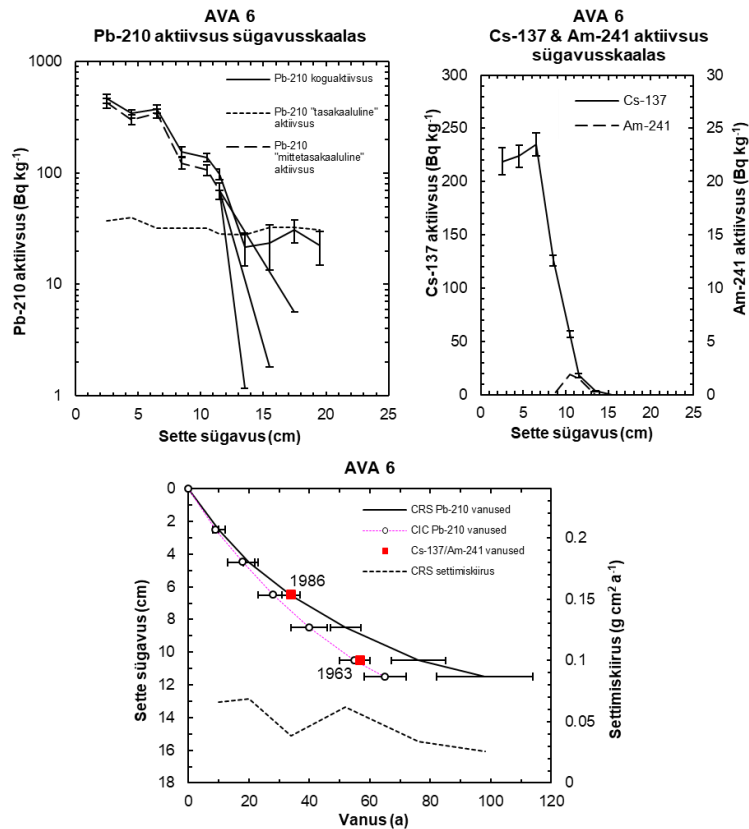


Joonis 36. Setteläbilõike AVA 4 vanaadiumi, strontsiumi, ütriumi, baariumi, seleeni ja tsirkooniumi sisaldus. Vertikaalteljel on sette sügavus- ja vanuseskaala. Sr, Ba ja Se sisaldused setteläbilõikes ei muutu, V, Y, Zr sisaldus tänapäeva suunas aga väheneb.

3.2.2 Setteläbilõige AVA 6

Setteläbilõige AVA 6 pärineb avamere alalt Saaremaast edelas (joonis 4, tabel 2), proovivõtu kohas on veesügavus 74 m. Gemax-tüüpi proovivõtjaga saadud puursüdamik pikkus on 23 cm. Setteläbilõike pindmine paari cm paksune kiht on orgaanilise aine rikkam rohekashall meremuda, mille lamamiks on visuaalselt erinevat värvi aleuriidid (joonis 5, tabel 2).

Setteläbilõikel on ^{210}Pb aktiivsusprofiil väga lühike, vaid sette ülemises 15 cm paksuses pinnakihis. Summaarne ^{210}Pb aktiivsus väheneb küllaltki monotoonselt sette pinnakihi 630 Bq kg^{-1} aktiivsuselt kuni u $30\text{--}40 \text{ Bq kg}^{-1}$ aktiivsuseni 15 cm sügavusel (joonis 37). See näitab, et suuri muutusi settimiskiiruses ei ole. Madal ^{241}Am aktiivsus registreeriti 10,5 cm sügavusel. See aktiivsuse on vaid u 2 Bq kg^{-1} , mis on liiga madal tase, et kindlalt väita selle paigutumist 1960-ndate a algusesse, atmosfääri tuumakatsetuste tippaega. ^{137}Cs aktiivsuse maksimumväärtus registreeriti 6,5 cm sügavusel, tähistades Tšernobõli aatomielektrijaama õnnetuse aega 1986. a (joonis 37). Arvutatud vanused nii CRS kui CIC mudeliga annavad küllaltki lahknevad tulemused. ^{241}Am aktiivsuse järgi kasutasime me läbilõike keskosas ajaskaalana CIC arvutusmudeli tulemusi. Settimiskiirus läbilõikes AVA 6 on olnud suhteliselt ühtlane, väikeste kõikumistega $0,03$ ja $0,06 \text{ g cm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ vahel. Eeldusel, et läbilõike allosas on settimiskiirus püsunud muutumatuna ekstrapoleeriti vanused kuni setteprofiili lõpuni, st 22 cm sügavuseni, mis arvutuste järgi on moodustunud u 1800-ndatel a.

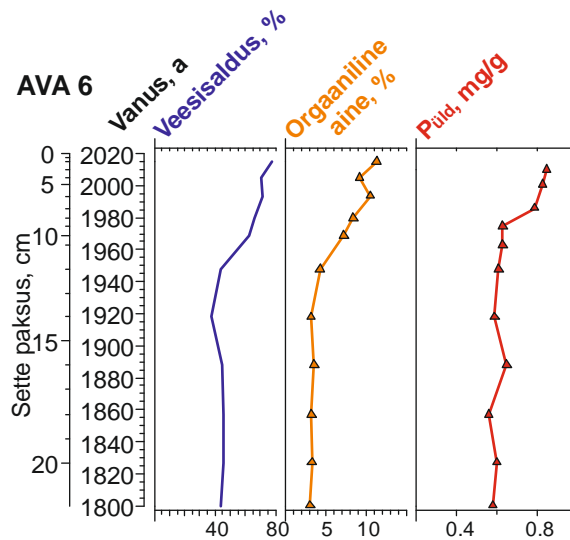


Joonis 37. Setteläbilõike AVA 6 radiomeetriste mõõtmiste tulemused - sette ^{210}Pb aktiivsuse (Bq kg^{-1}) erinevad komponendid; ^{137}Cs ja ^{241}Am aktiivsus (Bq kg^{-1}) erinevates settekihtides; ja nende põhjal koostatud sügavus-vanus ajaskaala koos settimiskiirusega ($\text{g cm}^2 \text{a}^{-1}$).

Tabel 8. Setteläbilõike AVA 6 geokeemilise koostise analüüsitulemused.

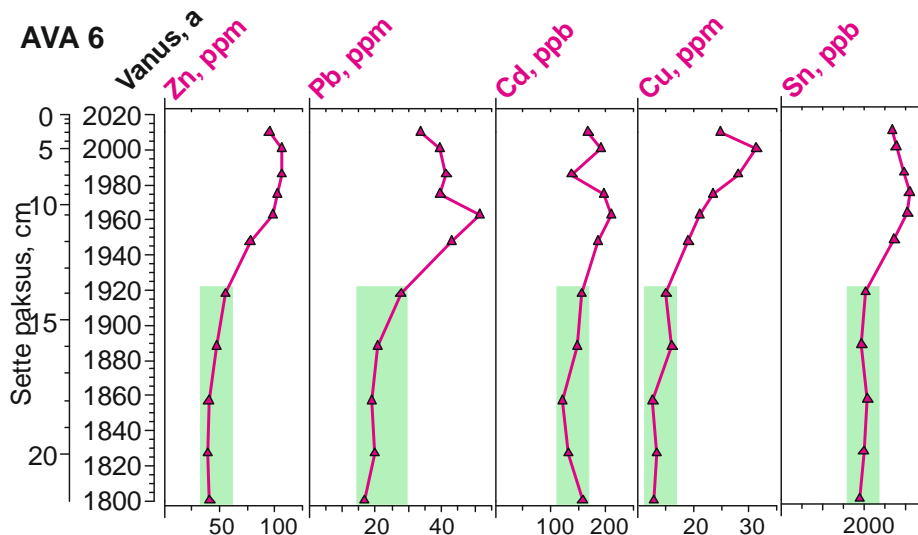
Sette sügavus, cm	Vanus, a	Org. aine, %	P, mg/g	Zn, ppm	Pb, ppm	Cu, ppm	V, ppm	Cr, ppm	Ni, ppm	Cd, ppb	Sn, ppb
3	2010	11,3	0,9	94,9	33,6	24,8	73,5	72,8	35,7	168,3	2669
5	2001	9,2	0,8	106,3	39,5	31,3	72,9	69,3	36,4	191,1	2763
7	1986	10,5	0,8	106,3	41,4	28,0	74,5	75,5	35,8	138,6	2959
9	1974	8,4	0,6	101,9	39,6	23,5	63,3	65,2	33,0	196,6	3084
11	1963	7,3	0,6	97,9	51,5	21,1	63,0	62,8	28,3	210,2	3034
12	1948	4,3	0,6	77,3	43,0	19,0	51,0	52,3	22,4	185,7	2718
14	1918	3,2	0,6	54,9	27,7	15,0	44,2	46,7	19,5	156,5	2028
16	1888	3,6	0,7	47,2	20,7	16,1	52,9	53,2	22,5	147,9	1931
18	1857	3,3	0,6	39,9	19,0	12,6	43,7	47,0	28,3	122,4	2076
20	1827	3,3	0,6	39,1	19,9	13,3	41,1	48,7	22,7	132,7	1971
22	1800	3,1	0,6	41,0	16,6	12,8	42,5	52,0	27,3	157,9	1887

Sarnaselt setteläbilõikele AVA 4 sette koostises 20. saj keskpaigani suuri muutusi ei toimu (tabel 8, joonis 38). Orgaanilise aine sisaldus hakkab suurenema 1960-ndatel a, settefosfori tõus toimub paarikümneaastase viibeajaga. Mõlemad setteparameetrid näitavad eutrofeerumise tõusu tendentsi selles Läänemere avamere osas.



Joonis 38. Setteläbilõike AVA 6 vee-, orgaanilise aine ja üldfosfori sisaldus. Vertikaalteljel on sette sügavus- ja vanuseskaala.

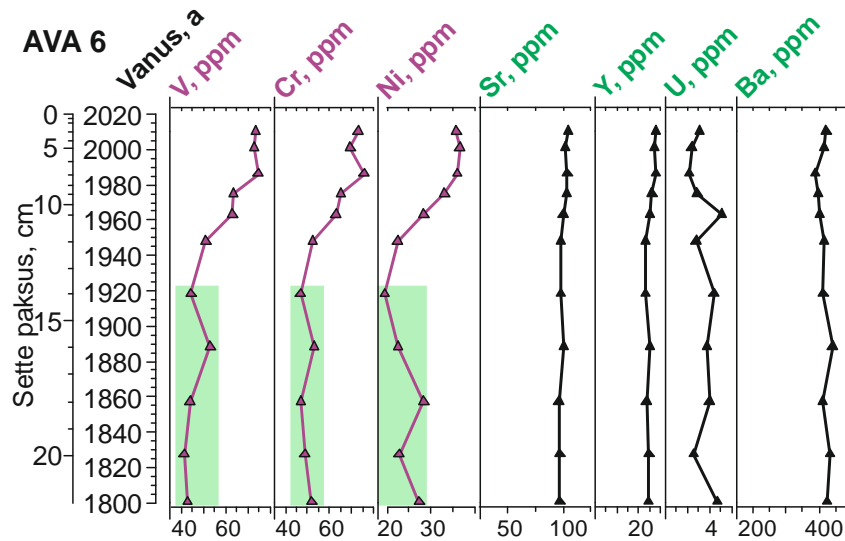
Mõnede raskmetallide nagu Zn, Pb, Cd, Cu ja Sn sisaldused on ühtlaselt väikesed enne 20. saj keskpaika akumulunud setetes (joonis 39). Sarnaselt setteläbilõikele AVA 4 hakkab nende toksiliste mikroelementide sisaldus seejärel suurenema. Sõltuvalt elemendist saavutatakse maksimumtase 1960-ndate a ja 2000-ndate a vahel ning kontsentratsioonide kasv on 2-3 kordne. Nende raskmetallide kõrged kontsentratsioonid jäävad 5-10 cm sügavusele settepinnast. Viimase paarikümne aasta vanustes setetes on täheldatav Zn, Pb, Cd, Cu ja Sn kontsentratsioonide vähenemine.



Joonis 39. Setteläbilõike AVA 6 tsingi, plii, kaadmiumi, vase ja tina sisaldus. Vertikaalteljel on sette sügavus- ja vanuseskaala. 19. sajandi ja 20-nda sajandi alguses akumulunud raskmetallide sisaldus (roheline taust) on elementide looduslähedane hea keskkonnaseisund.

Mikroelementide nagu V, Cr, ja Ni setteläbilõike jaotuskõver on erineva ajalise suunitlusega (joonis 40). Nende toksiliste elementide sisaldused on samuti väikesed 20. saj keskpaigani. Seejärel toimub elementide sisalduse suurenemine 1990-ndate a. Setteläbilõike viimase 30 a

välteel akumuleerunud settekihtides jäävad nende raskmetallide sisaldused maksimumtasemetele. AVA 6 setteläbilõikes Sr, Y, Ba ja U kontsentratsioon ei muutu (joonis 40).



Joonis 40. Setteläbilõike AVA 6 vanaadiumi, kroomi, nikli, strontsiumi, ütriumi, uraani ja baariumi sisaldus. Vertikaalteljel on sette sügavus- ja vanuseskaala. 19. sajandi ja 20-nda sajandi alguses akumuleerunud raskmetallide sisaldus (roheline taust) on elementide looduslähedane hea keskkonnaseisund. Sr, Y, U ja Ba sisaldused setteläbilõikes AVA 6 ei muutu.

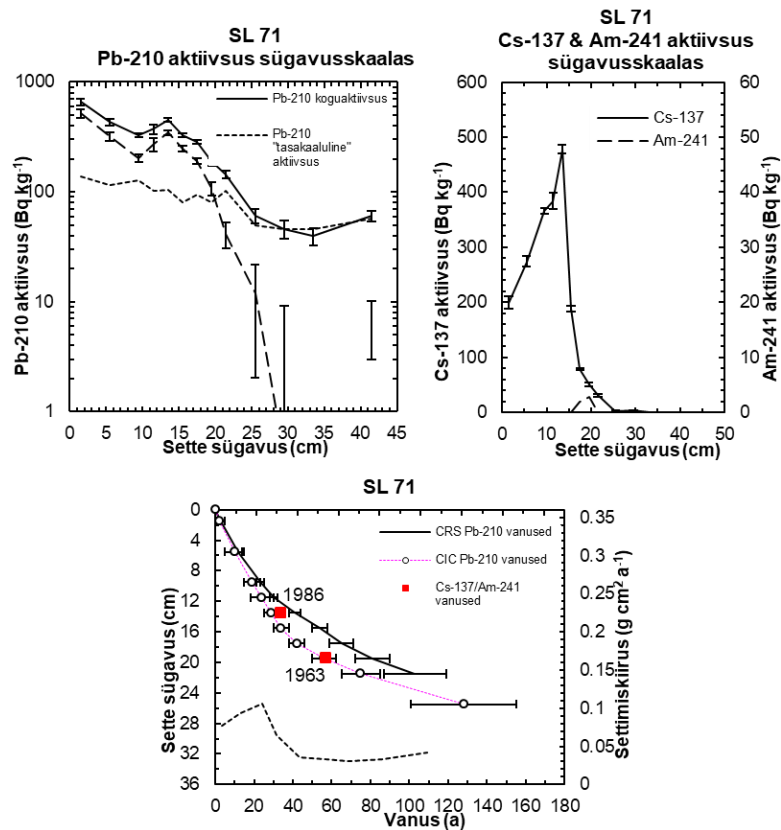
3.2.3 Setteläbilõige SL 71

Et käesoleva projekti raames uurimislaev Salme 2020. a veebruari reisirakendusel osutusid analüüsimisevääriliseks vaid kaks setteläbilõiget (AVA 4 ja AVA 6), siis otsustasime tööse võtta varasema SedGoF projekti raames (Suuroja jt, 2016) 2015. a kogutud ja seni analüüsimata setteläbilõike SL 71 proovid. SL 71 proove oli senini säilitatud Tallinna Tehnikaülikooli geoloogia instituudi spetsiaalses külmuurumis.

Setteläbilõige SL 71 pärineb Soome lahe avamere alalt Vaindloo saarest põhja pool Eesti riigipiiri põhjapoolsemas tipus (joonis 4, tabel 3), proovivõtu kohas on veesügavus 68 m. Gemax-tüüpi proovivõtjaga saadud puursüdamik pikkus on 48 cm. Setteläbilõike ülemine 20 cm paksune kiht on visuaalselt tumeda värvusega meremuda, mille lamamiks on halli värvi savialeuriit (tabel 3).

Sette summaarne ^{210}Pb aktiivsus väheneb üldjoontes järkjärgult sette pinnakihi 860 Bq kg^{-1} aktiivsusest kuni 50 Bq kg^{-1} aktiivsuseni 25-30 cm sügavusel (joonis 41), kus saavutatakse radioaktiivne tasakaal ^{226}Ra aktiivsusega ("tasakaaluline" ^{210}Pb komponent). Mõõdukas ^{210}Pb aktiivsuse tõus 10 cm-st allpool maksimumiga 13,5 cm sügavusel, viitab muutusele settimiskiiruses. ^{241}Am madal aktiivsus 2-3 Bq kg^{-1} sügavusel 19,5 cm võimaldab selle settetaseme dateerida 1960-ndate a alguse atmosfääri tuumakatsetuste tippaega. ^{137}Cs aktiivsusjaotus sügavusskaalas näitab väga selget ühte tippu 13,5 cm-l settesügavusel maksimumväärtusega 500 Bq kg^{-1} ja tähistab Tšernobõli aatomielektriijaama õnnetuse aega

1986. a. ^{137}Cs ja ^{241}Am aktiivsuse väärtused lubavad pigem õigemaks pidada CIC arvutusmudeli dateerimistulemusi. Arvutatud settimiskiirus läbilõikes SL 71 on olnud pikalt, üle 60 aasta, väga ühtlane $0,03\text{--}0,04\text{ g cm}^{-2}\text{ a}^{-1}$ ja siis 1980-ndatel a on see tõusnud kuni $0,12\text{ g cm}^{-2}\text{ a}^{-1}$, millele on järgnenud väike langus kuni $0,08\text{ g cm}^{-2}\text{ a}^{-1}$ paaril viimasel aastakümnel. Eeldusel, et läbilõike allosas püsis settimiskiirus muutumatuna ekstrapoleeriti vanused kuni 48 cm sügavuseni, mis arvutuste järgi akumulieerus 1820-ndatel a.

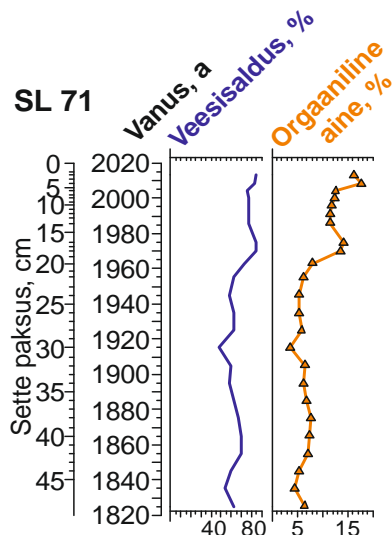


Joonis 41. Setteläbilõike SL 71 radiomeetriliste mõõtmiste tulemused: sette ^{210}Pb aktiivsuse (Bq kg⁻¹) erinevad komponendid; ^{137}Cs ja ^{241}Am aktiivsus (Bq kg⁻¹) erinevates settekihtides; sügavus-vanus ajaskaala koos settimiskiirusega.

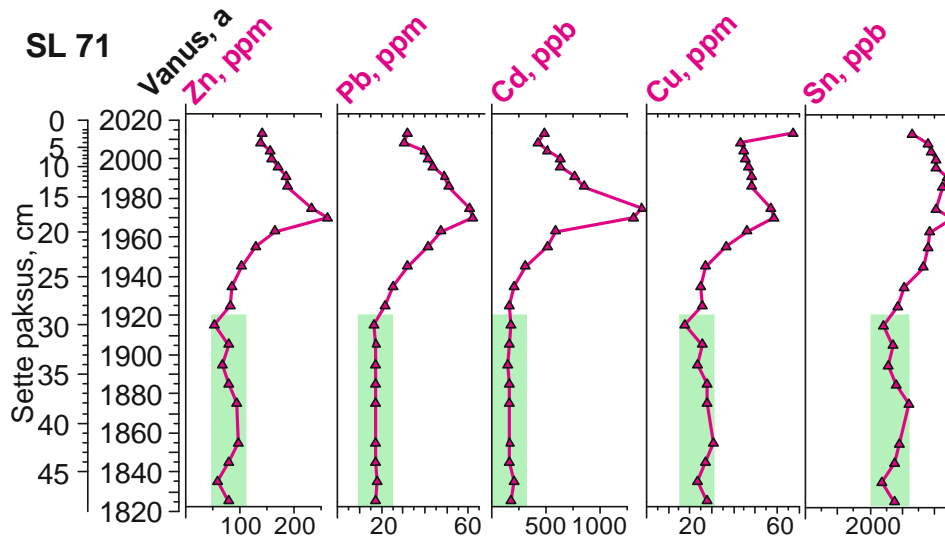
Setete orgaanilise aine sisalduse põhjal võib setteläbilõike SL 71 jagada kaheks: ajavahemikus 1830-ndatest a kuni 1960-ndate a on orgaanilise aine sisaldus madal (< 8%), 20. saj lõpul suureneb see 12% ja käesoleval sajandi algusel 18% (joonis 42, tabel 9).

Tabel 9. Setteläbilõike SL 71 geokeemilise koostise analüüsitulemused.

Sette sügavus, cm	Vanus, a	Org. aine, %	Pb, ppm	Zn, ppm	Mo, ppm	Cr, ppm	Co, ppm	Ni, ppm	Cu, ppm	Cd, ppb	Sn, ppb	Sb, ppb
2	2013	16,3	32,2	141,0	21,0	91,7	19,0	127,8	67,6	489,6	3282	2345
4	2009	17,8	30,4	139,4	26,0	75,2	15,9	72,7	43,4	428,8	3786	2277
6	2004	12,6	39,6	156,7	11,5	76,6	17,7	40,9	44,7	508,1	3867	1791
8	2000	12,4	41,6	160,4	5,6	78,8	18,5	38,8	45,6	630,5	4037	1707
10	1996	12,0	43,4	170,9	5,6	77,9	18,0	37,4	47,2	638,4	4015	1775
12	1991	11,5	49,1	186,6	3,3	82,1	17,7	38,3	48,3	765,8	4366	1857
14	1986	11,5	50,8	188,8	6,3	80,6	18,6	38,5	48,6	850,2	4240	1806
16	1975	14,1	60,6	232,7	19,8	77,2	19,0	41,3	57,4	1386	4033	2213
18	1970	13,7	62,1	260,6	21,8	73,3	20,5	43,2	58,7	1310	4531	2515
20	1963	8,0	47,3	164,0	3,8	73,9	14,8	37,9	45,9	590,1	3847	1669
22	1955	6,3	41,6	130,2	2,2	64,5	12,4	30,5	36,6	519,9	3788	1445
24	1945	5,4	32,2	104,9	2,9	61,6	11,9	27,6	27,4	316,6	3655	1280
26	1935	5,3	25,5	84,9	6,0	59,5	13,8	29,0	25,0	202,8	3035	1167
28	1925	5,8	21,3	82,2	5,5	60,8	13,8	28,4	25,6	160,9	2870	1098
30	1915	3,7	16,8	53,0	3,1	45,9	10,6	24,7	17,6	173,9	2408	1115
32	1905	6,7	17,6	80,0	10,8	59,3	13,0	28,6	25,9	157,3	2706	1099
34	1895	6,3	17,1	68,1	8,3	58,0	13,2	27,6	23,3	147,6	2548	1033
36	1885	6,8	17,6	80,0	7,7	63,1	13,8	31,5	28,1	161,9	2801	1010
38	1875	7,7	17,2	95,6	8,7	71,2	14,9	33,2	28,1	158,0	3194	1060
42	1855	7,1	17,0	96,5	6,0	76,5	15,4	35,0	30,5	170,1	2903	1075
44	1845	5,5	17,4	79,1	4,4	58,7	13,2	29,6	27,1	158,7	2750	1021
46	1835	4,4	18,1	60,3	4,7	51,3	12,1	24,6	23,4	202,7	2354	1003
48	1825	6,4	17,5	80,4	9,0	65,5	14,8	31,4	27,8	173,8	2743	1044

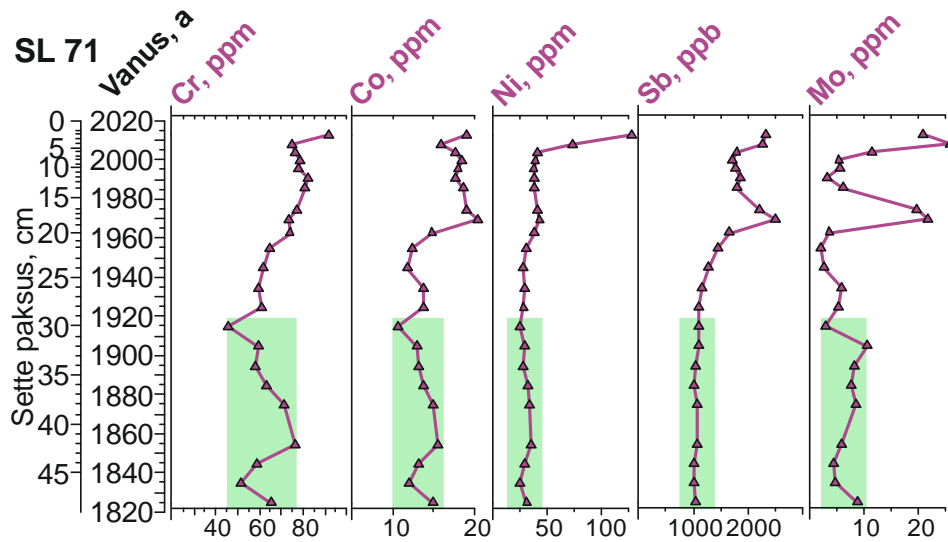

Joonis 42. Setteläbilõike SL 71 vee- ja orgaanilise aine sisaldus. Vertikaalteljel on sette sügavus- ja vanuseskaala.

Raskmetallide Zn, Pb ja Cd, Cu ja Sn sisaldused on ühtlaselt madalad 20. saj keskpaigani ja seda vähemalt 100 a jooksul. 1950-ndatel a algab eelloetletud toksiliste raskmetallide sisalduste tõus, mis kulmineerub 1970-1980-ndatel a (tabel 9, joonis 43). Mikroelementide maksimaalsed kontsentratsioonid jäävad 15-20 cm sügavusele settepinnast. Alates 1990-ndatest a on täheldatav eelnimetatud raskmetallide sisalduse vähenemine, välja arvatud Cu, mille sisaldus settepinnal on uuesti suurenenud.

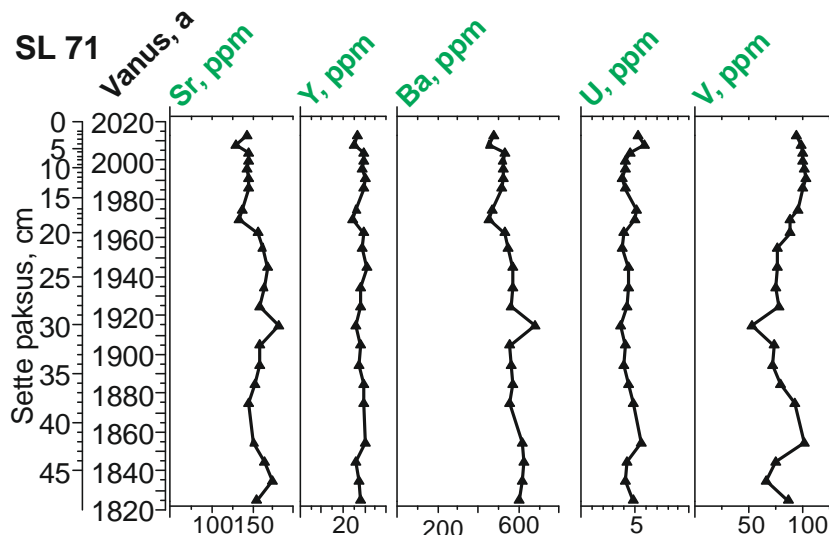


Joonis 43. Setteläbilõike SL 71 tsingi, plii, kaadmiumi, vase ja tina sisaldus. Vertikaalteljel on sette sügavus- ja vanuseskaala. 19. sajandil ja 20. sajandi alguses akumulunud raskmetallide ühtlane sisaldus (roheline taust) on elementide looduslähedane hea keskkonnaseisund.

Raskmetallide Cr, Co, Ni, Sb ja Mo setteläbilõike ajaline jaotuskõver on teistsuguse trendiga (joonis 44). 19. saj ja 20. saj esimesel poolel kuhjunud elementide sisaldus on väike ja ei muutu. 1960-ndatel a leiab aset eelnimetatud elementide sisalduse suurenemine. Seejuures Co, Sb ja Mo puhul on 1970-ndatel a nähtav veel üks sisalduse haripunkt, mis jääb 15-20 cm settesügavusse. Pindmises viimase aastakümne vältel settinud meremudas on Cr, Co, Ni, Sb ja Mo sisaldused maksimumtasemel. SL 71 setteläbilõikes Sr, Y, Ba, U ja V ei muutu (joonis 45).



Joonis 44. Setteläbilõike SL 71 kroomi, koobalti, nikli, antimoni ja molübdeeni sisaldus. Vertikaalteljel on sette sügavus- ja vanuseskaala. 19. sajandil ja 20. sajandi alguses akumulereerunud raskmetallide ühtlane sisaldus (roheline taust) on elementide looduslähedane hea keskkonnaseisund.



Joonis 45. Setteläbilõike SL 71 strontsiumi, ütriumi, baariumi, uraani ja vanaadiumi sisaldus. Vertikaalteljel on sette sügavus- ja vanuseskaala. Sr, Y, Ba, U ja V sisaldused setteläbilõikes ei muutu.

4. Hinnang geofüüsikaliste kaugseire meetodite kasutamisele merepõhja geoloogiliseks kaardistamiseks

Merepõhja substraadi (setete ja kivimite) kaardistamisel on otstarbekas kasutada samaaegselt erinevaid geofüüsikalisi kaugseire meetodeid, mis võimaldavad kaardistada merepõhja nii pindalaliselt kui sügavuti.

Merepõhja geoloogilise läbilõike kaardistamisel saadakse parim tulemus kombineerides erinevates sagedusvahemikes töötavaid peegeldunud lainete meetodil töötavaid seismoakustilisi setteprofilaatoreid. Madalasageduslik *Boomer*-tüüpi setteprofilaator võimaldab läbida setteid kuni aluspõhja kõvemate kivimiteni. Madal sagedusvahemik võimaldab eristada settekihte kuni 0,4 m lahutusvõimega. Keskmisesagedusliku *Chirp*-tüüpi setteprofilaatori vertikaalne eraldusvõime on kuni 0,1 m, kuid kasutatav sagedusvahemik ei võimalda läbida üldjuhul moreeni ega liivakihte, sest signaal sumbub tekkivate laine sisepeegelduste tõttu settekihis. Kõrgesageduslik *Pinger*-tüüpi setteprofilaator annab kõrge lahutusvõimega andmestiku merepõhja reljeefi iseloomust ja pehmetest setetest (savikad setted).

Seisimoakustiliste setteprofilaatorite kasutamisel madalas vees peab arvestama nn. korduslainega (tekib helilaine mitmekordsel peegeldumisel veepinna ja merepõhja vahel), mis raskendab teatud määral andmestiku interpreteerimist. Seisimoakustiline profileerimine võimaldab jälgida ka merepõhja settekihtide ja aluspõhjakivimite lateraalset levikut. Seisimoakustiline profileerimine võimaldab määrata peale merepõhja vertikaalse läbilõike geoloogilise ehituse ka settimise iseloomu (kuhje, transport, kulutus), viimane on vajalik põhjasetete keskkonnaseisundi hindamise proovijaamade asukohtade valikul.

Merepõhja pindalaliseks kaardistamiseks kasutati kahte erinevat meetodit: profileerimist külgvaate- ja lehviksonariga. Külgvaatesonari puhul kasutati kahte erinevat sagedusvahemikku (100/400 KHz ja 400/900 KHz), millest efektiivsema tulemuse setete leviku ja koostise kaardistamisel andis sagedus 900 KHz. Sellise sagedusega on võimalik katta ühe profiiliga 100 m laiune uurimisriba, seejuures horisontaalne resolutsioon on kuni 10 cm. Lehviksonari tööriba laius on otseses sõltuvuses merepõhja sügavusest. Madalamas vees on see kitsam võrreldes külgvaate sonariga, seega kulub lehviksonariga merepõhja kaardistamiseks väga madalas vees kauem aega.

Lehviksonar võimaldab lisaks sette ja kivimitüüpide eristamisele kaardistada täpselt merepõhja sügavusi. Külgvaate sonar ei võimalda otseselt määrata merepõhja sügavust. Põhjasete tüüpide eristamise võime on mõlemal meetodil samaväärne. Kasutatud sonarite andmestik koos põhjaproovide granulomeetriselise koostise analüüsi andmetega võimaldas pilootalal eraldada terasuuruse järgi erinevaid substraadi tüüpe (vägapeeneteraline liiv, peeneteraline liiv, jämepurdsete, segateraline sete, moreen, aluspõhja kivim). Põhjasete granulomeetriselise koostise proovide võrgu tihedus sõltub substraadi geodiversiteedist, pilootalal oli optimaalne võtta proov iga paarisaja meetri tagant.

Geofüüsikalistel mõõdistusandmetel põhinevad teemakaardid ja andmemudelid on alusandmestikuks merepõhja elupaikade kaardistamiseks, mere- ja rannaala ruumiliseks planeerimiseks, mere- ja rannikualade kaitsmiseks, avamererajatiste projekteerimiseks ning mereala kasutamise kaasnega riskijuhtimise kaardistamiseks. Samuti merepõhja maavaraliste ressursside otsimiseks, kaardistamiseks ja kasutamiseks ning nende keskkonnasäästlikuks ja jätkusuutlikuks kasutamiseks, tagades seejuures olemasolevate ökosüsteemide säilimise.

5. Hinnang mere põhjasetete keskkonnaseisundile

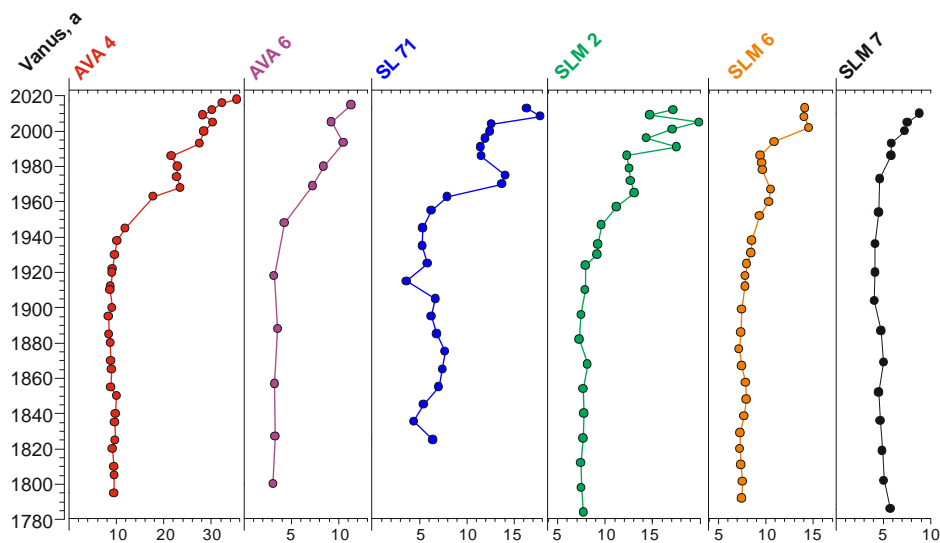
Veekogude HKS määratlemise paleouuringute metoodika alused töötasime välja Eesti järvedele (Heinsalu ja Alliksaar, 2009). Kasutades veekogude setteläbilõigete analüüsi (dateeringud, setetes säilinud füüsikaliste, keemiliste ja bioloogiliste näitajate määrangud), rekonstrueeritakse veekogude looduslähedased keskkonnatingimused nn HKS, mida võrreldakse tänapäevaste tingimustega ja hinnatakse statistiliselt, kui olulised muutused on toimunud.

5.1 Toiteelemendid

Põhjasetetesse akumulunud orgaaniline aine on erinevate orgaaniliste ühendite segu, mis on moodustunud veekogu ja tema valgjal elanud organismide elutegevuse tagajärjel. Läänemeres pärineb valdav enamus põhjasetetesse settinud orgaanilisest ainest veekogu enda taimhõljumi primaarproduktioonist, mida näitavad ka meie uuringu setete C/N aatomsuhte väärtused vahemikus 9-10. Seega on Läänemere põhjasetete orgaanilise aine sisaldus Läänemere primaarproduktiooni muutumise, sh eutrofeerumise indikaator. Eriti kehtib see avamere süvikute akumulatsioonialade puhul, kus on püsiva hapnikupuuduse tingimustes orgaanilise aine säilimine hea, sest selle lagunemine on piiratud.

Analüütiliselt on võimalik määrata spetsiaalse analüsaatoriga setete C_{org} (vt metoodika osa), tulemus on täpsem, kuid see protseduur on aeganõudev ja kallis. Setete orgaanilise aine sisaldust on lihtsustatult võimalik määrata ka nn kuumutuskao meetodil, kus eelnevalt kaalutud proov põletatakse 550 °C juures muhvelahjus. Seda meetodit kasutasime ka käesolevas uuringus ja läbilõike AVA 4 puhul mõõtsime ka C_{org} elementanalüsaatoriga. Kuumutuskao meetodil määratud setete orgaanilise aine sisaldus on võimalik ümber arvutada C_{org} , jagades selle 2,13 (Dean, 1974).

Setteläbilõigete orgaanilise aine sisaldus omab sarnast mustrit – 19. saj algusest kuni 20. saj keskpaigani moodustunud setete orgaanilise aine sisaldus on stabiilselt madal (joonis 46) ja seda võib defineerida kui selle parameetri looduslähedast head keskkonnaseisundit. Orgaanilise aine sisalduse väärtused jäävad alla 10%, välja arvatud Läänemere avaosa põhjabasseini jääv AVA 4, kus looduslähedast head keskkonnaseisundit määratlevad setete orgaanilise aine väärtused on 10% piirimail. Leipe jt (2011) hinnangul ongi Läänemere süvikute hapnikuta alad kõrgema põhjasete orgaanilise aine sisaldusega. Viimase 70. a vältel on täheldatav setete orgaanilise aine 2-3 kordne pidev tõus, mis on selge märk Läänemere jätkuvast eutrofeerumisest.

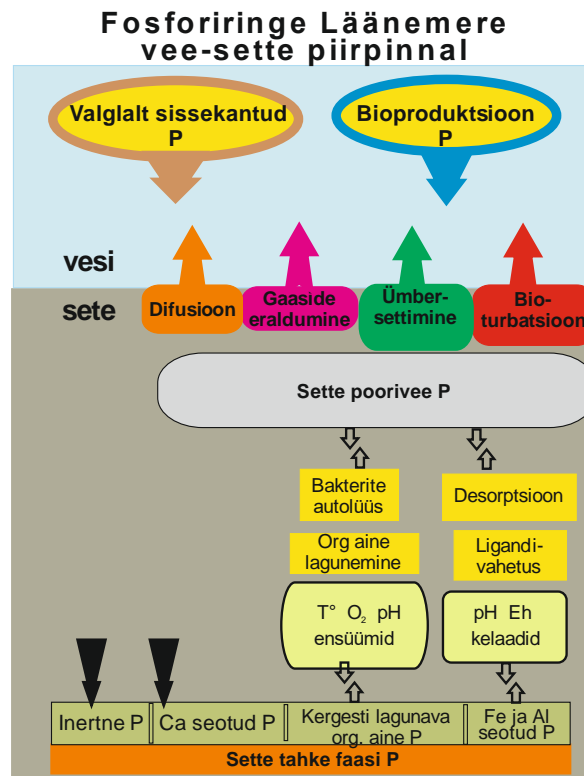


Joonis 46. Eesti mereala dateeritud setteläbilõigete orgaanilise aine sisaldus (läbilõigete asukoht on joonisel 4). Vertikaalteljel on setete vanuseskaala. Kõikidele setteläbilõigetele on omane orgaanilise aine ühtlaselt madal sisaldus enne 20. saj keskaika, mis on looduslähedase hea keskkonnaseisundi tunnus.

Eesti Mereinstituudi ettepanek lisada põhjasetete orgaanilise aine sisaldus mereseire indikaatorite nimekirja on mõistlik (TÜ Eesti Mereinstituut, 2020). Hetkel on määratlemata põhjasetete orgaanilise aine sisalduse läviväärtused. Käesoleva uuringu tulemused, rakendades põhjasetete paleouuringute meetodikat, annavad selleks sobiva võimaluse. Samuti peaksid põhjasetete orgaanilise aine sisalduse läviväärtused olema Eesti merealal väiksemate geograafiliste üksuste põhised. Katseuuringuna võiks lähitulevikus läbi viia Läänemere põhjasetete orgaanilise aine isotoopkoostise analüüsi ($\delta^{13}\text{C}$ ja $\delta^{15}\text{N}$), mis võimaldaks täpsustada orgaanilise aineringe eripärasid. Tallinna Tehnikaülikooli geoloogia instituudil on olemas analüüsiks vajalik aparatuur.

Sarnaselt setteläbilõigete orgaanilise aine sisaldusele on enne 1960-ndaid a moodustunud setetes ühtlaselt madalad P väärtused, $P_{\text{üld}}$ sisaldus jääb 1 mg/g kuivaines või sellest allapoole. Järgnevate aastakümnete jooksul on settefosfori sisaldus kasvutrendis.

Fosfor on lämmastiku kõrval peamine Läänemere ökosüsteemi primaarproduktiooni reguleeriv biogeen. Nii valglalt sissekantud kui ka veekogus endas produtseeritud orgaanilise ja mineraalse ainega seotud fosfor akumulereerub Läänemere setetesse. Põhjasetetesse akumulereerunud fosfor võib teatud biogeokeemiliste protsesside tulemusena vabaneda uuesti tagasi veesambasse (joonis 47) ja põhjustada toitainete sisekoormuse näol (lisaks valglalt tulevale fosfori väliskoormusele) vetikate primaarproduktiooni tõusu (Conley jt, 2002; Puttonen jt, 2014). Seniajani Eesti merealade põhjasetete fosfori sisekoormuse uuringud ja hinnangud selle protsessi ulatusele puuduvad.



Joonis 47. Läänemere sete-vee piirpinnal toimuv fosforiringe (modifitseeritud Heinsalu ja Alliksaar, 2005).

Et vältida paremini vee ja sete piiril kulgevate protsesside iseloomu ning hinnata setete võimaliku mõju veekogu ökosüsteemile, on välja töötatud mitmesuguseid geokeemilisi analüüsimeetodeid. Meresetetes esineb fosfor erinevates keemilistes vormides ehk fraktsioonides. Meresetete järjestikusel ekstraheerimisel aluste ja hapetega ning lahustest ortofosfaatse ja/või üldfosfori määramisel eraldatakse fosfori eri vormid (Psenner jt, 1988). Setete fosfori eri fraktsioonid annavad informatsiooni setete fosfori sidumisvõimest, küllastumisastmest ja potentsiaalsest vabanemisest veesambasse. Näiteks Hieltjes ja Lijklema (1980) ekstraheerimiskeemi puhul eraldatakse välja järgmised fraktsioonid (rP tähistab ortofosfaatset fosforit): **NH₄Cl-P** –setete pooriveega seotud fosfor; **NaOH-rP** – raua- ja alumiiniumiühenditega seotud fosfor; **NaOH-P** – orgaaniliste ühenditega seotud fosfor, mis allub kergesti bakterite lagundavale toimele; **HCl-RP** – kaltsiumiühenditega (peamiselt apatiidiga) seotud fosfor; **Jääk-P** – raskesti laguneva orgaanilise aine ja mõnede mineraalide kristallivõredega seotud inertne fosfor.

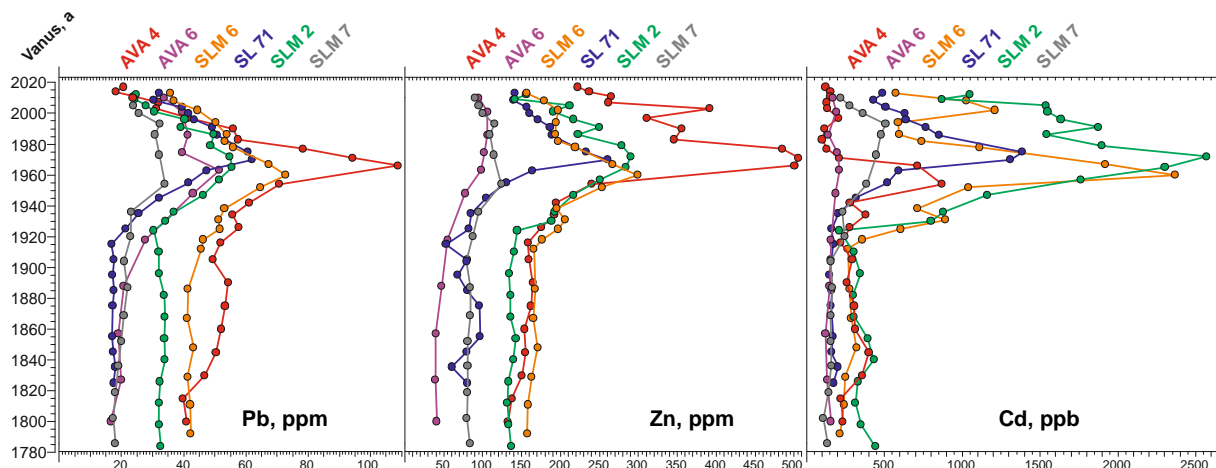
Setete poorivee (NH₄Cl-P) ja rauaühenditega (NaOH-rP) seotud settefosfori fraktsioonid on väga mobiilsed ja võivad kergesti vette tagasi pöörduda. Bakterite elutegevus põhjustab orgaanilise ainega seotud (NaOH-P) fosfori ülemineku setete poorivette. Jääk-P ja apatiidiga seotud fosforivorme peetakse võrdlemisi inertseks ja arvatakse, et need ei osale veekogu fosforiringes. Järelikult, teades fosforivormide jaotust settes ja nende hulka, on võimalik prognoosida fosfori sisekoormuse eripärasusi ja mahtu.

Fosfori vabanemine setetest vette toimub keemiliste, füüsikaliste ja bioloogiliste protsesside koosmõjul. Esimese etapina mobiliseerub tahke faasi fosfor desorptsiooni, lahustumise, ligandi vahetuse, orgaanilise aine mineraliseerumise ja/või bakterite elutegevuse tagajärjel setete poorivette. Neid protsesse kontrollivad mitmesugused keskkonnategurid, nagu merevee ja setete temperatuur, pH, redokspotentsiaal, kelaatide olemasolu ja/või desorptsiooni-adsorptsiooni tasakaal. Setetes oleva poorivee fosfor kandub veesambasse difusiooni, setete resuspensiooni, bioturbatsiooni ja/või gaaside eraldumise teel (Enell ja Löfgren, 1988).

Eeltoodust lähtuvalt on mõistlik läbi viia mõnede seirejaamade piirkonnas settefosfori eri fraktsioonide uuringud. Sellised uuringud võimaldaksid anda hinnangut settest lähtuvatele toitainevogudele. Uuringutulemustest lähtuvalt tuleks kaaluda ka põhjasetete fosfori sisalduse lülitamist mereseire indikaatorite nimekirja.

5.2 Toksilised raskmetallid

Projekti käigus teostatud raskmetallide geokeemilised analüüsid põhjasetete vanusemäärangutega läbilõigetest näitavad, et raskmetallide sisaldused on 1800-1940-ndate a vahemikus madalad (joonis 48) ja ühtlase kontsentratsiooniga, mis tähistab kohaspetsiifilist foonitaset. Põhjasetete mikroelementide kontsentratsioonid ja looduslähedased foonitasemed avamere eri piirkondades ei lange täielikult kokku. Need erinevused sõltuvad peamiselt, milline on põhjasetete raskmetalle adsorbeerivate komponentide (nt savifraktsioon, orgaanilise aine sisaldus) osatähtsus ja kohalike lähtekivimite koostis (Vallius ja Leivuori, 2003).



Joonis 48. Eesti mereala dateeritud setteläbilõigete plii, tsingi ja kaadmiumi sisaldused (läbilõigete asukoht on joonisel 4). Vertikaalteljel on setete vanuseskaala. Kõikidele setteläbilõigetele on omane raskmetallide ühtlaselt madal sisaldus enne 20. saj algust, mis on looduslähedase hea keskkonnaseisundi tunnus.

Mõningate toksiliste raskmetallide ajaliste jaotuskõverate (nt Pb, Zn, Cd) puhul on täheldatav nende mikroelementide kontsentratsiooni tõus 20. saj. esimesel poolel ja maksimumtase 1960-1980-ndatel a. Kõrgemad elementide sisaldused on olenevalt asukohapõhisest settimiskiirusest settesügavuses 5-25 cm ja ületavad tööstuseelse looduslähedase

foonitaseme 2-5 korda. Viimase paarikümne aasta vältel on toimunud Pb, Zn, Cd jt raskmetallide sisalduse vähenemine valdavas osas tööstuseelse perioodi tasemele. Silmatorkav on, et selline raskmetallide ajaline jaotusprofiil on täheldatav üle terve Eesti mereala avamere osa.

Eesti mereala põhjasetete toksiliste raskmetallide HKS läviväärtused on senimaani kehtestamata (Tornero jt, 2019). Ainukese toksilise raskmetallina, mille kohta mere põhjasetetele on kehtestatud Eesti Vabariigi regulatsioonid, on plii. Keskkonna kvaliteedi piirväärtus mere põhjasetetes on 53400 µg/kg e 53,4 ppm (<https://www.riigiteataja.ee/akt/101082019021?leiaKehtiv>).

Käesoleva uuringu tulemuste põhjal võib öelda, et Eesti mereala avamere põhjasetete pinnakiht on toksiliste raskmetallide sisalduse vaatest hea. Seetõttu ei näe me vajadust teha täiendavaid ettepanekuid avamere põhjasetete HKS läviväärtuste väljapakkumiseks. Enamgi veel, lähitulevikus pole tungivat vajadust mereseire raames toksiliste raskmetallide seireks avamere põhjasetetes.

6. Kokkuvõtte ja soovitused

Käesolev projekt käsitleb kahte erinevat tegevussuunda: (1) erinevate seismoakustiliste seadmetega merepõhja geofüüsikalist kaugeiret; ja (2) Eesti avamereala pikaajalise (viimased sajandid) keskkonnaseisundi hindamist põhjasetete geokeemilise koostise alusel.

Merepõhja kaugeire pilootuuringu käigus katsetati erinevaid geofüüsikalisi meetodeid ja aparatuure leidmaks efektiivseimat meetodit merepõhja geoloogiliseks kaardistamiseks. Merepõhja vertikaalse geoloogilise läbilõike kaardistamisel rakendati üheaegselt erineva sagedusega seismoakustilisi setteprofiilaatoreid ning pindalaliseks kaardistamiseks erinevaid sonareid (külgvaate- ja lehviksonar). Geofüüsikaliste andmete usaldusväärseks interpreteerimiseks ja väljaeraldatud merepõhja substraaditüüpide verifitseerimiseks määrati haardkopaga võetud setteproovide granulomeetriline koostis.

Põhjasetete geokeemilise koostise uuringute käigus määrati erinevate dateerimismeetodite (^{210}Pb , ^{137}Cs , ^{241}Am , fossiilsete kütuste põletamisel eralduvad lendtuhaosakesed) abil kolme setteläbilõike vanus ning rekonstrueeriti setteparameetrite (põhjasetete orgaanilise aine, C_{org} , $N_{üld}$, $P_{üld}$ sisaldus, granulomeetriline koostis, erinevad raskmetallid) põhjal viimaste sajandite vältel aset leidnud merekeskkonna kvaliteedi muutused ning selgitati välja avamere põhjasetete toksiliste raskmetallide hea keskkonnaseisund. Kaks setteläbilõiget võeti Eesti läänepoolselt avamerealalt, üks uuritud setteprofiil pärineb Soome lahest. Eesti läänepoolselt avamerealalt varasemad sellised detailsed setteuuringud puudusid.

Geofüüsikaliste kaugeire uuringutega saadud andmete tulemusel võib kokkuvõtvalt teha järgmised järeldused:

- üheaegselt kasutatavate erinevatel sagedustel töötavate seismoakustiliste setteprofiilaatorite andmete alusel saab koostada pinnakatte ja selle all lasuva aluskivimi vertikaalseid geoloogilisi läbilõikeid. Meetod võimaldab läbindada setteid

kuni aluspõhja kivimite pinnani. Sõltuvalt kasutatud lainepikkuse sagedusest on võimalik eraldada settekihte kuni 0,1 m täpsusega;

- geofüüsikalised kaugseire meetodid võimaldavad anda usaldusväärse ülevaate looduslike ja inimtekkeliste tegurite mõjul toimuvatest settimisprotsessidest (setete dünaamika, kulutus, transport ja kuhjumine). Kordusmõõdistustega (nt 3-5 aastase ajavahemikuga) saab määrata põhjasetete liikumise suuna ja mahud;
- sonaritega tehtud merepõhja pindalaline geofüüsikaline kaardistamine koos põhjaproovide granulomeetrilise koostise analüüsiga võimaldab eristada erinevaid Folki klassifikatsioonidele vastavaid settelisi substraaditüüpe;
- sonarite võrdluses saab külgvaatesonariga merepõhja kiiremini kaardistada kui lehviksonariga. Merepõhja substraaditüüpide eraldamise võimekus on mõlemal meetodil samaväärne. Lehviksonari tagasipeegelduva signaali tugevuse andmete põhjal koostatud settetüüpide kaartide detailsus on võrreldes külgvaate sonariga parem.

Läänemere põhjasetete dateeritud läbilõigete geokeemilistes uuringutes saadud andmete koondanalüüsi tulemusena võib kokkuvõtvalt teha järgnevad järeldused ja soovitused:

- avamere põhjasetete orgaanilise aine sisaldus on sobilik eutrofeerumist kirjeldav mereseire indikaator. Käesolevas uuringus kasutatud paleometoodika võimaldab määratleda põhjasetete orgaanilise aine sisalduse läviväärtused;
- viia mõnede avamere seirejaamade piirkonnas läbi pinnasette fosfori eri fraktsioonide testuuringud. Sellised uuringud võimaldaksid anda hinnangut settest lähtuvatele toitainevogudele, nn fosfori sisekoormusele. Uuringutulemustest lähtuvalt saab kaaluda ka põhjasetete fosfori sisalduse lülitamist mereseire indikaatorite nimekirja;
- Eesti mereala avamere osa põhjasetete pindmise kihi toksiliste raskmetallide sisaldus on madal ja põhjasetete keskkonnaseisund seega hea. Lähitulevikus pole vajadust mereseire raames toksiliste raskmetallide seireks avamere põhjasetetes;
- uuringute käigus täheldati, et settepinna all 5-25 cm sügavusel on kõrgenenud toksiliste raskmetallide ja radioaktiivse ¹³⁷Cs sisaldusega settekiht. Seda tuleb silmas pidada merepõhja inimtegevusest põhjustatavate füüsiliste merepõhja häiringute (nt süvendustööd, kaablid, torujuhtmed jm tehisrajatised) planeerimisel.

7. Kirjanduse loetelu

Alliksaar, T., 2000. Spatial and temporal variability of the distribution of spherical fly-ash particles in sediments in Estonia. Tallinn Pedagogical University, Dissertations on Natural Sciences 4, 1-44.

Appleby, P. G., 2001. Chronostratigraphic techniques in recent sediments. Rmt: Last, W. M., Smol, J. P., (toim), Tracking Environmental Change Using Lake Sediments. Volume 1: Basin Analysis, Coring and Chronological Techniques. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 171-203.

- Appleby, P. G., Oldfield, F., 1978. The calculation of ^{210}Pb dates assuming a constant rate of supply of unsupported ^{210}Pb to the sediment. *Catena* 5, 1-8.
- Björck, S., 1995. A review of the history of the Baltic Sea, 13.0–8.0 ka BP. *Quaternary International* 27, 19-40.
- Conley, D. J., Humborg, C., Rahm, L., Savchuk, O. P., Wulff, F., 2002. Hypoxia in the Baltic Sea and basin-scale changes in phosphorus biogeochemistry. *Environmental Science & Technology* 36, 5315-5320.
- Dean, W. E. Jr., 1974. Determination of carbonate and organic matter in calcareous sediments and sedimentary rocks by loss on ignition: Comparison with other methods. *Journal of Sedimentary Petrology* 44, 242-248.
- EL direktiiv 2000/60/EÜ. Euroopa Parlamendi ja nõukogu direktiiv 2000/60/EÜ, 23. oktoober 2000, millega kehtestatakse ühenduse veepoliitika alane tegevusraamistik. Euroopa Liidu Teataja, L327.
- EL direktiiv 2008/56/EÜ. Euroopa Parlamendi ja nõukogu direktiiv 2008/56/EÜ, 17. juuni 2008, millega kehtestatakse ühenduse merekeskkonnapoliitika-alane tegevusraamistik (merestrategie raamdirektiiv). Euroopa Liidu Teataja, L164/19.
- Enell, M., Löfgren, S., 1988. Phosphorus in interstitial water: methods and dynamics. *Hydrobiologia* 170, 103-132.
- Folk, R. L., 1954. The distinction between grain size and mineral composition in sedimentary rock nomenclature. *Journal of Geology*, 62, 344-359.
- Heinsalu, A., Alliksaar, T., 2005. Järvetüüpide interkalibreerimiseks vajalike foonitingimuste väljaselgitamine paleolimnoloogiliste uuringute abil. TTÜ Geoloogia Instituut, Aruanne 2005-29.
- Heinsalu, A., Alliksaar, T., 2009. Palaeolimnological assessment of the reference conditions and ecological status of lakes in Estonia – implications for the European Union Water Framework Directive. *Estonian Journal of Earth Sciences* 58, 334-341.
- Heiri O., Lotter A.F., Lemcke G., 2001. Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: reproducibility and comparability of results. *Journal of Paleolimnology* 25, 101-110.
- Hieltjes, A. H. M., Lijklema, L., 1980. Fractionation of inorganic phosphates in calcareous sediments. *Journal of Environmental Quality* 9, 405-407.
- Kaskela, A. M., Kotilainen, A. T., Alanen, U., jt, 2019. Picking up the pieces - harmonising and collating seabed substrate data for European maritime areas. *Geosciences* 9, 84.
- Last W. M., 2001. Textural analysis of lake sediments. Rmt: Last, W. M., Smol, J. P., (toim), *Tracking Environmental Change Using Lake Sediments. Volume 2: Physical and Geochemical Methods*. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 41-81.

Leipe, T., Tauber, F., Vallius, H., Virtasalo, J., Uścińowicz, S., Kowalski, N., Hille, S., Lindgren, S., Myllyvirta, T., 2011. Particulate organic carbon (POC) in surface sediments of the Baltic Sea. *Geo-Marine Letters* 31, 175-188.

Lutt, J., Raukas, A. (toim), 1993. Eesti šelfi geoloogia. Tallinn, Eesti Teaduste Akadeemia.

Psenner, R., Boström, B., Dinka, M., Pettersson, K. Pucsko, R., Sager, M., 1988. Fractionation of phosphorus in suspended matter and sediment. *Archiv für Hydrobiologie – Advances in Limnology* 30, 98-103.

Puttonen, I., Mattila, J., Jonsson, P., Karlsson, O. M., Kohonen, T., Kotilainen, A., Lukkari, K., Malmaeus, J. M., Rydin, E., 2014. Distribution and estimated release of sediment phosphorus in the northern Baltic Sea archipelagos. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 145, 9-21.

Radojevic, M., Bashkin, V.N., 2006. Practical environmental analysis, 2nd Edition, The Royal Society of Chemistry, Cambridge, UK.

Suuroja, S., Heinsalu, A., Alliksaar, T., Tõnisson, H., Lips, U., jt, 2016. Hinnangu andmine merekeskkonna ökosüsteemipõhiseks korraldamiseks Soome lahe merepõhja ja setete näitel (SedGoF). Eesti Geoloogiakeskus, Aruanne.

Suuroja, S., Veski, A., Liira, M., Tuuling, I., Ausmeel, M., 2020. 2019.–2020. aasta mererannikute seire tööd. Eesti Geoloogiateenistus, Aruanne EGF 9445.

Tornero, V., Hanke, G., jt, 2019. Marine chemical contaminants – support to the harmonization of MSFD D8 methodological standards: Matrices and threshold values/reference levels for relevant substances. Luxembourg, Publications Office of the European Union.

Tuuling, I., Suuroja, S., Veski, A., Liira, M., 2021. Ülevaade meregeoloogilisest andmestikust meretuuleparkide planeerimiseks. Eesti Geoloogiateenistus, Aruanne EGF 9465.

TÜ Eesti Mereinstituut, 2020. Mereliste elupaigatüüpide seisundi hindamise meetodika. Aruanne.

Udden, J., A., 1914. Mechanical composition of clastic sediments. *Geological Society of America Bulletin* 25, 655-744.

Vallius, H., Leivuori, M., 2003. Classification of heavy metal contaminated sediments in the Gulf of Finland. *Baltica* 16, 3-12.

Wentforth, C. K., 1922. A scale of grade and class terms for clastic sediments. *Journal of Geology* 30, 377-392.

Zillén, L., Conley, D. J., Andrén, T., Andrén, E., Björck, S., 2008. Past occurrences of hypoxia in the Baltic Sea and the role of climate variability, environmental change and human impact. *Earth-Science Reviews* 91, 77-92.