



# **Soome lahe raua-mangaani konkretsioonide tekkemehhanismide seos merepõhja geoloogilise ehituse ja lekkimislehtritega**

Bakalaureusetöö

Üliõpilane: Hannah Mikenberg (213207LARB)

Juhendaja: Atko Heinsalu, TalTech, vanemteadur, PhD

Kaasjuhendaja: Vladimir Karpin, TalTech, doktorant, MSc

Õppekava: Maa süsteemid, kliima ja tehnoloogiad (LARB17)

## **Autorideklaratsioon**

Kinnitan, et olen koostanud antud lõputöö iseseisvalt ning seda ei ole kellegi teise poolt varem kaitsmisele esitatud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on töös viidatud.

Autor: Hannah Mikenberg

27.05.2024

Töö vastab bakalaureusetööle/magistritööle esitatavatele nõuetele.

Juhendaja: Atko Heinsalu

27.05.2024

## Sisukord

Annotatsioon.....	4
Abstract .....	5
Jooniste loetelu .....	6
Tabelite loetelu.....	8
1. Sissejuhatus .....	9
2. Läänemeri ja Soome laht.....	11
2.1. Läänemere geoloogia .....	12
2.2. Soome lahe geoloogiline ehitus .....	14
2.3. Läänemere kujunemine.....	16
2.4. Eesti põhjaveekompleksid .....	17
2.5. Raua-mangaani konkretsioonid ja nende levik Soome lahes.....	19
2.6. Lekkimislehtrid .....	23
3. Uuringuala, uurimismeetodid ja kogutud andmed .....	25
3.1. Uuringuala .....	25
3.2. Uurimismeetodid.....	26
3.2.1. Kõrgesageduslik setteprofilaator Pinger .....	28
3.2.2. Keskmisesageduslik setteprofilaator Chirp .....	28
3.2.3. Madalasageduslik setteprofilaator Boomer .....	28
3.2.4. Külgvaatesonar .....	29
3.2.5. Lehviksonar.....	30
3.2.6. Kaugjuhitav veealune robot .....	30
3.3. Kogutud andmed .....	31
4. Tulemused .....	33
5. Arutelu.....	37
Kokkuvõte.....	43
Tänuavaldused .....	44
Kirjanduse loetelu.....	45

## Annotatsioon

Hiljuti läbi viidud mereekspeditsioonide käigus avastati, et Soome lahe merepõhjas on lekkimislehtrid ning nendega on seotud raua-mangaani konkretsioonide ja valgete bakterimattide kooslus. Lekkimislehter on kraatrit meenutav nõgus pinnavorm, mis on tekkinud põhjavee ja/või gaaside väljapääsemisel merepõhja. Lekkimislehtrid paiknevad tihti merepõhja kõrgendikel. Käesolevas töös keskendutakse ühele konkretsioonide rikkale Soome lahe uuringualale, et teha kindlaks sealne merepõhja geoloogiline ehitus, tõlgendada lekkimislehtrite tekkimismehhanisme, selgitada välja merepõhja geoloogilise ehituse, lekkimislehtrite ja raua-mangaani konkretsioonide võimalikud omavahelised seosed ning pakkuda välja võimalusi tuleviku mereekspeditsioonideks. Lõputöö eesmärkide saavutamiseks interpreteeriti mereekspeditsioonidel setteprofiilaatorite, sonarite ja allveerobotiga kogutud merepõhja alusandmeid.

Uuringualal liigestati seismoakustiliste profiilide põhjal neli seismostratigraafilist üksust: aluskord, Ediacara settektivimid, Balti jääjärve viirsavid ja Litoriinamere/Limneamere meremudad. Uuringualal lasuvad raua-mangaani konkretsioonid reeglina merepõhja kõrgendiku viirsavidel. Viirsavikiht on kõrgendikul osaliselt erodoreerunud ning selles leidub nii aktiivseid kui ka mitteaktiivseid lekkimislehtreid. Tõenäoliselt on viirsavi all ning kristalse aluskorra peal asuva geoloogilise kompleksi puhul tegemist Ediacara vettjuhtiva liivakiviga, millest pärinevad lekkimislehtreid tekitavad põhjavesi ja/või gaasid. Needsamad põhjavesi ja/või gaasid võivad olla seotud uuringualal levivate raua-mangaani konkretsioonide ja valgete bakterimattide moodustumisega. Meremudad levivad merepõhjas vaid väljaspool kõrgendikku ja seal raua-mangaani konkretsioonid puuduvad.

Kuna andmed Soome lahe geoloogilise ehituse kohta on peamiselt kogutud kaudsete seismoakustiliste meetodite abil, on geoloogilise tegelikkuse välja selgitamiseks vaja viia läbi täiendavaid uuringuid. Vajalik on koguda kivimiproove viirsavide all lasuvast kihist, et paremini mõista konkretsioonide tekkeprotsessi. Lõputöös on välja pakutud neli potentsiaalset uuringujaama proovide võtmiseks, kus viirsavikiht puudub või on piisavalt õhuke. Eesti merelaevastikul puudub hetkel võimekus sellise uuringu läbiviimiseks ja tuleb teha koostööd teiste Läänemere teadusasutustega kuni valmib Eestile uus teaduslaev.

## **Formation mechanisms of the iron-manganese concretions in the Gulf of Finland**

### **Abstract**

Iron-manganese concretions and white bacterial mats are found in regions around pockmarks on the seabed of the Gulf of Finland. Pockmarks are structural features of the seafloor that resemble craters and are formed by the release of groundwater and/or gases into the seabed. They are often situated on seabed ridges. This study focuses on a specific area in the Gulf of Finland that is rich in concretions, with the aim to determine the geological structure of the seabed, interpret the formation mechanisms of the pockmarks, explore their relationship with iron-manganese concretions, and suggest possibilities for future marine expeditions. To achieve these objectives, previously collected seabed data from sub-bottom profilers, sonars, and underwater robots were analysed.

In the study area, four seismostratigraphic units were identified based on seismic-acoustic profiles: the basement, Ediacaran sedimentary rocks, varved clays of the Baltic Ice Lake, and Littorina Sea/Limnea Sea muds. Concretions in the study area lie on varved clays, while the Littorina Sea/Limnea Sea muds are found only outside the seabed ridge where they cover the 10 m thick varved clay layer. The varved clay layer on the ridge is partially eroded, containing both active and inactive pockmarks. It is likely that the geological complex beneath the varved clay and above the crystalline basement consists of Ediacaran sandstone, from which the fluids creating the pockmarks originate. These fluids may be linked to the formation of iron-manganese concretions and white bacterial mats in the study area.

Since data on the basement and bedrock of the Gulf of Finland have primarily been collected using indirect seismic acoustic methods, further studies are necessary to uncover the actual conditions. It is essential to collect samples from the geological layer beneath the varved clays to better understand the concretion formation process. The thesis identifies four favourable sampling stations where the varved clay layer is absent or thin. As Estonian vessels lack the specific equipment for such research, cooperation with other Baltic Sea marine institutions is necessary until Estonia's planned new research vessel has been built.

## Jooniste loetelu

Joonis 1. Läänemere nõo maakoore tektooniline ehitus, kohandatud Uścinowicz (2014) järgi. ....	11
Joonis 2. Läänemere aluspõhja geoloogiline kaart, kohandatud Tuuling jt (2011) järgi.....	13
Joonis 3. Soome lahe aluspõhja stratigraafiline skeem (Suuroja jt, 2016).....	14
Joonis 4. Soome lahe Kvaternaari setete stratigraafiline skeem (Suuroja jt, 2016).....	15
Joonis 5. Viimase mandrijää taandumine Eestist, mandrijääserva asendid ja vanus Hughes jt (2016) järgi.....	16
Joonis 6. Eesti põhjaveekomplekside levik, veepidemed ja põhjavee hapniku isotoopiline koostis ( $\delta^{18}\text{O}$ väärtused) Marandi jt (2019) järgi. ....	17
Joonis 7. Kambriumi-Vendi põhjaveekogumid (Marandi jt, 2019).....	18
Joonis 8. Gdovi ja Voronka põhjaveekogumite kontseptuaalsete mudelite läbilõiked (A) jääaegadel Pleistotseenis ja (B) tänapäeval, kohandatud Marandi jt (2019) järgi.....	19
Joonis 9. Raua-mangaani konkretsioonide leviku arvukus Läänemeres Wasiljeff (2015) järgi.....	20
Joonis 10. Konkretsioonid kogutud haardkopaga 2023 a septembri ekspeditsioonil uurimislaevalt Salme: (A) koorikulaadsed; (B) kettalaadsed; (C) keralaadsed; (D) segatüüpi. Fotod: Sten Suuroja, Eesti Geoloogiteenistus. ....	21
Joonis 11. Soome lahe maavarade kaart (Suuroja jt, 2016).....	21
Joonis 12. Soome lahe aluspõhja geoloogiline ehitus, kohandatud Tuuling (2019) järgi. ....	22
Joonis 13. Raua-mangaani konkretsioonide levik Soome lahes (EMODnet Geology Portal, 15.03.2024). ....	22
Joonis 14. Lekkimislehtrite morfoloogia, kohandatud Chen jt (2015) järgi. ....	23
Joonis 15. Merepõhja lekkimislehtri tekkimine: (A) fluid tõuseb veekogu põhja suunas; (B) fluid koguneb põhjasettesse; (C) ülerõhust tekib kungas; (D) fluidide purse ja lehtri moodustumine, kohandatud Saritaş (2018) järgi. ....	24
Joonis 16. Uuringualad ja nende põhjareljeef: (1) Vaindloo lääne ala; (2) Vaindloo ida ala; (3) Vaindloo põhja ala; (4) Mohni ala (aluskaart: Maa-amet, 2024a,b).....	25
Joonis 17. Mohni saarest kirdesse jääva uuringuala põhjareljeef, veealusel künkal on selgelt eristuvad ümmargused lekkimislehtrid.....	26
Joonis 18. Pinger-, Chirp- ja Boomer-tüüpi põhjaprofilaatorid, kohandatud Lekkerkerk (2020) järgi..	27
Joonis 19. Külgvaatesonari tööpõhimõte ja näide saadud andmetest, kohandatud Dondurur (2018) järgi.....	29
Joonis 20. Ühe- ja mitmekiirelise kajaloodi tööpõhimõte, kohandatud Dondurur (2018) järgi. ....	30
Joonis 21. Kaugjuhitav allveeaparaat AKVA Group Sub-Fighter 100K 2023. a suvel suundumas laeval EVA 316 mereekspeditsioonile Soome lahes (erakogu).....	31

Joonis 22. Mohni ala merepõhja reljeef. Mustad lääne-ida suunalised jooned näitavad seismoakustiliste profiilide asendeid ja valge joon märgib allveeaparaadi marsruuti merepõhjas. ....	32
Joonis 23. Lehviksonariga kogutud Mohni uuringuala: (A) veesügavuse ja põhjareljeefi kaart ning (B) merepõhja setete kaart.....	33
Joonis 24. Mohni uuringuala seismoakustilised Boomer- ja Chirp-tüüpi profilaatorite interpreteeritud geoloogilised läbilõiked, profiili asukoht vaata joonis 23. Punaste nooltega on tähistatud lekkimislehtred nr 1-4. Bowtie-efektiga on lekkimisleht nr 4.....	35
Joonis 25. Kuvatõmmised allveeaparaadi kogutud videotest: (A) lekkimislehtri viirsavist koosnev veer; (B) lekkimislehtri veerust allavarisenud viirsavi blokid ja valged bakterite matid; (C) bakterite matid lekkimislehtri põhjas; (D) raua-mangaani konkretsioonid viirsavide seljandikul lekkimislehtrite vahel. ....	36
Joonis 26. (A) Merepõhja pinnakatte kaart (Aluskaart: Maa-amet, 2024c); (B) raua-mangaani konkretsioonide levik, kohandatud Suuroja jt (2016) järgi: (1) Vaindloo lääne ala; (2) Vaindloo ida ala; (3) Vaindloo põhja ala; (4) Mohni ala.....	38
Joonis 27. Soome lahe raua-mangaani konkretsioonide ja lekkimislehtrite tekkemehhanismi lihtsustatud mudel. ....	39
Joonis 28. Mohni uuringuala põhjareljeefi kaardile on kantud perspektiivsed proovikohad järgnevatele mereekspeditsioonidele. ....	40
Joonis 29. Mohni uuringuala seismoakustilised Chirp-tüüpi profilaatorite interpreteeritud geoloogilised läbilõiked, punaste numbritega on tähistatud perspektiivsed proovivõtu kohad.....	41

## **Tabelite loetelu**

Tabel 1. Mohni uuringuala merepõhja perspektiivsete uute proovikohtade koordinaadid..... 41



## 1. Sissejuhatus

Eesti on põhjast, läänest ja edelast ümbritsetud mereterritooriumiga, mille geoloogiline olemus on mitmekülgne. Eesti merealade geoloogilise ehituse süstemaatiline uurimine algas 1973. aastal, mil Eesti Teaduste Akadeemia Geoloogia Instituudis alustati iga-aastaseid meregeoloogilisi ekspeditsioone. Tänapäeval suureneb Eesti riigi huvi merealade ressursside kasutamiseks, samas on kohuseks kindlustada oma territooriumile kuuluva Läänemere keskkonnasäästlik ja jätkusuutlik haldamine, tagada merealade loodusväärtuste kestlikkus, elurikkus ja säilitada olemasolevad ökosüsteemid. Seepärast on Eestil üha rohkem vaja läbi viia põhjalikke meregeoloogilisi uurimis- ja kaardistamistöid, et oleks olemas baasteadmised merepõhja elupaikadest, mere- ja rannaala planeerimiseks, avamererajatiste projekteerimiseks ning merepõhja ressursside otsimiseks (Tuuling jt, 2021).

Kõikide ookeanide ja enamike merede põhjas esinevad raua-mangaani konkretsioonid. Need on kihilise ehitusega kemobiogeensed moodustised, mis sisaldavad peale raua ja mangaani ka fosforit, niklit, koobaltit, vaske ning haruldasi muldmetalle. Läänemeres levivad konkretsioonid eelkõige Liivi, Põhja- ja Soome lahe piires. Soome lahe idaosas on konkretsioone mere põhjas keskmiselt 20-30 kg/m<sup>2</sup>, kuid paiguti võib kogus ulatuda 50 kg/m<sup>2</sup> (Glasby jt, 1997). Väliskuju järgi eristatakse ketta-, kooriku- ja keralaadseid ning segatüüpi konkretsioone (Suuroja jt, 2016).

Konkretsioonide levik on enamasti seotud merepõhja kulutus- ja transpordialadega, kus settimist ei toimu. Soome lahes esinevad konkretsioonid peamiselt hilisjäaaegsete viirsavide avamusel, väga aeglase settimisega piirkondades leidub neid kohati ka pärastjäaaegsete peeneteraliste setete levikualal. Lisaks settimistingimustele on konkretsioonide levik ilmselt seotud veesügavuse, põhjareljeefi, redokstingimuste ja põhjahoovuste esinemisega. Konkretsioonide tekkeks on vaja algtuuma olemasolu, milleks võib olla nii jänepurdne tera, mereorganismi fragment kui ka vana konkretsiooni tük.

On teada, et konkretsioonide tuuma ümber sadenevad lahustunud elemendid mereveest, kuid nende elementide päritolu ja täpsed moodustumist kontrollivad tegurid on siiani ebaselged. Võimalikeks lähteallikateks Läänemere konkretsioonide settetsükliks võivad olla nii jõetransport, aluspõhja kivimite murenemine ja lagunemine merepõhjas, Kattegati soolaste vete sissevool läbi Taani väinade, kui ka põhjavee väljaimbumine merepõhjas (Nigul, 1987).

Viimastel aastatel Soome lahes läbi viidud Eesti ja rahvusvaheliste mereekspeditsioonide käigus avastati, et konkretsioonid levivad merepõhjas lekkimislehtrite (*rõugearmid, inglise keeles pockmarks*) lähiümbruses. Lekkimislehtred on erisuurused kraatreid meenutavad nõgusad merepõhja pinnavormid, mis tekivad põhjavee ja/või gaaside vertikaalsel liikumisel pudedates setendites ja väljapääsemisel merepõhja (Lumiste, 2017).

Soome lahe lekkimislehtrite nõlvad on erineva kallakusega, nii järsud kui lauged ning nende põhi on enamasti tasane. Lekkimislehtrite sügavus on kuni kolm meetrit ning läbimõõtu ulatub paarikümnest paarisaja meetrini (Liira jt, 2024). Soome lahes asetsevad lekkimislehtred peamiselt merepõhja kõrgendikel, aladel, kus tänapäevast settetuhjumist ei toimu ja avanevad hilisglatsiaalsed viirsavid.

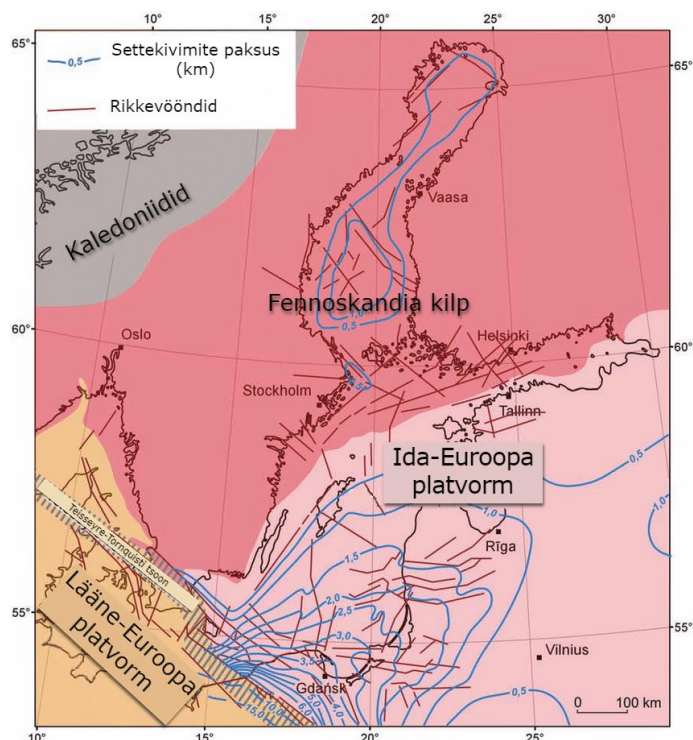
Lisaks asjaolule, et lekkimislehtrite ümbruses leidub suurtes kogustes raua-mangaani konkretsioone, avastati hiljutiste mereekspeditsioonidel allveevideokaameratega lekkimislehtrite põhjas esinevad bakterite matid, mis võib osundada aktiivsele metaani ja põhjavee väljavoolule merepõhja.

Käesoleva bakalaureusetöö sihiks on Soome lahe merepõhja geoloogilise ehituse väljaselgitamine ühe raua-mangaani konkretsioonide rikka uuringuala näitel. Selleks kasutasin eelmisel aastal läbi viidud merepõhja geofüüsikalise kaardistamise alusandmeid ja tulemuste interpreteerimist. Sellest tulenevalt seadsin oma lõputööle neli põhieesmärki:

- 1) Soome lahes raua-mangaani konkretsioonide levikualadel avastatud merepõhja kõrgendike geoloogilise ehituse kindlakstegemine;
- 2) merepõhja kõrgendikel paiknevate lekkimislehtrite tekkemehhanismi tõlgendamine;
- 3) uuringuala geoloogilise ehituse ja raua-mangaani konkretsioonide moodustumise vahelise seose väljaselgitamine;
- 4) tulevaste mereekspeditsioonide uuringualade ja merepõhja setendite proovivõtukohtade väljapakkumine.

## 2. Läänemeri ja Soome laht

Läänemeri on riimveeline sisemeri, mille pindala on 386 000 km<sup>2</sup> ja keskmine sügavus on umbes 50 m (Tuuling jt, 2011). Kuna Läänemeri on mandrisisene madalmeri, katab see ümbritseva maismaaga sarnast geoloogilist ala. Lõunapoolne osa merest asub Lääne-Euroopa ja Ida-Euroopa platvormi settekivimitel, mille piiri märgib Teisseyre-Tornquisti tsoon ning põhjapoolne osa Fennoskandia kilbil - Paleoproterosoikumi kristalsetel kivimitel (joonis 1).



**Joonis 1.** Läänemere nõo maakoore tektooniline ehitus, kohandatud Uścinowicz (2014) järgi.

Riimveelisesse Läänemerre lisandub uus vesi mageda veena sademetest, jõgedest ning vähesel määral soolasem Põhjamere vesi Taani väinade kaudu. Sademete maht ületab iga aastast aurumist. Kattegati väina juures, kus alumistes veekihtides on mere soolsus 30‰ ning ülemistes veekihtides 10-25‰, väheneb Läänemere soolsus Põhja- ja Soome lahe suunas. Läänemere keskosas on soolsus kuni 6‰, Liivi lahes 4-5‰, Põhjalahes 1-6‰ ning Soome lahes 4-5‰. Nagu mujal Läänemeres, on ka Soome lahe sügavamad veekihtid suurema tiheduse tõttu suurema soolsusega (Uścinowicz, 2014).

Läänemeres ei ole tõus ja mõõn eriti tajutavad ookeanist isoleerituse tõttu. Peamine pikaajalise meretaseme muutuse põhjus on jääajajärgne glatsioisostaatiline maakerge, mis algas u 16 000 aastat tagasi Läänemere nõost viimase mandrijää taandumisega (Hughes jt, 2016). Lisaks mõjutavad meretaset ookeani veetaseme muutused ning lokaalselt ja lühiajaliselt regionaalsed tormituuled, mis võivad veetaset muuta mitme meetri võrra. Läänemere lõuna rannajoonel toimub transgressioon ehk merevee pealetung maismaale ja põhjas regressioon ehk mere taandumine (Tuuling, 2011).

Soome laht on Läänemere idapoolseim laht, mis jääb Soome, Eesti ja Venemaa vahele. See on suhteliselt madal mereala, kus keskmine sügavus on 37 m. Soome laht muutub madalamaks idapoolses osas, kus ühtlasi suubub merre Läänemere suurim jõgi Neeva. Soome laht on pikliku ja kitsa kujuga - selle pikkus on 400 km ja laius 48 kuni 135 km. Soome lahe pindala on ligikaudu 29 500 km<sup>2</sup> ja vee maht on 1098 km<sup>3</sup>, mis moodustab 5% Läänemere kogumahust. Merepõhjas toimuv maakerge on 1-4 mm aastas (Characteristics of the seafloor, i.a).

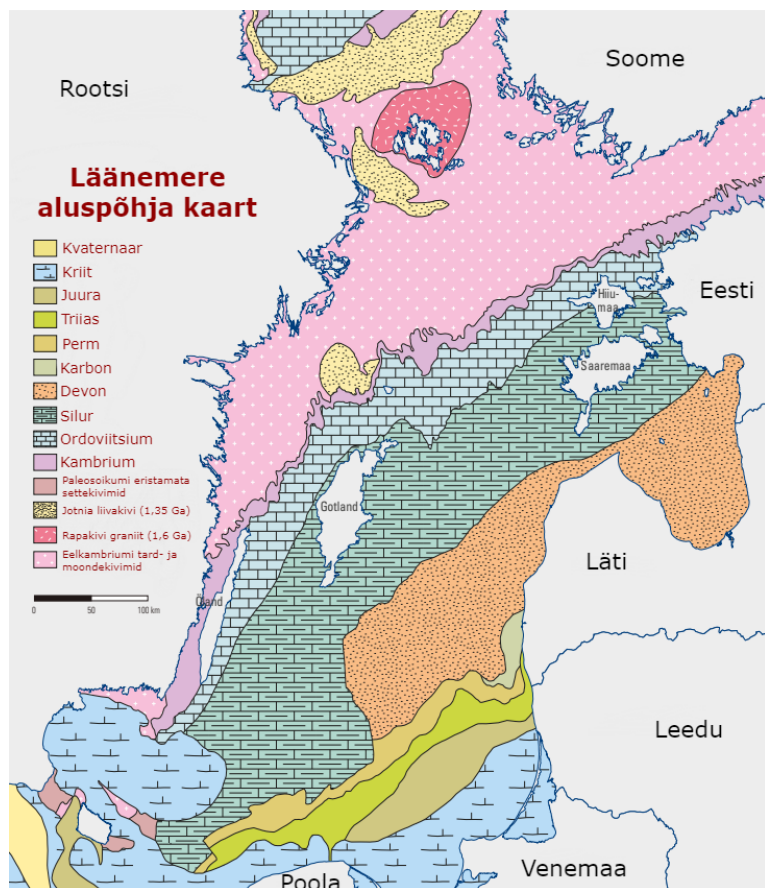
## 2.1. Läänemere geoloogia

Läänemeri on väga noor meri ning on oma praeguses olekus eksisteerinud vaid mõni tuhat aastat, kuid selle all olevad kivimid on rohkem kui 3 miljardit aastat vanad. Mere all asuvad kivimid moodustavad süvendi või nõo, mille tekke põhjuseks on loodud teooriaid nii erosioonist kui ka tektoonilistest protsessidest. Läänemere aluskorda moodustavad kristalsed kivimid on erivanuselised ning neid saab jaotada kolmeks: Põhjalahes ja sellest põhja pool asuvad vanimad kristalsed kivimid, mis pärinevad Arhaikumist ning on 3,5-2,7 miljardit aastat vanad, kõige nooremad Svekonorra orogeneesist pärinevad kristalsed kivimid asuvad Kattegati väina ümbruses ja on 1,14-0,94 miljardit aastat vanad ning vahepealse 1,95-1,75 miljardi aastase vanusega ülejäänud kivimid pärinevad Svekofenni orogeneesist (joonis 2). Svekofenni orogeneesi kivimites Ahvenamaal, Karjalas Viiburis, Põhja- ja Soome lahes võib leida ka rapakivi massiive, mis tekkisid 1,67-1,44 miljardit aastat tagasi, osad neist on kaetud Mesoproterosoikumist pärit Jotnia kvartsiitidega (Tuuling jt, 2011).

Ida-Euroopa platvormi alal suureneb Faneroosoikumi settekivimite paksus kagu suunas, st kui põhjas ja loodes lasuvad Kvaternaari setted Kambriumi settekivimite peal, siis lõunas lasuvad Kvaternaari setted Neogeeni setenditel (Rosentau jt, 2017). Aluskorra ja settekivimite koosneva platvormi tekke vahel oli suur ajaline paus, kuna esimene settebassein moodustus alles Ediacara ajastu lõpul, mil kuhjusid liivakivid, konglomeraadid, savid ning sinisavi, mille paksus on kuni 120-200 m ja mis osaliselt paljandub Põhja-Eesti rannikul. Kambriumi ajastu liivaste ja savikate setendite kihi paksus kasvab lõuna poole järk-järgult 250-500 m (Šliaupa ja Hoth, 2011). Lasuvaid settekivimeid mõjutas tugevalt Kaledoonia orogenees, kui Siluri ja Devoni ajastu üleminekul Baltika ürgkontinent põrkus kokku Laurentia ürgkontinendiga ning Balti sünekliisis, mis oli suur aluskorra nõgu, toimus aktiivne setete kuhjumine (Tuuling jt, 2011).

Ordoviitsiumi karbonaatsete kivimite kihi paksus on merealadel 60-160 m ja maismaal kuni 250 m. Siluri ajastul muutus settimine intensiivsemaks ning selle ajastu kivimite, savi- ja karbonaatsete kivimite kihid on Lõuna- ja Edela-Läänemeres kuni 3500 m paksud. Devoni ajastul settisid terrigeensed ja karbonaatsed setted vaheldumisi, maksimaalne ladestumise paksus on Lääne-Leedus, kus see ulatub 1050 m. Karboni ajastu liivakivi ja karbonaatseid kivimeid leidub vähestel aladel Loode-Leedus, Edela-Lätis ja Läänemere lõunaaladel. Permi ajastu kivimikiht koosneb karbonaatsetest kivimitest, evaporaatidest ning selle paksus on kuni 350 m Gdanski vao lõunaosas. Triiase mudakivimite ja punaste peeneteralised arkoosid levivad samal alal. Juura ladestu, mis on kuni 200 m paks, alumine osa koosneb sarnastest peeneteralistest liivakividest, aluriitidest ja kiltkividest, kuid läheb ülemises osas üle

lubjakiviks. Kriidi ajastu kivimikiht koosneb glaukonitsetest liivakividest, kiltadest, aleuriitidest ning kriidist ja on Läänemere lõunaosas kuni 400 m paks (joonis 2). Paleogeeni ja Neogeeni terrigeenseid setendeid on kaardistatud vaid Läänemere kõige lõuna poolsemas osas (Šliaupa ja Hoth, 2011).



**Joonis 2.** Läänemere aluspõhja geoloogiline kaart, kohandatud Tuuling jt (2011) järgi.

Kvaternaari ladestu lasundid Läänemeres koosnevad valdavalt Pleistotseeni glatsiaalsetest, fluvio-, limno- ja interglatsiaalsetest setetest ning Holotseeni merelistest ja järvelistest setetest (Rosentau jt, 2017). Pleistotseeni setete paksus varieerub suuresti - kõige õhemad 5 m paksused setted asuvad aladel, kus domineeris liustiku erosioon ning kõige paksemad kuni 200 m settelasundid asuvad Kvaternaari eelsetes aluspõhja orgudes (Uścinowicz, 2014). Pleistotseeni setteid esindab valdavalt viimase jääaja moreen, samuti on levinud jääjõelised setted fluvioglatsiaalsete deltade ja ooside näol ning taanduva liustikuserva ees laiunud jääjärvedes moodustunud viirsavid. Jääajajärgsed Hilis-Pleistotseeni ja Holotseeni setted on üldjuhul üksteisega sarnased terves Läänemeres, koosnevad peamiselt aleuriidist ja savist ning jagunevad: Balti jääjärve pruunik viirsaviks, Joldiamere ja Antsülusjärve halliks saviks ning Litoriinamere rohekashalliks mudaks (Rosentau jt, 2017).

## 2.2. Soome lahe geoloogiline ehitus

Soome laht asub Balti kilbi ja Ida-Euroopa platvormi piiril ning seetõttu on lahe põhjapoolne osa ühekorruselise ja lõunapoolne kahekorruselise ehitusega. Alumise korruse moodustab kristalne keskmiselt 40–60 km paksune aluskord, mis koosneb Paleoproterosoikumis Svekofenni orogeneesi käigus moodustunud kurrutatud ja migmatiidistunud moondekivimeist, mida läbistavad Paleo- ja Mesoproterosoikumist pärit rabakivid ning nendel lasub suure 900 miljoni aastase lüngaga monoklinaalsetest sette kivimite kompleksidest koosnev pealiskord (joonis 3). Mõlemad kivimikompleksid on tektooniliselt rikutud, kuid erinevalt aluskorrast, pole aluspõhja kivimid kurrutatud ega moonduvad. Aluskord on kaetud 1-20 m paksuse murenemiskoorikuga, kuid murenemiskoorik puudub aladel, kus aluskord paljandub. Paljandid meenutavad üldiselt silekaljude taoliseid pinnavorme (Suuroja jt, 2016).

LADESTU <i>System</i>	LADESTIK <i>Seriez</i>	LADE <i>Stage</i>	LITOSTRATIGRAAFI- LINE ÜKSUS <i>Lithostratigraphical unit</i>	INDEKS <i>Index</i>	AVAMUS MEREPOHJAS <i>Outcrop on sea bottom</i>	KIVIMI KIRJELDUS <i>Rock description</i>		
KVATERNAAR <i>QUATERNARY</i>				Q	Q	Kvaternaari setted (ainult läbilõigetel) <i>Quaternary deposits (only on cross- sections)</i>		
ORDOVIITSIUM <i>ORDOVICIAN</i>	KESK- MIDDLE	UHAKU	KÕRGEKALDA	O <sub>2kr</sub>	O <sub>2</sub> lubjakivid	Savikas lubjakivi <i>Argillaceous limestone</i>		
		LASNAMÄE	VÄO	O <sub>2va</sub>		Lubjakivi <i>Limestone</i>		
		ASERI	KANDLE	O <sub>2kn</sub>		Ooidlubjakivi <i>Ooid-limestone</i>		
		KUNDA	PAKRI   LOOBU	O <sub>2pk</sub>   O <sub>2lb</sub>		Liivalubjakivi, lubjakivi <i>Sandy limestone, limestone</i>		
		VOLHOVI	TOILA	O <sub>1.2tl</sub>		Glaukonitlubjakivi <i>Glauconite limestone</i>		
		BILLINGENI						
		HUNNEBERGI	LEETSE	O <sub>1lt</sub>		Glaukonitliivakivi <i>Glauconite sandstone</i>		
		PAKERORDI	TÜRISALU	O <sub>1tr</sub>		Maarjaskilt <i>Alum shale</i>		
		KAMBRIUM <i>CAMBRIAN</i>	FURONG FURONGIAN	ÜLGASE, TSITRE, KALLAVERE		Ca <sub>3</sub> il-O <sub>1kl</sub>	Ca+O <sub>1</sub> liivakivid, savid	Oobolusliivakivi <i>Oobolus sandstone</i>
				TISKRE		Ca <sub>1ts</sub>		Puiteraline kvartsiivakivi <i>Fine-grained quartzose sandstone</i>
LÜKATI	Ca <sub>1lk</sub>			Sinisavi liivakivi vahelikeid <i>Blue clay with interbeds of sandstone</i>				
LONTOVA	Ca <sub>1ln</sub>			Sinisavi liivakivi <i>Blue clay, sandstone</i>				
EDIACARA (VEND) EDICARAN (VENDIAN)	VALDAI	KOTLINI	KROODI	V <sub>2vr</sub>	V <sub>2</sub> liivakivid, aleuroiidid, savid	Liivakivi, aleuroitne savi, savi <i>Sandstone, silty claystone</i>		
			KOTLINI	V <sub>2kr</sub>		Liivakivi, aleuroit, savi <i>Sandstone, siltstone, claystone</i>		
			GDOVI	V <sub>2gd</sub>		Liivakivi, aleuroit, savi <i>Sandstone, siltstone, claystone</i>		
MESOPROTEROSOIKUM <i>MESOPROTEROZOIC</i>				MP	MP	Rabakivi <i>Rapakivi</i>		
PALEOPROTEROSOIKUM <i>PALEOPROTEROZOIC</i>			LÄÄNE-EESTI	PP	PP	Moondekivimid: gneissid, migmatiidid, amfiboliidid jt <i>Metamorphic rocks: gneisses, migmatites, amphibolites etc</i>		
			TALLINNA					
			ALUTAĞUSE KOMPI EKS					

**Joonis 3.** Soome lahe aluspõhja stratigraafiline skeem (Suuroja jt, 2016).

Pealiskord koosneb neoproterosoilistest Ediacara ning varapaleosoilistest Kambriumi ja Ordoviitsiumi sette kivimitest ning Kvaternaari pinnakattest. Aluskorra väikese lõunasuunalise kallakuse tõttu on sette kivimid monoklinaalselt kaldus 2 kuni 4 m km kohta põhjast lõuna poole ning ühtlasi avanevad samas suunas järguti nooremad kivimid. Samuti kopeerivad pealiskorra avamused üldjuhul rannajoont ning aluskorras esinevate orgude reljeefi. Olulised piirid pealiskorras on Ediacara Kotlini ja Vara-Kambriumi Lontova lademe piir, kus toimub madalaveelise terrigeense sedimentatsiooni asendumine sügavamaveeliste savikamate sette kivimitega ning Vara-Ordoviitsiumi Hunnebergi ja Billingeni lademe vaheline piir, kus toimub terrigeense sedimentatsiooni asendumine karbonaatsega. Litostratigraafiliselt saab aluspõhja jaotada kolmeks üksuseks: Ediacara liivakivid, Kambriumi ja Vara-Ordoviitsiumi savid, aleuroliidid ja liivakivid ning Kesk-Ordoviitsiumi karbonaatsed sette kivimid (Suuroja jt, 2016).

Kvaternaari setted katavad peaaegu terve Soome lahe merepõhja Eesti majandusvööndi alal. Tavaliselt on Kvaternaari seteteks Hilis-Pleistotseeni viimase jäätumise moreen, hilisjäaja Balti jääjärve viirsavid ja erisugused Holotseeni setted. Vanemaid Pleistotseeni setteid on siiani avastatud peamiselt vaid Soome lahe väikesaartel puuritud puursüdamikes. Kesk-Pleistotseeni setted Soome lahes ei paljandu, Ugandi kihistusse kuuluvad tardkivimitest veeriseid sisaldavad hallikaspruun moreen ja kollakashallid liustikujõelised jämpurdsed setted lasuvad tavaliselt aluskorral. Hilis-Pleistotseeni setted on esindatud Prangli kihistu jäävaheaja mereliste setetega ning Järva kihistu viimase jääaja halli moreeni ja teiste jäätekkeliste setetega. Kaugemal kui 2 km rannajoonest avanevad merepõhja laugematel osadel enamasti Balti jääjärve viirsavid (Suuroja jt, 2016).

Pärastjääaegsed Holotseeni setteid saab jagada neljaks settekompleksiks: Joldiamere savikad aleuriitsete vahekihtidega peeneteralised setted, Antsülusjärve savid ja aleuriidid, Litoriina- ja Limneamere sügavaveelised merelised mudad ning Limneamere madalaveelised kruusad, liivad ja aleuriidid (joonis 4). Joldiamere mikrokihilised aleuriidika saviga setted lasuvad Balti jääjärve setetel. Joldiamere lõpp ei väljendu meresetetes eriti selgelt, sest settetingimused olid sarnased Antsülusjärvega. Antsülusjärve setted on esindatud peamiselt ebaselge kihilisusega must või tumehalli hüdrotroiliidi suletiste või vahekihtidega savina. Litoriina- ja Limneamere setted on sügavaveelises keskkonnas settinud muda või savi, mille eristamine on üldjuhul võimatu. Lasundi alumine pind on teravalt tähistatud katkestuspindade või liivakate kihtidega. Limneamere kõige nooremad madalamaveelised setted on ranniku ääres, lahtedes ning madalikel esinevad aleuriit, liiv ja kruus (Suuroja jt, 2016).

STRATIGRAAFILINE ÜKSUS				BALTI MERE ARENGUSTAADIUM	GENEETHLINE TÜÜP	SETTEÜÜBI INDEKS	ALUMISE PIIRI VANUS, tuhat a.	
LADESTU	LADESTIK	ALAMLADESTIK	KIHISTU					
KVATERNAAR	HOLOTSEEN			LIMNEAMERI	meresetted	mIV <sub>im</sub>	11,7	
				LITORINAMERI	meresetted	mIV <sub>lt</sub>		
				ANTSÜLUSJÄRV	järvesetted	IIV <sub>an</sub>		
				JOLDIAMERI	meresetted	mIV <sub>y</sub>		
	PLEISTOTSEEN	ÜLEM-PLEISTOTSEEN	JÄRVA	BALTI JÄÄJÄRV	jääjärvede setted	IgIII <sub>r3</sub>	115	
					jääjõgede setted	fIII <sub>r3</sub>		
			liustikusetted	gIII <sub>r3</sub>				
			jääjärvede setted	IgIII <sub>r1</sub>				
		PRANGLI		meresetted	mIII <sub>pr</sub>	126		
			KESK-PLEISTOTSEEN	UGANDI		jääjärvede setted		IgII
					jääjõgede setted	fII		
					liustikusetted	gII		

Joonis 4. Soome lahe Kvaternaari setete stratigraafiline skeem (Suuroja jt, 2016).

### 2.3. Läänemere kujunemine

Kainosoikumist alates, enne Kvaternaari jää- ja jäävaheaegu, kujunes praeguse Läänemere nõo kohal hiiglaslik sügavale maakoore lõikunud jõgedevõrk, näiteks ülisuured Eridanose ja Ürg-Neeva jõed (Tuuling jt, 2011). Aluspõhja kivimitesse voolitud mattunud orud tõestavad toonast jõgede süsteemi, mis kadus umbes paar miljon aastat tagasi, kui algas jääaeg (Cohen jt, 2017). Pleistotseeni mandriliustike korduv kulutav tegevus süvendas ja voolis ümber eelneva pinnamoe ja lõi eeldused jäävaheaegadel suurte veekogude tekkeks. Viimase 2,6 miljoni aasta jooksul koges Põhja-Euroopa vaheldumisi mitmeid jää- ja jäävaheaegu, mil suured mandriliustikud liikusid üle Läänemere nõo ja seda ümbritseva maismaa alade, kulutades ja ümberkujundades nii aluspõhja pinnamoodi ja kuhjates uusi liustikulisi pinnavorme. Tänapäevane Läänemeri hakkas kujunema pärast viimast Weichseli jäätumist, kuid usutakse, et enne seda eksisteeris Eemi meri, mis oli tänapäeva Läänemerest ulatuslikum ning oli ühendatud ookeaniga Valge mere kaudu (Tuuling jt, 2011).

Viimane jääaeg, Weichseli jäätumine toimus 115 000 kuni 11 700 aastat tagasi, jõudis oma maksimaalse ulatuseni 22 000 aastat tagasi (Tuuling jt, 2011). Liustiku taandumisega 16 000 aastat tagasi hakkas moodustuma magedaveeline Balti jääjärv, mille veetase oli ookeani tasemest kõrgemal. Soome laht, käesoleva lõputöö uuringuala, vabanes mandriliustikust ligikaudu 13 000 aastat tagasi (joonis 5). Ligikaudu 11 700 aastat tagasi tekkis jääjärvel tänapäeva Kesk-Rootsis asuva Billingeni mäe juures ühendus ookeaniga ning veetase langes umbes 25 m. Ookeani ja Läänemere basseini veetase võrdsustus, soolase vee sissevool tõi kaasa Läänemere nõos osaliselt riimveelise Joldiamere kujunemise.



**Joonis 5.** Viimase mandrijää taandumine Eestist, mandrijääserva asendid ja vanus Hughes jt (2016) järgi.

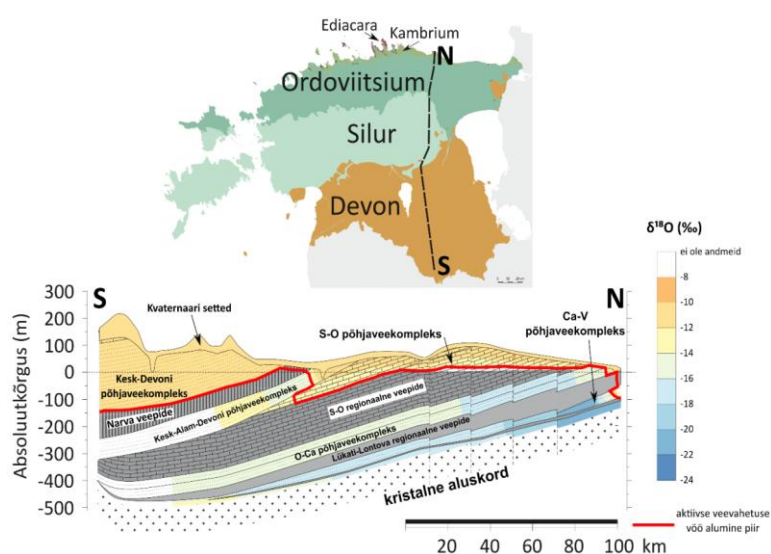
Jääkilbi alt vabanenud ala kiire maakerke tõttu ühendus ookeaniga kahanes, kuni see täielikult katkes umbes 10 700 aastat tagasi ning Joldiamerest sai Antsülusjärv. Toimus edasine mandriliustiku taandumine ning see kahanes viimaks merealadelt põhja poole Skandinaavia mägedesse. Samuti jätkus edasi ka maakoore tagasikerkimine, mis oli põhjas kiire, kuid lõunas aeglustus. Kuna maailmamere



veetase kerkis, moodustus lõunas Taani väinade kohal umbes 9800 aastat tagasi uus ühendus ookeaniga ja algas Läänemere riimveeline Litoriaamere staadium. Kuna Litoriaamere ajal oli ühendus ookeaniga parem, siis oli selle veekogu soolsus suurem kui tänapäeval. Viimase 4500 aasta jooksul, kui maailmamere veetaseme tõusu aeglustumine tõi kaasa Taani väinade madaldumise ja Läänemere voolava soolase veemassi vähenemise, on nimetatud seda magedunud veekogu Limneamereks (Rosentau jt, 2017). Läänemeri muutub siiani iga aastaga magedamaks. Tänapäevase maakoore glatsioisostaatilise liikumise tõttu toimub Läänemere kõige kaugemas põhjaosas aastane 9 mm maakerge ning kõige kaugemas lõunaosas merepõhi vajub 2 mm võrra aastas (Tuuling jt, 2011).

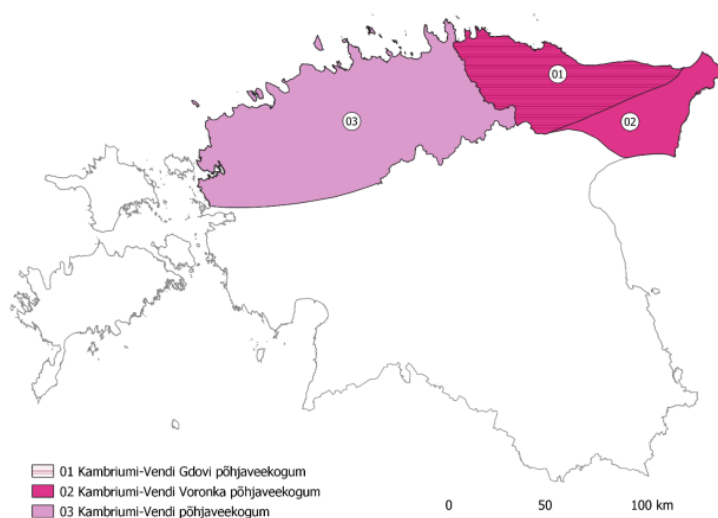
## 2.4. Eesti põhjaveekompleksid

Kuna käesoleva lõputöö arutelus on oluline osa ka põhjavee võimalikul lekkimisel merepõhja, siis esitan lühikese ülevaate Eesti hüdrogeoloogiast. Eestis esinevad kivimikihid on kallutatud 2 kuni 4 kraadise nurga all lõuna suunas ning põhjaveekihtid jälgivad kivimikihtide lasumust. Põhjaveekiht koosneb enam-vähem ühtlase koostisega ulatuslikul alal levivatest poorsetest ja vett läbi laskvatest kivimitest või setetest. Eesti põhjavee võib päritolust lähtuvalt jagada kolmeks: Holotseeni või tänapäeva sademete tekkelised, glatsiaalsed ehk liustikutekkelised ning relikitse või tänapäeva merelise tekkega põhjaveed. Pinnakattes leidub Kvaternaari põhjaveekompleks, mis katab praktiliselt kogu Eesti territooriumi. Lõuna-Eestis levivad aluspõhja settekiivimites Ülem-, Kesk- ja Kesk-Alam-Devoni põhjaveekompleksid, mille avamusalad jäävad Lõuna- ja Kesk-Eestisse ja piiratud alal ka Kirde-Eestis. Siluri ja Ordoviitsiumi karbonaatsetes kivimikihtides esinevad põhjaveekihtid levivad pea kogu Eestis. Üle terve Eesti on samuti esindatud sügavamal esinevad Ordoviitsium-Kambriumi ja Kambriumi-Vendi põhjaveekompleksid. Põhjaveekomplekside vahel asuvad savist, merglist või savikast lubjakivist koosnevad veepidemed (joonis 6).



**Joonis 6.** Eesti põhjaveekomplekside levik, veepidemed ja põhjavee hapniku isotoopiline koostis ( $\delta^{18}\text{O}$  väärtused) Marandi jt (2019) järgi.

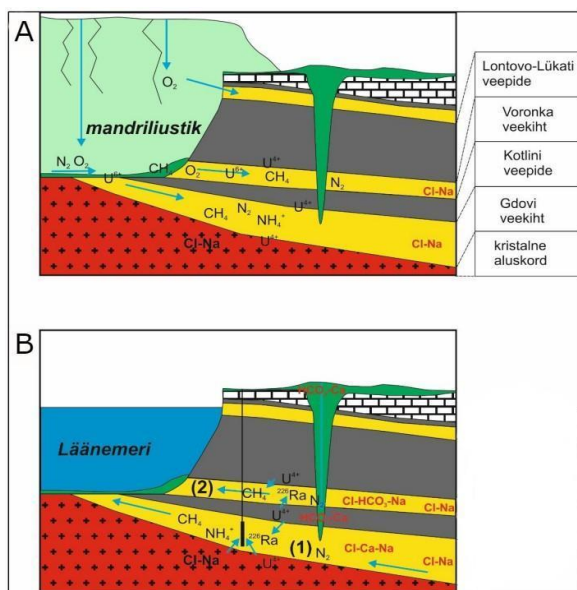
Kambriumi-Vendi veekompleks jaguneb: Kambriumi-Vendi Gdovi, Kambriumi-Vendi Voronka ja Kambriumi-Vendi põhjaveekogumiks (joonis 7). Põhjaveekogumid on veekogumi hindamiseks ja majandamiseks loodud allüksused, mis koondavad mitmeid põhjaveekihte. Kambriumi-Vendi Gdovi ja Voronka põhjaveekogumid asuvad Lääne- ja Ida-Virumaal ning nende vett kandvad kivimid on segateraline Ediacara liivakivi ja aleuroliit, mis lasuvad vähesel määral vett juhtival kristasel aluskorral. Kihtide paksus on kuni 60 m ning see väheneb põhjast lõuna suunas. Veekompleksidel lamav veepide on Kotlini lademe aleuroliidid ja savid (Marandi jt, 2019).



**Joonis 7.** Kambriumi-Vendi põhjaveekogumid (Marandi jt, 2019).

Gdovi ja Voronka põhjaveekogumite voolusuund on lõunast põhja poole ning looduslikuks väljealaks on Soome laht. Põhjavee intensiivse tarbimise tõttu võib aset leida lokaalselt põhjaveevoolu suuna muutus. Gdovi ja Voronka põhjaveekogumeid iseloomustab anomaalne hapniku isotoopkoostis,  $\delta^{18}\text{O}$  väärtused jäävad vahemikku  $-18,5$  kuni  $-20\%$  (joonis 6). Põhjavesi toitub lõunapoolsete soolaste vete ja ürgorgudes läbi Kvaternaari setete infiltreeruvast sademeveest. Veevõtu ja survevee taseme alanemise tõttu toimub soolase vee sissetung aluskorra murenemiskoorikust Gdovi põhjaveekogumisse. Keemiliselt koostiselt on mõlema põhjaveekogumi põhjavesi  $\text{Na-Cl-HCO}_3$ -tüüpi ning mineraalsus suureneb ida ja lõuna suunas (Marandi jt, 2019).

Glatsiaalne põhjavesi on kujunenud viimase Skandinaavia liustiku pealetungi käigus, kui Eestit katnud mandriliustik tekitas põhjapoolt suure hüdrostaatilise rõhu, mis pööras ümber tavapärase lokaalse põhjavee liikumise suuna. Sellele põhjavee äärmiselt kerge hapniku isotoopkoostis (anomaalselt negatiivsed  $\delta^{18}\text{O}$  väärtused vahemikus  $-18,5$  kuni  $-23\%$ ) on kinnituseks, et antud põhjavesi on kujunenud tänapäevastest erinevates kliimatingimustes 30 000 kuni 12 000 aastat tagasi. Gdovi ja Voronka põhjaveekogumite keemilised omadused on paljuski põhjustatud põhjavee päritolust ning oluliseks protsessiks on olnud relikitse soolavee ja glatsiaalse mageda põhjavee segunemine (joonis 8).



**Joonis 8.** Gdovi ja Voronka põhjaveekogumite kontseptuaalsete mudelite läbilõiked (A) jääaegadel Pleistotseenis ja (B) tänapäeval, kohandatud Marandi jt (2019) järgi.

Samuti on keemilist koostist on kujundanud liustiku sulavete poolt sisse kantud orgaanilised ühendid, mis on andnud põhjaveele looduslikult kõrged metaani, lämmastiku ning ammooniumi sisaldused. Üldiselt on Voronka veekihi raadiumi isotoopide aktiivsus palju madalam kui Gdovi põhjaveekogumis, sest puudub otsene kontakt kõrgema uraani ja tooriumi sisaldusega kristalse aluskorruga. Võimalik raadiumi allikas võib olla ka ürgorgude suudmealadel liustikuvete infiltreerumisel toimunud uraani maagistumine (Marandi jt, 2019).

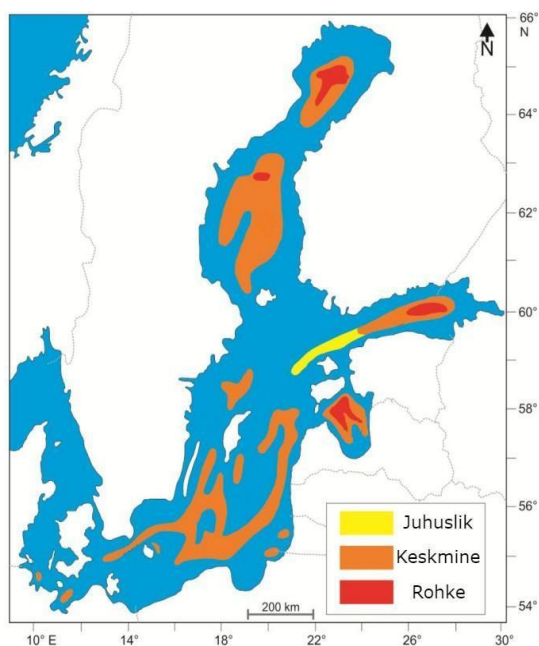
Kambriumi-Vendi põhjaveekogum on sarnane Kambriumi-Vendi Gdovi ja Voronka põhjaveekogumiga, kuid asub Harju-, Rapla- ja Läänemaal. Vett kandva kivimikiht on kuni 100 m ning koosneb Voronka ja Gdovi kihistu liivakividest, kuid läänepool Lontova/Voosi kihistu liivakividest ja aleuoliitidest. Peal lasuvaks veepidemeks on peaaegu kogu kogumi ulatuses Lükati–Lontova kihistute savi ja aleuoliit. Põhjaveekogum avaneb Läänemeres ja Soome lahes ning looduslik voolusuund on lõunast põhja, kuid on inimtegevuse tõttu lokaalselt muutunud. Keemiliselt koostiselt on see põhjavesi mage, Na-HCO<sub>3</sub>-Cl või Na-Cl-HCO<sub>3</sub>-tüüpi. Tallinnas ja põhjaveekogumi kirdeosas on põhjavee kujunemisel oluline olnud veepidet lõikavatel sügavatel ürgorgudel, mis võimaldasid magedamate ja Ca-HCO<sub>3</sub> tüüpi põhjavete infiltreerumist (Marandi jt, 2019).

## 2.5. Raua-mangaani konkretsioonid ja nende levik Soome lahes

Soome lahes viidi läbi esimesed merepõhja uuringud Venemaa Hüdrograafiateenistuse poolt 18. sajandil, kuid esimesed kirjalikud andmed raua-mangaani konkretsioonide koostisest ja levikust ilmusid alles 20. sajandi alguses vene teadlaste I. Samoilovi ja A. Titovi poolt (Suuroja jt, 2016). Läänemeri on omapärane sisemeri oma rohke raua-mangaani konkretsioonide leviku poolest. Raua-

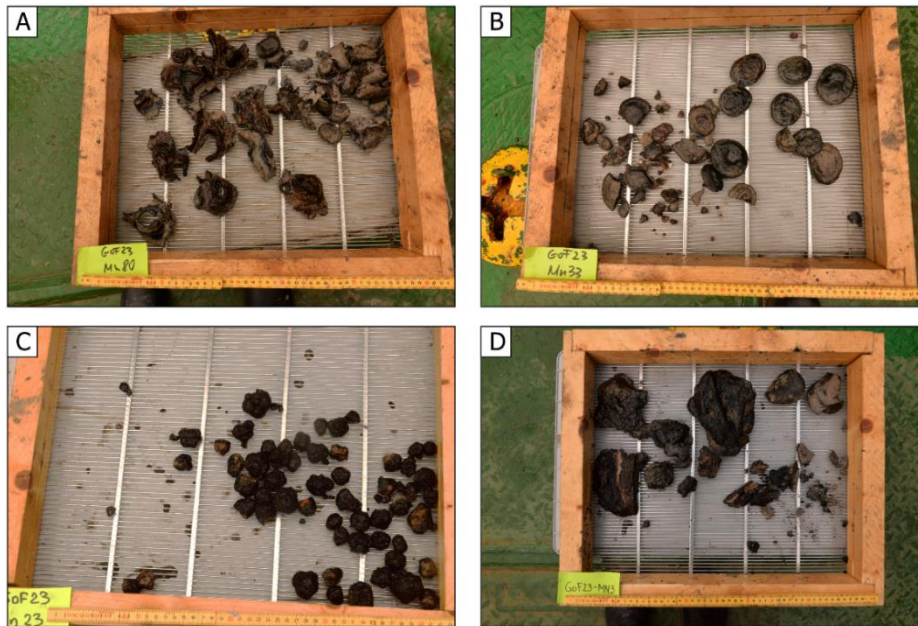
mangaani konkretsioonid on kihilise ehitusega mugulad. Peale raua ja mangaani sisaldavad konkretsioonid ka fosforit, niklit, koobaltit, vaske, haruldasi muldmetalle ja teisi elemente, seega on neil potentsiaal kriitilise tähtsusega aku- ja elektroonikaelementide ning haruldaste jälgelementide kontsentreerimiseks. Läänemeres on konkretsioonid eelkõige akumulunud Liivi, Põhja- ja Soome lahte. Soome lahe idaosas Neeva jõe suudme lähedal on konkretsioone mere põhjas keskmiselt 20-30 kg/m<sup>2</sup>, kuid paiguti võib see maht ulatuda 50 kg/m<sup>2</sup> (Glasby jt, 1997). Võrreldes teiste Läänemere konkretsioonidega, on Soome lahe konkretsioonides enam fosforit ja mangaani (Suuroja jt, 2016). Rohepöörde tehnoloogiate plahvatuslikult suureneva kasutuselevõtu tõttu kasvab maailmaturul kiiresti nõudlus kõrgtehnoloogiliste metallide järele, seega tulevikus võib raua-mangaani konkretsioonidest saada võimalik metallide toormaterjal (Toro jt, 2020).

Soome lahes ning mujal Läänemeres asuvad konkretsioonid nõgudel, nõlvadel ja kõrgendikel sügaval vees hilis- või pärastjäaaegsetel järvesavidel või vähese settimisega piirkondade poolvedelal meremudal. Läänemeri on raua-mangaani konkretsioonide levikualadele põhinedes jagatud viieks osaks: Lääneregioon, Keskregioon, Põhjalaht, Soome laht ja Liivi laht. Soome lahes leiduvad need keskmiselt 50-60 m sügavusel (Nigul, 1987). Soome lahes on konkretsioone kõige rohkem kesk- ja eriti idaosas (joonis 9).



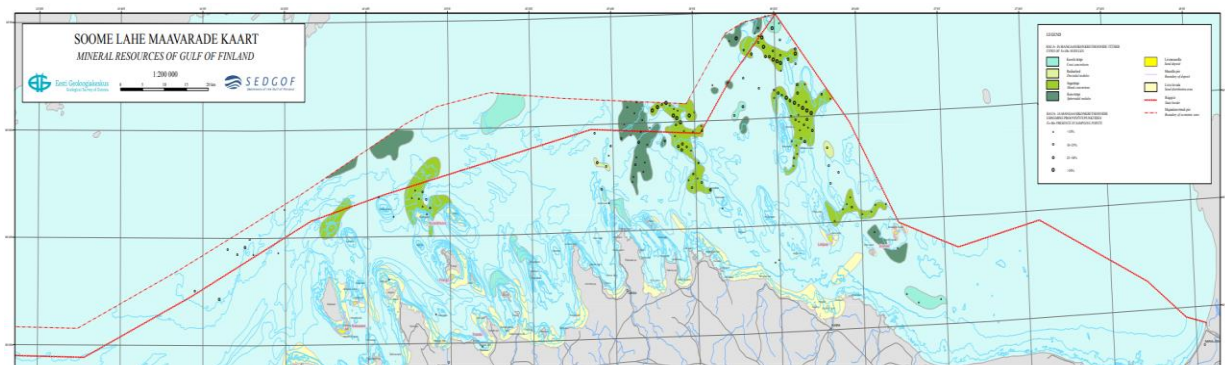
**Joonis 9.** Raua-mangaani konkretsioonide leviku arvukus Läänemeres Wasiljeff (2015) järgi.

Läänemeres on konkretsioonid poorsed ning nendega on seotud unikaalsed mikroobikooslused, mis võivad mõjutada nende kasvu. Ookeanis leiduvate konkretsioonidega võrreldes kasvavad Läänemere konkretsioonid väga kiiresti, keskmine kasvukiirus on parkümmend µm aastas, ookeanis on see mõni mm miljoni aasta jooksul. Kuju järgi eristatakse nelja tüüpi konkretsioone: kooriku-, ketta- ja keralaadseid ning segatüüpi (joonis 10). Tänu konkretsioonide kihilise ehitusele, on võimalik koostise põhjal hinnata Läänemere keskkonna seisundit ja selle kvaliteedi muutuste kohta minevikus (Wasiljeff jt, 2024).



**Joonis 10.** Konkretsioonid kogutud haardkopaga 2023 a septembri ekspeditsioonil uurimislaevalt Salme: (A) koorikulaadsed; (B) kettalaadsed; (C) keralaadsed; (D) segatüüpi. Fotod: Sten Suuroja, Eesti Geoloogiteenistus.

Soome lahes Eesti merealal esineb kõige rohkem segatüüpi konkretsioone (joonis 11). Varasemate uuringute põhjal arvatakse, et veealuste kõrgendike nõlvadel levivad peamiselt koorikutüüpi konkretsioonid ning vähese settimisega tasastele aladele on iseloomulikud kera- või kettatüüpi konkretsioonid. Kooriku- või kettakujuliste konkretsioonide läbimõõt võib ulatuda 20–30 cm. Vähesese settimisega aladel esineb tavaliselt 1–2 cm läbimõõduga kerakujulisi konkretsioone, mis asuvad 10–15 cm paksusel, 2–3 mm vedela pruuni oksüdeerunud kihiga kaetud rohekashallil redutseerunud savil (Suuroja jt, 2016). Savidel on koos konkretsioonidega levinud õhuke kruusa ja liiva kirme, mis võib madalike lähedal sisaldada väikseid kive. Vahel katab savisid õhuke musta muda kiht aleuriidi ja liivaga (Nigul, 1987).



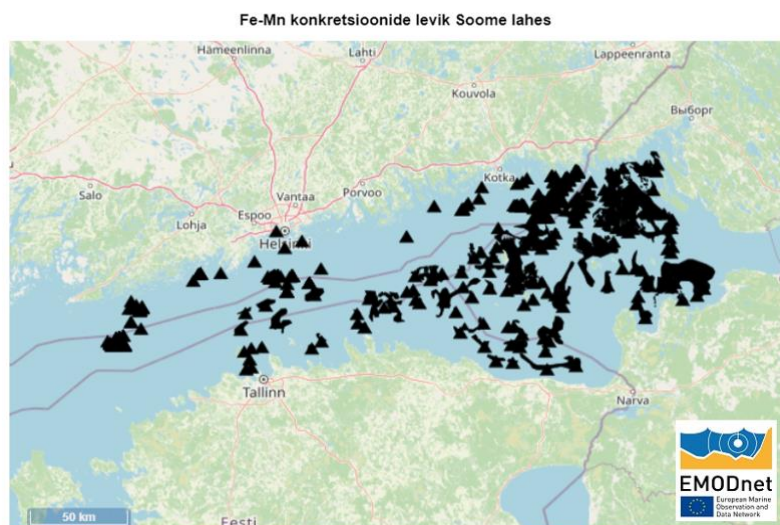
**Joonis 11.** Soome lahe maavarade kaart (Suuroja jt, 2016).

Alad, kus konkretsioonid esinevad, on tavaliselt nullsedimentatsiooni või transiitvööndid. Tõenäoliselt merepõhja reljeefi tõttu jääb konkretsioonide levikupiirkond peamiselt Naissaarest ida poole. Naissaarest lääne poole jääv merepõhja reljeef on ida poolsest laugem, põhjalähedased hoovused on nõrgemad ja seetõttu on merepõhjas rohkem settimisalasid. Reeglina katavad konkretsioonid koos õhukese jäänukliiva ja -kruusa kihiga Balti jääjärve või Antsülusjärve järvesavisid või paiknevad vähese settimisega piirkondade poolvedelal mudal (Suuroja jt, 2016). Aluspõhi, millel Soome lahe raua-mangaani konkretsioonid lasuvad, koosneb peamiselt Ediacara liivakivist (joonis 12).



**Joonis 12.** Soome lahe aluspõhja geoloogiline ehitus, kohandatud Tuuling (2019) järgi.

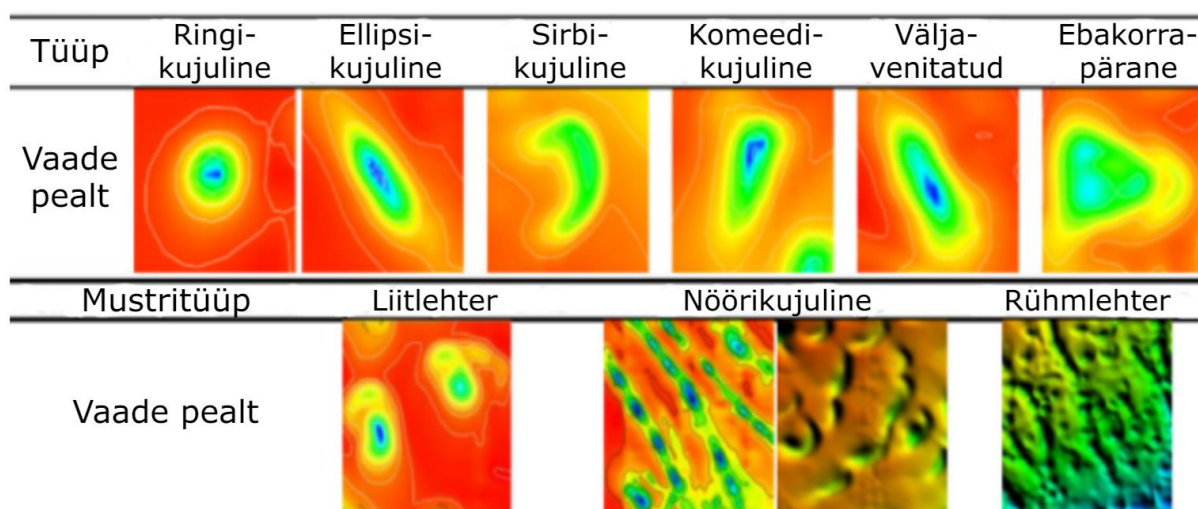
Eriti ilmsiks tuleb konkretsioonide lasumine Ediacara kivimitel Soome lahe idaosas, kus Ediacara avamusala on suurem ning konkretsioonide esinemine sagedasem (joonis 13). Konkretsioonide tekke jaoks on vaja tuuma, milleks võib olla terrigeenne kui ka vana konkretsiooni tük. On arvatud, et tuuma ümber sadenevad lahustunud elemendid mereveest, kuid nende elementide päritolu ja täpsed moodustumist kontrollivad tegurid on siiani ebaselged. Võimalikeks lähteallikateks Läänemere settetsükliks võivad olla: jõetransport, aluspõhja ja setete murenemine merepõhjas, Kattegati vete sissevool läbi Taani väinade, põhjavee väljaimbumine merepõhjas. Kõige olulisem roll jõetranspordil Soome lahes on Neeva jõel (Nigul, 1987).



**Joonis 13.** Raua-mangaani konkretsioonide levik Soome lahes (EMODnet Geology Portal, 15.03.2024).

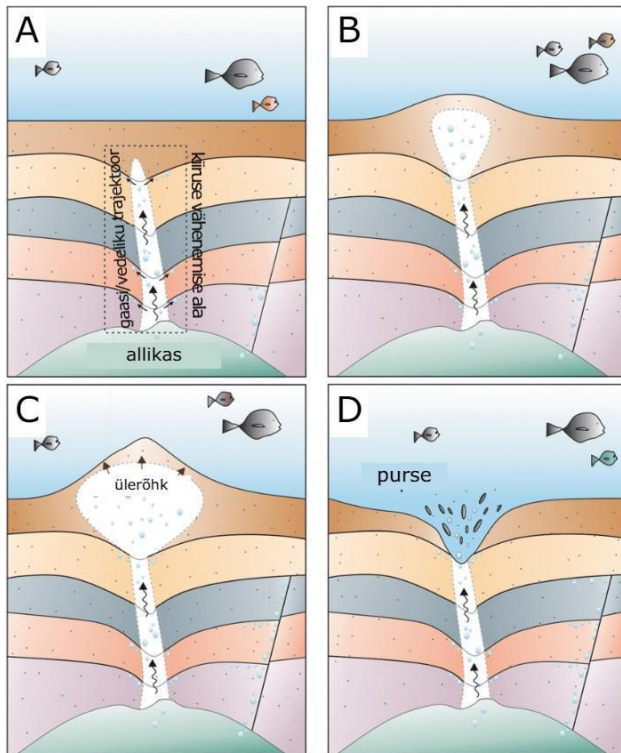
## 2.6. Lekkimislehtrid

Lekkimislehtrid on merepõhja negatiivsed pinnavormid, mis tekivad vedelike ja/või gaaside ülespoole liikumisel läbi peeneteraliste setete. Need erinevad suuresti kuju ja suuruse poolest, ulatudes ookeanides läbimõõdus mõnest meetrist sadade või tuhandete meetriteni ja sügavuses mõnest meetrist sadade meetriteni. Läänemeres on lekkimislehtrite mõõdud väiksemapoolsed - sügavus kuni paar meetrit ning läbimõõt paarkümmend kuni paarsada meetrit. Lekkimislehtrid avastati esmakordselt 1960ndate lõpus Kanadas Nova Scotia rannikumadalikul. Tänu tänapäevaste seisimokustiliste meetodite kasutusevõtule merepõhja kaardistamisel on merepõhja lekkimislehtreid avastatud erinevatest maailmamere piirkondadest (Chen jt, 2015). Leitud on erineva kujuga ja suurusega lekkimislehtreid, kuid kõige levinumad on ringikujulised lekkimislehtrid. Lekkimislehtrid esinevad veekogude põhjas üksikuna või väiksemates või suuremates gruppides (joonis 14).



**Joonis 14.** Lekkimislehtrite morfoloogia, kohandatud Chen jt (2015) järgi.

Lekkimislehtreid on arvukalt leitud piirkondades, kus merepõhja geoloogilistes ehituses on gaase sisaldavaid kivimeid. Gaasirikkaid kivimeid on võimalik tuvastada seisimokustilistel profiilidel. Samuti on täheldatud, et lekkimislehtrid asuvad piirkondades, kus on tugevad merepõhja hoovused, mis ei lase setetel kuhjuda ning lekkimislehtritel setete alla mattuda. Lekkimislehtrid moodustuvad, kui kivimite seest pärinevad gaasid või lahused (fluidid) üleslükkejõu tagajärjel ülespoole liikudes põhjustavad merepõhja kerget. Fluidide intensiivne ülespoole liikumine tekitab veekogu põhja kupli- või künkalaadseid pinnavorme ja nendes olevad lõhed võimaldavad fluidide väljalekkimist. Kui fluide koguneb merepõhja all olevatesse settekihtidesse piisavas mahus, võib rõhk tõusta nii kõrgeks, et leiab aset fluidide jõuline purse, mille tagajärjel moodustubki lekkimislehter (joonis 15).



**Joonis 15.** Merepõhja lekkimislehtri tekkimine: (A) fluid tõuseb veekogu põhja suunas; (B) fluid koguneb põhjasettesse; (C) ülerõhust tekib kungas; (D) fluidide purse ja lehtri moodustumine, kohandatud Saritaş (2018) järgi.

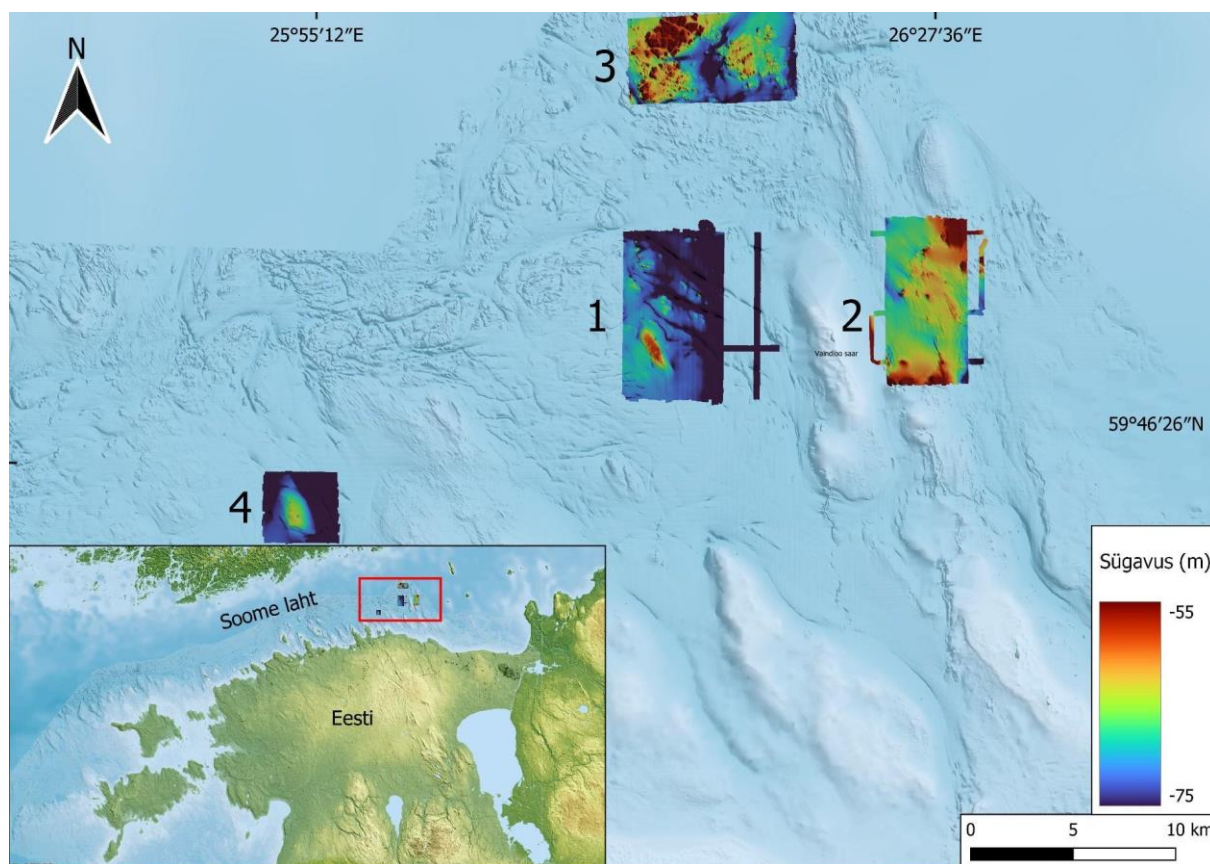
Lekkimislehtrite tekkimine võib olla kiire ja järsk, kuid episoodiline. Lekkimislehtrid arenevad aja jooksul edasi ning nende ümber tekib lekkimislehtreid juurde. Lekkimislehtrite arengus võivad eraldi asetsevad lekkimislehtrid üksteisega kokku kasvada. Lekkimislehtrid võivad aegamisi muutuda mitteaktiivseks, kui fluidide ülesliikumist enam ei toimu või see toimub teist trajektoori mööda ja jõuab veekogu põhja läbi teise lekkimislehtri. Lekkimislehter võib ka taasaktiveeruda uue fluidide purskega (Cathles jt, 2010).



### 3. Uuringuala, uurimismeetodid ja kogutud andmed

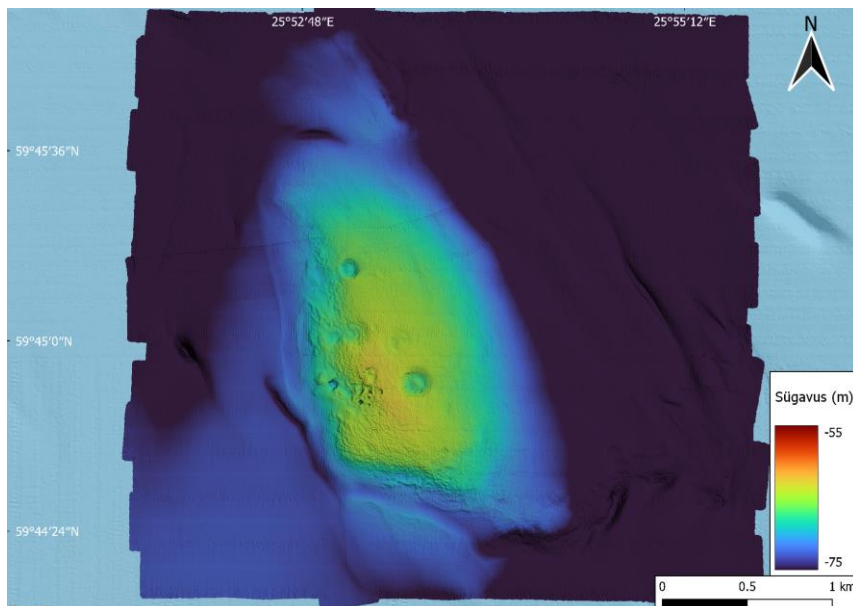
#### 3.1. Uuringuala

Geoloogiliselt huvitavad alad, mida mitme mereekspeditsiooni käigus põhjalikult uuriti, asuvad Soome lahe keskosas oleva Vaindloo saarest läänes, põhjas ja idas ning Mohni saarest kirdes (joonis 16). Kuivõrd töö maht muutuks liiga suureks, keskendutakse käesolevas lõputöös Mohni saarest kirdes asuvale uuringualale - uuritakse põhjalikult selle ala merepõhja pinnavorme (joonis 17) ja geoloogilist ehitust. Vaindloo ja Mohni saarte ümbruses on laialdaselt levinud konkretsioonid, mis reeglina lasuvad Balti jääjärve viirsavidel. See viitab sellele, et nende uuringualade piires paiguti puuduvad Joldiamere, Antsülusjärve, Litoriina- ja Limneamere setted ning kaasaegset settimist ei toimu. Lisaks konkretsioonidele on nendel aladel täheldatud ka lekkimislehtrite esinemist. Lekkimislehtred võivad ulatuda läbimõõdult paarikümnest meetrist paarisaja meetrini ning nende sügavus võib ulatuda kuni kolme meetrini. Lekkimislehtred leidub eriti rohkesti Vaindloo saarest lääne suunas (joonis 16, uuringuala 1) ja Mohni saarest kirdesse jääval uuringualal (joonis 16, uuringuala 4). Põhjareljeefi iseloomustab merepõhja kõrgendike olemasolu.



**Joonis 16.** Uuringualad ja nende põhjareljeef: (1) Vaindloo lääne ala; (2) Vaindloo ida ala; (3) Vaindloo põhja ala; (4) Mohni ala (aluskaart: Maa-amet, 2024a,b).

Vaindloo ida ja põhja aladel ehk uuringualadel 2 ja 3 selgelt eristatavat kõrgendikku merepõhjas pole, kuid siiski esinevad lekkimislehtrid ja viirsavikiht. Merepõhjas avaneb kohati ka aluskord. Lõputöö uuringualaks valisin Mohni ala (joonis 17), kuna seal on väga hästi esindatud lekkimislehtrite nii aktiivsed kui ka mitteaktiivsed vormid.



**Joonis 17.** Mohni saarest kirdesse jääva uuringuala põhjareljeef, veealusel künkal on selgelt eristuvad ümmargused lekkimislehtrid.

### 3.2. Uurimismeetodid

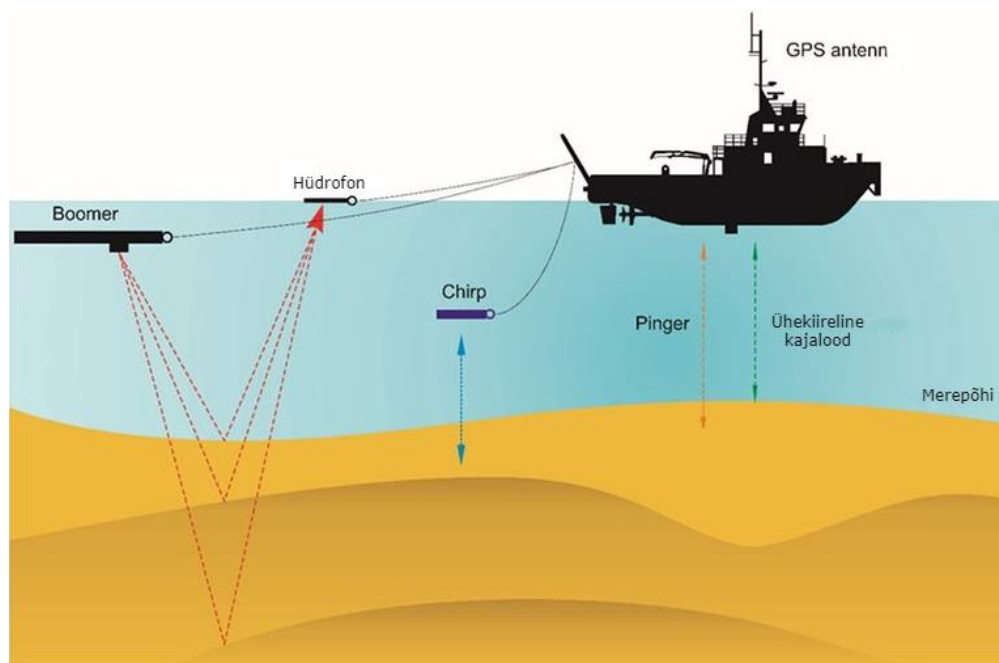
Merepõhja geoloogiline uurimine ning sealt proovide kogumine on maismaaga võrreldes keerulisem ja kallim. Tavaliselt tuginevad meregeoloogilised uurimistööd peamiselt geofüüsikalistele kaugseire uuringutele. Tänapäeval kasutatakse merepõhja geoloogilise läbilõike kaardistamiseks üheaegselt erinevaid setteprofilaatoreid ning merepõhja pindalaliseks kaardistamiseks erinevaid sonareid, millele tuginedes on võimalik saada detailne ja kvaliteetne ülevaade merepõhja reljeefist, geoloogilisest olemusest ja läbilõikest. Merepõhja läbilõigetest andmete kogumiseks kasutatakse erinevaid põhjaprofilaatoreid ehk seismoakustilisi aparate, mis tekitavad erineva sagedusega merepõhja tungivaid seismoakustilisi impulsse. Impulsi sagedus määrab saadava informatsiooni sügavuse - suurema lainepikkusega ehk madalama sagedusega levib impulss sügavamale setenditesse. Samas tuleb arvestada sellega, et lainepikkuse suurenemisel väheneb detailsus ja kõrvuti asetsevate kihipindade eristamise võimalus (Tuuling jt, 2021).

Üldjoontes kuulub kõikide seismoakustiliste aparatuuride koosseisu kindlal sagedusel või kindlal sagedusvahemikul vette saatvat impulssi tekitav saatja ning veesamba ja merepõhja läbinud ning sealt geoloogiliselt pindadelt tagasi peegeldunud signaali vastuvõtja. Seismoakustilise impulsi lainepikkust

silmas pidades on otstarbekas uuritava ala erinevatest geoloogilise ehituse aspektidest informatsiooni saamiseks kasutada samal ajal erinevat tüüpi saatjaid.

Geograafiliste koordinaatide määramine tugineb Eesti riikliku geodeetilise süsteemi aluseks olevale tasapinnalisele ristkoordinaatide süsteemile L-EST97 ning asukoha fikseerimiseks merel kasutatakse Maa-ameti globaalse navigatsioonisatelliitide süsteemi püsijaamade võrgustiku süsteemi ESTPOS. Nii on asukoha määramisel täpsuseks umbes 1 kuni 3 cm horisontaalsuunal ja 1 kuni 5 cm vertikaalsuunal (Tuuling jt, 2021).

Käesolevas bakalaureusetöös käsitletakse järgmisi seisimise seismoloogilise pidevprofileerimise seadmeid: vastavalt madalal sagedusel töötavat setteprofiilaatorit Boomer, keskmisel sagedusel toimivat setteprofiilaatorit Chirp ning kõrgsageduslikku Pinger-tüüpi profilaatorit (joonis 18). Geofüüsikaliste profiilide ja andmete kogumiseks kasutati Meridata tarkvara *Meridata Collecting software* (MDCS) ning nende interpreteerimiseks Meridata tarkvara *Meridata Processing software* (MDPS). Merepõhja pindalaliseks kaardistamiseks kasutati külgvaate- ja lehvikonarit (Heinsalu jt, 2021) ning täpsema geoloogilise info kogumiseks kaugjuhitavat allveerobotit (*ROV, inglise keeles remotely operated vehicle*), millega saab merepõhja filmida ja võtta sealt sette- või kivimiproeve.



Joonis 18. Pinger-, Chirp- ja Boomer-tüüpi põhjaprofiilaatorid, kohandatud Lekkerkerk (2020) järgi.

### **3.2.1. Kõrgesageduslik setteprofilaator Pinger**

Kõrgesageduslik setteprofilaator Pinger sarnaneb meresügavust fikseerivale kajaloodile - saatjate poolt tekitatud impulss on koondunud kitsale sagedusribale (Heinsalu jt, 2021). Pinger on kõrgesageduslik merepõhja profileerimissüsteem, mis töötab kindlal impulsi lainesagedusel käesoleva uuringu käigus 24 kHz. Üldjuhul on Pinger kinnitatud laeva põhja ning kasutatakse merepõhja sügavuse määramiseks, kuid on võimalik kasutada pindmiste pehmete settekihtide tuvastamiseks. Selle setteprofilaatori süsteemi koosneb seismoakustilise signaali saatjast, vastuvõtjast ja arvutist, kuhu info kogutakse. Pingeriga kogutud andmed on kõrge resolutsiooniga, kus on võimalik eristada ka väiksemaid detaile, kuid see ei suuda penetreerida setetesse rohkem kui kümnekond meetrit. Palju sõltub ka merepõhja setete iseloomust, aluspõhjast ja vee sügavusest (Calvert, 2022). Sellise kõrge sagedusega seismoakustilise impulsi on võimalik profileerida Läänemere põhjas olevaid pehmeid mudaseteid ja koguda seega informatsiooni merepõhjas levivatest noorima Limneamere staadiumi setetest (Tuuling jt, 2021). Mohni saare lähistel paikneval uurimisalal Pingeriga mõõdistamisi ei tehtud, küll aga kasutati seda setteprofilaatorit Vaindloo saare ümbruse merepõhja mõõdistamisel.

### **3.2.2. Keskmisesageduslik setteprofilaator Chirp**

Chirp on keskmisesageduslik põhjaprofilaator, millega on võimalik saavutada kõrge resolutsiooniga andmeid. Chirp koosneb saatjast ning vastuvõtjast, info kogutakse arvutisse. Chirp võimaldab saada geoloogilist infot sügavamate kihtide kohta kui Pinger, signaal tungib tavaliselt 20-50 m sügavusele settesse, kuid see sõltub pinnakattest, aluspõhjast ja merepõhja sügavusest (Calvert, 2022). Uurimislaeva poolt pukseeritav Chirp asub 1 m allpool merepinda ning selle sagedus on 3 kuni 9 kHz. Sellise sagedusega on üldiselt võimalik läbida seismilise profiili läbilõike ülaossa jäävaid muda-, savi- ja liivakihte ning tungida ka moreeni ülemisse kihti. Chirpi signaal ei tungi aluspõhja kivimitesse, kuid võimaldab saada detailse ettekujutuse Läänemere Holotseeni pudedate setete läbilõikest ning nende alla mattunud glatsiofluviaalsetest setetest ja pinnavormidest. See tähendab, et Chirpi seismoakustilised profiilid või profiilide lõigud täiendavad Boomer-tüüpi põhjaprofilaatoriga tehtud Läänemere setete läbilõike salvestisi ning annab võimaluse vajaduse korral üksikasju täpsustada (Tuuling jt, 2021).

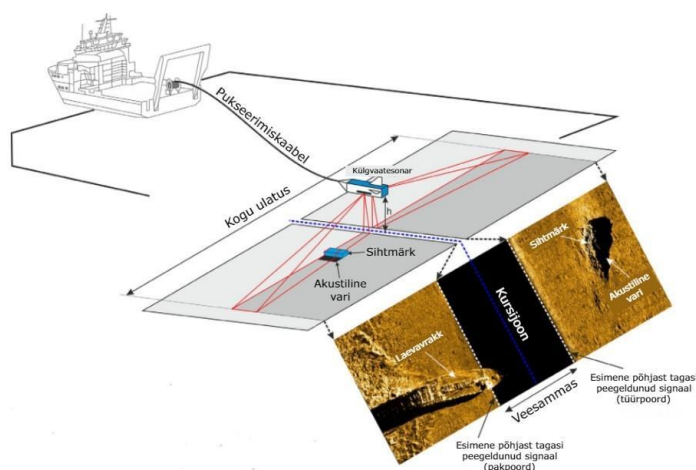
### **3.2.3. Madalasageduslik setteprofilaator Boomer**

Boomer on madalasageduslik põhjaprofilaator, mis töötab tavaliselt laias sagedusvahemikus 500 Hz kuni 5 kHz. Üldjuhul on selle signaalid võimelised ulatuma kuni 100 meetri sügavusele merepõhja setenditesse, kuid see samuti sõltub merepõhja pinnakattest, aluspõhjast ja merepõhja sügavusest. Erinevalt Pingerist ja Chirpist, ei ole Boomeri aparatuuri puhul saatja ja vastuvõtja üks tervik. Tavaliselt Boomer-tüüpi profilaatorit, mis saadab merepõhja signaale, pukseeritakse laeva taga ja tagasipeegeldunud impulsi vastuvõtmiseks kasutatakse laeva poolt pukseeritavat pikka eraldi ujuvat hüdrofoni (Calvert, 2022). Boomeriga on võimalik saada infot merepõhja pinnakatte all lasuvatest

moreenikihtidest, aluspõhja ülaosast ning aluspõhja reljeefist. Tavaliselt kasutatakse Läänemerel selle jaoks 0,5 kuni 2 kHz sagedust, kuid tuleb arvestada, et madala sagedusega lahutusvõime väheneb ning on suurem vajadus vastava kihi jaoks interpreteerimisel andmeid tarkvaras parameetrite muutmise abil töödelda (Tuuling jt, 2021).

### 3.2.4. Külgvaatesonar

Külgvaatesonar on akustiline seade merepõhjas leiduvate objektide ja pinnavormide kaardistamiseks. Külgvaate sonari küljes on mitmed andurid, mis saavad ja võtavad vastu akustilisi impulsse ning seda pukseeritakse tavaliselt laeva taga. Laeva liikumisel saadab külgvaatesonar anduritega mõlemalt küljelt merepõhja suunas signaale, mis moodustavad kaks lehvikut, millega saadakse kaks paralleelset merepõhja kujutist (joonis 19). Sonar salvestab andmeid helisagedustel 50 kHz kuni 100 kHz, kõrgemate sageduste puhul on lehvik küll kitsam, aga seevastu saadav pilt detailsem. Kujutisel (joonis 19) esinevad tumedad alad vastavad tagasipeegelduvale tugevale akustilisele signaalile (merepõhjust kõrgemad alad, kruusased-liivased setted) ning heledad alad vastavad nõrgale tagasipeegelduvale signaalile (savikad setted). Külgvaatesonariga vee sügavust mõõta ei ole võimalik ning peab kasutama koos sügavust mõõtvat lehvikkajaloodi ehk lehviksonariga (NOAA, 2002). Tihti kasutatakse selle aparatuuri puhul kahte erinevat sagedust, et saada parem ettekujutus merepõhjust ning samuti tuleb arvestada sellega, et kõrvuti asetsevate profiilide puhul oleks kontrolli eesmärgil andmete piisav kattumine (Heinsalu jt, 2021). Mohni saare lähistel paikneval uurimisalal külgvaatesonariga mõõdistamisi ei tehtud, küll aga kasutati külgvaatesonarit Vaindloo saare ümbruse merepõhja mõõdistamisel.

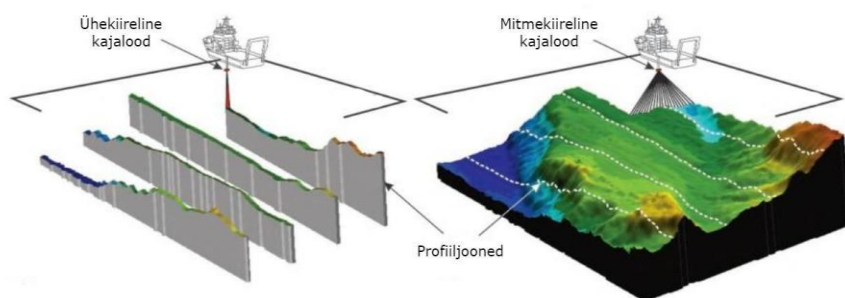


**Joonis 19.** Külgvaatesonari tööpõhimõte ja näide saadud andmetest, kohandatud Dondurur (2018) järgi.

### 3.2.5. Lehviksonar

Veekogude sügavuse ehk batümeetria mõõtmiseks kasutatavaid akustilisi süsteeme nimetatakse kajaloodideks. Kajaloodid on tavaliselt monteeritud laeva alla kiilu külge ning neil on nii saatja kui ka vastuvõtja funktsioon. Kajaloodid võib liigitada ühe- ja mitmekiirelisteks (lehviksonar) olenevalt nendes kasutatavate akustiliste kiirte arvust (joonis 20) ning nende sagedusvahemik varieerub 200 kHz kuni 450 kHz vahel. Lehviksonar on kõrge resolutsiooniga mitmekiireline süsteem, mis on võimeline mõõtma merepõhja sügavust nii laeva all kui ka laevaga külgevatel aladel.

Peale sügavuse saab lehviksonariga koguda andmeid merepõhja substraadi kohta. Tagasipeegelduva signaali tugevus (*inglise keeles backscatter*) näitab merepõhja setete terasuurust, heledama tooniga on peeneteralised ja tumedama tooniga jämedateralised setted. Andmeid vee sügavuse kohta saab omakorda kasutada seismiliste andmete töötlemisel peegelduse kõrvaldamiseks (Dondurur, 2018).



**Joonis 20.** Ühe- ja mitmekiirelise kajaloodi tööpõhimõtte, kohandatud Dondurur (2018) järgi.

### 3.2.6. Kaugjuhitav veealune robot

Kaugjuhitav allveeaparaat (*ROV, inglise keeles remotely operated vehicle*) on mobiilne veealune robot, mida saab kasutada merepõhja uurimiseks (NOAA, 2019). Robotite suurus võib ulatuda väikesest arvutist suure autoni, suuremate robotite puhul on laeval vajalik vints, et neid laevalt vette lasta ja laevale tagasi tõsta. Veealuseid roboteid juhib tavaliselt pealveelaeval viibiv juhtkangi kasutav piloot. Aparaat on laevaga ühendatud kaablitega, nende abil toimub infovahetus roboti ja laeva vahel. Roboteid kasutatakse laialdaselt tööstuslikel eesmärkidel, näiteks merepõhja installatsioonide haldamisel, kuid ka teadusuuringutes, kuna nad on võimelised turvaliselt koguma teaduslikku informatsiooni sügavustest, kuhu inimene sukeldudes ligi ei saa. Enamik allveeaparaate on varustatud kaamerate ja valgustusega, kuid võib olla lisatud lisaseadmeid proovide võtmiseks, näiteks seadmed gaaside, setete ja sette poorivee proovide kogumiseks (joonis 21).



**Joonis 21.** Kaugjuhitav allveeaparaat AKVA Group Sub-Fighter 100K 2023. a suvel suundumas laeval EVA 316 mereekspeditsioonile Soome lahes (erakogu).

### 3.3. Kogutud andmed

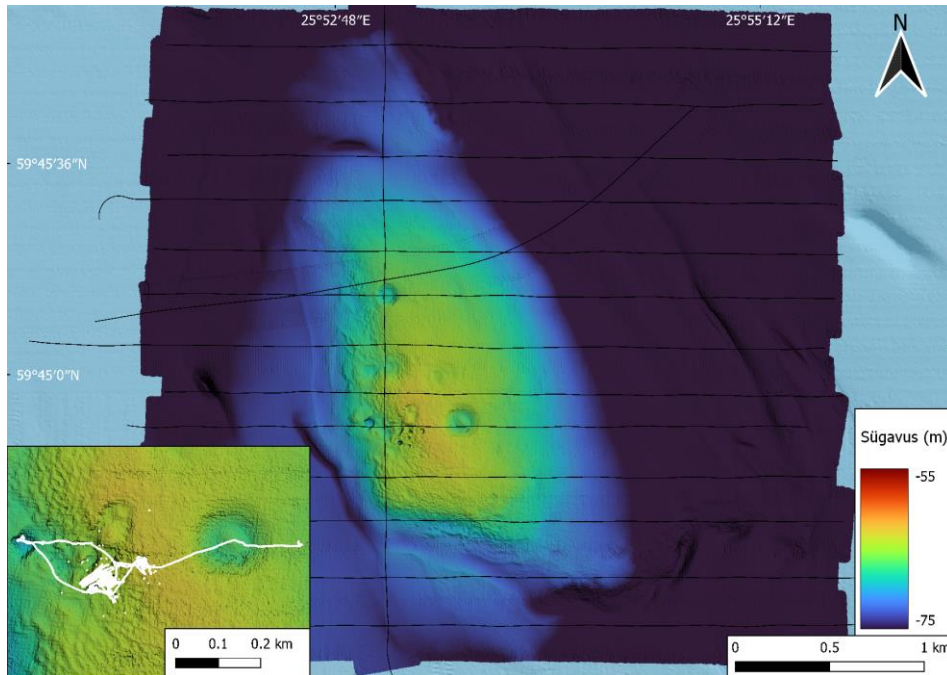
Soome lahe neljalt uuringualalt koguti andmeid mitme mereekspeditsiooni käigus. Esimene ekspeditsioon toimus 2022. aasta septembris Stockholmi Ülikooli laevaga Elektra, mille käigus koguti esmased detailsed batümeetrilised andmed külgvaate- ja lehviksonariga, seismoakustilised andmed Boomeri, Chirpi ja Pingeriga, võeti sette-, poorivee- ja konkretsioonide proove ning tehti visuaalsed uuringud lihtsama allveekaameraga.

Sellele järgnes ekspeditsioon 2023. aasta aprillis, mille käigus kaardistati Transpordiameti hüdrograafia laevaga Jakob Prei kõik neli uurimisala lehviksonariga ning koguti seismoakustilised andmed Boomeri ja Chirpiga. Sama aasta augustikus leidis aset rahvusvaheline ekspeditsioon, millest võttis osa ka autor, riigilaevastiku laevaga EVA-316, mille käigus koguti neljalt uurimisalalt Norra teadus- ja tehnikaülikoolist renditud kaugjuhitava allvee robotiga sette-, poorivee-, gaasi- ja konkretsioonide proove ning filmiti kõrge kvaliteediga kaameraga merepõhja objekte: lekkimislehtreid, raua-mangaani konkretsioone ning bakterimatte. Kuu aega hiljem toimus lisaekspeditsioon Tallinna Tehnikaülikooli uurimislaevaga Salme konkretsioonide ja setteproovide kogumiseks.

Uuringute käigus salvestati külgvaatesonari andmestik Meridata tarkvara failiformaati SSS, lehviksonari puhul salvestati nii merepõhja sügavusandmestik kui tagasipeegelduva signaali tugevus, Pingeri andmed salvestati Meridata failiformaati CV100, Chirpi andmed failiformaati HFC ning Boomeri andmed failiformaati BMR. Külgvaatesonariga ja Pingeriga Mohni uuringualal andmeid ei kogutud, kuid neid kasutati Vaindloo uuringualadega tutvumisel, et oleks võimalik nende alade geoloogilist olemust lõputöö uuringualaga võrrelda. Kaartide koostamiseks kasutati QGIS tarkvara.

Mohni uuringuala on nelinurkne (joonis 22), merepõhja reljeefi kaardil on mustade joontega näidatud põhjaprofiilaatoritega kogutud seismoakustiliste profiilide asendid. Joonise alumises vasakus nurgas on kujutatud Mohni pinnavormi peal veeluse roboti trajektoor, mis läbis ning kogus andmeid mitmest

lekkimislehtrist ja nende vahelisest alast. Jakob Prei lehviksonar asetses laevakere all ning profilaatoreid koos Boomeri hüdrofoniga pukseeriti laeva taga. Seismoakustiline andmestik koguti üldiselt lääne-ida suunaliselt ning umbes 250 meetriste vahedega. Andmete kogumisel oli laeva kiirus umbes 10 sõlme ning kasutati Eesti Geoloogiateenistuse aparatuuri.



**Joonis 22.** Mohni ala merepõhja reljeef. Mustad lääne-ida suunalised jooned näitavad seismoakustiliste profiilide asendeid ja valge joon märgib allveeaparaadi marsruuti merepõhjas.

Eesti Geoloogiateenistuse poolt kasutatav aparatuur on ettevõtte EchoTrac poolt toodetud Pinger, mille töösagedus on 24 kHz, ettevõtte Airmar Chirp, mille töösagedus on 3-12 kHz ning ettevõtte SIG France Boomer, mille töösagedus on 0,4-2 kHz. Külgvaatesonar on toodetud SonarBeamix poolt ning see töötab sagedustel 100/400 kHz ja 400/900 kHz. Jakob Prei pardal olev lehviksonar Teledyne Reson T50-R töötab sagedusel 400 kHz ning Meridata Chirp-tüüpi setteprofiilaator töötab sagedusel 2-9 kHz.

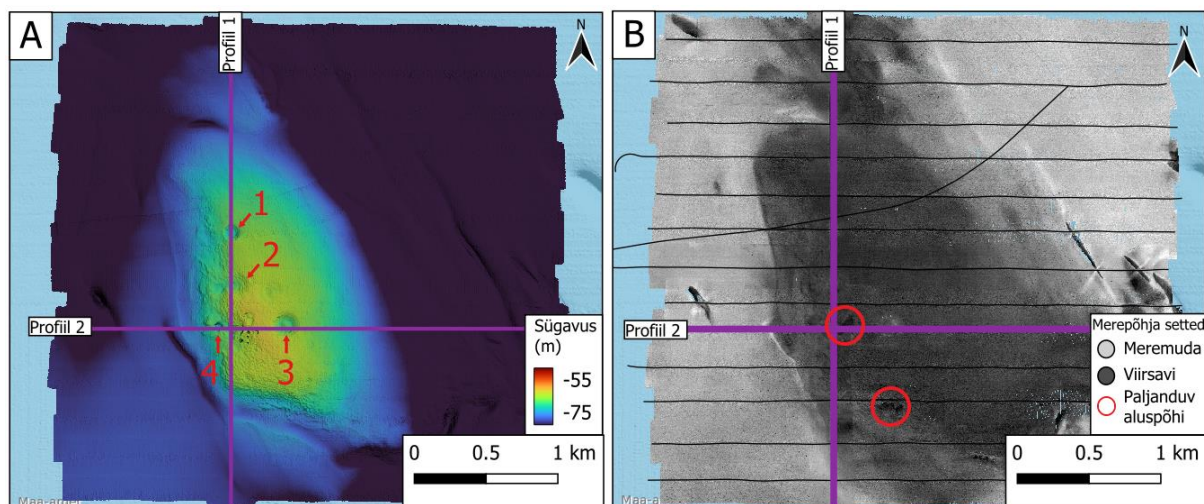


## 4. Tulemused

Mohni uuringuala pikliku kujuga seljandik asub 60 kuni 70 m sügavusel merepõhjas, selle pikkus on umbes 3 km ning laius 1,5 km. Seljandikku ümbritsev veesügavus, kus merepõhja reljeef on setenditega tasandunud, on keskmiselt 75 kuni 80 m. Seega seljandiku suhteline kõrgus ümbritseva merepõhjaga on umbes 5 kuni 10 m (joonis 23).

Joonisel 23 on välja toodud kaks uuringuala akustilist kujundit - vasakpoolne kujutab lehviksonariga kogutud andmete põhjal välja joonistatud kolmemõõtmelise veesügavuse ja põhjareljeefi kaarti ning parempoolne kujutab endast tagasipeegelduva signaali tugevuse põhjal interpreteeritud merepõhja setete kaarti. Setete kaardi nõrgema akustilise tagasipeegelduse andmed on näidatud heledate aladena, mida võib interpreteerida kui Litorinamere/Limneamere mudana. Tugevama akustilise tagasipeegelduse andmed on tumedamad alad, tegemist on hilisjäaegsete jääjärveliste viirsavidega. Leviksonari tagasipeegelduva signaali tugevuse andmete põhjal on Mohni uuringualal paikneva kõrgendikul kaks tõenäoliselt Ediacara settekivimite paljandit. Ediacara settekivimite avamused eristuvad viirsavidest märkimisväärselt tumedama tooni poolest.

Mohni uuringuala seljaku lael tuvastati veesügavuse ja põhjareljeefi kaardil (joonis 23) ühtekokku neliteist ümmarguse kujuga lekkimisletrit, millest umbes pooled on mitteaktiivsed ja raskemini merepõhjust eristuvad, kuna nende veered on muutunud laugeks. Kuivõrd Mohni uuringualal koguti Boomeri ja Chirpiga kokku 15 seisreakustilist profiili üle 200 m vahedega, jäädvustati seisreakustilistel profiilidel vaid mõned lekkimislehtid. Lekkimislehtrite uurimiseks valiti kaks erisuunalist profiili, mis omavahel ristuvad. Selgesti eristatavaid lekkimislehtreid, mis jäid kogutud seisreakustilistele profiilidele, oli ühtekokku neli. Lekkimislehtrite nr 1, 2, 3 ja 4 läbimõõdud on vastavalt 115, 130, 150 ja 50 m ning sügavus on keskmiselt 2-3 m.

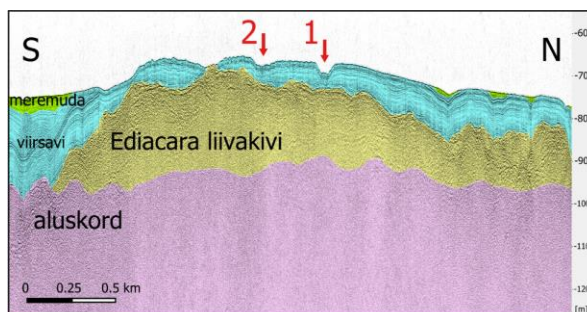


**Joonis 23.** Leviksonariga kogutud Mohni uuringuala: (A) veesügavuse ja põhjareljeefi kaart ning (B) merepõhja setete kaart.

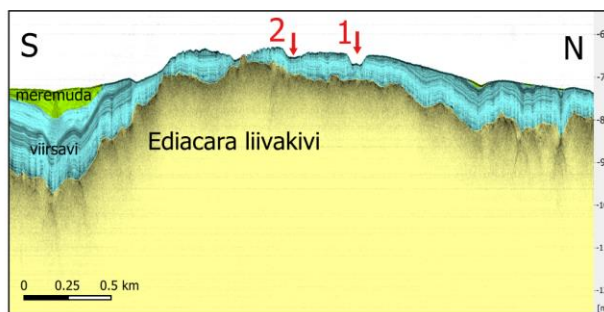
Lekkimislehtid nr 1 ja 4 on praeguseni aktiivsed, kuid lekkimislehtid nr 2 ja 3 on olnud aktiivsed minevikus ning tänaseks muutunud mitteaktiivseteks. Aktiivsete lekkimislehtide puhul on pinnavormi veered palju järsemad kui mitteaktiivsetel (joonised 23 ja 24). Lekkimislehtri 4 puhul tuleb märkida, et profiilil on tegemist tüüpilise *bowtie*-efektiga geofüüsikas, kus tekib peegelduse tõttu õige kuju asemel lipsu sarnane kujutis (joonis 24, lekkimisleht nr 4). Kasutusel olnud Meridata tarkvaras ei ole võimalik *bowtie*-efekti korrigeerida, kuid tegelikkuses on tegu väiksema poolse lehtiga, millel on teravad servad.

Ühtlasi on lekkimisleht nr 4 ka ainuke lekkimisleht sellel seljakul, mis ei ole täiuslikult ümmarguse kujuga. Lekkimisleht nr 1 on suurema läbimõõduga ja laugemate servadega kui lekkimisleht nr 4, seega on alust arvata, et see ei ole ka enam nii aktiivne kui lekkimisleht nr 4. Lekkimislehtide nr 3 ja 4 vahel asub mitu väikest 10 kuni 30 m läbimõõduga tervaservalist aktiivset lekkimislehtit, mis seismoakustiliste profiilide peale ei sattunud. Lekkimislehtid nr 2 ja 3 on mitteaktiivsed lekkimislehtid, mille läbimõõt on suur ning veered ei ole järsud, vaid lauged. Nendest lekkimislehtidest ei toimu ilmselt enam fluidide väljavoolu, kuna nende ümber ega sees ei leidu bakteriaalseid matte.

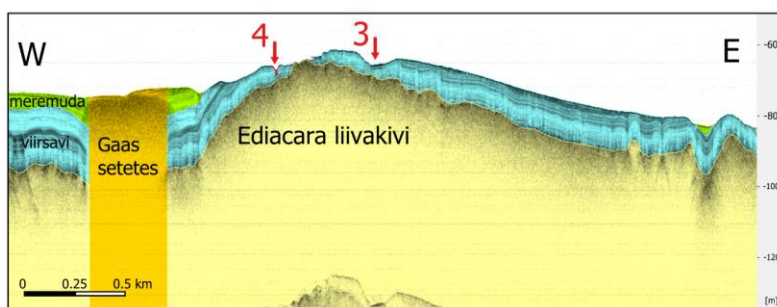
Seisimoakustiliste profiilide abil on võimalik analüüsida peale lekkimislehtide morfoloogia ka merepõhja geoloogilise ehituse seismostratigraafilist liigestatust. Seisimoakustiliste profiilide andmestikust on näitena välja toodud kaks geoloogilist läbilõiget (joonised 23 ja 24), mille abil uuriti lekkimislehteid. Seisimoakustiline profiil 1 paikneb põhja-lõuna suunaliselt, kus merepõhja geoloogiline ehitus on interpreteeritud nii Boomeri kui ka Chirpi-tüüpi profilaatori andmetest. Seisimoakustiline profiil 2 paikneb lääne-ida suunaliselt ja merepõhja geoloogiline ehitus on interpreteeritud Chirp-tüüpi profilaatori andmetest. Boomeriga kogutud seisimoakustilised andmed võimaldasid tuvastada tänu sügavamale ulatuvate impulsside levikule allpool lasuvate geoloogiliste komplekside kihtide piire ning Chirpiga kogutud seisimoakustilised andmed andsid tänu suuremale lahutusvõimele täpsema pildi ülemiste setendite piiridest.



Profiil 1 (Boomer)



Profiil 1 (Chirp)



Profiil 2 (Chirp)

**Joonis 24.** Mohni uuringuala seisreakustilised Boomer- ja Chirp-tüüpi profilaatorite interpreteeritud geoloogilised läbilõiked, profiili asukoht vaata joonis 23. Punaste nooltega on tähistatud lekkimislehtid nr 1-4. Bowtie-efektiga on lekkimisleht nr 4.

Läbilõigete põhjal, oli uuringualal võimalik liigestada neli seisreakustigraafilist üksust: aluskord, Ediacara settekiivimid, Balti jääjärve viirsavid ja Litoriaamere/Limneamere meremudad, mis tähistati interpreteeritud seisreakustilistel profiilidel vastavalt roosa, kollase, sinise ja rohelse värviga (joonis 24).

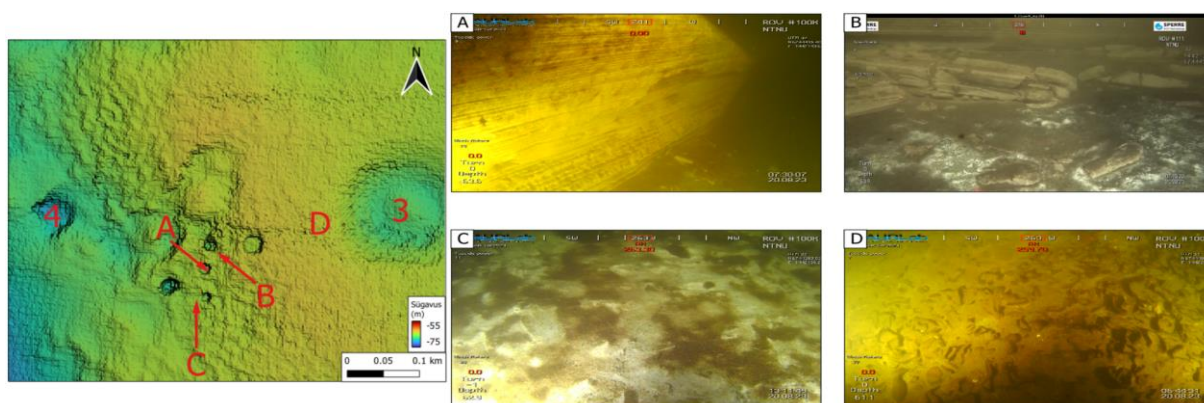
Mohni uurimisala põhja-lõunasuunalisel geoloogilisel profiilil nr 1 (joonis 23) on Boomer-tüüpi setteprofiilaatoriga saadud seisreakustilisel läbilõikel kõige alumise geoloogilise kompleksina välja eraldatav kristalne aluskord (joonis 24). Kristalse aluskorra pealispind ei ole tasane, vaid laineliselt liigestatud. Aluskorra pealispind asub umbes 95 m sügavusel merepinnast. Aluskorra kivimikompleksi paksust pole võimalik määrata.

Aluskorra kivimikompleksil lasub järgmine seisreakustiline kompleks, mida võib interpreteerida kui vettjuhtivat settekiivimi kihti. Tõenäoliselt on tegemist Ediacara liivakiviga. Ediacara settekiivimikompleks moodustab Mohni uuringuala merepõhja kõrgendiku, selle kivimikompleks paksus on 15-25 m. Ediacara settekiivimikompleksi pealispind on laineliselt liigestatud. Ediacara settekiivimikompleksil lasub kolmas seisreakustiline kompleks, mida võib interpreteerida hilisjäaegseks Balti jääjärve viirsaviks, seisreakustilisel profiilidel on see kiht tähistatud sinise tooniga (joonis 24). Viirsavide kihi paksus on üldjuhul umbes 10 meetrit, veealusel seljakul on see osaliselt erodeerunud; kohati on üksus alla 1 m paks või puudub täiesti ja nendes kohtades paljandub Ediacara liivakivi. Viirsavide settekompleksi sees esinevad akustiliste tagasipeegelduste väärtuste erinevustest tulenevad heledamad ja tumedamad kihid ning viirsavide kiht jäljendab selle all lasuva Ediacara

liivakivikompleksi reljeefi. Eriti ilmekalt jäljendab viirsavide pealispind lamava Ediacara sette kivikompleksi pealispinda väljaspool veealust kõrgendikku. Lekkimislehtrite asukohtades on viirsavide kiht õhem ja on näha, et tegemist on lehtrikujuliste aukudega merepõhja kõrgendikus.

Kõige ülemise seismoakustilise settekompleksi puhul on tegemist Holotseeni peeneteraliste mudadega, mis seismoakustilistel profiilidel on märgitud rohelse tooniga (joonis 24). Holotseeni mereliste mudade settekompleks puudub Mohni uurimisala veealusel seljakul. Väljaspool veealust kõrgendikku on meremudade settekompleksi paksus kuni 5 m. Pärastjääaegsete meremudade kuhjealal on merepõhja reljeef tasandunud. Seismoakustilistel profiilidel oranži värviga on tähistatud settekompleks, kus setteprofiilaatori seismoakustilise signaali levik on pärsitud. Signaali levikut takistab Litoriinamere ja Limneamere meremudade orgaanilise aine lagunemisel tekkinud gaas (joonis 24).

Joonisel 25 on kujutatud kaugjuhitava allveeaparaadi videosalvestustest kogutud kuvatõmmised olulisemate merealuste ilmingute kohta Mohni uuringualal. Joonise 25 A osa kujutab aktiivse lekkimislehtri järsku seinu, mille alumisest servast toimub tõenäoliselt fluidide väljalekkimine. Samuti on hästi näha viirsavide omaseid heledaid suvekihte ning tumedaid talvekihte. Joonise 25 B osa kujutab veealuse lekkimislehtri seinast alla langenud viirsavi lahmakaid. Viirsavi tükkide vahel asustavad lekkimislehtrite sees merepõhja unikaalsed bakterimatid, mida leidub vaid aktiivsete veealuste lekkimislehtrite põhjas ja ümbruses. Lekkimislehtrite viirsavist koosnevad seinad lagunevad veeru alumisest servast lekkiva vedeliku/gaasi tõttu, mis moodustavad sellesse pragusid ning lõpuks serva ülemine osa kukub alla.



**Joonis 25.** Kuvatõmmised allveeaparaadi kogutud videotest: (A) lekkimislehtri viirsavist koosnev veer; (B) lekkimislehtri veerust allavarisenud viirsavi blokid ja valged bakterite matid; (C) bakterite matid lekkimislehtri põhjas; (D) raua-mangaani konkretsioonid viirsavide seljandikul lekkimislehtrite vahel.

Merepõhja asustavaid bakterite kolooniaid on paremini näha joonise 25 C osas, kuvatõmmis on filmitud lekkimislehtrite nr 3 ja 4 vahel olevate pisikeste lekkimislehtrite äärealadel. Joonise 25 D osas on kuvatõmmis koorikulaadsetest raua-mangaani konkretsioonidest, mis levivad väljaspool lekkimislehtrid. Raua-mangaani konkretsioonid laiuvad kõikide veealuste lekkimislehtrite ümbruses. Kõige tihedam raua-mangaani konkretsioonide levikutihedus on veealuste videosalvestiste andmete põhjal Mohni uuringualal just aktiivsete lekkimislehtrite vahetus ümbruses (Johanna Maria Ojap, Tartu Ülikool, avaldamata andmed).

## 5. Arutelu

Eesti merealal, Soome lahe keskosas, kus puudub settimine, leidub merepõhjal suurel hulgal raua-mangaani konkretsioone. Soome lahe konkretsioone iseloomustab kõrge raua, mangaani ja fosfori sisaldus, samuti on neis võimekus aku- ja elektroonikaelementide ning haruldaste jälgelementide kontsentreerimiseks. Konkretsioonide uurimine võimaldab saada teadmisi Soome lahe keskkonnaseisundi kohta. Paraku ei ole teadlasel veel selgust, mismoodi konkretsioonid on tekkinud ning kas on olemas seos konkretsioonide leviku seaduspärasuste ja Soome lahe geoloogilise ehituse vahel.

Kuna andmed Soome lahe aluskorra ja aluspõhja kivimite kohta on kogutud peamiselt kaudsete seisreaktsioonide meetodite abil, siis tuleb maismaa alade geoloogilise ehituse seaduspärasusi laiendada merepõhja geoloogilise ehituse interpreteerimiseks. Mohni uuringuala asub Hillis-Proterosoilise Ediacara sette kivide avamusel. Seepärast on loogiline tõlgendada, et uuringuala kristalsel aluskorral lasub ja moodustab pikliku merepõhja kõrgendiku Ediacara liivakivide kompleks. Ediacara liivakivide lasundit katab omakorda viirsavikiht, mis on veealusel kõrgendikul osaliselt erodeerunud, kuid mujal merepõhjas levib ühtlaselt umbes 10 m kihina ning on väljaspool veealust seljandikku kaetud Litoriinamere/Limneamere meremudaga.

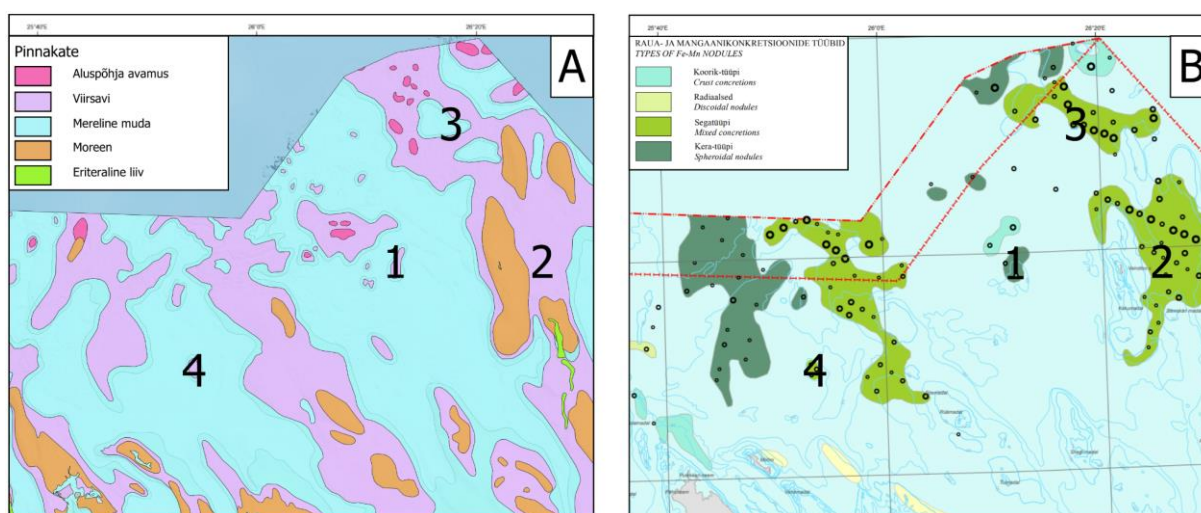
Seljandiku lael asuvad viirsavi sees ümmargused lekkimislehtrid. Need on veealused negatiivsed pinnavormid, mis on moodustunud gaaside ja/või põhjavee väljavoolul merepõhjust. Gaaside puhul on ilmselt tegemist metaaniga, mis on oluline kasvuhoonegaas ning mis võib mõjutada merepõhja setetes toimuvaid biogeokeemilisi protsesse. Leekimislehtrite sette poorivee koostis erineb merevee koostisest ning loob isepärase merepõhja bioloogilise koosluse (Kurowski jt, 2024).

Soome lahe merepõhjale on teatud piirkondades iseloomulik bakterite mattide ja raua-mangaani konkretsioonide koos eksisteerimine, selline sümbioos on märgatav ka käesoleva lõputöö uuringuala merepõhjal. Praeguse teadmiste kohaselt on merepõhja bakterite kolooniate ja raua-mangaani konkretsioonide kooslevik seotud ka merepõhjas esinevate lekkimislehtritega. Seega on loogiline järeldada, et lekkimislehtrite tekkimisel merepõhja vabanev erilise koostisega põhjavesi ja või gaasid tekitavadki eeldused erilisteks biogeokeemilisteks protsessideks, mis loob alused raua-mangaani konkretsioonide moodustumiseks.

Kõikidel uuringualadel (joonis 26) dokumenteeriti merepõhjust filmitud videosalvestistel lekkimislehtrite sees ja kohati lekkimislehtrite ümber merepõhja bakterite kolooniate esinemine, mis on tõend merepõhjust metaani väljalekkimisele. Peale metaani on võimalik, et merepõhjust lekkivad põhjaveed sisaldavad olulisel määral ka lahustunud rauda, mangaani ning teisi elemente, mis on raua-mangaani konkretsioonide moodustumisel lähteaineks.

Joonisel 26 on kujutatud kahte kaarti, millest vasakpoolne kirjeldab merepõhja pinnakatet ning parempoolne raua-mangaani konkretsioonide levikut. Igal uurimisalal nii Vaindloo saare ümbruses kui ka Mohni saare läheduses esinevad sega- või kooriktüüpi raua-mangaani konkretsioonid ning nende all paljandub ühtlasi viirsavi. Veealuseid kõrgendikke ja viirsavide avamusalasid ümbritseb uuringualal meremudaga kaetud merepõhi ja seal raua-mangaani konkretsioone ei esine.

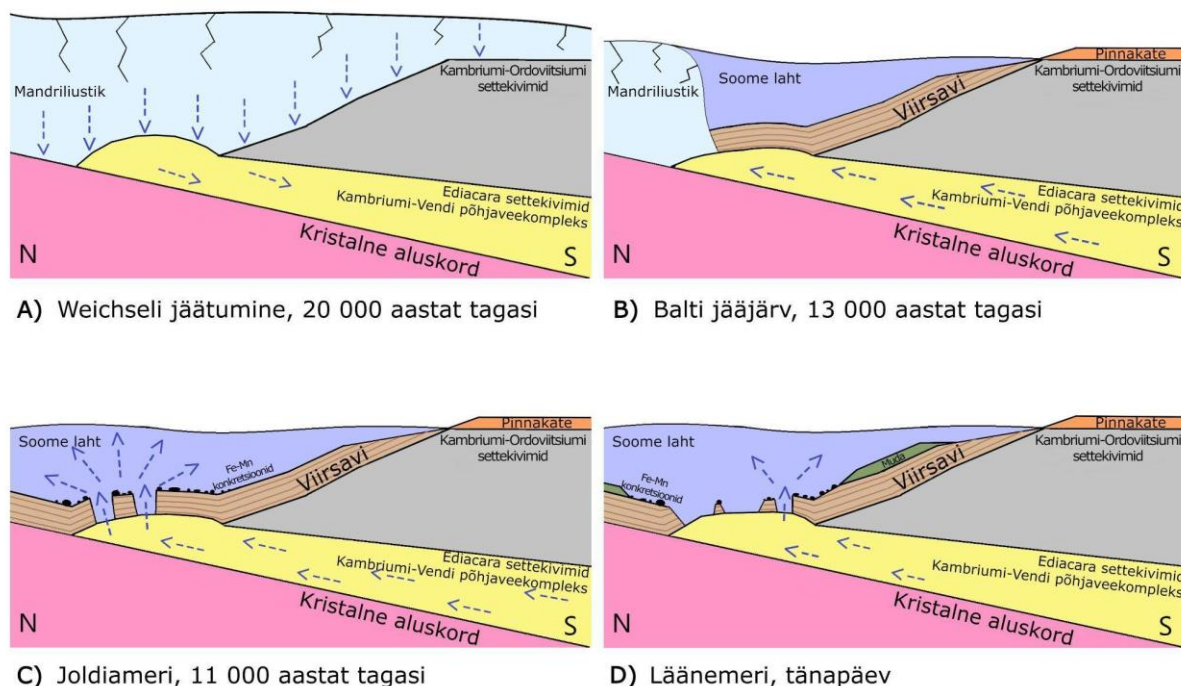
Kuna lekkimislehtrid on tekkinud vettpidava viirsavikihi sisse ning selle jaoks on vajalik põhjavee ja gaaside ülesliikumine altpoolt, siis merepõhja vabanevate fluidid pärinevad ilmselt poorsetest ja vett juhtivast Ediacara liivakivide kompleksist (joonis 12). Raua-mangaani konkretsioonide levik on peale merepõhja Ediacara liivakivide avamuse seotud merepõhjas paljanduvate viirsavidega. Tõenäoliselt on konkretsioonide levikualal merepõhjas piisavalt tugevad hoovused, mis ei lase tänapäevastel setetel kuhjuda, teisalt võivad aidata merepõhja kulutusele kaasa aktiivselt lekkivad põhjaveed, mis omakorda kiirendab merepõhja erodeerumist ning takistab meremudade settimist.



**Joonis 26.** (A) Merepõhja pinnakatte kaart (Aluskaart: Maa-amet, 2024c); (B) raua-mangaani konkretsioonide levik, kohandatud Suuroja jt (2016) järgi: (1) Vaandloo lääne ala; (2) Vaandloo ida ala; (3) Vaandloo põhja ala; (4) Mohni ala.

Tuginedes olemasolevale merepõhja geoloogilisele andmestikule esitan Soome lahe raua-mangaani konkretsioonide ja lekkimislehtrite tekkemehhanismi lihtsustatud mudeli (joonis 27), kus on kujutatud põhja-lõuna suunalist Soome lahe geoloogilist läbilõiget.

Viimase Weichseli jäätumise ajal umbes 20 000 aastat tagasi, kattis Soome lahte ligikaudu kahe kilomeetri paksune jääkilp (Svendsen jt, 2004), mis vajutas oma raskusega maakoort allapoole ja maakoort oli tugeva surve all. Ediacara settekiivimites olev põhjavesi voolas põhja-lõuna suunaliselt (joonis 27A). Kliima soojenemine tõi kaasa mandriliustiku taandumise, Soome laht vabanes järk-järgult liustikukattest umbes 13 000 aastat tagasi, taanduva jääserva ees moodustus Balti jääjärv ning selle veekogu põhja settisid viirsavid (joonis 27B). Maakoore tagasikerkimine võis kaasa tuua Ediacara liivakivides oleva Kambrium-Vendi põhjavee liikumise suunamuutuse, põhjavesi suundus lõunast põhja.



**Joonis 27.** Soome lahe raua-mangaani konkretsioonide ja lekkimislehtrite tekkemehhanismi lihtsustatud mudel.

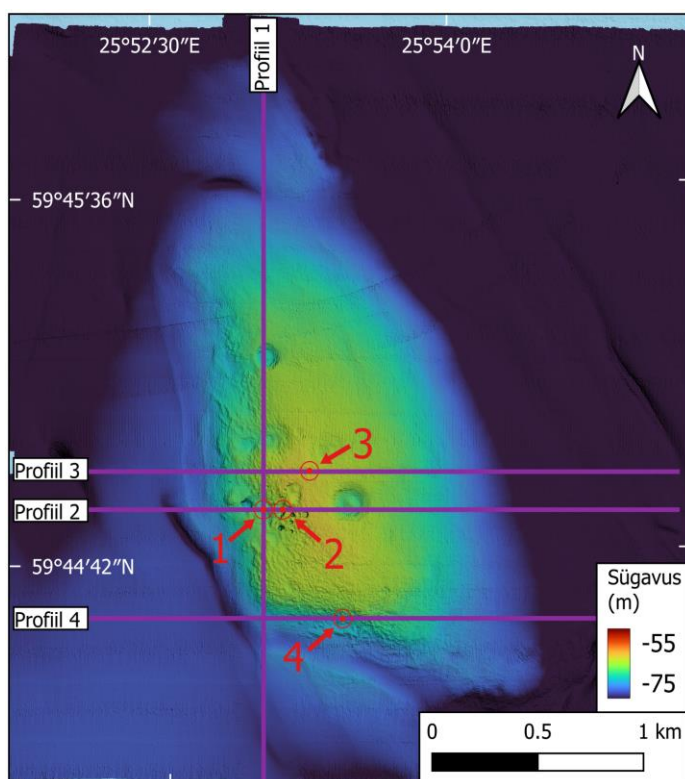
Läänemere Joldiamere staadiumist alates 11 000 aastat tagasi olid Soome lahe põhjas loodud eeldused lekkimislehtrite moodustumiseks (joonis 27C). Ediacara liivakivides paiknev survealine põhjavesi otsis ülepoole liikudes teed Soome lahe merepõhjast väljalekkimiseks. Kambriumi-Vendi põhjavesi moodustus 30 000 kuni 12 000 tagasi, mis tähendab, et see on osaliselt glatsiaalse päritoluga ning sisaldab muuhulgas märkimisväärselt metaani, lämmastiku ning ammooniumit. Seega lekkimislehtreid tekitav Kambrium-Vendi põhjavesi võib olla raua-mangaani konkretsioonide lähteaineid sisaldavaks lahuseks, kuna see sisaldab vajalikke gaase ning võimalik, et ka rauda, mangaani ning teisi elemente, mis pärinevad Ediacara settekivimist või selle all lasuvast kristalsest aluskorrast.

Põhjavesi leidis tõenäoliselt kõige vabama liikumistee merepõhja Ediacara settekivimitest moodustunud kõrgendike kohal, kus lamamiks olev viirsavi kiht polnud nii paks ning oli gaaside ja põhjavee jaoks kergemini läbistatav. Seega Balti jääjärve järgselt võisid koos lekkimislehtritega hakata moodustuma nende ümber ka raua-mangaani konkretsioonid. Võib eeldada, et pärastjääaja alguses oli lekkimislehtrite moodustumine Soome lahes palju aktiivsem kui tänapäeval.

Viimaste aastatuhandete jooksul on Soome lahes osa lekkimislehtreid muutunud inaktiivseks (joonis 27D). See ei pruugi otseselt tähendada, et põhjavee väljalekkimine on võrreldes Holotseeni algusega vähenenud, võimalik, et aja jooksul on põhjavesi leidnud merepõhjas väljalekkimiseks uued trajektooreid. Samuti on Soome lahe raua-mangaani konkretsioonide vanus siiani hüpoteetiline ja vajab alles geokronoloogiliste meetoditega tõendamist.

Eeltoodud hüpotees raua-mangaani konkretsioonide ja Soome lahe merepõhja lekkimislehtrite tekkele vajab tulevikus veel tõestamist mitmeski aspektist. Muuhulgas ei pruugi vastata tegelikkusele seisreaktsioonide läbilõigete interpretatsioon, et Soome lahe uuringualade veealused kõrgendikud moodustuvad just Ediacara liivakividest. Ühest 2023. aasta augustis allveerobotiga merepõhjast kogutud setendiproovist (GOF 23-07) valmistas professor Siim Veski õietolmu preparaadi ning määras õietolmu liigilise koosseisu. Õietolmu oli ohtralt, peamiselt mänd, kuusk ja kask, rohttaimedest aga puju ja korvõielised, samuti leidis koldade ja sõnajalgade eoseid. Õietolmu koostis vastab metsatundrale ja on sarnane Põhja-Eestis uuritud Voka läbilõikes viimase jäätumise eelse umbes 35 000 aasta vanuse interstadiaali setete õietolmu kooslusele (Molodkov jt, 2007).

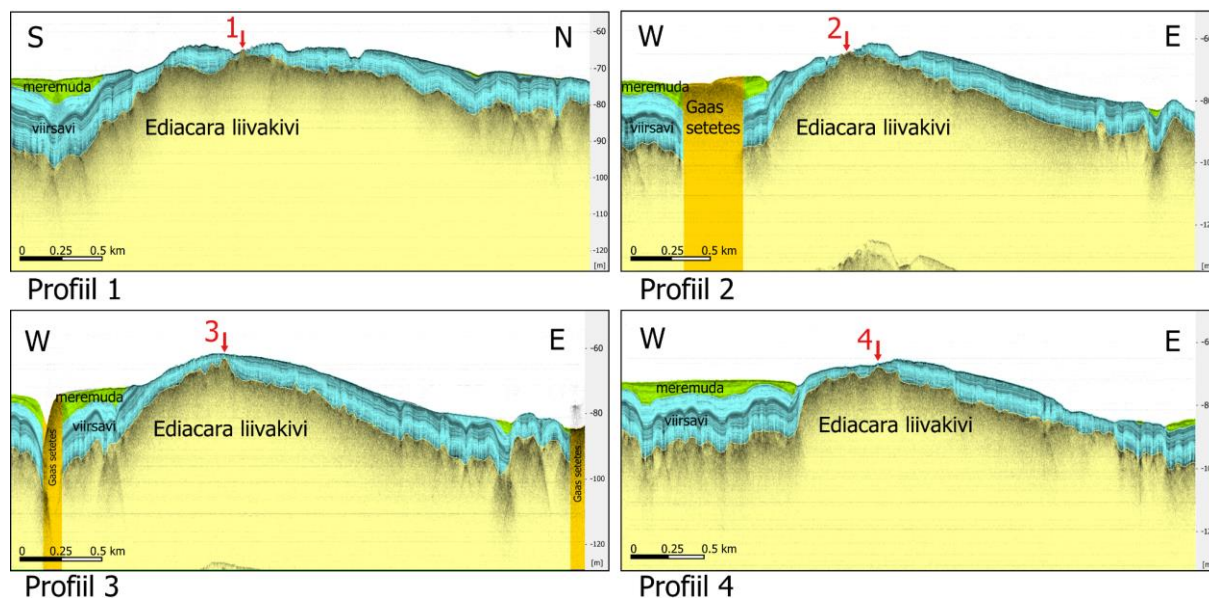
Käesolev lõputöö püstatab mõned Soome lahe raua-mangaani konkretsioonide tekkepõhjuste hüpoteesid, lõpliku tõe väljaselgitamiseks tuleb meregeoloogidel tulevikus veel palju uurimisekspeditsioone läbi viia ja merepõhja proove analüüsida. Tuginedes selle uurimistöo järeldustele, esitan järgnevalt mõned soovitusel planeeritavatele mereekspeiditsioonidele uuringualade ja merepõhja setendite proovivõtu kohtadeks. Väga oluline on kindlaks teha Mohni uurimisalal aluskorra peal ja viirsavide all oleva setendite kompleksi stratigraafiline kuuluvus. Seisreaktsioonide profilaatorite läbilõigetel interpreteerin selle kompleksi liivakivideks. Lehtvõrkse ja setteprofilaatorite andmete kõrvutamisel on Mohni uuringuala veealusel seljandikul neli väikest ala, kus need huvipakkuvad setendid paljanduvad või on nendel lasuv viirsavide kiht õhuke (joonis 28).



**Joonis 28.** Mohni uuringuala põhjareljeefi kaardile on kantud perspektiivsed proovikohad järgnevatele mereekspeiditsioonidele.



Kõige paljulubavamad on välja pakutud proovikohad nr 1 ja 2, mille puhul on tegemist kohtadega, kus paljandub võimalik Ediacara settekivimikompleks ning sealt proovide kogumine oleks kõige lihtsam. Proovivõtukohad nr 3 ja 4 on huvi pakuva Ediacara settekivimikompleksi peal viirsavi kiht paksusega vastavalt umbes 1,5 ja 1 m (joonis 29).



**Joonis 29.** Mohni uuringuala seismoakustilised Chirp-tüüpi profilaatorite interpreteeritud geoloogilised läbilõiked, punaste numbritega on tähistatud perspektiivsed proovivõtu kohad.

Mohni uuringuala potentsiaalsete proovikohtade koordinaadid on märgitud tabelis 1.

**Tabel 1.** Mohni uuringuala merepõhja perspektiivsete uute proovikohtade koordinaadid.

Proovikoha nr.	Asukoht
1	59°44'50"N, 25°53'01"E
2	59°44'49"N, 25°53'04"E
3	59°44'55"N, 25°53'12"E
4	59°44'33"N, 25°53'24"E

Kuivõrd Eesti Riigilaevastiku laevadel ei ole vastavat tehnikat, et merepõhja puurida ega piisavalt pikka raskustoru, et puursüdamikke koguda, on vaja teha koostööd teiste Läänemere riikidega, kus on vajaliku varustusega uurimislavade olemas. Eesti Geoloogiateenistusel on olemas haardkopad (Van-Veen tüüpi haardkopp) ja lühikesed raskustorud (Gemax tüüpi proovivõtja), millega on võimalik koguda proove vaid merepõhja pindmistest setetest. Lähiriikide uurimislavadele on võimalik rentida või koostöö raames kasutada Rootsi Stockholmi ülikooli laeva Electra või Soome uurimislava Aranda,

mis mõlemad on varustatud vajaliku proovivõtuseadmete kompleksidega. Mereekspeditsioonid, proovide kogumine ja nende säilitamine on kulukas ning proovide võtmine peab olema võimalikult täpne.

Eesti meregeoloogia lähitulevik paistab helgem. 2026. aasta sügiseks on planeeritud uue Eesti teaduslaeva valmimine, millel on olemas paremad võimalused ja vastav varustus merepõhja kivimite ja setteproovide kogumiseks.

## Kokkuvõte

Viimase paari aasta jooksul on toimunud Soome lahes mitu Eesti kui ka rahvusvahelist mereekspeditsiooni, mille käigus on avastatud, et raua-mangaani konkretsioonid levivad merepõhjas lekkimislehtrite ümbruses. Lekkimislehtrid on kraatreid meenutavad nõod, mis tekivad põhjavee ja/või gaaside vertikaalsel liikumisel pudedates setendites ja väljapääsemisel merepõhja. Lekkimislehtrite veerude kallakud on erinevad ning nende sügavus on kuni kolm meetrit ja läbimõõt paarkümmend kuni paarsada meetrit. Samuti saab põhjavee ja/või gaasi lekkimise põhjal jaotada need aktiivseteks või mitteaktiivseteks.

Leitud lekkimislehtrid asuvad merepõhja kõrgendikel, mille moodustavad kristalsel aluskorral lasuvad vettjuhtivad Ediacara liivakivi avamused. Ediacara liivakivide lasundit kattev vettpidav viirsavikiht on veealusel kõrgendikul osaliselt erodeerunud, kuid mujal merepõhjas levib ühtlaselt umbes 10 m kihina ning on väljaspool veealust seljandikku kaetud Litoriinamere/Limneamere meremudaga. Lekkimislehtrid on esinevad viirsavides ning need moodustusid arvatavasti vahetult pärast viimast jääaega. Sellistel Soome lahe merepõhja seljakutel leidub palju raua-mangaani konkretsioone ja bakterite matte, mis viitavad metaani ja põhjavee aktiivsele lekkimisele. Seega võib järeldada, et lekkimislehtrite tekkimisel vabanev põhjavesi ja/või gaasid, mis tõenäoliselt pärinevad Ediacara liivakivist, loovad tingimused biogeokeemilisteks protsessideks, mis soodustavad raua-mangaani konkretsioonide moodustumist.

Käesolevas lõputöös liigestati seisimoakustiliste profiilide põhjal neli seismostratigraafilist üksust: aluskord, Ediacara settekivimid, Balti jääjärve viirsavid ja Litoriinamere/Limneamere meremudad, kuid see, et kõrgendiku moodustab just Ediacara liivakivi, ei pruugi vastata tõele. Kuivõrd andmed Soome lahe aluskorra ja aluspõhja kivimite kohta on kogutud peamiselt kaudsete seismoakustiliste meetodite abil ning konkretsioonide tekkeprotsessi ja nende seost nende all lasuva geoloogilise struktuuriga ei mõisteta, on vajalik läbi viia täiendavaid mereekspeditsioone.

Selle jaoks pakkus autor välja neli perspektiivset uut proovikohta, kus viirsavikiht puudub või on piisavalt õhuke, et ulatuda raskustorude või koppadega all oleva geoloogilise kompleksini. Füüsiliste proovide kogumisel on võimalik jõuda selgusele, kas tegemist on Ediacara liivakiviga või mitte. Hetkel pole Eesti laevadel piisavalt head varustust sellise uuringu läbi viimiseks ja tuleb teha koostööd teiste Läänemere riikidega, nt Rootsi uurimislaevaga Electra või Soome teaduslaevaga Aranda. Aastaks 2026 peaks valmima uus Eesti teaduslaev.

## Tänuavaldused

Lõputöö kirjutamisel sain palju abi ja toetust mitmetelt inimestelt, keda soovin tänada.

Esiteks soovin tänada oma juhendajat Atko Heinsalu, kes pakkus mulle välja huvitava ja väljakutseterohke teema. Selle kõrval tutvustas juhendaja mind meregeoloogia valdkonna inimestele, mis aitas mul luua kasulikke tutvusi ning võtta osa põnevatest välitöödest. Ta pühendas palju aega minu lõputööle, et seda mitu korda üle lugeda, põhjalikult parandada ning soovitusi jagada. Lisaks oli ta alati olemas moraalseks toeks ning tema abivalmidus ja muhe olek tegi töö valmimise teekonna toredamaks.

Samuti tahan öelda suur tänu oma kaasjuhendajale Vladimir Karpinile, kes aitas mind lõputöö tarkvaralise poolega. Ta jagas minuga palju vajalikke materjale ja suutis vastata kannatlikult ka kõige lihtsamatele küsimustele. Tema juhendamisel omandasin erinevate meregeoloogiliste tarkvarade kasutamise oskused, milles olin varem ebakindel ning sain lõpuks tehniliste ülesannetega hästi hakkama.

Tänamist on kindlasti väärt ka Eesti Geoloogiateenistuse meregeoloogia ja geofüüsika osakonna juhataja Sten Suuroja, kes oli minu mitteametlik juhendaja. Tema abil tutvusin Meridata tarkvaraga ning hakkasin tema juhendamisel Soome lahe merepõhja uuringualasid uurima ja interpreteerima. Ta varustas mind vajalike andmetega ja failidega ning aitas mul mõista töö geofüüsikalist poolt, millest mul varem polnud vähimatki aimu.

Lõpuks tahan tänada Norra Geoloogiateenistuse teadlast Aivo Leplandi, kelle abita poleks minu lõputöö valminud. Tema teooriad aitasid luua minu lõputöö peamise hüpoteesi ja eesmärgi. Lisaks tuleb tunnustada tema algatusvõimet viia läbi uhkeid mereekspeditsioone, et koguda olulisi andmeid Eesti merepõhja olemuse kohta.

## Kirjanduse loetelu

Calvert, M. (27.05.2022). *Guide to Sub-Bottom Profiling*. aae Technologies. Kasutatud 20.03.2024, <https://www.aatechnologiesgroup.com/news/guide-to-sub-bottom-profiling/>

Cathles, L. M., Su, Z. ja Chen, D. (2010). The physics of gas chimney and pockmark formation, with implications for assessment of seafloor hazards and gas sequestration. *Marine and Petroleum Geology*, 27, 82–91. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2009.09.010>

Characteristics of the seafloor. (i.a). www.marinefinland.fi. Kasutatud 17.05.2024, [https://www.marinefinland.fi/en-US/Nature and how it changes/The unique Baltic Sea/Characteristics of the seafloor#:~:text=The%20Gulf%20of%20Finland%20is%20a%20relatively%20shallow%20marine%20area](https://www.marinefinland.fi/en-US/Nature%20and%20how%20it%20changes/The%20unique%20Baltic%20Sea/Characteristics%20of%20the%20seafloor#:~:text=The%20Gulf%20of%20Finland%20is%20a%20relatively%20shallow%20marine%20area)

Chen, J., Song, H., Guan, Y., Yang, S., Pinheiro, L. M., Bai, Y., Liu, B. ja Geng, M. (2015). Morphologies, classification and genesis of pockmarks, mud volcanoes and associated fluid escape features in the northern Zhongjiannan Basin, South China Sea. Wang, P., Li, Q. ja Dai, M. (toim), *The South China Sea Deep* (lk 106–117). Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 122. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2015.11.007>

Cohen, K. M., Westley, K., Erkens, G., Hijma, M. P. ja Weerts, H. J. T. (2017). Chapter 7 The North Sea. *Submerged Landscapes of the Continental Shelf: Quaternary Paleoenvironments*. (lk 103–133). The Geological Society. (lk 147–186). The Geological Society. <https://doi.org/10.1002/9781118927823.ch7>

Dondurur, D. (2018). *Acquisition and Processing of Marine Seismic Data*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2016-0-01591-7>

EMODnet Geology Portal. (i.a). Kasutatud 15.03.2024, <https://emodnet.ec.europa.eu/en/geology>

Glasby, G. P., Emelyanov, E. M., Zhamoida, V. A., Baturin, G. N., Leipe, T., Bahlo, R. ja Bonacker, P. (1997). Environments of formation of ferromanganese concretions in the Baltic Sea: a critical review. *Geological Society, London, Special Publications*, 119, 213–237. <https://doi.org/10.1144/gsl.sp.1997.119.01.14>

Heinsalu, A., Alliksaar, T., Liiv, M., Kallaste, T., Urtson, K., Karpin, V., Suuroja, S., Tuuling, I. ja Veski, A. (2021). *Merepõhja geoloogia: geofüüsikalised kaugseire meetodid ja setteuringud*. Aruanne, Tallinna Tehnikaülikool geoloogia instituut ja Eesti Geoloogiateenistus. [https://sisu.ut.ee/wp-content/uploads/sites/356/2\\_3\\_2\\_seabed\\_geological\\_inventories\\_acoustic\\_profiling\\_and\\_sediment\\_survey.pdf](https://sisu.ut.ee/wp-content/uploads/sites/356/2_3_2_seabed_geological_inventories_acoustic_profiling_and_sediment_survey.pdf)

Hughes, A. L. C., Gyllencreutz, R., Lohne, Ø. S., Mangerud, J. ja Svendsen, J. I. (2016). The last Eurasian ice sheets – a chronological database and time-slice reconstruction, DATED-1. *Boreas*, 45, 1–45. <https://doi.org/10.1111/bor.12142>

Kurowski, S., Łukawska-Matuszewska, K., Čović, A., Jozić, D. ja Brodecka-Goluch, A. (2024). Effects of pockmark activity on iron cycling and mineral composition in continental shelf sediments (southern Baltic Sea). *Biogeochemistry*, 167, 135–154. <https://doi.org/10.1007/s10533-024-01127-1>

Lekkerkerk, H.-J. (11.12.2020). *Sub-bottom object detection*. HYDRO International. Kasutatud 21.03.2024, <https://www.hydro-international.com/content/article/sub-bottom-object-detection>

Liira, M., Ojap, J. M., Lepland, A., Suuroja, S., Ausmeel, M., Szymczycha, B., Hong, W.-L., Böttcher, M. E., Virtasalo, J., Mikenberg, H., Heinsalu, A. ja Roopõld, K. (2024). *Insights into the genesis and geological significance of iron-manganese precipitates in the Baltic Sea, Gulf of Finland seafloor*. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu24-7279>

Lumiste, K. (2017). *Triigi objekti uuring seisreaktiivide pidevsondeerimise meetodil*. [Magistritöö, Tartu ülikool]. <https://dspace.ut.ee/server/api/core/bitstreams/99ed92e2-a1d3-4eb7-bb08-9aacddc5551f/content>

Maa-Amet. (2024a). Reljeefvarjutus.

Maa-Amet. (2024b). Värviline reljeefvarjutus.

Maa-Amet. (2024c). 1:50 000 geoloogiline baaskaart

Marandi, A., Osjamets, M., Polikarpus, M., Pärn, J., Raidla, V., Tarros, S. ja Vallner, L. (2019). *Põhjaveekogumite piiride kirjeldamine, koormusallikate hindamine ja hüdrogeoloogiliste kontseptuaalsete mudelite koostamine*. Eesti Geoloogiateenistus. <http://www.digar.ee/id/nlib-digar:399365>

Molodkov, A., Bolikhovskaya, N., Miidel, A. ja Ploom, K. (2007). The sedimentary sequence recovered from the Voka outcrops, northeastern Estonia: implications for late Pleistocene stratigraphy. *Estonian Journal of Earth Sciences*, 56, 47–62.

Nigul, S. (1987). *Raua-mangaani konkretsioonidest Naissaar-Väike-Tütarsaar vahelisel alal*. [Diplomitöö, Tartu Riiklik Ülikool].

NOAA. (2002). *Exploration Tools: Side Scan Sonar*: NOAA Office of Ocean Exploration and Research. [Oceanexplorer.noaa.gov](https://oceanexplorer.noaa.gov/technology/sonar/side-scan.html). Kasutatud 22.03.2024, <https://oceanexplorer.noaa.gov/technology/sonar/side-scan.html>

NOAA. (2019). *What is an ROV? : Ocean Exploration Facts*: NOAA Office of Ocean Exploration and Research. [Noaa.gov](https://oceanexplorer.noaa.gov/facts/rov.html). Kasutatud 22.03.2024, <https://oceanexplorer.noaa.gov/facts/rov.html>

Rosentau, A., Bennike, O., Uścinowicz, S. ja Miotk-Szpiganowicz, G. (2017). Chapter 5 The Baltic Sea Basin. *Submerged Landscapes of the Continental Shelf: Quaternary Paleoenvironments*. (lk 103–133). The Geological Society. <https://doi.org/10.1002/9781118927823.ch5>

Sarıtaş, H., Çifçi, G., Géli, L., Thomas, Y., Marsset, B., Henry, P., Grall, C. ja Rochat, A. (2018). Gas occurrence and shallow conduit systems in the Western Sea of Marmara: a review and new acoustic evidence. *Geo-Marine Letters*, 38, 385–402. <https://doi.org/10.1007/s00367-018-0547-5>

Suuroja, S., Heinsalu, A., Alliksaar, T., Tõnisson, H., Lips, U., Pajusaar, S., Liiv, M., Buschmann, F., Erm, A., Kiipli, T., Kallaste, T., Voolma, M., Ehrlich, K., jt. (2016). *Hinnangu andmine merekeskkonna ökosüsteemipõhiseks korraldamiseks Soome lahe merepõhja ja setete näitel: SedGoF projekti aruanne*. Eesti Geoloogiakeskus. <https://ws.lib.ttu.ee/digibase/et/Publ>

Svendsen, J. I., Alexanderson, H., Astakhov, V. I., Demidov, I., Dowdeswell, J. A., Funder, S., Gataullin, V., Henriksen, M., Hjort, C., Houmark-Nielsen, M., Hubberten, H. W., Ingólfsson, Ó., Jakobsson, M., Kjær, K. H., Larsen, E., Lokrantz, H., Lunkka, J. P., Lyså, A., Mangerud, J., Matiouchkov, A., Murray, A., Möller, P., Niessen, F., Nikolkaya, O., Polyak, L., Saarnisto, M., Siegert, M. J., Spielhagen, R. F., ja Stein, R. (2004). Late Quaternary ice sheet history of northern Eurasia. *Quaternary Science Reviews*, 23, 1229–1271. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2003.12.008>

Toro, N., Robles, P. ja Jeldres, R. I. (2020). Seabed mineral resources, an alternative for the future of renewable energy: A critical review. *Ore Geology Reviews*, 126, 103699. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103699>

Tuuling, I. (2019). The Leba Ridge–Riga–Pskov Fault Zone – a major East European Craton interior dislocation zone and its role in the early Palaeozoic development of the platform cover. *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences. Geology/Estonian Journal of Earth Sciences*, 68, 161–161. <https://doi.org/10.3176/earth.2019.12>

Tuuling, I., Bauert, H., Willman, S. ja Budd, G. E. (2011). *The Baltic Sea. Geology and geotourism highlights*. GeoGuide Baltoscandia.

Tuuling, I., Suuroja, S., Veski, A. ja Liira, M. (2021). *Ülevaade meregeoloogilisest andmestikust meretuuleparkide planeerimiseks*. Eesti Geoloogiateenistus. <https://doi.org/10.23679/1022>

Uścinowicz, S. (2014). The Baltic Sea continental shelf. Geological Society, London, *Memoirs*, 41, 69–89. <https://doi.org/10.1144/m41.7>

Šliaupa, S. ja Hoth, P. (2011). Geological Evolution and Resources of the Baltic Sea Area from the Precambrian to the Quaternary. *Central and Eastern European Development Studies*, 13–51. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-17220-5\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-642-17220-5_2)

Wasiljeff, J. A. M. (2015). Internal structure and geochemical properties of spheroidal ferromanganese concretions of the Baltic Sea. [Magistritöö, Helsingi ülikool].

Wasiljeff, J., Salminen, J. M., Roberts, A. P., Hu, P., Brown, M., Kuva, J. jt. (2024). Morphology-dependent magnetic properties in shallow-water ferromanganese concretions. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 25, e2023GC011366. <https://doi.org/10.1029/2023GC011366>

Lisa  
rektori 07.04.2020 käskkirjale nr 1-8/17

### **Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks<sup>1</sup>**

Mina Hannah Mikenberg

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Soome lahe raua-mangaani konkretsioonide tekkemehhanismide seos merepõhja geoloogilise ehituse ja lekkimislehtritega“, mille juhendaja on Atko Heinsalu ning kaasjuhendaja Vladimir Karpin,

1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

---

27.05.2024

---

<sup>1</sup> Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loomingu tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.