

Resenttisen liejusaven käyttäytyminen Suomen merialueiden merenpohjan hydrodynaamisissa olosuhteissa

Laura Laaksonen

Maantiede (Fluviaali- ja rannikkomaantiede)

Pro gradu -tutkielma

Laajuus: 30 op

Ohjaajat:

Joni Mäkinen

Sari Penttinen

15.12.2021

Turku

Turun yliopiston laatu järjestelmän mukaisesti tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu

Turnitin OriginalityCheck -järjestelmällä.

Pro gradu -tutkielma

Pääaine: Maantiede

Tekijä: Laura Laaksonen

Otsikko: Resenttisen liejusaven käyttäytyminen Suomen merialueiden merenpohjan hydrodynaamisissa olosuhteissa

Ohjaajat: Joni Mäkinen, Sari Penttinen

Sivumäärä: 57 sivua

Päivämäärä: 15.12.2021

Tutkimuksessa selvitetään merenpohjassa esiintyvän resenttisen liejusaven kasaantumisympäristöjä Suomen merialueiden hydrodynaamisissa olosuhteissa. Resenttinen liejusavi on nykyisin merenpohjaan muodostuvaa löyhää ja orgaanista savea, joka lähtee helposti uudelleen kuljetukseen veden liikkeen toimesta. Resenttinen liejusavi reagoi veden liikkeisiin hyvin matalalla kynnyksellä, minkä takia sitä käytetään tässä tutkimuksessa indikaattorina merenpohjan hydrodynaamisten voimien, kuten aaltojen sekä merivirtojen läsnäolosta. Tutkielman tavoitteena on laajentaa käsitystä resenttisen liejusaven käyttämisestä ja esiintymisestä merenpohjan vaihtelevissa olosuhteissa.

Tutkielman aineistona käytetään Rannikkolaivaston 4. miinantorjuntalaivueen akustisin kaikuluotausmenetelmin tuottamia kaikugrammi profiileja, joita on kerätty Suomen eteläisiltä merialueilta. Kaikugrammit kuvaavat merenpohjan pinnan alaisia sedimenttikerrostumia. Tyypillisesti Suomen merenpohja muodostuu kallioperän päälle kasaantuneista savikerrostumista, joista kaikkein päällimmäisimpänä on havaittavissa resenttinen liejusavi. Kaikugrammeista tunnistetaan näiden resenttisten liejusavikerrostumien erityispiirteitä sekä veden liikkeen aiheuttamia eroosiopintoja savikerrostumissa.

Resenttistä liejusavea on havaittavissa niin Suomenlahdella, Saaristomerellä kuin myös Ahvenanmerellä. Tuloksista voidaan havaita resenttisen liejusaven kasaantumisen sekä virtausuomien olevan yhteydessä toisiinsa. Näin ollen on todennäköistä, että myös saaristo-olosuhteissa merivirrat aiheuttaisivat resenttisen liejusaven kasaantumista kontouriittimaiseen tapaan merivirtojen suuntausta myötäillen. Lisäksi virtauksesta syntyneen virtausuoman koko on usein verrannollinen vierelle syntyvän resenttisen liejusaven kasauman kokoon. Virtausuomien toimesta merialueen syvin kohta ei välttämättä myöskään ole liejusaven peitossa vaan virtausuoman eroosioaluetta. Aallot sen sijaan määrittävät mille syvyydelle liejusavea voi muodostua. Toisaalta meren ollessa muutostilassa esimerkiksi maankohoamisen seurauksesta, voi aikaisemmin levottomat eroosioympäristöt muuttua rauhallisiksi kasaantumisympäristöiksi. Näin ollen merenpohjan sedimentaatio-olosuhteet eivät ole stabiileja vaan voivat muuttua hyvinkin toisenlaisiksi vesisyvyyden tai hydrodynaamisten olosuhteiden vaihtelun vuoksi.

Tutkielman tulokset laajentavat käsitystä resenttisen liejusaven muodostumisympäristöistä sekä sen yleisestä käyttäytymisestä merenpohjassa. Tästä on hyötyä esimerkiksi merenpohjan ravinnepitoisten sedimenttien liikkeen kartoittamisessa sekä merenpohjan laadun arvioimisessa. Lisäksi ilmastonmuutoksen vaikutus merenpohjan sedimentaatio-olosuhteisiin tulee todennäköisesti vaikuttamaan pohjan geomorfologiaan sekä sitä ympäröiviin ekosysteemeihin.

Avainsanat: resenttinen liejusavi, merivirrat, aallot, kontouriitit, kaikugrammi, akustiset kaikuluotausmenetelmät, Itämeri, merenpohja

Master's thesis

Subject: Geography

Author: Laura Laaksonen

Title: Behavior of modern gyttja at the hydrodynamic environment of the Finnish seafloor

Supervisors: Joni Mäkinen, Sari Penttinen

Number of pages: 57 pages

Date: 15.12.2021

The aim of this study is to investigate the behavior of recently accumulated gyttja in the hydrodynamic environment of the Finnish seafloor. Modern gyttja is typically less consolidated than the underlying postglacial deposits and therefore they can be easily removed back to transport by the waves and currents. Thereby the existence or absence of these soft sediments can be used as an indicator for presence of hydrodynamic movement at the seafloor.

Finnish Navy have collected the data by using sediment echo sounder (SES) that produces echograms of the sediments lying underneath the seafloor. Modern gyttja is typically overlying the postglacial sediments and bedrock at bottom of the Baltic Sea. As a study method, the special features of modern gyttja and erosional surfaces are documented from echograms.

Results show that modern gyttja is found from the seafloors of the Gulf of Finland, the Archipelago Sea and the Åland Sea. Current channels and gyttja deposits often appear nearby each other's and their sizes correlate as well. It can be concluded that bottom currents are accumulating soft sediments to the seafloor and thereby are forming small-scale contourites even in the archipelago. The deepest area of the Finnish seafloor is not always the main accumulation zone when bottom currents create a deep channel into the bottom sediments. On the other hand, waves and thereby openness of the sea determinate the depth which recent muds can accumulate. Thus as the seafloor is constantly under change by seafloor uplifting, otherwise calm environment can turn into an restless environment and vice versa in shallowing depth and exposure to waves.

This study extends the conception of modern gyttja accumulation environment and behavior under the near seafloor hydrodynamics at the seafloor of Finland. The results of this study can be used for mapping nutrients flow or for estimating seafloors quality. In addition, climate change will cause stress to the seafloor and thereby have an influence to the geomorphology of the seabed and to the ecosystems surrounded by it.

Key words: recent mud, modern gyttja, waves, currents, contourites, sediment echo sounding, SES, Baltic Sea, seafloor

Sisällysluettelo

1	Johdanto	5
2	Teoreettinen viitekehys	7
2.1	Itämeren merenpohjan topografia ja maalajien levinneisyys	7
2.1.1	Suomen eteläisten merialueiden merenpohjan kallioperä	7
2.1.2	Itämeren merenpohjan hienoaineskerrostumat	8
2.1.3	Maankohoaminen saaristossa	13
2.2	Virtaavan veden ja aaltoliikkeen kerroksia kuluttava ja liikuttava vaikutus	14
2.2.1	Merivirrat	14
2.2.2	Aallot	18
2.3	Akustiset tutkimusmenetelmät	19
2.4	Tutkimusalue	21
3	Aineisto ja menetelmät	24
4	Tulokset	26
4.1	Merivirrat kaikogrammeissa	26
4.2	Aaltoeroosio kaikogrammeissa	35
5	Pohdinta	38
5.1	Merivirtojen muodostamat kontouriitit Itämerellä	38
5.2	Merenkulun aiheuttama pohjaneroosio	42
5.3	Ilmastonmuutoksen vaikutukset merenpohjan sedimentaatio-olosuhteisiin	43
6	Johtopäätökset	48
	Kiitokset	49
	Lähteet	50

1 Johdanto

Sukeltaessaan mereen Muumipeikko havainnoi pohjalla keiuvia levämetsiä ja laineikasta hiekkaa, mutta nähdessään kauempana syvälle pohjattomuuteen johtavan mustan aukon, päätti hän ponkaista takaisin pintaan ja purjehtia aallon mukana takaisin rantaan (Jansson 1946). Menneinä aikoina Itämeren merenpohja oli mystinen ja tuntematon murtovesialtaan meriperä, jonka pohjan laadusta oli tiedossa vain mahdolliset haaksirikkoutuneet purjelaivat. Nykyaikana tutkimusmenetelmien kehittyttyä on Itämeren saavuttamattomasta meriperästä tullut saavutettava tutkimusalusta, jonka erityispiirteet tekevät siitä entistäkin uniikimman muihin merialueisiin verrattuna.

Tänä päivänä Itämeren pohjaan on keskitetty tutkimustyötä useilta tutkimusaloilta. Itämeren pohjan laadun tiedetään olevan yleisesti hapetonta sekä ravinnepitoista. Erityisesti Itämeren altaan syvänteissä ravinnerikkaiden sedimenttien kerrostuminen on valtamerien sedimentaatiosta poiketen aktiivisinta sekä hapettomuus pysyvää hydrodynaamisten prosessien puuttuessa (Puttonen ym. 2016). Toisaalta ravinnepitoinen aines ei kulkeudu ainoastaan tunnettuihin syvänteisiin, vaan sitä kasaantuu myös rikkonaisen rantaviivan muodostamiin rauhallisiin lahtiin ja mataliin altaisiin. Näin ollen esimerkiksi Saaristomeren mosaiikkinen saaristo toimii kuin filtterinä, joka ei päästä mantereelta kulkeutuneita ravinteita virtaamaan suoraan syvänteisiin vaan säilöo ravinteita myös omiin sedimenttikerrostumiinsa (Puttonen ym. 2016). Tämän seurauksesta Itämerelle tyypillisestä akkumulaatiosta poiketen Suomen merialueilla hienoaineksen sedimentaatiota tapahtuu myös matalissa vesissä saarien suojassa (Virtasalo ym. 2005).

Tällä hetkellä Itämeren merenpohjan syvänteisiin ja rauhallisiin lahtiin kerrostuva sedimenttiaines luokitellaan resenttiseksi liejusaveksi, jonka ominaisuudet eroavat merkittävästi vanhemmista merenpohjan hienoainekkerrostumista. Resenttinen liejusavi on hyvin orgaanispitoista ja rakenteeltaan löyhää, koska sen partikkeleiden väliset sidokset ovat heikkoja (Nuorteva & Kankaanpää 2016). Tämän seurauksena resenttisen liejusaven kerrostumat lähtevät herkästi liikkeelle hydrodynaamisten voimien merenpohjaan kohdistamasta paineesta, kuten aaltojen tai merivirtojen liikkeestä. Aaltojen ja merivirtojen vaikutus merenpohjan sedimentaatio-olosuhteisiin vaihtelee kuitenkin alueittain, koska jokainen Suomen merialue on oma uniikki yksikkö geodiversiteetiltään (Kaskela & Kotilainen

2017). Näin ollen merialueitten pohjan topografiat, maalajit sekä vesisyvyydet ovat hyvin vaihtelevia ja luovat jokaiselle alueelle omat erityiset sedimentaatio-olosuhteensa. Aaltoihin ja merivirtoihin nopeasti reagoiva löyhä resanttinen liejusavi on oiva indikaattori kuvaamaan Suomen merialueiden merenpohjan vaihtelevia sedimentaatio- ja eroosioympäristöjä.

Puolustusvoimien näkökulmasta resanttisen liejusaven käyttäytymisen tutkiminen on tärkeää, koska sillä on vaikutusta merimiinoittamiseen ja muuhun vedenalaiseen sodankäyntiin. Erittäin pehmeänä pohjamateriaalina resanttinen liejusavi ei sovellu merimiinoittamiseen, koska merimiinan upotessa pehmeään ainekseen eivät niiden herätysanturit kykene vastaanottamaan aluksista tulevia herätteitä. Lisäksi kaikkein nuorimpana merenpohjan kerrostumana se sitoo itseensä muun muassa ravinteita sekä mikromuovia, jotka saattavat vapautua tai ajautua uudelleen kuljetukseen aaltojen ja merivirtojen toimesta (Bryhn & Håkanson 2011). Muista maaperäkerrostumista poiketen resanttiset liejusavikerrostumat ovat hyvin aktiivisia liikkumaan merenpohjan toimintaympäristössä ja näin ollen kykenevät myrskyn sisällä muuttamaan paksuuttaan maaperäkerrostumana jopa useita kymmeniä senttimetrejä (Nuorteva & Kankaanpää 2016). Näin ollen ilmaston muutoksen tuomien ääri-ilmiöiden voimakuuksien noustessa, tulee resanttisen liejusaven käyttäytymiseen löytää malleja, jotta tulevaisuudessa kyettäisiin hahmottamaan ääriolosuhteiden tuomia haasteita resanttisen liejusaven sijainnin paikantamiseen.

Tutkimuskysymykset:

- Kuinka resanttista liejusavea kyetään havainnoimaan akustisista luotausaineistoista?
 - Millaisia erityispiirteitä resanttisellä liejusavella on kaikogrammeista havaittaessa?
- Minkälaisia vaikutuksia meren hydrodynaamisilla ominaisuuksilla on resanttisen liejusaven kasautumiselle?
- Kuinka resanttisen liejusaven käyttäytyminen reagoi meri-ilmaston muuttumiseen nyt ja tulevaisuudessa?

2 Teoreettinen viitekehys

2.1 Itämeren merenpohjan topografia ja maalajien levinneisyys

Nuorteva (2013) listaa Itämeren merenpohjan topografian sekä maalajien levinneisyyden ja esiintymisen olevan seurausta neljästä prosessista. Ensimmäisenä Nuorteva mainitsee jääkautta edeltäneen kallioperän sekä kallion kivilajin merkityksen, mitkä määrittävät pääsääntöisesti, kuinka mannerjäätikkö on päässyt etenemään ja näin ollen kuluttamaan merenpohjaa. Seuraavana Nuorteva on listannut jääkauden kuluttavan sekä kasaavan vaikutuksen, minkä seurauksesta kallioperästä irronnut kiviaines on kulkeutunut proksimaalisesta sijainnistaan muualle kasaantuen erinäisiksi maaperämuodostumiksi kuten harjuiksi tai merenpohjaa tasaaviksi glasiaalisaviksi. Kolmantena Nuorteva listaa jääkauden maankohoamisen, joka muuttaa merenpohjan sedimentaatio-olosuhteita vesisyvyyden muuttuessa. Näihin muuttuvan vesisyvyyden aiheuttamiin sedimentaatio-olosuhteisiin vaikuttavat erityisesti listan viimeinen prosessi eli virtaava vesi ja aallot.

2.1.1 Suomen eteläisten merialueiden merenpohjan kallioperä

Suomen merialueilla merenpohjan pinta muodostuu pääosin kovan kallioperän päälle kasautuneesta moreenista sekä pehmeämmästä postglasiaalisesta hienoaineksesta (Nuorteva 2018). Kuitenkin monin paikoin maaperäkerrostumista tunkeutuvista kalliohuipuista voidaan havainnoida kiteinen paleoproterotsoinen peruskallio, mistä suurin osan Itämeren pohjoisesta kallioperästä muodostuu (Kaskela ym. 2012). Peruskallion kivilaji on vaikuttanut siihen, kuinka voimasta kulutusta jäätiköt ovat kyenneet aiheuttamaan: Pohjois-Itämeren graniittinen kova peruskallio kuluu hitaasti, kun taas eteläisen Itämeren, sedimenttikivet jauhaantuvat helposti takaisin hiekaksi (Nuorteva 2013). Suomen eteläisten merialueiden merenpohja on geologisessa ajassa muuttunut useaan kertaan, kunnes Svekofennisen vuoripoimutuksen jälkeen eroosivoimat ovat tasoittaneet vuoristoisen kallioperän lähes nykytasoon, muodostaen Suomen merenpohjasta prekambriksen peneplaanin (Häkkinen 1990). Itämeren erityispiirteisiin kuuluvat esijäätikölliset rakennegeologiset piirteet kuten syvänteet sekä ruhjeet, ovat myös selkeästi havaittavissa Suomen merialueiden pohjan pinnanmuodoissa. Nämä syvänteet ja ruhjeet ovat toimineet jääkausien aikana jäätiköiden kulkuväylinä, minkä myötä niiden pohjat ovat kuluneet entistäkin syvemmiiksi kanjoneiksi, joissa esimerkiksi merivirrat pääsevät kanavoitumaan voimakkaiksi virtauksiksi.

2.1.2 Itämeren merenpohjan hienoaineskerrostumat

Merenpohjan monimuotoisuus, sen peruskallion topografiassa sekä kivilajeissa, on toiminut edellytyksenä epätasaisen sedimenttijakauman muodostumiselle Itämeren altaassa (Kaskela ym. 2012). Tätä mallintaakseen voidaan indikaattorina käyttää geodiversiteettiä, joka kuvaa alueen maaston heterogeenisyyttä laskemalla erinäisten merenpohjan elementtien määrän vaihtelua (Kaskela & Kotilainen 2017). Näin ollen, kun alueen sisäiset olosuhteet ovat geodiversiteetiltään rikkaita, heijastuu tämä myös sedimenttien eroosiossa, kulkeutumisessa sekä kasaantumisessa vedenalaisessa ympäristössä. Vedenpinnan alaisten sisäisten prosessien lisäksi ilmaston viilennyttyä useaan kertaan viimeisen 3 miljoonan vuoden aikana, ovat jäätiköt kuluttaneet sekä kasanneet aktiivisesti Itämeren altaan materiaaleja. Tämän seurauksesta on Itämeren alueelta havaittavissa rintarinnan niin voimakkaita eroosionaalisia piirteitä kuten virtausuomia kuin myös aineksen kasaantumista eli sedimentaatiota. Itämeren merenpohjan sedimentaatiokerrostumissa voidaan havaita jopa tuhansien vuosien hyppäyksiä päällekkäisten kerrostumien välillä seurauksena esimerkiksi resenttisen liejusaven kasaantuessa suoraan kuluneen glasiaalisaven tai hiekan päälle (Nuorteva 1988).

Pääsääntöisesti Itämeren kallioperää peittää kronologisesti kasaantuneita savikerrostumia. Suomen merialueiden merenpohjan pehmeät maalajit jaetaan yleisesti kolmeen eri luokkaan, jotka kuvastavat niiden muodostumisajankohdan aikana vallinneita sedimentaatioolosuhteita. Iältään vanhimmat jääkauden aikaiset eli glasiaaliset sekä myöhäisglasiaaliset lustosavet ja siltit ovat muodostuneet noin 14 000–10 700 vuotta sitten Baltian jääjärven sekä Yoldianmeren aikana (Hyttinen 2012). Seuraavana luokkana tunnetaan postglasiaaliset savet, jotka ovat muodostuneet jäätikön sulamisvaiheen jälkeen 10 700–8 500 vuotta sitten Anculysjärven ja Litorinameren alkuvaiheen aikana (Kaskela 2017). Viimeiseen luokkaan luetaan kaikki alle 8 500 vuotta sitten muodostuneet kerrostumat, mikä kattaa Litorinameren myöhäiset vaiheet ja vielä nykyisinkin muodostuvan resenttisen liejusaven (Häkkinen & Åker 1991). Statigrafisesti glasiaalisavet ovat kaikkein alimpana, postglasiaaliset savet niiden yläpuolella ja resenttiset liejusavet päällimmäisenä.

Mannerjäätikön alkaessa perääntyä Itämeren eteläosista noin 15 000 vuotta sitten, ei Itämerellä ollut vielä yhteyttä valtameriin (Häkkinen & Åker 1991). Näin ollen nykyisen Itämeren altaan eteläosiin muodostui Baltian jääjärvi, jonka aikana merenpohjaan kerrostui

glasiaalisia savia ja silttejä, joille on tyypillistä lustomainen rakenne. Glasiaalisavien paksuus Suomen merialueilla on yleensä alle 10 metriä, mutta paikoin kerrostumia voi olla useita kymmeniä metrejä, etenkin Pohjois-Itämerellä (Nuorteva 1988). Glasiaalisavet tyypillisesti myötäilevät tasapaksuisina kerrostumialustansa topografisia muotoja eli niiden muodostuminen on konformista (Åker & Häkkinen 1991).

Maankohoamisen seurauksesta glasiaalisavea on usein havaittavissa maaperän pintamaalajina kallio-, moreenikohoumien ja – muodostumien ympärillä (Rantataro 1992). Kerrostumisen jälkeinen maankohoaminen on madaltanut altaan vesisyvyyttä, minkä johdosta aiemmin muodostuneet sedimenttikerrostumat ovat altistuneet voimakkaammalle eroosiolle, jolloin sekä meren aallokko, että merivirrat ovat kuluttaneet savikerrostumia ja uudelleen kasanneet niitä rauhallisempiin syviin altaisiin (Häkkinen & Åker 1991; Rantataro 1992). Paikoin glasiaalisavia on havaittavissa pitkänomaisten virtausuomien paljastumisissa, missä jäljelle ovat jääneet vain kaikkein vanhimmat ja tiiviit savikerrostumat (Rantataro 1992). Glasiaalisavien kerroksellisuudessa on tyypillisesti havaittavissa vaihtelu punertavien ja harmaiden vuosilustojen välillä, mitä on seurauksena sedimenttipartikkeleiden hapetus-pelkistymisolosuhteista veden happipitoisuuden muutoksessa siirryttäessä sulamisvedestä murtovesivaltaiseen ympäristöön (Hyttinen 2012).

Glasiaalisavea peittää yleensä, sekä laajoissa että pienissä, merenpohjan altaissa postglasiaalisavet, jotka ovat muodostuneet jääkauden lopulla tai sen jälkeen (Rantataro 1992). Postglasiaalinen kerrostuminen on pyrkinyt tasaamaan merenpohjan epätasaisuuksia, minkä johdosta ne ovat usein kerrostuneet erityisesti merenpohjan painanteisiin (Nuorteva 1988). Tyypillisesti postglasiaalisavet näkyvät kaikugrammeissa vaaleina ja melko homogeenisinä kerrostumina, joissa saattaa esiintyä juovikkuutta, jonka aiheuttavat eroosiopinnat sekä muutokset raekoostumuksessa (Nuorteva 1988). Glasiaalisavien päällä ennen postglasiaalisia kerrostumia voidaan havaita myöhäisglasiaalisia, Yoldianmeren aikana noin 11 550–10 700 vuotta sitten muodostuneita hiesusavikerrostumia, joita kutsutaan lustosaviksi (Ignatius ym. 1980; Hyttinen 2012). Niille tyypillistä on kerroksellinen rakenne, jossa vuosilustojen paksuudet pienevät säännöllisesti ylöspäin noustessa, perääntyvän mannerjäätikön nopean deglasiaation eli jäätikön perääntymisen edellyttämällä tavalla (Ignatius ym. 1980). Usein Yoldiameren kerrostumista on vielä havaittavissa joitakin

glasigeeniä piirteitä kuten painovoiman aiheuttamia debrittikerrostumia tai voimakkaassa turbulensissa irronnutta mutaa (rip-up mud) (Häkkinen & Åker 1991; Hyttinen 2021).

Yoldiameren jälkeen noin 10 700 vuotta sitten Itämeren allas muuttui Ancylusjärveksi, minkä seurauksesta altaan pohjalle alkoi kerrostua postglasiaalisia lakustrisia sulfidisavia (Hyttinen 2012). Ensimmäiset Ancylusjärven kerrostumat ovat tyypillisesti monosulfidien voimakkaasti mustaksi värjäämiä, minkä jälkeen tämän päälle on muodostunut paksu sinertävän harmaa homogeeninen kerros (Ignatius ym. 1980; Rantataro 1992). Ancylusjärven aikana Itämeren allas on ilmeisemmin ollut pohjalta hyvin stagnantti, jolloin pohjakerroksissa vallinneet anaerobiset olosuhteet ovat voineet aiheuttaa raudan saostumista rikkivajauksen takia amorfisena monosulfidina (Ignatius ym. 1980). Sulfidisavien orgaanisen aineen pitoisuus on Yoldiameren saven tapaan hyvin alhainen eli noin 2 % (Ignatius ym. 1980). Ancylusjärven tarkkaa ajankohtaa on haastava ajoittaa piilevätutkimuksilla, koska postglasiaalisissa sedimenteissä on hyvin vähän piileviä sekä ne ovat usein uudelleen kerrostuneita (Häkkinen & Åker 1991). Ancylusjärven sulfidisavet vaihtuvat tyypillisesti hyvin terävällä kontaktilla Litorina-merenvaiheen orgaanista ainesta sisältäviin liejusavikerrostumiin.

Aluksi ensimmäiset noin 1300 vuotta Litorinameri oli vähän suolainen meri, kunnes 8 500 vuotta sitten Itämeren altaaseen ryöpsähti voimakas virtaus vähäsuolaista vettä (Hyttinen 2012). Tämän seurauksesta myös pohjalle kasautuvan aineksen orgaanisen aineksen pitoisuus nousi piilevien määrän lisääntyessä ja näin ollen Itämeren altaaseen alkoi muodostua gytjaa eli runsaasti orgaanista ainesta sisältävää liejusavea (Hyttinen 2012). Litorina- ja tätä nuoremassa postlitorinan liejusavessa orgaanisen aineen määrän heikutushäviönä on arvioitu olevan 8–8,9 %, mutta esimerkiksi Airistolta on Litorinakerrostumista mitattu pitoisuuksia 3,3–10,3 % väliltä (Heino 1973; Häkkinen & Åker 1991). Rakenteeltaan Litorina-liejusavet ovat heikosti laminaarisia, väriltään harmaita tai oliivinvihreitä sekä toisinaan ne voivat olla kaasupitoisia (kuva 1) (Rantataro 1992). Litorina-liejusavien näytteet haisevat usein rikkivedyltä, ja merenpohjalta otetut näytteet tyypillisesti paisuvat kaasukuplien vaikutuksesta (Heino 1973; Rantataro 1992). Litorinasaven kerrostumien päältä voidaan Suomen merialueilla havaita paikallisesti resenttisen liejusaven kasaumia, jotka tyypillisesti erottuvat erittäin vaaleana ja kumpuilevana kerrostumana.



Kuva 1. Vuosikerrallinen sedimenttinäyte merenpohjan kerrostumista Saaristomerellä. Näytteen ympärille kaukaloon on levinnyt tummaa liejusavea. @Laaksonen

Resenttinen liejusavi on kaikkein nuorinta ja edelleen kerrostuvaa hienosedimenttikerrostumaa, joka on tyypillisesti havaittavissa Itämeren syvänteissä. Resenttisen liejusaven sedimenttipartikkeleiden väliset sidokset eivät ole yhtä konsolidoituneita kuin alla olevien postglasiaalisten kerrostumien, minkä myötä resenttisen kerrostumat ovat yleisesti pehmeämpiä kuin vanhemmat kerrostumat (Nuorteva & Kankaanpää 2016). Löyhän rakenteensa myötä ne kykenevät lähtemään uudelleen kuljetukseen virtausten sekä aallokon mukana ja kuljetuksen jälkeen kasaantuessaan peittämään alleen suuriakin alueita (Nuorteva 2018). Resenttistä liejusavea muodostuu tyypillisesti merenpohjan syvänteiden altaisiin yli 50 syvyyteen, minne aaltojen ja virtausten erodoiva voima ei enää vaikuta sekä myös rikkonaisen saariston rauhallisiin lahdenpohjiin, missä kasaantuminen voi tapahtua hyvinkin mataliin vesisyvyysyksiin (Häkkinen 1990; Nuorteva & Kankaanpää 2016). Suomenlahden ulappaolosuhteissa resenttisen liejusaven muodostumista ei tapahdu juuri alle 70–90 metriä matalammissa vesissä (Rantataro 1992). Rannikon läheisyydessä liejusaven koostumuksesta suuri osa on lähinnä humusta eli kuolleiden kasvien jäänteitä, jotka keväisin sekoittuvat sulamisvesien mukanaan kuljettaman mineraaliaineksen kanssa (Rantataro 1992). Ulkomerellä kasaantuva aines on tyypillisesti

uudelleen kerrostunutta ainesta, joka on irronnut maankohoamisen seurauksena pohjasta aallokon voimasta tai kulkeutunut syvemmälle merivirtojen kuljettamana (Rantataro 1992).

Resenttisen liejusaven muodostuminen merenpohjaan on hyvin myös riippuvainen paikallisista hydrodynaamisista olosuhteista, mitä peilaavat aikaisempien tutkimusten eroavat päätelmät liejusaven esiintymisen tyypillisestä vesisyvyydestä. Muihin maalajeihin verrattuna liejusaven esiintyminen on paikallisesti yleensä keskittynyt jollekin tietylle vesisyvyydelle, mutta kyseinen vesisyvyys on riippuvainen siitä millaiset aalto- ja virtausolosuhteet paikallisesti vaikuttavat. Nuortevan (2013) tutkimuksessa liejun kerrostumisen todettiin keskittyvän 23–44 metrin syvyydelle, mutta liejusaven vallitsevuus maalajina kasvoi samassa suhteessa syvyyden kanssa. Näin ollen kyettiin päättelemään, että alle 23 metrin vesisyvyyksillä aallokon aiheuttama veden liikehdintä estää partikkelien laskeutumisen merenpohjalle, mutta tästä syvemmälle olosuhteet ovat merkittävästi rauhallisemmat mitä alemmas laskeudutaan. Toisaalta 23 metrin syvyys on hyvin matala verrattuna aikaisempiin päätelmiin siitä, milloin liejua voidaan alkaa tavata merenpohjan olosuhteissa. Tutkimuksen tutkimusalue ei kuitenkaan ole ulappaolosuhteissa, mikä selittää sen, että liejua kerrostuu alle 50 metrin syvyyteen. Kuitenkin on huomioitava, ettei tutkimusalue sijaitse aalloilta suojassa saarten takana tai rauhallisessa lahdessa, vaan aineksen merkittävään kasautumiseen vaikuttavaa todennäköisesti mantereelta tulevan samean veden partikkeleiden laskeutuminen niiden kohdatessa avoimen meren yleisesti dynamiikaltaan rauhallisemmat olosuhteet.

Nuortevan (2018) tutkimuksessa vertaillaan ulappaolosuhteissa maalajien ja vesisyvyyden suhdetta toisiinsa, jolloin liejun esiintymissyvyys on merkittävästi syvemmällä kuin aikaisemmassa tutkimuksessa. Tällöin resenttistä liejusavea havaitaan ensimmäisen kerran vasta 42 metrin syvyydessä, minkä jälkeen sen määrä on kaikkein voimakkainta 55 metrin syvyydessä, mutta 75 metrin syvyydellä sitä ei enää havaita ollenkaan, vaan syvyysalueella onkin havaittavissa pääosin postglasiaalisia savikerrostumia. Äkillinen liejusaven puuttuminen kaikkein syvimmällä alueella selittyy paikallisella merivirralla. Vaikka Suomen merialueiden merivirtaukset ovat rauhallisia verrattuna valtamerien merivirtauksiin, niin voivat ne kuitenkin kapeissa virtailuja ohjailevissa uomissa ja virtauksia kohtaavien kohoumien rinteillä saavuttaa sedimentaatiota estäviä virtausnopeuksia (Ignatius ym. 1980). Näin ollen merenpohjan

sedimentaatio-olosuhteissa alueen kaikkein syvin kohta ei välttämättä ole se paikka, missä sedimentaatio on kaikkein voimakkainta, jos alueen pohjan virtaukset ovat liian voimakkaita veden kuljettamien partikkelien laskeutumiselle pois kuljetuksesta. Monin paikoin virtaukset voivat olla jopa niin voimakkaita, että ne jopa kuluttavat merenpohjan kerrostumia kovaan glasiaalisaveen asti (Nuorteva 1988). Kaiken kaikkiaan on kuitenkin huomioitava, että liejusaven kerrostumisen vesisyvyys vaihtelee alueittain eikä näin ollen yksinään vesisyvyydellä voida selittää liejusaven muodostumista merenpohjan vaihtelevissa olosuhteissa.

2.1.3 Maankohoaminen saaristossa

Kolmantena maalajien levinneisyyteen vaikuttavana tekijänä Nuorteva (2013) listaa jääkauden maankohoamisen, joka muuttaa pohjan hydrodynaamisia olosuhteita vesisyvyyden muuttuessa. Nykyinen maankohoaminen Fennoskandian alueella on seurausta maankuoren pyrkimyksestä palata entiseen muotoonsa menneiden jäätiköiden painon aiheuttamasta maankuoren painautumisesta kohti vaippaa. Viimeisimmän Veiksel-jäätikön jäätiköitymisen maksimin aikaan noin 20 000 vuotta sitten, Fennoskandian päällä makasi noin 2500–3000 metriä paksu jäätikkö, joka painoi maankuorta noin 500–900 metriä (Poutanen & Steffen 2014). Jäätikön sulamisen jälkeinen voimakas maanpinnan palautuminen entiseen muotoonsa on rauhoittunut asteittain nykyaikaiseen vain 4–5 millimetriin vuodessa Suomen eteläisillä merialueilla. Tällä hetkellä maankohoaminen on voimakkainta Merenkurkussa ja Perämerellä, missä maan kohoaa edelleen noin 7–9 millimetriä vuodessa (Myrberg & Andrejev 2006).



Kuva 2. Maankohoamisen vaikutus vesisyvyyteen ja merenpohjan sedimentaatio-olosuhteisiin.

@Laaksonen

Merialueilla maankohoaminen vaikuttaa moninaisesti niin vedenpinnan yläpuolella, alapuolella sekä erityisesti vedenpinnan rajassa. Merenpohjan kohotessa merialueen vesisyvyys laskee ja vähitellen merenpinnan yläpuolelle kohoaa uutta maanpintaa (kuva 2). Näin ollen maankohoamisen myötä merialueilla maa-ala laajenee sekä rantaviivan sijainti vaihtuu. Maankohoamisen jatkuessa matalikot muodostavat kareja ja saaria, joiden taakse jää meren aaltoliikkeiltä ja voimakkailta virtauksilta suojassa olevia alueita (Ignatius ym. 1980). Näin muodostuu myös edellytykset reserentin liejusaven muodostumiselle hydrodynaamisten voimien rauhoittuessa (kuva 2). Toisaalta maankohoamisen seurauksena merenpohjaan jo kertaalleen laskeutuneet savikerrostumat kohoavat ja näin ollen menettävät vesisyvyyttään, minkä seurauksesta ne voivat ajautua mataloituvassa rannikkovyöhykkeessä aaltoeroosiolle alttiille vesisyvyydelle (Ignatius ym. 1980).

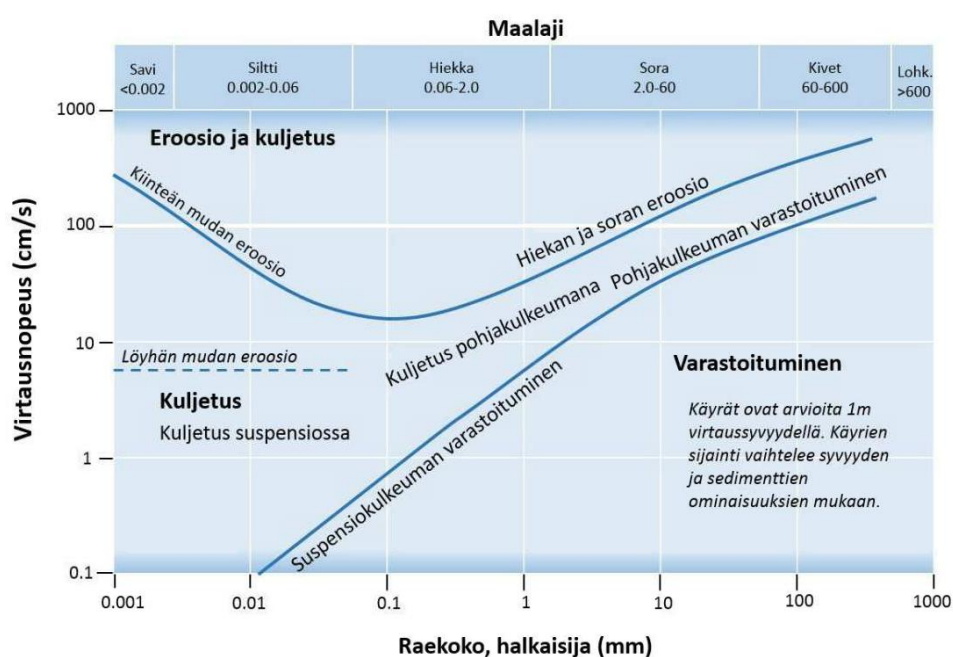
2.2 Virtaavan veden ja aaltoliikkeen kerroksia kuluttava ja liikuttava vaikutus

2.2.1 Merivirrat

Neljäntenä Nuorteva (2013) listaa virtaavan veden ja aaltoliikkeen kerroksia lajittelevan ja kuluttavan vaikutuksen. Merenpohjan sedimentaatiokerrostumia kuvaavissa kaikogrammeissa aaltojen ja merivirtausten aiheuttama eroosio näkyy tyypillisesti virtausuomina, puuttuvina sedimentaatiokerrostumina, jäännösrakenteina sekä katkeilevina ja leikkaantuvina kerroksina (Häkkinen & Åker 1991; Rantataro 1992). Virtaava vesi tyypillisesti kykenee virtausnopeuden mukaisesti lajittelemaan sedimenttiainesta raekokonsa mukaan kerroksellisesti, kuten esimerkiksi harjuihin syntyy kerroksellinen rakenne virtausolosuhteiden muuttuessa jäätikköjoen kohdatessa jäätikön reunan rauhalliset virtausolosuhteet (Nuorteva 2013). Valtamerissä erittäin voimakkaat merivirrat kykenevät muodostamaan merenpohjan kielekkeiden laiduille kontouriittimuodostumia (contourites), jotka ovat tyypillisesti päävirtaussuuntaa mukailevia hiekkaselänteitä, joiden päällimmäinen kerros on maanpäältä kulkeutuneesta aineksesta muodostuvaa hienoaineskerrostumaa (De Castro ym. 2021). Suomen merialueilla Itämeren pohjoisosissa, vallitseva rikkoinen rannikko vaikuttaa merkittävästi veden liikkeisiin kanavoiden virtauksia, kun taas ulkomerellä virtaussuunnissa on vaihtelua (Winterhalter 1972; Rantataro 1992). Suomen merialueiden saaristossa

virtaukset voivat jopa olla siinä määrin kerroksellisia, että pintavesi saattaa virrata sisäänpäin kohti rannikkoa ja pohjavesi pois päin rannikosta ulkomerelle (Rantataro 1992).

Itämeren merivirtaukset ovat tyypillisesti hyvin heikkoja, niiden kiertosuunta on coriolis-ilmiön mukaisesti vastapäiväinen sekä niiden päävirtaussuunnat ovat vuodenaikojen mukaisesti vaihtelevia (Jędrasik & Kowalewski 2019). Itämeren merivirtojen liikkeisiin vaikuttaa merkittävästi suolattoman veden laskeutuminen merialtaaseen jokien kautta, minkä seurauksena pinnalla virtaukset ovat tyypillisesti vain muutaman senttimetrin s^{-1} ja pohjalla alle 1 cm s^{-1} (Kullenberg 1981). Itämeren päävirtausten keskivoimakkuus on yleisesti hyvin heikkoa, vain noin $5\text{--}10 \text{ cm s}^{-1}$, vaikkakin voimakkaiden myrskyjen aikana voimakkuudet voivat kohota 50 cm s^{-1} tai vielä voimakkaammaksi paikallisissa kapeissa ruhjeissa (Kanarik ym. 2018). Paikoin merivirtausten nopeudet voivat olla korkeampia, kuten Merenkurkun alueella, missä virtausnopeudet ovat voimakkaammillaan jopa 1 m s^{-1} (Nuorteva 1988). Vaikkakin Itämeren merivirtaukset ovat pääasiallisesti hyvin alhaisia, ovat ne kuitenkin tarpeeksi voimakkaita estämään savi- ja hiesupartikkelien sedimentaation virtausalueilla (Ignatius ym. 1980). Hjulströmin diagrammin mukaisesti, jotta silttiä pienemmän raekoon (alle 0.01 mm) partikkelit laskeutuisivat suspensiosta ja kerrostuisivat, vaaditaan hyvin rauhalliset ja miltei olemattomat virtausolosuhteet (kuva 3).

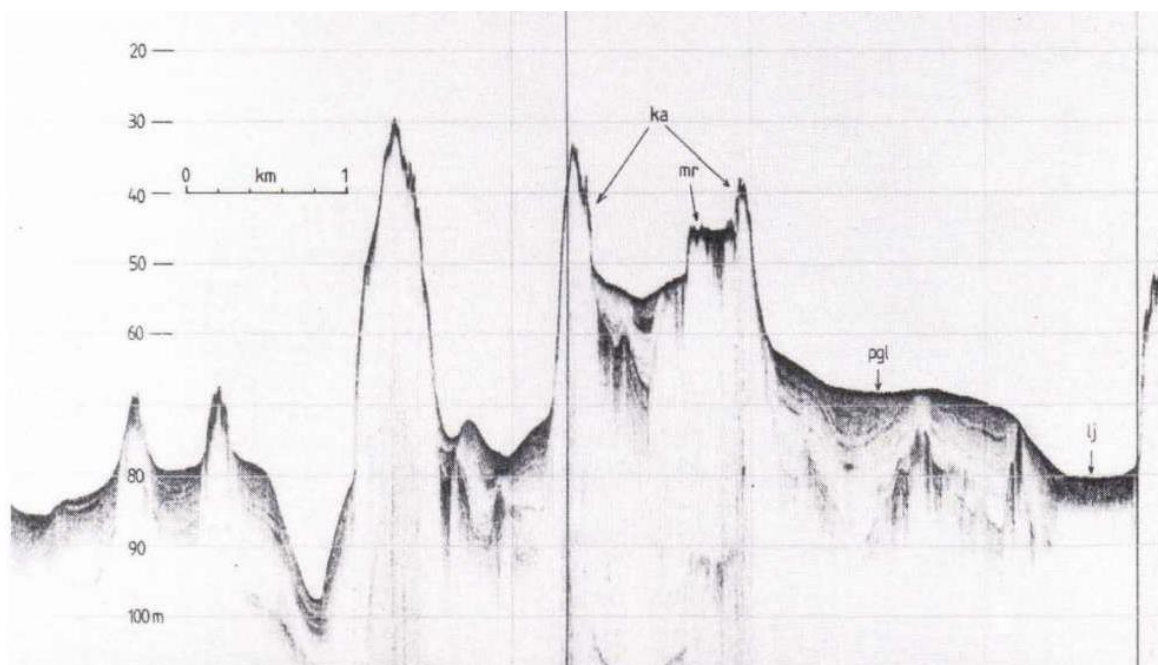


Kuva 3. Hjulströmin diagrammi, joka kuvaa raekoon ja virtausnopeuden vaikutusta aineskuljetukseen. (Kaipainen 2020 mukailen Press & Silver (1986), alkuperäinen kuva Hjulström (1935)).

Toisaalta tunnetusti hienorakeisissa sedimenteissä partikkelien väliset koheesivoimat nousevat raekoon pientyessä (Nuorteva 1988). Näin ollen, jotta savipartikkelien väliset liitokset erkanisivat toisistaan ja partikkelit lähtisivät liikkeelle kasaantumipaikastaan, vaaditaan suhteellisesti enemmän energiaa kuin esimerkiksi hiekkarakeen liikkeelle lähtemiseen (Holden 2012). Täten, vaikka savipartikkelit vaatisivatkin kasaantuakseen hyvin olemattomat virtausolosuhteet, sen uudelleen kuljetukseen lähteminen vaatii runsaasti energiaa. Näin ollen kaikogrammeista havaitut eroosiouomat heijastavat virtausolosuhteiden voimakkuutta siten, kuinka sitkeitä savikerrostumia paikalliset merenpohjan virtaukset ovat kyenneet irrottamaan uudelleen kuljetukseen. On kuitenkin huomioitava, että vaikkakin Suomen merialueilla esiintyvän liejusaven raekoko on tyyppillisesti sama kuin aikaisemmin kerrostuneilla glasiaalisilla ja postglasiaalisilla savikerrostumilla, sen partikkeleiden väliset liitokset eivät ole konsolidoituneita, minkä myötä partikkelien väliset liitokset ovat hyvin heikkoja. Tämän seurauksesta Hjulströmin diagrammista luettuna, löyhä liejusavi on lähtevä uudelleen kuljetukseen paljon alhaisemmissa virtausnopeuksissa verrattuna aikaisempiin tiiviisiin savikerrostumiin (kuva 3). Näin ollen liejusaven kasaantuminen, sen erodoituminen tai sen puuttuminen paikallisesti alueella on hyvä indikaattori sille, kuinka hydrodynaamisesti aktiivinen merialueen vesipatsas on, sillä sen partikkelit lähtevät liikkeelle hyvinkin pienistä muutoksissa hydrodynaamisessa ympäristössä.

Suomen merialueilla paikallisiin merivirtauksiin vaikuttavat erityisesti rantaviivan rikkonaisuus ja saariston mosaiikkisuus. Ruhjelaaksot, murros- sekä siirrosvyöhykkeet kanavoivat merituulia ja -virtauksia, minkä seurauksena veden liikkeet saaristoissa määräytyvät saariston topografian mukaisesti. Näin ollen Suomen merialueiden välillä virtausolosuhteetkin vaihtelevat merialueittain merkittävästi, mikä heijastuu myös merenpohjan sedimentaatioolosuhteisiin. Esimerkiksi Pohjanlahdella kapeissa virtailu- ohjaavissa uomissa muodostuu 25 metriä syviä kanjoneita, missä sedimentaatiota ei tapahdu, vaikka kanjonin yläpuolella pienemmässä vesisyvytydessä sedimentaatio on edelleen jatkuvaa (kuva 4) (Ignatius ym. 1980). Perämeren pohjan savi- ja silttikerrostumien on todettu lähtevän uudelleen kuljetukseen virtausuomissa veden virtausnopeuden noustessa 0,5–2 metriin sekunnissa (Nuorteva 1988). Vaikkakin edellä mainitut virtausnopeudet ovat alhaisia valtameriin verrattuna, kykenevät ne kuitenkin liikuttamaan merkittäviä määriä sedimenttiainesta paikaltaan uudelleen kuljetukseen. Esimerkiksi Suomenlahdella 40 metrin syvytydessä

virtausnopeuksien ollessa alle 5 cm s^{-1} irtoaa uudelleen suspensioon kiviaineista noin $5\text{--}20 \text{ kg m}^{-2}$ vuositasolla, mikä on merkittävä määrä sedimenttiainesta uudelleen kuljetuksessa luonnon voimien seurauksesta (Rasmus ym. 2015).



Kuva 4. Kaikugrammi merenpohjan sedimenttikerrostumista ja topografiasta. Vasemman korkean huipun vasemmalla puolella on havaittavissa virtauksen aiheuttama eroosiouoma. Kaikugrammin oikeassa laidassa taas on havaittavissa liejua yli kymmenen metriä korkeammalla virtausuomasta. Kaikugrammin merkinnät ovat kallio (ka), moreeni (mr), postglasiaalisavi (pgl) sekä liejusavi (lj). (Nuorteva 1988)

Saaristomerellä saariston mosaiikkinen rakenne heijastuu niin sen topografiaan kuin vesimassan olosuhteisiin. Saaristomeren pohjanvirtaus poikkeaa Itämeren syvänteiden hydrodynaamisista olosuhteista siinä, että yleisesti Itämerellä syvimmillä alueilla pohjan olosuhteita kuvastavat hapettomuus ja stabiilius, kun taas Saaristomeren syvänteiden ruhjelaaksoissa voimakkaat pohjan virtaukset sekoittavat vettä ja näin ollen parantavat syvänteiden happiolosuhteita (Virtasalo ym. 2005). Saaristomerellä veden virtausnopeus on tyypillisesti alle 10 cm s^{-1} , mutta virtaussuuntiin ja -voimakkuuksiin vaikuttavat paikallisesti Itämeren päävirtaussuunta, alueelliset ilmanpaine-erot sekä aallot (Suominen ym. 2010). Toisaalta Saaristomeren virtausolosuhteissa on merkitseviä eroja pinnan ja pohjan virtausten välillä. Merenpinnan virtaussuunta on vaihteleva niin suunnaltaan kuin voimakkuudeltaan läpi vuoden, kun taas pohjan virtaus on voimakkuudeltaan sekä suunnaltaan paljon vakaampi vuodesta toiseen (Tuomi ym. 2018). Näin ollen virtausnopeudet vaihtelevat pinnalla $0.08\text{--}1.3 \text{ m s}^{-1}$, kun taas pohjalla pohjan keskivirtaus on noin 0.07 m s^{-1} (Tuomi ym. 2018).

Saaristomeren virtausolosuhteisiin verrattuna Suomenlahden virtauskenttä on erittäin dynaaminen. Sen suolapitoisuuden vaihtelut tekevät virtauksista syklonisia ja barokliinisiä, minkä lisäksi päävirtaukseen vaikuttavat tuulet, coriolis-ilmiö, meriveden kumpuaminen sekä vedenkorkeusvaihtelut (Rasmus ym. 2015; Westerlund ym. 2017). Suomenlahden sykloninen päävirtaus on seurausta vesimassojen suolapitoisuuden vaihtelun tuottamista tiheyseroista, kun taas lyhyt aikaiset virtaukset syntyvät tuuliolosuhteiden muutoksien mukaisesti (Westerlund ym. 2017). Suomenlahden sisäänvirtaus tapahtuu syklonisesti Viron puolella eteläisellä rannikolla, missä virtausnopeudet ovat 4–6 cm s⁻¹ ja ulosvirtaus taas Suomen puolella pohjoiselta rannikolta, missä virtaukset ovat jopa pohjalla 5–9 cm s⁻¹ (Alenius ym. 1998; Suursaar 2010; Maljutenko & Raudsepp 2019). Toisaalta Suomenlahden keskiosissa vesi voi virrata pitkäaikaisestikin 20 cm s⁻¹ (Rasmus ym. 2015). Kaiken kaikkiaan, vaikka virtausolosuhteet Suomen merialueilla ovatkin yleisesti hyvin rauhalliset, ovat ne kuitenkin dynaamisesti vaihtelevia siirryttäessä merialueelta toiselle. Näin ollen tarkastellessa virtausolosuhteiden vaikutusta merenpohjan sedimentaatio-olosuhteisiin on huomioitava merialueen paikallisten virtausten ominaispiirteet.

2.2.2 Aallot

Toinen merenpohjan sedimentaatioon vaikuttava hydrodynaaminen tekijä on aaltoliike. Aaltoeroosion toimesta jo aikaisemmin kerrostuneet sedimenttikerrostumat voivat irtautua ja huuhtoutua muualle (Nuorteva 1988). Ignatius ym. (1980) mukaisesti Pohjanlahden sedimenteistä tehtyjen havaintojen perusteella aaltoliikkeen aiheuttaman turbulenssin vaikutus riittäisi estämään nuorien sedimenttikerrostumien muodostumisen alle 50–70 metriä matalammassa vedessä ulappaolosuhteissa. Näin ollen Suomen rannikon edustalta on havaittavissa syvyysvyöhyke, missä aaltojen liike on riittävä estämään hienojakoisen aineksen kasautumisen, mutta liian pieni pystyäkseen nopeasti kuluttamaan aikaisemmin syntyneitä sedimenttikerrostumia (Nuorteva 1988). Toisaalta hetkellisesti muodostuvat myrskyaallot kykenevät kuluttamaan merenpohjaa syvemmältä kuin mitä voidaan määrittää yleisesti eroosio- ja sedimentaatiolta vapaaksi ympäristöksi. Nuorteva ja Kankaanpää (2016) toteaa, että merkitsevän aallonkorkeuden ollessa 2.7 metriä kykenee aallosta aiheutuva vesipatsaan turbulenssi kuluttamaan sedimenttejä jopa 39 metrin syvyydestä ja 1.9 metrin aalto 27 metrin syvyydeltä. Kuitenkin paikoin voimakkaiden myrskyjen aikana yksittäisten aaltojen

korkeus voi olla Suomen merialueilla jopa 8 metriä, mikä saattaa aiheuttaa eroosiota entistä syvemmillä äärimmäisissä aalto-olosuhteissa (Björkqvist ym. 2017).

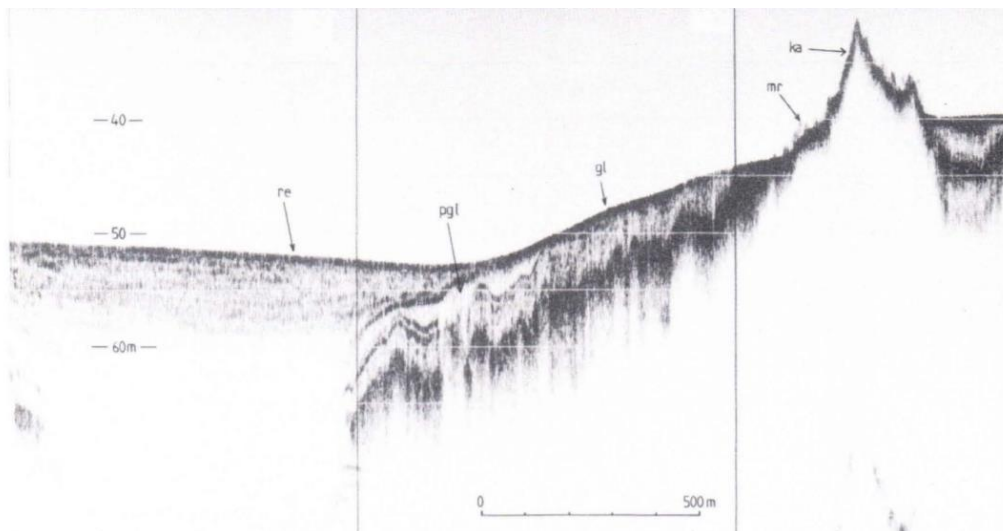
Toisaalta on huomioitava millaisia sedimenttejä aallot myrskyjen aikana kaiken kaikkiaan kuluttavat merenpohjasta. Itämeren sedimenttien tunnetaan yleisesti olevan hyvin ravinnerikkaita ja pohjan olosuhteiden olevan paikoin hapettomia. Tämän seurauksesta Itämeren merenpohjassa tapahtuva sisäinen kuormitus vapauttaa hapettomissa olosuhteissa merenpohjan sedimentteihin aikaisemmin varastoituneita ravinteita, kuten esimerkiksi fosforia, joka tunnetusti vaikuttaa Itämeren rehevöitymiseen voimakkaasti (Puttonen ym. 2016). Näin ollen aaltojen myllätessään merenpohjan sedimenttejä myrskyaikoina, laittavat ne uudelleen liikkeelle jo kertaalleen kerrostuneet ravinnepitoiset savikerrostumat, minkä myötä savipartikkelien sekä fosforin määrä vesipatsaassa lisääntyy (Bryhn & Håkanson 2011). Lisäksi Bryhn ja Håkansson (2011) toteaa, että ilman maankohoamisen tuomaa vesisyvyyden laskua eivät Itämeren ravinnepitoiset sedimentit olisi niin alttiita aaltojen aiheuttamalle pohjaneroosiolle eivätkä myöskään vapauttaisi fosforia runsaasti vesipatsaaseen. Toisaalta Nuorteva ja Kankaanpää (2016) toteaa tutkimuksessaan liejusaven eroosiosta rannikko-olosuhteissa, että erodoituneen aineksen liike olisi eteläsuuntaista. Näin ollen ravinnepitoinen sedimentti kykenee jatkamaan liikettään Suomen rannikoilta kohti Itämeren syvänteitä, jossa se kerrostuu valmiiksi hapettomiin olosuhteisiin, missä sen ravinteet pääsevät vapautumaan ja edesauttamaan vesistön rehevöitymistä.

2.3 Akustiset tutkimusmenetelmät

Jotta merenpohjan sedimenttien nykyisiin ja menneisiin eroosioympäristöihin päästäisiin käsiksi, tulee tutkimusmenetelmien päästä pohjan pintaa syvemmälle. Akustisilla kaikuluotausmenetelmillä kyetään luomaan tähän tarkoitukseen kaikuprofiileja, jotka kuvastavat sedimenttikerrostumien rakenteita, niin kuin ne pohjalle ovat aikoinaan laskeutuneet. Sedimenttikerrostumien akustisessa kaikuluotaamisessa (sediment echo sounding) merenpohjaa kohti lähetetään äänipulsseja, jotka kimpoavat takaisin kohdatessaan pohjan sedimenttikerrostumia. Kohdatessaan sedimenttikerrostuman ääniaallon nopeus muuttuu, taittuu ja heijastuu takaisin, muodostaen kaikuprofiiliin rajapinnan (Nuorteva 1988). Äänen taittuminen sedimenttikerrostumista on verrannollista niiden impedanssiin eli näennäisvastustuskykyyn sekä näin ollen kerrostumien huokoisuuteen (Smith & Li 1966).

Jokaisella sedimenttikerrostumalla on oma vastakaiku, jonka myötä akustiseen kaikuprofiiliin muodostuu useita rajapintoja vastaamaan muuttuvia fysikaalisia sedimentaatio-olosuhteita. Näin ollen rajapinnoista kyetään päättämään sedimentaatiokerrostuman fasies, jonka avulla esimerkiksi Itämeren sedimenttikerrostumat saadaan jaettua omiin yksiköihinsä muodostumisajankohtansa mukaisesti (Nuorteva 1988).

Rajapintojen tulkinta ei kuitenkaan ole aina yksioikoista vaan vaatii tulkitsijalta kykyä kyseenalaistaa tehdyt päätelmänsä (Smith & Li 1966). Ääniaallon sirontaan vaikuttaa erityisesti heijastavan merenpohjan karheus (roughness), jota aiheuttaa esimerkiksi sedimenteissä oleva kasvillisuus tai vesikolumnin turbulentsuus aaltojen tai virtauksen seurauksena (Eidem & Landmark 2013). Erityisesti löyhärakenteinen lieju on myös Nuorteva (2012) mukaan pölisevää, mikä aiheuttaa sameutta pohjan vesikerrostumiin ja näin ollen vaikeuttaa ääniaaltojen taittumista. Tämän lisäksi resanttisen liejun orgaanisen aineksen pitoisuus aiheuttaa kaiun oksilloitumista kaasukuplissa, mikä myötä ääniaallon penetraatio tällaiseen sedimenttikerrostumaan voi jäädä hyvin pieneksi (Heino 1973; Nuorteva 1988;). Vaikka nämä edellä mainitut resanttisen liejusaven erityispiirteet häiritsevätkin rajapintojen piirtymistä kaikuprofiiliin, ne toisaalta myös helpottavat liejusaven havainnoimista muiden hienoaineskerrostumien joukosta (kuva 5).



Kuva 5. Kaikugrammi merenpohjan sedimenttikerrostumista, missä vasemmalle syvänteeseen vajonneen liejusaven kaasupitoisuus tai sen sisältämä orgaaninen aine aiheuttaa häiriöitä ääniaallon penetraatioon ja sen alapuolisten kerrostumien piirtymiseen. Kaikugrammin merkinnät ovat kallio (ka), moreeni (mr), glasiaalisavi (gs), postglasiaalisavi (pgl) ja resanttinen liejusavi (re). (Nuorteva 1988)

Akustisilla kaikuluotausmenetelmillä kyetään erottelemaan erityisesti kovat ja pehmeät kerrostumat toisistaan (Nuorteva 1988). Kaikkein karkeimmat ainekset kuten kallio, moreeni ja hiekka, näkyvät kaikuprofiileissa tyypillisesti vain pintaviivana, koska ääniaallot eivät kykene penetroitumaan niiden sisään (Heino 1973). Sen sijaan savikerrostumat heijastuvat takaisin niiden sedimenttifasieksensa mukaisesti. Kaikilla Itämeren vaiheita peilaavilla sedimenttikerrostumilla on omankaltainen kaikunsa, minkä mukaisesti ne voidaan tunnistaa ja erotella toisistaan kaikuprofiileista. Tyypillisesti savikerrostumat piirtyvät sitä vaaleampina mitä huokoisempia ne ovat (Nuorteva 1988). Näin ollen resenttinen liejusavi on yleensä päällimmäinen erittäin vaalea kerrostuma, kun taas glasiaalisavi on alimmaisina tumma, tiivis ja raidallinen savikerros kovan pohjan päällä. Vaikkakin merenpohjan kairausnäytteissä savikerrokset ovatkin vuosikerrallisia, niin todellisuudessa kaikuprofiileihin piirtyvät fasieksien sisäiset raidat harvoin heijastavat todellisia kerroksia, vaan ovat useiden heijastumien interferenssi (Nuorteva 1988). Toisaalta fasieksien sisällä kerrostuminen voi olla hyvin homogeenistä, mikä on tyypillistä vuosikerrattomille postglasiaalisaville (Häkkinen 1990). Näin ollen postglasiaalisavet piirtyvät kaikugrammeihin paksuhkoina vaaleina kerrostumina, joita tyypillisesti leikkaa keskeltä Ancylus-sedimenttien tumma raita (Nuorteva 1988).

2.4 Tutkimusalue

Tutkimusalueena toimii Suomen eteläiset merialueet. Aineistot ovat pääsääntöisesti eri puolilta Saaristomerta, Ahvenanmerta sekä Suomenlahtea. Valittujen kaikugrammiprofiilien tarkkoja sijainteja merialueilla ei tulla tuomaan julki, vaan ne sijoitetaan ainoastaan Merisotakoululle tuotettavaan liitteeseen.

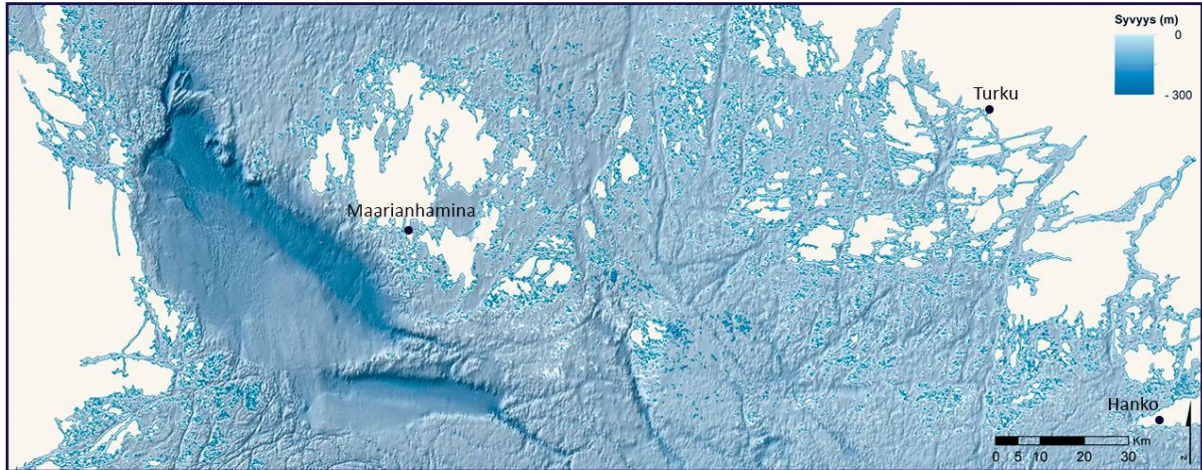
Ahvenanmaan saaristo sijaitsee Suomen lounaisen saariston ja Ruotsin välissä (kuva 6). Siihen kuuluu noin 6500 saarta, jotka mosaiikkisesti aukeavat sulkeutuneesta rannikosta avoimeen ulkosaaristoon (Bonsdorff ym. 1996). Ahvenanmaan saaristo on hyvin heterogeeninen rakenteeltaan, mikä heijastuu muun muassa sen veden lämpötilaan, suolaisuuteen sekä happipitoisuuteen (Weigel ym. 2015). Tämän seurauksesta erot mittausarvoissa rannikon rauhallisten lahtien ja ulkomeren välillä voivat olla hyvinkin jyrkkiä. Ahvenanmerellä on noin 8000 kilometriä rantaviivaa ja keskisyvyys on 20–25 metriä, vaikkakin suurin osa rannikosta on alle 10 metriä syvää (Bonsdorff ym. 1996; Kremp ym. 2009). Ahvenanmeren suolaisuus on

noin 6–7 PSU (Kremp ym. 2009). Ahvenanmeren kallioperän erikoisuutena on rapakivikalliot, mutta enimmäkseen sen merenpohjan pintamateriaali on lasiaali- tai postglasiaalisavea (Vallius 2020). Ahvenanmaan pääsaaren kyljessä olevan Lumparlandin lahden pohjasta on löydetty runsaasti kaasukumpuja, joista purkautuu ulos metalleja kuten kuparia ja nikkeliä (Vallius 2020).

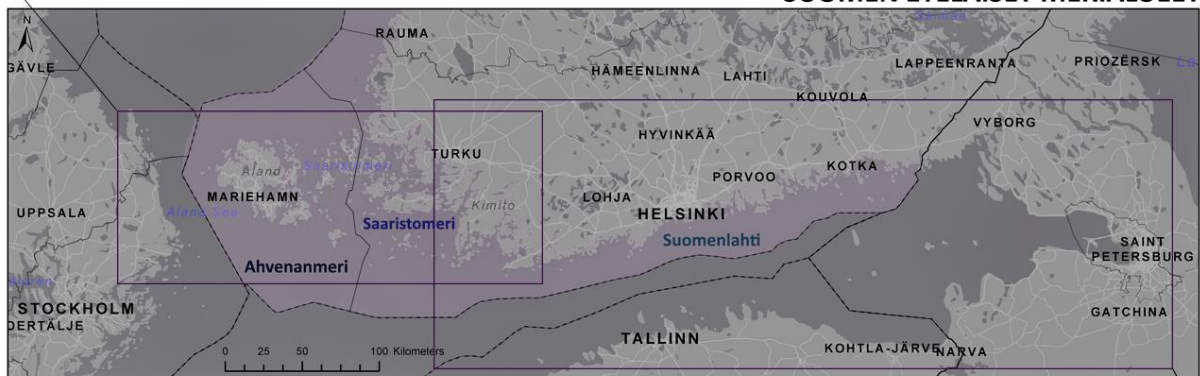
Saaristomeri on vesistö Ahvenanmaan ja Manner-Suomen välissä (kuva 6). Suomella on toiseksi pisin rantaviiva (46 600 km) Euroopassa, mistä Saaristomerellä on yli 14 400 kilometriä (Tolvanen & Suominen 2005; Koitilainen & Kaskela 2017). Saaristomerellä on noin 25 000 saarta, joiden koko on yli 500 m² (Tolvanen & Suominen 2005). Saaristomeri on kuitenkin hyvin matala vesistö. Sen keskisyvyys on 23 metriä, mutta ruhjelaaksojen syvimmissä kohdissa voi olla jopa yli sata metriä syvyyttä (Luhtala ym. 2013). Ruhjelaaksot, murros- sekä siirrosvyöhykkeet ovat avanneet kallioperän Saaristomerellä luoden saaristosta mosaiikkisen niin rakenteeltaan kuin vesimassojen koostumukseltaan. Pintakerroksen suolaisuus vaihtelee jokisuistojen alhaisista pitoisuuksista ulkomeren noin 7 PSU eikä merialueella ole stabiilia halokliinia (Suominen ym. 2010; Luhtala ym. 2013). Saaristomeren rikkonaista kallioperää peittävät tyypillisesti moreeni-, glasifluviaali- sekä savikerrostumat.

Suomenlahti on Suomen ja Viron väliin jäävä lahti Itämeren koillisella puolella (kuva 6). Se on laajuudeltaan noin 30 000 km², millä se kattaa on 5 % koko Itämeren volyymista (Rasmus ym. 2015). Suomenlahden keskisyvyys on 37 m ja maksimi syvyys 123 m (Rasmus ym. 2015). Suomenlahden virtauskenttä on erittäin dynaaminen. Sen suolapitoisuuden vaihtelevuus tekee virtauksista syklonisia ja barokliinisiä, minkä lisäksi päävirtaukseen vaikuttavat tuulet, coriolis-ilmiö sekä vedenkorkeusvaihtelut (Rasmus ym. 2015). Suomenlahden suolapitoisuuteen vaikuttaa erityisesti Itämeren suurimman yksittäisen suolattoman veden lähteen Nevajoen laskeutuminen lahden pohjaan, minkä seurauksena sen suolapitoisuus lännessä on noin 5–6.5 PSU ja itäisessä päädyssä vain noin 0.3 PSU (Soomere ym. 2008). Suomenlahden merenpohjan geologia on hyvin samankaltainen maaperän koostumukseltaan kuin Saaristomeri, missä pohjalta löytyy glasigeenistä moreenia ja tämän päältä erinäisiä glasifluviaalisia, glasilakustrisia, lakustrisia sekä postglasiaalisia kerrostumia Itämeren vaiheiden mukaisesti (Zhamoida ym. 2017).

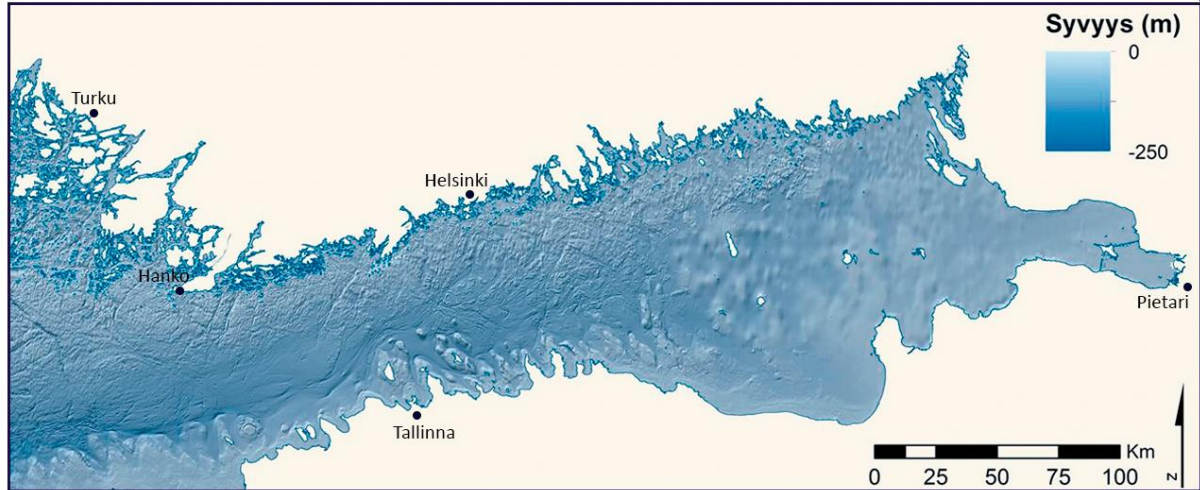
AHVENANMERI JA SAARISTOMERI



SUOMEN ETELÄISET MERIALUEET



SUOMENLAHTI



Kuva 6. Tutkimusalueen syvyys mallit merialueittain. (Mukaillen @SYKE, aineistot EMODnet Bathymetry Consortium, 2018; taustakartat ja merialuerajat @MML)

3 Aineisto ja menetelmät

Aineistona käytetään Rannikkolaivaston 4. Miinantorjuntalaivueen keräämiä akustisia kaikugrammiaaineistoja. Aineisto on kerätty vuosien 2014–2021 välillä käyttäen TOPAS-laitteistoa. Aineiston kaikuluotaimissa jaksoluku eli lähetystaajuus on 5 kHz, mikä on matala lähetystaajuus. Matalan lähetystaajuuden etu on, että se tunkeutuu hyvin pohjaan, mutta sen erottelukyky voi olla heikko (Nuorteva 1988). Aineistojen pulssin äänennopeus on 1460–1500 m/s väliltä, mikä on reseranttisen liejusaven ideaali heijastusäänennopeus haara (Taulukko 1). Käytetyn pulssin muoto on Ricker, joka on yleisesti käytetty yleisaallonmuoto vähillä parametreillä (Gholamy & Kreinovich 2014). Se on yksittäinen äänipulssi, jolla saadaan korkea resoluutioista aineistoa. Aallon amplitudin muutosta $x(t)$ kuvaa signaalin muutos ajassa hetkellä t_0 ja parametrin σ arvon muutos, jolloin saadaan aallon pituus matkassa:

$$x(t) = (1 - ((t - t_0)^2 / \sigma^2)) \cdot \exp(-((t - t_0)^2 / 2\sigma^2))$$

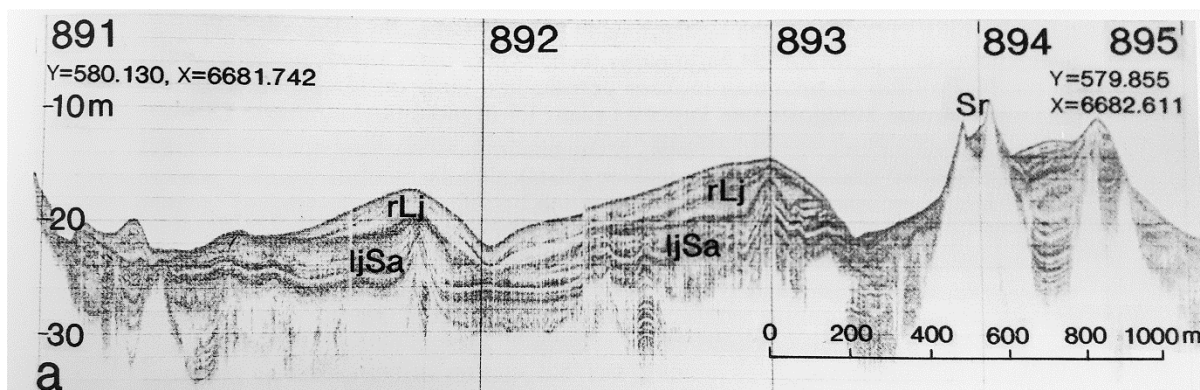
Aineistot konvertoidaan ensin TOPAS:ksen omalla ohjelmalla raaka-aineistosta seg-aineistoksi ja aineistojen laatu tarkistetaan samalla katseluohjelmalla. Seg-aineisto viedään Sonarwitz-ohjelmaan, jossa aineistoja voidaan tarkastella ja visualisoida. Sonarwitz ohjelmasta kaikugrammiaaineistot viedään valokuva-aineistoksi, jotka voidaan visualisoida ja esittää tutkielmassa julkisena Merivoimien tutkimusluvalla.

Taulukko 1. Äänen kulkunopeus sedimenttikerrostumissa Nuortevaa (1988 mukaillen).

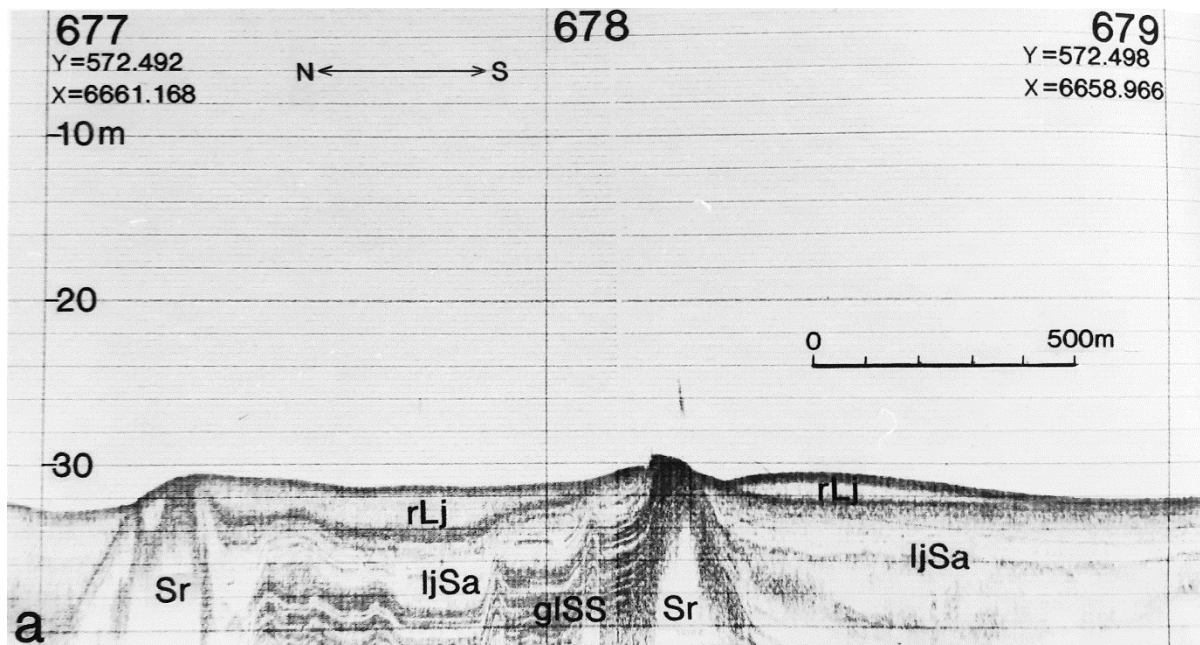
Maalaji	Äänennopeus (m/s)
reseranttinen liejusavi	1300–1480
postglasiaali- ja glasiaalisavet	1500–1700
hiekat	1800

Menetelmällisesti tutkielmassa tulkitaan akustisin luotausmenetelmin tuotettuja kaikuprofiileja, joita valittiin 10 kappaletta erinäisistä hydrodynaamisista olosuhteista sekä vesisyvyyksistä. Valituista kaikugrammeista etsitään ja visualisoidaan reseranttisen liejusaven kerrostumia sekä eroosiopintoja, joita tyypillisesti aallot sekä merenpohjan virtaukset aiheuttavat (kuva 4 ja 7). Liejusaven voi tunnistaa sen vaaleasta ja homogeenisestä olomuodosta, joka on kumpuileva (kuva 8). Tämän lisäksi sen kerrostumissa on havaittavissa

näkökatkoksia kaasukerrostumien aiheuttamien häiriöiden myötä. Eroosiopinnat taas ovat yleensä kuluneita sedimenttikerroksia, joissa on havaittavissa epäjatkuvuuspintoja tai kokonaan puuttuvia kerroksia. Eroosiopinnat ovat yleensä karkeita ja saattavat vajota uomana muun ympäristön alapuolelle (kuva 7). Tuloksissa pyritään hahmottamaan syy-seuraus-suhdetta resanttisen liejusaven ja hydrodynaamisten prosessien esiintymiselle yhdessä tai erikseen ja näin ollen käsittelemään niiden käyttäytymistä merenpohjassa.



Kuva 7. Kaikugrammi Suomenlahden vaihtelevista sedimenttikerrostumista ja korkeuseroista. Lisäksi kuvassa on havaittavissa eroosion aiheuttamia epäjatkuvuuspintoja. Kaikugrammin selitteet ovat sora (Sr), liejusavi (ljSa) ja resanttinen lieju (rLj). (Rantataro 1992)



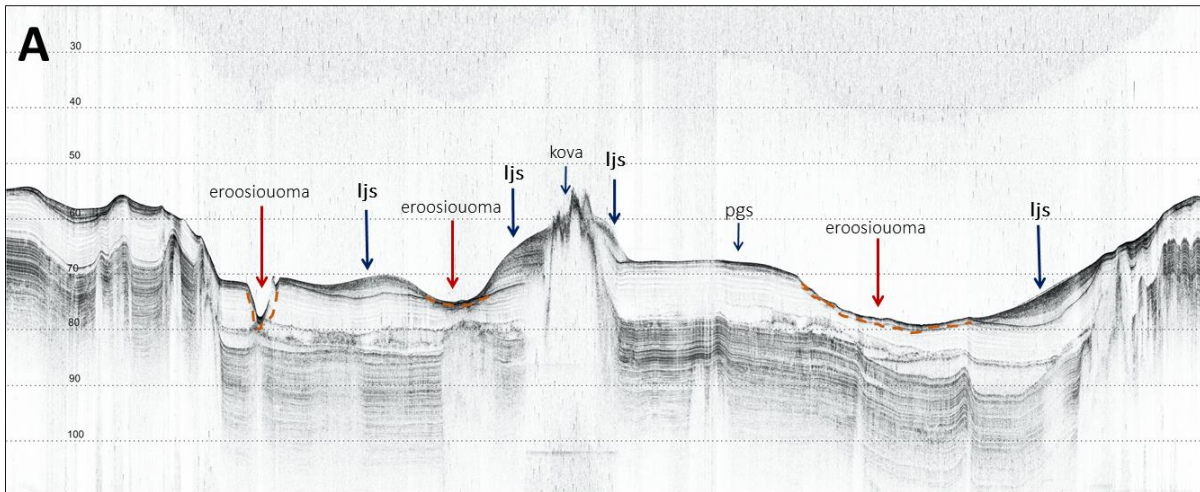
Kuva 8. Kaikugrammi Suomenlahden sedimenttikerrostumista laakeammasta korkeusprofiilista. Kaikugrammin selitteet ovat sora (Sr), liejusavi (ljSa) ja resanttinen lieju (rLj). (Rantataro 1992)

4 Tulokset

4.1 Merivirrat kaikogrammeissa

Ensimmäisessä kaikogrammissa A on havaittavissa virtausolosuhteita merenpohjan tuntumassa (kuva 9). Kaikogrammista on havaittavissa kolme erilaista tai eri vaiheista virtausuomaa, jotka ovat alkaneet kuluttaa merenpohjan postglasiaalisia sedimenttikerrostumia. Vasemmassa laidassa on yksittäinen erittäin jyrkkäreunainen virtausuoma. Uoman syvyys katseluohjelmalla mitattuna on 5 metriä. Vähän matkan päässä uoman oikealla puolella on havaittavissa toinen muodoltaan laakeampi virtausuoma, jonka etenemistä alemmas todennäköisesti estää jokin kovemman aineksen huippu. Tämän näkyy pienenä kumpuna uoman alapuolella sekä häiriöinä uoman alapuolella, joka viestii mahdollisesta sedimenttikerrostumien alaisesta kovan aineksen esiintymästä. Tämän virtausuoman molemmilla laidoilla on havaittavissa pehmeämpää sedimentaatiota, joka on tunnistettavissa sen alakontaktissa olevasta erittäin tummasta kerrostumasta sekä kontaktin yläpuolella olevien kerrostumien homogeenisyydestä ja kumpuilevuudesta.

Kaikogrammi A:n oikeassa laidassa on havaittavissa yksittäinen laakeampi eroosiuoma, joka leikkaa postglasiaalisia kerrostumia runsaasti niin leveys- kuin syvyysuunnassa. Tämä viestii pitkäaikaisesta voimakkaasta virtauksesta, jonka voimakkuus on tarpeeksi suuri irrottamaan savipartikkeleiden sidoksia toisistaan. Virtausuoman oikealla laidalla on havaittavissa pehmeämmän aineksen kasauma, joka nousee rinnettä ylös. Rinteen jyrkkyys on kuitenkin kaikogrammissa todellista jyrkempi, jolloin todennäköisesti tässä tilanteessa hienoaines on vain levinnyt kauemmas vienoon ylämäkeen. Kaikissa kolmessa virtausuomassa on kuitenkin havaittavissa uoman välittömässä läheisyydessä hienoaineskerrostumia. Kaikogrammin tutkimusalue kertoo myös virtauksien pirstaleisuudesta, missä alueellisesti ei vaikuta vain yksi merkittävä virtaus vaan useampia eri tasoisia yksittäisiä virtauksia. Tutkimusalueen virtauskenttä tavallaan muistuttaa palmikoituvan joen haarautumista useammaksi pienemmäksi alajoeksi.



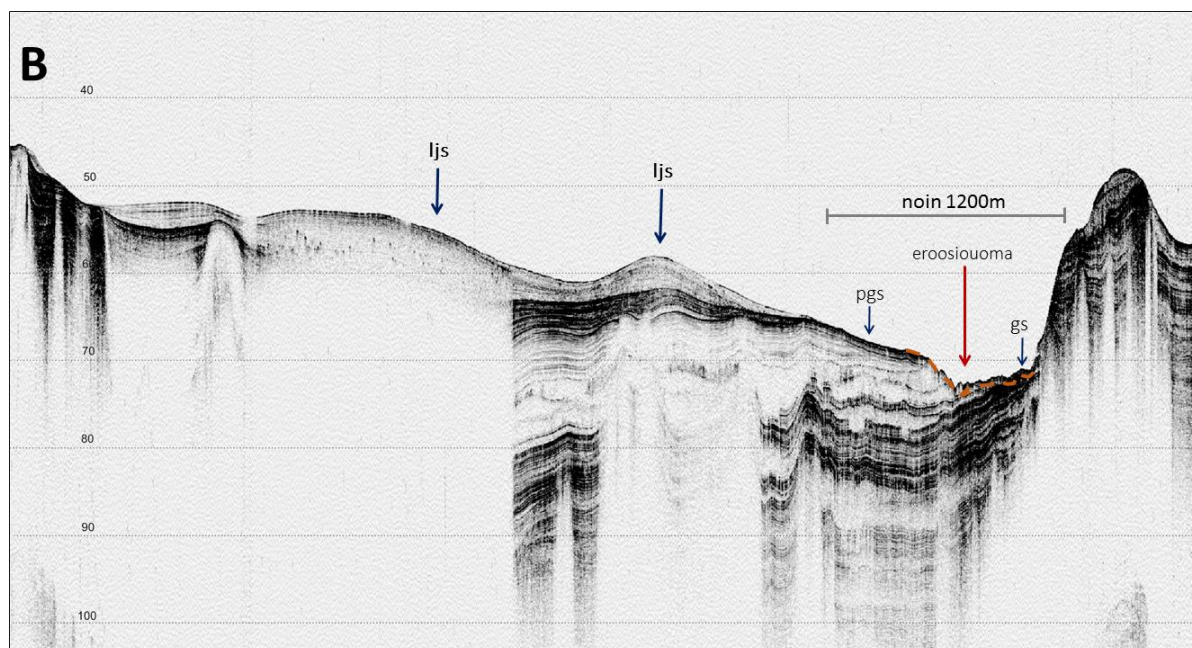
Kuva 9. Kaikugrammissa on havaittavissa kolme virtausuomaa, jotka kaikki ovat eri kokoisia ja syvyisiä. Nuolet osoittavat liejusaven (ljs) muodostamia pehmeitä kerrostumia, postglasiaalisia savia (pgs) sekä kovaa ainesta, joka voi olla hiekkaa, moreenia tai kalliota. Kaikugrammi on kerätty Saaristomereltä.

Kaikugrammissa B on havaittavissa yksittäinen voimakas eroosiuoma, jonka veden virtausta rajoittaa topografiset tekijät (kuva 10). Ignatius ym. (1980) on nimennyt tämän kaltaisen epäsymmetrisen kasautumisen jyrkänteiden laidoille differentiaaliseksi kerrostumiseksi. Heidän mukaansa tämä viestii paikallisista pohjan läheisistä vesimassojen virtauksista. Veden virtaus on havaittavissa kaikugrammissa oikeassa laidan eroosiuomassa, jossa savikerrostumat ovat selkeästi kuluneet pois ja jäljelle on jäänyt epäjatkuvuuspinnoja postglasiaalisissa kerrostumissa. Kuluneen eroosiuoman pinta on hyvin karhea ja rikkonainen. Huomioiden uoman syvyys ja pois kuluneen sedimenttikerrostuman määrä, paikallinen virtaus on todennäköisesti virrannut paikalla jo pitkään eikä ole vain yksittäinen tapahtuma.

Eroosiuoman vasemmalla puolella on havaittavissa hyvin selkeä resenttisen liejusaven kasauma, joka jatkuu kumpuilevana pitkälle laakeaa rinnettä ylöspäin. Kyseinen kasauma on tunnistettavissa resenttiseksi liejusaveksi sen vaalean ja homogeenisen kerrostumuksen mukaan. Havaintoa tukee myös kaikugrammissa havaittava häiriö, joka johtuu resenttisen liejusaven kaasupitoisuudesta ja orgaanisesta aineksestä. Näistä johtuen tutkimuslaitteesta lähtevä ääni siroutuu eikä kykene tunkeutumaan alempiin sedimenttikerrostumiin. Näin ollen resenttisen liejusavikerrostuman ollessa tarpeeksi paksu tai kaasupitoinen ja orgaanista ainesta sisältävä, ei kaikugrammiin piirry liejusavikerrostuman alaisia sedimenttikerrostumia.

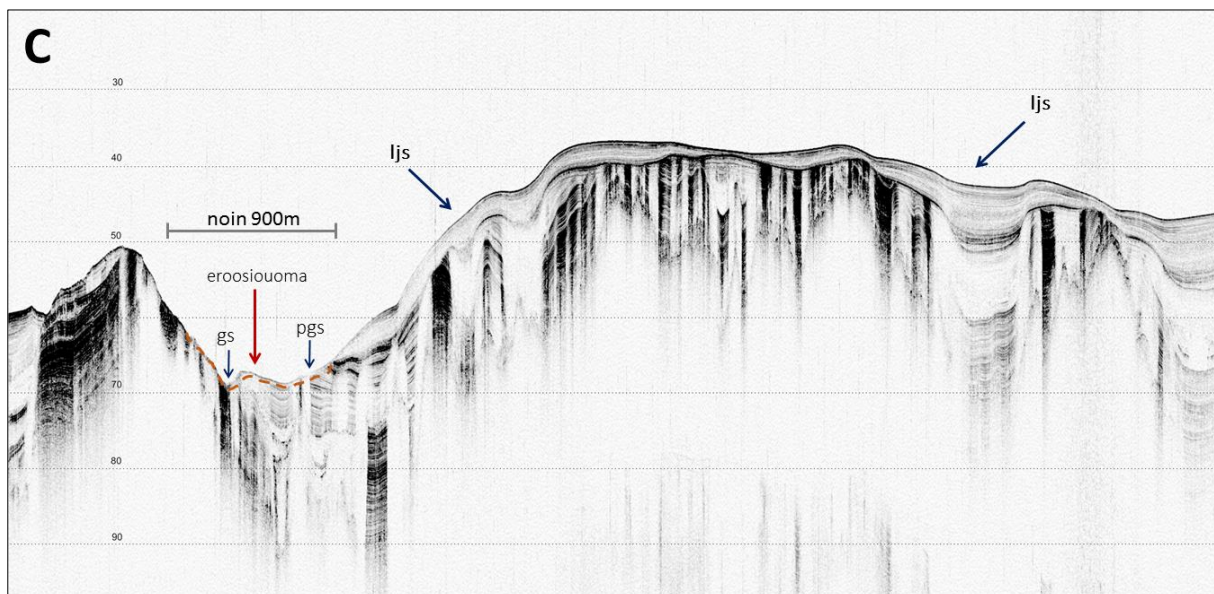
Tämä toimii näin ollen toimii indikaattorina tunnistettaessa resenttistä liejusavea muista sedimenttikerrostumista.

On myös huomioitava, että kaikugrammi A:n tapaan virtausuoman läheisyydessä on havaittavissa resenttisen liejusaven kasauma. Kasauma ei ole ainoastaan uoman välittömässä läheisyydessä vaan jatkuu pitkälle kauas virtausuomasta. Arvioidessa, onko paikalla ollut ensin virtausuoma ja siitä seurannut liejusavikasauma vai pehmeän liejusaven täyttämä syväne, jonne on syntynyt myöhemmin virtausuoma, tulee kiinnittää huomiota virtausuoman ja resenttisen liejusaven kontaktiin. Liejusavikasauman oikeassa laidassa on havaittavissa, että sen alainen postglasiaalinen savikerros on kulunut pois viettäen virtausuomaa kohti. Alla oleva päällimmäinen postglasiaalinen savikerros katoaa kiilamaisesti lähestyttäessä uomaa, mikä kertoo siitä, että siitä on kulunut kerrostumia pois jo ennen, kun sen päälle on alkanut uudelleen kerrostumaan tavaraa. Näin ollen voidaan tehdä johtopäätös, että resenttisen liejusaven kerrostuminen on muodostunut virtauksen aikana tai ainakin sen virtaamisen alkamisen jälkeen (kuva 16 A).



Kuva 10. Kaikugrammin oikealla puolella on selkeä eroosiuoma (oranssilla) ja uoman vasemmalla puolella on resenttisen liejusaven (ljs) kasauma. Virtausuoman leveys on noin 1200 metriä ja sen pohjalla on havaittavissa postglasiaali- (pgs) ja glasiaalisavea (gs). Kaikugrammi on kerätty Saaristomereltä.

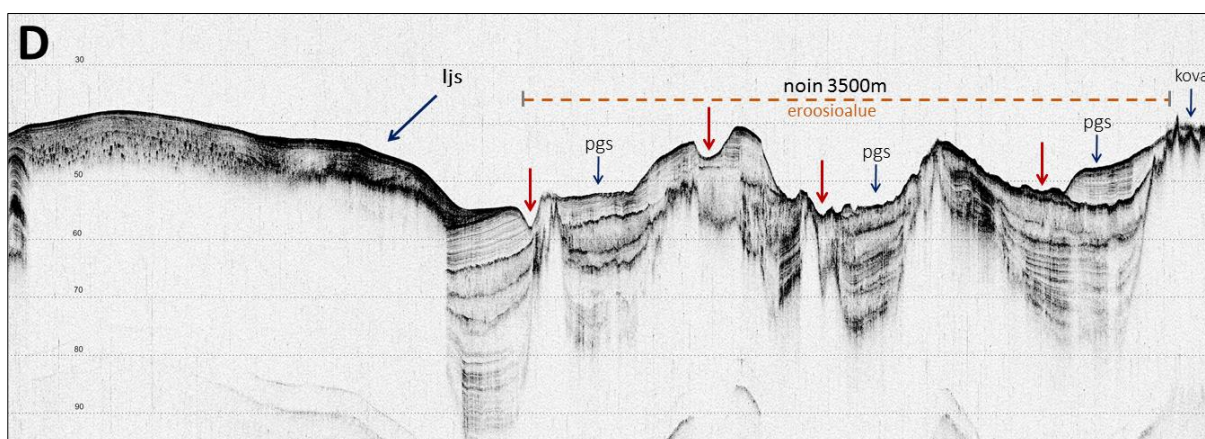
Topografian määräämä epäsymmetrinen jakautuminen toistuu myös muissa kaikugrammeissa. Kaikugrammissa C on B:n kaltainen epäsymmetrinen sedimenttijakauma, mutta merkittävää on, kuinka kauas sekä korkealle resenttisen liejusaven kerrostuminen jatkuu virtausuomasta (kuva 11). Resenttinen liejusavi nousee jopa noin 20 metriä jyrkkään ylämäkeen virtausuoman viereiselle kukkulalle sekä yli kahden kilometrin päähän uomasta. Kaikugrammissa C on huomioitava, että alue todennäköisesti on myös muutenkin otollinen ympäristö resenttisen liejusaven kasautumiselle eikä kaikki kerääntynyt aines välttämättä ole virtauksen aiheuttamaa. Kuitenkin muut vastaavanlaiset kaikugrammit huomioiden, voi tehdä johtopäätöksen, että veden virratessa niin voimakkaasti, että se kuluttaa itselleen virtausuoman on jotakin tekemistä resenttisen liejusaven kasautumisen kanssa. Kuitenkin kaikugrammi B:stä poiketen kaikugrammi C:n liejusavi ei ole koostumukseltaan äänialtoja häiritsevä, vaan resenttisen liejusaven alaisetkin kerrostumat näkyvät. Häiriöitä sedimentteihin aiheuttaa lähinnä sedimenttien alainen kallioperän vaihteleva topografia, joka hankaloittaa kaiun palautumista geometrisesti oikeassa kulmassa.



Kuva 11. Kaikugrammi, jonka vasemmassa laidassa on havaittavissa eroosiουoma (oranssilla) ja sen oikealla puolella resenttisen liejusaven (ljs) kerrostumia, jotka nousevat ylämäkeen jopa 30 metriä ylöspäin. Saaristomereltä kerätyn näytteen virtausuoman leveys on noin 900 metriä. Virtausuoman pohjalla havaittavissa postglaciaalisavea (pgs) sekä glaciaalisavea (gs).

Kaikugrammissa D toistuu edellisten kaikugrammien kaltaiset virtausolosuhteet, mutta syntynyt eroosiουoma on erittäin leveä sekä kulunut (kuva 12). Tässä kaikugrammissa virtauksen aiheuttamasta eroosiουomasta on havaittavissa selkeitä epäjatkuvuuspintoja

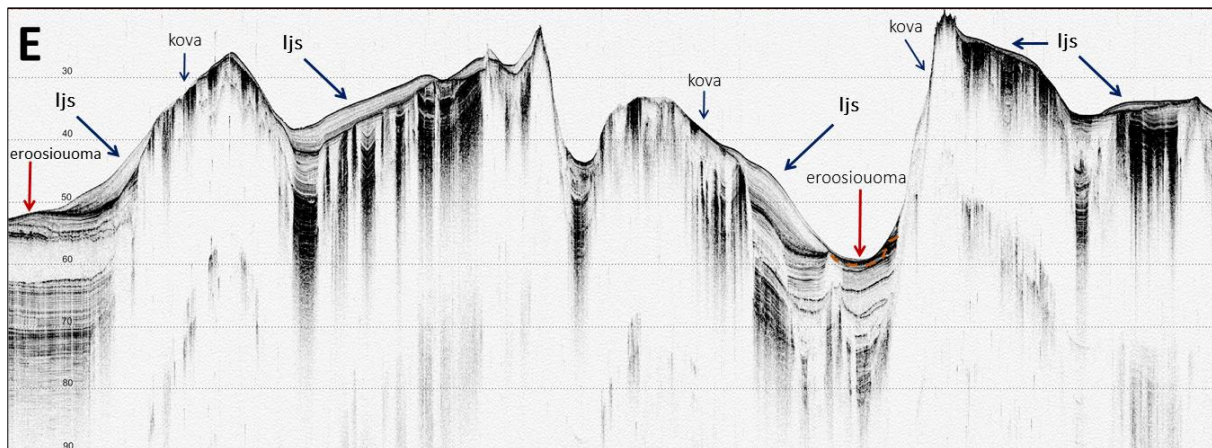
savikerrostumissa. Eroosiuomassa on myös havaittavissa erillisiä pienempiä virtausuomia, jotka ovat yksittäisesti kuluttaneet pieniä, mutta syviä uomia savikerrostumiin. Toisaalta erittäin voimakasta eroosiuomaa sivuaa hyvin laaja ja paksu resenttisen liejusaven muodostama kenttä. Näin ollen virtausuoman eroosion voimakkuuden voidaan päätellä peilaavan myös muodostuvan liejusavipatjan muodostumisen kokoa niin, että ne kasvavat molemmat toisen kasvaessa. Erotten kuitenkin kaikugrammista C, kaikugrammi D:n liejusavi kerrostumat ovat erittäin orgaanisia ja kaasupitoisia, minkä seurauksesta paksun kerrostuman alkaessa kaikugrammista katoaa täysin alapuolinen näkyvyys. Kaikugrammi D:n lisäksi kaikugrammi B:ssä on tällaisesta häiriöllisestä liejusavipatsaasta havaittavissa pilkkuja, jotka voivat kuvastaa sedimenttikerrostumien sisäisiä kaasukuplia.



Kuva 12. Kaikugrammin oikea laita edustaa laajaa eroosiuomaa (oranssilla), jonka vasemmalla laidalla suuri resenttisen liejusaven (ljs) kasaantuma. Eroosioalueen leveys on noin 3500 metriä, minkä sisällä on useita pienempiä eroosiuomia (punertavat nuolet) pääosin postglasiaalisessa savessa (pgs). Näyte on Saaristomereltä.

Resenttisen liejusaven epäsymmetrisen kasaantumisen ei kuitenkaan ole välttämättä aivan systemaattista suhteutettuna siihen mille puolelle kasaantuma virtausalueella muodostuu. Kaikugrammissa E on havaittavissa yksi yksittäinen ja suora ajolinja, jonka varrella on useita eri puolille kasaantuneita resenttisen liejusaven kasaantumia (kuva 13). Keskeltä kaikugrammia on myös havaittavissa uoma, jokseenkin pieni sellainen, minkä laiduille ei kasaantumista ole syntynyt lainkaan. Kaikugrammissa on myös havaittavissa korkeammilla huipuilla liejusavi kerrostumia, jotka ovat muodostuneet matalahkoon veteen alle 30 metrin syvyyteen yksittäisinä kasoina ja kasaamina. Näin ollen kyseisessä kaikugrammissa on hyvin monipuolinen akkumulaatioympäristö, jota kuitenkin sivuavat useat eroosiuomat. Edelliset

kaikugrammit huomioiden voidaan myös todeta, että alueen syvin kohta ei välttämättä ole aktiivista sedimentaatioaluetta vaan tämän sijaan veden virtauksen muodostama eroosioympäristö. Näin ollen virtausolosuhteissa kaikkein syvin kohta on eroosioaluetta, jossa sedimenttiä kuluu voimakkaasti kerrostumisen sijaan.

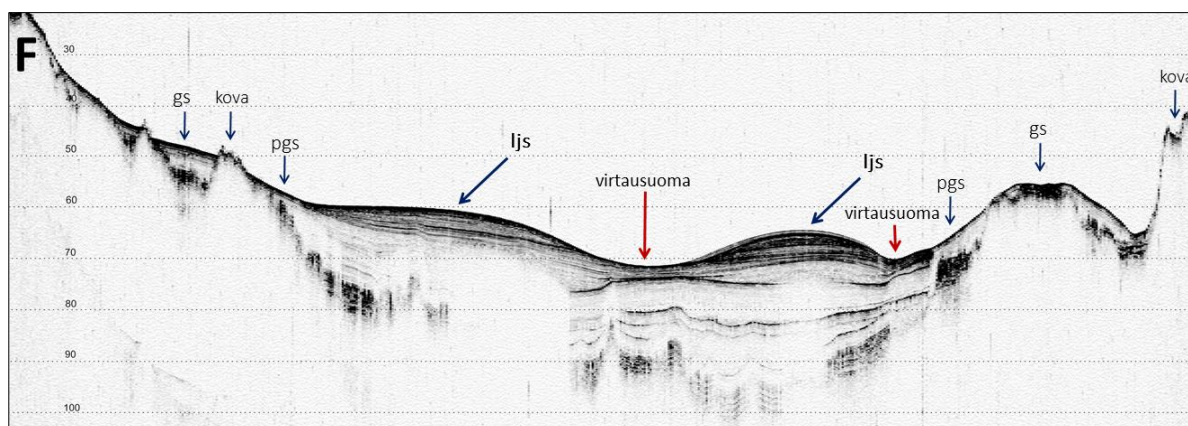


Kuva 13. Kaikugrammi, jossa on tyypillistä hyvin vaihtelevaa merenpohjan topografiaa Saaristomereltä. Kaikugrammissa on havaittavissa virtausuomia (oranssilla), joiden resenttisen liejusaven (ljs) kasaantumispuolet vaihtelevat. Lisäksi on liejusavi kasaantumia, jotka eivät ole yhteydessä virtaukseen ja ovat kasaantuneet alle 40 metrin syvyyteen sekä uomia, jotka eivät ole seurausta virtauksesta vaan myötäilevät yleistä topografiaa.

Toisaalta on huomioitava, että paksu resenttisen liejusaven kerrostuma ei aiheuta aina häiriöitä kaikugrammeihin. Etenkin kaikugrammeissa C ja E on resenttisen liejusaven paksutkaan kerrostumat eivät aiheuta kaikugrammien B ja D kaltaisia häiriöitä ääniaallon penetroitumisessa. Tämä tarkoittaa, että liejusaven koostumus ei jokaisessa tilanteessa ole aivan samankaltainen, vaan toisinaan se on hyvin orgaanista ja kaasupitoista ja toisinaan ei. Toisaalta voidaan todeta, ettei virtaava vesi ole määräävä sitä, millainen resenttisen liejusaven koostumus on luonteeltaan. Toisaalta sillä voi olla merkitystä, että millaisesta ympäristöstä virtaus lähtee kuljettamaan ja kuluttamaan ainesta. Liejusavien koostumukseen voi vaikuttaa erityisesti savipartikkeleiden lähtökivilaji, mikä määrittäisi rapautumisen jälkeisen partikkelin muodon, koon sekä kemialliset ominaisuudet. Tämä taas määräisi millaiset kyvyt kyseisellä partikkelilla olisi kuljettaa esimerkiksi ravinteita kemiallisina sidoksina ja tämän seurauksena sen kuinka hedelmällinen kasvualusta orgaaniselle toiminnalle kyseinen liejusavikerrostuma olisi (suullinen toimeksianto Penttinen 2021). Liejusavikerrostuman orgaanisen aineksen määrään voivat myös mahdollisesti vaikuttaa etäisyys rannasta, vedenkirkkaus sekä

vesisyvyys. Tämä kuitenkin vaatisi lisätutkimuksia ja näytteiden ottamista erilaisista liejusavikerrostumista.

Kaikugrammissa F on havaittavissa tyynymäisiä resenttisen liejusaven kasaumia (kuva 14). Liejukasaumien ympärillä on havaittavissa kolme virtausuomaa, joista kaksi ovat tyynyjien laidoilla ja yksi niiden keskellä. Tässä kaikugrammissa on havaittavissa kaikugrammi A:n kaltainen tilanne, jossa virtausuomia on useampi muuten tasaisella alueella. Näin nämä useammat virtaukset jälleen kerran muodostavat kuin palmikoivan virtausverkoston merenpohjalle. Tässä kaikugrammissa jää kuitenkin epäselväksi ovatko liejukasaumat syntyneet ennen virtauksia vai niiden aikana. Kaikugrammissa voi hyvin olla sellainen tilanne, jossa aikaisemmin rauhallinen syväne, jonne aines on päässyt rauhassa kasaantumaan, onkin muuttunut virtausalueeksi. Näin ollen virtaukset leikkaisivat jo ennestään muodostuneita liejusavikerrostumia eikä niinkään muodostaisi niitä. Tyynymäinen muoto on näin seurausta siitä, kun virtaus on kohdannut tiiviimmän postglasiaalisen kerrostumat ja virtauksen laidoilta on jääneet vain pehmeät lieju- ja litorinasaven kerrostumat.

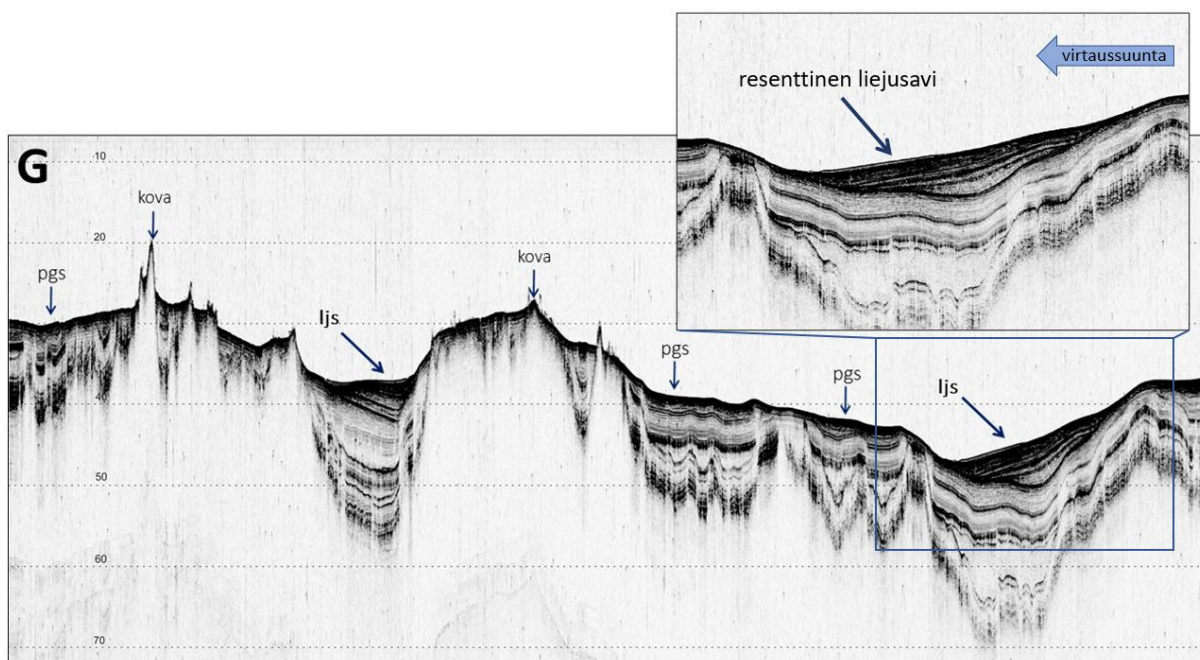


Kuva 14. Kumpuilevia resenttisen liejusaven (ljs) muodostumia merenpohjan syvänteessä. Vaihtelevassa maastossa on liejusaven lisäksi postglasiaali- (pgs) ja glasiaalisavea (gs), sekä läpäisemätöntä kovaa ainesta. Näyte on Suomenlahdelta.

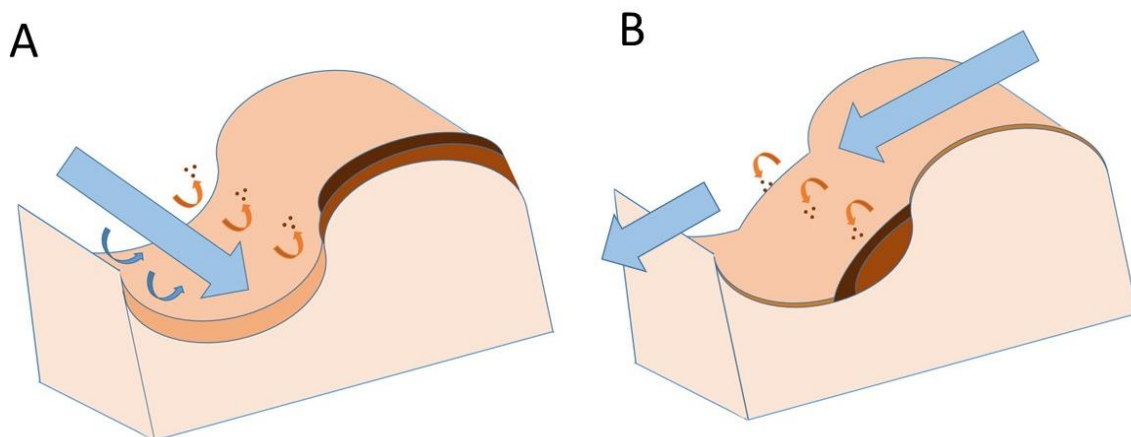
Tämä viittaisi siihen, että merenpohjassa veden olotila voi muuttua hyvinkin merkittävästi rauhallisesta akkumulaatiosta eroosioalueeksi. Toisaalta katsellessa oikealla puolella olevaa liejusaven kasaumaa voi havaita, että sen kerrostumat kaartuvat molemmilta puolilta kohti reunoja, joka ei viittaa niinkään eroosion aiheuttamiin epäjatkuvuus pintoihin. On kuitenkin huomioitava, että kaikugrammien näyttämät raidat eivät välttämättä vastaa savikerrostumien

raitaisuutta vaan ovat useiden heijastusten interferenssejä, minkä seurauksesta ne saattavat piirtyä kaikogrammissa enemmän tai vähemmän pinnan muotoja myötäileviksi.

Kaikogrammissa G on havaittavissa pehmeämmän aineksen kasautuma syvänteeseen (kuva 15). Tässä kaikogrammissa erityistä on kuitenkin se, että pehmeän aineksen kasautuminen on painottunut ainoastaan syvänteen toiselle laidalla eikä vastakkaisella puolella ole havaittavissa selkeää eroosiouomaa. Syvänteen yläpuolella olevatkaan alueet eivät ole akkumulaatioaluetta, koska niiden pinnat ovat hyvin tasaiset ja kuluneet. Kaikogrammin G tilanteessa voidaan olettaa, että kasaantuminen on muodostunut aineksesta, joka on tippunut pois kuljetuksesta virtauksesta, joka kaikogrammissa tapahtuisi oikealta vasemmalle (kuva 16 B). Tämä kaikogrammi on otettu Suomenlahdelta, missä vesi on tunnetusti sameaa, joka tarkoittaa, että sen vesimassan kiintoaineksen määrä on runsas. Näin ollen kaikogrammi G:n tilanteessa aines tippuisi pois virtauksen kuljetuksessa edeltävän kummun distaalipuolelle samalla tavalla kuin muun muassa aines kasaantuu drumliinin taakse. Olettamusta tukee se, että saman kaikogrammin kauemmassa osassa on samankaltainen toispuolinen liejusaven kasauma esteen taakse syvänteeseen. Tämä kertoo siitä, että resanttisen liejusaven kasaantuminen merenpohjan virtausolosuhteissa on hyvin monimuotoista sekä vaihtelevaa.



Kuva 15. Kaikogrammi Suomenlahdelta, missä liejusavea (ljs) on kasaantunut kumpujen taakse virtauksen distaalipuolelle. Muuten näyte koostuu postglasiaalisen saven (pgs) kerrostumista kumpuilevan kovan aineksen päällä. Tässä kaikogrammissa äänipulssin lähetystaajuus on ollut 7 kHz, minkä takia pinnankontakti näkyy tummempana kuin muissa kaikogrammeissa.

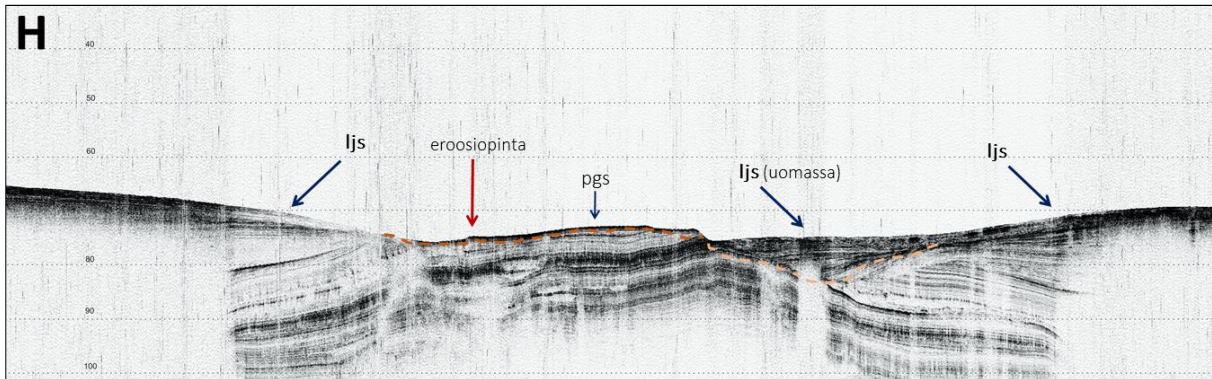


Kuva 16. Malleja virtauksen aiheuttamasta aineksen kasautumisesta. Tilanne A kuvaa virtausta, jossa aines kasaantuu virtauksen suuntauksen mukaisesti virtausuoman laidalle. Tilanne B on taas kaikugrammi G:n tilanne, missä aines on kasaantunut pois kuljetuksesta kummun takaiselle distaalipuolelle. @Laaksonen

Kaikugrammissa H on havaittavissa erityinen akkumulaatioympäristö, jossa merenpohjan virtausuoma on vaihtanut paikkaa ja vanha uoma on täyttynyt liejusavella (kuva 17). Oikealla puolella on havaittavissa vanha uoma, joka näkyy epäjatkuvuuspintoina sekä uoman oikeanpuoleisena resanttisen liejusaven kasaumana, jonka päälle on myöhemmin uoman siirryttyä vasemmalle kasaantunut vielä lisää resanttista ainesta. Toisaalta paikalla on voinut myös olla kaksi lähekkäistä virtausta, joista toinen on sammunut. Kaikugrammin oikealla ja vasemmalla puolella on hyvin paksut liejukasaumat, joiden koostumus aiheuttaa häiriöitä ääniaaltojen penetraatioon. Lisäksi vanhan uoman kohdalla on havaittavissa pienempi paikallinen häiriöalue liejusaven alaisissa kerrostumissa. Tämä kaikugrammi kertoo siitä, kuinka virtausolosuhteet voivat muuttua merenpohjassa sekä toisaalta siitä, mitä tapahtuu, kun virtausuoma vaihtaakin paikkaa tai sammuu ja eroosioympäristö muuttuukin kerrostumisympäristöksi.

Merivirran siirtyminen tai sammuminen merenpohjassa toisaalta viestii jostain merkittävämmästä muutoksesta merenpohjan olosuhteissa. Siirtyminen voi johtua esimerkiksi maankohoamisen vaikutuksesta topografian vesisyvyyteen tai merivirtauksien aiheuttavien tekijöiden eli veden tiheyserojen muutoksesta. Meriveden tiheyteen vaikuttavat muun muassa veden lämpötila ja suolapitoisuus, jotka jakavat vesimassoja syvyysskolumnissa. Toisaalta on huomioitava, että vaikka muutos on todennäköisesti tapahtunut verkkaaisesti, viestii se kuitenkin siitä, että merenpohjan virtaukset voivat vaihtaa paikkaa tai jopa sammua eli

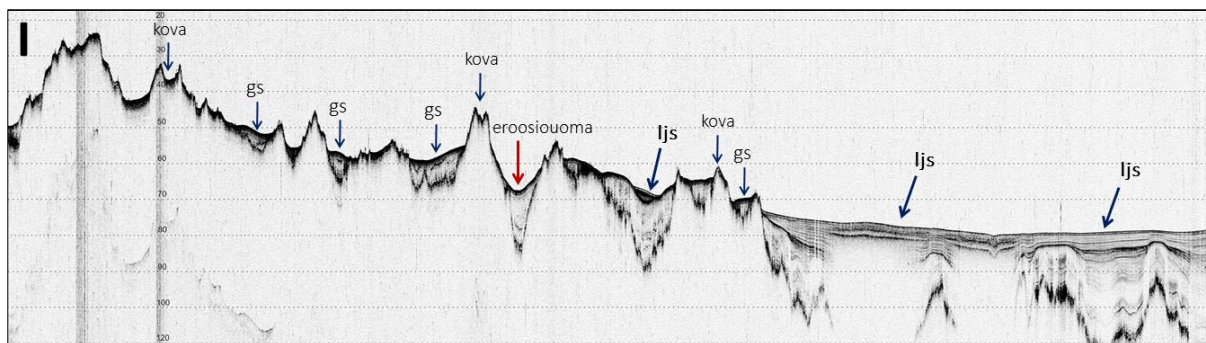
pohjan sedimentaatio-olosuhteet ovat muutoksen alaisia. Tällaisella muutoksella merivirroissa todennäköisesti on vaikutusta myös merenpohjan ekosysteemeihin ja ravinteiden kulkeutumiseen vesipatsaan alakerroksissa.



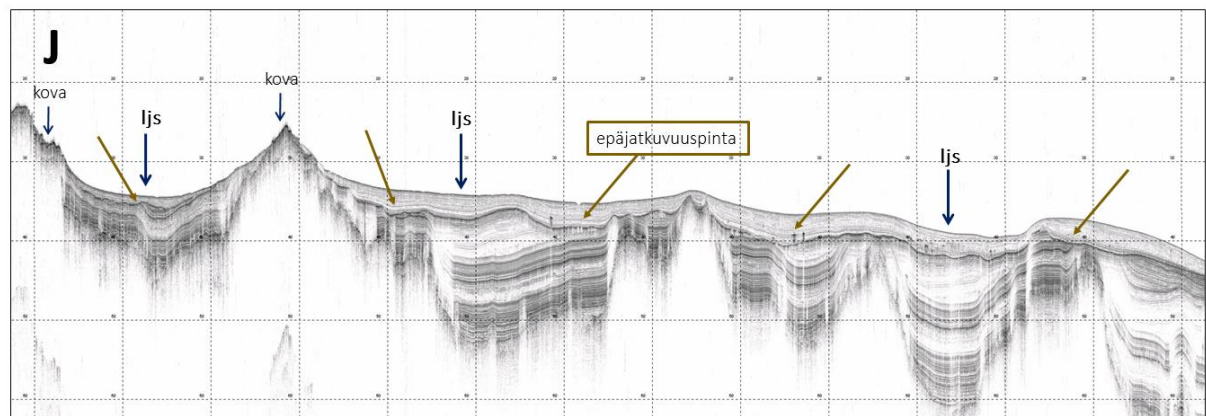
Kuva 17. Kaikugrammissa keskellä eroosioympäristö ja laidoilla resanttisen liejusaven (ljs) paksuja kerrostumia. Eroosioympäristön oikealla laidalla on vanha virtausuoma (vaalea katkoviiva), joka on täyttynyt liejusavella. Eroosioalueella on paljastuneena postglasiaalisia kerrostumia (pgs). Näyte on Suomenlahdelta.

4.2 Aaltoeroosio kaikugrammeissa

Edellä mainituissa virtausolosuhteissa muodostuneiden resanttisten liejusavien kerrostumat kumoavat osaltaan väitteet siitä, että liejusavea muodostuisi vain syvänteiden altaissa rauhallisissa olosuhteissa. Tämä havainto eivät kuitenkaan tarkoita, etteikö tämänkaltaista kasaantumista tapahtuisi. Sen sijaan tyypillisimmillään resanttista liejusavea on löydettävistä juuri kaikugrammi I:n kaltaisissa tilanteissa, missä kaikkein syvin alue on pehmeän aineksen täyttämää (kuva 18). Tämä on tyypillistä kaikilla Suomen merialueilla, joskin kerrostumissyvyys vaihtelee alueittain. Kaiken kaikkiaan kaikista tutkituista kaikugrammeista on huomioitava, että resanttisen liejusaven kerrostumissyvyys on hyvin vaihtelevaa jo ihan vain saman merialueenkin sisällä. Näin ollen saadaan vetää johtopäätös, että resanttisen liejusaven muodostuminen ei ole selitettävissä yksinään vesisyvyydellä. Toisaalta syvyydellä on merkitystä siihen, onko kyseiseen alueen syvänteeksi syvällä ollakseen myrskyaaltojen vaikutussyvyyden alapuolella. Näin ollen syvyydellä on merkitystä, mutta vain toisen parametrin kuten avoimuuden kanssa.



Kuva 18. Kaikugrammi liejusaven tyypillisestä kasaantumisympäristöstä, missä liejusavi (ljs) muodostuu alueen syvänteeseen, koska matalammat vesisyvytydet eivät ole tarpeeksi rauhallisia kasaantumisympäristöjä. Nousevassa rinteessä on havaittavissa vaihtelevasti kovaa ainesta ja postglasiaalisaven (pgs) kerrostumia. Näyte on Suomenlahdelta.



Kuva 19. Kaikugrammissa kuluneen merenpinnan päälle muodostunutta liejusavea. Näyte on Ahvenanmereltä. Kaikugrammissa on TOPAS:ksen katseluohjelman näkymä, koska Sonarwitz ei pystynyt lukemaan aineistoa. Kaikugrammissa näkyvät neliöt eivät ole mittakaavallisesti oikeassa suhteessa.

Kaikugrammista I on selkeästi havaittavissa, kuinka hienoaines kerrostumien paksuus vähenee mitä matalampaan vesisyvyyteen kohotaan (kuva 18). Tämä on seurausta aallokon ylhäältä päin kohdistuvasta paineesta merenpohjan hienoaineskerrostumiin, mikä vähenee taas mitä syvemmälle rinnettä laskeudutaan. Kaikugrammista J on kuitenkin huomioitavissa ilmiö, jossa resanttista liejusavea on muodostunut selkeästi erodoituneiden postglasiaali- ja glasiaalisavien päälle ja näin ollen kerrostumien välisessä kronologiassa on muodostunut merkittävä aukko (kuva 19). Tämä tarkoittaa, että kyseinen alue on aikaisemmin ollut todennäköisesti aalloille alttiina, minkä seurauksena sen pinta on kulunut rosoiseksi ja epätasaiseksi. Kuitenkin myöhemmin alueen aalto-olosuhteet ovat rauhoittuneet ja alueelle on alkanut muodostua resanttista liejusavea. Aalto-olosuhteiden muutos on todennäköisesti

seurausta maankohoamisesta, joka on sulkenut altaan avoimelta mereltä, minkä jälkeen alueella ei enää ole pystynyt muodostumaan tarpeeksi suuria aaltoja kuluttamaan merenpohjaa tältä syvyydeltä (kuva 2). Vaikka kyseinen muutos on todennäköisesti vaatinut tuhansia vuosia geologisessa ajassa, kertoo se kuitenkin siitä, kuinka muutokset saariston rakenteessa ja sen vyöhykkeellisyydessä vaikuttavan ei vain maisemaan vaan koko vedenalaiseen ympäristöön.

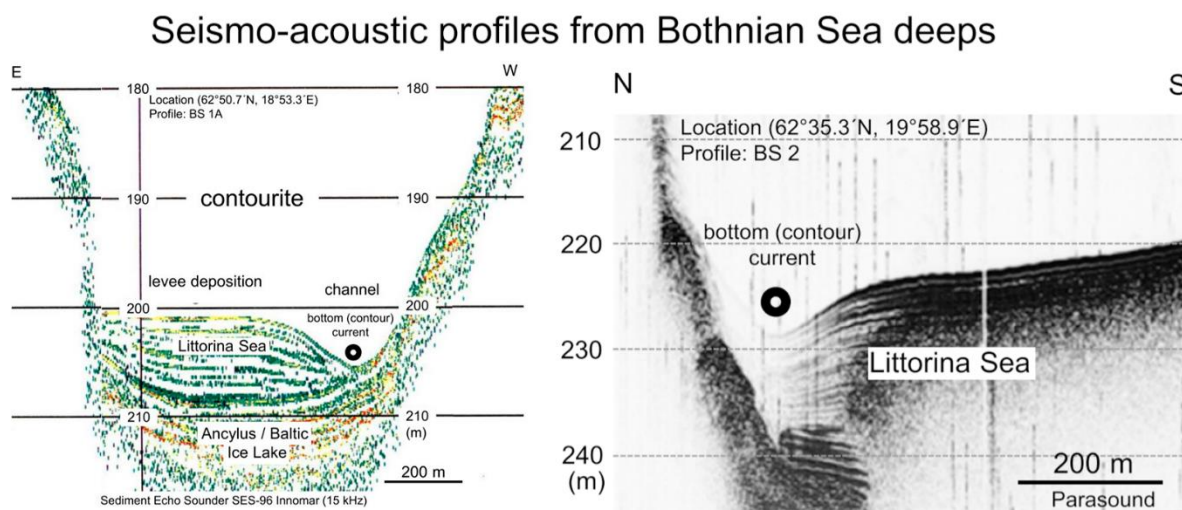
5 Pohdinta

Tuloksien perusteella on selkeää, ettei reseranttisen liejusaven esiintyminen Suomen merialueiden merenpohjassa ole niin yksinkertaista kuin aikaisemmin on annettu ymmärtää. Sen sijaan merenpohjassa vallitsee hydrodynaamisia voimia, jotka määrittelevät olemassaolollaan sen minkälainen akkumulaatioympäristö paikalle voi muodostua. Näin ollen esimerkiksi näiden tulosten varjolla merivirta voi luoda ympäristön, jossa vierekkäin ovat niin voimakas eroosioympäristö kuin myös rauhallinen akkumulaatioalue. Toisaalta aallokko muodostaa ylhäältäpäin painetta merenpohjan sedimenteille ja määrää mille syvyydelle paikallisesti sedimenttipartikkelit voivat pudota pohjaan vai ajautuvatko ne uudelleen kuljetukseen. Nämä kaksi prosessia myös avustavan toisiensa toimintaa sedimenttipartikkelien kulutuksessa, kuljetuksessa ja kasaantumisessa. Winterhalter (1972) toteaa, että aallokko irrottaa materiaalin pohjasta ja virtaus kuljettaa sen muualle. Näin ollen nämä kaksi prosessia toimivat niin yhdessä kuin erikseen muodostaessaan merenpohjan sedimentaatioympäristöä.

5.1 Merivirtojen muodostamat kontouriitit Itämerellä

Tuloksien varjolla merenpohjan virtaukset niin kuluttaisivat, kuljettaisivat sekä kasaisivat sedimenttipartikkeleita. Aikaisemmin on vain todettu differentiaalinen kasautuminen, jossa topografian määräämänä virtaus aiheuttaa epäsymmetrisen kasaantumisen jyrkänteiden laidoille (Ignatius ym. 1980). Kaikugrammien tulokset sen sijaan kertovat, että liejusedimenttien kasaantuminen on tapahtunut joko virtauksen aikana tai sen jälkeen, koska niiden alapuolelta virtausuoman läheisyydestä on havaittavissa kulunutta pintaa. Tämän lisäksi virtauksen voimakkuudella on selkeä yhteys liejusaven kerrostumisen määrään, jolloin uoman koko on verrannollinen liejukerrostumien laajuuteen. Toisaalta kasaantuminen on hyvin riippuvaista virtauksen käyttäytymisestä, joka voi olla hyvinkin keskittyneitä yhteen uomaan tai poukkoilla useiksi virtausuomiksi. Tällöinkään kasaantuminen ei ole alueellisesti aina systemaattista vaan kasaantumisen puoli voi vaihdella hyvinkin pienellä alueella uomittain. Näin ollen virtauksen aiheuttaman kasaantumisen luonteeseen tulee kiinnittää erityistä huomiota, koska sen käyttäytyminen ei ole suoraviivaista.

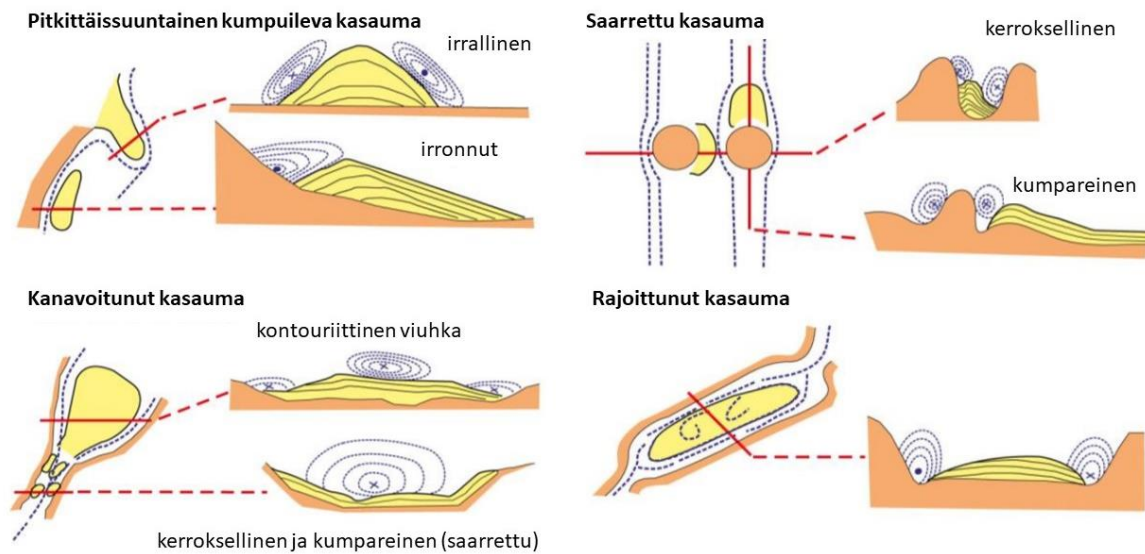
Tällainen merivirtauksen seurauksena tapahtuva virtauksen suuntainen kasautuminen viittaa kontouriitti muodostumiin, joita on havaittavissa erityisesti valtamerien kielekkeiden laidoilla, missä Coriolis-ilmiö määrittelee virtauksen suunnan (Rebesco ym. 2014). Valtamerien kielekkeillä kontouriitit voivat olla jopa 100 kilometrin leveitä, satoja kilometrejä pitkiä ja jopa 2 kilometriä paksuja muodostumia (Rebesco ym. 2014). Itämereltä tutkimuksia tämänkaltaisesta sedimenttimuodostumasta on hyvin vähän, mutta tarpeeksi siihen, että niiden ilmeneminen Itämeren pohjassa on tunnistettu (kuva 20). Itämeren merenpohjan kontouriittimuodostumat on luokiteltu alhaisen virtauksen kontouriiteiksi eli mutakontouriiteiksi (Sivkov ym. 2002; Dorador ym. 2019). Pohjoisella Itämerellä niitä on määritetty olevan havaittavissa merenpohjan suurien kanavien laidoilla yli 200 metrin syvyydessä, missä suolapitoinen vesi virtaa Pohjanmereltä Itämerelle luoden voimakkaita virtaustapahtumia (Moros ym. 2020; Portz ym. 2021) (kuva 20). Muualla Itämeren syvänteissä kontouriittien muodostuminen on liitetty erityisesti kylmien ja lämpimien ilmastojen merkittävään vaihteluun viimeisen 7 000 vuoden aikana, mikä on vaikuttanut erityisesti pohjan uudelleen suspensioon ja kasautumiseen esimerkiksi Pohjanlahden syvänteistä Ahvenanmaan rotkoon (Moros ym. 2020). Itämeren mutakontouriittien on todettu koostuvan tyypillisesti hienojakoisesta pehmeistä sulfidirikkaasta mudasta, joka sisältää orgaanista ainesta ja voi mahdollisesti myös mangaania (Sivkov 2002).



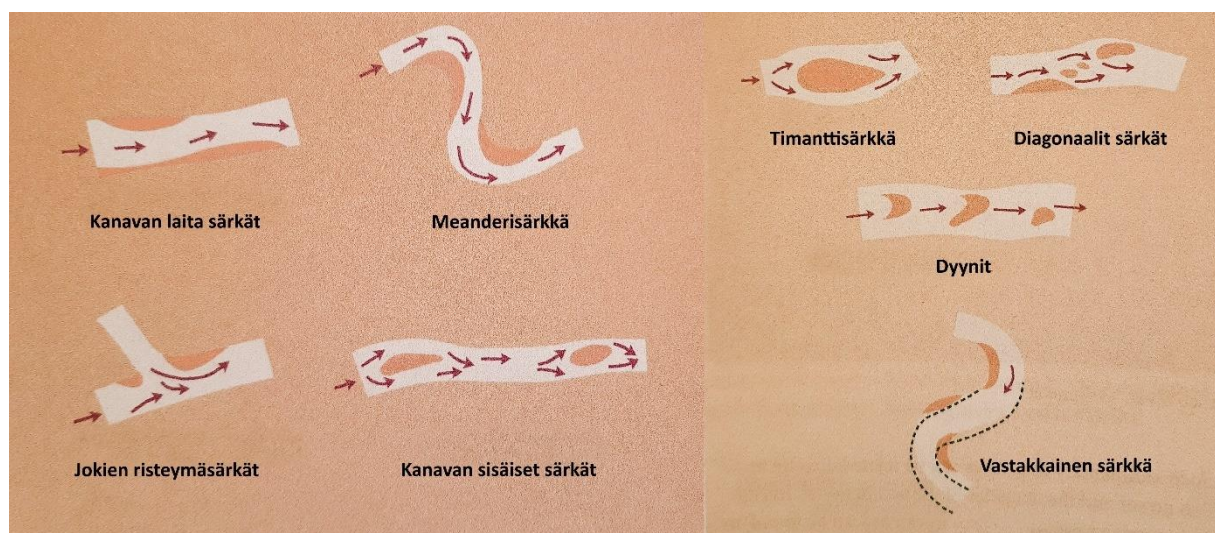
Kuva 20. Pohjois-Itämeren kontouriitteja 200 metrin syvyydessä. Kyseisistä kaikuprofiileista on havaittavissa yhtäläisyyksiä tutkielmassa esitettyjen matalan veden kontouriittien muodon, rakenteen ja aiheutuvien häiriöiden kanssa. Kaikugrammien kaikkein päällimmäinen kerros on virtauksen kasaama ainesta ja alemmat litorinakerrostumat ovat muodostuneet laskeumana (Lähde: Moros ym. 2020)

Koostumukseltaan Itämeren kontouriitit muistuttavan siis hyvin paljon kuvausta resenttisestä liejusavesta, minkä myötä voidaan olettaa, että ne koostuvat ainakin resenttisen liejusaven kaltaisesta orgaanista ainesta sisältävästä materiaalista. Näin ollen ottaen huomioon koostumukselliset erityispiirteet sekä virtauksien aiheuttaman kasaantumistavan, voidaan tutkimuksessa todetut virtauskasaumat todeta mahdollisesti olevan Itämeren mutakontouriitteja. Valtamerien kontouriittien stratigrafisissa tutkimuksissa kontouriittien raekoon on todettu hienonevan ylöspäin niin, että kaikkein alimpana tavataan keskikarkeaa hiekkaa ja päällimmäisenä hienoa silttiä, joka on sisältää orgaanista ainesta (De Castro 2021). Ylöspäin hienoneva raekoko johtuu rauhoittuneesta virtauksesta, mikä viittaa siihen, että Itämeren virtaukset vastaavat tehokkuudeltaan vain valtamerten heikoimpien kontouriitteja muodostavien virtausten voimakkuutta (Rebesco ym. 2014). Itämeren kontouriittien ja tutkielman saaristossa havaittavien kontouriittien rakenteellisia tutkimuksia tulisi jatkaa, jotta näille kontouriiteille voitaisiin määrittää oma stratigrafia.

Aikaisemmista tutkimuksista eroten kuitenkin tämän tutkimuksen tulokset tuovat ilmi, ettei kontouriittien muodostuminen tapahdu ainoastaan Itämeren suurien pohjanvirtausten laidoilla vaan myös matalammissa vesissä saaristossa. Toisaalta Itämeren syvänteiden kontouriittien kokoluokka on aivan toisenlainen verrattuna pieniin saaristojen virtausten kontouriitteihin. Tutkimalla näitä pienempiä matalien vesien kontouriitteja, voitaisiin saavuttaa ymmärrys suurien kontouriittien muodostumisesta. Esimerkiksi tuloksissa mainittu tasaisen pohjan virtauksien muodostamat virtausverkostot eroavat merkittävästi syvien kanavoiden virtauksista. Virtausverkostot myös muistuttavat palmikoivaa jokea, missä virtauksien pyörteet vaihtelevat ja näin ollen myös sedimenttien kasaantumispuoli. Rebesco ym. (2014) on havainnoinut kontouriittien kasaantumismuotoja vaihtelevissa virtausolosuhteissa ja näistä kuvista on havaittavissa virtausten jakautumista pohjan pinnanmuotojen määrittelemänä useiksi virtausuomiksi (kuva 21). Lisäksi kuvien virtausuomat muistuttavat hyvin paljon maanpäällisiä jokiuomia ja niiden särkkiä, joten kontouriittien tutkimuksessa voitaisiin mahdollisesti omaksua maanpäällisten virtausten teorioita veden liikkeistä sekä aineksen kasaantumisesta (kuva 22). Havainnot Itämeren kontouriittien virtauskentistä vaatisivat kuitenkin lisätutkimuksia ja monipuolisia julkisia aineistoja, jotta saariston merenpohjassa voitaisiin todeta ilmenevän virtausten palmikoivia verkostoja.



Kuva 21. Valtamerillä tavattavien kontouriittien kasaantumismuotoja vaihtelevissa virtausolosuhteissa. (Laaksonen 2021 mukaillen Rebesco ym. 2014)



Kuva 22. Jokisärkkien luokittelu ja virtaussuunnat. Maanpäällisten jokien sekä merenpohjan virtausten särkkien muodostuminen muistuttavat hyvin paljon toisiaan, mikä tukee ajatusta merenpohjan virtausverkostoista. (Laaksonen 2021 mukailleen Holden 2012)

Vertaillen merenpohjan kontouriittien ja maanpäällisten jokiuomien särkkien muodostumista on niiden välillä havaittavissa yhtäläisyyksiä. Selkeimmät yhtäläisyydet ovat havaittavissa esimerkiksi kontouriittien kanavoituneen ja rajoittuneen kasauman sekä jokien sisäisten särkkien ja timanttisärkkien muodostumisen välillä, missä molemmissa uoman keskelle syntyy itsenäinen materiaalin keskittymä (kuva 21 ja 22). Molemmissa virtaus saartaa

keskelle uoma materiaalia ja keskelle muodostuu särkkä. Lisäksi jokiuomien laidoille yleisesti muodostuvat särkät kuten kanavan laidoille ja meandereihin kasaantuvat yksilöt muistuttavat hyvin paljon kontouriittien rinteiden pitkittäissuuntaisesti muodostuvia kasaumia. On siis selkeää, että virtaavan veden aiheuttama aineksen kasaantuminen on samankaltaista niin maan päällä kuin merenpohjassa. Näin ollen merenpohjan virtausten aiheuttama aineksen kasaantuminen tulisi ottaa huomioon kartoittaessa aineksen liikkumista ja kasaantumista Itämerellä, koska virtausten liike on yhtäläillä aktiivista kuin maanpäällisten jokien, minkä seurauksena ne kuljettavat ja kasaavat maanpäältä kulkeutuneita ravinteita ja mikromuoveja merenpohjalle kontouriitteihin.

5.2 Merenkulun aiheuttama pohjanerosio

Merenkulku voi aiheuttaa hydrodynaamista stressiä alueilla, jotka muuten eivät välttämättä olisi alttiita merenpohjan eroosiolle. Keskusteltaessa merenkulun aiheuttamasta eroosiosta yleensä keskitytään laivoista syntyvän aallokon aiheuttamaan rannan kulumiseen. Merenkulun aiheuttamien aaltojen seurauksena rantavyöhykkeelle voi muodostua äkillisiä virtauksia ja aaltoja, jotka kuluttavat niin rantaa kuin merenpohjaa. Pohjoisella Saaristomerellä esimerkiksi merenkulun aiheuttamat virtaukset voivat olla nopeudeltaan äkillisesti jopa 40–50 cm/s, mikä aiheuttaa merkittävää pohjan kulumista ja uudelleen suspendoitumista (Rytkönen ym. 2001). Tosin, vaikka tällaisten risteilyalusten aiheuttamien aaltojen eroosio on hyvin lyhyt aikaista, niin se on kuitenkin riittävän voimakasta irrottamaan kiviainesta pohjasta ja uppoumavirtauksen myötä kuljettamaan ainesta syvänteisiin (Rytkönen ym. 2001). Tämän lisäksi pohjamateriaaleissa tapahtuvat muutokset vaikuttavat myös alueen kasvistoon sekä eliöstään (Madedivi 1993).

Laivaliikenne voi aiheuttaa myös fyysistä häiriötä merenpohjaan potkurivirtojen sekoittaessa merenpohjan sedimenttejä vesipatsaaseen. Potkurivirtauksen sekoittaessa vesipatsaan alinta kerrosta, voi ravinnerikasta alusvettä kummuta pintaveteen, mikä lisää osittain levien kasvua, hapen kulutusta sekä muuttaa pintaveden suolapitoisuutta ja sekoittaa harppauskerrosta (Madedivi 1993). Laivaliikenteen aiheuttamat virtaukset ovat myös havaittavissa tutkielman kaikugrammeissa, koska usea virtausympäristöä kuvastava kaikugrammi sijaitsee väyläalueella. Erityisesti kaikugrammi A:n moniuomainen pinta sijaitsee alueella, jossa useammat väylät kohtaavat isomman väylän. Kaikugrammi D taas leikkaa suuri liikenteistä

laivaväylää Saaristomerellä. Näin ollen jotkin kaikugrammin uomat saattavat olla myös seurausta merenkulun aiheuttamista virtauksista, jotka tehostavat alueen muuta pohjan vesimassan virtausta paikallisesti.

Tulkittaessa merenpohjan sedimenttien eroosioympäristöjä tulee näin ollen ottaa huomioon muutkin kuin luonnonvoimien aiheuttamat hydrodynaamiset ympäristöt. Erityisesti laivaliikenteen aiheuttamien murtuvien aaltojen koko on verrannollinen niiden aiheuttamien virtausten voimakkuuteen, jolloin mitä korkeampi ja pidempi aalto on sitä syvemmälle ja voimakkaampia virtausnopeuksia se aiheuttaa (Alusliikenteen aaltovaikutukset... 2018). Laivaliikenteen murtuvat aallot kuluttavat niin pohjaa kuin rantaakin, minkä seurauksena uppoamisvirtaukset kuljettavat aineksen joko kasaantumaan rantaa syvemmälle tai aines kulkeutuu pohjan virtausten mukana vielä kauemmas toisille merialueille. Laivaliikenteen potkurivirrat taas kuluttavat pohjaa erityisesti satamissa ja väyläalueilla, mistä aines ajautuu uudelleen kuljetukseen merivirtauksiin. Näin ollen laivaliikenteen aaltojen irrottama ja virtausten kuljettama aines sedimentoituaan merenpohjaan muodostaa uusia kerrostumia eli resenttistä liejusavea. Samat voimat myös toisaalta voivat irrottaa resenttistä liejusavea aluksen kulkiessa muuten rauhallisilla merialueilla. On siis selvää, että merenkululla on vaikutusta resenttisen liejusaven esiintymiseen ja sen muodostumiseen. Kuitenkin se kuinka merkittävässä määrin laivaliikenteellä on vaikutusta juuri resenttiseen liejusaveen vaatisi lisätutkimuksia.

5.3 Ilmastonmuutoksen vaikutukset merenpohjan sedimentaatio-olosuhteisiin

Akustiset kaikuprofiilit ovat kuin historian kirjoja menneistä merigeologisista olosuhteista. Tutkimalla menneitä geologisia prosesseja voidaan saavuttaa ymmärrys vallinneista sää- ja ilmasto-olosuhteista, jotka ovat olleet osana muodostamassa nykyisin tuntemamme maaperän. Toisaalta tuntemalla menneiden aikojen olosuhteiden syy-seuraus-suhteet voidaan myös ennustaa tulevien ilmastollisten muuttujien aiheuttamia vaikutuksia nykyisiin geologisiin prosesseihin. Esimerkiksi tutkimalla Baltian jääjärven suuren purkauksen aikana syntyneiden maanvyörymien esiintymistä Itämeren savikerrostumissa voidaan saavuttaa ymmärrystä siitä, millaisia vaikutuksia jääjärven suolattoman veden purkautumisella on ympäristöönsä, kuten valtamerien termokliiniseen kiertoon (Hyttinen ym. 2011). Myös sanan

rapautuminen englanninkielinen versio weathering johdetaan sanasta weather eli sää. Näin ollen rapautuminen kuvastaa sitä, kuinka maaperä reagoi sen altistuessa sääolosuhteille (Holden 2012). Täten arvioidessa sedimenttiaineksen rapautumista, kulumista, kuljetusta ja kasautumista tulvaisuudessa, tulee huomio kiinnittää sääolosuhteiden nykyiselle trendille.

Nykyisin kerrostuva hienoaines on tyypillisesti joko jokien tuomaa ainesta mantereelta tai sitten merenpohjasta uudelleen irtautunutta ainesta, joka uudelleen sedimentoituaan laskeutuu jälleen pois kuljetuksesta. Vaikkakin Suomen merialueilla joet tuovatkin meriin sedimenttikuormaa, se ei kuitenkaan riitä läheskään yksinään selittämään sedimentaation määrää Itämeren altaassa. Winterhalter (1973) kokoo, että jotta Perämeren sedimentaatiokuorma voitaisiin selittää jokien kuljettamalla aineksella tulisi sen olla jokikohtaisesti noin 200 mg/l, kun se kuitenkin Suomen suurimmalla Perämereen laskevalla joella, Kokemäenjoella se on noin 37 mg/l. Näin ollen merkittävä määrä Itämeren sedimentti kuormasta ei ole peräisin mantereelta vaan on kertaalleen laskeutunutta uudelleen irtautunutta ainesta, jonka saa liikkeelle merenpohjaan vaikuttavat hydrodynaamiset voimat.

On kuitenkin huomioitavaa, että vaikka jokien tuoma kuorma ei ole kaikkein merkittävin sedimentaation aiheuttaja, se on kuitenkin syklillisellä syötöllään tuo jatkuvasti uutta sedimenttiaineista merialueille tai ainakin rannikon läheisyyteen. Rannikon läheisyyteen laskeuduttuaan se on alttiina esimerkiksi aalloille ja näin ollen uudelleen kulkeutumiselle kohti syvempiä merialueita. Toisaalta kaikki jokisuulle kulkeutunut aines ei laskeudu välittömästi jokisuiston edustalle. Jokien kuljettaman veden sisältämä sedimenttikuorma voi tehdä vedestä myös tiheämpää kuin vastassa oleva murtovesi, jolloin jokivesi kohdatessaan meriveden saattaa raskaampana kulkeutua merenpohja pitkin syvemmille vesille (Nuorteva & Kankaanpää 2016). Toisaalta voimakkaiden virtaamien aikana joen tuoma sedimenttirikas suolaton vesi voi myös jäädä suolavettä kevyempänä vesikolumnin yläkerrokseen ja levitä avomerta kohti pinnalla myöhemmin tiputtaen sedimenttikuormansa merenpohjaan (Salmela ym. 2020).

Täten vaikka joet eivät olekaan se merkitsevin sedimentaation aiheuttaja Suomen merialueilla, ne kuitenkin edesauttavat Itämeren pohjan sedimentaatiota. Suomessa jokiveden sisältämän kiintoaineksen määrään vaikuttaa tunnetusti sadannan ja lumipeitteen

määrä joen valuma-alueelle. Tyypillisesti sadannan ja lämpötilan kohotessa, virtaaman ja lumipeitteen olosuhteet muuttuvat ja tämän myötä myös suspendoituneen kiintoaineksen määrä sekä eroosion intensiteetti jokiuomassa (Lotsari ym. 2014). Tulevaisuuden ilmastonmuutoksen skenaarioissa Suomen sadannan ennakoitaan kasvavan erityisesti talvisin ja syksyisin, mikä lisääntyvän virtaaman ja kiintoaineksen sekä maanpinnan lumettomuuden myötä kasvattaisivat orgaanisen aineksen ja ravinteiden päätymistä jokien mukana rannikoille (Granskog ym. 2006; Lotsari ym. 2014; Ollson ym. 2015). Lisäksi joidenkin mallien mukaan lämpötilan nousemisen myötä erityisesti lumipeitteen väheneminen tai kokonaan puuttuminen lisääisi sadantaa noin 10–40 % seuraavan 100 vuoden aikana (Veijalainen ym. 2010). Lumipeitteen puuttuessa, kuten 2019–2020 talvena koettiin Etelä-Suomessa, altistuu maanpinta ympärivuotiselle eroosiolle sadannan kohdistuessa maanpäälle neljänä vuoden aikana. Tämän lisäksi ilmastomalleissa on ennakoitu tulvien lisääntymisen ja tulva-alueiden kasvavan erityisesti syksyisin ja talvisin, mikä merkittävästi lisää myös kiintoaineksen määrä ympärivuotisesti jokisuulla (Veijalainen ym. 2010). Näin ollen jokien tuoman kiintoaineksen määrä rannikkoalueilla ei tule ainakaan vähenemään tulevaisuuden ilmastoskenaarioissa.

Koska jokien tuoma kiintoaineksen määrä ei pysty yksinään selittämään Itämeren merenpohjan sedimentaatiota, on aallojen aiheuttamaan uudelleen suspensioon kiinnitettävä erityistä huomiota. Aallot tunnetusti lisäävät merenpohjan pinnan uudelleen suspendoitumista sekä määrittävät myös osin sen mitkä alueet ovat pitkällä aikavälillä eroosioaluetta tai akkumulaatioaluetta (Danielson ym. 2007). Yleisesti jos vesisyvyys on matalampi kuin puolet aallonpituudesta, aallon alaspäin suuntautuva liikerata saavuttaa merenpohjan ja vaikuttaa pohjan partikkeleiden spatiotemporaaliseen esiintymisympäristöön (Jönsson ym. 2005). Toisaalta aallon kokoon vaikuttaa aallon muodostavan tuulen pyyhkäisylinjan pituus, minkä myötä mitä pidempi pyyhkäisy linja on, sitä suurempi aalto muodostuu (Danielson ym. 2007). Näin ollen mahdollisesti vallitsevan tuulen suunnan muuttuessa ilmaston muutoksen myötä, voisi samalla Itämeren rannikolta valjastua uusia alueita alttiiksi aaltoeroosiolle, kun tuulen suunta olisikin voimakkaampi eri suunnasta kuin tällä hetkellä. Esimerkiksi Suomenlahden tuulien on 40 vuoden aikana havainnoitu suuntautuvan enemmän lounaisen suuntaiseksi, minkä johdosta Suomenlahden pohjoiset alueet ovat alkaneet altistua pidemmälle pyyhkäisymatkalle ja näin ollen suuremmille aalloille (Zaitseva-Pärnaste ym. 2011).

Useissa tutkimuksissa ilmaston muutoksen arvioidaan tulevaisuudessa vaikuttavan aaltokenttään monin tavoin. Aaltojen pääsuuntauksen muuttumisen lisäksi odotettavissa on aaltojen intensiteetin sekä niiden ääriolosuhteiden kasvua, mutta muutokset vaihtelevat Itämeren alueiden välillä (Soomere & Räämet 2011). Aaltojen intensiteetin kasvu tarkoittaisiin myös aaltojen merkitsevän aallonkorkeuden kasvua, mikä mahdollistaisi merenpohjaan aiheutuvan eroosion entistä syvemmältä. Toisaalta vuotuisen merenpinnan jäätyminen ennakoitaan vähenevän tulevaisuudessa, minkä myötä aallot kykenisivät mylläämään ympärivuotisesti vesipatsaassa (Soomere & Räämet 2011). Kaiken kaikkiaan arvioidaan, että talvikuukausina tammi-helmikuussa aaltojen aktiviteetti tulisi ilmaston lämpenemisen myötä kasvamaan jääpeitteen pienenemisen myötä, minkä seurauksena voimakkaat talvimyrskyt erodoisivat entistä voimakkaammin merenpohjaa sekä rannikkoa (Räämet & Soomere 2011). Eckhell ym. (2000) päätyivät tuloksissaan siihen, että jopa 70 % jo kerralleen kasaantuneista sedimenttikerrostumista erodoituvat tai uudelleen suspendoituvat myrskyjen vaikutuksesta pohjoisella Itämerellä. Toisaalta jo uudelleen suspendoitumisen määrään vaikuttaa merkittävästi alueen vesisyvyys, kun Jurgensen ym. (2013) toteavat aaltojen aiheuttama pohjan eroosio tapahtuvan 15–35 % vuoden sisällä, kun syvänteissä eroosiota tapahtuu vain 3 % eli hyvin harvoin vuoden sisällä. Näin ollen myrskyjen voimakkuuksien ja aaltojen korkeuksien kasvaessa, todennäköisesti prosentuaalinen osuus siitä ajasta, kun merenpohjan eroosion alaisena tulisi kasvamaan ja näin olleen enemmän ainesta ajautuisi uudelleen kuljetukseen niin matalikoissa kun syvänteissä.

Toisaalta Suomen merialueilla vaikuttava maankohoaminen saattaa muuttaa ilmaston muutoksen vaikutuksia merenpohjaan saaristo-olosuhteissa. On tärkeää ottaa huomioon, että vaikka Etelä-Suomen maankohoaminen onkin vain alle 5 cm vuodessa on Suomen rannikkovyöhykkeestä noin 15 % syvyydeltään alle 10 metriä (Kotilainen & Kaskela 2017). Maan kohotessa sisä- ja välisaaristossa saariston rakenne muuttuu saariston sulkeutuessa, kun uusia lahdenpohjia muodostuu ja vanhojen umpeutuu. Näin syntyy uusia otollisia alueita resenttiselle liejusavelle muodostua. Toisaalta vesisyvyyden laskiessa ja aaltojen voimakkuuden kasvaessa nykyiset rannikon läheiset resenttisen liejusaven sedimentaatioalueet välisaaristossa saattavat altistua aaltoeroosiolle ja nykyinen sedimentaatioalue siirtyä kauemmas rannikosta rauhallisempiin vesisyvyyskiin (Bryhn &

Håkanson 2010). Lisäksi sulkeutuva saaristo vaikuttaa merivirtauksien liikkeisiin mahdollisten kulkureittien umpeutuessa, minkä seurauksesta merivirrat saattavat etsiä uusia reittejä tai sammua paikallisesti. Näin ollen vanhat uomat saattavat rauhoittua ja täyttyä reserptisellä liejusavella ja uudet virtausalueet altistua pohjaeroosiolle sekä mahdollistaa kontouriittien muodostumisen. Myös ilmaston muutoksen aiheuttamat muutokset meriveden lämpötilassa sekä mantereisen veden kuormassa saattavat aiheuttaa alueellisia eroja veden tiheydessä ja näin ollen saattaa muuttaa virtauksien voimakkuuksia alueellisesti (Johansson ym. 2014).

6 Johtopäätökset

Toisin kuin Muumipeikko merenpohjan koki, ei tuntemamme Itämeren pohjan ole kuin musta aukko. Sen sijaan se kätkee syvänteisiinsä ja saaristoihinsa sedimenttejä, jotka eivät kuitenkaan ole tuomittuja pysymään paikallaan kasaantumisen jälkeen, vaan ne ovat aina valmiina uuteen seikkailuun merenpohjan hydrodynaamisissa olosuhteissa.

- Kaikilla Suomen eteläisillä merialueilla on havaittavissa resenttistä liejusavea.
- Kaikugrammeissa resenttinen liejusavi on tyypillisesti päällimmäinen vaalea kerrostuma, joka kumpuilee sekä aiheuttaa häiriöitä alempiin kerrostumiin ollessaan kaasupitoinen tai sisältäessään orgaanista ainesta. Lisäksi resenttisen liejusaven kontakti alempiin postglasiaalisiin kerrostumiin on monesti selkeä ja tumma.
- Suomen merialueiden merenpohjassa on havaittavissa kontouriittimuodostumia, tyypillisesti merivirtojen välittömässä läheisyydessä. Tämän seurauksena merivirrat aiheuttavat niin merenpohjan eroosiota kuin aineksen kasaantumista. Syntyvän eroosiuoman laajuus on verrattavissa muodostuvan resenttisen liejusaven määrään uoman vieressä.
- Resenttisen liejusaven sisältämän orgaanisen aineksen ja kaasun määrä vaihtelee merenpohjassa, mikä on pääteltävissä sen aiheuttamasta häiriöstä alapuolisiin sedimentteihin kaikugrammeissa. Koostumuksen selvittäminen vaatisi lisätutkimuksia ja näytteenottoa erikaikuisista resenttisen liejusaven kerrostumista.
- Alueellisesti merenpohjan syvin kohta ei välttämättä ole kasaantumisen keskittymä vaan virtauksen aiheuttama eroosioympäristö.
- Alueen vesisyvyys ei yksinään riitä kertomaan resenttisen liejusaven kasaantumisyyvyyttä, vaan rinnalle tarvitaan jokin muu parametri. Esimerkiksi avoimuuden kanssa voidaan selvittää aallonkorkeus ja tästä johtaa eroosiosyvyys.
- Ilmaston muutos ja maankohoaminen tulee vaikuttamaan meri-ilmastoon ja sitä myötä myös merenpohjan sedimentaatio-olosuhteisiin. Tämän seurauksena resenttinen liejusaven määrä tuskin tulee vähenemään Suomen merialueilla, mutta sen kasaantumis- ja eroosioympäristöt saattavat vaihdella nykytilanteesta.

Kiitokset

Kiitokset Merisotakoululle ja erityisesti UWDC:n Sari Penttiselle ja Jari Korvelle.

Lähteet

- Alenius P., A. Nekrasov & K. Myrberg (2003) The baroclinic Rossby-radius in the Gulf of Finland. *Cont. Shelf Res.* 23 (6), 563–573.
[http://dx.doi.org/10.1016/S0278-4343\(03\)00004-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0278-4343(03)00004-9)
- Alusliikenteen aaltovaikutukset pohjaeliöstöön (2018) *Liikennevirasto*. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 13/2018. 8.12.2021 <https://julkaisut.vayla.fi/pdf/8/lts_2018-13_alusliikenteen_aaltovaikutukset_web.pdf>
- Björkqvist J.-V., L. Tuomi, N. Tollman, A. Kangas, H. Pettersson, R. Marjamaa, H. Jokinen & C. Fortelius (2017) Brief communication: Characteristic properties of extreme wave events observed in the northern Baltic Proper, Baltic Sea. *Natural Hazards Earth System Science* 17, 1653–1658. <http://dx.doi.org/10.5194/nhess-17-1653-2017>
- Bonsdorff, E., R. J. Diaz, R. Rosenberg, A. Norkko & G. R. Gutter Jr (1996) Characterization of soft-bottom benthic habitats of the Åland Islands, northern Baltic Sea. *Marine Ecology Progress Series* 143, 235–245. <http://dx.doi.org/10.3354/meps142235>
- Bryhn A. & L. Håkanson (2011) Land uplift effects on the phosphorus cycle of the Baltic Sea. *Environmental Earth Sciences* 62 (8), 1761–1770.
<http://dx.doi.org/10.1007/s12665-010-0656-6>
- Danielsson Å., A. Jönsson & L. Rahm (2007) Resuspension patterns in the Baltic proper. *Journal of Sea Research* 57, 257–269. <http://dx.doi.org/10.1016/j.seares.2006.07.005>
- De Castro S., F. J. Hernández-Molina, W. Weger, F. J. Jiménez-Espejo, F. J. Rodríguez-Tovar, A. Mena, E. Llave, F. J. Sierro & A. McArthur (2021) Contourite characterization and its discrimination from other deep-water deposits in the Gulf of Cadiz contourite depositional system. *Sedimentology*, 68 (3), 987–1027.
<https://doi.org/10.1111/sed.12813>
- Dorador J., F. J. Rodríguez-Tovar, A. Mena & G. Francés (2019) Lateral variability of ichnological content in muddy contourites: Weak bottom currents affecting organisms' behavior. *Scientific reports* 9 (1), 17713–7.
<https://www.nature.com/articles/s41598-019-54246-3>

- Eckhell J., P. Jonsson, M. Meili and R. Carman (2000) Storm Influence on the Accumulation and Lamination of Sediments in Deep Areas of the Northwestern Baltic Proper. *Ambio*, 29 (4/5), 238–245. <http://dx.doi.org/10.1579/0044-7447-29.4.238>
- Eidem E. J. & K. Landmark (2013) Acoustic seabed classification using QTC IMPACT on single-beam echo sounder data from the Norwegian Channel, northern North Sea. *Continental shelf research* 68, 1–14. <http://dx.doi.org/10.1016/j.csr.2013.08.001>
- Granskog M., H. Kaartokallio, H. Kuosa, D. N. Thomas & J. Vainio (2006) Sea ice in the Baltic Sea – A review. *Estuarine, coastal and shelf science* 70 (1), 145–160. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecss.2006.06.001>
- Heino A. (1973) Bottom deposits and sedimentation on Northern Airisto and Southwestern Finland. *Bull. Geol. Soc. Finland* 45, 131–142.
- Holden J. (2012) *Introduction to Physical Geography and the Environment*. Harlow: Pearson Education UK.
- Hyttinen O., Kotilainen A. & V.-P. Salonen (2011) Acoustic evidence of Baltic Ice Lake drainage in the northern Baltic Sea. *Marine Geology* 284, 139–148. <http://dx.doi.org/10.1016/j.margeo.2011.03.014>
- Hyttinen O. (2012) Sedimentological and chronological aspects of the Younger Dryas – Holocene transition record in southern Finland and northern Baltic. Väitöskirja. Helsingin yliopisto, Geotieteiden ja maantieteen laitos. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-10-6324-4>
- Häkkinen A. (1990) *Saaristomeren vedenalaisten maa-ainesvarojen kartoitus Gullkronan selällä 1989*. Geologian tutkimuslaitos. Julkaisija Varsinais-Suomen Seutukaavaliitto.
- Häkkinen A. & Åker K. (1991) *Kotkan, Pyhtään ja Vehkalahden maalajikerrostumat*. Geologian tutkimuskeskus. Tutkimusraportti 109.
- Ignatius H., E. Kukkonen & B. Winterhalter (1980) *Pohjanlahden kvartäärikerrostumat*. Geologian tutkimuskeskus. Tutkimusraportti 45.

- Jansson T. (1946) *Muumipeikko ja pyrstötähti*. WSOY. Helsinki.
- Jędrasika J. & M. Kowalewska (2019) Mean annual and seasonal circulation patterns and long-term variability of currents in the Baltic Sea. *Journal of Marine Systems* 193, 1–26. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmarsys.2018.12.011>
- Johansson M. M., H. Pellikka, K. K. Kahma & K. Ruosteenoja (2014). Global sea level rise scenarios adapted to the Finnish coast. *Journal of Marine Systems* 129, 35–46. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmarsys.2012.08.007>
- Jurgensen C., C. Christiansen, L. C. Lund-Hansen, M. J.C. Laima & T. Vang (2013) Nutrient Dynamics in Southwestern Kattegat, Scandinavia: Modelling Transport, Budget and Consequences of Reduced Terrestrial Loads. *Geografisk Tidsskrift-Danish Journal of Geography*, 97:1, 1–10. <http://dx.doi.org/10.1080/00167223.1997.10649388>
- Jönsson A., Å. Danielsson & L. Rahm (2005) Bottom type distribution based on wave friction velocity in the Baltic Sea. *Continental Shelf Research* 25, 419–435. <http://dx.doi.org/10.1016/j.csr.2004.09.011>
- Kaipanen S. (2019) Virtausolosuhteiden ja geometrian yhteys kiintoaineen pidättymiseen vesiensuojelualtaissa. Pro gradu -tutkielma. Turun yliopisto, maantieteen ja geologian laitos. <http://urn.fi/URN:NBN:fi-fe202002125258>
- Kanarik H., L. Tuomi, P. Alenius, M. Lensu, E. Miettunen & R. Hietala (2018) Evaluating Strong Currents at a Fairway in the Finnish Archipelago Sea. *Journal of Marine Science and Engineering* 6, 122 1–20. <http://dx.doi.org/10.3390/jmse6040122>
- Kaskela A. M., A. T. Kotilainen, Z. Al-Hamdani, J. O. Leth & J. Reker (2012) Seabed geomorphic features in a glaciated shelf of the Baltic Sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 100, 150–161. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.07.014>
- Kaskela A. M. & A. Kotilainen (2017) Seabed Geodiversity in a Glaciated Shelf Area, the Baltic Sea. *Geomorphology (Amsterdam, Netherlands)* 295, 419–435. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.07.014>

- Kremp, A., T. Lindholm, N. Drebler, K. Erler, G. Gerds, S. Eirtovaara & E. Leskinen (2009) Bloom forming *Alexandrium ostenfeldii* (Dinophyceae) in shallow waters of the Åland Archipelago, Northern Baltic Sea. *Harmful Algae* 8, 318–328. <http://dx.doi.org/10.1016/j.hal.2008.07.004>
- Kullenberg, G. (1981) Physical oceanography. The Baltic Sea. *Elsevier Oceanography Series Elsevier Sci. Publ.* 30, 135–181.
- Lotsari E., J. Aaltonen, N. Veijalainen. P. Alho & J. Käyhkö (2014) Future fluvial erosion and sedimentation potential of cohesive sediments in a coastal river reach of SW Finland. *Hydrol. Process.* 28, 6016–6037. <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.10080>
- Madekivi O. (1993) *Alusten aiheuttamien aaltojen ja virtausten ympäristövaikutukset*. Vesi- ja ympäristöhallinnon julkaisuja: Tutkimusraportti A 166.
- Maljutenko I. & U. Raudsepp (2019) Long-term mean, interannual and seasonal circulation in the Gulf of Finland — The wide salt wedge estuary or gulf type ROFI. *Journal of Marine Systems* 195, 1–19. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmarsys.2019.03.004>
- Moros M., A. T. Kotilainen, I. Snowball, T. Neumann, K. Pernera, H. E. M. Meiera, T. Leipe, L. Zillén, J. S. S. Damstéf & R. Schneider (2020) Is ‘deep-water formation’ in the Baltic Sea a key to understanding seabed dynamics and ventilation changes over the past 7,000 years? *Quaternary International* 550, 55–56. <http://dx.doi.org/10.1016/j.quaint.2020.03.031>
- Myrberg K. & O. Andrejev (2006) Modelling of the circulation, water exchange and water age properties of the Gulf of Bothnia. *Oceanologia*, 48, 55–74.
- Nuorteva J. (1988) *Akustisilla luotausmenetelmillä saatu kuva merenpohjan kvartaärikerrostumia*. Geologian tutkimuskeskus. Tutkimusraportti 82.
- Nuorteva J. (2012) *Näytteenoton merkitys merenpohjan pintakerroksen akustisen tulkinnan varmistamisessa*. Merivoimien Tutkimuslaitos. Tutkimusraportti 27. (ei julkinen)
- Nuorteva J. (2013) *Veden syvyyden vaikutus merenpohjan maalajien esiintymiseen ulkosaaristossa ja tulosten vertaaminen olemassa olevaan merenpohjakarttaan* –

yksityiskohtainen geologinen tutkimus Hangon läntiseltä selältä. Merivoimien Tutkimuslaitos. Tutkimusraportti 28. (ei julkinen)

Nuorteva J. & H. T. Kankaanpää (2016) Relocation of soft mud deposits: An example from the Archipelago Sea, northern Baltic Sea. *Marine Geology* 380, 148–162.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.margeo.2016.08.002>

Nuorteva J. (2018) *Merenpohjatyyppin ja vesisyvyyden keskinäisestä riippuvuudesta: Tutkimus läntiseltä Suomenlahdelta.* Merisotakoulu. Tutkimusraportti 43/2018.

Olsson T., J. Jakkila, N. Veijalainen, L. Backman, J. Kaurola & B. Vehviläinen (2015) Impacts of climate change on temperature, precipitation and hydrology in Finland – studies using bias corrected Regional Climate Model data. *Hydrology and Earth System Sciences* 19, 3217–3238. <https://doi.org/10.5194/hess-19-3217-2015>

Porz L., W. Zhang & C. Schrum (2021) Density-driven bottom currents control development of muddy basins in the southwestern Baltic Sea. *Marine Geology* 438, 1–14.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.margeo.2021.106523>

Poutanen M. & H. Steffen (2015) Land uplift at Kvarken Archipelago / high coast UNESCO World Heritage area. *Geophysica*, 50: 2, 49–64.

Puttonen I., T. Kohonen & J. Mattila (2016) Factors controlling phosphorus release from sediments in coastal archipelago areas. *Marine Pollution Bulletin* 108, 77–86.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.04.059>

Rantataro J. (1992) *Pääkaupunkiseudun vedenalaiset maa-ainesvarat.* Helsingin seutukaavaliiton julkaisuja 31 C.

Rasmus K., M. Kiirikki & A. Lindfors (2015) Long-term field measurements of turbidity and current speed in the Gulf of Finland leading to an estimate of natural resuspension of bottom sediment. *Boreal Environment Research* 20, 735–747.
<http://hdl.handle.net/10138/228308>

- Rebesco M., F. J. Hernández-Molina, D. Van Rooij & A. Wåhlin (2014) Contourites and associated sediments controlled by deep-water circulation processes: State-of-the-art and future considerations. *Marine Geology* 352, 111–154. <http://dx.doi.org/10.1016/j.margeo.2014.03.011>
- Rytkönen J., T. Kohonen & J. Virtasalo (2001) Laivaliikenteen aiheuttama eroosio Pohjois-Airistolla. *Vesitalous* 3, 30–36. <https://www.vesitalous.fi/wp-content/uploads/2010/04/3-2001.pdf>
- Räämet A. & T. Soomere (2011) Spatial patterns of the wave climate in the Baltic Proper and the Gulf of Finland. *Oceanologia* 53, 335–371. <https://doi.org/10.5697/oc.53-1-TI.335>
- Salmela J., E. Kasvi & P. Alho (2020) River plume and sediment transport seasonality in a non-tidal semi-enclosed brackish water estuary of the Baltic Sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 245, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2020.106986>
- Sivkov V., V Gorbatskiy, A. Kuleshov & Y. Zhurov (2002) Muddy contourites in the Baltic Sea: an example of a shallow-water contourite system. *Geological Society, London, Memoirs* 22, 121–136. <http://dx.doi.org/10.1144/GSL.MEM.2002.022.01.10>
- Smith T. & W. N. Li (1966) Echo-sounding and sea-floor sediments. *Marine geology* 4 (5), 353–364
- Soomere T. & A. Räämet (2011) Long-term spatial variations in the Baltic Sea wave fields. *Ocean Science* 7, 141–150. <http://dx.doi.org/10.5194/osd-7-1889-2010>
- Soomere T. & A. Räämet (2011) Spatial variations in the wave climate change in the Baltic Sea. *Journal of Coastal Research* 64, 1–5. <https://doi.org/10.5697/oc.53-1-TI.335>
- SYKE (2020) Merenpohjan ominaispiirteet. 7.12.2021. <https://www.ostersjon.fi/fi-FI/Luonto_ja_sen_muutos/Ainutlaatuinen_Itameri/Merenpohjan_ominaispiirteet>
- Suominen T., H. Tolvanen & R. Kalliola (2010) Geographical persistence of surface-layer water properties in the Archipelago Sea, SW Finland. *Fennia* 188: 2, 179–196.

- Suursaar Ü. (2010) Waves, currents and sea level variations along the Letipea — Sillamäe coastal section of the southern Gulf of Finland. *Oceanologia* 52, 391–416. <http://dx.doi.org/10.5697/oc.52-3.391>
- Tuomi L., E. Miettunen, P. Alenius & K. Myrberg (2018) Evaluating hydrography, circulation and transport in a coastal archipelago using a high-resolution 3D hydrodynamic model. *Journal of Marine Systems* 180, 24–36. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2017.12.006>
- Vallius, H. (2020) Sediment quality in the semi-enclosed Lumparn Bay, Åland Islands, Baltic Sea. *Marine Pollution Bulletin* 161, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111798>
- Veijalainen N., E. Lotsari, P. Alho, B. Vehviläinen & J. Käyhkö (2010) National scale assessment of climate change impacts on flooding in Finland. *Journal of hydrology* 391:3, 333–350. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.035>
- Virtasalo J. J., T. Kohonen, I. Vuorinen & T. Huttula (2005) Sea bottom anoxia in the Archipelago Sea, northern Baltic Sea – Impactations for phosphorus remineralization at the sediment surface. *Marine Geology* 224, 103–122. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2005.07.010>
- Weigel, B., H. C. Andersson, H. E. M. Meier, T. Blenckner, M. Snickars & E. Bonsdorff (2015) Long-term progression and drivers of coastal zoobenthos in a changing system. *Marine Ecology Progress Series* 528, 141–159. <http://dx.doi.org/10.3354/meps11279>
- Westerlund A., L. Tuomi, P. Alenius, E. Miettunen & R. E. Vankevich (2018) Attributing mean circulation patterns to physical phenomena in the Gulf of Finland. *Oceanologia* 60, 16–31. <https://doi.org/10.1016/j.oceano.2017.05.003>
- Winterhalter B. (1972) *On the geology of the Bothnian Sea, an epeiric sea that has undergone Pleistocene glaciation*. Geologian tutkimuslaitos. Otaniemi.
- Zaitseva-Pärnaste I., T. Soomere & O. Tribštok (2011) Spatial variations in the wave climate change in the eastern part of the Baltic Sea. *Journal of Coastal Research* 64, 195–199.

