

Glasiomariiniset kerrostumissysteemit

Tommi Kukkonen

Kandidaatintyö

Teknillinen tiedekunta

Geotieteiden tutkinto-ohjelma

Oulun yliopisto

5 / 2018

Tiivistelmä

Glasiomariiniset kerrostumissysteemit tarkoittavat ympäristöjä, joissa jään reuna päättyy mereen, ja joissa muodostuu geneettisesti yhtenäisiä litofasieskokonaisuuksia. Ympäristössä tapahtuu glasiaalivaikuttaisia prosesseja, joiden tuloksena syntyy kerrostumia. Kerrostumissysteemit voidaan jakaa jääproksimaaliasemaan, joka sijaitsee lähellä jäätikön reunaa, ja jäädistaaliasemaan, joka sijaitsee kauempana jäätiköstä. Kerrostumissysteemien vaikutus ulottuu laajalti mannerreunuksen ympäristöön ja jopa meren abyssoalisille tasangoille asti. Kerrostumasuknessioiden muodostumiseen ja sedimenttisaantoon vaikuttavat merkittävästi alueelliset ilmasto-olosuhteet.

Glasiaalivaikuttteisissa altaissa tapahtuvien merenpinnanvaihteluiden ja jäätikön aseman muutosten vuoksi merelliset allasrakenteet kokevat muutoksia. Muutokset voivat olla eustaattisia eli jäätikön kokoon liittyviä muutoksia, tai glasioisostaattisia eli jään painaman maan kuoren palautumiseen liittyviä muutoksia. Muutokset vaikuttavat myös altaan energiatasoihin, jotka puolestaan vaikuttavat sedimentaatioprosessien tehokkuuteen. Jäätiköstä irtoavilla jäämassoilla on merkittävä ympäristöä ja merenpohjaa muovaava vaikutus etenkin korkeilla leveysasteilla.

Glasiomariinisten prosessien ja kerrostumien sekä glasiaalisten sedimenttisuknessioiden tulkitseminen auttaa ymmärtämään aiempaa jäätiköitymishistoriaa ja menneitä ilmasto- ja paleoympäristöolosuhteita. Kerrostumisprosessien tulkinta on hankalaa, mutta glasiaalisedimentologinen tieto voi auttaa ratkaisemaan tulevaisuuden ympäristöongelmia laajenevilla urbaaneilla alueilla.

Avainsanat: kerrostumissysteemit, glasiomariininen, merenpinnanvaihtelut, glasiaali, faasi-suknessio

Sisällysluettelo

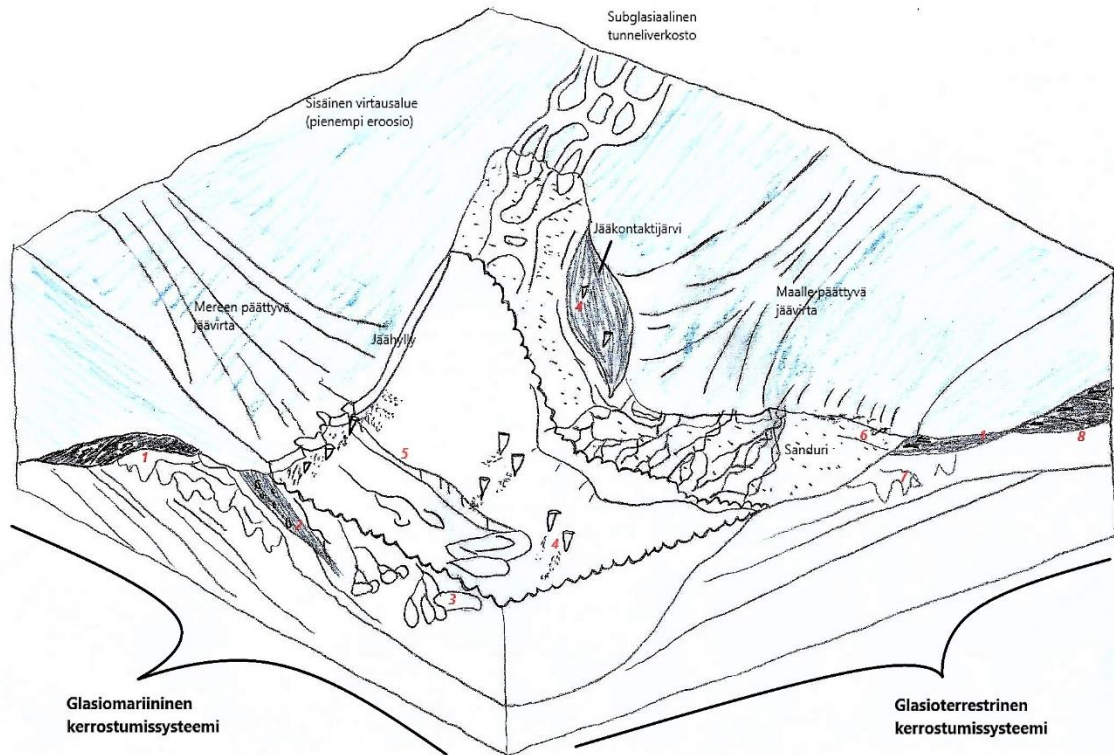
1. Johdanto	1
2. Jääproksimaaliaseman kerrostumissysteemit	2
3. Jäädistaaliaseman kerrostumissysteemit	6
3.1 Mannerhylly	6
3.2 Mannerrinne	7
4. Glasiaalivaikutteiset allaskonstruktiot	9
4.1 Merenpinnanvaihtelut ja jäätikön aseman muutokset	9
4.1.1 Korkean vaiheen interglasiaali	10
4.1.2 Jään eteneminen tai vetäytyminen	11
4.1.3 Matalan vaiheen glasiaali	11
4.2 Kelluvat jäämassat glasiaalivaikutteisissa altaissa	14
5. Yhteenveto	15
Lähteet	17

1. Johdanto

Glasiomariiniset ympäristöt ovat merellisiä ympäristöjä, joissa vaikuttavat glasiaaliset prosessit. Kerrostumissysteemit ovat tietyllä maantieteellisellä alueella tai ympäristössä muodostuvia kolmiulotteisia, geneettisesti yhtenäisiä litofasieskokonaisuuksia (James ja Dalrymple, 2010). Sedimenttikerrostumat voivat olla glasio-terrestriaalisia tai glasiomariinisia (Kuva 1), riippuen siitä päättyykö jäätikön reuna maalle vai mereen (Le Heron, 2009). Glasiaalisten prosessien ymmärrys merellisessä ympäristössä perustuu osaltaan rajoitettuun määrään modernia havainnoitua tietoa ja aiemmin tulkittuun sekä analysoituun tietoon subglasiaalisista ja glasiomariinisista kerrostumista. Glasiaalisten kerrostumisprosessien tulkinta on kuitenkin hankalaa. Tekijöistä, jotka kontrolloivat eroosiota, kuljetusta ja sedimenttien kerrostumista monissa glasiaalisissa ympäristöissä, tiedetään hyvin vähän (James ja Dalrymple, 2010).

Glasiomariinisten ympäristöjen sedimentaatiotyylisiin vaikuttaa merkittävästi alueellinen ilmasto, joka määrittää ennen kaikkea ympäristöön saapuvien sulavesien määrän. Esimerkiksi korkeat sedimentaatiomäärät glasiomariinisten ympäristöjen mannerhyllillä selittyvät lämpimällä alueellisella ilmastolla, jossa sulavesien ja hienoainessedimentin määrä on korkea. Vastaavasti polaarilla alueilla, kuten Antarktiksella, sulavesi- ja sedimenttisaanto on alhainen, mutta kemiallinen ja biogeeninen sedimentaatio on tällaisissa kylmissä ympäristöissä suhteellisen runsasta. Paksut glasiomariiniset kerrostumasuknessiot ovat todennäköisimmin muodostuneet lämpimissä ilmasto-oloissa (James ja Dalrymple, 2010) ja näillä kerrostumilla on myös suurempi säilymispotentiaali. Glasiomariinisten kerrostumien ja prosessien ymmärtäminen onkin tärkeää tulkittaessa maapallon jäätiköitymishistoriaa (Bennett ja Glasser, 2009). Glasiomariinisessa ympäristössä hallitsevina prosesseina toimivat glasiaaliset- ja merelliset prosessit. Glasiaaliset prosessit toimivat jääproksimaaliasemassa, eli jääkontaktiympäristössä, ja merelliset prosessit toimivat jäädistaaliasemassa vaikuttavissa mannerhyllyn ja mannerrinteen ympäristöissä (James ja Dalrymple, 2010).

Tämän kandidaatintyön tarkoituksena on selvittää glasiomariinisten ympäristöjen kerrostumissysteemejä sekä merenpinnanvaihteluiden ja jäätikön aseman muutosten vaikutusta glasiaalivaikutteisten merialtaiden prosesseihin ja kerrostumiin.

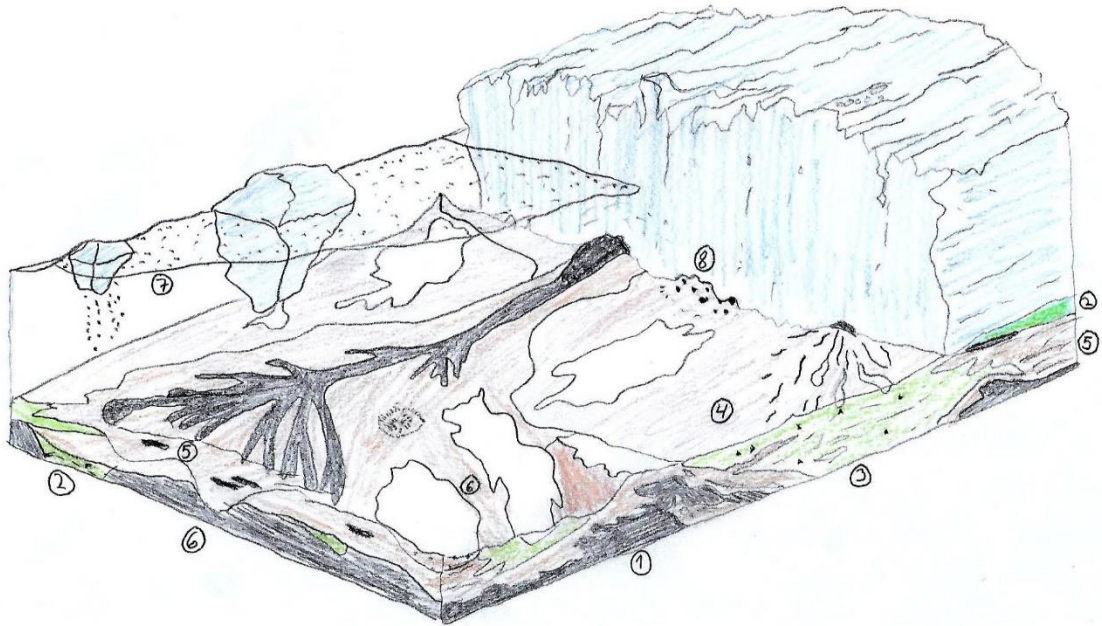


Kuva 1. Glasiaalivaikutteisia kerrostumisprosesseja mereen ja maalle päättyvissä jään reunan ympäristöissä. 1: subglasiaalinen deformaatio, 2: glasiogeenisiä debris- ja turbidiittivirtauksia, 3: subakvaattinen viuhka, 4: rain-out diamiktoni, 5: vedenalainen kouru, 6: työntömoreenia 7: laaksontäytteitä, 8: moreeniainesta (mukaellen Le Heron, 2009)

2. Jääproksimaaliaseman kerrostumissysteemit

Lønnen (1995) mukaan glasiomariinisen ympäristön jääproksimaaliaseman systeemiä kuvaa monien eri tekijöiden monimutkainen vuorovaikutus, joiden tuloksena syntyy erilaisia fasies- ja kerrostumiskokonaisuuksia (Kuva 2). Le Heronin (2009) mukaan

glasiaalivaikutteiset kerrostumat ja pinnanmuodot esiintyvät fasioksen kanssa lähekkäin samalla tavalla glasiomariinisessa ympäristössä kuin ei-glasiaalisillakin mannerhyllyllä.

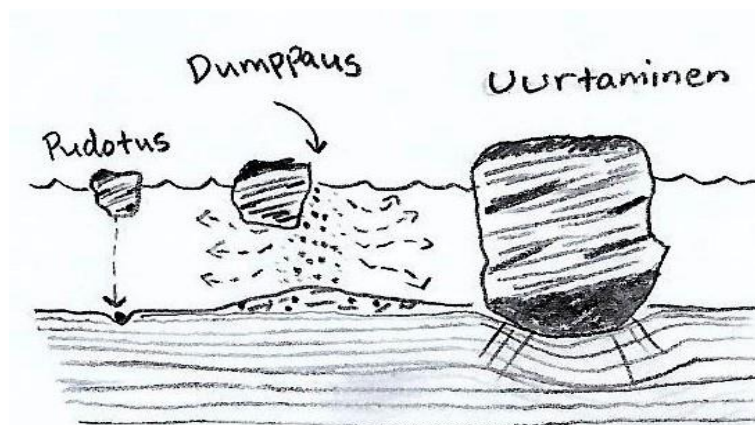


Kuva 2. Jääproksimaaliaseman kerrostumien fasiaesmalli. 1: glasiotektonisoitunutta merisedimenttiä tai kallioperää, 2: deformaatiomoreeni, 3: kerroksellisia diamiktoni kerrostumia, 4: mutaa, jossa jään kuljettamaa debristä, 5: soraa ja hiekkaa sisältävä subakvaattinen viuhka, 6: sedimentin gravitaatiovirtausfasies, 7: jäävuorten uurteita ja suspensiosedimenttiä, 8: työntöharjanne (mukaellen James ja Dalrymple, 2010)

Glasiomariinisen ympäristön ja jääproksimaaliaseman sijaitessa lämpimällä alueella ovat subglasiaaliset sulavesivirtaukset, jotka etenevät aina merenpohjaan saakka, hallitsevia prosesseja dynaamisessa ympäristössä. Virtaukset aiheuttavat *underflow*-kerrostumista ja sedimenttien gravitaatiovirtauksia, joiden tuloksena proksimaaliasemaan syntyy subakvaattisia viuhkoja, joissa on nähtävillä karkeita sora- ja hiekkafasieskerroksia (James ja Dalrymple, 2010). Kerrostumisympäristöä muovaavia tekijöitä ovat sedimentaatiotyylit, eri kerrostumisprosessien ominaisuudet ja glasiotektonisen deformaation rooli. Glasiotektoninen deformaatio voi olla tärkeässä roolissa subakvaattisen viuhkan kerrostumisessa, sillä se kontrolloi niin sedimenttisaantoa kuin viuhkan leviämistäkin (Lønne, 1995). Sulavesi, joka omaa alhaisemman tiheyden kuin merivesi, ja joka sisältää hienoa suspensiosedimenttiainesta kohoaa kohti pintaa luoden pluumeja, jotka voivat

ulottua kymmenien kilometrien etäisyydelle jäätiköstä. Kun pluumit saapuvat rauhallisemmille vesille sedimentti laskeutuu merenpohjaan, jonne kerrostuu mutapeitteitä. Vuoroveden virtaukset vaikuttavat pluumien kerrostumiseen ja niiden yhteisprosessit voivatkin muodostaa laminoituneita mutafasieksia eli vuorovesirytmiteitä (James ja Dalrymple, 2010).

Rain-out diamiktonifasies syntyy alueilla, joilla jäävuoret pudottavat kuljettamaansa debristä merenpohjaan (James ja Dalrymple, 2010). Jäävuoret saattavat kerrostaa kuljettamaansa ainesta pudottamalla yksittäisiä vajokiviä (*eng. dropstone*) tai dumpaamalla suuria määriä debristä kerralla. Jäävuoret voivat myös kulkea pohjaa pitkin, jolloin kerrostunut sedimentti deformoituu jäävuoren painosta (Kuva 3). Suurin osa jäävuoren kuljettamasta sedimentistä vapautuu ensimmäisten 200 km aikana, ja jäävuori on arvioiden mukaan jo täysin debrisivapaa noin 400 km päässä jäätikönreunasta (Benn ja Evans, 1998). Rain-out diamiktonifasieksella voi olla monia rakenteellisia ominaisuuksia riippuen vapautuneen debriksen määrästä ja koostumuksesta, sulavesien kuljettamasta hienoinessaannosta ja aalto- ja vuorovesivirtausten lajittuneisuusominaisuuksista merenpohjassa. Hiekkarikkaat diamiktonifasieksiset muodostavat litofasiesjatkumon kivisten hiekkojen ja huonosti lajittuneiden sorien kanssa kasaantuessaan alueilla, joille ovat tyypillisiä jaksottaiset traktiovirtaukset (James ja Dalrymple, 2010).



Kuva 3. Jäävuorten kerrostamat yksittäiset vajokivet ja suuremmat debrismäärät. Pohjaa uurtavat jäävuoret deformoivat alla olevaa sedimenttiä (mukaellen Benn ja Evans, 1998)

Jyrkkien rinteiden romahtaminen aikaansaa sedimentin gravitaatiovirtauksia, joista kerrostuu diamiktonifasiuksia. Virtausten aikana heterogeeninen sedimentti (sora, hiekka, siltti, savi) sekoittuu tuottaen lopulta koostumukseltaan erilaisia fasieskokonaisuuksia. Huonosti lajittunutta pohjan debristä virtaa ulos grounding-lineista jäätikön edustalla. Debris saattaa liikkua pois päin jäätiköstä debrisivirtauksina ja synnyttää grounding-line viuhkoja (*eng. grounding-line fan*). Jäätikön edustalla sijaitseva grounding-line etenee merelle päin usein kausittaisesti talvikausina tapahtuvien sulavesien vähenemisten ja jäävuorten irtoamisten vuoksi (James ja Dalrymple, 2010). Jäätikön ollessa pitkään paikallaan grounding-line viuhkat voivat kasvaa nopeasti ja ilmestyä vedenpinnan yläpuolelle luoden jääkontakti deltoja. Viuhkat kasvavat lateraalisuunnassa sulavesistä saadun materiaalin myötä, ja deltan etuosassa gravitaatiovirtausten myötä (Bennett ja Glasser, 2009). Sedimentin kasaantumista on mitattu jopa 17 m per vuosi Alaskan vuonoilla. Jäätikön etenemisen myötä sedimentti työntyy vedenalaiseksi harjanteeksi tai moreenipenkaksi (*eng. moraine bank*). Mannerhyllyillä moreenipenkat usein kuvastavat jään ulointa rajaa. Moreenipenkkojen sedimentti on usein deformatunutta johtuen glasiotektonisista prosesseista, kuten poimuttumisesta. Jään edetessä penkkojen yli saattaa sedimentti deformatua, jolloin siitä muodostuu deformaatiomoreenia (James ja Dalrymple, 2010). Bennin ja Evansin (1998) mukaan moreenipenkkoja ei tulisi kuitenkaan eritellä omiksi kerrostumissysteemeikseen, koska jäätikön grounding-lineilla tapahtuu aktiivisesti laajoja kerrostumis- ja deformaatioprosesseja. Heidän mukaansa moreenipenkat tulisi luokitella osaksi eriytyneiden grounding-line viuhkojen, sulavesimoreenipenkkojen sekä jään edustan puristus- ja työntömoreenien jatkumoa.

Glasiomariinisen ympäristön sedimenttisuknessiot sisältävät heterogeenisiä fasiestyyppejä, joissa on näkyvissä nopeaa fasioksen vaihtelevuutta lateraali- ja vertikaalisuunnissa sekä epäsäännöllistä kerrosgeometriaa. Vanhemmissa suknessioissa glasiomariininen fasies voidaan erottaa terrestriaalisesta fasieksesta makro- ja mikrofaunan avulla, vaikkakin jääproksimaalin ympäristössä biologista aktiviteettia saattaa esiintyä niukalti. Iknofossiileja (*eng. trace fossils*) löytyy harvakseltaan nopeasti kerrostuneista

jääproksimaalikerrostumista, mutta niitä esiintyy runsaammin mitä kauemmas jäätikön reunasta edetään. (James ja Dalrymple, 2010)

3. Jäädistaaliaseman kerrostumissysteemit

Jamesin ja Dalrymplen (2010) mukaan jäädistaaliaseman glasiomariinisia ympäristöjä löytyy monista merellisistä asemista. Matalien korkokuvien ympäristöjä ovat heidän mukaansa mannerhyllyt ja abysaaliset tasangot ja korkean korkokuvan ympäristöjä manerrinteet ja vuonot. Näihin ympäristöihin saapuva sedimentti on pääosin peräisin hienoainespluumeista, jäävuorista, massavirtauksista ja merivirtauksista. Knaustin ja Bromleyn (2012) mukaan jääproksimaalivyöhykkeeseen kerrostuu tavallisesti karkeampi sedimenttifasies ja jäädistaaliosaan hienompi sedimenttifasies. Vuonoilla jääproksimaalikerrostumat sijaitsevat rinteillä ja jäädistaalikerrostumat ulottuvat sedimenttialtaaseen turbiidiitteinä. Eroosion vaikutus on alueilla merkittävä, joten stratigrafiset epäjatkuvuuspinnat ovat yleisiä.

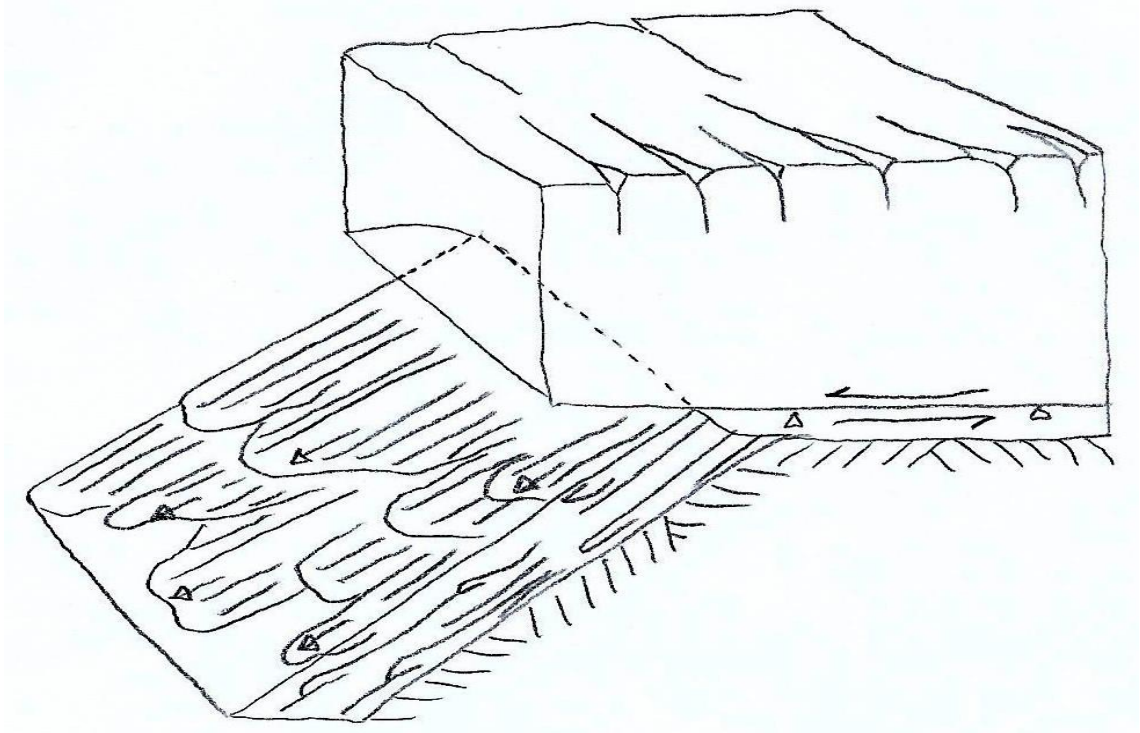
3.1 Mannerhyllä

Lämpimien glasiaalivaikutteisten mannerhylläjen merkittävin sedimentaatioprosessi on jäävuorten hienoainessedimentistä ja karkeasta debriksestä kerrostuvat rain-out diamiktonifasiekset. Paksuudeltaan ne voivat olla kymmeniä metrejä, rakenteettomia tai kerrostuneita riippuen sedimentin rakenteellisista ominaisuuksista ja merivirtojen kyvystä lajitella sedimenttiainesta. Glasiomariinisissa olosuhteissa syntynyt rain-out diamiktoni sisältää runsaasti mikrofaunaa ja kotilomaista makrofaunaa. Kerrostumisnopeudet voivat olla 1 m/1000a ja jään kuljettama debris voi kulkeutua satojen kilometrien etäisyydelle lähtöalueeltaan. (James ja Dalrymple, 2010)

Nopeasti kerrostunut hienorakeinen sedimentti omaa korkean huokosvesipaineen, jonka vuoksi uudelleensedimentaatioprosessit ovat mahdollisia mannerhyllyn loivillakin rinteillä. Sedimenttien gravitaatiovirtauksia voivat aiheuttaa seismiset shokit, myrskyt ja jäävuorten uurtamisprosessit (James ja Dalrymple, 2010). Sedimentti voi lähteä uudelleen liikkeelle myös syvien merivirtojen liikkeen vaikutuksesta. Uudelleensedimentaatioon johtavat prosessit ovat tärkeitä tekijöitä sellaisilla mannerhyllillä, joilla alun perin kerrostuneeseen sedimenttiin vaikuttaneet prosessit eivät ole olleet välttämättä kovin voimakkaita (Benn ja Evans, 1998). Diamiktoni, joka on kerrostunut rain-out prosessien myötä voi olla vaikea erottaa uudelleensedimentoituneesta aineksesta, varsinkin jos kerrostumat eivät sisällä turbidiitteja tai faunaa. Glasiaalivaikutteisilla mannerjalustoilla voi esiintyä kourumaisia laaksoja, jotka halkovat mannerjalustaa merelle päin. Laaksoja pitkin kulkee suuria määriä glasiaalista sedimenttiä gravitaatiovirtauksina, ja ne kerrostuvat rinteiden juurelle merenalaisiksi keiloiksi. Kerrostumat koostuvat pääasiassa karkea- ja hienorakeisista turbidiiteista sekä debriiteistä, jotka syntyvät debrisvirtauksista. Debrisvirtaukset saattavat virrata jopa satoja kilometrejä rinnettä alaspäin abyssoisille tasangoille (James ja Dalrymple, 2010).

3.2 Mannerrinne

Mannerhyllystä eteenpäin sijaitsee mannerrinne, joka on usein glasiaalisen sedimentin viimeinen kerrostumispaikka. Sedimentit kulkeutuvat mannerhyllyn poikki jäätikön kuljettamana ja lopulta mannerhyllyn reunan yli. Jäätikön prosessien kuljettama sedimentti kulkeutuu rinnettä alaspäin gravitaatiovirtauksina (James ja Dalrymple, 2010) ja kerrostuu laajoiksi rinteiden myötäisiksi, kaukalomaisiksi viuhkoiksi (*eng. trough-mouth fan*) (Kuva 4). Viuhkat saattavat liikkua edelleen rinnettä alaspäin rinnevalumana (*eng. slumping*). Jään reunan ollessa lähellä mannerhyllyn reunaa rinteiden kasvu merelle päin (progradaatio) jatkuu tuottaen jyrkkiä perättäisiä kerroksia (*eng. foresets*) (Bennett ja Glasser, 2009) debriittejä. Vanhoista glasiomariinisista sukessioista pystytään havainnoimaan hyllyn reunan ja ylemmän rinteiden laajamittaista rinnevalumaa, joissa on havaittavissa suuria määriä kulkeutunutta sedimenttiä ja olistostroomeja. Tällaisia sukessioita on löydetty muun muassa Skotlannista (James ja Dalrymple, 2010).



Kuva 4. Viuhkojen (trough-mouth fan) muodostuminen mannerrinteelle (mukaellen Bennett ja Glasser, 2009)

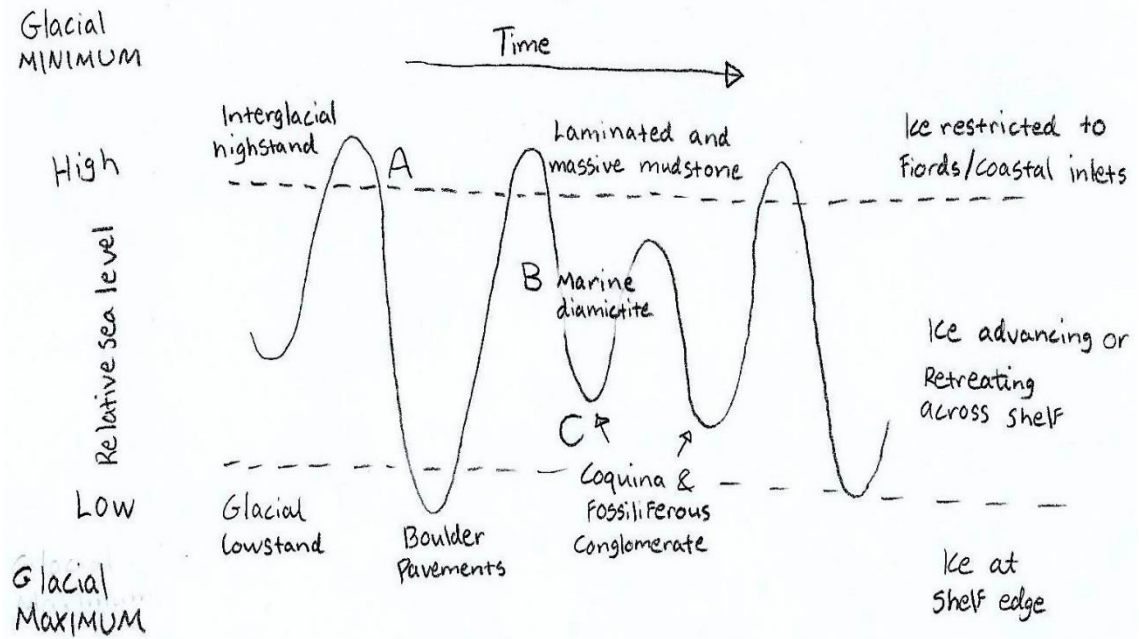
Aktiiviset uomat mannerrinteessä mahdollistavat glasigeenisten debris- ja turbidiittivirtausten liikkeen syvemmälle merelliseen ympäristöön. Sedimenttiä kulkeutuu näin suuria määriä ja niistä kerrostuu karkearakeisia sora- ja hiekkafasieksia sekä kerrostuneita diamiktonifasieksia rinteen juurelle ja rinteen uomiin ja viuhkoihin. Rinnettä halkoviin uomiin kasaantuu myös paksuja uudelleensedimentoituneita diamiktoniyksiköitä jään liikkua ja kuljettaessa karkearakeista sedimenttiä mannerhyllyn poikki ja sen reunan ylitse. Korkean konsentraation turbidiittivirtaukset saavat materiaalinsa jäätikön sulamisvesistä, joiden mukana kulkeutuu suhteellisen hyvin lajittunutta, karkearakeista sedimenttiä. Tällaiset karkearakeiset virtaukset kasaavat kerrostumattomia ja karkearakeisia sora- ja hiekka sukessioita (James ja Dalrymple, 2010). Jäävuorten kuljettama ja pudottama debris kerrostuu rinteelle diamiktonikerrostumina, jos debrismäärä jäävuorissa on runsasta. Jäävuori voi pudottaa debristä myös yksittäisinä klasteina tai vajokivinä, jos jään kuljettamaa debristä on suhteellisen vähän (Bennett ja Glasser, 2009). Jäävuorten pudottamia klasteja voi esiintyä massiiveissa ja laminoituneissa sedimenttikerrostumissa,

jolloin niistä voidaan käyttää termejä *dropstone diamicton* tai *dropstone mud*, riippuen klastien koosta. Vajokividiamiktonit- ja mudat peittävätkin laajalti aiempaa topografiaa ja ne voivat olla heikosti kerrostuneita (Benn ja Evans, 1998).

4. Glasiaalivaikutteiset allaskonstruktio

4.1 Merenpinnanvaihtelut ja jäätikön aseman muutokset

Suhteellisella merenpinnantasolla on suuri vaikutus glasiaalivaikutteisiin prosesseihin. Samoin glasiaalivaikutteiset prosessit vaikuttavat merkittävästi suhteelliseen merenpinnan tasoon. Vaihtelut ovatkin pitkälti riippuvaisia maapallon jäämassojen muutoksista (Menzies, 1995, 1996). Glasiaalivaikutteisilla mannerhyllyillä sedimentaatioon vaikuttavat niin merenpinnanvaihtelut kuin muutokset energiajärjestelmissäkin (Kuva 5). Merenpinnanvaihteluihin ja energiajärjestelmien muutoksiin vaikuttavat globaalit merenpinnan vaihtelun muutokset eli eustaattiset muutokset, jotka aiheutuvat jäätiköiden laajenemisista ja sulamisista, sekä paikalliset glasioisostaattiset muutokset, jotka aiheutuvat jään painon aikaansaamista muutoksista maan kuoressa (James ja Dalrymple, 2010).



Kuva 5. Merenpinnanvaihteluiden sekä jäätikön aseman ja energijärjestelmien muutosten vaikutus glasiaalivaikutteisilla mannerhyillyllä (mukaellen James ja Dalrymple, 2010)

4.1.1 Korkean vaiheen interglasiaali

Jäätikön vetäytyessä (tai tektonisen laskun myötä) jäätikköminimiin merenpinta nousee ja energiatasot mannerhyillyllä laskevat. Tämä johtaa laajojen mutakerrosten, joissa on näkyvillä bioturbaatiota, kasaantumiseen. Tällaisten kerrostumien aikana ympäristön klastinen sedimenttisaanto on tehostunut ja ne liittyvät tyypillisesti korkean vaiheen interglasiaalisiin olosuhteisiin (interglacial highstand) (Kuva 6A), jolloin merenpinta on kohonnut mannerhyllyn reunan yläpuolelle. Mallit jään etenemisestä ja perääntymisestä mannerjalustoilla ovat monella tapaa monimutkaisia, etenkin glasioisotaattisten, glasioeustaattisten ja tektonisten muutosten vuoksi sekä näiden vaikutuksista merenpinnan muutoksiin. Tämän vuoksi paleoklimaattisten epäjatkuvuuksien, eroosiopintojen ja mutakerrostumien tulkinta glasiaalivaikutteisilla mannerhyllyn sukkessioilla on hankalaa. Mannerreunukset, joita kuvaavat syvänmeren ympäristöt ja jotka vajoavat hitaasti voivat toimia ympäristöinä paksuille glasiaali ja glasiomariinisille sedimenttikerrostumille vaikka sedimentaatio onkin kylmissä ympäristöissä hidasta. Tällainen mannerreunus on muun muassa Antarktiks. Sen mannerhyllyn sukkessioissa on näkyvillä pinnanalaisia

topset- kerroksia, joissa tapahtuu aggradaatiota. Sukkessoiden moreenista voidaan saada selville toistuvia jäätikön etenemisiä ja kerrostumia ja moreeni onkin tärkeä komponentti tulkittaessa näitä suknessioita. (James ja Dalrymple, 2010)

4.1.2 Jään eteneminen tai vetäytyminen

Jään edetessä tai vetäytyessä mannerhyllyn ylitse vedenpinta voi nousta tai laskea (Kuva 6B). Merenpinnan laskiessa merkittävästi jään reuna voi edetessään aiheuttaa alustan eroosiota tai moreenin kerrostumista. Jäätiköstä irronneet jäävuoret kerrostavat karkearakeista sedimenttiä ympäristöön rain-out- tai uudelleensedimentoituneena diamiktonina, (James ja Dalrymple, 2010) joissa esiintyy lajittunutta kerroksellisuutta, jos debrissaanto on jaksottaista. Vedenpinnan ollessa liian matalalla ja debrissaannon ollessa jatkuvaa ei kerroksellisuutta synny. Myös kausittainen merijää kuljettaa ja kerrostaa debristä glasiomariiniseen ympäristöön. Esimerkiksi lumi-, kivi- ja mutavyöryjen kuljettaessa debristä merijäälle voi debris kulkeutua edemmäs ja lopulta kerrostua jään sulaessa tai pudottaessa debriksen merenpohjaan (Bennett ja Glasser, 2009).

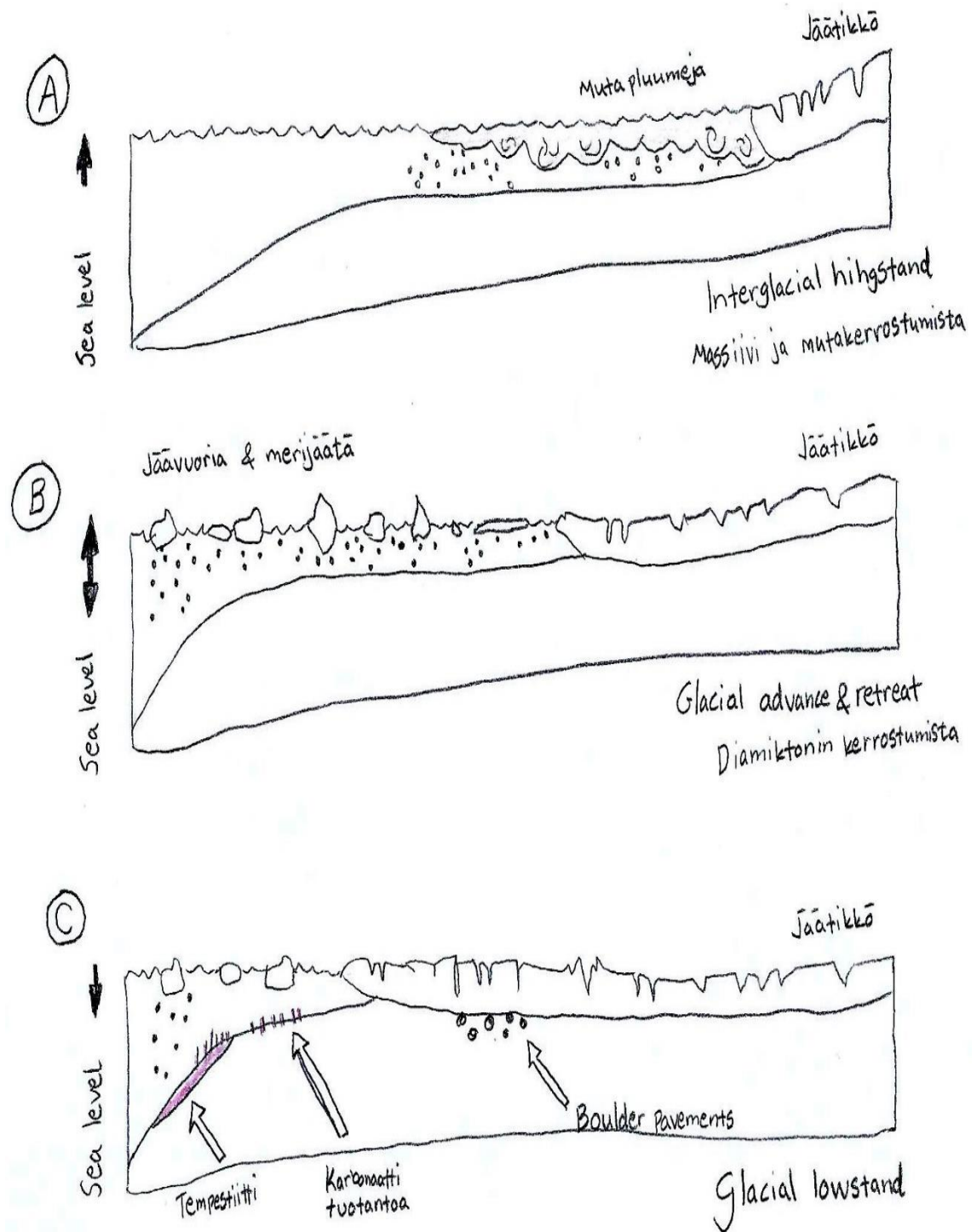
Pienikin merenpinnan nousu voi vaikuttaa vuorovesijäätiköiden stabiilisuuteen, jolloin jäätiköstä irtoavilla jäämassoilla voi olla katastrofaalisia seurauksia. Tällaisia tapahtumia voi kuitenkin olla stratigrafisesti vaikea tunnistaa (Lønne, 1995). Merenpinnan noustessa tarpeeksi, ja riippuen jäätikön paksuudesta saattaa se alkaa kellua prosessissa, joka tunnetaan nimellä *decoupling*. Tämä taas voi johtaa nopeaan ja laajaan jäätiköiden mannerhyllysten hajoamiseen (Anderson ja Molnia, 1989).

4.1.3 Matalan vaiheen glasiaali

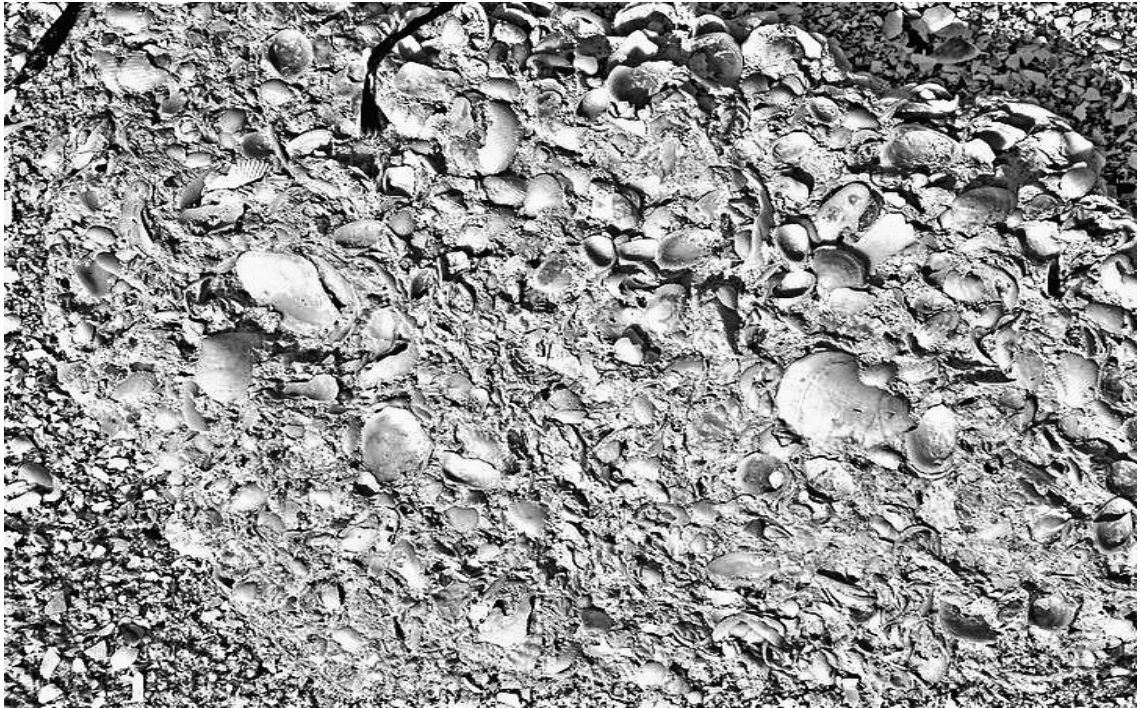
Jäätikkömaksimin (glacial lowstand) (Kuva 6C) aikana jäätikkö on laajimmillaan aiheuttaen minimaalista isostaattista depressiota mannerhyllyllä sekä glasioeustaattista merenpinnantason alenemista. Tämä saattaa johtaa siihen, että laajoja mannerhyllyn alueita nousee niin sanotun storm wave-basen yläpuolelle. Tämä johtaa aiemmin kerrostuneen

diamiktonin eroosioon, jossa hienempi aines kuluu pois tuulen ja veden työn tuloksena ja jäljelle jää epäjatkuvuuspintoja ja jäännöslohkareita (*eng. boulder lag*). Myöhemmin etenevä jäätikkö saattaa luoda lohkaraisiin uurteita sekä uurtaa itse merenpohjaa luoden lohkarapäällysteitä (*eng. boulder pavements*) (James ja Dalrymple, 2010). Lohkarapäällysteet muodostuvat tyypillisesti matalilla mannerhyllyn alueilla, kun eroosiovoimat kuluttavat jäävuorista ja aalto- ja vuorovesien kerrostamasta diamiktonista hienorakeista ainesta pois. Jäätikön liikkuesssa lohkarapäällysteiden ylitse niiden pinnalle muodostuu juovia ja tasomaisuutta (Bennett ja Glasser, 2009).

Merenpinnan ollessa suhteellisen matalalla myös hienorakeisen sedimentin kerrostuminen vähenee. Tähän syynä ovat voimakkaat aallot ja merivirtaukset. Aiemmin kerrostunut sedimentti saattaa lähteä uudelleen liikkeelle ja lajittua storm wave- prosessien myötä, jolloin sedimentti voi kerrostua uudelleen kumpu- ja aaltomaisiksi, ristikerrokselliseksi hiekoiksi tai tempesteiteiksi. Kylmillä ja/tai korkean energian olosuhteiden mannerhyllyllä klastinen sedimenttisaanto vähenee, mutta se mahdollistaa kalsiittisten selkäränkaisyhdyskuntien kerrostumisen jäännöslohkareiden pinnoille, joihin muodostuu kotilo- maista sedimenttikiveä, *coquinaa* (Kuva 7) (James ja Dalrymple, 2010). Näiden sedimenttikivien fauna viihtyy matalan meren ympäristöissä, joissa tapahtuu hyvin vähän sedimentin kerrostumista. Coquinoiden muodostuminen liittyykin todennäköisesti voimakkaampiin virtauksiin, jotka estävät mutapeitteiden kerrostumista (Benn ja Evans, 1998). Glasiomariiniset sukkessiot, joissa on havaittavissa karbonaattirikkaita horisontteja voivat liittyä jäätikön etenemisvaiheeseen mannerhyllyllä. Tällaisia vaiheita kuvaa vähentynyt klastinen sedimenttisaanto, joka vastaavasti johtuu merenpinnan laskusta ja korkean energian olosuhteista (James ja Dalrymple, 2010).



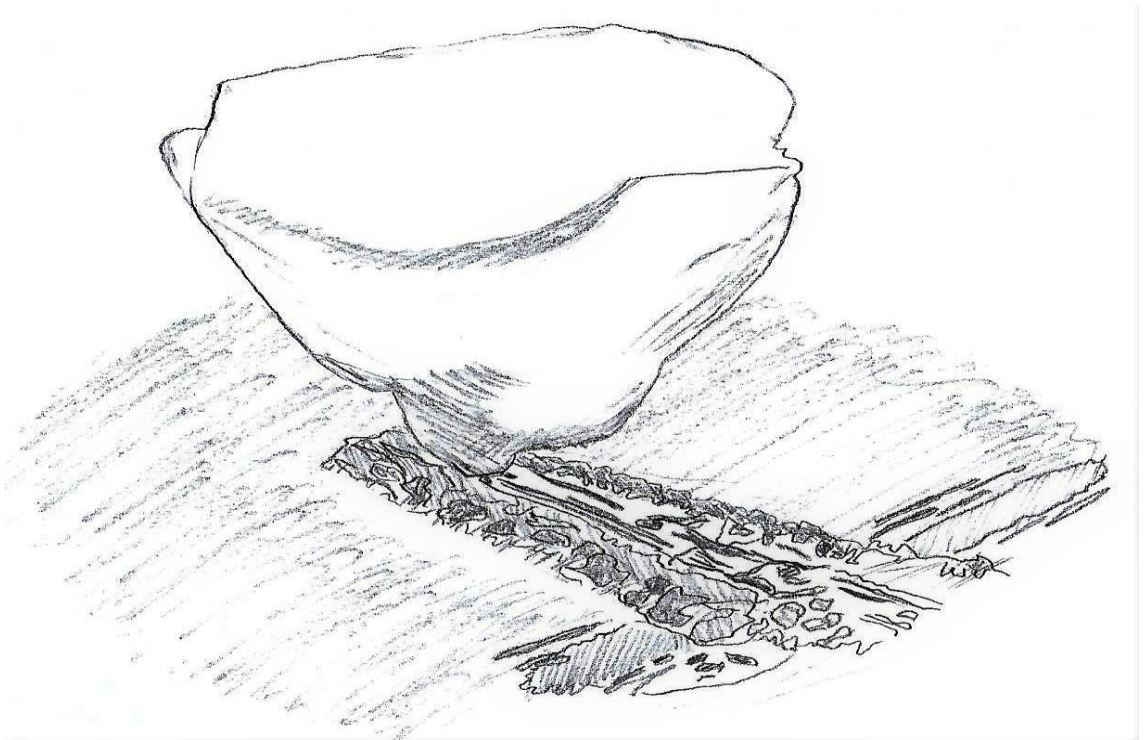
Kuva 6. A: Interglasiaalisten vaiheiden aikana meriveden pinta on korkealla ja mutakerrostuminen on yleistä, **B:** Jään edetessä tai perääntyessä vedenpinta vastaavasti nousee tai laskee. Kelluvat jäämassat kerrostavat rain-out- ja uudelleensedimentoitunutta diamiktonia, **C:** Merenpinnan ollessa matalalla jäätikkö saattaa edetä mannerhyllyn ylitse. Samaa aikaan se muodostaa lohkaräpällysteitä ja kerrostaa moreeniainesta (mukaellen James ja Dalrymple, 2010)



Kuva 7. Kvartäärikaudella muodostunutta fossiilipitoista kalkkikiveä, coquinaa. Anastasian muodostuma, Florida, USA (muokattu St. John, 2009)

4.2 Kelluvat jäämassat glasiaalivaikutteisissa altaissa

Kelluvilla jäämassoilla, joita voivat olla jäävuoret tai laajat kausittaiset tai monivuotiset ahtojäät, on merkittävä vaikutus glasiomariiniseen ympäristöön. Kausittaiset jääkiilat ja pohjaa kyntävät jäävuoret synnyttävät merenpohjaan kouruja (Kuva 8). Niitä esiintyy runsaasti korkeampien leveysasteiden mannerhyllillä. Jäävuorten tuottamat pohjan kourut voivat olla jopa 50 m leveitä ja useita metrejä syviä sekä ulottua useiden kilometrien pituudelle. Jääkiilat aiheuttavat matalissa vesissä jatkuvaa turbaatiota, jolloin hienosedimenttiaines joutuu uudelleen suspensioon. Tämä synnyttää karkearakeisia jäännösturbaatteja (*eng. lag turbates*) merenpohjaan. Jäävuorten uurtamisprosessin aikana saattaa merenpohjaan ilmestyä koloja ja kuoppia (*eng. pock marks*). Kuopat syntyvät jäävuorten aikaansaamien pinnanalaisten kaasu- ja vesipurkausten vuoksi. Jäävuorten uurteita ja pohjan kuoppia esiintyy harvoin vanhemmissa glasiaalikerrostumissa, sillä ne häviävät nopeasti aalto- ja uudelleensedimentaatioprosessien myötä. (James ja Dalrymple, 2010)



Kuva 8. Jäävuoret saattavat kyntää merenpohjaan kouruja, jolloin hienoainessedimentti joutuu suspensioon (mukaellen Kenny, 2009)

5. Yhteenveto

Glasiomariiniset kerrostumissysteemit koostuvat prosesseista ja kerrostumista, jotka toimivat glasiaalivaikutteisessa merellisessä ympäristössä. Prosessit ovat moninaisia kokonaisuuksia ja niiden lopputuotteina muodostuu fasieskokonaisuuksia. Kerrostumissysteemejä voidaan tarkastella jääproksimaaliaseman ja jäädistaaliaseman kerrostumissysteeminä. Proksimaaliaseman systeemiä kuvaavat glasiaalivaikutteiset prosessit, jossa jäätikön liikkeellä ja kerrostavalla toiminnalla on ensisijainen rooli ympäristössä. Eri jäätikön prosessien kautta proksimaaliasemaan syntyy muun muassa subakvaattisia viuhkoja, hienoaines- ja diamiktonikerrostumia ja moreenipenkkoja. Distaaliaseman kerrostumissysteemissä dominoivia prosesseja ovat merelliset prosessit, kuten aalto- ja vuorovesivoimat. Distaaliasemaa tarkastellessa voidaan prosessit ja kerrostumat erotella mannerhyllyn ja

mannerrinteen aseman ympäristöihin. Aineksen kulku tapahtuu mannerhyllyn ylitse kerrostuen ensin mannerhyllylle ja mannerrinteeseen ja sitäkin kauemmaksi. Mannerhyllyn ja mannerrinteen kerrostumia ovat muun muassa rinteen turbidiitti- ja debrisvirtaukset. Proksimaali- ja distaaliasemien systeemeissä on molemmissa nähtävillä merellisten ja glasiaalivaikutteisten prosessien hallitsevia piirteitä. Altaissa tapahtuvat muutokset vaikuttavat merkittävästi sedimentaatioon. Jäätikön koon muutosten ja merenpinnan korkeuden muuttuessa myös altaan sedimenttisaanto kokee muutoksia. Näiden muutosten myötä vaikuttavien prosessien intensiteetti sekä kerrostumien ominaisuudet muuttuvat. Glasioisostaattisten ja glasioeustaattisten muutosten vuoksi muutoksia ilmenee myös altaan karbonaattituotannossa, sedimentaatiotyyleissä ja kerrostuvan sedimentin ominaisuuksissa, sekä jäämassojen myötä myös altaan pohjan rakenteissa ja topografiassa.

Ilmasto on ensisijainen tekijä merenpinnan ja jäätikön aseman muutoksissa. Lämpimien ja kylmien ilmasto-olosuhteiden erot vaikuttavat olennaisesti jäätiköiden sulavesien määrään ja näin ollen myös sedimentin kerrostumisnopeuksiin altaissa. Jamesin ja Dalrymplen (2010) mukaan glasiaalisten sedimenttisukessioiden ymmärrys on tärkeää, jotta voidaan tulkita vanhempia ilmasto- ja paleoympäristöolosuhteita, ja ennen kaikkea ymmärtääksemme menneitä ilmastomuutoksia. Glasiaalisten kerrostumien ja niiden ominaisuuksien ja pinnan geometrian ymmärtäminen on tärkeää etenkin sellaisilla aiemmin jäätiköityneillä alueilla, joilla nykyisin ilmenee ympäristöongelmia, ja jotka nykyään ovat asutettuina. Tulevaisuuden jätteidenpoistopaikkojen sijainti, pohjaveden etsintä, veden pilaantuminen ja pintamaan laadunparannus ovat kaikki riippuvaisia glasiaalisista fasiesmalleista, joista voidaan tulkita sedimenttityypit ja niiden jakautuminen. Urbanien keskusten laajetessa tulee glasiaalinen sedimentologia tulevaisuudessa yhä tärkeämmäksi tekijäksi ympäristöongelmien ratkaisussa.

Lähteet

- Anderson, J.B., & Molnia, B.F. 1989. Glacial-Marine Sedimentation. American Geophysical Union, Washington, DC.
- Benn, D.I., & Evans, D.J.A. 1998. Glaciers & Glaciation. Oxford University Press, Inc., New York. p. 289-307, 412-421, 507-532.
- Bennett, M.R., & Glasser, N.F. 2009. Glacial Geology: Ice Sheets and Landforms. Second Edition. Wiley-Blackwell.
- James, N.P., & Dalrymple, R.W. 2010. Facies Models 4. Geological Association of Canada. p. 92- 102
- Kenny, S. 2007. Ice Gouging. Memorial University of Newfoundland. http://www.engr.mun.ca/~spkenny/Research/Env_Loads/Ice_Gouging/Ice_Gouging.htm [viitattu 17.4.2018]
- Knaust, D., & Bromley, R.G. 2012. Developments in Sedimentology. Vol 64. Trace Fossils as Indicators of Sedimentary Environments. p. 300-321
- Le Heron, D.P., ym. 2009. Ancient Glaciations and Hydrocarbon Accumulations in North Africa and the Middle East. Earth Science Reviews 93. p. 47-76
- Lønne, I. 1995. Sedimentary Facies and Depositional Architecture of Ice-contact Glaciomarine Systems. Sedimentary Geology 98. p. 13-43
- Menzies, J. 1995. Modern Glacial Environments: Processes, Dynamics and Sediments. Vol 1. Butterworth-Heinemann Ltd.
- Menzies, J. 1996. Past Glacial Environments: Sediments, Forms and Techniques. Vol 2. Butterworth-Heinemann Ltd.
- St. John, J. 2009. Coquina. Wikimedia.org. [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Coquina_\(Anastasia_Formation,_Pleistocene_or_Holocene;_Cayo_Costa_Island,_Florida,_USA\)_ \(26032505336\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Coquina_(Anastasia_Formation,_Pleistocene_or_Holocene;_Cayo_Costa_Island,_Florida,_USA)_ (26032505336).jpg) [viitattu 17.4.2018]