Hienosedimenttien kerrostumisesta ja pohjaeläinyhteisöjen toiminnasta Itämeren syvänteissä

Yhdistetyn sedimentologisen ja iknologisen analyysin mahdollisuuksia

JOONAS VIRTASALO JA AARNO KOTILAINEN

ääosa maapallon kivettyneistä ja kivettymättömistä sedimenttikerrostumista on muodostunut hienorakeisesta aineksesta (siltti ja savi). Siitä huolimatta hienorakeisten sedimenttien kerrostumisprosessit tunnetaan karkeampien maalajien kerrostumisprosesseja huonommin. Tämä lienee seurausta kahdesta seikasta. Ensinnä hienosedimenttien kerrosrakenteiden perusteellinen tarkastelu on työläämpää kuin karkearakeisempien sedimenttien, sillä se ei onnistu paljaalla silmällä, vaan apuna on käytettävä muita keinoja, kuten mikroskopiaa tai röntgenkuvausta. Toiseksi hienorakeisten maalaiien kerrostuminen on rakeiden välillä vaikuttavien koheesiovoimien ansiosta mutkikkaampi tapahtuma kuin karkeampien kitkamaalajien.

Oppikirjoissa hienosedimenttien esitetään kerrostuvan rakeiden pudotessa seisovassa väliaineessa Stokesin lakia noudattaen. Kokeellisesti tätä on helppo tarkastella esimerkiksi lisäämällä hienorakeista ainesta vedellä täytettyyn mittalasiin, ja mittaamalla hydrometrin avulla rakeiden sedimentoitumista liuoksesta useiden päivien ajan. Luonnossa useita päiviä täysin paikallaan seisova vesi on kuitenkin poikkeuksellista. Kokeellisissa ja sedimentologisissa tutkimuksissa onkin hiljattain osoitettu, että hienosedimenttejä voi tietyissä oloissa kerrostua myös verrattain nopeasti virtaavasta vedestä (mm. Gerdes et al. 2000, Gerdes 2007, Schieber 2007, Schieber et al. 2007, Schieber ja Southard 2009).

ltämeren syvänteissä kerrostuu hienosedimenttiä virtaavasta vedestä

Itämeren altaaseen on sen nykyisen murtovesivaiheen alettua noin 8 000 vuotta sitten kerrostunut massiivisten ja kerrallisten yksikköjen kirjomia hienosedimenttejä (kuva 1). Kerrallisten hienosedimenttien ajatellaan tavallisesti muodostuneen rauhallisissa oloissa hapet-



Kuva 1. Itämeren syvyyskartta sekä Gotlannin syvänteestä otetun näytesarjan 211640-7 kuvat ja litologinen tulkinta. Litologisen tulkinnan selitykset: 1 = kerrallinen sedimentti, 2 = biodeformoitunut sedimentti, 3 = onkaloiden laikuttama sedimentti, 4 = turbidiittikerros. Selityksistä on kerrottu tarkemmin työssä Virtasalo et al. (2010).

Figure 1. Bathymetric map of the Baltic Sea with digital images and lithologic interpretation of the core 211640-7 collected from the Gotland Deep. Legend for lithologic interpretation: 1 = laminated sediment, 2 = biodeformed sediment, 3 = burrow-mottled sediment, 4 = event deposit. See Virtasalo et al. (2010) for details.

tomilla merenpohjan alueilla, missä pohjaeläimet eivät ole päässeet sotkemaan niiden kerrallista primäärirakennetta. Gotlannin syvänteestä kerätyissä pitkissä sedimenttinäytesarjoissa havaitaan kuitenkin pienipiirteisiä rakenteita, jotka osoittavat virtaavan veden osallisuutta niiden kerrostumisessa (Virtasalo et al. 2010). Tällaisia rakenteita ovat kerrallisuuden epäjatkuvuuspinnat, joiden päällä on loivasti kaltevia ja alapuoliseen kerrokseen päättyviä laminoita (kuva 2A). Nämä päättyvät laminat ovat ristiriidassa rauhallisissa oloissa tapahtuvan sedimentaation kanssa, jolloin vesimassaan suspendoituneen hienoaineksen tulisi kerrostua yhtenäisenä kerroksena altaan pohjalle. Rauhallisia kerrostumisoloja vastaan todistavat myös Gotlannin altaalla tehdyt virtausmittaukset, joiden mukaan alueella esiintyy jopa yli 40 cm/s tunnittaisia maksimivirtausnopeuksia 20 metriä pohjan yläpuolella (vedensyvyys mittauspaikalla 204 m, Hagen ja Feistel 2004). Lisäksi virtausten vaikutuksesta kerrostumiseen kertoo murtovesisedimenttikerrostuman huomattava paksuusvaihtelu (1–8 m) altaassa.

Kerrallisuuden epäjatkuvuuspinnat ja niitä peittävä kalteva laminaatio muistuttavat hienoainesflokkiväreitä (mud floccule ripple), jotka muodostuvat hiutaleiksi flokkuloituvien hienoainesrakeiden sedimentoituessa pohjanläheisestä virtauksesta (Schieber et al. 2007, Schieber ja Southard 2009). Hienoainesflokkiväreet muodostuvat nopeasti, minuuttien tai enintään tuntien kuluessa. Aiemmissa tutkimuksissa on kuitenkin todettu, että Itämeren kerrallisten sedimenttien tummien ja vaaleiden laminoiden mikrofossiilikoostumus usein noudattaa kevät- ja kesälajien sekä syksyisten lajien vuotuista vaihtelua (Burke et al. 2002). Flokkiväreiden kerrostuminen on paljon nopeampaa kuin vuotuinen vaihtelu kerrostuvan aineksen laadussa, minkä vuoksi korkeintaan osa kerrallisuuden epäjatkuvuuspinnoista ja niitä peittävistä kaltevista laminoista voi olla flokkiväreitä.

Epäyhtenäistä kerrostumista voi aiheuttaa myös merenpohjalla laikkuina kasvava mikrobimatto, joka sekä suojaa sedimentin pintaa eroosiolta että tahmean kärpäspaperin lailla pyydystää rakeita pohjavirtauksesta (Gerdes et al. 2000, Gerdes 2007). Mikrobimaton pintaan tarttuneet rakeet vajoavat hiljalleen maton läpi muodostaen sedimenttiä paikoissa, joissa kerrostumista ei muuten tapahtuisi. Virtauksen mikrobimattoon repäisemän aukon kasvaessa vuosien kuluessa umpeen voi hyvinkin syntyä kuvassa 2 erottuvia kaltevia ja alapuoliseen tasoon päättyviä laminoita, joiden mikrofossiilikoostumus noudattaa vuodenaikaisvaihtelua. Kalifornian edustan vähähappisessa Santa Barbara Basin:ssa kerrostuu kerrallista hienosedimenttiä merenpohjalla kasvavan *Beggiatoa*-suvun bakteerimaton myötävaikutuksesta (Soutar ja Crill 1977). Valkeat *Beggiatoa*-matot ovat tavallisia myös Itämeren vähähappisissa syvänteissä, missä niillä voi hyvinkin olla vaikutusta hienosedimenttien kerrostumiseen.

Sedimentin tekstuuri kertoo vivahteista merenpohjan happioloissa

Yhdistämällä iknologista (eliöiden toiminnasta sedimentteihin jääneitä jälkiä tutkiva tieteenala) analyysiä sedimentologiseen tarkasteluun voidaan tarkentaa tulkintoja Itämeren menneistä kerrostumisympäristöistä (Virtasalo et al. 2006). Pohjanläheiseen veteen liuenneen hapen määrä säätelee pohjaeläinten esiintymistä ja käyttäytymistä merenpohjalla (Pearson ja Rosenberg 1978). Hapettomalla merenpohjalla makroskooppiset pohjaeläimet eivät selviä, eivätkä siten pääse sekoittamaan pintasedimenttien kerrallista primäärirakennetta. Vähähappisissa oloissa vedessä uivat eläimet voivat käväistä lepäämässä ja syömässä merenpohjalla, mutta vasta kunnolla hapekkaissa oloissa pohjaeläimet pystyvät pysyvästi asumaan merenpohjalla ja kaivautumaan merenpohjan pintasedimenttiin. Tästä johtuen pohjaeläimistön pintasedimenttejä sotkeva toiminta (bioturbaatio) ja hautautuviin sedimentteihin tallentuva sekundäärinen bioturbaatiotekstuuri ovat erilaisia veteen liuenneen hapen määrästä riippuen (Savrda ja Bottjer 1986).

Gotlannin altaalta kerätyissä pitkissä sedimenttinäytesarjoissa toistuu kaksi eri bioturbaatiotekstuuria: biodeformoitunut sedimentti



Kuva 2. Kuvat, tulkittu piirros ja röntgenkuvat tekstissä kuvatuista sedimenttitekstuureista sekä niitä vastaavat pohjaeläinyhteisön sukkessiovaiheet (Rumohr et al. 1996). (A) Kerrallinen sedimentti, jossa on kerrallisuuden epäjatkuvuuspintoja. Piirrokseen on merkitty kolme epäjatkuvuuspintaa (punaiset viivat), joita peittävät loivasti kaltevat ja alapuoliseen kerrokseen päättyvät laminat (katkoviivat). (B) Biodeformoitunut sedimentti. Kuvissa erottuu kahden biodeformoituneen kerroksen välissä ohut, bioturbaation osittain hävittämä kerrallinen kerros. (C) Onkaloiden laikuttama sedimentti, jossa erottuu heikkoa *Planolites*-iknosuvun laikutusta (PIM), *Arenicolites* (Ar) ja sedimenttikerroksen epätasainen pohja, jossa alapuoliseen kerralliseen sedimenttiin tunkeutuu biodeformaatiorakenne. Vaaleat, terävät tikut ylemmässä röntgenkuvassa ovat näytteeseen säilytyksen aikana muodostuneita kipsikiteitä.

Figure 2. Digital images, negative X-radiographs and an interpreted line-drawing of the described sediment textures, and the corresponding macrozoobenthic successional stages of Rumohr et al. (1996). (A) Laminated mud with Iamination discontinuity horizons. Four beds of Iaminae of different inclination and thickness, separated by three Iamination-discontinuity horizons are outlined in the interpreted line-drawing on the right. Note that the inclined Iaminae terminate toward the underlying layer. (B) Biodeformed mud. Note the thin, nearly obliterated Iaminated bed in the middle between the two biodeformed beds. (C) Burrow-mottled mud with Planolites-dominated background mottling (PIM), Arenicolites (Ar), an undulating base, and a biodeformation structure penetrating into the underlying laminite. Pale, needle-like sticks in the upper X-radiograph are gypsum crystals precipitated during the core storage.

ja onkaloiden laikuttama sedimentti (kuvat 1, 2B ja 2C, Virtasalo et al. 2010). Biodeformoitunut tekstuuri syntyy, kun heikosti erikoistuneet pohjaeläimet sekoittavat pintasedimentin primäärirakenteen (Schäfer 1956). Biodeformoitunutta sedimenttiä esiintyy ohuina välikerroksina kerrallisissa sedimenteissä. Nämä välikerrokset edustavat hapettomia taustaoloja katkovia lyhyitä hapekkaita ajanjaksoja, jolloin heikosti erikoistunut pioneeripohjaeläinyhteisö on sekoittanut sedimentin pintaa.

Myös onkaloiden laikuttaman sedimentin primäärirakenne on täysin sekoittunut, mutta sedimentissä erottuu tunnistettavia pohjaeläinten jättämiä onkaloita ja muita rakenteita (iknofossiileja eli jälkifossiileja). Yleisimpiä ovat Planolites-iknosuvun jälkifossiilit, mutta myös joitakin Arenicolites ja Lockeia-iknosukujen jälkifossiileja sekä nimeämättömiä biodeformaatiorakenteita havaitaan (kuva 2). Planolites on heikosti erottuva, pääasiassa vaakasuuntainen, putkimainen rakenne, joka on syntynyt matomaisen eläimen luikerrellessa sedimentissä ravintoa etsien (Pemberton ja Frey 1982). Arenicolites on litteän u-kirjaimen muotoinen rakenne, joka on ollut matomaisen eläimen avoin käytävä tai asumus (Gingras et al. 2008). Lockeia on simpukan tekemä v-kirjaimen muotoinen painauma. Nimeämättömät biodeformaatiorakenteet koostuvat vaihtelevan suuntaisista sarjoista puolikuunmuotoista laminaatiota, jollaisia syntyy simpukoiden kaivautuessa sedimenttiin, kääntyessä ja vaihtaessa paikkaa sedimentissä (Werner 2002). Onkaloiden laikuttamaa sedimenttiä esiintyy paksuina kerroksina. Ne edustavat pitkäkestoisia runsashappisia ajanjaksoja, jolloin merenpohjalla eli pioneerilajien lisäksi erikoistuneempia, sedimenttiä syöviä ja pysyviä onkaloita kaivavia matomaisia eläimiä sekä simpukoita.

Tarkastelemalla kerrallisen, biodeformoituneen ja onkaloiden laikuttaman sedimentin esiintymistä sedimenttinäytesarjoissa voidaan arvioida pohjanläheiseen veteen liuenneen hapen määrää eri aikoina (Virtasalo et al. 2010). Tälle työkalulle on käyttöä, sillä merenpohjan hapekkuuden määrittämiseen Itämeren sedimenteistä ei ole aiemmin ollut luotettavaa menetelmää. Geologian tutkimuskeskuksen koordinoimassa, EU:n Bonus+ -tutkimusohjelman Inflow-hankkeessa yhdistettyä sedimentologista ja iknologista analyysiä käytetään merenpohjan hapekkuushistorian selvittämiseen useissa Itämeren osa-altaissa edellisten 6 000 vuoden aikana.

Sedimentin tekstuurista luettavissa ainutlaatuista tietoa muinaisten pohjaeläinyhteisöjen vaihtelusta

Biologit erottavat Itämeren nykyisissä pohjaeläinyhteisöissä viisi sukkessiovaihetta, joista vaiheet III, IV ja V esiintyvät syvänveden alueilla (Rumohr et al. 1996). Vaihe V tarkoittaa hapetonta merenpohjaa, jolla ei ole makroskooppista elämää. Vaihe IV vastaa vähähappisia oloja, joissa nektobenttiset madot ja katkat väliaikaisesti laskeutuvat pohjalle syömään ja lepäämään. Nektobenttisiä ovat eläimet, jotka viettävät osan vuorokaudesta vedessä vapaasti uiden ja osan sedimentin pinnalla. Vaiheen III pohjaeläinyhteisöä hallitsevat opportunistiset pienet madot, simpukat ja katkat, joista osa kaivautuu merenpohjaan hieman sedimentin pinnan alapuolelle. Sukkessiovaiheet V, IV ja III vastaavat melko hyvin edellä kuvattuja kerrallista, biodeformoitunutta ja onkaloiden laikuttamaa sedimenttitekstuuria (kuva 2), mikä tarkoittaa sitä, että nykyisten pohjaeläinyhteisöjen sukkessiovaiheita vastaavaa vaihtelua voidaan jäljittää ajassa taaksepäin sedimenteistä.

Gotlannin altaalla on tehty pohjaeläimistön säännöllisiä seurantatutkimuksia 1960luvulta lähtien (Andersin et al. 1978, Laine et al. 1997). Näiden tutkimusten perusteella merenpohjan muuttuessa hapettomasta hapekkaaksi ensimmäisten 2–3 vuoden aikana alueelle saapuvat nektobenttiset pienet madot ja katkat, kuten liejusukasjalkainen, valkokatka ja merivalkokatka. Tämän pioneeripohjaeläinyhteisön toiminta ilmeisesti tallentuu sedimentteihin biodeformoituneena tekstuurina. Hapekkaiden olojen kestäessä pidempään paikalle saapuvat hitaammin levittäytyvät sekä erikoistuneemmat madot ja simpukat, kuten makkaramato, erilaiset monisukasmadot ja liejusimpukka, jotka kaivautuvat sedimenttiin jättäen jälkeensä iknofossiileja. Onkaloiden laikuttama tekstuuri syntyy tämän erikoistuneemman pohjaeläinyhteisön toiminnan tuloksena.

Yhdistettyä sedimentologista ja iknologista analyysiä käyttäen on mahdollista tutkia vaihteluita Itämeren pohjaeläinyhteisöissä yli sata kertaa pidemmällä aikavälillä kuin mitä säännölliset seurantatutkimukset kattavat. Eläinlajitasolle tällä menetelmällä ei kuitenkaan päästä. Siitä huolimatta sedimenttien hienorakenteeseen tallentunut tieto muinaisista pohjaeläinyhteisöistä on ainutlaatuista, koska pohjaeläinten jäänteet säilyvät erittäin huonosti fossiileina Itämeren sedimenteissä.

Summary:

Intergrated sedimentological and ichnological analysis gives new perspectives on mud accumulation and macrobenthic dynamics in the Baltic Sea deep areas

Laminated intervals in the Holocene brackishwater sediments of Gotland Deep, the main sub-basin of the Baltic Sea, contain occasional lamination-discontinuity horizons (Figure 1), where the regular lamination is sharply overlain by gently inclined laminae that terminate toward the underlying layer (Figure 2A, Virtasalo et al. 2010). These features are incompatible with the traditional view of mud accumulation by settling from suspension under quiescent conditions that would produce continuous draping laminae. Also the high near-bottom current velocities previously recorded in the area (Hagen and Feistel 2004) contradict the quiescent depositional conditions. These lamination-discontinuity The laminated intervals are punctuated by thin biodeformed interbeds that record brief periods when dissolved oxygen levels in the near-bottom waters permitted disturbance of the sediment surface by poorly-specialized macrofauna (Figure 2B). Concluding from the systematic macrobenthic studies carried out in the area since the 1950's (Andersin et al. 1978, Laine et al. 1997), the likely biodeformers were nectobenthic worm-like animals and amphipods such as *Bylgides sarsi*, *Pontoporeia femorata*, and *Monoporeia affinis*.

The laminated intervals alternate with long burrow-mottled intervals that are characterized by discrete Planolites, rare Arenicolites and very rare Lockeia ichnofossils, and unnamed biodeformational structures (Figures 2C and 3). The ichnofossil assemblage reflects shallowly penetrating endobenthic feeding and grazing strategies and permanent dwellings (Virtasalo et al. 2006). These burrowed intervals represent longer periods of oxic conditions that permitted bioturbation by specialized worm-like macrofauna and bivalves. The likely vermiform burrowers were the priapulid Halicryptus spinulosus, the polychaetes Scoloplos armiger, Terebellides stroemi, Aricidea jeffreysi and Pygospio elegans, and the bivalve Macoma balthica.

The described sediment textures provide, for the first time, a means of studying the past occurrences and magnitudes of sea floor oxygenation and their benthic responses in the Baltic Sea on time-scales longer than the past several decades covered by systematic oceanographic and zoobenthic studies (Virtasalo et al. 2010). Integrated sedimentological and ichnological analysis can provide unique information on past benthic communities in the Baltic Sea, where the remains of the benthic organisms are hardly ever preserved in the sediments.

This work is part of the INFLOW project that aims to identify forcing mechanisms of environmental changes of the Baltic Sea over the past 6000 years by studying a high-resolution Baltic Sea sediment archives. INFLOW is one of the BONUS+ research programme projects (http://www.bonusportal.org/).

Kirjallisuus

- Andersin, A.-B., Lassig, J., Parkkonen, L. ja Sandler, H. 1978. The decline of macrofauna in the deeper parts of the Baltic proper and the Gulf of Finland. Kieler Meeresforschungen 4:23–52.
- Burke, I.T., Grigorov, I. ja Kemp, A.E.S. 2002. Microfabric study of diatomaceous and lithogenic deposition in laminated sediments from the Gotland Deep, Baltic Sea. Marine Geology 183:89–105.
- Gerdes, G. 2007. Structures left by modern microbial mats in their host sediments. Teoksessa: Schieber, J., Bose, P.K., Eriksson, P.G., Banerjee, S., Sarkar, S., Altermann W. ja Catuneau, O. (toim.). Atlas of Microbial Mat Features Preserved within the Clastic Rock Record. Amsterdam, Elsevier, 5–38.
- Gerdes, G., Noffke, N., Klenke, T. ja Krumbein, W.E. 2000. Microbial signatures in peritidal sediments a catalogue. Sedimentology 47:279–308.
- Gingras, M.K., Dashtgard, S.E., MacEachern, J.A. ja Pemberton, S.G. 2008. Biology of shallow marine ichnology: a modern perspective. Aquatic Biology 2:255–268.
- Hagen, E. ja Feistel, R. 2004. Observations of low-frequency current fluctuations in deep water of the Eastern Gotland Basin/Baltic Sea. Journal of Geophysical Research 109:C03044.
- Laine, A.O., Sandler, H., Andersin, A.-B. ja Stigzelius, J. 1997. Long-term changes of macrozoobenthos in the Eastern Gotland Basin and the Gulf of Finland (Baltic Sea) in relation to the hydrographical regime. Journal of Sea Research 38:135–159.
- Pearson, T.H. ja Rosenberg, R. 1978. Macrobenthic succession in relation to organic enrichment and pollution of the marine environment. Oceanography and Marine Biology: An Annual Review 16:229–311.

- Pemberton, S.G. ja Frey, R.W. 1982. Trace fossil nomenclature and the *Planolites–Palaeophycos* dilemma. Journal of Paleontology 56:843–881.
- Rumohr, H., Bonsdorff, E. ja Pearson, T.H. 1996. Zoobenthic succession in Baltic sedimentary habitats. Archive of Fishery and Marine Research 44:179– 214.
- Savrda, C.E. ja Bottjer, D.J. 1986. Trace-fossil model for reconstruction of paleo-oxygenation in bottom waters. Geology 14:3–6.
- Schieber, J. 2007. Microbial mats on muddy substrates – examples of possible sedimentary features and underlying processes. Teoksessa: Schieber, J., Bose, P.K., Eriksson, P.G., Banerjee, S., Sarkar, S., Altermann W. ja Catuneau, O. (toim.). Atlas of Microbial Mat Features Preserved within the Clastic Rock Record. Amsterdam, Elsevier, 117–134.
- Schieber, J. ja Southard, J.B. 2009. Bedload transport of mud by floccule ripples – direct observation of ripple migration processes and their implications. Geology 37:483–486.
- Schieber, J., Southard, J. ja Thaisen, K. 2007. Accretion of mudstone beds from migrating floccule ripples. Science 318:1760–1763.
- Schäfer, W. 1956. Wirkungen der Benthos Organismen auf den jungen Schichtverband. Senckenbergiana Lethaea 37:183–263.
- Soutar, A. ja Crill, P.A. 1977. Sedimentation and climatic patterns in the Santa Barbara Basin during the 19th and 20th centuries. Geological Society of America Bulletin 88:1161–1172.
- Virtasalo, J.J., Kotilainen, A.T. ja Gingras, M.K. 2006. Trace fossils as indicators of environmental change in Holocene sediments of the Archipelago Sea, northern Baltic Sea. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 240:453–467.
- Virtasalo, J.J., Leipe, T., Moros, M. ja Kotilainen, A.T. 2010. Physicochemical and biological influences on sedimentary-fabric formation in a salinity and oxygen-restricted semi-enclosed sea: Gotland Deep, Baltic Sea. Sedimentology, painossa. Julkaistu sähköisessä muodossa 18.5.2010.
- Werner, F. 2002. Bioturbation structures in marine Holocene sediments of Kiel Bay (Western Baltic). Meyniana 54:41–72.