

Kerrostunut ja puuttuva aika

Allostratigrafia edistää mannerjäätikön peittäminä olleiden alueiden sedimenttien luokittelua

JOONAS VIRTASALO

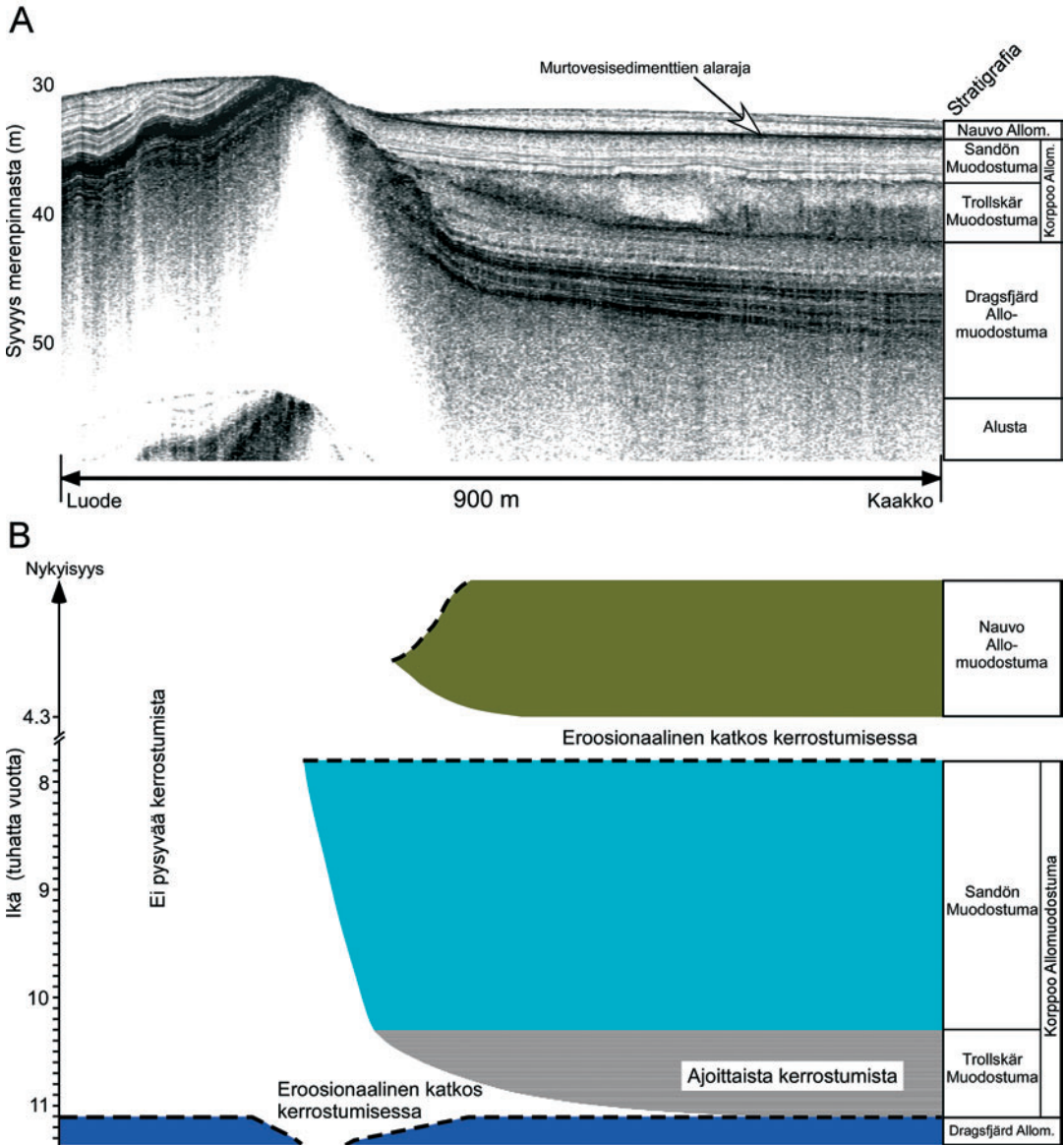
Ihminen on aina luokitellut ja nimennyt ympärillään olevia asioita. Kuuluisin luonnontieteellinen luokittelusysteemi lienee Carl von Linnén noin 300 vuotta sitten julkaisema kasvi- ja eläinkunnan taksonominen luokittelu. Linné yritti luoda myös ”kivikunnalle” yleispätevää luokittelusysteemiä tässä kuitenkaan onnistumatta. 1800-luvun alussa englantilainen William Smith laati ensimmäisen geologisen kartan ja tuli samalla kehittäneeksi ensimmäisen systemaattisen kivikunnan luokittelujärjestelmän. Sittenmin geologinen tiedeyhteisö on kansainvälisen yhteistyön ja 1970-luvulta lähtien kansainvälisen stratigrafisen komission (International Commission on Stratigraphy) kautta kehittänyt geologisten kerrostumien ja aikakausien luokittelua eli *stratigrafiaa*. Suurelle yleisölle tutuimpia stratigrafisia käsitteitä lienevät varhaisen maapallon arkeinen maailmankausi, dinosaurusten jurakausi ja nykyinen geologinen aikakausi holoseeni, jonka aikana ihminen kehitti maatalouden, kaupungit ja kirjoitetun kielen.

Stratigrafisen luokittelun avulla voimme ryhmitellä kiviä ja sedimenttejä, järjestää niitä suhteelliseen ikäjärjestykseen, ja ennustaa kallio- ja maaperän ominaisuuksia alueellisesti.

Stratigrafinen tieto kallio- ja maaperästä on välttämätöntä yhteiskunnalle mm. maa- ja meri-alueiden käytön suunnittelussa sekä luonnonvarojen menestyksellisessä etsinnässä ja tehokkaassa hyödyntämisessä. Aiheellisesti voidaan todeta stratigrafian olevan niin olennainen osa geologista tieteenalaa, että se on välttämätöntä sekä perustutkimukselle että soveltavalle tutkimukselle. Alati karttuva tieto Suomen maa- ja kallioperästä on suuri rikkaus, mutta sen hyvä hallinta edellyttää tarkoituksenmukaisen stratigrafisen luokittelujärjestelmän käyttöä.

Litostatigrafia ja allostratigrafia

Tavallisin sedimenttiyksiköiden luokittelujärjestelmä perustuu niiden ulkonäköön. Tässä *litostratigrafisessa* luokittelussa esimerkiksi värin, sedimenttirakenteiden tai raekoon perusteella samannäköiset sedimentit ryhmitellään luokkiin, kuten William Smith teki 200 vuotta sitten. Toisaalta skotlantilainen James Hutton oivalsi jo 1700-luvun puolivälissä, että terävät rajapinnat sedimenttikiviüksiköiden välillä saattoivat merkitä hyvinkin pitkää katkosta eli epäjatkuvuutta sedimentin kerrostumisesta ja siten edustaa puuttuvaa aikaa sediment-



Kuva 1. (A) Akustinen luotausprofiili (12 kHz pinger) ja allostratigrafiset yksiköt Saaristomereltä. (B) Vastaava Wheeler-diagrammi, jossa pystyakselina on aika. Tässä esitystavassa stratigrafisten yksiköiden edustama aika ja niitä rajaavien epäjatkuvuuspintojen edustama puuttuva aika tulevat hyvin esille. Muokattu Virtasalo et al. (2007) artikkelista. Stratigrafiset yksiköt Virtasalo et al. (2010) mukaan.

Figure 1. (A) Acoustic profile (12 kHz pinger) and allostratigraphic units from the Archipelago Sea. (B) Corresponding Wheeler diagram with time on the vertical axis. Modified from Virtasalo et al. (2007). Stratigraphic units after Virtasalo et al. (2010). The vertical scales are in metres below sea surface in (A) and in thousand years before present (1950) in (B).

tikerrostumiin tallentuneessa historiassa. Sedimenttiyksiköitä erottaviin *epäjatkuvuuspin-toihin* perustuva *allostratigrafinen* luokittelujärjestelmä auttaa hahmottamaan kerrostumisen epäjatkuvuutta, eroosion merkitystä ja pitkienkin ajanjaksojen puuttumista yksiköiden väliltä (kuva 1). Allostratigrafisesta luokittelusta on 1900-luvun lopulta lähtien kehittynyt merkittävä luokittelujärjestelmä litostratigrafisen luokittelun rinnalle.

Kansainvälisen stratigrafisen komission toimittamaan Kansainväliseen stratigrafian oppaaseen (International Stratigraphic Guide; Salvador 1994) on koottu ohjeet ja suositukset muun muassa litostratigrafisten yksiköiden muodolliseen määrittelyyn ja systemaattiseen nimeämiseen. Litostratigrafisen luokittelun perusyksikkö on muodostuma, joka voidaan jakaa jäseniin ja joita voidaan koota ryhmiksi. Kansainvälinen stratigrafian opas kuvaa myös epäjatkuvuuspintojen rajaamien yksiköiden (synteemi) luokittelujärjestelmän, mutta se on jäänyt melko vähälle käytölle ja sen on käytännössä korvannut Pohjois-Amerikan stratigrafian oppaassa (North-American Stratigraphic Code, NACSN 2005) kuvattu allostratigrafinen luokittelujärjestelmä. Allostratigrafinen luokittelujärjestelmä sallii yksiköiden hierarkkisen luokittelun (allojäsenet, allomuodostumat, alloryhmät) litostratigrafisen luokittelun tapaan.

Suomessa stratigrafista luokittelua ohjeistaa, uudistaa ja valvoo Suomen stratigrafisen komitea, jonka johdolla Geologian tutkimuskeskus julkaisi 2010 oppaan Suomen kallio-perän stratigrafiseen luokitteluun (Guidelines and Procedures for Naming Precambrian Geological Units in Finland; Strand *et al.* 2010). Suomen maaperäkerrostumien luokitteluun ei vastaavaa opasta ole näkemyseroista johtuen saatu julkaistuksi.

Yksi stratigrafisissa oppaissa toistuvista perussäännöistä on, että eri stratigrafisia luokitteluperusteita ei saa yhdistää. Esimerkiksi sedimenttikerrosten fossiilisisältöön perustu-

vat biostratigrafiset yksiköt tulisi aina rajata ja nimetä litostratigrafisista yksiköistä riippumatta. Vaikka litostratigrafisen ja allostratigrafisen luokittelun näkökulmat ja luokitteluperiaatteet eroavat toisistaan, perustuvat ne käytännössä samaan aineistoon eli sedimenttikerrostumien silmin nähtäviin piirteisiin. Siinä missä litostratigrafia keskittyy yleisemmin kerrostumien ulkonäköön, allostratigrafiasa huomio kiinnittyy kerrostumia jakaviin teräviin rajapintoihin. Niinpä epäjatkuvuuspintojen ylä- ja alapuolelta rajaama litostratigrafinen yksikkö on samalla myös allostratigrafinen yksikkö. Räsänen *et al.* (2009) esittivätkin yhdistetyn allo- ja litostratigrafisen luokittelujärjestelmän (Combined Use of Allostratigraphy and Lithostratigraphy), jossa sedimenttikerrostumat luokitellaan epäjatkuvuuspintojen perusteella allostratigrafisiin yksiköihin, joiden sisälle voidaan määritellä litostratigrafisia yksiköitä (kuva 1). Allostratigrafisen ja litostratigrafisen luokittelun suhdetta voidaan verrata biostratigrafisten yksiköiden eri tyyppeihin (biozooneihin), jotka rajautuvat esimerkiksi tietyn lajin tai lajiston esiintymisvyöhykkeeseen (esiintymisbiozooni), tai lajin tai lajiston A ja sitä seuraavan lajin tai lajiston B samanaikaisen esiintymisen vyöhykkeeseen (samanaikaiseesiintymisen biozooni).

Epäjatkuvuuspintoja on kaikkialla

Sedimentin pysyvälle kerrostumiselle on kaksi perusedellytystä: aineksen lähde ja kerrostumiselle sopiva tila (accommodation; Catuneanu *et al.* 2011). Jos edes toinen näistä perusedellytyksistä jää toteutumatta, pysyvää kerrostumista ei tapahdu ja muodostuu epäjatkuvuuspinna. Perusedellytysten toteutumista säätelevät monet tekijät riippuvat sekä ajasta (vuorokausivaihtelusta astronomisiin tekijöihin) että tarkastelun kohteen mittakaavasta (kareesta valtamerten kerrostumisaltaisiin). Kerrostumisen perusedellytysten toteutumisen lisäksi epäjatkuvuuspintojen syntyä ja niiden

edustaman ajanjakson pituutta säätelee eroosio. Useimmille sedimenttikerrostumille ovatkin tyypillisiä lukemattomat epäjatkuuspinnat ja eripituiset katkokset niihin tallentuneessa ajassa (Miall 2016). Vain murto-osa maapallon geologisesta historiasta on säilyneenä lyhyinä katkelmina sedimenteissä.

Kaikkien sedimenttien voidaan ajatella kuuluvan epäjatkuuspintojen rajaamiin yksiköihin. Näistä alloyksiköistä pienimmät muodostavat toinen toistaan suurempia alloyksiköitä alkaen yksittäisistä ohuista kerroksista, jotka muodostavat esimerkiksi särkkiä, jotka muodostavat jokikerrostumia ja niin edelleen aina kiteiseen peruskallioon ja maanpintaan (tai merenpohjaan) rajautuviin alloyksiköihin asti (kuva 2A). Tiukat katkokset kerrostumisessa eivät ole tyypillisiä pelkästään kitkamaalajeille, vaan myös hienosedimenttien kerrostuminen merissä ja järvissä on katkonaisista johtuen vuotuisesta vaihtelusta, pohjanläheisistä virtauksista ja äkillisistä kerrostumistapahtumista kuten vyöryistä (Virtasalo ja Kotilainen 2010, Jokinen *et al.* 2015). Allostratigrafinen luokittelujärjestelmä mahdollistaa sedimenttikerrostumien jakamisen niille luonteenomaisen rakenteen mukaisiin yksiköihin ja näiden yksiköiden hierarkkisen ryhmitelyn. Käytännön syistä allostratigrafiseksi perusyksiköksi, allomuodostumaksi, valitaan kokonaisuus, joka on kokonsa puolesta karotitettavissa.

Mannerjäätikön alla ja sen edustalla kerrostumisolosuhteet vaihtelevat nopeasti johtuen mannerjäätikön dynamiikasta (jäätikön virtaus, jään reunan eteneminen ja perääntyminen, vaihtelut sulamisvesien määrässä ja reiteissä jne.). Lisäksi mannerjäätikön edustalle manneralueilla tavallisesti muodostuu laajoja järviä, joiden kokoa säätelevät sulamisvesien määrä, purku-uomien kynnysten korkeus, nopea ja epätasainen maankohoaminen ja valtameren pinnan taso (Brookfield ja Martini 1999). Tästä seurauksena jäätikkösyntyiset kerrostumat, jotka hallitsevat Suomenkin ir-

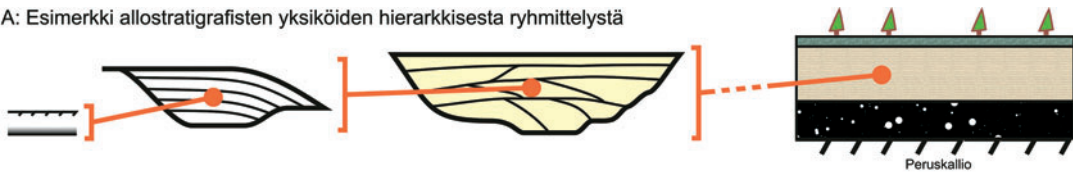
tomaapeitettä, sisältävät erityisen runsaasti epäjatkuuspintoja. Allostratigrafia soveltuu erittäin hyvin jäätikkösyntyisten kerrostumien jakamiseen yksiköihin ja yksiköiden ryhmittelyyn (Räsänen *et al.* 2009).

Mannerjäätikön peittäminä olleiden alueiden sedimenttikerrostumille on tyypillistä myös suuri litologinen vaihtelu. Esimerkiksi moreenikerroksen väri muuttuu alapuolisen kallioperän kivilajikoostumuksen mukaisesti. Jäätikkösyntyiset kerrostumat onkin tarkoitukseenmukaisempaa luokitella sisäisen litologisen vaihtelun salliviin alloyksiköihin kuin lukuisiin ulkonäöltään yhtenäisiin mutta pieniin, litostratigrafisiin yksiköihin tai suurempiin litostratigrafisiin yksiköihin, joihin välttämättä sisältyvä huomattava litologinen vaihtelu on vaikeaa määrittellä täsmällisesti ja yksilöivästi (Räsänen *et al.* 2009).

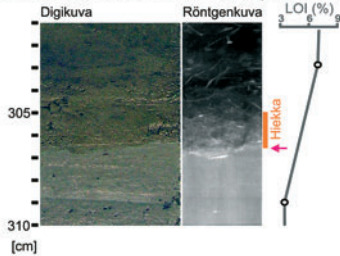
Allostratigrafian mahdollisuuksia

Viime vuosina monet tutkimusryhmät Itämeren alueella ovat alkaneet käyttää allostratigrafiaa Veiksel-jääkauden ja sitä nuorempien kerrostumien luokitteluun. Merialueista ensimmäisenä allostratigrafinen luokittelu esitettiin Saaristomerelle (Virtasalo *et al.* 2005, 2010; kuva 1). Sittemmin allostratigrafisia luokitteluja on tehty Riianlahdelle (Tsyrunikov *et al.* 2012), läntiselle Suomenlahdelle (Virtasalo *et al.* 2014), Bornholmin altaalle (Jensen *et al.* 2017) ja Ångermanjoen suun edustalle Selkämerellä (Hyttinen *et al.* 2017). Allostratigrafia yksinkertaistaa ja selventää sedimenttien luokittelua ja korrelointia Itämeren eri osien välillä. Noin 8000 vuotta sitten alkaneen Itämeren murtovesivaiheen sedimenttien alaraja määriteltiin hiljattain muodollisesti alueelliseksi stratigrafiseksi rajaksi, joka on seurattavissa akustis-seismisillä luotauksilla ja tunnistettavissa terävänä rajapintana sedimenttinäytteissä lähes joka puolella Itämeren (Virtasalo *et al.* 2016; kuvat 1A, 2B ja 2C). Työ uusien paikallisten allostratigrafisten luokitusten ja alu-

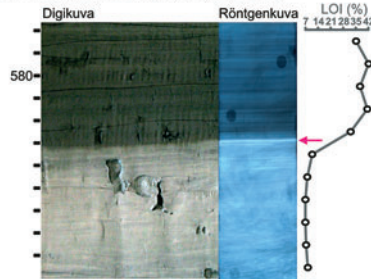
A: Esimerkki allostratigrafisten yksiköiden hierarkkisesta ryhmittelystä



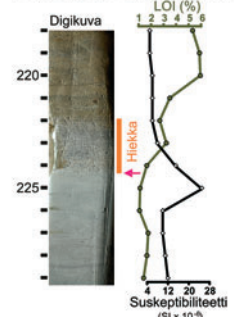
B: Saaristomeri, Paimionlahti (AS5-PC2)



C: Eteläinen Selkämeri (370570)



D: Espoo, Perkkää (PER-2b)



Kuva 2. (A) Esimerkki allostratigrafisten yksiköiden hierarkiasta alkaen ohuesta kerroksesta, joka edustaa osaa särkästä, osaa jokikerrostumasta ja niin edelleen aina kiteiseen peruskallioon ja maanpintaan rajautuvaan alloyksikköön asti. (B) Itämeren murtovesivaiheen sedimenttien alarajan stratotyypipi näytesarjassa AS5-PC2 Paimionlahdelta, jossa terävästi leikkautuneen postglasiaalisen järvisaven päällä on ohut siltti-hiekkakerros, joka vaihtuu murtovesivaiheen orgaanispiteeseen bioturboituneeseen liejusilttiin (Virtasalo *et al.* 2016). (C) Syvän veden referenssinäytesarja 370570 eteläiseltä Selkämereltä, josta puuttuu matalille alueille tyypillinen hiekkakerros ja jossa murtovesisedimentti on laminoitunutta (Virtasalo *et al.* 2016). (D) Itämeren murtovesivaiheen sedimenttien alaraja rakentamiseksi kaavoitetulta alueelta Espoon Perkkäältä (Ojala *et al.* painossa). LOI = hehkutushäviö. Punainen nuoli osoittaa Itämeren murtovesivaiheen alarajaa. Pystyasteikko senttimetrejä näytesarjan pinnasta.

Figure 2. (A) Example hierarchy of allostratigraphic units starting from a thin bed, representing a part of a bar, a part of channel fill, and so on to an allo-unit bound by the crystalline bedrock and the land surface. (B) Boundary stratotype of the base of the brackish-water mud in core AS5-PC2 from the Paimionlahti Bay, Archipelago Sea, where the underlying postglacial lacustrine clay is sharply cut and covered by a thin silt-sand layer that grades to bioturbated organic-rich brackish-water mud (Virtasalo *et al.* 2016). (C) Deep water reference section in core 370570 from the southern Bothnian Sea, where the sand layer is missing and the brackish-water mud is sharply laminated (Virtasalo *et al.* 2016). (D) Base of the brackish-water mud from the Perkkää area in Espoo city (Ojala *et al.* painossa). Red arrows indicate the base of brackish-water mud and LOI the weight loss on ignition. Vertical scales are in centimetres below core top.

ellisesti korreloitavissa olevien allostratigrafisten rajapintojen löytämiseksi ja määrittelemiseksi jatkuu.

Kuivalla maalla ensimmäinen allostratigrafinen luokittelu Itämeren alueella esitettiin niin ikään Suomessa, Merenkurkun saaristossa (Räsänen *et al.* 2009). Itämeren murtovesivaiheen sedimenttien alaraja on helposti tunnistettavissa Litorinameren aiemmin peittämällä ran-

nikkoseuduilla, jotka maankohoamisen seurauksena ovat nousseet merenpinnan yläpuolelle (kuva 2D). Pääkaupunkiseudulla tämän allostratigrafisen rajan käyttö auttaa uusien asuinalueiden kaavoituksessa, pehmeiköiden 3D-mallinnuksessa ja perustusten suunnittelussa sulfidipitoisille pehmeiköille (Ojala *et al.* painossa). Huomionarvoista on, että epäjatkuuspinnat tyypillisesti erottavat ihmisen

kasaamat jätteet ja maa-ainekset alapuolisista geologisista yksiköistä. Allostratigrafinen yksikkö on selvästi rajattu kolmiulotteinen kappale (vokseli), joka sopii hyvin mallinnettavaksi. Myös maalla allostratigrafisia yksiköitä rajaavat epäjatkuvuuspinnot ovat seurattavissa erilaisilla profilointimenetelmillä, kuten maatutkauksella ja sähkövastustomografialla

Litostratigrafia ja allostratigrafia ovat kuvailevia (engl. *descriptive*) luokittelujärjestelmiä, jotka ainoastaan toteavat stratigrafisen yksikön luonteen ja aseman suhteessa muihin yksiköihin. Täsmällisesti rajattuina allostratigrafiset yksiköt ovat helposti sijoitettavissa tulkitseviin (engl. *interpretive*) stratigrafisiin viittekehyksiin, kuten morfostratigrafia, sekvenssistratigrafia, arkkitehtoniset elementit tai landsystem-lähestymistapa (Hughes 2010, Slomka ja Eyles 2015, Miall 2016). Klassisessa sekvenssistratografiassa stratigrafiset yksiköt ja epäjatkuvuuspinnot kytketään merenpinnan suhteellisiin muutoksiin, minkä vuoksi mene-

telmä soveltuu huonosti jäätikkösyntyisten kerrostumien syntyolosuhteiden tulkintaan, koska glasiaaliset prosessit ovat olennaisesti vaikuttaneet niiden muodostumiseen. Jäätikkösyntyisiä kerrostumia varten onkin kehitetty glasiaalisekvenssistratigrafiaa, jossa stratigrafiset yksiköt ryhmitellään glasiaalisiin systeemipolkuihin (Powell ja Cooper 2002).

Allostratigrafisiin yksiköihin perustuvat glasiaalisekvenssistratigrafiset tulkinnat tuovat uudenlaista syvällistä näkemystä jäätiköityneiden alueiden kerrostumien syntyhistorian tutkimukseen, koska ne liittävät sedimenttiyksiköt täsmällisemmin määriteltyihin ja maailmanlaajuisesti vertailtavissa oleviin tapahtumakulkuihin. Läntiselle Suomenlahdelle esitetty sekvenssistratigrafinen tulkinta ryhmittelee allostratigrafiset yksiköt kolmeen systeemipolkuun, joita jakavat mannerjäätikön etenemisen ja peräytymisen sekä Itämeren murtovesivaiheen alkamisen seurauksena syntyneet rajapinnat (kuva 3). Allostratigrafisten yksiköi-

A: Stratigrafiset yksiköt

Merenpohja	
Ylin allo-muodostuma	Resentti lieju (muodostuma)
	Ylempi murtovesisedimentti (muodostuma)
Alempi murtovesisedimentti (allojäsen)	
Keskimäinen allo-muodostuma	Postglasiaalinen järvisedimentti (muodostuma)
	Debriitit (muodostuma)
	Glasilakustrinen lustosedimentti (muodostuma)
	Glasiaalinen sekasedimentti (muodost.)
Alin allomuod. Moreeni (allomuodostuma)	
Peruskallio	

B: Sekvenssimalli

Merenpinnan suhteellisen laskun systeemipolku	Vedenpinnan korkeuden säätelmä kerrostuminen
Valtameren tulvimispinta (murtovesivaiheen alku)	Siirtymä jäätikkökuljetuksen säätelmästä kerrostumisesta vedenpinnan korkeuden säätelmään kerrostumiseen
Jäätikön peräytymisen systeemipolku	
Jäätikön pohjareunan peräytymispinta	
Jäätiköitymismaksimin systeemipolku	
Glasiaalisekvenssiraja	

C: Itämeren vaiheet

Litorinameri ja nykyaika
Ancylusjärvi
Yoldiameri ja Baltian jääjärvi

Kuva 3. (A) Läntisen Suomenlahden allostratigrafinen luokittelu. (B) Allostratigrafisten yksiköiden sekvenssistratigrafinen tulkinta perustuen julkaisuihin Brookfield ja Martini (1999), Powell ja Cooper (2002) ja Catuneanu et al. (2011). (C) Yksiköitä vastaavat Itämeren vaiheet. Muokattu Virtasalo et al. (2014) pohjalta.

Figure 3. (A) Allostratigraphic division of the western Gulf of Finland. (B) Sequence stratigraphic interpretation based on Brookfield and Martini (1999), Powell and Cooper (2002), and Catuneanu et al. (2011). (C) The corresponding Baltic Sea stages. Modified from Virtasalo et al. (2014), where the text is shown in English.

den ja sekvenssimallin ohessa esitetty perinteinen Itämeren vaiheiden mukainen tulkinta tunnistaa huomattavasti vähemmän sedimenttiyksiköitä ja yksinkertaistaa liikaa kerrostumisympäristöjen seurantoa. Itämeren vaiheiden mukaisen sedimenttiluokittelun lisäksi uudenlaiset sekvenssistratigrafiset tulkinnat haastavat myös muita totuttuja tulkinnallisia viitekehyksiä, kuten vallitsevan näkemyksen Suomen ja Pohjois-Euroopan jäätiköitymisestä Veiksel-jääkaudella ennen sen lopun laajaa jäätiköitymistä (Räsänen *et al.* 2015).

Tulevaisuuden tehtävänä on kokeilla ja valita sopivimmat tulkitsevat stratigrafiset menetelmät allostratigrafisten yksiköiden tulkintaan. Eri tulkitsevien menetelmien soveltuvuus saattaa vaihdella tutkimuskohteiden välillä, ja tarkoituksesta riippuen saattaa olla perusteltua käyttää useitakin eri menetelmiä samassa kohteessa.

JOONAS VIRTASALO
Geologian tutkimuskeskus
PL 96
02151 Espoo
joonas.virtasalo@gtk.fi

Kirjoittaja työskentelee erikoistutkijana Geologian tutkimuskeskuksen merigeologian yksikössä, erikoisaloinaan sedimentologia, stratigrafia, iknologia ja (isotooppi)geokemia.

Summary:

Deposited and missing time

The sedimentary record may be viewed as being composed of units that are bounded at the top and bottom by non-depositional or erosional surfaces (unconformities), from the scale of thin beds to the scale of continental sedimentary cover (Fig. 2A; Miall 2016). Processes of sediment deposition operate at various speeds and at spatial scales ranging from ripples to continents, which are then reflected in the resultant sequences and their

bounding unconformities. Sediment is deposited where there is both a sufficient supply of sediment and an accommodation (space) for it; otherwise, a gap in deposition will occur (Catuneanu *et al.* 2011). Virtasalo *et al.* (2007) illustrate the significance of missing time in a chronostratigraphic cross-section (“Wheeler diagram”) from the northern Baltic Sea, in which the vertical dimension is drawn with a time scale instead of a thickness scale, making time gaps become readily apparent (Fig. 1). Allostratigraphy is aimed at describing and organizing such unconformity-bound units in a hierarchical manner: allogroups are composed of alloformations which are further composed of allomembers, etc.

Allostratigraphic classification criteria are similar to lithostratigraphic criteria in that they both are descriptive and can be studied visually in sediment cores and excavations. Indeed, both approaches may be carried out simultaneously on same materials. The only difference is that while allostratigraphy emphasizes unconformities, lithostratigraphy is focused on the general visual appearance of sediments. The combined use of allostratigraphy and lithostratigraphy (CUAL approach; Räsänen *et al.* 2009) integrates the allostratigraphic and lithostratigraphic approaches in a single stratigraphic framework, where allostratigraphic units are given priority, whereas mappable lithologic features can be defined, where useful, as lithostratigraphic units which occur inside the allostratigraphic units.

Sediment deposition on glacially influenced shelves and basins is complex and controlled by many factors such as the ice-margin position, differential glacioisostatic rebound, local water-level changes and eustatic sea level change (Brookfield and Martini 1999). As a result, glacial sediments typically show high lateral lithologic variation and frequent unconformities (Räsänen *et al.* 2009). Lithostratigraphic units defined in such

deposits either have a restricted lateral extent or incorporate substantial lithologic heterogeneity, which complicates their unambiguous definition and recognition at the regional scale. Instead, extensive unconformities present in these sediments provide a useful means of regional allostratigraphic correlation.

The first allostratigraphic division in the Baltic Sea region was presented for the Archipelago Sea (Virtasalo *et al.* 2005, 2010). Soon thereafter allostratigraphic divisions were presented for the Gulf of Riga (Tsyrlunikov *et al.* 2012), western Gulf of Finland (Virtasalo *et al.* 2014), Bornholm Basin (Jensen *et al.* 2017), and the Ångermanälven River estuary (Hyttinen *et al.* in press). Further allostratigraphic studies are being carried out in the Baltic Sea region. The local stratigraphic studies, when combined, will result in the recognition of unconformities that have regional and basin-wide significance. These major unconformities will guarantee the regional correlatability of local stratigraphic divisions, and ultimately lead to significantly improved and more coherent understanding of the deglacial and postglacial development of the Baltic Sea Basin.

The unconformable *base of the brackish-water mud* is a basin-wide marine flooding surface, which was caused by the glacioeustatic sea-level rise and the transgression of the world ocean to the Baltic Sea Basin ca. 8 ka ago (Virtasalo *et al.* 2016). The surface is erosional and covered by a patchy, thin, transgressive silt-sand sheet in the shallow areas, while in the deep areas the surface is sharp and possibly erosional (Figs. 2B and 2C). The flooding surface can be identified by the lithologic examination of sediment cores and excavations over large areas of the Baltic Sea, which has permitted its formal definition as a regional allostratigraphic bounding surface (Virtasalo *et al.* 2016). The base of the brackish-water mud is also identifiable in dry land areas that were previously covered by the brackish-water

sea but have since risen above sea level due to land uplift. Ojala *et al.* (in press) demonstrate that the correct identification of the base of the brackish-water mud aids planning land use and construction in the Helsinki metropolitan area (Fig. 2D).

A major future task will be to test and select the most suitable interpretive approach(es) to the allostratigraphic framework, such as morphostratigraphy, sequence stratigraphy, and architectural element and land system schemes (Hughes 2010, Slomka and Eyles 2015, Miall 2016). Classical sequence stratigraphy is concerned with relative sea-level changes in marine settings, and is less suitable for glacial and glacially-influenced depositional successions. Instead, glacial sequence-stratigraphic models consider the ice-margin position, differential glacioisostatic rebound and local water-level changes as additional controls on sediment accommodation (Powell and Cooper 2002). A sequence-stratigraphic interpretation of the allostratigraphic division of western Gulf of Finland captures the depositional history in higher detail than is possible by using the traditional classification practice based on the Baltic Sea stages (Fig. 3). It should be noted that one interpretive approach may be more suitable than others at a particular scale of study, and more than one approach may be applied on the same depositional succession as long as they all serve a purpose.

Kirjallisuus

- Brookfield, M.E. ja Martini, I.P., 1999. Facies architecture and sequence stratigraphy in glacially influenced basins: basic problems and water-level/glacier input-point controls (with an example from the Quaternary of Ontario, Canada). *Sedimentary Geology* 123:183–197.
- Catuneanu, O., Galloway, W.E., Kendall, C.G.St.C., Miall, A.D., Posamentier, H.W., Strasser, A., *et al.*, 2011. Sequence stratigraphy: methodology and nomenclature. *Newsletters on Stratigraphy* 44:173–245.

- Hughes, P.D., 2010. Geomorphology and Quaternary stratigraphy: the roles of morpho-, litho-, and allostratigraphy. *Geomorphology* 123:189–199.
- Hyttinen, O., Kotilainen, A.T., Virtasalo, J.J., Kekäläinen, P., Snowball, I., Obrochta, S., *et al.* 2017. Holocene stratigraphy of Ångermanälven River estuary, Bothnian Sea. *Geo-Marine Letters* 37:273–288.
- Jensen, J.B., Moros, M., Endler, R., IODP Expedition 347 Members, 2017. The Bornholm Basin, southern Scandinavia: a complex history from Late Cretaceous structural developments to recent sedimentation. *Boreas* 46:3–17.
- Jokinen, S.A., Virtasalo, J.J., Kotilainen, A.T. ja Saarinen, T., 2015. Varve microfabric record of seasonal sedimentation and bottom flow-modulated mud deposition in the coastal northern Baltic Sea. *Marine Geology* 366:79–96.
- Miall, A.D., 2016. *Stratigraphy: A Modern Synthesis*. Springer, Cham Heidelberg, 454 s.
- NACSN (North American Commission on Stratigraphic Nomenclature), 2005. North American Stratigraphic Code. *AAPG Bulletin* 89:1547–1591.
- Ojala, A.E.K., Saresma, M., Virtasalo, J.J. ja Huotari-Halkosaari, T. An allostratigraphic approach to subdivide fine-grained sediments for urban planning. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, painossa.
- Powell, R.D. ja Cooper, J.M., 2002. A glacial sequence stratigraphic model for temperate, glaciated continental shelves. Teoksessa: Dowdeswell, J.A. ja Ó Cofaigh, C. (toim.), *Glacier-influenced sedimentation on high-latitude continental margins*. Geological Society, London, Special Publications 203:215–244.
- Räsänen, M.E., Auri, J.M., Huitti, J.V., Klap, A.K. ja Virtasalo, J.J., 2009. A shift from lithostratigraphic to allostratigraphic classification of Quaternary glacial deposits. *GSA Today* 19(2):4–11.
- Räsänen, M.E., Huitti, J.V., Bhattarai, S., Harvey, J. III ja Huttunen, S., 2015. The SE sector of the Middle Weichselian Eurasian Ice Sheet was much smaller than assumed. *Quaternary Science Reviews* 122: 131–141.
- Salvador, A. (toim.), 1994. *International Stratigraphic Guide*. International Union of Geological Sciences, Trondheim, ja Geological Society of America, Boulder, 214 s.
- Slomka, J.M. ja Eyles, C.H., 2015. Architectural-landsystem analysis of a modern glacial landscape, Sólheimajökull, southern Iceland. *Geomorphology* 230:75–97.
- Strand, K., Köykkä, J. ja Kohonen, J. (toim.), 2010. *Guidelines and Procedures for Naming Precambrian Geological Units in Finland*. 2010 Edition Stratigraphic Commission of Finland: Precambrian Sub-Commission. Geologian tutkimuskeskus, Opas 55, 41 s.
- Tsyrlunikov, A., Tuuling, I., Kalm, V., Hang, T. ja Flodén, T., 2012. Late Weichselian and Holocene seismostratigraphy and depositional history of the Gulf of Riga, NE Baltic Sea. *Boreas* 41:673–689.
- Virtasalo, J. ja Kotilainen, A., 2010. Hienosedimenttien kerrostumisesta ja pohjaeläinyhteisöjen toiminnasta Itämeren syvänteissä: yhdistetyn sedimentologisen ja iknologisen analyysin mahdollisuuksia. *Geologi* 62:140–146.
- Virtasalo, J.J., Kotilainen, A.T. ja Räsänen, M.E., 2005. Holocene stratigraphy of the Archipelago Sea, northern Baltic Sea: the definitions and descriptions of the Dragsfjärd, Korppoo and Nauvo Alloformations. *Baltica* 18:83–97.
- Virtasalo, J.J., Kotilainen, A.T., Räsänen, M.E. ja Ojala, A.E.K., 2007. Late-glacial and post-glacial deposition in a large, low relief, epicontinental basin: the northern Baltic Sea. *Sedimentology* 54:1323–1344.
- Virtasalo, J.J., Kotilainen, A.T. ja Räsänen, M.E., 2010. Definitions of Trollskär Formation and Sandön Formation in the Archipelago Sea, northern Baltic Sea. *Bulletin of the Geological Society of Finland* 82:63–68.
- Virtasalo, J.J., Hämäläinen, J. ja Kotilainen, A.T., 2014. Toward a standard stratigraphical classification practice for the Baltic Sea sediments: the CUAL approach. *Boreas* 43:924–938.
- Virtasalo, J.J., Endler, M., Moros, M., Jokinen, S.A., Hämäläinen, J. ja Kotilainen, A.T., 2016. Base of brackish-water mud as key regional stratigraphic marker of mid-Holocene marine flooding of the Baltic Sea Basin. *Geo-Marine Letters* 36:445–456.