

Sokli varoittaa ilmastonmuutoksen seurauksista

Mitä maapallolla tapahtui, kun ilmasto edellisen kerran lämpeni? Savukosken Soklista kairattu Eem-interglasiaalin aikainen sedimenttisarja tarjoaa joitakin vastauksia.

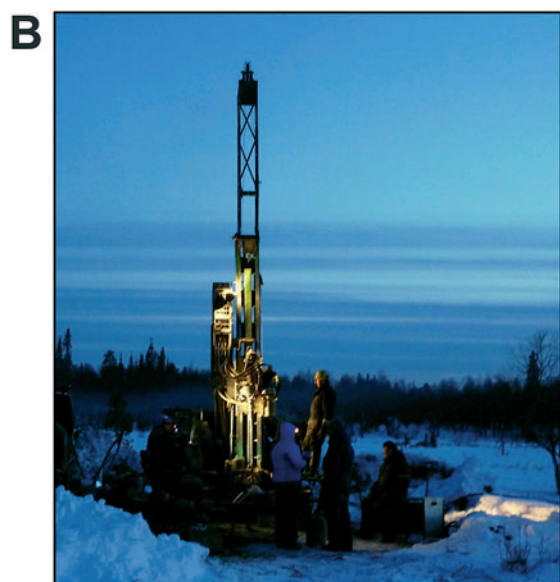
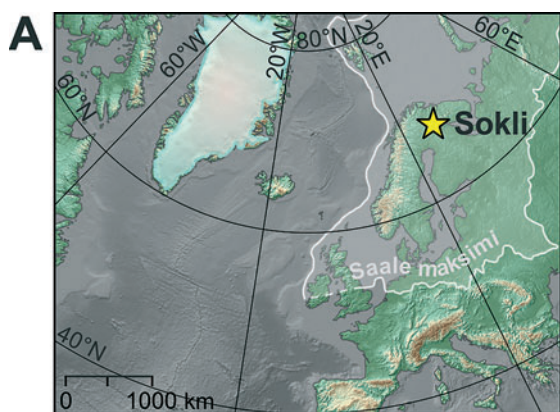
J. SAKARI SALONEN ja KARIN HELMENS

Eem-interglasiaalikaudella (n. 129–116 tuhatta vuotta sitten) on ilmastotutkimukselle erityismerkitys. Kyseessä oli viimeisin kerta geologisessa historiassa, jolloin maapallon keskilämpötilan tiedetään nousseen esiteollista tasoa korkeammalle. Eem-kausi muodostaakin luontevan tavan tutkia ilmaston lämpenemisen vaikutuksia empiirisesti. Paleoilmaستوaineistojen kuten jääkairauksien, merisedimenttien ja Soklin kaltaisten terrestristen sarjojen avulla voidaan kvantifioida Eem-kautisen maapallon ilmastotilat. Geologisten aineistojen perusteella voidaan lisäksi tutkia ympäristön vastetta tähän lämpenemiseen: mitä tapahtui esimerkiksi kasvillisuusvyöhykkeille, jäätiköille ja merenpinnalle? Nämä osaset yhdistämällä voidaan saada arvokasta tietoa maapallon ympäristön herkkyydestä ilmastonmuutokselle.

Savukosken Soklista kairattiin vuonna 2010 Eem-kauteen sijoittuva pitkä sedimenttisarja (kuva 1). Noin 20–30 metrin syvyydessä, paksujen moreenien alla maannut interglasiaalikerrostuma havaittiin ensimmäisen kerran jo 1970-luvulla (Ilvonen 1973). Nyt

kairattu sarja on ensimmäinen korkean resoluution, täydellinen Eem-aineisto koko pohjoisesta Euroopasta – alueelta, joka sittemmin jäätiköityi Veiksel-jääkauden aikana. Moreeninalaisia, joko Veiksel-jääkauden interstadi-aaleihin tai Eemiin sijoittuvia kerrostumia on tutkittu Fennoskandiassa pitkään, mutta nämä ovat olleet joko epätäydellisiä, häiriintyneitä tai epävarmasti ajoitettuja (Donner 1995, Helmens 2014). Soklin Eem-kerrostuma (kuva 2), joka koostuu lähinnä piileväliejusta, on yhteensä yli 12 metriä pitkä ja kattaa koko Eem-kauden alun lämpenemisestä aina Veikselin alkuun ja ilmaston viilenemiseen.

Soklin Eem-kerrostumaa on viime vuosina ollut tutkimassa laaja kansainvälinen tutkijajoukko. Allekirjoittaneiden lisäksi mukana oli eri fossiiliryhmiä asiantuntijoita, merentutkijoita, ilmastomallintajia ja data-analyysin asiantuntijoita Suomesta, Ruotsista, Norjasta, Alankomaista ja Kanadasta. Tutkimusten tavoitteena oli kuvata erittäin tarkalla kronologisella resoluutiolla Eem-kauden ilmaston ja ympäristön kehitystä Pohjois-Euroopassa, ja samalla täydentää Eem-kauden



globaalia kuvaa erittäin huonosti tutkitulta arktiselta alueelta. Alustavia tuloksia tutkimuksemme julkaistiin jo vuonna 2015 (Helmens *et al.* 2015). Lopulliset ilmastorekonstruktiot korkean resoluution analyyseistä julkaistiin *Nature Communications*-lehdessä aikaisemmin tänä vuonna (Salonen *et al.* 2018). Tutkimuksemme osoittivat Pohjois-Suomen Eem-kauden osin odotetun ja aikaisempien tulosten kaltaiseksi. Kun työmme eteni yhä korkeamman resoluution analyyseihin, paljastui Soklin maaperän uumenista kuitenkin myös valtavia ilmastollisia yllätyksiä.

← Kuva 1. (A) Soklin sijainti. Karttaan on merkitty myös Saale-kauden jäätiköitymisen maksimilajuuus. (B) Geologian tutkimuskeskuksen henkilökuntaa kairaamassa Soklin Eem-kerrostumaa keväällä 2010. Kuva: Karin Helmens

Figure 1. (A) Location of Sokli. The map also shows the maximum extent of glaciation during the Saalian ice age. (B) Personnel of the Geological Survey of Finland drilling the Eemian deposits at Sokli in spring 2010. Photo: Karin Helmens



↑ Kuva 2. Eem-kautisia kairanäytteitä Soklistä. Kaikkiaan 12-metrinen sarja koostuu etupäässä suureen järveen kerrostuneesta piileväliejasta. Sarjan pohjalla on minerogeeninen jääjärvikerrostuma. Kuva: Karin Helmens

Figure 2. Eemian sediment cores from Sokli. 12-metre sequence mainly consists of diatom gyttjas deposited in a large lake, with a minerogenic glacial lake deposit at the bottom. Photo: Karin Helmens

Eem-kauden kerrostumien ajoittaminen

Yleisenä haasteena Eem-kauden tutkimuksessa kaikkialla maailmassa on kerrostumien ajoittaminen. Eem-kauden iän vuoksi radiohiilen käyttö rajoittuu siihen, että kerrostumia osoitetaan jääkauden loppuosaa vanhemmiksi. Useimpien kerrostumien suora, absoluuttinen ajoittaminen vaihtoehtoisilla menetelmillä ei ole mahdollista.

Tyypillinen lähestymistapa Eem-tutki-

muksissa on pyrkiä rinnastamaan aineistossa esiintyviä piirteitä, kuten isotooppisuhteissa, fossiilikooستمuksissa tai ilmastorekonstruktioissa tapahtuvia muutoksia johonkin toiseen, absoluuttisesti ajoitettuun aineistoon. Silloin kun tutkimusalueelta tai sen lähistöltä on saatavilla U/Th-menetelmällä ajoitettuja tippukiviä (tavallisesti stalagmiitteja), joiden isotooppisuhteissa esiintyy selvä paleoilmaستosignaali, tarjoavat ne ylivertaisen rinnastuskohteen ja absoluuttisen kronologian lähteen. Keski-Euroopan Eem-kautisia siitepölyaineistoja on rinnastettu myös Etelä-Italian Lago di Monticchio -järven kerrostumiin, jotka poikkeuksellisesti ovat laminoituneita aina Eem-kaudelta nykypäivään. Tämä vuosilustoihin perustuva ajoitus on voitu varmentaa myös tefrakronologialla (Govin *et al.* 2015).

Meillä Pohjois-Euroopassa tämä työ on ollut erityisen vaikeaa, koska vastaavia alueellisia korrelointikohteita on vähemmän. Soklista kairattu pitkä sedimenttisarja oli sinänsä helppo korreloida Eem-kaudelle, koska orgaanisen kerrostuman ylä- ja alapuolisista mineroogeenisista kerroksista on luminesenssi-iat ($> \sim 110$ ka ja $< \sim 150\text{--}180$ ka). Tämän jälkeen alkoivat todelliset haasteet, kun orgaaniselle kerrostumalle lähdettiin rakentamaan tarkempaa ikämallia. Soklin Eem-tutkimusten alkuvaiheessa käytimme ikämallia, joka perustui Soklin ilmastorekonstruktion korreloimiseen Norjanmereltä kairattuun merisedimenttisarjaan ja sen perusteella rekonstruoituun meren pintaveden lämpötiläkäyrään. Tällä merisedimenttisarjalla vuorostaan oli absoluuttinen ikämalli, joka perustui valtameren happiisotooppikronologiaan, ja näin sarja saattoi välillisesti toimia Soklin kronologian lähteenä (Helmens *et al.* 2015). Soklin ajoittaminen helpottui tämän jälkeen yllättäen, kun sekä Itävallasta (Moseley *et al.* 2015) että Belgiasta (Vansteenberghe *et al.* 2016) julkaistiin uusia stalagmiittiaineistoja, joissa näkyi selviä, yh-

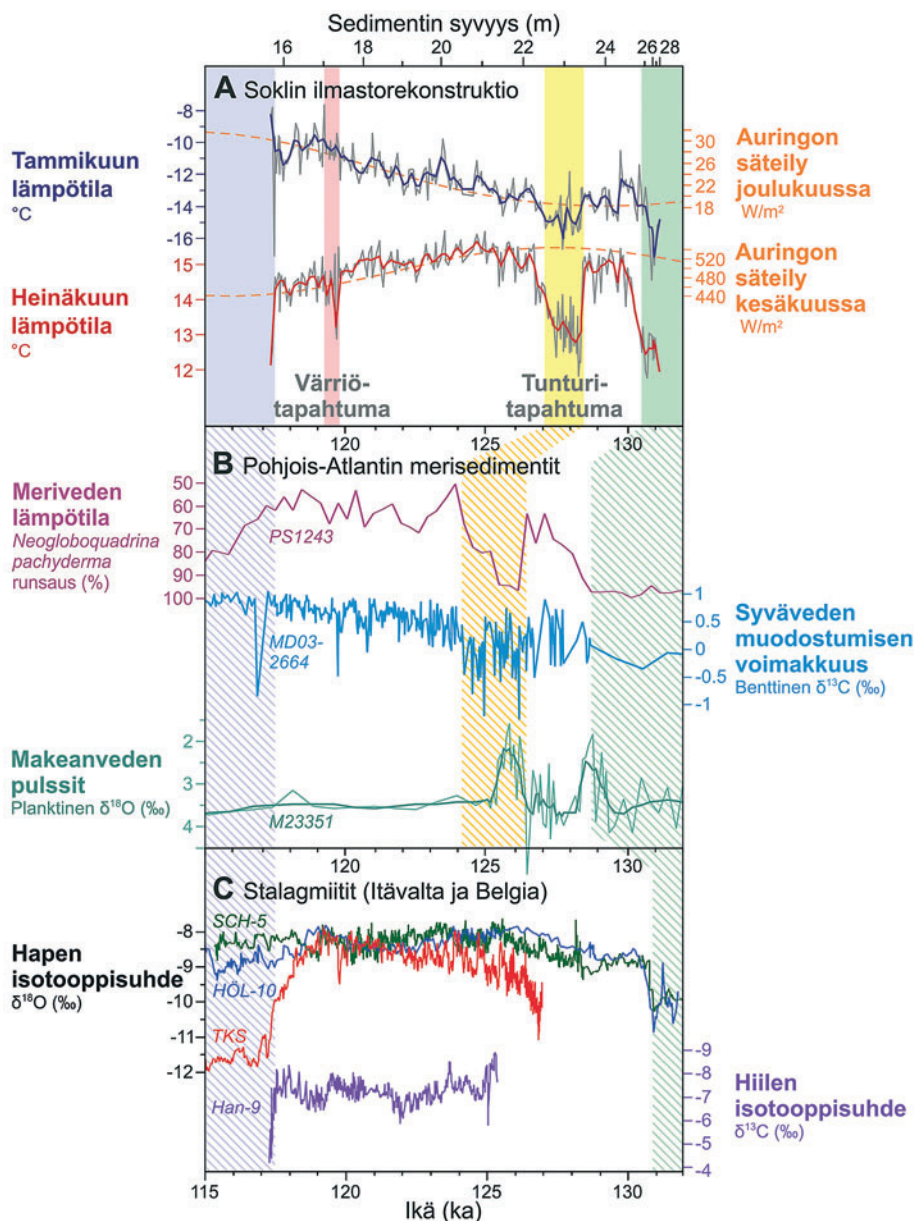
teneviä ilmastopiirteitä Eem-kauden alussa ja lopussa. Lisäksi Ruotsin Jämtlandin Korallgrottan-luolasta on löydetty Eem-kautinen stalagmiitti, jota tutkitaan paraikaa Tukholman yliopistossa. Myös Korallgrottanin stalagmiittin ajoitus tukee Itävallasta ja Belgiasta saatuja tuloksia (Salonen *et al.* 2018).

Näiden uusien tulosten myötä Pohjois-Eurooppaan alkoi yhtäkkiä – ja onnekaastikin – muodostua käyttökelpoinen kehys Eem-kauden kronologialle. Kaikkiin stalagmiittiaineistoihin perustuen korreloimme Soklin Eem-kauden alun stalagmiitti-ikään $130,9 \pm 1$ tuhatta vuotta (2σ) ja Eem-kauden lopun stalagmiitti-ikään $117,5 \pm 0,5$ tuhatta vuotta (2σ).

Paleoilmaستon rekonstruointi

Soklin Eem-sarjasta laadittiin erittäin korkean resoluution paleoilmaستorekonstruktio (kuva 3A), joka perustui 217 eri-ikäiseen siitepölynäytteeseen. Kun Eem-kauden pituus Soklissa on stalagmiittiaineistoihin (kuva 3C) perustuvan ikämallin perusteella n. 13 500 vuotta, on rekonstruktion resoluutio keskimäärin selvästi alle sata vuotta (Salonen *et al.* 2018).

Ilmastorekonstruktio tehtiin niin sanottuna ryväsrekonstruktiona (engl. *ensemble reconstruction*), jossa arviot muinaisilmastoista perustuvat useaan eri tilastolliseen rekonstruktiomenetelmään, sisältäen sekä perinteisiä että uusia, koneoppimiseen perustuvia lähestymistapoja. Eri menetelmien tuottamista ilmastorekonstruktioista laskettiin lopulta mediaani. Lähestymistapamme oli tavallaan analoginen ilmastomuutoksen ennustamisessa käytettävien ryväsennusteiden kanssa. Ilmaستon rekonstruointiin on paljon erilaisia menetelmiä, jotka perustuvat erilaisiin ekologiisiin ja tilastollisiin oletuksiin ja joiden kyky rekonstruoida kaukaisen menneisyyden ilmastoa on osin vai-



Kuva 3. Soklin ilmastorekonstruktiot ja muita Eem-kautisia aineistoja Euroopasta ja Pohjois-Atlantilta. Kuva on yksinkertaistettu Salonen et al. (2018) perusteella. Värillisillä palkeilla on merkitty ilmastovaiheita, joilla on mahdollisia vastineita muissa aineistoissa. (A) Soklin siitepölyaineistoihin perustuvat rekonstruktiot Eem-kauden lämpötilasta tammikuussa ja heinäkuussa. Kuvassa on esitetty myös Milankovičin sykleistä johtuva muutos kesän ja talven auringon säteilyssä. (B) Merisedimenttiaineistoja Pohjois-Atlantilta (Galaasen et al. 2014, Zhuravleva et al. 2017). (C) Stalagmiittiaineistoja, joihin Soklin kronologia perustuu (Meyer et al. 2008, Moseley et al. 2015, Vansteenberghe et al. 2016).

Figure 3. Palaeoclimate reconstructions from Sokli compared with other Eemian records from Europe and the North Atlantic. The figure is simplified based on Salonen et al. (2018). Coloured bars indicate climate stages with possible counterparts in other records. (A) Pollen-based reconstruction of Eemian January and July temperature at Sokli. The figure also indicates the variation in summer and winter insolation due to Milankovitch cycles. (B) Seafloor sediment records from the North Atlantic (Galaasen et al. 2014, Zhuravleva et al. 2017). (C) Stalagmite records forming the basis of the chronology at Sokli (Meyer et al. 2008, Moseley et al. 2015, Vansteenberghe et al. 2016).

keasti arvioitavissa. Tämän vuoksi usein neutraalein vaihtoehto on käyttää kaikkia malleja, mikä pehmentää yksittäisten mallien mahdollisten heikkouksien vaikutusta.

Siitepölyaineiston perusteella laadittiin erilliset rekonstruktiot Eem-kauden kesä- ja talvilämpötilalle. Tulokset olivat siltä osin odotettuja, että Eem-kauden ilmasto oli kaiken kaikkiaan lauha: lämpötilat olivat enimmäkseen noin pari astetta nykyistä ylempänä. Varhais- ja myöhäis-Eem olivat ilmastollisesti varsin erilaisia: ilmasto muuttui kohti Eemin loppua yhä merellisemmäksi, kun talvilämpötila nousi samalla kun kesälämpötila oli kääntynyt jo laskuun (kuva 3A).

Päähuomio lämpötilarekonstruktiossa kiinnittyy kuitenkin ilmaston valtavaan epävakauteen. Lämmintä ilmastovaihetta pilkkoo kaksi voimakasta heilahdusta, joiden aikana lämpötila laski äkillisesti useilla asteilla. Nämä Tunturi- ja Värriö-tapahtumiksi nimeämämme kylmät ilmastovaiheet keskellä Eem-kautta olivat täysin odottamattomia. Aikaisemman tutkimuksen perusteella Eem-kauden on oletettu olleen holoseenin tavoin vakaa, lämmin ilmastovaihe.

Siitepölyjen lisäksi Soklin Eem-kerrostumasta on tutkittu monia muitakin fossiiliryhmiä, kuten piileviä, surviaissääskiä ja kasvimakrofossiileita. Näiden tarjoama paleoilmastotieto tukee siitepölyihin perustuvan ilmastorekonstruktion yleispiirteitä (Plikk *et al.* 2016, painossa).

Soklin merkitys Eem-kauden tutkimukselle

Soklin kerrostuma täyttää isoa tyhjää aluetta, jolta ovat puuttuneet hyvin säilyneet Eem-aineistot viime jääkauden aikaisen eroosion vuoksi. Sokli paljastaa Pohjois-Fennoskandian Eem-kautisen ilmastokehityksen olleen omaleimainen suhteessa Euroopan keskile-

veyksiin, joilta dataa on paljon. Toisin kuin Keski- ja Etelä-Euroopassa, Soklin ilmastorekonstruktioissa näkyy kesä- ja talvilämpötilojen selvät vastakkaiset trendit. Nämä vuoden-aikaiset ilmastotrendit seuraavat jopa ällistytävän tarkkaan Milankovićin syklien aiheuttamia muutoksia kesän ja talven auringon säteilyn voimakkuudessa (kuva 3A).

Yhteiskunnallisesti tärkein anti Soklin tutkimuksista on kuitenkin Eem-kauden äkilliset, kylmät ilmastotapahtumat. Vastaavia, äkillisiä ilmaston heilahduksia on tunnettu jo pitkään viime jääkauden ajalta. Grönlannin jääkairauksissa viime jääkautta leimaavat toistuvat Dansgaardin-Oeschgerin tapahtumat, jotka antavat koko jääkauden ilmastokäyrälle omintakeisen, sahalaitaisen muodon. Salpausselät Etelä-Suomeen muodostanut nuorempi Dryas-kausi oli Veikselin monista heilahduksista viimeinen. Vielä varhaisholoseenissa tapahtui niin sanottu 8200-tapahtuma, jossa ilmasto Pohjois-Atlantin ympäristössä viileni äkillisesti parin sadan vuoden ajaksi. Tämäkin oli tavallaan jääkauden jälkimaininkeja: 8200-tapahtuman aiheutti sulaveden purkaus Pohjois-Amerikasta, Laurentian mannerjäätikön viimeisiltä rippeliltä. Eem-kauden kylmät ilmastotapahtumat eroavat kuitenkin perustavanlaatuisesti edellä mainituista: Eem-kauden heilahdukset tapahtuivat keskellä nykyistä lämpimämpää ilmastovaihetta, ja varsinkin jälkimmäinen Värriö-tapahtuma niin myöhään, ettei se voi kytkeytyä aikaisemman Saale-jääkauden deglasiatioon. Vastaavat tapahtumat näyttävät puuttuvan ainakin useimmista eteläisemmän Euroopan Eem-kerrostumista. Tämä voi johtua siitä, että tapahtumien vaikutusalue todella oli pohjoiseen painotunut. Toisaalta monien Eem-kerrostumien kronologinen resoluutio saattaa olla liian heikko tapahtumien tunnistamiseen (Salonen *et al.* 2018).

Vaikka kylmät tapahtumat näyttävät mys-

tisesti puuttuvan useimmista Euroopan Eem-kerrostumista, joissakin hiljattain tutkituissa Pohjois-Atlantin merenpohjan kerrostumissa ne näkyvät sen sijaan selvästi (kuva 3B; Gaalaasen *et al.* 2014, Zhuravleva *et al.* 2017). Nämä tutkimukset paljastavat karkeasti Soklin Tunturi- ja Värriö-tapahtumien ikäisiä häiriöitä niin Pohjois-Atlantin meriveden lämpötilassa kuin merivirtojen kiertoliikkeessäkin. Paleo-oseanografiset aineistot tarjoavat samalla vahvan hypoteesin kylmien ilmastohäiriöiden aiheuttajasta: tapahtumat näyttävät kytkeytyvän Atlantin termohaliiniokierron häiriöihin. Tarkempi mekaniikka – mikä häiritsi Atlantin kiertoa – on yhä epäselvä. Merisedimentteistä on kuitenkin hiljattain löydetty merkkejä samanikäisistä makean veden pulseista Grönlannista, mikä saattaa viitata siihen, että Grönlannin mannerjäätikkö oli muuttunut epästabiiliksi (Zhuravleva *et al.* 2017). Viimeaikaiset tutkimukset ovat viitanneet siihen, että Pohjois-Atlantin merivirrat saattavat olla jo heikkenemässä ilmastomuutoksen seurauksena (Rahmstorf *et al.* 2015, Caesar *et al.* 2018). Sokli osoittaa, että epävakauden uhka on todellinen – äkillinen ilmaston häiriintyminen Euroopassa todella toteutui edellisellä lämpökaudella.

Toinen odottamaton ja kiehtova piirre Soklissa on myöhäis-Eemin ilmasto, joka jatkuu voimakkaan merellisenä aivan Eem-kauden lopulle asti (kuva 3A). Tämä löydös kytkeytyy pitkään paleoklimatologien keskuudessa käytyyn keskusteluun siitä, minkälainen ilmaston kehitys johti Veiksel-jääkauden alkamiseen. Vaihtoehtoisia hypoteeseja on ollut kaksi. Yhden vaihtoehdon mukaan pääroolia näyttelivät lämpötilojen viileneminen, kun taas toisen ehdotuksen mukaan tärkeässä roolissa oli verraten merellinen ilmasto ja voimakas sadanta (Risebrobakken *et al.* 2007). Soklin uusi aineisto on tärkeässä roolissa tässä keskustelussa: meillä on nyt korkean resoluution

paleoilmastoaineisto paikasta, joka sijaitsee aivan Fennoskandian jäätiköitymisen ydinalueen kyljessä. Soklin ilmastorekonstruktiot tukevat selvästi jälkimmäistä hypoteesia: ilmasto oli merellisen lauha mutta kostea aivan viime jääkauden kynnykselle asti, mikä mahdollisti mannerjäätikön kasvun.

Eem-kauden viesti

Eem-kautta Soklissa pilkkovat kylmät ilmastotapahtumat ovat yhä monin tavoin kryptisiä, ja niiden tutkimus jatkuu yhä. Yhteys Pohjois-Atlantilla havaittuihin merivirtojen häiriöihin vaikuttaa todennäköiseltä, mutta tapahtumien tarkempi mekaniikka ja vuorovaikutukset kryosfääriin, valtameren ja ilmakehän välillä ovat hämärän peitossa. Näiden yhteyksien avaaminen edellyttää ainakin Euroopan ja Pohjois-Atlantin ympäristön Eem-kautisten kerrostumien laajempaa meta-analyysiä, jotta voidaan päästä käsiksi tapahtumien maantieteelliseen vaikutusalueeseen ja ilmastolliseen sormenjälkeen. Fossiiliaineistoihin perustuvien ilmastorekonstruktioiden integraatio numeerisen ilmastomallinnuksen kanssa voi auttaa testaamaan hypoteeseja tapahtumien syntymekanismista.

Monista avoimista kysymyksistä huolimatta yksi Eem-kauden viesti on kristallinkirkas: Eem-kauden ympäristömuutokset alleviivaavat ympäristömme huolestuttavaa herkkyyttä ilmastomuutokselle (Salonen 2018). Eem on kuuluisa esimerkki nykyistä lämpimämmästä ilmastovaiheesta ja tärkeä vertailukohta, kun arvioidaan ilmastomuutoksen seurauksia. Uudessa tutkimuksessa arviota maapallon keskilämpötilan noususta Eem-kaudella on korjattu alaspäin, vain noin 0,5 asteeseen esiteollisen tason yläpuolella (Hoffman *et al.* 2017). Silti vaikutus ympäristöön oli valtava: merenpinta nousi peräti 6–9 metriä ja Pohjois-Atlantin kiertoliike häiriintyi. Kun Eem-kauden ympäristön herkkyyttä puolen asteen lämpe-

nemiseen verrataan uusimpiin arvioihin neljän asteen lämpenemisestä tällä vuosisadalla, ei tämä ennakoi helpoja aikoja ilmastonmuutokseen varautumisessa.

Kiitokset

Kirjoittajat kiittävät kaikkia tutkimuksen rahoittajia. Ruotsin ydinjäteyhtiö SKB on toiminut Soklin paleoilmastotutkimusten pitkäaikaisena tukijana. Bolin Centre for Climate Research rahoitti Eem-kerrostuman kairauksen ja laboratorioanalyysijä. Kiitämme myös Geologian tutkimuskeskusta avusta kairauksessa. J.S.S. on lisäksi saanut rahoitusta Suomen Akatemian hankkeesta ”Koneoppiminen paleoklimatologiassa”, Suomen Akatemian tutkijatohtorirahoituksesta sekä Suomen Kulttuurirahastolta.

J. SAKARI SALONEN

Geotieteiden ja maantieteen osasto
Helsingin yliopisto
sakari.salonen@helsinki.fi

KARIN HELMENS

Luonnonmaantieteen laitos ja
Bolin Centre for Climate Research
Tukholman yliopisto
karin.helmens@natgeo.su.se

J.S.S. on tutkijatohtori ja paleoklimatologian dosentti Helsingin yliopistossa. K.H. toimii kvartäärigeologian dosenttina Tukholman yliopistossa.

Eem-kauden kasvillisuuden

Soklin Eem-sarjan fossiiliaineistossa esiintyy joitakin nykyiseen Lappiin vieraita lämpimän ilmaston indikaattoreita. Hätkähdyttävän löytö on kuningassaniaisen (*Osmunda regalis*) itiöt (kuva 4). Nykyiseltä levinneisyydeltään kuningassaniainen on voimakkaan merellinen: Pohjois-Euroopassa lajin mantereisimmat esiintymispaikat ovat Ruotsissa noin Tukholman korkeudella. Kuningassaniainen on todennäköisesti kasvanut Soklissa paikallisesti, koska laji on matalaa aluskasvillisuutta ja sen itiöt verraten massiivisia eivätkä todennäköisesti leviä pitkiä matkoja tuulen mukana.

Myös toinen merellisen ilmaston indikaattorilaji, pähkinäpensas (*Corylus avellana*) näyt-



Kuva 4. Kuningassaniaisen itiö.
Kuva: J. Sakari Salonen

Figure 4. Royal fern spore.
Photo: J. Sakari Salonen

erikoisuuksia

tää kasvaneen Soklissa. Lajin siitepölyjä esiintyy Soklin Eem-kerrostumassa niin paljon, ettei se todennäköisesti selity siitepölyn kaukokulkeutumalla (Salonen *et al.* 2018).

Metsäkasvillisuudessa merkittävää on lehtikuusen (*Larix*) selvä läsnäolo, mistä todistavat sekä siitepölyt (kuva 5) että sedimentissä säilyneet huulisolut (kuva 6). Lehtikuusta on havaittu myös aiemmissa siitepölyanalyyseissä, joita on tehty Suomen moreeninalaisista orgaanisista kerrostumista (Eriksson 1982). Lisäksi Vuotson kanavan kaivutöiden (1978–1981) yhteydessä löydettiin kokonainen lehtikuusen runko, jonka paksuus oli 40 senttimetriä ja pituus 8 metriä. Runko tulkittiin Eem-kautiseksi radiohiiliajoituksen (> 49 200

a) ja runkoa ympäröineen kerrostuman mikrofossiilianalyysin perusteella (Mäkinen 1982).

Yksi on poissa: lehmus (*Tilia*) puuttuu Soklin fossiiliaineistosta lähes tyystin. Yli 200 siitepölynäytteessä voitiin löytää vaivaiset neljä lehmuksen siitepölyä, mikä on silmiinpistävää, koska samat näytteet ovat tulvillaan lehmusta vaateliaampien lämpöindikaattorien siitepölyjä. Lehmuksen puuttumiseen on kiinnitetty huomiota myös aikaisemmissa Fennoskandian Eem-kerrostumien tutkimuksissa (Donner 1995). Selitys saattaa piillä Eemin merellisessä ilmastossa. Lehmus on jalojen lehtipuiden joukossa nykyiseltä levinneisyydeltään selvästi mantereinen, joten Eem-kautinen Fennoskandia on voinut olla sille vaikea kilpailuympäristö.



Kuva 5. Lehtikuusen siitepöly.
Kuva: J. Sakari Salonen

Figure 5. Larch pollen grain.
Photo: J. Sakari Salonen



Kuva 6. Lehtikuusen huulisolu.
Kuva: Niina Kuosmanen

Figure 6. Larch stoma.
Photo: Niina Kuosmanen

Summary

Sokli: a cautionary tale about consequences of climate change

The Eemian interglacial (129–116 ka) provides an important point of comparison as we strive to understand the consequences of global warming. As the last time in geological history with global temperatures above the preindustrial level, the Eemian allows us to assess the sensitivity of the global environment – including sea level, glaciers, and vegetation – to rising temperatures. However, the study of the Eemian has long been hampered by the lack of continuous and well-dated sequences from the northern land areas, due to widespread glacial erosion during the following Weichselian ice age. This situation has recently improved by the recovery of a continuous Eemian sequence from Sokli, northern Finland (Fig. 1). The 12-metre sequence (Fig. 2) has been analysed for a multitude of climate proxies, including pollen, plant macrofossils, chironomids and diatoms. A pollen-based climate-reconstruction of July and January temperature (Fig. 3) reveals a generally warm Eemian, which is however intersected by two abrupt cooling events (the Tunturi and Värriö events). These cooling events have clear counterparts in the North Atlantic marine proxies, suggesting a link to disturbances in North Atlantic circulation. The late-Eemian climate at Sokli is markedly temperate, with warm reconstructed winters and indicators of oceanic climate such as *Corylus* and *Osmunda* found in the fossil record (Figs 4–6). This observation lends support to an earlier hypothesis about Weichselian glacial inception due to strong North Atlantic circulation and heavy marine influence including high precipitation in Fennoscandian climate.

Kirjallisuus

- Caesar, L., Rahmstorf, S., Robinson, A., Feulner, G. ja Saba, V., 2018. Observed fingerprint of a weakening Atlantic Ocean overturning circulation. *Nature* 556:191–196.
- Donner, J., 1995. The Quaternary History of Scandinavia. Cambridge University Press, Cambridge, 200 s.
- Erikson, B., 1982. Piirteitä interglasiaalikerrostumien siitepölyfloorista. *Geologi* 34:185–186.
- Galaasen, E.V., Ninnemann, U.S., Irväl, N., Kleiven, H.F., Rosenthal, Y., Kissel, C., *et al.*, 2014. Rapid Reductions in North Atlantic Deep Water During the Peak of the Last Interglacial Period. *Science* 343:1129–1132.
- Govin, A., Capron, E., Tzedakis, P.C., Verheyden, S., Ghaleb, B., Hillaire-Marcel, C., *et al.*, 2015. Sequence of events from the onset to the demise of the Last Interglacial: evaluating strengths and limitations of chronologies used in climatic archives. *Quaternary Science Reviews* 129:1–36.
- Helmens, K.F., 2014. The Last Interglacial–Glacial cycle (MIS 5–2) re-examined based on long proxy records from central and northern Europe. *Quaternary Science Reviews* 86:115–143.
- Helmens, K.F., Salonen, J.S., Pliikk, A., Engels, S., Välranta, M., Kylander, M., *et al.*, 2015. Major cooling intersecting peak Eemian Interglacial warmth in northern Europe. *Quaternary Science Reviews* 122:293–299.
- Hoffman, J.S., Clark, P.U., Parnell, A.C. ja He, F., 2017. Regional and global sea surface temperatures during the last interglaciation. *Science* 355:276–279.
- Ilvonen, E., 1973. Eem-kerrostuma Savukosken Soklilla. *Geologi* 25:81–84.
- Mäkinen, K., 1982. Tiedonanto Vuotson interglasiaalisesta lehtikuusen rungosta. *Geologi* 34:183–185.
- Meyer, M.C., Spötl, C. ja Mangini, A., 2008. The demise of the Last Interglacial recorded in isotopically dated speleothems from the Alps. *Quaternary Science Reviews* 27:476–496.
- Moseley, G.E., Spötl, C., Cheng, H., Boch, R., Min, A. ja Edwards, R.L., 2015. Termination-II interstadial/stadial climate change recorded in two stalagmites from the north European Alps. *Quaternary Science Reviews* 127:229–239.





- Plikk, A., Helmens, K.F., Fernández-Fernández, M., Kylander, M., Löwemark, L., Risberg, J., *et al.*, 2016. Development of an Eemian (MIS 5e) Interglacial paleolake at Sokli (N Finland) inferred using multiple proxies. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 464:11–26.
- Rahmstorf, S., Box, J.E., Feulner, G., Mann, M.E., Robinson, A., Rutherford, S., *et al.*, 2015. Exceptional twentieth-century slowdown in Atlantic Ocean overturning circulation. *Nature Climate Change* 5:475–480.
- Risebrobakken, B., Dokken, T., Otterå, O.H., Jansen, E., Gao, Y. ja Drange, H., 2007. Inception of the Northern European ice sheet due to contrasting ocean and insolation forcing. *Quaternary Research* 67:128–135.
- Salonen, J.S., 2018. Tutkijat löysivät Lapista avaimen jääkautta edeltäneen lämpimän ilmaston draamattisten vaiheiden selvittämiseen. #Muutos-lehti 14.9.2018. <http://www.muutoslehti.fi>
- Salonen, J.S., Helmens, K.F., Brendryen, J., Kuosmanen, N., Välranta, M., Goring, S., *et al.*, 2018. Abrupt high-latitude climate events and decoupled seasonal trends during the Eemian. *Nature Communications* 9:2851.
- Vansteenberghe, S., Verheyden, S., Cheng, H., Edwards, R.L., Keppens, E. ja Claeys, P., 2016. Paleoclimate in continental northwestern Europe during the Eemian and early Weichselian (125–97 ka): insights from a Belgian speleothem. *Climate of the Past* 12:1445–1458.
- Zhuravleva, A., Bauch, H.A., ja Van Nieuwenhove, N., 2017. Last Interglacial (MIS5e) hydrographic shifts linked to meltwater discharges from the East Greenland margin. *Quaternary Science Reviews* 164:95–109.