

Palsasuot muuttuvassa ilmastossa

Palsa mires in a changing climate

Pirita O. Oksanen & Minna Väliranta

Pirita O. Oksanen, University of Bristol, School of Geographical Sciences, University Road, Bristol BS8 1SS, UK, e-mail: p.oksanen@bristol.ac.uk

Minna Väliranta, Helsingin yliopisto, Bio- ja ympäristötieteiden laitos (Department of Biological and Environmental Sciences, University of Helsinki), PL 65, FIN-00014 Helsingin yliopisto, Finland, e-mail: minna.valiranta@helsinki.fi

Tämä artikkeli käsittelee kirjoittajien uusimpia palsasuotutkimuksia Venäjällä Komin tasavallassa ja Nenetsian alueella sekä Suomen Lapissa. Tutkimusten tarkoituksena oli selvittää palsasoiden kasvillisuutta ja dynamiikkaa. Lisäksi verrattiin palsasoiden historiallista dynamiikkaa holoseenin (11 500 vuotta) ilmastonmuutoksiin ja pohditaan ikiroutaa sisältävien soiden tulevaisuutta hiilen kertymisen ja ilmakehään vapautumisen näkökulmasta. Ikiroutadynamiikassa tapahtuneita muutoksia tutkittiin kasvimakro-fossiilianalyysin ja radiohiiliajoituksen avulla. Hiilen kertymistä ikiroutasoiden turpeeseen tutkittiin hiilipitoisuusanalyysillä. Historiallisten kasviyhdyskuntien tulkinnan tueksi tutkimuspaikkojen nykyistä kasvillisuutta kartoitettiin otantamenetelmällä. Vaikka yhtään varsinaista ikiroudan läsnäoloa osoittavaa nk. positiivista indikaattorilajia ei löytynyt, voitiin osoittaa, että historiallista ikiroutadynamiikkaa on mahdollista tulkita kasvillisuudessa tapahtuneiden muutosten avulla, sillä tietynlaiset muutokset kasviyhdyskunnissa ovat tyypillisiä erilaisissa ikiroutaympäristöissä ja suon kehitysvaiheissa. Tulkintaa kuitenkin usein vaikeuttaa samanlaisten kasviyhdyskuntien esiintyminen myös ikiroudattomilla suotyypeillä sekä mahdolliset eroosion aiheuttamat katkokset turvekertymissä. Monet nk. negatiiviset indikaattorilajit, jotka eivät koskaan esiinny ikiroudan yhteydessä, ovat kuitenkin erityisen käyttökelpoisia ikiroutadynamiikkaa tutkittaessa. Yleistäen voidaan todeta, että ikiroutadynamiikassa tapahtuneet muutokset sopivat hyvin yhteen aiempien holoseenin ilmastorekonstruktioiden kanssa; ikiroudan muodostuminen on ollut aktiivisinta viileiden ilmastovaiheiden aikana. Lisäksi ikirouta-alueen maantieteellinen laajuus on pienentynyt viimeisten noin 150 vuoden aikana. Soitten ikiroutakumpuja, palsoja, alkoi Euroopassa muodostua viimeistään noin 3000 vuotta sitten Pohjois-Venäjällä ja noin 2500 vuotta sitten Fennoskandiassa. On kuitenkin todennäköistä, että ikiroutaa on soihin muodostunut myös näitä ajankohtia aiemmin. Ikiroutaisiin soihin sitoutuneet hiilen määrät vastaavat keskimäärin pohjoisten ikiroudattomien soiden arvoja. Arvot kuitenkin vaihtelevat suuresti (0–100 g C m⁻² a⁻¹) hydrologisista ja ikiroutaoloista riippuen

Avainsanat: hiilen kierto, Fennoskandia, holoseeni, Pohjois-Venäjä, palsa, ikirouta, kasvimakrofossiili, radiohiiliajoitus

Johdanto

Palsat ovat ikiroutaa sisältäviä turvemuodostelmia, joita esiintyy alueilla, joiden vuotuinen keskilämpötila on alle 0 °C. Lisäksi palsojen muodostumiselle tärkeitä tekijöitä ovat maaperän laatu, paikallinen kasvillisuus, sadanta ja tuuliolot. Ohut lumipeite talvella ja vähäsateinen kesä suosivat palsojen syntyä (esim. Seppälä 1988). Palsat voivat olla yksittäisiä 1–7 m korkeita kumpareita tai yhtenäisempiä, 1–3 m ympäröivästä suonpinnasta kohoavia, laakeita tasanteita eli laakio-palvoja (engl. plateau palsas). Korkeat kumpupalsat ovat yleisiä pohjoisimman taigan ja Fennoskandian tunturikoivuvyöhykkeen soilla, laakio-palsasuot ovat tyypillisiä metsätundralle ja eteläiselle tundralle (Kats 1948, Pjavitshenko 1955, Ruuhijärvi 1960). Palsat itse vaikuttavat huomattavasti suon mikrotopografiaan ja siten sen mikroilmastoon, hydrologiaan, kasvillisuuteen sekä suossa tapahtuvaan hiilenkiertoon eli hiilen sitoutumiseen ekosysteemiin ja sen poistumiseen siitä hajotuksen kautta. Ikiroutasuot ovat mikrohabitaateiltaan hyvin vaihtelevia, ja historiallisissa stratigrafioissa tätä vaihtelua voidaan käyttää hyväksi tunnistettaessa ja ajoitettaessa suon ikiroutadynamiikkaa.

Palsasoita on tutkittu yli sadan vuoden ajan (esim. Kihlman 1890, Fries & Bergström 1910, Auer 1924, Sumgin 1934), mutta edelleenkin ei esimerkiksi tiedetä, kuinka samanaikaisia palsasoiden dynamiikkaan liittyvät tapahtumat eri puolilla Pohjois-Eurooppaa ovat. Tämä johtuu siitä, että huolella ajoitettuja palsastratigrafioita ei ole ollut käytettävissä. Aikaisemmissa tutkimuksissa palsojen ikää ja muodostumisprosessia on usein arvioitu siitepölystratigrafian ja siihen perustuvan ilmastorekonstruktion avulla varsinaisten radiohiiliajoitusten ja kasvistoanalyysin sijasta. Kasvimakrofossiilianalyysiä, varsinkin yhdistettynä radiohiiliajoitukseen, on palsojen kehittymistä selvittävässä tutkimuksissa käytetty hämmästyttävän vähän (Sonesson 1968, 1970, Vorren 1972, 1979 ja Vorren & Vorren 1976). Lisäksi ikiroudan merkitystä pohjoisten soiden hiilenkierrossa ei ole aiemmin tutkittu.

Tässä artikkelissa esittelemme uusia Venäjältä, Komin tasavallasta ja Nenetsiasta, sekä Suomen Lapista saatuja tutkimustuloksia ja vertaam-

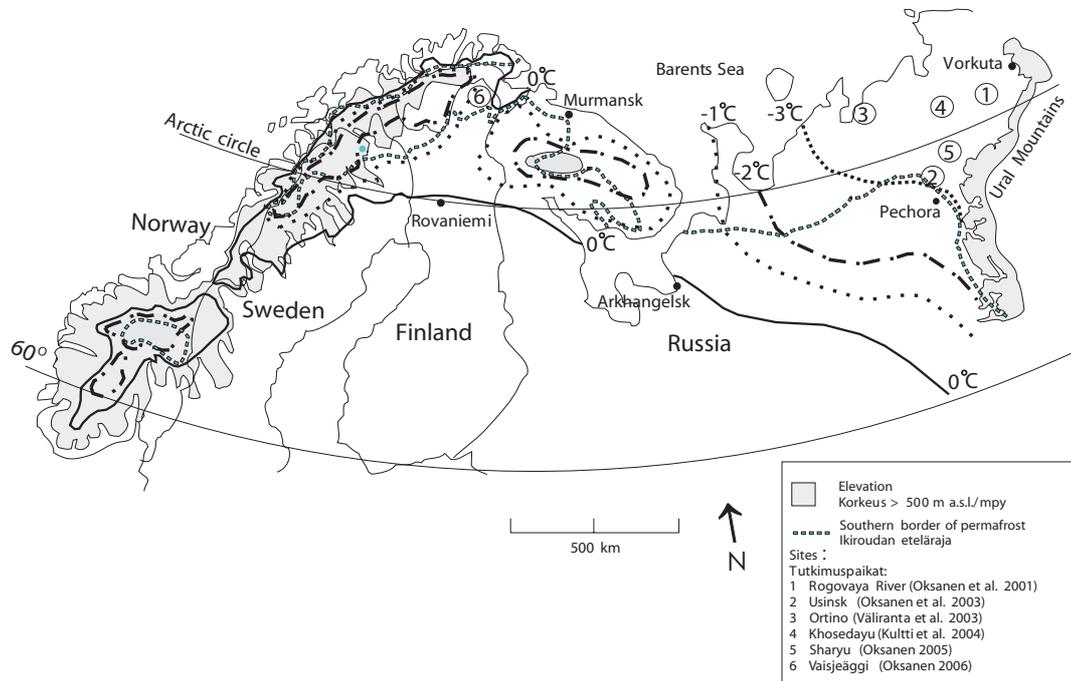
me palsasoiden historiallista dynamiikkaa holoseenin (viimeiset noin 11 500 vuotta) ilmastomuutoksiin. Pohdimme myös ikiroutaa sisältävien soiden tulevaisuutta hiilen kertymisen ja ilmakehään vapautumisen näkökulmasta, ennustetussa lämpenevässä ilmastossa. Artikkelin perustuu seuraaviin julkaisuihin: Oksanen ym. (2001), Oksanen ym. (2003), Väiliranta ym. (2003), Kultti ym. (2004), Oksanen (2005), Väiliranta (2005) ja Oksanen (2006).

Tutkimusalueet ja -menetelmät

Tutkitut alueet sijaitsevat Euroopan-puoleisen Venäjän pohjoisosissa (Komin ja Nenetsian alueilla, Petschora-joen valuma-alueella) sekä Suomen Lapissa (Kuva 1). Venäjän puoleiset tutkimusalueet sijaitsevat alankoalueilla nykyisen puurajan etelä- ja pohjoispuolella. Suomen kohteet sijaitsevat ylängöllä tunturikoivuvyöhykkeessä.

Kaikilta tutkimuskohteilta kairattiin turvenäytteitä, joista tehtiin kasvimakrofossiilianalyysi. Analyysiä varten palsan seinämään kaivetusta paljastumasta otettiin halutulla näytetiheydellä turvenäytteet muovipusseihin. Roudattomasta turpeesta näytteet otettiin venäläisellä suokairalla. Laboratorioissa näytteistä otettiin tilavuustarkka osanäyte, joka keitettiin laimeassa kaliumhydroksidiliuoksessa. Näyte siivilöitiin vesihanalla tiheän siivilän (n. 120 µm) avulla. Siivilään jäänyt turvenäyte analysoitiin systemaattisesti stereomikroskoopin avulla. Sammallajien ja kasvisolukoiden tunnistamiseen käytettiin suuritehoista valomikroskooppia. Turvenäytteen sisältämien erilaisten komponenttien, esim. sammalten, juurten, varpujen tai siementen osuudet näytteessä arvioitiin prosentteina tai kirjattiin ylös kappalemäärinä. Näytteen maatuneisuusaste arvioitiin kuusiportaisella asteikolla (0–5) (Janssens 1983). Muista paitsi yhdestä profiilista tehtiin lisäksi hiilianalyysi akkumulaationopeuksien laskemiseksi. Turveprofiilit ajoitettiin radiohiilimenetelmällä, joko konventionaalilla tai AMS-analyysillä.

Osalla tutkimuskohteista tehtiin kasvipeitekartoitus, jonka tarkoituksena oli selvittää, onko olemassa tietynlaisia kasvivyhdyskuntia tai yksit-



Kuva 1. Kartta tutkimuskohteista.

Figure 1. Map of the study sites.

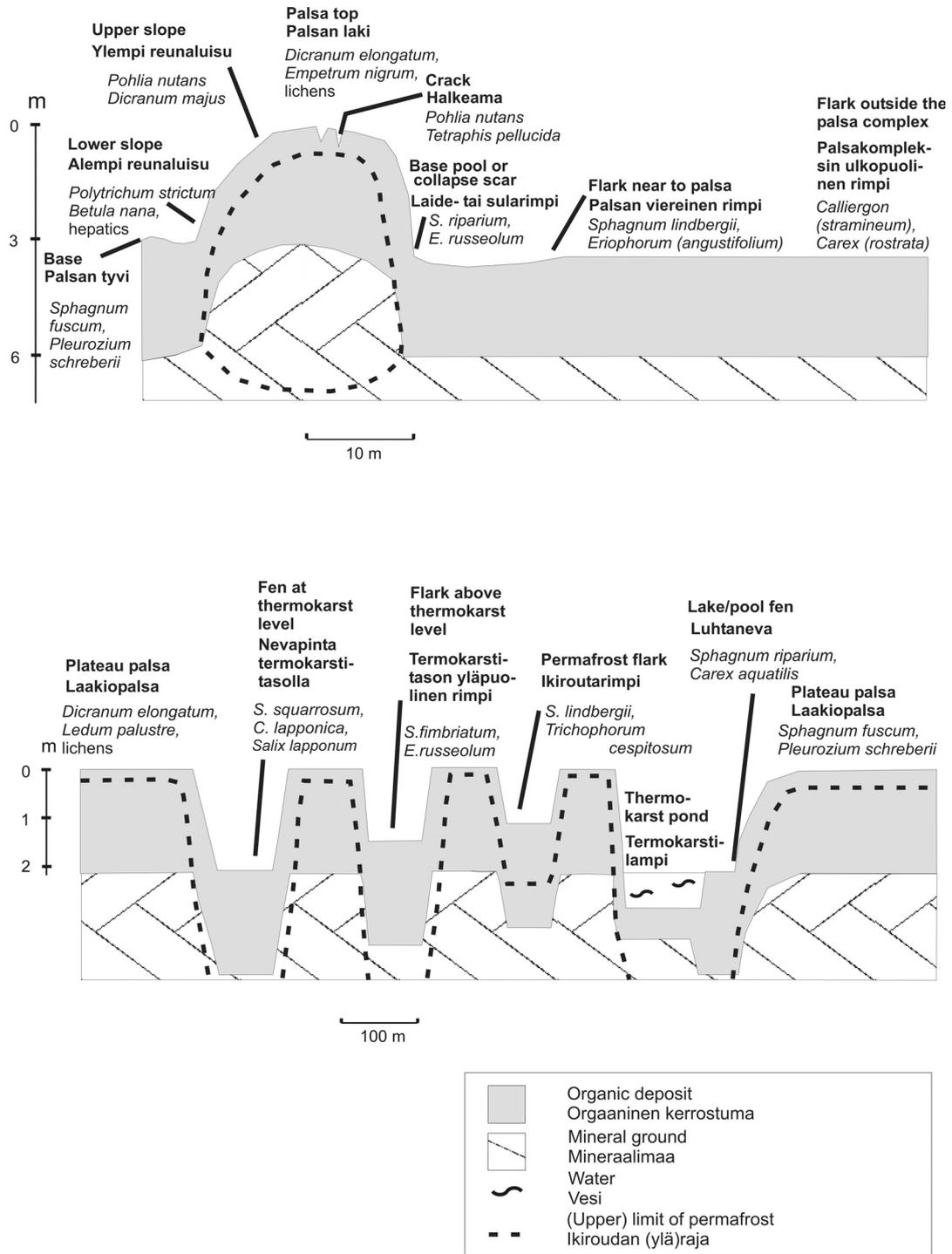
täisiä lajeja, joiden perusteella olisi mahdollista päätellä, onko kasvupaikalla ikeroutaa vai ei. Toisin sanoen, pyrittiin etsimään mahdollisia positiivisia tai negatiivisia routaindikaattoreita. Tällaiset indikaattorilajit tai kasviyhdykunnat olisivat erittäin käyttökelpoisia selvitettäessä palsan syntytetkeä.

Tulokset ja tulosten tarkastelu

Nykyinen kasvillisuus ja indikaattorilajit

Eurooppalaisten palsasoiden kasvillisuudessa on vähän alueellisia eroja. Hienoisia eroja kuitenkin on itäisen Euroopan palsasoiden kasvillisuudessa verrattuna läntiseen (Fennoskandian) alueeseen, sekä pohjoisten laakiopalsasoiden ja eteläisten korkeiden palsojen soitten välillä. Palsasuiden mikrohabitaatit voidaan morfologisesti ja ikeroudan suhteen luokitella seuraavasti: 1) palsan laki, 2) palsan reunallisuus, 3) palsan viereinen rimppe sekä 4) palsakompleksin ulkopuolella

sijaitseva ikeroudaton mätäs ja rimppe (Kuva 2). Laakiopalsasoilla on lisäksi ikeroutaisia rimppeä. Korkeat palsat ovat kuivia ja ombrotrofisia kasvupaikkoja. Kuivat, palsan laella esiintyvät kasvillisuustyyppit, voidaan jakaa kahteen alatyppiin: jäkälävaltaiset ja sammalvaltaiset. Sammallajeista erityisesti tunturikynsisammal (*Dicranum elongatum*) ja rämekarhunsammal (*Polytrichum strictum*), ja etenkin Itä-Euroopassa myös seinäsammal (*Pleurozium schreberi*) viihtyvät palsojen päällä. Kenttäkerroksen lajeja kuivilla kasvupaikoilla ovat varvut, kuten variksenmarja (*Empetrum nigrum*), etenkin Fennoskandiassa, ja suopuru (*Ledum palustre*), joka on yleisempi idässä. Myös kosteita palsahabitaatteja tavataan, etenkin laakiopalsasoilla. Tällaisia kasvupaikkoja hallitsevat rahkasammalista pääsääntöisesti *Sphagnum fuscum*, toisinaan *S. capillifolium*. Palsasoiden rimppeiden vallitsevia lajeja ovat *S. lindbergii*, *S. balticum*, *S. riparium* ja sarat (*Carex* spp). Villoista yleisimmät ovat luhtavilla (*Eriophorum angustifolium*), tupasvilla (*E. vaginatum*) (hieman yleisempiä Fennoskandiassa) ja ruostevilla (*E.*



Kuva 2. Kaaviokuva kumpu- ja laakiopalsan mikrohabitaateista tyypillisine kasviyhdyksuntineen.

Figure 2. A schematic illustration of microhabitats of a mound palsa and a plateau palsa, and their typical modern vegetation assemblages.

russuleum) (etenkin Euroopan-puoleisen Venäjän itäosan kohteilla). Rimpikasvillisuus voidaan jakaa kahteen päätyyppiin: *Sphagnum - Eriophorum* -valtaisiin sekä Bryales - *Carex* -valtaisiin. Näistä ensin mainittua tavataan useimmiten ikiroudan läheisyydessä (ks. myös Saari 2001).

Koska kaikki edellä mainitut lajit esiintyvät kuitenkin myös ikiroudattomilla kasvupaikoilla, selkeitä positiivisia indikaattorilajeja on vaikea osoittaa. Tosin eräitä hyvin harvinaisia lajeja, varsinkin jäkälä, on soilta raportoitu ainoastaan palsoilta. Tällaisia taksoneita ovat esim. jäkälät *Alectoria* spp., *Bryocaulon nigricans* ja *Coelocaulon aculeatum*, sammalet *Aulacomnium turgidum* ja *Dicranella cerviculata* sekä putkilokasveja riekonmarja (*Arctostaphylos alpina*). Negatiiviset routaindikaattorit, eli lajit, jotka eivät koskaan esiinny roudan vaikutuksen alaisilla kasvupaikoilla, ovatkin käyttökelpoisempia historiallista kasvillisuustutkimusta ajatellen.

Kasvimakrofossiilianalyysi ja ikiroudan merkkien tunnistaminen

Sammalet ja erityisesti rahkasammalet ovat käyttökelpoisin kasvillisuuselementti, kun historiallista suokasvivyhdyskuntaa selvitetään. Myös sarakasveja jää usein tunnistuskelpoisia jäännöksiä, kuten pullakoita. Monilla sarakasveilla on kuitenkin laaja kasvupaikkatoleranssi, ja se vaikeuttaa niiden käyttöä ekologiseen tulkintaan. Lisäksi eri saralajien taipumus risteytyä keskenään pohjoisilla alueilla vähentää näiden kasvijäännösten indikaatioarvoa.

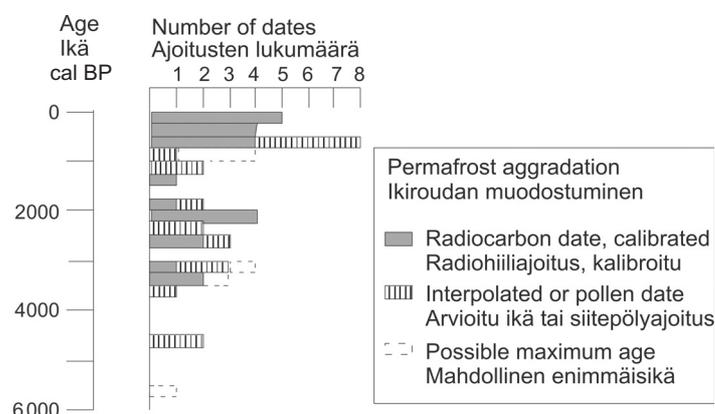
Varsinaisen ikiroudan syntyhetken määrittäminen on usein hankalaa edellä mainittujen seikkojen takia, eli koska varsinaisia routaindikaattorilajeja ei ole olemassa. Negatiivisten indikaattorilajien käyttöä rajoittaa se seikka, että makrofossiilianalyysi on esim. siitepölyanalyysiin verrattuna sattumanvaraisempi. Tämä tarkoittaa, että vaikka tietty kasvi olisikin ollut läsnä, sen jäännöksiä ei välttämättä osu otettuun näytteeseen, joka kuvastaa vain juuri kyseisellä paikalla kasvannutta kasvivyhdyskuntaa. Lisäksi, kun turvekumpu nousee ympäristöönsä korkeammalle, se altistuu eroosiolle. Tällöin kuivissa oloissa kerrostunut turve, jonka selvärajainen esiintyminen kosteissa minerotrofisissa oloissa kerrostuneen

turpeen päällä on suhteellisen selkeä merkki ikiroudan synnystä, kuluu pois, mikä hankaloittaa iän selvittämistä.

Tutkimukset kuitenkin osoittavat, että ikiroutadynamiikkaa on mahdollista selvittää kasvimakrofossiilianalyysiin ja radiohiiliajoitukseen perustuen. Tulkinta perustuu tällöin analogiaan nykyisistä kasvivyhdyskunnista tai tiettyjen lajien esiintymisestä. Tyypillinen ikiroutakumpareen syntymiseen viittaava seikka on kasvillisuussukessio, jossa rimpikasvillisuus äkillisesti korvautuu kuivalla mätäslajistolla. Kuitenkin, varsinkin alkuvaiheessa, turvekumpu saattaa vuoroin nousta ikiroudan työntämänä ympäristöönsä korkeammalle ja taas romahtaa takaisin pintakerroksen tasolle. Tuloksena on vaihtuva stratigrafia, jossa kuivat ja märät jaksot vuorottelevat. *Sphagnum fuscum* -kerros antaa yleensä vain ikiroudan maksimi-ikä, koska ilman muita merkkejä on vaikea tietää, onko sen ilmaantuminen stratigrafiaan ikiroudan seuraus vai osasy roudan syntyyn. Jotkin lajit, esim. *Sphagnum lindbergii*, ovat laakio-palsasoilla yleisiä vain ikiroutarimmissä, joten niitä voidaan (stratigrafisesta asemasta riippuen) pitää todennäköisenä merkinä ikiroudan vaikutuksesta.

Historialliset kasvivyhdyskunnat menneitten ilmasto-olojen ilmentäjinä

Palsakumpuihin on kerrostunut tietoa menneistä ilmasto-oloista ennen ikiroudan syntyä, ja koska palsojen muodostuminen ja häviäminen ovat osittain ilmastosidonnaisia tapahtumia, itse ikiroudan syntyajankohtakin kertoo jotain vallitsevasta ilmastosta – unohtamatta, että esim. suon oma dynamiikka, vallitseva kasvillisuus ja maaperän laatu ovat myös tärkeitä tekijöitä. Aiemmat ilmastotutkimukset Itä-Euroopasta ja Fennoskandiasista ovat osoittaneet, että ilmasto oli varhais- ja keski-holoseenin aikana ainakin 2–3 °C lämpimämpää (Kremenetski & Patyk-Kara 1997, Eronen ym. 1999, Kaakinen & Eronen 2000, MacDonald ym. 2000, Shemesh ym. 2001, Rosén ym. 2001, Seppä & Birks 2001 ja Kultti ym. 2003, 2004). Tämä lämmin ajanjakso on rekisteröitynyt myös niihin turvekerrostumiin, jotka tällä hetkellä ovat palsoja. Kerrostumista löytyy seläisiä lajeja, joiden nykyiset esiintymisalueet ovat



Kuva 3. Yhteenvetokuva ikeroudan muodostumisajankohdista Pohjois-Euroopan soissa eri menetelmillä ajoitettuna. Alkuperäiset lähteet kts. Oksanen (2005).

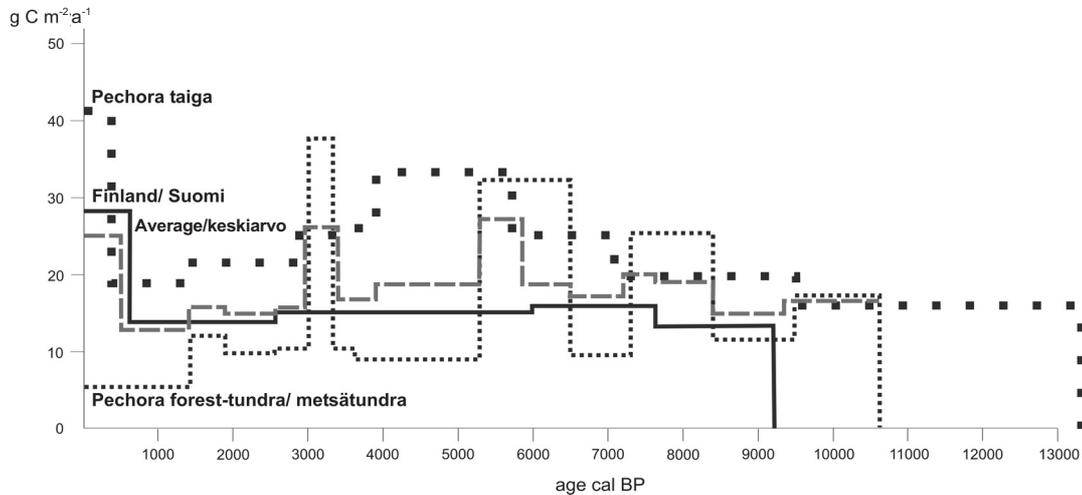
Figure 3. Summary figure showing historical permafrost aggradation in Northern European mires. For original references, see Oksanen (2005).

tänä päivänä huomattavastikin (jopa 800 km) nykyisiä tutkimuskohteita etelämpänä. Tällaisia löytöjä ovat esimerkiksi muutamien vesikasvien, kuten näkinruohojen (*Najas*) ja haurujen (*Zanichellia*) siemenet soiden pohjakerroksissa. Näitä sukuja tavataan murtovedessä pohjoisempaan, mutta tässä tapauksessa muut jäännökset viittaavat makeanveden ympäristöön. Palsasoilla nykyään hyvin harvinaisten kasvien, kuten kuusen (*Picea abies*) (kasvaa palsasoiden laitamilla Petshoran alueella) tai leväkön (*Scheuchzeria palustris*) (harvinaisena Venäjän eteläisimmillä palsasoilla) jäännöksiä löytyy yleisinä ikeroudan syntyä edeltävistä kerrostumista. Etupäässä historiallisissa lajistoissa kuitenkin tavataan samoja lajeja, joita soilla esiintyy nykyisinkin, mutta lajisuhteissa on yleensä tapahtunut muutoksia; esim. erilaiset Bryales -ryhmän sammaleet ja suokorte (*Equisetum palustre*) ovat aiemmin olleet huomattavasti yleisempiä.

Ajoittamista vaikeuttavista tekijöistä, kuten eroosiosta huolimatta stratigrafiset tutkimukset palsasoista paljastavat kaksi ajanjaksoa, jolloin palsojen syntyminen on ollut laajamittaista koko Pohjois-Euroopan metsäraja- ja tundra-alueilla: noin 2600–2000 vuotta sitten, sekä noin 600–100 vuotta sitten eli aikana, jota kutsutaan ”pieneksi jääkaudeksi” (Kuva 3). Palsasuoalueelta on muutamia havaintoja yli 3000 vuotta vanhemmasta ikeroudan muodostumisesta, mutta koska stratigrafia ei todennäköisesti eroosion takia ole täydellinen, on ikää vaikeaa määrittää. Enimmäisikänä holoseenikautiselle ikeroudalle Euroopan soissa voidaan kuitenkin pitää noin 5000 vuotta. Sa-

maan ajankohtaan viittaa tutkimus Siperiasta (Blyakharchuk & Sulerzhitsky 1999). Edellämainitut syntyvaiheet sopivat alueellisiin ilmastorekonstruktioihin, jotka osoittavat ilmaston vähitellen alkaneen viiletä noin 5000 vuotta sitten, kulmineituen noin 3000 vuotta sitten selvään lämpötilojen laskuun (Davydova & Servant-Vildary 1996, Kremenetski ym. 1998, Arslanov ym. 1999, Kaakinen & Eronen 2000, MacDonald ym. 2000, Kultti ym. 2003, 2004, Paus ym. 2003).

Ilman lämpötilan vaikutusta palsasuodynamiikkaan on varsin vaikea arvioida, koska luonnolliseen palsadynamiikkaan kuuluu, että stabiloituneet vanhat palsamuodostumat (eng. mature palsa) ovat huomattavasti vastustuskykyisempiä ilmastossa tapahtuville muutoksille kuin syntyvaiheessa olevat nuoret palsat. Lisäksi muutokset kasvillisuudessa (esim. suon oma kasvudynamiikka), tai paikallisessa hydrologiassa, esim. uusien vesiuomien avautuminen tai vanhojen tukkeutuminen, vaikuttavat palsojen dynamiikkaan (Kuhry 1998, Matthews ym. 1997, Zuidhoff & Kolstrup 2000, 2005). Lisäksi palsasoilla tavataan yleisesti eri kehitysvaiheessa olevia palsoja, sillä yksittäisen palsan muodostumiseen ja sulamiseen vaikuttavat myös esim. talviset tuuliolot, lumipeitteen jakautuminen, routakummun oma korkeuskasvu ja jopa eläinten kulkureitit. Pelkkä vuotuisen keskilämpötilan nousu ei siis välttämättä aiheuta palsan häviämistä (Matthews ym. 1997, Zuidhoff & Kolstrup 2000). Varsinkin palsavyöhykkeen reunaosissa pienikin lämpötilan muutos saattaa kuitenkin johtaa palsojen sulamiseen (Zuidhoff & Kolstrup 2000). Noin 150 vuot-



Kuva 4. Keskimääräiset historialliset hiilenkertymäärät Venäjän Petchoran alueen ja Suomen palsasoilla. Yhtenäinen viiva kuvastaa koko alueen keskiarvoa.

Figure 4. Average historical carbon accumulation values for the studied palsa mires in Russian Pechora and northern Finland. The continuous line shows the average value for the whole area.

ta sitten alkaneen ilmaston lämpenemisen seurauksena sekä Norjasta että Ruotsista on raportoitu palsojen häviämistä (Matthews ym. 1997, Zuidhoff & Kolstrup 2000). Ilmakuvatulkintaan perustuvan termokarstilampikartoituksen perusteella Inarin Lapin läntinen palsasuovyöhyke on saattanut kutistua jopa kolmasosaan entisestä laajuudestaan (Luoto & Seppälä 2003). Lisäksi vaikuttaa siltä, että eräät vanhempiin karttoihin merkityt eteläisimmät palsat Inarin Lapissa ovat kadonneet. Uuden ikeroudan synty on nykyisissä ilmasto-oloissa yhä mahdollista Fennoskandiasakin (esim. Seppälä 1998 ja omat havainnot 1997–2000), mutta uusien ikeroutamuodostumien pysyvyydestä ei ole tietoa pitkältä ajanjaksolta. Vanhimmat palsat tässä artikkelissa esitellyissä tutkimuksissa ovat noin 2500 vuotta vanhoja. Nämä tutkimukset sekä tutkimukset mm. Kanadasta ja Ural-vuoriston itäpuolelta (esim. Vardy ym. 1997, Kremenetski ym. 2003) osoittavat, että ikeroudan syntyhetket, kuten myös ikeroutaa sisältävien turvemuotojen pysyvyys ovat alueellisesti vaihdelleet paljonkin.

Turpeen kertyminen ja hiilen varastoituminen

Aineisto on toistaiseksi pieni, joten tuloksia hiilen kertymisestä (Kuva 4) voidaan pitää vasta alustavina. Hiilianalyysien mukaan Venäjän metsätundralla on suon kasvuhistorian aikana kertynyt keskimäärin 17 g hiiltä neliömetrille vuodessa, Venäjän taiga-alueen soilla 28 g m⁻² a⁻¹ ja Suomen tunturikoivuvyöhykkeen soilla 16 g m⁻² a⁻¹. Nämä arvot vastaavat yleisesti ottaen pohjoisten soitten hiilenkertymiä, jotka tyypillisesti laskevat pohjoista kohti. Hiilen kertymisnopeus vaihtelee kuitenkin suuresti paikoittain ja aikakausittain. Hitainta se on vanhoilla, kypsillä palsoilla, n. 4–7 g m⁻² a⁻¹. Akkumulaatio voi myös täysin lakata tai kääntyä negatiiviseksi eroosion syödessä pintaturvetta. Roudattomalle palsasuon mätätälle on saatu arvo 13 g m⁻² a⁻¹. Myös ikeroutaja sulamisrimmissä hiilen kertyminen voi olla hidasta, noin 10 g m⁻² a⁻¹. Vastaavan hidasta akkumulaatiota tapahtuu roudattomissa allikoissa. Suon ollessa dynaamisessa vaiheessa, jolloin iki-

roudan muodostuminen ja sulaminen vaihtelevat, hiilen kertymä voi pysyä melko korkeana: 18–19 g m⁻²a⁻¹. Lyhyille ajanjaksoille, jolloin ikiroutaa syntyy, on havaittu hyvinkin suuria kerrostumisnopeuksia, 36–102 g m⁻²a⁻¹. Ennen ikiroudan syntyä korkeimmat kertymisarvot on mitattu nuorista, puustoisista suovaiheista, jopa 79 g m⁻²a⁻¹.

Ikiroudassa oleviin soihin siis sitoutuu hiiltä suurinpiirtein saman verran kuin pohjoisimpiin soihin yleensäkin. Palsasuo tuottavat ilmakehään metaania, mutta kylmän ilmaston vuoksi verrattain vähän, ja sitä vähemmän mitä enemmän kuivaa mätäspintaa suolla on, eli suurten laakiopalojen metaanipäästöt ovat suhteessa vähäisimmät. Ainakin aluksi ikiroudan sulaminen lisää soitten rimpipinta-alaa ja täten myös metaanipäästöjä. Jotkut pohjoisen Itä-Euroopan suot ovat ehkä jo muuttuneet hiilen nettositojista sen nettotuottajiksi (Heikkinen *ym.* 2004).

Yhteenvedo ja tulevaisuuden tutkimustarpeet

Vaikka ikiroutadynamiikan historialliseen tutkimiseen liittyy paljon epävarmuustekijöitä, kuten selvien positiivisten routaindikaattorilajien puuttuminen ja routakumpujen altistuminen eroosiolle, on dynamiikan selvittäminen kuitenkin mahdollista soveltuvia menetelmiä hyväksikäyttäen. Kasvimakrofossiilianalyysin tuloksien vertaaminen nykykasviyhdyntäisiin sekä suoprofiilien huolellinen ajoittaminen ovat osoittautuneet hyviksi menetelmiksi. Koska palsasuo on kuitenkin dynaaminen ympäristö ja siinä tapahtuvat muutokset usein nopeita, makrofossiilianalyysi tulisi tehdä mahdollisimman tiheällä näytevälillä (0.5–1 cm), eli tiuhemmin kuin nyt esitellyissä tutkimuksissa. Luotettavan ja tarkan kronologian luominen vaatii suuren määrän radiohiiliajoituksia yhtä profiilia kohti, jotta muutokset ja esim. mahdolliset erodoituneet kerrokset voidaan tunnistaa ja ajoittaa. Erittäin tarkalla resoluutiolla tehty kronologia myös mahdollistaisi nk. wiggle-match-ajoitusmenetelmän (esim. Blaauw *ym.* 2004), jossa turpeesta saatua ikäkäyrää verrataan puun vuosilustoista saatuihin tarkan vuosiluvun antaviin ikäkäyriin ja hiilen isotooppisuhteiden vaihteluun ilmakehässä.

Lähtötulevaisuudessa biokemiallisesta molekyylianalyysistä saattaa tulla makrofossiilianalyysiä täydentävä menetelmä, jonka avulla menneitä kasviyhdyntä voidaan selvittää. Biomolekyylianalyysin avulla on mahdollista tunnistaa hyvin maastuneestakin turpeesta siinä kasvaneita kasveja tai ainakin kasviryhmiä. Toisaalta tietomme palsasoitten eri mikrohabitaateilla esiintyvistä erilaisista kasveista, varsinkin jäkäläistä ja pienistä sammalista, ovat edelleen puutteelliset, joten kasvikartoitustyötäkin vielä tarvitaan. Tutkimuksia tulisi laajentaa vähän tutkituille alueille, joita ovat esim. Kaninin niemimaa ja Vienanmeren rannikkoalueet siitä länteen, Kuolan niemimaa sekä Malenkaja Bolshezemelskaja –tundra Petschora-joesta länteen. Vanhoja karttoja sekä ilmakuvia voi hyödyntää laajemmin viimeaikaisen ikiroutadynamiikan selvittämisessä.

Siitä huolimatta, että ikiroutadynamiikka on riippuvainen muistakin tekijöistä kuin ilman lämpötilasta (esim. Oberman & Mazhitova 2001), on selvää, että jo parin asteen lämpötilan nousu pienentää pohjoista ikiroutavyöhykettä (esim. Anisimov & Nelson 1996). Laajat suoalueet pohjoisilla leveyspiireillä ovat tällä hetkellä ikiroudassa, ja ilmaston lämpenemisen aiheuttaman roudan sulamisen nettovaikutuksen arvioiminen esim. hiilen sitoutumiseen ja vapautumiseen on edelleen epävarmaa. Ikiroudan sulaminen muuttaa soiden kasvillisuutta, jolloin myös turpeen hajotusnopeudessa voi tapahtua muutoksia (esim. Camill 1999). Menneisyyteen ulottuva hiilen kertymistä selvittävä tutkimus voisi antaa taustatietoa, johon olisi mahdollista verrata pohjoisten suoekosysteemien hiilenkierrossa tulevaisuudessa tapahtuvia muutoksia.

Kiitokset

Kiitämme Rauno Ruuhijärveä, Heikki Seppää sekä Sakari Sarkkolaa kommentista, jotka paransivat käsikirjoitustamme. Osa tutkimuksista liittyy seuraaviin laajoihin kansainvälisiin ja monitieteellisiin tutkimushankkeisiin: EU:n rahoittama TUNDRA (ENV4-CT97-0522) sekä Suomen Akatemian rahoittama ARCTICA (grant 47095).

Kirjallisuus

- Anisimov, O. A. & Nelson, F. E. 1996. Permafrost distribution in the Northern Hemisphere under scenarios of climatic change. *Global and Planetary Change* 14: 59–72.
- Arslanov, Kh. A., Saveljeva, L. A., Gey, N. A., Klimanov, V. A., Chernov, S. B., Chernova, G. M., Kuzmin, G. F., Tertychnaya, T. V., Subetto, D. A. & Denisenkov, V. P. 1999. Chronology of vegetation and paleoclimatic stages of northwestern Russia during the Late glacial and Holocene. *Radiocarbon* 41: 25–45.
- Auer, V. 1924. Enontekiön suurmättäistä (palsoista). *Terra* 36: 149–154.
- Blaauw, M., van Geel, B., Mauquoy, D. & van der Plicht, J. 2004. Carbon-14 wiggle-match dating of peat deposits: advantages and limitations. *Journal of Quaternary Science* 19: 177–181.
- Blyakharchuk, T. A. & Sulerzhitsky, L. D. 1999. Holocene vegetational and climatic changes in the forest zone of Western Siberia according to pollen records from the extrazonal palsa bog Bugristoye. *The Holocene* 9: 621–628.
- Camill, P. 1999. Patterns of boreal permafrost peatland vegetation across environmental gradients sensitive to climate warming. *Canadian Journal of Botany* 77: 721–733.
- Davydova, N. & Servant-Vildary, S. 1996. Late Pleistocene and Holocene history of the lakes in the Kola Peninsula, Karelia and North-western part of the East European Plain. *Quaternary Science Reviews* 15: 997–1012.
- Eronen, M., Lindholm, M., Saastamoinen, S. & Zetterberg, P. 1999. Variable Holocene climate, treeline dynamics and changes in natural environments in northern Finnish Lapland. *Chemosphere* 1: 377–387.
- Fries, T. & Bergström, E. 1910. Några iakttagelser öfver pälser och deras förekomst i nordligaste Sverige. *Geologiska Föreningens i Stockholm Förhandlingar* 32(1): 195–205.
- Heikkinen, J. E. P., Virtanen, T., Huttunen, J. T., Elsakov, V. & Martikainen, P. J. 2004. Carbon balance of East European tundra. *Global Biogeochemical Cycles* 18 (GB002054): 1–14.
- Janssens, J. A. 1983. A quantitative method for stratigraphic analysis of bryophytes in Holocene peat. *Journal of Ecology* 71: 189–196.
- Kaakinen, A. & Eronen, M. 2000. Holocene pollen stratigraphy indicating climatic and tree-line changes derived from a peat section at Ortino, in the Pechora lowland, northern Russia. *The Holocene* 10: 611–620.
- Kats, N. Ja. 1948. Түпы болот СССР и западной Евropy и их географитшескоје распротраненіе. Москва.
- Kihlman, A. O. 1890. Pflanzenbiologische Studien aus Russisch Lappland. *Acta Societatis pro Fauna et Flora Fennica* 6(3): 1–263.
- Kremenetski, C. & Patyk-Kara, N. G. 1997. Holocene vegetation dynamics of the southeast Kola Peninsula, Russia. *The Holocene* 7: 473–479.
- Kremenetski, C. V., Sulerzhitsky, L. D. & Hantemirov, R. 1998. Holocene history of the northern limits of some trees and shrubs in Russia. *Arctic and Alpine Research* 30: 317–333.
- Kremenetski, K. V., Velichko, O. K., Borisova, G. M., MacDonald, G. M., Smith, L. C., Frey, K. E. & Orlova, L. A. 2003. Peatlands of the Western Siberian lowlands: current knowledge on zonation, carbon content and Late Quaternary history. *Quaternary Science Reviews* 22: 703–723.
- Kuhry, P. 1998. Late Holocene permafrost dynamics in two subarctic peatlands of the Hudson Bay Lowlands (Manitoba, Canada). *Eurasian Soil Science* 31: 529–534.
- Kultti, S., Väiliranta, M., Sarmaja-Korjonen, K., Solovieva, N., Virtanen, T., Kauppila, T. & Eronen, M. 2003. Palaeoecological evidence of changes in vegetation and climate during the Holocene in the pre-Polar Urals, northeast European Russia. *Journal of Quaternary Science* 18: 503–520.
- Kultti, S., Oksanen, P. O. & Väiliranta, M. 2004. Multiproxy record of Holocene environmental change in the Nenets Region, East-European Russian Arctic. *Canadian Journal of Earth Sciences* 41: 1141–1158.
- Luoto, M. & Seppälä, M. 2003. Thermokarst ponds as indicators of the former distribution of palsas in Finnish Lapland. *Permafrost and Periglacial Processes* 14: 19–27.
- MacDonald, G. M., Velichko, A. A., Kremenetski, V., Borisova, O. K., Goleva, A. A., Andreev, A. A., Cwynar, L. C., Riding, R. T., Forman, S. L., Edwards, T. W. D., Aravena, R., Hammarlund, D., Szeicz, J. M., & Gataulin, V. N. 2000. Holocene treeline history and climate change across northern Eurasia. *Quaternary Research* 53: 302–311.
- Matthews, J. A., Dahl, S.-O., Berrisford, M. S. & Nesje, A. 1997. Cyclic development and thermokarstic degradation of palsas in the mid-alpine zone at Leirpullan, Dovrefjell, Southern Norway. *Permafrost and Periglacial Processes* 8: 107–122.
- Oberman, N. G. & Mashitova, G. G. 2001. Permafrost dynamics in the north-east of European Russia at the end of the 20th century. *Norsk Geografisk Tidsskrift – Norwegian Journal of Geography* 55: 241–244.
- Oksanen, P. O. 2005. Development of palsa mires on the northern European continent in relation to Holocene climatic and environmental changes. *Acta Universitatis Ouluensis, Scientiae Rerum Naturalium A* 446: 1–50.
- Oksanen, P. O. 2006. Holocene development of the Vaisjeäggi palsa mire, Finnish Lapland. *Boreas* 35: 81–95.
- Oksanen, P. O., Kuhry, P. & Alekseeva, R. N. 2001. Holocene development of the Rogovaya River peat plateau, East-European Russian arctic. *The Holocene* 11: 25–40.
- Oksanen, P. O., Kuhry, P. & Alekseeva, R. N. 2003.

- Holocene development and permafrost history of the Usinsk mire, northeast European Russia. *Géographie Physique et Quaternaire* 57(2–3): 169–187.
- Paus, A., Svendsen, J. I. & Matiouchkov, A. 2003. Late Weichselian (Valdaian) and Holocene vegetation and environmental history of the northern Timan Ridge, European Arctic Russia. *Quaternary Science Reviews* 22: 2285–2302.
- Pjavitshenko N. I. 1955. Bugristyje torfjaniki. Izdatelstvo Akademii nauk SSSR, Moskva. 279 pp.
- Rosén, P., Segerström, U., Eriksson, L., Renberg, I. & Birks, H. J. B. 2001. Holocene climatic change reconstructed from diatoms, chironomids, pollen and near-infrared spectroscopy at an alpine lake (Sjuodjijaure) in northern Sweden. *The Holocene* 11: 551–562.
- Ruuhijärvi, R. 1960. Über die regionale Einteilung der nordfinnischen Moore. *Annales Botanici Societatis Zoologicae Botanicae Fennicae 'Vanamo'* 31: 1–360.
- Saari, T. P. 2001. Palsasoiden kasvillisuus Utsjoen Pais-tuntureilla. Master's thesis, Department of Geography, University of Helsinki. 112 pp.
- Seppä, H. & Birks, H. J. B. 2001. July mean temperature and annual precipitation trends during the Holocene in the Fennoscandian tree-line area: pollen-based climate reconstruction. *The Holocene* 11: 527–539.
- Seppälä, M. 1988. Palsas and related forms. In: Clark, M. J. (ed). *Advances in periglacial geomorphology*. John Wiley & Sons, Chichester, pp. 247–278.
- Seppälä, M. 1998. New permafrost formed in peat hummocks (pounus), Finnish Lapland. *Permafrost and Periglacial Processes* 9: 367–373.
- Shemesh, A., Rosqvist, G., Rietti-Shati, M., Rubensdotter, L., Bigler, C., Yam, R. & Karlén, W. 2001. Holocene climatic change in Swedish Lapland inferred from an oxygen-isotope record of lacustrine biogenic silica. *The Holocene* 11(4): 447–454.
- Sonesson, M. 1968. Pollen zones at Abisko, Torne Lappmark, Sweden. *Botaniska Notiser* 121: 491–500.
- Sonesson, M. 1970. Studies on mire vegetation in the Torne-träsk area, northern Sweden. IV Some habitat conditions of the poor mires. *Botaniska Notiser* 123: 67–111.
- Sumgin, M. I. 1934. K voprosu o vetshnoj merzlotie v torfjanyh bugrah na Kolskom poluostrove. *Trudy Komis-sii po izutsheniju vetshnoi merzloty* 3: 107–115.
- Väliranta, M. 2005. Plant macrofossil evidence of changes in aquatic and terrestrial environments in north-eastern European Russia and Finnish Lapland since the late Weichselian. University of Helsinki, Publications of the Department of Geology 2: 1–37.
- Väliranta, M., Kaakinen, A. & Kuhry, P. 2003. Holocene climate and landscape evolution East of the Pechora Delta, East-European Russian Arctic. *Quaternary Research* 59: 335–344.
- Vardy, S. R., Warner, B. G. & Aravena, R. 1997. Holocene climate effects on the development of a peatland on the Tuktoyaktuk Peninsula, Northwest Territories. *Quaternary Research* 47: 90–104.
- Vorren, K.-D. 1972. Stratigraphical investigations of a palsa bog in northern Norway. *Astarte* 5(1–2): 39–71.
- Vorren, K.-D. 1979. Vegetational investigations of a palsa bog in Northern Norway. *Naturvitenskap* 5. Universitetet i Tromsø Institutt for museumvirksomhet. 182 pp.
- Vorren, K.-D. & Vorren, B. 1976. The problem of dating a palsa. Two attempts involving pollen diagrams, determination of moss subfossils, and C14-datings. *Astarte* 8: 73–81.
- Zuidhoff, F. S. & Kolstrup, E. 2000. Changes in palsa distribution in relation to climate change in Laivadalen, northern Sweden, especially 1960–1997. *Permafrost and Periglacial Processes* 11: 55–69.
- Zuidhoff, F. S. & Kolstrup, E. 2005. Palsa development and associated vegetation in northern Sweden. *Arctic, Antarctic and Alpine Research* 37: 49–60.

Summary:**Palsa mires in a changing climate**

The article presents an overview of the recent palsa mire studies, conducted by the authors in the Komi Republic, Nenets region (Russia) and Finnish Lapland. The changes in permafrost dynamics were studied using plant macrofossil analysis and radiocarbon dating. Carbon content measurements were carried out to investigate historical carbon accumulation rates. The survey of modern vegetation was performed in order to obtain background data for the interpretations based on paleovegetation analysis.

Although no practical positive indicator species attesting the presence of permafrost were found, we conclude that permafrost dynamics can, nonetheless, often be reliably detected based on historical vegetation changes. Some plant assemblages and vegetation successions prove to be typical for different permafrost landforms and developmental phases in mires. In addition, there are many useful negative permafrost indicator species. The interpretation is, however, often complicated due to similar plant communities growing on permafrost-free habitats and hiatuses in stratigraphy resulting from erosion.

In general, permafrost dynamics fit the scheme of the reconstructed climate events during the Holocene; the formation of palsas has been most active during the coldest stages and the area of permafrost has diminished during the last ca. 150 years. Palsas started to develop at latest about 3000 years ago in mires of northern Russia and 2500 years ago in Fennoscandia. Older permafrost aggradation is, however, probable.

On average the carbon accumulation rates correspond to the values of non-permafrost peatlands in northern areas, but they vary greatly under different hydrological and permafrost conditions: from zero or negative values to as high as $100 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$.

Key words: carbon content, Fennoscandia, Holocene, northern European Russia, palsa, permafrost, plant macrofossils, radiocarbon dating

