

Viimeisten vuosisatojen lämpimien ja kylmien ilmastovaiheiden vaikutus ikiroutasoiden hiilidynamiikkaan ja hydrologisiin muutoksiin

Response of permafrost peatland hydrology and carbon dynamics to warm and cold climate phases during the last centuries

Minna Väiliranta, Sanna Piilo & Hui Zhang

Minna Väiliranta & Sanna Piilo, Environmental Change Research Unit (ECRU), Ekosysteemit ja ympäristö tutkimusohjelma sekä Helsinki Institute of Sustainability Science (HELSUS), email: minna.valiranta@helsinki.fi
Hui Zhang, Institute for Atmospheric and Earth System Research (INAR), Fysiikan laitos, Helsingin yliopisto.

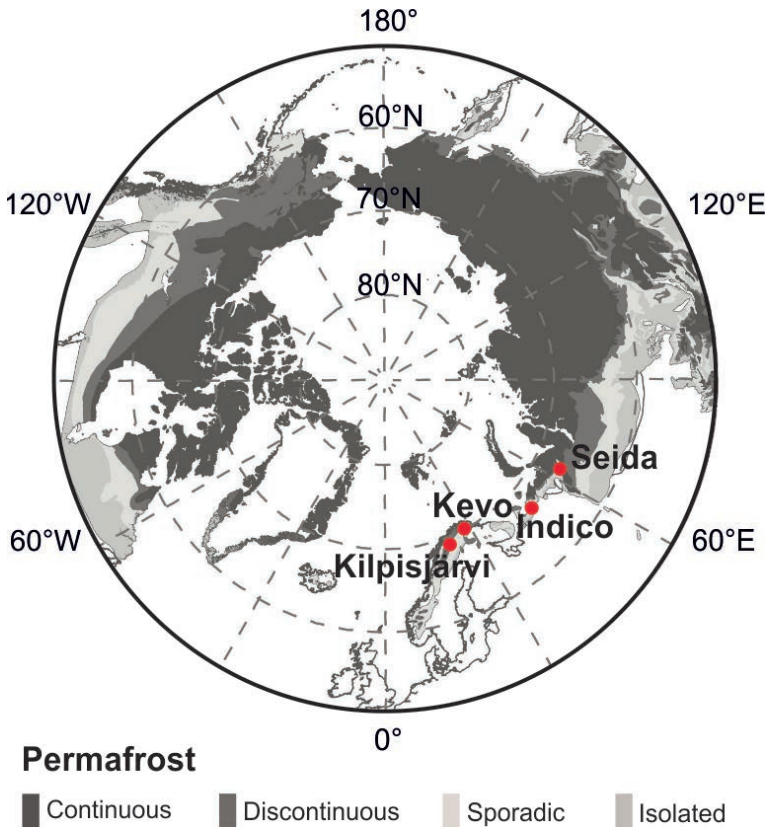
Avainsanat: hiilen kertyminen, ilmastonmuutos, hydrologiset muutokset, ikiroutasuot, kasvimakrofossiilit, kuoriamebat

Keywords: carbon accumulation, climate change, hydrological changes, permafrost peatlands, plant macrofossils, testate amoeba

Johdanto

Ikiroutaa esiintyy alueilla, joilla lämpötila pysyttelee alle 0 °C yli kaksi vuotta (Osterkamp 2001). Maailmanlaajuisesti pohjoiset ikirouta-alueet käsittävät noin 16 % maapinta-alasta ja tästä noin 19 % on soiden peitossa. Eniten ikiroutaa on Venäjällä, Siperiassa, sekä arktisessa Kanadassa (Tarnocai ym. 2009). Ikiroutaa on syntynyt kylmien ilmastovaiheiden aikana, kuten esimerkiksi myöhäisholoseeniin liittyvän viilenemisen (nk. neo glacial cooling) eli viimeisen noin 3000 vuoden aikana sekä pienen jääkauden (~ 1500–1850 AD) aikana (Oksanen & Väiliranta 2006, Treat & Jones 2018). 1980-luvulta alkaneen lämpenemisen seurauksena ikirouta-alueilla vuosittain sulava aktiivikerros on nykyään paksumpi ja ikiroudan lämpötila on noussut; esimerkiksi Venäjällä ikirouta on alkanut sulaa (Vaughan ym. 2013). Arktisen ikirouta-alueen sitoman hiilen määrä

on noin kaksinkertainen verrattuna ilmakehän hiilivarastoon (Houghton 2007), sillä hiilivaraston on arvioitu olevan noin 1 035±150 Pg (Hugelius ym. 2014). Tästä määrästä noin 280 Pg on sitoutuneena ikiroutasoihin (Tarnocai ym. 2009). Näin ollen ikiroutasoilla on tärkeä merkitys globaalissa biogeokemiallisessa kierrossa (Gorham 1991, Frohling & Roulet 2007, McGuire ym. 2009). Arktinen alue on viimeisen 30 vuoden aikana lämmennyt 0,6 °C kymmentä vuotta kohti; lämpeneminen on kaksi kertaa nopeampaa kuin muualla maapallolla (Stocker ym. 2013). Mittaukset osoittavat, että myös maanpinnan lämpötilat ovat ikirouta-alueella nousseet viimeisen 20–30 vuoden aikana (Johansson ym. 2011, Sannel ym. 2016). Arktisen alueen pitkäaikainen hiilen varasto on vaarassa, sillä ikiroudan sulaminen paljastaa aikojen saatossa kertyneen turpeen hajotusprosesseille. Lisäksi sulamisen aiheuttamat hydrologiset muutokset sekä lämpenemisen



Kuva 1. Tutkimuskoh-
teiden sijainti Euroopan
puoleisella Venäjällä sekä
Suomen Lapissa.

*Fig 1. Study sites in Euro-
pean Russia and Finnish
Lapland.*

aiheuttama fotosynteesin kiihtyminen vaikuttavat pohjoisten soiden hiilidynamiikkaan (Shaver ym. 2006). Kasvukauden pidentyminen lisää kasvillisuuden määrää ja lämpeneminen yhdistettynä kasvaneeseen ilmakehän hiilidioksidipitoisuuteen kiihdyttää fotosynteesiä; tämä tehostaa hiilinielua ja lisää hiilen kertymistä (Gallego-Sala ym. 2018). Ilmaston lämpenemisen aiheuttama mahdollinen kuivuminen taas voi johtaa hiilen vapautumiseen turpeesta hajotusprosessin kiihtymisen seurauksena (Swindles ym. 2019). Soiden pintaosien kuivuminen voi altistaa ne palamiselle, jonka seurauksena (vanhaa) hiiltä voi vapautua suuriakin määriä ilmakehään hyvin lyhyessä ajassa (Gorham 1991). Erilaisten prosessien yhteen kytkeytyminen vaikeuttaa tulevaisuuden ennusteiden tekemistä (Frolking ym. 2011, Swindles ym. 2015a). Näihin teemoihin perehdyttiin tutkimalla 14 ikiroutasoista kairattua turvesarjaa (kuva 1). Tämä kirjoitus esittelee yhteenveton Hui Zhang:n väitöskirjan synteisistä ja julkaisuista, joihin

se perustui (Zhang ym. 2017, 2018a, b, Zhang 2018). Tutkimuksen hypoteesit olivat: 1) lämmin ilmastovaihe aiheuttaa ikiroudan sulamista ja johtaa kostean habitaatin syntymiseen, 2) kylmä ilmasto laukaisee prosessin, jossa turpeen sisään kertyy jäätä, jolloin muodostuu turvekumpuja, joiden pinnalla vallitsevat kuivat olosuhteet, 3) hiilen kertymisessä tapahtuvat muutokset seuraavat ilmastossa tapahtuneita muutoksia; lämmin jakso kiihdyttää turpeen kertymistä ja viileä vähentää sitä.

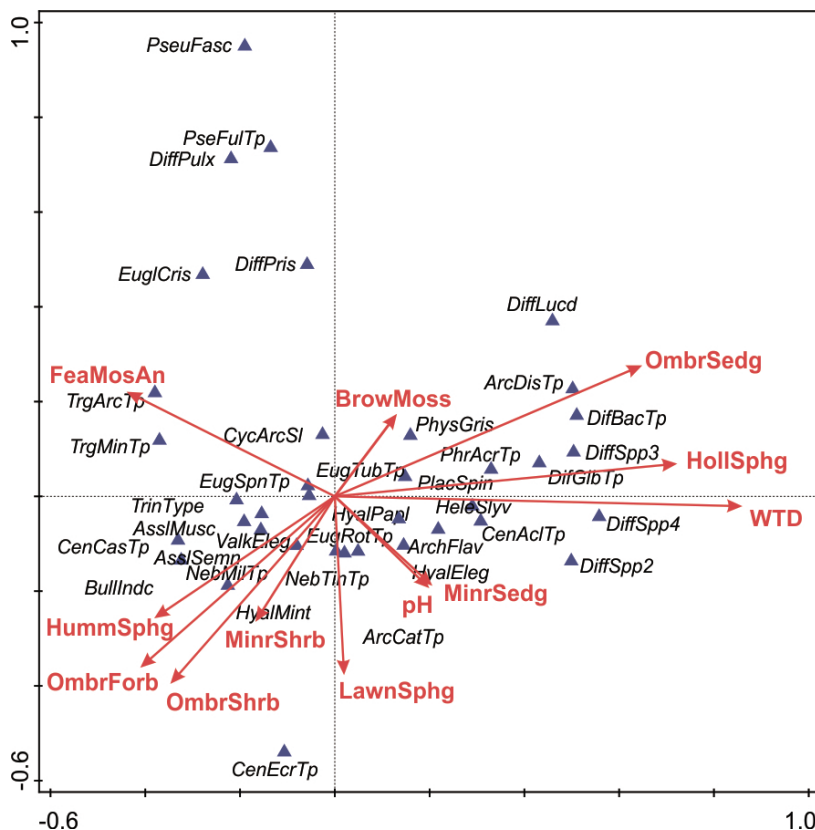
Tutkimusalueet ja menetelmät

Tutkimusalueet

Tutkimusalueet sijaisivat Euroopan puoleisella Venäjällä sekä Suomen Lapissa. Turvesarjat ajoitettiin ^{14}C - sekä ^{210}Pb - menetelmillä ja turpeesta tutkittiin kuoriameba-yhteisöt, kasvillisuuskoos-

Kuva 2. Kuoriamebayhteisöjen vaste ympäristömuuttujiin uudessa pintaturveaineistossa CCA monimuuttajamallin ilmentämänä. Lyhenteet viittaavat funktionaalisiin kasviyhteisöihin.

Fig. 2. CCA ordination showing the response of sub-arctic testate amoeba taxa to environmental variables in a newly established modern training set. Abbreviations indicate plant functional types.

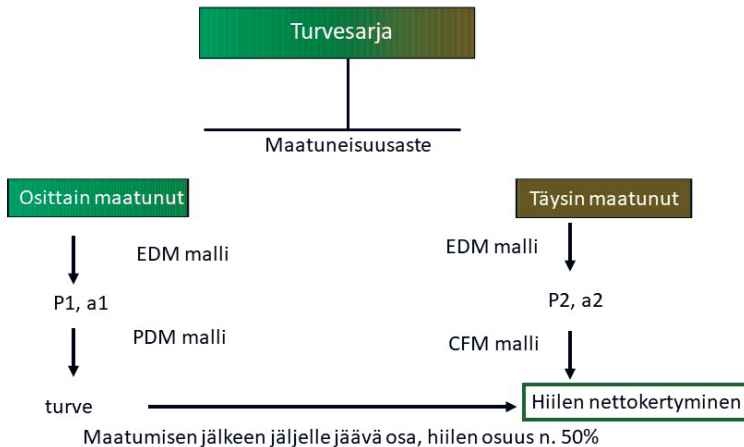


tumus sekä turpeen ominaisuudet. Näiden ”projektiön” avulla rekonstruointiin, miten suot ovat menneinä aikoina reagoineet ilmastossa tapahtuneisiin muutoksiin. Erityisenä tarkastelun kohteena olivat keskiajan lämpökausi, n. 1000–1300 AD, pieni jääkausi n. 1500–1850 AD (Cook ym. 2004) sekä viimeaikainen ihmisen aiheuttama lämpeneminen n. 1980 luvulta lähtien.

Kuoriameba-analyysi

Muutoksia suovedenpinnan tasossa rekonstruointiin kuoriamebojen avulla. Kuoriamebat ovat mikroskooppisen pieniä eliöitä, jotka elävät sammalien pinnalla. Kuoriamebat ovat perinteinen menetelmä, jolla suovedenpinnan tasossa tapahtuvia muutoksia voidaan rekonstruoida (Booth & Jackson 2003, Charman ym. 2006, Swindles ym. 2015a.). Suomalainen tutkija Kimmo Tolonen oli aikoinaan kansainvälisestikin ottaen pioneeri kuoriamebataksonomian ja niihin perustuvien tut-

kimusmenetelmien kehittämisessä (Tolonen ym. 1992). Siirtofunktiomenetelmällä tehtävät paleoekologiset rekonstruktioit perustuvat tietämykseen lajien nykyisestä ekologiasta (Amesbury ym. 2012, 2016). Koska arktisilta alueilta ei tällaista tietoa juurikaan ollut saatavilla, tätä tutkimusta varten koottiin oma nykyisiä olosuhteita kuvaava vertailuaineisto. Kuoriamebalajiston koostumusta ja esiintymistä verrattiin kerättyihin ympäristömuuttujiin, kuten kasvillisuuskoostumukseen ja vedenpinnantasoon. Kuoriamebalajiston vastetta ympäristömuuttujien analysoitiin CCA-muuttujamenetelmän avulla (kuva 2). Aineistoa varten kerättiin tutkimussoilta 145 näytettä, jotka edustivat erilaisia suohabitaatteja kosteasta kivaan (kuva). Siirtofunktiomenetelmän tuottamat vedenpintarekonstruktioarvot (cm) (ter Braak & Šmilauer 2012, Juggins 2015) muutettiin nk. Z score -arvoiksi, jotka ilmentävät muutoksen suuntaa, eivät niinkään absoluuttista muutosta vedenpinnan tasossa (Swindles ym. 2015b).



Kuva 3. Turvesarjojen hiilenkertymisen laskemiseen sovellettujen mallien esittely. Eri ikäisiin ja eri maatuneisuusasteisiin sovellettiin erilaisia malleja ja parametrejä. Mallien selitykset: EDM= turpeen eksponentiaalinen hajoaminen, PDM= turpeen hajoaminen, CFM= hiilifluksien rekonstruktio malli, P=turpeen kertyminen, a=turpeen hajoamisen vakiokerroin. Turpeen hiilipitoisuudeksi asetettiin 50%. Mallien yhdistäminen tuotti arvon hiilen nettokertymästä.

Fig. 3. Decomposition models used in this study. On the left, the models applied for only partially decomposed upper part of the peat section and on the right the models for fully decomposed deep peat. Model abbreviations: EDM= exponential decay model, PDM= peat decay model, CFM= carbon flux reconstruction model. p =peat addition rate and a =peat decay coefficient. In the model peat carbon content for is assumed 50%. When combined the two models yield a net carbon uptake value.

Kasvimakrofossiilianalyysi

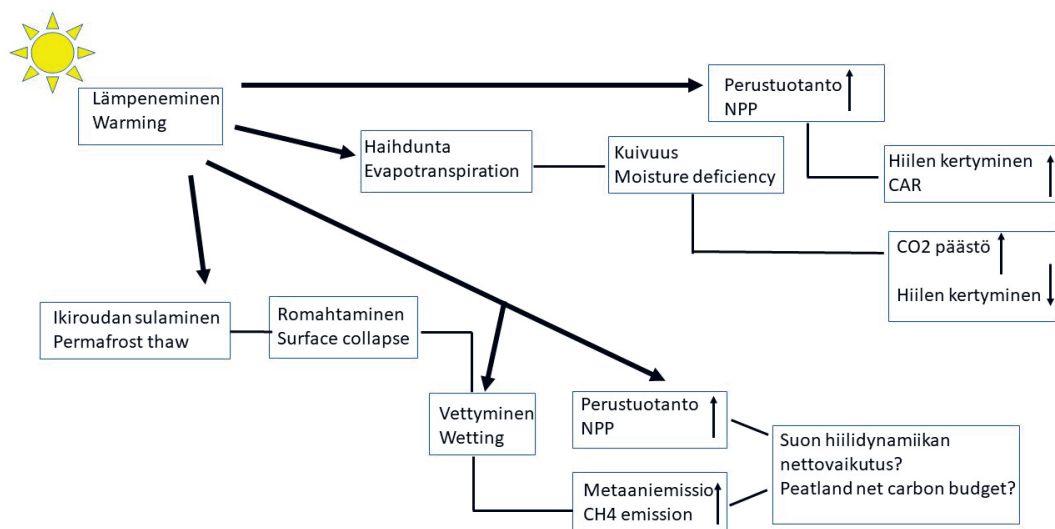
Kuoriameba-aineistojen tueksi turvenäytteistä analysoitiin kasvilajikoostumus, joka myös kuvaa paikalla vallinneita kosteusolosuhteita. Nämä menetelmät täydentävät hyvin toisiaan (Väiliranta ym. 2012). Soiden kosteusolosuhteet ja kosteusolosuhteisiin liittyvä ravinteisuusasto pitkälti määrittävät suon hiilidynamiikan. Yleistäen voidaan sanoa, että märiltä aapasuotyypisiltä saravaltaisilta soilta pääsee ilmakehään paljon ilmakehää lämmittävää metaania ja ne kerryttävät hiiltä hitaasti. Keidassuot taas varastoivat ja kerryttävät hiiltä tehokkaasti ja metaanipäästöt ovat pienet (Leppälä ym. 2011, Laine ym. 2012). Ikiroutasoilta löytyy näitä molempia habitaattityyppejä (Voigt ym. 2017, Wilson ym. 2017). Ikiroutaa sisältävillä kuivilla turvekummuilla, jotka vastaavat keidassoiden kermien ombrotrofisia olosuhteita, kasvaa muun muassa variksenmarjaa ja jäkälää, kun taas niiden väliset kosteat painanteet vastaavat aapasuo-tyyppiä ja siellä valtalajeina ovat sarat ja rahkasammalista esimerkiksi aaparahkasammal (Seppälä 2006).

Hiilenkertymäanalyysi

Turpeeseen kertyneen hiilen määrässä tapahtuneita muutoksia tutkittiin analysoimalla turvenäytteistä turpeen tiheys ja hiilen määrä (Tolonen & Turunen 1996.) Erilaisten turve- ja ympäristökijöiden, kuten typen (N), hiilen ja typen suhteen (C/N), vedenpinnan tason, kasvilajikoostumuksen ja kesälämpötilan vaikutusta hiilenkertymiseen tutkittiin erilaisten turpeen kertymistä ja maatumista kuvaavien mallien avulla (Clymo 1984, Frolking ym. 2001, Yu 2011, Wilson ym. 2016) (kuva 3).

Tulokset ja tulosten tarkastelu

Tutkimuksessa saatiin selville, että keskiajan lämpöjakson aikana sekä viimeaikaisen lämpenemisen johdosta ikiroudan sulaminen on aiheuttanut suovedenpinnan nousua eli olosuhteet muuttuivat ainakin hetkellisesti kosteiksi. Ajan kuluessa kiihtynyt haihdunta kuitenkin johti kuivumiseen. Vastaavasti tutkittujen soiden pinnat olivat pienen jääkauden aikana pääsääntöisesti kuivia. Tämä



Kuva 4. Kaavakuva mahdollisista ikiroutasoiden vasteista muuttuviin olosuhteisiin tulevaisuudessa, kun ilmasto lämpenee. Kuva keskittyy erityisesti hiilidynamiikassa ja hydrologiassa tapahtuviin muutoksiin. Ylöspäin osoittavat nuolet tarkoittavat kiihtyvää tai lisääntyvää vastetta ja alaspäiset nuolet vähenevää vastetta.

Fig. 4. Schematic overview of alternative permafrost peatland pathways as a response to climate warming. Warming may lead to surface drying or wetting via thawing. Change in habitat hydrology affects peatland carbon dynamics and carbon accumulation potential. Decreasing scenario is indicated by downward arrow. Warming may increase net primary productivity, thus increasing carbon accumulation (upward arrows).

johtui luultavasti siitä, että ikiroudan muodostuminen nosti turvepintoja ylöspäin, jolloin ne kuivuivat (Seppälä 1989). Pienen jääkauden aikana esiintyi kuitenkin myös väliaikaisesti kosteita vaiheita, joiden voidaan ajatella liittyvän siihen, että kylmässä ilmassa haihdunta vähenee.

Tutkitut suot ovat kautta historiansa toimineet hiilen nieluina. Keskimääräinen hiilen kertymä tutkituilla kohteilla vaihteli kuitenkin suuresti, 10,80–32,40 g C m⁻² v⁻¹ (taulukko 1). Matemaattinen tarkastelu (kuva 3) kuitenkin viittasi siihen, että hiilen kertyminen ei suoraan reagoi lämpötilaan – hiilen kertyminen lämpimän vaiheen aikana ei johdonmukaisesti kiihtynyt. Johtopäätös on, että mikään yksittäinen ympäristötekijä ei selittänyt tutkittujen ikiroutasoiden hiilen kertymisessä tapahtuneita muutoksia. Joissain kohteissa hiilen kertyminen kiihtyi pienen jääkauden jälkeisen lämpenemisen seurauksena, toisaalla taas kertyminen jopa hidastui. Nämä toisistaan poikkeavat vasteet ilmastoon osoittavat, että myös tulevaisuudessa soiden vasteet voivat edetä toisistaan poikkeavin reitein (kuva 4). Tutkimus osoitti,

Taulukko 1. Esimerkkejä hiilen kertymäärävoista (Apparent carbon accumulation rates, ACAR) (g C m⁻² v⁻¹) viimeisen noin tuhannen vuoden keskiarvona (1 ka) sekä keskiarvona 1950-luvun jälkeen, jotka osoittavat kuinka suuria eroja ACAR-arvoissa esiintyi. Vertailun vuoksi taulukossa on myös vastaava viimeaikainen 1950-luvun jälkeinen ACAR-arvo Itä-Kanadasta Kuujjuarapikistä. Siellä turpeen kertyminen on ollut hyvin nopeaa ja näytesarjan pohjaikä (31 cm) ajoittui n. 1900 AD ja näin ollen viimeiseltä tuhannelta vuodelta ei ole hiilen kertymisarvoja (Piilo ym. 2019).

Table 1. Example values for apparent carbon accumulation rates (ACAR), g C m⁻² y⁻¹, measured in this study. The left column is indicating ACAR during the last millennium and the right column after AD 1950. The values demonstrate the large spatial and temporal variation. For comparison, we present one value from eastern north Canada (Piilo et al. 2019). There the recent peat accumulation rate has been very high; thus, the 1 ka value is not available.

Tutkimus- alue	Viimeiset tuhat vuotta (1 ka) ACAR	Viimeaikainen (1950- luvun jälkeen) ACAR
Seida	2.92	4.76
Kevo	36.95	72.35
Kuujjuarapik	NA	149.1

miten haastavaa on soiden ilmastovasteiden ja niihin liittyvien hiilidynamiikan muutosten ja niistä seuraavien takaisinkytkentöjen liittäminen osaksi ennustemalleja.

Kirjallisuus

- Amesbury, M. J., Mallon, G., Charman, D.J., Hughes, P.D.M., Booth, R.K., Daley, T.J. & Garneau, M. 2012. Statistical testing of a new testate amoeba-based transfer function for water-table depth reconstruction on ombrotrophic peatlands in north-eastern Canada and Maine, United States. *Journal of Quaternary Science* 28: 27–39.
- Amesbury, M. J., Swindles, G.T., Bobrov, A., Charman, D.J., Holden, J., Lamentowicz, M., Mallon, G., Mazei, Y., Mitchell, E.A.D., Payne, R. J., Roland, T.P., Turner, R. E. & Warner, B. G. 2016. Development of a new pan-European testate amoeba transfer function for reconstructing peatland palaeohydrology. *Quaternary Science Reviews* 152: 132–151: doi: 10.1016/j.quascirev.2016.09.024.
- Booth, R. K. & Jackson, S. T. 2003. A high-resolution record of late-Holocene moisture variability from a Michigan raised bog, USA. *Holocene* 13: 863–876.
- Charman, D.J., Blundell, A., Chiverrell, R.C., Hendon, D. & Langdon, P.G. 2006. Compilation of non-annually resolved Holocene proxy climate records: stacked Holocene peatland palaeo-water table reconstructions from northern Britain. *Quaternary Science Reviews* 25: 336–350.
- Clymo, R. S. 1984. The limits to peat bog growth. *Philosophical Transactions of the Royal Society B* 303: 605–654.
- Cook, E. R., Esper, J. & D'Arrigo, R. D. 2004. Extra-tropical Northern Hemisphere land temperature variability over the past 1000 years. *Quaternary Science Reviews* 23: 2063–2074.
- Frolking, S., Roulet, N.T., Moore, T.R., Richard, P.J.H., Lavoie, M. & Muller, S.D. 2001. Modeling northern peatland decomposition and peat accumulation. *Ecosystems* 4: 479–498.
- Frolking, S. & Roulet, N. T. 2007. Holocene radiative forcing impact of northern peatland carbon accumulation and methane emissions. *Global Change Biology* 13: 1079–1088.
- Frolking, S., Talbot, J., Jones, M.C., Treat, C.C., Kauffman, J.B., Tuittila, E-S. & Roulet, N. 2011. Peatlands in the Earth's 21st century climate system. *Environmental Reviews* 19: 371–396.
- Gallego-Sala, A.V., Charman, D.J., Brewer, S., Page, S.E., Prentice, I.C., Friedlingstein, P., Moreton, S., Amesbury, M.J., Beilman, D.W., Björck, S., Blyakharchuk, T., Bochicchio, C., Booth, R.K., Bunbury, J., Camill, P., Carless, D., Chimner, R.A., Clifford, M., Cressey, E., Courtney-Mustaphi, C., Vleeschouwer, F.D., de Jong, R., Fialkiewicz-Kozziel, B., Finkelstein, S.A., Garneau, M., Githumbi, E., Hribljan, J., Holmquist, J., Hughes, P.D.M., Jones, C., Jones, M.C., Karofeld, E., Klein, E.S., Kokfelt, U., Korhola, A., Lacourse, T., Roux, G.L., Lamentowicz, M., Large, D., Lavoie, M., Loisel, J., Mackay, H., MacDonald, G.M., Makila, M., Magnan, G., Marchant, R., Marcisz, K., Cortizas, A.M., Massa, C., Mathijssen, P., Mauquoy, D., Mighall, T., Mitchell, F.J.G., Moss, P., Nichols, J., Oksanen, P.O., Orme, L., Packalen, M.S., Robinson, S., Roland, T.P., Sanderson, N.K., Sannel, A.B.K., Silva-Sánchez, N., Steinberg, N., Swindles, G.T., Turner, T.E., Uglow, J., Väliranta, M., van Bellen, S., van der Linden, M., van Geel, B., Wang, G., Yu, Z., Zaragoza-Castells, J. & Zhao, Y. 2018. Latitudinal limits to the predicted increase of the peatland carbon sink with warming. *Nature Climate Change* 8: 907–913.
- Gorham, E. 1991. Northern peatlands: Role in the carbon cycle and probable responses to climate warming. *Ecological Applications* 1: 182–195.
- Houghton, R. A. 2007. Balancing the global carbon budget. *The Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 35: 313–347.
- Hugelius, G., Strauss, J., Zubrzycki, S., Harden, J.W., Schuur, E.A.G., Ping, C-L., Schirmermeister, L., Grosse, G., Michaelson, G.J., Koven, C.D., O'Donnell, J.A., Elberling, B., Mishra, U., Camill, P., Yu, Z., Palmtag, J. & Kuhry, P. 2014. Estimated stocks of circumpolar permafrost carbon with quantified uncertainty ranges and identified data gaps. *Biogeosciences* 11: 6573–6593.

- Johansson, M., Kerman, J.A., Keuper, F., Christensen, T.R., Lantuit, H. & Callaghan, T.V. 2011 Past and present permafrost temperatures in the Abisko area: Redrilling of boreholes. *Ambio* 40: 558–565.
- Juggins, S. 2015. Rioja: Analysis of Quaternary Science Data, R package version (0.9-5). (<http://cran.r-project.org/package=rioja>).
- Laine, A.M., Bubier, J., Riutta, T., Nilsson, M.B., Moore, T.R., Vasander, H. & Tuittila, E-S. 2012. Abundance and composition of plant biomass as potential controls for mire net ecosystem CO₂ exchange. *Botany-Botanique* 90: 63–74.
- Leppälä, M., Oksanen, J. & Tuittila, E-S. 2011. Methane flux dynamics during mire succession. *Oecologia* 165: 489–499.
- McGuire, A. D., Anderson, L.G., Christensen, T.R., Dallimore, S., Guo, L., Hayes, D.J., Heimann M., Lorenson, T.D., Macdonald, R.W. & Roulet, N. 2009. Sensitivity of the carbon cycle in the Arctic to climate change. *Ecology Monographs* 79: 523–555.
- Oksanen, P. O. & Väliiranta, M. 2006. Palsasuot muuttuvassa ympäristössä (Summary: Palsa mires in a changing climate). *Suo, Mires and peat* 57(2): 33–43.
- Osterkamp, T. E. 2001: Sub-sea Permafrost. In: Steele, J. H., Thorpe, S. A. & Turekian, K. K. (ed.) *Encyclopedia of Ocean Sciences*, Elsevier: 2902–2912.
- Piilo, S.R., Zhang, H., Garneau, M., Gallego-Sala, A., Amesbury, M.J. & Väliiranta, M. 2019. Recent peat and carbon accumulation following the Little Ice Age in northwestern Québec, Canada. *Environmental Research Letters* 14: 075002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab11ec>.
- Sannel, A. B. K. ym. 2016. Permafrost warming in a subarctic peatland-which meteorological controls are most important? *Permafrost Periglacial Process* 27: 177–188.
- Seppälä, M. 1989. The origin of Palsas. *Geografiska Annaler, Series A, Physical Geography* 68(3): 141–147.
- Seppälä, M. 2006. Palsa mires in Finland. *The Finnish Environment* 23: 155–162.
- Shaver, G.R., Giblin, A.E., Nadelhoffer, K.J., Thieler, K.K., Downs, M.R., Laundre, J.A. & Rastetter, E.B. 2006. Carbon turnover in Alaskan tundra soils: effects of organic matter quality, temperature, moisture and fertilizer. *Journal of Ecology* 94: 740–753.
- Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V. & Midgley, P.M. 2013. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Swindles, G. T., Morris, P.J., Mullan, D., Watson, E.J., Turner, T.E., Roland, T.P., Amesbury, M.J., Kokfelt, U., Schoning, K., Pratte, S., Gallego-Sala, A., Charman, D.J., Sanderson, N., Garneau, M., Carrivick, J.L., Woulds, C., Holden, J., Parry, L. & Galloway, J.M. 2015a. The long-term fate of permafrost peatlands under rapid climate warming. *Scientific Reports* 5: doi: 10.1038/srep17951.
- Swindles, G. T., Holden, J., Raby, C. L., Turner, T.E., Blundell, A., Charman, D.J., Menberu, M.W. & Kløve, B. 2015b. Testing peatland water-table depth transfer functions using high-resolution hydrological monitoring data. *Quaternary Science Reviews* 120: 107–117.
- Swindles, G.T., Morris, P.J., Mullan, D.J., Payne, R.J., Roland, T.P., Amesbury, M.J., Lamentowicz, M., Turner, T.E., Gallego-Sala, A., Sim, T., Barr, I.D., Blaauw, M., Blundell, A., Chambers, F.M., Charman, D.J., Feurdean, A., Galloway, J.M., Gałka, M., Green, S.M., Kajukalo, K., Karofeld, E., Korhola, A., Lamentowicz, L., Langdon, P., Marcisz, K., Mauquoy, D., Mazei, Y., McKeown, M.M., Mitchell, E.A.D., Novenko, E., Plunkett, G., Roe, H.M., Schoning, K., Sillasoo, Ü., Tsyganov, A.N., van der Linden, M., Väliiranta, M. & Warner, B. 2019. Widespread drying of European peatlands in recent centuries. *Nature Geoscience* 12: 922–928.
- Tarnocai, C., Canadell, J.G., Schuur, E.A.G., Kuhry, P., Mazhitova, G. & Zimov, S. 2009. Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region. *Global Biogeochemical Cycles* 23: GB2023. doi:10.1029/2008GB003327.

- ter Braak, C. J. F. & Šmilauer, P. 2012. CANOCO Reference Manual and User's Guide: Software for Ordination. Version 5. Microcomputer Power Ithaca, New York.
- Tolonen, K., Warner, B. G. & Vasander, H. 1992. Ecology of testaceans (Protozoa: Rhizopoda) in mires in southern Finland: I. Autecology. *Archiv Fur Protistenkunde* 142: 119–138.
- Tolonen, K. & Turunen, J. 1996. Accumulation rates of carbon in mires in Finland and implications for climate change. *Holocene* 6: 171–178.
- Treat, C. C. & Jones, M. C. 2018. Near-surface permafrost aggradation in Northern Hemisphere peatlands shows regional and global trends during the past 6000 years. *Holocene*: doi: 10.1177/0959683617752858.
- Vaughan, D. G., J. C. Comiso, I. Allison, J. Carrasco, G. Kaser, R. Kwok, ... T. Zhang (2013). Observations: Cryosphere. *Teoksessa Stocker, T. F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex & P. M. Midgley (toim.). Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change.* Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Voigt, C. ym. 2017. Warming of subarctic tundra increase emissions of all three important greenhouse gases – carbon dioxide, methane, and nitrous oxide. *Global Change Biology* 23: 3121–3138.
- Väliranta, M., Blundell, A., Charman, D.J., Karofeld, E., Korhola, A., Sillasoo, Ü. & Tuittila, E-S. 2012. Reconstructing peatland water tables using transfer functions for plant macrofossils and testate amoebae: A methodological comparison. *Quaternary International* 268: 34–43.
- Wilson, R., Anchukaitis, K., Briffa, K.R., Büntgen, U., Cook, E., D'Arrigo, R., Davi, N., Esper, J., Frank, D., Gunnarson, B., Hegerl, G., Helama, S., Klesse, S., Krusic, P.J., Linderholm, H.W., Myglan, V., Osborn, T.J., Rydval, M., Schneider, L., Schurer, A., Wiles, G., Zhang, P. & Zorita, E. 2016. Last millennium northern hemisphere summer temperatures from tree rings: Part I: The long-term context. *Quaternary Science Reviews* 134: 1–18.
- Wilson, R. M., Fitzhugh, L., Whiting, G.J., Frolking, S., Harrison, M.D., Burnett, W.C. & Chanton, J.P. 2017. Greenhouse gas balance over thaw-freeze cycles in discontinuous zone permafrost. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 122: 387–404.
- Yu, Z. C. 2011. Holocene carbon flux histories of the world's peatlands: Global carbon-cycle implications. *Holocene* 21: 761–774.
- Zhang, H., Amesbury, M.J., Ronkainen, T., Charman, D.J., Gallego-Sala, A.V. & Väliranta, M.M. 2017. Testate amoeba as palaeohydrological indicators in the permafrost peatlands of Northeast European Russia and Finnish Lapland. *Journal of Quaternary Science*, DOI 10.1002/jqs.2970
- Zhang, H. Responses of Arctic permafrost peatlands to climate changes over the past millennia. PhD thesis, <http://urn.fi/URN:ISBN:978-951-51-4457-7>
- Zhang, H., Piilo, S.R., Amesbury, M.J., Charman, D.J., Gallego-Sala, A.V. & Väliranta, M.M. 2018a. The role of climate change in regulating Arctic permafrost peatland hydrological and vegetation change over the last millennium, *Quaternary Science Reviews* 182: 121–130.
- Zhang, H., Gallego-Sala, A.V., Amesbury, M.J., Charman, D.J., Piilo, S.R. & Väliranta, M.M. 2018b. Inconsistent response of Arctic permafrost peatland carbon accumulation to warm climate phases. *Global Biogeochemical Cycles*, doi.org/10.1029/2018GB005980

Summary: Response of permafrost peatland hydrology and carbon dynamics to warm and cold climate phases during the last centuries

Circumpolar permafrost peatlands store ~300 Pg of organic carbon (C), and play a critical role in global biogeochemical cycles. Amplified warming in high-latitude regions is threatening this large C stock, because permafrost thawing will expose previously frozen C to decomposition. Permafrost thaw leads to hydrological changes and warming will influence plant photosynthesis and decomposition processes and thus C accumulation patterns. However, it is still unresolved how C accumulation, warming and associated hydrological changes are interlinked. In this study, 14 peat sections from four sites in northeast European Russia and Finnish Lapland were studied to reconstruct permafrost peatland vegetation, hydrology and C dynamics. At first, in order to reconstruct changes in peatland water-table depth (WTD), a new modern testate amoeba-WTD training set was established. Plant macrofossil data provided supportive data. Peat property data, bulk density and C content, together with robust chronologies enabled carbon dynamics modelling. Results suggested that warm climate phases (Medieval Climate Anomaly: MCA, and warming since 1850 AD) caused permafrost thawing and temporarily wet conditions, while surfaces later desiccated due to accelerated evapotranspiration. In turn, during the cool climate phase, Little Ice Age (LIA), the peat surfaces mainly remained dry due to surface uplift causing desiccation. The studied peatlands have been persistent C sinks during mid- to late-Holocene with an average accumulation rate of 10.80–32.40 g C m⁻² yr⁻¹. However, the values indicate large temporal and spatial variation. Moreover, the apparent C accumulation rate (ACAR) analyses suggested inconsistent response to warming. Overall, the data suggested that there are alternative response directions to warming in the future from increased C uptake to an overall decrease in the C sequestration ability.