



## Trooppisten kosteikkosedimenttien

hiilen

## varastot vaarassa

## ILMASTONMUUTOKSEN JOHDOSTA?

MINNA VÄLIRANTA, SAKONVAN CHAWCHAI, ANGELA GALLEGOSALA, STEVE FROLKING, SANNA PIILO ja BARBARA WOHLFARTH

**T**roopiikissa sijaitsevat kosteikot ja matalat järvet kerrostavat sedimenttejä, joiden orgaaninen pitoisuus voi olla hyvinkin korkea. Näiden kerros-

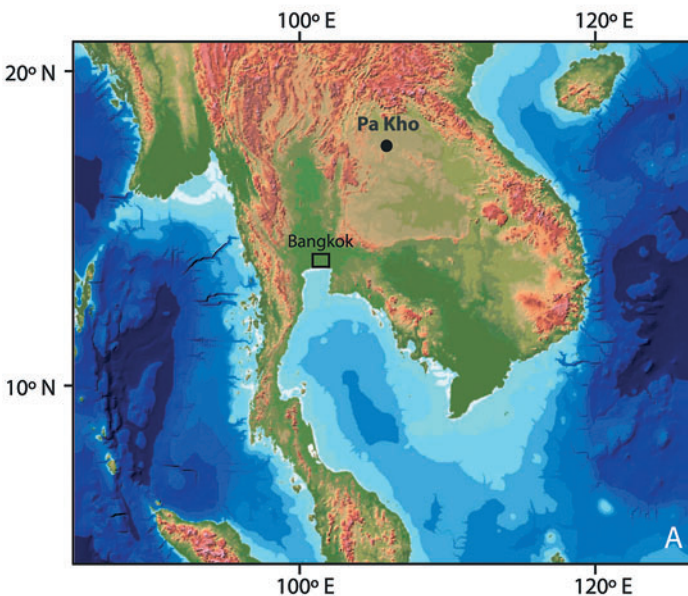
tumisympäristöjen hiilen kiertoa, varastoitumista ja päästöjä on tutkittu huomattavasti vähemmän kuin varsinaisia trooppisia soita. Nämä systeemit ovat erittäin herkkiä kosteustasapainossa tapahtuville muutoksille, jotka

usein johtuvat muutoksista monsuunisateiden reiteissä tai intensiteetissä (Gopal 2013, Singh 2016). Tulevaisuuden ennusteet monsuunidynamiikan osalta ovat epävarmoja (Hoegh-Guldberg 2018). Monet skenaariot ennustavat sateisuuden osalta laajoja alueellisia eroja, mutta esimerkiksi Kaakkois-Aasian arvellaan tulevaisuudessa kärsivän entistä useammin äärevistä sääilmiöistä (Ge *et al.* 2019). Trooppiset kosteikot ovat merkittäviä hiilidioksidin ja metaanin päästölähteitä, joskin päästömitauksia on vain vähän saatavilla (Jauhiainen *et al.* 2005, Raymond *et al.* 2013, Sjögersten *et al.* 2014, Borges *et al.* 2015, Gallego-Sala *et al.* 2019). Näihin kerrostumisympäristöihin kertyneet pitkäaikaiset hiilen varastot voivat olla vaarassa, kun ilmasto muuttuu. Lisäksi esimerkiksi Aasiassa kosteikkoja on aikojen saatossa voimakkaasti hyödynnetty (Wohlfarth *et al.* 2016) ja tämän takia ne ovat erityisen herkkiä muuttuville ilmasto-olosuhteille.

Thaimaan koillisosassa sijaitsevaan Pa Kho-järveen on vuosituhansien aikana kerrostunut hyvin orgaanisia sedimenttejä (kuva 1). Tämä on yksi Thaimaassa sijaitsevista järvis-

tä, joita kansainvälinen tutkijayhteisö on tutkinut jo useita vuosia (Wohlfarth *et al.* 2012, Chawchai *et al.* 2015, Chawchai *et al.* 2016a,b, Yamoah *et al.* 2016a). Järvien pohjasedimenttien ja niistä löytyneiden proxy-aineistojen avulla on rekonstruoitu ensisijaisesti alueen ilmastoa. Näissä tutkimuksissa järvisedimenttejä ei kuitenkaan ole tutkittu hiilidynamiikan näkökulmasta lainkaan, vaikka niihin kaikkiiin on kerrostunut hyvin orgaanisia sedimenttejä. Thaimaan järvien sedimenttien orgaanisen aineksen pitoisuudet ovat ajoittain erittäin korkeita, > 90 prosenttia, jolloin materiaali muistuttaa jo turvetta. Tässä retrospektiivisessä katsauksessa esitellään yhden järven kerrostumishistoria hiilidynamiikan näkökulmasta ja pohditaan trooppisten kosteikkojen mahdollista merkitystä ilmastomuutostutkimuksessa ja mahdollisena huomionarvoisena lisäelementtinä.

Kaikkien Thaimaassa tutkittujen järvien sedimentaatiossa on ikä-syvyysmallien perusteella havaittavissa katkoksia (Wohlfarth *et al.* 2012, Chawchai *et al.* 2015, Chawchai *et al.* 2016a,b, Yamoah *et al.* 2016a). Alueen suur-



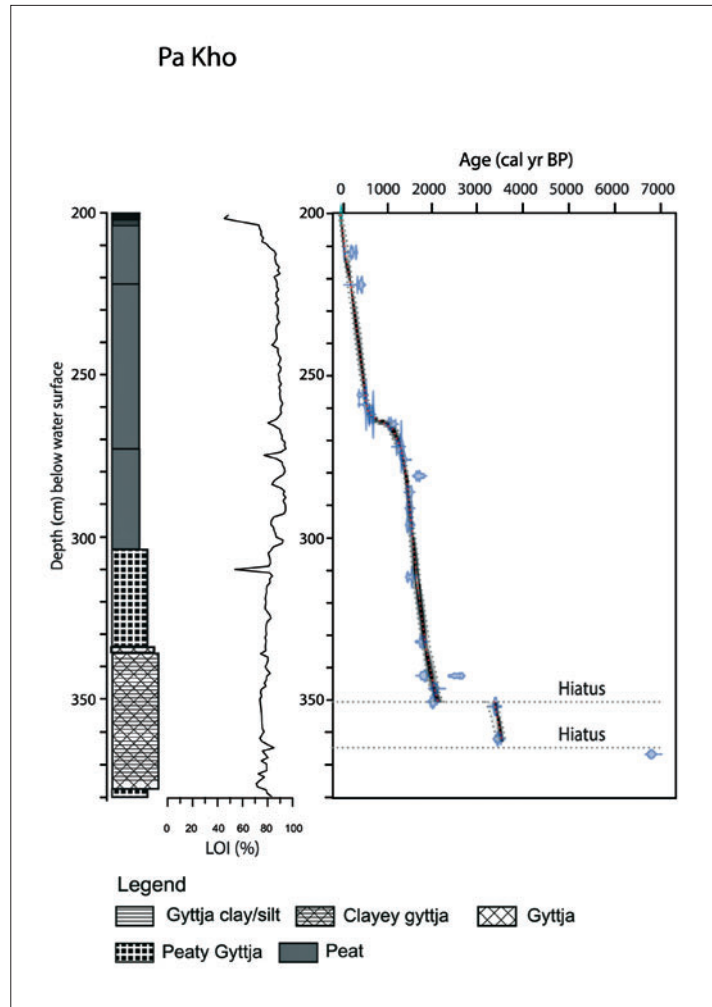
Kuva 1. Pa Kho järven sijainti Koillis-Thaimaassa sekä näkymä järvelle.

Figure 1. Location of the Lake Pa Kho in northeastern Thailand and a view over the lake.

ilmasto on vaihdellut kosteasta alku-holoseenista kuivempaan keski- ja myöhäis-holoseeniin (Chawchai *et al.* 2016a; Wohlfarth *et al.* 2016). Keski-holoseenin aikana ilmasto on kuitenkin vaihdellut paljon ja ajankohtaan osuu useita äärimmäisiä kuivuusjaksoja esimerkiksi 5000–4000 vuotta sitten (Chawchai *et al.* 2016a; Wohlfarth *et al.* 2016). Kuivat jaksot ovat seurausta heikoista kesämonsuuneista. Noin 1800 vuotta sitten kesämonsuunit vahvistuivat ja järvien vedenpinnat nousivat (Chawchai *et al.* 2015, Yamoah *et al.* 2016b). Kuivien ja kosteiden vaiheiden vaihtelut ovat näkyvissä Pa Kho -järven sedimenteissä, jossa sedimentti vaihtelee limnisen ja turpeenomaisen aineksen välillä (Wohlfarth *et al.* 2012, Chawchai *et al.* 2015, Yamoah *et al.* 2016a). Pa Kho -järven osalta sedimentaatiokatkos, hiatus, osuu hyvin orgaaniseen kerrokseen (kuva 2).

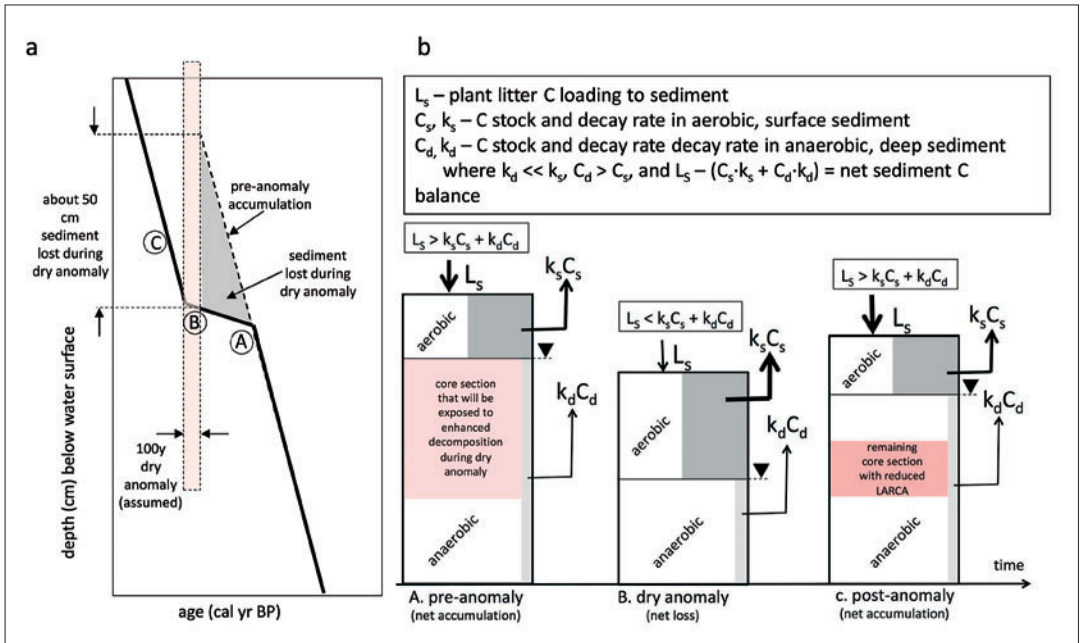
Pa Kho -järven sedimentistä analysoitiin sedimentin orgaanisen aineksen osuus, hiilen määrä sekä sedimentin tiheys. Ikä-syvyysmallia hyödyntäen Pa Kho -järven sedimenttisarjaan sovellettiin koe-mielessä suoympäristöihin kehitettyä mallia (Holocene Peat Model eli HPM), jonka avulla kuivumisen aiheuttamaa sedimentin ja siinä olevan hiilen hajoamista takaisin ilmakehään voidaan teoreettisesti mallintaa (kuva 3) (Frolking *et al.* 2014). Ylei-

sesti ottaen malli osoittaa, että kuivat jaksot johtavat myös alla olevien sedimenttikerrosten hajoamiseen. Tällöin kuiva jakso näkyy ikä-syvyysmallissa hitaana (hiilen) kertymisellä ja kuivan jakson aikana ilmakehään päätyy ajankohdan ”modernia” hiiltä, mutta myös vanhaa hiiltä kerrostumista, jotka kerrostui-



Kuva 2. Pa Kho järven litostartigrafia sekä ikä-syvyysmalli, joka osoittaa hitaan sedimentaation vaiheen välillä 1000 ja 2000 vuotta sitten sekä hiatuksen välillä 2000 ja 3000 vuotta sitten. Toinen hiatus sijoittuu ajalle ennen vuotta 4000 kal BP.

Figure 2. Lithostratigraphy and age-depth model for Pa Kho. The age-depth model shows a period of slow accumulation rate between 1000 and 2000 cal BP and hiatus between 2000 and 3000 cal BP. There is another hiatus below 4000 cal BP.



Kuva 3. Sedimentaatiota ja sedimentin hajoamista kuvaava malli erilaisissa vedenpinnan mukaisissa tilanteissa. (a) Malli olettaa, että ennen hiatusa sedimentaationopeus vastaa ikä-syvyyssmallin osoittamaa nopeutta hiatukseen asti. Kuivan ilmastovaiheen aikana sedimenttiä hajoaa, tämä näkyy ikä-syvyyssmallissa hitaana kertymisnopeutena ja/tai hiatuksena. Kuivan ilmastovaiheen jälkeen sedimentin kerrostumisnopeus palautuu ennalleen. (b) teoreettinen ja kaavamainen esitys sedimentaatiosta eri vaiheiden aikana A, B ja C.  $L$  = hiilen kertymien pintasedimenttiin,  $C$  = hiilen varasto,  $k$  = hajoamisnopeus, alaindeksit  $s$  tarkoittaa matalaa vedenpintaa ja sedimentin hapellisia olosuhteita ja  $d$  korkeaa vedenpintaa ja hapettomia olosuhteita. Nuolen paksuus vastaa hiilivirran suuruutta. Kärjellään olevat kolmiot kuvaavat vedenpinnan sijaintia. Kiihtynyt sedimentin hajoaminen kuivana ajanjaksona johtaa sedimenttipatjan ohentamiseen tilanteesta A tilanteeseen C.

Figure 3. Conceptual model of sediment balance for Pa Kho site. (a) Heavy black line indicates age-depth profile. Model assumes that accumulation continued at pre-hiatus rate until final 100 years of hiatus (label A), at which time a dry climate anomaly occurred (label B) and sediment was lost to enhanced decomposition. After the dry anomaly, sediment accumulation returned to pre-anomaly rates (label C). (b) Schematics of sediment carbon balance at times A, B, and C of panel a, where  $L$  is carbon loading to the surface,  $C$  is the carbon stock,  $k$  is a decomposition loss rate, and subscripts  $s$  and  $d$  refer to shallow (aerobic) and deep (anaerobic) positions in the sediment, respectively. Arrow widths vary with strength of  $C$  flux; long-term mean water table identified by inverted triangles. Enhanced decomposition during the dry anomaly reduced the thickness of the shaded sediment from pre-anomaly (A) to post-anomaly (C), which manifests in panel a as a low rate of accumulation for an interval before and during the anomaly.

vat ennen kuivaa jaksoa. Teoreettista tarkastelua varten oletettiin, että kuiva jakso kesti Pa Khossa 100 vuotta. Tämän mittainen kuiva jakso johtaisi siihen, että Pa Khon tapauksessa hiiltä menetettäisiin suurin piirtein 15 kiloa neliometriä kohti. Pinta-alaan suhteutettuna Pa Khosta poistuisi näin ollen  $\sim 0.04$  Mt hiiltä.

Tämä malliharjoitus on siis teoreettinen, koska Pa Khon sedimenttejä ei alun perin kerätty eikä analysoitu hiilen dynamiikan arviointia varten. Nyt käytettyä mallia ei myöskään ole suunniteltu järviympäristöön, mutta sitä voitaisiin hyvinkin kehittää toimimaan luotettavammin myös sekä alloktionisesta että autoktonisesta materiaalista koostuvien orgaa-

nisten järvisedimenttien hiilitaseiden mallintamiseen. Alustavan kirjallisuuskatsauksen mukaan vastaavanlaisia järvikohteita, joihin on kertynyt hyvin orgaanista sedimenttiä, on eri puolilla tropiikkia ja subtropiikkia: Kiinassa, Kaakkois-Aasiassa, Indonesiassa ja Tyynenmeren saarilla (Maxwell 2001, Anshari *et al.* 2004, Wüst ja Bustin 2004, Mann *et al.* 2008, Page *et al.* 2011, Zhang *et al.* 2015). Tässä esitetyn aineiston ja mallikokeen perusteella voimme kuitenkin ennustaa, että vastaavanlaiset sedimenttikerrostumat, jos ne paljastuvat veden alta – jolloin eroosiolle altistumisen ohella sedimentin hajoaminen kiihtyy – voivat ympäristöinä muodostaa merkittävän uuden biogeokemiallisen elementin ilmastomuutosta simuloiviin ja ennustaviin malleihin.

#### MINNA VÄLIRANTA

#### SANNA PIILO

ECRU, Ekosysteemit ja Ympäristö  
Tutkimusohjelma  
PL 65, 00014 Helsingin yliopisto  
minna.valiranta@helsinki.fi  
sanna.piilo@helsinki.fi

#### SAKONVAN CHAWCHAI

MESA Research Unit, Department of  
Geology  
Chulalongkorn University  
Bangkok 10330, Thailand  
Sakonvan.C@chula.ac.th

#### ANGELA GALLEGO-SALA

Department of Geography, College of Life  
and Environmental Sciences  
University of Exeter, EX4 UK  
A.Gallego-Sala@exeter.ac.uk

#### STEVE FROLKING

Earth Systems Research Center, Institute for  
the Study of Earth, Oceans, and Space  
University of New Hampshire, Durham  
NH 03824, USA  
steve.frolking@unh.edu

#### BARBARA WOHLFARTH

Department of Geological Sciences and  
Bolin Centre for Climate Research  
Stockholm University  
Stockholm 10691, Sweden  
barbara.wohlfarth@geo.su.se

*Yliopistotutkija Minna Väiliranta on paleoekologi, joka tällä hetkellä tutkii ilmastomuutokseen ja hiilenkiertoon liittyviä yhteyksiä pohjoisissa soissa, MV suunnitteli artikkelin hypoteettisen teeman yhdessä BW kanssa.*

*Väitöskirjatutkija Sanna Piilo tutkii väitöskirjassaan soiden vastetta muuttuviin ilmasto-oloihin ja tähän tutkimukseen hän teki laboratorioanalyysyjä.*

*Sakonvan Chawchai on Bangkokin yliopiston tutkija ja geokemian alalla. Hän väitteli Tukholman yliopistoon, aiheenaan Kaakkois-Aasian paleoklimatologia. Pa Kho on yksi hänen tutkimusjärvistään.*

*Apulaisprofessori Angela Gallego-Sala tutkii ja mallintaa soihin liittyviä biogeokemiallisia kiertoja, hän toimi asiantuntijana trooppisten ekosysteemien hiilenkiertoon liittyvissä asioissa.*

*Tutkimusprofessori Steve Frolking kehittää hiilenkiertoon liittyviä malleja ja tässä tutkimuksessa suoritti Pa Kho -järven sedimentteihin perustuvan mallinnuskokeen.*

*Professori Barbara Wohlfarth on kvartäärigeologi ja paleoklimatologi. Hän on pitkään tehnyt tutkimusta Thaimaassa. Hän suunnitteli yhdessä MV:n kanssa tutkimuksen teeman ja toteutuksen.*

# Summary

## Can tropical wetland sediments form an additional carbon feedback element in the future?

Tropical shallow lakes and wetlands contain organic rich sediments, but to date these types of environments have received much less attention than tropical peatlands in terms of carbon dynamics. Here, we present data from Lake Pa Kho, which is situated in northeastern Thailand. The lake has accumulated very organic-rich sediments, resembling peat over the past ca. 7000 years. The age-depth model revealed periods of low accumulation rates but also a long-lasting hiatus. The slow accumulation rate may be due to enhanced decomposition of litter originating from aquatic macrophytes, while the hiatus may reflect a drastic decrease in accumulation rates, which again could be due to accelerated decomposition processes when the highly organic sediments are exposed to aerobic conditions due to lower water levels in response to drier climate conditions. The previous

studies have reported that both dry and wet phases have occurred. In the case of a dry scenario, old carbon is released into the atmosphere. Here we present a theoretical carbon loss modelling experiment using Holocene Peat Model designed for peatland carbon dynamics modelling. We apply the Pa Kho age-depth model, the sediment properties and accumulation rate data to provide a hypothetical estimation of the mean carbon loss rate during an assumed 100-year dry period. The modelling experiment suggests a carbon loss of ca. 15 kg/m<sup>2</sup>, and when scaled over the lake area, the total carbon loss would be ca. 0.04 Mt. Based on this modeling experiment we conclude that tropical wetlands and their carbon storage may form a previously neglected potential positive greenhouse gas feedback to the atmosphere if dry climate periods occur more frequently in the future.

## Kirjallisuus

- Anshari, G., Kershaw, A. P., Kaars, S. V. D. ja Jacobsen, G., 2004. Environmental change and peatland forest dynamics in the Lake Sentarum area, West Kalimantan, Indonesia. *Journal of Quaternary Science* 19:637–655.
- Borges, A.V., Darchambeau, F, Teodoru, C.R., Marwick, T.R., Tamooh, F., Geeraert, N., *et al.*, 2015. Globally significant greenhouse-gas emissions from African inland waters. *Nature Geoscience* 8:637–642.
- Chawchai, S., Chabangborn, A., Fritz, S., Väiliranta, M., Mörth, C-M., Blaauw, M., *et al.*, 2015. Hydroclimatic shifts in northeast Thailand during the last two millennia – the record of Lake Pa Kho. *Quaternary Science Reviews* 111:62–71.
- Chawchai, S., Yamoah, K., Smittenberg, R., Kurkela, J., Väiliranta, M.M., Chabangborn, A., *et al.*, 2016a. Lake Kumphawapi revisited – The complex climatic and environmental record of a tropical wetland in NE Thailand. *The Holocene* 26:614–626.
- Chawchai, S., Kylander, M.E., Chabangborn, A. ja Löwemark, L., Wohlfarth, B., 2016b. Testing commonly used X-ray fluorescence core scanning-based proxies for organic-rich lake sediments and peat. *Boreas* 45:180–189.
- Frolking, S., Talbot, J. ja Subin, Z.M., 2014. Exploring the relationship between peatland net carbon balance and apparent carbon accumulation rate at century to millennial time scales. *The Holocene* 24: 1167–1173.
- Gallego-Sala, A., Charman, D.J., Brewer, S., Page, S.E., Prentice, I.C., Friedlingstein, P., *et al.*, 2018. Latitudinal limits to the predicted increase of the peatland carbon sink with warming, *Nature Climate Change*, doi.org/10.1038/s41558-018-0271-1

- Ge, F., Zhu, S., Peng, T., Zhao, Y., Sielmann, F., Fraedrich, K., et al., 2019. Risks of precipitation extremes over Southeast Asia: does 1.5 °C or 2 °C global warming make a difference? *Environmental Research Letters* 14:044015.
- Gopal, B., 2013. Future of wetlands in tropical and subtropical Asia, especially in the face of climate change. *Aquatic Sciences* 75:39–61.
- Hoegh-Guldberg, O. Jacob, D., Taylor, M., Bindi, M., Brown, S., Camilloni, I., et al., 2018. Impacts of 1.5 °C Global Warming on Natural and Human Systems. *Teoksessa: Global Warming of 1.5 °C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* (Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pörtner, H.-O., Roberts, D., Skea, J., Shukla, P.R. *et al.* (edit.), Intergovernmental Panel on Climate Change, 175–311.
- Jauhainen, J., Takahashi, H., Heikkinen, J. E. P., Martikainen, P. J. ja Vasander, H., 2005. Carbon fluxes from a tropical peat swamp forest floor. *Global Change Biology* 11:1788–1797.
- Mann, D., Edwards, J., Chase, J., Beck, W., Reanier, R., Mass, M, et al., 2008. Drought, vegetation change, and human history on Rapa Nui (Isla de Pascua, Easter Island). *Quaternary Research* 69:16–28.
- Maxwell, A.L., 2001. Holocene Monsoon Changes Inferred from Lake Sediment Pollen and Carbonate Records, Northeastern Cambodia. *Quaternary Research* 56:390–400.
- Maxwell, A.L., 2001. Holocene Monsoon Changes Inferred from Lake Sediment Pollen and Carbonate Records, Northeastern Cambodia. *Quaternary Research* 56:390–400.
- Page, S.E., Rieley, J.O. ja Banks, C. J., 2011. Global and regional importance of the tropical peatland carbon pool. *Global Change Biology* 17: 798–818.
- Raymond, P.A., Hartmann, J., Lauerwald, R., Sobek, S., McDonald, C., Hoover, M., et al., 2013. Global carbon dioxide emissions from inland waters *Nature* 503:355–359
- Ciais, P. ja Guth, P., 2013. Global carbon dioxide emissions from inland waters. *Nature* 503:355–359.
- Singh, D., 2016. South Asian monsoon: Tug of war on rainfall changes. *Nature Climate Change* 6:20–22.
- Sjögersten, S., Black, C.R., Evers, S., Hoyos-Santillan, J., Wright, M.L. ja Turner, B.L., 2014. Tropical wetlands: A missing link in the global carbon cycle? *Global Biogeochemical Cycles* 28:1371–1386.
- Wohlfarth, B., Klubseang, W., Inthongkaew, S., Fritz, S.C., Blaauw, M., Reimer, P.J., et al, 2012 Holocene environmental changes in northeast Thailand as reconstructed from a tropical wetland. *Global and Planetary Change* 92–93:148–161.
- Wohlfarth, B., Higham, C., Yamoah, K.A., Chabangborn, A., Chawchai, S. ja Smittenberg, R.H., 2016. Human adaptation to mid- to late-Holocene climate change in Northeast Thailand. *The Holocene* 26:1875–1886.
- Wüst, R.A.J. ja Bustin, R.M., 2004. Late Pleistocene and Holocene development of the interior peat-accumulating basin of tropical Tasek Bera, Peninsular Malaysia. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 211:241–270.
- Yamoah, K.A., Chabangborn, A., Chawchai, S., Schenk, F., Wohlfarth, B. ja Smittenberg, R.H., 2016a. A 2000-year leaf wax-based hydrogen isotope record from Southeast Asia suggests low frequency ENSO-like teleconnections on a centennial timescale. *Quaternary Science Reviews* 148:44–53.
- Yamoah, K., Chabangborn, A., Chawchai, S., Väliiranta, M., Wohlfarth, B. ja Smittenberg, R.H., 2016b. Large variability in n-alkane  $\delta^{13}C$  values in Lake Pa Kho (Thailand) driven by wetland wetness and aquatic productivity. *Organic Geochemistry* 97: 53–60.
- Zhang, E., Sun, W., Ji, M., Zhao, C., Xue, B. ja Shen, J., 2015. Late Quaternary carbon cycling responses to environmental change revealed by multi-proxy analyses of a sediment core from an upland lake in southwest China. *Quaternary Research* 84:415–422.