

Kelly, A. L. & Passier, S., 2018. A sub-millennial sediment record of ice-stream retreat and meltwater storage in the Baltic Ice Lake during the Bølling-Allerød interstadial. *Quaternary Science Reviews* 198, 126–139. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2018.08.018>

Kurucz, S., Fralick, P., Homann, M. & Lalonde, S., 2021. Earth's first snowball event: Evidence from

the early Paleoproterozoic Huronian Supergroup. *Precambrian Research* 365, 106408. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2021.106408>

Strand, K., 2012. Global and continental-scale glaciations on the Precambrian Earth. *Marine and Petroleum Geology* 33, 69–79. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2012.01.011>

Jäätiköt ilmastonmuutoksessa

JUHA LAAKKONEN JA NIKO PUTKINEN

Manner- ja laaksojäätiköiden sulaminen on sään äärivaihteluiden ohella yksi ilmastonmuutoksen näkyvimpiä ilmiöitä. Korkealta vuoristosta alas laaksoja pitkin kiemurtelevat laaksojäätiköt sykkivät suurilmaston vaihteluiden tahdissa. Toiminnallaan ne kuluttavat laaksoja, muokkaavat sedimenttejä ja luovat uusia ekolokeroita biosfäärille. Kalliota rapauttaessaan laaksojäätiköt ovat tärkeä osa maapallon kivikehän, veden ja ravinteiden kiertoa. Mannerjäätiköt muodostavat suurimman osan maapallon makean veden varannoista, ja sulaessaan ne nostavat merenpinnan tasoa sekä uhkaavat muuttaa merivirtojen reittejä.

Valtavat maa-alueet pohjoisella pallonpuoliskolla ovat olleet mannerjäätikön peitossa useita kertoja historiansa aikana. Jäätikön elinkaari on monin tavoin riippuvainen ilmastosta. Pelkkä ilmaston viileneminen ei saa jäätikköä kasvamaan, vaan vuotuisen kerääntyvän lumen määrän pitää olla suurempi sulamiseen verrattuna. Kerääntyneen lumen tiivistyminen jääksi kestää vuosia. Lopulta muodostunut jää alkaa virrata painovoiman vaikutuksesta kertymis- eli akkumulaatioalueelta kohti alavampia seutuja, jolloin jäätiköstä tulee dynaaminen ja ympäristöään muokkaava tekijä. Jokaisella jäätiköllä on oma tasapainotilansa, jota ylläpitävät jään kertyminen ja sen virtaaminen jäätikön reuna-alueille, jossa sulaminen pääosin tapah-

tuu. Jäätikön massan kasvaessa sen tasapainotilaa kuvaava tasapainoraja siirtyy lähemmäksi sen reuna-alueita. Vastaavasti sulamisen ylitäessä kertyvän jään määrän, tasapainoraja siirtyy ylemmäksi jäätikköä ja sen reuna vetäytyy. Jäätikön herkkyyttä siirtyä tasapainotilasta toiseen kuvataan termeillä reaktioaika ja vasteaika. Jäätikön reaktioaika kertoo sen valmiudesta tasapainottaa vuodenaikavaihteluita. Korkeilla leveysasteilla jäätikkö useimmiten menettää massaansa lämpiminä kesinä sulamisen ja haihtumisen kautta, sekä vastaavasti kasvattaa sitä talvisadannan aikana. Jäätikön vasteaika kuvaa pidemmän aikavälin siirtymistä tasapainotilasta toiseen muuttuneen ilmaston johdosta (Benn & Evans 2010). Vasteajan pituus on kymmenistä satoihin vuosiin riippuen jäätikön koosta ja sijainnista.

Muutokset ilmastossa saavat jäätiköt liikkeelle

Suuret mannerjäätiköt ovat valtava massa, jonka vasteaika on pitkä eikä massatasapainon muutos tapahdu muutamien poikkeuksellisten vuosien aikana. Tällä hetkellä ilmasto on lämmennyt jo riittävän pitkän aikaa, jotta näemme nopeita muutoksia jäätiköiden sulamisessa.

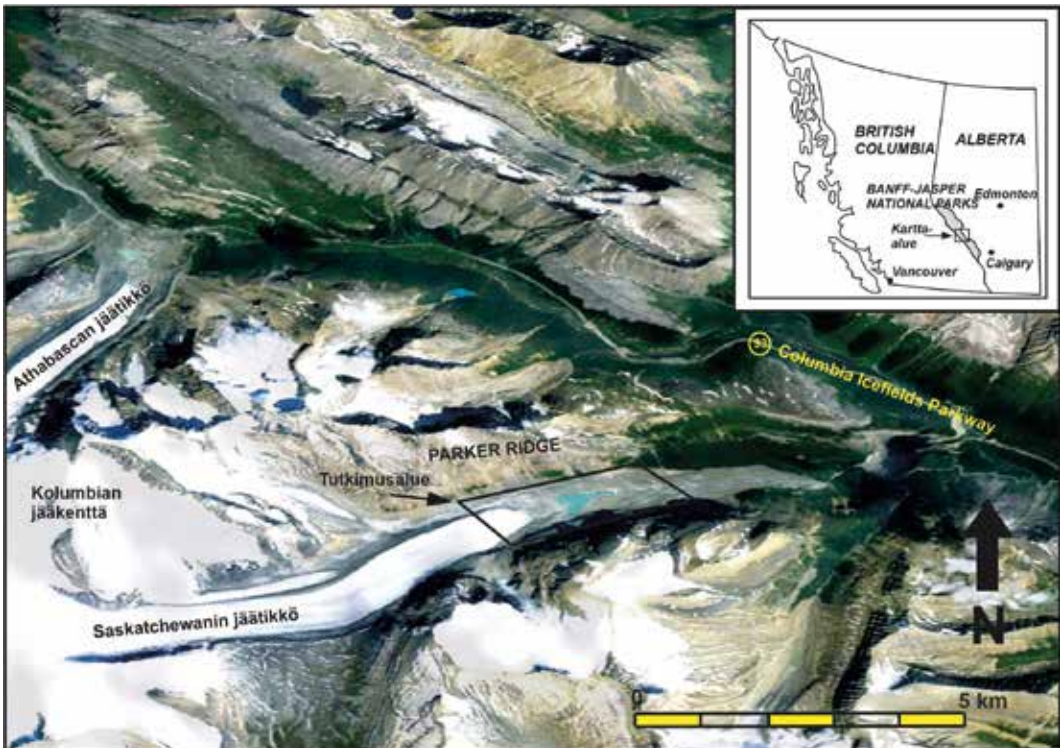
Kuitenkin paikalliset vaihtelut jäätiköiden

toiminnassa voivat olla suuria johtuen mm. sademäärien vaihteluista (Nesje 2005). Tarkempaa tietoa ilmaston lämpenemisen etenemisestä on mahdollista saada tutkimalla jäätiköiden käyttäytymistä pienen jääkauden aikana ja sen jälkeen. Pieneksi jääkaudeksi kutsutaan viimeisintä kylmää jaksoa n. 1300–1850, jolloin lämpötilat varsinkin pohjoisella pallonpuoliskolla laskivat. Laaksojäätiköillä on havainnointu etenemishistoriaa tänä aikana sekä Euroopassa että Pohjois-Amerikassa. Muun muassa Zumbühl ja muut (2008) ovat selvittäneet Mer de Glace -laaksojäätikön käyttäytymishistoriaa Ranskan Alpeilla. Lisäksi esimerkiksi Meier (1957) sekä Eyles ja muut (2015) ovat tutkineet vastaavanlaista Saskatchewanin jäätikköä Kanadan Kalliovuorilla (kuva 1, kansikuva). Molemmilla jäätiköillä on havaittu pienen jääkauden aiheuttamasta massatasapainon muutoksesta johtuvaa etenemistä.

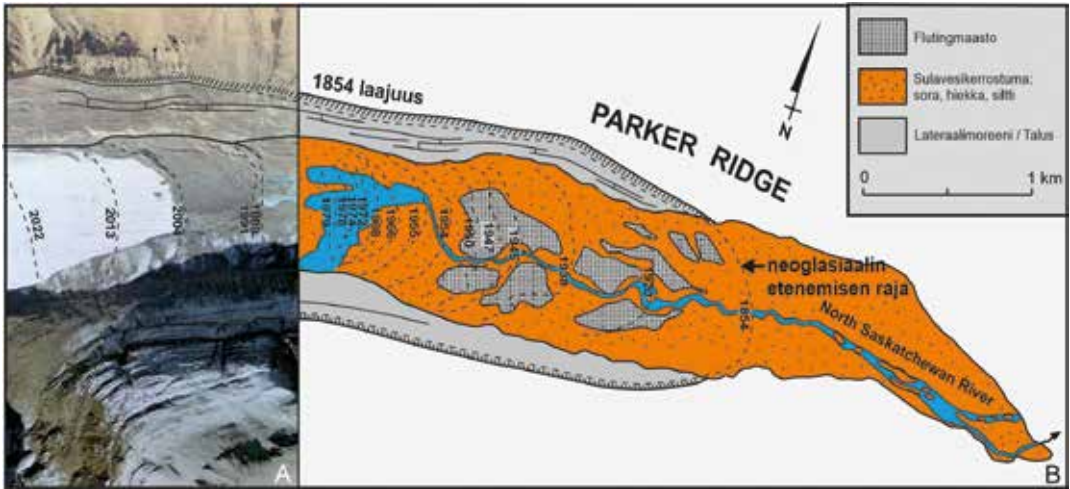
Laaksojäätiköiden liikkeitä on tutkittu muun muassa käyttämällä lähteinä maalauksia, piirustuksia, valokuvia, kirjoituksia ja vanhoja karttoja, kuten Nussbaumerin ja Zumbühlin (2011) tutkimuksessa. Viimeisimmissä töissä satelliittikuvat sekä LiDAR-aineisto (*Light Detection and Ranging*) ovat käytännössä osoittaneet modernin teknologian ja menetelmien ylivertauuden. Kronologisissa tutkimuksissa kosmogeenninen isotooppiajoitus sekä optisesti stimuloitu luminesenssiajoitus (OSL) ovat yleistyneet radiohiiliajoituksen rinnalla käytettäviksi metodeiksi.

Jääkentän pitkät sormet, Saskatchewanin jäätikkö

Kanadan Kalliovuorilla sijaitsevalta Kolumbian jääkentältä virtaa useita jäätiköitä laaksojen purkautumisreittejä pitkin. Laaksojäätiköt



Kuva 1. Saskatchewanin jäätikön tutkimusalue Kanadan Kalliovuorilla. Satelliittikuva: Google Earth, © Google.
Figure 1. The research area of the Saskatchewan Glacier in the Rocky Mountains, Canada. Satellite imagery: Google Earth, © Google.



Kuva 2. Satelliittikuva (Google Earth, © Google) vuodelta 2004 (A). Ilmaston lämpenemisen myötä jäätikön kiihtyvä vetäytyminen on esitetty ajoitettujen jään reuna-asemien perusteella. Havainnekuva (B), jossa Saskatchewanin jäätikön reunan sijainnit neoglasiaalin maksimivaiheesta (pieni jääkausi vuonna 1854) vuoteen 1979 sekä laakson geomorfologiset piirteet on esitetty.

Figure 2. Satellite image (Google Earth, © Google) from 2004 (A). Global warming induced fast retreating of the glacier is presented from the ice margin historical locations. Demonstrated ice marginal positions (B) starting from the Neoglacial maximum (Little Ice Age year 1854) and the main geomorphological features are shown in the front of the Saskatchewan Glacier.

etenevät ja vetäytyvät vastaten viiveellä ilmaston muutosten tuomiin massatasapainon muutoksiin (Benn & Evans 2010). Näitä alueita tutkimalla on mahdollista saada tietoa mm. menneistä ilmaston vaihteluista ja jäätikön dynamiikasta. Tutkimuksen avainasemassa ovat jäätiköiden jälkeensä jättämät geomorfologiset piirteet. Esimerkiksi jäätiköiden reunan eteen kerrostuneista jään puskeista päätmoreenivalleista voidaan päätellä niiden laajimpia vaiheita, sekä pidempiaikaisia pysähtymiskohtia ja -aikoja.

Käsitlemme Kalliovuorilla sijaitsevan Saskatchewanin jäätikön elinkaarta historiallisen tiedon, tieteellisen tutkimustiedon ja alueelle vuosina 2013 ja 2022 suuntautuneiden maastotutkimusten valossa: Saskatchewanin jäätikön vetäytyessä monia etenevän jäätikön muokkaamia piirteitä on tullut esille, vaikkakin kokoluokaltaan usein pienempinä mihin olemme Suomessa tottuneet. Drumlinoidit ovat jäätikön alla sen virtauksen vaikutuksesta muodostuneita kumpareita, joilta puuttuu vielä drumliineille tyypillinen täysin virtavi-

vainen muoto. Nämä osoittavat jään liikkeen suuntaa ja kertovat lämpimöhjaisen jäätikön deformaivasta ja erosionaalisesta vaikutuksesta sen edessä aikaisempien kerrostumien yli. Topografiassa ylimpänä näkyvät, viereen syntyneiden flutingien, pitkien vakoumien tai kohoumien peittämät moreenikentät ovat syntyneet päätmoreenimuodostumien päälle ja kertovat pienen jääkauden aikaisen yhtäjaksoisen etenemisen alleen jyräämistä päätmoreenikummuista. Pienen jääkauden jälkeen syntyneet peräkkäiset päätmoreenit puolestaan osoittavat vetäytymisnopeuden kasvaneen 1850-luvulta lähtien. Nykyisin suurin osa laakson pintaosan sedimentistä koostuu sulavesikerrostumasta. Palmikoivat, alati uomiaan vaihtelevat virtaukset paljastavat laakson maaperän sisäistä rakennetta, kun ne leikkaavat kerrostumia paikoin metrien syvyyteen (kuvat 2 ja 3). Saskatchewanin jäätikön alueen edellinen jäätön aika on kyetty ajoittamaan sedimenttikerrosten alta löytyneistä puiden subfossiilista kannoista, jotka on radiohiiliajoitettu n. 3000 vuotta vanhoiksi

Kuva 3. Saskatchewanin jäätikön laakson pääpiirteitä ovat sulavesikerrostumat, flutingien peittämät saarekkeet sekä moreenikumpareet ja -harjanteet. Laakson reunoja peittää seinämiltä irronnut kiviaines. Laakson pohjalla kiemurtelevat syvien sulavesijokien uomat paljastavat kerrostumien rakenteita. Kuva: Niko Putkinen.

Figure 3. The valley glacier landsystem of the Saskatchewan Glacier consists of fluted surfaces surrounded by outwash deposits, moraine hummocks and ridges. Also, loose cone-shaped debris accumulations are seen on valley slopes. Relatively deep channels are cut down to the sediment by glacier melt water streams revealing internal structures. Photo: Niko Putkinen.

(Wood & Smith 2004). Tämä sijoittuu keski-holoseenikauden lämpöoptimiin, jota seurannut ilmaston kylmenemisestä johtuva jäätikön kasvukausi saavutti maksiminsa vuonna 1854. Osia näistä puista on kulkeutunut sulavesien mukana pitkälle alas laaksoon, osa on nähtävissä sekoittuneena jäätikön alta paljastuneeseen moreeniin.

Maapallon keskilämpötilan ollessa nopeassa nousussa, pääsemme havainnoimaan jäätiköiden perääntymistä käytännössä reaaliajassa. Saskatchewanin jäätikön reunan perääntymisen viimeisimmästä maksimistaan voidaan jakaa kolmeen eri vaiheeseen. 1950-luvulle tultaessa jäätikön reuna oli vetäytynyt 1,5 km ylöspäin laaksoa. Tätä seurasi alueella vallinnut viileämpi ja sateisempi jakso 1980-luvulle asti, jolloin vetäytymistä tapahtui n. 600 metriä. Tämän jälkeen sulaminen jälleen nopeutui ja jatkuu yhä kiihtyvällä vauhdilla. Vuosien

1980–2013 välillä jäätikön reuna vetäytyi lähes yhtä paljon kuin ensimmäisen sadan vuoden aikana pienen jääkauden jälkeen (Eyles ym. 2015). Lisäksi on huomionarvoista, että vuosien 2013 ja 2022 tutkimusmatkojen välillä perääntymistä on tapahtunut noin 600 metriä (kuva 4).

Saskatchewanin jäätikön meneillään olevat tutkimukset

Viimeisimmältä tutkimusmatkalta kerätystä aineistosta on käynnissä kaksi tutkimusta: Nick Eylesin vetämänä tutkitaan Kanadassa LiDAR-pohjaisen aineiston avulla maaperän pintavyöhykkeen evoluutiota, ja Suomessa tämän kirjoituksen tekijät tarkastelevat maaperän syvempiä kerrostumia 3D-mallinnuksen avulla. Jälkimmäisen tutkimuksen tavoitteena on kartoittaa ymmärrettävään ja havainnolli-



Kuva 4. Globaalit lämpötilat ja Saskatchewanin jäätikön perääntyminen pienen jääkauden maksimiasemasta (vuodesta 1854) vuoteen 2020.

Figure 4. Global temperatures and retreat of the Saskatchewan Glacier since its Neoglacial maximum reached in year 1854 until 2020.

seen muotoon varsin hajallaan olevia stratigrafisia yksiköitä. Näitä tulkitsemalla saamme yhtenäisen kuvan laakson alueen tärkeimmistä sedimenttiryksiköistä. Kun yhdistämme kerätyn moniulotteisen stratigrafisen ja kerrostumisympäristötiedon maanpinnan geomorfologiaan ja ajoituksiin, saamme lopputuloksena maaperän 4D-kerrostumismallin alueelta.

Toisin kuin suuret laaksojäätiköt yleensä (ja vastaavat samalla alueella), Saskatchewanin jäätikkö virtaa osittain paksun sedimenttikeroksen päällä. Tämän takia jäätikön edustan sedimentit antavat poikkeuksellisen aikaikunan neoglasiaalisen ilmaston muutoksiin Kanadan Kalliovuorten ympäristössä. Viimeisin etenemistapahtuma pienen jääkauden aikana on glasiaalilineaatioista päätellen ollut nopeaa, kuten myös jäätikön reunan vetäytyminen sen jälkeen. Woodin ja Smithin (2004) tutkimat subfossiliset kannot noin 3000 vuoden takaa tuovat mielenkiintoisen lisätiedon jäätikön syklisestä kierrosta. Ilmeisesti lämpimämmän ajanjakson aikana puut olivat päässeet juurtumaan jäätikön edustan sulavesi-kerrostumiin, mutta peittyneet myöhemmin useamman metrin syvyyteen moreeniin.

Suurten jääkausien aika alkoi kvartaari-kaudella, ja jääkaudet sekä niiden väliset interstadiaalit, lämpimämmät jaksot, ovat seuranneet toisiaan. Kvartaarikauden lämpötilakäyriä tarkastelemalla voidaan nähdä, miten muuttaman asteen vaihtelut keskilämpötilassa ovat vaikuttaneet jäätiköiden koon valtaviiin vaihteluihin. Vastaavasti pienen jääkauden jälkeiset muutokset maapallon keskilämpötilassa ovat saaneet tämän kirjoituksen esimerkkinä toimineen Saskatchewanin jäätikön reunan vetäytymään kilometrejä. Kvartaarikauden jäätiköitymiset ovat olleet omalta osaltaan muokkaamassa elinympäristöämme. Jäätiköt ovat todennäköisesti välillä olleet melkein kokonaan poissakin pohjoiselta pallonpuoliskolta. Huolestuttavaa kuitenkin on, jos ilmaston lämpenemisen seurauksena menetämme sekä elottoman että elollisen luonnon kannalta tärkeän kryosfäärin kokonaan.

Muuta taustatietoa

Saskatchewanin jäätikköön liittyvää tutkimusta on tehty Geologian tutkimuskeskuksen Tie-de ja innovaatiot -vastuualueen Niko Putkiselälle Helsingin yliopiston graduprojektiin myöntämällä yliopistoyhteistyörahoituksella.

LUK JUHA LAAKKONEN

(juha.t.laakkonen@helsinki.fi)

Helsingin yliopisto

DOS., FT NIKO PUTKINEN

(niko.putkinen@gtk.fi)

Geologian tutkimuskeskus

Juha Laakkonen opiskelee Helsingin yliopiston geotieteiden maisteriohjelmassa. Niko Putkinen toimii erikoistutkijana Geologian tutkimuskeskuksessa ja glasiaaligeologian dosenttina Helsingin yliopistossa.

Summary

Global warming effect on glaciers

Glaciers and glaciated terrains are often studied as a proxy for past climate changes as they demonstrate a different response and reaction times for changing conditions in precipitation and temperature. Unlike many valley glaciers, Saskatchewan Glacier in the Canadian Rocky Mountains has experienced an advancing period on a soft sediment bed during the Little Ice Age reaching the maximum extent in 1854, followed by a continuous retreat. Since then, the glacier retreating has exposed typical geomorphological features belong to valley glacier landsystem.

Highly variable geomorphology and subsurface sedimentary sequences, together with Holocene Climatic Optimum aged from the biogenic data (about 3000 years old three stumps) gave us an opportunity to examine the glacier multistage operation over the terrain in time perspective. Our results also highlight the increasing retreat of the Saskatchewan Glacier terminus under a warming climate, corresponds the observations from the similar valley glaciers around the planet.

Lähdeluettelo

- Benn, D. & Evans, D., 2010. *Glaciers and Glaciation*. Hodder Education, London, 802 s.
- Eyles, N., Boyce, J. I. & Putkinen, N., 2015. Neoglacial (<3000 years) till and flutes at Saskatchewan Glacier, Canadian Rocky Mountains, formed by subglacial deformation of a soft bed. *Sedimentology* 62, 182–203. <https://doi.org/10.1111/sed.12145>
- Meier, M. F., 1957. Mode of flow of Saskatchewan Glacier, Alberta, Canada. *Väitöskirja*. California Institute of Technology, 70 s.
- Nesje, A., 2005. Briksdalsbreen in western Norway: AD 1900–2004 frontal fluctuations as a combined effect of variations in winter precipitation and summer temperature. *The Holocene* 15, 1245–1252. <https://doi.org/10.1191/0959683605hl897rr>
- Nussbaumer, S. U. & Zumbühl, H. J., 2011. The Little Ice Age history of the Glacier des Bossons (Mont Blanc massif, France): a new high-resolution glacier length curve based on historical documents. *Climatic Change* 111, 301–334. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0130-9>
- Wood, C. & Smith, D., 2004. Dendroglaciological evidence for A Neoglacial advance of the Saskatchewan Glacier, Banff National Park, Canadian Rocky Mountains. *Tree-Ring Research* 60, 59–65. <https://doi.org/10.3959/1536-1098-60.1.59>
- Zumbühl, H. J., Steiner, D. & Nussbaumer, S. U., 2008. 19th century glacier representations and fluctuations in the central and western European Alps: An interdisciplinary approach. *Global and Planetary Change* 60, 42–57. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2006.08.005>