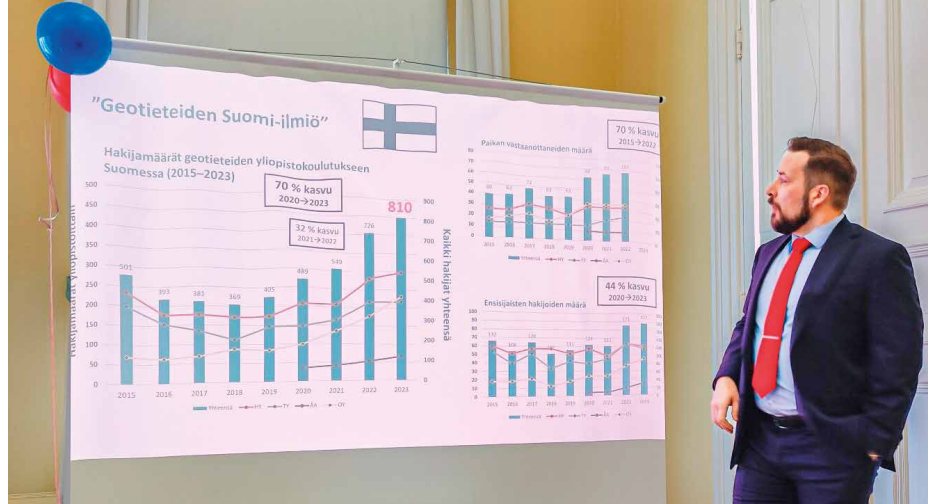


Kuva 1. Dos. Aku Heinonen ja Suomi-ilmio. Kuva: Elina Koskela.

Figure 1. Docent Aku Heinonen and the "Finnish phenomenon of geoscience education". Photo: Elina Koskela.



kuulumisten vaihdolle juhlakansan kesken. Joukon hajaantuessa kohti omia vappumeinojaan, oli taas aika kiittää juhlan osallistujia ja toivottaa tämän kirjoituksen myötä koko jäsenistölle ja SGS:n lukijoille mukavaa kesää! Tilaisuuden järjestelyistä vastasivat SGS:n 2023 toimihenkilöt: Olli-Pekka, Tapio, Joonas, Johanna, Hanna, Arto ja Elina K.

FM ELINA KOSKELA
(elina.koskela@gtk.fi)

Kirjoittaja on SGS:n hallituksen jäsen.

Summary

May Day Matinee 2023

The Geological Society of Finland held a May Day Matinee in Kumpula Botanic Garden 30.4.2023, a tradition initiated already in 2009. The festive event gathered approximately 45 people together to toast for the upcoming summer and Vappu. The program included a performance from the GTK Kivitaskut choir, and a presentation given by docent Aku Heinonen. The presentation focused on the Finnish phenomenon of geoscience education.

Miten jäätikön alaiset järvet purkautuivat – esimerkkinä Urjala-Akaan subglasiaalinen järvi

ANTTI SAINIO, PERTTU HEISKANEN, ANTTI E. K. OJALA JA JONI MÄKINEN

Subglasiaaliset järvet ovat jäätikön alle muodostuneita vesialtaita. Ne vaikuttavat oleellisesti mannerjäätiköiden dynamiikkaan rytmittämällä sulavesien liikkeitä purkauksilla sekä keräämällä ja pidättämällä jäätikön pohjan sulamisvesiä silloin, kun sulaminen on vähäisempää (Livingstone ym. 2016). Maailmalta

on paikannettu lukuisia subglasiaalisia järviä nykyisten mannerjäätiköiden alta Grönlannista ja Antarktikselta (Greenwood ym. 2016). Kuitenkaan paleosubglasiaalisten eli muinaisten jäätikön alaisten järvien sijainteja ei ole dokumentoitu kattavasti, ja sijaintia tukevaa tutkimusaineistoa on ollut vaikeaa hankkia

Fennoskandian mannerjäätiköityneiltä alueilta kuten Suomesta (Livingstone ym. 2016; Greenwood ym. 2016).

Korkealaatuisten LiDAR-aineistojen muodostamat korkeusmallit ovat edistäneet merkittävästi maaperän morfolitogeneettistä tutkimusta ja mahdollistaneet maankamaran pienten piirteiden kartoitusta ja uusien maaperämuodostumien löytämistä (Ojala ym. 2022a). Esimerkiksi murtoo on LiDAR-tekniikan avulla löydetty uusi yleensä kolmiomainen subglasiaalinen muodostumatyyppi, joka liittyy olennaisesti sulamisvesireitteihin ja subglasiaaliin järviin (Mäkinen ym. 2017; Ojala ym. 2019).

LiDAR-aineiston avulla on Urjalan ja Akaan alueelta paikallistettu potentiaalinen subglasiaalinen järvi, joka on kytköksissä useisiin jäätikön alaisiin sulamisvesireitteihin, harjuihin sekä murtoo-alueisiin sen ympärillä (Kajuutti ym. 2016; Mäkinen ym. 2017; Tuunainen 2018). Alueen jäätikkösyntyiset maaperämuodostumat kuten harjut ja deltat, murtoot ja kumpumoreenit sekä topografia ja sulamisreitillä tehdyt sedimentologiset havainnot kertovat Itämeren virtauskielekkeen deglasiatiohistoriasta. Nämä kaikki tukevat ajatusta, että alueella sijaisi Urjala-Akaan subglasiaalinen järvi mannerjäätikön voimakkaan sulamisen aikana (kuva 1).

Subglasiaalisten järvien vaikutus jäätikködynamiikkaan

Subglasiaalisen järven dynamiikka perustuu maanpinnan topografiaan ja jäätikön paksuuteen. Nämä puolestaan vaikuttavat jäätikön ja subglasiaalisen sulamisveden paineen sekä hydraulisen gradientin vaihteluihin (Shackleton ym. 2018). Hydraulisen gradientin suuruus kuvastaa virtaamisen helppoutta huokoisessa väliaineessa (Sanaksenaho 2019). Jäätikön laajentuessa hydraulinen gradientti tasoittuu rajoittaen sulavesien pääsemistä kohti jäätikön reunaa, jolloin subglasiaalisia järviä muodostuu mannerjäätikön alle maankamaran pai-

nanteisiin (Livingstone ym. 2012; Stroeven ym. 2016; Shackleton ym. 2018). Subglasiaaliset järvet myös vähentävät jäätikön pohjan liukukitkaa, jolloin subglasiaalisen järven paikka vakiintuu ja jäätikön liikkeen suunta voi jopa muuttua (Kwok ym. 2000; Pattyn 2008). Kun sulamisvaiheessa jäätikkö vetäytyy, hydraulisen gradientin erot kasvavat: tämä tehostaa sulavesien kulkeutumista jäätikön reunaa kohti ja luo olosuhteet subglasiaalisten järvien purkautumiselle (Jordan ym. 2010).

Jäätikön paksuuden kasvaessa sekä pohjasulamisen lisääntyessä jäätikönalaisen veden paine kasvaa, ja vastaavasti se laskee sulavesien pidätyessä ja purkautuessa (Björnsson 2003). Tällaiset sykliiset sulamisvesipurkaukset ovat tyyppillinen ja olennainen osa lämminpohjaisen jäätiköiden hydrologista kehitystä ja liikedynamiikkaa, sillä ne voivat kiihdyttää jäätikön virtausta (Livingstone ym. 2012).

Aktiivisia jäätikönalaisia järviä on arktisilla alueilla paikannettu nykyisten napajäätiköiden alueilla 1970-luvulta alkaen seismis-akustisten luotausten ja painovoimamittausten avulla (mm. Robin ym. 1970; Filina ym. 2008). Viime vuosikymmeninä teknologiset edistysaskeleet geofysikaalisten menetelmien ja kaukokartoituksen kehityksessä ovat mahdollistaneet paleosubglasiaalisten järvien ja niihin liittyvien sulamisvesireittien löytämisen ja tutkimisen muun muassa Pohjois-Amerikassa (Lewington ym. 2020; Sharpe ym. 2021), Skandinaviassa (Kajuutti ym. 2016; Shackleton ym. 2018; Ahokangas ym. 2021) ja Antarktiksella (Kuhn ym. 2017). Kuitenkin tutkimusala itsessään on vielä alkutekijöissään (Livingstone ym. 2012). Subglasiaalisten järvien perustutkimus on järvien tunnistamista niitä ympäröivän glasiaaligeomorfologian sekä sedimentologisten havaintojen avulla. Näitä tutkimalla voidaan selvittää ja ymmärtää jäätikködynamiikan vaikutuksia tutkittavaan alueeseen (Livingstone ym. 2012; Tuunainen 2018). Tässä työssä tehdyt sedimentologiset kenttätutkimukset tukevat LiDAR-aineiston avulla tehtyjä geo-

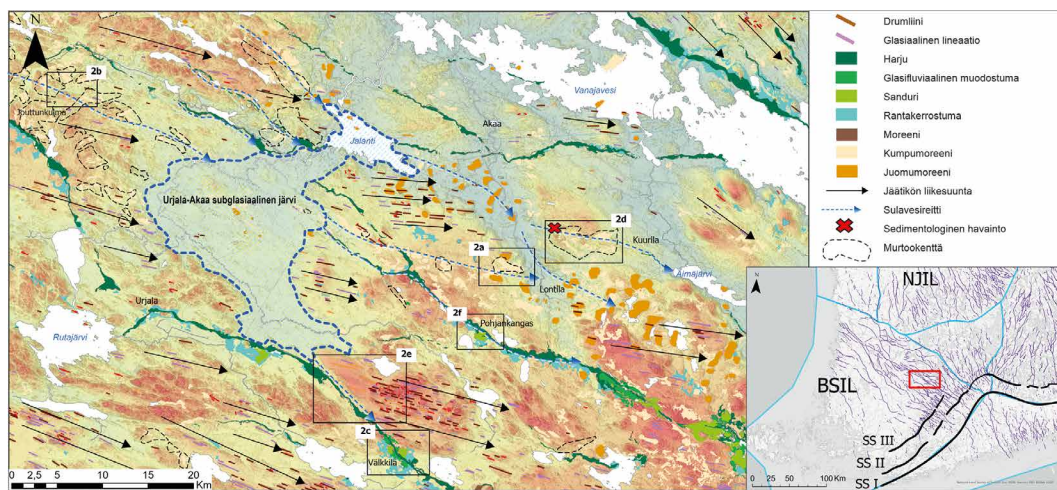
morfologiaa havaintoja, joiden perusteella on arvioitu mahdollisen Urjala-Akaan subglasiaalisen järven sijaintia (kuva 1).

Veiksel-jääkauden deglasiatio liittyy olennaisesti Urjala-Akaan subglasiaalisen järven muodostumiseen Fennoskandian mannerjäätköityneellä alueella (Mäkinen ym. 2017; Ojala ym. 2019). Jäätikön sulaminen alkoi viime jääkauden kylmimmän vaiheen jälkeen 20 000 vuotta sitten ja jatkui nuoremman dryaskauden eli kylmän ajanjakson jälkeen 12 900–11 700 vuotta sitten (Stroeven ym. 2016). Stroevenin ja muiden (2016) mukaan Salpausselät muo-

dotuivat nuoremman dryaskauden aikana ja Urjala-Akaan tutkimusalue vapautui mannerjäätikön alta varhaisen holoseenin aikana noin 11 500–11 000 vuotta sitten. Oletettu Urjala-Akaan subglasiaalinen järvi sekä murtoomuodostumat sijaitsevat noin 40–50 km päässä toisesta ja kolmannelta Salpausselästä.

Urjala-Akaan alueen geomorfologiset ja sedimentologiset havainnot

Oletettu Urjala-Akaan subglasiaalinen järvi sijaitsee Itämeren virtauskielekkeen alueella (kuva 1).



Kuva 1. Korkeusmallikartta oletetusta Urjala-Akaa subglasiaalisesta järvestä ja sitä ympärivästä alueesta. Kartassa näkyy Urjala-Akaan subglasiaalisen järven aluerajaus, johon myös Jalanti on sisällytetty. Karttaan on myös merkitty glasiaaliset lineaatiot ja niiden indikoimat jäätikön liikesuunnat, glasifluviaaliset muodostumat ja niihin liittyvät subglasiaaliset sulamisvesireitit ja murtookentät. Suorakaiteet 2a–2f rajaavat tärkeimpiä geomorfologisia piirteitä, joita käsitellään tekstissä ja ne on kuvattu yksityiskohtaisemmin kuvassa 2. Indeksikarttaan on merkitty tutkimusalueen sijainti punaisella neliöllä, jäätiköiden sulavesireitit tummansinisin viivoin, Salpausselät mustilla viivoilla ja jäävirtauskielekkeiden rajat vaaleansinisellä. Merkinnät: SS = Salpausselkä, BSIL = Itämeren virtauskieleke, NJIL = Näsijärvi-Jyväskylän virtauskieleke. Pohjakartan lähde: LiDAR korkeusmalli, © Maanmittauslaitos, 2/2023.

Figure 1. Surroundings of the potential Urjala-Akaa subglacial lake. Estimate of the area of Urjala-Akaa subglacial lake illustrated with Lake Jalanti included. Black arrows represent direction of ice-sheet movement indicated by glacial lineations (purple lines) and blue arrows show subglacial meltwater routes based on geomorphological indicators such as murtoo fields (black dotted line areas), eskers (dark green areas), and ribbed moraines (light yellow areas). Rectangles 2a–2f mark key geomorphological elements, which are discussed in the text and represented in more detail in Fig. 2. Markings in index map: SS = Salpausselkä, BSIL = Baltic Sea Ice Lobe, NJIL = Näsijärvi-Jyväskylä Ice Lobe. Location of study area is marked as red rectangle, glacial meltwater routes with dark-blue lines, Salpausselkä ice-marginal complexes with black lines and areas related to ice lobe borders are marked with light-blue lines. Markings in index map: SS = Salpausselkä, BSIL = Baltic Sea Ice Lobe, NJIL = Näsijärvi-Jyväskylä Ice Lobe. Background map source: LiDAR digital elevation model, © National Land Survey of Finland, 2/2023.

Tarkasteltaessa korkealaatuista LiDAR-aineistoa sen paikka voidaan nähdä maaston painanteena. Lisäksi voidaan havaita murtooken-tät Urjala-Akaan subglasiaalisen järven luoteis-puolella (kuva 1: 2b) ja Lontila-murtooken-ttä sen kaakkoispuolella (kuva 1: 2a). Subgla-siaalisen järven pinta-ala on Jalanti mukaan lukien noin 90 km². Nykyisen Jalanti-järven kaakkoiskärjestä alkaa lukuisten juomumoree-nimuodostumien vyöhyke, joka jatkuu pel-to- ja savialueiden mukaisesti kaakkoa kohti. Juomumoreenivyöhykkeen puolivälissä sijait-see Kuurila-murtooken-ttä (kuva 1: 2d), joka vaihettuu lopulta kapeaksi harjuksi päättyen Äimäjärveen. Urjala-Akaan subglasiaalisen järven eteläpuolella sijaitsee myös drumlii-nikenttä (kuva 1: 2e). Drumliinikentän itä-puolella on harju, joka rajaa Urjala-Akaan subglasiaalisen järven eteläpuolelta. Muutkin subglasiaalisen järven läheisyydessä olevat har-jut ovat muodostuneet luode kaakkosuuntai-sesti. Kaikki alueen murtooken-tät sijaitsevat rinteiden kaakkoispuolilla alamässä.

Sedimentologiset tutkimukset tehtiin Kuurila-murtooken-tän luoteispuolella sijait-sevalla louhosalueella sekä alueen morfologi-aa havainnoitiin Urjala-Akaan subglasiaalisen järven ympäriltä (kuvat 1 ja 2). Sedimentolo-gisten havaintojen perusteella alueen maape-rä koostuu yleispiirteiltään osin lajittuneista sedimenttikerroksista sekä sekoittuneesta savi-hiekkamoreenista, jossa on raekooltaan erilaisia linssejä hiekasta kookkasiin kiviin. Savi-hiekkamoreenin päällä on ohut karkea-rakeinen hiekka-kivimoreenikerros (kuva 3).

Urjala-Akaan subglasiaalinen järvi osana sulamisvesireittiä

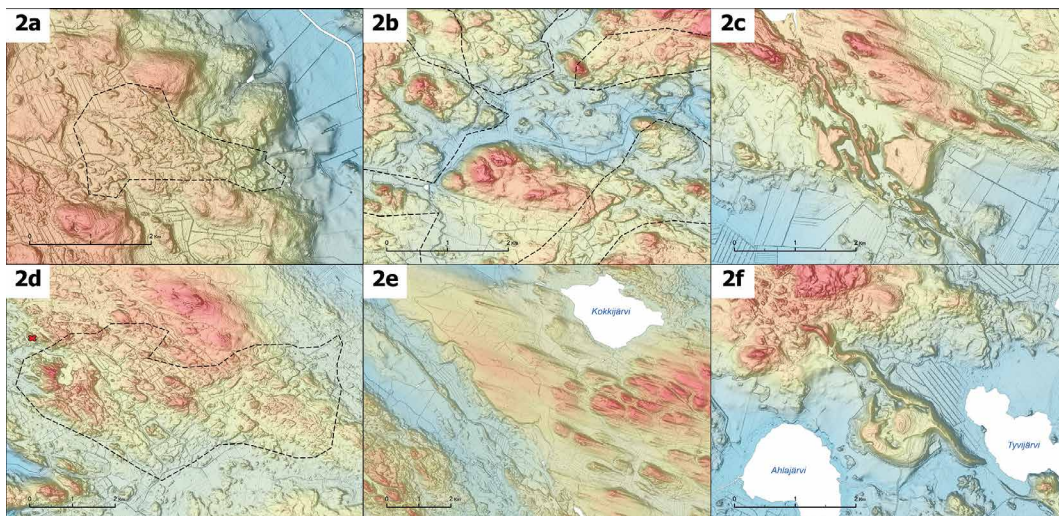
Ahokankaan ja muiden (2021) sekä Véritén ja muiden (2022) mukaan subglasiaalisilla sula-misvesireiteillä on usein kumpu- ja juomumo-reeneja, jotka ovat oleellinen osa murtoiden kerrostumisympäristöjä. Murtoot muodostu-vat alueille, joissa jäätikön pohjaeroosio ja

virtaava vesi muokkaavat juomumoreenien muotoja (Ahokangas ym. 2021). Ahokankaan ja muiden (2021) mukaan subglasiaalisten sulamisvesien partikkelikuljetuskykyä kas-vattavat kiihtynyt jään pohjan sulaminen ja valuma subglasiaalisesta tai supraglasialaisesta lähteestä eli jäätikön pohjalta tai päältä tule-vasta vedestä. Jäätikön aiheuttamasta korkeas-ta paineesta johtuva pohjan sulaminen ja hyd-rogiset muutokset jään alla mahdollistavat murtoiden ja juomumoreenien muodostumi-sen (Ahokangas ym. 2021; Vérité ym. 2022).

Nykyinen Jalanti ja paikannettu Urjala-Akaan painanne ovat korkeudeltaan lähes sa-malla tasolla, joten Jalanti on todennäköisesti ollut osa Urjala-Akaan subglasiaalista järveä ja pääasiallinen subglasiaalinen sulamisvesireit-ti on alkanut Jalanti-järven kaakkoiskärjestä. Lisäksi Urjala-Akaan subglasiaalisen järven ympäristön kallioperää hallitsee helposti ero-doituva biotiittiparagneissi, joka on lisännyt erodoituneen materiaalin määrää ja edesaut-tanut subglasiaalisten sulamisvesireittien muo-dostumista (Ahokangas ym. 2021).

Urjala-Akaan subglasiaalinen järvi on sää-dellyt alueen subglasiaalisten sulamisvesien ke-rääntymistä ja kanavoitumista. Sulamisvesien virtausnopeudet ovat sedimentologisten tutki-musten perusteella todennäköisesti vaihdelleet rauhallisesta virtauksesta nopeaan (Ojala ym. 2022b). Ojalan ja muiden (2022b) mukaan Urjala-Akaan subglasiaalisen järven sulamisve-sireitit ovat esimerkkejä rauhallisen virtauksen muuttumisesta kanavamaiseksi eli voimakkaak-si yhteen uomaan kohdistuneeksi virtaukseksi.

Urjala-Akaan subglasiaalisen järven ja ny-kyisen Jalanti-järven kaakkoispuolelta alkava juomumoreenivyöhyke vaihettuu vähitellen Kuurilan murtooken-täksi (kuvat 1 ja 2: 2d). Véritén ja muiden (2022) mukaan juomumo-reenit muodostuvat rauhallisen virtauksen ai-kana, jolloin jäätikön virtausnopeus on alhai-nen ja subglasiaalisesta lähteestä virtavaa vettä on kauttaaltaan alueella. Jäätikön virtauksen kiihtyessä pohjaeroosio lisääntyy ja subglasiaa-



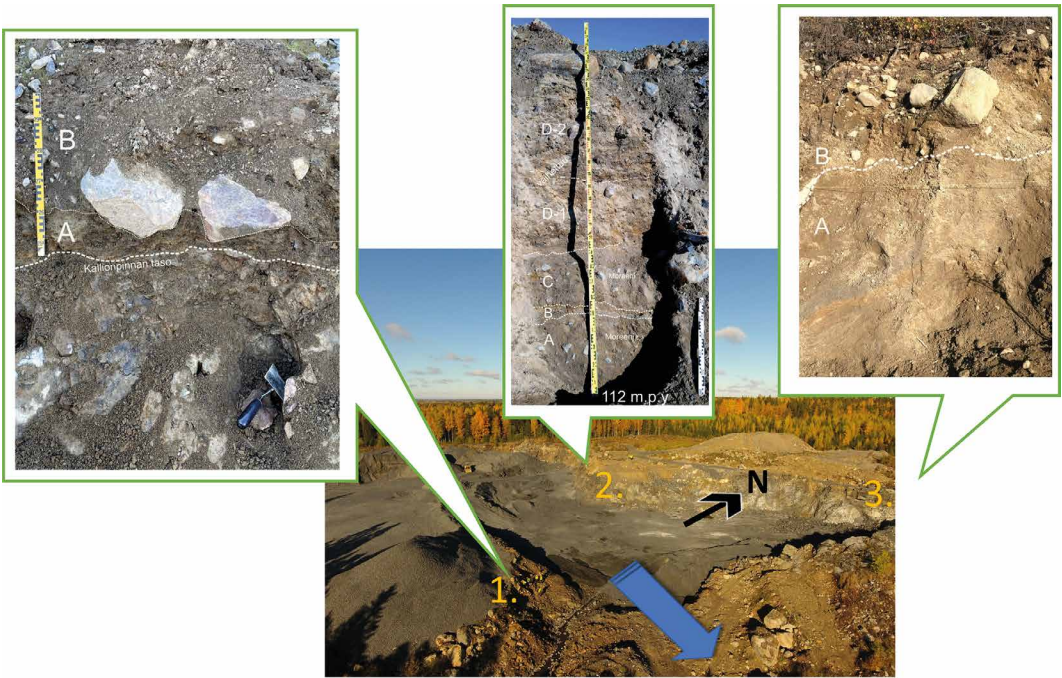
Kuva 2. Tärkeimmät geomorfologiset muodostumat, jotka osoittavat Urjala-Akaan subglasiaalisen järven sijaintia ja sen subglasiaalisten sulamisvesireittien kulkua. Korkeusmallikartoissa nähdään: Lontilan ulostulomurtookenttä (2a), sisääntulomurtookenttä Jouttunkulmassa (2b), Välikkilän delta (2c), Kuurilan ulostulomurtookenttä, drumliinikenttä ja purkauskanava Urjala-Akaan subglasiaalisen järven eteläpuolella (2e) sekä Pohjankankaan delta (2f). Sedimentologiset havainnot on tehty punaisen rastin kohdalla (2d). Pohjakartan lähde: LiDAR korkeusmalli, © Maanmittauslaitos, 2/2023.

Figure 2. Key geomorphological formations indicating the location of the Urjala-Akaa subglacial lake and its associated subglacial meltwater routes. In elevation model maps can be seen: output murtoo field of Lontila (2a), input murtoofield in Jouttunkulma (2b), Välikkilä delta (2c), drumlin field and output channel south from Urjala-Akaa subglacial lake (2e), and Pohjankangas delta (2f). Red cross marks sedimentological observations (2d). Background map source: LiDAR digital elevation model, © National Land Survey of Finland, 2/2023.

lisen veden virtaus kanavoituu yhtenäiseksi uomaksi (Ahokangas ym. 2021; Ojala ym. 2022b; Vérité ym. 2022). Virtausnopeuden kasvaessa juomumoreenit erodoituvat, joka johtaa murtoiden muodostumiseen erodoituneesta aineksesta (Vérité ym. 2022). Subglasiaalisesta järvestä tulevan kanavamaisen virtauksen ja juomumoreeneista erodoituvan aineksen yhteisvaikutus edesauttoivat Kuurilan murtookentän muodostumista (Ahokangas ym. 2021; Ojala ym. 2022b; Vérité ym. 2022). Tämä murtookenttä päättyy lopulta Äimäjärveen johtavaan harjuun.

Lontila-murtookenttä (kuvat 1 ja 2: 2a) indikoi vaihtoehtoisesta sulamisvesireitistä Urjala-Akaan subglasiaalisesta järvestä kohti jäätikön reunaa. Nämä, kuten muutkin tutkimusalueen murtoot, ovat jäätikön kulkusuuntaan nähden subglasiaalista järveä rajavien harjanteiden suojarinteellä – niin kuin on

Mäkisen ja muiden (2017) tutkimusalueella. Livingstonen ja muiden (2016) mukaan harjanteet voivat pidättää ja kerätä jäätikön pohjan sulamisvesiä. Vastaavasti tulvien aikana sulamisvedet purkautuvat harjanteen yli, jolloin virtaavan veden vaikutuksesta muodostuu murtoita (Livingstone ym. 2016; Vérité ym. 2022). Kyseiset murtoot voivat liittyä Livingstonen ja muiden (2016) kuvailemaan tulvimiseen eivätkä yhtäjaksoisen pohjasulamisen seurauksena muodostuvien juomumoreenien ja murtoiden muodostumiseen. Palmerin ja muiden (2015) mukaan vastaavanlainen äkillinen subglasiaalisen järven purkaus on havaittu myös Grönlannin jäätiköllä. Tällöin subglasiaalista allasta reunusti harjanne, jonka taakse vettä kerääntyä, kunnes se tulvi voimakkaasti harjanteen yli (Palmer ym. 2015). Palmerin ja muiden (2015) mukaan lämminpohjaisten jäätiköiden virtauksissa tällaiset tulvapurkauk-



Kuva 3. Sedimentologiset havainnot ja niiden sijainnit Pikku-Patavuoren louhoksella Kuurilan ulostulomurto kentän luoteispuolella. Sininen nuoli kuvastaa jäätikön etenemissuuntaa. Havainto 1 (vasemmalla): A-yksikkö hiekka-siltti-savilaminaatiota ja B-yksikkö massiivista sulamismoreenia. Havainto 2 (keskellä): A-yksikkö tiivistä ja massiivista moreenia (havainto 112 metriä merenpinnan yläpuolella), B-yksikkö laminoitunutta hienojakoista ainesta, C-yksikkö tiivistä ja massiivista moreenia ja D-yksikkö kerroksellisesta (D-1) massiiviseen (D-2) vaihtettavaa sulamismoreenia. Havainto 3 (oikealla): A-yksikkö kerroksellista rakennetta, jossa savi-hiekkalinssejä ja B-yksikkö kivistä ja massiivista sulamismoreenia. Kuvat: Perttu Heiskanen (havainto 1), Elmiina Huhtala (havainto 2), Antti Sainio (havainto 3) ja Kari Kajuutti (louhoskuva).

Figure 3. Sedimentological observations and locations of study sites in quarry of Pikku-Patavuori, northwest from Kuurila output murtoofield. Blue arrow represents direction of advancing ice sheet. Observation 1 (left): unit A consists of sand-silt-clay laminations and unit B is massive deglaciation till. Observation 2 (middle) unit A is dense and massive till (112 m above sea level), unit B consists of fine-grained laminations, unit C is dense and massive till, and unit D is deglaciation till changing gradually from layered (D-1) to massive (D-2). Observation 3 (right): unit A has layered structure with clay-sand lenses and unit B is rocky and massive deglaciation till. Photos: Perttu Heiskanen (observation 1), Elmiina Huhtala (observation 2), Antti Sainio (observation 3) and Kari Kajuutti (quarry photo).

set ovat yleisiä, ja kiihdyttävät harjanteen eroosiota.

Urjala-Akaan subglasiaalisen järven eteläreunassa oleva purkaukanava on muodostunut drumliinikentän reunalle (kuvat 1 ja 2: 2e). Murtooreitit eli murtojen muodostumisalueet sijaitsevat usein drumliinikenttien ja lineaatioalueiden läheisyydessä (Ahokangas ym. 2021), josta virtaus on jatkunut eteenpäin – tällä tutkimusalueella kohti kaakkoa. Urjala-Akaan subglasiaalinen järvi on vaikuttanut jäätikön virtausdynamiikkaan, jonka

seurauksena lineaatiot ovat erisuuntaisia subglasiaalisen järven luoteis- ja kaakkoispuolella (Tuunainen 2018). Sulamisvesimurtojen lisäksi Urjala-Akaan subglasiaalisen järven ja Jalanti-järven luoteispuolella sijaitsee subglasiaalisia sulamisvesireittejä ja niihin liittyviä murtookenttiä. Ahokankaan ja muiden (2021) esimerkkien mukaan nämä toimivat syöttökanavina subglasiaaliselle järvelle.

Varsinaisen murtooreitin varrelta tehdyt sedimentologiset tutkimukset osoittavat, että alueen maaperäkerrostumat koostuvat pää-

asiassa subglasiaalisista kanavasedimenteistä. Nämä kanavasedimentit vaihtelevat tiiviistä moreenista lajittuneeseen moreeniin, ja niitä on havaittu myös Ojalan ja muiden (2022b) tutkimuksessa. Subglasiaalisen kanavasedimentin päällä on löyhää liuku- tai pintasulamismoreenia, joka on seurausta jäätikön passiivitoimisesta ja lopullisesta sulamisesta (Ojala ym. 2022b). Urjala-Akaan subglasiaalisen järven pohjois-, itä- ja eteläpuolella olevat harjujaksot ovat todennäköisesti muodostuneet aika-transgressiivisesti eli jäätikön perääntyessä (Greenwood ym. 2016; Tuunainen 2018; Ojala ym. 2022b). Harjujaksot esiintyvät Urjala-Akaan subglasiaalisen järven ympärillä, sillä hydraulinen potentiaali on ohjannut ne kohti negatiivista gradienttia eli tässä tapauksessa kohti subglasiaalisen järven reunoja (Greenwood ym. 2016; Tuunainen 2018).

Syöttömurtoot Urjala-Akaan subglasiaalisen järven luoteispuolella ovat muodostuneet noin 45–50 km päähän Salpausselkä III:sta ja Kuurila- ja Lontila-murtookennät eli subglasiaalisen järven ulostulomurtoot 40–45 km päähän Salpausselkä II:sta. Tämä on tyypillinen etäisyys murtoiden muodostumispaikalle jäätikön reuna-asehasta (Ojala ym. 2019). Kyseinen etäisyys viittaa Ojalan ja muiden (2019) tutkimukseen perustuen siihen, että subglasiaalisen järven virtausta on todennäköisesti tapahtunut jo toisen Salpausselän muodostuessa. Kolmannen Salpausselän muodostuessa sulavesien määrä on mahdollisesti lisääntynyt, jolloin syöttömurtoiden määrä on kasvanut Urjala-Akaan subglasiaalisen järven luoteispuolella (Ojala ym. 2019).

Alueen harjut ovat muodostuneet lopullisen sulamisen aikana, jolloin jäätikkö on perääntynyt lähes yhtäjaksoisesti (Ojala ym. 2019). Harjut mukailevat samoja sulamisvesireittejä murtookenntien kanssa, joten Urjala-Akaan subglasiaalinen järvi on toiminut ainakin osittain näiden harjujaksojen sulamisvesilähteenä. Jäätikön nopeasta sulamisesta huolimatta, harjujen keskellä olevat Pohjakan-

kaan ja Välikkälän deltat indikoivat mahdollisesta lyhytaikaisesta sulamisen hidastumisesta. Tällöin kyseiset vedenpinnan tasoon tai sen lähelle kehittyneet sanduri-deltamuodostumat ovat ehtineet kehittyä.

Urjala-Akaan subglasiaalisen järven sulamisvesireittien ja alueen maaperämuodostumien täsmällistä ikäsuhdetta ja muodostumisjärjestystä on vaikeaa määrittää. Luultavasti ensimmäisenä on muodostunut osa subglasiaalisen järven sisäänvirtausmurtoista. Juomumoreenivyöhyke on muodostunut seuraavaksi, sillä alue on topografialtaan tasaista, jäätikön virtausnopeus on ollut hidas ja subglasiaalisen veden määrä on ollut vähäinen. Sulamisvesireitit ja niihin liittyvät murtookenntät ovat muodostuneet jään reunan tullessa lähemmäksi ja subglasiaalisen järven sulamisvesitoiminnan lisääntyessä. Drumliinikentän viereistä sulamisvesireittiä sekä Lontila- ja Kuurila-murtookennttien muodostumisaikasuhdetta on hankalaa arvioida, sillä tulvajaksojen ajoittaminen on LiDAR-aineiston pohjalta haasteellista. Luultavammin Lontila-murtookennttä ja drumliinikentän viereinen sulamisvesireitti ovat muodostuneet ennen Kuurila-murtookennttää, sillä tulviminen on kohdistunut subglasiaalisen järven ympäröimään harjanteeseen ennen kauempana olevaa Kuurila-murtookennttää. Lontilan sulamisvesireitti on luultavasti yhtynyt juomumoreenivyöhykkeeseen, mutta yhteyttä Kuurila-murtookennttään on vaikeaa todentaa. Luultavasti Kuurila- ja Lontila-murtookenntät sekä drumliinikentän viereinen reitti ovat olleet erillisiä sulamisvesireittejä Urjala-Akaan subglasiaaliselle järvelle. Maaperämuodostumista nuorimpia ovat alueen harjut, jotka ovat jäätikön lopullisen sulamisen aikana kerrostuneet kaikkien muiden muodostumien päälle.

Sulamisvesien purkauksista on vaikeaa hankkia tietoa, mutta kairaamalla Jalanti-järven pohjasedimenttejä voitaisiin asiaa selvittää. Sedimenttitutkimukset voisivat tuoda lisätietoa myös Urjala-Akaan subglasiaalisen

järven kehityksestä, kuten sulavesipulssien voimakkuuksista ja toistuvuuksista sekä subglasiaalisen tulvimisen vaikutuksista alueen glasiaalihydrologiaan ja -dynamiikkaan deglasiatation aikana.

Subglasiaaliset järvet kertovat jäätiköiden sulamisesta

Havainto Urjala-Akaan subglasiaalisen järven olemassaolosta on merkittävä, sillä vastaavanlaisia jäätikön alaisia järviä ei ole Suomesta tai koko Fennoskandian jäätiköityneiltä alueilta aiemmin kuvattu. Myöskään niiden glasiaalihydrologista kytköstä murtooreitteihin ei ole tarkemmin selvitetty (Tuunainen 2018). Antarktiksien ja Grönlannin alueiden esimerkit osoittavat, että subglasiaalisista järvistä ja niiden sulamisvesireiteistä tehdyt tutkimukset antavat tärkeää tietoa, jota voidaan hyödyntää osana nykyisten jäätiköiden sulamisen ja virtausdynamiikan mallintamista (Greenwood ym. 2016; Livingstone ym. 2016). Hydrologia on jäätiköiden ja niihin liittyvien paleoglasialogisten mallien vähiten tutkittu osa-alue, joten tieto jäätikönalaisen veden liikkeistä on arvokasta mallinnuksen kehittymisen kannalta (Livingstone ym. 2016).

Stroevenin ja muiden (2016) mukaan nykyisten suurten jäätiköiden sulamista ennustetaan erilaisilla malleilla, jotka pohjautuvat Euroopan ja Pohjois-Amerikan suurten muinaisjäätiköiden deglasiatiodynamiikkaan. Fennoskandian jäätikön deglasiatiodynamiikka on ollut monimutkainen ja vetäytymisnopeudet ovat vaihdelleet alueellisista pinnanmuodoista sekä jäätikön merellisestä tai mantereisesta sijainnista johtuen (Stroeven ym. 2016). Greenwoodin ja muiden (2016) mukaan yksi merkittävä deglasiatation dynamiikkaan vaikuttava tekijä on subglasiaaliset sulamisvesiverkostot. Näiden alueellisesta ja ajallisesta aktiivisuudesta sekä vuorovaikutuksesta maankamaraan ja jäätikön kanssa tiedetään vielä vähän (Greenwood ym. 2016).

Antarktiksien ja Grönlannin jäätiköiden tarkentuvat sulamisvesimallit edesauttavat ymmärtämään meneillään olevan nopean ilmaston lämpenemisen vaikutuksia, kuten globaalin merenpinnan tason muutosten ennustamista tulevaisuudessa (Greenwood ym. 2016; Livingstone ym. 2016). Julkaistua tutkimustietoa murtooreittien morfolitogeneettisestä luonteesta ja muodostumien glasiaalihydrologisesta monimuotoisuudesta on vielä niukasti, joten Urjala-Akaan subglasiaalisen järven tunnistaminen on myös Fennoskandian jäätiköityneen alueen maaperämuodostumien synnyn kannalta arvokas.

Kiitokset

Tutkimusaineisto kerättiin Turun yliopiston Maantieteen ja geologian laitoksen yhteisellä kenttäkurssilla syksyllä 2022. Kiitos aineiston keräämisestä ja keskusteluista kurssilaisille: Franziska Berktold, Antoine Garreau, Elmiina Huhtala, Severi Kolehmäinen, Erkki Viitanen, Marcus Petäjä, Mariana Kobryn, Lise Goosens, Anniina Vuorinen ja Juho Vuorio.

ANTTI SAINIO
(ajsain@utu.fi)

PERTTU HEISKANEN
(perttu.k.heiskanen@utu.fi)

ANTTI E. K. OJALA
(antti.e.ojala@utu.fi)

JONI MÄKINEN
(jonmak@utu.fi)

Antti Sainio ja Perttu Heiskanen ovat maaperägeologian maisteriopiskelijoita Turun yliopistossa. Antti E. K. Ojala on maaperägeologian professori Turun yliopiston Maantieteen ja geologian laitoksella. Hän on työskennellyt maaperän ominaispiirteiden ja eri kerrostumisympäristöjen parissa ja hyödyntänyt LiDAR-korkeusmalleja mm. Itämeren kehityksen, maaperän eri moreenimuotojen, glasiaalidynamiikan sekä

jääkauden jälkeisten kallioperän siirrosten tutkimisessa. Joni Mäkinen toimii yliopistolehtorina Turun yliopiston Maantieteen ja geologian laitoksella. Hän on sedimentologian ja glasiaaligeologian asiantuntija ja tutkinut maaperän rakennetta ja kerrosjärjestystä erityisesti pohjaveden ja maa-aineksen käyttöä varten.

Summary

How subglacial lakes erupted – Urjala-Akaa subglacial lake as an example

Subglacial lakes play an essential role in the dynamics of continental glaciers by rhythmizing the movement of meltwater through outbursts and, in turn, by collecting and holding meltwater from the glacier bed when melting is less intense. Numerous subglacial lakes have been located around the world, including in Greenland and Antarctica, but the formerly glaciated areas, such as Finland, the locations of subglacial lakes have not been comprehensively documented and it has been difficult to obtain research data to support their location.

Murtoo is a new type of usually triangular subglacial formation discovered using LiDAR technology, which is essentially related to meltwater routes and subglacial lakes. The elevation models generated by high quality LiDAR data have significantly contributed to morpholithogenetic research and have enabled the mapping of glaciated terrain.

A potential subglacial lake has been located in the Urjala-Akaa area using LiDAR data, which is connected to several subglacial meltwater routes, murtoo fields and eskers around the subglacial lake (Fig. 1). The geomorphological formations (Fig. 2) and sedimentological evidence along the subglacial meltwater route (Fig. 3) support the existence and location of the Urjala-Akaa subglacial lake and provide information on the deglaciation history of the Baltic Sea Ice Lobe.

The observation of the existence of the

Urjala-Akaa subglacial lake is significant, as similar subglacial lakes have not been described in Finland or in glaciated areas throughout Fennoscandia. In addition, their glacial-hydrological or dynamic link to murtoo routes has not been further investigated. The examples from Antarctica and Greenland show that studies of subglacial lakes and their meltwater routes provide important information that can be used as a part of modelling the melting and flow dynamics of existing glaciers. Hydrology is the least known aspect of glaciology and related paleoglaciological modelling. Therefore, knowledge of subglacial water movements is valuable for the development of modelling. In turn, refined meltwater models of the Antarctic and Greenland glaciers will contribute to predicting future changes in global sea level. Published research on the morpholithogenetic pattern of murtoo routes and the diversity of formations in relation to glacial hydrology is still scarce, making this discovery also valuable for the formation of glaciated region of Fennoscandia.

Lähdeluetelo

- Ahokangas, E., Ojala, A. E. K., Tuunainen, A., Valkama, M., Palmu, J.-P., ym., 2021. The distribution of glacial meltwater routes and associated murtoo fields in Finland. *Geomorphology* 389, 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.107854>
- Björnsson, H., 2003. Subglacial lakes and jökulhlaups in Iceland. *Global and Planetary Change*, 35, 255–271. [https://doi.org/10.1016/S0921-8181\(02\)00130-3](https://doi.org/10.1016/S0921-8181(02)00130-3)
- Filina, I. Y., Blankenship, D. D., Thoma, M., Lukin, V. V., Masolov, V. N. & Sen, M. K., 2008. New 3D bathymetry and sediment distribution in Lake Vostok: Implication for pre-glacial origin and numerical modeling of the internal processes within the lake. *Earth and Planetary Science Letters* 276, 106–114. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.09.012>
- Greenwood, S. L., Clason, C. C., Helanow, C. & Margold, M., 2016. Theoretical, contemporary observational and palaeo-perspectives on ice sheet hydrology: Processes and products. *Earth-Science Reviews* 155, 1–27. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.01.010>

- Jordan, T. A., Ferraccioli, F., Corr, H., Graham, A., Armadillo, E. & Bozzo, E., 2010. Hypothesis for mega-outburst flooding from a palaeo-subglacial lake beneath the East Antarctic Ice Sheet. *Terra Nova* 22, 283–289. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.2010.00944.x>
- Kajuutti, K., Mäkinen, J. & Palmu, J.-P., 2016. LiDAR-based interpretation of deglacial dynamics in SW Finland. Abstracts of the 32nd Nordic Geological Winter Meeting, 314 s.
- Kuhn, G., Hillenbrand, C. D., Kasten, S., Smith, J. A., Nitsche, F. O., ym., 2017. Evidence for a palaeo-subglacial lake on the Antarctic continental shelf. *Nature Communications* 8, 15591. <https://doi.org/10.1038/ncomms15591>
- Kwok, R., Siegert, M. & Carsey, F., 2000. Ice motion over Lake Vostok, Antarctica: Constraints on inferences regarding the accreted ice. *Journal of Glaciology* 46, 689–694. <https://doi.org/10.3189/172756500781832710>
- Lewington, E. L., Livingstone, S. J., Clark, C. D., Sole, A. J. & Storrar, D. R., 2020. Large-scale integrated subglacial drainage around the former Keewatin Ice Divide, Canada reveals interaction between distributed and channelized systems. *EGU General Assembly 2020*, EGU2020-5861. <https://doi.org/10.5194/tc-2020-10>
- Livingstone, S. J., Clark, C. D., Piotrowski, J. A., Tranter, M., Bentley, M. J., ym., 2012. Theoretical framework and diagnostic criteria for the identification of palaeo-subglacial lakes. *Quaternary Science Reviews* 53, 88–110. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2012.08.010>
- Livingstone, S. J., Utting, D. J., Ruffell, A., Clark, C. D., Pawley, S., ym., 2016. Discovery of relict subglacial lakes and their geometry and mechanism of drainage. *Nature Communications* 7, 11767. <https://doi.org/10.1038/ncomms11767>
- Mäkinen, J., Kajuutti, K., Palmu, J.-P., Ojala, A., & Ahokangas, E., 2017. Triangular-shaped landforms reveal subglacial drainage routes in SW Finland. *Quaternary Science Reviews* 164, 37–53. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2017.03.024>
- Ojala, A. E. K., Peterson, G., Mäkinen, J., Johnson, M. D., Kajuutti, K., ym., 2019. Ice-sheet scale distribution and morphometry of triangularshaped hummocks (murtoos): a subglacial landform produced during rapid retreat of the Scandinavian Ice Sheet. *Annals of Glaciology* 60, 115–126. <https://doi.org/10.1017/aog.2019.34>
- Ojala, A. E. K., Mäkinen, J., Hovikoski, J., Palmu, J.-P., Ahokangas, E., ym., 2022a. Murtoot – mitä ne ovat? *Geologi* 74 (6), 204–218.
- Ojala, A. E. K., Mäkinen, J., Kajuutti, K., Ahokangas, E., Palmu, J.-P., 2022b. Subglacial evolution from distributed to channelized drainage: Evidence from the Lake Murtoo area in SW Finland. *Earth Surface Processes and Landforms* 47, 1–20. <https://doi.org/10.1002/esp.5430>
- Palmer, S., McMillan, M. & Morlighem, M., 2015. Subglacial lake drainage detected beneath the Greenland ice sheet. *Nature Communications* 6, 8408. <https://doi.org/10.1038/ncomms9408>
- Pattyn, F., 2008. Investigating the stability of subglacial lakes with a full Stokes ice-sheet model. *Journal of Glaciology* 54, 353–361. <https://doi.org/10.3189/002214308784886171>
- Robin, G. D. Q., Swithinbank, C. W. M. & Smith, B. M. E., 1970. Radio echo exploration of the Antarctic ice sheet. *International Association of Scientific Hydrology Publication* 86, 97–115.
- Sanaksenaho, R., 2019. Maaaperän hydraulisen johtavuuden kustannustehokas määrittäminen pohjavesiputkista Lapin alueella. *Ympäristötekniikka, Oulun yliopisto, diplomityö*, 57 s.
- Shackleton, C., Patton, H., Hubbard, A., Winsborrow, M., Kingslake, J., ym., 2018. Subglacial water storage and drainage beneath the Fennoscandian and Barents Sea ice sheets. *Quaternary Science Reviews* 201, 13–28. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2018.10.007>
- Sharpe, D. R., Lesemann, J. E., Knight, R. D. & Kjarsgaard, B. A., 2021. Regional stagnation of the western Keewatin ice sheet and the significance of meltwater corridors and eskers, northern Canada. *Canadian Journal of Earth Sciences* 58, 1005–1026. <https://doi.org/10.1139/cjes-2020-0136>
- Stroeven, A. P., Hättestrand, C., Kleman, J., Heyman, J., Fabel, D., ym., 2016. Deglaciation of Fennoscandia. *Quaternary Science Reviews* 147, 91–121. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2015.09.016>
- Tuunainen, A., 2018. Subglasiaaliset järvet osana Lounais-Suomen glasiaalidynamiikkaa? Maantieteen ja geologian laitos, Turun yliopisto, Turku, pro gradu -tutkielma, 110 s.
- Vérité, J., Ravier, É., Bourgeois, O., Bessin, P., Livingstone, S. J., ym., 2022. Formation of murtoos by repeated flooding of ribbed bedforms along subglacial meltwater corridors. *Geomorphology* 408, 1–24. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2022.108248>