

Jäätikön sulamisvesien jäljet Satakunnan kumpumoreenialueella: potentiaalisten paleoblisterien kartoitus

MANDI HANNULA, KAROLIINA KORKIAKOSKI, SUVI RYTTÄRI,
VILHELMIINA VIRTANEN, JONI MÄKINEN JA ANTTI E. K. OJALA

Mäkinen ja muut (2023) kuvasivat ensimmäisenä maailmassa blisterin jättämän jäljen (eng. *water blister mark*) Fennoskandian jäätikön muovaamalta Satakunnan kumpumoreenialueelta, jossa on kulkenut kaksi merkittävää jäätikönalaista sulamisvesireittiä (Mäkinen ym. 2017; Ahokangas ym. 2021). Englanninkielisissä artikkeleissa sulamisvesirakkulan eli blisterin maaperään muodostamasta pyöreästä jäljestä on käytetty termiä *water blister mark*. Vakiintunutta suomenkielistä termiä tälle muodostumalle ei vielä ole. Tämän vuoksi tässä artikkelissa käytetään tämän tutkimuksen tekijöiden mielestä havainnollistavinta termiä paleoblisteri ja englanninkielisessä tiivistelmässä termiä *paleoblister*, kun puhutaan blisterin jättämästä jäljestä maaperässä. Muita termivaihtoehtoja blisterin jättämälle jäljelle ovat mm. rohju tai rakku. Termistä voi käydä avointa keskustelua Tieteen termipankin verkkosivuilla: <https://tieteentermipankki.fi/wiki/Geologia:paleoblisteri>.

Dowin ja muiden (2015) mukaan paleoblisteri syntyy, kun vettä purkautuu nopeasti ja kovalla paineella jäätikön pinnalta jäätikkökaivoa tai halkeamaa pitkin maanpinnalle. Vesi kovertaa jäätikön alle maaperään laajenevan blisterin, ennen kuin veden kasvava paine muodostaa sen ympärille säteittäiset purkautumiskanavat. Grönlannissa tehdyssä tutkimuksessa Das ja muut (2008) havaitsivat blisterin nostavan jäätikköä ylöspäin noin metrin. Dowin ja muiden (2015) mukaan suuret vesimäärät poistuvat jäätikön alla pyörteisen

blisterin ja hajautuneen sulamisvesiverkoston kautta. Grönlannin mannerjäätiköllä havaitun blisterin halkaisijaksi on mitattu jopa neljä kilometriä (Lai ym. 2021). Blisterit sijoittuvat Grönlannissa topografiaan painanteisiin, jotka ohjaavat myös jäätikön pinnan painaumuksia ja niihin muodostuvia supraglasiaalisia järviä (Doyle ym. 2013; Lai ym. 2021). Suomessa sijaitsevien paleoblisterien esiintyvyydestä ei ole Mäkisen ja muiden (2023) julkaisun lisäksi muita tutkimuksia. Suomen ja Grönlannin maankamaran topografia ja mannerjäätikön dynamiikka eroavat toisistaan, minkä vuoksi paleoblisterien sijaintiin vaikuttavat todennäköisesti erilaiset tekijät (Mäkinen ym. 2023).

Tämänhetkisen tiedon (Mäkinen ym. 2023) mukaan paleoblisterin pyöreästä jäljestä lähtee useita säteittäisiä jäätikön sulamisveden purkautumiskanavia, joista suurimmat suuntautuvat paleoblisteristä jäätikön painegradientin mukaisesti alavirtaan eli kohti jään reunaa. Tämän lisäksi paleoblisterillä on muitakin tunnistettavia piirteitä: esimerkiksi Mäkisen ja muiden (2023) löytämässä paleoblisterissä jäätikön suhteen ylävirran puolella sijaitsee sulamisvesireittiin viittaava murtookenttä ja alavirran puolella on voimakkaasti huuhtoutuneita kumpumaisia moreenimuotoja ja niiden jatkeena harjuja. On myös todennäköistä, että paleoblisterit voivat tuhoutua tai muokkautua jäänalaisissa prosesseissa, jolloin niiden säilymispotentiaali on heikko.

On hyvin todennäköistä, että paleoblisteriteitä on muodostunut Fennoskandian mannerjäätikön vetäytyessä ja sulaessa. Parhai-

ten löydettävissä olevat sekä hyvin säilyneet paleoblisterit sijaitsevat mahdollisesti jäätikönaisten sulamisvesireittien läheisyydessä (Ahokangas ym. 2021) ablaatiovyöhykkeellä. Näillä alueilla jään pintasulamminen on ollut voimakasta ja suuri määrä vettä on valunut nopeasti supraglasiaalisista järivistä jäätikön pohjalle (Mäkinen ym. 2023). Grönlannissa joidenkin supraglasiaalisten järvien on havaittu tyhjentävän yhdessä päivässä niiden pohjalla sijaitsevien pystysuorien jäätikkökaivojen kautta (Das ym. 2008). Grönlannin jäätikön North Laken alueella havaittiin, että vettä valui keskimäärin 8700 m³/s alle kahden tunnin aikana. Valunnan kanssa samaan aikaan havaittiin blisterin aiheuttama jäätikön kohoaminen ja horisontaalinen siirtymä. Jäätikön laskeutuminen havaittiin valuntaa seuraavan vuorokauden aikana. Näiden tekijöiden perusteella voidaan olettaa, että sulamisvesi purkautuu blisteristä jäätikön alle. Vanhojen jäätikköjärvien pohjalla on lisäksi havaittu halkeamia, mikä myös tukee teoriaa nopeasta sulamisvesivalunnasta.

Jäätikkökaivot läpäisevät jäätikön koko sen paksuudelta ja kuljettavat vettä jäätikön pinnalta aina maanpinnalle saakka. Aikaisemat glasiaalihydrologiset mallit ovat esittäneet jäätikkökaivot sylinterin tai kartion muotoisina, halkaisijaltaan muutamista senttimetreistä kymmeneen metreihiin (Greenwood ym. 2016). Kuitenkin Trunzin ym. (2022) tutkimuksen mukaan jäätikkökaivot voivat olla hyvinkin monimutkaisen muotoisia, erityisesti jäätikön yläosissa. Jäätikkökaivon rakenne vaikuttaa sulamisvesien valunnan määrään ja nopeuteen: mitä monimutkaisempi jäätikkökaivon rakenne on, sitä enemmän sulamisvesiä voi varastoitua jäätikön sisään. Jos jäätikkökaivo on rakenteeltaan yksinkertainen jäätikön päältä pohjalle kulkeva tunneli, vesi virtaa nopeasti eikä ehdi varastoitua jään sisään. Grönlannin jäätiköllä on havaittu, että lähes kaikki jäätikön pinnalla muodostuva sulamisvesi valuu jäätikkökaivoihin (Smith ym. 2015). Tämä

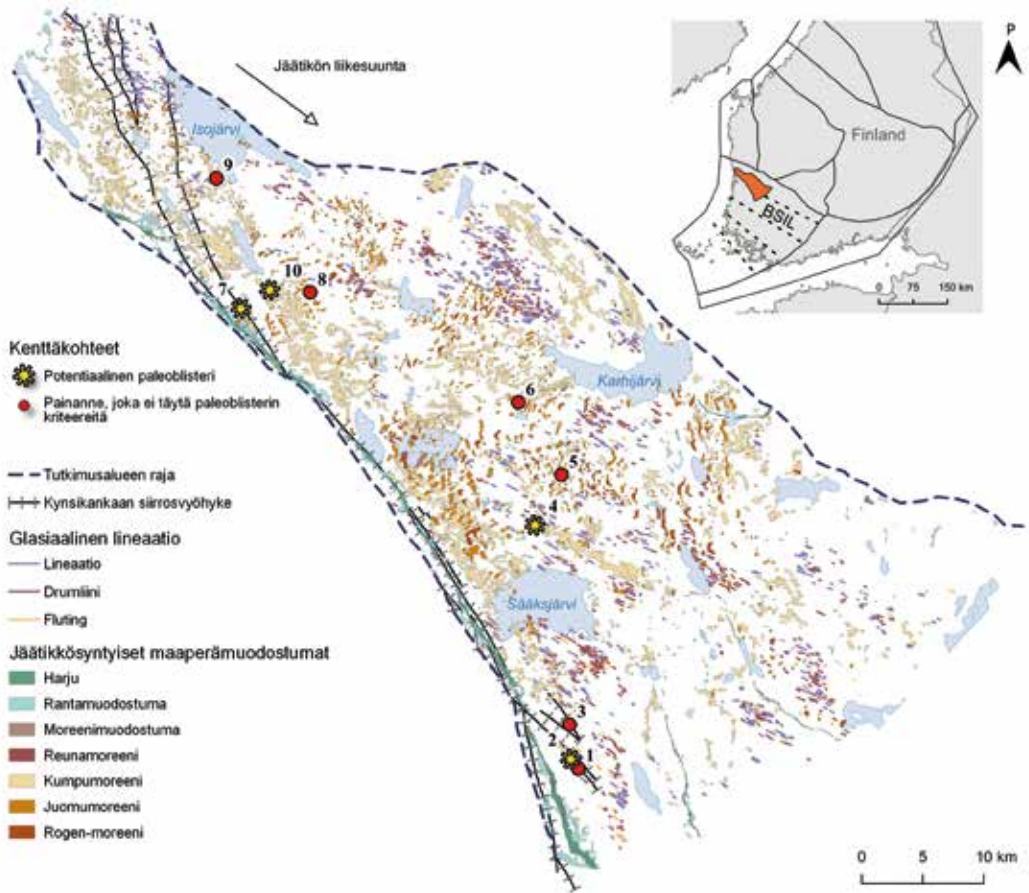
osoittaa, että jäätikkökaivot ovat hyvin merkittävä osa jäätikön sulamisvesijärjestelmää (Gulley ym. 2012). Grönlannissa jäätikkökaivoja on havaittu noin yksi neliökilometriä kohden (Colgan & Steffen 2009).

Tämän artikkelin tarkoituksena on tarkastella potentiaalisten paleoblisterien yleisyyttä ja esiintymistä Satakunnan subglasiaalisella sulamisvesireitillä (kuva 1), missä on toistaiseksi tutkittu vain yhtä muodostumaa (Mäkinen ym. 2023). Tutkimuksen tavoitteena on selvittää, millaisia paleoblisterit ovat morfologialtaan, miten ne sijoittuvat suhteessa ympäröivään geologiaan, topografiaan, sulamisvesireitistöön ja muihin subglasiaalisiin muodostumiin sekä mitkä tekijät ovat mahdollisesti vaikuttaneet niiden sijoittumiseen.

Satakunnan subglasiaalisen sulamisvesireitin geomorfologiset ominaisuudet

Viimeisimmän mannerjäätikön vetäytyessä nuoremman dryaskauden päättymisen aikaan noin 12 000 vuotta sitten, Itämeren kielekevirta (*Baltic Sea Ice Lobe*, BSIL) alkoi vetäytyä luoteesta kaakkoon (Palacios ym. 2022). Tämän virtauskielekkeen sisältä on tunnistettu Loimaan osakieleke (*Loimaa sublobe*, BSIL-L) (Mäkinen 2003; Palmu ym. 2021), missä Satakunnan laajan kumpumoreenialueen yhteyteen muodostui yksi Suomen laajimmista jäänalaisista sulamisvesireitistöistä. Tutkimusalue on rajattu tälle alueelle. Kyseinen kumpumoreenialue rajautuu lounaassa Porin Ahlalaisista Forssan kautta III Salpausselälle ulottuvaan harjujaksoon (Haavisto-Hyvärinen ym. 1990) ja sen itäpuolella Sääksjärvelle asti jatkuvaan, runsaasti murtoo-muodostumia sisältävään jäänalaiseen sulamisvesireittiin.

Kumpumoreenimuodostumat ovat tutkimusalueen hallitsevimpiä maaperämuodostumia. Ne muodostavat geomorfologisesti yhtenäisen alueen, jossa esiintyy myös muita



Kuva 1. Tutkimusalueen sijainti Satakunnassa, kohti kaakkoa liikkuvan Itämeren kielekevirran (BSIL) pohjoisosassa ja suhteessa alueen jäätikkösyntyisiin maaperämuodostumiin. Jään liikesuunta tutkimusalueella esittää viimeisintä jäätikön virtaussuuntaa nuoremman dryaskauden jälkeen (Kejonen ym. 1988). Neljä potentiaalista paleoblisteriä, numerot 2, 4, 7 ja 10 (keltainen tähti), sijaitsevat tutkimusalueen lounaisosissa. Punaisilla pisteillä on merkitty muiden maastotarkastettujen kohteiden sijainnit (numerot 1, 3, 5, 6, 8 ja 9). Pohjakartta: GTK:n Jäätikkösyntyiset maaperämuodostumat aineistoa, GTK Avoin lisenssi Nimeä CC 4.0.

Figure 1. The location of the study area in Satakunta, in the northern part of the Baltic Sea Ice Lobe (BSIL) moving southeast and related to the area's glacial features. The direction of the ice flow depicts the most recent flow direction after the Younger Dryas (Kejonen et al. 1988). Four potential water blister marks, numbers 2, 4, 7 and 10 (yellow stars), are located in the southwestern part of the study area. Other studied sites are marked with red dots (1, 3, 5, 6, 8 and 9). Background map: Geological Survey of Finland / GTK open license CC BY 4.0, including GTK's Glacial features data.

jäätikkösyntyisiä geomorfologisia muotoja. Kumpumoreenit ovat muodostuneet pääosin jäätikönalaisesti aktiivisen jään virtauksen ja veden lajittelevan vaikutuksen seurauksena (Putkinen ym. 2017). Tutkimusalueella on neljä murtokenttää, joiden läheisyydessä on

sekä juomu- että Rogen-moreeneja. Alueella ei ole Ahlainen-Forssa harjujakson lisäksi muita merkittäviä harjuja, mutta Loimaan osakielekettä rajaa sen ja Itämeren kielekevirran väliseen saamaan syntynyt Porin-Someron harjujakso (kuva 1). Tutkimusalueen harjut

ovat suhteellisen eheitä, mutta paikoitellen järvet rikkovat harjujen selänneitä. Jäätikön liikesuunnassa sulamisvesireittien jatkeena olevat harjut alkavat suurin piirtein Kokemäen Sääksjärven ja Lavian Karhijärven muodostamalta linjalta itään ja kaakkoon.

Kallioperältään tutkimusalue on monipuolinen (Lehtinen ym. 2005). Alueella esiintyy eniten gneissia ja graniittia, mutta näiden lisäksi erityispiirteinä ovat lounaispuolella sijaitseva Satakunnan hiekkakivivajoama ja sitä halkovat oliviinidiabaasijuonet. Alueen lounaisreunalla sijaitsee Kynsikankaan siirrosvyöhyke (Paananen & Kuivamäki 2007). Hiekkakivivajoaman ohella tällaiset kallioperän heikkousvyöhykkeet voivat vaikuttaa jäätikön liikkeisiin, jäätikön railoutumiseen, subglasiaalisten sulamisvesien kanavoitumiseen ja näin jäätikön dynamiikkaan sekä lopulta koko alueen geomorfologiaan.

Potentiaalisten paleoblisterien tunnistaminen

Tutkimuksen pääaineistoina ovat Geologian tutkimuskeskuksen (GTK) ja Maanmittauslaitoksen laserkeilausaineistoon (LiDAR eli *Light Detection and Ranging*) perustuvat rinnevarjosteet sekä digitaalinen korkeusmalli (*Digital Elevation Model*, DEM). LiDAR-tekniologia perustuu laserpulssien lähettämisen ja niiden paluuseen kuluvan ajan mittaamiseen (Dassot ym. 2011). LiDAR-aineisto pohjautuu digitaaliseen kahden metrin korkeusmalliin, jonka vertikaalinen resoluutio on noin 0,3 metriä (Maanmittauslaitos 2023). Geologian tutkimuskeskuksen rinnevarjoste on tehty monisuuntavarjostuksella optimoiden Suomen geomorfologiaa parhaiten kuvaavan esitystavan. Rinnevarjosteiden visualisointien välillä on eroja muodostumien piirteiden kuvautumisessa, joten tutkimuksessa käytettiin molempia mahdollisimman monipuolisen kuvan saamiseksi. Tutkimusalue käytiin sys-

temaattisesti läpi neliökilometriruuduittain hyödyntäen rinnevarjosteita mittakaavoissa 1:15 118 ja 1:7 559. Näiden lisäksi karttatulokinnassa hyödynnettiin Geologian tutkimuskeskuksen Maankamara-palvelun karttatasoja (11/2023), joista tärkeimpiä olivat Jäätikkösyntyiset maaperämuodostumat, Maaperä 1:20 000 / 1:50 000 ja Kallioperä 1:1 000 000.

Potentiaalisten paleoblisterien tunnistaminen ja luokittelu perustuivat Mäkisen ja muiden (2023) aiemmin esittämiin tuntomerkkeihin ensimmäisestä Suomessa löydetyistä paleoblisteristä. Näitä ovat saven ja turvekerroksen peittämä pyöreähkö painauma ja siitä lähtevät säteittäiset purkautumiskanavat, joista selkeimmin erottuva purkauskanava suuntautuu kaakkoon. Lisäksi pääpurkauskanavan puolella maastossa havaittiin laajempia vesieroosion jälkiä sekä selviä geomorfologisia muutoksia sulamisvesireitin kerrostumisissa. Kyseisessä paleoblisterissä havaittiin myös jäätikön tulosuunnan puolella huuhtoutunutta lohkariekkkoa.

Näiden kriteerien pohjalta tutkimusaluetta tarkasteltiin kaukokartoituksen avulla, ja valikoitiin kohteet maastotarkastuksiin. Jokaiselle kohteelle laskettiin pinta-ala ja mitattiin halkaisija. Pinta-ala määritettiin kunkin painauman reunojen mukaisesti, ja halkaisija mitattiin jäätikön liikkeen suuntaisesti. Lisäksi kohteiden väliset etäisyydet mitattiin jäätikön liikesuunnan mukaisesti. Kymmenen kohteen maastotarkastukset (kuva 1) tehtiin kahtena päivänä (7.11.2023 ja 14.11.2023) Kokemäellä, Ulvilassa, Porissa, Noormarkussa ja Pomarkussa tutkimusalueen lounaisen sulamisvesireitistön läheisyydessä. Maastossa GPS-laitteella mitattiin huuhtoutuneiden lohkariekkokojen ja maaperäpiikillä tai venäläisellä suokairalla tehtyjen maaperähavaintojen sijaintitiedot. Lisäksi valokuvattiin tärkeitä geomorfologisia piirteitä ja otettuja näytteitä. Maaperäkairauksia tehtiin pääosin painanteissa sekä säteittäisesti lähtevien kanavamaisten muotojen pohjissa. Näytteistä tarkasteltiin

turpeen paksuutta sekä maaperän kerrosrakennetta ja ainesta. Lisäksi kolmessa kohteessa tehtiin kairauksia myöhemmin (16.4.2024).

Tunnistetut potentiaaliset paleoblisterit ja niitä yhdistävät kriteerit

LiDAR-aineistosta löydettiin 10 mahdollisesti paleoblisteriin viittaavaa muodostumaa, jotka sijoittuvat tutkimusalueen lounaisen sulamisvesireitin läheisyyteen (kuva 2). Maastotarkastusten perusteella näistä neljä on potentiaalisia paleoblisteriteitä, joiden pinta-alat vaihtelivat 0,74–15,61 hehtaarin ja halkaisijat 102,2–450,3 metrin välillä. Mahdollisia paleoblisteriteitä hylättiin maastotarkastusten perusteella muun muassa selkeiden säteittäisten purkauskanavien puuttumisen, huuhtoutumattoman moreenin ja hajanaisen lohkaraisuuden tai sen puuttumisen takia. Muutama kohde jäi epäselväksi, sillä paleoblisterien säilyvyys voi olla heikko (Mäkinen ym. 2023) tai niitä voi olla vaikea erottaa heikommalla paineella ja pienemmällä vesimäärällä tyhjentyneen jäätikkökaivon pohjasta. Monissa kohteissa näkyi viitteitä vesieroosiosta, mutta ne vaikuttivat olevan jäätikön sulamisveden läpivirtauspaikkoja tai vain sattumalta pyöreähköjä kalliopainauksia.

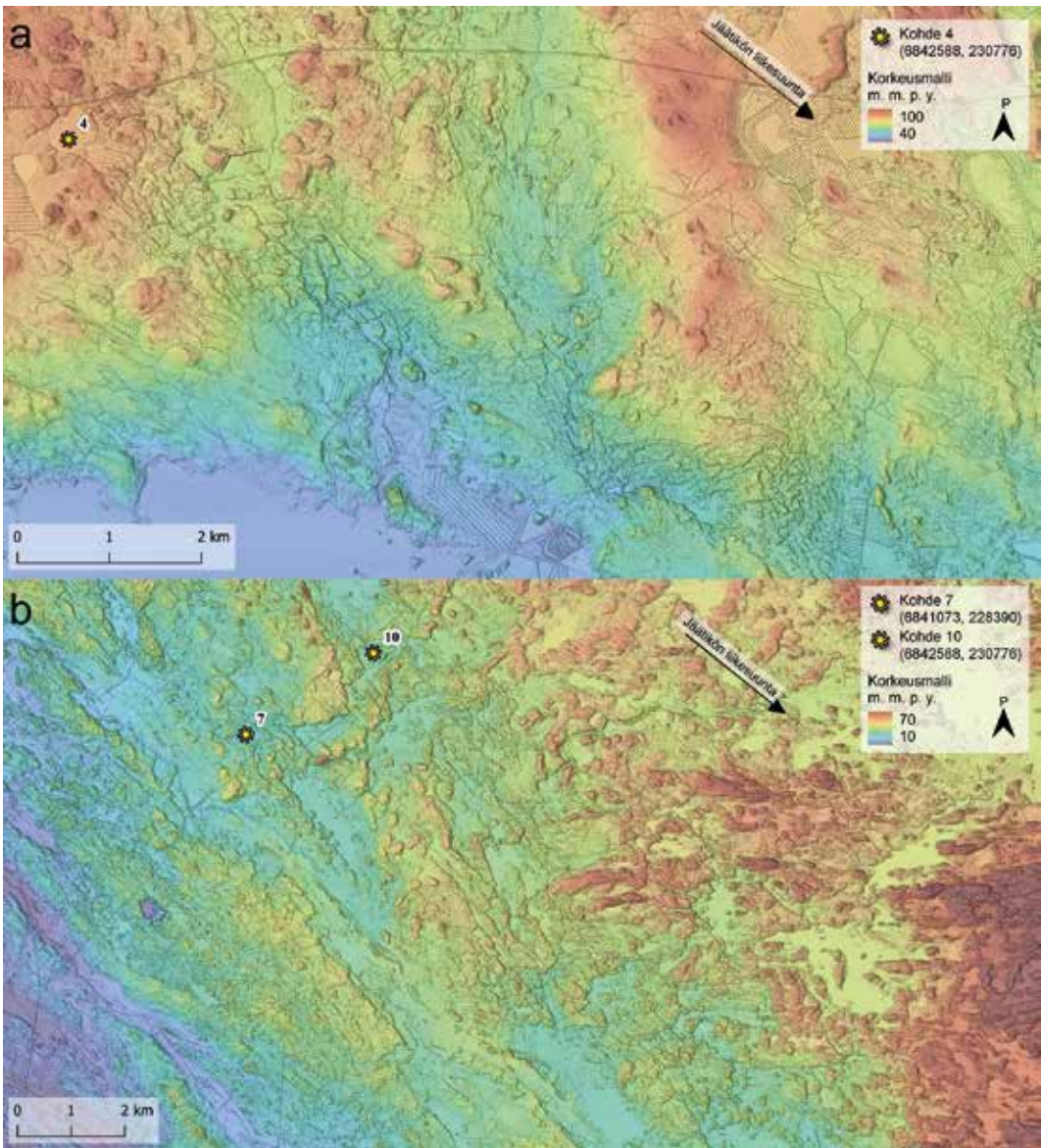
Potentiaalisiksi paleoblisteriksi luokiteltuja kohteita yhdistävät kaukokartoitusaineistoissa ja maastossa seuraavat kriteerit: 1) muodoltaan pyöreähkö painanne, 2) muodostuman reunoilta säteittäin useisiin suuntiin erodoituneet purkauskanavat, 3) muutokset maaston geomorfologiassa jäätikön liikesuunnan suhteen ennen ja jälkeen potentiaalisen paleoblisterin, 4) huuhtoutunut lohkarikko purkauskanavissa ja potentiaalisen paleoblisterin sisäreunoilla ja 5) painauksen halkaisija muutamia satoja metrejä.

Kohde 2 erottuu Kokemäellä pyöreähkönä, matalana soistuneena painanteena metsäs-

sä (kuva 3a). Kohteen keskellä (GPS 1) maannoksen alla on 450 cm paksu savikerros, joka päättyy kovaan kiviseen pohjaan. Kohteen sisäreunalla lohkarikko on voimakkaammin huuhtoutunutta, mutta ulkoreunalla lohkarikko on vähäisempää (kuva 4). Oletettu pääpurkauskanava ja sen koillispuolen selänne lähtevät painaumasta kaakkoon. Selänteen loppupäässä on murtoomaisia maaperäpiirteitä. Kanavassa (GPS 4) maannoksen alla on 180 cm paksuinen osittain kerroksellinen savi-silttikerrostuma, jossa on oksidoituneen hiekan muodostamia ohuita raitoja. Jäätikön liikesuunnassa potentiaalisesta paleoblisteristä alavirtaan, maisemassa näkyy lisäksi kanavamaisia jäätikön sulamisveden aiheuttamia rakenteita.

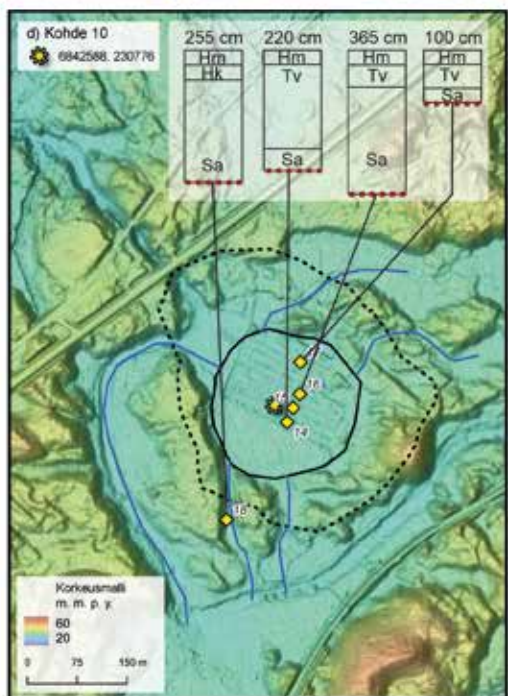
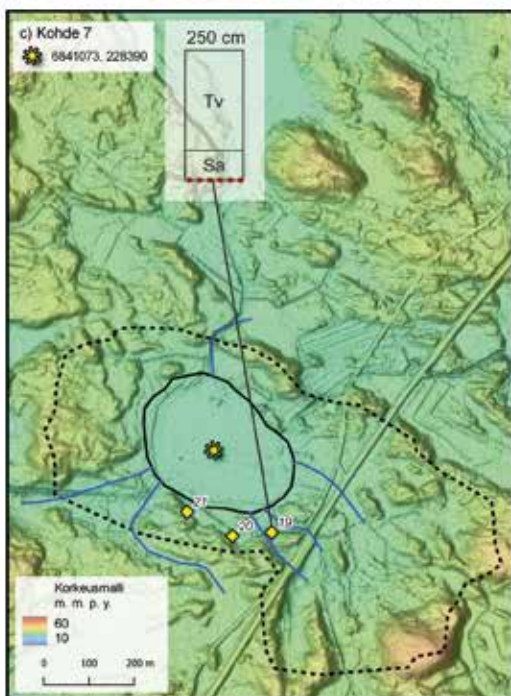
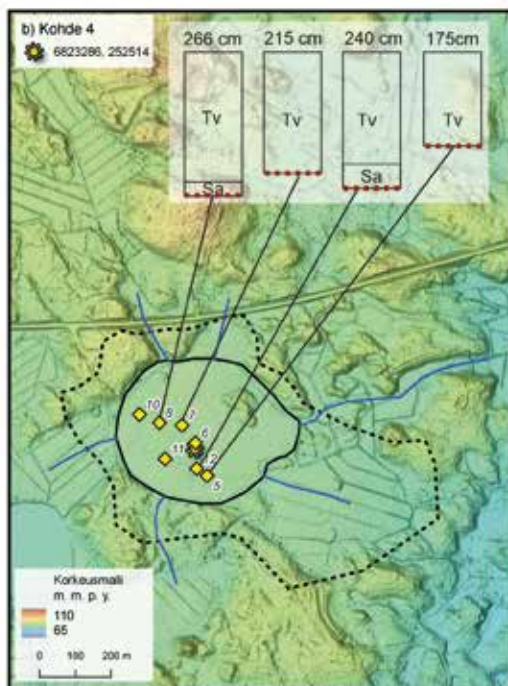
Kohde 4 Sääksjärven pohjoispuolella on lähellä Mäkisen ja muiden (2023) ensimmäistä dokumentoitua paleoblisterihavaintoa, mutta on kooltaan selvästi suurempi (halkaisija 450 m). Pyöreän turvesuon kaakon puoleisella sivulla erottuu selkeäpiirteisiä purkauskanavia, joista alavirtaan maaston geomorfologiset muodot muuttuvat teräväpiirteisemmiksi. Painaumasta jäätikön alavirran suuntaan näyttäisi alkavan Sääksjärven kylän kautta kulkeva murtoita sisältävä selväpiirteinen sulamisvesireitti (kuvat 2a, 3b). Turvekerroksen syvyys vaihteli kairauksissa 120 cm (GPS 9) ja 266 cm (GPS 8) välillä. Kovan pohjan päällä havaittiin maaperäkairauksissa (GPS 8 ja 12) ohut kerros (10–20 cm) tummaa savea. Turvesuolla sijaitsevilla kuivilla saarekkeilla nähtiin runsaasti lohkarikkoo (kuva 4).

Noormarkussa, kohteessa 7 paleoblisteristä lähtee useita kaakkoon suuntautuvia purkauskanavia, jotka jättävät selvät virtaavan veden merkit maaperään jäätikön alavirran suuntaan (kuvat 2b, 3c). Painauksen sisäreunat ovat voimakkaasti huuhtoutunutta lohkarikkooa. Paikalla on joskus sijainnut ojittamalla kuivatettu Vähäjärvi-niminen järvi, joka on mahdollisesti syntynyt potentiaalisen paleoblisterin jättämään painanteeseen.



Kuva 2. Potentiaalisten paleoblisterien sijoittuminen Itämeren kielekevirran (BSIL) sulamisvesireitille esitetyn korkeusmallissa. Kohde 4 Ulvilassa on selvästi ympäristöönsä korkeammalla kohdalla, murtookentän luoteispuolella (a). Kohteet 7 ja 10 sijaitsevat Noormarkussa (b). Potentiaalisten paleoblisterien purkauskanavat on nähtävissä kohteista kaakkoon. Alueen läpi kulkee Kynsikankaan siirrosvyöhyke luode-kaakosuunnassa. Jään liikesuunta tutkimusalueella esittää viimeisintä jäätikön virtaussuuntaa nuoremman dryaskauden jälkeen (Kejonen ym. 1988). Pohjakartta: Maanmittauslaitoksen aineistoa, Rinnevarjoste (korkeusmalli) 2 m, 11/2023.

Figure 2. The distribution of the potential water blister marks along the BSIL meltwater route presented in the digital elevation model. Site 4 in Ulvila is sitting notably higher than its surroundings, northwest of an esker field (a). Sites 7 and 10 are located in Noormarkku. All meltwater discharge channels are oriented to the southeast. The Kynsikangas Fault Zone intersects the study area in a northwest-southeast direction. The direction of the ice flow depicts the most recent flow direction after the Younger Dryas (Kejonen et al. 1988). Background map: National Land Survey of Finland, Hillshade (elevation model) 2 m, 11/2023.



Potentiaalinen paleoblasteri



GPS-piste

— Turvesuo

--- Korkeimmat kohdat turvesuon ympärillä

— Sulamisvesien purkautumiskanavat

..... Kova pohja, e. p. s.



◁ Kuva 3. Potentiaaliset paleoblisterit (kohteet 2, 4, 7 ja 10), niiden purkauskanavat ja ympäristön korkeimmat kohdat esitettynä lähikuvissa. Maastotutkimuksissa tehdyt havaintopaikat merkitty keltaisella. Kohteen 2 pyöreähkö painauma on halkaisijaltaan 102 m, ja sen eteläreunalla on selkeästi havaittava kaakkoon suuntautuva purkauskanava (a). Kanavassa maannoksen alla on pääasiassa silttistä savea. Painauman matalimmassa kohdassa yli neljän metrin savikerros maannoksen alla. Kohteen 4 halkaisija on 450 m, ja siitä kaakkoon on havaittavissa runsaasti vesieroosion jälkiä (b). Soistuneen painauman turvekerroksen paksuus on syvimmillään yli 2,5 metriä. Syvimmissä kohdissa on myös ohut savikerros maatumen turpeen alla. Kohteen 7 halkaisija on 362 m, ja sen kaakonpuoleisella reunalla on havaittavissa useita purkauskanavia ja veden aiheuttamaa eroosiota (c). Soistuneen painauman reunassa kahden metrin turvekerroksen alla on puoli metriä savea. Kohteen 10 halkaisija on 219 m, ja siitä lähtee säteittäisesti useita pieniä purkauskanavia (d). Potentiaalisen paleoblisterin länsi- ja eteläreunoilla kulkee Keskisjoki. Purkauskanavassa on maannoksen alla ensin hiekkansekainen kerrostuma ja sen alla 170 cm paksu savikerros. Painaumassa savikerros paksuimmillaan 2 metriä ja ohuimmillaan 15 cm matalassa pohjoisreunassa. Koordinaatit EUREF-FIN-muodossa. Pohjakartta: Maanmittauslaitoksen aineistoa, Rinnevarjoste (korkeusmalli) 2 m, 11/2023.

◁ Figure 3. Potential water blister marks (sites 2, 4, 7 and 10), with their meltwater discharge channels and the highest points of the surrounding terrain depicted in a close-up view. The observations made during field surveying are marked in yellow. Site 2 features a semi-circular depression with a diameter of 102 m, with a visible discharge channel extending southeast from its southern edge (a). Mainly silty clay in the channel under the soil layer. At the lowest point of the depression, a clay layer of more than 4 meters under the soil layer. Site 4 has a diameter of 450 m and abundant evidence of water erosion in the terrain southeast (b). The thickness of the peat layer of the imprint is over 2.5 meters at its deepest point. In the deepest parts, there is also a thin layer of clay under the ground peat. Site 7 has a diameter of 362 m, with several discharge channels and evidence of water-induced erosion visible on its southeastern edge (c). At the edge of the swampy depression, half a meter of clay under a two-meter layer of peat. Site 10 has a diameter of 219 m, with several small discharge channels in a radial pattern (d). River Keskisjoki runs around the potential water blister mark in the west and south. In the discharge channel, on top of a 170 cm thick layer of clay, there is a mixed layer of sand under the soil layer. In the depression, the clay layer is at its thickest 2 meters, at its thinnest 15 cm on the low northern edge. Coordinates are in EUREF-FIN form. Background map: National Land Survey of Finland, Hillshade (elevation model) 2 m, 11/2023.

Maaperäkairauksessa lähellä lounaista reunaa (GPS 19) päästiin 250 cm syvyyteen ennen kovaa kivipohjaa. Pohjalla oli noin 50 cm kerros savea, joka vaihtui harmaasta ruskeaksi ylöspäin tultaessa. Turvekerroksen paksuus saven päällä oli noin 200 cm.

Kohde 10 sijaitsee Noormarkussa. Jäätikön liikesuunnassa ennen potentiaalista paleoblisteriä maastossa ei näy selkeitä vesieroosion jälkiä (kuvat 2b, 3d). Maaston geomorfologia kuitenkin muuttuu alavirtaan, ja potentiaalisesta paleoblisteristä lähtee säteittäin purkauskanavia useisiin suuntiin. Suopeitteisen kohteen reunoissa on runsaasti voimakkaasti huuhtoutuneita lohkaraita. Paleoblisterin kaakkoispuolella on lähes poikittain sen reunaan nähden havaittavissa kaapea uoma. Uoman paleoblisterin puoleinen

reuna on jyrkempi, lohkaraisempi ja huuhtoutuneempi kuin piirteiltään pehmeämpi ulkoreuna. Maaperäpiikitysten ja lohkaraisuushavaintojen perusteella ulkoreuna saattaa olla lajittuneen aineksen särkkämäinen muodostuma. Kohteen keskellä havaittiin kairauksissa paksuimmillaan 200 cm savikerros kovan pohjan päällä (GPS 16). Turvekerroksen paksuus vaihteli 180 cm (GPS 14) ja 60 cm (GPS 17) välillä. Kanavassa (GPS 18) savikerroksen paksuus oli noin 170 cm ja multamaisen turvekerroksen paksuus pinnasta 50 cm.

Jokaisen potentiaalisen paleoblisterin ympäristössä vallitseva maalaji on hiekkamoreeni. Niiden lähistöllä on muitakin jäätikkösyntyisiä maaperämuodostumia, kuten kumpu- ja juomumoreeneja sekä murtoita. Lisäksi potentiaaliin paleoblistereihin liittyy jääkauden



Kuva 4. Maastohavaintoja kuvina: maakairausnäytteessä (kuva 3: GPS 15) havaittua homogeenista savea (a), lohkarehavaintoja painauman sisäreunalla (kuva 3: GPS 3) (b) ja lohkareinen saareke turvesuolla (kuva 3: GPS 11). Kuvat: Karoliina Korkiakoski (havainnot a ja b) ja Mandi Hannula (havainto c).

Figure 4. Field observations as photos: homogenous clay in a drilling sample (Fig. 3: GPS 15) (a), boulder observations at the inner edge of the depression (Fig. 3: GPS 3) (b), and boulder-studded island in the peat bog (Fig. 3: GPS 11) (c). Photos: Karoliina Korkiakoski (observations a and b) and Mandi Hannula (observation c).

jälkeen painanteisiin kerrostuneita savi- ja saraturvekerrostumia. Kaikki neljä kohdetta sijoittuvat joko ympäröivää maastoa korkeampaan kohtaan tai sellaisen välittömään läheisyyteen. Kohteet 2 ja 7 sijaitsevat Kynsikankaan kallioperän siirrosvyöhykkeellä (kuva 1).

Jäätikön sulamisvesien jättämät jäljet kertovat deglasiation vaiheista

Varjostetut tarkkaresoluutioiset korkeusmallit mahdollistavat uudenlaisen lähestymistavan glasiaaligeomorfologian ja jäätikön sulamisvesien maanpintaan aiheuttamien jälkien tutkimukseen (mm. Johnson ym. 2015). Viime vuosina Suomesta on löydetty ennestään tuntemattomia maaperämuodostumia, kuten murtoita (Ojala ym. 2019; Ojala ym. 2022) ja viimeisimpänä paleoblisteri (Mäkinen ym. 2023). Kriteerit paleoblisterien tunnistamiseksi ovat vasta muodostumassa, ja teoriapohja näiden maastonmuotojen synnylle perustuu

pääasiassa nykyjäätiköiltä supraglasiialisten jääjärvien purkausten yhteydessä tehtyihin havaintoihin ja mittauksiin (Das ym. 2008; Tsai & Rice 2012; Doyle ym. 2013; Dow ym. 2015). Tällä hetkellä ei siis esimerkiksi tiedetä, millaisia vesimääriä ja purkautumisnopeuksia erilaiset geomorfologiset muodostumat, kuten paleoblisterit, vaativat syntyäkseen. On todennäköistä, että paleoblisterillä on muitakin tunnistettavia piirteitä kuin aikaisemmassa kirjallisuudessa esitetyt pyöreä muoto ja veden purkautumisreitit. Tämän tutkimuksen havaintojen perusteella potentiaaliset paleoblisterit aiheuttavat geomorfologisia muutoksia ympäristöönsä jään liikesuunnan mukaisesti.

Paleoblisterit syntyvät mahdollisesti veden paineen ollessa suuri, joten todennäköisesti niitä syntyy erityisesti ajankohtina, jolloin ilmasto on deglasiation aikana poikkeuksellisen lämmin ja mannerjäätikön pintasulaminen huomattavan voimakasta (Greenwood ym. 2016; Nienow ym. 2017). Puolestaan

kylminä kausina jäätikön alle ei pääse valumaan sulamisvettä kerralla riittävän paljon. Sulamisvesien kanavoitumisessa on havaittu myös vuodenaikaisvaihtelua, koska sulamisvesien määrät vaihtelevat lämpötilan mukaan. Pienemmällä paineella jäätikkökaivon kautta valunut vesi on voinut aiheuttaa maanpintaan pyöreän muodon samalla tavoin kuin paleoblisteri, mutta tällöin ei ehkä ole syntynyt paleoblisterille ominaisia purkauskanavia. Maastotarkastuksen perusteella kohde 6 voisi olla syntyvaltaan tällainen, sillä pyöreästä painaumasta lähtee vain yksi voimakkaasti huuhtoutunut kanava.

Kohteissa havaittu huuhtoutunut lohkarikko on merkki siitä, että voimakas vedensyöttö ja paine on huuhtonut lohkaroiden välistä maa-ainesta erityisesti paleoblisterin sisäpuolelta sekä mahdollisista purkauskanaalista. Potentiaalisten paleoblisterien ulkoreunat eivät olleet yhtä huuhtoutuneita kuin sisäreunat. Toisin sanoen, geomorfologian avulla voidaan tarkastella supra- ja englasiaalisten sulamisvesien purkautumisen voimakkuutta ja ajankohtaa Fennoskandian mannerjäätikön deglasiaation aikana. On todennäköistä, että paleoblisterit sijaitsevat sellaisissa kohdissa maanpinnalla, joissa on viimeisimmän jääkauden sulamisvaiheen aikana sijainnut supraglasiaalinen järvi. Näitä järviä on mahdollisesti sijainnut alueilla, joilla maanpinta on ympäristöään matalammalla. Tällöin myös jää on hieman painunut ja sulamisvesi päässyt kerääntymään järveksi. Koska paleoblisteri tarvitsee muodostuakseen valtavan määrän vettä, paleoblisterit syntyvät todennäköisesti jäätikön ablaatiovyöhykkeellä eli alueella missä suurin osa jäätikkökaivoistakin sijaitsee. Esimerkiksi Ojalan ja muiden (2019) mukaan murtoot ovat muodostuneet sulamisvesien määrän kasvaessa. Koska murtookenvät sijaitsevat potentiaalisista paleoblistereistä kaakkoon, on supraglasiaalinen sulamisvesi mahdollisesti yhdessä subglasiaalisen sulamisveden kanssa vaikuttanut myös murtookenvien syntyyn.

Kaikki neljä tässä tutkimuksessa löydettyä potentiaalista paleoblisteriä myötäilevät sijaintinsa perusteella lounaista sulamisvesireittiä, eikä koillispuolen sulamisvesireitillä ole havaittavissa paleoblisteriin viittaavia geomorfologisia piirteitä (kuva 1). Tulosten perusteella on mahdollista, että Kynsikankaan siirrosvyöhykkeellä ja läheisellä Satakunnan hiekkakivivajoamalla on ollut suuri merkitys jään railoutumiseen ja vesien kertymiseen tiettyyn kohtaan jäätikön pinnalla. Sulamisprosessia on saattanut nopeuttaa myös osakielekkeiden aiheuttama kitka, joka aikaansaa lämpöä kielekkeiden saumakohdassa. Myös ympäristöään korkeammat kohdat maastossa saattavat aiheuttaa jäätikön pinnan railoutumista, joka puolestaan saattaa edesauttaa jäätikkökaivojen syntyä. Tutkitut paleoblisterit sijaitsevat topografialtaan joko Kynsikankaan siirrosvyöhykkeellä, maaston korkeimmassa kohdassa tai sen välittömässä läheisyydessä. Potentiaalisten paleoblisterien on mahdollista sijoittua myös sellaisille alueille, joilla tapahtuu painesulamista – jäätikkö liikkuu topografista estettä vasten laskien samalla jäätikön sulamislämpötilaa. Tällä on vaikutusta siihen, että jäätikköön muodostuu erilaisia railoja ja halkeamia, joiden kautta jäätikön pohjaan pääsee valumaan suuria määriä vettä samalla kun paine tuottaa vettä myös jäätikön pohjasta (Fricker ym. 2010; Iverson ym. 2017). Luokiteltaessa ensimmäisiä löydettyjä potentiaalisia paleoblisteriä, niiden havaittiin esiintyvän ryhmissä. Vaikka kaikki löydöistä eivät maastotarkastuksessa täyttäneet paleoblisterien kriteereitä, voi näillä maastonmuodoilla olla samantapaiset syntymekanismit. Ryhmittäistä sijoittumista kannattaakin tarkastella lähemmin, esimerkiksi Poinarin ja muiden (2021) julkaisema data käsittelee Grönlannissa sijaitsevan jäätikkökaivon liikkumista vuosien saatossa pienellä alueella.

Paleoblisterien sijainti lounaisella sulamisvesireitillä voisi kertoa myös siitä, että kyseisellä alueella jäätikön, topografian ja sulamis-

veden aiheuttama paine jäätikön pohjassa on ollut suurempi kuin pohjoisella sulamisvesireitillä. Lounaisella sulamisvesireitillä sijaitsee myös enemmän muita geomorfologisia muodostumia kuin pohjoisella sulamisvesireitillä. Esimerkiksi alueella sijaitsevat juomumoreenit voivat viitata siihen, että jäätikkö on hiertynyt maanpintaa vasten. Myös alueen murtoomuodostumat ovat selkeäpiirteisemmät kuin pohjoisella reitillä. Mahdollisten paleoblisterien sijoittuminen sulamisvesireiteille olisikin hyvä jatkotutkimuksen kohde, sillä tutkimusalue sijoittuu lähelle Loimaan osakielekkeen ja Pohjanlahden virtauskielekkeen saumavyöhykettä. Jatkotutkimuksissa on tarpeen tarkastella lähemmin myös siirrosvyöhykkeiden, kallioperän ja geomorfologian vaikutusta paleoblisterien sijoittumiseen sekä suhdetta muihin jääkauden synnyttämiin muodostumiin.

Pienet supraglasiaaliset järvet (<0,0495 km²) tulevat jäätikön kiihtyneen pintasulamisen seurauksena lisääntymään tulevaisuudessa Grönlannissa (Glen ym. 2024). Myös supraglasiaaliset sulamisvedet lisääntyvät, ja tällä voi olla vaikutuksia uusien blisterien syntymiseen myös tulevaisuudessa. Pienempien järvien vedenpoisto vaikuttaa jään virtaukseen, supraglasiaaliseen valumiseen ja lopulta merenpinnan nousuun. Glenin ja muiden (2024) tutkimuksessa havaittiin, että jäätikön sulamiskausina supraglasiaaliset sulamisvedet poistuvat jäätikön sulamisvesijärjestelmiä pitkin useammin kuin jäätyvät uudelleen. Korkeammilla alueilla jäätyminen on kuitenkin yleisempää kuin valuminen. Glenin ja muiden (2024) mukaan yli kolmannes pienistä järvistä valuu, kun jää oli alle 1 km paksuinen: tämä viittaisi siihen, että jäätikkökaivotiheys Grönlannissa on todennäköisesti suurempi kuin aiemmin on raportoitu. Pienten järvien synnyttämät jäätikkökaivot ohjaavat sulamisveden maanpinnalle eli näillä alueilla esiintyy mahdollisesti myös paleoblisteriä. Pienemmän vesimäärän vuoksi on mahdollista, että paleoblisteriä voi muodostaa myös huomattavasti pienemmät

blisterit kuin mitä nykyjäätiköiden tutkimuksessa havaitut. Tämän takia Grönlannissa tutkitut, hyvin suuriksi arvioidut blisterit (Dow ym. 2015; Lai ym. 2021) eivät välttämättä ole oikea vertailupohja paleoblisterille. Jäätikön sulamisvesijärjestelmässä supraglasiaaliset järvet voivat purkautua ketjussa, minkä vuoksi paleoblisterit voivat sijaita hyvin lähellä toisiaan tai yhden paleoblisterin alueelle on voinut purkautua sulamisvettä useammin kuin kerran.

Johtopäätökset

Paleoblisteri on tyypillisesti muodoltaan pyöreähkö painanne maaperässä, jonka reunoilla on säteittäin useisiin suuntiin erodoituneita purkauskanavia. Paleoblisterin ympärillä on havaittavissa jäätikön liikesuunnan mukaisia muutoksia maaston geomorfologiassa. Lisäksi sen purkauskanavissa ja painauman sisäreunoilla voidaan havaita huuhtoutunutta lohkariekköä. Painanteiden halkaisijat ovat keskimäärin muutamia satoja metrejä.

Noin 3 674 km² kokoisella tutkimusalueella Satakunnassa havaittiin neljä kriteereihin sopivaa potentiaalista paleoblisteriä sekä kuusi muuta pyöreää painaamaa, joissa oli nähtävissä sulamisveden aiheuttamia erosiojälkiä. Kaikki löydetty potentiaaliset paleoblisterit sijaitsevat lounaisella sulamisvesireitillä, jossa jäätikön railoutumiselle on ollut hyvät olosuhteet: merenpinnan tasolta jyrkästi nouseva topografia ja kallioperän siirrosvyöhyke. Alueella on runsaasti myös muita jäätikön sulamisvesien synnyttämiä muodostumia.

Varjostetut korkeusmallit ovat mahdollistaneet uudenlaisen lähestymistavan jäätikön sulamisvesien maanpintaan aiheuttamien jälkien tutkimukseen. Korkeusmallien tueksi tarvitaan kuitenkin systemaattisia kenttätutkimuksia. Tutkimuksessa kartoitettujen potentiaalisten paleoblisterien kohdalla tulisi tehdä yksityiskohtaisia geofysikaalisia ja sedimento-

logisia jatkotutkimuksia käyttäen maatumkaa ja kaivinkoneella tehtyjä tutkimuskaivantoja sekä kattavampia suopainanteiden ja virtauskanavien maaperäkairauksia.

Ilmastonmuutoksen kiihtyessä nykyisten mannerjäätiköiden sulaminen lisääntyy. Paleoblisterien tutkimus on tärkeää, koska sulamisvesipurkaukset vaikuttavat jään virtaukseen, jään sulamiseen ja merenpinnan nousuun.

Kiitokset

Tutkimus tehtiin osana Turun yliopiston maantieteen tutkimuskurssia syksyllä 2023. Kiitos työpanoksesta tutkimuskurssin aikana Mila Hämäläiselle. Kiitos myös väitöskirjatutkija Juulia Kautolle avusta aineistojen muokkaamisessa.

LUK MANDI HANNULA
(mandi.s.hannula@utu.fi)

LUK KAROLIINA KORKIAKOSKI
(karoliina.a.korkiakoski@utu.fi)

LUK SUVI RYTTÄRI
(suvi.m.ryttari@utu.fi)

LUK VILHELMIINA VIRTANEN
(vilhelmiina.a.virtanen@utu.fi)

DOS., FT JONI MÄKINEN
(jonmak@utu.fi)

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

MAANTIETEEN JA GEOLOGIAN
LAITOS
TURUN YLIOPISTO

Mandi Hannula, Karoliina Korkiakoski, Suvi Ryttäri ja Vilhelmiina Virtanen ovat maantieteen maisteriopiskelijoita Turun yliopistossa. Joni Mäkinen on maantieteen yliopistonlehtori ja dosentti Turun yliopiston Maantieteen ja geologian laitoksella. Hän on sedimentologian ja glasiaaligeomorfologian asiantuntija. Antti E. K. Ojala on maaperägeologian professori Turun yliopiston Maantieteen ja geologian laitoksella. Hän työskentelee muun muassa maaperän ominaispiirteiden ja eri kerrostumisympäristöjen parissa.

Summary

Traces of glacier-induced meltwater processes in the Satakunta hummocky moraine area: Mapping potential paleoblister

Paleoblister are circular depressions formed beneath a retreating ice sheet. They likely result from meltwater flowing rapidly from the glacier surface to the ground below through moulins, forming a water blister. This creates a paleoblister when draining. Most previous water blister studies are from Greenland, with the first paleoblister identified in Finland in 2023. This study discovered four new potential paleoblister in the same Satakunta hummocky moraine area, confirming previous research and exploring paleoblister's morphology and positioning relative to meltwater channels, other glacial formations, topography, and bedrock characteristics (Fig. 1).

Possible paleoblister sites were identified from shaded Digital Elevation Models (DEMs) created with LiDAR technology. The criteria for identifying a potential paleoblister included a circular imprint, radially eroded discharge channels, and geomorphic changes in terrain before and after the mark (Figs. 2 & 3). Ten sites were studied in situ in Kokemäki, Ulvila, Pori, Noormarkku, and Pomarkku using GPS devices, photographs, and Russian peat corers.

Based on the field surveys, four of the sites are potential paleoblister. In addition to the previously mentioned criteria, all the potential paleoblister are also characterized by a diameter of a few hundred meters and well-exposed, thoroughly washed boulder clusters on the inner edges of the depression. The dominant soil type in every location is sandy till with some peat and clay deposits (Fig. 3). Other surrounding glacial landforms include hummocky and ribbed moraines and murtoos. Two out of four potential paleoblister are located in the Kynsikangas fault zone. They sit at the highest points of the surrounding terrain or in its immediate vicinity in topographic profiles made in the direction of ice flow and transverse to it.

The formation of a paleoblister requires a rapid, immensely strong meltwater supply and pressure through moulins, likely in the ablation zone of a glacier during a warm season. It is possible that the water came from supraglacial lakes. DEMs provide a new, insightful approach to the study of the traces of subglacial meltwater processes. However, they need to be verified in the field for better accuracy. Future research should investigate the location of potential paleoblister in relation to other subglacial meltwater formations and how the fault zones affect ice crevassing and thus the formation of paleoblister. Various other factors must also be taken into account when looking at such a new research topic.

Lähdeluettelo

- Ahokangas, E., Ojala, A., Tuunainen, A., Valkama, M., Palmu, J.-P., ym., 2021. The distribution of glacial meltwater routes and associated murtoo fields in Finland. *Geomorphology* 389, 107854. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.107854>
- Colgan, W. & Steffen, K., 2009. Modelling the spatial distribution of moulins near Jakobshavn, Greenland. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 6, 012022. <https://doi.org/10.1088/1755-1307/6/1/012022>
- Das, S. B., Joughin, I., Behn, M. D., Howat, I. M., King, M. A., ym., 2008. Fracture propagation to the base of the Greenland ice sheet during supraglacial lake drainage. *Science* 320, 778–781. <https://doi.org/10.1126/science.1153360>
- Dassot, M., Constant, T. & Fournier, M., 2011. The use of terrestrial LiDAR technology in forest science: application fields, benefits and challenges. *Annals of Forest Science* 68, 959–974. <https://doi.org/10.1007/s13595-011-0102-2>
- Dow, C. F., Kulesa, B., Rutt, I. C., Tsai, V. C., Pimentel, S., ym., 2015. Modeling of subglacial hydrological development following rapid supraglacial lake drainage. *Journal of Geophysical Research - Earth Surface* 120, 1127–1147. <https://doi.org/10.1002/2014JF003333>
- Doyle, S. H., Hubbard, A. L., Dow, C. F., Jones, G. A., Fitzpatrick, A., ym., 2013. Ice tectonic deformation during the rapid in situ drainage of a supraglacial lake on the Greenland Ice Sheet. *The Cryosphere* 7, 129–140. <https://doi.org/10.5194/tc-7-129-2013>
- Fricker, H., Scambos, T., Carter, S., Davis, C., Haran, T. & Joughin, I., 2010. Synthesizing multiple remote-sensing techniques for subglacial hydrologic mapping: Application to a lake system beneath MacAyeal Ice Stream, West Antarctica. *Journal of Glaciology* 56, 187–199. <https://doi.org/10.3189/002214310791968557>
- Glen, E., Leeson, A., Banwell, A. F., Maddalena, J., Corr, D., ym., 2024. A comparison of supraglacial meltwater features throughout contrasting melt seasons: Southwest Greenland. *EGU sphere, käsikirjoitus (preprint)*. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2024-23>
- 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>
- Gulley, J., Walthard, P., Martin, J., Banwell, A., Benn, D. & Catania, G., 2012. Conduit roughness and dye-trace breakthrough curves: why slow velocity and high dispersivity may not reflect flow in distributed systems. *Journal of Glaciology* 58, 915–925. <https://doi.org/10.3189/2012JoG11J115>
- Haavisto-Hyvärinen, M., Sten, C.-G. & Kaija, J., 1990. Karisjärvi. Suomen geologinen kartta 1:20 000, maaperäkartta, lehti 2134 04. Geologian tutkimuskeskus, Espoo.
- Iverson, N. R., McCracken, R. G., Zoet, L. K., Benediktsson, Í. Ö., Schomacker, A., ym., 2017. A Theoretical Model of Drumlin Formation Based on Observations at Múlajökull, Iceland. *Journal of Geophysical Research - Earth Surface* 122, 2302–

2323. <https://doi.org/10.1002/2017JF004354>
- Johnson, M., Fredin, O., Ojala, A. E. K. & Peterson, G., 2015. Unraveling Scandinavian geomorphology: The LiDAR revolution. *GFF* 137, 245–251. <https://doi.org/10.1080/11035897.2015.1111410>
- Kejonen, A., Sten, C.-G., Moisanen, M. & Paukola, T., 1988. Sääksjärvi 114311. Maaperäkartan selitys. 1:20 000. Geologian tutkimuskeskus.
- Lai, C.Y., Stevens, L. A., Chase, D. L., Creyts, T. T., Behn, M. D., ym., 2021. Hydraulic transmissivity inferred from ice-sheet relaxation following Greenland supraglacial lake drainages. *Nature Communications* 12, 3955. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-24186-6>
- Lehtinen, M., Nurmi, P. & Rämö, T., 2005. Precambrian Geology of Finland. Elsevier, Amsterdam, 736 s.
- Maanmittauslaitos, 2023. Tuotekuvaukset. <https://www.maanmittauslaitos.fi/kartat-ja-paikkatieto/aineistot-ja-rajapinnat/tuotekuvaukset/rinnevarjostus> [5.4.2024]
- Mäkinen, J., Dow, C. F., Ahokangas, E., Ojala, A., Kajuutti, K., ym., 2023. Water paleoblaster geomorphology and subglacial drainage sediments: An example from the bed of the Fennoscandian Ice Sheet in SW Finland. *Journal of Glaciology* 1–17. <https://doi.org/10.1017/jog.2023.37>
- Mäkinen, J., 2003. The development of depositional environments within the Interlobate Säkylänharju-Virttaankangas Glaciofluvial complex in SW Finland. *Annales Academiae Scientiarum Fennicae Geologica-Geographica* 165, Vammala, 65 s.
- 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>
- Nienow, P. W., Sole, A. J., Slater, D. A. & Cowton, T. R., 2017. Recent Advances in Our Understanding of the Role of Meltwater in the Greenland Ice Sheet System. *Current Climate Change Reports* 3, 330–344. <https://doi.org/10.1007/s40641-017-0083-9>
- Ojala, A. E. K., Peterson, G., Mäkinen, J., Johnson, M. D., Kajuutti, K., ym., 2019. Ice-sheet scale distribution and morphometry of triangular-shaped 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., 2022. Murtoot – mitä? ne ovat? *Geologi* 74 (6), 204–218.
- Paananen, M. & Kuivamäki, A., 2007. Regional Lineament Analysis of the Southern Satakunta Area. Posiva Oy, Working Report 2007-04, 29 s.
- Palacios, D., Hughes, P. D., Garcia-Ruiz, J. M. & de Andrés, N., 2022. European Glacial Landscapes: The Last Deglaciation. Elsevier, Massachusetts, 623 s.
- Palmu, J.-P., Ojala, A. E. K., Virtasalo, J., Putkinen, N., Kohonen, J. & Sarala, P., 2021. Classification system of superficial (Quaternary) geological units in Finland. *Bulletin of the Geological Survey of Finland* 412, 115–169. <https://doi.org/10.30440/bt412.4>
- Poinar, K. & Andrews, L. C., 2021. Challenges in predicting Greenland supraglacial lake drainages at the regional scale. *The Cryosphere* 15, 1455–1483. <https://doi.org/10.5194/tc-15-1455-2021>
- Putkinen, N., Eyles, N., Putkinen, S., Ojala, A. E. K., Palmu, J.-P., ym., 2017. High-resolution LiDAR mapping of glacial landforms and ice stream lobes in Finland. *Bulletin of the Geological Society of Finland* 89, 64–81. <https://doi.org/10.17741/bgsgf/89.2.001>
- Smith, L. C., Chu, V. W., Yang, K., Gleason, C. J., Pitcher, L. H., ym., 2015. Efficient meltwater drainage through supraglacial streams and rivers on the southwest Greenland ice sheet. *PNAS* 112, 1001–1006. <https://doi.org/10.1073/pnas.1413024112>
- Trunz, C., Covington, M. D., Poinar, K., Andrews, L. C., Mejia, J. & Gulley, J., 2022. Modeling the influence of moulin shape on subglacial hydrology. *Journal of Geophysical Research – Earth Surface* 127, e2022JF006674. <https://doi.org/10.1029/2022JF006674>
- Tsai, V. C. & Rice, J. R., 2012. Modeling turbulent hydraulic fracture near a free surface. *Journal of Applied Mechanics* 79, 031003. <https://doi.org/10.1115/1.4005879>

Kuvan 1 pohjakartan tiedot:

GTK Avoin lisenssi Nimeä CC 4.0, sisältää GTK:n Jäätikkösyntyiset maaperämuodostumat aineistoa. © Geologian tutkimuskeskus. Lisenssin osoite: <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.fi>