

Murtoot – mitä ne ovat?

ANTTI E. K. OJALA, JONI MÄKINEN, JUSSI HOVIKOSKI, JUKKA-PEKKA PALMU, ELINA AHOKANGAS, KARI KAJUUTTI, SAMPO SOINI, JUULIA KAUTTO, ANTON KUUKKA, JUTTA PORKKA, MARK JOHNSON, GUSTAF PETERSON BECHER, CHRISTIAN ÖHRLING, ADAM HEPBURN JA CHRISTINE DOW

Murtoo on vasta hiljattain tunnistettu uudentyyppinen jäätikkösyntyinen maaperämuoto, joka on muodostunut mannerjäätikön sulamisen seurauksena (Mäkinen ym. 2017; Peterson ym. 2017; Ojala ym. 2019a, 2021) (kuva 1). Tämän artikkelin tarkoituksena on esittää yhteenveto olennaisista asioista, jotka tällä hetkellä tiedämme murtoo-maaperämuotojen esiintymisestä Fennoskandian mannerjäätiköityneillä alueilla. Artikkelissa käydään myös läpi mitä tiedetään murtoiden litologisista ominaispiirteistä, synty-ympäristöstä sekä niiden muodostumiseen liittyvistä prosesseista. Nykykäsitys murtoiden ominaispiirteistä ja kerrostumisympäristöstä perustuu maankamaran morfometrisiin analyyseihin, maaperäleikkauksista ja tutkimuskaivannoista tehtyihin sedimentologisiin havaintoihin sekä geofysikaalisiin profileihin – kuten artikkelin viimeisessä luvussa on esitetty.

Laserkeilaus geologisessa kartoituksessa

Tieteellisessä tutkimuksessa uudet merkittävät löydöt ja teoreemat ovat usein seurausta teknologian kehityksestä. Kartografiassa ja maankamaran geologisessa kartoittamisessa merkittäviä harppauksia on otettu paikannusjärjestelmien kehittymisen myötä sekä kaukokartoitusaineistojen, kuten ilmavalokuvien ja satelliittikuvien, tultua saataville. Esimerkiksi Suomessa ilmakuvatulkinta toi 1960-luvulla uuden ulottuvuuden maaperän kartoittamiseen, koska maankamaran muodot, kuten harjut ja moreeniselänteet, olivat ilmakuvien

stereotarkastelun kolmiulotteisuudesta johtuen helposti tunnistettavissa (Kujansuu 1967). Nyt elämme uutta merkittävää murrosta, joka on seurausta laserkeilaustekniikan yleistymisestä maanpinnan korkeusmallituotannossa (mm. Nenonen ym. 2010; Palmu & Nenonen 2015). Tämä niin kutsuttu LiDAR-teknologia (engl. *light detection and ranging*) on yksinkertainen ja nopea menetelmä, joka perustuu kohteen ja laserkeilaimen välisen etäisyyden mittaamiseen. Lasersäteen takaisinsironta tapahtuu muun muassa puiden latvoista, rakennuksista ja maan pinnasta. Maaston korkeuden lisäksi laserkeilaus tuottaa maastosta tai tutkittavasta kappaleesta kolmiulotteista tietoa, jonka avulla voidaan analysoida erilaisia muotoja ja niiden suhteita toisiinsa. Havaintojen perusteella saadaan siis yksityiskohtaista tietoa maa- ja kallioperän muodoista sekä geologisista rakenteista tarkemmassa mittakaavassa kuin aiemmin. Tutkijoiden onneksi Suomi on ollut LiDAR-korkeusmallin kehittämisen, tuottamisen ja hyödyntämisen eturintamassa, ja mikä tärkeintä: malli on tuotettu noudattaen avoimen datan periaatteita. Suomesta on Maanmittauslaitoksen toimesta saatavilla koko maan kattava LiDAR-korkeusmalli, jonka pistetiheys on 0,5 pistettä per neliometri.

Maaperän geologisessa kartoituksessa laserkeilaukseen perustuvat korkeusmallit ovat mullistaneet eri mittakaavaisen karttatuotannon digitaaliseen ja tulkintapainotteiseen suuntaan (Nenonen ym. 2010; Putkinen ym. 2017). Ne mahdollistavat maaperän muodostumatyyppien, niiden pääpiirteiden ja topologisten suhteiden tutkimisen sekä maanpinnan kolmiulotteisen visualisoinnin 3D- ja paikka-



Kuva 1. Murtookenttiä subglasiaalisten sulamisvesireittien varrella (siniset nuolet) Satakunnan Sääksjärven ympäristössä. Murtoiden tavanomainen ja helpoiten tunnistettava muoto on kolmion tai V-mallinen kohomuoto, joka on muokkaantunut vettyneen sedimentin deformoitussa jäätikön pohjalla subglasiaalisissa onkaloissa tai kanaaleissa. Kuvissa B ja C on tuotu esiin alueellisia eroja murtoiden morfologiassa. (Pohjakartan lähde: LiDAR korkeusmalli, © Maanmittauslaitos, 10/2022)

Figure 1. Murtoo fields along subglacial meltwater routes (blue arrows) in the Sääksjärvi vicinity. Triangle-type murtos are the most distinct and diagnostic murtoo types. Murtos were formed subglacially under warm-based ice, where high water pressure and highly sediment concentrated subglacial flood flows existed. (Background map source: LiDAR digital elevation model, © National Land Survey of Finland, 10/2022)

tieto-ohjelmistojen avulla. Maaperän karttakuvioita voidaan luokitella maanpinnan tarkkapiirteisen korkokuvan perusteella, ja vaikka prosessia ei ainakaan vielä voida tekoälyn avulla täysin automatisoida, vähentyy maastotutkimuksiin kulutettu aika merkittävästi, mikä lisää kustannustehokkuutta karttojen laadusta tinkimättä.

Ennen murtoiden pääpiirteistä keskustelemista on kuitenkin syytä todeta, että vaikka LiDAR-korkeusmallit ovat mullistaneet geologisen kartoituksen ja tutkimuksen (mm. Johnson ym. 2015; Ojala & Sarala 2017; Putkinen ym. 2017), ei voida olettaa, että yksistään geomorfologian avulla voisi ymmärtää tai selittää jäätikkösyntyisten maaperämuodostumien kerrostumiseen liittyviä prosesseja, jotka ovat usein diakronisia ja monimutkaisesti vuorovaikutteisia (mm. Menzies ym.

2018). Geomorfologisia tulkintoja on tuettava maastotutkimuksin, eritoten sedimentologisin ja stratigrafisin havainnoin, jotka perustuvat esimerkiksi kairauksiin, tutkimuskaivantoihin ja geofysikaalisiin mittauksiin. Erityisesti subglasiaalisten maaperämuodostumien synty-ympäristön ja kerrostumisprosessien tulkinta ilman sedimentologisten yksityiskohdien, yksiköiden rajapintojen ja materiaalien jatkuvuuksien hallitsemista on vähintäänkin haastavaa – ellei jopa mahdotonta.

Huolimatta siitä, että jäätikkösyntyisten maaperämuodostumien laajamittainen kartoitus on Suomessa viime vuosina perustunut LiDAR-korkeusmalleihin (mm. Putkinen ym. 2017), Palmu ym. (2021) painokkaasti korostavat, että kartoitettavat yksiköt ovat todellisuudessa morfologitogeneettisiä yksiköitä, joissa yhdistyvät maankamaran korkokuva eli

morfolgia, maa-aineksen raekoko eli litologia ja muodostumien syntyhistoria eli geneesi. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että muodostumien identifiointi perustuu morfometrian lisäksi perinteisiin maaperäkartoituihin, ns. maalajikartoituihin (Haavisto-Hyvärinen & Kutvonen 2007), sekä kartoittajan kokemukseen morfologian ja raekoon yhdistelmästä. Kaikki nämä yhdessä olemassa olevan tieteellisen kirjallisuuden kanssa antavat kartoittajalle pohjaa tulkita muodostumien kerrostumisympäristöä niiden ominaisuuksien ja spatiaalisen esiintymisen perusteella. Morfolitogeneettisten yksiköiden kartoittaminen perustuu kansainvälisesti käytettyihin määritelmiin (Lee & Booth 2006), mikä toimii mannerjäätiköityneillä alueilla erityisen hyvin yleisesti tunnetuille maaperämuodostumille kuten esimerkiksi glasiaalisille lineaatioille, glasifluviaalisille harju- ja deltamuodostumille sekä De Geer -moreeneille (Johnson ym. 2015; Putkinen ym. 2017). Morfolitogeneettiset yksiköt ovat kuitenkin epämuodollisia stratigrafisia yksiköitä, toisin kuin esimerkiksi litostratigrafiset tai biostratigrafiset yksiköt (Salvador 1994). Niiden käyttö on kuitenkin tarkoituksenmukaista, kun jäätikkösyntyisiä maaperämuodostumia kartoitetaan osana yhteiskuntaa palvelevia käytännön sovelluksia, kuten pohjaveden ja kiviainesten saatavuuteen liittyviä selvityksiä.

Modernin maaperäkartoituksen yhteydessä on syytä myös korostaa, että jäätikkösyntyisille maaperämuodostumille (ja sedimenteille) on tyypillistä, että maankamاران topografian lisäksi niiden kerrostumiseen vaikuttavat moninaiset fysikaaliset prosessit, kuten jäätikön pohjan olosuhteet (lämpötila, paine ja liike), kulkeutuvan ja kerrostuvan kiviaineksen määrä sekä sulamisvesien kanavoituminen jäätikön sisällä ja pohjalla. Nämä kaikki vaihtelevat dynaamisesti ajassa ja paikassa jäätiköitymisen eri vaiheissa. Esimerkiksi Clarken (2005) mukaan subglasiaaliset prosessit, jotka sisältävät jään, veden ja sediment-

tien vuorovaikutusta, ovat niin moninaisia ja kompleksisia, että lopputulosta on vaikea yksiselitteisesti osoittaa. Möller ja Dowling (2018) sekä Storrar ym. (2020) käyttävät kehitysbiologiasta (von Bertalanffy 1968) glasiaaligeomorfolgiaan lainattua termiä ekvifinaliteetti eli samatavoitteisuus (engl. *equifinality*), millä tarkoitetaan, että eri prosessit joko yksistään tai yhdessä voivat johtaa samaan tai samantyyppiseen geomorfologiseen lopputulokseen. Tämän vuoksi morfologisia tietoa-ineistoja, jotka käsittelevät jäätikön alla syntyneitä maaperämuodostumia, tulisi tarkastella muodostumien jatkumona eri tyyppimuotojen välillä erityisesti silloin, kun niiden sedimentologiasta ei ole tietoa (Möller & Dowling 2018). Samatavoitteisuuden ajatusmalli tekee yksin morfometrisin perustein tapahtuvasta jäätikkösyntyisten muodostumien luokitelusta ja muodostumien syntyyn liittyvien prosessein tulkitsemisesta hapuilevaa, mutta toisaalta tukee morfolitogeneettistä lähestymistapaa. Lisäksi mm. Putkinen ym. (2017), Palmu ym. (2015) ja Ojala ym. (2019c) ovat osoittaneet, että LiDAR-korkeusmalleista tarkastellut maankamاران morfologiset piirteet voivat myös liittyä ihmisen muokkaamiin rakenteisiin kuten vanhoihin rajalinjoihin, maanpuolustukseen liittyviin sulutus- ja raivausrakenteisiin tai peltojen raivauksien yhteydessä syntyneisiin kivikasoihin ja valleihin.

Murtoot syntyvät jäätikön alla ja liittyvät sulamisvesireitteihin

Murtoiden systemaattinen kartoitus ja tutkimus Suomessa ja Ruotsissa on usein eri tavoin osoittanut, että murtoot ovat maaperämuodostumia, jotka ovat muodostuneet lämminpohjaisen jäätikön alla – eli subglasiaalisesti – Fennoskandian mannerjäätikön deglasiaation aikana (mm. Mäkinen ym. 2017; Ojala ym. 2019a, 2021; Peterson Becher & Johnson 2021).

Murtoiden subglasiaalisesta muodostumisesta kertoo ensinnäkin se, että murtoot esiintyvät kenttinä subglasiaalisten sulamisvesireittien yhteydessä ja harjujen läheisyydessä (Ahokangas ym. 2021). Toisinaan murtookentät ja niihin liittyvät sulamisvesikanavat johtavat suoraan harjuihin (Ojala ym. painossa). Joissakin tapauksissa pienet harjut myös leikkaavat murtoita, joten murtoot ovat muodostuneet kauempana jään reunasta ja ennen harjuja (Ojala ym. 2019a). Murtoot ovat suuntautuneet yhdenmukaisesti harjujen ja sulamisvesireittien kanssa kohti jäätikön reunaa, eli painegradientin ja jäätikön liikesuunnan mukaisesti (Hooke 2020). Toiseksi, murtoot esiintyvät paikoin yhdessä juomumoreenien (engl. *ribbed moraine*) kanssa, tyypillisesti laaksojen alavimmilla alueilla tai suojasivun puolella jäätikön liikesuuntaan nähden (Ojala ym. 2019a). Näissä tapauksissa murtoot leikkaavat aikaisemmin kerrostuneita juomumoreeneja, joista toistuva subglasiaalinen sulamisvesien tulviminen on aikaansaanut kolmiomaisia muotoja. Vérité ym. (2022) ovat kokeellisesti osoittaneet, miten tämä tulvimisprosessi ja sedimenttien uudelleenorganisointuminen tapahtuu. Kolmanneksi, murtoiden pinnalla näkyy toisinaan heikkoa lineaatiota, mikä viittaa jäätikön viime vaiheen liikkeeseen niiden ylitse, kuitenkin aiheuttamatta merkittävää drumlinisaatiota (Ojala ym. 2019a; Peterson Becher & Johnson 2021). Joissakin tapauksissa murtoiden pinnalla esiintyy De Geer -moreeniselänteitä. Neljänneksi, murtoita verhoaa löyhä diamiktoni, joka on syntynyt deglasiaation viimeisessä vaiheessa mannerjäätikön passivoiduttua ja subglasiaalisen sulamisvesireitin levitessä (Mäkinen ym. 2019, käsikirjoitus; Ojala ym. painossa).

Alueellisen jakautumisen perusteella murtoot esiintyvät paikoissa, joissa jäätikön perääntymisnopeus on ollut huomattavan suurta ja sulamisvesien keskittyminen jään alle merkittävää (Ojala ym. 2019a; Peterson Becher & Johnson 2021). Ruotsin eteläosassa

murtookenttien keskittymä on muodostunut Bølling-Allerød-interstadiaalisen aikana, kun taas Suomessa ja Keski-Ruotsissa merkittävät murtookentät syntyivät holoseenin alkupuolella, kun ilmasto nopeasti lämpeni ja mannerjäätikkö lähti vetäytymään Salpausseliltä. On erityisen huomattavaa, kuinka murtoot puuttuvat sekä nuoremman dryaksen (vileä ilmasto) aikana syntyneiden Salpausselkien ja muiden reunamuodostumakompleksien alueelta että Fennoskandian mannerjäätikön kylmäpohjaisilta alueilta Pohjois-Suomesta ja -Ruotsista. Tämäkin ilmentää, että murtoita syntyy mannerjäätikön lämminpohjaisilla ja aktiivisilla alueilla ja niiden muodostuminen liittyy sulamisvesien kulkeutumiseen ja kanavoitumiseen sulavan jäätikön pohjalla. Suomessa murtoiden esiintyminen on myös selvästi sidoksissa jäätikködynamiikkaan ja aktiivisiin jäätikkökielekkeisiin (Ojala ym. 2019a). Enin osa murtookentistä sijoittuu Järvi-Suomen, Itämeren ja Oulun – Pohjois-Karjalan virtauskielekkeiden alueille, kun taas virtauskielekkeiden välisillä passiivisimmilla alueilla, joilla jäätikön virtaus on ollut vähäistä tai olematonta, ei murtoita juurikaan esiinny.

Tutkimusten perusteella (mm. Mäkinen ym. 2019; Ojala ym. 2021; Peterson Becher & Johnson 2021) on esitetty, että murtoiden kerrostumisympäristössä sulamisvesien hakeutuminen jäätikön pohjalle tapahtui niin kaukana perääntyvän jäätikön reunan sisäpuolella, että olosuhteet harjuja kerrostavien railojen tai tunnelien muodostumiselle eivät mm. jään paksuudesta johtuen olleet suotuisia (mm. Hooke 2020). Vedenpaine jään alla olevissa pienissä onkaloissa on ollut valtava ja verrannollinen peittävän jäätikön paksuuteen. Paineenalainen vesi todennäköisesti kulutti alustansa ja kerrosti sedimenttejä tukkien onkalot maa-aineksella sitä mukaa, kun ne aukenivat muodostaen siten murtoiden pääosat. Nenonen (2009) on kuvaillut tämänkaltaista ympäristöä vertauksenomaisesti sanoen olosuhteiden muistuttavan usean sadan ilma-

kehän paineella tehtävää ”betoniruisikutusta”, mutta moreeniaineksella. Murtoiden on ajateltu edustavan subglasiaalista vyöhykettä, jossa hajautunut (engl. *distributed*) sulamisvesisysteemi vaihettuu tehokkaaseen kanavoituneeseen (engl. *channelized*) systeemiin, eli harjujen muodostumisympäristöön. Lähimmät murtoot ovat yleisesti noin 40–50 km Salpausseliltä, mikä voi indikoida niiden synty-ympäristön tyypillistä etäisyyttä jäätikön reunan sisäpuolella. Tämä sopisi myös siihen, että tehokkaat kanavoituneet systeemit ja niiden kerrostamat harjut muodostuvat lähempänä jään reunaa, maksimissaan noin 50 km etäisyydellä (Greenwood ym. 2016; Hooke 2020). Subglasiaaliin sulamisvesireitteihin liittyviä murtoita voidaankin pitää tietynlaisina harjujen esimuotoina.

Murtoiden synty-ympäristön ja siihen liittyvien sulamisvesisysteemien tutkiminen voi tuoda aivan uudenlaista glasiaalihydrologista tietoa suurten mannerjäätiköiden dynamiikasta ja sulamisen seurauksista ilmaston lämmetessä jääkauden lopulla. Toistaiseksi tämän tyyppinen ympäristö puuttuu jäätikön dynamiikkaa simuloivista malleista, ja murtoiden kerrostumisympäristö voi osoittautua puuttuvaksi linkiksi hitaan ja hajautuneen sekä voimakkaasti kanavoituneen jäätikönalaisen hydrologian välille. Tutkimustieto sulaneiden mannerjäätiköiden hydrologiasta (mm. Hepburn ym. 2022) toimii analogiana Grönlannin napajäätikölle, joka parhaillaan sulaa nostoen valtamerien pinnan korkeutta. Tutkimustieto auttaa myös ymmärtämään, miten nykyiset jäätiköt tulevat käyttäytymään ilmaston edelleen lämmetessä ja sulamisen yhä kiihtyessä.

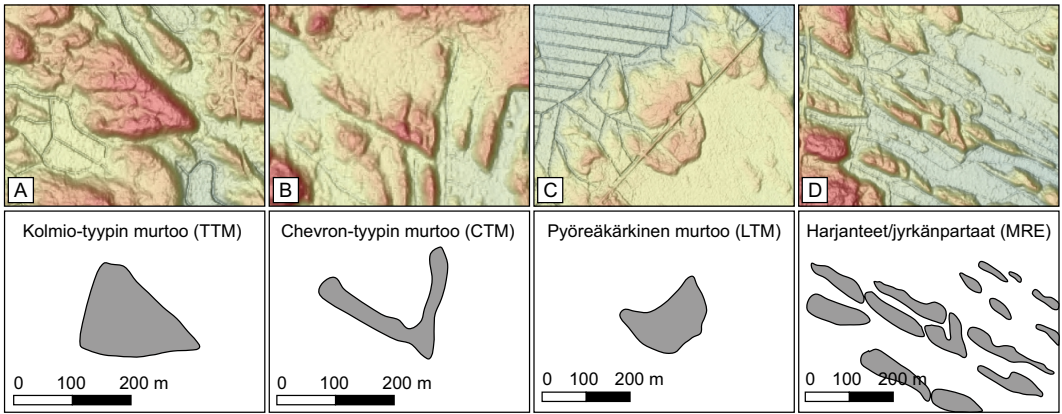
Murtoiden geomorfologia on monimuotoinen

Tyypillisimmillään murtoot erottuvat LiDAR-korkeusmalleilta kolmion tai V-kirjaimen mallisina kohomuotoina, joiden korkeus on yleensä

1–5 m ja leveys sekä pituus vaihtelevat tyypillisesti välillä 30–200 m (Ojala ym. 2019a). Termi murto viittaa niiden ensimmäiseen löytöpaikkaan Murtoonjärven läheisyydestä Nokian ja Vesilahden rajalta, mutta nimi myös sopivasti kuvastaa niiden pinnanmuodoiltaan vaihtelevaa, murtunutta topografiaa. Murtoiden sivut ovat suorat ja jyrkkäreunaiset, ja niiden kolmiomainen kärki osoittaa jäätikön liikesuuntaan. Murtoon pitkittäinen profiili kohti kolmion kärkeä on epäsymmetrinen niin, että jäätikönpuoleinen proksimaaliosa on matalampi ja loivapiirteisempi kun taas distaaliosa korkeampi ja jyrkkäpiirteisempi (Ojala ym. 2019a).

Myöhemmät korkeusmalleilta tehdyt analyysit, maastotutkimukset ja tutkimuskaivantojen sedimentologiset havainnot ovat osoittaneet, että murtoiden ja murtoisiin liittyvien maaperämuotojen morfologia subglasiaalisten sulamisvesireittien varrella olevissa kentissä on monimuotoisempaa kuin alun perin on karotettu (mm. Ahokangas ym. 2021; Ojala ym. 2021, painossa; Peterson Becher & Johnson 2021). Tämä ei ole mitenkään yllättävää, kun huomioi kuinka moninaisia ja kompleksisesti vuorovaikutteisia fysikaalisia prosesseja subglasiaalisessa ympäristössä tapahtuu (mm. Clarke 2005; Menzies ym. 2018).

Murtoona tunnetun teräväkärkisen muodon nimitys on tarkentunut kolmio-tyypin murtooksi (engl. *triangle-type murto*, TTM), minkä ohella Ojala ym. (2021) luokittelivat neljä muuta tyyppiryhmää, joista kaksi edustavat eri murtootyyppisiä ja loput niiden kanssa usein esiintyviä muodostumia (kuva 2). Pyöreäkärkiset murtoot (engl. *lobate-type murto*, LTM) ovat muuten TTM-tyypin kanssa samantaisia, mutta niiden distaaliosan kärki on pyöristynyt tai epätasainen. V-kirjaimen mallisten chevron-tyypin murtoiden (engl. *chevron-type murto*, CTM) reunat taas ovat selvärajaiset, mutta kahdesta muusta tyyppistä poiketen niillä on matalampi, ontto keskus. Lisäksi niiden reunoista toinen saattaa olla lyhyempi.



Kuva 2. Murtoiden tyypilliset morfologiset muodot Ojala ym. (2021) mukaan: Kolmio-tyyppin murtoo (TTM) Kynäsjärven länsipuolelta Pomarkusta (22° 9' 45" E 61° 42' 53" N) (A), V-kirjaimen mallinen murtoo (CTM) Jatkonjärven pohjoispuolelta Lestijärveltä (24° 49' 12" E 63° 24' 40" N) (B), pyöreäkärkinen murtoo (LTM) Ypyänjärven länsipuolelta Toholammilta (23° 58' 49" E 63° 48' 16" N) (C) sekä murtoisiin liittyviä harjanteiden (MRE) joukko Jatkonjärven kaakkoispuolelta Lestijärveltä (24° 50' 21" E 63° 24' 15" N) (D). (Pohjakarttojen lähde (A–D): LiDAR korkeusmalli, © Maanmittauslaitos, 10/2022)

Figure 2. LiDAR DEM characteristics of different murtoo types and murtoo-related landforms according to Ojala et al. (2021): Triangle-type murtoo (TTM) from Pomarkku, west of Lake Kynäsjärvi (22° 9' 45" E 61° 42' 53" N) (A), chevron-type murtoo (CTM) from Lestijärvi, north of Lake Jatkonjärvi (24° 49' 12" E 63° 24' 40" N) (B), lobate-type murtoo (LTM) from Toholampi, west of Lake Ypyänjärvi (23° 58' 49" E 63° 48' 16" N) (C), and murtoo-related escarpments (MRE) from Lestijärvi, southeast of Lake Jatkonjärvi (24° 50' 21" E 63° 24' 15" N) (D). (Background maps' source (A-D): LiDAR digital elevation model, © National Land Survey of Finland, 10/2022)

Murtoiden päätyyppien (TTM, LTM, CTM) kanssa sulamisvesireiteillä esiintyy usein myös muita muodostumia, jotka ovat morfologisesti monipuolisia ja joiden suhdetta murtoisiin on toisinaan vaikea määrittää (Ojala ym. 2021). Hyvin yleisiä murtoisiin liittyviä muotoja ovat erilaiset harjanteet ja jyrkänpartaat (engl. *murtoo-related ridges and escarpments*, MRE), jotka ovat tyypillisesti 100–1000 m pitkiä, 20–70 m leveitä ja 1–5 m korkeita (kuva 2). Spatiaalisen yhteyden lisäksi MRE:t koostuvat voimakkaasti huuhtoutuneesta hiekkaisesta diamiktonista kuten TTM:n ydinosat (ks. seuraava luku), ja niiden voidaan siten ajatella syntyneen samanlaisessa kerrostumisympäristössä (Ojala ym. 2021, painossa). Toisin kuin murtoiden, MRE:n suuntautuneisuus voi poiketa jäätikön liikesuunnasta ja mukailla sen sijaan esimerkiksi sulamisvesien paikallista virtaussuuntaa tai

alueellista topografiaa. MRE:n reunat ovat usein erosionaalisia ja niiden välissä esiintyy sulamisvesien virtausuomiksi tunnistettavia reittejä. Siinä missä murtoot edustavat subglasiaalisten onkaloiden täyttymistä, MRE:n erosionaaliset piirteet saattavat edustaa hieman myöhempää vaihetta, jolloin sulamisvedet kanavoituivat kohti tunnelimaista virtausta (harjujen synty) (Ojala ym. 2021). Tämänkaltaisesta dynaamisesti muuttavasta ympäristöstä on sedimentologista ja geomorfologista todistusaineistoa Murtoonjärven alueelta, kuten Ojala ym. (painossa) esittävät. Murtoisiin liittyvien jyrkänpartaisten reunoilta löytyy toisinaan myös savitäytteisiä kanavia, joita peittää löyhä deglasiation viimeisessä vaiheessa kerrostunut valumis- tai peitemoreeni. Onkin mahdollista, että osa näistä subglasiaalisista sulamisvesikanavista oli aktiivisia vielä harjujen syntymisen jälkeen ja reittejä pitkin on sulamiskausina

poistunut hiljalleen vettä kohti jäätikön reunaan (Ojala ym. painossa).

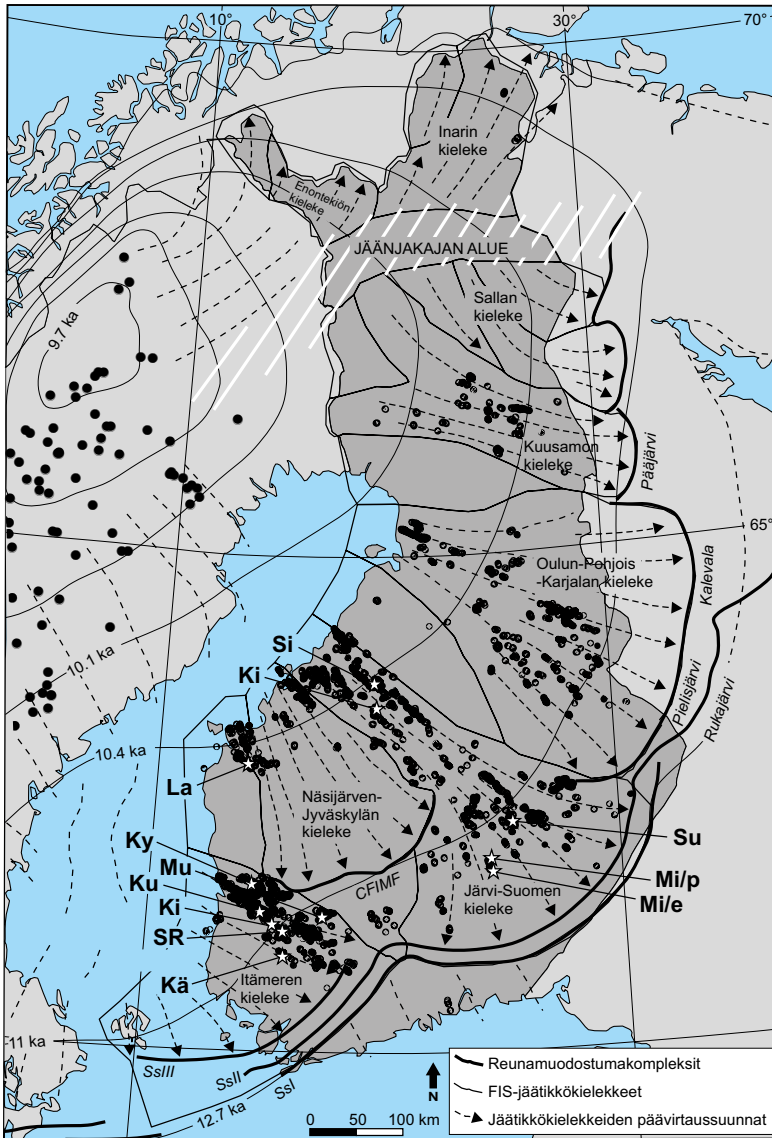
Ojalan ym. (2021) esittämästä luokittelusta on tärkeää kuitenkin huomioida, että murtoissa, kuten muissakin suglasiaalisesti syntyneissä maaperämuodostumissa, puhtaita 'oppikirjamaisia' muotoja on vain rajallisesti ja yksittäisiä muodostumia saattaa olla vaikea luokitella tarkasti tiettyyn ryhmään. Niiden välillä vallitsee jatkumo yhdestä muodosta toiseen. Lisäksi on hyvin tyypillistä, että yhdessä murtookentässä on eri tyyppisiä murtoomuotoja. Subglasiaalisilta sulamisvesireiteiltä murtookentistä ja niiden välittömästä läheisyydestä löytyy myös suuri joukko erilaisia kumpuja ja harjanteita, joista Ojala ym. (2021) käyttävät nimitystä polymorfiset kummut ja harjanteet (engl. *polymorphous mounds and ridges*, PMR). PMR:t ovat vaihtelevan kokoisia (5–100 m) epäsäännöllisesti sijoittuneita kohomuotoja, joilla voidaan toisinaan havaita heikkoa suuntautuneisuutta (mm. Kautto 2022). Spatiaalisen yhteyden takia ne saattavat edustaa heikosti kehittyneitä murtoita, jotka esimerkiksi paineolosuhteiden tai veden määrän muuttuessa eivät ole päässeet kehittymään selväpiirteisiksi (Ojala ym. 2021). Samatavoitteisuuden ajatusmallin mukaisesti korostettakoon vielä, että kaikki Fennoskandian jäätiköityneellä alueella esiintyvät kummut, harjanteet tai edes kolmion malliset kohomuodot eivät välttämättä ole murtoita, vaan ne saattavat edustaa maaperän muita tunnettuja muotoja ja ilmiöitä kuten glasiotektonisia piirteitä (mm. Seppälä 2016), massaliikuntoja ja railontäyhteitä (mm. Sutinen ym. 2021), tai juomu- tai Rogen-tyypin moreenimuodostumia. Onkin erityisen mielenkiintoista, kuinka Vérité ym. (2022) osoittivat murtoiden muokkaantuvan kauempana jään reunasta syntyneistä juomureeneista.

Murtoiden ja murtoisiin liittyvien maaperämuotojen monimuotoisuus kuvastaa subglasiaalisen hydrologian spatiotemporaalisia muutoksia deglasiation aikana. On ilmeistä,

että merkittävä määrä sulamisvesiä kerääntyi jäätikön pohjalla murtoiden kerrostumisympäristössä, mikä osaltaan vaikutti myös jäätikön dynamiikkaan, paineolosuhteisiin ja kitkaan jäätikön pohjalla (Benn & Evans 2010). Emme tarkalleen tiedä, kuinka iso vaikutus jäätikön liikkeellä on murtoiden muodostumiseen, mutta niiden sedimentologisten ja morfologisten ominaispiirteiden perusteella on todennäköistä, että murtoiden kerrostumisympäristössä jään paineen ja sulamisvesien paineen määrittelemä tehollinen paine (engl. *effective pressure*) on lähellä tasapainotilaa (Benn & Evans 2010; Mäkinen ym. 2019, käsikirjoitus). Toisin sanoen, jäätikön paine yrittää sulkea jään pohjaan syntyviä onkaloita (engl. *cavities*) samalla, kun veden paine yrittää pitää niitä auki. Kumpikin näistä prosesseista vaihtelee esimerkiksi paikallisen topografian ja jäätikön vuodeaikaisten sulamissykliä seurauksena. Lisäksi subglasiaalisilla sedimenteilla, niiden paksuudella ja deformatiivisuudella on havaittu olevan merkittävä rooli sulamisvesien ja jään virtauksen vuorovaikutussuhteissa (mm. Spagnolo ym. 2016). Dynaamisesti vaihtelevan subglasiaalisen ympäristön takia on hyvin mahdollista, että yhtä yksittäistä prosessia tai tarkasti rajattua kerrostumisympäristöä murtoiden ja murto-tyyppisten maaperämuotojen muodostumiseen ei voida määrittää (Menzies ym. 2018), vaan ne edustavat monien muiden subglasiaalisesti syntyneiden maaperämuotojen tavoin jatkumoa erilaisten geomorfologioiden välillä.

Murtoot ovat kerrostumismuotoja

Murtoiden koostumusta ja rakennetta on tutkittu Suomessa ja Ruotsissa useissa kohteissa (Mäkinen ym. 2017, 2018, 2019; Ojala ym. 2021, painossa; Peterson Becher & Johnson 2021) (kuva 3). Murtoot koostuvat osin lajittuneen aineksen kerroksista (sisältäen mm.



Kuva 3. Murtoiden ja murtoo-tyyppisten maaperämuotojen esiintyminen Suomen alueella on vahvasti riippuvainen Veiksel-jääkauden loppuvaiheen jäätikködynamikasta sekä mannerjäätikön alle muodostuneista sulamisvesireiteistä (Ojala ym. 2019a, 2021; Ahokangas ym. 2021). Deglasiation ajoittaminen sekä nuoremmen dryaksen aikaiset mannerjäätikön (FIS = Fennoscandian Ice Sheet) virtauskielekkeet Suomessa perustuvat Boulton ym. (2001), Stroeven ym. (2016) sekä Palmu ym. (2021) tulkintoihin. RewarD-projektissa kaivetut ja tutkitut maaperäleikkaukset on esitetty tunnuksin: Kä = Kämmäkkä, SR = Sääksjärvi-Rukamaa, Ki = Kiramonkulma, Mu = Murtoo, Ku = Kullaa, Ky = Kynäsjärvi, La = Laihia, Si = Sievi, Ki = Kinnula, Mi/e = Mikkeli etelä, Mi/p = Mikkeli pohjoinen, Su = Suonenjoki.

Figure 3. The distribution of murtoos and murtoo-related landforms in the Finnish sector of the Fennoscandian Ice Sheet (FIS) area is associated with Younger Dryas ice lobes and subglacial meltwater routes (Boulton et al. 2001; Ojala et al. 2019a, 2021; Ahokangas et al. 2021; Palmu et al. 2021). Locations of the trench excavations conducted in the RewarD project are specified as: Kä = Kämmäkkä, SR = Sääksjärvi-Rukamaa, Ki = Kiramonkulma, Mu = Murtoo, Ku = Kullaa, Ky = Kynäsjärvi, La = Laihia, Si = Sievi, Ki = Kinnula, Mi/e = Mikkeli etelä, Mi/p = Mikkeli pohjoinen, Su = Suonenjoki.

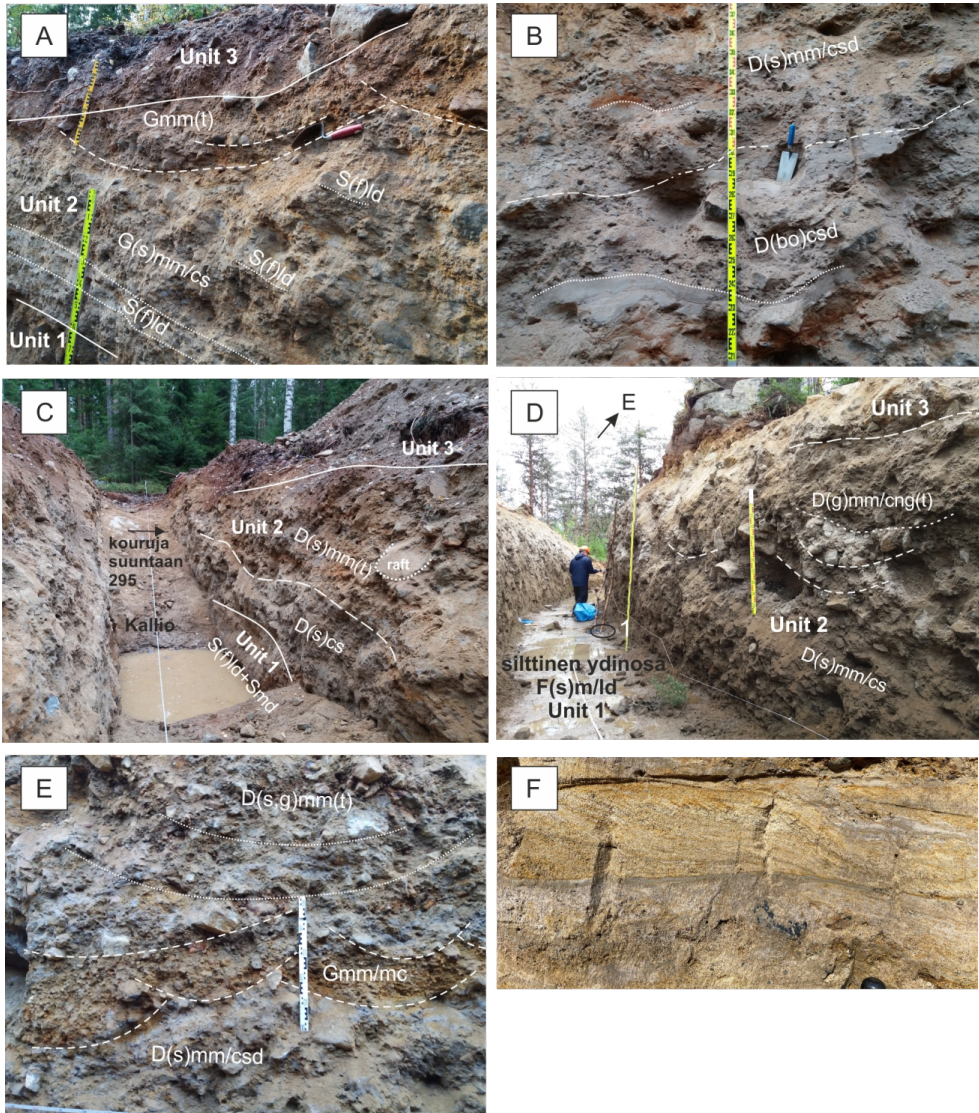
virtaavan veden rakenteita, kuten väreitä) ja homogeenisista diamiktoneista sekä usein ilman selvää rajaa toisiinsa liittyvistä kaukalonmuotoisista diamiktoneista ja heikosti lajittuneista sorakerroksista (kuva 4). Niihin liittyy paikoin myös virtaavan veden synnyttämiä rakenteita kuten klastikannatteisia osueita. Diamiktoneille on tyypillistä saven ja siltin vähäinen määrä ja klastien heikko pyöristyneisyys, joka vaihtelee kulkumikasta heikosti pyöristyneeseen. Murtoiden pinnat ovat useimmiten hyvin lohkaraisia (5–20 yli 0,5 m lohkareta/aari), mutta muodostumien sisällä olevien kivien maksimikoko jää kaikkialla alle metrin. Tämä osoittaa jään alla olleen kerrostumistilan maksimikokoa. Pitkänomaisten kivien suuntaus osoittaa yleensä vahvaa jäätikön liikkeen suuntaa murtoon keskiosassa ja huomattavasti hajanaisempaa suuntausta lähellä murtoon reunoja. Lisäksi murtoiden kärki sisältää viuhkamaisesti kohti reunoja ja kärkeä kallistuneita kerrosrakenteita.

Murtoiden aines ja rakenne poikkeavat lähialueiden moreeneista, ja kuten murtoiden morfologia myös niiden raekokojakauma kuvastaa murtoiden sijoittuvan pohjamoreenien ja harjuaineksen välimaastoon (kuva 4). Kaitteille tutkituille murtoille on lisäksi tyypillistä heikko deformaatioaste, deformaation ollessa kerroskohtaista ilman isompia läpyleikkäviä siirroksia, poimuja tai vedenpoistumisrakenteita. Lajittuneen, hienomman aineksen kerroksissa on usein yksittäisiä kiviä ja niihin liittyviä painumarakenteita. Diamiktoneissa ja sorakerroksissa esiintyy yleisesti lajittuneen aineksen siirtyneitä osueita, jotka ovat osin sekoittuneet karkeampaan ainekseen. Virtaavan veden keskeinen rooli sedimentaatiossa on erityisen hyvin havaittavissa murtoon proksimaaliosassa, jossa lajittuneet siltin ja hiekan raekokoluokan sedimentit ovat yleisiä. Näiden sedimenttien rakenteet viittaavat nopeasti vaihtelevaan veden virtausnopeuteen sekä muutoksiin virtauksen sedimenttikonsentraatiossa (kuva 4 A, F). Väreiden ohella kerrok-

sisissa on havaittavissa esimerkiksi antidyneiksi tulkittuja sedimenttirakenteita, jotka syntyvät nopean tiheysvirtauksen toiminnan tuloksena (engl. *upper flow regime*) (Hovikoski ym. käsikirjoitus). Proksimaaliosan sedimentit osoittavat siis murtoon ytimen olevan ensisijaisesti glasifluviaalisten prosessien aikaansaama kerrostumismuoto.

Suomen puolella murtoot voidaan jakaa kolmeen kerrostumisyksikköön ja -faasiin (*Units 1–3*) (Mäkinen ym. 2019, käsikirjoitus). Alinna, joko moreenin tai suoraan kallion päällä, on leveä ja matala, heikosti kaareutuva ydinosa, joka koostuu pääosin lajittuneesta aineksesta (*Unit 1*). Osa ytimistä on huomattavan silttivaltaisia, mutta ne voivat koostua myös heikosti kerroksellisesta sorasta. Ytimen päällä on varsinainen murtoaines, jota luonnehtivat huonosti lajittuneet sorakerrokset, tai hiekkaiset pääosin rakenteeltaan massiiviset ja matriksikannatteiset diamiktoneit ja niiden välissä olevat usein laminoituneet hiekkakerrokset (*Unit 2*) (kuva 4). Tämä kerrostumisyksikkö aikaansaa murtoon kolmiomaisen ja epäsymmetrisen morfologian ja sen paksuus vaihtelee tavallisesti välillä 1–5 m murtoon eri osissa. Ylimpänä yksikkönä on murtoita kaarevasti verhoava löyhärakenteinen, moreenimainen kerros, jonka alapinnalla on usein jäänteitä kerroksellisesta ja hyvin lajittuneesta hiekasta (*Unit 3*). Murtoiden pinnalla esiintyy lähes aina suuria lohkaraita ja sen ylin yksikkö on aallokon huuhtomisen, routimisen ja maannostumisen muokkaama. Keskeinen havainto on, että tämä ylin kerrostumisyksikkö ei rajoitu pelkästään murtoisiin, vaan peittää koko subglasiaalisen sulamisvesireitin alueelta myös muita muodostumia.

Suomesta dokumentoidut murtoiden sedimentologiset piirteet ovat huomattavan samankaltaisia verrattuna Ruotsin puolelta tutkittuihin murtoisiin (Peterson Becher & Johnson 2021; Mäkinen ym. käsikirjoitus). Suurimpana erona on Ruotsin murtoiden merkittävämpi, mutta edelleen kerroskohtai-



Kuva 4. Murtoiden ainesta ja rakenteita. Kullaa, huomaa löyhä ja lohkareinen moreenimainen ylin yksikkö (*Unit 3*), joka verhoaa koko murtoon (A). Kynäsjärvi, yksikön 2 (*Unit 2*) sekoitunutta sora ja hiekkavaltaista ainesta (B). Kämmäkkä, murtoon silttiydin (*Unit 1*) sijoittuu kallioperän kapeaan painanteeseen (C). Mikkeli, silttisen ydinosan päällä selvästi kaukalomaisia ja kivisiä diamiktonikerroksia, huomaa iso lohkare maanpinnalla (D). Laihia, selvästi kaukalomaisia diamiktoneja ja huonosti lajittuneen soran kerroksia murtooaineksessa (*Unit 2*) (Mäkinen ym. 2019, käsikirjoitus) (E). Virtaavan veden hiekkavaltaisia sedimenttirakenteita Rukamaan Myllykosken murtoosta (Hovikoski ym. käsikirjoitus) (F).

Figure 4. Typical lithologies and sediment structures documented inside murtoos within the Finnish sector of the FIS. Kullaa, note loose and bouldery diamicton that is covering crudely laminated sand and gravel of murtoo body (A). Kynäsjärvi, gravelly and sandy material of murtoo body (B). Kämmäkkä, the core of murtoo (*Unit 1*) lies in a bedrock depression (C). Mikkeli, silt-dominated murtoo core is superimposed by diamicton dominated and stony troughs, note a large erratic boulder on the surface of a murtoo (D). Laihia, trough-dominated structure of diamictons that are inter-bedded with sandier layers (Mäkinen et al. 2019, käsikirjoitus) (E). Low-angle, variably tangential cross-bedding that turns to deformed heterolithic bedding towards the downstream (Hovikoski et al. käsikirjoitus) (F).

nen deformaatio sekä vedenpoistumisrakenteiden yleisyys. Ruotsissa avatut murtoot sijoituvat aikaan ennen nuorempaa dryasta, mikä saattaa viitata siihen, että Suomen puolella varhaisholoseeniin sijoittuvat murtoot edustavat jatkuvampaa sulamisvesipainetta. Ruotsin puolelta ei myöskään ole havaittu yhtä selviä kerrosyksiköitä, mutta myös siellä muodostumien alin osa on selvästi moreenimaisempaa yläosaa lajittuneempi.

Murtoiden suojellinen ja taloudellinen merkitys

Murtoilla on tieteellisen mielenkiinnon lisäksi myös taloudellista maa-aines- ja pohjavesipotentiaalia, sillä pintalohkareisuudestaan huolimatta murtoot koostuvat pääosin lajittuneesta hiekan ja soran sekaisesta diamiktonista. Ne edustavat materiaaaliltaan jotakin pohjamooreenin ja veden voimakkaasti lajitteleman harjuhiekan välimuotoa. Murtoot on aikaisemmin kartoitettu kumpumaisiksi ja hyvin pintalohkareisiksi moreenimuodostumiksi (GTK, maaperäkartta 1: 20 000), ja niihin voi paikallisesti liittyä samantyyppisiä maisemallisia ja elollisen luonnon arvoja kuin avokallioihin ja harjuihin (Palmu ym. 1999). Murtoisiin liittyviä luontoarvoja selvitetään parhaillaan Jenny ja Antti Wihurin rahaston tuella hankkeessa, jonka kokonaisvaltaisena tavoitteena on tutkia murtoiden hyödyntämismahdollisuuksia sekä luontoarvoja ja suojelutarvetta (Kajuutti ym. käsikirjoitus). Nykyisellään Suomen murtoalueet ovat lähes yksinomaan metsätalouskäytössä. Huuhtoutuneissa ja hiekkapitoisissa diamiktoneissa, kuten murtookentissä, voi parhaimmillaan kuitenkin muodostua pohjavettä yhtä tehokkaasti kuin harjualueilla, ja ne voivat olla merkittävä vaihtoehto haja-asutusalueiden pienimuotoisina pohjavesilähteinä (Palmu ym. 1999; Mäkinen ym. 2007; Kajuutti ym. käsikirjoitus).

Olemassa oleviin suojelualueisiin murtoot eivät tällä hetkellä juuri kuulu, mutta toisaalta niiden syrjäisen sijainnin vuoksi niihin ei ainakaan toistaiseksi liity suuria uhkakuvia. Metsätalouden toimenpiteet hakkuineen kun eivät murtoalueita pilaa – saattaa käydä jopa päinvastoin, kun metsäkasvillisuuden peittämät lohkapintaiset murtoot paljastuvat katsojille. Maa-aineksen oton varalta parhaiten kehittyneet muodostumat on kuitenkin syytä suojella tutkimus- ja opetuskäyttöön sekä jälkipolvien ihailtaviksi.

Kiitokset: RewarD-projekti

Artikkeli perustuu meneillään olevan (2019–2023) Suomen Akatemian rahoittaman RewarD-projektin (*Reorganization of subglacial drainage processes during rapid melting of ice sheets*, nro 322252 ja nro 322243) tuloksiin ja kansainväliseen yhteistyöhön. Tutkimustuloksia on julkaistu vertaisarvioituissa artikkeleissa (Mäkinen ym. 2017; Peterson ym. 2017; Ojala ym. 2019a, 2021, painossa; Ahokangas ym. 2021; Peterson Becher & Johnson 2021) ja esitetty kansainvälisissä tieteellisissä konferensseissa (Johnson ym. 2018, 2019, 2020; Kajuutti ym. 2018, 2019; Mäkinen ym. 2018, 2019; Ojala ym. 2019b, 2022; Ahokangas ym. 2020; Hepburn ym. 2022). Useita aiheeseen liittyviä artikkeleita on myös parhaillaan kirjoittamis- ja ennakkotarkistusprosessissa (Ahokangas ym. käsikirjoitus; Hovikoski ym. käsikirjoitus; Mäkinen ym. käsikirjoitus) ja tematiikasta on valmistunut tai valmisteilla neljä opinnäytetyötä (Porkka 2019; Kautto 2022; Kuukka 2022; Soini valmisteilla). RewarD-projektissa on kerätty tutkimusaineistoa maaperäleikkauksista, koekuopista ja 10–70 m pitkistä tutkimuskaivannoista, joita on kaivettu yhteensä 38 kpl 13 kohteessa eri puolilla Suomea (kuva 3). Yksistään eri tyyppisten murtoiden läpi kaivettuja 2–4 m

syviä tutkimusosia on tehty yhteensä 725 m. Kaivantojen sijoittamista ja sedimentologisia havaintoja on tuettu Geologian tutkimuskeskuksen (GTK) olemassa olevilla maaperäkartoitus sekä koekuoppahavainnoilla (<https://gtkdata.gtk.fi/maankamara/>) sekä maantutkalinjoilla (100, 200 ja 400 MHz antennit), joita on RewarD-projektissa kerätty ja tulkittu yhteensä 123,51 km.

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

JONI MÄKINEN
(jonmak@utu.fi)

ELINA AHOKANGAS
(eliah@utu.fi)

KARI KAJUUTTI
(karkaj@utu.fi)

SAMPO SOINI
(sampo.f.soini@utu.fi)

JUULIA KAUTTO
(jujokau@utu.fi)

ANTON KUUKKA
(anton.kuukka@utu.fi)

JUTTA PORKKA
(jstpor@utu.fi)

Maantieteen ja geologian laitos
20014 Turun yliopisto

JUSSI HOVIKOSKI
(jussi.hovikoski@gtk.fi)

JUKKA-PEKKA PALMU
(jukka-pekka.palmu@gtk.fi)

Geologian tutkimuskeskus
Vuorimiehentie 5
20150 Espoo

MARK JOHNSON
(mark@gvc.gu.se)
Department of Earth Sciences
University of Gothenburg
P.O. Box 460
SE-40530 Gothenburg
Sweden

GUSTAF PETERSON BECHER
(gustaf.peterson.becher@sgu.se)

CHRISTIAN ÖHRLING
(christian.ohrling@sgu.se)

Geological Survey of Sweden
P.O. Box 670
SE-75128 Uppsala
Sweden

ADAM HEPBURN
(ahepburn@uwaterloo.ca)

CHRISTINE DOW
(christine.dow@uwaterloo.ca)

Geography and Environmental Management
University of Waterloo
200 University Avenue West
Waterloo, Ontario N2L 3G1
Canada

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 maaineksen käyttöä varten. Muut kirjoittajat ovat Jonin ja Antin johtamaan RewarD-projektiin osallistuneita asiantuntijoita ja tutkijoita.

Summary

Murtoos – what do we know about them?

The present paper focuses on murtoo landforms reporting results and understanding gained so far in the RewarD project funded by the Academy of Finland (<https://sites.utu.fi/reward/etusivu/reward-project>). Based on evidence from remote sensing and numerous murtoo excavations in Finland and Sweden, we describe three main observations. First, murtoos are formed subglacially, which is seen from their orientation parallel to ice flow and associations with eskers and subglacial meltwater routes. For example, murtoos are sometimes overlain by eskers, glacial lineations and De Geer moraine ridges. Murtoos are also covered by loose diamicton (flow till) that was deposited in the final phase of deglaciation. Second, the morphometric diversity of murtoos and murtoo-related landforms in the Fennoscandian Ice Sheet area is significant, with triangle-type murtoos being only the most representative and distinctive examples of murtoo landforms. Third, murtoos are depositional landforms composed of silt/clay-poor, sandy and gravelly diamictons interbedded with sorted glaciofluvial sediments. Accordingly, we suggest murtoo sediments are produced by pulsed, highly sediment concentrated flows during deglaciation with only weak glaciotectonic deformation. Importantly, murtoos potentially represent a transition form from non-channelized to channelized subglacial drainage networks, which is important from the viewpoint of glacial hydrology and ice-sheet dynamics. Murtoos may thus provide new information for glacial modelling approaches by introducing the missing link between inefficient and efficient subglacial drainage, and thereby also increase our understanding on how current glaciers will behave in the warming climate.

Lähdeluettelo

- Ahokangas, E., Mäkinen, J., Ojala, A., Kajuutti, K. & Palmu, J.-P., 2020. Murtoo and subglacial meltwater route mapping in the trunk area of the Finnish Lake District Lobe. 34th Nordic Geological Winter Meeting, 8.–10.1.2020, Oslo, Norja, abstrakti.
- Ahokangas, E., Ojala, A. E. K. Tuunainen, A., Valkama, M., Palmu, J.-P., ym., 2021. The distribution of murtoos along glacial meltwater routes in Finland. *Geomorphology* 389, 107854. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.107854>
- Ahokangas, E., Mäkinen, J., Ojala, A. E. K., Kajuutti, K., Palmu, J.-P., käsikirjoitus. The Sääksjärvi subglacial meltwater route in SW Finland.
- Benn, I. D. & Evans, D. J. A. (toim.), 2010. *Glaciers & Glaciation*. 2. painos. Hodder Education, London, 802 s.
- von Bertalanffy, L., 1968. *General Systems Theory: Foundations, Development, Applications*. Penguin University Books, New York, 289 s.
- Boulton, G. S., Dongelmans, P., Punkari, M. & Broadgate, M., 2001. Palaeoglaciology of an ice sheet through a glacial cycle: the European ice sheet through the Weichselian. *Quaternary Science Reviews* 20, 591–625. [https://doi.org/10.1016/S0277-3791\(00\)00160-8](https://doi.org/10.1016/S0277-3791(00)00160-8)
- Clarke, G. K. C., 2005. Subglacial Processes. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 33, 247–276. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.33.092203.122621>
- 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>
- Haavisto-Hyvärinen, M. & Kutvonen, H., 2007. Maa-peräkartan käyttöopas. Geologian tutkimuskeskus, Espoo, Raportti, 61 s.
- Hepburn, A. J., Dow, C. F., Ojala, A., Ahokangas, E. & Mäkinen, J., 2022. Reorganization of subglacial drainage processes during rapid melting of former ice sheets. AGU Fall Meeting 2022, 12.–16.12. 2022, Chicago, Yhdysvallat, abstrakti.
- Hooke, R., 2020. *Principles of Glacier mechanics*. 3. painos. Cambridge University Press, New York, 513 s.
- Hovikoski, J., Mäkinen, J., Kajuutti, K., Hepburn, A., Soini, S. & Ojala, A. E. K., käsikirjoitus. Upper flow regime bedforms in a subglacial meltwater route, Holocene SW Finland.
- 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>

- Johnson, M. D., Mäkinen, J., Peterson, G., Ojala, A., Palmu, J.-P., ym., 2018. Geomorphology and distribution of subglacial triangular hummocks (murtoos) in Sweden and Finland. *Nordic Geological Winter Meeting 2018*, 10.–12.1.2018, Kööpenhamina, Tanska, abstrakti.
- Johnson, M. D., Mäkinen, J., Peterson, G., Ojala, A. E. K., Palmu, J.-P., ym., 2019. Geomorphology and distribution of subglacial triangular hummocks in Sweden and Finland. *International Glaciological Society IGS2019 meeting*, 12.–17.5.2019, Madison, Yhdysvallat, abstrakti.
- Johnson, M., Peterson, G., Öhrling, C., Ojala, A. E. K., Mäkinen, J., ym., 2020. Geomorphology, distribution and composition of subglacial triangular hummocks (murtoos) in Sweden and Finland. *The EGU General Assembly*, 3.–8.5.2020, Wien, Itävalta, abstrakti.
- Kajuutti, K., Mäkinen, J., Ahokangas, E., Ojala, A. & Palmu, J.-P., 2018. New subglacial landforms detected from LiDAR data. *Nordic Geological Winter Meeting 2018*, 10.–12.1.2018, Kööpenhamina, Tanska, abstrakti.
- Kajuutti, K., Mäkinen, J., Ahokangas, E., Ojala, A., Palmu, J.-P., ym., 2019. A subglacial landform called 'murtoo': characterization and distribution. *Nordic Branch Meeting of the International Glaciological Society 2019*, 30.10.–1.11.2019, Reykholt, Islanti, abstrakti.
- Kajuutti, K., Mäkinen, J. & Kautto, J., käsikirjoitus. Murtooalueiden hyödyntämismahdollisuudet, luontoarvot ja suojelutarve.
- Kautto, J., 2022. Polymorfisten kumpujen ja harjanteiden synty Sääksjärven subglasiaalisella sulamisvesireitillä Lounais-Suomessa. *Maantieteen ja geologian laitos, Turun yliopisto, Turku, pro gradu -tutkielma*, 73 s.
- Kujansuu, R., 1967. On the deglaciation of western Finnish Lapland. *Bulletin de la Commission géologique de Finlande* 232, 98 s.
- Kuukka, A., 2022. Subglasiaalisen sulamisvesireitin geomorfologia ja pintalohkareisuus Kokemäen Sääksjärvellä. *Maantieteen ja geologian laitos, Turun yliopisto, Turku, pro gradu -tutkielma*, 73 s.
- Lee, J. R. & Booth, S. J., 2006. Quaternary field mapping: Lowland Britain. *British Geological Survey, Internal Report IR/06/99*, 78 s.
- Menzies, J., van der Meer, J. J. M. & Shilts, W. W., 2018. *Subglacial Processes and Sediments*. Teoksessa: Menzies, J., van der Meer (toim.), *Past Glacial Environments*. 2. painos, Elsevier Ltd., 105–158.
- 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>
- Mäkinen, J., Kajuutti, K., Ahokangas, E., Ojala, A. E. K. & Palmu, J.-P., 2018. Sedimentology of murtoos – new subglacial landforms detected from LiDAR data in SW Finland. *Nordic Geological Winter Meeting 2018*, 10.1.–12.1.2018, Kööpenhamina, Tanska, abstrakti.
- Mäkinen, J., Kajuutti, K., Ojala, A. E. K., Ahokangas, E. & Palmu, J.-P., 2019. Sedimentary characteristics of Finnish MURTOOs – triangular-shaped subglacial landforms produced during rapid retreat of continental ice sheets. *AGU Fall meeting*, 9.–13.12.2019, San Francisco, Yhdysvallat, abstrakti.
- Mäkinen, J., Kajuutti, K., Ojala, A. E. K., Ahokangas, E. & Palmu, J.-P., käsikirjoitus. Genesis of subglacial triangular-shaped landforms (murtoos) of the Fennoscandian Ice Sheet.
- Mäkinen, J., Dow, C., Ahokangas, E., Ojala, A. E. K., Kajuutti, K., ym., käsikirjoitus. Water blister geomorphology and subglacial drainage sediments: an example from the bed of the Fennoscandian Ice Sheet in SW Finland.
- Mäkinen, K., Palmu, J.-P., Teeriaho, J., Rönty, H., Rauhaniemi, T. & Jarva, J., 2007. Valtakunnallisesti arvokkaat moreenimuodostumat. *Suomen Ympäristö 14*, Ympäristöministeriö, 120 s.
- Möller, P. & Dowling, T. P. F., 2018. Equifinality in glacial geomorphology: instability theory examined via ribbed moraine and drumlins in Sweden. *GFF* 140, 106–135. <https://doi.org/10.1080/11035897.2018.1441903>
- Nenonen, K., 2009. Subglasiaaliset vesialtaat ovat osoittautumassa merkittäviksi sedimentaatio- ja eroosioympäristöiksi. *Geologi* 61 (1), 6–9.
- Nenonen, K., Vanne, J. & Laaksonen, H., 2010. Laserkeilaus – uusi menetelmä geologiseen kartoitukseen ja tutkimukseen. *Geologi* 62 (2), 62–69.
- Ojala, A. E. K. & Sarala, P., 2017. Editorial: LiDAR – rapid developments in remote sensing of geological features. *Bulletin of the Geological Society of Finland* 89, 61–63. <https://doi.org/10.17741/bgsf/89.2.ed>
- Ojala, A. E. K., Peterson, G., Mäkinen, J., Johnson, M., Kajuutti, K., ym., 2019a. Ice sheet scale distribution of unique 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., Peterson, G., Kajuutti, K., Johnson, M., ym., 2019b. Geomorphology of MURTOOs – a triangular-shaped subglacial landforms produced during rapid retreat of continental ice sheets. *AGU Fall meeting*, 9.–13.12.2019, San Francisco, Yhdysvallat, abstrakti.

- Ojala, A. E. K., Mattila, J., Ruskeeniemi, T., Markovaara-Koivisto, M., Palmu, J.-P., ym., 2019c. Postglacial faults in Finland – a review of PGSDyn -project results. POSIVA, Report 2019-1, 118 s.
- Ojala, A. E. K., Mäkinen, J., Ahokangas, E., Kajuutti, K., Valkama, M., ym., 2021. Diversity of murtoos and murtoo-related subglacial landforms in the Finnish area of the Scandinavian Ice Sheet. *Boreas* 50, 1095–1115. <https://doi.org/10.1111/bor.12526>
- Ojala, A. E. K., Skyttä, P., Mattila, J. & Mäkinen, J., 2022. Bedrock structural control on the formation of subglacial murtoos: is there evidence for late-glacial paleoseismicity origin? Fourth Symposium on late- and postglacial faults, 30.8.–1.9.2022, Løkken, Tanska, abstrakti.
- Ojala, A. E. K., Mäkinen, J., Kajuutti, K., Ahokangas, E., Tuunainen, A., ym., painossa. Subglacial evolution from distributed to channelized drainage: evidence from the Lake Murtoo area in SW Finland. *Earth Surface Processes and Landforms*. <https://doi.org/10.1002/esp.5430>
- Palmu, J.-P., 1999. Moreenimuodostumien inventointi – Esitutkimus Pohjois-Uudenmaan ja Etelä-Hämeen alueella. *Suomen Ympäristö* 292, Ympäristöministeriö, Helsinki, 91 s.
- Palmu, J.-P. & Nenonen, K., 2015. Maaston laserkeilausaineistot maa- ja kallioperän korkokuvan ja rakenteiden heijastajana. *Geologi* 67 (1), 18–25.
- Palmu, J.-P., Ojala, A. E. K., Ruskeeniemi, T., Sutinen, R. & Mattila, J., 2015. LiDAR DEM detection and classification of postglacial faults and seismically-induced landforms in Finland: a paleoseismic database. *GFF* 137, 344–352. <https://doi.org/10.1080/11035897.2015.1068370>
- Palmu, J.-P., Ojala, A. E. K., Virtasalo, J., Putkinen, N. & Kohonen, J., 2021. Classification system of Superficial (Quaternary) Geologic Units in Finland. *Geological Survey of Finland, Bulletin* 412, 115–144.
- Peterson, G., Johnson, M. D. & Smith, C. A., 2017. Glacial geomorphology of the south Swedish uplands - focus on the spatial distribution of hummock tracts. *Journal of Maps* 132, 534–544. <https://doi.org/10.1080/17445647.2017.1336121>
- Peterson Becher, G. & Johnson, M. J., 2021. Sedimentology and internal structure of murtoos – V-shaped landforms indicative of a dynamic subglacial hydrological system. *Geomorphology* 380, 107644. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.107644>
- Porkka, J., 2019. Viuhkamurrosten morfologia ja suhde subglasiaalisiin sulamisvesireitteihin ja murtoomuodostumiin. Maantieteen ja geologian laitos, Turun yliopisto, Turku, LuK-tutkielma, 19 s.
- Putkinen, N., Eyles, N., Putkinen, S., Ojala, A. E. K., Palmu, J.-P., ym., 2017. High-resolution LiDAR mapping of ice stream lobes in Finland. *Bulletin of the Geological Society of Finland* 89, 64–81. <https://doi.org/10.17741/bgsf/89.2.001>
- Salvador, A., 1994. *International Stratigraphic Guide: A Guide to Stratigraphic Classification, Terminology, and Procedure*. Geological Society of America, 214 s.
- Seppälä, M. V. J., 2016. Lidar-based detection and interpretation of glaciotectionic features of the morainic topography of Finland. *Journal of Geological Research* 2016, 4292806. <https://doi.org/10.1155/2016/4292806>
- Soini, S., valmisteilla. Murtoo-muodostuman sisärakenne ja sen 3D-mallintaminen. Maantieteen ja geologian laitos, Turun yliopisto, Turku, pro gradu -tutkielma.
- Spagnolo, M., Phillips, E., Piotrowski, J. A., Rea, B. R., Clark, C. D., ym., 2016. Ice stream motion facilitated by a shallow-deforming and accreting bed. *Nature Communications* 7, 1–11. <https://doi.org/10.1038/ncomms10723>
- Storror, R. D., Ewertowski, M., Tomczyk, A. M., Barr, I. D., Livingstone, S. J., ym., 2020. Equifinality and preservation potential of complex eskers. *Boreas* 49, 211–231. <https://doi.org/10.1111/bor.12414>
- 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>
- Sutinen, R., Sutinen, A. & Middleton, M., 2021. Subglacial squeeze-up moraines adjacent to the Vaalajärvi-Ristonmännikkö glacially-induced fault system, Finnish Lapland. *Geomorphology* 384, 107716. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.107716>
- Vérité, J., Ravier, E., Bourgeois, O., Bessin, P., Livingstone, S. J., ym., 2022. Formation of murtoos by repeated flooding of ribbed bedforms along subglacial meltwater corridors. *Geomorphology* 408, 108248. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2022.108248>