TURUN YLIOPISTO

Geomorfologia ja pintalohkareisuus Kokemäen Sääksjärven subglasiaalisella sulamisvesireitillä

Anton Kuukka

Maantiede
Pro gradu -tutkielma
Laajuus: 30 op

Ohjaaja:
Joni Mäkinen

11.12.2023
Turku

Turun yliopiston laatujärjestelmän mukaisesti tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -järjestelmällä.

Pro gradu -tutkielma

Pääaine: Maantiede
Tekijä: Anton Kuukka
Otsikko: Geomorfologia ja pintalohkareisuus Kokemäen Sääksjärven subglasiaalisella sulamisvesireitillä
Ohjaaja: Joni Mäkinen
Sivumäärä: 49 sivua + liitteet 3 sivua
Päivämäärä: 11.12.2023

Fennoskandian mannerjäätikön deglasiaatio 20 000–10 000 vuotta sitten jätti maaperään lukuisia erilaisia maaperämuodostumia, jotka paljastavat tietoa mannerjäätikön toiminnasta. Tieteellisesti viimeaikaisin maaperämuodostumien luokka on murtoo, joka on kolmionmuotoinen subglasiaalisilla sulamisvesireiteillä muodostunut maastonmuoto. Tyypillistä murtoille on suuri pintalohkareisuus, mutta tarkempaa selvitystä sulamisvesireittien kivisyydestä ei ole aiemmin tehty. Tämän tutkimuksen tavoitteena on selvittää pintalohkareisuuden ja murtoomuotojen suhdetta ja vaihtelua Kokemäen Sääksjärvellä. Aineistona on käytössä noin 4000 lohkareen paikkatietoaineisto, joka on kerätty maastossa satelliittipaikannuksen avulla.

Murtoiden rajaamiseen käytettiin laserkeilausaineistosta laskettua digitaalista korkeusmallia. Menetelminä käytettiin geomorfologista kartoittamista, päällekkäisanalyysiä ja visuaalista karttatulkintaa.

Tutkimuksen keskeisenä tuloksena on, että sulamisvesireitillä pintalohkareisuus on keskittynyt murtoomuotojen ja muiden kohoavien maastonmuotojen päälle. Sulamisvesireitin tasaiset alueet, muinaiset sulamisvesikanavat sekä murtookentille tyypilliset viuhkamurrokset ovat suhteessa kivettömämpiä.

Jäätikkökuljetuksen prosessit sekä subglasiaaliset olosuhteet selittävät topografian vaikutusta kivien sijoittumiseen. Mahdollisesti mannerjään pohja on vaihdellut sulan ja jäätyneen välillä, ja jäätyneenä lohkareet ovat tempautuneet yllä virtaavan mannerjään mukana sulamisvesireitin kohoavien maastonmuotojen päälle.

Tutkimus esittelee uudenlaisen lähestymistavan pintalohkareisuuden paleoglasiologiseen tutkimiseen. Yhdessä muiden tutkimusmenetelmien kanssa se tuo arvokkaan lisän paikallisen glasiaalidynamiikan ymmärtämiseen.

Avainsanat: paleoglasiologia, pintalohkareisuus, sulamisvesireitit, glasiaalidynamiikka, murtoot

Master's thesis

Subject: Geography
Author(s): Anton Kuukka
Title: Geomorphology and surficial boulders of subglacial meltwater route in Sääksjärvi SW Finland
Supervisor: Joni Mäkinen
Number of pages: 49 pages + appendix 3 pages
Date: 11.12.2023

The deglaciation of the Fennoscandian Ice Sheet 20 000–10 000 years ago, left numerous different superficial geological units on the ground, revealing information about the dynamics of the continental glacier. Scientifically, the most recent category of superficial geological unit is murtoo, which is a triangular landform formed by subglacial meltwater. Murtoos are characterized by high density of surface boulders, but more detailed study of the stoniness of the meltwater routes has not been made previously. The aim of this study is to investigate the relationship and variation of the surface boulders and murtoos in Sääksjärvi, SW Finland.

The data used were spatial data from about 4,000 boulders, which were collected in the terrain using GNSS. To delineate murtoos, a digital elevation model created from the laser scanning data was used. The methods were geomorphological mapping, overlay analysis and visual interpretation.

A key finding of the study is that on the meltwater route, surface boulders are concentrated over murtoos and other positive terrain forms. The flat areas of the meltwater route, the ancient meltwater channels, and the fan-shaped hollows have relatively less boulders.

The processes of glacial transport and subglacial environments explain the impact of topography to the positions of the boulders. Potentially, the bed of the continental glacier has fluctuated between melted and frozen, and when frozen, the boulders have been transported on positive terrain forms.

The study presents a novel approach to the paleoglaciological study of surface boulders. It brings valuable additional information to understand the local glacial dynamics together with other methods.

Key words: paleoglaciology, surface boulders, meltwater routes, glacial dynamics, murtoos

Sisällysluettelo

1 Johdanto 1

2 Pintalohkareisuus ja subglasiaaliset sulamisvesireitit 3

2.1 Glasiaalieroosio 5

2.2 Kivikkotyypit 7

2.3 Subglasiaaliset sulamisvesireitit 9

2.4 Jäätikkösyntyiset maaperämuodostumat 11

2.4.1 Moreenimuodostumat 11

2.4.2 Glasifluviaaliset muodostumat 12

2.5 Murtoot ja niiden yhteydessä esiintyvät muodostumat 13

2.6 Murtoiden ja juomumoreenien välinen yhteys 18

3 Aineistot ja menetelmät 20

3.1 Geomorfologinen kartoitus 20

3.2 Lohkareaineiston keruu 22

3.3 Lohkareaineiston laadun arviointi 22

4 Tutkimusalueen kuvaus 24

5 Tulokset 29

5.1 Pintalohkareisuus tutkimusalueella 29

5.2 Tutkimusalueelta löytyvät murtoomuodot 32

5.3 Pintalohkareisuuden sijoittuminen suhteessa maaperämuodostumiin 33

6 Keskustelu 38

6.1 Murtooreitin pintalohkareisuus 38

6.2 Sääksjärven pohjoispuolisen murtooreitin syntyolosuhteet 40

7 Johtopäätökset 42

8 Kiitokset 43

Lähteet 44

Liitteet 50

1 Johdanto

Jäätiköt ovat merkittävä osa globaalia ilmastojärjestelmää, ja tutkimalla niiden toimintaa, on mahdollista ymmärtää nykyistä ja tulevaa ilmastoa entistä paremmin. Nykyiset mannerjäätiköt, Grönlanti ja Etelämanner, ovat haastavasti tutkittavissa monilta ominaisuuksiltaan (Menzies 2002). Onneksi mannerjäätiköistä saadaan lisätietoa tutkimalla myös muinaisten mannerjäätiköiden muokkaamia maastonmuotoja.

Suomen pinnanmuodot muodostuvat ikivanhasta kallioperästä ja sitä peittävästä, pääosin viimeisimmän Veiksel-jääkauden muokkaamasta maaperästä (Lehtinen ym. 1998). Laajimmillaan mannerjäätikkö ulottui noin 20 000 vuotta sitten Keski-Eurooppaan asti ja oli Suomen kohdalla yli kaksi kilometriä paksu (Haavisto-Hyvärinen & Kutvonen 2007, Stroeven ym. 2016). Noin 17 000 vuotta sitten ilmasto lämpeni ja jäätikkö alkoi sulaa sekä sen reuna perääntyä. Nuorempi Dryaskausi noin 13 000–11 500 vuotta sitten oli yksittäinen kylmempi vaihe, jolloin jäätikön perääntyminen pysähtyi synnyttäen I ja II Salpausselän (Menzies 2002). Tämän jälkeen mannerjään sulaminen eli deglasiaatio jatkui, ja jäätikkö hävisi Suomesta noin 10 000 vuotta sitten (Haavisto-Hyvärinen & Kutvonen 2007).

Perinteisesti mannerjään aiheuttamat maaperämuodostumat ovat jaettu moreenimuodostumiin ja jäätikköjokimuodostumiin (esim. Haavisto-Hyvärinen & Kutvonen 2007). Mäkinen ym. (2017) ja Ojala ym. (2019) esittelemät murtoot ovat esimerkki maaperämuodostumasta, joka ei täysin istu nykyiseen kahtiajakoon moreenimuodostumista ja jäätikköjokimuodostumista. Tällä hetkellä murtoo on luokiteltu kumpumoreenien alle (Palmu ym. 2021: 130), vaikka niiden syntyyn on olennaisesti vaikuttanut jään sulamisvedet ja sen perusteella murtoo voitaisiin luokitella myös jäätikköjokimuodostumiin. Ylipäätänsä mannerjäätiköiden hydrologia on huonosti ymmärretty (Greenwood ym. 2016) ja tieteellinen keskustelu sen yksityiskohdista on tärkeää, kun haluamme ymmärtää sulavien jäätiköiden toimintaa.

Murtoot ovat kolmionmuotoisia jäätikkösyntyisiä maaperämuodostumia, jotka ovat muodostuneet lämminpohjaisen jäätikön alla subglasiaalisesti (Mäkinen ym. 2017). Ne ovat mahdollisesti muodostuneet hajautuneen ja kanavoituneen sulamisvesijärjestelmän eräänlaisessa vaihettumistilassa, noin 40–50 kilometriä jään reunasta (Ojala ym. 2022) ja niiden kautta on virrannut sulamisvettä harjuihin. Suomesta ja Ruotsista löydetyt murtoot sijaitsevat yleensä kentissä, jotka muodostavat reittejä (Ojala ym. 2019). Nämä reitit ovat toimineet mannerjäätikön sulamisvesireitteinä jäätikön deglasiaatiovaiheessa (Ojala ym.

2022). Murtooreitit koostuvat morfologisesti monimuotoisista murtoomuodoista, johon kuuluvat erityyppiset murtoot, jyrkänpartaat sekä muut sulamisveden kuluttamat muodot (Ojala ym. 2021).

Niillä subglasiaalisilla sulamisvesireiteillä, missä on havaittu murtoita, on tyypillisesti runsas pintalohkareisuus (esim. Mäkinen ym. 2017; Ojala ym. 2019; Peterson Becher & Johnson 2021; Ojala ym. 2022). Yleensä pintalohkareisuus liittyy glasiaalieroosioon, esimerkiksi juomumoreeneilla (Sarala 2006). Glasiaalieroosion yksityiskohdat ovat tieteellisen debatin alaisena, ja jopa uusi glasiaalieroosion muoto on esitetty (Hall ym. 2020).

Yksityiskohtaisia kuvauksia maan pinnassa havaittujen kivien ja lohkareiden tarkasta sijoittumisesta suhteessa subglasiaalisen sulamisvesireitin maaperämuodostumiin ei ole murtoihin liittyvässä tutkimuksessa vielä tehty. Yleensä glasiaaligeomorfologisessa tutkimuksessa pintalohkareisuus käsitellään kuvailemalla keskimääräistä kivisyyttä sanoin tai lukumäärin, mutta systemaattista kartoitusta ei ole tällä tarkkuudella suoritettu.

Kivien sijaintitiedon yhdistäminen digitaaliseen korkeusmalliin mahdollistaa pintalohkareisuuden merkityksen tutkimisen alueella, jossa sulamisvettä ja jäätikön virtausta on esiintynyt. Tarkoituksenani on selvittää Sääksjärven pohjoispuoleisen subglasiaalisen sulamisvesireitin geomorfologian ja pintalohkareisuuden välistä suhdetta ja siten lisätä ymmärrystä sulavan jäätikön dynamiikasta ja maaston pintalohkareisuuden merkityksestä. Tämän pro gradu -tutkielman tutkimuskysymykset Sääksjärven pohjoispuolella esiintyvään subglasiaaliseen sulamisvesireittiin ovat seuraavat:

1) Minkä tyyppisiä murtoomuotoja tutkimusalueelta löytyy?

2) Miten pintalohkareisuus on sijoittunut suhteessa maaperämuodostumiin?

3) Miten Sääksjärven pohjoispuolinen sulamisvesireitti ja sen pintalohkareisuus ovat muodostuneet?

2 Pintalohkareisuus ja subglasiaaliset sulamisvesireitit

Suuret siirtolohkareet ovat kummastuttaneet ihmisiä läpi historian. Niitä on kutsuttu kulkukiviksi, koska niiden on huomattu edustavan muuta kuin paikallisen kallioperän kivilajia (Ratia 1996: 7). Rahvas selitti kivien kantautuneen taruolentojen, kuten jättiläisten, hiisien ja pirujen viskaamina.

Eräs tarina liittyy Karkun kirkkoon tähdättyyn kiveen, joka lipesi heittäjän kädestä ja putosi Sastamalan entisten kuntien Karkun ja Tyrvään rajalle, jossa sitä kutsutaan Tutervahan kiveksi. Vastaavia taruja heitetyistä siirtolohkareista liittyy myös Maarian, Hauhon, Alastaron, Euran, Hattulan, Huittisten, Raision, Urjalan ja Vesilahden kirkkoihin (Ratia 1996: 8).

1700-luvun tiedemiehet eivät uskoneet vanhan kansan tarinoihin, vaan etsivät vastausta siirtolohkareisiin ja muihin geologisiin ilmiöihin lähinnä Raamatusta (Ratia 1996: 11). Vielä 1800-luvulla tieteentekijöiden uskonnollisuus vaikutti heidän ajatteluunsa (Seppälä 2018: 79). Raamatussa kuvatun vedenpaisumuksen (lat. diluvium) tulkittiin aiheuttaneen maankamaran muodot (Ratia 1996: 11).

Tämä diluviaaliteoria sai jatkoa niin sanotulla jäävuoriteorialla, jonka mukaan suuri määrä kelluvia jäävuoria kuljetti kiviaineksen nykyisille paikoilleen (Seppälä 2018: 84). Lisäksi ruotsalainen Nils Sefström esitti vierinkivivirtateorian, jonka mukaan suunnattoman suuri joki olisi virrannut Ruotsista Saksaan (Ratia 1996: 14). Nämä teoriat haastettiin, kun vuonna 1832 saksalainen Albrecht Bernhardi esitti kaukaa pohjoisesta tulleen jään levittyneen yli Euroopan. Hieman myöhemmin, vuonna 1840 sveitsiläisyhdysvaltalainen Jean Louis Agassiz julkaisi kirjan, josta jääkausiteoria ja glasiaaligeologia sai alkunsa (Seppälä 2018: 84). Olennaisena todisteena muinaisesta jääkaudesta Agassiz käytti siirtolohkareita, joiden emäkalliot sijaitsivat kauempana Alppien keskiosissa (Salonen 1986: 5; Kesäläinen & Kejonen 2019: 35).

Tähän uuteen tieteelliseen teoriaan ei kuitenkaan heti uskottu, ja muun muassa Suomen mineralogian isänä tunnettu Nils Gustav Nordenskiöld selitti vielä 1860-luvulla silokallioiden uurteiden syntyneen jäävuorien sisältämien kivien naarmuttamina (Ratia 1996: 16; Seppälä 2018: 83). 1890-luvun mittaan jääkausiteoria rantautui lopullisesti myös Suomeen ja maaperämuodot tulkittiin jäätikkösyntyisiksi (Seppälä 2018: 85).

Agassizin jääkausiteorian todistustausta nojasi pitkälti siirtolohkareiden kulkeutumiseen ja etäisyyteen lohkareiden emäkalliosta (Salonen 1986: 5). Tätä jäätikkökuljetukseen perustuvaa tutkimussuuntausta jatkettiin 1800-luvun loppupuolelta lähtien niin sanotuilla kivilaskuilla, joilla määritetään moreenin kivilajisuhteet (Koivisto 2004: 154). Aluksi jäätikkökuljetuksen tutkimus jäi kuvailevalle, deskriptiiviselle tasolle. 1900-luvun alkupuolella lohkareiden kulkeutumista selvitettiin kuitenkin jo numeerisesti, kun Hellaakoski (1930) käytti Laitilan rapakiveä indikaattorikivilajina selvittäessään jäätikkökuljetusta. Nykyisin tiedetään lukuisten tekijöiden vaikuttavan jäätikkökuljetukseen, kuten kivilajien ominaisuuksien, alueen maastonmuotojen, jäätikön virtauksen voimakkuuden sekä kalliopaljastuman morfologian (Salonen 1986: 5–6; Koivisto 2004: 154).

Moreenin lisäksi jäätikkökuljetusta on tutkittu myös jäätikköjokiympäristössä (esim. Perttunen & Vartiainen 1992). Harjujen kivet ovat ensin kulkeutuneet jäätikössä ja sitten jäätikköjoessa, joten ne ovat keskimäärin kauempaa kulkeutuneet kuin moreenin kivet (Koivisto 2004: 152). Jäätikkökuljetuksen tutkiminen tuo lisätietoa alueellisesta jäätikködynamiikasta, mutta se on lisäksi ollut tärkeä osa malminetsintää lohkareviuhkojen avulla (Salonen 1986: 5). Lohkareita on hyödynnetty myös kosmogonisessa ajoituksessa. Tällä menetelmällä on ajoitettu Fennoskandian mannerjään deglasiaation vaiheita Veikseljääkauden lopulla (Hughes ym. 2016; Stroeven ym. 2016) sekä Salpausselkien reunamuodostumakompleksien syntyhistoriaa (Rinterknecht ym. 2004). Lisäksi kosmogonisella ajoituksella on tutkittu muun muassa kivivyöryjä (Moreiras ym. 2015).

Pintalohkareisuutta on yleisesti kuvattu maaperäkartoissa, peruskartoissa ja suunnistuskartoissa. Maaperäkartalla pintalohkareisuuden kuvaus jää usein maininnoiksi maaperäkartan selitykseen. Esimerkiksi Sääksjärven maaperäkartan selityksessä alueen moreenia kuvataan paikoin erittäin lohkareiseksi (Kejonen ym. 1988).

Peruskartoissa pintalohkareisuus on kartoitettu pääosin maastossa ja nykyisin peruskarttaa vastaa Maanmittauslaitoksen maastotietokanta (MML 2021). Maastotietokannan pintalohkareisuutta kuvaavat kohteet ovat suuntaa antavia ja pitävät parhaiten paikkansa siellä, missä maastokartoittaja on sattunut liikkumaan.

Suunnistuskartta on suurimittakaavainen, usein 1:10 000 topografinen maastokartta, johon on kuvattu etenkin maaston kulkukelpoisuus. Suunnistuskartalla pintalohkareisuus on kuvattu yksityiskohtaisemmin kuin peruskartalla, mutta yksittäiset yli metrin korkuiset kivet voidaan kuvata vain, jos ne sijaitsevat tarpeeksi kaukana toisistaan (IOF 2019). Tiheämmässä

kivikossa suunnistuskartoittaja käyttää louhikon symbolia kuvaamaan useampia kiviä ja samalla turvaa kartan luettavuuden juoksuvauhdissa.

Yksi viimeisimmistä kehitysaskeleista paleoglasiologiassa liittyy tarkkojen digitaalisten korkeusmallien tulkintaan (esim. Johnson ym. 2015). Laserkeilausaineistosta lasketussa korkeusmallissa (engl. LiDAR, Light detection and ranging; DEM, digital elevation model) on jokaisella koordinaatilla tarkka korkeustieto. Maanmittauslaitoksen avoimesti saatavilla olevan digitaalisen korkeusmallin spatiaalinen resoluutio on 2 metriä ja vertikaalinen tarkkuus on keskimäärin 0,3 metriä (MML 2021).

Digitaalinen korkeusmalli paljastaa maankamaran kolmiulotteiset muodot yksityiskohtaisemmin kuin aikaisempi korkeuskäyriin perustuva topografinen esitystapa. Tämä edistysaskel on mahdollistanut maaperämuodostumien tutkimisen ennennäkemättömällä tarkkuudella (Ojala & Sarala 2017). Esimerkiksi De Geer moreenit ovat yleisempiä kuin aiemmin luultiin (Ojala 2016) ja jopa uusia, tieteelle entuudestaan tuntemattomia maaperämuodostumia on löytynyt (Mäkinen ym. 2017).

Maanmittauslaitoksen digitaalisesta korkeusmallista erottuu yksittäisiä suuria lohkareita, esimerkiksi toorimuodostumat Pyhä-Nattasen päällä (Nenonen ym. 2018: 249). Pienemmät lohkareet eivät erotu etenkään kasvillisuuden peittämillä alueilla. Näin ollen lohkareet ovat kartoitettava maastossa, kunnes laserkeilausaineiston pistetiheys lisääntyy teknologian kehittyessä. Vuonna 2020 aloitettu laserkeilausohjelma kymmenkertaistaa pistetiheyden (MML 2021), jolloin yksittäisten kivien tunnistaminen mahdollistuu erityisesti alueilla, joilla kasvillisuus ei peitä maastoa.

2.1 Glasiaalieroosio

Mannerjää virtaa säteittäisesti keskiosista kohti sen reunoja (Haavisto-Hyvärinen & Kutvonen 2007). Samalla se kuluttaa, kuljettaa ja kasaa kallio- ja maaperää. Tätä prosessia kutsutaan glasiaali- eli jäätikköeroosioksi. Jäätikköeroosio jaetaan tavallisesti abraasioon (engl. abrasion) ja louhintaan (engl. plucking). Jäätikkökuljetusta on tutkittu erityisesti Suomessa moreenin ja harjuaineksen kulkeutumismatkatutkimuksilla (Koivisto 2004: 152).

Abraasiolla tarkoitetaan jäätikön kykyä hioa alustaansa, kuten peruskalliota. Lopputuloksena on silokallio (engl. roche moutonnée) josta on löydettävissä uurteita ja muita kulutusmerkkejä (Ratia 1996: 49). Louhivassa jäätikköeroosion muodossa peruskallio murskaantuu ja sekoittuu jään alla. Jään pohjan sulamisveden paineen vaihtelut voivat myös lisätä murtumia (Glasser

& Bennett 2004: 46). Louhintaa lisää regelaatioksi (engl. regelation) kutsuttu ilmiö, jossa vesi jäätyy ja sulaa vuorotellen (Ratia 1996: 48). Jäätikön massan aiheuttama paine sulattaa jäätä vedeksi maastonmuotojen vastasivulla. Maastonmuodon suojasivulla paine vuorostaan pienenee ja vesi jäätyy. Jäällä on suurempi tilavuus kuin vedellä mikä suurentaa kallion halkeamia. Yllä virtaava jäätikkö vie mukanaan irtoavan materiaalin, ja osa kiviaineksesta nousee jään sisään (Ratia 1996: 48). Jäätikköeroosion voimakkuuteen vaikuttaa huomattavasti kallioperän ominaisuudet ja paikoin aikaisemmat glasiaalisyklit (Bukhari ym. 2021).

Glasiaalinen repiminen (engl. glacial ripping) on Hall ym. (2020) määritelmään perustuva tieteelle uusi jäätikköeroosion muoto. Repiminen tapahtuu deglasiaatiovaihessa ja se on mallinnettu kolmeen osaan (Hall ym. 2020: 346). Ensin paineellinen jäätikön alainen vesi tunkeutuu kallioperän halkeamiin ja muihin heikkouskohtiin ja särkee kallion (engl. hydraulic jacking). Toiseksi kallion yläpuolella virtaava mannerjää ”repii” kalliopaljastumaa lohkareiksi. Kolmanneksi jää kuljettaa lohkareet emokallion distaalipuolelle ja ne kasaantuvat lohkareikoiksi ja kivikoiksi (engl. boulder spread).

Mannerjää on kuljettanut lohkareita jäätikkökuljetuksessaan sen pohjalla subglasiaalisesti, sisällä englasiaalisesti tai päällä supraglasiaalisesti. Jäätikön sisällä kulkeutuva lohkare voi säilyä suurikokoisena ja pyöristymättömänä, kun taas pohjakuorman mukana lohkare usein murskaantuu pienempiin osiin (Ratia 1996). Lohkareen muotoon ja pyöristyneisyyteen vaikuttaa kulkeutumistavan lisäksi kulkeutumisen pituus emäkalliosta sekä kivilajin ominaisuudet. Yksittäinen lohkare voi kulkeutua monen eri tekijän vaikutuksesta ja eri glasiaalisykleissä (Ratia 1996).

Siirtolohkareiksi luokitellaan lohkare, joka on kulkeutunut emäkalliosta vähintään kaksi kertaa oman pituutensa verran (Kesäläinen & Kejonen 2019: 35). Lohkareita on kartoitettu ja niiden kulkeutumismatkoja on arvioitu malminetsinnän yhteydessä (esim. Sauramo 1924; Salonen 1986; Puranen 1988). Yksittäiset moreenikivikon lohkareet muodostavat lohkareviuhkoja, joista voidaan päätellä lohkareiden kulkeutumismatka ja emäkallion sijainti. Tämä perustuu kallioperän ja lohkareiden kivilajin sekä jään liikesuunnan selvittämiselle (Ratia 1996).

Mannerjään ylivirtaamat moreenimaat koostuvat lukemattomista päällekkäisistä lohkareviuhkoista, joista vain osaa on tutkittu. Suomessa on kartoitettu malminetsinnän tarpeisiin yli viisisataa lohkareviuhkaa, ja niiden pituudet ovat tyypillisesti yhdestä viiteen kilometriin, pisimmillään jopa 170 km (Ratia 1996: 189–190). Tarkemmin tutkittuna

lohkareiden kulkeutuminen on ollut kumpumoreenialueilla 0,4–3,0 km, pohjamoreenialueilla 0,8–10,0 km ja drumlinisoituneessa maastossa 5,0–17,0 km (Salonen 1986).

Yksittäisiä lohkareita mannerjää on kuljettanut Suomen maankamaralta Keski-Euroopan pohjoisosiin saakka (Haavisto-Hyvärinen & Kutvonen 2007: 14). Tämänlaisissa tuhansien kilometrien kaukokulkeutumisessa lohkareet ovat kulkeutuneet useamman jäätiköitymisen aikana (Koivisto 2004: 154).

Kokemäen Sääksjärvellä on tutkittu impaktiittilohkareiden kulkeutumista (Salonen & Aumo 1984). Meteoriittitörmäyksessä syntyneitä impaktiittilohkareita on löytynyt Sääksjärven etelä- ja kaakkoispuolelta noin kymmenen kilometrin etäisyydellä Sääksjärvestä. Ne ovat kulkeutuneet mannerjäätikön viimeisimmän (285–295 astetta) mutta myös vanhemman (325–335 astetta) liikesuunnan mukaan (Salonen & Aumo 1984). Sen sijaan impaktiittilohkareita ei ole löytynyt Sääksjärven lounais- länsi- eikä luoteispuolelta, mikä osoittaa mannerjäätikön liikesuunnan merkityksen lohkareiden kulkeutumisessa.

2.2 Kivikkotyypit

Valtakunnallisesti arvokkaiden kivikkojen kartoituksessa Räisänen ym. (2018) luokittelivat Suomen kivikot niiden syntyprosessin mukaan autoktonisiin, para-autoktonisiin ja alloktonisiin kivikoihin. Autoktonisia kivikoita ovat paikallaan rapautuvat rakkakivikot. Para-autoktoniset kivikot ovat massaliikuntojen synnyttämiä taluksia. Mannerjää, routa, rantavoimat ja virtaava vesi kuljettaa materiaalia kauempaa ja muodostavat alloktonisia kivikoita. Lisäksi on olemassa polygeneettisiä kivikoita, jotka muodostuvat usean eri syntyprosessin tuloksena (Räisänen ym. 2018: 32).

Rakkakivikko muodostuu, kun kallioperän rakoihin päätynyt vesi jäätyy, sen tilavuus kasvaa ja raot suurenevat (Johansson & Kujansuu 2005: 30). Tämän prosessin toistuessa kallio pirstoutuu yhä pienemmiksi, särmikkäiksi kiviksi. Suomessa rakkakivikoita esiintyy pääosin Lapissa (Räisänen ym. 2018: 35).

Kalliojyrkänteen ja rapautumisen yhteydessä muodostuu taluskivikko. Jyrkänteestä irtoaa ajan kuluessa kappaleita, jotka putoavat rinnettä alas (Räisänen ym. 2018: 38). Taluksia voi syntyä myös maanjäristyksen seurauksena (Kesäläinen & Kejonen 2019: 47). Yksittäiset kivet ovat rakka-aineksen tapaan särmikkäitä lyhyen kulkeutumismatkan takia.

Mannerjään kerrostaman pohjamoreenin ja moreenimuodostumien kivinen aines muodostaa moreenikivikoita. Pintalohkareisuus on yleisesti suurta kumpu- ja reunamoreenimuodostumilla (Räisänen ym. 2018: 42). Toisin kuin talus- ja rakkakivikossa, moreenikivikon kiviaines on kulkeutunut kauempaa, ei tavallisesti edusta paikallisen kallioperän kivilajia ja on kohtalaisesti pyöristynyttä. Poikkeuksena tähän ovat niin sanotut distaalikivikot (Räisänen ym. 2018: 42), jotka myös lukeutuvat moreenikivikoihin. Ne muodostuvat, kun mannerjää louhii rikkonaista kalliokohoumaa ja kerrostaa kiviaineksen lyhyen kuljetuksen jälkeen kalliokohouman distaalipuolelle. Distaalilouhikko on usein yksittäisen lohkareviuhkan runsaslohkareinen alkupää (Kesäläinen & Kejonen 2019: 38).

Uhkurakat muodostuvat maastonkohtiin, joissa pohjavedenpinta on lähellä maanpintaa ja moreeni on routivaa (Johansson & Kujansuu 2005: 32). Jäätyvä maa kuivuu ja muodostuu kapillaarinen imu, joka nostaa vettä ylöspäin. Tämä vesi jäätyy linssimäisiksi jääkerroksiksi ja maanpinta nousee. Keväällä roudan sulaessa kivien alle valuu maa-ainesta, ja prosessin toistuessa kivet kerrostuvat maanpinnalle uhkurakaksi (Räisänen ym. 2018: 45).

Virtaava vesi on paikoin kerrostanut kivikoita ja toisaalla huuhtonut hienompaa ainesta pois, jolloin moreeniaineksen lohkareet ovat jääneet maanpinnalle (Räisänen ym. 2018: 49). Harjut ovat muodostuneet jäätikköjokien kasaamasta aineksesta. Jäätikköjoet kuljettivat hiekan ja soran lisäksi kiviä, jotka päätyivät harjun ydinosiin. Tämä ydinkivikko on paikoin paljastunut esiin, kun jäätikköjoki on supra-akvaattisilla alueilla huuhtonut aiemmin kerrostunutta muodostumaa (Räisänen ym. 2018: 50). Subakvaattisilla alueilla Itämeren varhaisvaiheiden rantavoimat ovat voineet huuhtoa ydinkivikkoa esiin. Lapista on lisäksi löytynyt harjuja, joiden aines on pelkästään lohkareikkoa (Johansson & Kujansuu 2005: 32).

Jääjärvi voi patoutua jään reunan ja paikallisen topografian rajaamalle alueelle. Jään sulaessa vesi voi virrata voimakkaasti uurtaen maaperään uomia. Lisäksi jään alla sulamisvedet kuluttavat uomia vedenpaineen vaihdellessa (Räisänen ym. 2018: 50). Supra-akvaattisilla alueilla on havaittu virtaavan veden muodostamia purkauskivikkokerrostumia. Ne ovat muodostuneet, kun voimakkaasti virtaava vesi tempaa hienomman aineksen mukaansa ja jäljelle jää vain kivet ja lohkareet. Deglasiaation jälkeen maankohoaminen oli voimakasta ja järvien lasku-uomat vaihtuivat. Tämän takia postglasiaalisia, nykyään kuivia virtaavan veden kuluttamia kivisiä uomia löytyy etenkin Pohjois-Suomesta (Räisänen ym. 2018: 51).

Rantakivikot ja muinaisrantakivikot ovat aallokon ja jäiden kasaamaa kivikkoa tai lohkareikkoa (Räisänen ym. 2018: 51). Rantakivikot voivat olla pitkänomaisia

rinteensuuntaisia kivivöitä, kivisiä rantavalleja tai laajoja pirunpeltoja. Ne ovat syntyneet, kun rantavoimat ovat huuhtoneet hienomman aineksen kivien ympäriltä pois (Mäkinen ym. 2011). Rantakivikoiden kivet ja lohkareet ovat usein melko pyöristyneitä. Rantakivikkoja ja muita rantamerkkejä esiintyy eri puolilla Suomea maankohoamisen ja rannansiirtymisen seurauksena eri korkeustasoilla (Johansson ym. 2000: 9).

Kuviomaakivikot ovat roudan toiminnan ja kiviaineksen valumisen synnyttämiä kivikoita. Routa nostaa maa-ainesta ja kivet lajittuvat kehiksi. Rinteessä valuminen järjestää kiviä kivijuoviksi tai kivivirroiksi (Räisänen ym. 2018: 56). Kuviomaiden synty edellyttää kylmiä olosuhteita, joten kuviomaakivikoita esiintyy Suomessa vain Lapissa.

Polygeneettiset kivikot eli kompleksiset kivikot ovat useasta kivikkotyypistä koostuvia kivikoita. Kivikko on voinut kehittyä usean prosessin tuloksena ja kivikon luokittelu yhteen tyyppiin voi olla haastavaa. Myös yksittäisen lohkareen kehityshistoria voi olla varsin monimuotoinen. Lohkare on voinut olla ennen viimeisintä jääkautta rapakalliosta syntynyt toori, jota mannerjää on kuljettanut. Deglasiaation jälkeen lohkare on voinut olla raukkina, jota rantavoimat ja järven- tai merenjää ovat kuluttaneet. Myöhemmin maankohoamisen seurauksena ranta on siirtynyt ja lohkare on jatkanut toorina (Kesäläinen & Kejonen 2019: 47).

Kallion yli virtaava jää louhii, murskaa ja kuljettaa kiviainesta kauemmaksi emäkallion luota jään virtaussuunnan mukaisesti. Siirtolohkareiksi kutsutaan mannerjään peruskalliosta irrottamia lohkareita, jotka ovat kulkeutuneet joko jäätikkökuljetuksessa tai jäävuorien mukana (Räisänen ym. 2018: 53). Lisäksi lohkare voi kulkeutua jäätikköjoessa, matkata kelluvien jäävuorien mukana tai liikkua rantavoimien vaikutuksesta (Saltikoff 1985: 10).

2.3 Subglasiaaliset sulamisvesireitit

Mannerjään sulaessa eli deglasiaatiovaiheessa valtavat vesimassat virtasivat jäätikön keskiosista kohti sen reunoja. Mannerjäätiköiden toiminnan ja dynamiikan kannalta subglasiaalinen (eli jäänalainen) hydrologia on olennaisessa osassa, mutta sen tieteellinen ymmärtäminen on vielä puutteellista (Greenwood ym. 2016). Subglasiaalisia sulamisvesireittejä ovat tutkineet viime aikoina muun muassa Lewington ym. (2020) ja Sharpe (2021).

Subglasiaaliset sulamisvesireitit voidaan jakaa kanavoituneeseen (engl. channelized) ja hajautettuun (engl. distributed) sulamisvesijärjestelmään (Hooke 2020: 208). Yleisesti

kanavoitunutta järjestelmää pidetään tehokkaampana virtauksen suhteen kuin hajautettua sulamisvesijärjestelmää, jossa vesi virtaa verkkaisemmin (Hooke 2020: 209).

Harjut ja tunnelilaaksot ovat esimerkkejä kanavoituneen järjestelmän maaperämuodostumista, kun taas hajautetun järjestelmän jäljet ovat pitkään olleet tieteelle tuntemattomampia. Kanavoituneeseen järjestelmään lukeutuvat R- ja N-uomat, jotka muodostuvat joko jään sisään sulamisvesitunneliksi tai jään alle uomaksi (Hooke 2020: 209).

Hajautettu sulamisvesijärjestelmä muodostuu subglasiaalisista kavitaatioista (engl. cavities), jotka voivat olla yhteydessä toisiinsa purkausaukkojen (engl. orfices) kautta, jolloin muodostuu verkottunut kavitaatiosysteemi (engl. linked cavity system) (Hooke 2020: 209). Kavitaatiot muodostuvat, kun veden paine ylittää paikallisesti jään paineen jään liikettä vastustavan esteen distaalisivulla, ja samalla jään virtausnopeus lisääntyy (Hooke 2020: 161).

Murtoiden kerrostumisympäristössä on todennäköisesti tehollinen paine (effective pressure) ollut lähellä nollaa, eli tasapainotilaa (Ojala ym. 2022). Tehollisen paineen määrittää jään paineen ja veden paineen erotus. Tasapainotilassa jään paine pyrkii sulkemaan kavitaatioita samalla kun veden paine pyrkii pitämään niitä auki, ja jään kontakti maanpinnan välillä vaihtelee.

Ahokangas ym. (2021) ovat kartoittaneet sulamisvesireittien jakautumista Suomessa viiteen luokkaan. Luokkia ovat murtooreitit (engl. murtoo routes), kumpumoreenireitit (engl. hummock routes), muut reitit (engl. other routes), jään reunan reitit (engl. proglacial/marginal routes) sekä harjut (engl. eskers).

Murtooreitit ovat sulamisvesireittejä, joilla esiintyy murtoita tai niihin liittyviä maaperämuodostumia (Ahokangas ym. 2021: 4). Murtoot esiintyvät kentissä, jotka asettuvat sulamisvesireiteille. Nämä reitit ovat löytyneet aikaisemman murtoisiin liittyneen tutkimuksen (Mäkinen ym. 2017; Ojala ym. 2019; Ojala ym. 2021) yhteydessä.

Kumpumoreenireitit koostuvat epäsäännöllisistä kumpareista ja kumpumoreeneista, mutta niiltä puuttuvat murtoisiin liittyviä morfologisia ominaisuuksia (Ahokangas ym. 2021: 5). Muut reitit tarkoittavat tässä yhteydessä sulamisvesireittejä, joissa on eroosion jälkiä ja paikoin yhteys peruskallion murroskohtiin. Jään reunan reitit ovat subglasiaalisia sulamisvesireittejä, esimerkiksi subglasiaalisesti syntyneitä kuruja ja ekstramarginaalisia uomia, joita esiintyy pääosin vedenkoskemattomilla alueilla (Ahokangas ym. 2021: 5).

Jäätikköjokitunnelissa syntyneet harjut muodostavat sulamisvesireittien viidennen ryhmän. Harjut edustavat kanavoitunutta sulamisvesijärjestelmää siinä missä kumpumoreenireitit edustavat hajautunutta järjestelmää (Ahokangas ym. 2021: 5). Murtooreittien on tulkittu asettuvan kanavoituneen ja hajautuneen sulamisvesijärjestelmien välille (Ojala ym. 2022).

2.4 Jäätikkösyntyiset maaperämuodostumat

2.4.1 Moreenimuodostumat

Jäätikkösyntyiset eli glasigeeniset maaperämuodostumat voidaan jakaa jäätikkösyntyisiin moreenimuodostumiin ja jäätikköjokisyntyisiin muodostumiin (Palmu ym. 2021: 129). Moreenimuodostumat ovat pääosin moreenista koostuvia, korkokuvaltaan erottuvia maastonmuotoja, jotka on perinteisesti jaettu drumliineihin, kumpumoreeneihin ja reunamoreenimuodostumiin (Mäkinen ym. 2007: 26). Jäätikköjokisyntyiset eli glasifluviaaliset muodostumat ovat jään sulamisveden lajittelevasta materiaalista koostuvia muodostumia, jotka paikoin kasaantuvat harjuiksi ja paikoin erodoituvat kuruiksi, uomiksi tai paljaiksi kalliopinnoiksi (Haavisto-Hyvärinen & Kutvonen 2007.

Drumliinit kuuluvat glasiaalisiin lineaatioihin, jotka ovat jään liikesuuntaa ilmentäviä maaperämuodostumia Palmu ym. (2021: 161). Ne ovat syntyneet jään virratessa maaperän ylitse samalla deformoiden ja virtaviivaistaen maaperän esteet, kuten kalliokohoumat ja lujat maaperän kerrostumat. Tämänlaisia maaperämuodostumia ovat drumliinit ja flutingit, ja niiden syntyprosessia kutsutaan drumlinisaatioksi (Mäkinen ym. 2007: 29).

Bennett & Glasser (1996) ovat luokitelleet kumpumoreenit kolmeen perustyyppiin. Ensimmäinen on supraglasiaalinen tai marginaalinen kumpumoreeni, joka on syntynyt vedenkoskemattomilla, ylimmän rannan yläpuolisilla alueilla tai matalan veden oloissa jäätikön reunan läheisyyteen jään sulaessa paikalleen. Toinen on subglasiaalinen, eli jäätikön pohjalla syntynyt kumpumoreeni. Sen morfologiassa on usein merkkejä jään liikkeestä ja sulamisvesien huuhtoutumisesta. Tähän luokkaan kuuluvat juomumoreenit mukaan luettuna Rogen- ja ribbed-moreenit. Kolmas kumpumoreenityyppi Bennett & Glasserin (1996) luokittelussa on jäätikkökielekkeiden saumoissa esiintyvät kumpumoreenit. Niille on tyypillistä massaliikuntoihin liittyvät prosessit ja lohkareisuus.

Kumpumoreenit eivät tavallisesti ole suuntautuneet jään liikesuunnan mukaan. Poikkeuksena tähän on juomumoreeni, joka tyypillisesti orientoituu kohtisuoraan jään liikesuuntaan nähden

(Mäkinen ym. 2007: 26). Maaperämuodostumia on luokiteltu kumpumoreeneiksi myös silloin, kun niiden syntytapa on vaikea määritellä (Palmu ym. 2021: 163).

Kumpumoreenialueille muodostuneet moreenikivikot ovat pääasiassa syntyneet deglasiaatiovaiheessa jään reunavyöhykkeeseen kertyneestä aineksesta (Räisänen ym. 2018: 43). Lisäksi jään reunan yhteydessä esiintyneet railot ovat kasanneet kiviaineista ja subakvaattisilla alueilla rantavoimat ovat huuhtoneet moreenikivikoita. Juomumoreenien pintalohkareisuus on tulkittu johtuvan kylmä- ja lämminpohjaisen jäätikön vaihtelusta ja jään voimakkaasta louhinnasta (Sarala 2006). Näin ollen juomumoreeneita peittävät kivet ovat kulkeutuneet vain lyhyen matkan ja ovat peräisin paikallisesta kallioperästä.

Reunamoreenimuodostumat ovat nimensä mukaisesti syntyneet jäätikön reunassa tai sen läheisyydessä (Mäkinen ym. 2007: 26). Reunamoreenimuodostumat voidaan jakaa isoihin reunamoreenimuodostumiin, joita esiintyy esimerkiksi Salpausselkien muodostumaketjuissa, sekä pienempiin reunamoreenivalleihin, kuten De Geer -moreeneihin (Mäkinen ym. 2007: 47–48). Isossa reunamoreenimuodostumassa jäätikköjokien kasaamaa lajittunutta materiaalia on huomattavat määrät etenkin muodostuman distaalisivulla. Jään reuna on pysynyt pidempään paikallaan, jolloin materiaalia on ehtinyt kerrostua enemmän (Mäkinen ym. 2007: 47). De Geer -moreenit ovat pitkänomaisia harjanteita, jotka ovat muodostuneet mannerjään deglasiaatiovaiheessa jään reunaan. Niiden muoto ja etäisyys toisistaan kertoo paikallisesti jään perääntymisen dynamiikasta (Palmu ym. 2021: 162). De Geer -moreenien harjanteet ovat usein suurten lohkareiden peitossa (Ojala 2016: 17).

2.4.2 Glasifluviaaliset muodostumat

Mannerjäätikön sulaessa valtavat määrät vettä virtasivat jään alla, päällä ja sisällä mannerjään keskiosista kohti sen reunoja. Sulamisvedet paikoin kerrostivat ja paikoin erodoivat maa-ainesta, ja näin ollen glasifluviaaliset muodostumat eli jäätikköjokimuodostumat voidaan jakaa kasaantumismuotoihin ja kulutusmuotoihin (Haavisto-Hyvärinen & Kutvonen 2007: 23–24).

Sulamisvesien kanavoitumiseen vaikuttavat mannerjäätikön pohjan olosuhteet, kuten lämpötila ja paine sekä paikallinen topografia (Johansson & Kujansuu 2005: 116–117). Sulamisvedet hakeutuvat painegradientin mukaisesti kohti jään reunaa maastonmuotoja mukaillen, mutta suuren hydrostaattisen paineen takia sulamisvedet pystyvät virtaamaan myös ylämäkeen toisin kuin nykyiset virtavedet.

Jäätikköjokimuodostumien kasaantumismuotoja ovat harjut, jotka koostuvat hiekasta ja sorasta sekä pyöristyneistä kivistä ja lohkareista (Haavisto-Hyvärinen & Kutvonen 2007: 24). Harjut muodostuvat jäätikköjokitunnelissa, ja harjun morfologia kertoo tunnelin muodosta. Paikoin harjut levenivät harjulaajentumiksi, joissa voi esiintyä jäälohkareista syntyneitä suppia. Jäätikköjoensuistoa kutsutaan joko deltaksi tai sanduriksi sen mukaan, onko sulamisvedet kerrostuneet veteen vai kuivalle maalle (Haavisto-Hyvärinen & Kutvonen 2007: 24–25).

Jäätikköjokien muodostamia kulutusmuotoja, kuten lieveuomia ja satulakuruja esiintyy etenkin Lapissa korkeimman rannan yläpuolella. Etenkin Pohjois-Suomessa kulutus- ja kasaantumismuodot vuorottelevat sulamisvesireitillä ja näin ilmentävät subglasiaalisten olosuhteiden sekä paikallisen topografian vaihtelua (Johansson & Kujansuu 2005: 117). Mannerjään sulamisvesireitti saattaa esimerkiksi kerrostaa harjuainesta tunturiselännettä kohdin ylämäkeen, huuhtoa tunturin kalliopinnan näkyviin mäen laella ja alamäkeen ja jatkaa harjumuodostumaa siitä eteenpäin kohti mannerjään reunaa (Johansson & Kujansuu 2005: 58).

2.5 Murtoot ja niiden yhteydessä esiintyvät muodostumat

Murtoot ovat kolmionmuotoisia jäätikkösyntyisiä maaperämuodostumia, jotka muodostuvat lämminpohjaisen jäätikön alla subglasiaalisesti (Mäkinen ym. 2017, Ojala ym. 2021). Murtoot sijaitsevat yleensä kentissä, jotka muodostavat reittejä (Ojala ym. 2019). Nämä reitit ovat olleet mannerjäätikön sulamisvesireitteinä jäätikön deglasiaatiovaiheessa. Suomen murtoot ovat selkeämmin kehittyneet edellä mainituissa reiteissä, verrattuna Ruotsin maaperältä löytyneisiin murtoisiin. Murtoita on löydetty Suomesta, Ruotsista sekä Virosta (Karpin ym. 2023).

Murtoot on perinteisesti kartoitettu ja luokiteltu kumpumoreeneiksi, ennen kuin ne tieteellisesti löydettiin ja tunnistettiin omaksi moreenimuodostumaluokaksi. Mäkinen ym. (2017) löysivät murtoot tutkimalla laserkeilausaineistosta tuotettua korkeusmallia ja kiinnittämällä huomion kolmionmuotoisiin maaperämuotoihin, jotka myöhemmin sedimentologisen tutkimuksen myötä osoittautuivat itsenäisiksi tieteelle aikaisemmin tuntemattomiksi maaperämuodostumiksi. Itämeren virtauskielekkeen alueelta, pääosin nykyisestä Satakunnasta löydettiin 23 murtookenttää, joista suurin osa asettui subglasiaalisille sulamisvesireiteille (Mäkinen ym. 2017).

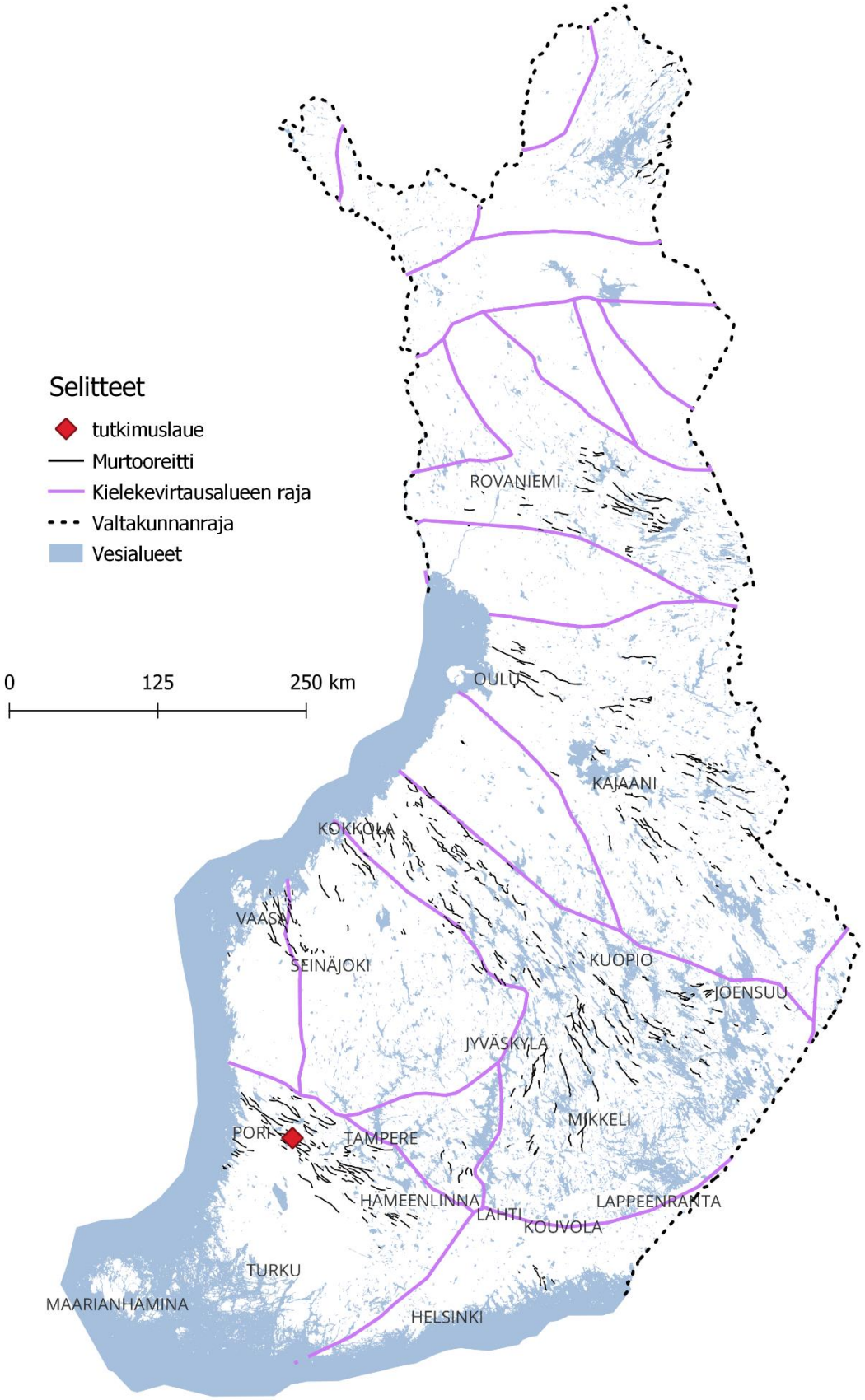
Samanaikaisesti Peterson ym. (2017) löysivät samanlaisia muodostumia Ruotsista kartoittaessaan kumpumoreenireittejä. Seppälä (2016) kiinnitti myös huomiota murtookenttiin tulkiten niiden syntyperän liittyvän sekundaariseen deformaatioon, kuten glasiotektoniikkaan. Varsinaisesti termi murtoo hyväksyttiin tiedeyhteisön käyttöön Ojala ym. (2019) artikkelin myötä, jossa murtoiden morfologiaa ja levinneisyyttä käsitellään tarkemmin. Nimi viittaa Murtoon taloon Nokialla, joka oli yksi ensimmäisiä murtoiden havaintopaikoista (Ojala ym. 2019: 115). Kaikkiaan 564 murtookenttää löydettiin ja tarkat morfometriset mitat tilastoitiin 680 yksittäisen murtoon osalta (Ojala ym. 2021: 117–118). Myöhemmin Ahokangas ym. (2021) ovat kartoittaneet 573 yksittäistä murtooreittiä pelkästään Suomen alueelta (kuva 1), jolloin on selvää, että murtoot muodostavat merkittävän aiemmin tuntemattoman kokonaisuuden glasiologisessa tutkimuksessa.

Peterson Becher & Johnson (2021), Mäkinen ym. (2023) ja Hovikoski ym. (2023) ovat tutkineet tarkemmin murtoiden sedimentologiaa ja syntyperää. Murtoon yllä virtaavan mannerjään kontaktin ja sulamisvesivirtauksen voimakkuus ovat vaihdelleet muodostuman kehittyessä ja murtoon teoreettinen kehittymismalli sisältää kuusi vaihetta (Peterson Becher & Johnson 2021: 12).

Ensimmäisessä vaiheessa mannerjää virtaa aktiivisesti, moreenia kerrostuu ja sulamisvesien paine on matala. Toisessa vaiheessa mannerjään ja maaperän väliin muodostuu tila, jossa sulamisvesien virtaus on voimakasta ja aikaisemmin kerrostunut moreeni voi deformoitua. Kolmannessa vaiheessa virtaus heikkenee ja Peterson Becher & Johnson (2021: 12) ehdottaa hajautuneen sulamisvesijärjestelmän kavitaatioiden muodostumista. Jäänalaisten kavitaatioiden ollessa yhteydessä toisiinsa purkausaukkojen kautta muodostuu verkottunut kavitaatiosysteemi. Murtoista löydetyt hiekka- ja sorayksiköt on tulkittu kerrostuneen tämänlaisissa kavitaatioissa (Peterson Becher & Johnson 2021: 5). Neljännessä vaiheessa sulamisvesien virtaus tehostuu ja murtoon erosionaaliset rakenteet syntyvät. Samalla yllä virtaavan jään aiheuttama paine ylittää veden paineen, jolloin tila maaperän ja jään välillä kapenee. Viidennessä vaiheessa sulamisvedet jatkavat uomien muodostamista ja murtookenttä saa morfologisen rakenteensa. Kuudes vaihe toistaa ensimmäisen vaiheen syklin, jolloin yli virtaava jää kerrostaa moreenia ja deformoi sedimenttejä (Peterson Becher & Johnson 2021: 12).

Ojala ym. (2021) ovat luokitelleet murtoot ja niiden yhteydessä esiintyvät muodostumat viiteen luokkaan (taulukko 1): 1) kolmionmuotoiset murtoot (engl. triangle-type murtoos,

TTMs), 2) chevron -tyypin murtoot (engl. chevron-type murtoos, CTMs), 3) lohkomaiset murtoot (engl. lobate-type murtoos, LTMs), 4) murtoiden yhteydessä esiintyvät harjanteet ja jyrkänpartaat (engl. murtoo-related ridges and escarpments, MREs) ja 5) murtoisiin liittyvät polymorfiset maastonmuodot (engl. other murtoo-related polymorphous landforms, PMRs). Tämä luokittelu kattaa maastonmuodot, joita murtookentillä tyypillisesti on havaittavissa. Käytännössä moni murtoisiin liittyvä maastonmuoto vaihettuu näiden luokkien välille ollen sekoitus kahta tai useampaa luokkaa (Ojala ym. 2021: 5).



Kuva 1. Tutkimusalueen sijainti (punaisella). Mustat viivasymbolit esittävät murtooreittejä Ahokangas ym. (2021) mukaan. Kielekevirtausalueet ovat Geologian tutkimuskeskuksen aineistoa. Pohja-aineistona on MML:n yleiskartta 1:4,5 milj.

Kolmionmuotoisen murtoon tunnistaa sen nuolen kärkeä muistuttavasta muodosta, joka osoittaa viimeisimmän jään liikesuuntaa (Mäkinen ym. 2017, Ojala ym. 2019, Ojala ym. 2021). Jään proksimaalisivu on loivapiirteisempi kuin jyrkkä distaalisivu, joka erottuu hyvin digitaalisesta korkeusmallista. Kolmionmuotoiset murtoot esiintyvät paikoin vierekkäin sekä osittain päällekkäin ja ovat läheisessä yhteydessä viuhkamurroksiin (Porkka 2019, Ojala ym. 2021: 5) joita Seppälä (2016) on kuvannut glasiotektonisiksi rakenteiksi. Suurimpien kolmionmuotoisten murtoiden päällä on erotettavissa pieniä harjanteita ja notkelmia (Ojala ym. 2021: 5).

Chevron -tyypin murtoo muistuttaa muuten kolmionmuotoista murtoota, mutta niiden proksimaali- ja keskiosasta puuttuu maa-ainesta (Ojala ym. 2021: 6). Kokonainen chevron -tyypin murtoo koostuu kahdesta haarasta, mutta toisinaan toinen haara on lyhyempi tai se puuttuu lähes täysin (Ojala ym. 2021: 6).

Lohkomaisen murtoon distaalikärki on kolmionmuotoista murtoota pyöreämpi ja epämääräisempi. Proksimaalisivu on usein kuperan muotoinen, siinä missä se kolmionmuotoisella murtoolla on suorempi (Ojala ym. 2021: 7–8).

Kolmionmuotoisen ja chevron -tyypin murtoon pituus on suunnilleen yhtä pitkä kuin leveys, mutta lohkomaisen murtoon leveys on keskimäärin suurempi kuin sen pituus (Ojala ym. 2021: 10). Kolmionmuotoisen ja lohkomaisen murtoon distaalisivun jyrkkyys on tyypillisesti verrannollinen muodon korkeuteen ja pinta-alaan, mikä ei täysin päde chevron -tyypin murtooseen (Ojala ym. 2021: 10). Murtoiden korkeudessa (yleisesti alle viisi metriä) ei puolestaan ole havaittu eroa eri murtootyyppien välillä (Ojala ym. 2021: 10).

Murtoiden yhteydessä esiintyvät harjanteet ja jyrkänpartaat ovat loivasti mutkittelevia pitkänomaisia muotoja, joiden pituus vaihtelee muutamasta sadasta metristä useaan kilometriin (Ojala ym. 2021: 8). Erosionaaliset uomat katkaisevat paikoin harjanteita ja jyrkänpartaita. Yksittäinen pitkänomainen muoto edustaa usein jyrkänparras -tyyppiä kun taas useat pitkänomaiset muodot rinnakkain edustavat harjanteita (Ojala ym. 2021: 9). Harjanteiden ja jyrkänpartaiden jyrkempi sivu on usein kahdesta kymmeneen kertaa jyrkempi kuin loivempi sivu, ja muotojen korkeus on yleisesti verrannollinen muodon rinteen kaltevuuteen (Ojala ym. 2021: 10).

Murtoisiin liittyvät polyformiset maastonmuodot ovat vaihtelevan kokoisia (5–100 metriä pitkiä ja leveitä) kumpuja ja harjanteita, jotka ovat suuntautuneet läheisten murtoiden mukaan

tai ovat epäsäännöllisesti suuntautuneita (Ojala ym. 2021: 9). Murtoisiin liittyviä polyformisia maastonmuotoja löytyy lähes kaikilta murtookentiltä ja osa niistä muistuttaa ikään kuin heikosti kehittyneitä murtoita, joita ei voi täsmällisesti kuvata edellä mainituilla muilla murtootyypeillä (Ojala ym. 2021: 9). Kumpujen ja harjanteiden lisäksi murtoisiin liittyviin polyformisiin maastonmuotoihin luokitellaan myös viuhkamurrokset, jotka muodostavat paikoin kokonaisuuden kolmionmuotoisten murtoiden kanssa (Ojala ym. 2021: 7).

2.6 Murtoiden ja juomumoreenien välinen yhteys

Vérité ym. (2022) rajasivat digitaalisesta korkeusmallista yli 7 000 murtoota ja juomumoreenia (engl. ribbed bedforms) vertaillakseen niiden pohjamuotoja huomioimatta kohteiden pinta-aloja, ja osoittivat jatkuvuutta murtoiden ja juomumoreenien pohjamuotojen välillä. Maastonmuodoissa verrattiin suuntautuneisuutta (engl. elongation) jään liikesuuntaan nähden, ympyrämäisyyttä (engl. circularity) ja mutkittelevuutta (engl. sinuosity) (Vérité ym. (2022: 3). Harjaviivalla (engl. crestline) tarkoitetaan tässä yhteydessä maastonmuodon korkeimpien kohtien yhdistävää viivaa.

$$Suuntautuneisuus = \frac{poikittainen\ pituus}{pitkittäinen\ pituus}$$

$$Ympyrämäisyys = \frac{4 \times \pi \times pinta - ala}{2 \times ympärysmitta}$$

$$Mutkittelevuus = (\left(\frac{harjaviivan\ pituus}{suora\ pituus}\right) - 1\ )/(\sqrt{5} - 1)$$

Pieni suuntautuneisuusluku kuvaa pohjamuotoa, joka on vahvasti suuntautunut jään liikesuunnan mukaan ja suuri suuntautuneisuusluku kuvaa pohjamuotoa, joka on suuntautunut kohtisuoraan jään liikesuuntaan verrattuna. Ympyrämäisyysluku kuvaa pohjamuodon pyöreyttä ja vaihtelee nollan (ei-ympyrämäinen pohjamuoto) ja yhden (täydellisen ympyränmuotoinen pohjamuoto) välillä. Mutkittelevuusluku kuvaa pohjamuodon kiemuraisuutta ja pieni luku kuvaa suoraviivaista pohjamuotoa ja suuri luku mutkittelevaa pohjamuotoa (Vérite ym. 2022).

Suuntautuneisuuden, ympyrämäisyyden ja mutkittelevuuden perusteella maastonmuodot jaettiin kolmeen luokkaan. Luokan yksi muodostivat pääosin suuntautumattomat, ympyränmuotoiset ja mutkittelemattomat maastonmuodot. Luokan kaksi muodostivat pääosin jään liikesuuntaan nähden kohtisuoraan suuntautuneet, pitkänomaiset ja suoraviivaiset

maastonmuodot. Juomumoreenit asettuvat Vérité ym. (2022) mukaan luokan yksi ja kaksi välille. Luokan kolme muodostivat kolmionmuotoiset murtoot, jotka ovat suuntautuneet jään liikesuunnan mukaan, melko ympyränmuotoisia ja vahvasti mutkittelevia. Luokkien 2 ja 3 välille asettuvat juomumoreenien ja murtoiden vaihettumismuodostelmat, joihin lukeutuvat Vérité ym. (2022: 9) mukaan muun muassa lohkomaiset murtoot.

Vérité ym. (2022) suoritti analogisen mallinnuksen, jossa toistuvilla tulvilla saavutettiin pienoiskoossa vastaavia maastonmuotoja, kuin luonnosta oli havaittu. Tämä havainto puoltaa sitä hypoteesia, jonka mukaan murtoot olisivat muodostuneet juomumoreeneista toistuvien subglasiaalisten tulvien myötä. Mitä useampi tulva, sitä lähempänä muodostuma muistutti kolmionmuotoista murtoota suuntautuneisuuden, ympyrämäisyyden ja mutkittelevuuden osalta analogisessa mallinnuksessa. Vérite ym. (2022: 13) mukaan murtoot muodostuisivat juomumoreeneista toistuvien tulvien ja jään kontaktin vaihdellessa. Tässä prosessissa juomumoreenit olisivat vain lähtökohta, josta myöhemmin sopivissa subglasiaalisissa olosuhteissa muokkaantuisivat murtoot.

Analogisessa mallinnuksessa ei kuitenkaan voida saavuttaa luonnollisten olosuhteiden kaikkia piirteitä, kuten subglasiaalista vedenpainetta, jäätikkökuljetusta ja heterogeenistä raekokoa. Lisäksi Vérité ym. (2022) tulkinta murtoiden ja juomumoreenien morfologisesta jatkuvuudesta pohjautuvat yksinomaan geomorfologisiin havaintoihin ilman kenttätöitä vaativia sedimentologisia ja stratigrafisia tutkimuksia. Hypoteesi juomumoreenien ja murtoiden yhteydestä tuo kuitenkin mielenkiintoisen lisän murtootutkimukseen.

3 Aineistot ja menetelmät

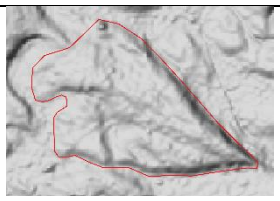
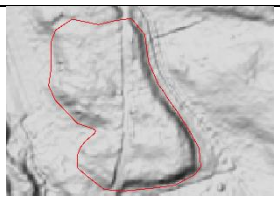
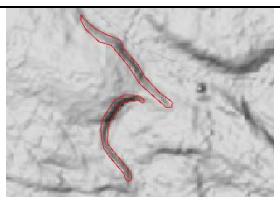
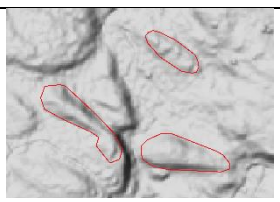
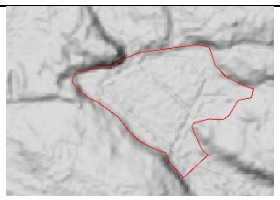
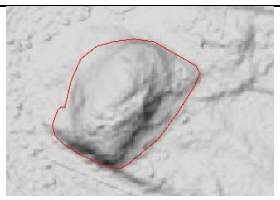
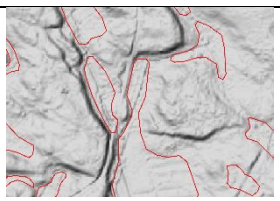
Tutkielman menetelmänä käytettiin geomorfologista kartoitusta digitaalista korkeusmallia hyödyntäen. Kartoituksessa keskityttiin erityisesti murtoisiin ja muihin subglasiaalisella sulamisvesireitillä löydettyjen maaperämuotojen tarkasteluun. Geomorfologinen kartoitus dokumentoitiin QGIS paikkatieto-ohjelmalla. Maastossa satelliittipaikantimella kerätty lohkareaineisto yhdistettiin tähän geomorfologiseen kartoitukseen, ja aineistoja analysoitiin päällekkäisanalyysin avulla, jolloin saatiin tietoa mitkä murtooreitin maaperämuodot ovat suhteellisesti kivisimpiä.

Aineistona käytettiin Maanmittauslaitoksen laserkeilaukseen perustuvaa kahden metrin ruutukoon korkeusmallia. Itse tuottaminani aineistoina käytin pintalohkareisuuden paikkatietoaineistoa sekä geomorfologista kartoitusta. Tutkielman analyysivaiheessa kivien sijaintia tarkasteltiin suhteessa toisiin kiviin, jäätikkösyntyisiin maaperäkohteisiin, maaston topografiaan ja jään liikesuuntaan. Tutkimusalueen kuvausta varten käytettiin GTK:n avointa maaperä-, muinaisrannat- ja kallioperäaineistoa.

3.1 Geomorfologinen kartoitus

Tutkimusalueen tasaiset alueet rajattiin ensin omaksi luokakseen. Nämä tasaiset alueet ovat nykyisin pääosin ojitettuja soita. Tasainen alue määriteltiin digitaalisesta korkeusmallista laskettujen 30 cm korkeuskäyrien avulla. Muut alueet luokiteltiin niin sanotuiksi mäkialueiksi. Digitaalisesta korkeusmallista lasketun rinnevalovarjostuksen ja kaltevuuskulmaa esittävän rasteriaineiston avulla digitoitiin murtoot ja niiden yhteydessä esiintyvät maaperämuodot. Nämä luokiteltiin tarkemmin Ojala ym. (2021) määritelmän mukaisesti. Omiksi luokikseen muodostuivat vielä potentiaaliset kalliomäet sekä viuhkamurrokset. Murtoot, potentiaaliset kalliomäet sekä viuhkamurrokset erotettiin ensiksi mainituista tasaisista alueista ja mäkialueista, jolloin muodostui yhtenäinen maanpinnan luokittelu. Murtoiden distaalisivut jyrkistäneet potentiaaliset muinaisuomat lukeutuivat tasaisten alueiden ja murtoomuotojen välille geomorfologisessa kartoituksessa. Murtooreitin geomorfologisen kartoituksen luokat ovat yksityiskohtaisesti kuvattu taulukossa 1.

Taulukko 1. Geomorfologisen kartoituksen luokat, jotka on määritelty Ojala ym. (2021) mukaillen.

Luokan nimi	**Kuvaus**	**Esimerkki**
Kolmionmuotoinen murtoo	Nuolen kärkeä muistuttava muoto, joka osoittaa jään viimeisimpään liikesuuntaan. Loiva proksimaalisivu ja jyrkkä distaalikärki	
Chevron -tyypin murtoo	Muistuttaa kolmionmuotoista murtoota, mutta proksimaali- ja keskiosasta puuttuu maa-ainesta, jolloin maastonmuoto muistuttaa V-kirjainta.	
Lohkomainen murtoo	Distaalikärki on kolmionmuotoista murtoota pyöreämpi ja epämääräisempi. Muodon leveys on tyypillisesti suurempi kuin pituus.	
Murtoiden yhteydessä esiintyvä jyrkänparras	Jyrkkä pitkänomainen maastonkohta. Muilla murtookentillä jyrkänpartaiden yhteydessä havaittuja harjanteita ei tutkimusalueelta löytynyt.	
Murtoisiin liittyvät polymorfiset maastonmuodot	Vaihtelevan muotoisia kumpuja tai harjanteita, jotka ovat suuntautuneet muiden murtoomuotojen mukaan tai epäsäännöllisesti.	
Viuhkamurrokset	Kolmionmuotoisia tasaisia alueita, jotka rajautuvat jyrkkiin kalteviin rinteisiin alueen proksimaaliosassa.	
Hypoteettinen kalliomäki	Korkeusmallista havaittu kalliomäen topografiaa muistuttava, ympäristöä korkeampi muodostuma. Maastossa kallio ei ollut kuitenkaan paljaana, joten muodon varmistaminen vaatisi lisätutkimuksia.	
Luokittelemattomat tasaiset alueet	Tasaiset alueet, jotka eivät kuuluneet aikaisempiin luokkiin ja ovat pääosin entisiä tai nykyisiä suoalueita. Tasaiset alueet ovat rajattu digitaalisesta korkeusmallista 30 cm korkeuskäyrien avulla.	
Luokittelemattomat mäkialueet	Kaikki loput alueet, jotka eivät kuuluneet aikaisempiin luokkiin.	

3.2 Lohkareaineiston keruu

Maastossa kartoitettiin satelliittipaikannuksen avulla kaikki yli yhden metrin korkuiset kivet ja siirtolohkareet. Murtoiden sedimenteistä ei ole löytynyt yli yhden metrin halkaisijalta olevia kiviä (Mäkinen ym. 2023) joten kartoitettavan kiven rajaksi asetettiin yksi metri. Maanpinnan ylä- ja alapuolella olevan kiven halkaisija on kuitenkin vaikea arvioida ilman kaivamista, joten päädyttiin arvioimaan kiven korkeus maanpinnan yläpuolella, jolloin kartoitettavat kivet ovat halkaisijaltaan suurempia.

Lohkareet luokiteltiin kolmeen luokkaan lohkareen korkeuden mukaan. Korkeus arvioitiin maanpinnasta lohkareen huipulle (taulukko 2). Luokkaan yksi kuuluvat lohkareet, joiden korkeus on yli yhden metrin, mutta alle kaksi metriä. Luokkaan kaksi kuuluvat lohkareet, joiden korkeus on yli kaksi metriä, mutta alle neljä metriä. Luokkaan kolme kuuluvat lohkareet, joiden korkeus on yli neljä metriä.

Taulukko 2. Lohkareaineiston kiviluokittelu kiven korkeuden mukaan.

Luokka	**Korkeus maanpinnasta lohkareen huipulle**	**Kivien lukumäärä**
I Kivi	yli 1 metri	3 456
II Keskikokoinen kivi	yli 2 metriä	299
III Suuri kivi	yli 4 metriä	89

Yksittäisten kivien sijaintitiedon tallensin OCAD-kartanpiirto-ohjelmaan (Garmin Glo) satelliittipaikantimen ja (Panasonic Toughpad FZ-G1) maastotietokoneen avulla. Tarkoituksena oli käydä koko maastoalue läpi niin, että yksikään yli yhden metrin korkuinen kivi ei jäisi huomaamatta. Tähän toi varmuutta maastotietokoneen näytöllä näkyvä reaaliaikainen sijainti sekä kuljetun reitin jälki, josta pystyi tarkastamaan, mikä alue on jo tarkastettu. Lisäksi maastotietokoneessa näkyi laserkeilausaineistosta lasketut korkeuskäyrät, jolloin kivien sijaintia pystyi peilaamaan maastonmuotoihin ja näin minimoida satelliittipaikannuksen aiheuttama sijaintivirhe.

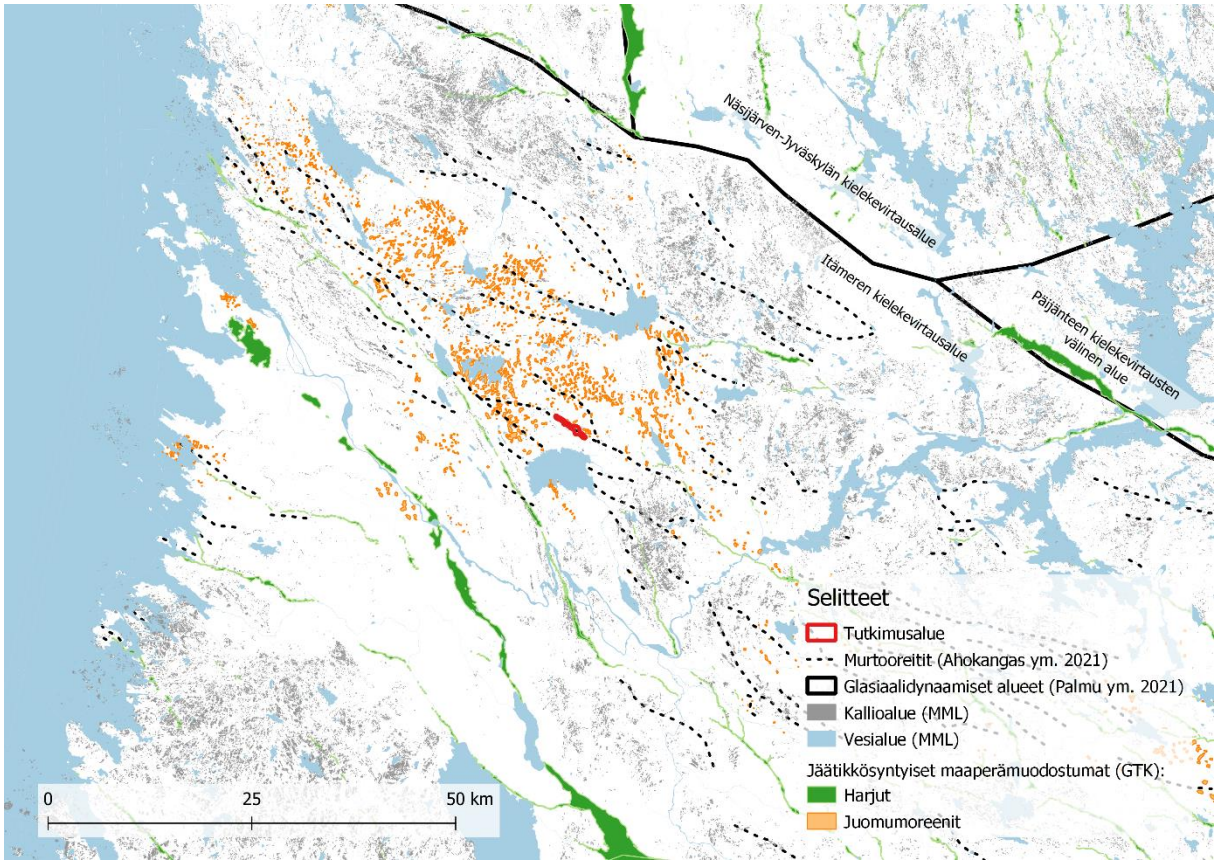
3.3 Lohkareaineiston laadun arviointi

Kahdelta hakkuuaukealta kuvattiin (DJI Mavic Mini) dronella ja Dronelink ohjelman avustuksella ilmakuvia, jotka suoristettiin ortokuvaksi Open Drone Map ohjelmalla.

Ortokuvan spatiaalinen resoluutio oli 5 cm ja se georeferoitiin Maanmittauslaitoksen ortokuvan avulla ETRS-TM35FIN koordinaatistoon. Maastossa kartoitettujen kivien ja dronekuvasta erottuvien kivien sijainteja verrattiin, ja keskimääräinen etäisyysheitto oli 2,82 metriä hakkuuaukealla. Mediaani virhe oli 2,67 metriä ja vaihteluväli 0,15–8,40 metriä. Vertauksessa oli mukana 153 kiveä.

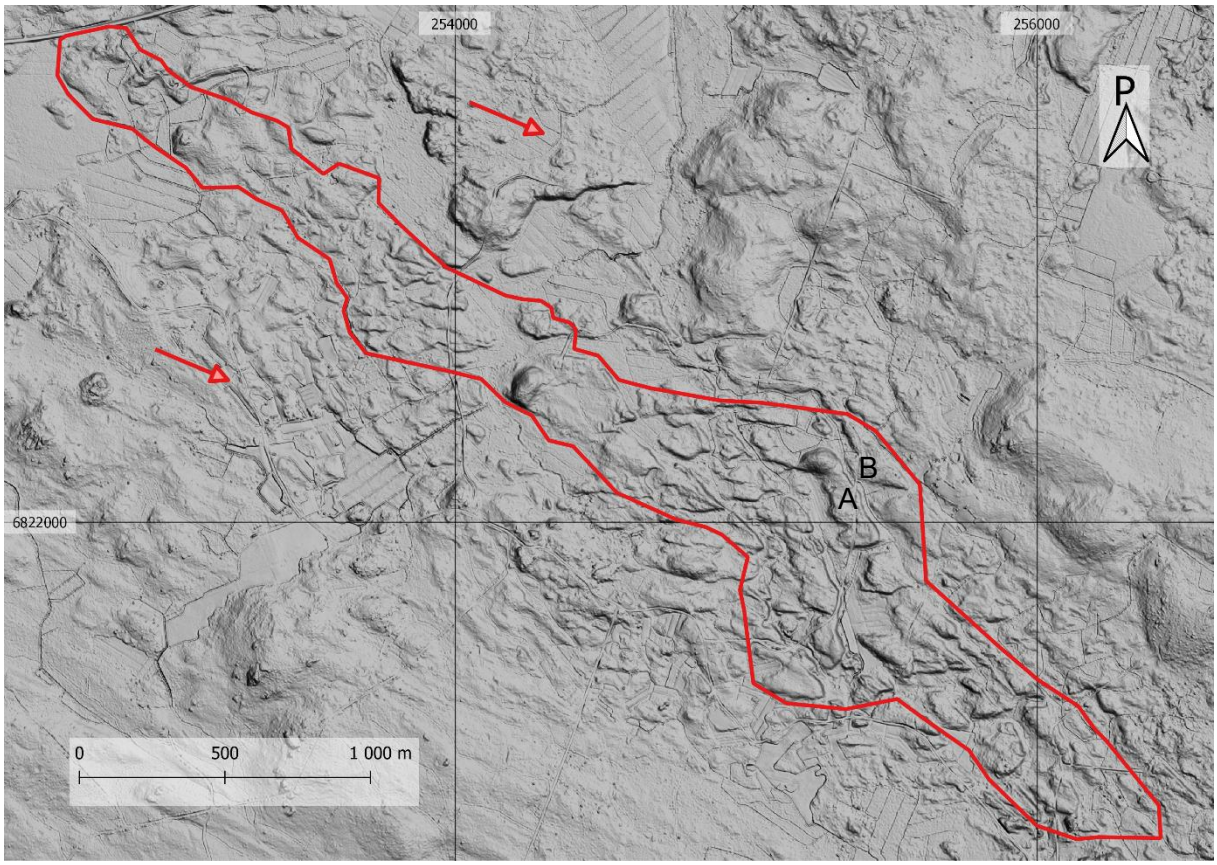
4 Tutkimusalueen kuvaus

Tutkimusalue sijaitsee Itämeren jääkielekkeen alueella subglasiaalisella luode-kaakko suuntaisella sulamisvesireitillä, joka kulkee nykyisen Kokemäen Sääksjärven kylän ohitse. Olen rajannut tutkimusalueeni 1,8 neliökilometrin laajuiseksi alueella virranneen sulamisvesireitin selkeimpien murtoomuotojen perusteella (kuvat 2–3, liitteet 1–5).



Kuva 2. Tutkimusalueen sijainti osana Itämeren kielekevirtausaluetta. Juomumoreenikentät, harjut ja murtooreitit vuorottelevat, kun taas laajat kallioalueet ovat suhteellisen harvinaisia tutkimusalueen läheisyydessä.

Tutkimusalue sijaitsee Porin–Ahlaisten kumpumoreenikentän kaakkoisosassa (Mäkinen ym. 2007: 41). Moreenimuodostumat ovat luokiteltu GTK:n jäätikkösyntyiset maaperämuodostumat paikkatietoaineistossa pääasiassa ribbed-tyypin moreeneiksi eli juomumoreeneiksi (kuva 2). Murtooreittejä on tämän kumpumoreenikentän alueella useita ja läheisin harjumuodostuma sijaitsee noin 10 kilometriä tutkimusalueesta länteen. Tutkimusalue sijaitsee Itämeren kielekevirtausalueen (engl. Baltic Sea ice-lobe province) reunalla osana Loimaan osa-aluetta (engl. Loimaa sub-province) (Palmu ym. 2021: 126).



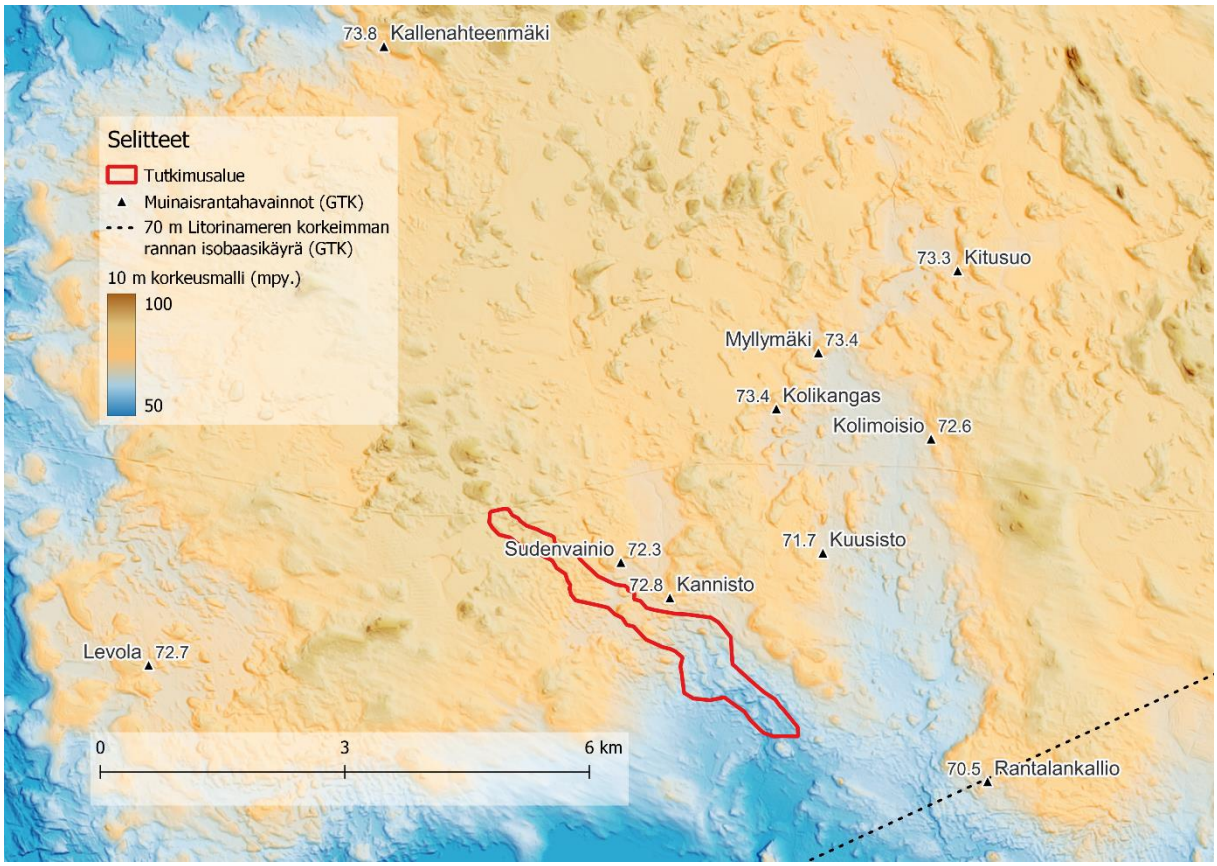
Kuva 3. Kartta tutkimusalueen rajauksesta (punaisella). Nuolet osoittavat jään paikallisen liikesuunnan, joka on määritetty tutkimusalueen viereisestä lineaatiokentästä. A- ja B-kirjaimet osoittavat kuvan 6 kaivantojen sijainnit. Taustakarttana on MML:n 2 metrin korkeusmallista laskettu rinnevalovarjostus.

Geologian tutkimuskeskuksen maaperäkartoituksessa tutkimusalue on kartoitettu pääosin pohjamoreeniksi, jolla on kahdesta kymmeneen metriä korkeita epäsäännöllisen muotoisia moreenikumpuja (Kejonen ym. 1988). Kumpujen pintaa kuvaillaan erittäin lohkareiseksi ja voimakkaasti huuhtoutuneeksi. Kumpujen aines on tulkittu hiekkamoreeniksi, jossa on hiekkalinssejä. Lohkareisten kumpujen syntyä selitetään deglasiaation loppuvaiheella, jolloin jäätikkö lakkasi liikkumasta ja suli paikalleen, jolloin kuolleen jään alueilla muodostui kumpumoreenikenttiä (Kejonen ym. 1988).

Maaperäkartoituksen yhteydessä alueella ei havaittu joki- tuuli tai jäätikköjokimuodostumia (Kejonen ym. 1988). Jään tulosuunnaksi on arvioitu vanhemmassa vaiheessa 300–310 astetta ja nuoremmassa virtausvaiheessa 280–295 astetta. Deglasiaatiovaiheessa mannerjään virtaussuunnaksi on määritetty 270 astetta Sääksjärven alueella (Kejonen ym. 1988).

Tutkimusalueella sijaitsee joitakin rantakerrostumia, jotka ovat muodostuneet Itämeren aikaisempien vaiheiden aikana (Kejonen ym. 1988). GTK:n muinaisrantahavaintoja löytyy kymmenen kappaletta alle kuuden kilometrin etäisyydellä tutkimusalueesta. Muinaisrantaa

indikoivat havainnot ovat tulkittu muodostuneen Litorinameren vaiheessa noin 8 000–9 000 vuotta sitten (kuva 4). Deglasiaation aikana, kun jää poistui tutkimusalueelta, korkeimman rannan taso oli noin 170 metriä nykyistä merenpintaa korkeammalla (Ojala ym. 2013), jolloin koko tutkimusalue oli veden alla.



Kuva 4. GTK:n muinaisrantahavainnot tutkimusalueen lähellä. Havaintojen perusteella Litorinameren ranta on sijainnut alueella 8000–9000 vuotta sitten noin 70 metriä nykyisen merenpinnan yläpuolella. Pohjakarttana MML:n 10 metrin korkeusmalli varjostettuna.

Alueella sijaitsee 1960- ja 1970-luvuilla ojitettuja soita, jotka ovat maaperäkarttaan merkattu sara- ja rahkaturpeeksi. Maaperäkartoituksen ohessa tutkittujen soiden keskimääräinen turvepatjan paksuus on tutkimusalueen karttalehdellä 1,7 metriä ja yleisin pohjamaalaji on savi (Kejonen ym. 1988).

Kallioperä 1:200 000 aineiston perusteella tutkimusalueen kallioperä on muodostunut noin 1 900 miljoonaa vuotta sitten svekofennisessa vuorijonopoimutuksessa pääasiassa biotiitti paragneissistä ja tonaliitista (kuva 5). Paragneissit ovat aikoinaan merenpohjaan kerrostuneita savia ja hiekkoja (Mikkola 2016). Tonaliitti on syväkivilaji, jossa on runsaasti kvartsia ja plagioklaasia (Grönholm 2006: 54).



Kuva 5. GTK:n 1:200 000 kallioperäkartta tutkimusalueelta sekä lohkareaineisto.

Ensimmäisen kerran alueen murtoita tutkivat Mäkinen ym. (2017). Reitillä on havaittu olevan kaksi murtookenttää, jotka on nimetty Sääksjärvi pohjoiseksi ja Sääksjärvi itäiseksi murtookentäksi (Mäkinen ym. 2017). Yhdessä nämä kaksi murtookenttää muodostavat subglasiaalisen sulamisvesireitin, joka päättyy lähellä Kiikoisjärven eteläpuolelta alkavaa harjujaksoa. Tutkimusalue rajautuu Sääksjärvi pohjoisen murtookentän alueelle. Mäkinen ym. (2017: 44) kuvailee siellä sijaitsevan hyvin kehittyneitä murtoita, joiden kaltevuus muuttuu reitin varrella. Lisäksi siellä on kompleksisia muodostumia, viuhkamurroksia ja murtookentällä on heikko yhteys Joutsijärven murtookenttään (Mäkinen ym. 2017: 44). Joutsijärven murtookenttä sijaitsee tutkimusalueelta noin kymmenen kilometriä länsiluoteeseen.

Turun yliopiston RewarD -tutkimushankkeessa kaivettiin kaksi kaivantoa tutkimusalueella moreenistratigrafian selvittämiseksi. Kaivannot sijoittuivat Pirisjoen metsätien läheisyyteen tutkimusalueen koillisosaan (kuva 3). Kaivanto A sijaitsi lohkomaisen murtoon proksimaaliosassa ja kaivanto B sijaitsi viereisen kolmionmuotoisen murtoon proksimaaliosassa. Molemmissa kaivannoissa erottuivat pohjalla oleva sinertävän harmaa pohjamoreeni, ja sen päällä osin lajittunut ja kerroksellinen, hiekkavaltainen aines, joka on

kerrostunut sulamisvesireitin toiminnassa (kuva 6). Yleisesti alueella on ollut kaksi jäätikön virtaussuuntaa (Kejonen ym. 1988) sekä niitä vastaavat moreenipatjat (Hirvas & Nenonen 1987). Kaivauksista erottuvista moreenipatjoista ylempi liittyy sulamisvesireitin osalta murtoomuotoihin.



Kuva 6. RewarD -tutkimushankkeen kaivannot Pirisjoen metsätien läheisyydessä. Vasemmalla kaivanto A ja oikealla kaivanto B. Kaivannon A (lohkomainen murtoo) koordinaatit olivat 61° 27’ 17,79’’, 22° 24’ 29,91’’ ja suunta 350–190 astetta. Kaivannon B (kolmionmuotoinen murtoo) koordinaatit olivat 61° 27’ 21,18, 22° 24’ 32,46’’ ja suunta 265–85 astetta. Maantieteelliset koordinaatit ovat ETRS-89 muodossa. Kuva: RewarD-tutkimushanke.

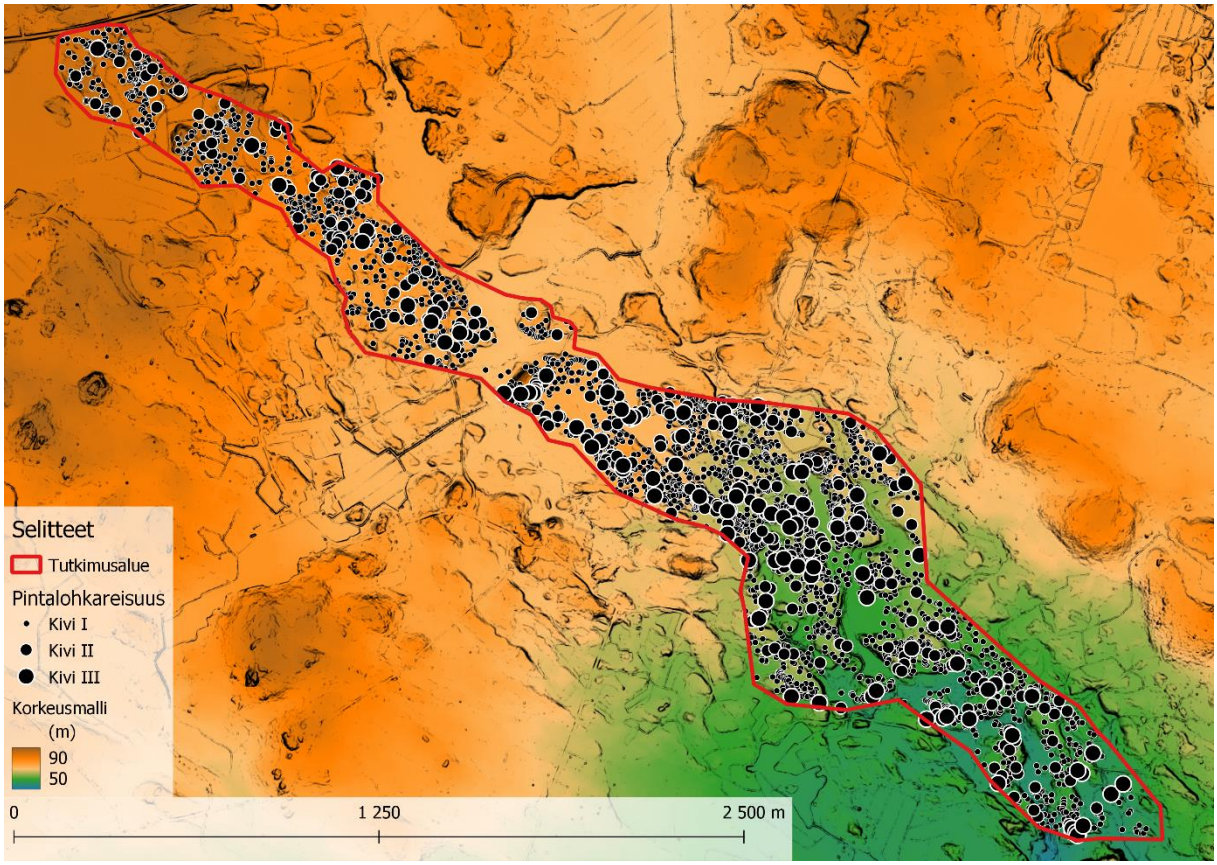
Kaivannon A pohjalla oli vähintään 0,9 m paksuinen silttinen, sinertävän harmaa hiekkavaltainen pohjamoreeni. Tässä kerroksessa oli isoja, enintään 0,4 m halkaisijaltaan heikosti pyöristyneitä kiviä. Pohjamoreenin päällä oli noin 3,5 m paksuinen sulamisvesireitin osin lajittunut ja kerroksellinen hiekkavaltainen murtooaines. Tässä kerroksellisessa, heikosti deformoituneessa yksikössä oli silttistä vähäkivistä hiekkaa ja lajittuneita soraosueita. Päällimmäisenä oli noin 0,9 m paksuinen moreenimainen, löyhä diamiktoni, joka muodostaa metsänpohjan ja maannoksen.

Kaivannon B pohjalla oli vastaavanlainen vähintään 0,7 m paksuinen pohjamoreeni. Vastaavasti keskimmäisessä noin 1,9 m paksuisessa heikosti deformoituneessa yksikössä oli kerroksellista hiekkaa ja osin lajittuneita soraosueita. Ylimpänä oli noin 0,9 m paksuinen kaivanto A:ta vastaava diamiktoni.

5 Tulokset

5.1 Pintalohkareisuus tutkimusalueella

Tutkimusalueelta kartoitettiin 3 844 yli yhden metrin korkuista kiveä (kuva 7). Kivet ovat sijoittuneet pääosin sulamisvesireitin kohoaville maastonmuodoille. Niillä kiviä esiintyi keskimäärin 27,8 kappaletta per hehtaari. Viuhkamurroksilla ja luokittelemattomilla tasaisilla alueilla kiviä esiintyi keskimäärin 5,7 kappaletta per hehtaari. Tutkimusalue on 1,8 km^2 laajuinen ja keskimäärin kiviä sijaitsee 21,3 kappaletta hehtaarilla (taulukko 3).

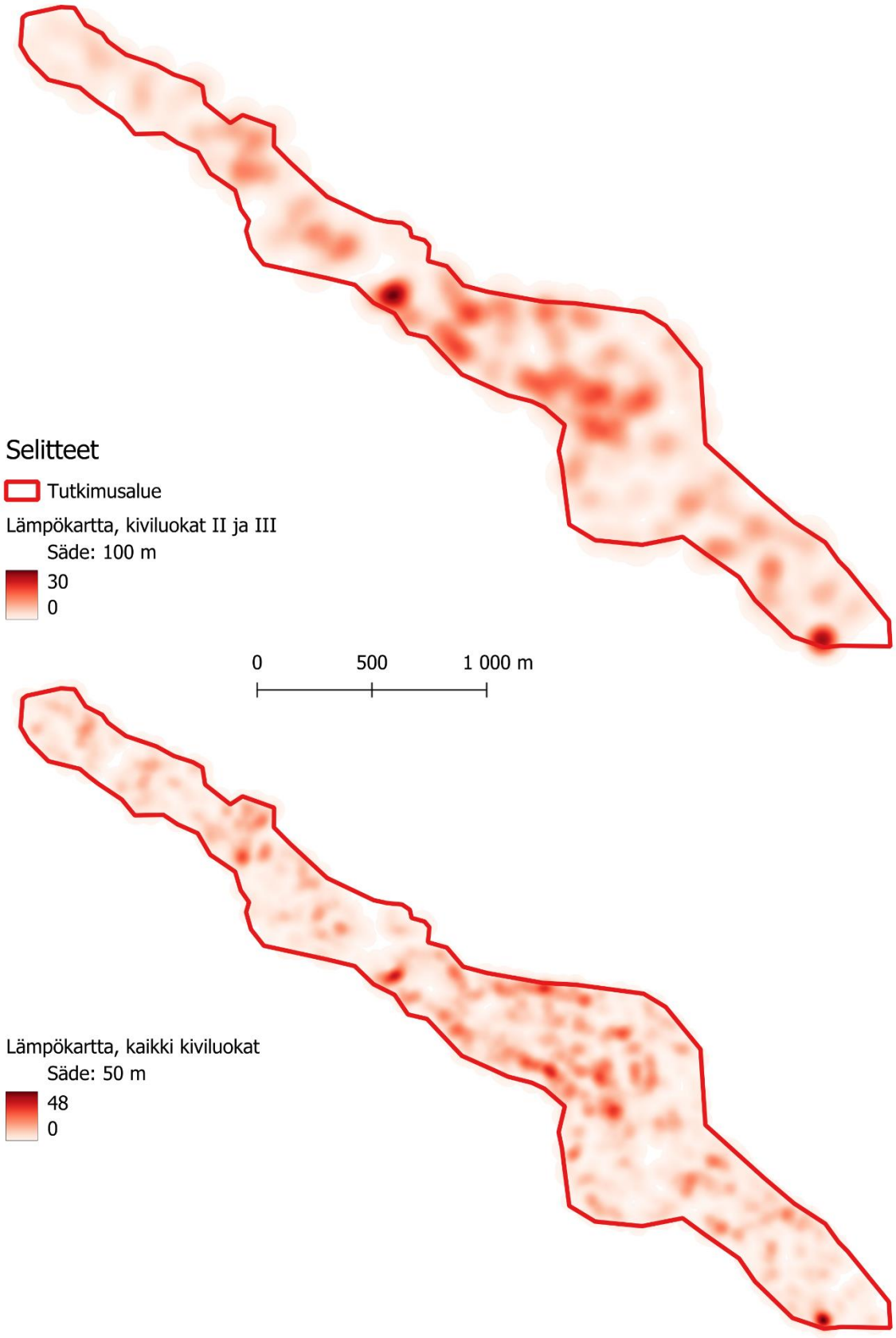


Kuva 7. Tutkimusalueen kartta. MML:n 2 m korkeusmalli ja pintalohkareisuusaineisto.

Osa lohkareista sijaitsi jonoissa, joista esimerkkejä on kuvassa 8. Suurin osa jonoista on suuntautunut mannerjään paikallisen virtaussuunnan ja maastonmuotojen mukaisesti (kuva 11C). Osa jonoista oli muodostunut myös suhteellisen tasaiselle alueelle (kuva 11F, 11G) tai kohtisuoraan virtaussuuntaan nähden (kuva 11E). Yksittäisten pienempien lohkarejonojen lisäksi tutkimusalueella on havaittavissa laajempia lohkareiden keskittymiä, ja osa näistä keskittymistä on orientoitunut myös mannerjään virtaussuunnan suuntaisesti (kuva 8). Selkeimmin tämä näkyy tutkimusalueen keskiosassa sulamisvesireitin leveimmällä kohdalla (kuva 8, liite 4).

Tutkimuksessa kartoitettujen yli yhden metrin korkuisten kivien lisäksi tutkimusalueella oli pienempää kivikkoa kauttaaltaan. Dronesta tuotetusta ortokuvasta laskettuna yli 50 cm halkaisijan kiviä oli paikoin 34 kappaletta aaria kohden. Enimmillään maasto oli kokonaan kivien peitossa. Osa pienikokoisemmasta kivikosta on mahdollisesti Itämeren aikaisempien vaiheiden kerrostamia muinaisrantoja. Lisäksi murtooreitin alueella oli näkyvissä notkelmiin keskittyneitä kivikkoja, jotka ovat todennäköisesti huuhtoutuneet jään sulamisvesien virratessa.

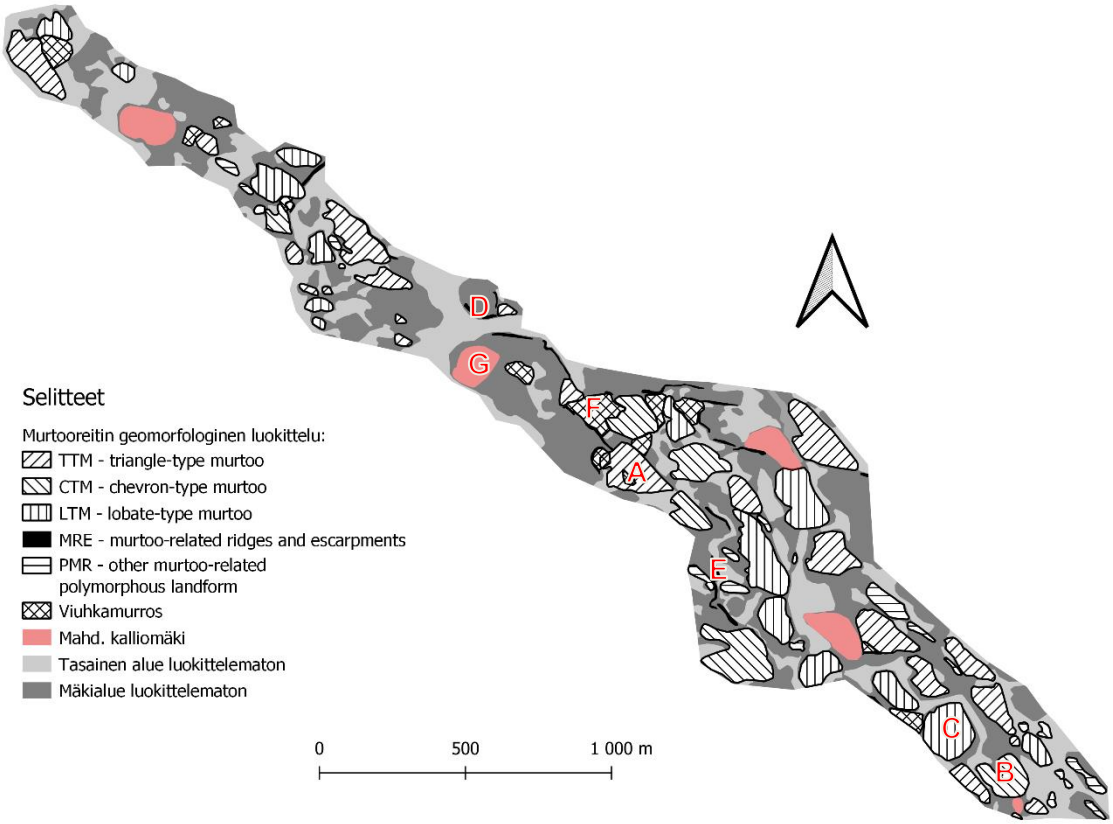
Tutkimusalueen postglasiaalista fluviaalista korkokuvaa edustaa loivasti meanderoiva Pirisjoki. Joki, joka on kesäisin vain puro, on paljastanut paikoin suuriakin kiviä esiin, erityisesti Pirunkosken kohdalla (kuva 11A murtoon distaalikärjen lähellä). Mahdollisia jäätikkökaivoja (engl. moulins) on myös voinut olla tutkimusalueella. Yksi tällainen kivikeskittymä näkyy kuvan 11B murtoon eteläpuolella tutkimusalueen eteläreunassa (kuva 8).



Kuva 8. Lämpökartta lohkareaineistosta. Ylempi kartta kuvaa suurien yli 2 metrin ja yli 4 metrin korkuisten lohkareiden sijaintia (kiviluokat II ja III). Alemmassa on mukana kaikki yli 1 metrin lohkareet. Luokan II kiviä painotettiin arvolla 2 ja luokan III kiviä painotettiin arvolla 3.

5.2 Tutkimusalueelta löytyvät murtoomuodot

Tutkimusalueelta löytyi kaikkia Ojala ym. (2021) kuvaamia murtooluokkia (kuva 9). Näistä pinta-alan mukaan yleisimmät luokat ovat kolmionmuotoinen, lohkomainen ja chevron -tyypin murtoo (taulukko 3). Geomorfologisen kartoituksen luokista luokittelemattomat alueet olivat pinta-alaltaan laajimmat kattaen yhteensä 62,5 prosenttia tutkimusalueesta. Tutkimusalueen pinta-alasta noin yksi kolmasosa (33,7 %) on erilaisten murtoomuotojen peittämää.



Kuva 9. Tutkimusalueen geomorfologinen kartoitus erilaisten murtoomuotojen mukaan. Luokkien määritelmät on esitetty taulukossa 1. Kirjaimet A-B viittaavat kuvan 11 esimerkkikohteisiin.

Murtoomuodot muodostavat keskittymiä, joita tasaiset alueet erottavat toisistaan. Nämä tasaiset alueet ovat pääosin nykyisin soita tai ojitettuja turvemaita. Tasaiset alueet ovat voineet deglasiaation aikana olla subglasiaalisia kavitaatioita, mutta tämän todentaminen vaatisi tarkempia lisätutkimuksia. Murtoiden distaalisivun jyrkistäneet potentiaaliset muinaisuomat olivat osittain havaittavissa maastossa. Osa muinaisuomista erottui paljaana lohkareikkona, jota kasvillisuus ei ollut peittänyt.

5.3 Pintalohkareisuuden sijoittuminen suhteessa maaperämuodostumiin

Suhteellisesti kivisimpiä luokkia olivat keskimäärin jyrkänpartaat ja mahdolliset kalliomäet. Näillä maastonmuodoilla lohkareita löytyi keskimäärin yli neljäkymmentä kappaletta hehtaaria kohti. Seuraavaksi eniten pintalohkareisuutta löytyy Chevron -tyypin, kolmionmuotoisen, lohkomaisen ja polymorfisen murtoomuodon luokassa. Näissä neljässä luokassa lohkareita löytyi keskimäärin noin 30–35 kappaletta hehtaaria kohti. Vähiten pintalohkareisuutta esiintyi luokittelemattomilla tasaisilla alueilla ja viuhkamurroksilla, joilla kiviä löytyi vain 5,7–6,6 kappaletta hehtaaria kohti. Luokittelemattomilla mäkialueilla pintalohkareisuus (22,2 kappaletta per hehtaari) oli vähäisempää kuin yleisimmillä murtooluokilla vastaten koko tutkimusaleen keskimääräistä pintalohkareisuutta (21,3 kappaletta per hehtaari).

Taulukko 3. Geomorfologisten luokkien pinta-ala ja kivien lukumäärä.

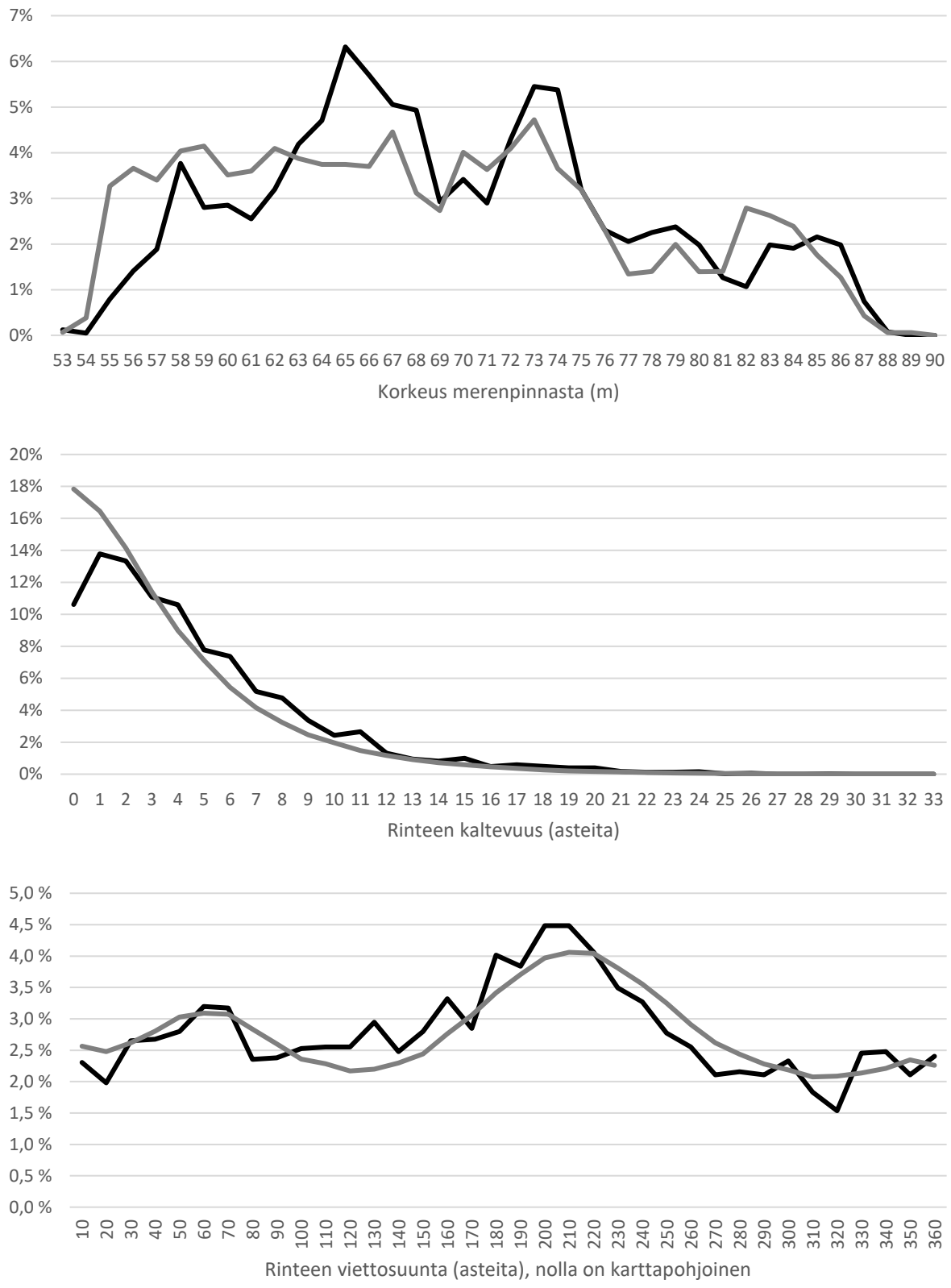
Geomorfologinen luokka	Pinta-ala (ha)	Pinta-alan osuus tutkimusalueesta (%)	Kivien lukumäärä	Kivien lukumäärä suhteessa pinta-alaan (lkm./ha)
Kolmionmuotoinen murtoo	21,6	11,9	699	32,4
Chevron –tyypin murtoo	10,2	5,7	357	34,9
Lohkomainen murtoo	17,5	9,7	558	31,8
Murtoiden yhteydessä esiintyvä jyrkänparras	2,2	1,2	93	43,0
Murtoisiin liittyvät polymorfiset maastonmuodot	3,7	2,1	112	30,2
Viuhkamurros	5,6	3,1	37	6,6
Hypoteettinen kalliomäki	7,0	3,8	279	40,1
Luokittelemattomat tasaiset alueet	47,8	26,5	270	5,6
Luokittelemattomat mäkialueet	65,2	36,0	1 439	22,1
Yhteensä	180,8	100,0	3 844	21,3

Dronella kuvattiin ortokuva koealalta, josta analysoitiin 153 kiveä tarkemmin, ja kivien pohjamuoto digitoitiin paikkatieto-ohjelmassa. Luokan yksi kivien pinta-ala oli keskimäärin 4,92 neliömetriä. Luokan kaksi kivien pinta-ala oli keskimäärin 10,68 neliömetriä ja luokan kolme kivien pinta-ala oli keskimäärin 30,87 neliömetriä.

Kivet eivät ole jakautuneet tutkimusalueelle tasaisesti, sillä muuten kivien ja tutkimusalueen suhteellinen frekvenssi noudattaisi samaa linjaa (kuva 10, liitteet 2–5). Alle 63 metriä merenpinnasta korkeusluvuille kiviä sijaitsee vähemmän kuin tutkimusalueen jakauman perusteella voisi olettaa (kuva 10 yläosa). Kivien yleisin korkeuslukema on 65 metriä merenpinnan yläpuolella, kun tutkimusalueen jakauman osalta se on 73 metriä merenpinnan yläpuolella. Kivien ja tutkimusalueen korkeuden vaihtelua selittää parhaiten tasaisten ja mäkisten alueiden vaihtelu. Jokin tasainen alue, esimerkiksi 82 metriä merenpinnan yläpuolella on pinta-alallisesti merkittävä mutta kiviä on harvemmassa.

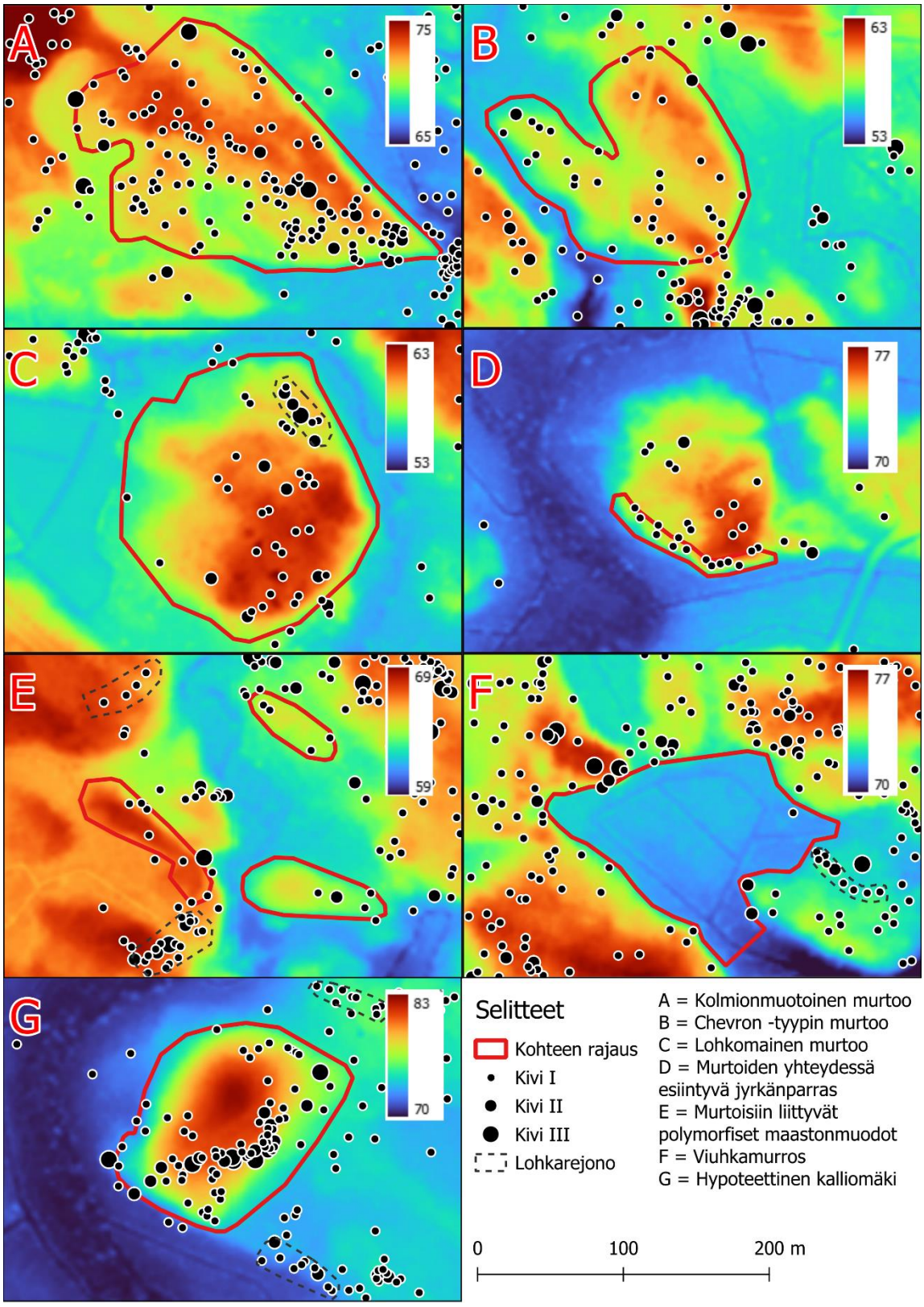
Rinteen kaltevuuden perusteella kiviä on tasaisilla, alle kolmen asteen kaltevissa maastonkohdissa vähemmän kuin niitä voisi tutkimusalueen jakauman perusteella olettaa (kuva 10 keskiosa). Yli kolmen asteen jyrkissä rinteissä kiviä on puolestaan suhteellisesti enemmän kuin mitä niitä voisi tutkimusalueen jakauman perusteella olettaa. Nämä tulokset ovat linjassa siihen havaintoon, että kiviä on tasaisilla alueilla vähemmän kuin murtooreitin muilla alueilla (taulukko 3).

Tutkimusalue on loivassa rinteessä, joka viettää etelään ja lounaaseen (kuva 10 alaosa). Kivet ovat tutkimusalueen jakaumaan verrattuna keskittyneet enemmän maastonkohtiin, jotka viettävät kaakkoon kuin maastonkohtiin, jotka viettävät lounaaseen.



Kuva 10. Kivien (musta viiva) ja tutkimusalueen (harmaa viiva) suhteellinen frekvenssi (pystyakseli) absoluuttisen korkeuden, kaltevuuden (engl. slope) ja rinteen suunnan (engl. aspect) suhteen (vaaka-akselit). Arvot ovat laskettu MML:n 2 metrin korkeusmallista. Histogrammit laskettiin luomalla koko tutkimusalueen kattava 2 metrin ruudukko ja vertaamalla sitä digitaaliseen korkeusmalliin ja siitä laskettuihin rasteriaineistoihin. Kivien osalta suoritettiin päällekkäisanalyysi digitaalisen korkeusmallin kanssa.

Pintalohkareisuus on sijoittunut suhteellisen tasaisesti erityyppisille murtoomuodoille (kuva 11A, B ja C). Jyrkänpartaat toimivat paikoin ikään kuin rajoina kivisemmän mäkisen maaston ja kivettömän tasaisen maaston välillä (kuva 11D). Viuhkamurrokset ovat suhteellisen kivettömiä (kuva 11F). Viuhkamurrosten pohjat ovat yleisesti suota, jonka turpeen paksuus tutkimusalueella on noin kaksi metriä yksittäisiin kenttätyössä tehtyihin kairauksiin perustuen. Maaperäkartoituksen yhteydessä turvepatjan paksuus oli keskimäärin 1,7 metriä (Kejonen ym. 1988). Osa kivistä voi olla piilossa turvepatjan sisällä, mutta ojaleikkauksista päätellen kivet ovat harvinaisia tutkimusalueen suoalueilla. Tutkimusalueella on muutama kalliomäeksi tulkittu kohouma. Yhden mäen jään suojapuolella erottui selkeä distaalikivikko (kuva 11G).



Kuva 11. Esimerkkejä eri murtooluokkien pintalohkareisuudesta. Kohteiden sijainti tutkimusalueella on esitetty kuvassa 9.

6 Keskustelu

6.1 Murtooreitin pintalohkareisuus

Murtooreitin pintalohkareisuus ei yksiselitteisesti vastaa mitään tunnettua kivikkotyyppiä (Räisänen ym. 2018). Ottaen huomioon murtooreitin glasiaalihistorian subglasiaalisena sulamisvesireittinä, pintalohkareisuus on alloktonista, eli nykyiselle paikalleen kulkeutunutta kivikkoa.

Lähimpänä murtooreitin pintalohkareisuus on moreenikivikkoa, jolla tarkoitetaan mannerjään louhimia, kuljettamia ja kerrostamia kivikkoja (Räisänen ym. 2018). Moreenikivikolle tyypilliseksi piirteeksi on kuvattu, että kivikkoa esiintyy moreenikumpujen pinnalla enemmän kuin varsinaisessa moreeniaineksessa. Tämä pätee myös murtoihin, joissa on havaittu suurien yli metrin kokoisten kivien puuttuvan murtoiden sisältä (Mäkinen ym. 2017). Maanpinnan ja mannerjään välinen tila on voinut olla niin ahdas, että suurimmat lohkareet eivät ole päätyneet murtoiden sisään murtoiden muodostumisvaiheessa, sillä ne eivät ole yksinkertaisesti mahtuneet.

Kivien sijaintiaineiston ja geomorfologisen kartoituksen avulla ei ole mahdollista selvittää kivien kulkeutumista täydellä varmuudella. Tarkempi kivilajitunnistukseen perustuva lohkareviuhkatutkimus voisi tuoda lisätietoa mistä yksittäiset kivet ovat peräisin. Ylipäätänsä glasiaalieroosion eri muodot ovat tieteellisen depatin aiheena. Uudet glasiaalieroosion teoriat, kuten Hall ym. (2020) glasiaalinen repiminen, voi selittää kivikkojen muodostumista aiempaa tarkemmin. Tutkimusalueella kalliopaljastumat ovat kuitenkin niin harvinaisia, että glasiaalisen repiminen ei vaikuta pääasialliselta eroosiomuodolta tämän murtooreitin alueella.

Tutkimuksen yhtenä päähavaintona on, että kivet eivät ole jakautuneet tasaisesti sulamisvesireitin alueelle, vaan tasaiset alueet ja potentiaaliset muinaisuomat ovat huomattavasti kivettömämpiä kuin tutkimusalueen suhteellisesti korkeammat maastonmuodot. Tämä voi johtua siitä, että sulamisvesi on virratessaan kerrostanut pienemmät alle yhden metrin halkaisijan lohkareet murtoiden sisään, mutta kerrostumistilan rajallisuuden takia suurimmat lohkareet ovat jääneet uomaan. Uomassa nämä suuret lohkareet ovat voineet jäätyä kiinni mannerjään pohjaan tai muuten kulkeutua virtaavan jään mukana sulamisvesireitin korkeampien maastonmuotojen päälle.

Mannerjään subglasiaaliset olosuhteet, kuten regelaatio, korkea lämpötilagradientti ja mannerjään sulamisveden hetkellisen jäätymisen vaikutukset saattavat osaltaan selittää matalampien maastonmuotojen kivettömyyttä. Mannerjään virratessa korkeamman maastonmuodon ylitse jäänpaine lisääntyy ja jäätä sulaa vedeksi, jolloin kiviä ei ole tarttunut jäätikkökuljetukseen mukaan, vaan niitä on voinut päinvastoin kerrostua maastonmuotojen päälle. Maaston muuttuessa matalammaksi yllä virtaavan mannerjään jäänpaine vuorostaan pienenee ja sulamisvettä jäätyy. Jäällä on suurempi tilavuus kuin vedellä, jolloin jäätikkökuljetus on mahdollisesti vienyt irtoavaa materiaalia, kuten kiviä mukanaan tehokkaammin. Mannerjään maahan kiinnittymisen ja irtoamisen sekä vedenpaineen vaihtelu (Menzies 2002) selittäisi laajat kivettömät tasaiset alueet, jotka ovat nykyisin ojitettuja soita ja turvemaita sekä kiviset kalliomäet, murtoot ja muut murtookentän kohoavat maastonmuodot. Murtoiden sedimentologian perusteella on todennäköistä, että tehollinen paine (engl. effective pressure) on lähellä tasapainotilaa (Ojala ym. 2022). Tämänkaltainen subglasiaalinen ympäristö voisi mahdollistaa kivien lajittumisen mannerjään ”esteille” olosuhteissa, jossa kontakti maanpinnan ja mannerjään pohjan välillä on vaihdellut topografian mukaan.

Kivet ovat asettuneet nykyisille paikoilleen murtoiden muodostumisen jälkeen, sillä suuria, yli metrin korkuisia kiviä ei ole löydetty murtoiden sisältä (Mäkinen ym. 2017). Tämän tutkimusaineiston perusteella kivien kerrostumisen voi ajoittaa murtoiden muodostumisen ja lopullisen deglasiaation välille.

Tutkimusalueelta havaitut lohkarejonot ovat mahdollisesti jonkinlaisia railontäytteitä. Tätä vahvistaa havainto jään liikesuunnan mukaisista sekä siihen kohtisuoraan suuntautuneista lohkarejonoista, jolloin jään reunan- ja säteensuuntaiset railot olisivat täyttyneet lohkareista.

Mitä tasaiset alueet, nykyiset suoalueet ovat olleet deglasiaation aikana? Niistä, niin kuin muistakin subglasiaalisista maastonmuodoista on vähän suoraa tutkimustietoa (Greenwood ym. 2016), mutta hypoteettisesti ne ovat voineet olla kavitaatioita (engl. cavities) jotka ovat olleet yhteydessä toisiinsa purkausaukkojen (engl. orfices) kautta. Tällöin ne olisivat olleet osa juomumoreenien muodostumiseen liittyvää hajautunutta sulamisvesijärjestelmää ja muokkautuneet osaksi kanavoituneempaa sulamisvesijärjestelmää deglasiaation edetessä ja murtoiden muodostuessa (Vérité ym. 2021, Ojala ym. 2022).

Subglasiaaliseen glasiaalidynamiikkaan vaikuttaa kuitenkin niin moni asia, että täysin varmoja johtopäätöksiä ei voi tehdä yksittäisestä tutkimusaineistosta. Mahdollisesti kivien

sijoittumiseen on vaikuttanut myös prosessi, jota ei ole tieteellisesti vielä kuvattu. Myös subglasiaalisen sulamisveden rooli kivien liikuttajana on tieteellisesti epäselvä.

Laajoilla tasaisilla alueilla, kuten viuhkamurrosten pohjilla tai nykyisillä suoalueilla on niin ikään vähän kivikkoa, myös siirtolohkareita. Osa kivistä voi myös olla turpeen peitossa nykyisillä suoalueilla. Turpeen ja kasvillisuuden peittävä vaikutus ei yksinään riitä selittäväksi tekijäksi, sillä suuret, yli turpeenpaksuuden korkuiset kivet puuttuvat myös lähes kokonaan tasaisilta alueilta.

Sääksjärven meteoriittikraatterin impaktiittikiviä jäätikkö on kuljettanut viuhkamaisesti kahdessa eri virtaussuunnassa noin kymmenen kilometriä pitkiksi lohkareviuhkoiksi (Salonen & Aumo 1984). Tämän perusteella voi olettaa, että myös tutkimusalueen murtooreitin pintalohkareisuuden alkuperä eli emäkallio löytyy pääosin alle 10 kilometriä tutkimusalueesta luoteeseen, jään tulosuuntaan päin. Tutkimusalueen subglasiaalinen sulamisvesireitti voi kuitenkin muokata jäätikkökuljetusta, eivätkä läheisetkään alueet ole täysin vertailtavissa.

6.2 Sääksjärven pohjoispuolisen murtooreitin syntyolosuhteet

Subglasiaalisiin olosuhteisiin liittyy monitulkintaisuutta, sillä muinaisen mannerjäätikön jättämä maisema on muodostunut diakronisesti jäätikön perääntyessä. Yksinkertaiset totuudet ovat tavoittamattomissa (Clarke 2005), mutta yhdistämällä geomorfologista, sedimentologista ja mallinnukseen perustuvaa tutkimusaineistoa on mahdollisuus muodostaa mahdollinen hypoteesi subglasiaalisen sulamisvesireitin syntyolosuhteista.

Jään deglasiaatiovaiheessa sulamisvesi virtasi lämminpohjaisen mannerjään pohjalla muodostaen alueita, joissa jää oli kiinni maaperässä (engl. coupling zones) sekä irti siitä (engl. decoupling zones) ja näissä olosuhteissa on tulkittu juomumoreenien muodostuvan (Vérité ym. 2022). Juomumoreenit kasvavat suuremmiksi niin kauan kun sulamisvesi virtaa rauhallisesti ja sen kokoa rajoittaa etenkin yllä virtaava mannerjää, joka on kiinni juomumoreenin korkeimmissa kohdissa.

Vuosikiertoon liittyvät ja pitkäaikaisemmat lämpötilannousut sulattivat jään pohjaa ja lisäsivät sulamisvesien virtausta, joka esimerkiksi subglasiaalisten järvien purkauksista (Sainio ym. 2023) tai supraglasiaalisten järvien valumisista (Christoffersen ym. 2018) yltyi tulviksi. Näissä olosuhteissa syntyi sulamisvesireittejä, joissa juomumoreenit erodoituivat ja muokkaantuivat sulamisvesien vaikutuksesta.

Tulvahuipun jälkeen sulamisvesireitille muodostui sulamisvesisysteemi (Ojala ym. 2022), jossa pienemmät kanavat kuljettavat sulamisvettä ja sedimenttejä suurempiin sulamisvesikanaviin. Samalla yllä virtaava jäätikkö ulottui sulamisvesireitin korkeimpiin maastonmuotoihin ja sen pohjaeroosio muokkasi juomumoreeneja. Sulamisvesireitin juomumoreenit murtuivat ja tästä erodoituneesta aineksesta muodostuivat murtoot ja niiden esiasteet.

Tulvien toistuessa uomia muodostui lisää ja murtookenttä sai nykyisen rakenteensa. Mannerjään edelleen virratessa murtookentän ylitse pintalohkareisuus asettui nykyiselle paikalleen. Subglasiaalisten olosuhteiden, kuten sulamisveden paineen sekä jään pohjan sulamisen ja jäätymisen vaihteluiden ansiosta mannerjää tempaisi mukaansa kivet matalammilta alueilta ja kasasi niitä korkeammille maastonmuodoille. Mahdollisesti sulamisvesireitti toimi aktiivisena deglasiaation loppuun saakka, sillä muuten yllä virtaava mannerjää olisi sijoittanut pintalohkareisuuden tasaisemmin sulamisvesireitin alueelle.

Kivilajin tunnistukseen perustuva lohkareviuhkatutkimus, suurempi otoskoko useammalta murtooreitiltä sekä tutkimusalueiden ulottaminen myös sulamisvesireitin ulkopuolelle mahdollistaisivat paremman arvion pintalohkareisuuden sijoittumisen syistä. Lisäksi tarkempi tutkimus murtooreitin ominaisuuksista, kuten kavitaatioiden yleisyydestä, toisi lisätietoa glasiaalidynamiikasta mannerjäiden sulamisvaiheessa.

7 Johtopäätökset

Sääksjärven pohjoispuolisella sulamisvesireitillä esiintyy murtoo muodostumia ja muinaisia sulamisvesikanavia, jotka kertovat alueen glasiaalidynamiikasta. Murtoot ovat kerrostuneet lämminpohjaisen mannerjään alla useiden tulvatapahtumien seurauksena ja muodostivat sulamisvesisysteemin, joka on toimittanut sulamisvettä kanavoituneeseen järjestelmään, kuten harjuihin. Murtooreiteille tyypillisesti pintalohkareisuutta esiintyy Sääksjärven pohjoispuolisella sulamisvesireitillä runsaasti.

Pintalohkareisuutta tutkittiin subglasiaalisen sulamisvesireitin 1,8 neliökilometrin tutkimusalueella lähes 4 000 yksittäisen lohkareen paikkatietoaineistolla. Tämän aineiston perusteella pintalohkareisuus ei ole jakautunut tasaisesti, vaan murtoomuodot ja muut kohoavat maastonmuodot ovat suhteellisesti kivisempiä kuin tasaiset alueet, sulamisvesikanavat sekä viuhkamurrokset.

Subglasiaaliset olosuhteet sekä jäätikkökuljetuksen prosessit selittävät topografian vaikutusta kivien sijoittumiseen. Mahdollisesti mannerjään pohjan kontakti lohkareisiin on vaihdellut sulan ja jäätyneen välillä, ja jäätyneenä kivet ovat tempautuneet yllä virtaavan mannerjään mukana sulamisvesireitin kohoavien maastonmuotojen päälle.

Osa lohkareista on tasaisilla alueilla peittynyt siihen postglasiaalisesti kasvaneen turpeen alle, mutta ojakaivantojen perusteella kivisyys on tasaisilla alueilla huomattavasti viereisiä korkeampia alueita vähäisempää.

Murtoiden sisältä ei ole löytynyt yli metrin kokoista lohkaretta, mikä osoittanee paitsi kerrostumistilan korkeutta myös ajoittaa kivien asettumisen murtoiden muodostumisen jälkeen. Pintalohkareisuuden sijoittumisen perusteella sulamisvesireitin toiminta on säilynyt aktiivisena deglasiaation loppuun asti.

Laserkeilausaineistoon pohjautuva geomorfologinen tutkimus, maastotöitä vaativat kenttätyöt kuten sedimentologinen tutkimus sekä laboratoriossa tehtävä analoginen mallinnus ovat menetelmiä, jotka yhdessä tuottavat arvokasta tietoa sulavien jäätiköiden dynamiikasta. Pintalohkareisuuden tutkiminen oli glasiaaligeologian alkuvaiheessa olennaisessa osassa, mutta sillä on edelleen lisätietoa antava roolinsa paikallisen ja yksityiskohtaisen glasiaalidynamiikan tutkimisessa.

8 Kiitokset

Kiitokset Turun yliopiston RewarD hankkeelle kaivanto- ja paikkatietoaineistojen jakamisesta sekä kenttätöiden logistiikassa auttamisessa. Kiitokset myös tutkielman ohjaaja Joni Mäkiselle asiantuntevasta ohjauksesta sekä professori Antti Ojalalle arvokkaista kommenteista.

Lähteet

Ahokangas, E., A.E.K. Ojala., A. Tuunainen., M. Valkama., J.-P. Palmu., K. Kajuutti & J. Mäkinen (2021). The distribution of glacial meltwater routes and associated murtoo fields in Finland. *Geomorphology* 389(107854) 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.107854>

Bennett, M. & N. F. Glasser (1996) *Glacial geology: ice sheets and landforms*. 364 s. Chichester, Wiley.

Bukhari, S., N. Eyles, S. Sookhan, R. Mulligan, R. Paulen, M. Krabbendam & N. Putkinen (2021). Regional subglacial quarrying and abrasion below hard-bedded palaeo-ice streams crossing the Shield–Palaeozoic boundary of central Canada: the importance of substrate control. *Boreas* 50(3) 781–805. <https://doi.org/10.1111/bor.12522>

Christoffersen, P., M. Bougamont, A. Hubbard, S. H. Doyle, S. Grigsby & R. Pettersson (2018). Cascading lake drainage on the Greenland Ice Sheet triggered by tensile shock and fracture. *Nature Communications* 9(1064) 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-03420-8>

Clarke, G. K. C. (2005). Subglacial processes. *Annual review of earth and planetary sciences* 33 247–276.

Glasser, N. F. & M. R. Bennett (2004). Glacial erosional landforms: origins and significance for palaeoglaciology. *Progress in Physical Geography* 28(1) 43–75. <https://doi.org/10.1191/0309133304pp401ra>

Greenwood, S. L., C. C. Clason, C. Helanow & M. Margold (2016). Theoretical, contemporary observational and palaeo-perspectives on ice sheet hydrology: processes and products. *Earth-Science Reviews* 155(1) 1–27. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.01.010>

Grönholm S., R., Alviola, K. A. Kinnunen, K. Kojonen, N. Kärkkäinen & H. Mäkitie (2006). *Retkeilijän kiviopas*. Geologian tutkimuskeskus. Erikoisjulkaisu. 87 s. <http://tupa.gtk.fi/julkaisu/erikoisjulkaisu/ej_078.pdf> 24.11.2021.

Haavisto-Hyvärinen M. & H. Kutvonen (2007). *Maaperäkartan käyttöopas*. 61 s. Geologian tutkimuskeskus, Espoo. <https://tupa.gtk.fi/julkaisu/erikoisjulkaisu/gtk_maaperakartan_kayttoopas.pdf> 23.11.2021.

Hall, A. M., M. Krabbendam, M. van Boeckel, B. W. Goodfellow, C. Hättestrand, J. Heyman, R. N. Palamakumbura, A. P. Stroeven & J.-O. Näslund (2020). Glacial ripping:

geomorphological evidence from Sweden for a new process of glacial erosion, *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography* 102(4) 333–353. <https://doi.org/10.1080/04353676.2020.1774244>

Hellaakoski, A. (1930). On the transportation of materials in the esker of Laitila. *Fennia* 52: 7. 42 s.

Hirvas, H. & K. Nenonen (1987). The till stratigraphy of Finland. *Geological Survey of Finland, Special Paper* 3: 49-63. <https://tupa.gtk.fi/julkaisu/specialpaper/sp_003_pages_049_063.pdf>

Hooke, R. (2020). *Principles of Glacier mechanics*. 3rd ed. Cambridge University Press, New York. 513 s. <https://doi.org/10.1017/9781108698207>

Hovikoski, J., J. Mäkinen, J. Winsemann, S. Soini, K. Kajuutti, A. Hepburn & A. E. K. Ojala (2023). Upper-flow regime bedforms in a subglacial triangular-shaped landform (murtoo), Late Pleistocene, SWFinland: Implications for flow dynamics and sediment transport in (semi-)distributed subglacial meltwater drainage systems. *Sedimentary Geology* 454 (106448) 1–15.

Hughes, P., N. Glasser, & D. Fink (2016). Rapid thinning of the Welsh Ice Cap at 20–19 ka Based on ^{10}Be Ages. *Quaternary Research* 85(1) 107–117. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2015.11.003>

IOF 2019 = International Orienteering Federation (2019). *International Specification for Orienteering Maps ISOM 2017-2*. <https://orienteering.sport/iof/mapping/> 23.11.2021.

Johansson, P. & R. Kujansuu (2005; toim.). *Pohjois-Suomen maaperä*. 236 s. Geologian tutkimuskeskus, Espoo. <http://tupa.gtk.fi/julkaisu/erikoisjulkaisu/ej_046.pdf> 23.11.2021.

Johansson, P., L. Sahala & K. Virtanen (2000). *Rantamerkit, tuulikerrostumat ja moreenimuodostumat geologisina luontokohteina*. Geologian tutkimuskeskus. Tutkimusraportti 151. 76 s. <https://tupa.gtk.fi/julkaisu/tutkimusraportti/tr_151.pdf> 23.11.2021.

Johnson, M. D., O., Fredin, A. E. K. Ojala, & G. Peterson (2015). Unraveling Scandinavian geomorphology: the LiDAR revolution. *GFF* 137(4) 245–251. <https://doi.org/10.1080/11035897.2015.1111410>

Karpin, V., A. Heinsalu, A. E. K. Ojala & J. J. Virtasalo (2023). Offshore murtoos indicate warm-based Fennoscandian ice-sheet conditions during the Bølling warming in the

northern Gulf of Riga, Baltic Sea. *Geomorphology* 430(108655) 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2023.108655>

Kejonen, A., C.-G. Sten, M. Moisanen & T. Paukola (1988). Sääksjärvi. *Maaperäkartan 114311 selitys*. <tupa.gtk.fi/kartta/maaperakartta20/mps_114311.pdf> 23.11.2021.

Kesäläinen, T. & A. Kejonen (2019). Suomen lohkareet ja tarinakivet. 400 s. Salakirjat, Helsinki.

Koivisto, M. (2004; toim.). Jääkaudet. 233 s. WSOY, Porvoo.

Lehtinen, M., P. Nurmi & T. Rämö (1998; toim.). Suomen kallioperä: 3000 vuosimiljoonaa. 375 s. Suomen Geologinen Seura ry., Helsinki.

Lewington, E. L. M., S. J. Livingstone, C. D. Clark, A. J. Sole & R. D. Storrar (2020). A model for interaction between conduits and surrounding hydraulically connected distributed drainage based on geomorphological evidence from Keewatin, Canada. *The Cryosphere* 14 2949–2976. <https://doi.org/10.5194/tc-14-2949-2020>

Menzies, J. (2002; toim.). Modern and past glacial environments. Rev. student ed. Oxford.

Mikkola, P. (2016). Yleistettu kalliperäkartta 1M – oheismateriaali. <http://tupa.gtk.fi/karttasovellus/maankamara/yleistetty_kalliopera_1m/18.pdf> 24.11.2021.

MML = Maanmittauslaitos (2021). Tuotekuvaukset. <www.maanmittauslaitos.fi/kartat-ja-paikkatieto/asiantuntevalle-kayttajalle/tuotekuvaukset/> 23.11.2021.

Moreiras, S. M., R. L. Hermanns & L. Faugué (2015). Cosmogenic dating of rock avalanches constraining quaternary stratigraphy and regional neotectonics in the Argentine central Andes (32° S). *Quaternary Science Reviews* 33(112) 45–58. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2015.01.016>

Mäkinen, J., K. Kajuutti, J.-P. Palmu, A. Ojala & E. Ahokangas (2017). Triangular-shaped landforms reveal subglacial drainage routes in SW Finland. *Quaternary Science Reviews* 164: 1, 37–53. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2017.03.024>

Mäkinen, J. K. Kajuutti, A. E. K. Ojala, E. Ahokangas, A. Tuunainen, M. Valkama & J.-P. Palmu (2023). Genesis of subglacial triangular-shaped landforms (murtoos) formed by the Fennoscandian Ice Sheet. *ESPL* 1–23. <https://doi.org/10.1002/esp.5606>

Mäkinen, K., J. Teeriaho, H. Rönty, T. Rauhaniemi & L. Sahala (2011). Valtakunnallisesti arvokkaat tuuli- ja rantakerrostumat. *Suomen ympäristö 32*. 185 s. <http://hdl.handle.net/10138/37025>

Mäkinen, K., J.-P. Palmu, J. Teeriaho, H. Rönty, T. Rauhaniemi & J. Jarva (2007). Valtakunnallisesti arvokkaat moreenimuodostumat. *Suomen ympäristö 14*. 120 s. <http://hdl.handle.net/10138/38399>

Nenonen, K, P. Johansson, O. Sallasmaa, P. Sarala, & J.-P. Palmu (2018). "The Inselberg landscape in Finnish Lapland: a morphological study based on the LiDAR data interpretation. *Bulletin of the Geological Society of Finland* 90(2) 239–256. <https://doi.org/10.17741/bgsf/90.2.008>

Ojala, A. E. K. (2016). Appearance of De Geer moraines in southern and western Finland — implications for reconstructing glacier retreat dynamics. *Geomorphology* 255(1) 16–25. <http://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.12.005>

Ojala, A. E. K. & P. Sarala (2017). LiDAR – rapid developments in remote sensing of geological features. *Bulletin of the Geological Society of Finland* 89(2) 61–63. <https://doi.org/10.17741/bgsf/89.2.ed>

Ojala, A. E. K., J.-P. Palmu, A. Åberg, S. Åberg & H. Virkki. (2013). Development of an ancient shoreline database to reconstruct the Litorina Sea maximum extension and the highest shoreline of the Baltic Sea basin in Finland. *Bulletin of the Geological Society of Finland* 85(2) 127-144.

Ojala, A. E. K., J. Mäkinen, K. Kajuutti, E. Ahokangas & J.-P. Palmu (2022). Subglacial evolution from distributed to channelized drainage: evidence from the Lake Murtoo area in SW Finland. *Earth surface processes and landforms* 47(12) 2877–2896. <https://doi.org/10.1002/esp.5430>

Ojala, A. E. K., J. Mäkinen, E. Ahokangas, K. Kajuutti, M. Valkama, A. Tuunainen & J.-P. Palmu (2021). Diversity of murtoos and murtoo-related subglacial landforms in the Finnish area of the Fennoscandian Ice Sheet. *Boreas* 50(1) 1095–1115. <https://doi.org/10.1111/bor.12526>

Ojala, A. E. K., G. Peterson, J. Mäkinen, M. D. Johnson, K. Kajuutti, J.-P. Palmu, E. Ahokangas & C. Öhrling (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(80) 115–126. <http://doi.org/10.1017/aog.2019.34>

Palmu, J.-P., A. E. K., Ojala, J. Virtasalo, N. Putkinen, J. Kohonen & S. Pertti (2021). Classification system of superficial (quaternary) geological units in Finland. *Bulletin of the Geological Society of Finland* 412(1) 115–169. <http://doi.org/10.30440/bt412.4>

Perttunen, M. & H. Vartiainen (1992). Glaciofluvial transport of clasts and heavy minerals from the Sokli carbonatite complex, Finnish Lapland. *Geological Survey of Finland, Bulletin 366*. <https://tupa.gtk.fi/julkaisu/bulletin/bt_366.pdf> 23.11.2021.

Peterson Becher, G. & M. D. Johnson (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>

Peterson, G., M. D. Johnson & C.A. Smith (2017). Glacial geomorphology of the south Swedish uplands – focus on the spatial distribution of hummock tracts. *Journal of Maps* 13(2) 534–544. <https://doi.org/10.1080/17445647.2017.1336121>

Porkka, J. (2019). Viuhkamurrosten morfologia ja suhde subglasiaalisiin sulamisvesireitteihin ja murtoo-muodostumiin. LuK-tutkielma. Turun yliopisto. Maantieteen ja geologian laitos. 38 s.

Puranen, R. (1988). Modelling of glacial transport of basal tills Finland. Tutkimusraportti 81. GTK:n arkistoraportit. 36 s. <https://tupa.gtk.fi/julkaisu/tutkimusraportti/tr_081.pdf>

Ratia, A. (1996). Lohkareesta emäkallioon. 222 s. Tammi, Helsinki.

Rinterknecht, V. R., P. U. Clark, G. M. Raisbeck, F. Yiou, E. J. Brook, S. Tschudi & J. P. Lunkka (2004). Cosmogenic 10Be dating of the Salpausselkä I moraine in southwestern Finland. *Quaternary Science Reviews* 23(23–24) 2283–2289. <https://doi-org.ezproxy.utu.fi/10.1016/j.quascirev.2004.06.012>

Räisänen, J., J. Teeriaho, T. Kananoja & H. Rönty (2018). Valtakunnallisesti arvokkaat kivikot – Osa 1. Suomen ympäristö 2. 194 s. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-11-4795-1>

Sainio, A., P. Heiskanen, A. E. K. Ojala & J. Mäkinen (2023). Miten jäätikön alaiset järvet purkautuivat – esimerkkinä Urjala-Akaan subglasiaalinen järvi. *Geologi* 75(3) 93–102. <https://www.geologinenseura.fi/sites/geologinenseura.fi/files/geologi_-_artikkelit/geologi_3_2023_s93_102.pdf>

Salonen, V.-P. (1986). Glacial transport distance distributions of surface boulders in Finland. *Geological Survey of Finland, Bulletin 338*. 57 s. <https://tupa.gtk.fi/julkaisu/bulletin/bt_338.pdf> 23.11.2021.

Salonen, V.-P. & Aumo, R. (1984). Kenttäraportti lohkareprojektin impaktiittietsinnöistä Sääksjärvellä kesällä 1984. Outokumpu Oy:n malminetsinnän raportit. <https://tupa.gtk.fi/raportti/arkisto/020_1143_08_vps_ra_84.pdf> 23.11.2021.

Saltikoff, B. (1985). Lohkare-etsijän opas. 23 s. Geologian tutkimuskeskus, Espoo. <https://tupa.gtk.fi/julkaisu/opas/op_013.pdf> 23.11.2021.

Sarala, P. (2006). Ribbed moraine stratigraphy and formation in southern Finnish Lapland. *Journal of Quaternary Science* 21(4) 387–398. <https://doi.org/10.1002/jqs.995>

Sauramo, M. (1924). Tracing of glacial boulders and its application in prospecting. *Bulletin de la Commission geologique de Finlande* 67, 5–37.

Seppälä, M. (2016). Suomen moreenimuodostumat ja sekundaarinen deformaatio. Geologi 68: 3, 98–106. <https://www.geologinenseura.fi/sites/geologinenseura.fi/files/geologi_-_artikkelit/geologi_3_2016_05mordefor.pdf> 23.11.2021.

Seppälä, M. (2018). Topelius, Maamme kirja, maantiede ja jääkausi. Terra 130: 2, 79–89. <https://terra.journal.fi/article/view/76473/37758> 23.11.2021.

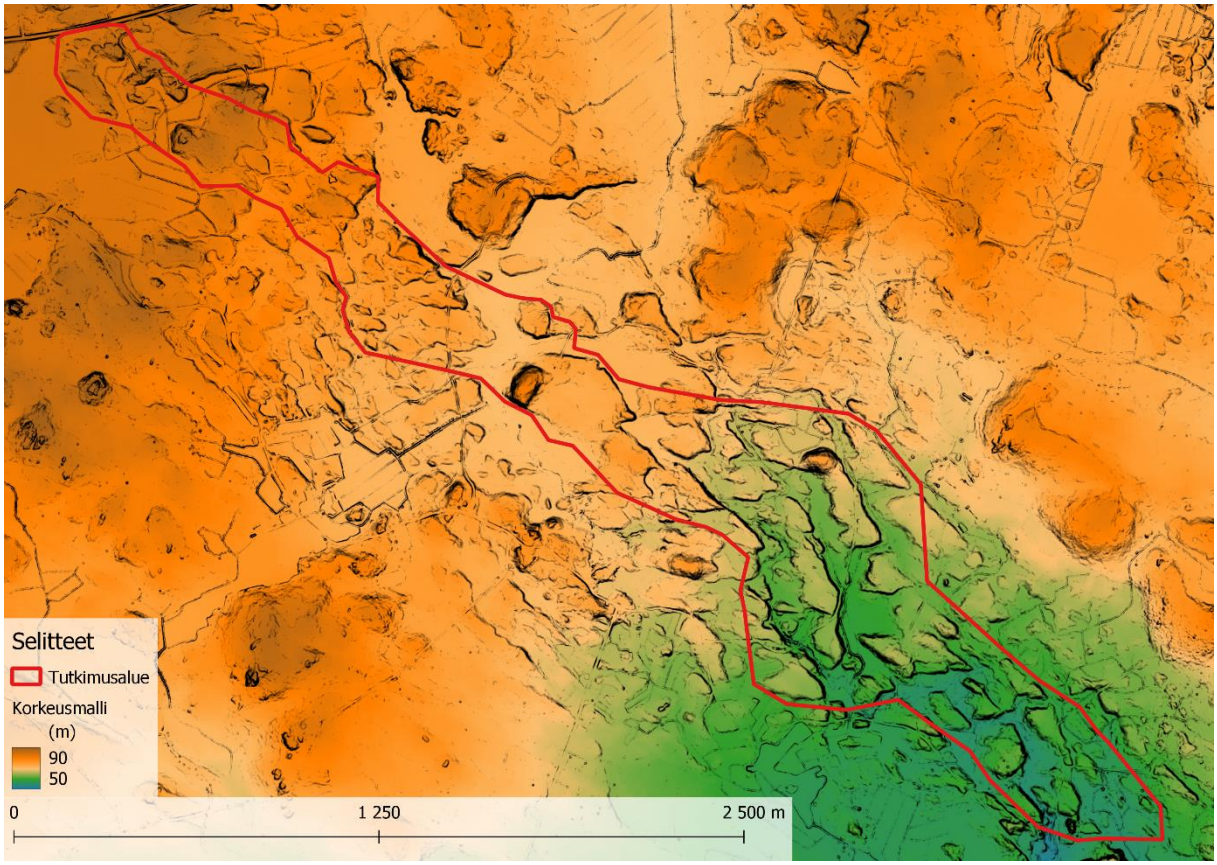
Seppälä, M. V. J. (2016). Lidar-Based Detection and Interpretation of Glaciotectonic Features of the Morainic Topography of Finland. *Journal of Geological Research* 4292806 1–11. <https://doi.org/10.1155/2016/4292806>

Sharpe, D. R., Lesemann, J.-E., R., D. Knight & B. A. Kjarsgaard (2021). Regional stagnation of the western Keewatin ice sheet and the significance of meltwater corridors and eskers, northern Canada. *Canadian Journal of Earth Sciences* 58 (10): 1005–1026. <https://doi.org/10.1139/cjes-2020-0136>

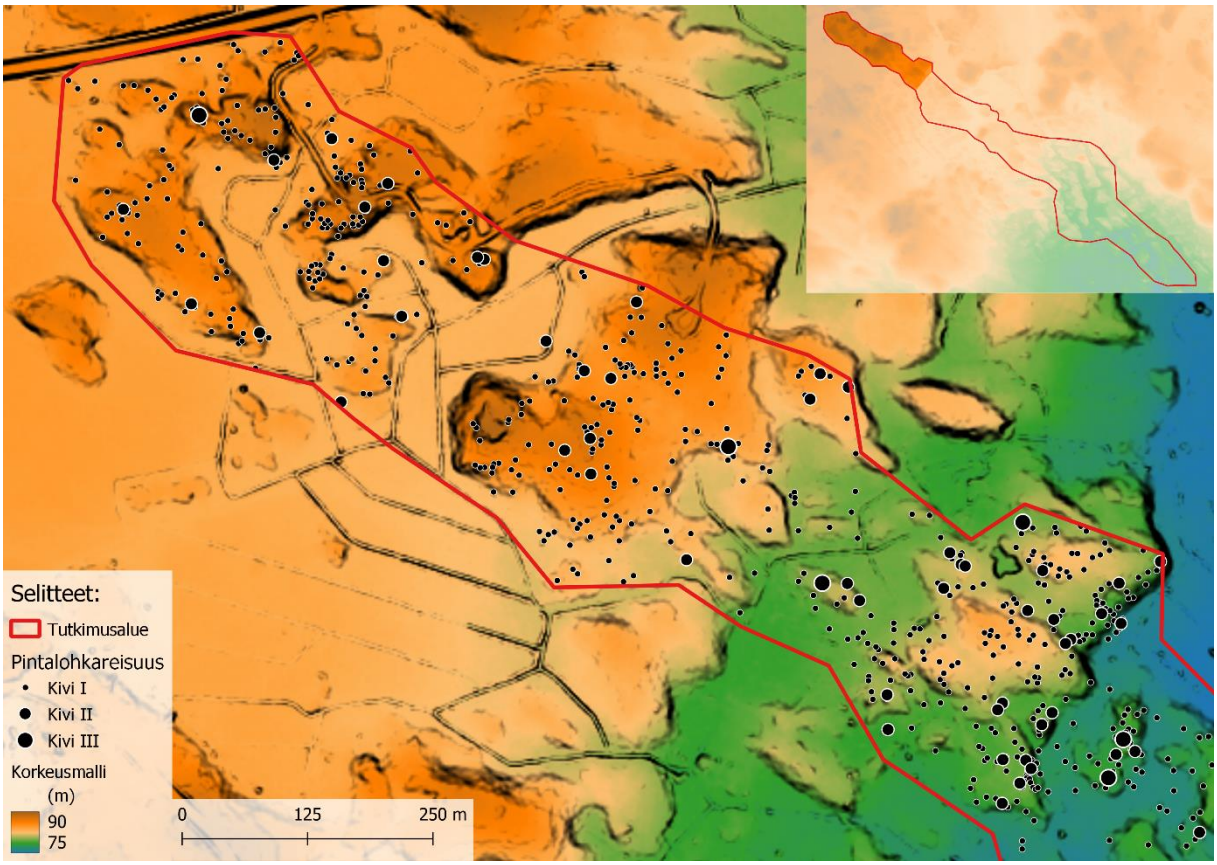
Stroeven, A. P., C. Hättestrand, J. Kleman, J. Heyman, D. Fabel, O. Fredin, B. W. Goodfellow, J. M. Harbor, J. D. Jansen, L. Olsen, M. W. Caffee, D. Fink, J. Lundqvist, G. C. Rosqvist, B. Strömberg & K. N. Jansson (2016) Deglaciation of Fennoscandia, *Quaternary Science Reviews* 147: 91-121.

Vérité, J., É. Ravier, O. Bourgeois, P. Bessin, S. J. Livingstone, C. D. Clark, S. Pochat & R. Mourgues (2022). Formation of murtoos by repeated flooding of ribbed bedforms along subglacial meltwater corridors. *Geomorphology* 408(108248) 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2022.108248>

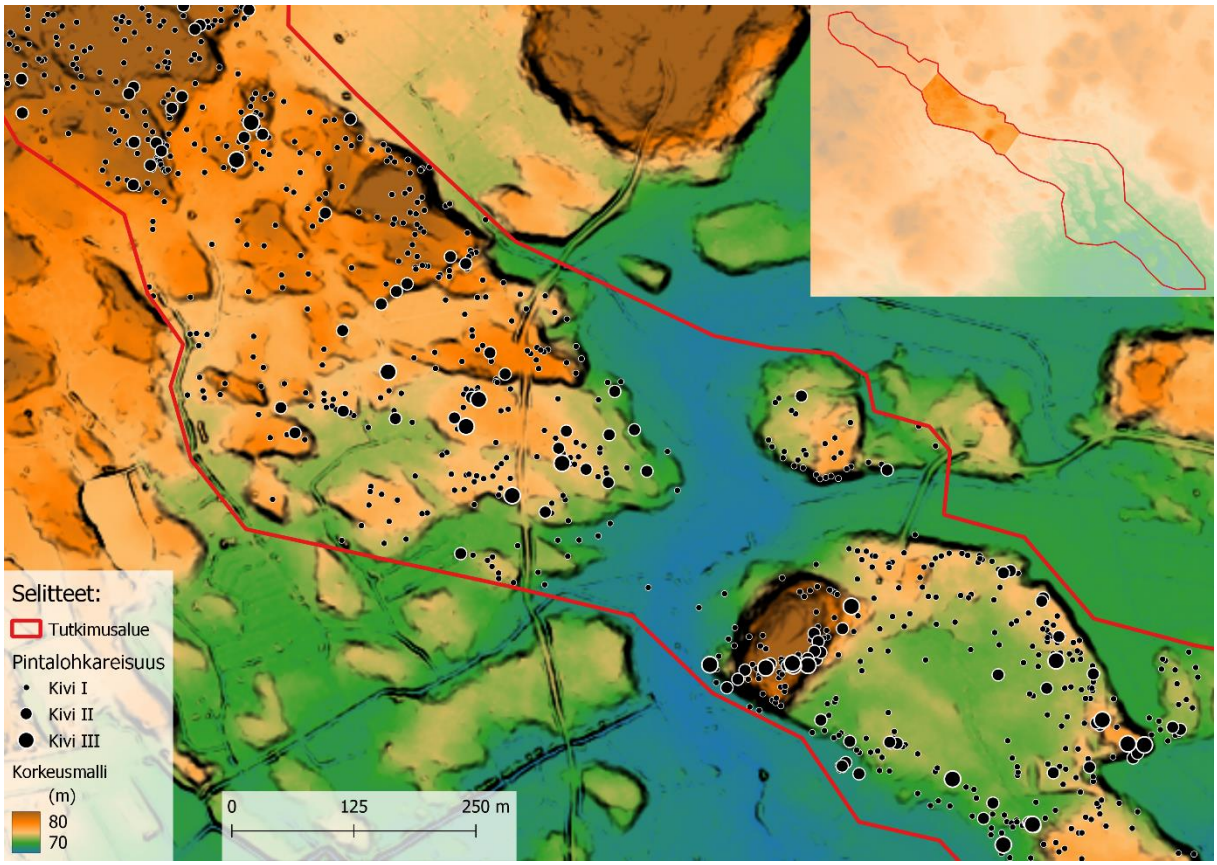
Liitteet



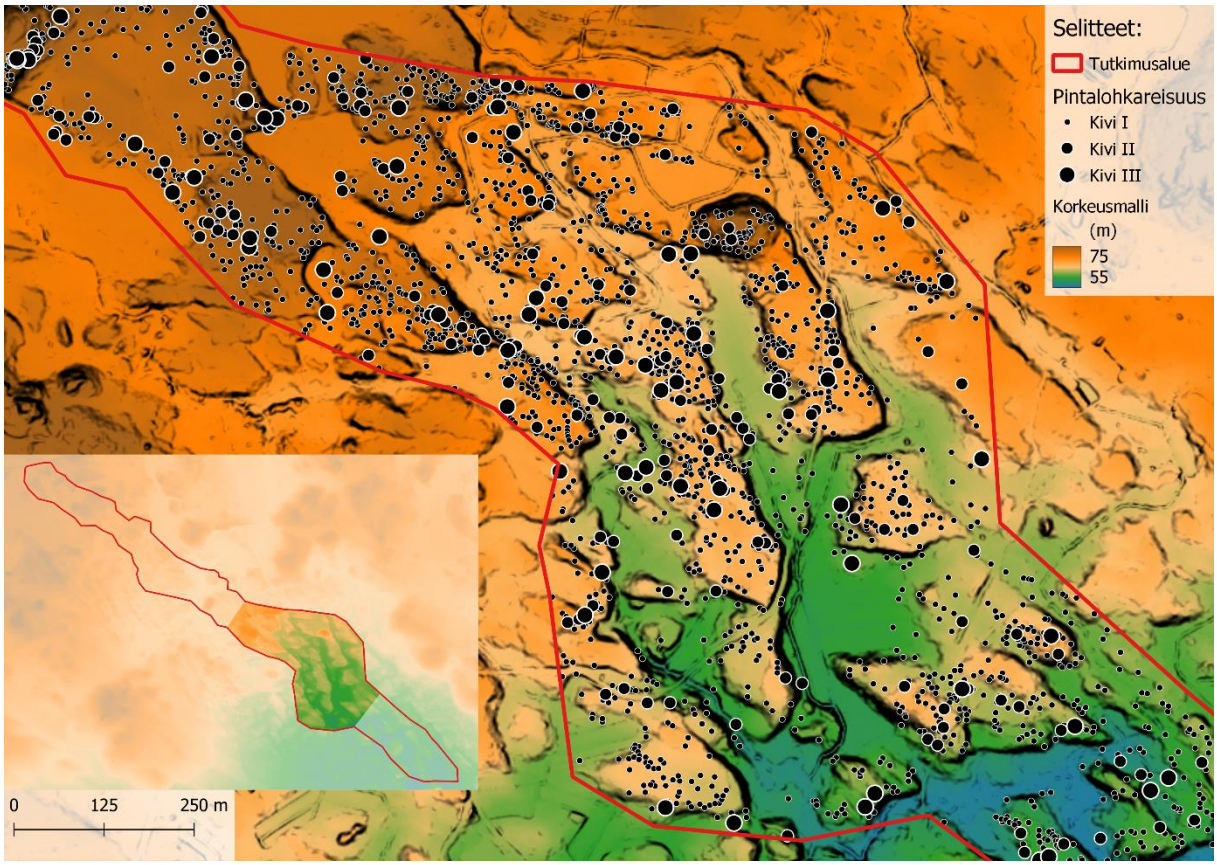
Liite 1. Tutkimusalueen kartta. MML:n 2 m korkeusmalli.



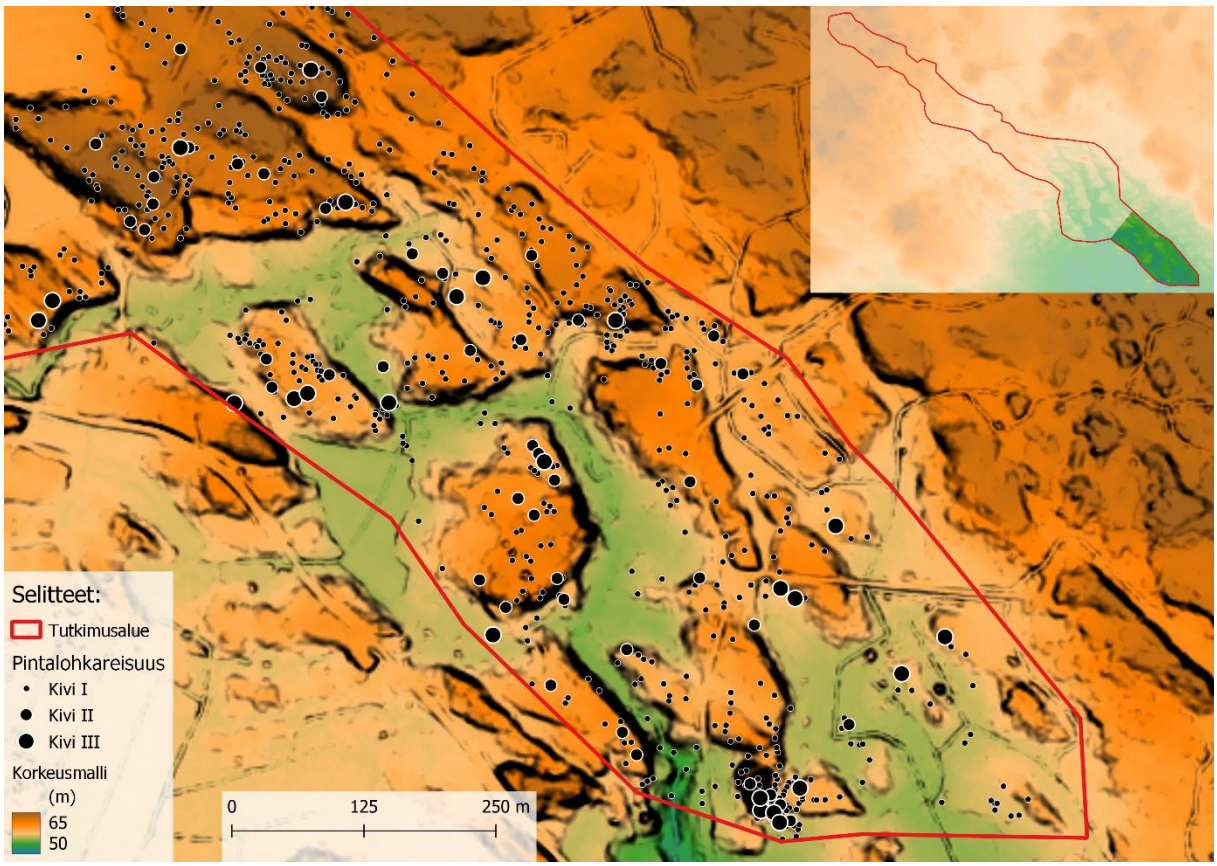
Liite 2. Tutkimusalueen kartta 1/4. MML:n 2 m korkeusmalli ja pintalohkareisuusaineisto.



Liite 3. Tutkimusalueen kartta 2/4. MML:n 2 m korkeusmalli ja pintalohkareisuusaineisto.



Liite 4. Tutkimusalueen kartta 3/4. MML:n 2 m korkeusmalli ja pintalohkareisuusaineisto.



Liite 5. Tutkimusalueen kartta 4/4. MML:n 2 m korkeusmalli ja pintalohkareisuusaineisto.