

Turun alueen erodoituneen kallioperän yläpinnan 3D-mallinnus geoteknisten kairausten avulla

Kallioperägeologian
pro gradu -tutkielma

Laatija:
Kati Ahlqvist

28.6.2023
Turku

Pro gradu -tutkielma

Oppiaine: Kallioperägeologia

Tekijä: Kati Ahlqvist

Otsikko: Turun alueen erodoituneen kallioperän yläpinnan 3D-mallinnus geoteknisten kairausten avulla

Ohjaaja: Pietari Skyttä

Sivumäärä: 55 sivua

Päivämäärä: 28.6.2023

Turun seudulla on pulaa hyvästä rakennuspohjasta, jonka vuoksi rakentaminen suuntautuu usein epäedullisimmille savikkoalueille. Tämän vuoksi geologisilla tekijöillä, kuten kallion rikkonaisuudella ja savikerrosten paksuudella, on merkittävä vaikutus rakentamiskustannuksiin. Kaupunkisuunnittelua hyödyttäisi geologinen 3D-malli, jonka avulla eri alueiden rakentamiseen vaikuttavia geologisia tekijöitä voitaisiin arvioida. Tässä työssä tarkastellaan i) erilaisten pohjatutkimusmenetelmien käytettävyyttä ja luotettavuutta kalliopinnan mallinnuksessa, ii) tuotetaan digitaalinen korkeusmalli kalliopinnasta ja iii) karakterisoidaan valikoitujen deformaatiovyöhykkeiden rakennetta.

Tässä työssä laadittiin digitaalinen korkeusmalli Turun alueen erodoituneen kallioperän yläpinnasta. Geoteknisten kairausten lähtöaineisto oli 61 325 kairausta, joista mallinnuksessa käytettiin 34 917 kairausta. Lisäksi käytettiin korkeusmallista (DEM 10 m) tuotettua kalliopaljastumien pistedataa sekä meren pohjan syvyyspisteitä ja -käyriä. Kallionpintamallin korkeus vaihtelee välillä - 69,0 m - +67,5 m merenpinnan tasoon nähden. Korkeusmallissa havaittiin useita lineaarisia painanteita, joilla on rinnekaltevuustarkastelun perusteella jyrkemmät rinteet ja tasaisempi pohja. Havaitut suunnat vastaavat alueelta aiemmin tunnistettuja myöhäis-svekofennisiä, NE-SW ja N-S –suuntaisia deformaatiovyöhykkeitä. Lisäksi korkeusmallista voidaan havaita kokonaan uusia lineaarisia painanteita tutkimusalueen itä- ja pohjoisosassa. Tarkasteluissa erottuivat kaksi jyrkkäseinäistä ja jatkuvaa painannetta: Aurajoen ja Jaaninojan painanne. Painanteissa karkearakeisen maaperän paksuudet vaihtelevat, paksuimmillaan ne voivat olla yli 30 m, mutta laaksosysteemien reunoilla savi voi olla suoraan kallion päällä.

Geoteknisistä kairauksista kalliopinnan mallintamiseen ensisijaisesti tulisi käyttää kalliovarmennettuja kairauksia, joista saadaan varmennettu kalliopinnan sijainti. Mallinnusta ohjaavina kairauksina voidaan käyttää myös kiilautuneita, kiveen, lohkareseen tai kallioon varmentamattomasti päätyneitä kairauksia, jolloin niiden päättymistasoa tässä työssä laskettiin 2 m.

Tuotettu 3D-malli on resoluutioltaan ja luotettavuudeltaan sopiva aluesuunnitteluun ja rakentamisen kustannusten arviointiin. Mallin avulla saadaan uutta tietoa heikkousvyöhykkeiden sijainnista, niiden laajuudesta sekä morfologiasta ja maapeitteiden paksuudesta. Malli toimii myös samanaikaisesti laaditun savikkomallin pohjatietona, ja yhdessä ne muodostavat yhtenäisen alustavan maankamaramallin Turun alueelta.

Avainsanat: geotekniset kairaukset, kalliopinta, Turku, 3D-malli

Master's thesis

Subject: Bedrock geology

Author: Kati Ahlqvist

Title: 3D modeling of the top surface of the eroded bedrock in the Turku area using geotechnical drillings

Supervisor: Pietari Skyttä

Number of pages: pages

Date: 28.6.2023

There is a shortage of a good building areas in the Turku region, which is why construction is often directed to more unfavourable clay areas. Therefore, geological factors, such as the fragmentation of the bedrock and the thickness of the clay layers, have a significant impact on construction costs. Urban planning would benefit from a geological 3D model that could be used to assess geological factors affecting the construction of different areas. This work examines i) the usability and reliability of different ground survey methods in rock surface modelling, ii) produces a digital elevation model of the rock surface, and iii) characterizes the structure of selected deformation zones.

In this work, a digital elevation model of the upper surface of eroded bedrock in the Turku area was modelled. The source data for modelling included 61 325 drillings, of which 34 917 drillings were used. In addition, point data of bedrock outcrops produced from the elevation model (DEM 10 m) and depth points and contours of the seabed were used. The height of the rock surface model varies from – 69.0 m to +67.5 m relative to sea level. In the elevation model, several linear depressions were observed with steeper slopes and flatter bottoms based on slope analysis. The observed directions correspond to the previously identified late-Svekofennian, NE-SW and N-S deformation zones in the area. In addition, completely new linear depressions were observed from the elevation model in the eastern and northern parts of the area. Two steep-walled and continuous depressions were observed: the depression of the Aura River and the Jaaninoja River. In depressions, the thicknesses of coarse-grained soils vary, at their thickest they can exceed 30 m, but at the edges of valley systems, clay can lie directly on top of the bedrock.

In modelling top of the bedrock primary data should be bedrock verified drillings with elevation of the bedrock surface. Wedged drillings, drillings terminated in rock, boulder or unverified bedrock can also be used as controlling data, in which case their termination level in this work was lowered by 2 m.

In terms of resolution and reliability, the produced 3D model is suitable for regional planning and estimating construction costs. The model provides new information on the location of weakness zones, their extent, morphology, and soil cover thickness. The model also serves as the basis data for the clay model produced at the same time, and together these models form a uniform preliminary soil model of the Turku region.

Avainsanat: geotechnical drillings, bedrock surface, Turku, 3D-model

Sisällysluettelo

1	Johdanto	1
2	Geologinen tausta	4
2.1	Kallioperä	4
2.1.1	Turun seudun kallioperä	4
2.1.2	Tutkimusalueen kallioperä	8
2.2	Maaperä	10
2.2.1	Etelä-Suomen maaperä	10
2.2.2	Turun seudun maaperä	11
2.3	Glasiaalieroosio	13
3	Pohjatutkimusmenetelmät	14
3.1	Ohjeistus ja standardit	14
3.2	Kairausmenetelmät	15
3.2.1	Porakonekairaus	16
3.2.2	Painokairaus	16
3.2.3	Heijarikairaus ja puristin-heijarikairaus	19
3.3	Porakonekairausten luotettavuus kalliopinnan määrittelyssä	20
4	Aineisto ja menetelmät	22
4.1	Tutkimusalue ja -aineisto	22
4.2	Menetelmät	24
4.2.1	Geoteknisten kairaustietojen käsittely	25
4.2.2	LiDAR-aineiston käyttö paljastuma-alueilla	27
4.2.3	Meren pohjan syvyyspisteet	30
4.2.4	Interpolointi	31
4.2.5	Kallion pintamallin tulkinta ja moreenipaksuuksien mallinnus	31
5	Kalliopinnan topografinen 3D-malli	32
5.1	Kalliopinnan rakenteet	32
5.2	Poikkileikkaustarkastelut	36
5.2.1	Aurajoen vyöhyke	36
5.2.2	Jaaninojan vyöhyke	39
5.3	Karkearakeinen maaperä tarkasteltuna mallinnetun saven alapinnan ja kalliopinnan välisenä erotuksena	41

6	Keskustelu	44
6.1	Vertailu aiempiin kallioperän rakennemalleihin	44
6.2	Geoteknisten kairausten käytettävyys ja luotettavuus kalliopinnan mallinnuksessa	45
7	Johtopäätökset	47
	Lähteet	49

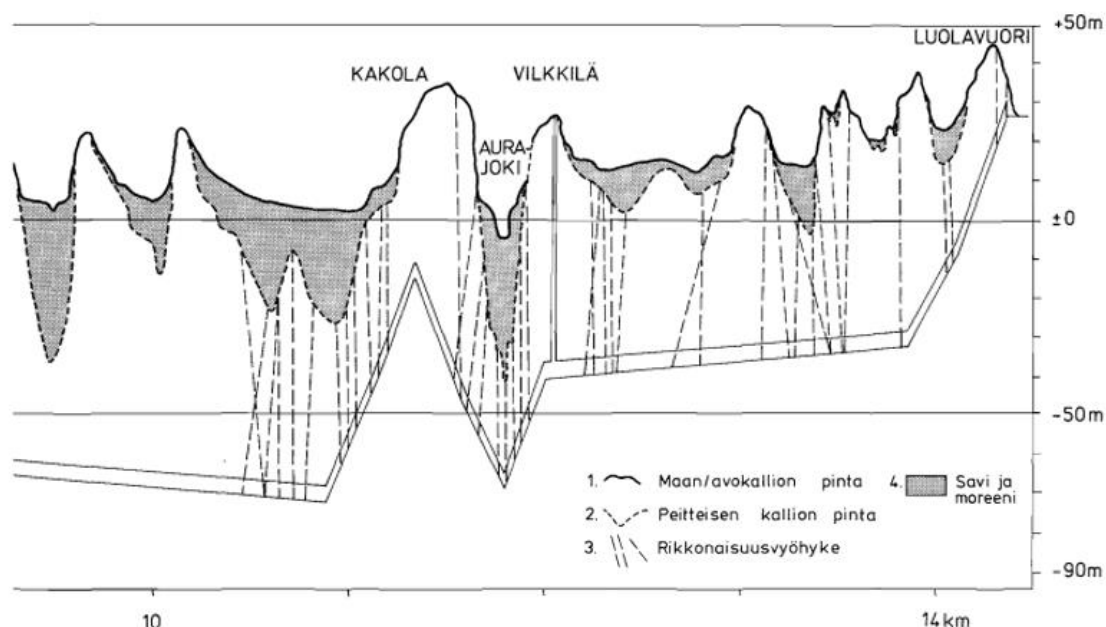
1 Johdanto

Turun väkiluku kasvaa, ja samaan aikaan asumisväljyys eli asuinpinta-ala henkilöä kohden on kasvanut (Turun kaupunki 2023). Tämän seurauksena asuminen vaatii aiempaa suurempia maapinta-aloja, ja kaupunkirakenne tiivistyy. Turun kaupungin valmisteluvaiheessa olevassa yleiskaavassa ohjataan uudisrakentamista olemassa olevan kaupunkirakenteen sisään, jolloin suurimman osan rakentamisesta tulisi sijoittua tiivistyvän kaupunkirakenteen vyöhykkeelle, ja vastaavasti haja-asutusalueiden rakentamisen vähentyä (Turun kaupunki 2023). Rakentamisen tiivistäminen on myös merkittävä keino vähentää kasvihuonepäästöjä, ja se tukee hiilineutraaliuden tavoitteita (Turun kaupunki 2023). Kaupunkien tiivistyminen lisää rakentamista maan alle tai maaperäolosuhteiltaan epäedullisille alueille, jotka Suomen rannikkoalueilla ovat tyypillisesti savikkoja (Ojala *et al.* 2021). Turun seudulla on pulaa maa-alueista, joilla olisi hyvä rakennuspohja, ja lisäksi maanomistussuhteet ja maatalouden väheneminen kaupunkialueella ovat suunnanneet rakentamista savikkoalueille (Raitamäki 2014).

Maan alle ja savikkoalueille rakennettaessa geologiset tekijät, kuten kallioperän ominaisuudet, kallion tai kantavan maakerroksen sijainti ja maapeitteiden paksuudet vaikuttavat merkittävästi rakentamisen kustannuksiin. Savipitoisilla alueilla rakennukset paalutetaan kovaan pohjaan, mikä kasvattaa kustannuksia (Raitamäki 2014). Kallioperän ominaisuuksista rakentamisen kannalta tärkeimpiä geologisia tekijöitä ovat kiven mekaaniset ominaisuudet ja rakoilu (Jääskeläinen 2011). Syväkivet ovat tavallisimmin massiivisia, ja niistä yleensä puuttuva tai luonteeltaan heikko suuntautuneisuus tekee niistä mekaanisilta ominaisuuksiltaan kestäviä (Palmström & Stille 2010, Yusof & Zabidi 2015). Metamorfisten kivien rakenteessa ja koostumuksessa on enemmän vaihtelua. Ne ovat syväkivien tapaan kiteisiä ja koostuvat kovista mineraaleista, mutta yhdensuuntaisten levymäisten mineraalien synnyttämä liuskeisuus aiheuttaa niissä anisotropiaa (mm. Ramamurthy *et al.* 1993, Behrestaghi *et al.* 1996, Cho *et al.* 2012), joka sekä heikentää kiveä mekaanisesti että kontrolloi siihen myöhemmin syntyvien rakojen esiintymistä (mm. Donath 1961, Hoek 1964, Ramamurthy *et al.* 1993).

Turun alueella erityisesti kallioperän vaihteleva topografia ja savikerrosten paksuuksien vaihtelevuus vaikeuttavat rakentamista (Pirilä 2016). Alueella on runsaasti deformaatiovyöhykkeitä, joiden muodostamien painanteiden Niemelä *et al.* (1987) kuvailee maaperäkarttalehden selityksessä hallitsevan alueen kallioperän topografiaa. Pitkänomaiset

painanteet ovat syntyneet joko yhden tai useamman deformaatiovyöhykkeen seurauksena tai vyöhykkeiden risteyskohtiin (Niemelä *et al.* 1987). Mikäli painanne on syntynyt samansuuntaisista vyöhykkeistä, se on suoraviivainen, kun taas risteävät vyöhykkeet muodostavat polveilevia laaksoja (Niemelä *et al.* 1987). Aurajoki ja Raisionjoki sijoittuvat näihin pitkänomaisiin painanteisiin (Pirilä 2016). Keskustan alueen kalliopinnan korkeuserot painanteiden ja niiden vieressä olevien kalliomäkien välillä ovat jopa 100 m (kuva 1). Painanteissa on paksut maapeitteet, joissa karkearakeiset jäätikön ja sulamisvesien muodostamat maalajit, kuten moreeni, sora ja hiekka, muodostavat pohjalle 0,5–2 m paksun kerroksen, jonka päälle on kerrostunut Itämeren postglasiaalista savea (Niemelä *et al.* 1987). Paikoin näiden karkearakeisten maalajien kerrokset ovat Anttilan (2023) mukaan selvästi yli kaksi metriä paksuja.



Kuva 1. Geoteknisiin kairauksiin perustuva S-SE-suuntainen poikkileikkaus kalliion pinnasta, maapeitteiden paksuudesta ja arvioiduista rikkonaisuusvyöhykkeistä Turun keskustasta (Niemelä *et al.* 1987).

Rakentamisen kannalta epäedullisilta alueilta ei ole riittävästi valmiita pohjatutkimustietoja, joista saataisiin tietoa kalliion pinnan sijainnista ja sitä kautta pehmeiden maapeitteiden paksuudesta. Kaupunkisuunnittelua ja rakentamisen kustannusten arviointia on mahdollista parantaa geologisilla 3D-malleilla, joita on mahdollista päivittää ja jotka mahdollistavat kallioperän rakenteiden huomioon ottamisen. Mallissa voidaan tuoda esille deformaatiovyöhykkeiden jatkuvuudet ja verkostot sekä deformaatiovyöhykkeiden rakosysteemit osana siirrosrakennetta.

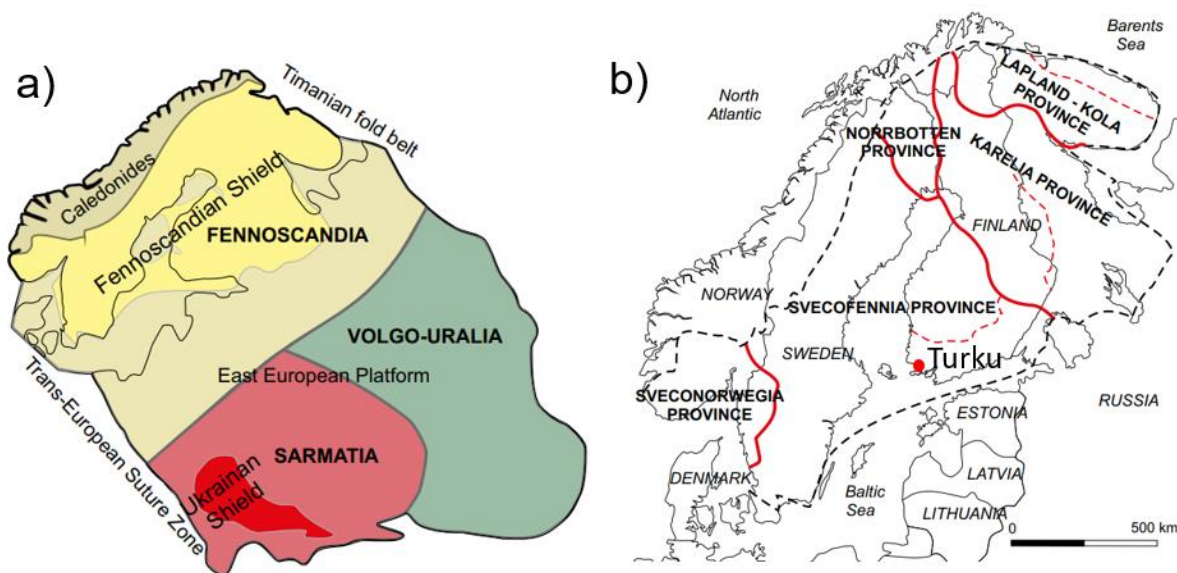
Tämä työ on osa Turun yliopistossa toteutettua ja Varsinais-Suomen Kulttuurirahaston rahoittamaa Turku 3D -hanketta, jonka tavoitteena on tuottaa Turun seudulta integroitu geologinen malli kallion pinnan topografiasta, morfologiasta ja savikkoaltaista. Osana hanketta Noora Anttila on vuonna 2023 valmistuneessa opinnäytetyössään mallintanut kallioperän päällä olevien savikkojen esiintymisaluetta, paksuusvaihtelua ja savikkoaltaiden kehityshistoriaa. Jatkamme tässä työssä Pirilän (2016) pro gradu-työssään aloittamaa yhtenäisen alueellisen maankamaramallin kehitystä. Oman työni tarkoituksena on i) tarkastella mikä on erilaisten pohjatutkimuksissa käytettyjen kairaustyyppien käytettävyys ja luotettavuus kalliopinnan mallinnuksessa, ii) tuottaa digitaalinen korkeusmalli (digital elevation model; DEM) Turun alueen kalliopinnasta ja iii) karakterisoida valikoitujen deformaatiovyöhykkeiden rakennetta ja karkearakeisen maa-aineksen sijoittumista niihin liittyvissä painanteissa ja koko tutkimusalueella.

2 Geologinen tausta

2.1 Kallioperä

2.1.1 Turun seudun kallioperä

Suomi kuuluu Fennoskandian kilpeen, joka on osa Itä-Euroopan kratonia (kuva 2). Fennoskandian kilpi jaetaan tektonisiin provinssisiin, joista Etelä-Suomi kuuluu prekambriiseen Svekofenniseen provinssiin (mm. Kähkönen 1998, Nironen 2017) ja rajoittuu arkeiseen Karjalan provinssiin luode-kaakko-suuntaisella sutuurivyöhykkeellä (Lahtinen *et al.* 2015). Alueen kallioperä muodostui Svekofennisessä orogeniassa 1,93–1,87 Ga, kun valtameren paksut sedimenttikerrostumat ja vulkaaniset kaaret poimuttuivat (mm. Kähkönen 1998, Nironen 2017).

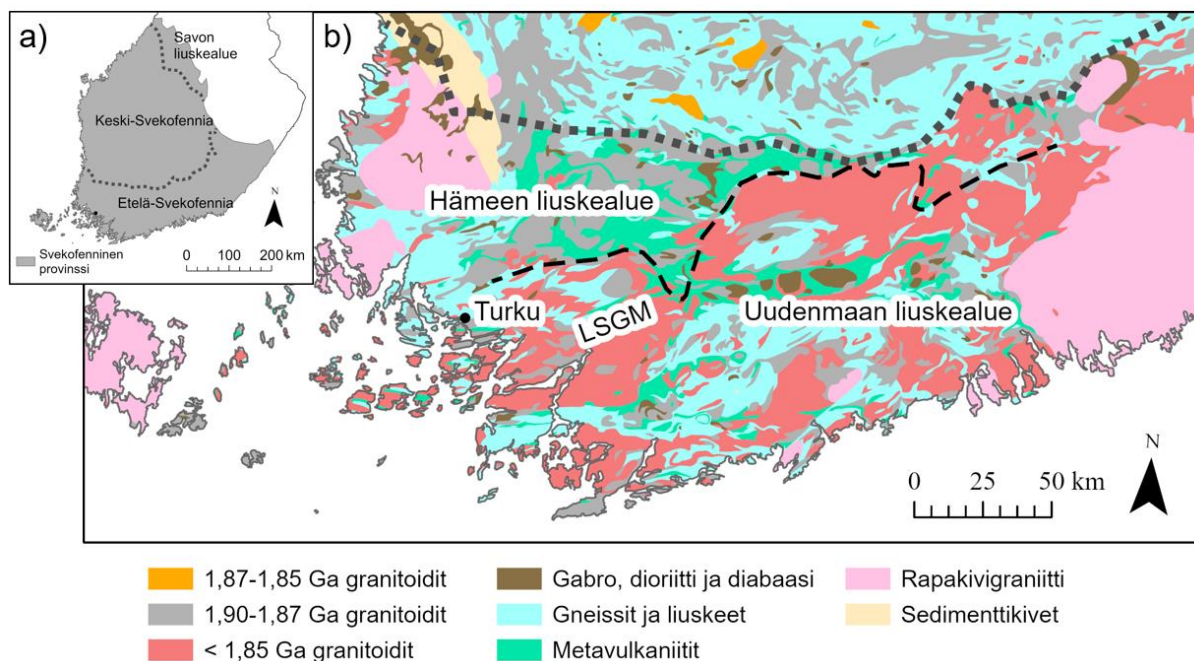


Kuva 2. a) Itä-Euroopan kratoni ja sen osa-alueet, b) Fennoskandian tektoniset provinssit (mukailtu Nironen 2017)

Svekofennisestä orogeniasta on kaksi erilaista teoriaa, joista ensimmäinen sisältää yhdistelmän akkreetio- ja törmäysprosesseja, jolloin saarikaaria ja mikromantereita on törmännyt vasten arkeista mannerta (Nironen 1997, Lahtinen *et al.* 2005). Tämä malli sisältää useita orogenioita, mikromantereiden akkreetioita, ekstensiovaiheita, mannerten törmäyksiä ja orogenian romahtamisen sekä orokliinisen taipumisen ennen kuoren stabiloitumista (mm. Lahtinen *et al.* 2005, 2009, 2014, Nironen 2017). Toisen konseptuaalisen mallin mukaan akkreetio on tapahtunut yhdessä jatkuvassa

subduktioprosessissa, jossa subduktion geometrian ja laattojen suhteellisten nopeuksien muutokset ovat aiheuttaneet törmäys- ja ekstensiovaiheiden vaihtelua (mm. Rutland *et al.* 2004, Hermansson *et al.* 2008, Stephens & Andersson 2015, Chopin *et al.* 2020).

Svekofenninen provinssi on muodostunut ainakin kolmesta tunnetusta terraanista (kuva 3), jotka ovat akkreditoituneet arkeiseen kratoniin Svekofennisen orogenian aikana: Savon liuskealue, Keski-Svekofennian subprovinssi ja Etelä-Svekofennian subprovinssi (mm. Korsman *et al.* 1997). Etelä-Svekofennia voidaan jakaa kahteen itä-länsi-suuntaiseen vulkaaniseen vyöhykkeeseen, Hämeen ja Uudenmaan liuskealueisiin, joiden väliin sijoittuu myöhäis-svekofenninen graniitti-migmatiittivyöhyke (LSGM) (mm. Ehlers *et al.* 1993, Korsman *et al.* 1997, Kähkönen 2005).



Kuva 3. a) Svekofennisen provinssin tunnetut terraanit (mukailtu Hölttä & Heilimo 2017), b) Etelä-Svekofennian litologinen kartta ja jako vulkaanisiin vyöhykkeisiin (mukailtu Kara *et al.* 2021, GTK 2016)

Orogenian aikana Etelä-Suomen kivien primäärirakenteet suurelta osin tuhoutuivat metamorfoosissa, jonka tyypillisiä tuotteita ovat korkean lämpötilan ja matalan paineen (650–700°C, 4–5 kbar) migmatiitit ja graniitit (Väisänen & Hölttä 1999, Väisänen 2002). Pintasyntyiset kivet ovat alkuperältään pääasiassa hiekka-, siltti- ja savisedimenteistä metamorfoituneita fylliittejä, kiilleliuskeita, kiillegneissejä ja migmatiitteja, joiden välikerroksina esiintyy paikoin metavulkaniitteja (Kähkönen 1998). Svekofenniseen orogeniaan liittyvät magmakivet ovat synorogeenisia granitoideja, dioriitteja ja gabroja sekä

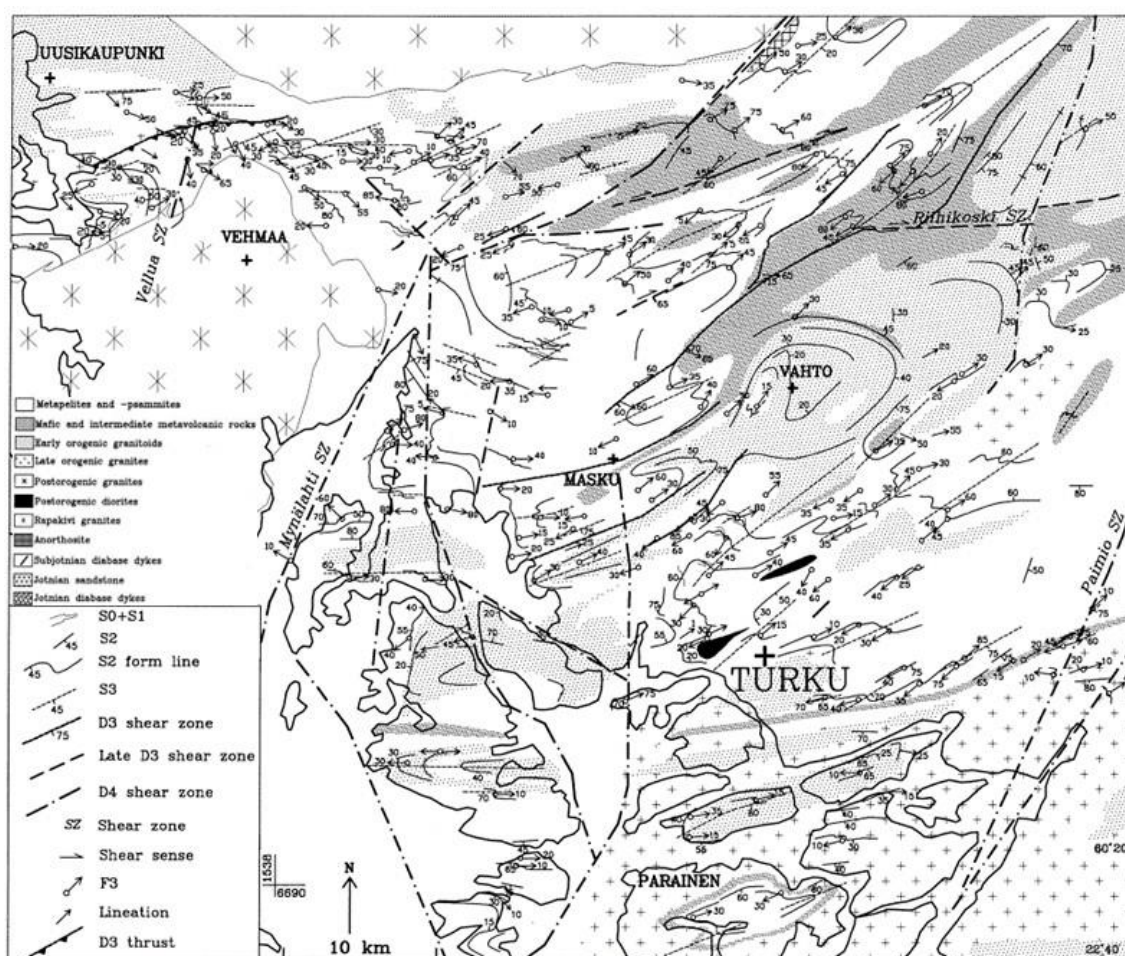
myöhäisorogeenisia ja postorogeenisia graniitteja, joiden ikä vaihtelee välillä 1,96–1,80 Ga (mm. Lahtinen *et al.* 2009, Nironen 2017, Kara *et al.* 2021). Emäksisiä ja ultraemäksisiä intruusioita on vähän ja ne ovat kooltaan rajattuja, ja koostumukseltaan ne vaihtelevat peridotiiteista gabroihiin (Nironen 2017).

Turun seutu sijoittuu Uudenmaan liuskealueen länsiosan LSGM-vyöhykkeeseen. Turun seudulle ovat tyypillisiä LSGM-vyöhykkeen myöhäisorogeeniset S-tyyppin graniitit ja migmatiitit (1,85–1,82 Ga) (kuva 3, mm. Huhma 1986, Suominen 1991, Väisänen & Hölttä 1999, Kurhila *et al.* 2005). Alueen kallioperän metamorfinen aste kasvaa luoteesta kaakkoon, muodostuen pääosin ylemmän amfiboliittifasiuksen ja granuliittifasiuksen migmatiittisista metapeliiteistä, metavulkaanisista kivistä, tonaliiteista ja graniiteista (Väisänen & Hölttä 1999). Suurin osa suprakrustisista kivistä (>1,88 Ga) on erilaisia metasedimenttejä, ja korkeasta metamorfoosisasteesta huolimatta niiden primäärirakenteet ovat paikallisesti säilyneet (Väisänen & Hölttä 1999). Sedimenttiyksiköiden vaihteleva paksuus ja koostumus viittaavat turbidiittiseen alkuperään (Väisänen & Hölttä 1999). Vanhimmat suprakrustisiin kiviin intrudoituneet syväkivet ovat varhaisorogeenisia (1,89–1,87 Ga) ja koostumukseltaan gabroista trondhjemiitteihin (Väisänen & Hölttä 1999). Myöhäisorogeenisia intrusiivisia kiviä ovat karkearakeiset punaiset tai vaaleat graniitit (1,84–1,83 Ga), ja ne ovat S-tyyppin anatektistä kuoren sulaa, joiden synty liittyy korkean lämpötilan ja alhaisen paineen metamorfismiin (Väisänen & Hölttä 1999). Postorogeenisia kiviä (<1,79 Ga) on vähäinen määrä ja ne ovat koostumukseltaan bimodaalisia (Väisänen & Hölttä 1999).

Turun alueella on ollut kolme merkittävää erillistä deformaatiovaihetta: D₁/D₂, D₃ ja D₄, joista D₃ on aiheuttanut alueen näkyvimät rakenteelliset piirteet (kuva 4, Väisänen & Hölttä 1999). Vanhin tektonis-metamorfinen D₁-rakenne on primäärikerroksellisuuden suuntainen biotiitin liuskeisuus, mutta se on pitkälti tuhoutunut myöhempien deformaatiovaiheiden aikana, eikä sen synnyttäneestä tektonisesta prosessista ole tietoa (Väisänen & Hölttä 1999). D₂-vaiheessa kerroksellisuus ja liuskeisuus deformoituiivat poimutuksessa, jossa syntyi isokliinisiä ja tiukkoja, akselitasoltaan lähes makaavia poimuja (Väisänen & Hölttä 1999). Nämä poimut ovat arviolta samanikäisiä 1.89–1.87 Ga granitoidien kanssa (Väisänen & Hölttä 1999).

D₃-deformaatiossa (1,84–1,83 Ga) intensiivinen myöhäisorogeeninen NW-SE-suuntainen puristus ja kuoren paksuuntuminen käänsivät subhorisontaaliset D₁- ja D₂-rakenteet alueen lounaisosassa E-W-suuntaisiksi, keskiosassa NE-SW-suuntaisiksi ja koillisosassa NNE-SSW-

suuntaisiksi (Väisänen & Hölttä 1999). Vaiheessa saavutettiin granuliittifasioksen olosuhteet ja tapahtui kuoren sulamista, jolloin suprakrustisia kiviä sulii S-tyypin graniiteiksi korkean paineen (6 kbar) olosuhteissa (Väisänen & Hölttä 1999). D₃-deformaatio on pääasiassa aiheuttanut rakenteiden nykyisen suuntauksen. Poimutus on ei-sylinterimäistä, ja kaartuvat poimuakselit synnyttävät doomi- ja allasrakenteita (Väisänen & Hölttä 1999). Poimutuksen voimakkuus vaihtelee avoimista isokliinisiin poimuihin, ja vyöhykkeen keskiosissa poimujen akselitasot ovat pystyjä, kun taas muualla ne kaatuvat luoteeseen (Väisänen & Hölttä 1999). D₃-hiertovyöhykkeet ovat NE-SW-suuntaisia (kuva 4).



Kuva 4. Turun alueen rakennegeologinen kartta (mukailtu Väisänen 1999)

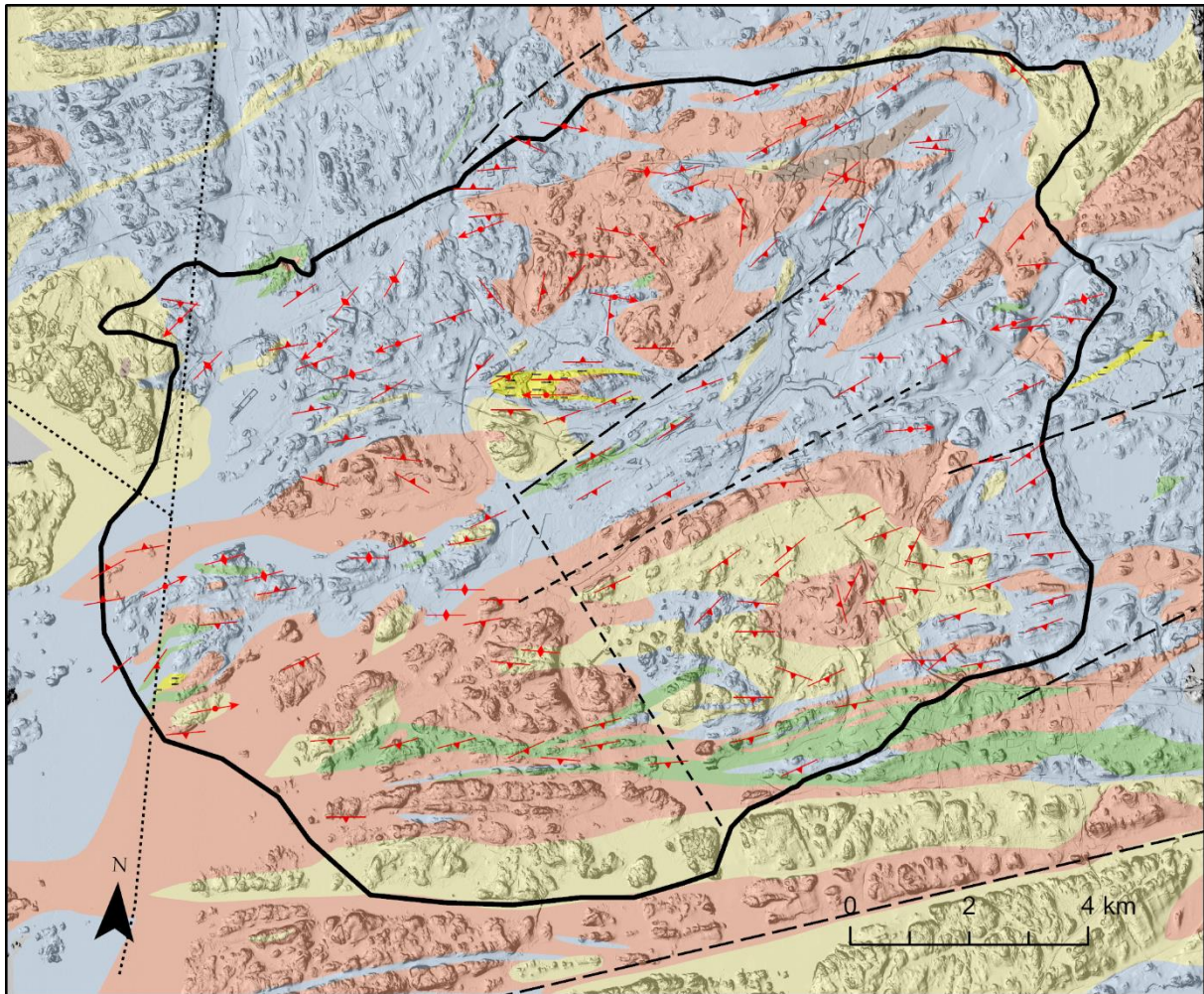
D₄-rakenteet ovat myöhäis-svekofennisiä hiertovyöhykkeitä, jotka leikkaavat ja ovat paikallisesti suunnanneet uudestaan vanhoja rakenteita ja myöhäisorogeenisiä graniitteja, ja sisältävät duktiileja ja hauraita piirteitä (Väisänen & Hölttä 1999, Väisänen & Skyttä 2007). Lounais-Suomen kallioperää luonnehtiikin siirrostien verkosto, joilla on kaksi pääsuuntaa: ~E–W ja ~N–S (Väisänen & Skyttä 2007). Iältään vanhimmat hiertovyöhykkeet ovat 1,85 Ga

(Torvela *et al.* 2007). ~E–W-suuntaiset ovat oikeakätisiä kulkusirroksia, ja ~N–S-suuntaiset ovat kaadesirroksia (Väisänen & Skyttä 2007). 1,83–1,79 Ga ekstensio on aiheuttanut kätisyyden muutoksen (Väisänen & Skyttä 2007). Vyöhykkeet ovat leveydeltään muutamasta metristä kymmeneen metriin, mutta paikoin ne esiintyvät lähekkäin ja muodostavat leveämpiä vyöhykkeitä (Väisänen & Hölttä 1999). Näitä vyöhykkeitä ovat Mynälahden ja Paimion siirrosvyöhykkeet, joissa molemmissa liikesuunta on ollut itäisellä puolella alaspäin (Väisänen & Hölttä 1999). Myös Turun alueelta länteen päin esiintyy pohjois-eteläsuuntaisia siirrosvyöhykkeitä Ahvenanmaan saaristossa (Väisänen & Hölttä 1999). Väisänen & Skyttä (2007) ovat tulkinneet nämä ~N-S-suuntaiset vyöhykkeet kahta ~E-W-suuntaista siirrosvyöhykettä, Etelä-Suomen hiertovyöhykettä (SFSZ) ja Someron hiertovyöhykettä (SSZ), yhdistäviksi siirrosvyöhykkeiksi.

2.1.2 Tutkimusalueen kallioperä

Turun alueella kallioperässä on nähtävissä D₃-deformaation aiheuttama ~E–W- ja ~NE–SW-suuntautuneisuus (kuva 5). Alueen eteläosassa amfiboliittia on ~E–W-suuntaisina kerroksina sekä graniitissa että kiillegneississä. Graniitit esiintyvät laajoina yhtenäisinä massiiveina ja juonina, ja Turun keskustan alueella ja eteläpuolella niitä esiintyy laajana vyöhykkeenä itä-länsisuuntaisesti (kuva 5). Myös granodioriitti muodostaa alueella itä-länsisuuntaisia vyöhykkeitä (Karhunen 2004).

Alueella on voimakasta D₃ -vaiheen poimutusta (Väisänen & Hölttä 1999). Poimuakselit ovat ~W-SW- ja ~N-NE- suuntaisia, ja niiden kaateet vaihtelevat jyrkistä (80°) loiviin (20°) (kuva 5). Poimuakselit kaartuvat, ja alueen keskiosassa onkin nähtävissä yksi selkeä doimirakenne kvartsi-maasälpagneissin esiintymisalueella. Poimujen kyljet ovat hyvin jyrkät ja monissa paikoin pystyt, mutta loiviakin rakenteita esiintyy. Alueella on useita ~NE–SW-suuntaisia D₃-vaiheen hiertovyöhykkeitä ja yksi samansuuntainen iältään määrittämätön vyöhyke. ~N-S-suuntaisia vyöhykkeitä on kaksi, joista idempi haarautuu kahteen osaan ja on D₄-vaiheen vyöhyke. Keskiosan samansuuntaisesta vyöhykkeestä ei ole ikäarviota.

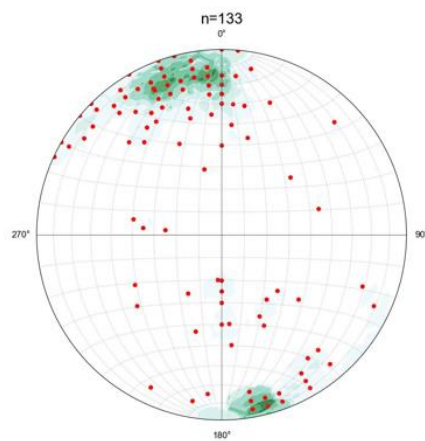


Hiertovyöhykkeet

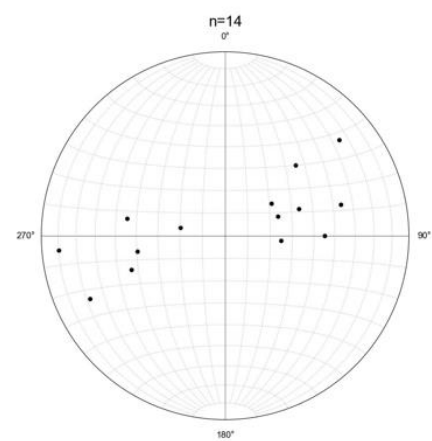
- D4
- Myöhäinen D3
- - - Määrittelemätön vyöhyke

Kivilajit

- Emäksinen vulkaniitti, amfiboliitti
- Gabro
- Dioriitti
- Graniitti
- Porfyryrinen graniitti
- Granodioriitti
- Tonaliitti, trondhjemitti
- Kalkkikivi, karsi
- Kiillegneissi
- Kvartsimaasälpagneissi, -liuske



Liuskeisuudet



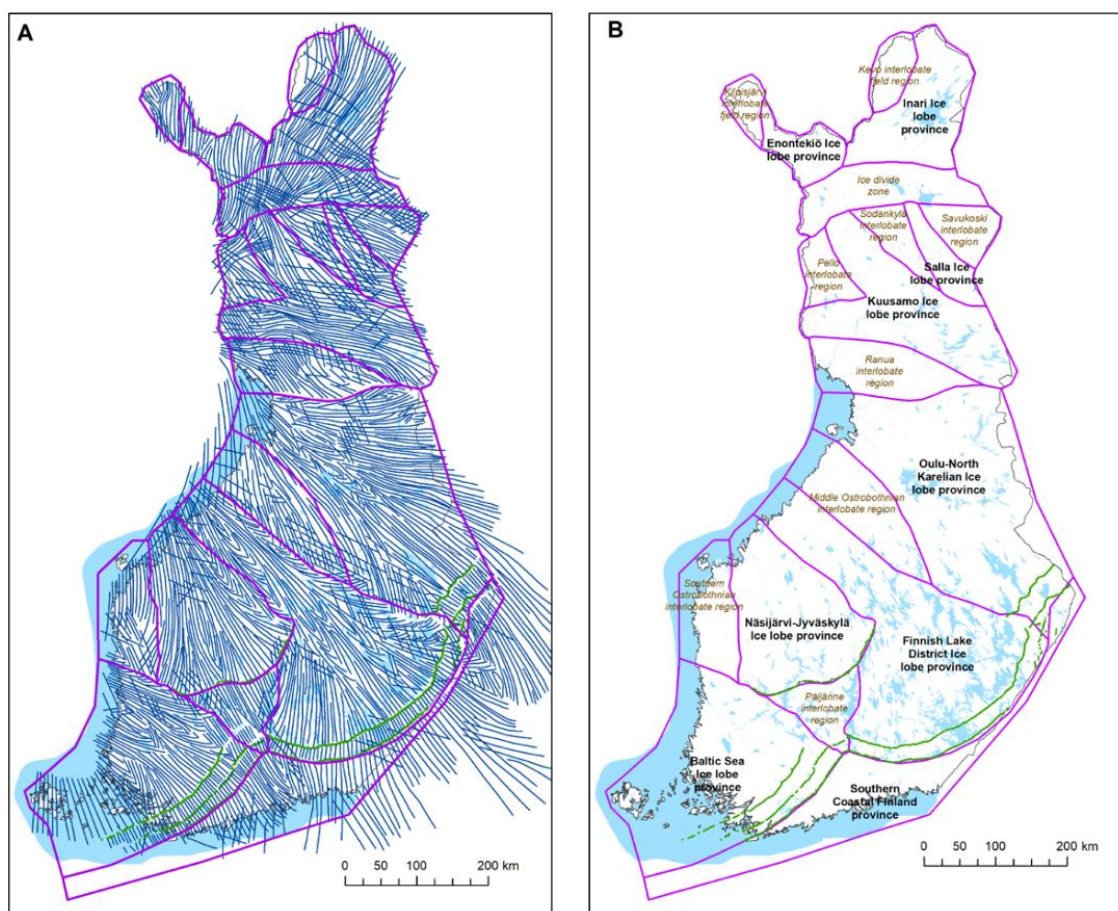
Poimuakselit

Kuva 5. Turun alueen kallioperä ja rakennegeologiset piirteet. Hiertovyöhykkeistä D3- ja D4-vaiheet Väisänen & Höltän (1999) mukaan ja määrittelemätön vyöhyke Lindberg *et al.* (1994) mukaan (mukailtu Lindberg *et al.* 1994, Maanmittauslaitos 2022a, Väisänen & Hölttä 1999, Väisänen 2007)

2.2 Maaperä

2.2.1 Etelä-Suomen maaperä

Etelä-Suomen maaperäkerrostumat ovat pääosin muodostuneet viimeisen Veiksel-jäätiköitymisen loppuvaiheessa ja Holoseenin aikana (Palmu *et al.* 2021). Jäätikön virtauskielekkeet olivat merkittävin maaperäkerrostumia muokkaava tekijä, ja ne olivat olemassa Myöhäis-Veikselistä varhaiseen Holoseeniaikaan (noin 13 000–10 000 vuotta sitten) (kuva 6, Palmu *et al.* 2021).



Kuva 6. A) Veiksel-jäätiköitymisen jään virtaussuunnat. Merkittävimmät jään vetäytymisen pysähtymisen sijainnit on merkitty vihreällä. B) Suomen glasiaalidynaamiset alueet (Palmu *et al.* 2021)

Veiksel-jääkauden aikana muodostuneet glasiaalikerrostumat ovat moreeneja, lohkareita, soraa, hiekkaa ja silttiä, ja ne ovat kerrostuneet kallioperän päälle (Palmu *et al.* 2021).

Moreenikerrostumien paksuuteen, ominaispiirteisiin ja alueelliseen esiintymiseen vaikuttavat kallioperän topografia, moreenien syntyyn ja kerrostumiseen liittyvät prosessit, kallioperän litologia ja Myöhäis-Veikselin jäätikkökielekkeiden sijainti (Palmu *et al.* 2021).

Pohjamoreenien päälle ovat kerrostuneet erilaiset glasiifluvialiset kerrostumat ja pinta- ja päätemoreenit (Palmu *et al.* 2021). Glasiaalikerrostumien päälle, väliin tai suoraan kallioperän päälle on kerrostunut Itämeren faasien aikaisia pohjasedimenttejä eli silttejä ja savia (Palmu *et al.* 2021). Postglasiaalikerrostumat ovat kerrostuneet näiden maaperäkerrostumien päälle ja ovat koostumukseltaan orgaanisia sedimenttejä, kuten turvetta, tai rantavaiheiden uudelleenkerrostumia, kuten soraa, hiekkaa, silttiä ja savea (Palmu *et al.* 2021).

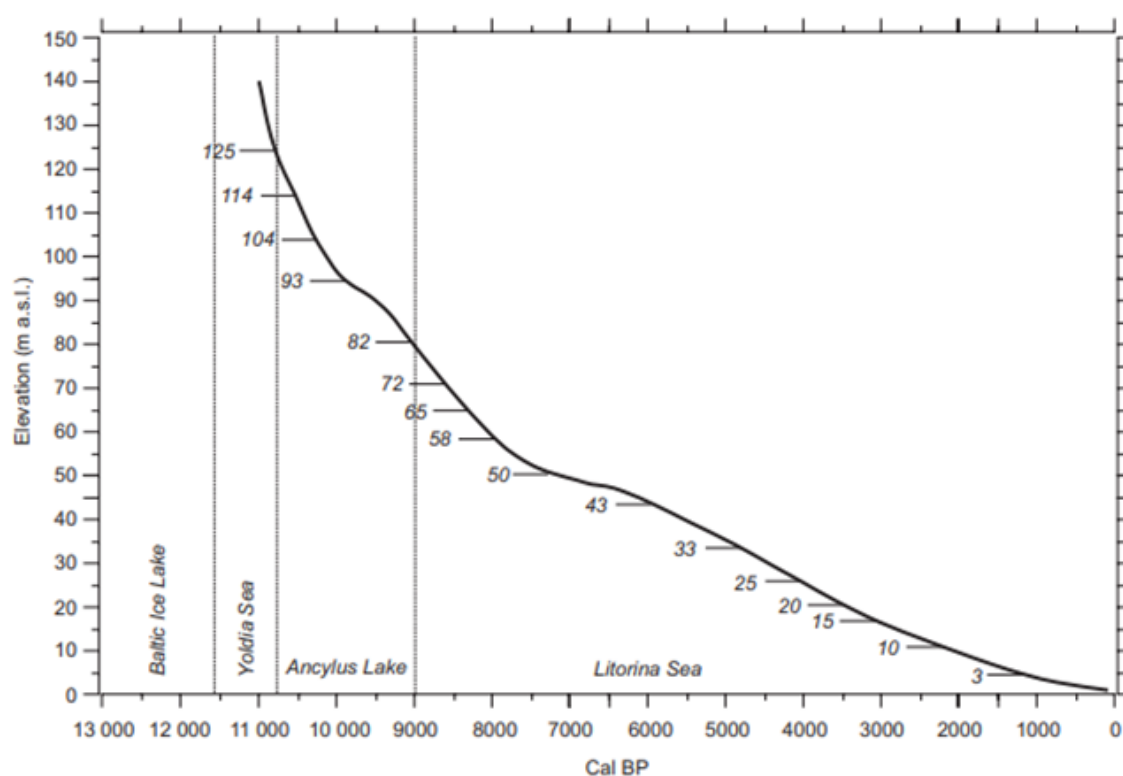
Etelä- ja Lounais-Suomen erityispiirteinä ovat paksut ja laaja-alaiset postglasiaaliset hienorakeiset sedimentit, siltit ja savet (Palmu *et al.* 2021). Savikoiden synty alkoi jäätiköitymisvaiheen aikana, kun sulavesivirtojen mukana kulkeutui jäätikön ulkopuolelle hienorakeista ainesta, josta kerrostui vähintään 10–20 metrin syvyyteen savea, hiesua ja silttiä (Haavisto-Hyvärinen & Kutvonen 2007). Hienorakeiset ainekset muodostivat jäätikön reunan edustalle paksuja kerrostumia kerrallisia glasiaalisavia (Haavisto-Hyvärinen & Kutvonen 2007). Jäätikön reunan peräännyttyä sulavesien vaikutus Etelä-Suomessa väheni, jolloin kerrallisten savien päälle alkoi kerrostua homogeenista postglasiaalisavea, joka on suurimmaksi osaksi peräisin glasiaalisavista (Haavisto-Hyvärinen & Kutvonen 2007). Glasiaalisavet joutuivat maankohoamisen vuoksi rantavyöhykkeeseen ja aallokon kuluttamiksi sekä uudelleenkerrostuivat meren pohjaan (Haavisto-Hyvärinen & Kutvonen 2007). Rannikkovesien mataloitua maankohoamisen vaikutuksesta saviin sekoittui orgaanista ainesta, ja tämän prosessin seurauksena syntyi liejusavia, joista osa on mustiksi värjäytyneitä sulfidisavia (Haavisto-Hyvärinen & Kutvonen 2007).

2.2.2 Turun seudun maaperä

Turun alue sijaitsee Itämeren virtauskielekkeen (engl. Baltic Sea Ice Lobe, BSIL) alueella, jossa vallitseva jään virtaussuunta on ollut NW–SE (kuva 6). Turun alueen deglasiatio tapahtui noin 10 700 vuotta sitten Itämeren Yoldia-faasin aikana, jolloin ylin ranta sijaitsi 130 m a. s. l. (Ojala *et al.* 2013, Stroeven *et al.* 2016, kuva 7). Tämän jälkeen rannan siirtyminen alemmas on ollut jatkuvaa, eikä alueella ole tapahtunut rantaviivan nousua. Ancylus-järven ja Litorinameren alkuvaiheessa muutos vedenpinnan suhteellisessa tasossa on ollut nopeampaa, mutta se on hidastunut noin 7000 vuotta sitten. Nykyisin maankohoaminen alueella on noin 4–5 mm vuodessa (mm. Eronen *et al.* 2001, Vuorela *et al.* 2009)

Aiempien tutkimusten mukaan Turun seudulla pohjamoreenin paksuus vaihtelee laaksomuodostumissa 0,5–2 m välillä, mutta paikoitellen moreeni puuttuu kokonaan ja savi

on suoraan kallion päällä (Niemelä *et al.* 1987). Joissakin paikoissa esiintyy kuitenkin hyvinkin paksuja moreenikerrostumia: esimerkiksi Naantalın edustalta on löytynyt 41 m paksu moreenikerrostuma ja Raisionlahdelta yli 20 m paksuja kerrostumia (Niemelä *et al.* 1987). Nämä paksut moreenikerrostumat todennäköisesti liittyvät alueellisesti kallioperän deformaatiovyöhykkeisiin. Alueen kalliopaljastumien yhteydessä esiintyy myös jäätikön vastasivun moreenikerrostumia ja suojasivun moreenihäntiä, jotka saattavat olla 5–10 m paksuja (Niemelä *et al.* 1987).

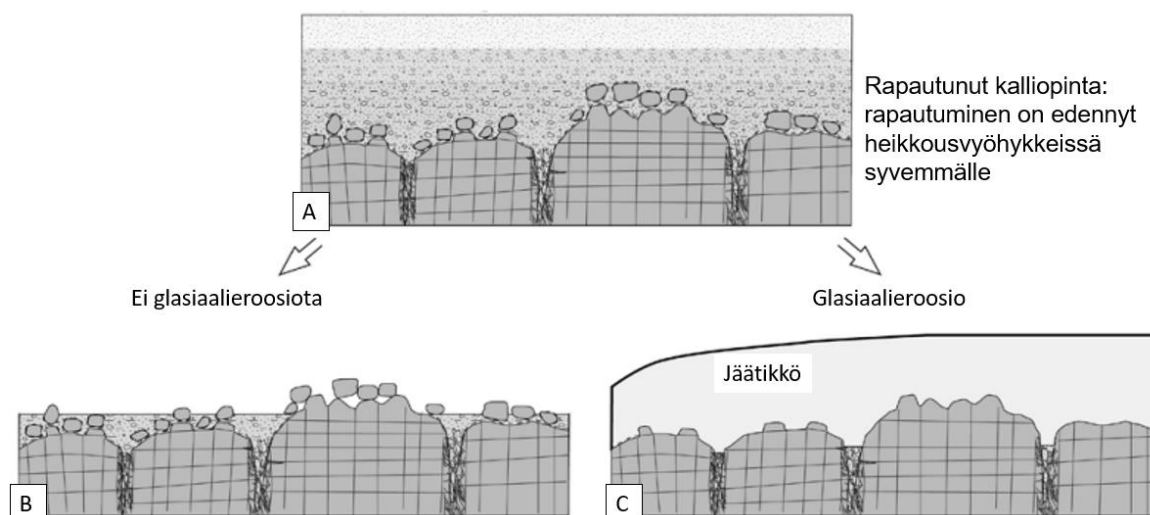


Kuva 7. Ylimmän rannan sijainti Turussa Itämeren eri vaiheissa (Glückert 1967, muokattu Eronen *et al.* 2001 ja Ojala *et al.* 2013 mukaan)

Turun maaperässä esiintyy runsaasti savea. Niemelä *et al.* (1987) mukaan kallioperän heikkousvyöhykkeissä savien paksuus on suurimmillaan, yleensä 20–40 m, mutta paksuimmat savikerrostumat ovat lähes 50 m Aurajoen kohdalla olevassa vyöhykkeessä. Maan pinnan korkeusasema ei vaikuta savikerroksen paksuuteen, vaan maan pinnan noustessa tasaisesti sisämaahan mentäessä savien paksuuksissa on suuria vaihteluja lyhyelläkin matkalla (Pirilä 2016). Tämä pienipiirteinen vaihtelu savien paksuudessa viittaa Pirilän (2016) mukaan kallioperän topografian vaihtelevuuteen, ja paksut savikerrostumat tasoittavat kalliopinnan jyrkkäpiirteistä topografiaa.

2.3 Glasiaalieroosio

Kallioperän rapautuminen on pitkälti kemiallinen prosessi, joka on riippuvainen fluidien määrästä, jota taas kontrolloi kallion rakoverkosto (mm. Nesbitt & Markovics 1997, Shaw 1997). Rapautuminen etenee pinnalta käsin katsottuna epäsäännöllisenä ”rapautumisrintamana”, joka on rakoverkoston kontrolloima (Kroonenberg & Melitz 1983, kohta ”A” kuvassa 8). Heikkousvyöhykkeissä esiintyvän, ympäristöään tiheimmän rakoilun vuoksi rapautuminen voi niissä edetä huomattavasti syvemmälle kuin ehjimmässä kalliassa (Shaw 1997). Monia kalliopinnan lineaarisia painanteita kontrolloivatkin kallioperässä esiintyvät hauraan deformaation vyöhykkeet (siirrokset ja rakovyöhykkeet), joista jäätikköeroosio on poistanut rakoillutta ja muuttanutta kiveä ympäristöään tehokkaammin (Krabbendam & Bradwell 2014). Deformaatiovyöhykkeiden sijainnin lisäksi niihin liittyvien rakojen luonteen ja geometrian on havaittu vaikuttavan painanteiden kokoon ja morfologiaan (Skyttä *et al.* 2023).



Kuva 8. Pitkäaikaisen rapautumisen, glasiaalieroosion ja rakoverkoston vaikutus kalliopintaan (mukailtu Krabbendam & Bradwell 2014).

3 Pohjatutkimusmenetelmät

Rakennushankkeiden suunnitteluvaiheessa tehdään aina pohjatutkimuksia, joiden tavoitteena on tuottaa pohjarakennesuunnittelijalle geotekninen maaperämalli, jossa on rakentamisen kannalta olennaiset maaperän ominaisuudet, tieto kantavan pohjan tai kallion sijainnista ja tietoa kallion geologisista ominaisuuksista (Jääskeläinen 2011). Kairauksia käytetään myös kalliopinnan topografian määrittämiseen ja kallion geologisten ominaisuuksien tutkimiseen (Mäkinen 2017).

Geologisista ominaisuuksista tärkeimpiä on kallion rakoilu. Rakoilun osatekijöitä ovat rakoilutyyppi, rakotiheys ja rakojen laatu (Jääskeläinen 2011). Rakoilutyyppejä ovat kuutiorakoilu, laattarakoilu, kiilarakoilu ja sekarakoilu (Jääskeläinen 2011). Kuutiorakoilu on tyypillinen syväkiville ja laattarakoilu taas metamorfisille kiville (Jääskeläinen 2011). Rakojen laatuun vaikuttavat rakojen avoimuus ja rakopintojen sileys tai karkeus, mahdolliset rakotäytteet sekä isäntäkiven mahdollinen muuttuminen (Palmström & Stille 2010). Myös rakojen jatkuvuus ja pituus vaikuttavat kiven mekaanisiin ominaisuuksiin (Palmström & Stille 2010). Kivien laadun ja rakoilun perusteella kallio voidaan luokitella sen mekaanisten ominaisuuksien perusteella (Jääskeläinen 2011). Kallioluokitusmenetelmiä on useita, ja niistä parhaiten Suomen olosuhteisiin soveltuvat numeeriset Q- ja GSI-luokitukset (Barton *et al.* 1974, Grimstad & Barton 1993, Hoek *et al.* 1995) sekä kuvaileva RG-luokitus (Gardemeister *et al.* 1976).

Tiheään rakennetuilla alueilla geoteknistä kairaustietoa on kertynyt vuosikymmenten ajalta, ja sitä on kerätty eri rekistereihin. Turun alueelta sitä on Turun kaupungin maaperärekisterissä ja Geologian tutkimuskeskuksen pohjatutkimusrekisterissä (GTK 2021). Geotekninen kairaustieto tarjoaakin suuren määrän tietoa kallioperästä ja maaperästä, jota hyödyntämällä voidaan laatia 3D-malleja kustannustehokkaasti ilman erillisiä uusia kairaustutkimuksia.

3.1 Ohjeistus ja standardit

Pohjatutkimusmenetelmät ja niiden dokumentointikäytännöt ovat pääsääntöisesti kansallisia tai pohjoismaisia, ja ohjeistuksen niihin on laatinut ensimmäisenä Suomen Geoteknillinen Yhdistys SGY (Mäkinen 2017). Myöhemmin ohjeistuksia on antanut Suomen standardisoimisliitto SFS ja Liikennevirasto (Mäkinen 2017). Myös kaupungeilla, kunnilla ja ELY-keskuksilla on pohjatutkimuksiin liittyviä ohjeistuksia (Mäkinen 2017).

Pohjatutkimusmenetelmien tallennusformaatti on Infra, joka pohjautuu vanhempaan TEKLA-

formaattiin (SGY 2018). Uusin versio formaatista on Infra 2.5 (SGY 2018).

Maalajiluokituksena käytetään yleensä kansallista geoteknistä GEO-maalajiluokitusta (SGY 2018). Kansainväliseen standardiin SFS-EN ISO 14688-2 perustuvan maalajiluokituksen käyttö on kuitenkin yleistymässä (Mäkinen 2017).

3.2 Kairausmenetelmät

Kairausmenetelmistä kalliopinnan määrittämiseen käytetään painokairausta, heijarikairausta, tärykairausta ja porakonekairausta, joista tähän tarkoitukseen käytetään pääasiassa porakonekairausta (taulukko 1). Paino-, heijari- ja tärykairauksilla kalliopinnan sijaintia voidaan arvioida, mutta tarkkuus on heikko. Ainoa tutkimusmenetelmä, jolla kalliopinnan sijainti voidaan tarkasti määrittellä, on porakonekairaus. Muita pohjatutkimuksissa yleisesti käytettyjä kairausmenetelmiä ovat puristinkairaus sekä hienorakeisissa maalajeissa käytetty siipikairaus (SGY 2022).

Taulukko 1. Kairausmenetelmät ja niiden suositeltava käyttökohde (Jääskeläinen 2011).

Kairausmenetelmän pääasiallinen käyttötarkoitus Kairausmenetelmän toissijainen käyttötarkoitus tai selvitettävän seikan selvitystarkkuus heikko	Selvitettävä seikka	Kallionpinnan sijainti	Tiiviin pohjakerroksen sijainti	Tiiviydeltään erilaisten maakerrosten rajat	Maakerrosten lujuus likimäärin	Maakerrosten lujuus tarkasti	Maakerrosten tiiviyys likimäärin	Maalajiryhmä	Lyöntipaaluiputeuden arviointi
Kairausmenetelmät									
Painokairaus	●	○	●	●	○		●	●	○
Heijarikairaus	○	○	●	○	○		●	○	●
Puristinkairaus			○	●	●		●	●	○
Siipikairaus						●			
Tärykairaus		○	●					○	○
Porakonekairaus		●	○						○

3.2.1 Porakonekairaus

Porakonekairauksella saadaan kairan kärki tunkeutumaan sekä maaperän että kallion läpi (SGY 1986). Porakonekairauksia käytetään usein myös lohkareisessa maassa: esimerkiksi rakennetuilla alueilla alavia kohtia on voitu jo aiemmin täyttää kivillä ja lohkareilla, ja muilla menetelmillä kalliopinnan määrittäminen on mahdotonta (Jääskeläinen 2011).

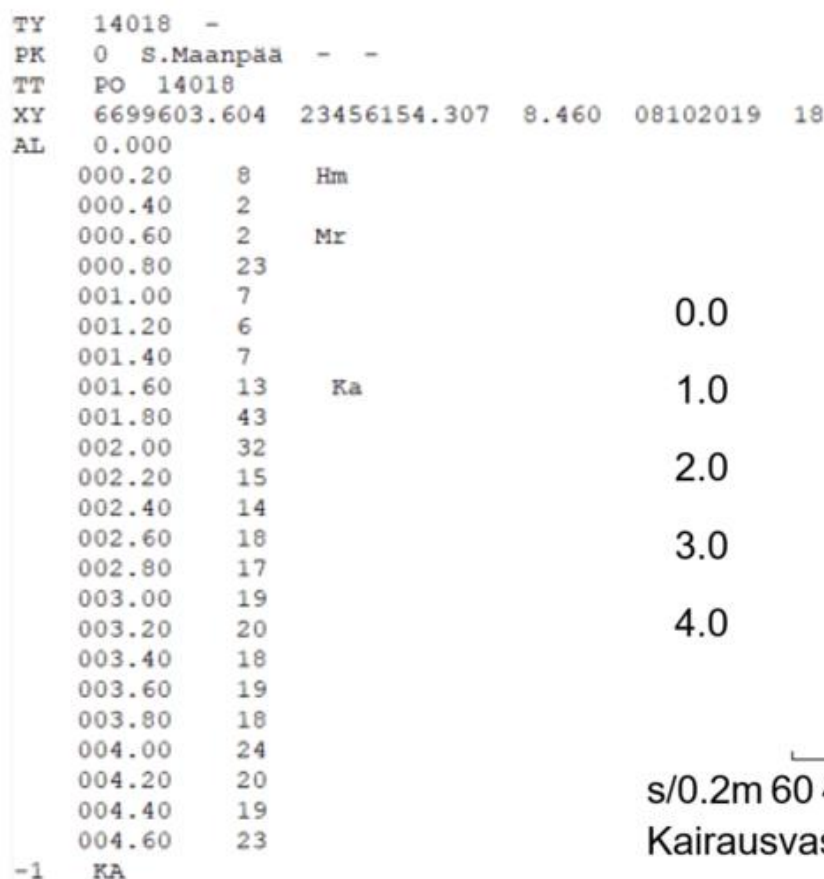
Porakonekairaus on myös ainoa menetelmä, jolla voidaan saada tietoa kallioperän laadusta (Jääskeläinen 2011).

Porakonekairaus perustuu staattiseen poraukseen, jossa kairaustankoja pyöritetään ja isketään maahan (Mäkinen 2017). Porakonekairauksessa kairaustangon päässä oleva porakruunu pyritään pitämään kairauksen aikana auki joko vesihuuhtelulla tai paineilmalla (Mäkinen 2017). Kalliopinnan erottaminen perustuu kairauksen suhteellisiin tunkeutumisenopeuden muutoksiin, ja kallion pinnan tulkitaan olevan siinä kohdassa, missä poran tunkeutumisenopeus pienenee äkillisesti ja pysyy pienenä jatkettaessa porausta vielä kolme metriä (SGY 1986). Tällöin kairauksen katsotaan olevan kalliovarmennettu. Kalliota porattaessa kirjataan poraukseen kulunut aika jokaista 20 cm:ä kohti, ja tämän tiedon avulla voidaan arvioida kallion laatua (SGY 1986) (kuva 9). Myös paljastuneet raot kirjataan ylös (Jääskeläinen 2011).

Kalliopinnan määrittämisessä voidaan käyttää apuna myös porauksessa syntyvän irtomateriaalin, ns. ”soijan” laadun muutosten havainnointia (SGY 1986). Myös huuhtelu- ja pyörityspaineita voidaan hyödyntää. Esimerkiksi moreenin läpi poratessa huuhtelu usein vaikeutuu hienoaineksen takia, sillä huuhtelupaine kasvaa, poraus hidastuu ja myös pyörityspaineet kasvavat (Tanttu 2015). Kalliota poratessa sekä huuhtelu- että pyörityspaineet taas ovat yleensä alhaiset (Tanttu 2015).

3.2.2 Painokairaus

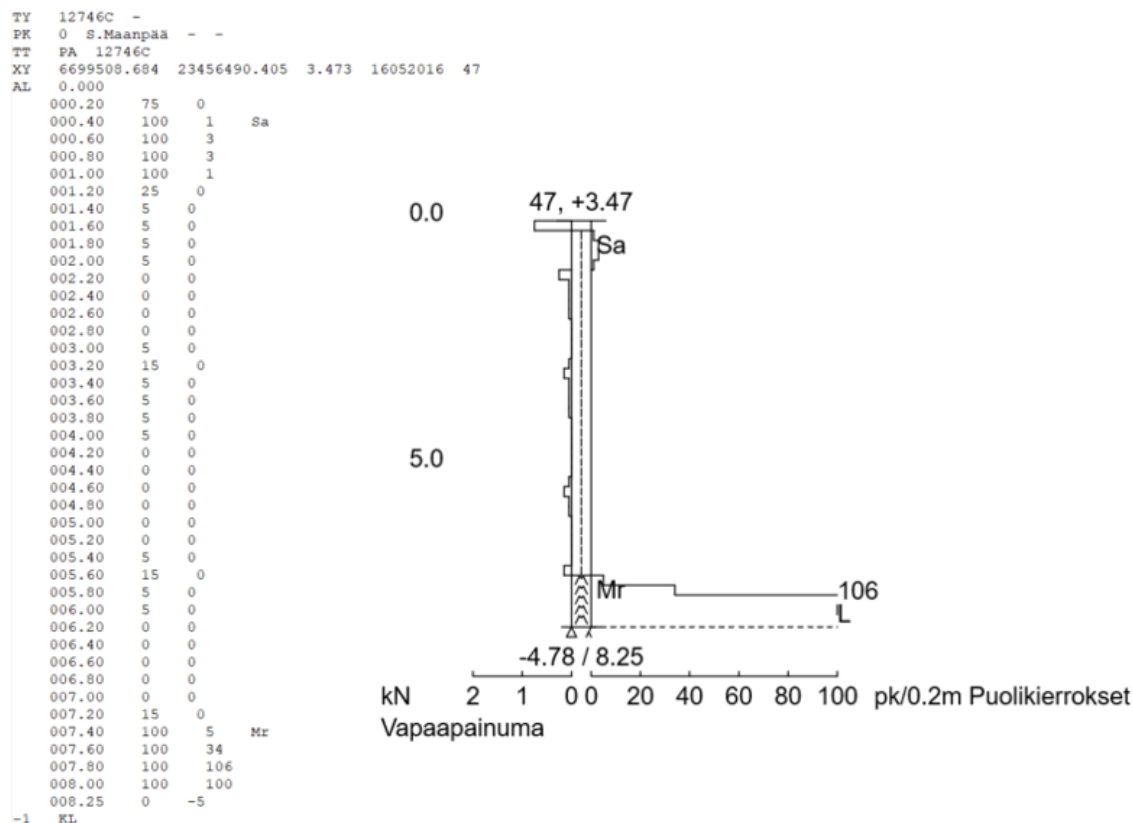
Painokairaus on staattinen kairausmenetelmä, jossa kaira upotetaan maahan painojen ja kiertämisen avulla (SGY 1981). Sen avulla voidaan arvioida tiiviin pohjan sijainti ja erilaisten maakerrosten rajapintoja (kuva 10, Jääskeläinen 2011). Menetelmänä se on käytössä lähinnä Pohjoismaissa maaperän heterogeenisuuden vuoksi (Jääskeläinen 2011).



Kuva 9. Esimerkki porakonekairauspöytäkirjasta ja siitä 3D-Win-ohjelmalla tuotetusta diagrammista. Pöytäkirjan otsikkoteksteissä: TY = työnnumero, PK = pöytäkirjan numero ja kairaajan nimi, TT = tutkimustapa ja tutkimuskohtainen tunnus, XY = koordinaatit, kairauksen aloitustaso, päivämäärä ja pistetunnus, AL = alkukairaustiedot. Kairauksen etenemisnopeus on merkitty sekunteina per 20 cm. Maalajitulkinnat on merkitty pöytäkirjaan. Kallion pinta on saavutettu 1.6 metrin syvyydessä. -1 = päättymistapa, KA = kalliovarmennettu kairaus.

Painokairauksessa kairausvastus on kairan tunkeutumiseen tarvittava kuorma tai maksimikuormalla 1 kN (100 kg) tunkeutumiseen tarvittavien puolikierrosten määrä (SGY 1981). Käytettävät kuormat ovat 0,25 kN, 0,5 kN, 0,75 kN ja 1 kN (Mäkinen 2017). Kairauksen alussa alkukairauksen jälkeen kuormitusta kasvatetaan, kunnes kaira alkaa tunkeutumaan maahan ja painot asetetaan siten, että kairan tunkeutumisnopeus on 20–50 mm/s (SGY 1981). Kairausta tehdään aina niillä minimipainoilla, joilla kaira vielä tunkeutuu maahan, ja kun kairan tunkeutumisnopeus maksimikuormalla (1 kN) laskee alle 5 mm/s, ryhdytään kairaa kiertämään puolikierrroksin (SGY 1981). Tämän jälkeen mitataan 20 cm:n etenemiseen vaadittujen puolikierrrosten määrä (SGY 1981). Mikäli kaira alkaa taas tunkeutumaan ilman kiertämistä, kaikki painot poistetaan ja kairausta jatketaan lisäämällä painoja, kunnes kaira taas alkaa tunkeutumaan maahan (SGY 1981). Mikäli etenemiseen

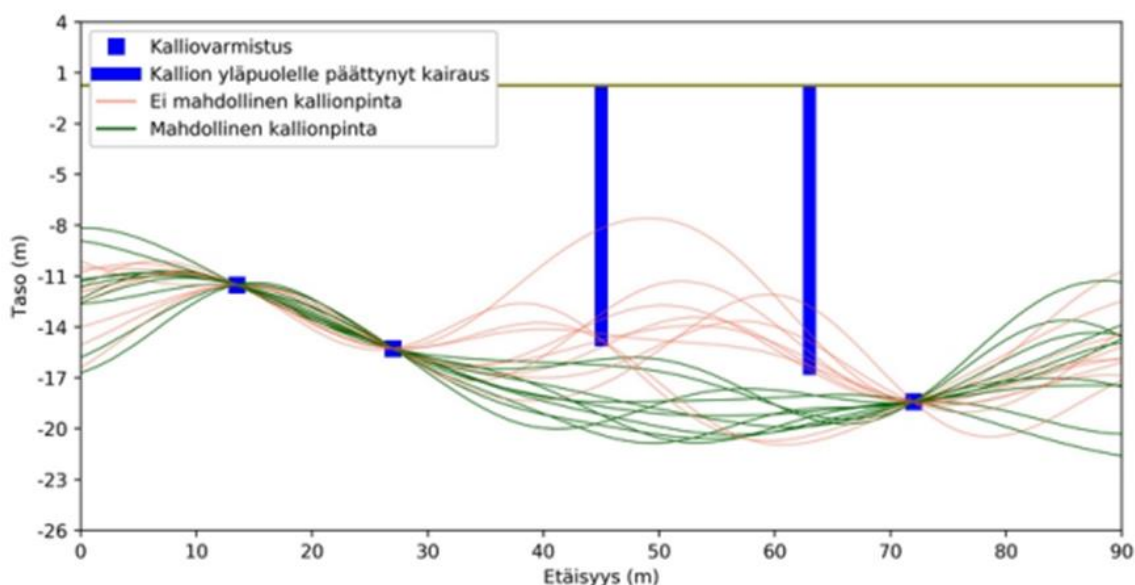
tarvitaan yli 100 puolikierrosta per 20 cm, painot otetaan pois ja kairaa lyödään nuijalla (SGY 1981). Tätä jatketaan, kunnes kaira taas etenee painoilla tai kiertämällä (SGY 1981).



Kuva 10. Esimerkki painokairauspöytäkirjasta ja siitä automaattisesti 3D-Win-ohjelmalla tuotetusta diagrammista. Pöytäkirjan otsikkotekstissä: TY = työnnumero, PK = pöytäkirjan numero ja kairajaan nimi, TT = tutkimustapa ja tutkimuskohtainen tunnus, XY = koordinaatit, kairauksen aloitustaso, päivämäärä ja pistetunnus, AL= aloituskairaus (esim. juurakoiden tai asvaltinn poisto). Pöytäkirjaan on merkitty syvyyden viereen ensimmäiseen sarakkeeseen käytetyt painot ja toiseen sarakkeeseen puolikierrokset. -1 = päättymistapa ja KL = kivi, lohkarie tai kallio. Diagrammissa käytetyt painot on merkitty vasemmalle puolelle ja puolikierrokset oikealle. L = lyönnit.

Painokairaus ei sovellu yhtä hyvin kalliopinnan määrittämiseen kuin porakonekairaus, koska se joudutaan todennäköisesti keskeyttämään tiiviiseen maakerrokseen ennen kalliopinnan saavuttamista, eikä sillä voida tehdä kolmen metrin kalliiovarmistusta. Sitä voidaan kuitenkin käyttää kalliopinnan minimitason eli sellaisen korkeustason määrittämiseen, jonka yläpuolelle kalliopinnan taso ei ainakaan ulotu (kuva 11). Painokairauksella voidaan kuitenkin saada arvio kalliopinnan tasosta suhteellisen tarkastikin alueilla, joilla pehmeä savi ulottuu lähes kalliopintaan asti (Tanttu 2015). Painokairauksen päättymissyy on aina kairajaan tulkinta,

varmempaan lopputulokseen päästään kalliovarmentamalla kairaus porakonekairauksella (Tanttu 2015).



Kuva 11. Ei-kalliovarmennettujen kairausten käyttö kallioinnin minimitason määrittämisessä (Hallipelto 2018).

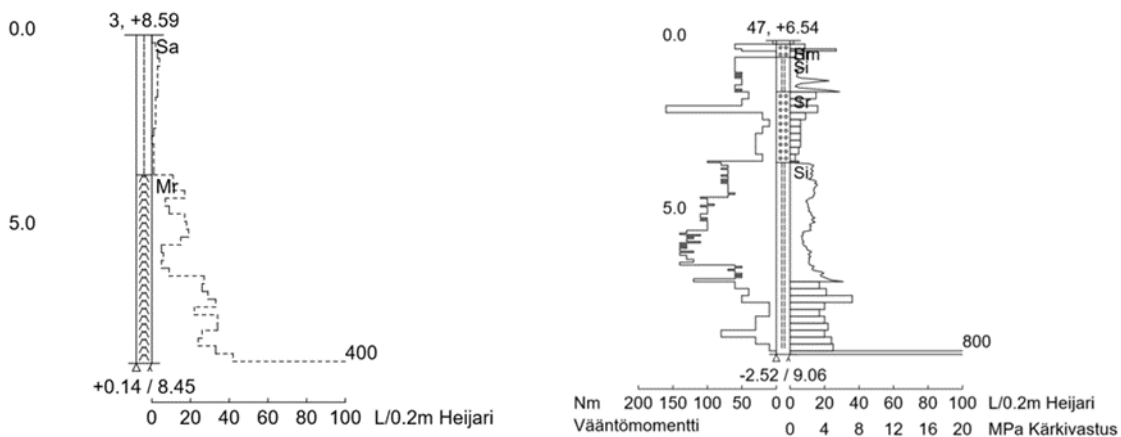
3.2.3 Heijarikairaus ja puristin-heijarikairaus

Heijarikairaus on dynaaminen kairausmenetelmä, jossa kaira tunkeutuu maahan heijarin (63,5 kg) lyönneistä, ja lisäksi tankoja kierretään kairauksen edetessä (Jääskeläinen 2011). Heijari pudotetaan 0,5 m korkeudelta, kärjen tunkeutuma maahan mitataan 20 cm välein, ja vakiolyöntimäärä on 30 lyöntiä minuutissa (Jääskeläinen 2011). Kairausvastus saadaan tarvittavien lyöntien määrästä syvyysyksikköä kohden (SGY 1981). Kairaus lopetetaan, kun lyöntien määrä 20 cm tunkeumaa kohden on joko 200 tai 400 lyöntiä kairauskohteesta riippuen (Mäkinen 2017). Heijarikairaus on painokairausta objektiivisempi menetelmä suoritustapansa takia, ja sillä on myös parempi läpäisevyys tiiviissä maakerroksessa (Tanttu 2015). Sillä saadaan myös tietoa kallioinnin minimisyvyydestä painokairauksen tavoin (kuva 12), ja paremman läpäisevyyden takia se on luotettavampi menetelmä kuin painokairaus (Tanttu 2015).

Heijarikairaus voidaan yhdistää myös puristinkairaukseen, jolloin käytetään nimitystä puristin-heijarikairaus (SGY 2001). Tämän menetelmän hyöty on se, että puristinkairauksella saadaan hyvin tietoa pehmeistä maalajeista, mutta koska laitteisto vaurioituu helposti tiiviissä maakerroksissa, nämä kerrokset voidaan kairata heijarikairauksella (SGY 2001). Kairaus

aloitetaan puristinkairauksella, jossa kairaa puristetaan maahan nopeudella 20 mm/s, ja samalla kairaustankoja pyöritetään 12 kierrosta minuutissa (SGY 2001). Pyörittämisellä pidetään tangot suorina ja pienennetään kitkaa (Jääskeläinen 2011). Mitatuista puristusvoimista voidaan päätellä maaperän ominaisuuksia (Jääskeläinen 2011).

Kun maksimipuristusvoima (yleensä n. 30 kN) on saavutettu, vaihdetaan menetelmä heijarikairaukseen (SGY 2001). Tankojen pyörittämistä jatketaan samalla tavalla kuin puristuskairauksessa (Jääskeläinen 2011). Heijaria pudotetaan vakiotaaajuudella, ja mikäli 40 cm:n matkalla lyöntiluku on viisi tai vähemmän, vaihdetaan taas puristinkairaukseen (SGY 2001). Puristin-heijarikairaus päätetään aina heijarikairaukseen (SGY 2001). Puristin-heijarikairaus on läpäisevyydeltään hieman parempi kuin pelkkä heijarikairaus, joten se on hieman luotettavampi menetelmä kalliopinnan määrittämisessä (Tanttu 2015).



Kuva 12. Esimerkit 3D-Win-ohjelmalla tuotetuista heijarikairausdiagrammista (vasen) ja puristin-heijarikairauksesta (oikea). Heijarikairausdiagrammissa on oikealla puolella esitetty heijarilyöntien lukumäärä. Puristin-heijarikairauksessa on oikealla puolella heijarivaiheiden kohdalla pylväinä lyöntien lukumäärä ja puristinvaiheessa kärkivastus, joka saadaan jakamalla kärkeen kohdistunut voima kärkikappaleen poikkipinta-alalla. Vasemmalla puolella on kuvattu tankojen pyörittämisen väjäntömomentti.

3.3 Porakonekairausten luotettavuus kalliopinnan määrittelyssä

Kalliopinnan havainnoinnin luotettavuuteen vaikuttavat kallioperän lujuusominaisuudet, pohjamaalaji, kalusto, kairaajan kokemus ja kairaussyvyys. Kallioperän rikkonaiset pintaosat ja runsas rakoilu voivat aiheuttaa sen, että kallion lujuusominaisuudet ovat lähellä tiiviin moreenimaan lujuusominaisuuksia, jolloin kairauksessa on vaikea erottaa tiivistä moreenimaata rikkonaisesta kalliosta (SGY 1986). Erityisesti kevyemmällä laitteistoilla tiiviin moreenimaan erottaminen kalliosta on vaikeaa (Tanttu 2015).

Porakonekairaustulosten tulkinta vaatii kokemusta, ja mitä syvemmälle poraus etenee, sitä vaikeammaksi tulee nopeusvaihteluiden tulkinta maan pinnalla (SGY 1986). Tämä johtuu tehohäviöstä kairaustankojen liitoksissa, tankojen lisääntyvästä painosta, porakruunujen kulumisesta, vaippakitkan lisääntymisestä ja huuhtelupaineen kasvusta (SGY 1986).

Tantun (2015) tutkimuksen perusteella porakonekairausten luotettavuus kalliopinnan määrittelyssä vaihtelee huomattavasti riippuen kohteesta ja kairausten syvyydestä.

Tutkimuksessa verrattiin kolmessa eri infrahankkeessa porakonekairauksella määritettyä kalliopinnan sijaintia todelliseen kalliopinnan sijaintiin niiden kairausten perusteella, joissa kalliopinnan vaaitseminen oli mahdollista. Kalliopinnan topografian vaihtelevuus, rikkonainen kalliopinta ja kivinen maaperä heikensivät tutkimuksessa kalliopintatulkinnan luotettavuutta (Tanttu 2015). Lyhyemmillä kairaussyvyyksillä kalliopinnan määrittely oli luotettavampaa, ja alle kahden metrin syvyydellä kalliopinnan tulkinta oli tutkimuksessa sama kuin todellinen kalliopinta (Tanttu 2015). Syvyyden kasvaessa luotettavuus heikkeni, ja yli kuuden metrin pituisissa kairauksissa kalliopinta tulkittiin 1,4 metriä syvemmälle kuin se todellisuudessa oli (taulukko 2). Tutkimuksen poikkeamatarkastelun perusteella arvioitiin, että mikäli kalliopintamallissa ei haluta olevan yli 0,5 m virheitä, kairauspisteiden etäisyys tulisi olla 5 m tai alle (Tanttu 2015).

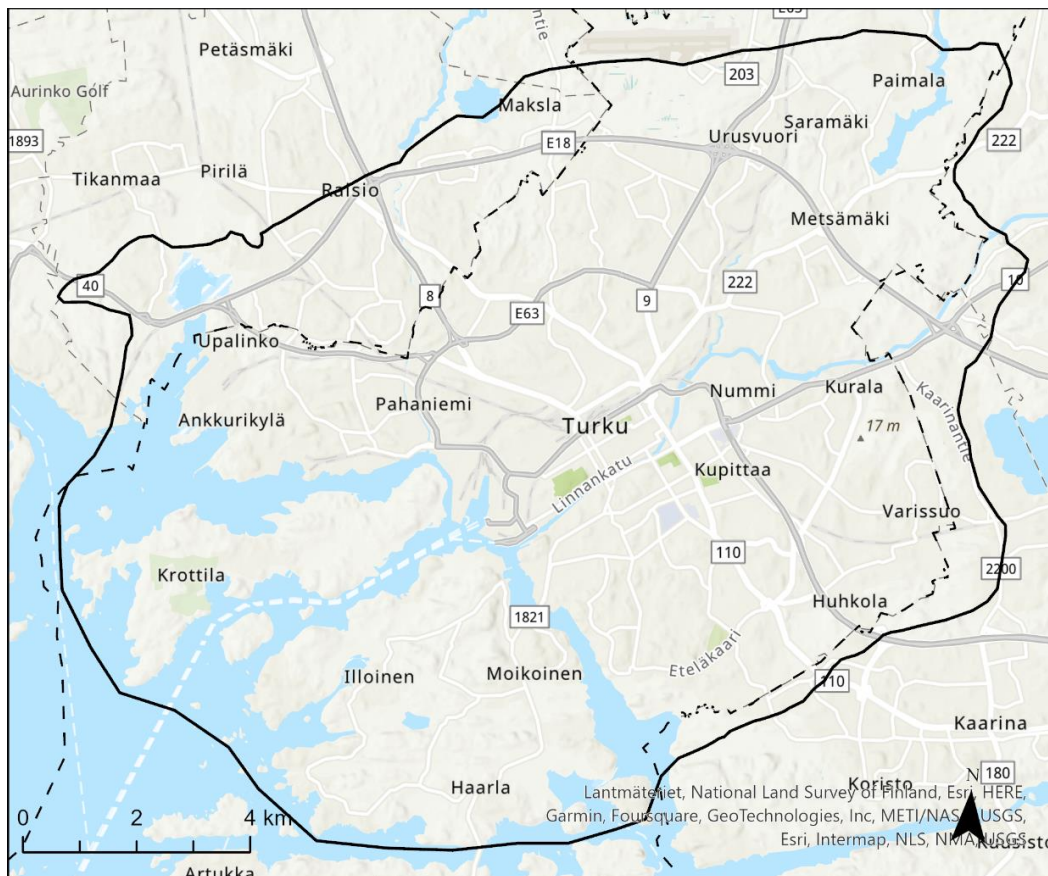
Taulukko 2. Porakonekairausten virheet jaoteltuna kairaussyvyyden mukaan kohteessa Valtatien 7 kehittäminen moottoritieksi välillä Koskenkylä-Loviisa-Kotka (Tanttu, 2015).

Syvyys [m]	Aineiston koko	Keskiarvo [m]	Keskihajonta [m]
0 – 1,99	564	-0,001	0,643
2 – 3,99	346	-0,337	0,826
4 – 5,99	124	-0,943	1,324
≥ 6	45	-1,407	1,663

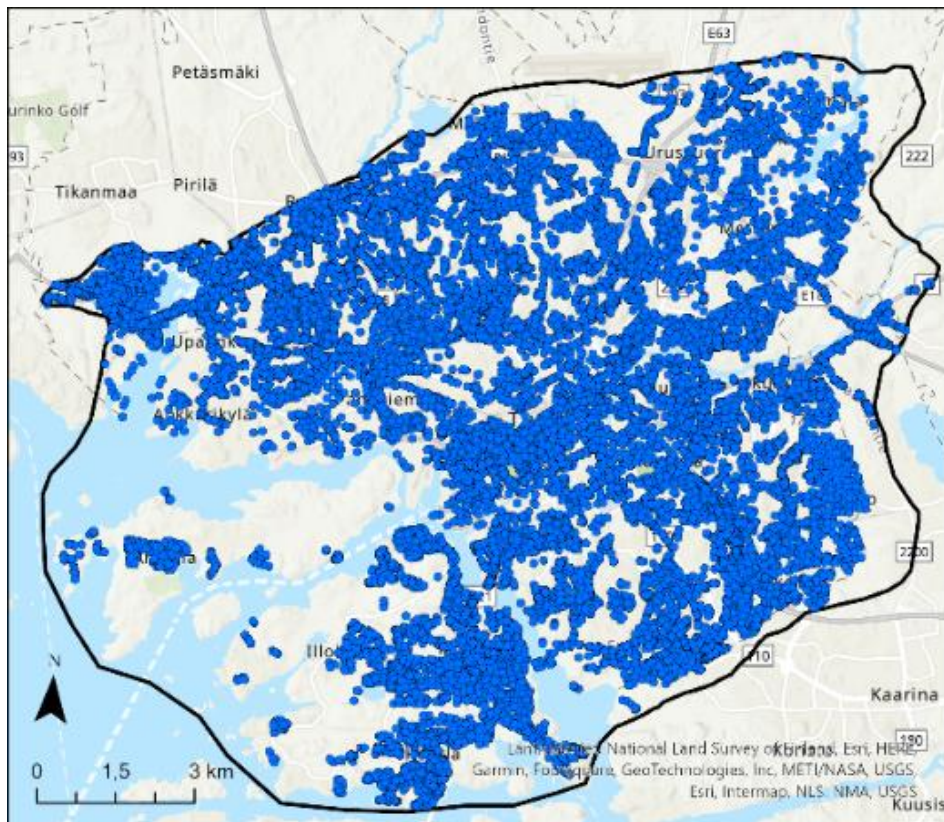
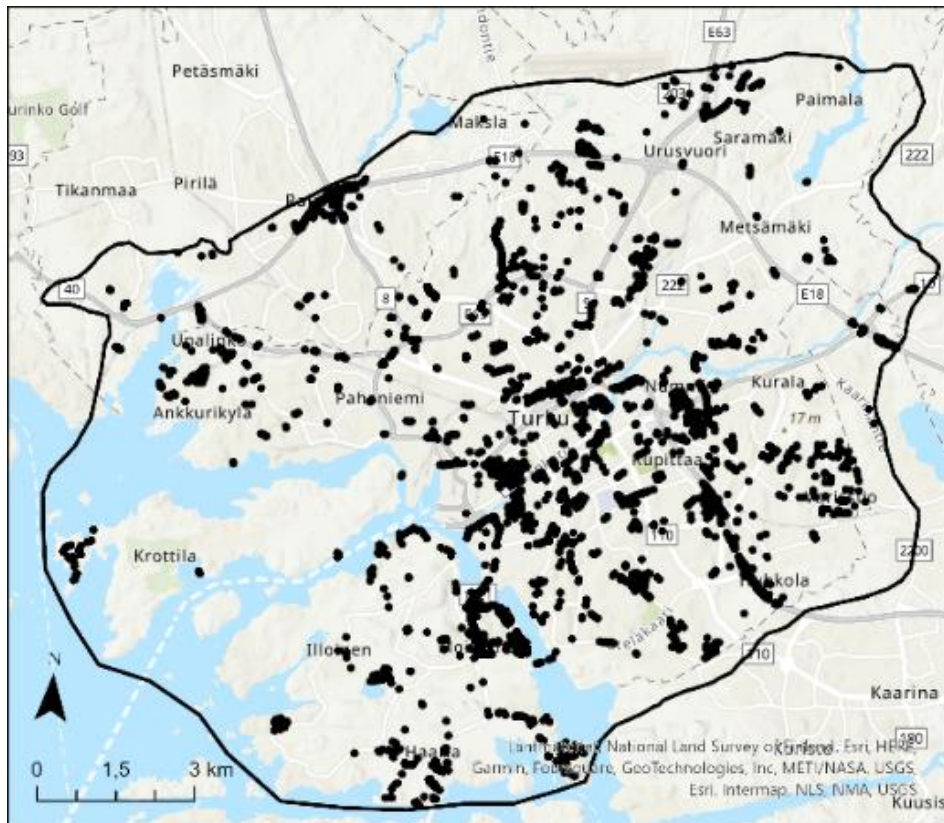
4 Aineisto ja menetelmät

4.1 Tutkimusalue ja -aineisto

Tutkimusalue kattaa Turun keskustan lähialueet sekä pienempiä alueita Kaarinasta ja Raisiosta, ja on pinta-alaltaan 177 km² (kuva 13). Tutkimusalue määriteltiin saatavilla olevan geoteknisen kairausaineiston alueellisen jakauman perusteella sekä Noora Anttilan (2023) pro gradu -työn saviallasmallinnuksen tarpeet huomioon ottaen. Geotekninen kairautieto sisältää tutkimusalueelta Turun kaupungin kairautiedot ja Raision ja Kaarinan alueelta Geologian tutkimuskeskuksen pohjatutkimusrekisterin kairautiedot joulukuulta 2021 (GTK 2021). Aineistossa oli yhteensä 61 325 kairautta. Kallionpintamallinnusta varten rajasin pois mallinnusaineistosta ne kairaukset, joiden perusteella kallion pinnan korkeusasemaa ei voida päätellä, esim. määräsyvyyteen tehdyt kairaukset ja tiiviiseen maakerrokseen päättyneet kairaukset. Mallinnuksessa käytin kairauksia, jotka ovat joko kalliovarmennettuja (n = 5 761) tai kiilautumiseen, kiveen, lohकारeeseen tai varmistamattomasti kallioon päättyneitä kairauksia (n = 29 156) (kuva 14).



Kuva 13. Tutkimusalue rajoittuu Turun kaupungin eteläiseen osaan, ja sisältää osia Raision ja Kaarinan kaupungeista. Kuntarajat on merkitty katkoviivalla. Taustakartta Esri (2021)



Kuva 14. Mallinnuksessa käytetyt geotekniset kairaustiedot (ylhäällä: mustat pisteet = kalliivarmennetut kairaukset, alhaalla: siniset pisteet = kiilautuneet tai kiveen, lohkaareeseen tai kallioon päättyneet kairaukset). Taustakartta Esri (2021)

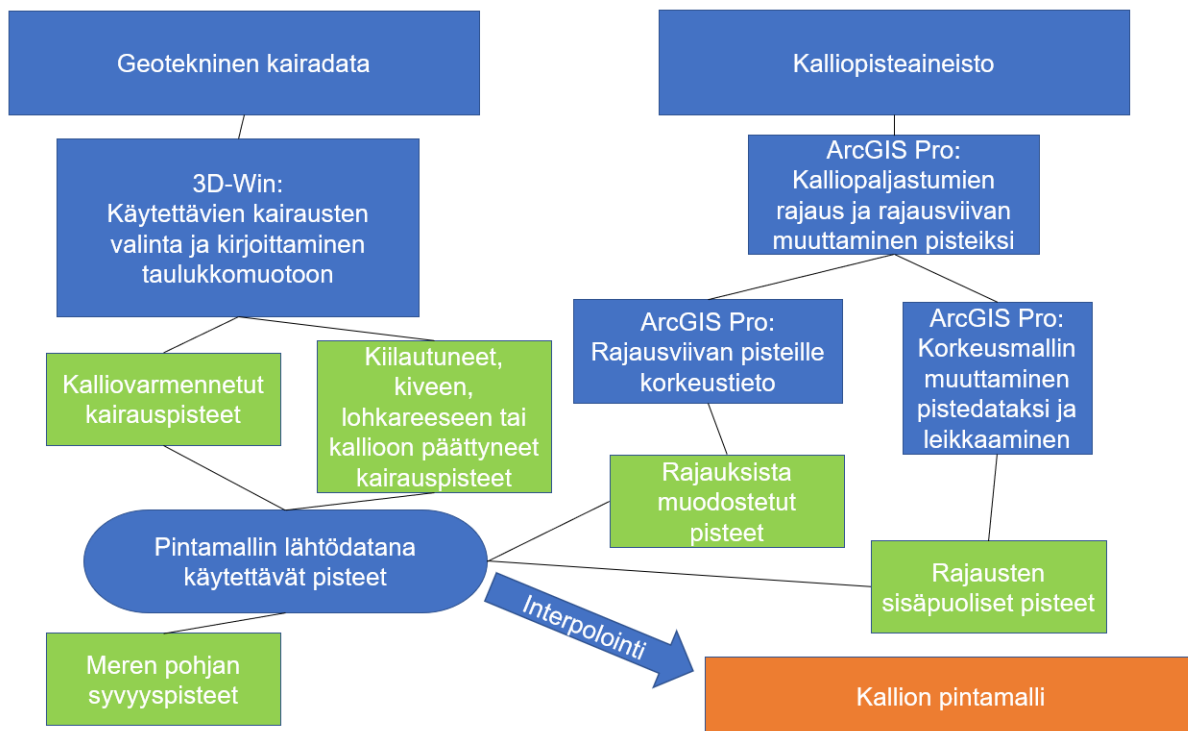
Mallinnuksen aineistona ja apuna käytin myös digitaalisia kahden ja kymmenen metrin resoluution korkeusmalleja (DEM), Googlen Street View -kuvia ja satelliittikuvia, pohjamaalajikarttaa, kenttähavaintoja sekä Pirilän (2016) pro gradu -tutkielman aineiston savihavaintopisteitä (taulukko 3). Pirilä (2016) on käyttänyt Turun kaupungin geoteknistä kairaustietoa pro gradu -työssään, jossa selvitettiin Turun alueen savien ominaisuuksia, savikerrosten paksuuden vaihtelua ja syntyhistoriaa, sekä maaperän vaikutuksia rakentamiseen ja liikenteeseen.

Taulukko 3. Käytetyt aineistot (Maanmittauslaitos 2022a, 2022b, GTK 2021, 2022, Pirilä 2016, Traficom 2022)

Aineisto	Kuvaus	Tuottaja
Geotekninen kairadata	Formaatti: INFRA	Turun kaupunki ja Geologian tutkimuskeskus
Merikartan syvyystiedot	Merialueen syvyyspisteet Formaatti: shapefile	Traficom
Korkeusmalli, 2 m	Ruutukoko 2 x 2 m Formaatti: Geo Tiff	Maanmittauslaitos
Korkeusmalli, 10 m	Ruutukoko 10 x 10 m Formaatti: Geo Tiff	Maanmittauslaitos
Pohjamaalajit	1:10 000 / 1:20 000 / 1:50 000 Metrin syvyydessä oleva maalaji (muokattu RT-luokitus) Formaatti: esri_file_gdb	Geologian tutkimuskeskus
Savipisteet	Pirilän (2016) savihavaintopisteet Formaatti: csv	Pirilä (2016)
Google Maps -satelliittikuvat Google Street View -kuvat		Google

4.2 Menetelmät

Kallioperän pintamallin laatimisessa käytin useaa erityyppistä pistedataa: peitteisillä alueilla geoteknisen kairaustiedon korkeuspisteitä ja paljastuma-alueilla LiDAR-korkeusmallin pistetietoa (kuva 15). Lisäksi merialueilla käytin meren pohjan syvyyspisteitä.



Kuva 15. Vuokaavio kalliopintamallin laatimisen päävaiheista ja sen välivaiheina tuotetut pistedatat.

4.2.1 Geoteknisten kairaustietojen käsittely

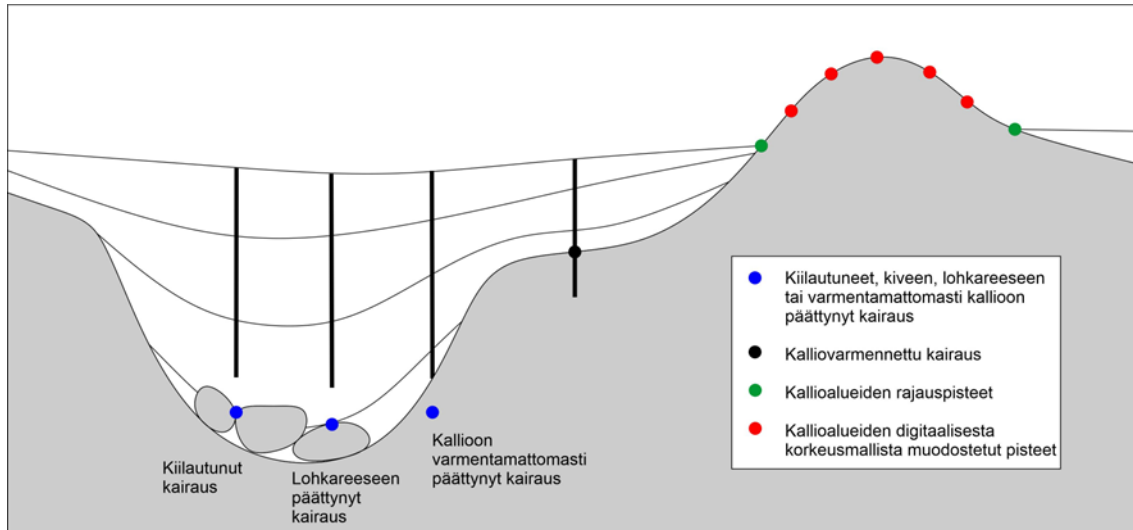
Sain kairaustiedot Turun kaupungin maaperärekisteristä ja Geologian tutkimuskeskukselta seitsemänä erillisenä dat- ja tek-tiedostona (kuva 16). Dat-tiedostot ovat Turun kaupungin aineistoa ja tek-tiedostot Geologian tutkimuskeskuksen pohjatutkimusrekisterin aineistoa Kaarinasta ja Raisiosta.

Turku 2.dat	9 818 kt	Turku 2.dat	9 818 kt	} Turun kaupungin aineisto
Turku 3.dat	8 381 kt	Turku 3.dat	8 381 kt	
Turku 4.dat	3 364 kt	Turku 4.dat	3 364 kt	
Turku 5.dat	1 875 kt	Turku 5.dat	1 875 kt	
Turku etelä 1.dat	7 669 kt	Turku etelä 1.dat	7 669 kt	
Turku-Littoinen.tek	2 606 kt	Turku-Littoinen.tek	2 606 kt	} Geologian tutkimuskeskuksen aineisto
Turku-Raisio.tek	13 990 kt	Turku-Raisio.tek	13 990 kt	

Kuva 16. Geotekninen kairaustieto

Tein mallinnuksessa käytettävän geoteknisen kairaustiedon valinnan ja kirjoittamisen taulukkomuotoon Novatronin 3D-Win -ohjelmalla (Novatron 2023). 3D-Win on maastomittaustiedon käsittelyyn tarkoitettu ohjelmisto, jolla voidaan tehdä geoteknisten

tutkimusaineistojen lukemista ja muunnoksia eri tiedostomuotoihin. Kairausaineistosta poimin kaksi pisteryhmää: 1) kalliovarmennetut kairaukset ja 2) kairaukset, jotka olivat päättyneet kiilautumiseen, kiveen, lohkareseen tai varmentamattomasti kallioon (kuva 17).



Kuva 17. Mallinnuksessa käytetty pistedata. Kiilautuneet, kiveen, lohkareseen tai varmentamattomasti kallioon päättyneiden kairauksen päättymiskorkeutta on laskettu mallinnukseen kaksi metriä. Kalliovarmennetuissa kairauksissa on kairattu kolme metriä kallion sisään.

Kirjoitin kairaukset taulukkomuotoon 3D-Win -ohjelman Text-muuntimella.

Taulukkomuotoiseen tiedostoon toin kairaustiedoista kairaustyyppin, kairauksen tunnuksen, koordinaattitiedot sekä kairauksen päättymisen z-arvon. Käytetty koordinaatisto oli ETRS-GK23. Korkeusjärjestelmä kairauksissa oli erilainen riippuen niiden tekemisen ajankohdasta. Kairausten muuntaminen samaan korkeusjärjestelmään ei ollut tämän työn puitteissa mahdollista. Ennen mallinnusta muunnin ETRS-GK23-koordinaattitiedot ETRS-TM35-järjestelmään. Taulukkomuotoisista tiedoista poistin saman koordinaattitiedon kairaukset siten, että mallinnukseen valittiin syvemmälle ulottunut kairaus. Lisäksi tiedostoissa oli myös duplikaatteja eli kahteen kertaan kirjattuja kairauksia, jotka poistin ennen mallinnusta.

Laskin kiilautuneiden ja kiveen, lohkareseen tai kallioon varmentamatta päättyneiden kairausten päättymisen z-arvoa kaksi metriä alemmas, koska pohjamoreenin paksuus on tyypillisesti 1–3 m, ja isoimmat kivet ja lohkaaret ovat moreenikerroksen alaosassa ja jo hyvin lähellä kallion pintaa (Eyles *et al.* 2016). Lasku perustuu olettamukseen, että kallion pinta on todennäköisesti jo lähellä, jos kairaus päättyy em. tavalla. Kairauksen päättymistavoissa kiveen, lohkareseen tai kallioon päättyneet kairaukset muodostavat oman päättymistyyppinsä. Aineistosta ei siis voi erotella kiveen, lohkareseen tai kallioon

varmentamattomasti päättyneitä kairauksia erikseen. Tämän takia niiden kairauksen z-arvoa, jotka ovat varmentamattomasti päättyneet kallioon, on myös laskettu kaksi metriä, ja ne voivat siis olla todellista alempia arvoja, mikäli ne ovat päättyneet kallion pintaan (kuva 17).

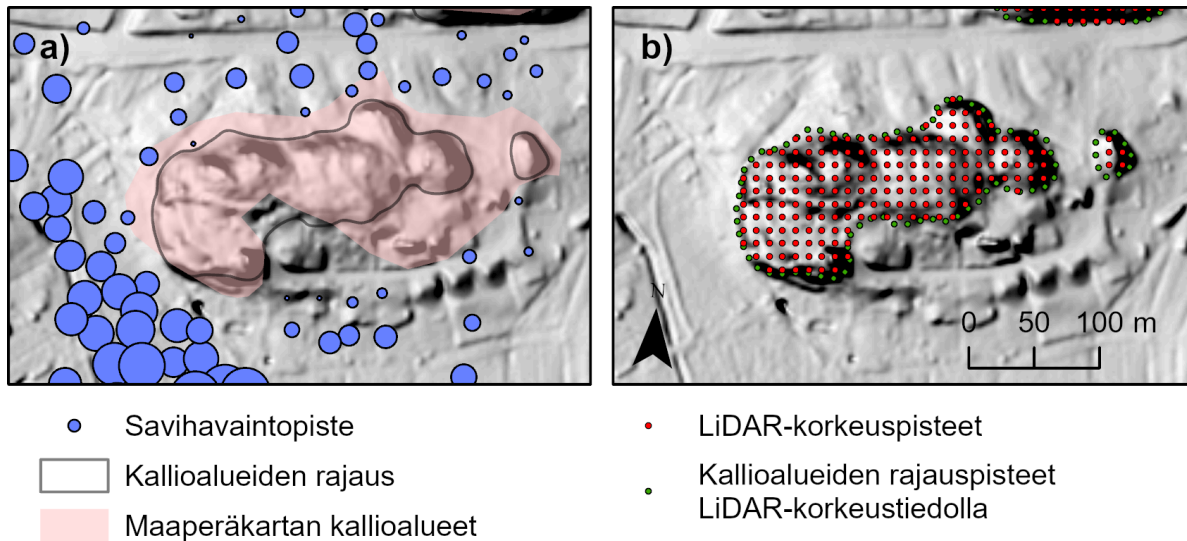
4.2.2 LiDAR-aineiston käyttö paljastuma-alueilla

Rajasin kalliopisteaineistoa varten aluksi kalliopaljastumat tai ohuen maapeitteen kallioalueet ArcGIS Pro -ohjelman editointityökaluilla erillisiksi polygoneiksi (kuva 18). Käytin rajauksessa Maanmittauslaitoksen 2 m korkeusmallia, Geologisen tutkimuskeskuksen pohjamaalajikarttaa (GTK 2022) sekä Pirilän (2016) pro gradu -tutkimuksen savihavaintopisteitä. Tulokseksi käytin apuna myös Google Maps -ilmakuvia ja Street View -kuvia. Rajattujen kallioalueiden osuus tutkimusalueesta on 27 %.



Kuva 18. Rajatut kalliopaljastumat tai alueet, joilla kallio on hyvin lähellä maan pintaa ($n = 1\,387$). Pohjakarttana 2 m korkeusmalli (Maanmittauslaitos 2022a).

Piirtämisen lähtökohtana olivat pohjamaalajikarttaan merkityt kallioalueet, joiden rajausta tarkennettiin korkeusmallin avulla (kuva 19). Piirsin kallioalajastumat niin, että savihavaintopisteet jäivät rajauksen ulkopuolelle. Jokaisen polygonin piirtämisen jälkeen tarkastelin aluetta myös ilmakuvista. Piirtämisen jälkeen muutin viivat pisteiksi ArcGIS Pro -ohjelman ”Generate points along line” -työkalun avulla (Esri 2022a). Pisteiden etäisyydeksi määritin 10 m. Lisäsin pisteisiin korkeustiedon 10 m korkeusmallista ArcGIS Pro-ohjelman ”Extract values to points” -toiminnolla (Esri 2022b).

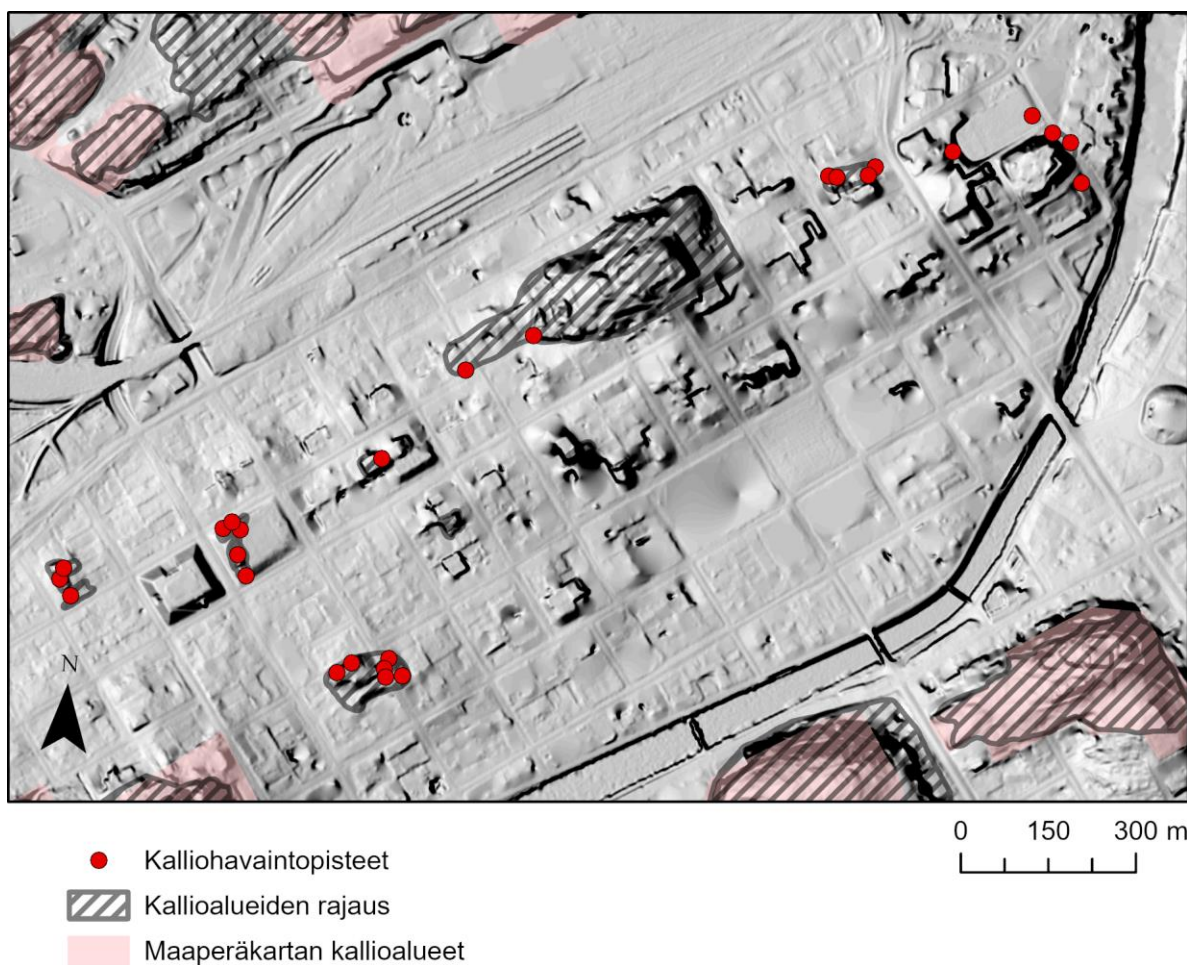


Kuva 19. a) Esimerkki kallioalueen rajauksesta. Taustakarttana on korkeusmalli (2 m) ja pohjamaalajikartta, jossa vaaleanpunainen on kalliota (GTK 2022, Maanmittauslaitos, 2022a). Punaiset pisteet ovat Pirilän (2016) savihavaintopisteitä, ja pisteen koko kuvaa saven alapinnan korkeutta: mitä pienempi piste, sitä lähempänä maan pintaa saven alapinta on. b) Piirrettyjen polygonien viivat on muutettu pisteiksi ja korkeusmallista muunnetut pisteet on leikattu polygonien sisältä.

Kalliopintojen rajauksen jälkeen muutin tutkimusalueen digitaalisen korkeusmallin (10 m) rasterimuodosta pisteiksi ArcGIS Pron ”Raster to points” -työkalulla (Esri 2022c). Muutin työkalulla pikselin korkeusarvon pikselin keskikohdassa olevan pisteen korkeusarvoksi. Tämän jälkeen leikkasin kallioalueepolygoneilla pisteet ArcGIS Pro:n ”Clip”-työkalulla siten, että polygonin sisällä olevat pisteet säilytettiin ja ulkopuolella olevat pisteet poistettiin (Esri 2022d).

Ongelmallisia alueita kallioalueiden rajaamisen kannalta olivat tiheään rakennetut alueet sekä alueet, joilla oli moreenipeitteitä. Tiheään rakennetuilla alueilla rakennukset peittävät kallion ja sedimenttien peittämän alueen rajaa siten, että sitä on vaikea havaita ja tarkasti sijoittaa kartalle. Näillä alueilla käytin tulkinnassa apuna Pirilän (2016) savihavaintopisteitä sekä Google Maps Street View -kuvia, joista kykenin tarkastelemaan katujen varsien

kallioleikkauksia ja lähellä olevia kalliopaljastumia. Rakennettu ympäristö erityisesti Turun keskustan alueella aiheutti vaikeuksia tulkita kalliopintaa korkeusmallista tai ilmakuvien avulla. Tämän vuoksi tein keskustan alueelle maastokäynnin, jolloin etsin epäselvältä alueelta kalliopaljastumia (kuva 20). Koska keskustan alue on tiiviisti rakennettu, todennäköisesti monien täytemaiden ja rakennusten alla on kalliota lähellä maan pintaa, jota en ole tässä tutkimuksessa havainnut.



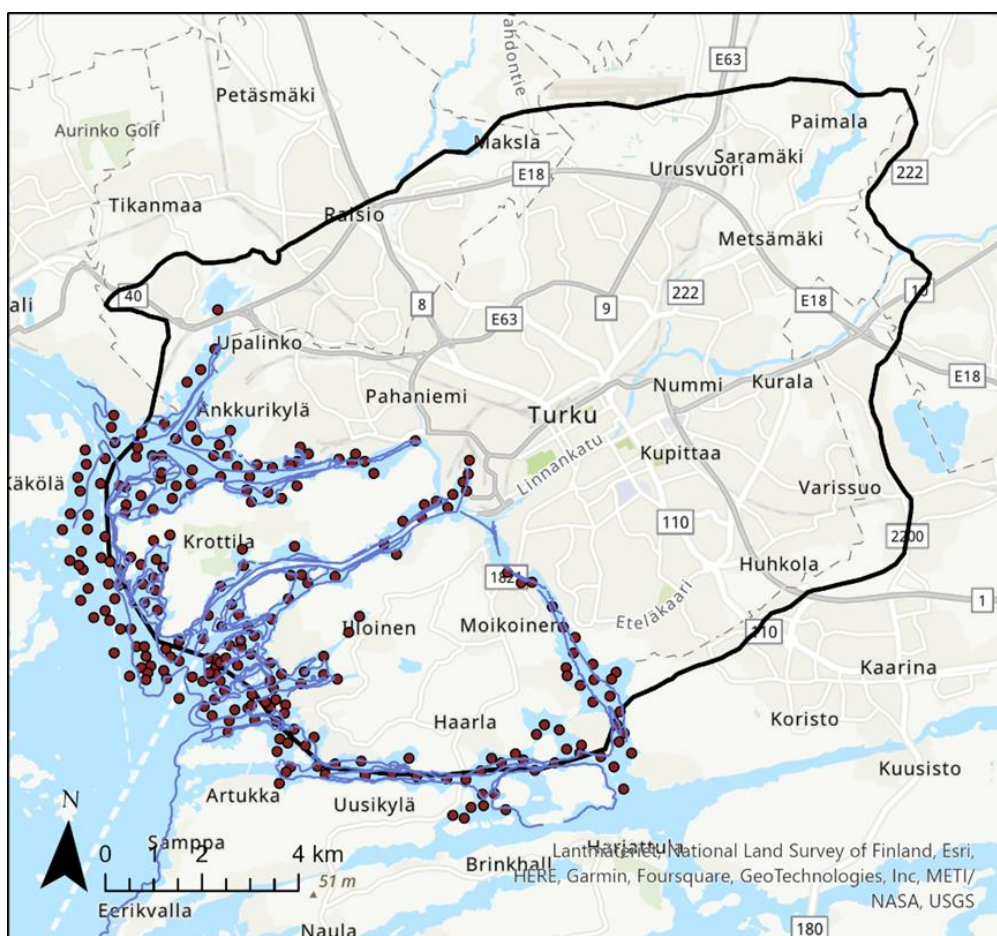
Kuva 20. Turun keskustan alueen maastokäynnin tuloksena kerätyt kalliohavaintopisteet, kallioalueiden rajaukset sekä maaperäkartan kallioalueet (GTK 2022). Taustakarttana korkeusmalli (2 m) (Maanmittauslaitos, 2022a).

Jäätikön kulkusuunnan mukaisesti moreenia on pintamaalajina paikoin kalliopaljastumien vastasivulla N-NW-puolella ja suojasivulla S-SE-puolella. LiDAR-havaintojen ja maaperäkartan moreenialueet eivät olleet kaikkialla yhtenevät, joten moreenialueiden ja kallion rajaamisessa olen tehnyt tulkintoja ensisijaisesti LiDAR-havaintoihin pohjaten sekä hyödyntäen geoteknisten kairausten moreenihavaintoja. Paikoin kallioalueiden tielinjausten kairauksissa on ohuita, alle metrin paksuisia karkearakeisia maakerroksia, jotka ovat

todennäköisesti täytemaita, ja ne jätiin huomioimatta kallioalueiden rajauksissa. Isoimmat kallioalueet on rajattu yhtenäisiksi kallioiksi, vaikka niiden päällä on ollut ohuita moreenipeitteitä.

4.2.3 Meren pohjan syvyyspisteet

Merialueilta oli hyvin vähän kairauksia, joten lisäsin malliin pistedataa meren pohjan syvyydestä parantamaan mallin laatua merialueilla. Käytetty pistedata muodostui suoraan Traficom (2022) syvyyspisteistä ($n = 243$) sekä syvyyskäyristä tutkimusalueen sisällä ja alle kilometrin etäisyydellä (kuva 21). Muutin syvyyskäyrät pistemäiseksi tiedoksi ”Generate points along line” -työkalulla 10 m välein (Esri 2022a). Meren syvyydetiedot sisältävät tiedon meren pohjan syvyydestä, joka käytännössä on poikkeuksetta eri kuin varsinaisen kallion pinnan korkeus. Käytin kuitenkin näitä pisteitä syventämään interpoloitua kallion pintaa merialueilla, jotta malli olisi lähempänä todellisuutta kuin ilman niiden käyttöä.



Kuva 21. Mallinnuksessa käytetyt meren pohjan syvyyspisteet ja syvyyskäyrät (Traficom, 2022). Taustakartta Esri (2021).

4.2.4 Interpolointi

Tein kalliopinnan interpoloinnin ArcGIS Pro:n Bayesian kriging -työkalulla (Esri 2022e). Bayesian kriging -menetelmä laskee automaattisesti interpoloinnin parametrit osajoukkojen ja simulaatioiden avulla (Esri 2022e). Menetelmä ottaa huomioon semivariogrammin estimoinnin aiheuttaman virheen, joten ennusteen standardivirhe on pienempi kuin muissa kriging-metodeissa, ja menetelmä on luotettava erityisesti pienillä datamäärillä (Esri 2022e). Anisotrooppiset korjaukset eivät ole menetelmässä mahdollisia (Esri 2022e). Menetelmä on nopea ja tuottaa luotettavan lopputuloksen työkalun oletusparametreilla (Krivoruchko & Gribov 2019).

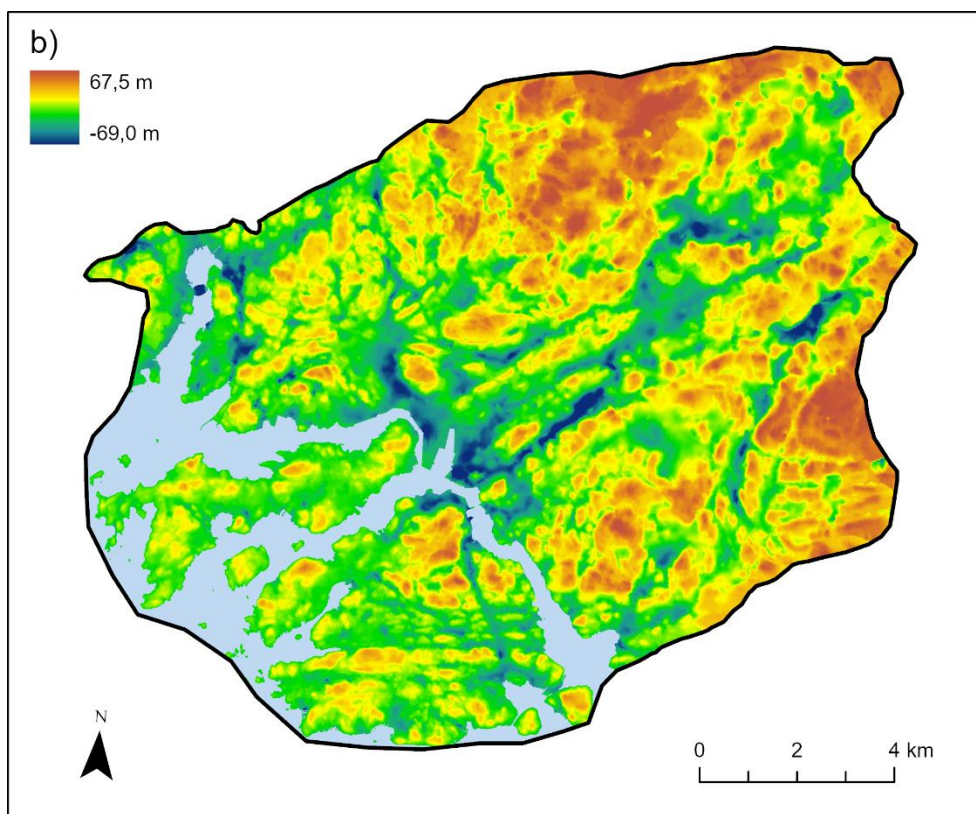
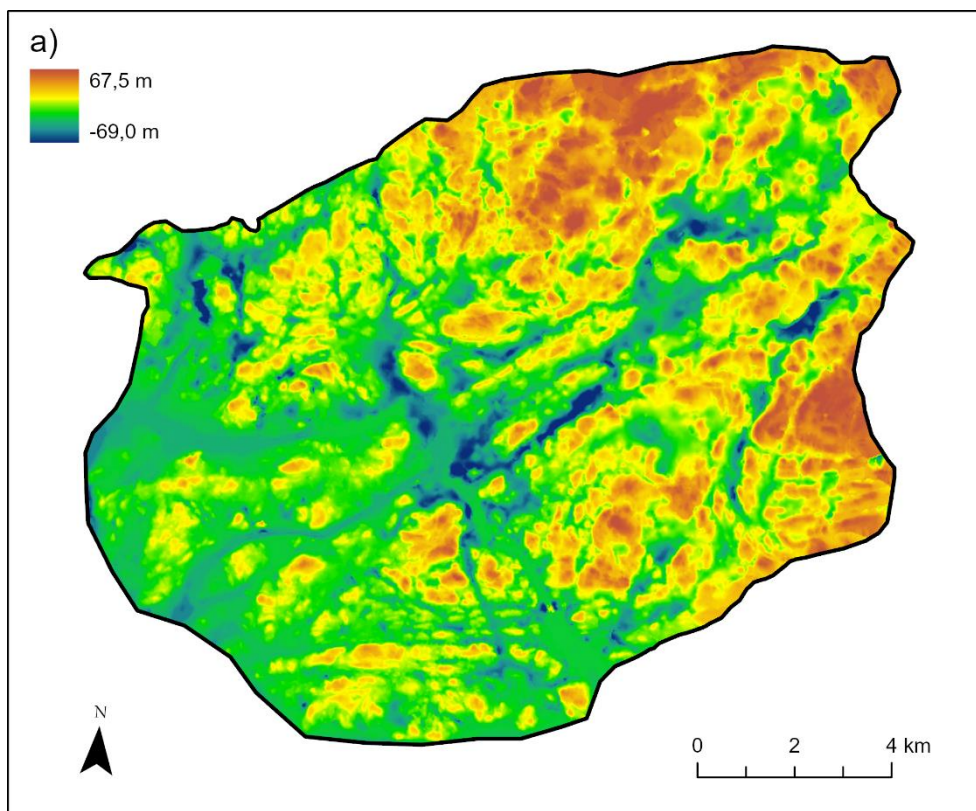
4.2.5 Kallion pintamallin tulkinta ja moreenipaksuuksien mallinnus

Tein 2D-rakennetulkinnan (lineamentit) tutkimusalueen deformaatiovyöhykkeistä perustuen kalliopintamallin lineaarisiin painanteisiin. Laskin ArcGIS Pro:n ”Surface Parameters” -työkalulla rinnekaltevuudet asteina (Esri 2023a). Saven alapinnan ja kalliopinnan välissä olevan karkearakeisen maaperän paksuuden määrittämiseksi laskin ”Raster calculator” -työkalulla kallion pinnan ja Anttilan (2023) pro gradu -työssä interpoloidun savikerroksen alapinnan erotuksen (Esri 2023b). Rinnekaltevuuden ja lineamentitulkinnan perusteella valitsin kaksi selkeintä ja jyrkkäpiirteisintä painannetta, joista tarkasteltiin niiden morfologiaa ja moreenikerroksen paksuutta. Poikkileikkausten paikat valitsin kohdista, joissa on kairauksia painanteen poikki. Tarkastelussa hyödynsin myös niitä lähtöaineiston kairauksia, joissa karkearakeinen maaperä eli sora, kivet tai moreeni oli merkitty kairauspöytäkirjaan.

5 Kalliopinnan topografinen 3D-malli

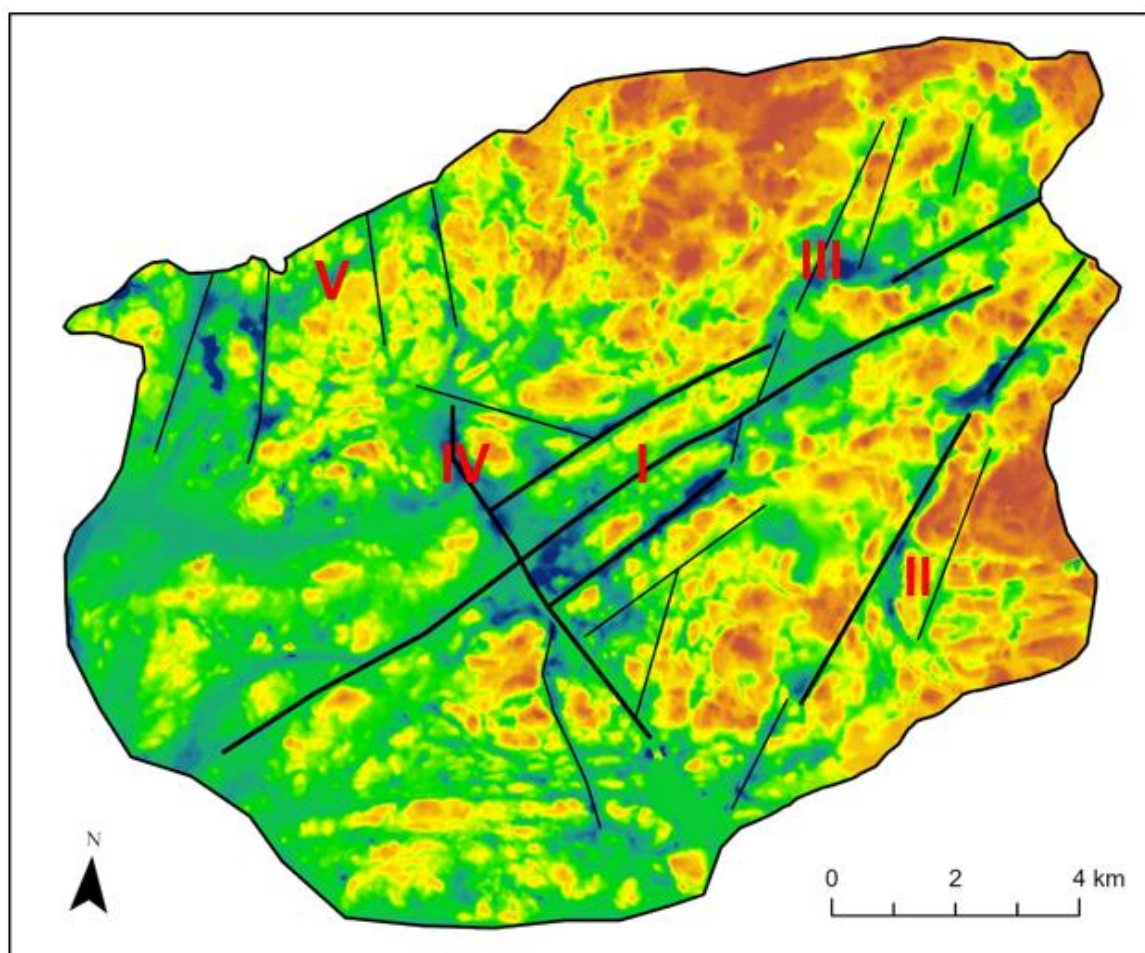
5.1 Kalliopinnan rakenteet

Interpoloidun kalliopinnan korkeus vaihtelee välillä 67,5 ja -69,0 metriä merenpinnasta (kuva 22). Tutkimusalueella on runsaasti lineaarisia painanteita, jotka näyttävät jatkuvan myös merelle, vaikka lähtöaineiston vuoksi rakenteet eivät ole yhtä selkeitä kuin mantereella (kuva 21). Neljä keskenään samansuuntaista ~ENE-WSW-suuntaista painannetta muodostavat tutkimusalueen keskelle yhtenäisen rakennesuunnan ("I" kuvassa 23). Niistä vain yhdellä on mallissa havaittava jatkuvuus merelle. Tutkimusalueen itäosassa on ~NNE-SSW-suuntaisia painanteita ("II" kuvassa 23), jotka eivät ole yhtä yhtenäisesti jatkuvia eivätkä yhtä pitkiä kuin ~ENE-WSW-suuntaiset painanteet. Tutkimusalueen keskiosassa näistä yksi muodostaa vinosti leikkaavan, polveilevan painanteen keskiosan painanteiden poikki ("III" kuvassa 23). Keskiosan painanteita leikkaa suoraviivaisemmin ~NNW-NNW-suuntainen painanne, joka taipuu pohjoisessa N-S-suuntaiseksi ja haarautuu etelässä kahteen eri vyöhykkeeseen ("IV" kuvassa 23). Vyöhyke todennäköisesti jatkuu merelle, mutta lähtöaineiston puuttumisen takia jatkuvuus ei ole nähtävissä mallissa. Tutkimusalueen pohjoisosassa on myös neljä lyhyttä ~N-S-suuntaista vyöhykettä ("V" kuvassa 23), joilla ei näy mallissa selkeää jatkuvuutta etelämmäksi. Itäisin niistä saattaa muodostaa jatkuvuuden "IV"-vyöhykkeen kanssa.

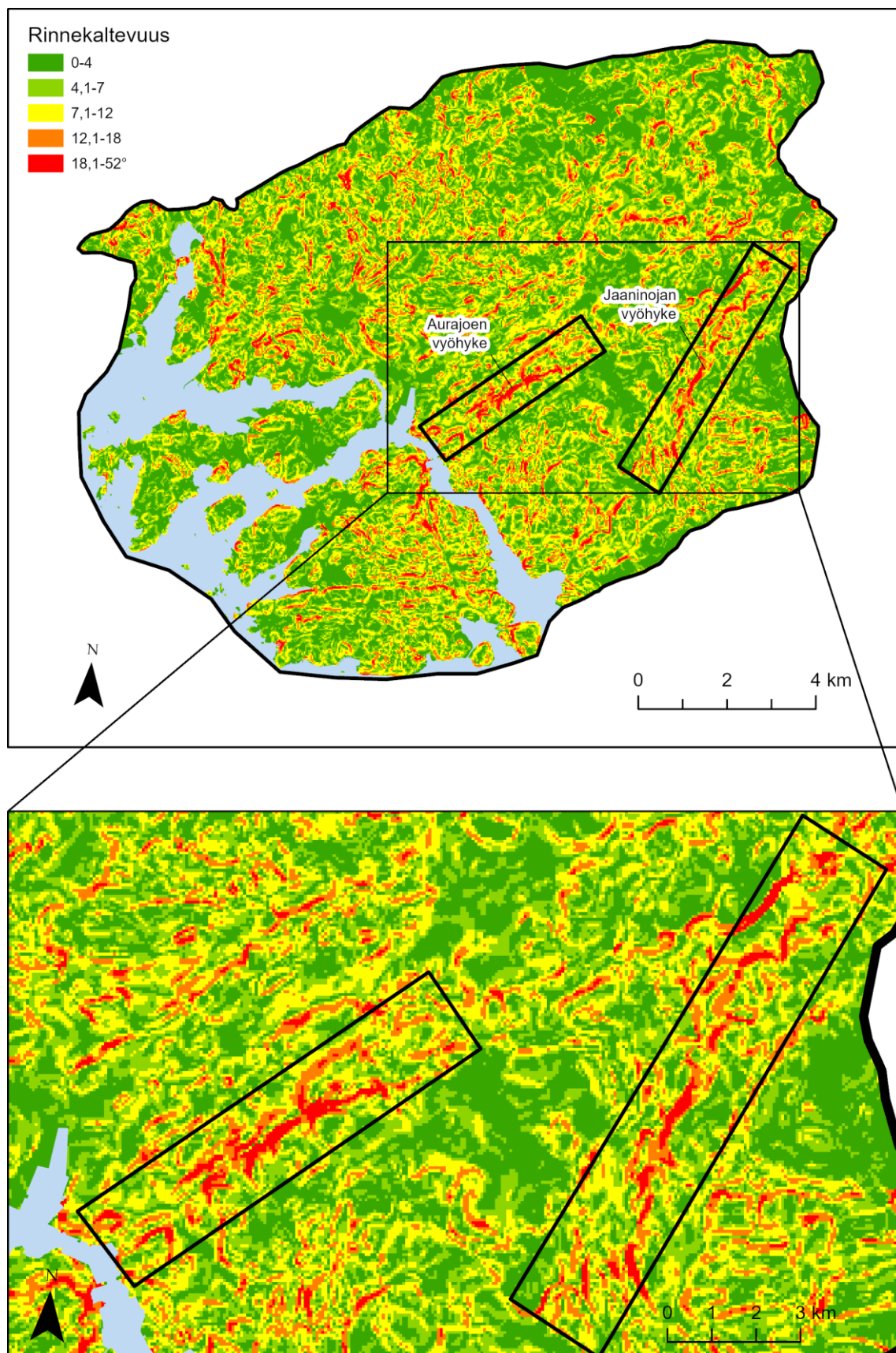


Kuva 22. a) Bayesian kriging -työkalulla interpoloitu kalliopinta. b) Interpoloitu kalliopinta merimaskilla. Merialueiden rajauksessa on käytetty nykyistä rantaviivaa (Suomen ympäristökeskus 2021).

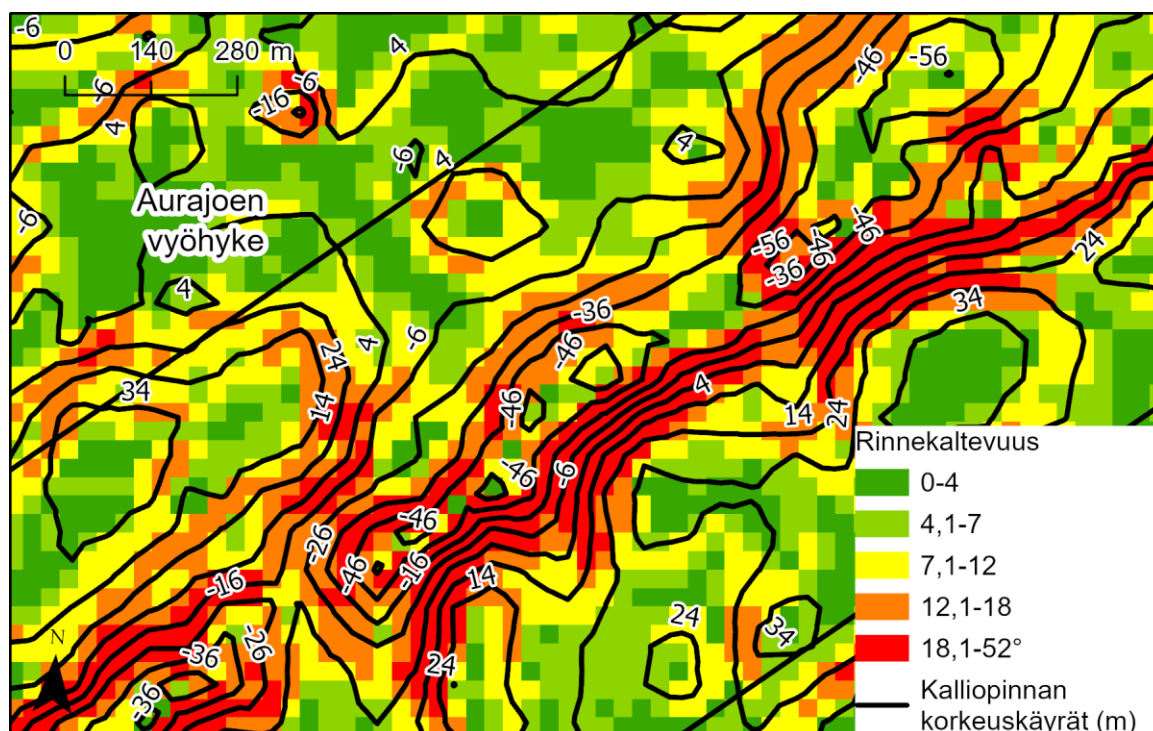
Kalliopinnan korkeusmallille määritellyt rinnekaltevuudet ovat suurimmillaan yli 50° (kuva 24). Suurimmat rinnekaltevuudet sijoittuvat pitkien ja kapeiden laaksomaisten painanteiden reunoille, joilla on jyrkät reunat ja tasaisempi pohja. Kaltevuuksien perusteella tutkimusalueelta erottuu kaksi muita pidempää ja yhtenäisempää jyrkkäreunaista vyöhykettä: keskustan alueella Aurajoen kohdalla oleva vyöhyke ja itäisen alueen Jaaninojan vyöhyke (kuva 24). Erityisesti Aurajoen vyöhykkeessä loivemmat rinnekaltevuudet sijoittuvat syvimpiin kohtiin, mikä viittaa rakenteeseen, jossa on hyvin jyrkät seinämät ja tasaisempi pohja. Pohjalla rinnekaltevuudet ovat Aurajoen vyöhykkeessä alle 7 astetta ja monin paikoin alle 4 astetta (kuva 25).



Kuva 23. Kalliopintamallissa esiintyvien pitkänomaisten painanteiden avulla laadittu tulkinta Turun alueen hauraista deformaatiovyöhykkeistä.



Kuva 24. Kalliopintamallista lasketut rinnekaltevuudet. Alla: suurennos kahden merkittävimmän vyöhykkeen rinnekaltevuuksista, joissa on havaittu jyrkät seinämät ja tasaisempi pohja. Merialueiden rajauksessa on käytetty nykyistä rantaviivaa (Suomen ympäristökeskus 2021).



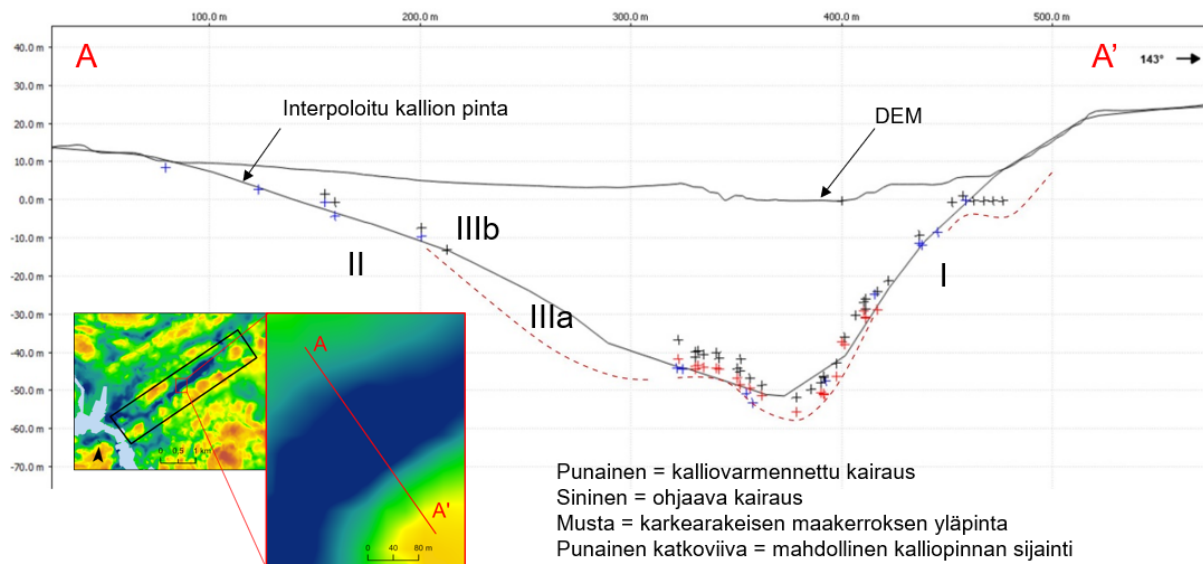
Kuva 25. Esimerkkikuva Aurajoen vyöhykkeen rinnekaltevuudesta ja kalliopinnan korkeudesta. Huomioitavaa on syvimpien kalliopinnan kohtien sijoittuminen tasaisemmille, alle 12 asteen kaltevuuden alueille.

5.2 Poikkileikkaustarkastelut

5.2.1 Aurajoen vyöhyke

Aurajoen painanne on poikkileikkauksessa muodoltaan epäsymmetrinen: painanteen kaakkoisseinä (”I” kuvassa 26) on jyrkempi kuin luoteispuolen seinämä (”II” kuvassa 26). Kaltevuus on jyrkimmillään 33° , kun se luoteispuolella on enintään 18° . Kallion pinnan sijainti on poikkileikkauksen kalliovarmennetuissa kairauksissa alimmillaan $-55,5$ metriä. Luoteispuolen mäkien korkeus on 25 m, joten vyöhykkeen kokonaissyvyys poikkileikkauksen kohdalla on yli 80 metriä. Kalliovarmennetut kairaukset sijoittuvat painanteen syvimpään kohtaan, kun taas painanteen reunoilla on vain ohjaavia kairauksia, ja tämä voi vaikuttaa mallin luotettavuuteen. Kalliopintamallin 30 m resoluution vuoksi pienipiirteisintä vaihtelua ei kuitenkaan näy mallissa, ja tarkastelemalla yksittäisiä kairauksia voidaan huomioida myös määräsyyvyyteen tai tiiviiseen maakerrokseen päättyneet kairaukset määrittämään kallion pinnan vähimmäissyvyyttä.

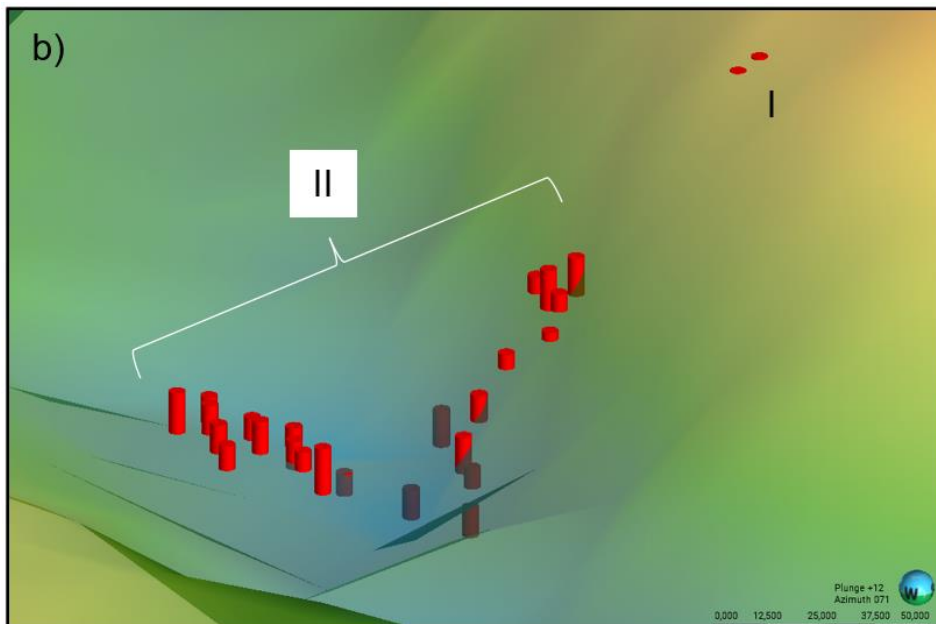
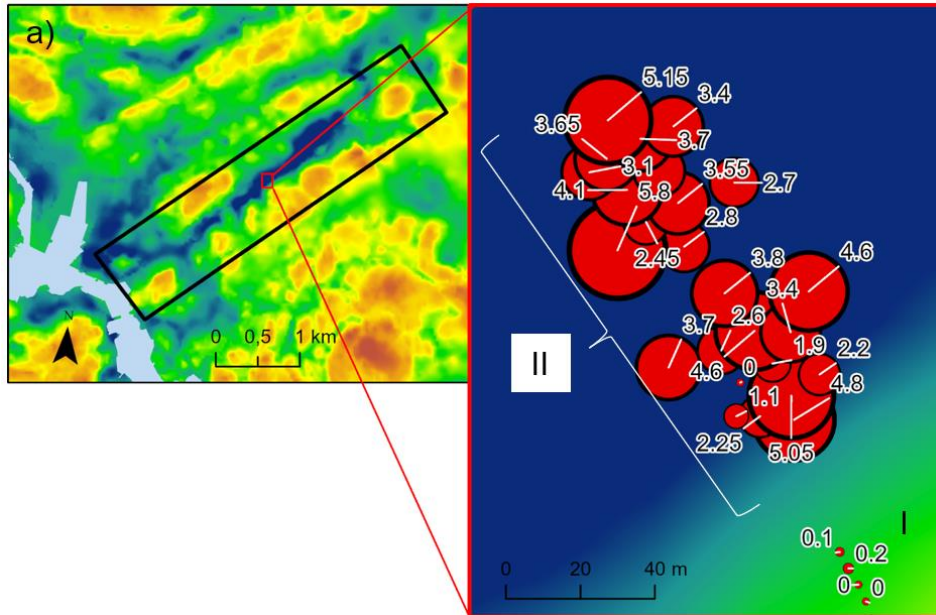
Painanteen kaakkoisreunalla ("I" kuvassa 26) on määräsyvyyteen tehtyjä kairauksia, joissa on havaittu karkearakeisen maakerroksen yläpinta, joka on alempana kuin interpoloitu kalliopintamalli. Näitä kairauksia ei ole käytetty mallinnuksessa, ja kalliopinta sijaitsee todellisuudessa paikalla ainakin yli 5, mutta mahdollisesti jopa yli 20 m (ks. osio 5.3) alempana kuin laaditussa mallissa. Myös painanteen pohjan alimmat kalliiovarmennetut kairaukset menevät 3–4 metriä mallinnettua kalliopintaa alemmas, ja karkearakeisten maakerrosten yläpinta on alempana kuin mallin kalliopinta. Luoteisreunalla on alue, jossa kairauksia ei ole, ja mallin kalliopinnan sijainti on tämän takia epävarma ("IIIa" kuvassa 26). Kohdan yläreunassa ("IIIb" kuvassa 26) on kairauksessa havaittu karkearakeisen maakerroksen yläpinta, joka on mallin kalliopinnan kanssa samassa tasossa, mikä viittaisi siihen, että kalliopinta todellisuudessa laskee jyrkemmin kuin mallissa. Todennäköisempää kalliopinnan tasoa on kuvattu punaisella katkoviivalla kuvassa 26.



Kuva 26. Aurajoen vyöhykkeen poikkileikkaustarkastelu. Poikkileikkauksessa on interpoloitu kalliopinta, maan pinnan korkeusmalli (DEM 10 m) sekä poikkileikkauksesta 30 m etäisyydeltä projisoidut lähtöaineiston kairaukset. Z-skaala on liioiteltu kaksikertaiseksi.

Karkearakeisen maapeitteen paksuus painanteessa vaihtelee kairauksissa 0–5,8 m välillä. Jyrkällä kaakkoisrinteellä paksuja karkearakeisia maaperäkerrostumia ei ole havaittu. Niitä ei joko ole ollenkaan tai ne ovat hyvin ohuita (0,1–0,2 m) (kohta "I" kuvassa 27a). Karkearakeisen maakerroksen paksuudet painanteen keskiosassa ovat suuremmat ja paksuudet vaihtelevat (kohta "II" kuvassa 27a). Myös tässä osassa painannetta on kairauksia, joissa karkearakeista maaperää ei ole havaittu. Joko karkearakeisen maakerroksen paksuudessa on vaihtelua tai paksuuden vaihtelut johtuvat tulkintavirheistä kairauksissa.

Karkearakeisen maakerroksen keskiarvopaksuus painanteen pohjalla on 3,2 m. Mallinnettu kalliopinta on painanteen pohjalla ylempänä kuin kairauksissa havaittu karkearakeisen maaperän alapinta ja kalliopinta (kuva 27b).

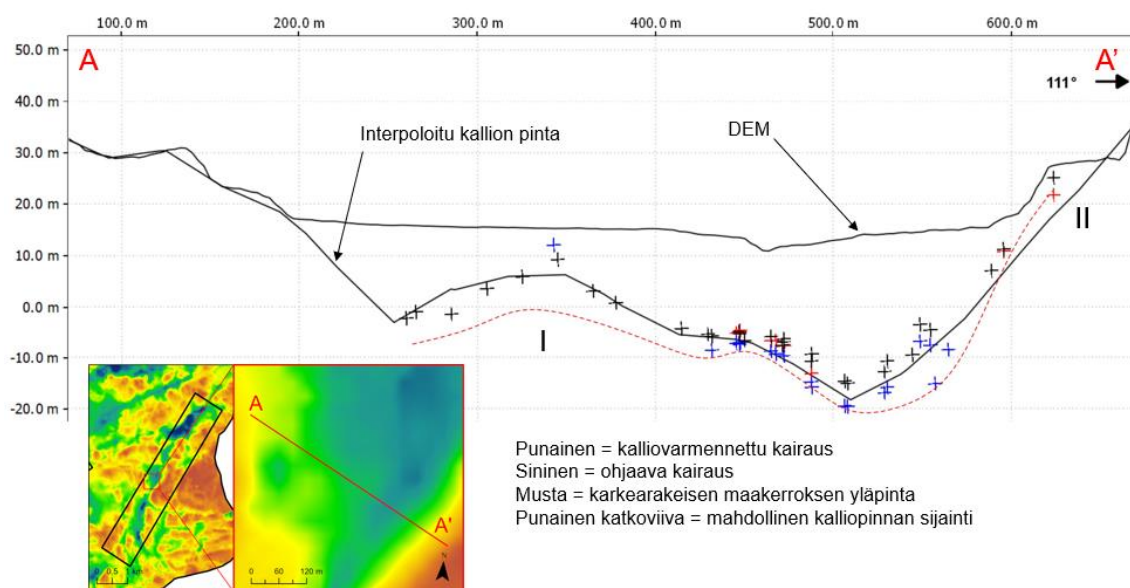


Kuva 27 a) Aurajoen vyöhykkeen poikkileikkauksen kohdalla olevien kairauksen karkearakeisen maakerroksen paksuudet metreinä. Merialueiden rajauksessa (a) on käytetty nykyistä rantaviivaa (Suomen ympäristökeskus 2021). b) Paksuudet visualisoituna Leapfrog Geo 3D-ohjelmassa (Seequent 2023). Z-skaala on liioiteltu kaksinkertaiseksi.

5.2.2 Jaaninojan vyöhyke

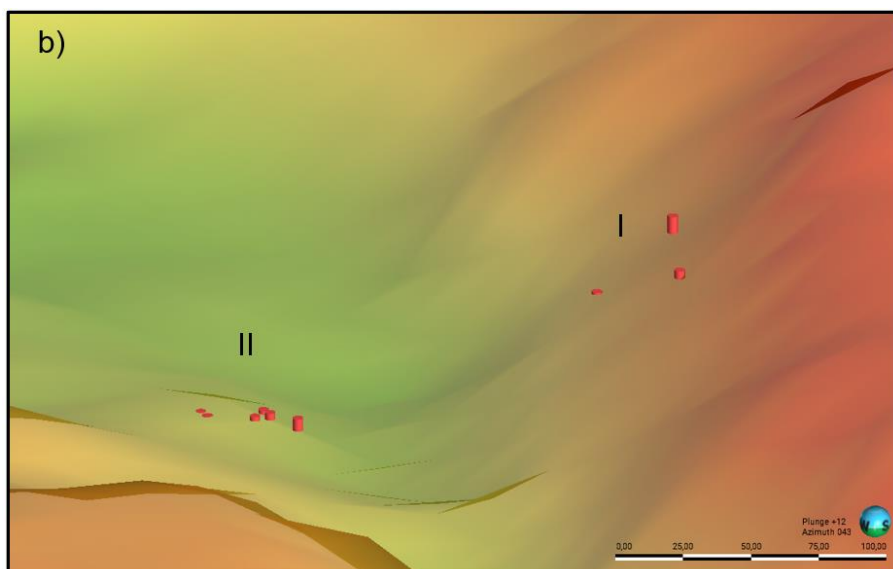
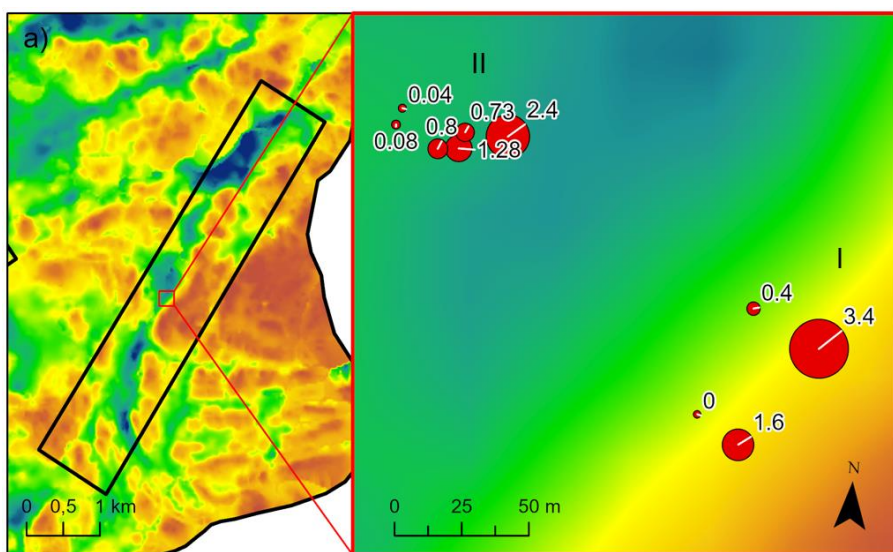
Jaaninojan painanne on poikkileikkauksen kohdalla seinämien osalta symmetrisempi ja loivempi kuin Aurajoen painanne (kuva 28). Kallion pinta on kalliovarmennetuissa kairauksissa alimmillaan -12,9 metrissä ja sitä ympäröivillä kallioalueilla 35 m, jolloin kalliopinnan korkeusvaihtelu on 47,9 m. Painanne on pohjoisessa syvempi ja vastaa luonteeltaan enemmän Aurajoen painannetta. Poikkileikkauksen kohta valittiin kuitenkin kohdasta, jossa on mahdollisimman paljon kairauksia painanteen poikki. Edustavuus ei ole kuitenkaan niin hyvä kuin Aurajoen painanteessa, sillä Jaaninojan poikkileikkauksessa ei ole tehty kairauksia aivan painanteen syvimmissä kohdassa.

Sekä kaakkois- että luoteisseinämien keskikaltevuus maapeitteisellä osuudella on noin 20 astetta. Painanteen pohja ei mallin mukaan ole tasainen, vaan siinä on noin 10 m korkea yksittäinen kohouma (kohta "I" kuvassa 28). Kohouman kohdalla on vain yksi ohjaava kairaus, ja muilta osin mallin pinta noudattelee määräsyvyisten ja tiiviiseen maakerrokseen päättyneiden kairausten karkearakeisen maaperän yläpinnan tasoa. Kallion pinta on mallissa tässä kohdassa 5–10 m ylempänä kuin se todellisuudessa on, koska havaitut karkearakeisen maakerroksen yläpinnat ovat mallinnettua kalliopintaa alempana. Kaakkoisseinämällä (kohta "II" kuvassa 28) on yksi kalliovarmennettu kairaus, jonka mukaan kalliion pinta olisi noin kaksi metriä mallia ylempänä. Todennäköisempää kalliopinnan tasoa on kuvattu punaisella katkoviivalla kuvassa 28.



Kuva 28. Jaaninojan vyöhykkeen poikkileikkaustarkastelu. Poikkileikkauksessa on interpoloitu kalliopinta, maan pinnan korkeusmalli (DEM 10 m) sekä poikkileikkauksesta 30 m etäisyydeltä projisoidut lähtöaineiston kairaukset. Z-skaala on liioiteltu kaksikertaiseksi.

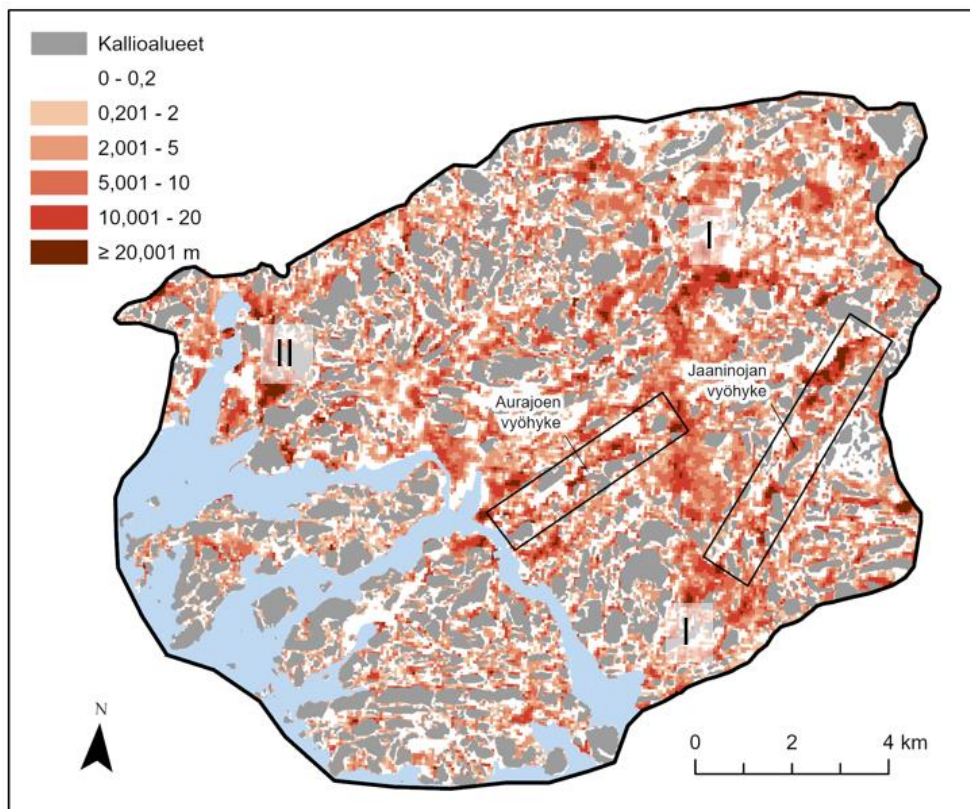
Karkearakeisen maakerroksen paksuudessa on vaihtelua myös Jaaninojan vyöhykkeessä. Paksuimmillaan kerrokset ovat painanteen kaakkoisrinteessä (3,4 m), mutta toisaalta rinteessä on myös kairauksia, joissa ei ole havaittu lainkaan karkearakeista maaperää tai kerros on hyvin ohut (kohta "I" kuvassa 29). Painanteen pohjan karkearakeisen maakerroksen paksuuden keskiarvo on 0,9 m. Pohjalla olevat kerrokset ohenevat luoteisrinnettä kohti (kohta "II" kuvassa 29). Tuloksia ei voi kuitenkaan sellaisenaan verrata Aurajoen poikkileikkauksen tuloksiin. On mahdollista, että puuttuvissa syvimmän kohdan kairauksissa havaittaisiin paksumpia kerroksia karkearakeista maaperää.



Kuva 29. a) Jaaninojan vyöhykkeen poikkileikkauksen kohdalla olevien kairauksen karkearakeisen maakerroksen paksuudet metreinä, b) paksuudet visualisoituna Leapfrog Geo 3D-ohjelmassa (Seequent 2023). Z-skaala on liioiteltu kaksikertaiseksi.

5.3 Karkearakeinen maaperä tarkasteltuna mallinnetun saven alapinnan ja kalliopinnan välisenä erotuksena

Karkearakeisen maaperän laskennallinen paksuus saven alapinnan (Anttila 2023) ja tässä työssä mallinnetun kalliopinnan välissä on suurimmillaan niillä alueilla, joilla kallion pinta on alimmillaan ja muodostaa painanteita (kuva 30). Kalliopaljastumia ympäröivillä alueilla taas vastaavasti karkearakeiset maakerrokset ovat ohuimmillaan. Alueen itäosassa erottuu pohjois-eteläsuuntainen Laitilanharju (Lounais-Suomen Seutukaavaliitto 1966, Niemelä *et al.* 1987, kohta ”I” kuvassa 30). Harjun kohdalla on yli 20 m paksuja kerroksia karkearakeista maaperää. Harjun maakerrosten paksuudet eivät ole kuitenkaan jatkuvia, vaan se on rakenteeltaan katkeileva. Harjua on käytetty alueella maanottoon, joten kerrosten nykyinen paksuusvaihtelu voi olla osittain myös maanoton aikaansaamaa (Lounais-Suomen Seutukaavaliitto 1966).

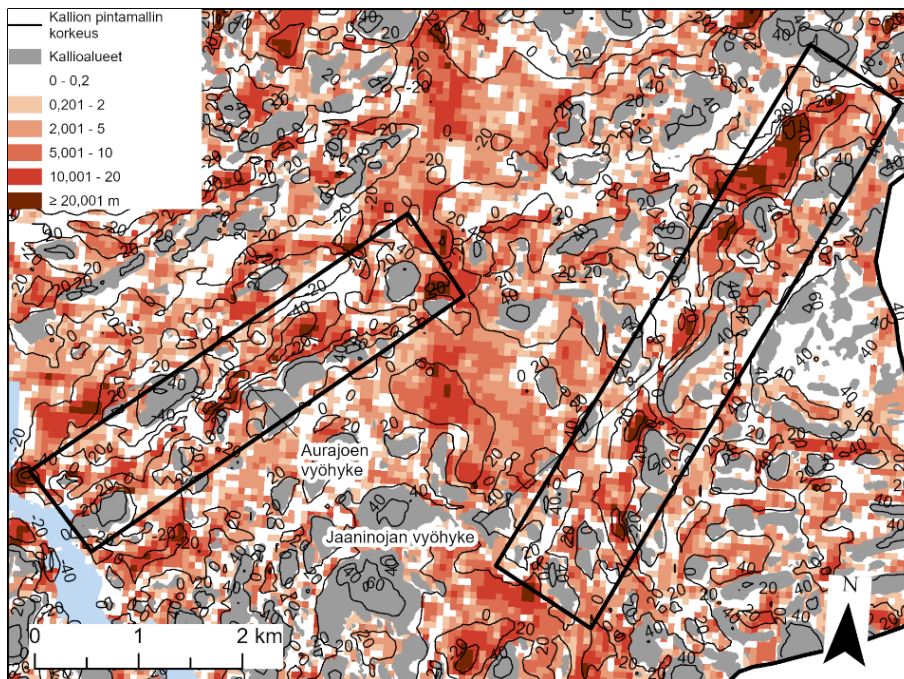


Kuva 30. Karkearakeisen maakerroksen paksuus laskettuna mallinnetun saven alapinnan (Anttila 2023) ja kalliopinnan erotuksena. Merkittävimmät heikkousvyöhykkeiden ulkopuoliset paksut kerrostumat ovat Laitilanharju (kohta ”I”) ja Raisionlahden itäpuolella olevat kerrostumat (kohta ”II”) Merialueiden rajauksessa on käytetty nykyistä rantaviivaa (Suomen ympäristökeskus 2021).

Huomattavan paksuja savenalaisia karkearakeisen maaperän kerroksia on kallioperän painanteissa Aurajoen ja Jaaninojan vyöhykkeiden lisäksi myös Raisionlahden itäpuolella

(kohta ”II” kuvassa 30). Alueella on rasteritarkastelun perusteella jopa yli 30 metriä paksuja kerroksia karkearakeista maaperää saven alapuolella. Alueen kairauksissa on jopa noin 20 m paksuja karkearakeisen maaperän kairauksia, jotka ovat päättyneet kiveen tai lohkareseen, mutta ei juuri lainkaan kalliovarmennettuja kairauksia. Karkearakeisen maakerroksen paksuuden jatkuvuuksien tarkkaa luotettavuutta on mahdoton arvioida alueella yksittäisten kairausten perusteella.

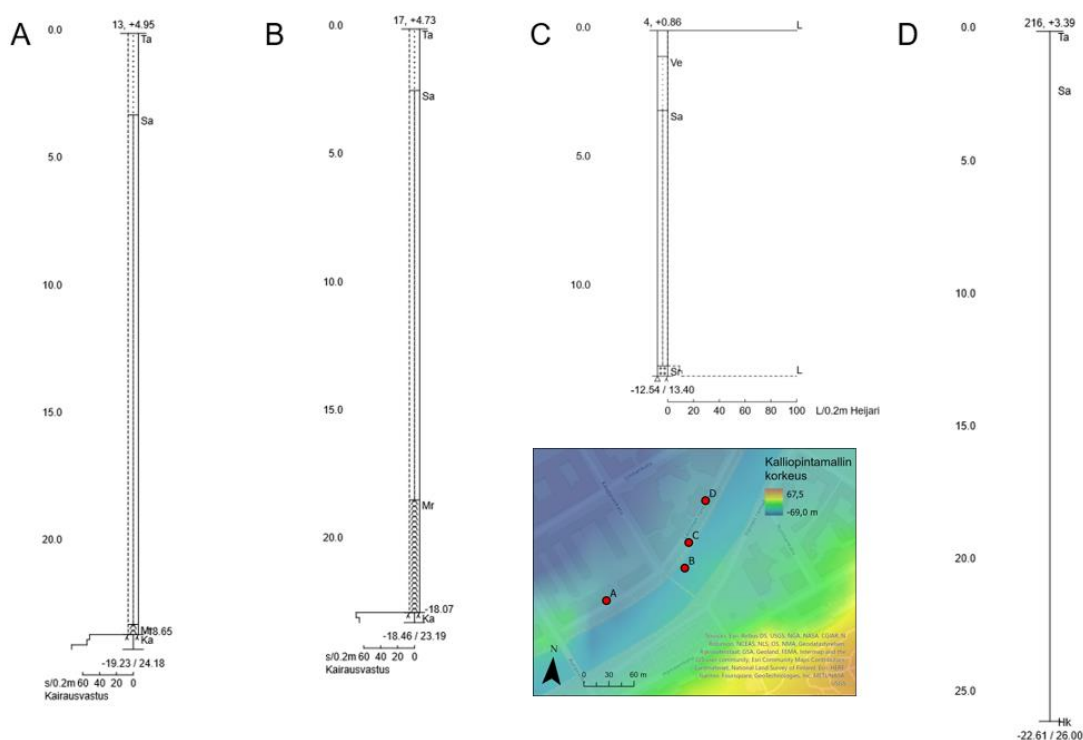
Aurajoen ja Jaaninojan vyöhykkeissä karkearakeisen maakerroksen paksuudet ovat myös tämän tarkastelutavan mukaan vaihtelevia (kuva 31). Syvimmissä painanteissa, joissa kalliopinta laskee -40 m alapuolelle, on myös suurimmat karkearakeisen maakerroksen paksuudet, ja rinteillä ohuimmat. Tämän tarkastelutavan perusteella rinteillä on alueita, joissa ei ole karkearakeista maaperää lainkaan tai kerros on hyvin ohut, ja savi voi olla suoraan kallion päällä, kuten poikkileikkaustarkasteluissakin havaittiin (kuva 29). Saven alapinnan ja kalliopinnan välinen erotus on kuitenkin rasteripintoja vertailemalla huomattavasti suurempi kuin poikkileikkaustarkastelussa kairauksissa havaitut karkearakeisen maakerroksen paksuudet. Rasteritarkastelussa karkearakeisen maakerroksen paksuudet ovat paikoin yli 20 m, kun taas poikkileikkaustarkastelussa paksuin kerros oli 5,8 m. Rasteripintojen erotukseen perustuvan tarkastelutavan luotettavuuden arviointi vaatisi laajempaa yksittäisten kairausten tarkastelua.



Kuva 31. Karkearakeisen maakerroksen paksuus laskettuna mallinnetun savon alapinnan (Anttila 2023) ja kalliopinnan erotuksena Aurajoen ja Jaaninojan vyöhykkeissä. Merialueiden rajauksessa on käytetty nykyistä rantaviivaa (Suomen ympäristökeskus 2021).

Karkearakeisen maaperän koostumus vaihtelee kairauksissa sekä koostumukseltaan että alueellisesti. Kairauksissa esiintyy moreenia, soraa ja hiekkaa, ja osa karkearakeisen maaperän kerroksista on todennäköisesti myös niiden sekoituksia. Kallioperän laaksosysteemit ovat olleet jäätikön perääntymisvaiheessa merkittäviä sulamisvesireittejä, joten niissä voi olla veden lajittelemia maalajeja ja moreenia vaihtelevina kerroksina.

Esimerkiksi Aurajoen vyöhykkeessä suhteellisen lyhyellä, noin 200 m matkalla karkearakeisen maaperän tulkinnat kairauksissa ovat sekä koostumukseltaan että paksuudeltaan vaihtelevia (kuva 32). Eteläisimmissä kairauksissa karkearakeinen maalaji on moreenia, mutta kerros on paksuudeltaan eteläisimmässä kairauksessa useita metrejä ohuempi (kohta ”A” kuvassa 32) verrattuna pohjoisempaan kairaukseen (kohta ”B” kuvassa 32). Kairauksessa C kuvassa 32 karkearakeinen maaperä on taas soraa, ja sen yläpinta on yli viisi metriä korkeammalla kuin eteläisempien kairausten moreenin yläpinta. Pohjoisimmassa kairauksessa (kohta ”D” kuvassa 32) kerros on tulkittu hiekaksi ja sen yläpinta on moreenien yläpintoja ja kalliopintaa alempana. Eroavaisuudet voivat olla todellisia sekä paksuuden että maaperän laadun suhteen, mutta on myös mahdollista, että kairaajan tulkinnat aiheuttavat näitä eroja.

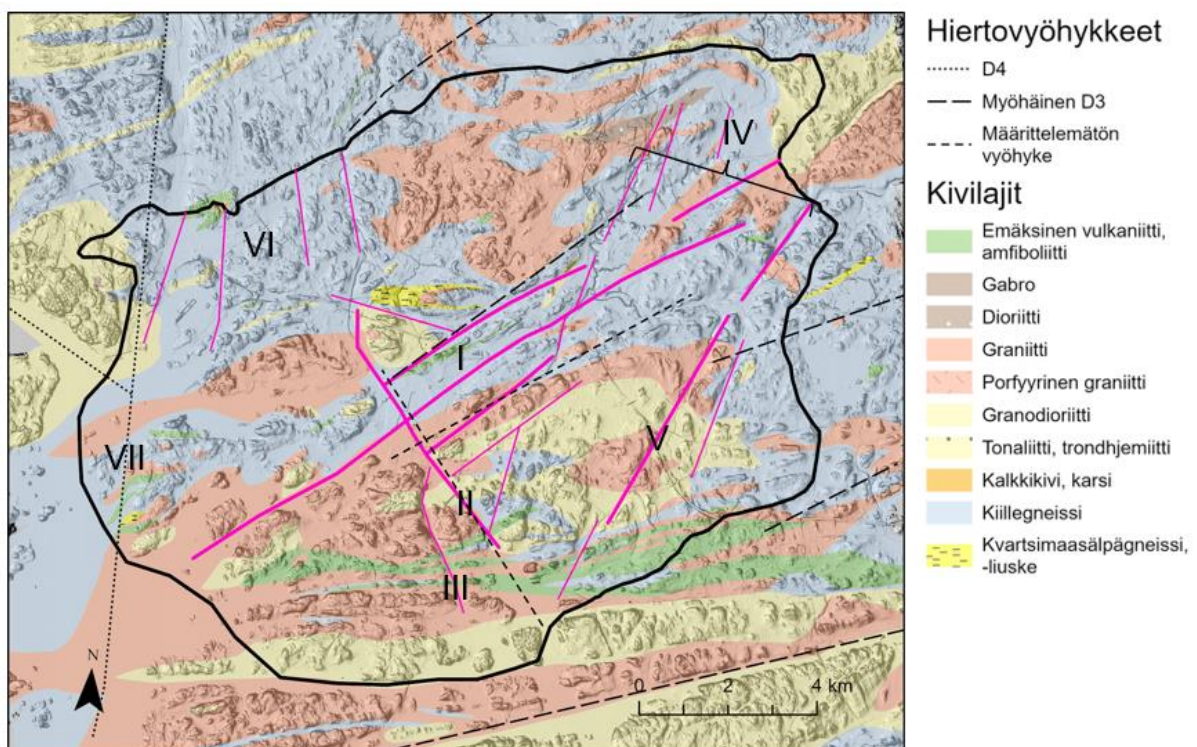


Kuva 32. Esimerkkikairauksia Aurajoen vyöhykkeen kairauksista, joissa on esiintynyt karkearakeisia maalajeja, kuten moreenia, soraa ja hiekkaa. Taustakartta Esri (2021).

6 Keskustelu

6.1 Vertailu aiempiin kallioperän rakennemalleihin

Verrattuna aiempiin rakennetulkintoihin (Lindberg *et al.* 1994, Väisänen & Hölttä 1999) tutkimusalueen keskiosan ~ENE–WSW-suuntaiset rakennesuunnat ovat keskenään lähes samanlaiset (kohta ”I” kuvassa 33), mutta vyöhykkeitä havaittiin kaksi lisää. Myös ~NNW–SSE-suuntainen Pitkänsalmen vyöhyke noudattaa suunnaltaan ja pituudeltaan aiempia tulkintoja (kohta ”II” kuvassa 33). Tästä vyöhykkeestä mahdollisesti haarautuvaa vyöhykettä ei aiemmissa tulkinnoissa ole havaittu (kohta ”III” kuvassa 33). Tutkimusalueen itäosissa havaittuja, osittain katkeilevia ~NNE–SSW-suuntaisia vyöhykkeitä ei ole aiemmissa rakennetulkintoissa havaittu (kohta ”IV” kuvassa 33). Näihin kuuluu myös tässä tutkimuksessa jyrkkäseinäiseksi havaittu Jaaninojan vyöhyke (kohta ”V” kuvassa 33). Tutkimusalueen luoteisosan lyhyitä ~N–S-suuntaisia vyöhykkeitä (kohta ”VI” kuvassa 33) ei ole myöskään aiemmissa rakennetulkintoissa, mutta ne esiintyvät lähes samansuuntaisen tutkimusalueen itäosan D₄-vaiheen vyöhykkeen läheisyydessä (kohta ”VII” kuvassa 33).



Kuva 33. Tutkimusalueen kivilajit, aiempien tutkimusten (Lindberg *et al.* 1994, Väisänen & Hölttä 1999) hiertovyöhykkeet sekä tässä tutkimuksessa havaitut painanteet (pinkit viivat).

Kallion pintamallin perusteella Pirilän (2016) havainnot pienipiirteisestä vaihtelusta pitävät paikkansa, kuten myös samansuuntaiset, osittain polveilevat laaksosysteemit Niemelän (1987) kuvailuissa. Erityisesti alueen itäosan vyöhykkeet muodostavat polveilevia rakenteita (kohta ”IV” kuvassa 33). Glasiaalieroosion vaikutus näkyy alueella: todennäköiset heikkousvyöhykkeet ovat rapautuneet ympäristöään syvemmälle, jäätikkö on erodoinut niitä ja heikkousvyöhykkeet muodostavat nyt lineaarisia savitäyhteisiä painanteita.

Karkearakeisen maaperän paksuusvaihtelut näkyvät myös tämän mallin ja lähtöaineiston tarkastelussa: paikoin savi on suoraan kallion päällä, ja paikoin on paksujakin karkearakeisen maaperän kerroksia. Sekä poikkileikkaustarkastelussa että rasteripintoja vertailemalla havaittiin paksuimpien kerrosten sijaitsevan kallioperän painanteissa. Paksuusarviot eri tarkastelutavoilla vaihtelevat paljon, mutta paksuushavainnot vaihtelevat myös suhteellisen lähellä olevissa kairauksissa paljon, joten luotettavaa käsitystä karkearakeisen kerroksen paksuuksista ei saatu. Painanteissa näyttäisi kuitenkin olevan paikoin useita metrejä karkearakeista maaperää, ja paikoin kerrokset ovat hyvinkin paksuja, jopa yli 20 m.

6.2 Geoteknisten kairausten käytettävyys ja luotettavuus kalliopinnan mallinnuksessa

Kairaustiheydet vaihtelevat tutkimusalueella paljon. Tantun (2015) tutkimuksen mukaista 0,5 m luotettavuutta ei voida mallissa saavuttaa, koska maaperän paksuus on liian suuri ja 20 metrin keskimääräinen kairaustiheys on huomattavasti suurempi kuin suositeltu 0,5 m. Myöskään kairausten sijoittuminen ei ole kaikilla alueilla kalliopintamallin laatimisen kannalta hyödyllisin. Erityisen hyödyllisiä kairauksia olisivat painanteiden poikki kulkevat kairauslinjat. Esimerkiksi Aurajoen painanteessa niitä on tehty vain siltojen kohdalla.

Osa kairauksista on hyvinkin vanhoja, ja niiden luotettavuudessa voi olla ongelmia kalustosta, aineiston digitoinnista ja korkeusjärjestelmien eroavaisuuksista johtuen. Koska maan pintaa on vuosikymmenten aikana muokattu alueella, se on paikoin jopa alempana kuin vanhat kairaukset. Mallin päivityksessä olisikin syytä tehdä kairausten päättymispisteiden vertailu LiDAR-aineistoon ja jättää mallinnuksesta pois ne kairaukset, joiden päättymispiste on ylempänä kuin nykyinen maan pinta. Toisaalta kyse voi olla esimerkiksi louhinnasta, jolloin luonnollinen kallionpinnan muodon vaihtelu ei tule esille. Kairausten vertailussa maan pinnan tasoon tulisi esille myös kairauksia, joissa on virheellinen kairauksen lähtökorkeustieto. Tässä tarkastelussa tulisi verrata kairauksen lähtötaso maan pinnan korkeuteen, ja jos näissä on huomattava ero, tulisi kairauksen käytettävyyttä mallinnuksessa arvioida. Joskus näillä eroilla

voi olla luonnollinen selitys, koska esimerkiksi täyttömaat ovat voineet nostaa maan pintaa, mutta kairausaineiston virheitäkin esiintyy.

Ohjaavien kairausten osalta mallin epäluotettavuutta lisäävät ne kairaukset, jotka jostain syystä ovat päättäneet huomattavasti ylemmäs kuin todellinen kalliopinta. Tällainen todennäköinen kairaus tuli esille Jaaninojan poikkileikkaustarkastelussa. Mallia voisi parantaa luokittelemalla ohjaavat kairaukset kahteen ryhmään mallinnettujen pintojen avulla. Varmennettujen kairausten ja avokallioaineiston avulla kolmioitua pintaa verrataan pintaan, joka on tehty em. aineistojen lisäksi ohjaavien kairausten avulla. Näitä kahta pintaa vertaamalla voitaisiin mallinnukseen valita vain ne kairaukset, jotka alentavat kallion pintaa. Toisaalta tällainen aineiston rajaaminen jättää todennäköisesti osan oikeaa kalliopintaa kuvaavista kairauksista pois. Tässä työssä käyttämättä jätetyt määräsyyvyteen tai tiiviiseen maakerrokseen päättäneet kairaukset tulisi ottaa mukaan myös em. pintojen vertailuun, jolloin kalliopinta ei mallissa nousisi näitä kairauksia ylemmäs, kuten esimerkiksi Aurajoen poikkileikkaustarkastelussa ilmeni.

Yksi tapa parantaa mallin luotettavuutta olisi käydä tutkimusalue läpi poikkileikkausten avulla etsien epäloogisia kohtia esimerkiksi moreenin yläpinnan tai saven alapinnan pisteaineiston avulla. Tällaista aineistoa ei ole mahdollista saada suoraan taulukkomuotoon Infra-formaatista, joten se vaatisi paljon manuaalista työtä.

Puutteista huolimatta tässä työssä laadittu kalliopinnan korkeusmalli antaa kuitenkin kattavan kuvan tutkimusalueen yleisistä rakennesuunnista, kallioperän painanteista ja mahdollisista heikkousvyöhykkeistä. Interpoloitu kalliopinta noudattelee kairausten mukaisia kalliopinnan korkeuksia, muttei täysin tarkasti. Kallion pinnan korkeudessa on epätarkkuuksia, ja pienipiirteisempi vaihtelu ei näy pinnassa 30 m resoluution takia. Laajan alueellisen kattavuuden ja poikkileikkaustarkastelun perusteella malli on kuitenkin riittävän luotettava aluesuunnittelun pohjaksi ja antaa yleiskäsityksen tietyn alueen kalliopinnan sijainnista ja mahdollisesta rikkonaisuudesta.

7 Johtopäätökset

Geoteknisten kairausten avulla saadaan tuotettua kallioperän topografinen malli, jonka luotettavuus riippuu i) kalliovarmennettujen kairausten määrästä ja alueellisesta jakaumasta sekä ii) ohjaavien kairausten määrästä ja alueellisesta jakaumasta. Mallinnuksessa tulisi käyttää ensisijaisesti kalliovarmennettuja kairauksia ja kiveen, lohkareseen, kiilautumiseen tai varmentamattomasti kallioon päätyneitä kairauksia laskemalla niiden päättymissyvyyttä. Näiden kairausten avulla mallinnettua kalliopintaa alentavien muiden kairausten käyttäminen tarkentaisi vielä mallia. Tässä työssä tuotettu kallion pintamalli on resoluutioltaan ja luotettavuudeltaan sopiva aluesuunnitteluun ja maapeitteiden paksuuden sekä kallioperän heikkousvyöhykkeiden sijainnin arviointiin.

Tässä tutkimuksessa havaittiin lineaarisia painanteita ~ENE–WSW-suunnassa tutkimusalueen keskiosassa, ~NNE-SSW-suunnassa alueen itäosassa, ~N-S-suunnassa alueen luoteisosassa sekä yksittäinen ~NNW-SSE-suuntainen Pitkäsalmen painanne. Näiden painanteiden oletetaan edustavan hauraita kallioperän rakenteita, jotka ovat rapautuneet ympäristöönsä syvemmälle ja joista jäätikkö on erodoinut rapautunutta materiaalia pois. Havaitut vyöhykkeet myös korreloivat suurelta osin alueelta aiemmin laadittujen rakennetulkintojen kanssa (Lindberg *et al.* 1994, Väisänen & Hölttä 1999), joten todennäköisesti kyse on hauraista rakenteista. Alueella on ainakin kaksi jyrkkäseinäistä ja jatkuvaa vyöhykettä: Aurajoen vyöhyke ja Jaaninojan vyöhyke. Ne eivät ole jäätikön virtaussuunnan mukaisia (Palmu *et al.* 2021), joten glasiaalieroosio ei voi olla ainoa painanteiden olemassaoloa selittävä päätekijä.

Karkearakeisen maaperän paksuudet vaihtelevat näissä painanteissa, ja paksuimmillaan ne voivat olla jopa yli 30 m, mutta varsinkin laaksosysteemien reunoilla havaittiin alueita, joilla savi on suoraan kallion päällä. Paksuimmat karkearakeiset maakerrokset sijoittuvat syvimpiin kallioperän painanteisiin. Karkearakeisen maaperän koostumus ja alueellinen jakautuminen vaihtelevat voimakkaasti.

Kiitokset

Haluan kiittää asiantuntevasta ja kannustavasta ohjauksesta professori Pietari Skyttää. Työtäni ovat tukeneet myös muut Turku 3D -tiimiläiset: Antti Ojala, Noora Anttila ja Eemi Ruuska. Haluan kiittää myös työtovereitani Emilia Kososta ja Noora Hornborgia avusta sekä

Geologian tutkimuskeskusta mahdollisuudesta yhdistää joustavasti työelämä ja opiskelu. Tärkeimmät tukijani ovat kuitenkin olleet aviopuolisoni ja lapset, jotka ovat väsymättä jaksaneet kannustaa ja tukea minua opintojeni loppuun saattamisessa. Mallinnuksessa käytin Petroleum Experts Ltd:n MOVE-, Seequentin Leapfrog Geo-, Esrin ArcGIS Pro- ja Novatronin 3D-Win-ohjelmaa akateemisilla lisensseillä.

Lähteet

- Anttila, N. 2023. Construction of 3D clay thickness models of Turku for urban planning and infrastructure. Pro gradu -tutkielma, Turun yliopisto. 57 s.
- Barton, N., Lien, R. & Lunde J. 1974. Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support. *Rock Mechanics Felsmechanik Mecanique des Roches* 6: 189-236.
- Behrestaghi, M. H. N., Seshagiri Rao, K. & Ramamurthy, T. 1996. Engineering geological and geotechnical responses of schistose rocks from dam project areas in India. *Engineering Geology* 44: 183-201.
- Cho, J-W., Kim, H., Seokwon, J. & Kik-Bok, M. 2012. Deformation and strength anisotropy of Asan gneiss, Boryeong shale, and Yeoncheon schist. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 50: 158-169.
- Chopin, F., Korja, A., Nikkilä, K., Hölttä, P., Korja, T., Abdel Zaher, M., Kurhila, M., Eklund, O. & Rämö, O.T. 2020. The Vaasa Migmatitic Complex (Svecofennian Orogen, Finland): Buildup of a LP-HT Dome During Nuna Assembly. *Tectonics* 39, e2019TC005583.
- Donath F. A. 1961. Experimental study of shear failure in anisotropic rocks. *Geological Society of America Bulletin* 72: 985–90.
- Ehlers, C., Lindroos, A. & Selonen, O. 1993. The late Svecofennian granite-migmatite zone of southern Finland—a belt of transpressive deformation and granite emplacement. *Precambrian Research* 64, 295–309.
- Eronen, M., Glückert, G., Hatakka, L., van de Plassche, O., van der Plicht, J. & Rantala, P., 2001. Rates of Holocene isostatic uplift and relative sea-level lowering of the Baltic in SW Finland based on studies of isolation contacts. *Boreas* 30, 17–30.
- Esri. 2021. World Topographic Map. 2021. Sources: Esri, HERE, Garmin, Intermap, INCREMENT P, GEBCO, USGS, FAO, NPS, NRCAN, GeoBase, IGN, Kadaster NL, Ordnance Survey, Esri Japan, METI, Esri China (Hong Kong), © OpenStreetMap contributors, GIS User Community.
https://services.arcgisonline.com/ArcGIS/rest/services/World_Topo_Map/MapServer
- Esri. 2022a. Generate Points Along Lines (Data Management). ArcGIS Pro 2.8. ArcGIS Pro geoprocessing tool reference. 6.5.2022. <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/2.8/tool-reference/data-management/generate-points-along-lines.htm>

- Esri. 2022b. Extract Values to Points (Spatial Analyst). ArcGIS Pro 2.8. ArcGIS Pro geoprocessing tool reference. 6.5.2022. <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/2.8/tool-reference/spatial-analyst/extract-values-to-points.htm>
- Esri. 2022c. Raster to Point (Conversion). ArcGIS Pro 2.8. ArcGIS Pro geoprocessing tool reference. 6.5.2022. <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/2.8/tool-reference/conversion/raster-to-point.htm>
- Esri. 2022d. Clip (Analysis). ArcGIS Pro 2.8. ArcGIS Pro geoprocessing tool reference. 6.5.2022. <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/2.8/tool-reference/analysis/clip.htm>
- Esri. 2022e. What is empirical Bayesian kriging? ArcGIS Pro 3.0. 25.12.2022. [https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/help/analysis/geostatistical-analyst/what-is-empirical-bayesian-kriging-.htm#:~:text=Empirical%20Bayesian%20kriging%20\(EBK\)%20is,building%20a%20valid%20kriging%20model.](https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/help/analysis/geostatistical-analyst/what-is-empirical-bayesian-kriging-.htm#:~:text=Empirical%20Bayesian%20kriging%20(EBK)%20is,building%20a%20valid%20kriging%20model.)
- Esri. 2023a. Surface Parameters (Spatial Analyst). ArcGIS Pro 3.0. 3.1.2023. <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/surface-parameters.htm>
- Esri. 2023b. Raster Calculator (Spatial Analyst). ArcGIS Pro 3.0. 2.1.2023. <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/raster-calculator.htm>
- Eyles, N., Putkinen, N., Sookhan, S. & Arbelaez-Moreno, L. 2016. Erosional origin of drumlins and megaridges. *Sedimentary Geology* 338, 2–23.
- Gardemeister, R., Johansson, S., Korhonen, P., Patrikainen, P., Tuisku, T. & Vähäsarja, P. 1974. Rakennusgeologisen kallioluokituksen soveltaminen. VTT Geotekniikan laboratorio, tiedonanto 25. Espoo. 38 s.
- Geologian tutkimuskeskus (GTK). 2016. Suomen geologinen kartta – Kallioperä 1:1 000 000. 22.04.2023. <https://hakku.gtk.fi/fi/locations/search>
- Geologian tutkimuskeskus (GTK). 2021. Pohjatutkimusrekisteri. <https://gtdata.gtk.fi/Pohjatutkimukset/index.html>
- Geologian tutkimuskeskus (GTK). 2022a. Maalajit 1:20 000/1:50 000. 8.5.2022. <https://hakku.gtk.fi/fi/locations/search>
- Glückert, G. 1967. Post-glacial shore-level displacement of the Baltic in SW Finland. *Annales Academiae Scientiarum Fennicae. Series A. III. Geologica-Geographica*. Suomalainen Tiedeakatemia, Helsinki.

- Grimstad, E. & Barton, N. 1993. Updating of the Q-System for NMT. Proceedings of the International Symposium on Sprayed Concrete, Fagernes, 22-26 October 1993, 46-66.
- Haavisto-Hyvärinen, M. & Kutvonen, H. 2007. Maaperäkartan käyttöopas. Geologian tutkimuskeskus, Espoo. 61 s.
- Hermansson, T., Stephens, M.B., Corfu, F., Page, L.M., Andersson, J., 2008. Migratory tectonic switching, western Svecofennian orogen, central Sweden: Constraints from U/Pb zircon and titanite geochronology. *Precambrian Research* 161, 250–278.
- Hoek, E. 1964. Fractures of anisotropic rock. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy* 64: 501-518.
- Hoek, E., Kaiser P. K. & Bawden, W. F. 1995. Support of underground excavations in hard rock. A. A. Balkema, Rotterdam. 225 s.
- Huhma, H. 1986. Sm-Nd, U-Pb and Pb-Pb isotopic evidence for the origin of the Early Proterozoic Svecokarelian crust in Finland. *Geological Survey of Finland, Bulletin* 337. 48 p.
- Hölttä, P. & Heilimo, E. 2017. Metamorphic Map of Finland. Special Paper - Geological Survey of Finland. 60. 75–126.
- Jääskeläinen, R. 2011. Geotekniikan perusteet. *Tammertekniikka*, Jyväskylä. 379 s.
- Kara, J., Leskelä, T., Väisänen, M., Skyttä, P., Lahaye, Y., Tiainen, M. & Leväniemi, H. 2021. Early Svecofennian rift-related magmatism: Geochemistry, U-Pb-Hf zircon isotope data and tectonic setting of the Au-hosting Uunimäki gabbro, SW Finland. *Precambrian Research* 364, 106364.
- Karhunen, R. 2004. Iniön ja Turun kartta-alueiden kallioperä. *Kallioperäkarttojen selitykset, lehdet 1041 ja 1043*. Geologian tutkimuskeskus, Espoo. 76 s.
- Korsman, K., Koistinen, T., Kohonen, J., Wennerström, M., Ekdahl, E., Honkamo, M., Idman, H. and Pekkala, Y. (Toim.) 1997. Bedrock map of Finland 1:1000000. *Geol. Surv. Finland*, Espoo.
- Krabbendam, M. & Bradwell, T. (2014) Quaternary evolution of glaciated gneiss terrains: pre-glacial weathering vs. glacial erosion. *Quaternary Science Reviews*, 95, 20–42.
- Krivoruchko, K. & Gribov, A. 2019. Evaluation of empirical Bayesian kriging. *Spatial Statistics* 32, 100368.
- Kroonenberg, S.B. & Melitz, P.J., 1983. Summit levels, bedrock control and the etchplain concept in the basement of Suriname. *Geologie en Mijnbouw* 62, 389–399.

- Kurhila, M., Vaasjoki, M., Mänttari, I., Rämö, T. & Nironen, M. 2005. U-Pb ages and Nd isotope characteristics of the lateorogenic, migmatizing microcline granites in southwestern Finland. *Bulletin of the Geological Society of Finland*, Vol. 77, 105-128.
- Kähkönen, Y. 1998. Svekofenniset liuskealueet. Teoksessa Lehtinen, M., Nurmi, P. & Rämö, T. (toim.) 1998. 3000 vuosimiljoonaa, Suomen Kallioperä. Suomen Geologinen Seura, Jyväskylä. 371 s.
- Kähkönen, Y. 2005. Svecofennian supracrustal rocks. *Developments in Precambrian Geology* 14, 343–405.
- Lahtinen, R., Korja, A., Nironen, M., 2005. Paleoproterozoic tectonic evolution. *Precambrian Geology of Finland* 481–532.
- Lahtinen, R., Korja, A., Nironen, M. & Heikkinen, P., 2009. Palaeoproterozoic accretionary processes in Fennoscandia. *Geol. Soc., London, Spec. Publ.* 318, 237–256.
- Lahtinen, R., Johnston, S.T., Nironen, M., 2014. The Bothnian coupled oroclinal of the Svecofennian Orogen: a Palaeoproterozoic terrane wreck. *Terra Nova* 26, 330–335.
- Lahtinen, R., Huhma, H., Lahaye, Y., Kousa, J. & Luukas, J. 2015. Archean-Proterozoic collision boundary in central Fennoscandia: Revisited. *Precambrian Research* 261, 127-165.
- Lindberg, B., Ehlers, C. & Edén, P. 1994. Suomen geologinen kartta, kallioperäkartta 1:100 000. Karttalehti: 1043 - Turku. Geologian tutkimuskeskus, Espoo.
- Lounais-Suomen Seutukaavaliitto, 1966. Turun seudun geologisen maaperäkartoituksen selitys vuodelta 1966. Geologian tutkimuskeskus, maaperäosasto. 15 s.
- Maanmittauslaitos. 2022a. Korkeusmalli (2 m). 8.5.2022.
<https://www.maanmittauslaitos.fi/kartat-ja-paikkatieto/asiantuntevalle-kayttajalle/tuotekuvaukset/korkeusmalli-2-m>
- Maanmittauslaitos. 2022b. Korkeusmalli (10 m). 8.5.2022.
<https://www.maanmittauslaitos.fi/kartat-ja-paikkatieto/asiantuntevalle-kayttajalle/tuotekuvaukset/korkeusmalli-10-m>
- Mäkinen, T. 2017. Pohjatutkimukset vaativissa erityisolosuhteissa. Diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto. 58 s.
- Nesbitt, H. W. & Markovics, G. 1997. Weathering of granodioritic crust, long-term storage of elements in weathering profiles, and petrogenesis of siliciclastic sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 8, 1653–1670.

- Niemelä, J. (toim.), Stén, C-G., Taka, M. & Winterhalter, B. 1987. Turun-Salon seudun maaperä. Maaperäkarttojen selitykset, lehdet 1043 ja 2021. Suomen geologinen kartta, 1:100 000. Geologian tutkimuskeskus, Espoo. 83 s.
- Nironen, M., 1997. The Svecofennian Orogen: a tectonic model. *Precambrian Research* 86, 21–44.
- Nironen, M. 2017. Guide to the Geological Map of Finland – Bedrock 1:1 000 000. Geological Survey of Finland, Special Paper 60, 41–76.
- Novatron. 2023. 3D-Win kotisivu. 23.4.202. <https://3dwin.fi/>
- Ojala, A.E.K., Palmu, J.-P., Åberg, A., Åberg, S. & Virkki, H., 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, 127–144.
- Ojala, E. K. A., Virtasalo, J. J., Lindsberg, E. & Markovaara-Koivisto, M. 2021. Basin-Scale 3D Sedimentary Modelling: An Approach to Subdivide Baltic Sea Onshore Sediments for Land use and Construction. *Geotechnical and Geological Engineering* 39, 4855–4876.
- Palmström, A. & Stille, H. 2010. *Rock engineering*. Thomas Telford Ltd, Lontoo. 311 s.
- Palmu, J.-P., Ojala, A. E. K., Virtasalo, J., Putkinen, N., Kohonen, J. & Sarala, P. 2021. Classification system of Superficial (Quaternary) Geological Units in Finland. Geological Survey of Finland, Bulletin 412, 115-169.
- Pirilä, L. 2016. Savikerrostumien syntyhistoria, niiden paksuus- ja ominaisuusvaihtelut sekä vaikutukset yhdyskuntatekniikkaan Turun alueella. Pro gradu -tutkielma, Turun yliopisto. 135 s.
- Raitamäki, K. 2014. Katu- ja piharakenteiden painumien ottaminen huomioon alue- ja rakennussuunnittelussa. Diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto. 112 s.
- Ramamurthy, T., Venkatappa Rao, G. & Singh, J. 1993. Engineering behaviour of phyllites. *Engineering Geology* 33: 209-225.
- Rutland, R.R., Williams, I.S., Korsman, K., 2004. Pre-1.91 Ga deformation and metamorphism in the Palaeoproterozoic Vammala Migmatite Belt, southern Finland, and implications for Svecofennian tectonics. *Bulletin of the Geological Society of Finland* 76, 93–140.
- Seequent. 2023. Leapfrog Geo -kotisivu. 10.6.2023. <https://www.seequent.com/products-solutions/leapfrog-geo/#overview>

- Shaw, R., 1997. Variations in sub-tropical deep weathering profiles over the Kowloon Granite, Hong Kong. *Journal of the Geological Society* 154, 1077–1085.
- Skyttä, P., Nordbäck, N., Ojala, A., Putkinen, N., Aaltonen, I., Engström, J., Mattila, J. & Ovaskainen, N. 2023. The interplay of bedrock fractures and glacial erosion in defining the present-day land surface topography in mesoscopically isotropic crystalline rocks. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1–13.
- Stephens, M.B. & Andersson, J. 2015. Migmatization related to mafic underplating and intra- or back-arc spreading above a subduction boundary in a 2.0–1.8 Ga accretionary orogen, Sweden. *Precambrian Research* 264, 235–257.
- Suomen Geoteknillinen Yhdistys (SGY). 1981. Kairausopas 1, painokairaus, tärykairaus, heijarikairaus. Rakentajain kustannus Oy. Helsinki. 11 s.
- Suomen Geoteknillinen Yhdistys (SGY). 1986. Kairausopas V, porakonekairaus. 9 s.
- Suomen Geoteknillinen Yhdistys (SGY). 2001. Kairausopas VI, CPTU/Puristinkairaus, puristin-heijarikairaus, versio 1.0. 91 s.
- Suomen Geoteknillinen Yhdistys (SGY). 2018. Infra -pohjatutkimusformaatti, versio 2.5. SGY 204. 20 s.
- Suomen Geoteknillinen Yhdistys (SGY). 2022. Kairausopas II. Siipileikkauskoe. 63 s.
- Suomen ympäristökeskus. 2021. Ranta10 – rantaviiva 1:10 000-paikkatietoaineisto. 28.12.2022. <https://ckan.ymparisto.fi/dataset/ranta10-rantaviiva-1-10-000>
- Suominen, V. 1991. The chronostratigraphy of southwestern Finland with special reference to Postjotnian and Subjotnian diabases. *Geological Survey of Finland, Bulletin* 356. 100 s.
- Stroeven, A. P., Hättestrand, C., Kleman, J., Heyman, J., Fabel, D., Fredin, O., Goodfellow, B. W., Harbor, J. M., Jansen, J. D., Olsen, L., Caffee, M. W., Fink, D., Lundqvist, J., Rosqvist, G. C., Strömberg, B. & Jansson, K. N. 2016 Deglaciation of Fennoscandia. *Quaternary Science Reviews* 147: 91–121.
- Tanttu, K. 2015. Kalliopintamallin luotettavuuden analysointi porakonekairausten määrän ja laadun perusteella. *Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä*, 27/2015. 67 s.
- Torvela, T., Mänttari, I. & Hermansson, T. 2007. Timing of deformation phases within the South Finland shear zone, SW Finland. *Precambrian Research* 160: 277–298.
- Traficom. 2022. Merikartan syvyystiedot: syvyyspisteet ja syvyyskäyrät. 28.12.2022. <https://julkinen.traficom.fi/oskari/>
- Turun kaupunki. 2023. Yleiskaava 2029, Kaavaselostus, Ehdotusvaihe. 151 s.

- Vuorela, A., Penttinen, T. & Lahdenperä, A-M. 2009. Review of Bothnian Sea Shore-Level Displacement Data and Use of a GIS Tool to Estimate Isostatic Uplift. Posiva Working Report, 17. 191 s.
- Väisänen, M. 2002. Tectonic evolution of the palaeoproterozoic Svecofennian orogen in southwestern Finland. *Annales Universitatis Turkuensis, A II*, 154, 143 p.
- Väisänen, M. 2007. Suomen geologinen kartta, kallioperäkartta 1:100 000. Karttalehti: 1044 - Mynämäki. Geologian tutkimuskeskus, Espoo.
- Väisänen, M. & Hölttä, P. 1999. Structural and metamorphic evolution of the Turku migmatite complex, southwestern Finland. *Bulletin of the Geological Society of Finland* 71, Part 1, 177-218.
- Väisänen, M. & Skyttä, P. 2007 Late Svecofennian shear zones in southwestern Finland, *GFF*, 129:1, 55-64.
- Yusof, N. Q. A. M. & Zabidi, H. 2015. Correlation of mineralogical and textural characteristics with engineering properties of granitic rock from Hulu Langat, Selangor. Teoksessa Jaafar, M., Razak, K. A., Ariff, Z. M. & Zabidi, H. (Toim.) 5th International Conference on Recent Advances in Materials, Minerals and Environment (RAMM) & 2nd International Postgraduate Conference on Materials, Mineral and Polymer (MAMIP). *Procedia Chemistry* 19. 1014 s.