



**TURUN
YLIOPISTO**

Matemaattis-luonnontieteellinen
tiedekunta

Kaarinan Littoisten maaperän 3D-mallinnus avoimen lähdekoodin GemPy-kirjastolla

Janne Schmandt

Geologia

LuK-tutkielma

Laajuus: 7 op

9.10.2025

Turku

Turun yliopiston laatujärjestelmän mukaisesti tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu

Turnitin OriginalityCheck -järjestelmällä.

Oppiaine: Geologia

Tekijä: Janne Schmandt

Otsikko: Kaarinan Littoisten maaperän 3D-mallinnus avoimen lähdekoodin GemPy-kirjastolla

Ohjaaja: Eila Hietaharju

Sivumäärä: 46 sivua + 1 liite

Päivämäärä: 9.10.2025

Kaupunkirakentamisen tiivistyessä tarvitaan yhä tarkempaa tietoa rakennuspaikkojen pohjaolosuhteista esimerkiksi 3D-mallien muodossa. Tämä korostuu erityisesti rannikkokaupungeissa, kuten Turussa, joiden maaperää hallitsevat Itämeren eri vaiheissa syntyneet heikosti kantavat savi- ja silttikerrostumat.

Kaupallisia ohjelmistoja 3D-mallintamiseen on tarjolla monipuolisesti, mutta niiden varjopuolina ovat korkeat lisenssihinnat ja suljettu lähdekoodi. Kun taas avoimet, yksinkertaiset ja käyttäjäystävälliset korkean tason ohjelmointirajapinnat ja -kirjastot ovat yleistyneet 2000-luvulla nopeasti. Tästä hyvänä esimerkkinä avoimen lähdekoodin GemPy-kirjasto geologisten 3D-mallien tuottamiseen. GemPyn algoritmi on toteutettu Python-ohjelmointikielillä ja siinä on hyödynnetty Python- taustakirjastoja. Koska GemPy on ns. implisiittinen mallinnusmenetelmä, sen avulla voidaan luoda ja päivittää geologisia 3D-malleja nopeasti ja suhteellisen helposti. Luotettava 3D-mallinnus edellyttää toki paikallisen stratigrafian ja sedimenttiyksiköiden geometrian ymmärtämistä.

Tässä työssä mallinnettiin Turun naapurikaupungin Kaarinan Littoisten alueen maaperää käyttäen GemPy-kirjastoa. Tietolähteenä käytettiin GTK:n avoimen pohjatutkimusrekisterin kautta saatavilla olevia Infra-formaatin TEK-tiedostoja Littoisten alueelta (ei saatavilla Turusta) sekä Maanmittauslaitoksen avointa 2 metrin resoluution korkeusmallia.

Työssä laadittiin Python-ohjelma, joka lukee ja käsittelee TEK-tiedoston ja kirjoittaa csv-tiedostot GemPy:lle lukukelpoiseen muotoon. Ohjelman avulla voidaan tuottaa maaperän 3D-malli pohjatutkimusrekisteristä tai pohjatutkijalta saatavasta TEK-tiedostosta. Pintamalleista ohjelma muodostaa automaattisesti tif- ja dxf-tiedostot jatkokäsittelyä ja -analysointia varten. Työssä keskityttiin ns. kovan pohjan eli hienorakeisten sedimenttien alapinnan mallintamiseen. Poikkileikkaustarkastelun perusteella GemPyn tuottamat pintamallit kuvaavat muodostumien geometriaa johdonmukaisesti ja vastaavat hyvin kairaushavaintoja.

Työssä laadittu Python-ohjelmakoodi on saatavilla GitHubissa. Avoin data ja avoimen lähdekoodin sovellukset tarjoavat merkittäviä mahdollisuuksia geologian alalla ja voivat tukea myös tiivistyvää kaupunkirakentamista edellyttäen, että kaupungit - Turku mukaan lukien - avaavat yhä enemmän pohjatutkimusrekistereitään.

Avainsanat: GemPy, Python, avoin lähdekoodi, avoin data, 3D-mallinnus, hienorakeiset sedimentit, Infra-formaatti, TEK-tiedosto, GTK:n pohjatutkimusrekisteri

Bachelor's thesis

Subject: Geology

Author: Janne Schmandt

Title: 3D modeling of Quaternary sediments in Littoinen, Kaarina, using the open-source GemPy library

Supervisor: Eila Hietaharju

Number of pages: 46 pages + 1 appendix

Date: 9.10.2025

As urbanization leads to urban densification, increasingly accurate information is needed about the ground conditions of construction sites for example in the form of 3D models. This is particularly true in Finland's coastal cities like Turku, where the soil is dominated by fine-grained clay and silt deposits formed during different phases of the Baltic Sea.

A wide range of commercial software for 3D modeling is available, but their drawbacks include high license costs and closed-source code. Meanwhile open, simple, and user-friendly high-level scientific libraries have become increasingly common during 21st century. These include tools for various scientific domains, such as the GemPy library for generating geological 3D models. The GemPy algorithm is implemented in Python and utilizes Python backend libraries. Because GemPy is based on an implicit approach, it enables generating and updating of 3D structural geological models - including diverse structural and stratigraphic features - in a fast and straightforward way. However, understanding the local stratigraphy and the geometry of sediment units is nevertheless essential for reliable 3D modeling.

In this study, Quaternary sediments of the Littoinen area in Kaarina, a neighboring city of Turku, was modeled using the GemPy library. The data source consisted of Infra-format TEK files from the Littoinen area (not available from Turku), obtained from GTK's open Ground investigating register and the National Land Survey of Finland's open 2-meter-resolution digital elevation model.

A Python program was developed that reads and processes TEK files and converts them into CSV files compatible with GemPy. The program can be used to generate a 3D model from a TEK file obtained either from the GTK's Ground investigation register or from a geotechnical investigator. From the surface models, the program automatically generates TIF and DXF files for further processing and analysis. The study focused on modeling the lower boundary of fine-grained sediments (the so-called "hard bottom"). Cross-section analysis shows that the surface models generated by GemPy consistently describe the geometry of the formations and correspond well with drilling observations.

The source code is available on GitHub. Open data and open-source applications offer significant opportunities in geology and can also support urban densification, provided that cities - Turku included - make their ground investigation registers increasingly available.

Keywords: GemPy, Python, open-source, open data, 3D modeling, fine-grained sediments, Infra-format, TEK file, GTK's Ground Investigation Register

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Tutkielman tausta ja teoreettinen viitekehys	3
2.1	Tietokoneavusteinen geologinen 3D-mallinnus	3
2.2	Spatiaalinen interpolointi	4
2.3	Avoimen lähdekoodin GemPy-kirjasto	5
3	Littoisten alueen geologia	7
3.1	Kallioperä	7
3.2	Maaperän synty	8
3.2.1	Veiksel-jäätiköitysmisvaihe ja sen kerrostumat	8
3.2.2	Glasilakustriset ja postglasiaaliset sedimentit ja Itämeren vaiheet	12
3.3	Littoisten alueen maaperä	18
4	Aineisto ja menetelmät	18
4.1	Aineisto	18
4.1.1	Pohjatutkimus	18
4.1.2	Pohjatutkimuksissa käytettävät kairausmenetelmät	19
4.1.3	Infra- ja pohjatutkimusformaatti versio 2.5	23
4.1.4	GTK:n pohjatutkimusrekisteri	25
4.1.5	Aineiston käsittely	25
4.2	Analyysimenetelmät	29
4.2.1	Python-ohjelmointikieli ja sen kirjastot	29
4.2.2	Geologisen 3D-mallin luonti GemPy-kirjastolla	31
5	Verkakylän ja Paltan mallit sekä poikkileikkaus	36
6	Verkakylän ja Paltan mallien ja poikkileikkauksen tarkastelu	41
7	Johtopäätökset	43
8	Lähteet	44
	Liite 1: Tutkielmassa laadittu Python-ohjelmakoodi	47

1 Johdanto

Jos ei Turun seudulla rakennuspaikka osu kapealle harjukaistaleelle tai sopivalle moreeni-mäelle, rakentajan on varauduttava joko paaluttamaan tai louhimaan. Usein molempiin. Pelkällä peruskarttatarkastelulla voidaan päätellä mitä on luvassa ja tarkempaa maaperätietoa saadaan rakennushankkeen suunnitteluvaiheessa tehtävästä pohjatutkimuksesta. Kuitenkin kaupunkirakentamisen tiivistyessä yhä tarkempaa ennakkotietoa pohjarakentamisen luonteesta, määristä ja kustannuksista nykyään tarvitaan. Perinteisen pohjatutkimuksen rinnalle ovatkin yleistyneet 3D-mallit rakennuspaikoilta, joiden ansiosta mm. määrääarviot tarkentuvat.

Rakennusteknisiin tarkoituksiin tehtävät maaperän 3D-mallit tehdään Suomessa pääsääntöisesti suomalaisella 3d-win ohjelmistolla. Python ohjelmointikielellä toteutettu avoimen lähdekoodin GemPy-kirjasto tarjoaa tälle vaihtoehdon. Python on mm. koneoppimisen (ML) ja tekoälyn (AI) tehtävissä suosittu korkean tason ohjelmointikieli, jolla on paljon kehittyneitä avoimen lähdekoodin kirjastoja eri sovellusalueilta. GemPy ei itsessään ole koneoppimiskirjasto, mutta lähtökohtana on ollut kehittää siihen AI-valmius, johon koneoppimiskirjastoja voidaan luontevasti yhdistää.

GemPy on lähtenyt liikkeelle väitöskirjatyönä Saksassa Aachan yliopistossa väittelijänä Miguel de la Varga ja ohjaajana professori Florian Wellmann. GemPyn kehittämiseen on osallistunut koko joukko geotieteilijöitä ja sen tavoite on edistää avoimen lähdekoodin ekosysteemiä geotieteissä (Varga ym., 2019).

Jyrkkäpiirteisillä kalliomäilläään ja syvillä savialtaillaan Turun seutu tarjoaa mielenkiintoisen ympäristön maaperän 3D-mallintamiselle. Turun seudun kallioperä on Svekofenissä orogeniassa 1,93 - 1,87 Ga muodostunutta, perinpohjin erodoitunutta pääasiassa mikroliinigraniittia ja kiillegneissia. Viimeisen jääkauden aikana ja sen jälkeen kalliomäet tasoittuivat kun ensin syntyivät moreenikerrostumat, sitten sulamisvesien muodostamat harjujaksot ja Itämeren eri vaiheissa hienorakeiset savi- ja silttikerrostumat ja viimein maankohoamisen myötä ranta- turve ja tuulikerrostumat.

Tämän työn tarkoitus on esitellä avoimen lähdekoodin GemPy -kirjasto ja luoda sen ja taustakirjastojen avulla kairaus-, korkeusmalli- ja maaperäkartta-aineistosta maankamaramalli Kaarinan Littoisten alueelta. Varsinkin rakennuspaikan valmistelua, rakennussuunnittelua ja kustannuslaskentaa varten kiinnostavinta on kovan pohjan eli tiiviin kitkamaalajikerrostuman tai kalliopinnan mallintaminen. Siksi tässä työssä keskitytään lähinnä kalliopinnan ja saven alapinnan mallintamiseen. Tavoitteena on ennenkaikkeaa selvittää GemPy -kirjaston

soveltuvuus pintamallien luomiseksi maaperän eri kerrostumista.

Avoimen lähdekoodin hengen mukaisesti tarkoitus on lisäksi kirjoittaa python-skripti kairausaineiston käsittelyyn. Skripti lukee pohjatutkimusformaatin mukaisen tek-tiedoston ja kirjoittaa GemPylle lukukelpoisen csv-tiedoston kairausdatasta. Lisäksi GemPyn luomien pintamallien vientitiedostojen (tif, dxf) luonti cad- ja gis-ohjelmistolle sekä kairausdiagrammien piirtotyökalu. Ajatuksena on mahdollisimman automatisoitu prosessi tek-tiedostojen sisäänluvusta geologisen mallin muodostamiseen, visualisointiin ja analysointiin ilman kaupallisia ohjelmistoja.

Epävarmuus on ollut läsnä ja hyvin tiedostettu tekijä geologisen tutkimuksen alkuaajoista lähtien ja tapana on aina ollut korostaa epävarmoja alueita tai rajapintoja (Wellmann ja Caumon, 2018). Kuten kartanteossa yleensäkin myös 3D-mallinnuksessa on tehtävä yleistyksiä. Kartanteossa yleistämisen muotoja ovat mm. valinta, yksinkertaistaminen, sijoittelu, pehmenys, korostaminen ja yhdistäminen (Holopainen, 2015). Erilaisia yleistämisen muotoja on myös tässä työssä tehtävä, jotta tarkoituksen mukainen malli saadaan aikaiseksi.

2 Tutkielman tausta ja teoreettinen viitekehys

2.1 Tietokoneavusteinen geologinen 3D-mallinnus

Geologian tutkimuskohdetta maa- ja kallioperää ei voida suoraan havainnoida paljon pintaa syvemmälle. Tarvitaan menetelmiä tiedonkeruuseen, -käsittelyyn ja analysointiin. Kenttä- ja laboratoriotutkimusten ohella ja niiden tueksi tietomallinnus on yksi keskeinen menetelmä. Geologisten kerrostumien, rakenteiden, rajapintojen ym. mallintaminen on oleellinen osa tutkimusta erityisesti rakennegeologiassa, geotekniikassa, pohjavesigeologiassa, malmigeologiassa jne. Tietokoneavusteisia geologisia mallinnusohjelmia on ollut käytössä jo vuosikymmeniä esimerkiksi Go-CAD, Petrel, GeoModeller ja suomalainen 3D-win. Ne ovat tänä päivänä lukemattomilla ominaisuuksillaan edistyksellisiä, tehokkaita ja monikäyttöisiä ohjelmistoympäristöjä. Kaupallisten ohjelmien varjopuolena on niiden korkea hinta ja suljettu lähdekoodi (Varga ym., 2019).

Geologinen 3D-malli voidaan Niirasan ym. (2019) mukaan luoda tietokoneavusteisesti joko implisiittisesti tai eksplisiittisesti. Implisiittisessä mallinnuksessa geologiset rakenteet ja kerrokset luodaan ohjelman algoritmeilla automaattisesti annetulla data-aineistolla (Niiranen ym., 2019). Eksplisiittisessä taas rakenteet digitoidaan käsin tulkitsemalla poikileikkausaineistosta geologisia piirteitä ja käytetään esimerkiksi spline-interpolaatiota yhdistettäessä datapisteitä viivoiksi ja tasoiksi (Niiranen ym., 2019). Se on Niirasan ym. (2019) mukaan kuitenkin työläs ja hidas menetelmä implisiittiseen menetelmään verrattuna. Etenkin mallin päivittäminen on Niirasan ym. (2019) mukaan implisiittisellä menetelmällä suoraviivaisempaa. Toisaalta mallinnettaessa esim. monimutkaisesti poimuttuneita rakenteita vähillä datapisteillä voi implisiittisellä menetelmällä olla vaikeaa, jos ei mahdotonta onnistua mallintamisessa (Niiranen ym., 2019).

Tiedon määrä ja tietokoneiden laskentateho mm. grafiikkasuorittimien (GPU) ansiosta ovat kasvaneet erityisesti 2000-luvulla valtavasti (Knuutila, 2021). Samaan aikaan vallalla on ollut avoimen koodin julkaisupolitiikka ja suurilla teknologiayrityksillä (Apple, Alphabet, Microsoft, Facebook, Amazon) on ollut käytössään lähes rajattomat resurssit (Knuutila, 2021). Tästä on Knuutilan (2021) mukaan seurannut ns. tekoälyn demokratisaatio. Eli datan määrän, tietokoneiden laskentatehon, avointen algoritmien ja resurssien kasvun myötä avoimet, yksinkertaiset ja käyttäjäystävälliset korkean tason ohjelmointirajapinnat ovat yleistyneet. Rajapintojen taustalla on usein jokin koneoppimiskirjasto (ML) esim. TensorFlow, Stan, pymc, PyTorch, Infer.NET (Knuutila, 2021). Näiden ohjelmointirajapintojen sovelluskohteita on jo lähes kaikilla yhteiskunnan aloilla terveydenhuollosta maatalouteen

ja verkkokaupoista ilmastomuutoksen torjuntaan. Niin myös geologisessa mallintamisessa, josta esimerkkinä tämän tutkielman aiheena oleva GemPy-kirjasto. Siitä ensimmäinen versio julkaistiin vuonna 2019 ja päivitysversio 3.0 vuonna 2024.

2.2 Spatiaalinen interpolointi

Geologisessa 3D-mallinnusprosessissa on Niirasen ym. (2019) mukaan monta vaihetta, kuten aineiston koonti ja evaluointi, aineiston prosessointi ja mallin rakentaminen. Yksi tärkeimmistä vaiheista on Holopaisen ym. (2015) mukaan interpolointimenetelmän valinta. Geologiseen mallintamiseen on tarjolla lukuisia interpolointimenetelmiä kuten, splinit, liukuvan keskiarvojen menetelmä, kaksoislineaarinen interpolointi ja kriging (Holopainen ym., 2015). Soveltuva menetelmä riippuu saatavilla olevan data-aineiston määrästä ja laadusta, niiden sijoittumisesta tutkittavalle alueelle sekä mallinnettavista ominaisuuksista ja käytettävästä ohjelmistosta (Holopainen ym., 2015).

Spatiaalinen interpolointi perustuu spatiaaliseen autokorrelaatioon eli toisiaan lähellä sijaitsevien pisteiden arvot ovat lähempänä toisiaan kuin kauempana sijaitsevien pisteiden arvoja (Holopainen ym., 2015). Interpolointi on mahdollista tehdä joko deterministisellä menetelmällä eli puhtaasti matemaattisesti tai geostatistisesti eli matemaattisten funktioiden ohella käytetään hyväksi tilastollisia menetelmiä, jolloin saadaan tieto myös ennusteen luotettavuudesta (Holopainen ym., 2015). Geostatistisista menetelmistä yleisimpiä ovat kriging-menetelmät (Holopainen ym., 2015).

Kriging-menetelmät on spatiaalinen interpolointiperhe, jossa analysoimalla ja mallintamalla ominaisuuden spatiaalinen vaihtelu voidaan määrittellä optimaalinen paino ennustepintaa laskettaessa (Holopainen ym., 2015). Kriging menetelmässä semiogrammin avulla tarkastellaan havaintopisteiden spatiaalista autokorrelaatiota (Holopainen ym., 2015). Semivariogrammissa x-akselilla on pisteiden väliset etäisyydet ja y-akselilla semivariogrammin arvo, joka kuvaa ominaisuusarvojen vaihtelua tarkastelupisteiden etäisyyden funktiona. (Holopainen ym., 2015).

Spatiaalinen vaihtelu esitetään Kriging-menetelmässä kahden komponentin avulla: 1) rakenteellinen komponentti, jota voidaan kuvata trendinomaisella vaihtelulla; 2) satunnainen spatiaalisesti korreloitunut komponentti (Holopainen ym., 2015). Tavallisessa krigingissä (engl. ordinary kriging) rakenteellinen komponentti kuvataan koko tutkimusalueen keskiarvona, kun taas univeraalissa krigingissä (engl. universal kriging) rakenteellinen komponentti kuvataan sijainnin funktiona eli trendi voi vaihdella alueen eri osissa (Holopainen

ym., 2015).

Estimointi tapahtuu Holopaisen ym. (2015) mukaan Kriging-menetelmässä kahdessa vaiheessa. Ensimmäisessä vaiheessa lasketaan aineistosta semivariogrammi ryhmittelemällä havaintopisteparit etäisyyden mukaan luokkiin ja laskemalla näiden etäisyyksille ja semivariansseille keskiarvo. Tämän jälkeen havaintopisteparit luokitellaan etäisyyden ja suunnan perusteella ja lasketaan näiden luokkien etäisyyksien ja semivarianssien keskiarvojen perusteella semivariogrammi. Toisessa vaiheessa semivariogrammiin sovitetaan jokin malli esim., lineaarinen, spherical-, exponentiaalinen, Gaussian tai aaltomalli. Sovitus tehdään yleensä usein pienimmän neliösumman menetelmällä. Sovitetun mallin avulla määritetään etsintäsäde ja painot interpoloitavan pisteen naapuripisteille (Holopainen ym., 2015). Havaintopisteryhmät huomioidaan siten, että ryhmän pisteitä painotetaan vähemmän kuin vastaavalla etäisyydellä olevaa yksittäistä havaintopistettä (Holopainen ym., 2015). Etsintäsädettä kauempana olevien havaintopisteiden painot asetetaan niin pieniksi, ettei niillä ole merkitystä ennusteeseen (Holopainen ym., 2015). Laskettu estimaatti on Holopaisen ym., (2015) mukaan harhaton eli vailla satunnaisvirhettä ja varianssi on pienempi kuin minkään muun lineaarisesti muodostetun estimaatin varianssi. Varsinainen interpolointi tuottaa kullekin kohdepisteelle ennusteen ominaisuuden arvosta sekä arvon ennusteen luotettavuudesta (Holopainen ym., 2015).

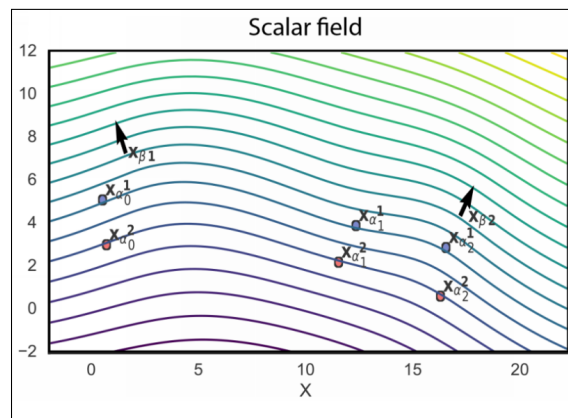
Kriging on Holopaisen ym. (2015) mukaan yksi monimutkaisimmista interpolointimenetelmistä ja sen varjopuolena on laskennan raskaus. Se pystyy kuitenkin tuottamaan parhaan ennusteen tasoituspinnasta (Holopainen ym., 2015).

2.3 Avoimen lähdekoodin GemPy-kirjasto

GemPy on avoimen lähdekoodin kirjasto geologisten 3D-mallien tuottamiseen (Varga ym., 2019). GemPyn interpolointialgoritmi vastaa Vargan ym. (2019) mukaan kaupallisissa ohjelmistoissa käytettäviä menetelmiä. Kirjaston avulla pystytään Vargan ym. (2019) mukaan tuottamaan monimutkaisia täysin kolmiulotteisia geologisia mallinnuksia erilaisista kerrostumista ja rakenteista mukaan lukien poimut, epäjatkuvuuspinnat, doomit jne. Algoritmi on toteutettu Python-ohjelmointikielellä ja siinä on hyödynnetty Python-taustakirjastoja, mikä mahdollistaa mm. suorituksen tehokkailla grafiikkasuorittimilla (GPU) sekä yhteyden koneoppimiskirjastoihin ja sitä kautta polun stokastisten geologisten mallien muodostamiseen (Varga ym., 2019). Avointen koneoppimiskirjastojen kehitys on Vargan ym. (2019) mukaan varsin nopeaa. Siksi on tärkeää, että myös geologiseen mallintamiseen on olemassa avoimen lähdekoodin kehitysympäristö (Varga ym., 2019).

Gempy on implisiittinen geostatistiseen menetelmään perustuva mallinnustyökalu (Varga ym., 2019). Sen interpolointimenetelmä perustuu Lajaunien ym. (1997) kehittämään potentiaalitenttämenetelmään, jossa käytetään universal co-kriging interpolointia (Varga ym., 2019). Co-kriging on kriging menetelmä, joka käyttää Z :n ennustuksessa hyväksi myös eri- tai samapaikkaisia havaintoja Z :n kanssa korreloituneista muista muuttujista (Heikkinen, 2006). Potentiaalitenttämenetelmän lähtöoletuksena on, että kukin mallinnettava rajapinta edustaa yhtä kerrostumaa, jolla on sama suuntaus (Lajaunien ym., 1997). Lisäksi suuntaus (kulku, kaade ja polaarisuus) on tiedettävä kerrostuman joistain osista (Lajaunien ym., 1997).

Lajaunien potentiaalitenttämenetelmässä luodaan interpolointifunktio $Z(x_0)$, missä x on mikä tahansa piste kolmeulotteisessa tilassa $(x, y, z) \in \mathbb{R}^3$. Kun tiedetään x, y, z ja suuntaus (kulku, kaade ja polaarisuus), funktion määrittelyjoukkoa D voidaan kuvata usean muuttujan funktiona eli skalaarikenttänä, jonka sama-arvopinnat edustavat kukin itseinäistä synkronista kerrostumaa (Varga ym., 2019). Kentän gradientti on kohtisuorassa suuntauksensa kulkuun nähden (Varga ym., 2019).



Kuva 1. Esimerkki skalaarikentästä. Syöteaineistossa kuusi pistettä, joista neljä kahden eri kerrostuman rajapintapistettä ($x_{\alpha_i}^1$ ja $x_{\alpha_i}^2$) sekä kahdesta orientaatiopisteestä (x_{β_j}), yksi piste kummallekin kerrostumalle (Varga ym., 2019).

Skalaarikentän (Kuva 1.) interpolointiin käytetään kahta parametria (i) kerrostuman rajapintapistettä x_{α} , jotka kuvaavat sama-arvopintoja ja ovat yleensä kahden kerrostumaan rajapintoja sekä (ii) skalaarikentän gradienttia x_{β} eli kaateen normaalivektoria (Varga ym., 2019).

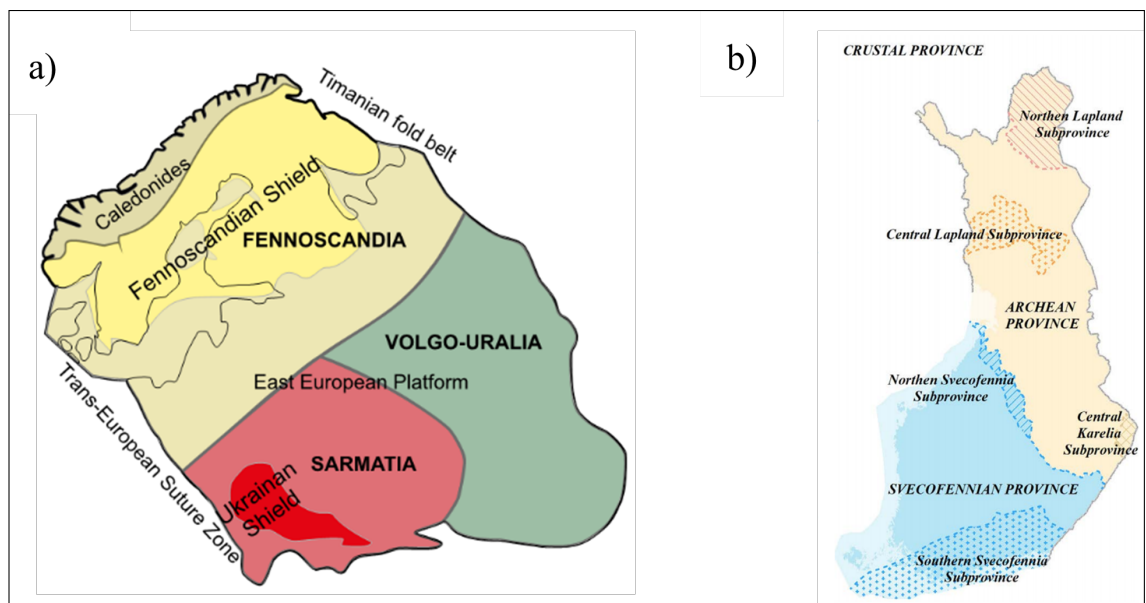
3 Littoisten alueen geologia

3.1 Kallioperä

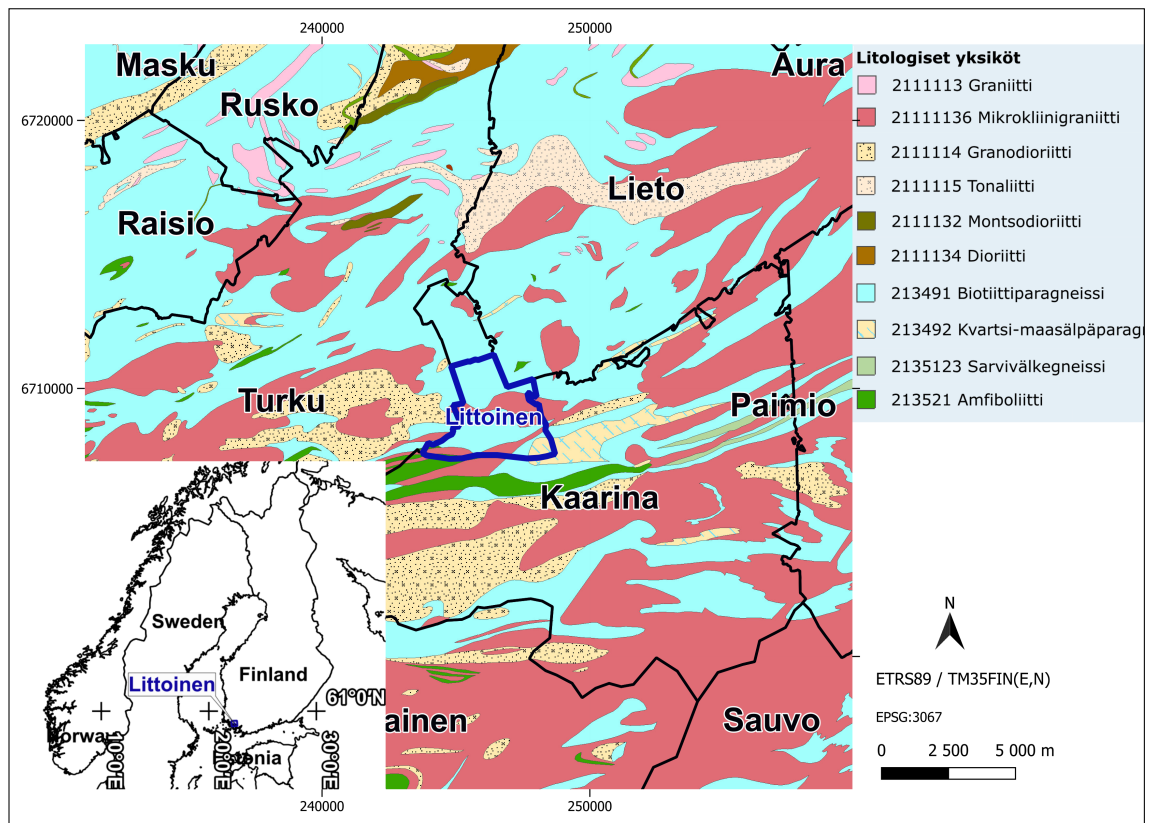
Suomen kallioperä kuuluu prekambriseen Itä-Euroopan kratoniin ja tämän osa-alueeseen Fennoskandian kilpeen (kuva 2a) (Kähkönen, 1998). Tämän prekabrinen peruskallion synty on ollut varsin monivaiheinen ja -syinen, lähes loputtoman pitkä prosessi (Kähkönen, 1998). Selkeä jako voidaan tehdä eri aikoina vaikuttaneiden vuorijonopoitumusten eli orogenioiden perusteella (Kähkönen, 1998). Pohjois- ja Itä-Suomen 3 100 - 2 500 miljoonaa vuotta vanhaan arkeiseen kallioperään (Arkeinen provinssi, kuva 2b.) ja Etelä- ja Keski-Suomen 1 930 - 1 800 miljoonaa vuotta vanhaan varhaisproterotsooiseen kallioperään (Svekofenninen provinssi, kuva 2b.) (Kähkönen, 1998).

Pohjois- ja Itä-Suomen arkeista mannerta ympäröi vuosimiljoonasatajoen aikana valtameri, johon tänä aikana muodostui paksuja turbidiittikerrostumia ja vulkaanisia kaaria (Kähkönen, 1998). Nämä työntyivät 1 900 miljoonaa vuotta sitten sfekofennisessä orogeniassa kohti arkeista mannerta ja poimuttuivat vuoristoksi (Kähkönen, 1998).

Littoisten alueen kallioperän kivilajit ovat mikroliinigraniitti ja biotiittiparagneissi (kuva 3.).



Kuva 2. a) Itä-Euroopan kratoni osa-alueineen (Nironen, 2017). b) Fennoskandian tektoniset provinssit (Nironen, 2017).



Kuva 3. Laitisten, Turun ja ympäryskuntien kallioperä.

3.2 Maaperän synty

3.2.1 Veiksel-jäätiköitymisvaihe ja sen kerrostumat

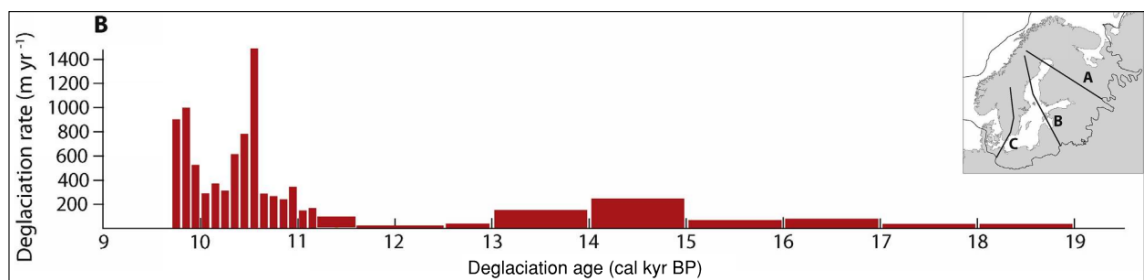
Suomen perusteellisesti erodoitunutta kallioperää peittää melko ohut (keskimäärin noin 8 m) maaperä (Salonen ym., 2002). Tosin vaihteluväli on suuri. Harjukerrostumat voivat Salosen ym. (2002) mukaan olla yli sata metriä paksuja ja veteen kerrostuneet savisedimentitkin kymmeniä metrejä.

Suomen maaperä on syntynyt pääosin viimeisen Veiksel-jäätiköitymisvaiheen (116 000-11 500 vuotta sitten) ilmastovaihteluiden seurauksena, kun mannerjäätikkö kulutti, kuljetti ja kerrosti kallioperäainesta (Lunkka, 2008). Tänä aikana ilmasto-olosuhteet vaihtelivat Lunkan (2008) mukaan paljon, toisinaan jopa kaoottisesti. Veiksel-vaihetta edeltäneen Eem-interglasiaalin ja sitä seuranneen Holoseenin aikana ilmasto-olot ovat Lunkan (2008) mukaan olleet vakaammat lukuun ottamatta teollisen vallankumouksen jälkeistä nykyäikää. Veiksel-jäätiköitymisvaiheen yleinen ilmastokehitys seurasi isolaatiosykliä (Lunkka, 2008). Mannerjäätiköt alkoivat sulaa nopeasti pääasiassa auringon säteilyenergian kasvun seurauksena myöhäis-Veikseliin ajoittuneen jäätiköitymismaksimin (LGM) (kuva 7b) jälkeen noin 18 000 vuotta sitten (Lunkka, 2008). Sulaminen kiihtyi noin 15 000 vuotta

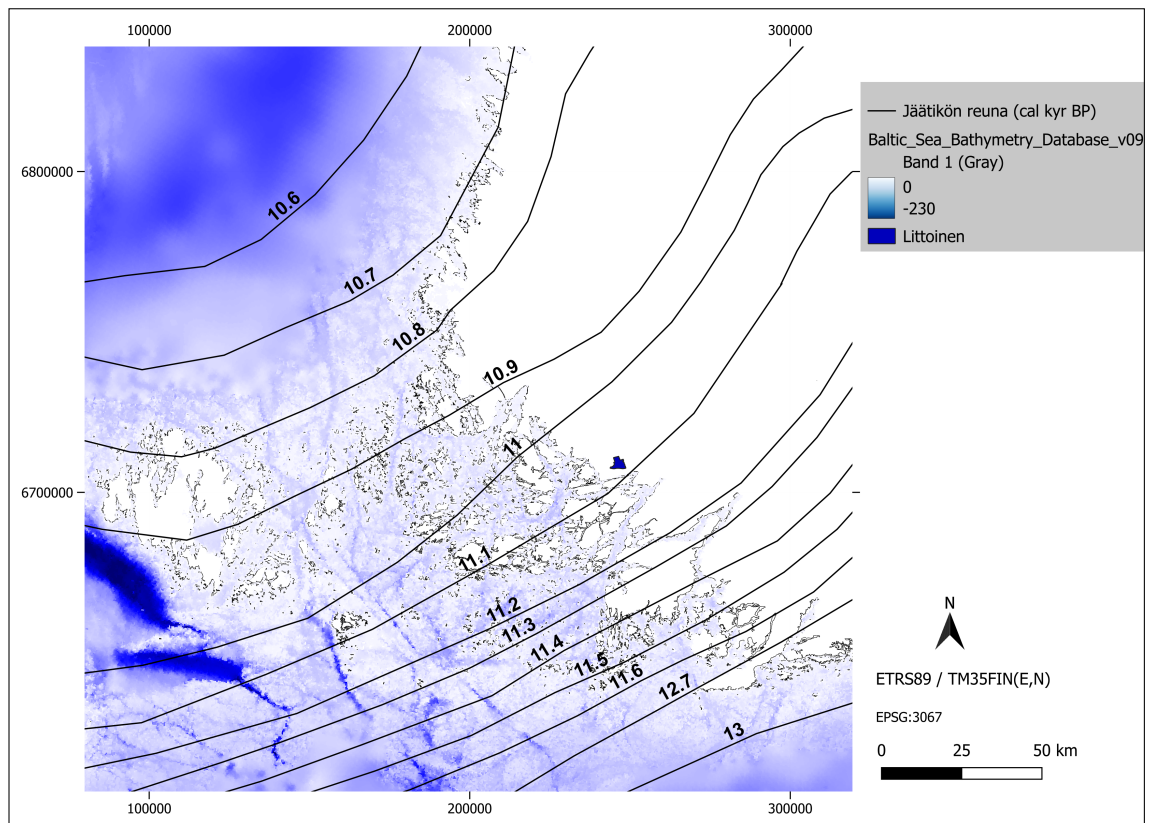
sitten, jolloin vallitsi hyvin lämmin ilmasto, kunnes 12 700 vuotta sitten tapahtui nopea viileneminen pohjoisen pallonpuoliskon ilmastossa (Lunkka, 2008). Tätä noin tuhat vuotta kestänyttä viileää ajanjaksoa kutsutaan Nuoremaksi Dryaskaudeksi, jolloin jäätiköiden sulaminen pysähtyi, joillakin alueilla jopa hieman eteni (Salonen ym., 2002). Tämä johtui Lunkan (2008) mukaan termohaliinisen kierron häiriintymisestä Pohjois-Atlantilla, kun valtavat määrät sulavesiä purkautui Pohjois-Atlantille Pohjois-Amerikan ja Scandinavian jäätiköiden alta ja niiden patoamista jäätikköjärvistä. Nämä kylmän ja makean veden purkaukset estivät Lunkan (2008) mukaan lämmön johtumisen pohjoisille leveysasteille. Nuoremman Dryaksen aikana syntyivät Ensimmäisen ja Toisen Salpausselän reunamuodostumat (kuva 7c) (Salonen ym., 2002). Nuorempi Dryaskausi päättyi noin 11 500 vuotta sitten ja alkoi nykyinen interglasiaaliaika Holoseeni (Lunkka, 2008).

Stroeven ym. (2016) ovat artikkelissaan muodostaneet Fennoskandian mannerjäätikön deglasiatiomallin (22 - 9.7 cal kyr vuotta sitten) laajasta aineistosta geomorfologiaa alueen harjuista, reunamuodostumista, lineaatioista, uurteista sekä geokronologisista ajoituksista jne. Stroeven ym., (2016) esittivät jäätikön vetäytymisnopeudet eri aikoina (kuva 4.), josta voidaan selvästi erottaa mm. Nuorempi Dryas ja Holoseeni.

Pian Holoseenin alussa noin 11 000 vuotta sitten jäätikkö oli perääntynyt Littoisten alueelta ja noin 10 700 vuotta sitten koko Saaristomerren rannikkoalueelta (kuva 5.) (Stroeven ym., 2016). Jäätiköltä vapautuneet maa-alueet jäivät veden alle, kun jäätiköltä suli valtavat määrät vettä (Salonen ym., 2002). Turun seudullakin merenpinta oli noin 140 m nykyisen merenpintaa ylempänä (Salonen ym., 2002). Alkoi Itämeren monivaiheinen kehitys (Salonen ym., 2002).



Kuva 4. Scandinavian mannerjäätikön keskiosan (B) vetäytymisnopeus (m / vuosi) (Stroeven ym., 2016.). Piikki vetäytymisnopeudessa 10,5-10,6 tuhatta vuotta liittyy Stroevenin ym. (2016) mukaan vetäytymiseen syvässä merialueessa Pohjanlahdella (kuva 5.) sekä todennäköisesti virtauskielekkeen hajoamiseen.



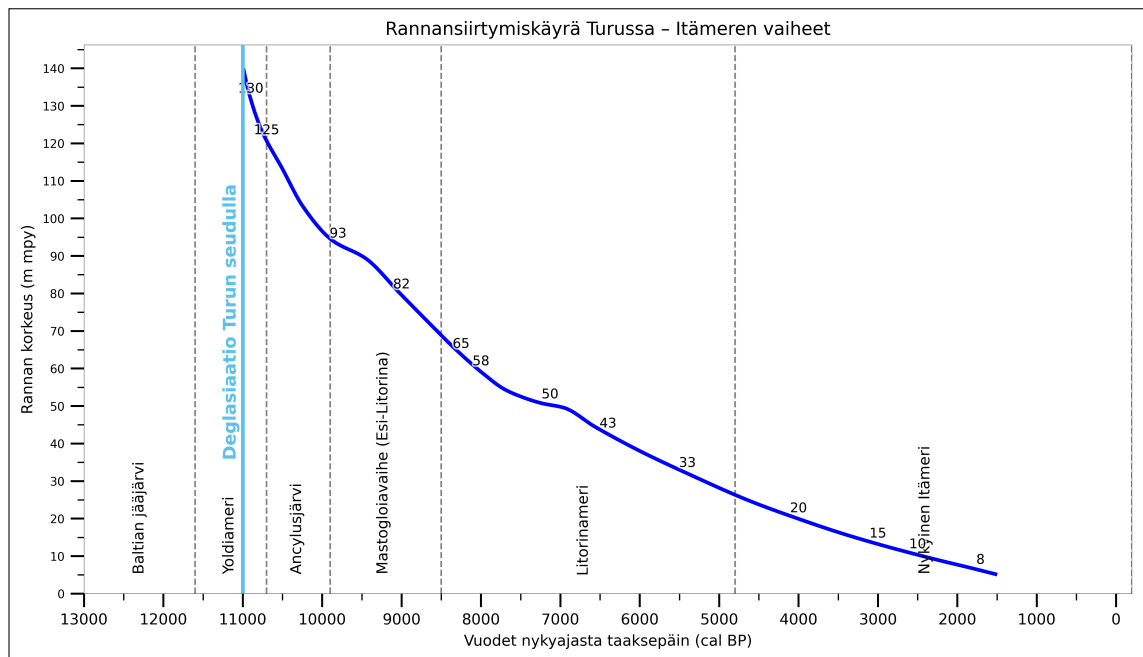
Kuva 5. Scandinavian mannerjäätikön perääntyminen Lounais-Suomessa Saaristomerren rannikkoalueella (Stroeven ym., 2016). Itämeren vedensyvyysmalli (HELCOM Secretariat. 2025-09-11).

Jäätikkö jätti jälkeensä silokallioita, siirtolohkareita, kulutusmerkkejä kallioiden kuten uurteita, kouruja, pistekaarteita ja sirppimurroksia jne. (Karhima ym., 2007). Mutta ennen kaikkea jäätikön jäljiltä ovat merkittävät kerrostumat kuten pohja-, pinta-, reuna-, kumpu-, - De Geer moreenit ja drumliinit (Karhima ym., 2007). Näiden kerrostumien aines on moreenia, joka on Suomen yleisin maalaji sillä noin puolet pintamaalajeista on moreenia (Salonen ym., 2002). Moreeni on jäätikkösyntyistä ja suhteistunutta eli sisältää hienoainesmatriisia ja karkearakeisia klasteja (Salonen ym., 2002). Moreenin ominaisuudet riippuvat sen synnyn ja kerrostumisen aikaisista tapahtumista (Salonen ym., 2002).

Erityisesti kauniiden maisemien, pohjaveden muodostumisympäristöjen, sora- ja hiekka-varantojen sekä rakentamiselle hyvien maapohjien kannalta merkittävimmät jäätikköihin liittyvät muodostumat ovat glasifluvialaisia kerrostumia, jotka peittävät noin 7% Suomen maa-alasta (Salonen ym., 2002). Nämä ovat muodostuneet, kun jäätiköltä virtaavat sulavedet kanavoituivat jäätinkönlaisiin tunneleihin ja railoihin (Salonen ym., 2002). Virtaukseen mukana kulkeva maa-aines lajittui, pyöristyi ja syntyi karkearakeisista maalajeista, sorasta ja hiekasta muodostuvia kerrostumia, pitkittäisharjuja ja reunamuodostumia (Salonen ym., 2002). Harjuissa on Salosen ym (2002) mukaan tavallisesti karkearakeisista kiviainekista muodostunut ydin ja hienojakoisempia kerroksia reunoilla. Harjujaksot

muodostavat yleisesti sulavan jäätikön virtaussuuntaa mukailevia jaksoja ja niitä esiintyy Suomessa laajalla alueella noin 10-20 km välein (Salonen ym., 2002). Reunamuodostumat ovat pääasiassa jäätikön eteen päättyvän sulamisvesiuoman aineksesta syntyneitä kerrostumia, joista tärkeimmät ovat Salpausselät (Salonen ym., 2002). Reunamuodostumien maalajeina ovat erityisesti lajittuneet karkearakeiset sora ja hiekka, mutta myös moreeni (Salonen ym., 2002).

Veiksel-vaiheen Scandinavian mannerjäätikön arvellaan olleen jopa 3 km paksu (Salonen ym., 2002). Tämä aiheutti valtavan, suurimmillaan jopa 1000 metrin painuman maankuoreen (Salonen ym., 2002). Jäätikön ohetessa ja viimein väistyessä kokonaan, maankuori alkoi palautua alkuperäiseen muotoonsa (Salonen ym., 2002). Lisäksi Itämeren kehitykseen on vaikuttanut mm. vedenpinnan koreuden muutokset, yhteydet ja yhteyksien katkeamiset valtamereseen sekä epätasaisesta maankohoamisesta aiheutuneet rantapintojen kallistumat (Salonen ym., 2002). Näiden glasiaali-isostasian ja eustasian yhteisvaikutuksena on syntynyt erityisesti Pohjanmaalla tuttu ilmiö, jota kutsutaan rannansiirtymiseksi (Salonen ym., 2002). Vestøl ym. 2019 ovat julkaisussaan esittäneet Pohjois Euroopan virallisen maankohoamismallin NKG2016LU (Nordic Commission of Geodesy, NKG). Mallin mukaan suurin maankohomisvauhti (9.6 mm/vuosi) on Umeån kaupungissa Pohjois Ruotsissa ja nollalinja seurailee Saksan ja Puolan rannikoita (Vestøl ym., 2019). Turku ympäristöineen sijaitsee näiden välissä ja täällä maankohoamisen vauhti on noin 5 mm vuodessa (Salonen ym., 2002). Rannansiirtymistä on tutkittu Suomessa ja muissa Pohjoismaissa vuosikymmeniä (Ojala ym., 2013). Rannansiirtymisestä ja muinaisrantojen sijainneista post-glasiaalisella ajanjaksolla onkin Ojalan ym. (2013) mukaan runsaasti havaintoja Suomessa (mm. Ramsay 1924, Glückert 1976, Saarnisto 1981, Ristaniemi 1987). Systemaattista ja yhtenäistä tietokantaa ei rannansiirtymis- ja muinaisrantaaineistosta kuitenkaan Suomessa ollut olemassa ennen kuin Ojala ym. 2013 julkaisivat ”muinaisrantojen havainnot”-tietokannan, josta käytetään nimitystä Ancient Shoreline Database (ASD). Maankohoaminen on siis vaikuttanut hyvin eri tavalla eri alueilla, Turun alueen rannansiirtymiskäyrä on esitetty kuvassa 6.



Kuva 6. Rannansiirtyminen Turussa Itämeren eri vaiheissa. Rannansiirtymiskäyrä 1500-8000 cal BP digitoitu Hatakka & Glückert (2000) mukaan ja 8000 - 11000 cal BP Glückert (1977) mukaan. Itämeren vaiheet Björck, S. 2008.

3.2.2 Glasilakustriset ja postglasiaaliset sedimentit ja Itämeren vaiheet

Rakentamisen kannalta haasteellisinta maaperää on hienorakeisten sedimenttien alueet. Savien ja silttien esiintyminen rajoittuu Salosen ym. (2002) mukaan varsin selvästi subakvaattisille eli veden koskemalle alueelle. Subakvaattiset alueet erottaa supra-akvaattisista alueista ylimmät rantatasot (Salonen ym, 2002). Hienorakeisten sedimenttien synty liittyy vahvasti Itämeren kehitykseen ja vaiheisiin (Gardemeister, 1975).

Baltian jääjärvivaiheen (14 500 - 11 600) alussa globaali merenpinta oli Björkin (2008) mukaan noin 100 metriä nykyistä merenpinnan tasoa alempana ja 2/3 maksimivaiheen jäätiköstä oli vielä sulamatta. Baltian jääjärvi oli muodostunut perääntyvän reunan eteen (Björck 2008). Jäätikön sulaessa vedenpinta kohosi, mutta maankohoaminen Ruotsin ja Tanskan välisellä Juutinrauman alueella oli jopa nopeampaa (Björck 2008). Noin 14 000 vuotta sitten Juutinrauman alueesta oli muodostunut patoava kynnys Itämeren ja valtameren välille (Björck 2008). Itämeren vedenpinta alkoi kohota valtameren pintaa yleemmäksi (Björck 2008). Jäätikön perääntyessä luoteeseen Ruotsin järvien Vänernin ja Vätternin välissä olevan Billingenin vuoren (kuva 7d) kohdalla noin 13 000 vuotta sitten jäätikön pohjalle muodostui sulavesien lasku-uoma valtameren (Björck 2008). Itämeren vedenpinta laski mahdollisesti 10 metriä. Sitten edennyt jäätikkö kuitenkin tuhosi mahdolliset todisteet tästä (Björck 2008).

Noin 12 700 vuotta sitten Nuoremman Dryaksen alkaessa ilmasto viileni äkillisesti ja jäätikkö eteni kohti etelää ja sulki Billingenin yhteyden valtameren (Björck 2008). Juutinrauman kynnys jatkoi patoamistaan ja Itämeren vedenpinta kohoamistaan (Björck 2008). Tuhat vuotta myöhemmin vedenpinta oli kohonnut noin 25 metriä valtamerenpintaa korkeammalle (Björck 2008). Viileän Nuoremman Dryaksen lopulla ilmasto alkoi taas lämmetä ja jäätikkö perääntyä (Björck 2008). Noin 11 600 vuotta sitten Billingenin 'portti' avautui jälleen ja Itämeren pinta putosi noin 25 metriä valtameren tasoon 1 - 2 vuoden aikana (Björck 2008). Alkoi Yoldiavaihe (Björck 2008).

Jäätikköjokien kuljettama hienorakeinen aines kerrostui Baltian jääjärven muodostaen ns. lustorakenteen, mikä osoittaa sulamisen vuodenaikaista vaihtelua (Salonen ym. 2002). Nämä glasilakustriset sedimentit ovat postglasiaalisavien peitossa ja harvoin yli viisi metriä paksuja kerrostumia (Salonen ym. 2002). Lounais-Suomeen ei Baltian jääjärven aikaisia lustosavia ehtinyt kerrostua, koska jäätikkö ei ollut alueelta vielä väistynyt (kuva 5.).

Yoldiavaihe (11 600 - 10 700) (kuva 7 d) ja Holoseeni alkoivat Itämerellä siis dramaattisesti. Alku oli käännekohta Itämeren kehityksessä kohti uudenlaisesta ympäristöä (Björck 2008). Lämpimämpi ilmasto, nopeasti sulava jäätikkö ja suora yhteys valtameren (Björck 2008). Salmiyhteydet (Götajoki ja Otteidien salmi) valtameren olivat kuitenkin kapeita eikä suolaista vettä päässyt virtaamaan Itämereen, koska virtaus toiseen suuntaan oli jäätikön sulavesien ansiosta voimakkaampaa (Björck 2008). Kesti noin 250 vuotta ennen kuin valtameren suolavettä pääsi Itämereen, josta siten muodostui murtovesiallas (Björck 2008). Sitä kesti kuitenkin vain noin 150 vuotta, sillä valtameriyhteys kävi kapeammaksi ja matalammaksi muodostaen hydraulisia patoja ja pian suolaisen veden virtaus Itämereen tyrehtyi (Björck 2008). Vaikkakin Itämeren vedenpinnan taso säilyi valtameren pinnan tasolla niin kauan kuin maankohoaminen Keski-Ruotsissa ja vedenpinnan nousu olivat suunnilleen tasapainossa (Björck 2008). Vähitellen maankohoaminen kuitenkin ohitti vedenpinnan nousun Keski-Ruotsissa ja salmiyhteydet katkesivat noin 10 700 vuotta sitten (Björck 2008). Samalla päättyi Yoldiavaihe (Björck 2008). Myös Suomessa maankohoaminen oli Yoldiavaiheen aikana voimakasta, vedenpinta laski ripeästi ja uutta maata vapautui jäätikön perääntyessä Salpausselkävyöhykkeestä Pohjanmaalle (Salonen ym., 2002).

Yoldiavaiheen alussa pohjalle kerrostui Baltian jääjärven kaltaisia lustosavia, mutta kun jäätiköltä tulevan sulamisvesien määrä väheni, muuttui kerrostuva savi homogeeniseksi ja orgaanisen aineksen määrä lisääntyi (Salonen ym., 2002). Yoldiasavet ovat Turun seudulla lihavia savia, joiden savespitoisuus vaihtelee 50 %:sta jopa 90 %:iin (Gardemeister, 1973). Gardemeisterin (1973) näytesarjoissa Turun seudun hienorakeisten sedimenttien Yoldia-

kerrostumien paksuus vaihtelee muutamasta metristä yli kymmeneen metriin (Raisio, Krookila) ja toisinaan puuttuvat kokonaan (Turku postitalo).

Ancylusjärvi (10 700 - 10 000) -vaiheen alussa Itämeren allas patoutui Vänernjärven länsipuolella valtameren pinnan yläpuolelle (kuva 7e) (Björck 2008). Koska maankohoaminen Itämeren eri alueilla oli hyvin eritahtista, Ancylus-transgression voimakkuus vaihteli paljon (Björck 2008). Suurinta se oli Puolan rannikolla noin 20 metriä, kun Itämeren Lounais-rannikolla se oli 10 - 12 metriä (Björck 2008). Ancylus-transgression kerrostumia on mm. Lounais-Suomessa ylimmillään 80 metriä vedenpinnan yläpuolella (Salonen ym., 2002). Kun taas esim. Pohjanlahden rannikolla maankohoaminen oli niin voimakasta, että vedenpinta laski kaiken aikaa (Salonen ym., 2002).

Ancylus-transgressio kesti noin 500 vuotta (Björck 2008). Se päättyi, koska maankohoaminen oli hidastunut Itämeren lounaisrannikolla, uusi lasku-uoma oli erodoitunut Ison Beltin salmen kautta valtameriin ja Kattegatin vedenpinta oli noussut Ancylusjärven vedenpinnan tasoon noin 10 000 vuotta sitten (Björck 2008). Tarkasta siirtymäajankohdasta makevetisestä Ancylusjärvivaiheesta murtovetiseen Litorinamerivaiheeseen ei Björckin (2008) mukaan ole yhtenäistä tulkintaa. Siirtymävaiheesta noin 10 000 - 8500 vuotta sitten käytetäänkin usein nimitystä Mastogloian meri (kuva 6.) (Björck 2008). Merkkejä suolapitoisuudesta Itämerellä löytyy jo noin 9800 vuotta vanhoista kerrostumista Bornholmin ja Blekingen rannikkoalueelta Koillis-Ruotsista (Björck 2008). Valtameriyhteys oli kuitenkin ahdas ja kesti noin 1500 vuotta ennen kuin merellinen vaikutus alkoi Itämerellä tuntua (Björck 2008).

Orgaanisen aineksen määrän lisääntyessä Itämeren altaaseen kerrostuvat savet muuttuivat sulfidipitoisiksi, mikä kertoo pohjan hapettumuudesta (Salonen ym., 2002). Sulfidisavia peittää Ancylusjärven loppuvaiheilla kerrostunut lähes homogeeninen harmaa savi, jossa sulfidia on vain vähän (Salonen ym., 2002). Gardemeisterin (1973) näytesarjoissa Turun seudun hienorakeisten sedimenttien Ancylusjärvikerrostumien paksuus on noin 4 metriä. Ancylusjärvisavet ovat Turun seudulla lihavia savia, joiden savespitoisuus vaihtelee 30 %:sta 85 %:iin. Yoldia- ja Ancylusjärvisavet ovat geoteknisiltä ominaisuuksiltaan hyvin samankaltaiset (Gardemeister, 1973).

Litorinamerivaihe (10 000 - 5 000) voidaan Björckin (2008) mukaan tulkinnasta riippumatta katsoa alkaneeksi viimeistään 8500 vuotta sitten, jonka aikaisista kerrostumista on selvästi dokumentoitavissa suolapitoisuuden nopea leviäminen koko Itämeren altaassa. Itämerellä vaikutti seuraavien 2500 - 3000 vuoden aikana Litorinatransgressio merenpinnan nousun vuoksi, mikä johtui pitkälti Pohjois-Amerikan jäätikön sulamisesta (Björck

2008). Juutinrauman ja Ison Beltin vedenpinnat nousivat merkittävästi, vähintään 10 metriä (Björck 2008). Tämä mahdollisti suuren määrän suolapitoista vettä Itämeren altaaseen (Björck 2008). Samaan aikaan suolapitoisuuden kasvun ja ilmaston lämpenemisen myötä biologinen tuotanto kasvoi Itämerellä, mikä näkyy orgaanisen määrän nopeana kasvuna sedimenteissä (Björck 2008). Tämä aiheutti myös anaerobiset olosuhteet syvimmillä (> 100 m) Itämerellä vesialueilla (Björck 2008).

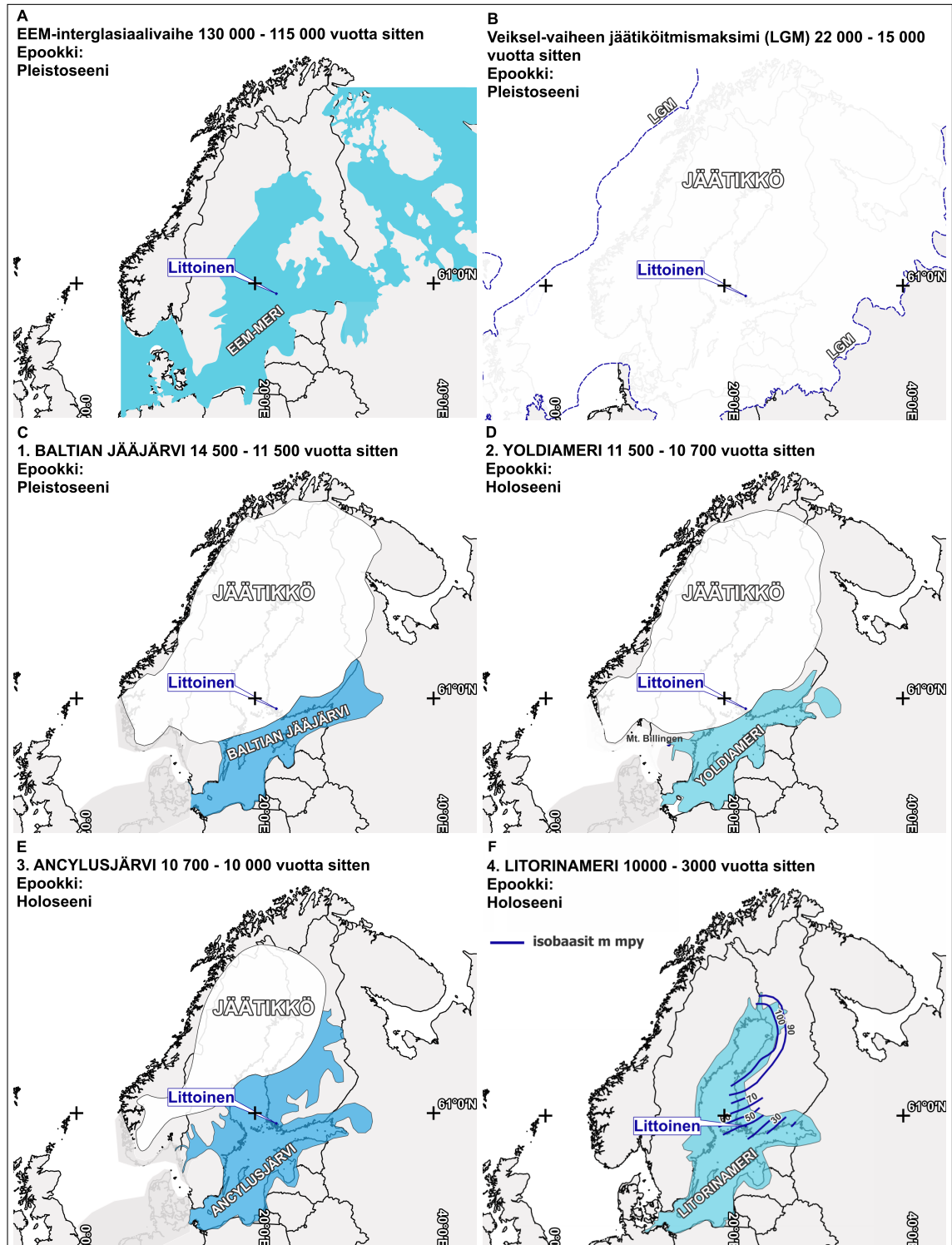
Suolapitoisuuden huippu Itämerellä saavutettiin Björckin (2008) mukaan noin 6000 vuotta sitten. Tämän jälkeen suolapitoisuus on laskenut, koska Tanskan salmien kautta virtaus valtamereltä Itämerelle on vähentynyt, kesien lämpötila laskenut ja suurimmalla osalla Itämeren alueista sademäärä kasvanut (Björck 2008). Lopulta Itämeren altaaseen levisi makeanveden kotilo *Lymnaea peregra* f. *ovata* noin 5000 vuotta sitten (Salonen ym., 2002). Tähän ajankohtaan Litorinamerivaiheen katsotaan Salosen ym. (2002) mukaan usein päättyneen.

Litorinasavi voidaan Salosen ym. (2002) mukaan selvästi erottaa sedimentistä värinsä ja etenkin humuspitoisuutensa ansiosta. Homogeeninen harmaa savi muuttuu äkillisesti vihertävän harmaaksi liejusaveksi, jossa orgaanista ainesta on 10 - 15 %, kun sen alpuolisessa savessa on vain 2 - 4 % (Salonen ym., 2002). Tätä selkeää kontaktia pidetään *Ancylus*- ja Litorina-kerrostumien rajapintana (Salonen ym., 2002). Litorinasavet puuttuvat Turun seudulla monin paikoin kokonaan esim. Gardemeisterin (1973) näytesarjoissa Raision alueella Litorina savi puuttuu kokonaan lukuunottamatta yhtä sarjaa. Toisaalta erittäin paksujakin Litorinasavipatjoja Lounais-Suomessa tavataan esim. Salon Ohikulkutien näytesarjassa, jonka kokonaisuudessaan noin 40 metrisen savikerrostuman pintaosa on noin 19 metriä paksu Litorinasavi (Gardemeister, 1973).

Tässä esitetyissä Gardemeisterin (1973) näytesarjoissa on kyse koko Suomen kattavasta selvityksestä, joten Turun seudun otos on hyvin pieni eikä esim. tyypillisistä kerrospaksuuksista voi vetää pitkälle meneviä johtopäätöksiä. Anttilan (2023) mukaan Turussa hienorakeisten sedimenttien kokonaispaksuus on parhaimmillaan 47 metriä. Syvimät hienorakeiset sedimentit löytyvät Aurajokilaaksosta, sataman alueelta sekä muilta kallion ruhjevyöhykkeiltä kuten Pahaniemi, Kurala, Raunistula ja Metsämäki (Anttila, 2023). Myöskään kairaushavainnoista tai luokitus- ja lujuusominaisuuksista ei humuspitoisuutta lukuunottamatta voi suoraan päätellä minkä Itämeren vaiheen savesta on kyse (Gardemeister, 1973). Stratigrafiseen jaotteluun Litorina-, *Ancylus*-, *Yoldia*- sekä Baltian jääjärven sedimentteihin tarvitaan siitepölyanalyysia, sedimenttien makroskooppista rakennetutkimusta sekä luokitus- ja lujuusominaisuuksien laboratorionkokeita ja näiden kaikkien huolellista tarkastelua (Garde-

meister, 1973). Tosin Ojala ym. (2021) havaitsivat Espoon Rastaalan tutkimuksissa, että painokairan tunkeutuminen Litorinasaveen vaati yleensä 0.2...1.0 kN painot, kun Ancyclus-järvisaveen tunkeutuminen vaati yleensä täydet 1.0 kN painot, joskus kiertämisen puolella. Tämä on sama rajapinta, jonka mukaan Gardemeister (1975) jaotteli hienorakeiset sedimentit kahteen luokkaan: päällimmäiset murtovesialtaaseen syntyneet liejusavet ja alapuoliset postglasiaaliset järvivaiheen sedimentit.

Kerrosjärjestys on joka tapauksessa selvää. Pohjamoreenin päällä on toisinaan sulamisvesien kerrostama sora- / hiekkakerros (kuva 17. kairauspisteet 24,25 ja 26), jonka päälle ovat kerrostuneet Baltian jääjärven glasilakustriset savet, sitten postglasiaaliset Yoldiavaiheen savet, Ancyclusvaiheen savet ja Litorinasavet. Turun seudulla esiintyy vain postglasiaalisia ja muutenkin yksi tai useampi voi puuttua kokonaan.



Kuva 7. A EEM-meri viimeisen interglasiaalivaiheen aikana. B Veiksel-vaiheen jäätiköitymismaksimi (Ehlers ym., 2011). C, D, E, F Itämeren neljä kehitysvaihetta (Thieme, 2019). D Littorinameren korkeimman rannan isobaasit m mpy (Ojala ym., 2013).

tuksen, vaaituksen ja varsinaiset pohjatutkimukset (Jääskeläinen, 2009). Keskeisin tavoite on selvittää rakennuspaikan maaperäolosuhteet niin, että aiotun rakennuksen tai muun rakenteen perustaminen ja tarvittavat pohjarakennustyöt voidaan luotettavasti suunnitella ja turvallisesti toteuttaa (Jääskeläinen, 2009). Tutkimus tulkintoineen tulee tuottaa pohjarakennusuunnittelijalle geoteknillinen maaperämalli, jossa on maanpinta muotoineen, pohjavesipinta ja maakerrokset lujuus-, muodonmuutos- ja muine ominaisuuksineen sekä alla oleva kova pohja tai kallio tarpeellisine tietoineen (Jääskeläinen, 2009). Pohjatutkimus tuottaa lähtötiedot ja tietyt reunaehdot rakennuttajalle, pääsuunnittelijalle, rakennesuunnittelijalle, LVI-suunnittelijalle sekä urakoitsijalle (Jääskeläinen, 2009).

4.1.2 Pohjatutkimuksissa käytettävät kairausmenetelmät

Pohjatutkimuksen keskeisin tutkimusmenetelmä ovat erilaiset kairaukset (Jääskeläinen, 2009). Kairausmenetelmä valitaan käyttötarkoituksen mukaan. Kuvassa 9. on esitetty yleisimmät kairausmenetelmät (Jääskeläinen, 2009).

<p>• = pääasiallinen käyttötarkoitus</p> <p>○ = toissijainen käyttötarkoitus tai heikko selvitystarkkuus</p>								
	Kallion pinnan sijainti	Tiiviin pohjakerroksen sijainti	Tiiviydetään eri maakerrosten rajat	Maakerrosten likimääräinen luj.	Maakerrosten lujuus tarkasti	Maakerrosten tiiviyys likimäärin	Maalajiryhmä	Lyöntipaaluipituuden arviointi
Kairausmenetelmät								
Painokairaus	○	●	●	○		●	●	○
Heijarikairaus	○	●	○	○		●	○	●
Puristinkairaus		○	●	●		●	●	○
Siipikairaus					●			
Tärykairaus	○	●					○	○
Porakonekairaus	●	○						○

Kuva 9. Kairausmenetelmät ja niiden soveltuvuus eri käyttötarkoituksiin (Jääskeläinen, 2009).

Painokairaus on Suomessa yleisin käytetty yleiskairausmenetelmä (Jääskeläinen, 2009). Yleisyyttä selittää Jääskeläisen (2009) mukaan sen soveltuvuus monenlaisiin maaperiin sekä Suomen maaperän vaihtelevuus ja pienpiirteisyys. Painakairauksen perusajatus on ensin mitata minimipainomäärää (5kg...100kg), joka aiheuttaa kairan painuman (Jääskeläinen, 2009). Jos kaira ei painu täysilläkään painoilla (100kg), aletaan kairaa kiertää ja mitata puolikierrosten määrä, mikä aiheuttaa 20 cm painuman (Jääskeläinen, 2009). Jos kaira ei painu kiertämälläkään, otetaan painot pois ja kairaa lyödään, kunnes kaira ei painu lyömälläkään, jolloin kairaus on päättynyt (Jääskeläinen, 2009). Painokairausdiagrammiin tulostuu keskelle maalajipylväs, johon merkitään kunkin kerroksen maalajisymboli (Jääskeläinen, 2009). Vasemmalle tulostuu painot, millä kairaus on painunut (Jääskeläinen, 2009). Maksimipaino 100 kg piirtyy ääri vasemmalle maalajipylvästä ja mitä pienemmällä painolla painunut (mitä pehmeämpää) sitä lähemmäksi maalajipylvästä käyrä piirtyy (Jääskeläinen, 2009). Diagrammin oikealle puolelle tulostuu puolikierrosten määrä, kun painuma on ta-

pahtunut kiertämällä (Jääskeläinen, 2009). Mikäli tarvitaan enemmän kuin 100 pk / 20 cm, kuvaaja jätetään päästään auki (Jääskeläinen, 2009). Samoin, jos tarvitaan lyöntiä, jolloin päähän merkitään vielä L-kirjain (Jääskeläinen, 2009). Painokairaustuloksia on Jääskeläisen (2009) mukaan vuosien varrella vertailtu runsaasti muihin tarkempiin mittauksiin ja maalajien ominaisuuksiin. Näin on Jääskeläisen (2009) mukaan syntynyt varsin luotettavia tulkintoja siitä, mitä kairausvastus kulloinkin tarkoittaa. Maaperän ominaisuuksien tulkinta kairausvastuksista on Jääskeläisen (2009) mukaan kuitenkin aina likimääräistä ja pääasiallisin tarkoitus on selvittää tiiviin pohjakerroksen sijainti, tiiviydeltään eri maakerrosten rajat sekä ohjata näytteenottokohtien ja siipikairauspisteiden valintaa.

Heijarikairaus on Jääskeläisen (2009) mukaan painokairausta objektiivisempi ja järeämpi, tiiviiden maakerrosten kairausmenetelmä. Heijarikairauksessa pudotetaan aina tietyn painoista (Suomessa 63,5 kg) heijaria aina samasta korkeudesta kairatankoon kiinnitettyä pidikettä vasten (Jääskeläinen, 2009). Mittaamalla montako iskua 20 cm uppoumaa varten tarvittiin, saadaan käsitys maan lujuusominaisuuksista ja voidaan vertailla maakerroksia toisiinsa (Jääskeläinen, 2009). Heijarikairausdiagrammi piirretään kairauspylvään oikealle puolelle ja kuvaajan etäisyys pylvään reunasta senttimetreinä saadaan jakamalla iskujen määrä vastaavien uppoumasenttimetrien määrällä (Jääskeläinen, 2009). Heijarikairaa käytetään usein silloin, kun painokaira ei tunkeudu esim. paksujen soraharjujen ja tiiviiden moreenikerrosten alueilla (Jääskeläinen, 2009). Heijarikairalla saadaan Jääskeläisen (2009) mukaan myös luotettavampi ennuste paalujen uppoumisvyvyksistä kuin painokairalla.

Puristinkairaus (CPT-kairaus) on Jääskeläisen (2009) mukaan painokairaa tarkempi kivettömien ja pehmeiden maiden kairausmenetelmä. Siinä standardoitua kärkikappaletta puristetaan vakionopeudella maahan ja mitataan voimia, joita kullakin syvyydellä tarvitaan (Jääskeläinen, 2009). Kairausdiagrammissa vasemmalle puolelle tulostuu huokospainekuvio (optio) ja oikealle kärkivastus ja vaippakitka (Jääskeläinen, 2009). Kärkivastus saadaan jakamalla kärkeen kohdistunut voima kärkikappaleen poikkipinta-alalla (Jääskeläinen, 2009). Vaippakitka saadaan jakamalla kitkahylsyyn kohdistunut hankausvoima kitkahylsyn vaippapinta-alalla (Jääskeläinen, 2009). Kärkivastus ja vaippakitka kasvavat maan muuttuessa karkeammaksi, tiiviimmäksi ja ylikonsolidoituneemmaksi (Jääskeläinen, 2009). Huokospaine kasvaa maan muuttuessa hienorakeisemmaksi ja leikkauslujuuden sekä herkkyyssasteen kasvaessa (Jääskeläinen, 2009). Puristinkairauksista on laadittu tulkintamonogrammeja ja nettokärkivastuksen tunnuslukuja eri maalajeille (Jääskeläinen, 2009).

Siipikairaus on maastossa suoritettava hienorakeisten maiden suljetun leikkauslujuuden

mittaustapa (Jääskeläinen, 2009). Leikkauslujuus on tärkein maaperän lujuusominaisuuksista, mikä käytännössä määrää maapohjan kantavuuden ja maaluiskien vakavuuden (Jääskeläinen, 2009). Karkearakeisten maalajien leikkauslujuus määräytyy rakeiden välisestä kitkasta ja hienorakeisten maalajien taas rakeiden välisestä koheesiosta (Jääskeläinen, 2009).

Alla on esimerkki infra-pohjatutkimusformaattista tutkimusalueelta pisteestä nro 10. Havainnoissa ensimmäinen luku on leikkaussyvyys (m), toinen on siipileikkauslujuus sv (kPa), ja kolmas on häiritty siipileikkauslujuus svr (kPa). Lisäksi neljantenä parametrina sensitiivisyys (sv/svr) ja viidentenä jäännöslujuus (MPa) (Suomen Geoteknillinen Yhdistys, 2022).

FO 2.1 GTK Pohjatutkimusrekisteri
 KJ ETRS-TM35FIN N2000
 OM Kaarinan kaupunki
 Or Kaarinan kaupunki
 TY 14538
 PK - 3:-
 TT SI 0 0
 HM Siipi: 65×130 Kerroin: 1, Nopeus: 12 astetta/min.
 XY 6709169.918 246402.338 25.563 13012021 10
 AL 0,00

AL	0.00			
1.50	11.20	0.40	28.00	6.00
2.00	10.80	0.20	54.00	4.00
2.50	7.00	0.00	∞	0.80
3.00	8.20	0.00	∞	1.20
3.50	7.80	0.00	∞	1.20
4.00	14.20	0.00	∞	4.40
4.50	14.20	0.20	71.00	2.40
5.00	18.80	0.00	∞	7.00
6.00	12.00	0.00	∞	0.40
7.00	26.80	0.40	67.00	-3.00
8.00	16.00	0.00	∞	3.40
9.00	28.00	0.20	140.00	-2.80
10.00	26.40	0.20	132.00	-6.80
11.00	26.20	0.40	65.50	-3.80
12.00	33.00	0.20	165.00	1.20
13.00	30.40	0.20	152.00	0.80
14.00	36.00	0.20	180.00	0.20
15.00	59.20	0.00	∞	7.20
-1 MS				

Tärykairaus on kevyellä porakalustolla suoritettava dynaaminen kairausmenetelmä (Jääskeläinen, 2009). Tärykairaus on Jääskeläisen (2009) mukaan painokairausta nopeampi kairausmenetelmä, mutta sen käyttötarkoitus rajautuu tiiviin pohjakerroksen sijainnin selvittämiseen eikä kerro juurikaan maaperän ominaisuuksista. Tärykairauksen käytön

perusajatus voidaan tiivistää siihen, että siellä, minne tärykairalla on päästy, ei voi olla kalliota (Jääskeläinen, 2009).

Porakonekairaus on ainoa kairausmenetelmä millä kalliopinnan sijainti voidaan varmuudella ennustaa (Jääskeläinen, 2009). Kalliopinnan oikean sijainnin selvittämiseksi on ulotuttava vähintään 3 metrin syvyyteen kallioon ellei kalliopinnan sijaintia voida toisin varmistaa (Jääskeläinen, 2009). Tämä on ns. kalliovarmistus kairaus (Jääskeläinen, 2009).

4.1.3 Infra- ja pohjatutkimusformaatti versio 2.5

Infra-pohjatutkimusformaatti tai lyhennettynä Infra-formaatti on Suomen Geoteknillisen Yhdistyksen SGY:n ylläpitämä dokumentaatio, josta uusin päivitysversio 2.5 on julkaistu 1.11.2018 SGY:n internet sivuilla (<https://www.sgy.fi>). Infra-formaatin tavoitteena on, että alan kaikki toimijat (suunnittelijat, tutkimusurakoitsijat ja laitevalmistajat) käyttävät tätä yleistä ja avointa formaattia pohjatutkimustiedonsiirroissaan. Infraformaattissa varsinaisia kairaushavaintorivejä lukuunottamatta kaikki tietorivit alkavat kaksikirjaimisella, rivillä olevaa tietoa kuvaavalla tunnuksella (rivin avain). Sarakkeiden erotinmerkki on välilyönti. Huutomerkillä (!) alkavat rivit ovat informaatorivejä. Informaatorivejä ei lueta sisään ohjelmistoihin ja niiden uloskirjoitus ei ole formaatissa tuettu ominaisuus. Päivämäärien esitysmuoto on ppkkvvvv. Jos päiväys ei ole tiedossa, merkitään 00000000. Rivikuvauksessa käytettyjen kenttäformaattien ja -pituuksien lyhenteet:

i kokonaisluku

t tekstikenttä, jonka pituutta ei ole rajoitettu; ei sisällä välilyöntejä.

c tekstikenttä, jonka pituus on rajoitettu; ei sisällä välilyöntejä (esim. c4 = neljä merkkiä).

f desimaaliluku, jossa desimaalien määrää ei ole rajoitettu.

- tietoa ei käsitellä; jos arvo puuttuu, käytetään '-' merkkiä.

- Jos formaatin lyhenne (I, T, C, F) on ISOLLA, arvo on pakollinen eikä '-' kelpaa.
- Ellei erikseen mainita, sallitut merkit ovat A...Z, a...z, 0...9.

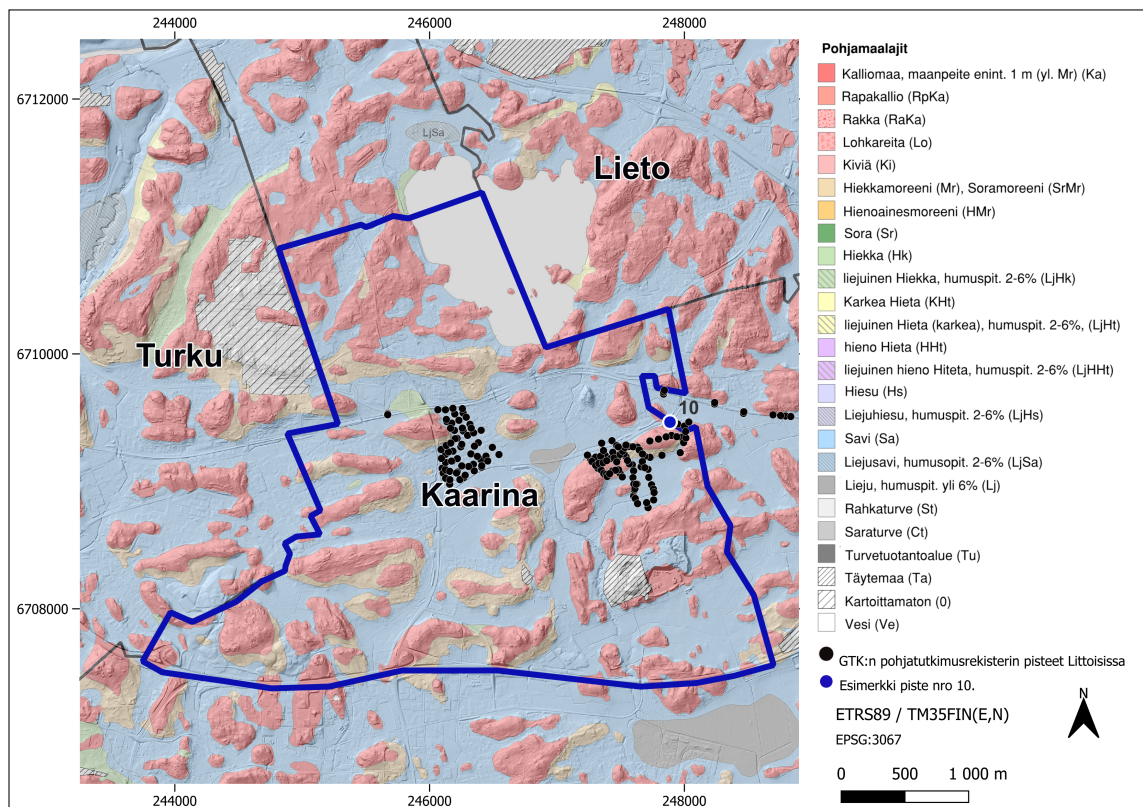
Taulukko 2: Infra-formaatin tunnukset. Pakollisten parametrien taustaväri on harmaa. Pakolliset lyhenteet: **FO, KJ, TT, XY, -1, ML** (SFS-EN ISO 14688-2), ja **KK** rivi kallionäytekairauksissa (SGY, 2018).

Lyhenne	Param.1	Param.2	Param.3	Param.4	Param.5	Param.6
Formaattitiedot FO	Formaatin versio nro t	Kirjoittava sovellus t	Sov. versio Nro t			
Mittausjärjestelmä KJ	Koordinaatisto T	Korkeusjärj. t				
Tiedon omistaja OM	Nimi t					
Maa- tai kalliolajiluokitus ML	Nimi t					
Tutkimusorganisaatio OR	Nimi t					
Työnumero TY	Työnumero T	Nimi t				
Pöytäkirja PK	Pöytäkirjan nro i	Kairaaja t	Tarkastaja t	Käsittelijä t	Digitoitu Vakio = D	Olosuhde t
Tutkimustapa TT	Tutkimustapalyhenne T	Luokka i	Tutkimuskohtainen tunnus T	Noudatettu standardi t	Näytteen- otin t	Tutk.tapa tarkenne t
Laitetiedot LA	Laitenumero i	Laitteen selitysteksti t	Kärjen koko t			
Koordinaattitiedot XY	x F	y F	kair.aloitustaso F	päiväys T	pistetunnus t	
Linjatiedot LN	Linjan nimi tai nro T	Paalu f	Etäisyys f			
Päätymistapa -1	Päätymistapa T					
Pohjatutk.ohj.yleistiedot GR	Ohjelman nimi t	Päiväys t	Ohjelmoija t			
Pohjatutk.ohj.tekstimit GL	Pohjatutk.ohj.tekstimit t					
Syvyyyden attribuuttitieto AT (kallionäytekairauksissa)	Kallionäyteattribuutin T nimi	Mahdollinen arvo T				
Alkukairaustiedot AL	Alkukair. syvyys (m) F	Alkukair. tapa t	Alkukair. maalaji t			
Vesi- tai huokosilmaputken tasotiedot ZP	Putken yläpään taso (m) PP f	Maanpinnan taso (m) MP f	Suojaputken yläpää taso (m) SP f	Kaivon kannen taso (m) KN f	Siivilä alap taso (m) f	
Vesi- tai huokosilmaputken TP rakenne TP	Yläosan rakenne t (putki, suojap. kaivo)	Siivilän pit. (m) f	Siivilätyyppi t	Putken halkaisija t (sisä/ulko mm)	Putkiaines t (taul. 11)	
Vesi- tai huokosilmaputken LP lisätiedot LP	Mittauskohta t (PP, MP, SP, KN)	Lisätieto t	Lukittu Kyllä / Ei Vakio= K tai E	Lukon omistaja t	Asentaja t	
Huomautustekstit HM	Huomautusteksti t (välilyönnit sallitaan)					
Vapaat tekstit TX	Vapaa teksti t (välilyönnit sallitaan)					
Piiloteksti HT	Ei tulostettava teksti t					
Epävirallinen maalaji EM	Epävirallinen maalaji t					
Vedenpinnan havainto VH						
Kallionäytekairaustiedot Vino kairaus KK	Suuntakulma (aste) F	Pystyakulma (aste) F	Halkaisija (mm) i			

4.1.4 GTK:n pohjatutkimusrekisteri

Pohjatutkimuksista saatavan tietojen tallennustapa vaihtelee kunnittain ja organisaatioittain. Geologian tutkimuskeskus (GTK) on 2010-luvun alusta alkaen ottanut talteen sekä jakanut kuntien ja muiden julkisten organisaatioiden pohjatutkimustietoja maksuttomasti Pohjatutkimukset-karttapalvelun kautta. Suurin osa pohjatutkimuksista saadaan Väyläviraston rakennus- ja saneeraushankkeista (GTK, 2021).

Pohjatutkimusrekisterissä pohjatutkimuksella tarkoitetaan pistemäistä tutkimustietoa, joka on joko kairaus, koekuoppa, näyte tai vedenpinnan mittaus (GTK, 2021). Dokumentoitu ja yhtenäisessä muodossa tallennettu pohjatutkimustieto on hyvä lähtökohta uusille suunnitelmille, jotta resurssit voidaan suunnata vielä tutkimattomiin kohteisiin (GTK, 2021). Pohjatutkimukset-palvelun aineistoa voi sekä tarkastella että ladata palvelun kautta omaan käyttöön (GTK, 2021).

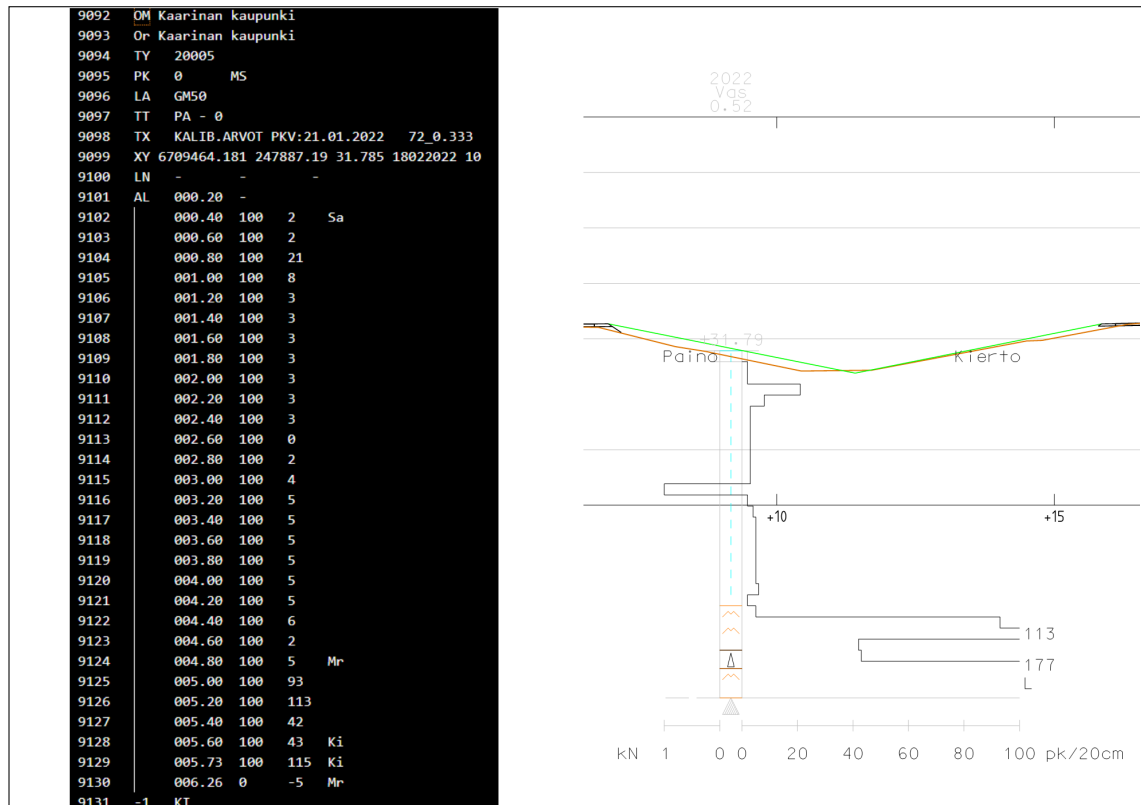


Kuva 10. GTK:n pohjatutkimusrekisterin pohjatutkimuspisteet Littoisissa (GTK, 2025, GTK:n Maaperä 1:20 000, Maanmittauslaitos, 2025).

4.1.5 Aineiston käsittely

GTK:n pohjatutkimusrekisteristä saa ladattua valitut kairauspisteet Infran pohjatutkimusformaatin mukaiseen tek-tiedostoon (kuva 10.). Tiedostot on muunnettava tietokantaan

tuotavaksi formaatiksi esim. csv-tiedostoksi. 3D-win ohjelmistossa on muunnin tätä varten, mutta tässä työssä muuntaminen tehtiin Python-scriptillä. Liite 1.



Kuva 11. Vasemmalla GTK:n pohjatutkimusrekisteristä ladatun tek-tiedoston piste nro 10. Oikealla tästä pisteestä piirretty kairadiagrammi. OM = tiedon omistaja, Or = tutkimusorganisaatio, TY = työnnumero=esim. piirustusnumero, TT = tutkimustapalyhenne, X = koordinaatti, Y = koordinaatti, Z = korkeus, pvm = päivämäärä, nro = pistenumero, AL = alkukairaustiedot, KL = kairauksen lopetustiedot. Kaira on ainoastaan syvyydellä 2.6 m (rivi 9113) tunkeutunut pelkillä painoilla, silloinkin maksimipainoilla 100 kg, mikä on kuvattu kairausdiagrammissa maalajipylyvään vasemmalle puolelle. Muuten on tarvittu pyörittämistä. Savikerrostumissa on tarvittu 2...6 puolikierrosta per 20 cm, moreenissa 42...115 puolikierrosta per 20 cm ja lähellä kalliopintaa on tarvittu lyöntiä, kunnes kairaus päättynyt kiveen tai kallioon. Puolikierrokset on kuvattu kairausdiagrammissa maalajipylyvään oikealle puolelle.

Taulukossa 3. on esitetty maaperäkerrostumien litologia ja syntyperä, jotka voidaan tulkita tutkimusalueelta yleisen geologisen ympäristön ja mm. Ojalan ym. (2021) ja Gardemeisterin (1975) mukaan. Tämän työn tavoitteen mukaan mallinnetaan erityisesti ns. kovan pohjan sijainti eikä erotella yksiköitä 4 - 6 toisistaan. Myös kaikki karkearakeiset maalajit kuten sora ja hiekka on syötteessä moreeni. Taulukoissa 4. ja 5. on esitetty esimerkkirivit kairaustiedoista, jotka on muodostettu tek-tiedostosta main.py-scriptillä. Ja edelleen taulukossa 6. on esitetty esimerkkirivit GemPy:lle lukukelpoisesta csv-tiedostotsta, joka on myös main.py-scriptillä muodostettu.

Taulukko 3: Littoisten alueen maaperäkerrostumien litologia ja syntyperä. Tunnus syötteessä kertoo, että tässä työssä on jouduttu yksinkertaistamaan ja savi on savea, karkearakeiset maalajit ovat moreenia.

Yksikkö	Litologia	Synty	Lisätiedot	Tunnus
Yksikkö 7	Hiekka ja sora	Moreenin huuhtoutuma	Rantakerrostumat	Mr
Yksikkö 6	Savi	Syvä murtovesi	Litorinasavi	Sa
Yksikkö 5	Savi	Syvä makeavesi	Ancylusjärvisavi	Sa
Yksikkö 4	Savi	Syvä murtovesi	Yoldiasavi	Sa
Yksikkö 3	Hiekka ja sora	Jäätikköjoki/ -reuna	Glasifluviaaliset	Mr
Yksikkö 2	Moreeni	Jäätikkösyntyinen	Pohjamoreeni	Mr
Yksikkö 1	Kallioperä	Metamorfinen, syväkivi	Biotiittiparagneissi, Mikroliinigraniitti	kallio

Taulukko 4: Kairausdata - osa 1. Muokattu main.py scriptillä tek-tiedostosta taulukkuun perustiedot jokaisesta pisteestä. Esimerkkirivit kairauspisteistä 24,26,24,25,11,39,44 ja 40 (pisteillä, voi olla sama numero, mutta tällöin eri työn nro). Näiden pisteiden kairausdiagrammit esitetty poikkileikkauksessa. Tämän taulukon nro vastaa poikkileikkauksen pistettä.

FO	OM	Or	TY	TT	X	Y	Z	pvm	nro	AL	KJ
2.1	Kaarinan kaup.	--	14538	PA	246252.433	6709289.712	26.462	11122020	24	0	ETRS-TM35FIN N2000
2.1	Kaarinan kaup.	--	1484	PA	246544.333	6709209.713	25.354	27012014	26	0	ETRS-TM35FIN N2000
2.1	Kaarinan kaup.	--	1484	PA	246442.341	6709197.317	25.909	27012014	24	0	ETRS-TM35FIN N2000
2.1	Kaarinan kaup.	--	1484	PA	246492.332	6709266.174	25.698	27012014	25	0	ETRS-TM35FIN N2000
2.1	Kaarinan kaup.	--	14538	PA	246351.561	6709275.581	25.915	11122020	11	0	ETRS-TM35FIN N2000
2.1	Kaarinan kaup.	--	20005	PA	247759.155	6708853.639	29.809	11022022	39	0	ETRS-TM35FIN N2000
2.1	Kaarinan kaup.	--	20005	PA	247602.092	6708883.876	29.182	11022022	44	0	ETRS-TM35FIN N2000
2.1	Kaarinan kaup.	--	20005	PA	247704.002	6708832.266	29.622	11022022	40	0	ETRS-TM35FIN N2000

Taulukko 5: Kairausdata - osa 2. Maalajisarakeet jatkuu edellisestä taulukosta 2. Esimerkiksi ensimmäisen rivin piste numero 24. Moreenin yläpinta (ensimmäinen esiintyminen kairauksessa) 18,56 metriä aloitusvyödydestä (+26,462) eli Moreenin yläpinta tasolla 26,462 - 18,56 = +7,902. Tähän lisätään +0,100 ja saadaan saven alapinta.

Si	Sa	liSa	Hk	Sr	SrMr	Ki	Mr	Hksa	Sasi	SrMr	Ka	Paattymissyv./-tapa
[]	[0.20]	[]	[]	[]	[]	[]	[18.56]	[]	[]	[]	[]	18.56/kivi tai kallio
[]	[0.40...20.20]	[]	[]	[]	[]	[]	[20.40...26.26]	[]	[]	[]	[]	26.26/määräsyv.
[]	[0.40...13.40]	[]	[]	[]	[]	[]	[13.60...17.48]	[]	[]	[]	[]	17.48/määräsyv.
[]	[0.40...17.80]	[]	[]	[]	[]	[]	[18.00...21.28]	[]	[]	[]	[]	21.28/määräsyv.
[]	[0.20]	[]	[]	[]	[]	[]	[20.00,21.12]	[]	[]	[]	[]	21.12/kivi tai kallio
[]	[0.60,1.40]	[]	[]	[]	[]	[]	[13.92...18.12]	[]	[]	[]	[]	19.20/kivi tai kallio
[]	[0.80]	[]	[]	[]	[]	[]	[4.22]	[]	[]	[]	[]	4.24/kivi tai kallio
[]	[0.80]	[]	[]	[]	[]	[]	[9.86]	[]	[]	[]	[]	9.88/kivi tai kallio

Taulukko 6: Taulukoiden 2. ja 3. csv-tiedostosta edelleen muokattu csv-tiedosto (offset_data.csv kuva 13.) GemPy:lle syötteenä. Kunkin pisteen muodostuman alapinnan +korkeus tiedostossa. Esimerkiksi piste nro 24., jonka y=6709289.712 on tämän taulukon riveillä 3 ja 22. Saven alapinta +0,100 moreenin yläpinta eli 8,002, kallion yläpintaan on saatu lisäämällä +2,00, kun kairaus on päättynyt kiveen, kallioon tai lohkareseen eli tässä +5,902.

Piste	X	Y	Z	Formation
11	246351.561	6709275.581	6.015	Sa
24	246442.341	6709197.317	12.409	Sa
24	246252.433	6709289.712	8.002	Sa
25	246492.332	6709266.174	7.798	Sa
26	246544.333	6709209.713	5.050	Sa
39	247759.155	6708853.639	15.990	Sa
40	247704.002	6708832.266	19.860	Sa
44	247602.092	6708883.876	25.062	Sa
11	246351.561	6709275.581	4.795	Mr
24	246442.341	6709197.317	8.429	Mr
24	246252.433	6709289.712	7.902	Mr
25	246492.332	6709266.174	4.418	Mr
26	246544.333	6709209.713	-0.906	Mr
39	247759.155	6708853.639	10.609	Mr
40	247704.002	6708832.266	19.742	Mr
44	247602.092	6708883.876	24.942	Mr
10367	246083.000	6709441.000	34.121	kallio
10386	246083.000	6709419.000	44.184	kallio
10387	246105.000	6709419.000	36.910	kallio
11	246351.561	6709275.581	2.795	kallio
24	246442.341	6709197.317	6.429	kallio
24	246252.433	6709289.712	5.902	kallio
25	246492.332	6709266.174	2.418	kallio
26	246544.333	6709209.713	-2.906	kallio
39	247759.155	6708853.639	8.609	kallio
40	247704.002	6708832.266	17.742	kallio
44	247602.092	6708883.876	22.942	kallio

4.2 Analyysimenetelmät

4.2.1 Python-ohjelmointikieli ja sen kirjastot

Python on ohjelmistosuunnittelija Guido van Rossumin 1980-luvun lopulla kehittämä korkean tason, tulkattu ja dynaamisesti tyyhitetty ohjelmointikieli, joka tukee oliopohjaista ohjelmointia (OOP) ja on laajennettavissa C- ja C++ -ohjelmointikielillä (Cutting, 2021). Python- tulkki ja -kirjastot on kehitetty avoimen lähdekoodin projektina (Cutting, 2021). Python on erityisesti koneoppimisen (ML) ja tekoälyn (AI) tehtävissä suosittu ohjelmointikieli, jonka suunnittelufilosofia korostaa luettavuutta ja selkeyttä (Cutting, 2021).

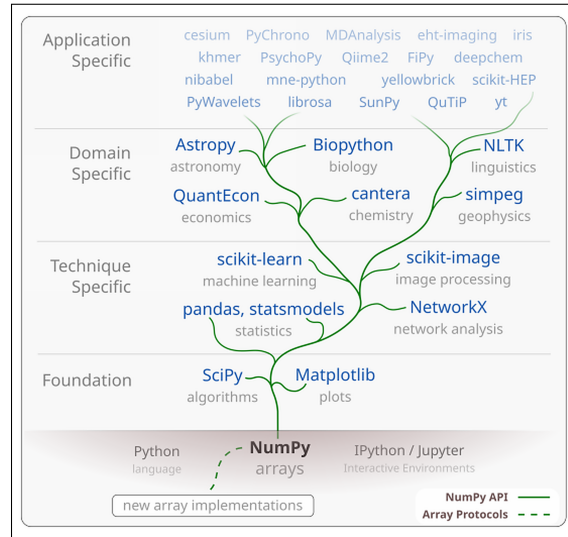
Pythonin etuja ovat Cuttingin (2021) mukaan mm. koodin lyhyys, tuki useille ohjelmointiparadigmoille, laaja käyttäjäyhteisö, dynaaminen tyyppitys sekä valmiiksi asennettujen että asennettavien kirjastojen paljous ja monipuolisuus. Heikkouksia Cuttingin (2021) mukaan ovat tulkattuna kielenä sen hitaus ja siksi heikompi soveltuvuus graafisiin käyttöliittymäsovelluksiin, vähäinen kontrolli datatyypeistä sekä suuri muistin kulutus. Pythonin tulevaisuus näyttää kuitenkin valoisalta, sillä yhä digitalisoituvimmissa tietoyhteiskunnissa sen suosio näyttää Taulukon 6. mukaan vain kasvavan. Lisäksi tekoälyn yleistymisen myötä Python-kirjastojen kehitys on vain kiihtynyt. (Cutting, 2021).

Taulukko 7: Ohjelmointikielten suosioindeksi kesäkuu 2025 (PYPL Popularity of Programming Language Index — Worldwide June 2025) <https://pypl.github.io/PYPL.html>

Rank	Language	Share (%)	1-year trend (%)
1	Python	30.27	+1.8
2	Java	14.89	-0.9
3	JavaScript	7.78	-0.9
4	C/C++	7.12	+0.6
5	C#	6.11	-0.6
6	R	4.54	-0.1
7	PHP	3.74	-0.7
8	Rust	3.14	+0.6
9	TypeScript	2.78	-0.1
10	Objective-C	2.74	+0.3

NumPy on tieteellisen laskennan Python kirjasto, joka tarjoaa monipuolisen ja -dimensionaalisen taulukko-olion (Karimi, 2021). NumPy sisältää useita tehokkaita operaatioita taulukoille (Karimi, 2021). NumPy julkaistiin vuonna 2005. Se yhdisti siihen

asti käytössä ollut kaksi Pythonin taulukkolaskentakirjastoa Numarrayn ja Numericin (Karimi, 2021). Numpy-tilukko on tietorakenne, joka tallentaa ja hakee moniulotteisia taulukoita (tensorit) ja mahdollistaa laajan kirjon tieteellistä laskentaa (Harris ym., 2020). Lukematon määrä Pythonin ekosysteemin kirjastoja perustuu NumPy-kirjastoon (kuva 12.) (Harris ym., 2020).



Kuva 12. Numpy on tieteellisen Python ekosysteemin perusta (Harris ym., 2020).

Matplotlib -kirjaston on alkujaan kehittänyt John D. Hunter vuonna 2003 tavoitteenaan korvata suosittu Matlab grafiikkamoottori, tukea eri alustoja, tuottaa korkealaatuiset rasteri- ja vektoritulosteet, tarjota tuki matemaattisille lausekkeille sekä mahdollistaa vuorovai- kutteinen työskentely komentoriviltä (Rougier, 2021). Tätä nykyä Matplotlib-kirjasto on käytännössä Python visualisoinnin de facto -standardi (Rougier, 2021). Matplotlib on monipuolinen ja tehokas, jonka avulla voi suunnitella erittäin korkealaatuisia tieteelliseen julkaisuihin soveltuvia kuvioita (Rougier, 2021).

Pyvista on Python-kirjasto, joka tarjoaa helposti lähestyttävän ja intuitiivisen rajapinnan Visualization Toolkit VTK-kirjastoon, mikä helpottaa mm. paikkatietoaineistojen visu- aalista integrointia (Sullivan ym, 2019). VTK on poikkeuksellisen tehokas tieteellisen visualisoinnin ohjelmakirjasto (Sullivan ym, 2019). Yhdistettynä Pythoniin saadaan C++:n suorituskyky ja Pythonin nopea iterointi (Sullivan ym, 2019). Tämän ohjelmointi on kuitenkin Sullivanin ym. (2019) mukaan tarpeettoman monimutkaista, koska sen Python-rajapinta edellyttää C++ -tyylisiä kutsuja. Pyvista tarjoaa selkeän ja hyvin dokumentoidun rajapin- nan Visualization Toolkit (VTK) -kirjastoon (Sullivan ym, 2019). Sen avulla tutkijat voivat nopeasti tutkia suuria aineistoja ja edistää toistettavuutta (Sullivan ym, 2019).

Rasterio on eristyisesti geospaatialisen rasteridatan käsittelyyn eirkoistunut Python-

kirjasto, joka on rakennettu GDAL (Geospatial Data Abstraction Library) päälle (Mapbox, 2018). Se mahdollistaa rasteridatan, kuten satelliittikuvien ja digitaalisten korkeusmallien lukemisen, kirjoittamisen ja analysoinnin Python-ohjelmalla (Mapbox, 2018). Rasteriota käytetään laajasti geoinformatiikassa, kaukokartoituksessa ja muissa GIS sovelluksissa (Mapbox, 2018).

Pandas on Python-ohjelmointikielelle kirjoitettu ohjelmistokirjasto tietojen käsittelyä ja analysointia varten (Mckinney, 2011). Se tarjoaa erityisesti tietorakenteita ja operaatioita numeeristen taulukoiden ja aikasarjojen käsittelyyn (Mckinney, 2011).

GemPy on siis avoimen lähdekoodin Python-kirjasto geologisten 3D-mallien tuottamiseen (Varga ym., 2019). GemPyn ensimmäinen versio julkaistiin 2019 ja vuonna 2024 julkaistiin versio 3 (Terranigma, 2025). Uusimmassa versiossa GemPy on jaettu useampaan kirjastoon (Terranigma, 2025):

- **gempy_engine**: Suorittaa geologisen mallinnuksen implisiittisen interpoloinnin: co-kriging, kovarianssifunktiot ja *skalaarikenttien* evaluointi syöteaineistolla (rajapinnat ja orientaatiot).
- **gempy_viewer**: 2D/3D-visualisointi (leikkaukset, pinnat).
- **gempy_plugins**: Lisätoiminnot ja integraatiot.
- **gempy_probability**: Probabilistinen mallinnus ja epävarmuusanalyysi (tulossa).

Koska GemPy on implisiittinen mallinnusmenetelmä, sen avulla voidaan nopeasti luoda ja päivittää geologista 3D-mallia (Varga ym., 2019). GemPy on avoimen lähdekoodin ohjelma, dokumentaatio on erittäin kattava ja tieteellinen perusta vankka (Terranigma, 2025).

4.2.2 Geologisen 3D-mallin luonti GemPy-kirjastolla

Vuokaaviossa kuva 13. on esitetty 3D-mallin luonnin työvaiheet tietolähteistä raportointiin. Tietolähteinä käytettiin GTK:n pohjatutkimusrekisterin tek-tiedostoja, Maanmittauslaitoksen 2 m korkeusmallia sekä GTK:n maaperäkarttaa 1:20 000. Lisäksi luotiin config.json-asetukset-tiedosto, joka sisältää parametreja (Infra-formaatin sarakkeet, värikartta, kerrostumien aliakset, huomioitavat kerrostumat jne.), joita säädellään erilaisisten geologisten ympäristöjen mukaan ja on käyttäjän muokattavissa. Tässä työssä kirjoitettu Python-ohjelma muodostuu kahdesta pääscriptistä: main.py ja gem.py (kuva 13.).

Main.py listaa ensin aineiston_kasittely/input -kansiossa olevat tek-tiedostot, joita saa pohjatutkijalta tai esimerkiksi GTK:n pohjatutkimusrekisteristä. Jos hakee kairaustieto-

ja GTK:n pohjatutkimusrekisteristä, valitaan webportaalista halutut pisteet ja tallennetaan aineiston_kasittely/input -kansioon, jonka jälkeen tiedosto (jossa on siis useampi kairauspiste) on main.py:n käytävissä. Lisäksi main.py tarvitsee korkeusmallin alueelta. Optiona voidaan antaa muita käytävissä olevia pisteitä kansioon: aineiston_kasittely/output_data/. Tällaisia pisteitä ovat esimerkiksi tässä työssä muodostetut kalliopintapisteet. Ne saatiin (kuva 13. yläoikea 'linja') ensin digitoimalla maaperäkartan mukaiset kallioalueet tutkimusalueella alueiksi, joiden mukaan leikattiin alueet korkeusmallista, jolloin saatiin Kallio_korkeusmalli.tif. Tästä muodostettiin geotifToCsv.py -scriptin avulla Kallio_pisteet.csv, joka toimii main.py:n syötteenä. Ohjelma jatkuu, kun käyttäjä on valinnut tek-tiedoston listalta. Tämän jälkeen main.py lukee valitun tek-tiedoston ja 'parssi' siitä ensin output_tek_to_csv.csv tiedoston (taulukot 4. ja 5.) ja yhdistää ja suodattaa (tek-tiedoston min-x...max-x ja min-y...max-y) muut pisteet (esim. kalliopintapisteet) ja kirjoittaa offset_data.csv tiedoston (taulukko 6.) gem.py:n syötteeksi. Lisäksi main.py leikkaa korkeusmallin valitun tek-tiedoston laajuuden (min-x...max-x ja min-y...max-y) mukaisesti neliönmuotoiseksi topography.tif gem.py:n syötteeksi. Lisäksi main.py kirjoittaa orientation_offset.csv gem.py:n syötteeksi.

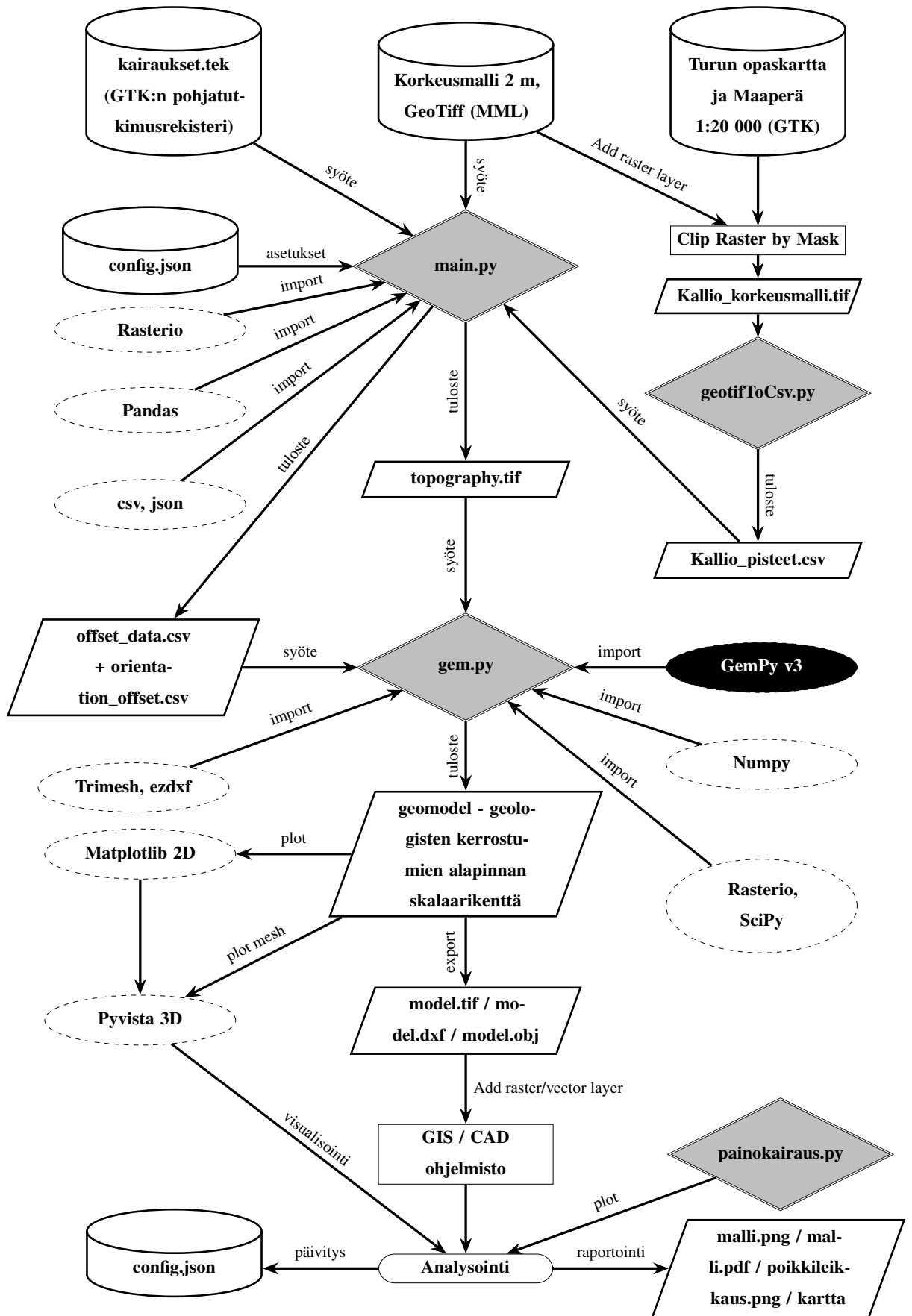
Main.py:n algoritmi sisältää kartanteossa yleisesti tunnettuja yleistämisen muotoja (Holopainen, 2015). Yksinkertaistusta käytetään, kun kirjoitetaan orientation_data.csv -tiedostoa ja jokaiselle kerrostumalle annetaan vaakasuora kaade. Valintaa, kun tek-tiedostoista huomioidaan ainoastaan painokairauspisteet ja kun, valitaan ainoastaan huomioitavat kerrostumat sekä yhdistämistä, kun tietyille maalajeille (kerrostumille) annetaan aliaksia rajapintojen vähentämiseksi.

Gem.py saa siis syötteenä kolme tiedostoa offset_data.csv, orientation_offset.csv ja topography.tif. Alla on esitetty riisuttu koodiesimerkki gem.py scriptistä, mistä nähdään miten GemPy-kirjastoa käytännössä käytetään. Rivillä yksi tuodaan gempy-kirjasto ja rivillä kaksi gempy-katselin. Kommenteissa (alkaa merkillä #, ei osa koodia) kolme pistettä tarkoittaa, että koodirivejä on ennen ja jälkeen varsinaisessa scriptissä. Rivillä neljä alkaa gempy:n pääfunktio, joka sisältää geo-mallin (geo_model) määrittelyn (rivillä 6 käytetään GemPy-kirjastoa gp), jossa annetaan mallille rivi kerrallaan nimi, laajuus, resoluutio ja syötteiden (GemPy siis vaatii sekä pintapisteet-tiedoston että orientaatio-tiedoston) polut riveillä 11 ja 12. Rivillä 15 määritetään mihin stratigrafiseen sarjaan kukin kerrostuma kuuluu. Rivillä 24 asetetaan topografia, määritetään sen laajuus ja resoluutio. Rivillä 26 alkaa mallin laskenta ja rivillä 28 käytetään tuotua gempy-katselinta ja määritetään plottauksen parametrit. Plottaukseen annetaan parametrejä kuten ve=1 eli vertikaalinen liioittelu, show_data=False eli ei näytetä datapisteitä, show_topography=False eli ei näytetä topogra-

fiaa, show_lith=True eli näytetään litologia, image=False eli ei muuteta pysähdyskuvaksi. Rivillä 32 plotataan malli.

Gem.py myös luo tuotujen kirjastojen avulla tif-tiedoston (kirjastot: SciPy, Rasterio) ja dxf-tiedoston (kirjastot: Trimesh, ezdxf) GemPy:n luomasta kolmioverkosta, mitkä voidaan edelleen viedä esimerkiksi GIS tai CAD ohjelmiin. Joissa voidaan tehdä analysointeja, laskentaa, visualisointeja ja esimerkiksi poikkileikkaustarkasteluja. Apuscriptiksi on tässä kirjoitettu myös painokairaus.py, joka piirtää kairausdiagrammeja tek-tiedostoista.

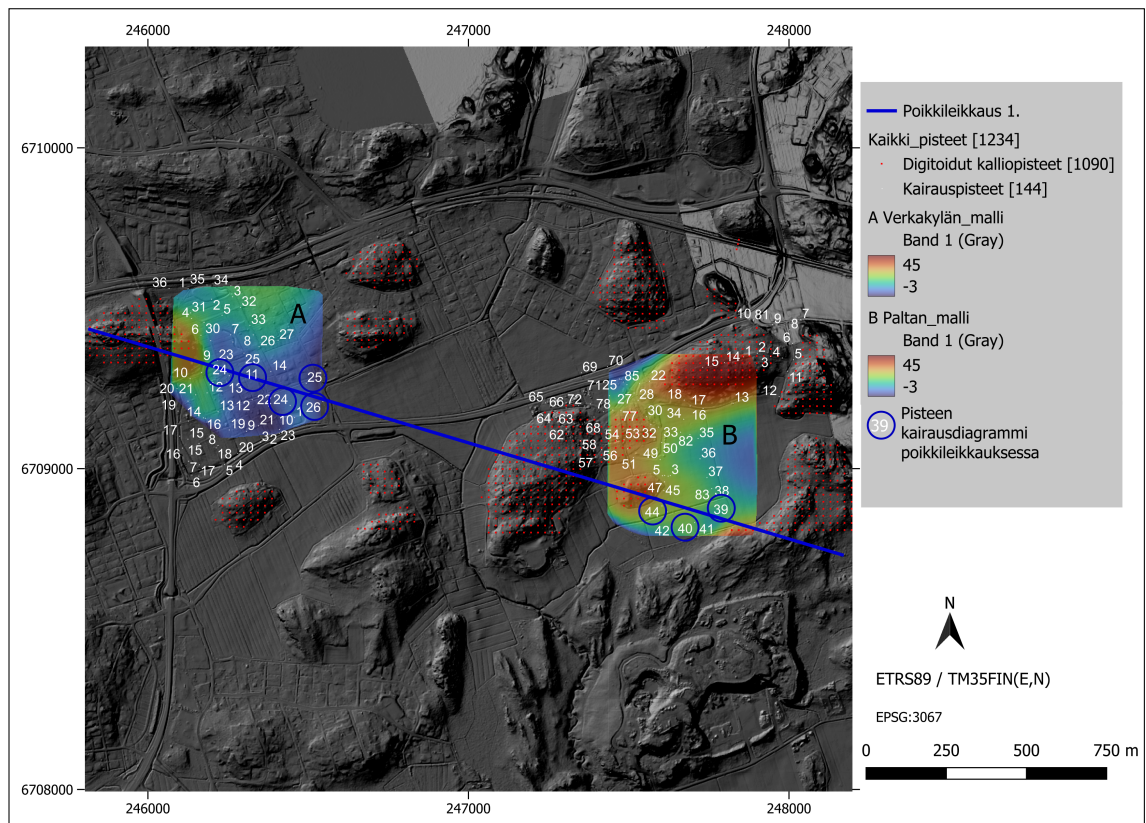
```
1 import gempy as gp
2 import gempy_viewer as gpv
3 # ...
4 def gempy_main():
5     # ...
6     geo_model = gp.create_geomodel(
7         project_name="Luk-tutkielma",
8         extent=[x_min, x_max, y_min, y_max, z_min, z_max],
9         resolution=[30, 30, 30],
10        importer_helper=gp.data.ImporterHelper(
11            path_to_orientations="aineiston_kasittely/output_data/
orientation_offset.csv",
12            path_to_surface_points="aineiston_kasittely/output_data/
offset_data.csv",
13        ),
14    )
15    gp.map_stack_to_surfaces(
16        gempy_model=geo_model,
17        mapping_object={
18            "Postglasiaalin": ("Sa",),
19            "Glasiaalin": ("Mr",),
20            "basement": ("kallio",),
21        },
22    )
23    # ...
24    set_topography(geo_model, x_min, x_max, y_min, y_max, z_min,
downsample_factor=1)
25    # ...
26    gp.compute_model(geo_model)
27    # ...
28    gpv.plot_3d(
29        geo_model, ve=1, show_data=False, show_topography=False,
show_lith=True, image=False
30    )
31    # ...
32    plt.show()
```



Kuva 13. Geologisen maankamaramallin vuokaavio. Tietolähteet (lieriöt), tämän työn Python-scriptit (harmaat vinoneliöt), Python-kirjastot (ellipsit), tulosteet/syötteet (suunnikkaat) sekä käsittely muissa ohjelmissa, tässä QGIS:ssä (neliöt).

5 Verkakylän ja Paltan mallit sekä poikkileikkaus

Kuvassa 14. on esitetty GemPy-kirjastolla laadittujen Verkakylän- ja Paltanmallin kalliopinnan korkeusmallit A ja B sekä QGIS-ohjelmassa luotu poikkileikkauksen sijainti. Kuvissa 15. ja 16 on esitetty GemPy-kirjastolla luoduista malleista otettuja pysähdyskuvia eri suunnista ja eri parametreilla. Kuvassa 17. on pituusleikkaus, joka on laadittu QGIS-ohjelmassa yhdistämällä Verkakylän malli, Paltan malli, digitoitu kalliopintamalli sekä tutkimuspisteiden ulkopuolisen alueen malli (luotu ns. dummy-pisteiden avulla).



Kuva 14. Kaarinan Littoisten kalliopintamallit, tutkimuspisteet (Maanmittauslaitos 2025).

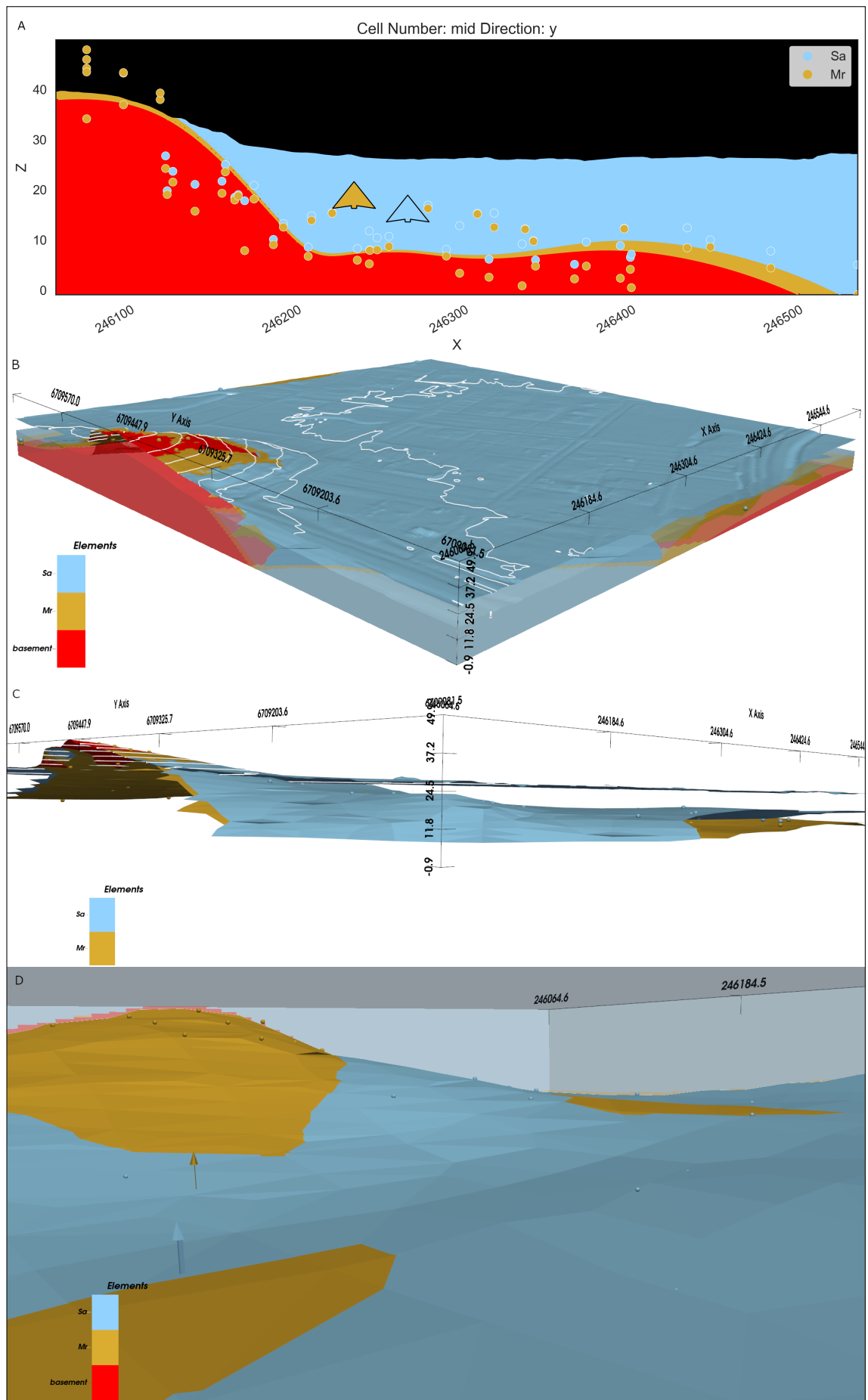
Gempyn luoman Verkakylän maaperämallin laskennassa käytetty data, luodut tiedostot ja luodun mallin laajuus:

- Valittu tiedosto: aineiston_kasittely/input_data/VerkakylaSuppea_2N2000_export_results_21.8.2025.tek
- Kirjoitettiin CSV: D:\Luk\LukFinal\aineiston_kasittely\output_data\output_tek_to_csv.csv
- Tek-tiedostosta parsitut rivit → CSV: 47
- Kairauspisteitä yhteensä: 48 | käytetty: 45
- Rivejä yhteensä kairauspisteistä tähän mennessä: 90
- Suodatetut rivit tiedostosta kallio_surface_points_combined.csv: 10 riviä
- offset_data.csv kirjoitettu. Rivejä yhteensä: 100

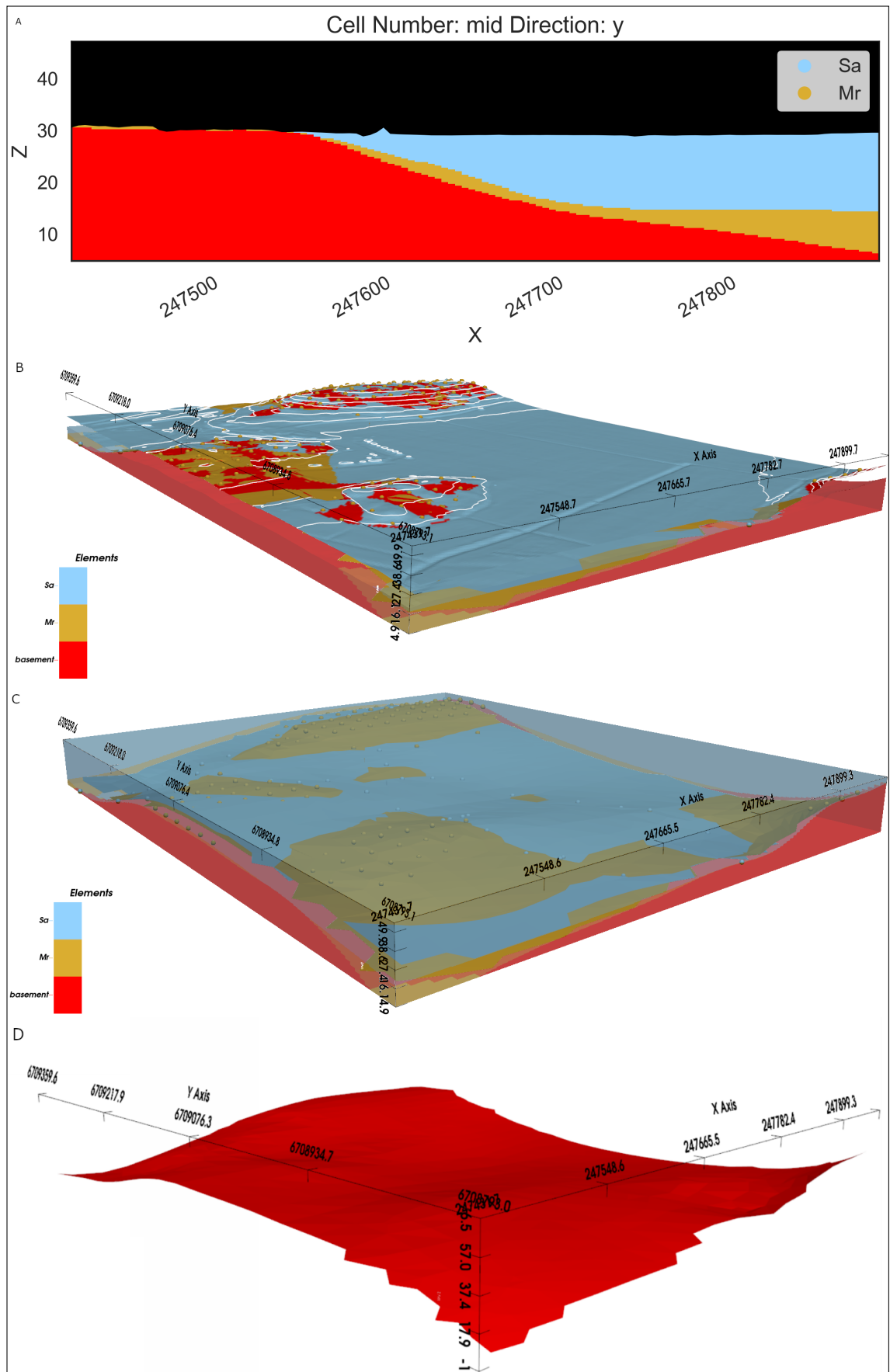
- Orientaatio-tiedosto luotu: aineiston_kasittely/output_data/orientation_offset.csv
- Yksiköt → 'Postglasiaalinen': ('Sa'), 'Glasiaalinen': ('Mr'), 'basement': ('kallio')
- Elementin suhdetyyppi → Postglasiaalinen = StackRelationType.ONLAP
- Laajuus X: 246064.574..246544.333 | Y: 6709081.73..6709569.964 | Z: -0.906..47.865

Gempyn luoman Paltan maaperämallin laskennassa käytetty data, luodut tiedostot ja luodun mallin laajuus:

- Valittu tiedosto: D:\Luk\LukFinal\aineiston_kasittely\input_data\PalttaSuppea_2_N2000_export_results_22.8.2025.tek
- Kirjoitettiin CSV: D:\Luk\LukFinal\aineiston_kasittely\output_data\output_tek_to_csv.csv
- Tek-tiedostosta parsitut rivit → CSV: 64
- Kairauspisteitä yhteensä: 64 | käytetty: 46
- Rivejä yhteensä kairauspisteistä tähän mennessä: 96
- Suodatetut rivit riedostosta kallio_surface_points_combined.csv: 122 riviä
- offset_data.csv kirjoitettu. Rivejä yhteensä: 218
- Orientaatio-tiedosto luotu: aineiston_kasittely/output_data/orientation_offset.csv
- Yksiköt → 'Postglasiaalinen': ('Sa'), 'Glasiaalinen': ('Mr'), 'basement': ('kallio')
- Elementin suhdetyyppi → Postglasiaalinen = StackRelationType.ONLAP
- Laajuus : X: 247431.703..247899.271 | Y: 6708793.141..6709359.579 | Z: 4.872..47.118



Kuva 15. Verkakylän maaperämalli eri suunnista ja zoomauksilla. Malli luotu GemPy-kirjastolla. Ylimmän kuvan poikkileikkauksessa ja alimmssa kuvassa mallin sisältä nähdään mm. orientaatio-uolet, jotka GemPy tarvitsee laskentaan kultakin kerrokselta.



Kuva 16. Paltan maaperämalli luotu GemPy-kirjastolla. Poikkileikkauksen resoluutiona käytetty pienempää kuin Verkakylän poikkileikkauksessa. Plottauksia voidaan tehdä topografialla tai ilman. Voidaan myös esittää vain yhtä pintaa kerrallaan, alin kuva jossa Paltan kalliopintamalli.

6 Verkakylän ja Paltan mallien ja poikkileikkauksen tarkastelu

Kaarinan Verkakaaren alue Littoisissa on geologisesti tyypillistä varsinais-suomalaista maalaismaisemaa. Tasaisia peltoalueita eli savikoita ympäröi jyrkkäpiirteiset kalliomäet, joiden juuret on usein moreeni- ja/tai rantakerrostumien peittämiä. Pientaloalueet ovat keskittyneet kallio- tai moreenimäille ja peltoaukeita halkovien teiden routavauriot tavallisia. Kalliomäet kohoavat Littoisissa paikoin yli 55 mpy ja savikot ovat noin tasolla 25 mpy...30 mpy. GemPy-kirjastolla luodut maaperämallit antavat syvällisemmän kuvan alueen geologiasta.

Kuvassa 15.a on Verkakylän mallin poikkileikkaus y-suunnassa keskeltä mallia. Poikkileikkauksesta voidaan nähdä, että kalliopintaa peittävän moreenin (tässä siis moreeni ja/tai sora) paksuus kasvaa kalliopinnan painuessa alemmas. Tämä on vielä selkeämmin nähtävissä kuvassa 16.a Paltan mallin poikkileikkauksessa. Nyt kun tarkastellaan QGIS-ohjelmassa laadittua poikkileikkausta (kuva 17.) nähdään, että totta tosiaan Paltan alueen painokairausdiagrammeissa tämä kalliopinnan syvetessä paksuuntuva kerrostuma on moreenia. Mutta Verkakylän poikkileikkauksessa kohti Verkakylää mentäessä kalliopinta syvenee, samoin karkerakeinen kerrostuma, mutta tämä ei olekaan enää moreenia vaan muuttuu moreenista soraksi kairauspisteiden 11 ja 14 välillä. Kairauspisteessä 26. tämän kerrostuma jatkuu vielä syvyydellä -2 mpy, johon kairaus on päätetty määräsyyvyteen. Kyseessä on todennäköisesti jäätikön sulamisvesien kerrostama sorakerros. Poikkileikkauksen kalliopintamalli on luonnollisesti tässä kohtaa ja siitä itään päin virheellinen, koska kairauspisteitä ei enää ole ja viimeinenkin kairattu määräsyyvyteen. Mielenkiintoinen kohta, miten syvä painanne Verkakaaren alueella tässä kohtaa on kyseessä. Syy miksi moreeni ja sora on asetettu aliakseiksi tässä on se, että soraa esiintyy sekä pohjamoreenin päällä että kalliomäkien rantakerrostumissa, jolloin GemPyn laskema skalaarikenttä näiden yhdistyessä hajoaa. Nämä kerrostumat pitäisi erottaa toisistaan, mutta sen algoritmin laatiminen jäi tämän työn ulkopuolelle.

Hienorakeisten sedimenttien paksuus Verkakylän alueella on noin 20 metriä ja Paltan alueella 5 - 15 metriä. Savialueen pinnalla on hyvin tavallinen noin metrin paksuinen kuiva-kuori. Tämän alla on noin viiden metrin paksuinen, kairausvastuksen mukaan pehmeämpi savi. Tämä on todennäköisesti humuspitoista Litorinan aikaista liejusavea. Tulkintaa vahvistaa maaperäkartalla oleva liejusavi Verkakaaren alueella. Tämän alla on noin 10 metrin paksuinen tasalaatuiselta vaikuttava kerrostuma, joka on todennäköisesti Ancylyl- ja/tai Yoldianaikaista homogeenista, sinistä savea. Tämän alla on noin kolmen metrin paksuinen sitkeämpi savikerrostuma, joka on todennäköisesti kerrostunut Yodiavaiheen alussa, jolloin alkuun kerrostui vuosikerrallista savea. Myös tämän kerrostuman paksuus syvenee samanaikaisesti kalliopinnan kanssa. Kairauspisteessä 26. sen paksuus on jo noin 6 metriä. Savikerrostumien yläraja on yleisesti noin 20 metriä Itämeren korkeimman rannan alapuolella (Salonen, 2002). Tämä voidaan todeta myös poikkileikkauksesta (kuva 17.),

jossa Paltan mallin saven yläpinta on noin tasolla +30 mpy ja Litorinan korkein rantataso alueella oli noin +50 mpy.

Edellä tehtyjen tulkinnoissa on epävarmuutta ja niiden varmistamiseksi tarvittaisiin mm. siitepölyanalyysia, sedimenttien makroskooppista rakennetutkimusta sekä luokitus- ja lujuusominaisuuksien laboratoriokeiteita ja näiden kaikkien huolellista tarkastelua. Toisaalta koska emme pysty suoraan mittaamaan tai havainnoimaan maanalaista todellisuutta, meidän on yhdistettävä mittaukset erilaisiin matemaattisiin ja numeerisiin malleihin, josta saadaan likiarvo todellisuudesta (Wellmann ja Caumon, 2018). Eli on huomattava, että malli on joka tapauksessa likiarvo todellisuudesta eikä täysin realistista mallia voida millään ohjelmalla tuottaa. Vielä kun tehdään kartanteossa yleisesti käytettäviä yleistyksiä. Niitä on tässä työssä tietoisesti tehty, jotta saadaan tarkoituksenmukainen malli luotua. Tässä työssä tavoitteena oli selvittää ns. kovan pohjan sijainti eli hienorakeisen ja karkearakeisen kerrostuman rajapinta. Jos tarkastellaan poikkileikkausta (kuva 17.), voidaan todeta, että kovan pohjan eli saven alapinta osuu melko tarkasti yhteen painokairausdiagrammien rajapintojen kanssa ja pisteiden väleissä pinnan muoto näyttää uskottavalta. Tämän perusteella voidaan siis todeta, että ns. kovan pohjan selvittäminen on onnistunut GemPy-kirjastolla.

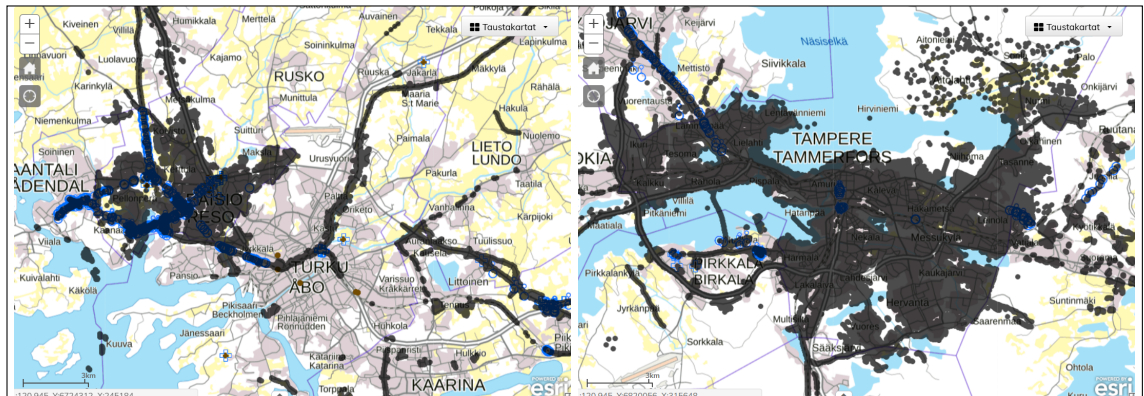
3D-mallinnuksen staattinen kuvaesitys on usein hankalaa varsinkin kun pituuskaala on huomavasti suurempi kuin korkeuskaala. Mallin kuvat (15. ja 16.) antavat kuitenkin käsityksen maaperän kerrosrakenteesta ja yksittäisten pintojen muodoista. Todellinen lisäarvo tulee kuitenkin mallinnetun kerrostuman tif- ja dxf-formaattiin luotavasta pintamalleista, joista voidaan GIS- ja CAD-ohjelmissa tehdä visualisointia, analysointia, laskentaa jne. Tämä on mahdollista toteuttaa GemPy-kirjastolla muutamassa minuutissa, jos tekstiedostossa on riittävä määrä ja riittävän tieheällä ruudukossa kairauspisteitä. Syvällisempään analysointiin tarvitaan luonnollisesti tueksi kairausdiagrammeja ja muuta geologista informaatiota. Lisäinformaation ansiosta mallia voidaan muokata, mikä on taas GemPy-kirjastolla suhteellisen vaivatonta ja nopeaa.

7 Johtopäätökset

Tässä työssä laaditun Python-ohjelman avulla voidaan suhteellisen vaivattomasti ja nopeasti muodostaa GTK:n pohjatutkimusrekisteristä ladatulla tai pohjatutkijalta saadulta tiedostolla maaperän 3D-malli avoimen lähdekoodin GemPy-kirjastolla. Mikäli pohjatutkimuskairauksia on tiheällä ruudukolla käytettävissä, voidaan suurella todennäköisyydellä luoda maaperän 3D-malli, jossa kovan pohjan saa tarkasti mallinnettua. Luotettava 3D-mallinnus edellyttää kuitenkin paikallisen stratigrafian ja sedimenttiyksiköiden geometrian ymmärtämistä.

Ohjelmaa voisi jatkokehittää ottamalla mukaan painokairauksen lisäksi muut kairausmenetelmät, lisäämällä käyttöliittymä, josta voisi antaa asetuksia ohjelman lähtöarvoiksi ja esimerkiksi kairausvastuksen huomioiminen algoritmissa.

Tutkimuspisteiden määrä on luonnollisesti yksi keskeisimmistä 3D-mallinnuksen muuttujista. Mallin luotettavuus kasvaa yleisesti ottaen datan määrän lisääntyessä. Kuvan 18. perusteella Turun seudulla laajemman alueen maaperän mallintaminen GemPy kirjastolla ja avoimella datalla onnistuu parhaiten Raision alueelta, jossa kaupunki on nähtävästi siirtänyt koko pohjatutkimusrekisterinsä GTK:n avoimeen pohjatutkimusrekisteriin. Samoin Pirkanmaalla Tampereen kaupungin pohjatutkimukset ovat avoimessa rekisterissä hyvin edustettuna. Avoimuudessaan toisessa ääripäässä on väkiluvultaan Suomen kuudenneksi suurin kaupunki Turku, joka ei ole avannut pohjatutkimusrekisteriään lainkaan (kuva 18).



Kuva 18. GTK:n pohjatutkimusrekisterin pisteet Turun seudulla (vas) ja Tampereen seudulla (oik) (GTK, 2021).

Avoin data ja avoimen lähdekoodin sovellukset tarjoavat merkittäviä mahdollisuuksia geologian alalla ja voivat tukea myös tiivistyvää kaupunkirakentamista edellyttäen, että kaupungit - Turku mukaan lukien - avaavat yhä enemmän pohjatutkimusrekistereitään.

8 Lähteet

Anttila, N. 2023. Construction of 3D clay thickness models of Turku for urban planning and infrastructure. Pro gradu -tutkielma, Turun yliopisto. 57 s.

Björck, S. 2008. The late Quaternary development of the Baltic Sea basin. In The BACC Author Team (Eds.): Assessment of climate change for the Baltic Sea Basin, SpringerVerlag Berlin Heidelberg, 398-407.

Cutting, V. ja Stephen, N. 2021. A Review on using Python as a Preferred Programming Language for Beginners. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET) 8. 4258-4263.

Ehlers J., Gibbard P.L. ja Hughes P.D. 2011. Quaternary Glaciations – Extent and Chronology: A Closer Look. 1st Edition, Volume 15. <http://booksite.elsevier.com/9780444534477/digital_maps.php> Vierailtu 10.9.2025

Glückert, G. 1977. Itämeren rannansiinymisestä Turussa ja sen lähiympäristössä. Absfact: Postglacial shore-level displacement of the Baltic at Turku, SW-Finland. Turun yliopiston maaperägeologian laitoksen julkaisuja 21, 36 s.

Gardemeister R. 1973. Hienorakeisten maalajien geologisia ja geoteknisiä tutkimustuloksia. VTT:n Geotekninen laboratorio, tiedonanto 8. Otaniemi. 113 s.

Gardemeister R. 1975. On engineering-geological properties of fine-grained sediments in Finland. Tech Res Centre of Finland, Build technol commun develop, Publ 9:91. 85 s.

GTK 2025. Avoin lisenssi Nimeä CC 4.0, sisältää GTK:n Maaperä 1:20 000 / 1:50 000 aineistoa, irrotettu 1.9.2025 Hakku-palvelu.

GTK 2021. Pohjatutkimusrekisteri. <<https://gtkdata.gtk.fi/Pohjatutkimukset/index.html>> Vierailtu 9.9.2025.

Harris, C. R., Millman, K. J., van der Walt, S. J., Gommers, R., Virtanen, P., Cournapeau, D., Wieser, E., Taylor, J., Berg, S., Smith, N. J., Kern, R., Picus, M., Hoyer, S., van Kerkwijk, M. H., Brett, M., Haldane, A., Fernández del Río, J., Wiebe, M., Peterson, P., Gérard-Marchant, P., Sheppard, K., Reddy, T., Weckesser, W., Abbasi, H., Gohlke, C. ja Oliphant, T. E. 2020. Array programming with NumPy. Nature, 585, 357–362. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2649-2>. 19 s.

Hatakka, L. ja Glückert, G. 2000. Calibration curves representing shore displacement of the Baltic based on radiocarbon ages in the Karjaa, Perniö, Turku, Mynämäki, and Laitila areas, SW Finland. Nissinaho, Aino (toim.), Sites and settlement. Publications of the project Changing Environment - Changing Society. Turku: 3-14.

- Heikkinen J. 2006.** Geostatistiikka. HY, Matematiikan ja tilastotieteen laitos. 69 s.
- HELCOM Secretariat. 2025-09-11.** Baltic Sea Bathymetry Database (BSBD): 500 m grid model. <<https://metadata.helcom.fi/geonetwork/srv/fin/catalog.search#/metadata/8b46e4c7-f911-44ab-89e6-2c8b8d9fa2c0>> Vierailtu 28.9.2025.
- Holopainen, M., Tokola, T., Vastaranta, M., Heikkilä, J., Huitu, H., Laamanen, R. ja Alho, P. 2015.** Geoinformatiikka luonnonvarojen hallinnassa. Helsingin yliopiston metsätieteiden laitoksen julkaisuja 7: 1–152.
- Jääskeläinen, R. 2009.** Geotekniikan perusteet. Tammertekniikka. 332 s.
- Karimi, Z. 2021.** NumPy Quick Review. 10.13140/RG.2.2.28097.58728. 12 s.
- Karhima, A., Raukas, A. ja Linna, A. 2007.** Jäätikön jäljillä Etelä-Suomessa ja Virossa. Tallinnan Teknillisen Yliopiston Geologian Instituutti ja Turun Yliopiston Geologian Laitos. MTÜ GEOGuide Baltoscandia. 32 s.
- Knuutila T. 2021.** Tekoälyn perusteet. Johdanto. Luentomoniste. Tietotekniikan laitos. Turun yliopisto. 24 s.
- Kähkönen, Y. 1998.** Svekofenniset liuskealueet. Teoksessa Lehtinen, M., Nurmi, P. ja Rämö, T. (toim.) 1998. 3000 vuosimiljoonaa, Suomen Kallioperä. Suomen Geologinen Seura, Jyväskylä. 371 s.
- Lajaunie C., Courrioux G. ja Manuel L. 1997.** Foliation Fields and 3D Cartography in Geology: Principles of a Method Based on Potential Interpolation. Mathematical Geology, Vol. 29, No. 4. 14 s.
- Lunkka J. P. 2009.** Maapallon ilmastohistoria - Kasvihuoneista jääkausiin. Gaudeamus. 286 s.
- Maanmittauslaitos, 2025.** Korkeusmalli 2 m. <<https://asiointi.maanmittauslaitos.fi/kart-tapaikka/tiedostopalvelu/korkeusmalli?lang=fi>> Vierailtu 28.9.2025.
- Mapbox. 2018.** <<https://rasterio.readthedocs.io/>> Vierailtu 28.9.2025.
- Mckinney, W. 2011.** pandas: a Foundational Python Library for Data Analysis and Statistics. 9 s.
- Niemelä J. (toimittaja), Sten C.-G., Taka M. ja Winterhalter B. 1987.** Turun-Salon seudun maaperä. Maaperäkarttojen selitykset, lehdet 1043 ja 2021. Suomen geologinen kartta, 1:100 000. Geologian tutkimuskeskus, Espoo. 83 s.
- Niiranen T., Kohonen J., Aatos S. ja Laine E. 2019.** 3D-vyöhykemallinnuksen menetelmäkehitys loppuraportti. GTK. 64 s.

Nironen, M. 2017. Guide to the Geological Map of Finland – Bedrock 1:1 000 000. Geological Survey of Finland, Special Paper 60, 41–76.

Ojala A.E.K., Palmu J.-P., Åberg A., Åberg S. ja 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, Vol. 85, 2013. 127–144.

Ojala A.E.K., Virtasalo J., Lindsberg E. ja Markovaara-Koivisto M. 2021. Basin-Scale 3D Sedimentary Modelling: An Approach to Subdivide Baltic Sea Onshore Sediments for Land use and Construction. Geotech Geol Eng (2021) 39: 4855–4876.

Rougier N. P. 2021. Scientific Visualization: Python + Matplotlib. Nicolas P. Rougier. , 2021, 978-29579901-0-8. hal-03427242. HAL Open Science. 223 s.

Salonen, V-P., Eronen M. ja Saarnisto M. 2002. Käytännön maaperägeologia. Kirja-Aurora. Turku 237 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., Bo S. ja Jansson K.N. 2016. Deglaciation of Fennoscandia. September 2016 Quaternary Science Reviews 147(6): 91-121.

Sullivan B.C. ja Kaszynski A.K. 2019. PyVista: 3D plotting and mesh analysis through a streamlined interface for the Visualization Toolkit (VTK). Journal of Open Source Software, 4(37). 3 s.

Suomen Geoteknillinen Yhdistys. 2022. Kairausopas II:n (Siipikairaus). 12 s.

Suomen Geoteknillinen Yhdistys. 2018. Infra formaatti. <https://sgy.fi/content/uploads/2018/11/infra_formaatti_v2-5_011118.pdf> 20 s. Vierailtu 28.9.2025.

Terranigma Solutions GmbH. 2025. <<https://www.gemPy.org/>> Vierailtu 28.9.2025.

Thieme, A. 2019. The Baltic Sea during the last 15,000 years. <<https://blog.datawrapper.de/weeklyhistory-of-the-baltic-sea-locator-map>> Vierailtu 15.6.2024.

de la Varga M., Schaaf A. ja Wellmann F. 2019. GemPy 1.0: open-source stochastic geological modeling and inversion. Geosci. Model Dev., 12, 1–32.

Wellmann F. ja Caumon G. 2018. 3-D Structural geological models: Concepts, methods, and uncertainties. Cedric Schmelzbach. Advances in Geophysics, 59, Elsevier. 1-121.

Vestøl O., Ågren J., Steffen H., Kierulf H. ja Tarasov L. 2019. NKG2016LU: a new land uplift model for Fennoscandia and the Baltic Region. Original Article. Open access. Published: 18 July 2019. Volume 93. 1759–1779.

Liite 1: Tutkielmassa laadittu Python-ohjelmakoodi

Ohjelmakoodi on saatavilla GitHubissa:

https://github.com/jaschm/Bachelor-s_thesis_GemPy

Ohjelmakoodin kansiorakenne:

```

1 +---aineiston_kasittely
2 | |   kairauksen_paattyminen.py
3 | |   painokairaus.py
4 | +---config_files
5 | |   colormap.json
6 | |   config.json
7 | +---input_data
8 | |   L3324D_2_no_nodata.tif
9 | |   PalttaSuppea_2_N2000_export_results_22.8.2025.tek
10 | |  VerkakylaSuppea_2N2000_export_results_21.8.2025.tek
11 | \---output_data
12 |   kallio_surface_points_combined.csv
13 |   output_tek_to_csv.csv
14 |   offset_data.csv
15 |   orientation_offset.csv
16 +---src
17 | |   gem.py
18 | |   main.py
19 | |   topography.py
20 | +---data_processing
21 | | |   clean_nro.py
22 | | |   filter_rows.py
23 | | |   write_to_csv.py
24 | +---utils
25 | | |   choose_input_file.py
26 | | |   create_orientation_file.py
27 | | |   read_filtered_data.py
28 \---exported_meshes
29     surface_points.csv
30     Sa_surface.obj
31     Sa_surface.vtp
32     Sa_surface.dxf
33     Sa_surface.tif
34     Mr_surface.obj
35     Mr_surface.vtp
36     Mr_surface.dxf
37     Mr_surface.tif

```

Korkeusmalli on ladattava Maanmittauslaitoksen karttapalvelusta kansioon input_data (Maanmittauslaitos, 2025).