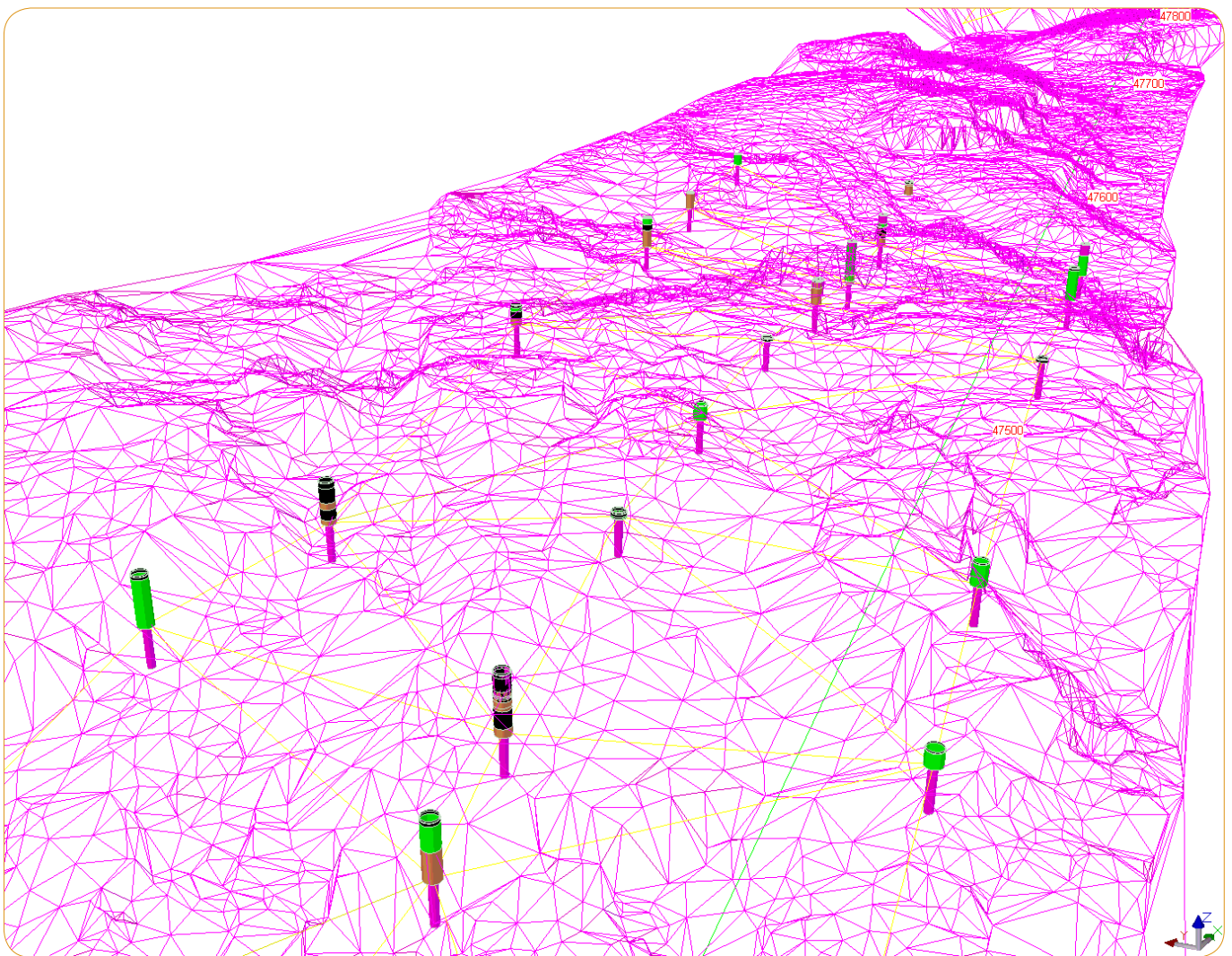


KIMMO TANTTU

Kallionpintamallin luotettavuuden analysointi porakonekairausten määrän ja laadun perusteella



Kimmo Tanttu

Kallionpintamallin luotettavuuden analysointi porakonekairausten määrän ja laadun perusteella

Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 27/2015

Liikennevirasto
Helsinki 2015

Kannen kuva: Kimmo Tantt

Verkojulkaisu pdf (www.liikennevirasto.fi)

ISSN-L 1798-6656

ISSN 1798-6664

ISBN 978-952-317-094-0

Liikennevirasto

PL 33

00521 HELSINKI

Puhelin 029 534 3000

Kimmo Tanttu: Kallionpintamallin luotettavuuden analysointi porakonekairausten määrän ja laadun perusteella. Liikennevirasto, suunnitteluosasto. Helsinki 2015. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 27/2015. 67 sivua ja 5 liitettä. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6656, ISBN 978-952-317-094-0.

Avainsanat: Kallionpintamalli, Monte Carlo -simulointi, porakonekairaus

Tiivistelmä

Kallionpinta sijaitsee Suomessa useimpiin muihin maihin verrattuna hyvin lähellä maanpintaa. Kallionpinnan syvyys vaikuttaa infra- ja rakennushankkeiden suunnitteluun monin tavoin, minkä takia sen sijainti tulisi tuntea mahdollisimman luotettavasti. Nykyään, suunnittelun siirtyessä enenevässä määrin mallipohjaiseksi, suunnittelua varten kallionpinnasta laaditaan usein kolmiulotteinen kallionpintamalli. Kallionpintamalli rakennetaan tyypillisesti porakonekairaustuloksiin pohjautuvana kolmioverkkona, jota täydennetään manuaalisesti muiden pohjatutkimusmenetelmien tuloksilla.

Tämän työn tarkoituksena oli arvioida, kuinka luotettavana porakonekairausten pohjalta määritettyä kallionpintamallia voidaan pitää. Lisäksi tavoitteina oli tutkia, miten porakonekairausten virheet, kairausverkon tiheys, sekä geologiset olosuhteet vaikuttavat kallionpintamallin luotettavuuteen. Tutkimuksessa porakonekairauksille määritettiin virhejakaumat neljästä todellisesta kohteesta saatuja pohjatutkimus- ja mittausaineistoja hyödyntämällä. Virhejakaumien pohjalta simuloitiin eri tiheyksillä porakonekairausverkkoja, joista laadittiin arvioidun kallionpinnan mallit. Näitä malleja verrattiin mitattuihin kallionpintamalleihin käyttämällä kahdenlaisia virhefunktioita: tilavuuseroja ja suurimpia poikkeamia. Simulointiprosessia toistettiin satoja kertoja Monte Carlo -periaatteen mukaisesti.

Tutkimuksessa havaittiin porakonekairausten sisältävän usein virheitä: pienimmillään keskimääräisen virheen suuruus oli noin 0,05 metriä ja enimmillään jopa noin 0,46 metriä. Tämän seurauksena porakonekairauksista laadittua kallionpintamalliakaan ei voida missään tilanteessa pitää täysin luotettavana. Porakonekairausten virheiden todettiin vaikuttavan pintamallien välisiin tilavuuseroihin, mutta ei niinkään suurimpiin poikkeamiin niiden välillä. Kairausverkon tiheyden todettiin olevan pintamallin luotettavuuden kannalta tärkein muuttuja, ja sen vaikutus oli odotetusti sitä suurempi mitä pienipiirteisempi kallionpinnan topografia oli. Poikkeamatarkastelun perusteella arvioitiin, että mikäli arvioitu kallionpintamalli halutaan määrittää tarkasti, on kairauksia syytä tehdä vähintään 5 metrin välein. Kun kallionpintatietoa tarvitaan ainoastaan massalaskentaan, riittävä tarkkuustaso arvioitiin saavutettavan noin 15–30 metrin kairausstiheydellä, louhinnan kokonaismäärästä riippuen.

Kimmo Tantt: Tillförlitlighet av modell för bergytan på grundval av kvantitet och kvalitet av jord-bergsonderingar. Trafikverket, planeringsavdelningen. Helsingfors 2015. Trafikverkets undersökningar och utredningar 27/2015. 67 sidor och 5 bilagor. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6656, ISBN 978-952-317-094-0.

Sammanfattning

I jämförelse med de flesta andra länder berggrunden i Finland ligger i nära anslutning till marken. Djupet av berggrunden påverkar planeringsprocessen av olika strukturer på olika sätt, och därför bör berggrundens nivå bli känd så noggrant som möjligt. Idag, när planeringsprocess övergår alltmer mot informationsmodellerna, är det vanligt att skapa en 3D modell för bergytan för att underlätta planering. Modell för bergytan är typiskt upprättat utifrån jord-bergsonderingsresultaten som trianguleringsnätet, kompletterat manuellt med andra geotekniska undersökningar.

Syftet av denna studie var att bedöma hur tillförlitlig en modell för bergytan bestämt genom jord-bergsonderingar kan betraktas som. Dessutom studeras effekten av jord-bergsondering fel, sondering densitet och geologiska miljöer på tillförlitligheten. Fel distributioner för jord-bergsonderingar definierades genom att utnyttja data från fyra finska byggarbetsplatser. Baserat på dessa fel distributioner simulerades jord-bergsonderingsnäten med olika densitet, därav utformades modeller av den beräknade bergytan. Beräknade modell för bergytan jämfördes med uppmätta modell för bergytan rörande två felfunktioner: volymkillnader och maximala avvikelserna. Simuleringsprocessen upprepades hundratals gånger i enlighet med Monte Carlo-metoden.

Studien visade att jord-bergsonderingar innehöll fel ganska ofta: medelfel varierade från cirka 0,05 meter upp till 0,46 meter. Således kan modeller för bergytan som skapats enbart baserat på jord-bergsonderingar aldrig betraktas som helt korrekt. Felen i jord-bergsonderingar verkade ha en betydande inverkan på tillförlitligheten i analyser av volymkillnad, men inte så mycket i analyser av maximala avvikelserna. Sondering densitet var den viktigaste variabeln rörande tillförlitligheten av modellen för bergytan. Som väntat blev dess inverkan ännu större när topografi av bergytan blev mer varierande. Baserat på den maximala avvikelseanalysen, för att definiera modellen för bergytan tillförlitlighet, bör avståndet mellan jord-bergsonderingar inte överstiga 5 meter. Däremot när information om bergytan enbart behövs för kvantitetsberäkningar av bergmassa, uppnås tillräcklig exakthet med sondering densitet av 15–30 meter, beroende på den totala bergmassan schaktat från sidotag.

Kimmo Tanttu: Reliability of rock surface model in terms of quantity and quality of percussion drillings. Finnish Transport Agency, Planning Department. Helsinki 2015. Research reports of the Finnish Transport Agency 27/2015. 67 pages and 5 appendices. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6656, ISBN 978-952-317-094-0.

Summary

Compared to most other countries, the bedrock in Finland lies in close proximity to ground surface. The depth of bedrock affects the design process of various structures in numerous ways, and thus, rock level locations should be known as accurately as possible. Today, as the design process is increasingly shifting towards building information models, it is common to create a 3D rock surface model to facilitate design. Rock surface is typically modelled out of percussion drillings as triangulated irregular network.

The aim of this study was to evaluate how reliably rock surface can be modelled based on percussion drilling results. Furthermore, the effect of percussion drilling errors, drilling densities, and different geological environments on the reliability was studied. Error distributions were defined for percussion drillings utilizing data acquired from four Finnish construction sites. Based on these error distributions, percussion drilling grids and further, estimated rock surface models were simulated. Estimated rock surface models were compared to measured rock surface models in terms of volume differences and maximum deviations. This simulation process was repeated hundreds of times in accordance with Monte Carlo method.

Study showed that percussion drillings contained errors quite commonly: mean errors varied from roughly 0,05 meters to as much as 0,46 meters. Thus, rock surface models created solely on percussion drillings can never be considered as completely accurate. The errors in percussion drillings seemed to have a significant impact on the reliability in volume difference analyses, but not so much in maximum deviations analyses. The drilling density was the most important variable in terms of reliability of the rock surface model. As expected, its effect on the reliability became even larger as the rock surface topography became more small-featured. Based on the maximum deviations analysis, in order to define the rock surface model accurately, the distance between percussion drillings should not exceed 5 meters. However, if the rock surface information is required solely for rock mass quantity calculations, percussion drilling density of 15–30 meters should be enough to achieve results with sufficient accuracy. The exact drilling density depends on the total rock mass requiring detachment.

Esipuhe

Kallionpinnan sijainti on Suomessa suunnittelun kannalta hyvin tärkeä lähtötieto, joten se tulisi tuntea aina riittävällä tarkkuudella. Nykyään tyypillinen käytäntö on laatia kallionpinnasta pohjatutkimustuloksiin perustuva kolmiulotteinen kallionpintamalli, jota hyödynnetään useaan otteeseen suunnitteluprosessin aikana. Pintamallien oikeellisuuden tärkeydestä huolimatta niiden luotettavuudesta ei ollut tehty aiempia tutkimuksia.

Tämän työn tarkoituksena oli arvioida porakonekairauksien avulla määritetyn kallionpintamallin luotettavuutta eri tilanteissa. Työn tutkimusosiossa vertailtiin neljästä todellisesta kohteesta saatuja porakonekairausaineistoja mitattuihin kallionpinta-aineistoihin. Tästä saatujen porakonekairausten virhejakaumien pohjalta arvioitiin kallionpintamallin luotettavuutta lukuisten Monte Carlo -simulointien avulla.

Tutkimus oli Aalto-yliopiston pohja- ja kalliorakentamisen opiskelijan Kimmo Tantun diplomityö, ja sen rahoittajina toimivat Liikennevirasto ja A-Insinöörit Suunnittelu Oy. Diplomityön ohjausryhmässä toimivat seuraavat henkilöt:

- Mikael Rinne, Aalto-yliopisto (työn valvoja)
- Ilona Häkkinen, A-Insinöörit Suunnittelu Oy (työn ohjaaja)
- Leena Korkiala-Tanttu, Aalto-yliopisto
- Tiina Perttula, Liikennevirasto
- Veli-Matti Uotinen, Liikennevirasto
- Mauri Kulman, A-Insinöörit Suunnittelu Oy
- Juha Liukas, Sito Oy
- Ossi Ikävalko, GTK
- Miia Paatsema, Helsingin Geo

Helsingissä huhtikuussa 2015

Liikennevirasto
Suunnitteluosasto

Sisällysluettelo

1	JOHDANTO	8
1.1	Työn tausta	8
1.2	Tutkimuksen tavoite	9
1.3	Tutkimuksen rajaukset	9
1.4	Tutkimusmenetelmät ja toteutustapa	10
2	MAA- JA KALLIOPERÄN TUTKIMINEN, TULKINTA JA MALLINTAMINEN INFRAHANKKEISSA	11
2.1	Tietomallintaminen infrahankkeissa	11
2.2	Liikenneviraston ohjeistukset	12
2.3	Pohjatutkimukset	14
2.3.1	Yleistä	14
2.3.2	Kallionpinnan määrittämiseen soveltuvat kairausmenetelmät	16
2.3.3	Geofysikaaliset menetelmät	20
2.4	Koordinaatti- ja korkeusjärjestelmät	22
2.5	Maa- ja kallioperän satunnaisuus sekä epävarmuudet niiden mallintamisessa	25
3	TUTKIMUKSEN SUORITUS	28
3.1	Käytetyt ohjelmistot	28
3.2	Käytetyt tilastolliset menetelmät	29
3.3	Tutkimusaineisto	30
3.3.1	Kohteiden yleiskuvaus	30
3.3.2	Aineiston käsittely	32
3.4	Tilastollinen analyysi	33
3.4.1	Yleiskuvaus	33
3.4.2	Analyysin yksityiskohdat	35
4	TUTKIMUKSEN TULOKSET	42
4.1	Analyysin ensimmäinen vaihe	42
4.2	Analyysin toinen vaihe	44
5	POHDINTAA	55
5.1	Porakonekairausten virheellisyys	55
5.2	Analyysin tulosten käytännöllisyys	58
5.3	Jatkotutkimustarpeet	61
6	JOHTOPÄÄTÖKSET	62
	LÄHDELUETTELO	64
	LIITTEET	
Liite 1	Simuloitavat mitatut kallionpinnat 3D-verkkona ja niiden sijainti kohteen sisällä	
Liite 2	Esimerkki Matlabiin luettavasta, taulukkomuotoisesta kairaustiedostosta	
Liite 3	Analyysin ensimmäisen vaiheen tulokset: Porakonekairausten virhejakaumat histogrammeina	
Liite 4	Analyysin toisen vaiheen tulokset: Virhefunktiona tilavuuserot	
Liite 5	Analyysin toisen vaiheen tulokset: Virhefunktiona suurimmat poikkeamat	

1 Johdanto

1.1 Työn tausta

Yleisen näkemyksen mukaan rakennushankkeiden suurin taloudellinen ja tekninen riski on useimmiten maaperässä. Maaperälle on tyypillistä heterogeenisyys ja usein myös pienipiirteisyys. Koko rakennettavan alueen maaperäprofiilin kartoittaminen ei kuitenkaan käytännössä ole mahdollista, minkä takia geoteknisessä suunnittelussa on turvaututtava pistemäisien pohjatutkimuksien avulla laadittuihin yksinkertaistettuihin geologisiin malleihin. Yksinkertaistusten vuoksi malleissa on epävarmuuksia, joiden suuruus on riippuvainen pohjatutkimusten tiheydestä. Pohjatutkimusten riittämättömästä määrästä saattaa aiheutua kolmenlaisia seuraamuksia (Jaksa et al. 2005):

- a) Geologinen malli on maaperän vaihteluiden suhteen liian optimistinen. Tällöin pohjarakenteet eivät välttämättä täytä kaikkia suunnittelukriteerejä, mikä voi johtaa pahimmillaan rakenteiden vaurioitumiseen. Lisäksi työnaikainen turvallisuus voi osoittautua puutteelliseksi tämän seurauksena.
- b) Geologinen malli on konservatiivinen, jolloin pohjarakenteet suunnitellaan tarpeettoman massiivisiksi.
- c) Maaperästä paljastuneet odottamattomat olosuhteet pakottavat suunnitteluratkaisun muuttamiseen, mikä viivästyttää rakentamista.

Pohjaolosuhteiden heterogeenisyydestä johtuen pohjatutkimuksien riittävää määrää on vaikea arvioida. Suunnittelijan kannalta olisi sitä parempi mitä enemmän pohjatutkimuksia tehtäisiin, mutta tyypillisesti pohjatutkimusten määrä rajautuu kuitenkin sen mukaan, kuinka paljon resursseja tilaaja tai projektinjohtaja on valmis tutkimuksiin sijoittamaan. (Jaksa et al. 2005.)

Suomen kallioperä kuuluu Euraasian vanhimpaan peruskallioalueeseen, Fennosarmatian peruskalliokratiiniin, joka on geologisellakin mittakaavalla hyvin vanhaa (noin 3000–1500 miljoonaa vuotta). Suomen kallioperä muodostaa Ruotsin, Norjan, Karjalan ja Kuolan niemimaan ohella niin kutsutun Fennoskandian kilpialueen, mikä on Ukrainan lisäksi Euraasian ainoa alue, jossa tämä ikivanha kallioperä ei ole nuorempien kalliomuodostumien peittämä. (Lehtinen et al. 1998.) Vanhuutensa johdosta Suomen kallioperä on ehtinyt muovautua moneen otteeseen. Toistuvat poimuilut, rapautumiset, syvältä nousseet kivilajit, tulivuoritoiminnat sekä maankuoren repeämät ovat johtaneet siihen, että Suomen kallionpinnasta on muodostunut hyvin monivahteinen. Kuvaavaa on, että vaikka kallionpinta on Suomessa keskimäärin noin 10 metrin syvyydellä, vaihtelee sen syvyystaso avokalliosta aina 100 metrin syvyisiin painanteisiin saakka. On arvioitu, että noin 13,4 prosenttia Suomen pinta-alasta on niin kutsuttua kalliomaata, eli avokalliota tai hyvin ohuen maapeitteen aluetta. (Jääskeläinen 2011, s. 305 & 338.) Kallionpinta Suomessa onkin moniin muihin maihin verrattuna hyvin lähellä maanpintaa, minkä johdosta kallionpintatieto on tärkeä osa infrahankkeiden suunnittelua Suomessa. Kallionpintatietoa tarvitaan muun muassa pohjarakenteen valintaan, poikkileikkauksen suunnitteluun, paalupituuksien määrittämiseen, massa- ja louhintamäärien laskentaan sekä luonnollisesti myös kalliotilojen ja tunnelien suunnitteluun (Liikennevirasto 2011). Oikein lasketut massa- ja louhintamäärät ovat erityisen tärkeitä suurissa infrahankkeissa, joissa siirrettävät massamäärät ovat

valtavia ja niiden optimaalisella käytöllä on mahdollista saavuttaa huomattavia aika- ja kustannussäästöjä (Moselhi et al. 2009).

Tällä hetkellä infrahankkeiden suunnittelu on siirrostilassa; perinteinen, dokumentti-pohjainen suunnittelu on väistymässä tietomallipohjaisen suunnittelun tieltä. Tietomallipohjaisessa suunnittelussa pyritään tuottamaan älykkäitä, ohjelmistoriippumattomia suunnitelmia, jolloin koko suunnitteluprosessia saadaan tehostettua. Oleellinen osa tietomallipohjaista suunnittelua ovat suunnittelualueen nykytilaa kuvaavat lähtötietomallit, joista geoteknisen suunnittelun kannalta kiinnostavin pääryhmä on maaperämalli. Maaperämalli sisältää pistemäisten pohjatutkimustietojen ja mitatun avokallion lisäksi tulkitut maalajien rajapinnat sekä kallionpintamallin. (Liukas & Virtanen 2014.) Kallionpintamalli muodostetaan tyypillisesti porakonekairauksien avulla määritetystä kallionpinnan pistemäisistä sijainneista, sekä näiden välille lineaarisesti interpoloidusta kolmioverkosta. Mallia on mahdollista vielä manuaalisesti täydentää muista kairausmenetelmistä tai geofysikaalisista mittauksista saadun tiedon avulla. Kallionpintamallia hyödynnetään määrä- ja kustannuslaskelmissa sekä suunnittelu-ratkaisun valinnassa, joten sen tulisi vastata todellisuutta mahdollisimman tarkasti. Tästä huolimatta, kallionpintamallin luotettavuudesta ei löytynyt aiemmin laadittuja tutkimuksia.

1.2 Tutkimuksen tavoite

Tutkimuksen tavoitteena oli arvioida porakonekairauksilla saaduista kallionpintahavainnoista lineaarisesti määritetyn kallionpintamallin luotettavuutta. Mallin luotettavuuden kehittymistä mitattiin suhteessa porakonekairauksien määrään kustannustehokkaimman kairausstiheyden löytämiseksi. Tutkimuksen osatavoitteina arvioitiin porakonekairausten laadun, eli niiden keskimääräisten virheiden sekä erilaisten geologisten olosuhteiden, kuten kallionpinnan muotojen vaikutusta kallionpintamallin luotettavuuteen. Työn tutkimuskysymyksiksi määritettiin:

- Kuinka luotettavasti kallionpinta on mahdollista mallintaa?
- Kuinka paljon kallionpintamallin luotettavuus muuttuu porakonekairausten määrää muutettaessa?
- Kuinka paljon virheet porakonekairauksissa vaikuttavat kallionpintamallin luotettavuuteen?
- Riippuuko kallionpintamallin luotettavuus geologisista olosuhteista?

1.3 Tutkimuksen rajaukset

Tutkimuksessa käsiteltiin ainoastaan kallionpintamallin luotettavuutta, maaperän kerrosrajojen pintamallit jätettiin tutkimuksen ulkopuolelle. Kallionpintamalli laadittiin lineaarisesti kolmioimalla, ja siinä käytettiin ainoastaan porakonekairauksilla mitattuja kallionpinnan sijainteja. Vaikka muitakin kairausmenetelmiä tarkasteltiin työn teoriaosuudessa, varsinaisessa analyysissä niitä ei hyödynnetty johtuen niiden subjektiivisuudesta kallionpinnan määrittämisessä.

Tutkimuksessa käytetty pohjatutkimus- ja kallionpinta-aineisto kerättiin pääasiassa väyläpuolen kohteista. Vertailun vuoksi mukaan otettiin myös yksi selvästi erityyppinen kohde: Länsimetron Urheilupuiston aseman kaivanto.

1.4 Tutkimusmenetelmät ja toteutustapa

Työn alkuosan teoriaosuuden tutkimusmenetelmä tehtiin kirjallisuustutkimuksena. Teoriaosuudessa käsiteltiin tietomallintamista infrarakentamisessa, pohjatutkimusmenetelmiä, koordinaatti- ja korkeusjärjestelmiä sekä Liikenneviraston ohjeistuksia ja määräyksiä liittyen pohjatutkimuksiin, maastomalleihin ja yleiseen tietomallipohjaiseen suunnitteluun. Lisäksi teoriaosuudessa käytiin läpi maa- ja kallioperän satunnaisuuteen ja siitä seuraaviin riskeihin liittyviä tutkimuksia.

Työn jälkipuoliskon tutkimusosuus oli yhdistelmä useammasta eri tutkimusmenetelmästä: laskennallisesta menetelmästä, tilastollisesta menetelmästä sekä mallintamisesta. Tutkimuksessa käytetty tilastollinen aineisto koostui kairauspisteistä sekä esiin kaivettujen kallionpintojen mittaustiedoista. Aineisto kerättiin neljästä todellisesta suunnittelukohteesta. Kohteet olivat Valtatien 7 (E18) kehittäminen moottoritieksi välillä Koskenkylä–Kotka, Sepänkylän ohitustie Valtatiellä 8, Kehä 3:n parantaminen välillä Valtatie 4–Valtatie 7 sekä Länsimetron Urheilupuiston kaivanto. Kairauspisteitä ja mitattua kallionpintaa vertailemalla määritettiin kairausten keskimääräiset virheet sekä niiden hajonnat. Tällä tavalla määritettyjen virhejakaumien pohjalta laadittiin Monte Carlo -simulointeja, joiden avulla tutkittiin eri kairaustiheyksillä tehtyjen kallionpintamallien luotettavuuksia.

2 Maa- ja kallioperän tutkiminen, tulkinta ja mallintaminen infrahankkeissa

2.1 Tietomallintaminen infrahankkeissa

Tietomalli on monikäsitteinen sana. Sitä käytetään usein synonyyminä tiedonhallinnalliselle termille käsitemalli (englanniksi conceptual model). Käsitemallilla tarkoitetaan tietojen formaalia määrittelyä, joka määrittelee tiedot ja niiden väliset yhteydet. Termiä tietomalli on viime aikoina alettu käyttämään synonyyminä myös rakennustekniselle termille tuotemalli, jolla tarkoitetaan digitaalisessa muodossa olevan kohteen kuvausta attribuuttitietoineen. Epäselvyyksien välttämiseksi Infra FINBIM -hankkeessa on päätetty, että infrarakenteen tuotemallista tulee käyttää termiä inframalli (englanniksi InfraBIM, Infra Built Environment Information Model). Mallintamisen terminologia on kuitenkin vielä muutostilassa ja vie oman aikansa, ennen kuin lopulliset termit vakiintuvat. (Seren 2014.)

Mallinnuksessa oleellisinta ei ole kolmiulotteisen inframallin luominen, vaan avoimessa muodossa siirtyvän älykkään tiedon tuottaminen (Perttula 2014). Tällaisessa harmonisoidussa muodossa oleva tieto mahdollistaa sen, että ihmisen lisäksi tietoa pystyvät tulkitsemaan eri tietotekniset ohjelmistot ja sovellukset, kuten suunnittelijoiden laskentaohjelmistot sekä työmaan mittaus- ja koneohjauslaitteet. Tietomallinnuksen tehokkaalla hyödyntämisellä on mahdollista tehostaa nykyistä suunnittelu- ja rakentamisprosessia huomattavasti. (Liikennevirasto 2014a.) Ideaalitulanteessa yhden mallin avulla voitaisiin hallinnoida rakennelman koko elinkaarta, suunnittelusta toteutuksen ja ylläpidon kautta aina purkamiseen saakka (Perttula 2014).

Viime vuosina infra-alan toimijat ovat olleet hyvin kiinnostuneita mallien hyödyntämisestä, ja mallinnusprosessin kehittämiseen on panostettu. Merkittävin kehityshanke on ollut Infra FINBIM (2010–2013), joka on yksi RYM Oy:n käynnistämän PRE-ohjelman (Built Environment Process Re-engineering) kuudesta työpaketista. Marraskuussa 2010 käynnistyneen Infra FINBIM -ohjelman visiona oli, että suuret infrahankkijat tilaisivat ainoastaan tietomallipohjaista suunnittelua vuodesta 2014 alkaen. Tarkoituksena oli alan eri toimijoiden (tilaajat, urakoitsijat, suunnittelijat ja ohjelmistojentuottajat) yhteistyöllä tunnistaa, tutkia, määrittää ja kehittää sellaiset asiakokonaisuudet, joissa yhteistyön vähäisyys on tähän saakka rajoittanut yritysten mahdollisuuksia toteuttaa ja kehittää tietomallinnettuja liiketoimintaprosesseja. Tuloksena on systeeminen muutos, jossa perinteinen vaiheajattelu korvataan älykkäällä, hankkeen koko elinkaaren ja kaikki osa-alueet kattavalla, tietomallipohjaisella palveluntuotannolla. Muutos parantaa merkittävästi alan toimintatapoja, yhteistyötä, keskinäistä ymmärrystä ja ylläpidon tuottavuutta. (Saksi & Laatusen 2011.)

Infra FINBIM -työpaketissa on kehitetty infra- ja maanmittausaineistolle soveltuva kansallinen Inframodel 3 -tiedonsiirtoformaatti, joka perustuu yleiseen, ohjelmistoriippumattomaan LandXML -standardiin (Liikennevirasto 2014b). Liikennevirasto on edellyttänyt 1.5.2014 jälkeen käynnistyneiltä suunnittelu-, toteutus- ja parantamishankkeilta Inframodel 3 -formaatin käyttöä, sekä lähtötietojen jäsentelyä Infra FINBIM -lähtötietomalliohjeiden mukaisesti. Tästä huolimatta, vaikka suunnittelu tehdään nykyään jo monilta osin kolmiulotteisina malleina, toimitetaan valmiit suunnitelmat silti urakoitsijalle usein kaksiulotteisina piirustuksina. (Hämäläinen 2014.)

Kaksiulotteisissa suunnitelmapiirustuksissa on useita puutteita: sama informaatio joudutaan esittämään useassa eri kuvassa, ne eivät ole jatkuvia, kuvia ei pystytä sähköisesti hyödyntämään, ne eivät ole älykkäitä (eivät sisällä metatietoja), ja lisäksi oleelliset tiedot voivat olla vaikeasti löydettävissä (Perttula 2014).

Tietomallintaminen infra-alalla kehittyy nopeasti, minkä takia ei voida pitää yllättävänä, että aiheesta on viime vuosien aikana laadittu runsaasti opinnäytetöitä sekä muita tutkimuksia ja ohjeistuksia. Inframallipohjaisen suunnittelun etuja perinteiseen, dokumenttipohjaiseen suunnitteluun nähden (geoteknisen suunnittelijan näkökulmasta) käsitellään perinpohjaisesti Valtteri Brotheruksen diplomityössä (Brotherus 2014).

2.2 Liikenneviraston ohjeistukset

Liikennevirastolla (entinen Tiehallinto) on useita ohjeita infrakohteiden pohjatutkimusten ja maastomallien laadinnasta, sekä tietomallipohjaisesta suunnittelusta. Tässä luvussa käydään läpi tämän työn kannalta tärkeimpiä ohjeita ja vaatimuksia. Julkaisut, joihin viitataan, ovat työn kirjoitushetkellä voimassa olevia.

Pohjatutkimuspisteiden määrä infrahankkeessa riippuu suunniteltavasta kohteesta, pohjasuhteista sekä suunnitelmavaiheesta. Tiehallinnon ohjeessa

(2008) on esitetty ohjeelliset tutkimustiheydet eri suunnitelmavaiheille. Yleissuunnitelmavaiheessa tehdään vain 2–3 tutkimusta tien pituussuunnassa 60...100 metrin välein. Rakennussuunnitelmaa varten tutkimustiheyden tulisi olla jo vähintään 2–4 tutkimusta 20...60 metrin välein. Tarkan tutkimustiheyden valinta riippuu pohjasuhteiden homogeenisuudesta, ja lopullisen valinnan tekee geotekninen suunnittelija. Periaatteena on, että käytössä tulisi olla teknistä suunnittelua, ympäristövaikutusten arviointia ja kustannusarviota varten aina kulloiseenkin suunnitteluvaiheeseen riittävän yksityiskohtaiset lähtötiedot. (Tiehallinto 2008.) Sivuhuomautuksena todettakoon, että Liikenneviraston luonnosvaiheessa olevassa päivitettyssä ohjeessa edellä esitetyt kairauspisteiden etäisyyksiä on pienennetty (Liikennevirasto 2015).

Samassa ohjeessa on esitetty myös rakennussuunnitelmavaiheen määrälaskennan ohjeellisia tavoitetarkkuuksia. Tämän työn kannalta kiinnostavin vaatimus on leikataville kalliomasoille esitetty tarkkuustaso $-10...+10\%$ (Tiehallinto 2008). Tämä tarkoittaa, että pohjatutkimuksien avulla laaditun arvioidun kallionpinnan tulisi olla niin luotettava, ettei sen pohjalta tehty leikkausmassojen laskenta poikkeaisi todellisista määristä yli 10 prosenttia.

Geotekniikan informaatiojulkaisussa esitetään suosituksia pohjatutkimustiheyksille eri tilanteissa, joissa kallionpinnan sijainnin selvittäminen on tarpeellista. Maaleikkauksissa yleisohjeena esitetään, että kallionpinnan tasot on pyrittävä selvittämään siten, ettei työn aikana ilmene yllättäviä louhintatarpeita. Moreenialueilla kairauksia tulisi tehdä 20 metrin ruutuun ja harjualueilla noin 40–60 metrin ruutuun. Mikäli kallionpinnan selvittämisessä on hyödynnetty myös geofysikaalisia menetelmiä, voidaan kairauksien määrää vähentää noin 25–50 %, minkä lisäksi ne on myös mahdollista kohdistaa paremmin tarvittaville alueille. (Tielaitos 1995.)

Sen sijaan kallioleikkauskohteissa samassa ohjeessa esitetään pohjatutkimuksien tavoitteiksi seuraavaa:

- Kallioleikkauksen alkamis- ja päättymiskohtien määrittäminen noin ± 10 metrin tarkkuudella.
- Kallionpinnan kulun selvittäminen leikkausosuudella ”riittävällä tarkkuudella”.
- Kallionpintasijaintien tarkempi selvitys tarvittaessa.

Kallioleikkauksen kohdalla luotettavia kallionpintahavaintoja (porakonekairauksia) tulisi olla väylän pituussuunnassa 20–40 metrin välein ja poikkisuunnassa 10–20 metrin välein. Tässäkin tapauksessa määrää on mahdollista pienentää geofysikaalisia menetelmiä hyödyntämällä. (Tielaitos 1995.)

Maastossa tehtävät tutkimukset tulee aina mitata paikoilleen riittävällä tarkkuudella. Sijainnin oikeellisuuden tärkeys korostuu entisestään, mikäli maasto- tai pohjasuhteissa on jyrkkiä muutoksia sivulle päin siirryttäessä. Liikenneviraston ohjeessa on esitetty vaatimukset pohjatutkimusten ja geofysikaalisten mittausten tarkkuudelle. Paikalleen mittauksen tarkkuusvaatimukseksi on määritetty:

- Tasosijainnin sallittu keskipoikkeama 200 mm, maksimivirhe 400 mm
- Korkeuden sallittu keskipoikkeama 50 mm, maksimivirhe 100 mm (Liikennevirasto 2011.)

Näiden lisäksi kairaushavaintojen syvyystarkkuutena voidaan pitää $\pm 0,05$ metriä, jolloin niistä määritettyjen kerrosrajojen tarkkuus on arviolta $\pm 0,15$ metriä. Kaikkien edellä mainittujen epävarmuustekijöiden seurauksena on mahdollista, että todellinen korkeustaso voi poiketa arvioidusta jopa 0,5 metriä, vaikkei yhtäkään mittausvirhettä olisikaan tehty. Erityistapauksissa kairauksilta on mahdollista edellyttää parempaa tarkkuutta. Tällöin tasosijainnin tarkkuusvaatimus on erikseen ilmoitettava pohjatutkimusohjelmassa. (Rantanen et al. 2007.)

Liikenneviraston ja ELY-keskusten hankkeissa noudatettavia, tietomallinnusta koskevia ohjeistuksia on listattu Liikenneviraston sivuilla. Osa ohjeista on työn kirjoitushetkellä voimassa tai koekäytössä, mutta suuri osa on kuitenkin vasta luonnoksia pilotointia varten. Luonnosversioidenkin periaatteita voidaan mallinnustyössä hyödyntää. Taulukossa 1 on listattu mallinnukseen liittyvät ohjeet ja julkaisut. (Liikennevirasto 2014a.)

		Ohje	Koekäytössä oleva ohje/ohjeluonnos	Informatiivinen julkaisu/ohjeluonnos
Liikenneviraston ohjeistukset	Siltojen tietomalliohje 06/2014	X		
	Taitorakenteiden suunnittelun lähtötieto-ohje 21/2014	X		
	Tiehankeiden mallipohjaisen suunnittelun hankinta		X	
	Ratahankeiden mallipohjaisen suunnittelun hankinta		X	
Yleiset inframallivaatimukset YIV 2014 (1-11) sekä siihen liittyvät muut ohjeistukset*	1. Tietomallipohjaisen hankkeen johtaminen			X
	2. Yleiset vaatimukset			X
	3. Lähtötietojen vaatimukset; Lähtötietomallit		X	
	4. Inframalli ja mallinnus hankkeen eri suunnitelmavaiheissa			X
	5. Rakennemallit; Maa-, pohja- ja kalliorakenteet, päällys- ja pintarakenteet (RO nimikkeet 1000-2000), sekä maarakennustöiden toteutusmallin laadintaohje			X
	6. Rakennemallit; Järjestelmät (RO nimikkeet 3000)			X
	7. Rakennemallit; Rakennustekniset rakennusosat (RO nimikkeet 4000)			X
	8. Inframallin laadunvarmistus			X
	9. Määrälaskenta, kustannusarviot			X
	10. Havainnollistaminen			X
	11. Tietomallin hyödyntäminen eri suunnitteluvaiheissa, Infran rakentamisessa, käytössä ja ylläpidossa			X
Inframodel 3 käyttöohje	X			
InfraBIM nimikkeistö		X		

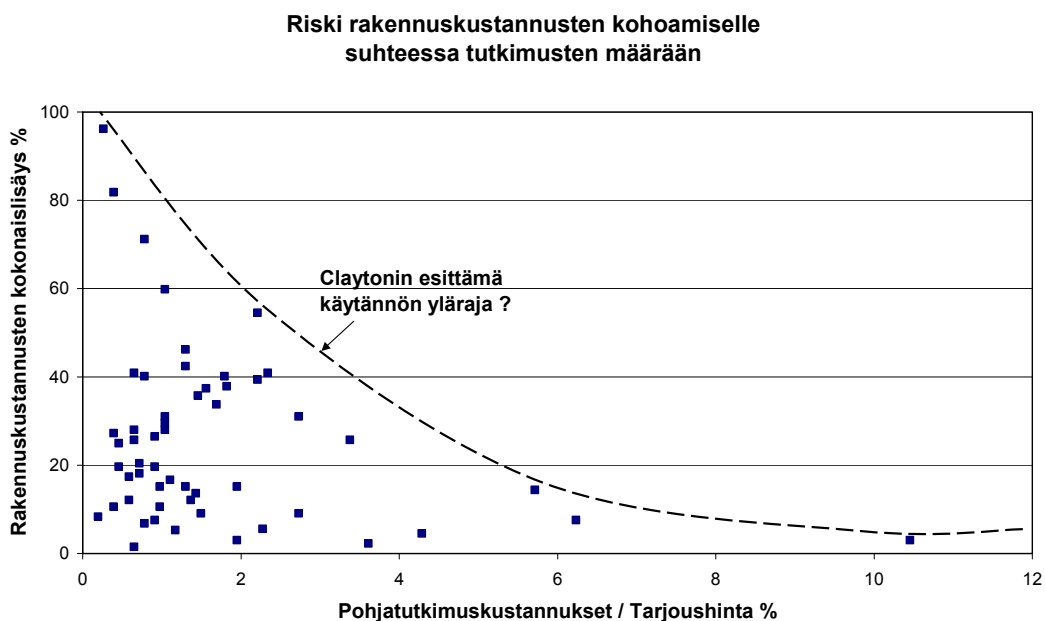
*YIV 2014 sarjan ohjeista mitään ei ole vielä hyväksytty. Kuitenkin osa 3 on luonnosversionakin riittävän valmis asiakirja suunnittelun ohjaamiseen.

2.3 Pohjatutkimukset

2.3.1 Yleistä

Rakennuspaikan pohjaolosuhteet on aina selvitettävä suunnittelukohteen ja suunnitteluvaiheen edellyttämällä riittävällä tarkkuudella sekä riittävällä luotettavuudella (Liikennevirasto 2012). Geotekniset maakerrokset, niiden parametrit, sekä kallion sijainti ja ominaisuudet selvitetään pohjatutkimuksien avulla. Pohjatutkimustavan valinnassa on huomioitava sen soveltuvuus kohteen geoteknisten ominaisuuksien määrittämiseen. Valintaan vaikuttavat muun muassa tutkimustavalla saavutettava syvyys ja sen kyky läpäistä tavoitetason yläpuolisia kerroksia. Tutkimustavan valinta on geoteknisen suunnittelijan tehtävä ja valitut tavat esitetään pohjatutkimusohjelmassa. (Tiehallinto 2008.)

Maaperän heterogeenisyydestä johtuen sopivan pohjatutkimusmäärän arviointi on usein hyvin haasteellista (Jaksa et al. 2005). Clayton (2001) tutki, millä pohjatutkimuskustannusten ja tarjoushinnan suhteella rakentamisen kokonaiskustannukset saataisiin minimoitua. Kuvassa 1 on esitetty tutkimuksen tuloksena saatu kuvaaja pohjatutkimuskustannusten osuuden vaikutuksesta rakennuskustannusten ylittymiseen. Kuvaajasta voidaan päätellä, että kun pohjatutkimuskustannukset ovat yli viisi prosenttia tarjoushinnasta, rakennuskustannusten kokonaisuus ei suurella todennäköisyydellä ylitä yli 20 prosenttia. Tutkimuksen aineisto on peräisin 1970-, 1980-, ja 1990-luvuilla tehdyistä ulkomaisista väylärakennushankkeista. (Clayton 2001.) On huomioitava, että kuvaaja ei sellaisenaan ole välttämättä täysin käyttökelpoinen Suomessa erilaisista pohjaolosuhteista ja rakentamiskäytännöistä johtuen. Kuvaajaa voidaan kuitenkin hyödyntää suuntaa-antavien arvioiden tekemisessä.



Kuva 1. Pohjatutkimuskustannusten suhteellisen määrän vaikutus rakennuskustannusten lisäykseen (mukailtu Clayton 2001).

Tässä luvussa esitellään joitakin Suomessa yleisesti käytettyjä pohjatutkimusmenetelmiä. Koska tässä työssä keskitytään kallionpintoihin, esitetään tässä vain sellaisia kairausmenetelmiä, joiden perusteella voidaan päätellä jotain kallionpinnan tasoista. Kuten kuvasta 2 käy ilmi, tällaisia kairauksia ovat painokairaus, heijarikairaus (ja puristin-heijarikairaus), koekuopat, tärykairaus sekä ennen kaikkea porakonekairaus. Lisäksi esitellään lyhyesti kolme geofysikaalista menetelmää (maatutkaus, seisminen luotaus sekä gravimetrinen luotaus), joita voidaan hyödyntää kallionpinnan määrittämisessä.

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

Kuva 2. Kairausmenetelmiä ja niiden suositeltava käyttötapa (mukailtu Jääskeläinen 2011, s. 243).

2.3.2 Kallionpinnan määrittämiseen soveltuvat kairausmenetelmät

Kallionpinnan sijainnin määrittämisen kannalta tärkein kairausmenetelmä on **porakonekairaus**. Sitä käytetään, kun tarvitaan luotettavaa tietoa kallionpinnan sijainnista. Sitä voidaan käyttää myös lohkaraisessa maassa, missä lohkarit pysäyttävät herkästi kairauksen muilla kairausmenetelmillä. (Tielaitos 1995.) Lisäksi porakonekairaus voi olla tarpeen, mikäli maassa on muita vaikeasti läpäistäviä maakerroksia tai rakenteita, kuten vanhoja paalulaattoja (SGY 1986).

Porakonekairauksessa kairan kärki on saatava tunkeutumaan maakerrosten läpi kalliin saakka. Kun kairauksella saavutetaan otaksuttu kallionpinta, jatketaan kairausta poraamalla vielä vähintään kolme metriä (kolme on Suomen Geoteknillisen Yhdistyksen mukainen oletusarvo). Näin voidaan varmistua, että kyseessä on todella kallionpinta eikä esimerkiksi vain iso lohkar. Porauksen tunkeumanopeutta mitataan jatkuvasti. Kairausdiagrammiin merkitään 200 millimetrin etenemään kuluvat ajat pylvään vasemmalla puolella piirrettävällä kuvaajalla. Näiden sekä kairaajan kairauksen aikana kirjaamien havaintojen perusteella voidaan arvioida kallion laadun vaihtelua eri syvyyksillä. (SGY 1986.)

Irtomaan ja kallionpinnan välinen rajapinta tunnustetaan porakonekairauksessa näiden kerrosten selvästä lujuuserosta. Kun kallioperä on ehjää ja lujaa, sekä sen päällä olevat maakerrokset eivät ole erityisen tiiviitä, kallion rajapinnan määrittäminen porakonekairauksella onnistuu yksikäsitteisesti. Suomen kallioperä on kuitenkin lujuusominaisuuksiltaan vaihtelevaa ja monin paikoin varsin rikkonaista. Rikkonaisuudessa kalliosta lujuuserot eivät ole yhtä jyrkkiä, jolloin rajapinnan tarkka määrittäminen hankaloituu huomattavasti. Erityisen hankalaa rajapinnan määrittäminen on tilanteessa, jossa rikkonaisen kallion päällä on hyvin tiivis moreenikerros, jonka

lujuusominaisuudet saattavat olla samaa luokkaa kallion kanssa. Tällöin porakonekairauksella saatu kallionpinta-arvio voi olla huomattavastikin väärässä. (SGY 1986.)

Nykyisillä porakonekalustoilla on tunkeumanopeuden lisäksi mahdollista hyödyntää kaluston tallentamia huuhtelu- ja pyörityspaineita tiukan moreenin ja kallion rajapinnan määrittämisessä. Moreenikerroksen läpi poratessa huuhtelu usein vaikeutuu, kun hienoainesta sisältävä moreeni ei pääse tai ei ehdi poistua reiästä, jolloin huuhtelupaine kasvaa. Mikäli porausta jatketaan samalla tavalla, myös pyörityspaine alkaa kasvaa voimakkaasti ja tunkeumanopeus hidastuu. Jos porausta edelleen jatketaan keskeytyksettä, saattaa reikä mennä kokonaan tukkoon, jolloin myös porakanget lakkaavat pyörimästä. Sitä vastoin kallioon poratessa, olettaen ettei maita pääse valahdamaan kallioreikään, sekä huuhtelu- että pyörityspaineet pysyvät tyypillisesti suhteellisen alhaisina. Samalla myös tunkeumanopeus pysyy melko tasaisena, kallion rikkonaisuudesta riippuen. Tällaisten asioiden huomioinnissa kairaajan kokemuksen, sekä kairaajalle tutun kaluston merkitys korostuvat. (Noukka 2014.)

Porakonekalustoja on erilaisia ja -kokoisia. Kallionpinnan arvioitu taso saattaa vaihdella sen mukaan, mitä kalustoa on käytetty. Kevyemmällä (keskiraskailla) laitteistolla saatetaan tiiviistä moreenia erehtyä luulemaan kallioksi, kun taas raskaalla kalustolla voi olla vaikeaa erottaa tiiviin moreenin ja rikkonaisen kallion rajapintaa. Raskaamalla kalustolla tehty poraus on kuitenkin lähtökohtaisesti luotettavampi kallionpinnan sijainnin arvioimiseen (Noukka 2014).

Lisämainintana todettakoon, että valmisteilla olevassa kansainvälisessä standardissa ISO 22476-15 () esitetään periaatteita porauksen aikana tallennettavien parametrien määrittämisestä ja niiden raportoinnista. Standardissa mitausperiaatteet jaotellaan kolmeen luokkaan tallennettavien parametrien määrän, sekä niiltä edellytettyjen tarkkuuden mukaan. Useamman parametrin avulla voidaan tehdä parempia tulkintoja maakerrosten ja kallion rajapinnoista. (ISO 2014.)

Kallionäytekairaus on malminetsinnässä ja kalliorakentamisessa tärkeä näyttömenetelmä, jolla saadaan kallionpinnan sijaintitiedon lisäksi tietoa kallion laadusta kallio- eli kairausnäytteen muodossa. Kallion iskemisen ja murskaamisen sijasta kallionäytekairauksessa kallioon hierretään renkaanmuotoista uraa, jolloin siitä saadaan irrotettua sylinterinmuotoinen näytekappale. Suunnatusta kallionäytteestä voi päätellä monia asioita kallioista, kuten kivilajin, rapautuneisuusasteen, rakoluvun, rakotäytteen ja rakokulmat. Lisäksi sillä saadaan myös luotettava tieto kallionpinnan sijainnista. Pelkän kallionpinnan tason määrittämiseen kallionäytekairaus ei kuitenkaan ole kovin tehokas sen hitaudesta (noin 2,5 metriä tunnissa) ja korkeasta hinnasta johtuen. (Jokinen 2010.)

Kuormitustavaltaan staattinen **painokairaus** on lähinnä Suomessa ja Ruotsissa käytetty kairausmenetelmä (Tiehallinto 1998). Painokairauksessa kaira upotetaan maahan kuormittamalla sitä erisuuruisilla painoilla sekä kiertämällä. Painokairauksessa kairausvastus on tunkeutumiseen tarvittava kuorma tai maksimikuormalla 1 kN tunkeutumiseen tarvittujen puolikierrosten määrä. Se on perinteinen kairausmenetelmä, jolla saa perustietoa monenlaisesta maaperästä; se sopii pehmeiköistä aina keskitiiviiseen moreeniin. (SGY 1981.)

Painokairaus voidaan tehdä joko koneellisesti tai käsin, joista jälkimmäinen on nykyään hyvin harvinaista. Molemmissa tapauksissa toimintaperiaate on sama. Ensimmäiseksi tehdään (tarvittaessa) niin kutsuttu alkukairaus, jossa pintamaata poistetaan tai siihen porataan alkureikä siten, etteivät pintamaassa olevat juurakot, routa, asfaltti tai muut vastaavat häiriötekijät vääristä tulosta. Alkukairauksen jälkeen suoritetaan varsinainen kairaus. Kairaamiseen lisätään painoja, kunnes se alkaa tunkeutua maahan. Painoja lisätään tai poistetaan siten, että kairan tunkeutumisenopeus maahan pysyy välillä 20–50 mm/s. Tavoitteena on mitata jatkuvasti minimipainomäärä, jolla kaira tunkeutuu maahan. Kun kairan tunkeutumisenopeus täydellä 1 kN (100 kg) kuormalla on alle 5 mm/s, aletaan kiertää. Kiertäminen tapahtuu puolikierrroksin, ja siinä pyritään mittaamaan 200 millimetrin tunkeumaan vaadittujen puolikierrrosten määrä. Mikäli kairan havaitaan tunkeutuvan ilman kiertämistä, poistetaan heti kaikki painot ja kairaukseen jätetään jälleen minimikuorman etsinnällä. (SFS 2005b.)

Mikäli kiertämisvaiheessa 200 millimetrin tunkeutumaan tarvitaan yli 100 puolikierrrosta, painot poistetaan ja kairaa aletaan lyömään tarkoitukseen sopivalla nuijalla. Lyömistä jätetään, kunnes kaira tunkeutuu jälleen painoilla tai kiertämällä. Kun kaira ei painu enää lyömälläkään, on kairaus päättynyt. Kairaus voidaan myös lopettaa kun saavutetaan ennalta määritetty määräsyyvyys. (Jääskeläinen 2011, s. 247–248.)

Painokairauksella saadaan hyvin monipuolista tietoa maaperästä. Sen avulla voidaan arvioida tiiviin pohjakerroksen sijaintia, tiiviydeltään erilaisten maakerrosten rajapintoja sekä maakerrosten likimääräistä tiiveyttä (SFS 2007). Kallionpinnan tason määrittämiseen se ei kuitenkaan kovinkaan hyvin sovellu, sillä painokairaus joudutaan suurella todennäköisyydellä keskeyttämään ennen kuin kallionpinta on saavutettu. Sitä voidaan kuitenkin käyttää apuna sellaisen korkeustason määrittämisessä, jonka yläpuolelle kallionpinta ei ainakaan ulotu. Lisäksi alueilla, jossa pehmeän saven on todettu ulottuvan lähes kallionpintaan asti, voidaan painokairauksillakin saada varsin tarkka kallionpinta-arvio. Tämä edellyttää kuitenkin, että alueella on tehty referenssipisteiksi joitakin paino- ja porakonekairauksia samaan kohtaan. Näistä syistä painokairaukset voidaan varauksin huomioida kallionpintamallia laadittaessa.

Heijarikairauksessa standardoitua kärkikappaletta upotetaan maahan tiputtamalla vakiopainoista pudotuskappaletta vakiokorkeudelta kairaukseen kiinnitettyä pidikettä vasten. Lisäksi kairaukseen kiinnitetään 1,5 kierrosta (tai maksimivääntökapasiteettiä asti) vähintään 1 metrin välein (SFS 2005a). Heijarikairauksessa iskun tekemä fyysikaalinen työ, pudotuskappaleen painon Q ja pudotuskorkeuden H tulo, on jokaiselle iskulle sama. Näin ollen tiettyyn uppoamaan tarvittavien iskujen määrästä voidaan tehdä päätelmiä maan lujuusominaisuuksista. (SFS 2007.)

Heijarikairaus on suoritustavastaan johtuen objektiivisempi kairausmenetelmä kuin painokairaus. Sillä on myös parempi läpäisevyys, minkä takia se soveltuu hyvin karkearakeisten ja tiiviiden maiden tutkimiseen. Sillä pystytään määrittämään hyvin tiiviin, kantavan maapohjan sijainti, minkä takia sitä käytetään usein tukipaalujen tunkeutumissyvyyden ennakointiin. (SFS 2007.)

Vaikka kallionpinnan tason määrittäminen ei olekaan heijarikairauksen ensisijainen tarkoitus, on sillä kuitenkin mahdollista saada viitteitä kallionpinnan tasosta. Heijarikairauksen hyvän läpäisevyyden ansiosta kairaus päättyy usein joko määräsyyvyyteen, kiveen tai kallioon (Jääskeläinen 2011, s. 254). Paremmalla läpäisevyydellä johdosta heijarikairauksen avulla kallionpintaa pystytään arvioimaan huomattavasti paremmin

kuin painokairauksella. Sitä on mahdollista hyödyntää porakonekairausten avulla määritetyn kallionpintamallin täydentämiseen.

Kun heijarikairaukseen yhdistetään toinen yleinen kairausmenetelmä, puristinkairaus, puhutaan **puristin-heijarikairauksesta**. Puristinkairaus on kivettömiin ja pehmeisiin maihin hyvin soveltuva tutkimusmenetelmä, jossa standardoitua karkikappaletta painetaan maahan vakionopeudella ja mitataan eri syvyyksillä upottamiseen tarvittavaa voimaa. (ISO 2009). Puristin-heijarikairauksessa yhdistyy kahden laadukkaan kairausmenetelmän hyvät puolet. Pehmeämmissä maakerroksissa kairakärkeä upotetaan puristamalla, ja tiiviimpiin kerroksiin tultaessa siirrytään heijarikairaukseen. Tämän johdosta puristin-heijarikairausta voidaan käyttää kaikenlaisissa maaperissä. Lisäksi toisin kuin perinteisissä puristin- ja heijarikairauksissa, puristin-heijarikairauksessa kairaustankoja pyöritetään koko kairauksen ajan. (SGY 2001.)

Puristin-heijarikairaus aloitetaan usein alkukairauksella. Maan päällimmäisiä kerroksia on avarrettava etenkin, jos on syytä epäillä että tiivis pintakerros vääristää puristinkairauksesta saatavia tuloksia. Varsinainen kairaus aloitetaan puristinkairauksella. Kairaa tulisi puristaa maahan nopeudella 20 mm/s, ja samalla pyörittää kairaustankoa nopeudella 12 kierrosta minuutissa. Kairauksen aikana mitataan sekä upotukseen tarvittavaa puristusvoimaa että pyörittämiseen tarvittavaa taivutusmomenttia. Mitatut tiedot rekisteröityvät automaattisesti. (Jääskeläinen 2011, s. 268.)

Kun maksimipuristusvoima (yleensä n. 30 kN) on saavutettu, siirrytään heijarikairaukseen. Heijarikairauksessakin kairatankoa pyöritetään vakionopeudella. Sen aikana mitattavia tietoja ovat taivutusmomentti sekä 200 millimetrin painumiseen tarvittava iskumäärä. Kummatkin rekisteröityvät automaattisesti 200 millimetrin välein. (Jääskeläinen 2011, s. 268.)

Puristin-heijarikairauksella saadaan tietoa tiiviin pohjakerroksen sijainnista, geoteknisistä kerrosrajoista, maakerrosten tiiveydestä ja lujuudesta, sekä maalajiryhmistä. Lisäksi teoreettisia kaavoja ja määrittyskriteerejä käyttämällä pystytään arvioimaan muun muassa maan kitkakulmaa sekä kokoonpuristuvuusominaisuuksia (SGY 2001). Kallionpinnan määrittämiseen puristin-heijarikairaus on aavistuksen heijarikairausta parempi, sillä tankojen jatkuva pyörittäminen takaa hieman paremman läpäisevyyden.

Tärykairaus on kevyt dynaaminen kairausmenetelmä. Siinä kairatangot upotetaan maahan koneen aikaansaaman tärytyksen avulla koneen oman painon toimiessa kuormana. Tärykairauksen iskuteho ei ole vakio, minkä takia sen avulla ei voida luotettavasti päätellä mitään maakerrosten ominaisuuksista. Enimmillään sillä voidaan havaita kerrosrajojen jyrkkiä muutoksia, sekä mahdollisesti päätellä maalajiryhmiä äänten perusteella. Se on kuitenkin muihin kairaustapoihin verrattuna nopea ja edullinen kairausmenetelmä, ja sitä käytetään usein täydentävänä kairausmenetelmänä. (SGY 1981.)

Tärykonekairauksella tärkein saatava tieto on kallionpinnan tason maksimiarvo; kalliota ei voi olla siellä, mihin tärykairalla on päästy. Tästä syystä sitä käytetään esimerkiksi varmistamaan, ettei kallionpinta ole kaivuun tiellä. Lisäksi mikäli kallionpinta on melko lähellä maanpintaa (alle 4 metrin syvyydessä), voidaan tärykairausta käyttää porakonekairausten väleissä tiheimmällä kairausruudukolla tarkentamaan kallionpintaprofiilia. (Jääskeläinen 2011, s. 256.)

Koekuoppa on pohjatutkimusmenetelmä, jota voidaan käyttää kairauksilla saatujen maaperätietojen täydentämiseen. Nimensä mukaisesti menetelmässä yksinkertaisesti kaivetaan kuoppa, josta voidaan silmämääräisesti tarkastella maaperän ominaisuuksia. Koekuopalla saadaan tietoa maakerrosrajoista, maan kaivettavuudesta, olemassa olevista rakenteista sekä maan pilaantuneisuudesta. Tilanteessa, jossa kallionpinta on melko lähellä maanpintaa ja sen päällä on esimerkiksi hyvin kivinen maakerros, voi koekuoppa olla kallionpinnan tason selvittämiseen paras keino. (Jääskeläinen 2011, s. 259–260.)

2.3.3 Geofysikaaliset menetelmät

Geofysikaalisilla menetelmillä tutkitaan maa- ja kallioperän erilaisia fysikaalisia ominaisuuksia. Menetelmät voivat perustua esimerkiksi maa- tai kallioperän ominaisvastuuksiin (sähköiset ja sähkömagneettiset menetelmät), kimmo-ominaisuuksiin (seismiset menetelmät), magneettisuuksiin (magneettiset menetelmät) tai tiheyksiin (gravimetriset menetelmät). Geofysikaalisten menetelmien vahvuuksia ja heikkouksia on listattu taulukossa 2. (Hokkanen 2011.)

Vahvuuksia	Heikkouksia
<ul style="list-style-type: none"> - Kohtuullisen hyvä syvyysulottuvuus - Tietoa saadaan maanpintaa vahingoittamatta - Nopeasti ja edullisesti kattavat mittaukset - Alueellinen edustavuus (jatkuvat maaperäprofiilit) 	<ul style="list-style-type: none"> - Tulkinnan monikäsitteisyys - Alttius häiriöille - Alueellisten tulosten huono resoluutio → pieniä piirteitä ei havaita

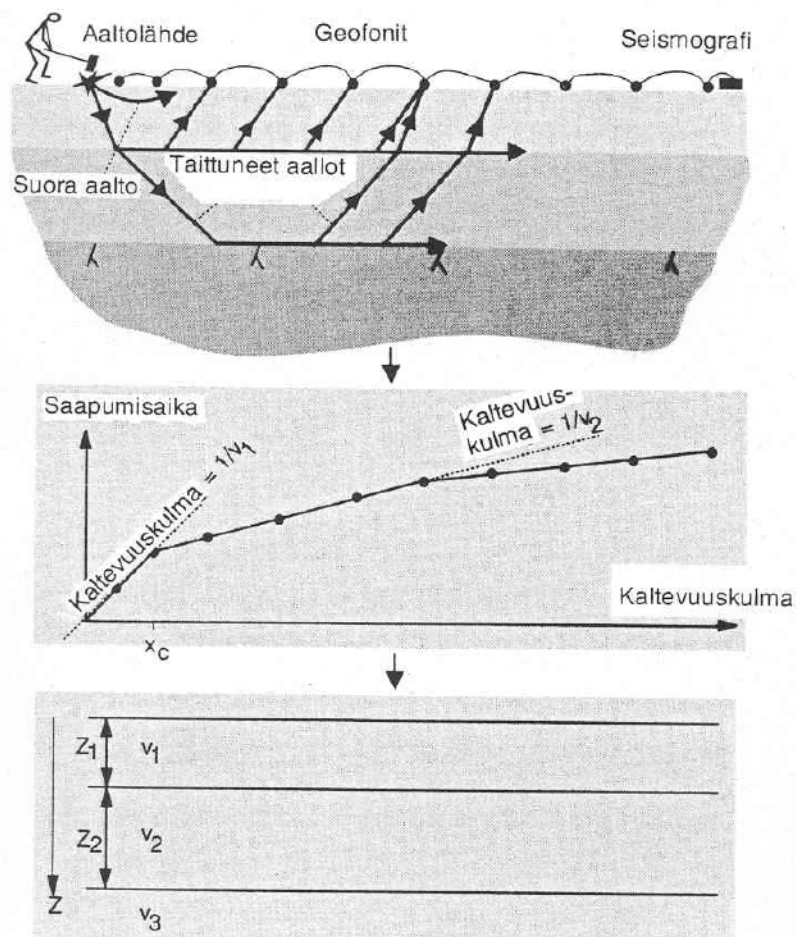
Geofysikaalisten mittausten tarkkuustaso on riippuvainen mitattavan suureen suuruusluokkaeroista; mitä jyrkempi on muutos suureessa materiaalien rajapinnoissa, sitä tarkemmin ne pystytään havaitsemaan. Tästä syystä monet maahan ”kuulumattomat” rakenteet (routaeristeet, teräsverkot ym.) on tyypillisesti helppo havaita geofysikaalisilla menetelmillä. (Rantanen et al. 2007.)

Geofysikaalisia menetelmiä suositellaan käytettäväksi ensisijaisesti alustavana tutkimustapana alueilla, jossa ei ole aiempaa tietoa pohjasuhteista. Mittauksien avulla pystytään tunnistamaan suunnittelun kannalta hankalimmat alueet, jolloin jatko-tutkimukset voidaan kohdistaa tehokkaammin. Rahaa säästyy, kun tarvittavien kairauksien määrää saadaan vähennettyä. (Rantanen et al. 2007.)

Suomessa melko yleisesti käytössä oleva **maatutkaus** on nopea ja edullinen geofysikaalinen menetelmä. Maatutkaus perustuu korkeataajuisen sähkömagneettisen aallon heijastumiseen väliaineen sähköisiltä rajapinnoilta. Laitteen lähetinantenni lähettää maahan 10 MHz–1 GHz taajuisen signaalin, jonka heijastukset vastaanotinantenni rekisteröi. Kun aallon kulunopeus tunnetaan, voidaan signaalin kulkuajasta laskea aallon kulkema matka ja edelleen määrittää kerrosrajojen syvyyksiä. Antennien taajuuksia vaihtamalla saadaan luotaussyvyyttä ja -tarkkuuta muutettua tarkoitukseen ja ympäristöön sopivaksi. Mitä matalampaa taajuutta käytetään, sitä suurempi on signaalin tunkeutumissyvyys. Korkeammilla taajuuksilla sen sijaan saadaan pystysuuntaista erottelukykyä parannettua. Maatutkauksella saadaan tietoa muun muassa tien

rakennekerroksien paksuuksista, sekä kallionpinnan, maakerrosrajojen ja pohjavedenpinnan sijainneista. Maatutkaustulosten tulkinta edellyttää kuitenkin aina jonkin verran referenssikairauksia, joiden avulla lasketaan kerrosten dielektrisyysvakiot ja kalibroidaan syvyyshavainnot. Tulkintojen tarkkuus on tämän johdosta riippuvainen referenssiaineiston määrästä ja laadusta. Maatutkauksen suurin heikkous on menetelmän huono soveltuvuus savikoille. Savikoilla korkea sähkönjohtavuus vaimentaa voimakkaasti signaalia. (Korkiala-Tanttu & Onninen 2001; Hokkanen 2011.)

Seisminen luotaus perustuu keinotekoisesti synnytettyjen seismisten aaltojen etenemiseen maaperässä. Räjähdyksellä tai lyömällä synnytettyt puristus- eli P-aallot taittuvat erisuuruisten seismisen nopeuden omaavien maakerrosten rajapinnassa. Taittuneet aallot heijastuvat lopulta takaisin maan pinnalle, missä niiden kuluaika rekisteröidään maahan kiinnitetyillä tuntoelimillä, geofoneilla. Syntyvistä aika-matka-kaavioista voidaan tulkita aaltojen etenemisnopeus eri kerroksissa, sekä esittää arviot maakerrosten paksuuksista, maalajeista, pohjaveden pinnan sijainnista ja kallion laadusta. Seismisen luotauksen periaate on esitetty kuvassa 3. (Tielaitos 1995.)



Seisminen luotaus soveltuu parhaiten hiekka- ja sora-alueille. Moreenialueilla maakerrosten tyypillisesti pieni paksuus on ongelmallinen seismisten tutkimusten onnistumisen kannalta. Menetelmä ei myöskään sovellu kovin hyvin tehtäväksi kylminä vuodenaikoina, sillä routa vaikeuttaa tulosten tulkintaa. (Tielaitos 1995.)

Gravimetrinen luotaus perustuu maa- ja kallioperän erisuuruisiin tiheyksiin. Kohdissa, jossa kallionpinta on syvällä ja maakerros on paksu, on vähemmän massaa kuin kohdissa, jossa kallio on lähellä maanpintaa. Tämän seurauksena myös painovoima on tällaisissa kohdissa aavistuksen pienempi. Kun maan ja kallion tiheydet, sekä painovoiman regionaalitaso (painovoima ilman maapeitettä) tunnetaan, on painovoimaa mittaavilla laitteilla mahdollista tehdä päätelmiä maapeitteen suhteellisista paksuusvaihteluista. Luotauksen aikana mitataan myös maanpinnan korkeuden tasoa, jolloin saadaan tietoa kallionpinnan topografiasta. Vaikka kallionpinnan syvyyden arvioinnissa saattaa paikallisesti olla suuriakin virheitä, saadaan menetelmällä suhteellisen hyviä tietoja kallionpinnan alueellisista vaihteluista (Valjus 2009.)

2.4 Koordinaatti- ja korkeusjärjestelmät

ISO/TC 211 -työryhmän laatimassa raportissa ”

” esitetään määritelmiä monille koordinaattijärjestelmiin liittyville termeille. Määritelmille laaditut suomenkieliset vastineet löytyvät julkaisusta JHS153. (Geodeettinen laitos 2012.)

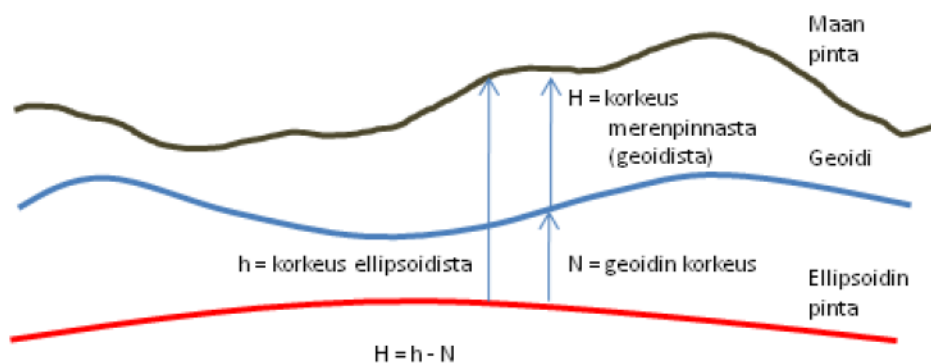
JHS153:ssa esitetyn määritelmän mukaan koordinaattijärjestelmä on ”joukko suureita, jotka tarvitaan koordinaatiston määrittelemiseksi, sijoittamiseksi ja orientoimiseksi” (Geodeettinen laitos 2012). Määritelmä on teoreettinen ja käytännössä koordinaattijärjestelmä on aina realisoitava eli toteutettava maastossa. Erilaisia Suomessa valtakunnallisesti käytettäviä tasokoordinaattijärjestelmiä ovat muun muassa kartastokoordinaattijärjestelmä KKJ, valtion vanha järjestelmä VVJ, sekä ETRS89. (Maanmittauslaitos 2010a.)

Koordinaattijärjestelmän realisaatiota maastossa kutsutaan koordinaatistiksi. Koordinaatisto on 2- tai 3-ulotteinen, yleensä suorakulmainen akselisto, jonka avulla pisteelle voidaan määritellä sijainti koordinaatiston origoon nähden. Koordinaatisto toteutetaan mittaamalla ja laskemalla maastossa oleville todellisille kiintopisteille koordinaattijärjestelmän mukaiset koordinaatit. Koordinaateilla puolestaan tarkoitetaan lukuarvoja, jotka tarvitaan pisteen sijainnin määrittämiseen valitussa koordinaatistossa. Lukuarvoja on saman verran kuin koordinaatistossa on akseleita. Koordinaatit voidaan esittää joko geodeettisinä (φ , λ , h) tai avaruuskoordinaatteina (X , Y , Z). (Maanmittauslaitos 2010a.)

Näiden lisäksi koordinaattijärjestelmiin liittyy läheisesti termi datumi. Datumilla tarkoitetaan joukkoa parametreja, jotka tarvitaan koordinaatiston määrittelemiseksi. Koordinaattijärjestelmän, koordinaatiston, datumien ja koordinaattien keskinäinen hierarkia on esitetty kuvassa 4. (Maanmittauslaitos 2010a.)



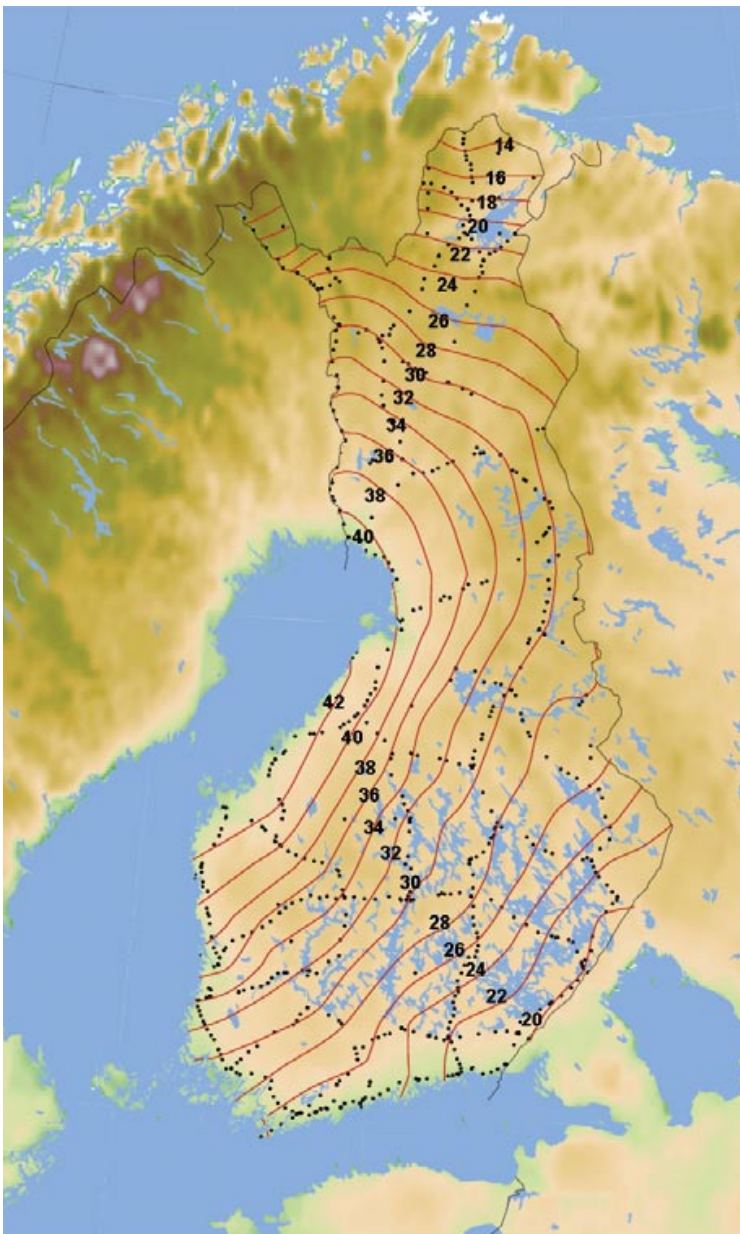
Koordinaattijärjestelmät ovat maapallon kolmiulotteisen todellisuuden kuvaamisen kannalta välttämättömiä työkaluja, joiden avulla kohteiden sijainti pystytään määrittämään. Kolmiulotteisia koordinaatistoja on kahdenlaisia. Karteesisessa (eli suorakulmaisessa) avaruuskoordinaatistossa koordinaattiakselit ovat tavalliset X, Y ja Z, ja origona toimii yleensä Maan massakeskipiste. Maapallon pinnan sijaintitietojen kuvaamisessa on kuitenkin huomattavasti käytännöllisempää käyttää niin kutsuttuja geodeettisia eli maantieteellisiä koordinaatistoja, joissa hyödynnetään Maan muotoihin mahdollisimman hyvin sovitettua ellipsoidia (ellipsoidi on ellipsin pyörähdyskappale). Maantieteelliset koordinaatit kuvataan ellipsoidin pinnalta. Ne ovat kulmamittoja, jotka käytännössä kertovat pisteen etäisyyden päiväntasaajasta (leveyskoordinaatti φ) ja koordinaatiston keskimeridiaanista (pituuskoordinaatti λ). Näihin on mahdollista yhdistää ellipsoidinen korkeus h , joka on etäisyys vertausellipsoidin pinnasta. Yleisesti korkeudesta puhuttaessa tarkoitetaan kuitenkin käytännöllisempää korkeutta H , joka on etäisyys geoidin pinnasta. Geoidilla tarkoitetaan painovoiman tasa-arvopintaa, johon levossa oleva merenpinta (tai sen kuvitteellinen jatke) asettuu. Geoidi poikkeaa todellisesta merenpinnan tasosta jonkin verran esimerkiksi vaihtelevien lämpötila- ja suolaisuusolosuhteiden tai merivirtojen johdosta. Lisäksi Maan sisäosien epätasaisesti jakautunut massa aiheuttaa geoidille aaltoilevan pinnan. Käytännössä edellä mainitut poikkeamat ovat kuitenkin Maan säteeseen verrattuna merkityksettömän pieniä. Kuvassa 5 on esitetty geoidin, ellipsoidin ja maanpinnan väliset suhteet. (Maanmittauslaitos 2010a.)



Käytännön syistä Maan pallomainen pinta joudutaan usein esittämään kaksiulotteisena, kuten karttakirjoissa tai kuvaruudulla. Kun 3-ulotteisesta pinnasta otetaan tällainen karttaprojektio, syntyy väistämättä jonkin verran suunta- ja mittakaavavirheitä. Nämä kaksiulotteiset tasokoordinaatistot pyritäänkin valitsemaan tapauskohtaisesti siten, että syntyneet kuvausvirheet olisivat mahdollisimman pieniä. Suomessa nykyisin yleisesti käytössä oleva tasokoordinaatisto ETRS-TM35FIN pohjautuu Universal Transverse Mercator (UTM) -projektioon, jossa maailma on jaettu projektiokaistojen avulla ruutuihin. ETRS-TM35FIN koordinaatisto sopii melko hyvin koko Suomen alueella, sillä Suomi sijoittuu lähes kokonaisuudessaan siinä käytetyn kaistan 35 alueelle. Tämän takia muun muassa maanmittauslaitoksen tietojärjestelmissä ja -kannoissa siirryttiin vuonna 2010 käyttämään tätä koordinaatistoa. Muita Suomessa käytettyjä koordinaatistoja ovat muun muassa kartastokoordinaattijärjestelmä KKJ ja ETRS-GKn. Näissä järjestelmissä projektiokaistojen leveydet ovat pienempiä, jolloin päästään paikallisesti parempaan tarkkuuteen kuin laajassa ETRS-TM35FIN:ssä. Tämän takia ne ovat tyypillisempiä koordinaatistoja esimerkiksi kaavoitus- ja rakentamis-

toiminnassa. ETRS-TM35FIN on kuitenkin koko Suomen laajuisissa kartta-aineistoissa parempi koordinaatisto. (Maanmittauslaitos 2010a.)

Koordinaattijärjestelmien lisäksi tarvitaan korkeusjärjestelmiä, joita käytetään pisteen korkeusaseman (geoidin pinnasta) ilmaisemiseen. Suomessa maa kohoaa edelleen jääkauden jäljiltä, minkä takia korkeusjärjestelmiä on päivitettävä tietyin väliajoin vastaamaan muuttunutta tilannetta. Suomessa uusin valtakunnallinen N2000 korkeusjärjestelmä on vähitellen korvaamassa yleisesti kunnissa ja eri toimijoilla käytössä olleen N60 -järjestelmän. Järjestelmillä on korkeuseroa 130–430 millimetriä, riippuen missä päin Suomea ollaan (kuva 6). Erot ovat pääosin seurausta 40 vuoden maankohoamisesta; N60 perustuu vuoden 1960 tilanteeseen ja N2000 vuoden 2000 tilanteeseen. Vanhempia korkeusjärjestelmiä N43 ja NN ei enää juurikaan käytetä. (Maanmittauslaitos 2010b.)



Kuva 6. Korkeusjärjestelmien N2000 ja N60 korkeuserot senttimetreissä eri puolilla Suomea. N2000 korkeus saadaan, kun N60 korkeuteen lisätään korjaus: $N2000\text{-korkeus} = N60\text{-korkeus} + \text{korjaus}$. (Maanmittauslaitos 2010b.)

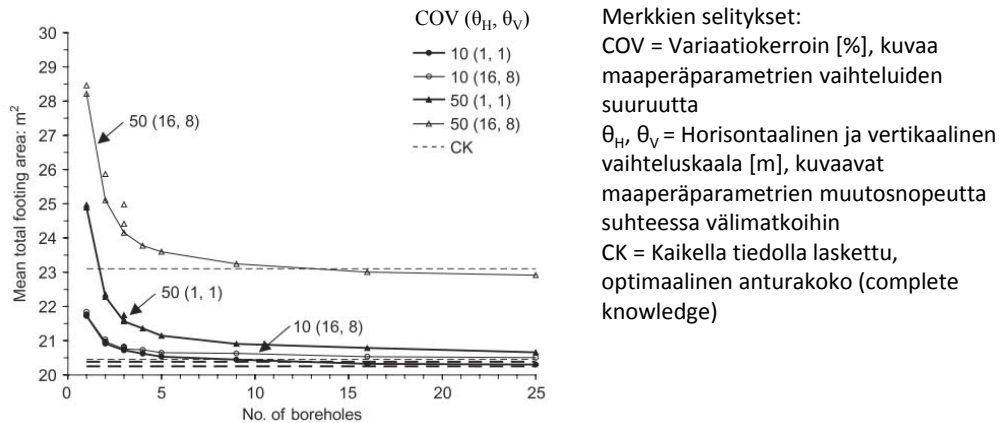
2.5 Maa- ja kallioperän satunnaisuus sekä epävarmuudet niiden mallintamisessa

Geotekniseen suunnitteluun sisältyy aina jonkin verran maaperän heterogeenisyydestä aiheutuvia epävarmuuksia. Käytännössä ei ole mahdollista saada mitattua tietoa koko maaperäprofiilista, minkä takia suunnittelussa joudutaan tekemään aina jonkin verran yksinkertaistuksia. Yksinkertaistuksista aiheutuvia epävarmuuksia voidaan analysoida tehokkaasti soveltamalla luotettavuusteorioita geotekniikkaan. (Baecher et al. 2003, s. 13.)

Esimerkki luotettavuusteorioita hyödyntävästä geoteknisestä tutkimuksesta on Jaksan (Jaksa et al. 2005) työryhmineen laatima artikkeli, jossa arvioitiin pohjatutkimusten määrän vaikutusta anturaperusteisen kolmikerroksisen talon anturoiden kokoon. Tutkimuksessa hyödynnettiin elementtianalyysiä (FEA), Schmertmannin menetelmää sekä Monte Carlo -simulaatiota.

Tutkimuksessa mallinnettiin elementteinä keinotekoisesti luotuja 3-ulotteisia maaperämalleja. Mallien maaperäparametrit luotiin sattumanvaraisesti siten, että parametrit ja niiden satunnaisuus ovat samankaltaisia luonnollisen maaperän kanssa. Malleja laadittiin erilaisilla satunnaisuuden tunnusluvuilla eli variaatiokertoimilla sekä vertikaalisilla ja horisontaalisilla vaihteluväleillä. Todellisessa tilanteessa maaperän geotekniset ominaisuuksista on mahdollista tehdä arvioita vain pohjatutkimuspisteiden kohdalla, mutta koska tutkimuksessa maaperämalli oli simuloitu, tunnettiin sen ominaisuudet tarkasti. Tällöin oli mahdollista määrittää anturoiden optimaalinen koko. Tutkimuksessa luotuun maaperämalliin simuloitiin kairauksia ja tehtiin anturoiden suunnittelu niiden pohjalta normaalisti, voitiin eri pohjatutkimustiheyksillä suunniteltuja anturakokoja verrata optimaaliseen kokoon. Tämä koko prosessi tehtiin tutkimuksessa tuhansia kertoja eri maaperämalleille Monte Carlo -menetelmän mukaisesti, jolloin pystyttiin arvioimaan pohjatutkimusten määrän ja laadun, sekä maaperän vaihtelevuuden vaikutusta anturakoon oikeellisuuteen. (Jaksa et al. 2005.)

Kuten odotettua, tutkimuksen tuloksena saatiin, että pohjatutkimusten määrän lisääntyessä suunniteltujen anturoiden yhteenlaskettu pinta-ala alkaa lähestyä optimaalista anturakokoa. Anturakokojen kehittyminen suhteessa kairausmäärään on esitetty kuvassa 7. Kuvan tulokset laskettiin kahdella eri variaatiokertoimella (10 % ja 50 %) ja kahdella vaihteluskalalla (1,1 ja 16,8). Variaatiokertoimella kuvataan maaperäparametrien vaihteluiden suuruutta ja vaihteluskaloilla maaperäparametrien muutosnopeuksia suhteessa välimatkoihin. Kuvasta havaitaan, että kun rakennusalueelle (tässä koko 20 m x 20 m) tehtävien kairausten määrä on yli viisi, eivät ylimääräiset kairaukset enää merkittävästi pienentäneet suunniteltujen anturoiden kokoa. Lisäksi kuvasta voidaan odotetusti havaita, että tarvittava anturakoko pienenee variaatiokertoimen pienentyessä. (Jaksa et al. 2005.)



Kuva 7. *Kairausten lukumäärän vaikutus suunniteltujen anturoiden keskimääräiseen yhteispinta-alaan. Eri kuvaajat kuvastavat eri variaatiokertoimilla ja eri vaihteluskaloilla laskettuja tuloksia. Katkoviivat puolestaan kuvaavat kaikella tiedolla laskettua, optimaalista anturapinta-alaa. (Jaksa et al. 2005.)*

Monet muutkin tutkimukset arvioivat maaperän heterogeenisyyden vaikutusta erilaisien geoteknisten tilanteiden mekaaniseen käyttäytymiseen. Suurimmassa osassa hyödynnetään vähintäänkin jossain määrin Monte Carlo -simulaatiota. Muutamia esimerkkejä tällaisista tutkimuksista on listattu aihepiireittäin taulukossa 3. (Popescu et al. 2008. s. 225.) Vastaavanlaisia tutkimuksia on tehty runsaasti, mutta niissä kaikissa keskitytään pääasiassa tarkastelemaan maaperän parametrien satunnaisuusvaikutuksia rakentamiseen. Tutkimuksia, joissa tutkittaisiin kerrosrajojen tai kallionpinnan muotojen satunnaisvaihteluita ja niiden vaikutuksia rakentamiseen, ei löytynyt.

Taulukko 3. *Esimerkkejä tutkimuksista, joissa käsitellään maaperän satunnaisvaihteluiden vaikutusta erilaisiin geoteknisiin ongelmiin.*

Aihepiiri	Tutkimuksia
Perustusten painuminen	Finite element modeling of settlements on spatially random soil (Paice et al. 1996).
	Influence of soil heterogeneity on load redistribution and settlement of a hyperstatic three-support frame (Houy et al. 2005).
Maan nesteytyminen	Risk assessment of an interacting structure–soil system due to liquefaction (Koutsourelakis et al. 2002).
	Stochastic evaluation of static liquefaction in a predominantly dilative sand fill (Hicks et al. 2005).
Luiskan stabiileetti	Probabilistic slope stability analysis for practice (El Ramly et al. 2002).
	Probabilistic slope stability analysis by finite elements (Griffiths et al. 2004).
Perustusten kantokestävyys	Effects of random heterogeneity of soil on bearing capacity (Popescu et al. 2005).
	Bearing-capacity prediction of spatially random $c - \phi$ soils (Fenton et al. 2003).

Anschützin (Anschütz et al. 2014) työryhmineen laatimassa raportissa esitellään ilmasta käsin tehtävää sähkömagneettista luotaustekniikkaa (Airborne Electromagnetics, AEM), ja sen käyttömahdollisuuksia geotekniikassa. Raportissa esitetyssä esimerkkikohteessa tätä luotaustekniikkaa on käytetty yhdessä porakonekairausten kanssa kolmiulotteisen kallionpintamallin luomiseen Norjassa sijaitsevalle moottoritiehankkeelle. Esimerkin lopussa esitetään jatkotutkimusehdotus optimaalisen porakonekairaust määrän selvittämiseksi:

- 1) Hyödynnetään kaikkia pohjatutkimuksia ja luotauksia mahdollisimman tarkan ja luotettavan kallionpintamallin luomiseksi
- 2) Tehdään pintamalli useita kertoja uudestaan hyödyntämällä vain osaa porakonekairauksista. Tällä tavalla pyritään löytämään porakonekairausten minimimäärä, jonka avulla saataisiin ”riittävän” tarkka kallionpintamalli luotua. (Anschütz et al. 2014.)

3 Tutkimuksen suoritus

3.1 Käytetyt ohjelmistot

Tekla Civil (myöhemmin Tekla) on yhdyskuntarakentamisen suunnittelussa käytetty ohjelmisto, jossa voidaan rakentaa kolmiulotteisia malleja väylärakenteista, pohjanvahvistuksista, maa- ja kalliopinnoista, kunnallistekniikasta sekä monesta muusta yhdyskuntarakentamiseen liittyvistä rakenteista. Aineistoja voidaan hallita ohjelmiston eri sovellusten avulla. Sovelluksia ovat maasto ja kartta, varusteet, pohjatutkimukset sekä rakenne. Teklalla tehty kolmiulotteinen malli mahdollistaa muun muassa massa- ja määrälaskentojen teon, työmaamittauksen sekä 3D-visualisoinnin (Tekla 2014). Tekla pystyy lukemaan ja kirjoittamaan aineistoa useassa eri formaatissa, kuten kansainväliseen LandXML-standardiin perustuvassa ohjelmistoriippumattomassa Inframodel-formaatissa, sekä pohjatutkimuksien siirtoon soveltuvassa Infra-pohjatutkimusformaatissa.

Tässä työssä tarkasteltiin pääasiassa pohjatutkimuksia ja pintoja. Pintoja voidaan luoda Teklaan joko manuaalisesti tai pohjatutkimuksien avulla automaattisesti (tai syöttämällä sopivassa muodossa, esimerkiksi gt-formaatissa, oleva valmis pintamalli). Manuaalisessa pintamallin luonnissa halutulle pinnalle (esimerkiksi arvioitu kallionpinta) syötetään pisteitä yksitellen, tyypillisesti leikkausnäkyssä. Tekla päivittää näkymään jatkuvasti pisteistä lineaarisesti muodostettua kolmioverkkoa. Sitä vastoin pohjatutkimuksien avulla tehtävässä automaattisessa pinnanluonnissa pinnan kolmioverkon pisteet valitaan sopivasti rajattujen pohjatutkimuksien havainnoista. Esimerkiksi arvioidun kallionpinnan luonnissa voidaan valita kolmioverkon pisteiksi porakonekairauksilla saadut kallionpintahavainnot, minkä jälkeen Tekla muodostaa niistä lineaarisen kolmioverkon automaattisesti. Manuaalisesti luotu pintamalli on kuitenkin tyypillisesti automaattisesti luotua parempi, koska pisteitä lisättäessä geotekninen suunnittelija pystyy samalla hyödyntämään omaa tietämystään ja kokemustaan geologiasta kairaajan tekemien maalajiarvioiden oikeellisuuden arvioinnissa. Lisäksi esimerkiksi kallionpintamallin luonnissa suunnittelija pystyy hyödyntämään myös muita pohjatutkimusmenetelmiä hahmotellessaan kallionpinnan kulkua porakonekairauspisteiden välillä. Näistä syistä automaattinen pinnanluominen ei todennäköisesti voi koskaan täysin korvata manuaalista tapaa. Kuitenkin, varsinkin laajoissa kohteissa automaattisella pinnanluonnilla on kätevää luoda alustava pintamalli, jota sitten tarkistetaan, korjataan ja täydennetään manuaalisesti. (Häkkinen 2014.)

Matlab (matrix laboratory) on The MathWorks -yhtiön ylläpitämä ohjelmisto erilaisten numeeristen laskelmien, mallinnojen ja ohjelmointien tekemiseen. Matlab on myös ohjelmistossa käytettävän ohjelmointikielen nimi. Matlabilla on mahdollista käsitellä matriiseja, tehdä funktioita, analysoida tilastollisia aineistoja, luoda algoritmeja, sekä tehdä monipuolisesti muita erilaisia matemaattisia operaatioita. (Mathworks 2014.) Tämän työn tilastollisissa analyyseissä ja simuloinneissa käytetty työkalu tehtiin Matlabilla.

3.2 Käytetyt tilastolliset menetelmät

Yleisin tapa havainnoida tilastollista aineistoa graafisesti on histogrammi. Histogrammi osoittaa eri arvoväleille osuvien havaintojen lukumäärän erikorkuisina pylväinä. Kunkin arvovälin kohdalla olevan pylvään korkeus osoittaa kyseiselle välille osuvien havaintojen lukumäärän, ja pylväiden yhteenlaskettu korkeus koko havaintojoukon lukumäärän. Arvovälit tulee valita siten, että ne ovat kaikki yhtä leveitä ja niiden päätepisteet osuvat järkeviin kohtiin. Histogrammin havainnollisuuden kannalta on myös tärkeää, ettei arvovälejä ole liikaa tai liian vähän. (Baecher et al. 2003. s. 35.)

Vaikka tilastollisen aineiston graafinen esittäminen esimerkiksi histogrammeina onkin varsin havainnollistavaa, puhtaasti laskennallisissa tarkasteluissa hyödyllisimpiä ovat niin kutsutut tilastolliset tunnusluvut, eli aineiston realisoinnit yksittäisiksi luvuiksi tai vektoreiksi. Esimerkiksi keskiluvut ja hajontaluvut ovat tilastollisia tunnuslukuja. Keskiluvuista yleisimpiä ovat moodi, mediaani sekä aritmeettinen keskiarvo. Moodi on aineiston yleisin arvo ja mediaani on suuruusjärjestykseen asetetun aineiston keskimäinen arvo. Aritmeettinen keskiarvo (myöhemmin keskiarvo) on havaintojen summa jaettuna havaintojen lukumäärällä. Se lasketaan kaavalla 1. (Baecher et al. 2003. s. 38.)

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n x_i \quad (1)$$

missä \bar{x} on keskiarvo
 n on havaintojen määrä
 x_i on aineiston i . havainto.

Yleisimpiä hajontalukuja ovat vaihteluväli, keskihajonta, sekä variaatiokerroin. Vaihteluvälillä tarkoitetaan aineiston suurimman ja pienimmän arvon erotusta. Keskihajonta on aineiston vaihtelun mitta, joka kertoo havaintojen keskimääräisen poikkeaman aineiston odotusarvosta (keskiarvosta). Keskihajonta (s_x) lasketaan kaavalla 2. Variaatiokerroin (COV) kuvaa aineiston suhteellista hajontaa. Se lasketaan jakamalla keskihajonta keskiarvolla (kaava 3). (Baecher et al. 2003. s. 39.)

$$s_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (2)$$

$$COV = \frac{s_x}{\bar{x}} \quad (3)$$

Tässä työssä esiin nousevat myös tilastolliset käsitteet luottamusväli ja luottamustaso. Luottamusvälillä tarkoitetaan sitä väliä, jonka sisällä tarkasteltava parametri määrättyllä todennäköisyydellä sijaitsee. Se kuinka usein parametri tälle välille sijoittuu, määrittelee kyseisen luottamusvälin luottamustason. (Baecher et al. 2003. s. 68.)

Niin kutsuttu Monte Carlo -simulaatio on huomattavasti edellä esitettyjä perustunnuslukuja kehittyneempi työkalu tilastollisten analyysien tekemiseen. Monte Carlo -simulaatioissa epätarkkoja lähtötietoja sisältävä ongelma ratkaistaan numeerisesti mallintamalla. Lähtöarvoille annetaan satunnaisia (tai näennäisen satunnaisia) arvoja ennalta määrättyjen rajojen puitteissa, joilla lasketaan tarkasteltavan ongelman lopputulos. Prosessi toistetaan useita kertoja, jolloin eri lähtöarvoilla tehtyjen laskelmien tulosjakaumasta saadaan arviot odotusarvoisesta lopputuloksesta sekä poikkeavan tuloksen todennäköisyydestä. Arviot ovat sitä tarkempia, mitä useampia

toistoja simulaatiosta tehdään. Monte Carlo -simulaation kolme periaatteellista vaihetta ovat (Popescu et al. 2008. s. 233–234):

- 1) Lähtötietojen rajauksen/virhejakauman määrittäminen
- 2) Ongelman ratkaiseminen useita kertoja kohdassa 1 rajatuilla satunnaisilla lähtöarvoilla
- 3) Tulosten tilastollinen tarkastelu.

Monte Carlo -simulaatio soveltuu hyvin stokastisiin ongelmiin, joiden lähtötiedoissa on paljon epävarmuutta. Koska maa- ja kallioperässä on tyypillisesti paljon ennalta-arvaamatonta heterogeenisyyttä, soveltuu Monte Carlo -simulaatio varsin hyvin monenlaisten geoteknisten ongelmien numeeriseen ratkaisemiseen. Tästä syystä menetelmää on hyödynnetty laajasti erilaisissa geoteknisissä tutkimuksissa ja artikkeleissa. (Popescu et al. 2008. s. 225 & 234.)

3.3 Tutkimusaineisto

3.3.1 Kohteiden yleiskuvaus

Tutkimuksessa käytettiin neljästä todellisesta kohteesta saatuja kairaus- ja mitattua kallionpinta-aineistoa. Aineistosta ainoastaan osaa pystyttiin hyödyntämään analyysissä. Ensinnäkin, kaikki muut pohjatutkimusmenetelmät paitsi porakonekairaus päätettiin rajata ulos käytettävästä aineistosta. Muiden menetelmien hyödyntäminen tutkimuksessa on huomattavasti hankalampaa, koska ne ovat kallionpinnan määrittämisessä paljon enemmän tulkitsijasta riippuvaisia. Toiseksi, porakonekairauksistakin voitiin hyödyntää vain niitä, joiden kohdalla kallionpinta on myöhemmin kaivettu esiin ja vaaittu. Vain näissä voidaan olettaa, että todellisen kallionpinnan sijainti tunnetaan ja vertailu arvioidun ja todellisen kallionpinnan välillä on mahdollista tehdä.

Ensimmäinen ja aineistomäärältään ylivoimaisesti suurin kohde oli Valtatien 7 kehittäminen moottoritieksi Koskenkylästä Loviisan kautta Kotkaan (**Koloko**). Se on osa E18-tien kansainvälisestä kehittämishankkeesta Turun ja Vaalimaan välillä. Yhteensä 53 kilometriä pitkässä kohteessa on 36 kilometriä täysin uutta moottoritietä sekä 17 kilometriä vanhan tien kehittämistä moottoritieksi. Tiejärjestelyjen tulisi olla täysin valmiita vuoden 2015 loppuun mennessä. (Liikennevirasto 2014c.)

Koloko -kohteesta luettiin Teklaan yhteensä 13644 pohjatutkimusta, joista 3371 oli porakonekairauksia. Näistä 1046 porausta sijaitsi alueilla, joista saatiin myös mitattua kallionpinta-aineistoa.

Toinen käytetty kohde oli Sepänkylän ohikulkutie Valtatiellä 8 (**Vt8**). Kohteessa ohikulkuliikenne ohjataan kulkemaan Valtatien 8 uudelle kaksi- tai nelikaistaiselle linjaukselle osuudella Kotiranta–Stormossen–Koivulahti. Osuuden pituus on noin seitsemän kilometriä, ja siihen sisältyy neljä eritasoliittymää, neljä risteyssiltaa sekä viisi kiertoliittymää. (Liikennevirasto 2014c.) Kohteesta luettiin Teklaan 1345 pohjatutkimusta, joista 382 oli porakonekairauksia. Näistä 102 porakonekairauksen kohdalla oli mitattu myös kallionpinta.

Kolmas kohde oli Kantatien 50 (**Kehä 3**) parantamishanke Valtatien 4 ja Valtatien 7 välisellä osuudella. Tavoitteena on saada päivittäisistä ruuhkista kärsivää Kehä 3:sta muutettua sujuvammaksi ja turvallisemmaksi. Kohteeseen kuuluu uusia kaistoja, ramppeja, sekä yksi uusi eritasoliittymä. (Liikennevirasto 2014c.) Kohteessa on kaikkiaan 619 porakonekairausta, joista tosin vain 56:n kohdalta on myös mitattua kallionpintatietoa.

Neljäs kohde oli Länsimetron Urheilupuiston asemaa varten tehty laaja kaivanto (**Urheilupuiston kaivanto**), joka on selvästi erityyppinen hanke muihin kohteisiin verrattuna. Kaivannon laajuus on noin 180 x 85 metriä. Hankkeesta luettiin Teklaan yhteensä 118 porakonekairauksia, joista tosin vain 32 sijaitsi mitatun kallionpinnan alueella.

Porakonekairausten määrät on listattu taulukossa 4. Kohteiden likimääräiset sijainnit Suomen kartalla on hahmoteltu kuvaan 8.

Kohde	Porakonekairauksia	Porakonekairauksia, joiden kohdalta on mitattu kallionpinta
Vt7 Koskenkylä–Kotka (Koloko)	3371	1046
Vt8 Sepänkylän ohikulkutie	382	102
Kehä 3:n parantaminen välillä Vt4 – Vt7	619	56
Länsimetro, Urheilupuiston kaivanto	118	32



3.3.2 Aineiston käsittely

Eri kohteista saadut pohjatutkimus- ja mitatut kallionpinta-aineistot koottiin yhteen laajaan Tekla-projektiin. Pohjatutkimukset luettiin Teklaan pääasiassa yleisessä Infra-pohjatutkimusformaattissa. Mitattujen kallionpinta-aineistojen sekä maastomallien (mikäli saatu) siirrossa käytettiin tielaitos- eli gt-formaattia.

Kaiken aineiston kokoaminen samaan Tekla-projektiin edellytti, että niiden täytyi olla yhtenevässä korkeus- ja koordinaattijärjestelmissä. Tässä työssä valittiin käytettäväksi hyvin koko Suomen alueella toimiva koordinaatisto ETRS-TM35FIN. Korkeusjärjestelmäksi valittiin uusin valtakunnallinen N2000-korkeusjärjestelmä. Yksikään saaduista aineistoista ei kuitenkaan ollut valmiiksi näissä järjestelmissä, minkä takia aineistoille jouduttiin tekemään koordinaattimuunnokset. Koordinaattimuunnokset tehtiin niin kutsuttuina Helmert-muunnoksina, missä annetut pisteet muunnetaan neljän parametrin avulla siten, että pisteiden muodostama kuvio pysyy samanlaisena. Ainoastaan pisteiden sijainnit, orientoinnit ja mittakaavat voivat muuttua. (Maanmittauslaitos 2010a.)

Koordinaattimuunnokset tehtiin Teklan koordinaattimuunnos -toiminnon avulla aineiston sisäänluvun yhteydessä. Tasokoordinaatistoille muunnokset onnistuivat Teklaan sisäänrakennettujen muunnoskaavojen avulla, mutta korkeusjärjestelmän muutosta varten joka kohteelle jouduttiin erikseen määrittämään sopiva, kohteen sijainnista riippuva korkeuskoordinaatin korjaus. Korjauksen määrittämisessä hyödynnettiin geodeettisen laitoksen koordinaattimuunnos-palvelua. Työssä käytetyt kohteet ja aineistoille tehdyt koordinaattimuunnokset on listattu taulukossa 5.

Kohde	Tasokoordinaatiston muunnos	Korkeusjärjestelmän muunnos	Korkeusaseman muutos, Δz
E18 Koskenkylä-Kotka	KKJ3 → ETRS-TM35FIN	N60 → N2000	+0,220 m
Vt8 Sepänkylän ohitus	KKJ1 → ETRS-TM35FIN	N60 → N2000	+0,436 m
Kehä 3 Vt4-Vt7	KKJ2 → ETRS-TM35FIN	N60 → N2000	+0,253 m
Länsimetro, Urheilupuiston kaivanto	VVJ → ETRS-TM35FIN	N60 → N2000	+0,247 m

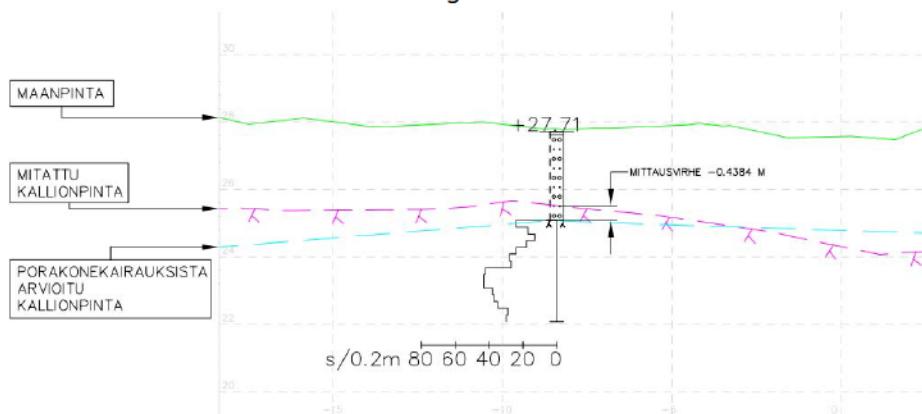
Arvioitu kallionpinta luotiin Teklaan automaattisesti luvussa 3.1 esitetyllä tavalla ainoastaan porakonekairauksia hyödyntäen. Tekla muodostaa kolmiomallin lineaarisesti yhdistämällä lähekkäiset havaintopisteet suorilla viivoilla. Pinnan kolmiomallissa kolmiosivun maksimipituutta on mahdollista säädellä pintakohtaisesti. Tässä työssä arvioitun kallionpinnan kolmiosivun maksimiksi asetettiin 50 metriä. Sen sijaan mitatun kallionpinnan ja maanpinnan kolmiosivun maksimipituudet pidettiin oletusarvoina, jotka ovat kallionpinnalle 30 ja maanpinnalle 60 metriä. Teklaan luotujen pintojen tarkoitus oli lähinnä mahdollistaa aineistojen silmämääräiset arvioinnit sekä poikkeikkausten tarkastelut, varsinainen analyysi toteutettiin Matlabilla.

Aineiston tarkastelun helpottamiseksi kohteille hahmoteltiin lisäksi rakennesovelluksessa apulinjat. Luodut apulinjat eivät olleet väyläkohteiden todellisia mittalinjoja, mutta niitä pitkin erilaisten leikkausten avaaminen ja siirtäminen onnistui helposti.

3.4 Tilastollinen analyysi

3.4.1 Yleiskuvaus

Tutkimuksen tilastollinen analyysi on jaettu kahteen vaiheeseen. Analyysin ensimmäisessä vaiheessa porakonekairausten pistemäisiä kallionpintahavaintoja verrataan mitattuun kallionpintaan. Kairauksista saatujen kallionpintahavaintojen virheet, eli korkeuskoordinaattien erotukset mitattuun kallionpinnan tasoon nähden määritetään, ja tälle aineistolle lasketaan tyypillisiä tilastollisia tunnuslukuja, tässä tapauksessa kiinnostavimmat ovat keskiarvot ja keskihajonnat. Lisäksi virheaineistosta muodostetaan tilastollisen jakauman graafiset esitykset eli histogrammit. Tuloksien avulla voidaan tehdä päätelmiä porakonekairausten yleisestä luotettavuudesta. Tulokset toimivat myös lähtötietoina analyysin toisessa vaiheessa. Kuvassa 9 on esimerkki mittausvirheen periaatteellisesta määrittämisestä yhden porakonekairauksen kohdalta. Erotus määritetään vähentämällä arvioidusta kallionpinnasta mitatun kallionpinnan taso, minkä takia kuvan mittausvirhe on negatiivinen.

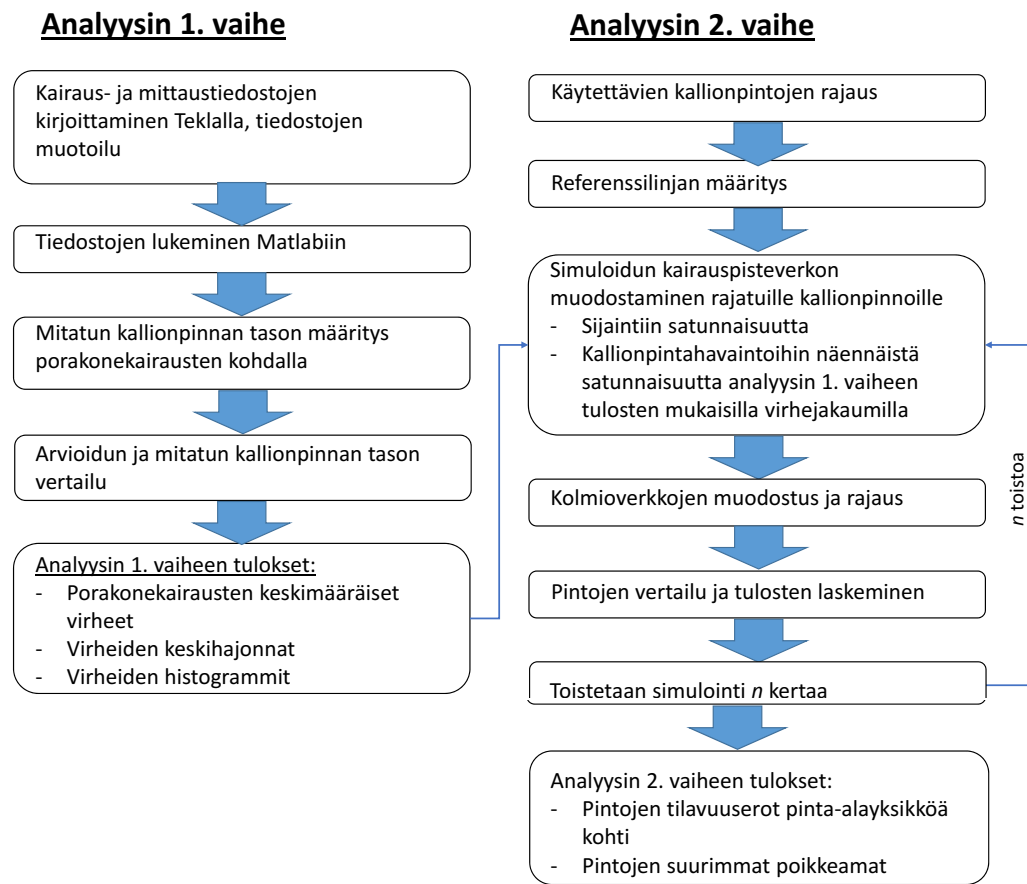


Tilastollisen analyysin toisessa vaiheessa tutkitaan porakonekairausten tiheyden, sekä erilaisten geologisten olosuhteiden vaikutusta arvioidun kallionpintamallin luotettavuuteen. Koska arvioidun kallionpintamallin lähtötiedoissa (eli porakonekairauksissa) on monesta virhelähteestä aiheutuvia epätarkkuuksia, ei mallin tarkkaa luotettavuutta ole mahdollista määrittää analyttisesti. Tällaisissa ongelmissa on usein kätevinä määrittää likimääräinen ratkaisu numeerisesti simulointien avulla, sillä ne ovat suhteellisen yksinkertaisia ja johtavat suoriin tuloksiin (Fenton et al. 2008, s. 235). Tässä työssä käytetään Monte Carlo -simulointimenetelmää. Simuloinnin tuloksia tarkastellaan käyttämällä kahdenlaisia virhefunktioita: arvioidun ja mitatun kallionpinnan välistä tilavuutta, sekä arvioidun kallionpinnan suurimpia poikkeamia mitatuista kallionpintapisteistä. Tilavuuserot ovat kiinnostavia louhintaa varten tehtävän massalaskennan kannalta. Tämä johtuu siitä, että massalaskennassa ei haittaa, vaikka arvioitu kallionpinnan sijainti poikkeaisi mitatusta kallionpinnasta paikoitellen eri suuntiin. Oleellista on, että keskimääräinen louhintasyvyys on likimain sama molemmille pinnoille (eli tilavuusero on nolla), jolloin lasketut louhintamäärät ovat oikein. Poikkeamat puolestaan ovat kiinnostavampi virhefunktio tilanteissa, joissa on tärkeää tietää kallionpinnan todelliset tasot ja arvioidun kallionpinnan suurimmat mahdolliset virheet mahdollisimman luotettavasti.

Analyysin toista vaihetta varten valitaan viisi mitatun kallionpinnan aluetta, joiden kohdalle simuloinnit tehdään. Jotta erilaisten geologisten olosuhteiden vaikutusta tuloksiin olisi mahdollista arvioida, tulisi kallionpintojen olla topografialtaan mahdollisimman erityyppisiä. Lisäksi kolmioinnin mahdollistamiseksi mitattujen alueiden tulisi olla riittävän laajoja siten, että niiden kohdalle osuu simuloituja kairauksia vähintään kahdessa linjassa. Taulukossa 6 on esitetty simuloinnissa käytettävät alueet, sekä kuvailtu sanallisesti alueiden kallionpintojen muotoja. Kallionpintojen Teklalla kuvatut kolmiulotteiset kolmioverkot on esitetty liitteessä 1.

Alue	Kohde	Paaluväli (apulinja)	Pinta-ala	Kuvaus mitatusta kallionpinnasta
Alue 1	Koloko	46900-47640	60271 m ²	Kallionpinta on paaluvälillä vaihtelevaa. Alueella on melko paljon pienipiirteisiä ja jyrkkiä muodostumia. Kallionpinnan taso vaihtelee välillä +10...+34 m.
Alue 2	Koloko	17540-18000	17887 m ²	Kallionpinta on koko paaluvälin matkalla keskimäärin hyvin tasaista. Vähäiset vaihtelut ovat paikallisia, ja pääosin hyvin loivia. Kallionpinnan taso vaihtelee välillä +20...+30 m.
Alue 3	VT8	1140-1380	12288 m ²	Kallionpinta on paaluvälillä yleisesti melko tasaista. Alueella on kuitenkin muutamia varsin jyrkkiä muodostumia. Kallionpinnan taso vaihtelee välillä +10...+16 m.
Alue 4	VT8	4000-4120	9859 m ²	Kallionpinta on paaluvälillä tasaista. Alueella on kuitenkin myös muutamia jyrkkäseinäisiä muodostumia. Kallionpinnan taso vaihtelee välillä +6...+14 m.
Alue 5	VT8	5200-5420	10740 m ²	Kallionpinta on paaluvälillä hyvin vaihtelevaa. Alueella on runsaasti pienipiirteisiä ja jyrkkiä muodostumia. Kallionpinnan taso vaihtelee välillä +2...+13 m.

Analyysiprosessin periaatteelliset vaiheet on esitetty kuvassa 10. Vaiheet on kuvattu tarkemmin luvussa 3.4.2, analyysin yksityiskohdat.



Kuva 10. Analyysiprosessin suoritus askeleittain

3.4.2 Analyysin yksityiskohdat

Tilastolliset analyysit tehtiin tutkimusta varten luodulla **työkalulla**, joka ohjelmoitiin Matlabilla. Työkalu tehtiin kallionpintamallien luotettavuuden analysointia varten, mutta sitä pystyttäisiin todennäköisesti hyödyntämään myös muiden pintamallien arvioinnissa. Tässä luvussa esitellään työkalulla tehdyn kaksivaiheisen analyysin yksityiskohtainen suoritus askel kerrallaan. Askeleet ovat:

A. Analyysin ensimmäinen vaihe:

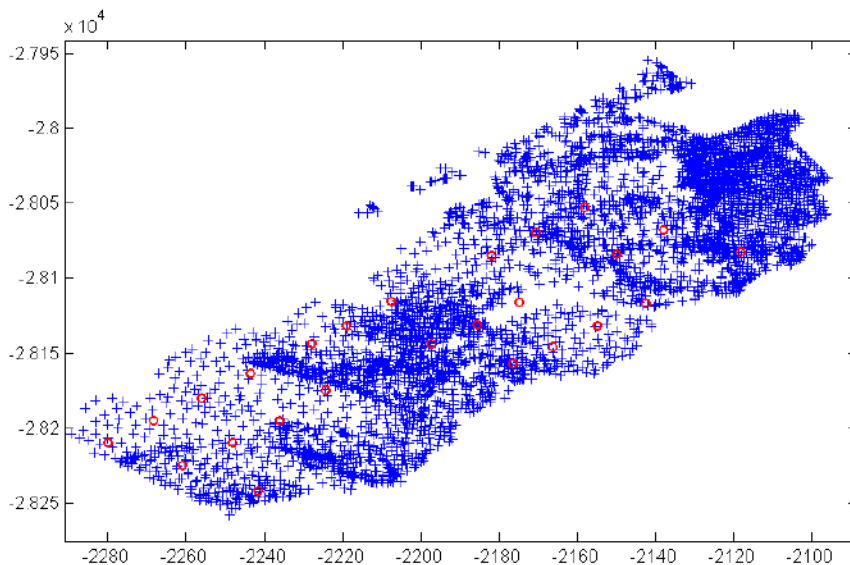
- A1) Valmistellaan aineistot ja luetaan ne työkaluun
- A2) Luodaan aineistoille omat paikalliset koordinaatit
- A3) Määritetään mitatun kallionpinnan tasot porakonekairausten kohdalla
- A4) Verrataan arvioitujen ja mitattujen kallionpintojen tasoja kairausten kohdalla
- A5) Luodaan tuloksista histogrammit ja lasketaan keskiarvot sekä keskijännöt

B. Analyysin toinen vaihe:

- B1) Valitaan kallionpinnat, joille simuloinnit tehdään
- B2) Määritetään mittauspistepilville referenssilinjoina toimivat regressiosuorat
- B3) Simuloidaan alueelle kairauspisteverkko asetetulla tiheydellä suhteessa referenssilinjaan ja annetaan sen sijainnille satunnaisuutta xy-tasossa
- B4) Asetetaan kairauksille analyysin ensimmäisessä vaiheessa määritettyjä virhejakaumia vastaavat, näennäisen satunnaiset kallionpintahavainnot
- B5) Luodaan mitatuista ja arvioituista kallionpintahavainnoista kolmioverkot
- B6) Rajataan kolmioverkkojen reunat yhteneviksi
- B7) Verrataan pintoja kahdella virhefunktiolla: tilavuuseroilla ja poikkeamilla
- B8) Toistetaan vaiheet B3–B7 useita kertoja Monte Carlo -menetelmän mukaisesti
- B9) Kootaan eri kallionpinnoille erilaisilla kairaustiheyksillä lasketut tulokset

Analyysin ensimmäisessä vaiheessa työkalun muuttujia ovat vain luettavat kairaus- ja mittaustulokset. Tämän vaiheen laskenta on nopeaa: se kesto vaihtelee aineistojen koosta riippuen muutamasta sekunnista vajaan minuuttiin. Analyysin toisessa vaiheessa sen sijaan työkalun muuttujia ovat porakonekairauksille määritetty keskimääräinen virhe, virheiden keskihajonta, kairausverkon tiheys, tarkasteltavat alueet ja simuloinnin toistokerrat. Tämän vaiheen laskemisen kesto vaihtelee vajaan tunnin reiluun vuorokauteen.

Ennen kun tilastollista aineistoa voidaan alkaa käsittelemään työkalulla, on aineistot muutettava luettavaan muotoon (askel A1). Tätä varten pohjatutkimuksista sekä mitatuista kallionpinnoista kirjoitetaan Teklalla taulukkomuotoiset tekstitiedostot, joissa on jaoteltuna tiedot mitatun kallionpintaverkon taitepisteiden, sekä porakonekairauksilla saatujen kallionpintahavaintojen x-, y- ja z-koordinaateista. Esimerkki kairausten siirtoon käytetystä tiedostosta on esitetty liitteessä 2. Kun aineisto on siirretty, on pisteitä mahdollista tarkastella myös Matlabissa, tosin vain kaksiulotteisesti. Kuvassa 11 on esimerkki Matlabilla xy-tasolla kuvatusta aineistosta.

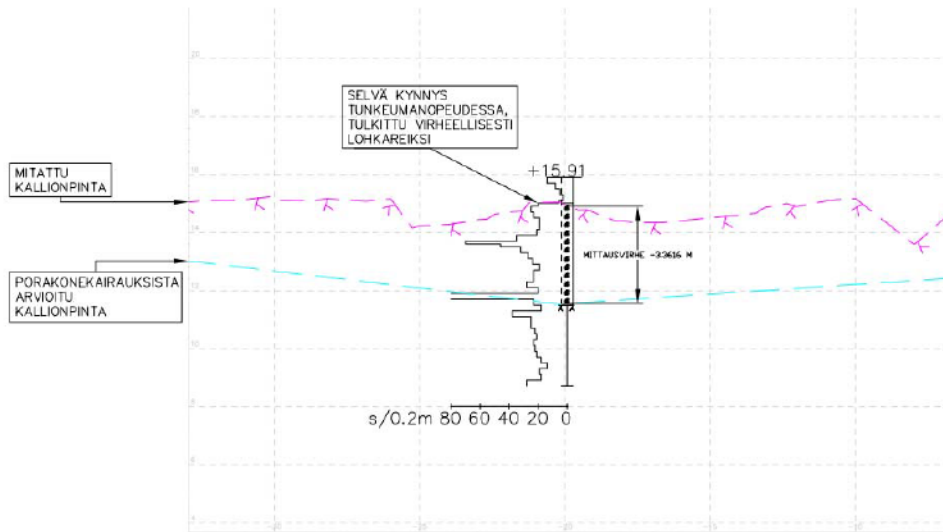


Analyyisin laskentojen kannalta on ongelmallista, että koordinaatiston origo on todella kaukana (päiväntasaajalla) suhteessa aineiston sisäisiin välimatkoihin. Tämän takia analyysin aluksi kullekin kohteelle luodaan oma paikallinen koordinaatistonsa (askel A2). Tämä tehdään sijoittamalla origo kunkin aineiston ensimmäisen mittauksen x- ja y-koordinaattien kohdalle. Muutos on välttämätön numeeristen tarkasteluiden onnistumisen kannalta, analyysin lopputuloksiin sillä ei ole vaikutusta. Esimerkiksi kuvan 11 x- ja y-akselien koordinaattilukemat ovat Koloko-kohteelle tehdyssä paikallisessa koordinaatistossa.

Seuraavaksi työkalulla määritetään mitatun kallionpinnan taso jokaisen mittausalueen sisällä olevan porakonekairauksen kohdalla (askel A3). Työkalu käy yksitellen jokaisen kairauspisteen läpi etsien niille kolme sopivinta mittauspistettä, joiden muodostaman kolmion sisään kairauspiste osuu. Mittauspisteiden valintaperusteena on, että niiden yhteenlaskettu xy-tason etäisyys kairauspisteestä on mahdollisimman pieni. Mikäli työkalu ei pysty kahdeksan lähimmän mittauspisteen tutkimisen jälkeen muodostamaan kairauspisteen ympärille sopivaa kolmiota, jätetään kyseinen kairaus huomioimatta. Näin tehdään myös siinä tapauksessa, että jonkun valitun kolmiopisteen etäisyys kairauspisteestä on yli 50 metriä. Kairauspisteen huomiotta jättäminen tarkoittaa, että tämä on todennäköisesti joko mittausalueen ulkopuolella, tai että lähimpien mittauspisteiden etäisyys johonkin suuntaan on niin suuri, ettei kolmiota pystytä järkevästi muodostamaan.

Sopivien kolmiopisteiden löytämisen jälkeen työkalu laskee niiden muodostaman kolmiulotteisen tason, eli mitatun kallionpinnan, korkeusaseman kunkin kairauspisteen kohdalla. Näin laskettuja korkeusasemia verrataan kallionpinnan arvioituihin korkeustasoihin porakonekairauksien kohdalla (askel A4). Korkeustasojen erotuksista lasketaan keskiarvot ja keskihajonnat, sekä muodostetaan histogrammit (askel A5). Nämä tiedot antavat paitsi hyvän yleiskäsityksen arvioidun kallionpinnan oikeellisuudesta, myös kairausten keskimääräiset virheet ja virheiden hajonnat, joita käytetään lähtötietoina analyysin toisessa vaiheessa.

Porakonekairauksien avulla määritetyissä kallionpintahavainnoissa on paikoitellen suuriakin poikkeamia mitatun kallionpinnan tasoon nähden. Mahdollisia syitä tähän on useita (listattu luvussa 5.1), mutta ainakin osa virheistä vaikuttaisi johtuvan selvästi huolimattomuudesta kairausta suoritettaessa tai kairauspöytäkirjaa laadittaessa. Monessa tapauksessa virhe olisi mahdollisesti pystytty havaitsemaan ja korjaamaan pintamallin manuaalisessa luonnissa tai tarkastuksessa. Esimerkki tällaisesta virheestä on esitetty kuvassa 12. Kuvassa on kohteesta VT8 otettu poikkileikkaus, jossa näkyy porakonekairausdiagrammi, arvioitu (vaaleansininen) sekä mitattu (violetti) kallionpinta. Mitattu kallionpinta osuu loogisesti kohtaan, jossa on selvä äkillinen lasku tunkeumanopeudessa. Kairaaja on kuitenkin jostain syystä virheellisesti tulkinnut tähän kohtaan vielä usean metrin paksuisen lohkaraisen kerroksen ennen kallionpinnan alkamista. Tällaisten virheiden poistamisen vaikutusta analyysin ensimmäisen vaiheen tuloksiin arvioidaan lisätarkastelussa, jossa jätetään huomiotta sellaiset kairauksien avulla määritetyt havainnot, joiden poikkeama mitatusta kallionpinnasta on yli kaksi metriä. Toisena lisätarkasteluna arvioidaan kallionpinnan syvyyden vaikutusta porakonekairausten virheisiin. Tämä tehdään jakamalla suurin, kohteen Koloko porakonekairausaineisto kairaussyvyyden mukaan eri tiedostoihin, ja tekemällä niille kaikille analyysin ensimmäisen vaiheen mukainen tarkastelu erikseen.



Analyysin toisessa vaiheessa aineistosta valitaan muutamia (5) mitattuja kalliopintamalleja, ja luodaan niiden kohdalle uudet porakonekairausruudukot. Kairaukset luodaan siten, että niiden poikkeamat mitatusta kalliopinnasta, eli niiden virhejakaumat vastaavat mahdollisimman hyvin analyysin ensimmäisessä vaiheessa määritettyjä virhejakaumia. Simuloituista kairauksista luodaan kalliopintaruudukot, joista saadaan uudet arvioidun kalliopinnan mallit. Näin muodostettuja arvioidun kalliopinnan malleja verrataan mitattuihin kalliopintamalleihin kahdenlaisia virhefunktioita käyttämällä. Prosessi toistetaan Monte Carlo -periaatteen mukaisesti useita kertoja, jolloin muodostuvien tulosjakaumien avulla voidaan tehdä päätelmiä arvioidun kalliopinnan luotettavuudesta. Useammat toistot parantavat tuloksien tarkkuutta, mutta hidastavat laskentaprosessia.

Ensimmäisenä työkalulla rajataan sellaiset kalliopintamuodostumat, joiden kohdalle simuloinnit tehdään (askel B1). Tämän jälkeen alueilla sijaitseville mittauspisteille sovitetaan regressiosuorat (askel B2). Nämä regressiosuorat toimivat referenssilinjoina, joiden suhteen luodut kairauspisteverkot sijoitetaan. Kairauspisteitä tehdään viiteen rinnakkaiseen linjaan, joista keskimäinen on likimain yhtenevä referenssilinjan kanssa. Kairauspisteiden linjojen suuntaisia välimatkoja, sekä linjojen välisiä kohtisuoria välimatkoja muuttamalla pystytään arvioimaan kairausverkon tiheyden vaikutusta tuloksiin.

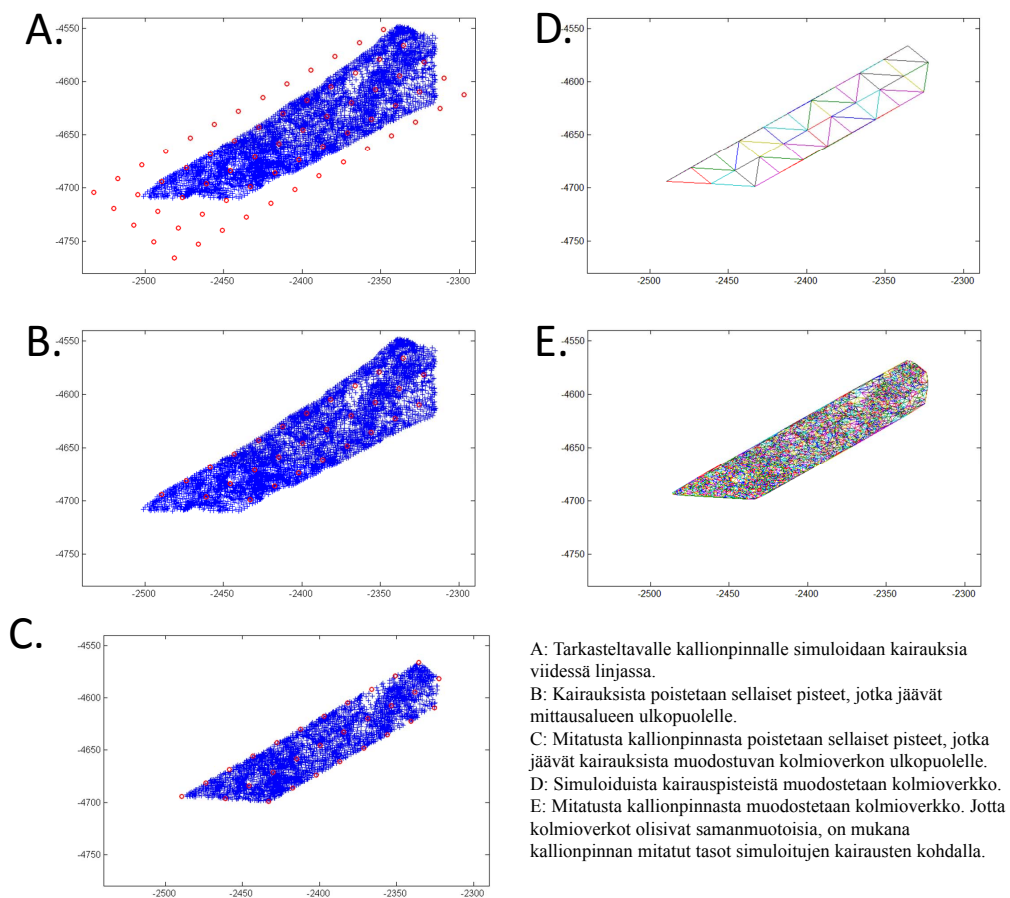
Työkalu luo tarkasteltavalle alueelle kairauspisteet neliöhilaan asetetulla tiheydellä (askel B3). Ensimmäinen kairaus asetetaan referenssilinjan alkupäähän, ja sen sijaintiin asetetaan satunnaisuutta sekä vaakaa- (x) että pystysuunnassa (y). Satunnaisuuden suuruus on enimmillään kairauspisteille asetettujen välimatkojen verran. Tämän jälkeen muiden kairauspisteiden sijainnit lasketaan asetetuilla välimatkoilla suhteessa ensimmäiseen kairaukseen ja referenssilinjaan. Näin muodostetusta kairauspisteverkosta rajataan pois sellaiset pisteet, jotka jäävät mitatun kalliopinnan ulkopuolelle. Jäljelle jääneille kairauspisteille määritetään arvioitu kalliopintahavainnon syvyystaso näennäisen satunnaisesti (askel B4). Havainnon määrittämisessä käytetään mitatun kalliopinnan tasoa kairauspisteen kohdalla, sekä tarkasteltavalle kohteelle analyysin ensimmäisessä vaiheessa laskettuja mittausvirheiden keskiarvoa ja keskihajontaa (kaava 4). Mittausvirheet oletetaan normaalisti jakautuneiksi, mikä on tyyppillinen perusoletus perinteisissä virhetarkasteluissa (Honjo 2011 s. 12). Tämä oletus on välttämätön, sillä kairausten vähyydestä johtuen osassa kohteista (VT8, Kehä 3 ja

Urheilupuiston kaivanto) on vaikea tehdä päätelmiä virhejakauman todellisesta muodosta.

$$z_{arv} = z_{mit} + randn \times s_x + \bar{x} \quad (4)$$

missä z_{arv} on kairaukselle asetettava arvioidun kallionpinnan korkeustaso [m]
 z_{mit} on mitatun kallionpinnan korkeustaso kairauspisteen kohdalla [m]
 $randn$ on näennäisen satunnainen arvo normaalijakaumalta
 s_x on kohteelle analyysin ensimmäisessä vaiheessa laskettu virheen keskihajonta [m]
 \bar{x} on kohteelle laskettu keskimääräinen virhe [m]

Kun kairauspisteiden kallionpintahavainnot on määritetty, tehdään sekä kallionpinnan mitatuista että arvioituista (luoduista) havainnoista kolmioverkot (askel B5). Kolmioverkot tehdään työkalussa Matlabin "delaunay" -komennon avulla. Jotta pintojen välisen tilavuuden laskenta olisi mahdollista, täytyy luoduista kolmioverkoista rajata samankokoiset (askel B6). Tämä tehdään poistamalla tarkastelusta ensin kaikki sellaiset mittauspisteet, jotka ovat kairauspisteistä luodun kolmioverkon ulkopuolella, minkä jälkeen mittauspisteisiin lisätään mitatun kallionpinnan tasot luotujen kairauksen kohdalla. Näin rajatuista mittauspisteistä saadaan muodostettua kolmioverkko, jonka ulkoreunat ovat yhtenevät kairauspisteiden kolmioverkon kanssa. Rajauksen periaate on esitetty vaiheittain kuvassa 13.



Kuva 13. Simuloitujen kairauksen sekä mitatun kallionpintapisteiden vaiheittainen rajaus sekä kolmiomallien muodostaminen, esimerkkinä alue 3 (VT8 plv 1140-1380) kairausverkon tiheydellä 20 m x 20 m

Kuten aiemmin todettiin, pintoja vertaillaan kahdenlaisilla virhefunktioilla: tilavuuseroilla ja poikkeamilla (askel B7). Pintojen välinen tilavuusero määritetään ensin laskemalla molemmille kolmioverkoille pintamallin ja merenpinnan tason ($z = 0$) välinen tilavuus, ja erottamalla tulokset toisistaan. Tilavuuksien absoluuttinen erotus on riippuvainen paitsi pintamallien korkeustasojen yhtenevyydestä, myös tarkastellun kolmioverkon laajuudesta. Tämän johdosta absoluuttisten tilavuuserojen tarkastelu ei ole mielekästä, vaan saatua tilavuuseron arvoa tarkastellaan suhteessa kolmioverkon pinta-alaan. Kolmioverkon pinta-ala lasketaan työkalussa Matlabin ”convexHull”-komennon avulla. Suhteellisen tilavuuseron laskentakaava (kaava 5) on:

$$\Delta V_{suht} = \frac{V_{arv} - V_{mit}}{A} \quad (5)$$

missä ΔV_{suht} on pintojen välinen tilavuusero suhteessa kolmioverkon pinta-alaan [m^3/m^2]
 V_{arv} on arvioidun kallionpinnan ja merenpinnan tason ($z = 0$) välinen tilavuus [m^3]
 V_{mit} on mitatun kallionpinnan ja merenpinnan tason ($z = 0$) välinen tilavuus [m^3]
 A on kolmioverkon pinta-ala (sama molemmille pinnoille) [m^2].

Poikkeamat määritetään laskemalla jokaiselle kolmioverkon sisällä olevalle mittauspisteelle pystysuuntainen etäisyys arvioituun kallionpintaan. Tuloksista poimitaan jokaisen alueen suurin positiivinen sekä suurin negatiivinen poikkeama. Nämä arvot kuvaavat, kuinka paljon arvioitu kallionpinta voi enimmillään poiketa todellisesta kallionpinnasta eri kairausaiheuksilla eri alueiden erilaisilla kallionpinnan topografioilla. Poikkeamien laskentakaava (kaava 6) on:

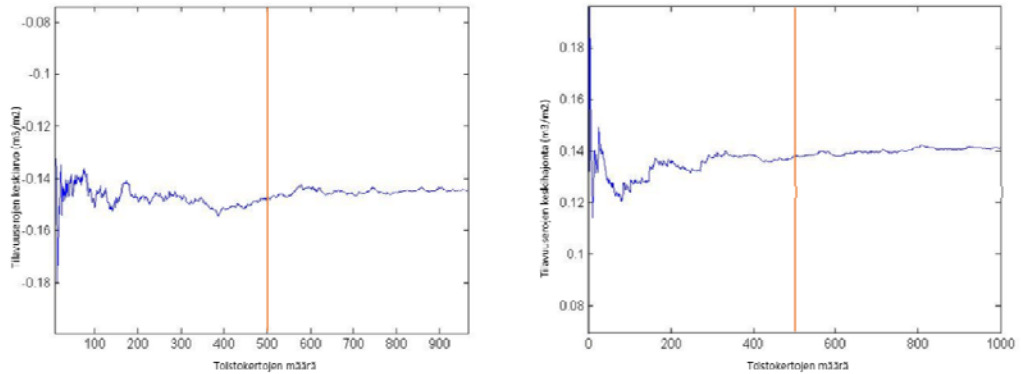
$$\Delta z_i = z_{arv,i} - z_i \quad (6)$$

missä Δz_i on mittauspisteen i pystysuuntainen poikkeama arvioidusta kallionpinnasta
 $z_{arv,i}$ on arvioidun kallionpinnan korkeustaso mittauspisteen i kohdalla
 z_i on kolmioverkon sisällä olevan mittauspisteen i korkeustaso.

Suurimpien poikkeamien laskeminen jokaiselle alueelle ei kuitenkaan kerro vielä kovin paljon poikkeamien käyttäytymisestä. Niiden tulos on riippuvainen alueiden koosta, minkä lisäksi niistä ei saada mitään tietoa poikkeamien jakautumisesta alueiden sisällä. Tämän takia suurimpien poikkeamien määrittäminen tehdään myös simuloituista kairauspisteverkoista laadittujen kolmioverkkojen jokaiselle kolmiolle erikseen. Tämä toteutetaan käymällä yksitellen jokainen alueelle muodostuva kolmioverkon kolmio läpi, ja määrittämällä kolmioiden rajaamien mittauspisteiden suurimmat poikkeamat arvioidusta kallionpinnasta. Eri kolmioille laskettujen suurimpien positiivisten ja suurimpien negatiivisten poikkeamien keskiarvoista ja keskihajonnoista voidaan tehdä päätelmiä alueen suurimpien poikkeamien keskimääräisistä arvoista sekä niiden hajonnoista.

Yhdessä laskusuorituksessa edellä esitetyn simulointiprosessin askeleet B3–B7 toistetaan Monte Carlo -periaatteen mukaisesti useita kertoja (askel B8). Toistojen riittävä määrä selvitetään 1000 toiston testiajossa, jossa seurataan tilavuuserojen keskiarvon ja keskihajonnan kehittymistä toistomäärän funktiona alueella 1, jossa kallionpinnan vaihtelu on huomattavan suurta. Testiajon tulokset on esitetty kuvassa 14. Ku-

vasta havaitaan, että molemmat kuvaajat tasoittuvat jo 500 toiston kohdilla. Tämän vuoksi tässä työssä simulointikertojen lukumääränä (n) käytetään 500 toistoa. Useampien toistojen käytön arvioidaan pidentävän laskentojen kestoa tarpeettomasti.



Simulointi tehdään jokaisella virhejakaumalla erikseen, kukin kuudella eri kairausverkon tiheydellä. Kairauspisteverkot simuloidaan neliöhilaan ja niille asetetut tiheydet ovat 5, 10, 15, 20, 25 ja 30 metriä.

Laskentojen tulokset kootaan erikokoisiin matriiseihin (askel B9). Kun tarkasteltava virhefunktio on tilavuuserot, tulokseksi saadaan matriisi, joka kuvaa pintojen välisiä tilavuuksia eri tarkastelualueilla ja toistokerroilla. Se on pintojen tilavuuseromatriisin ja sitä vastaavan pinta-alamatriisin osamäärä alkioittain. Tulomatriisissa rivien lukumäärä vastaa Monte Carlo -simuloinnin toistokertojen () määrää, ja sarakkeiden lukumäärä tarkasteltujen alueiden () määrää. Tilavuuserojen alueittaiset keskiarvot ja keskijonkat voidaan laskea matriisin sarakkeista. Sitä vastoin kun tarkasteltava virhefunktio on poikkeamat, tulomatriiseja tehdään useampia:

- Koko alueen poikkeamatarkastelun suurimmat positiiviset arvot
- Koko alueen poikkeamatarkastelun suurimmat negatiiviset arvot
- Kolmiokohtaisen poikkeamatarkastelun suurimpien positiivisten poikkeamien keskiarvot
- Kolmiokohtaisen poikkeamatarkastelun suurimpien positiivisten poikkeamien keskijonkat
- Kolmiokohtaisen poikkeamatarkastelun suurimpien negatiivisten poikkeamien keskiarvot
- Kolmiokohtaisen poikkeamatarkastelun suurimpien negatiivisten poikkeamien keskijonkat
- Kolmiokohtaisen poikkeamatarkastelussa käytettyjen kolmioiden lukumäärät

Myös näiden tulomatriisien koko on $n \times n$.

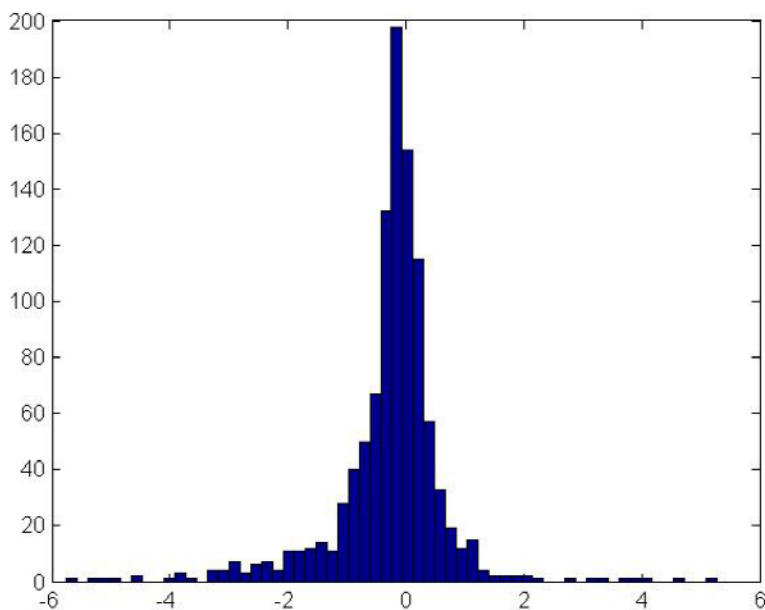
Lisätarkasteluna tutkitaan myös pintojen syvimpien kohtien välistä erotusta eri alueilla. Tarkastelun tavoitteena on arvioida, millä todennäköisyydellä todellisen kallionpinnan syvin kohta on syvemmällä kuin arvioidun pinnan syvin kohta. Tämä tehdään etsimällä jokaiselle alueelle arvioidun kallionpinnan pienin korkeuslukema ja vähentämällä siitä mitatun kallionpinnan pienin korkeuslukema. Myös nämä tulokset kootaan erilliseen tulomatriisiin.

4 Tutkimuksen tulokset

4.1 Analyysin ensimmäinen vaihe

Analyysin ensimmäisessä vaiheessa verrattiin porakonekairauksien avulla määritettyä kallionpintaa mitattuun tasoon kairausten kohdalla. Pintojen välisistä korkeustasojen erotuksien keskiarvoista ja keskihajonnoista määritettiin porakonekairausten virhejakaumat eri kohteille. Tulokset on koottu taulukkoon 7. Virheistä laadittiin myös histogrammit, joista yksi esimerkki (Koloko -kohteen tulokset) on esitetty kuvassa 15. Muiden kohteiden histogrammit on koottu liitteeseen 3. Analyysissä virheet laskettiin vähentämällä arvioitun kallionpinnan tasosta mitatun kallionpinnan taso. Näin ollen negatiivinen arvo tuloksissa tarkoittaa, että mitattu kallionpinta on lasketussa kohdassa arvioitua kallionpintaa ylempänä.

Kohde	Aineiston koko	Kaikki aineisto		Yli 2 m poikkeava aineisto poistettu	
		Keskiarvo [m]	Keskihajonta [m]	Keskiarvo [m]	Keskihajonta [m]
Vt7 Koskenkylä-Kotka (KoLoKo)	1046	-0,230	0,899	-0,152	0,566
Vt8 Sepänkylän ohikulkutie	102	-0,465	0,999	-0,241	0,561
Kehä 3:n parantaminen välillä Vt4 – Vt7	56	0,048	0,296	0,048	0,296
Länsimetro, Urheilupuiston kaivanto	32	0,420	1,360	-0,099	0,854



Tuloksista havaitaan, että porakonekairausten virhejakaumat vaihtelevat huomattavasti eri kohteiden välillä. Aineistomäärältään suurimmassa kohteessa, Kolokossa, porakonekairausten ja mitatun kallionpinnan välisten poikkeamien keskiarvo on -0,230 metriä. Tämä tarkoittaa, että kohteen porakonekairauksilla mitatut kallionpintahavainnot ovat keskimäärin noin 0,230 metriä syvemmällä kuin mitattu kallionpinta. Vastaava keskihajonnan arvo 0,899 metriä puolestaan tarkoittaa, että virheiden vaihtelu on huomattavaa. Histogrammista voidaankin todeta, että kohteen porakonekairauksissa on suuria yksittäisiä virheitä molempiin suuntiin.

Kohdetta Kehä 3 varten tehdyt porakonekairaukset ovat tulosten perusteella onnistuneet parhaiten. Kohteessa keskimääräinen virhe on melko lähellä nollaa (0,048 m) ja keskihajonta on suhteellisen pientä (0,296 m). Virhejakaumien kannalta heikoimmat aineistot ovat Vt 8 sekä Urheilupuiston kaivanto, joissa porakonekairaukset poikkeavat mitatusta kallionpinnasta keskimäärin yli 0,4 metriä (eri suuntiin tosin). Lisäksi näille kohteille laskettiin suurimmat arvot virheiden keskihajonnalle. Mahdollisia syitä eri kohteiden huomattavan erilaisille virhejakaumille on käsitelty luvussa 5.1.

Taulukossa 7 sekä liitteen 3 histogrammeissa on tulokset sekä kaikella aineistolla tehdyistä analyyseistä että analyyseistä, joissa aineistosta on jätetty huomiotta merkittävästi virheelliset porakonekairaukset. Jälkimmäisessä analyysissä poistettiin sellaiset kairaukset, joiden kohdalla arvioitu kallionpinta poikkesi mitatusta kallionpinnasta yli kaksi metriä. Kohteissa Vt 8 ja Urheilupuiston kaivanto on aineistojen kokoon nähden paljon merkittävästi virheellisiä kairauksia, minkä seurauksena toimenpiteellä on suurin vaikutus juuri näiden kohteiden virhejakaumiin. Sen sijaan kohteessa Kehä 3 ei ollut tällaisia kairauksia lainkaan, joten toimenpide ei vaikuttanut sen virhejakaumaan mitenkään. Käytännön tilanteessa mitattua kallionpinta-aineistoa ei kuitenkaan ole saatavilla, jolloin virheellisten kairaustulkintojen tunnistaminen on vaikeaa. Tästä syystä analyysin toisen vaiheen lähtötietoina käytettiin kaikesta aineistosta laskettuja virhejakaumia.

Liitteen 3 histogrammeista on aineistojen pienien kokojen vuoksi mahdotonta tehdä luotettavia päätelmiä virhejakaumien normaaliudesta. Poikkeuksena tähän on kohteen Koloko histogrammi, jonka laaja aineisto mahdollistaa jakauman silmämääräisen arvioinnin ja voidaankin todeta, että jakauma muistuttaa varsin selvästi normaali-jakaumaa. Analyysin toisen vaiheen kannalta on kuitenkin välttämätöntä olettaa, että myös muiden aineistojen virhejakaumat ovat normaalisti jakautuneita. Tässä oletuksessa tukeudutaan Honjon (2012 s. 12) esittämään perinteisen virhetarkastelun perusoletukseen, jonka mukaan mittausvirheitä voidaan pitää normaalisti jakautuneina.

Lisätarkasteluna kohteen Koloko porakonekairausaineisto jaettiin neljään osaan kairausvyöyksien perusteella, jonka jälkeen kullekin osalle tehtiin analyysin ensimmäisen vaiheen mukainen tarkastelu erikseen. Tarkastelun tulokset on esitetty taulukossa 8.

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

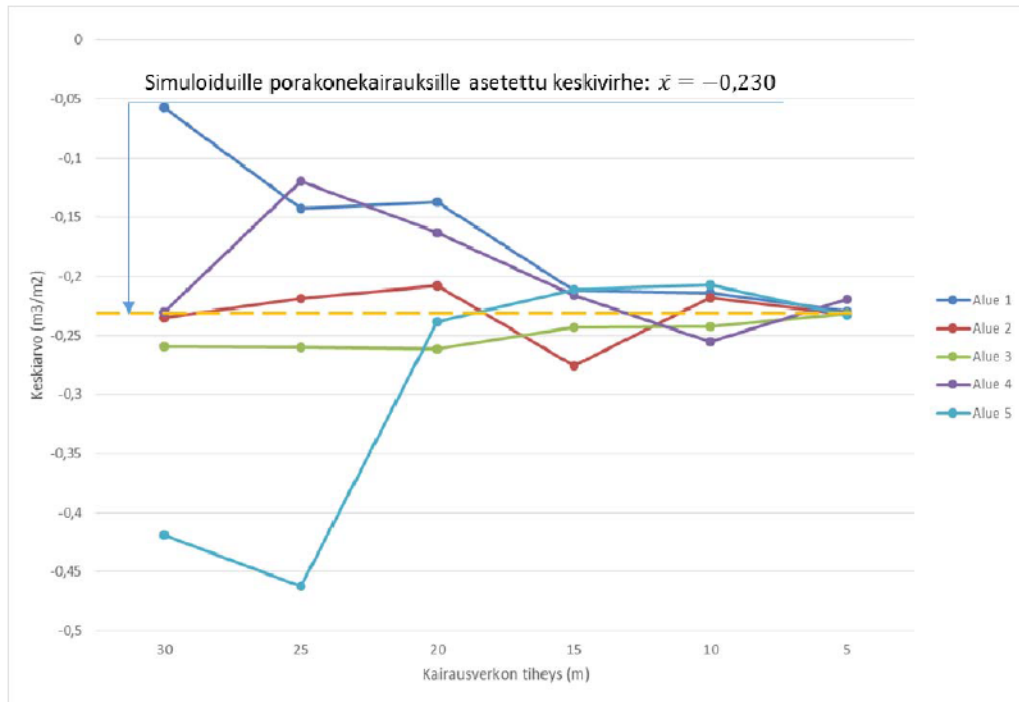
Taulukon 8 tuloksista havaitaan odotetusti, että lyhemmillä kairaussyvyyksillä porakonekairausten kallionpintatulokset ovat selvästi luotettavampia kuin syvälle ulottuvien kairausten tulokset. Kun kairaussyvyys on alle kaksi metriä, porakonekairausten kallionpintatulokset osuvat keskimäärin samalle tasolle kuin mitattu kallionpinta. Yli kuuden metrin syvyisissä kairauksissa sitä vastoin mitattu kallionpinta on keskimäärin noin 1,4 metriä ylempänä kuin porakonekairauksista arvioitu taso. Poikkeamien keskihajontakin kasvaa alle kahden metrin syvyisten kairauksien arvosta 0,643 metriä yli kuuden metrin syvyisten kairausten 1,663 metriin. Myös tämän tarkastelun histogrammit on koottu liitteeseen 3.

4.2 Analyysin toinen vaihe

Analyysin toisessa vaiheessa kohteista rajattiin yhteensä viisi erilaista kallionpintaa, joiden kohdalle simuloitiin porakonekairauserkkoja useita kertoja Monte Carlo-periaatteen mukaisesti. Kairauksista määritetyille kallionpintahavainnoille annettiin syvyysuunnassa satunnaisuutta analyysin ensimmäisessä vaiheessa määritettyjen virhejakaumien mukaisesti. Simuloituista kairauksista määritettyjä arvioidun kallionpinnan kolmioverkkoja verrattiin mitatun kallionpinnan kolmioverkkoihin. Pintoja verrattaessa virhefunktioina käytettiin suhteellisia tilavuuseroja sekä suurimpia poikkeamia. Tavoitteena oli mitata arvioidun kallionpintamallin luotettavuutta sekä arvioida kairauserkkojen tiheyden, porakonekairausten virhejakaumien sekä kallionpinnan muotojen vaikutuksia tuloksiin.

Tilavuuserot:

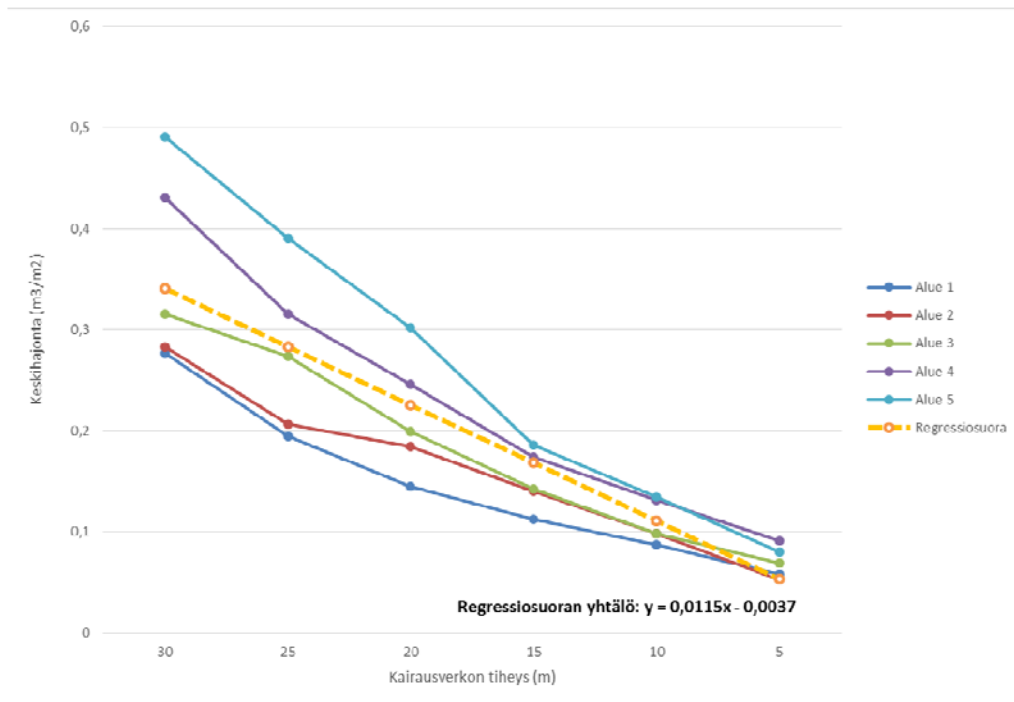
Massalaskennan kannalta kiinnostava virhefunktio määritettiin laskemalla simuloituista kairauspisteistä arvioidun kallionpintamallien sekä mitatun kallionpintamallin välinen tilavuus. Tilavuusero suhteutettiin pintamallin kokoon jakamalla tulos mallin pinta-alalla, jolloin tilavuuseron yksiköksi muodostui kuutiometri jaettu neliömetrillä (m^3/m^2). Simuloinnit tehtiin kussakin laskelmassa 500 kertaa, ja tulosten keskiarvot ja keskihajonnat määritettiin. Kohteen Koloko virhejakaumilla lasketut tilavuuserojen keskiarvot kairaustiheyden suhteen on esitetty kuvassa 16. Muiden kohteiden virhejakaumilla lasketut kuvaajat on koottu liitteeseen 4.



Tuloksista havaitaan, että käiräusverkon tihentyessä tilavuuserojen keskiarvot lähestyvät odotetusti simuloitaville porakonekäiräuksille asetettua keskimääräistä virhettä (kuvassa oranssi vaakaviiva). Lisäksi havaitaan, että alueilla, joiden mitatut kallionpinnat arvioitiin vaihteleviksi ja pieni-irteisiksi (ennen kaikkea alueet 1 ja 5), käiräusverkon tihentämisellä on suurempi vaikutus keskiarvoihin. Tulos on järkevä, koska tasaisemmille kallionpinnoille riittää suurempi käiräuspisteiden välimatka.

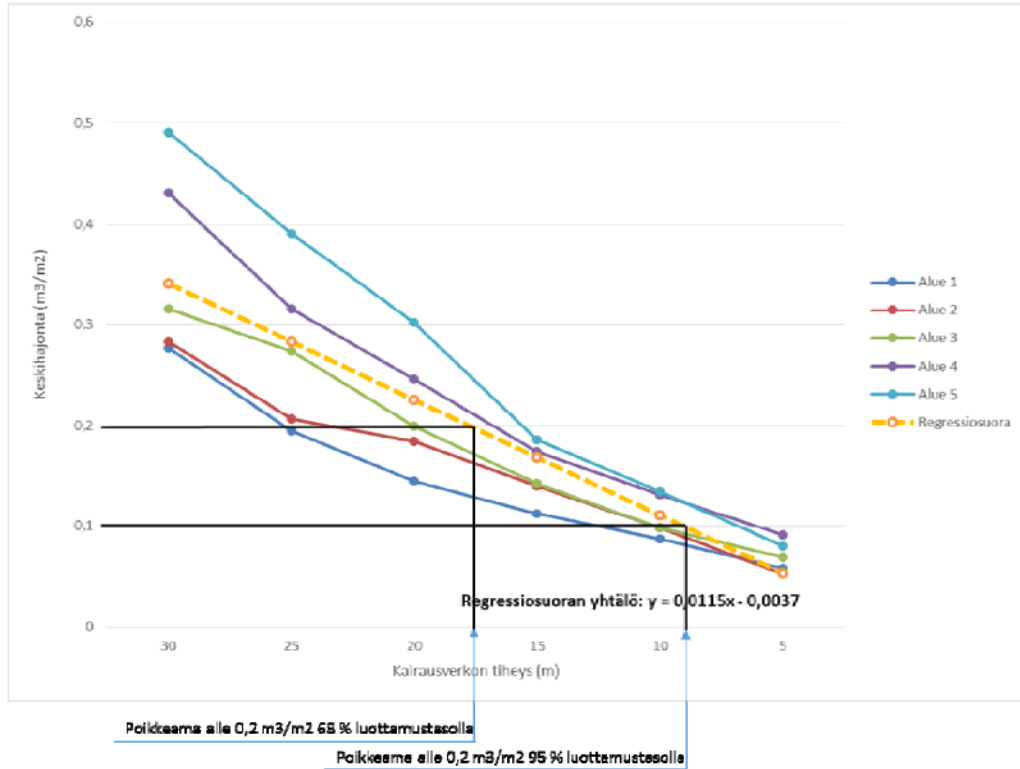
Eri virhejakaumilla laskettuja tuloksia vertailtaessa havaitaan myös, että vaikka tilavuuserotuksien keskiarvot vaihtelevat paljonkin, eri alueiden kuvaajat ovat muodoltaan varsin samanlaisia eri virhejakaumilla. Tästä voidaan päätellä, että tilavuuserotuksien keskiarvot ovat hyvin aluekohtaisia, ja varsinkin isommilla käiräustiheyksillä tulosten hajonta eri alueiden välillä on suurta. Kuitenkin noin 15 metrin käiräustiheyden kohdalla keskiarvot näyttävät tasaantuvan tarkastelluilla alueilla.

Tilavuuseroista laskettiin myös keskihajonnat, eli kuinka paljon yksittäisen simuloinnin tulos poikkeaa keskimäärin 500 simulointikerran keskiarvosta. Tämä on keskiarvoja kiinnostavampi arvo, koska yksittäinen simulointikerta edustaa keskiarvoja paremmin todellista tilannetta. Kuvassa 17 on esitetty kohteen Koloko virhejakaumalla lasketut keskihajonnat käiräusverkon tiheyden suhteen.



Kuten odotettua, tilavuuserojen keskihajontojen kuvaajat pienenevät kaikilla alueilla jotakuinkin lineaarisesti. Koska analyysin ensimmäisessä vaiheessa virhejakauma oletettiin normaalijakaumaksi, voidaan tilavuuserojen tulosjakaumienkin arvioida olevan likimain normaalisti jakautuneita. Normaalijakauman ominaisuuksien mukaan 95 prosentin luottamusväli on $\pm 1,96$ (noin ± 2) keskihajonnan päässä jakauman keskiarvosta, ja 68 prosentin luottamusväli $\pm 0,99$ (noin ± 1) keskihajonnan päässä. Tämän tarkoittaa, että kuvan 17 keskihajontojen kuvaajista on mahdollista arvioida kairaustiheys, jolla yksittäisen simulointikerran tilavuuserotus ei poikkea usean toiston keskiarvosta yli määrätyn arvon tietyllä todennäköisyydellä. Tällainen tarkastelu hahutettiin pystyä tekemään kallionpinnan vaihteluiltaan keskimääräiselle alueelle, minkä takia keskihajonnoille määritettiin keskimääräistä aluetta mahdollisimman hyvin kuvaava regressiosuora. Regressiosuora on esitetty kuvassa 17 oranssina katkoviivana.

Esimerkki tarkastelusta on esitetty kuvassa 18. Tavoitteena on etsiä sellainen kairaustiheys, jolla yhdestä simulointikerrasta laskettu suhteellinen tilavuusero poikkeaa useamman toiston keskiarvosta enintään $0,2 \text{ m}^3/\text{m}^2$ 95 prosentin todennäköisyydellä. Tällöin kairaustiheys voidaan lukea kohdasta, jossa regressiosuora leikkaa keskihajonnan arvon $0,1 (=0,2/2) \text{ m}^3/\text{m}^2$. Jos luottamustasoksi riittää 68 prosenttia, voidaan kairaustiheys lukea regressiosuoran ja keskihajonnan arvon $0,2 \text{ m}^3/\text{m}^2$ leikkauskohdasta. Näin ollen jotta kuvan esimerkkitapauksessa keskimääräiselle alueelle tehdyn simuloinnin tilavuusero olisi alle $0,2 \text{ m}^3/\text{m}^2$ keskiarvosta 95 prosentin todennäköisyydellä, on kairaustiheydeksi valittava noin 9 metriä (eli $9 \text{ m} \times 9 \text{ m}$). Sen sijaan 68 prosentin luottamustasolla kairauserkon tiheydeksi riittää noin 17 metriä. Esimerkissä käytettiin kohteen Koloko virhejakaumien pohjalta tehtyjä simulointeja, liitteessä 4 on vastaavat tarkastelut myös muiden kohteiden virhejakaumille. Lisäksi taulukossa 9 on tarkasteluiden tulokset kootusti.



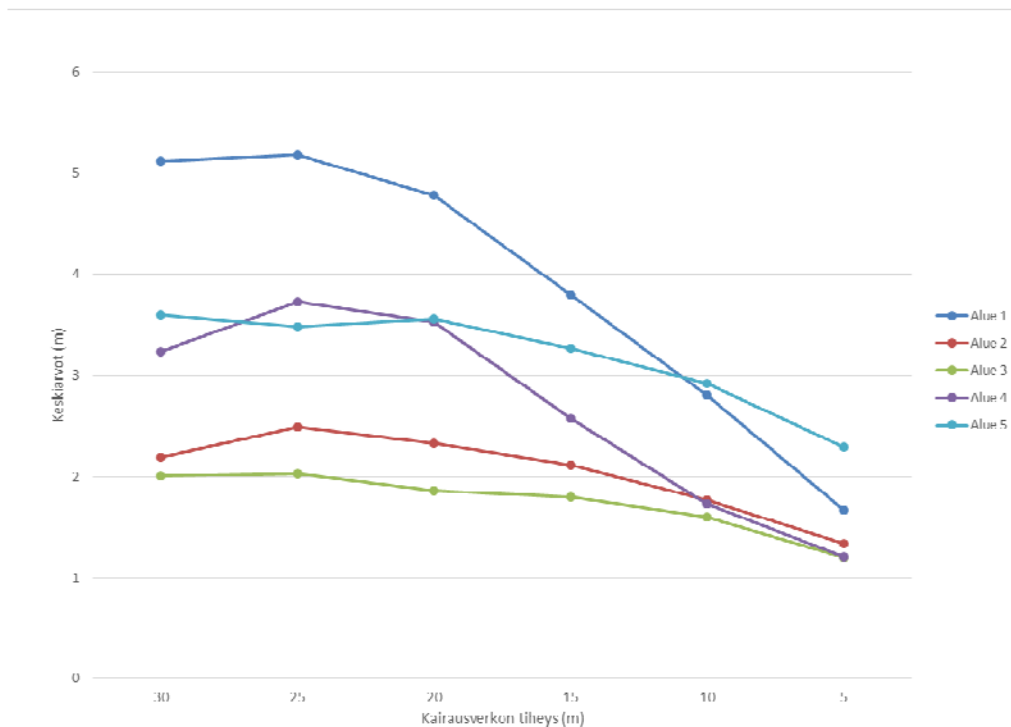
Käiräustiheys, jolla yksittäisen simulaation tilavuuserojen poikkeama 500 toiston keskiarvosta alle 0,2 m³/m² eri luottamustasoilla ja virhejakaumilla [m]		
Kohde, jonka virhejakaumaa käytetty	Luottamustaso	
	95 %	68 %
Vt7 Koskenkylä-Kotka (Koloko)	9	17
Vt8 Sepänkylän ohikulkutie	8	16
Kehä 3:n parantaminen välillä Vt4-Vt7	15	27
Länsimetro, Urheilupuiston kaivanto	6	13

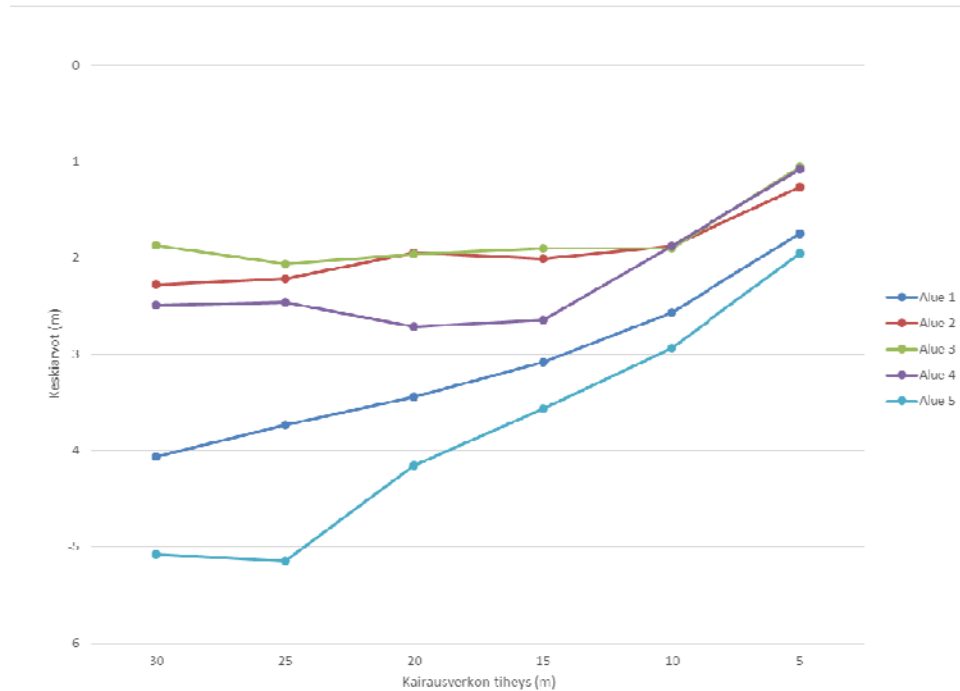
Taulukon 9 tuloksista havaitaan, että erilaisilla virhejakaumilla on huomattava merkitys tilavuuserotuksien keskihajontoihin, ja sitä kautta myös edellä esitetyn tarkastelun tuloksiin. Jotta yksittäisen simulaation tilavuuserotus poikkeaa keskiarvosta enintään $0,2 \text{ m}^3/\text{m}^2$ 95 prosentin luottamustasolla kohteen Kehä 3 virhejakaumalla lasketuna, tulee kairaustiheyden olla noin 15 metriä. Mikäli luottamustaso on 68 prosenttia, kairaustiheydeksi riittää noin 27 metriä. Vastaavat kairaustiheydet kohteen Urheilupuiston kaivanto virhejakaumalla ovat noin 6 metriä 95 prosentin luottamustasolla, ja noin 13 metriä 68 prosentin luottamustasolla.

Poikkeamatarkastelu alueittain:

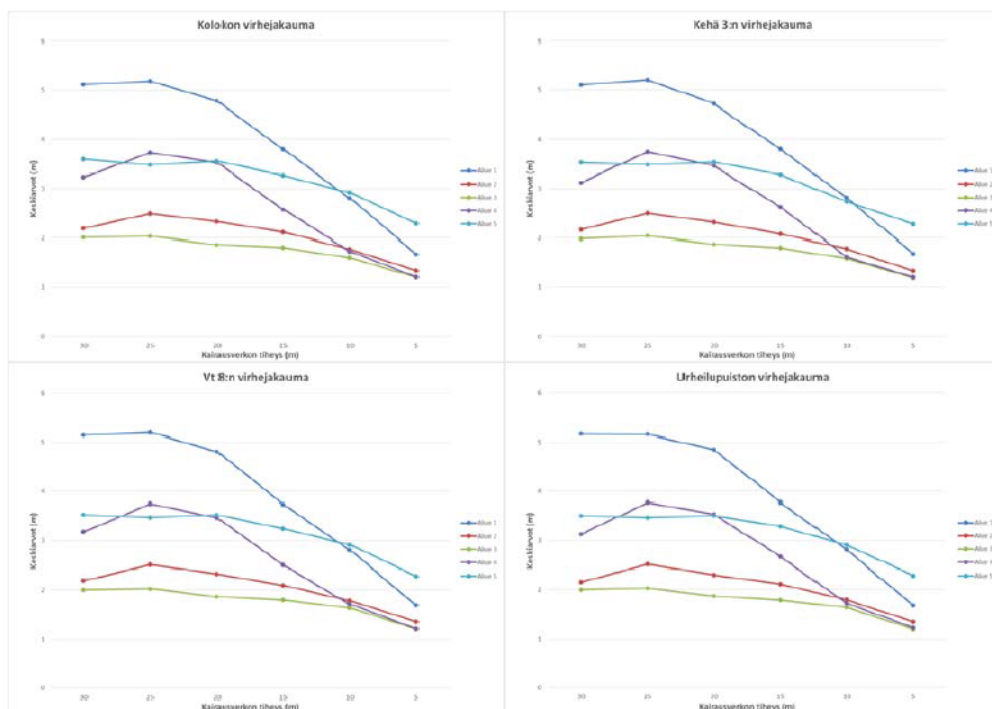
Toinen tarkasteltu virhefunktio oli . Tämä tehtiin määrittämällä jokaisen arvioidun kallionpintaverkon sisällä olevan mittauspisteen z-suuntainen etäisyys arvioidun kallionpinnan tasoon, ja poimimalla niistä suurin positiivinen ja suurin negatiivinen arvo. Kuten tilavuuseroissa, myös poikkeamat laskettiin vähentämällä simuloituista kallionpinnan tasoista mitatut tasot. Tällöin suurimmalla negatiivisella poikkeamalla tarkoitetaan kohtaa, jossa mitatun kallionpinnan taso on mahdollisimman paljon simuloitua pintaa ylempänä. Vastaavasti positiiviset poikkeamat tarkoittavat, että simuloitu pinta on ylempänä. Poikkeamatarkasteluissa positiiviset poikkeamat ovat oleellisempia, koska yllättävän syvällä sijaitsevalla kallionpinnalla on tyypillisesti suurempi taloudellinen ja tekninen haittavaikutus kuin sillä, että kallionpinta olisi odottamattoman ylhäällä.

Poikkeamien ääriarvojen tulosmatriisien sarakkeista voitiin laskea eri alueiden tulosten keskiarvot ja keskihajonnat. Kohteen Koloko virhejakaumalla lasketujen alueittaisten poikkeamien ääriarvojen keskiarvot kairaustiheyden suhteen on esitetty kuvissa 19 ja 20. Muilla virhejakaumilla lasketut tulokset on esitetty kuvassa 21.





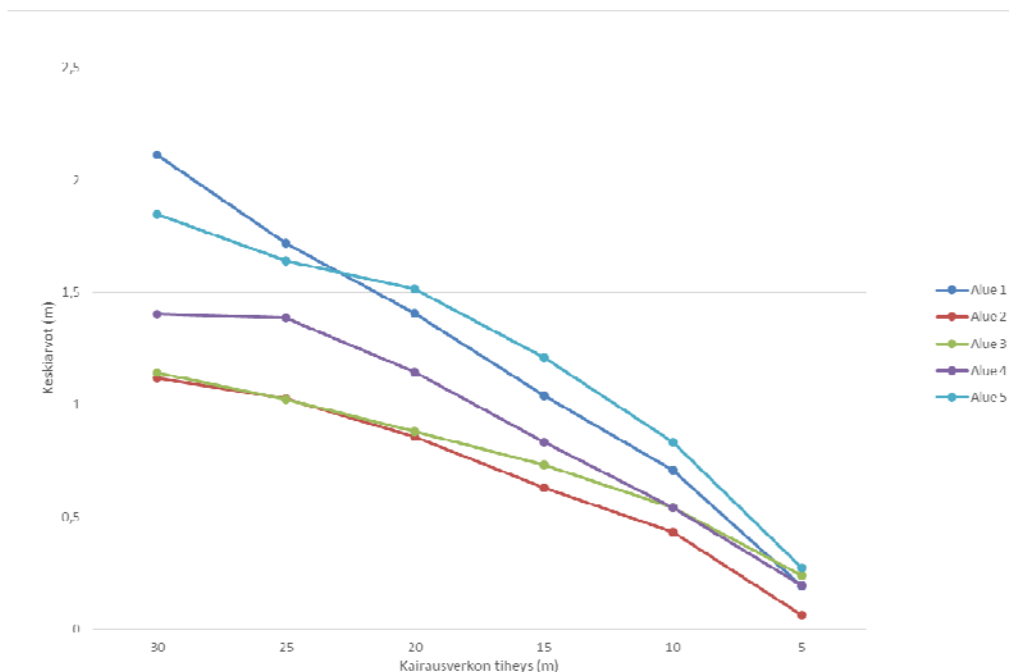
Kuvien 19 ja 20 perusteella voidaan todeta, että suurimpien poikkeamien itseisarvot pienenevät odotetusti kairausverkon tihteydessä (joitakin poikkeuksia lukuun ottamatta). Samoin kuin tilavuuseroissa, myös poikkeamissa kairausverkon tihtentämisellä on suurempi merkitys alueilla, joiden kallionpinnoissa on paljon vaihtelua ja pieni-piirteisyyttä.



Kun vertaillaan kuvassa 21 esitettyjä eri kohteiden virhejakaumilla laskettujen suurimpien alueittaisten poikkeamien kuvaajia, havaitaan että ne ovat lähestulkoon identtisiä keskenään. Erilaiset virhejakaumat eivät siis vaikuta kokonaiselle alueelle tehtävään poikkeamatarkastelun tuloksiin juuri mitenkään. Tästä voidaan päätellä, etteivät alueiden suurimmat poikkeamat ole merkittävästi riippuvaisia porakonekairausten onnistumisesta, vaan käytännössä merkitystä on ainoastaan kallionpinnan muodoilla sekä kairaustiheydellä.

Poikkeamatarkastelu kolmiokohtaisesti:

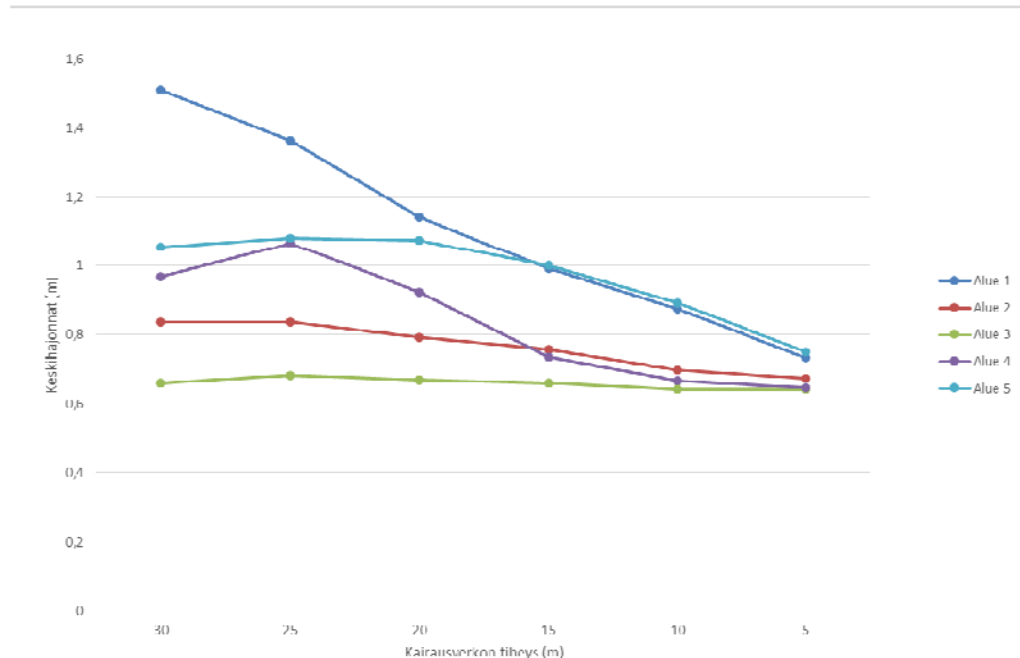
Kokonaisille alueille tehdyistä suurimpien poikkeamien tuloksista ei kuitenkaan pysytäkään edellä mainittujen, melko geneeristen päätelmien lisäksi sanomaan juuri mitään muuta. Tarkastelut eivät myöskään ottaneet mitenkään huomioon alueille muodostettujen kallionpintamallien kokoja, joilla on myös jonkin verran vaikutusta tuloksiin. Näistä syistä poikkeamatarkastelut tehtiin uudestaan siten, että tarkasteluissa etsittiin suurimmat poikkeamat arvioidun kallionpintamallin kolmioverkon jokaiselle kolmiolle erikseen. Tällöin saadaan selville, kuinka suurina poikkeamien ääriarvot ovat keskimäärin yhden kolmion sisällä. Pintamallien koolla ei myöskään tällaisessa tarkastelussa ole merkitystä, sillä tarkasteltavat yksittäiset kolmiot ovat samalla kairaustiheydellä samankokoisia eri alueilla. Uusi tarkastelu tehtiin vain yhdellä, kohteen Koloko virhejakaumalla. Kuvassa 22 on esitetty kuvaaja suurimpien positiivisten poikkeamien keskimääräisten arvojen keskiarvo (keskiarvojen keskiarvo) 500 toistosta. Tässäkin tapauksessa tulokset on laskettu kairausterkon tiheyden suhteen.



Kuvasta 22 havaitaan, että suurimmat keskimääräiset poikkeamat pienenevät melko lineaarisesti kairausterkon tihtyessä. Harvimmalla lasketulla, 30 metrin kairaustiheydellä pintamallin satunnaisen kolmion alueella oleva suurin keskimääräinen poikkeama vaihtelee noin yhden ja kahden metrin välillä, alueesta riippuen. Viiden metrin kairaustiheydellä vastaava arvo on kaikilla alueilla jo selvästi alle puoli metriä. Näiden tulosten perusteella voidaan arvioida, että mikäli jollain alueella kallionpintamallin

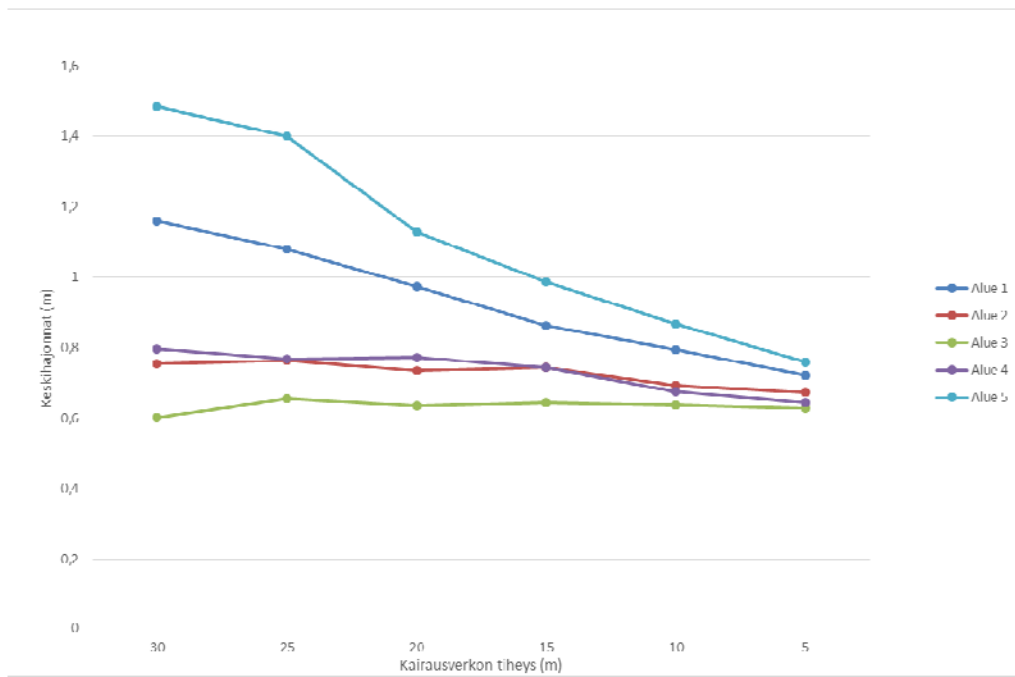
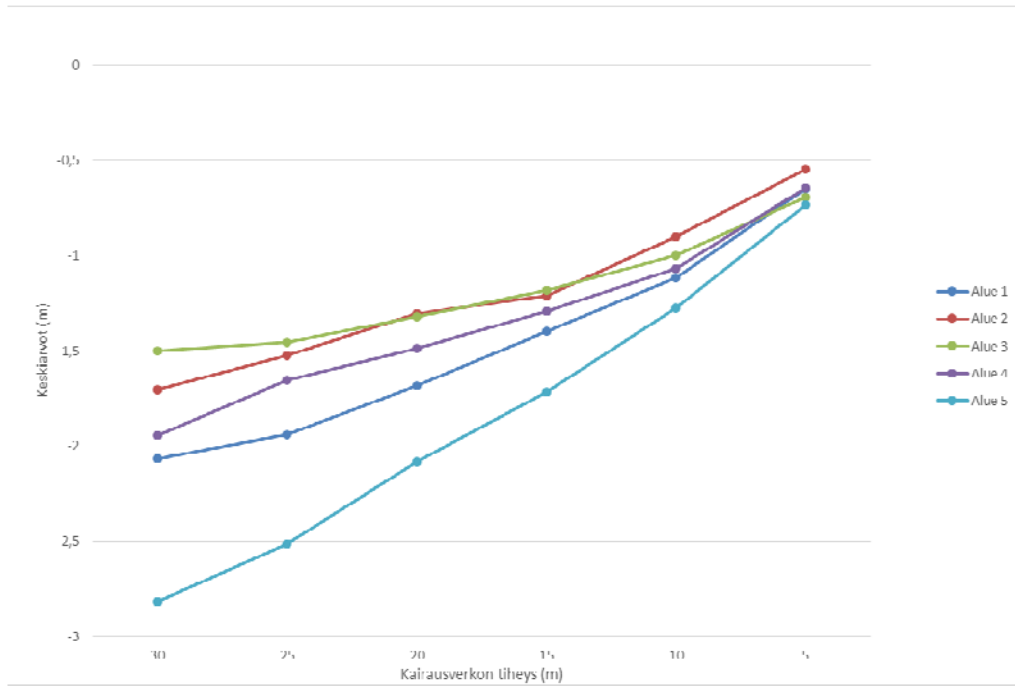
sijainnissa ei saa olla huomattavia virheitä, ei porakonekairauksien välinen etäisyys saisi olla yli 5 metriä.

Kolmioiden suurimpien poikkeamien keskiarvoista laskettiin myös 500 simulointiker-
ran keskihajonnat. Niiden tulokset kairaustiheyden suhteen on esitetty kuvassa 23.



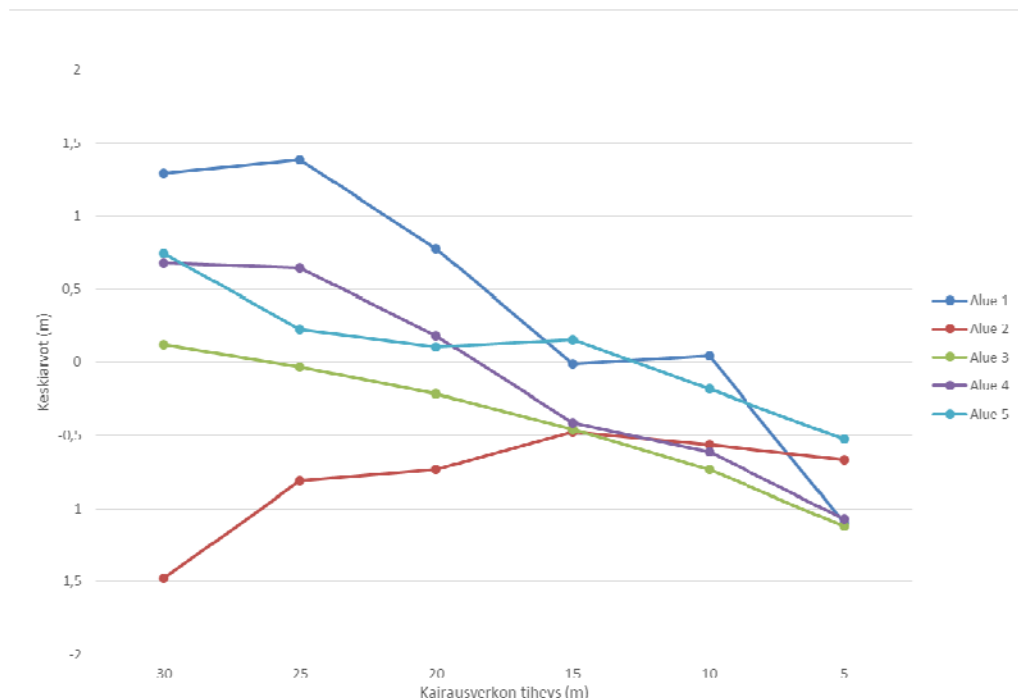
Kuvan 23 perusteella voidaan todeta, että vaikka kairaustiheyttä kasvatetaan 5 metriin asti, kolmioiden suurimpien poikkeamien keskiarvojen keskihajonta pysyy melko suurena (0,6–0,8 metriä) keskiarvoon (alle 0,5 metriä) nähden. Variaatiokerroin on täten suuri, jolloin yksittäisen poikkeamatarkastelun keskimääräinen poikkeama 500 toiston keskiarvoista on huomattava. Vastaava tarkastelu tehtiin kokeiluluontoisesti myös pienemmällä, kohteen Kehä 3 virhejakaumalla. Tällöin suurimpien poikkeamien keskiarvojen keskiarvot pysyivät likimain muuttumattomina, mutta keskihajontoja saatiin jonkin verran pienennettyä: 5 metrin kairaustiheydellä keskihajonnat olivat 0,3–0,6 metrin välillä.

Vastaavat tulokset on laskettu myös suurimpien negatiivisten poikkeamien keskiarvojen keskiarvoille ja -hajonnoille, ja ne on esitetty kuvissa 24 ja 25. Tulokset ovat hyvin samankaltaisia, merkittävin ero on keskiarvojen itseisarvoltaan hieman suuremmat arvot. Kuten kuvassa 23, myös suurimpien negatiivisten poikkeamien keskiarvojen keskihajonnat ovat keskiarvoihin nähden huomattavan suuria, 0,6–0,8 metriä 5 metrin kairaustiheydellä. Tulosten suuret variaatiokertoimet vaikuttavat tuloksista tehtävien päätelmien johdonmukaisuuteen.

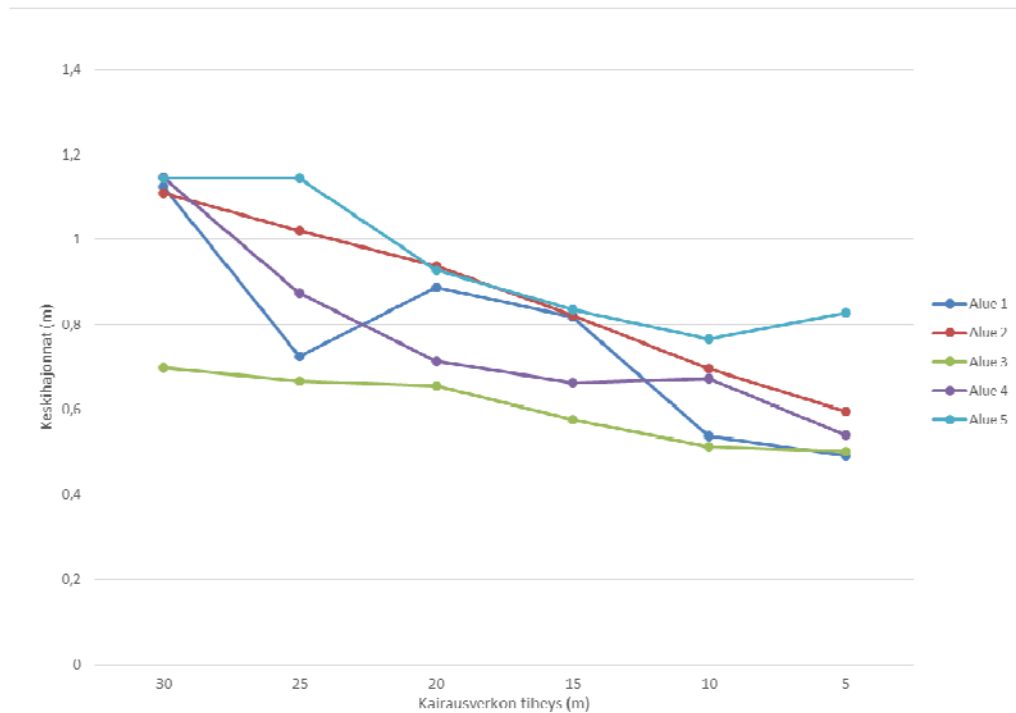


Pintamallien syvimpien kohtien erotus:

Samaan tarkasteluun sisällytettiin myös sekä mitatun että arvioidun kallionpintamallin syvimpien kohtien, eli pintojen absoluuttisten minimien määrittäminen ja niiden vertailu. Tällä tarkastelulla pyrittiin arvioimaan, kuinka todennäköisesti alueella olevan todellisen kallionpinnan syvin kohta on arvioituun kallionpintamalliin nähden yllättävän syvällä. Tarkastelu on kiinnostava esimerkiksi tilanteessa, jossa tutkitaan maan pinnalta käsin, onko kallioon rakennetun tilan päällä oleva kalliopeite riittävän paksu. Tämä tarkastelu tehtiin vain kohteen Koloko virhejakaumalla. Absoluuttisten minimien erotuksista laskettiin keskiarvot ja keskihajonnat kairausverkon tiheyden suhteen ja ne on esitetty kuvissa 26 ja 27. Myös tässä tarkastelussa arvioidun pinnan minimistä vähennettiin todellisen pinnan minimi. Näin ollen negatiivinen arvo erotuksissa tarkoittaa, että arvioidun kallionpinnan syvin kohta on syvemmällä kuin todellisen kallionpinnan syvin kohta.



Kuvan 26 tuloksista havaitaan, että kairausverkon tihentyessä pintamallien syvimpien kohtien erotuksien keskiarvot pienenevät jotakuinkin tasaisesti. Poikkeuksena tähän on alue 2, missä 500 tarkastelukerran keskiarvo näyttäisi olevan pienimmillään suurilla kairausverkon tiheyksillä. Kaikilla alueilla erotuksien keskiarvot näyttäisivät päättyvän 5 metrin kairaustiheydellä noin -0,5...-1,0 metriin. Mitä pienempi erotuksien keskiarvo on, sitä todennäköisemmin arvioidun kallionpinnan syvin kohta on syvemmällä kuin mitatun kallionpinnan syvin kohta kyseisen alueen sisällä. Tulosten perusteella vasta 5 metrin kairaustiheydellä voidaan pitää todennäköisenä, ettei mitattu kallionpinta ulotu millään alueella yllättävän syvälle. Mikäli kallionpinta voidaan olettaa melko tasaiseksi, huomattavasti harvempi 15 metrin kairaustiheyskin on todennäköisesti riittävä.



Kuvan 27 perusteella kallionpintamallien syvimpien kohtien erotuksien keskihajonnat näyttäisivät yleisesti ottaen laskevan loivasti kairauserkon tihentyessä. Keskihajonnan arvo jää kuitenkin pienimmilläänkin melko suureksi (yli 0,5 metriä). Tämä tarkoittaa, että yksittäisessä simulaatiossa syvimpien kohtien erotus voi satunnaisesti saada positiivisen arvon tiheilläkin kairauserkoilla. Tällaisissa tapauksissa mitatun kallionpinnan syvin kohta on siis arvioituun pintaan nähden yllättävän syvällä.

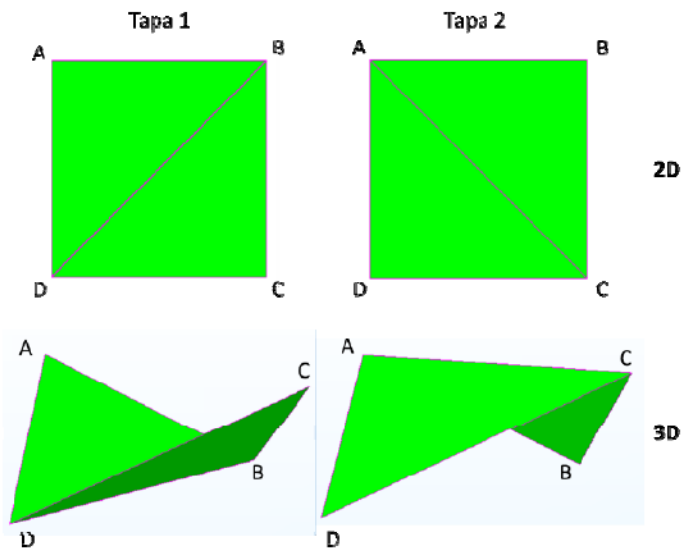
5 Pohdintaa

5.1 Porakonekairausten virheellisyys

Geoteknisessä suunnittelussa on tyypillistä, että porakonekairauksella määritettyä kallionpintaa pidetään luotettavana todellisen kallionpinnan kuvaintona. Tässä työssä tehtyjen kallionpintamallien silmämääräisten tarkasteluiden, sekä tilastollisen analyysin ensimmäisen vaiheen tuloksien perusteella on kuitenkin selvää, että porakonekairauksista määritetyissä kallionpinnan tulkinnoissakin on usein virheitä. Virheet saattavat olla huomattaviakin (yli metrin), jolloin niiden avulla määritetyn kallionpintamallin hyödyntäminen suunnittelussa saattaa johtaa yllättäviin kustannuksiin tai jopa suunnitelmaratkaisujen muuttumiseen. Tässä luvussa on esitetty mahdollisia syitä sille, miksi työssä hyödynnetyt porakonekairaukset eivät monin paikoin täsmänneet mitatun kallionpintamallin kanssa.

Ensinnäkin, vaikka työn analyysien kannalta oli välttämätöntä olettaa mitatut kallionpinnat kallionpintojen todellisiksi sijainneiksi, oli niissäkin todennäköisesti jonkin verran virheitä. Virheitä on saattanut muodostua kallionpinnan mittaajan huolimattomuudesta, koordinaattivirheistä, tiedonsiirron aikana tapahtuvista virheistä ynnä muista vastaavista, laitteiden tai inhimillisten tekijöiden aiheuttamista virheistä.

Mitattuun kallionpintaan on saattanut muodostua virheellisyyttä myös pinnan kolmioinnissa. Kolmioinnissa mittauspisteistä sekä maastoviivojen (taiteviivojen) päätepisteistä muodostetaan joukko vierekkäisiä kolmioita, joiden korkeusasemat määräytyvät kolmioiden kärkipisteiden korkeusasemien mukaan. Tekla käyttää kolmioinnissa niin kutsuttua Delaunay-kolmiointiperiaatetta, jossa kolmioiden kulmista pyritään saada mahdollisimman suuria (Tekla 2015). Taiteviivat määrittävät kuitenkin aina kolmion sivun (kolmioviivan), eivätkä kolmiot voi leikata taiteviivoja. Yksittäisten pisteiden kolmioinnissa erilaisilla kolmiointitavoilla muodostetut pinnat saattavat kuitenkin olla hyvinkin erilaisia. Esimerkiksi kuvan 28 kaltaisessa tapauksessa, missä neljä pistettä (A, B, C ja D) muodostavat neliön xy-tasossa, neliön keskikohdan korkeusasema on täysin riippuvainen kolmioiden muodostamistavasta. Koska suuri osa työssä hyödynnetyistä mittausaineistoista koostui juurikin tällaisista irtopisteistä, on pinnan korkeustasoihin saattanut helposti muodostua vääränlaisesta kolmioinnista aiheutuvia virheitä. Tästä syystä lineaarisen kolmioinnin sijasta pintojen luonnissa voisi olla tarkoituksenmukaista hyödyntää esimerkiksi Kriging-menetelmää, jossa funktion arvoja (pinnan tasoja) lasketaan tunnetuista arvoista interpoloimalla. Kriging-menetelmää käytetään paljon muun muassa malminetsinnässä. (Jeong et al. 2005.)



Kallionpinnan ollessa hyvin rikkonaista on mahdollista, ettei edes paljastetusta kalliopinnasta pystytä määrittämään korkeustasoja yksikäsitteisesti. Tämä johtuu siitä, että termi **rikko** on käsitteenä varsin väljä, ja sitä saatetaan käyttää eri tilanteissa kuvaamaan eri rajapintoja. Sillä voidaan tarkoittaa rikkonaisen kallion yläpintaa, tai vaihtoehtoisesti sellaista kiinteää kalliopintaa, minkä päältä rapautunut kallio on poistettu johtuen esimerkiksi pohjarakenteen edellyttämästä rakennuspohjan laatuvaatimuksista. Tästä syystä pohjarakentamisessa on tarkoituksenmukaista käyttää yleisen termin **rikko** ohella termiä **rikko** eri pintojen kuvaamiseen. Pelkistä porakonekairausdiagrammeista näiden pintojen erottaminen on kuitenkin hyvin vaikeaa. Kallionpinnan erilaiset tulkintamahdollisuudet voivatkin olla yksi lisätekijä, mikä tuo epävarmuutta kallionpinnan määrittämiseen.

Porakonekairauksista määritetyissä kallionpintahavainnoissa puolestaan mahdollisia virhelähteitä ovat kairaajan virhetulkinnat, tiedonsiirto- ja koordinaattivirheet, sopimaton (liian kevyt) kairauskalusto, kallionpinnan rapautuneisuus sekä kallion päällä olevien maakerrosten laatu ja paksuus. Työn tilastollisen analyysin ensimmäisen vaiheen tuloksista nähtiin, että eri kohteilla porakonekairausten virhejakaumat olivat hyvin erilaisia. Virheiden todellisia syitä ei voida tietää varmasti, mutta kohteista tiedettyjen asioiden perusteella on mahdollista esittää kohdekohtaisia arvioita erilaisten virhejakaumien syiksi.

Kohteessa Kehä 3 porakonekairaukset onnistuivat selvästi parhaiten. Kyseessä on työn kirjoitushetkellä rakenteilla oleva kohde, missä suurin osa kairausaineistosta oli 2010-luvulta. Kairausten tuoreus on saattanut jossain määrin vaikuttaa niiden onnistumiseen. Todennäköisesti suurempi vaikutus on kuitenkin kohteen geologisilla olosuhteilla mitatun kallionpinnan alueella. Kallionpinta on mitatulla alueella pääosin melko tasaista, minkä lisäksi se on monin paikoin huomattavan lähellä maanpintaa. Taulukossa 10 on esitetty eri kohteille lasketut porakonekairausten kallionpintatulkintojen keskimääräiset syvyudet sekä syvyyksien vaihteluvälit. Taulukosta havaitaan, että kohteessa Kehä 3 kallionpintatulkintojen keskisyvyys on selvästi pienin, vain 1,23 metriä. Kuten analyysin ensimmäisen vaiheessa tehdystä syvyyskohtaisesta lisätarkastelusta voitiin todeta, kallionpinnan syvyydellä on huomattava vaikutus porakonekairauksen luotettavuuteen.

Kohde	Kallionpintatulkintojen syvyyksien keskiarvo [m]	Kallionpintatulkintojen syvyyksien vaihteluväli [m]
Koloko	2,27	0–11,5
Vt8	2,16	0–7,2
Kehä 3	1,23	0–3,8
Urheilupuiston kaivanto	8,78	4,8–14,3

Kohteessa Vt8 porakonekairauksista määritetyt kallionpintahavainnot sen sijaan olivat analyysin ensimmäisen vaiheen tulosten perusteella keskimäärin lähes puoli metriä syvemmällä kuin mitattu kallionpinta. Analyysissä käytettyjen porakonekairausten määrä oli melko suuri (102 kpl), joten kairausten huonoa onnistumista ei voida perustella satunnaisella vaihtelulla. Suurimmat syyt tuloksille ovat todennäköisesti alueen geologisissa olosuhteissa. Ensinnäkin, mitatuissa kallionpinnoissa näyttäisi olevan laajoilla alueilla paljon jyrkkiä ja pienipiirteisiä vaihteluita, joiden seurauksena pienetkin koordinaattivirheet johtavat herkästi huomattaviin virheisiin kallionpintahavainnoissa. Toiseksi, kallion päällä olevat, monin paikoin paksut maapeitteet ovat varsin tiiviitä kitkamaita, jotka sisältävät myös runsaasti kiviä ja lohkareita. Lisäksi kallionpinta alueella on luultavasti monin paikoin melko rapautunutta, koska suurimmat virrehavainnot ovat kohdissa, joissa kairaaja on tulkinnut havainnot lohkariksi vielä useita metrejä mitatun kallionpinnan alapuolelle asti. Tämä ilmiö oli varsin yleinen koko kohteen alueella, joten se lienee suurin syy keskimääräisten virheidän suuruudelle.

Myös kohteessa Urheilupuiston kaivanto porakonekairauksista saadut kallionpintahavainnot poikkesivat huomattavasti mitatusta kallionpinnasta, analyysin ensimmäisen vaiheen perusteella keskimäärin noin 0,42 metriä. Toisin kuin kohteessa Vt8, poikkeamat olivat keskimäärin positiivisia, eli kallionpinnan arvioidut tasot olivat keskimäärin mitattua tasoa ylempänä. Poikkileikkauksien silmämääräisessä tarkastelussa havaitaan kuitenkin, että porakonekairaukset näyttäisivät täsmäävän muutamia poikkeuksia lukuun ottamatta melko hyvin mitatun kallionpinnan kanssa. Koska näiden muutamien virheellisten porakonekairausten kohdalla poikkeamat ovat varsin suuria (useampia metrejä), ja analyysissä hyödynnettyjen porakonekairausten määrä on pieni (32 kpl), on niillä suuri vaikutus porakonekairausten keskimääräisiin virheisiin. Lisähuomiona näiden virheellisten kairausten havaittiin sijaitsevan melko lähellä pieneköllä alueella kohteen sisällä. Tämän seurauksena heräsi epäily, että esiin kaivetun kallionpinnan sijainti olisi näiden kairausten kohdalla mitattu jo kerran louhitusta kallionpinnasta. Koska kohteen kallionpinnoissa on saatujen tietojen mukaan ollut jonkin verran rikkonaisuutta, on myös mahdollista, että kallion esiinkaivuun aikana kaivinkone on irrottanut pinnasta jonkin verran rikkonaista kallionpintaa.

Aineistomäärältään suurimmassa kohteeseen Koloko mahtui paljon erilaisia geologisia olosuhteita, ja sitä kautta porakonekairausten onnistumisissa oli runsaasti vaihtelua eri suuntiin. Syvyyskohtaisen tarkastelun tuloksista (luku 4.1) havaitaan, että varsinkin suuremmilla kairaussyvyyksillä kohteen porakonekairauksiin muodostui huomattavia epätarkkuuksia. Mukaan mahtuu myös joitakin yksittäisiä ääritapauksia, joissa porakonekairauksista määritetyt kallionpintahavainnot poikkeavat mitatusta kallionpinnasta todella paljon, pahimmillaan lähes kuusi metriä. Tällaiset havainnot vaikuttaisivat kuitenkin usein olevan paljon paremmin onnistuneiden kairausten ympäröimiä. Tästä syystä niille on vaikea keksiä mitään muuta selitystä kuin se, että kairauspöytäkirjan laadinnan, tiedon tallennuksen tai tiedonsiirron aikana on tapahtunut

inhimillinen tai laitteista johtuva virhe. Edellä mainituista asioista huolimatta laaja aineisto kuitenkin tasoittaa virhejakauman keskiarvon suhteellisen lähelle nolaa (-0,23 metriä).

5.2 Analyysin tulosten käytännöllisyys

Tässä työssä tehty analyysi on varsin teoreettinen, eikä sen tuloksia siitä syystä ole tarkoituksenmukaista kaikkiin käytännön tilanteisiin sellaisenaan soveltaa. Lisäksi lähtötietojen laadulla on suuri merkitys: Tilastollisen analyysin tulokset voivat olla enintään niin laadukkaita kuin siinä käytetty aineisto. Tästä huolimatta, analyysistä saatiin varsin hyviä suuntaa-antavia arvioita porakonekairauksista arvioidun kallionpintamallin luotettavuudesta ja riittävästä kairausstiheyksistä. Tässä luvussa käsitellään erinäisiä käytännön asioita, jotka on hyvä tiedostaa tutkimuksen tuloksia hyödynnettäessä.

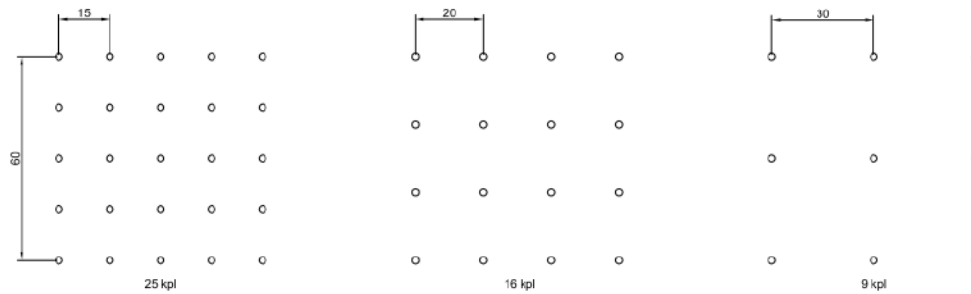
Analyysissä käsiteltiin vain porakonekairausten perusteella laadittuja kallionpintamalleja, muiden pohjatutkimusmenetelmien arvioitiin olevan analyysin kannalta liian subjektiivisia. Todellisessa tilanteessa geoteknisen suunnittelijan on kuitenkin mahdollista hyödyntää muidenkin pohjatutkimusten tuloksia sekä esimerkiksi avokalliohavaintoja arvioidun kallionpinnan mallintamisessa. Tällä tavalla saadaan mallia todennäköisesti jonkin verran tarkennettua, riippuen muiden tutkimusten laadusta ja määrästä. Muista pohjatutkimuksista voidaan määrittää ainakin tasot, joiden yläpuolella kallionpinta ei kairausten kohdalla voi olla. Tätä tietoa voidaan hyödyntää muun muassa louhintatarpeen arvioinnissa maaleikkauksissa. Toisaalta, mikäli maaperäolosuhteet ovat hankalia, saattavat muut pohjatutkimusmenetelmät jossain tapauksissa antaa myös harhaanjohtavia tuloksia.

Tutkimuksessa tehdyn analyysin ensimmäisessä vaiheessa määritettiin porakonekairauksille keskimääräisten virheiden suuruudet ja niiden hajonnat, joita käytettiin lähtötietoina analyysin toisessa vaiheessa. Kuten luvussa 5.1 todettiin, virhejakaumat vaihtelivat paljon eri kohteiden välillä, eikä virheiden suuruuksia voida tarkasti tietää käytännön tilanteissa, missä mitattua kallionpintatietoa ei ole käytettävissä. Virheiden mahdollisia suuruuksia on kuitenkin mahdollista arvioida havaittujen maaperäolosuhteiden pohjalta, minkä jälkeen arviota voidaan hyödyntää lisätutkimuksia suunniteltaessa. Esimerkiksi mikäli tiesuunnitelmavaiheen tutkimuksista havaitaan, että kallionpinta on jollain alueella varsin lähellä maanpintaa ja sen päällä oleva maapeite on helposti läpäistävää, voidaan olettaa porakonekairausten virheet melko pieniksi. Tämä tieto voidaan huomioida rakennussuunnitelmavaiheen kairauksia suunniteltaessa. Vastaava ohjeistus on esitetty myös Tiehallinnon ohjeessa (2008).

Massa- ja kustannuslaskenta:

Tutkimusten tulosten perusteella on mahdollista tehdä karkeaa vertailua eri kairausstiheyksien välillä määrä- ja kustannuslaskentojen näkökulmasta. Ohessa kairausstiheyden vaikutusta arvioidaan esimerkin kautta.

Tarkastellaan neliönmuotoista aluetta, jonka sivumitta on 60 metriä. Alueella on tarkoitus tehdä louhintaa koko alueen laajuudella. Vertaillaan 15, 20 ja 30 metrin porakonekairausverkoilla määritettyjä kallionpintamalleja, ja niiden pohjalta arvioituja louhintamääriä ja -kustannuksia.



Louhintamäärien oikeellisuutta voidaan arvioida karkeasti hyödyntämällä tutkimuksessa määritettyjä suhteellisten tilavuuserotustarkasteluiden tuloskuvaajia. Oletetaan tarkasteltavan alueen kallionpinnan topografia pienipiirteiseksi, jolloin louhintamäärien tarkkuuksille voidaan määrittää seuraavat likimääräiset arviot:

- 15 metrin kairaustiheydellä arvioitu louhintamäärä poikkeaa todellisesta keskimäärin $0,05 \text{ m}^3/\text{m}^2$
- 20 metrin kairaustiheydellä vastaava poikkeama $0,10 \text{ m}^3/\text{m}^2$
- 30 metrin kairaustiheydellä vastaava poikkeama $0,25 \text{ m}^3/\text{m}^2$

Tarkasteltavan alueen pinta-ala on 3600 m^2 , jolloin yllä esitetyillä tarkkuuksilla arvioidut louhintamäärät poikkeavat todellisesta määrästä 180 , 360 ja 900 m^3 . Tiehallinnon ohjeessa (2008) on esitetty kalliomasojen määrälaskennan tavoitetarkkuudeksi $-10...+10 \%$. Tämän tavoitteen saavuttaminen on riippuvainen louhittavien kalliomasojen kokonaismäärästä eli keskimääräisestä louhintasyvyydestä. Taulukossa 11 on esitetty eri louhintasyvyyksille kairausverkon tiheyksiä, joilla ohjeen esittämä tavoitetarkkuus saavutetaan. Taulukosta havaitaan, että kun keskimääräinen louhintasyvyys on $2,5$ metriä tai enemmän, pelkästään louhintamäärien laskennan kannalta porakonekairausten tiheydeksi riittää 30 metriä.

Keskimääräinen louhintasyvyys [m]	Kalliomasojen kokonaismäärä $60 \text{ m} \times 60 \text{ m}$ alueella [m ³ ktr]	Kairaustiheys, jolla arvioitujen louhintamäärien tarkkuustaso $-10...+10 \%$ täyttyy [m]
0,5	1800	15
1	3600	20
1,5	5400	20
2	7200	20
2,5	9000	30
3	10800	30

Arviointia voidaan tehdä myös kustannuspohjaisesti. Tarkasteltavalle alueelle tulevien porakonekairausten määrät 15, 20 ja 30 metrin tiheyksillä ovat 25, 16 ja 9 kairausta. Kun oletetaan, että kallionpinta on alle 10 metrin syvyydessä, voidaan yhden porakonekairauksen keskimääräiseksi hinnaksi arvioida noin 400 €/kairaus. Tällöin kairausten hinnat on helppo laskea:

- 15 metrin kairaustiheys: $Kust_{15} = 25 \times 400 \text{ €} = 10000 \text{ €}$
- 20 metrin kairaustiheys: $Kust_{20} = 16 \times 400 \text{ €} = 6400 \text{ €}$
- 30 metrin kairaustiheys: $Kust_{30} = 9 \times 400 \text{ €} = 3600 \text{ €}$

Louhinnan hinta on riippuvainen louhittavan alueen sijainnista sekä louhittavien kalliomasojen kokonaismäärästä. Aiemmin esitettiin, että eri kairaustiheyksillä (15, 20 ja 30 metriä) arvioidut louhintamäärät poikkeaisivat todellisesta määrästä tarkasteltavalla alueella keskimäärin 180, 360 ja 900 m³. Tällaisten massamäärien louhinnan kustannuksia eri tilanteissa on arvioitu taulukossa 12. Taulukossa olevat yksikköhinnat on peräisin Rapal Oy:n Fore kustannuslaskentaohjelmasta, joka on infrahankkeiden kustannushallintaa varten suunniteltu työkalu.

	Yksikköhinta [€/m ³ ktr]	Kustannus, louhittava määrä 180 m ³ ktr [€]	Kustannus, louhittava määrä 360 m ³ ktr [€]	Kustannus, louhittava määrä 900 m ³ ktr [€]
Kallion irrotus, h > 1m, 1000-5000 m ³ ktr, kaupunkialue	14,89	2680	5360	13401
Kallion irrotus, h > 1m, 5000-100000 m ³ ktr, kaupunkialue	11,95	2151	4302	10755
Kallion irrotus, h > 1m, 5000-100000 m ³ ktr, taajaan asuttu alue	10,3	1854	3708	9270
Kallion irrotus, h > 1m, 5000-100000 m ³ ktr, avoin alue	8,58	1544	3089	7722
h = louhinnan syvyys, m ³ ktr = kiintoteoreettinen kuutio (irroittamattoman maa- tai kallioaineksen tilavuus)				

Näin ollen voidaan arvioida, että kun tarkasteltavalle alueelle tehdään porakonekairauksia esimerkiksi 15 metrin tiheydellä, kairausten kustannus on 10 000 € ja louhinnan kustannukset voidaan arvioida 1544–2680 € tarkkuudella. On kuitenkin huomioitava, että yllättävät louhintatarpeet joudutaan usein tekemään lisätöinä. Lisätöinä tehtävien louhintojen yksikköhinnat ovat riippuvaisia urakkasopimuksen muodosta. Yllättävät louhintatarpeet saattavat lisäksi aiheuttaa muutossuunnittelua sekä aikataullisia haasteita.

Kalliomasamäärien arvioiminen sekä louhintojen kustannuslaskelmat ovat infrahankkeissa paljon merkittävämpiä kuin talorakennuskohteissa. Varsinkin suurissa infrahankkeissa massamäärät ovat usein valtavia, jolloin onnistuneella massatalouden suunnittelulla on mahdollista saavuttaa huomattavia säästöjä. Massataloussuunnitelman onnistuminen on riippuvainen oikein arvioiduista massamäärästä, jolloin myös sopivan kairaustiheyden vaikutus korostuu.

Louhintamäärien arviointitarkkuus ei kuitenkaan ole ainoa muuttuja tarvittavan porakonekairausten tiheyttä arvioidessa. Eryteisesti tilanteissa, joissa kallionpinta on lähellä suunnitellun väylän tasausta (louhintasyvyys on pieni), kallionpinnalla on vaikutusta myös teknisiin ratkaisuihin. Kallionpinnan sukelluskohtiin joudutaan tyypillisesti suunnittelemaan siirtymäkiiloja, sekä tarvittaessa myös massanvaihtoja. Louhintaa tehdään vain paikoittain, mutta se joudutaan tekemään yksikköhinnaltaan kalliina pintalouhintana (Fore -laskentaohjelman mukaan 13,83–21,23 €/m², riippuen

alueen koosta). Näin ollen alle kahden metrin keskimääräisellä louhintasyvyydellä kairausverkon tiheyden on todennäköisesti oltava taulukossa 11 esitettyä 15–20 metriä tiheämpi. Sen sijaan mikäli voidaan olettaa, että väylä kulkee suurella todennäköisyydellä koko matkan kallioleikkauksessa (louhintasyvyys on suuri), voidaan käyttää huomattavasti harvempia kairausstiheyksiä (≥ 30 metriä) taulukon 11 mukaisesti. Pohjatutkimusohjelmaa laadittaessa kallionpinnan korkeustasoista on kuitenkin melko harvoin riittävästi ennakkotietoa, jotta edellä esitettyjä asioita voitaisiin kunnolla huomioida.

Edellä esitettyjen tilanteiden lisäksi monissa tilanteissa, esimerkiksi taitorakenteiden kohdalla, vaaditaan paljon tarkempaa kallionpintatietoa, jolloin porakonekairausverkon tiheys määräytyy sen mukaan. Tällaisissa tilanteissa voidaan hyödyntää luvun 4.2 kolmiokohtaisten poikkeamatarkastelujen tuloksia, joissa arvioitiin että huomattavien virheiden välttämiseksi porakonekairauksia tulisi tehdä vähintään 5 metrin välein.

5.3 Jatkotutkimustarpeet

Työssä käytettyjen kohteiden aineistoista ainoastaan kohteen Koloko aineistoa voitiin pitää riittävän kattavana luotettavien tilastollisten analyysien tekoon. Muiden kohteiden pienemmissä aineistoissa satunnaisvaihteluilla oli enemmän vaikutusta tuloksiin. Tästä syystä tutkimusta olisi mielenkiintoista jatkaa suuremmilla aineistomäärillä, esimerkiksi neljä sellaista kohdetta, jotka vastaisivat aineistomäärältään kohdetta Koloko.

Kallionpinnan syvyyden vaikutusta porakonekairausten virheisiin arvioitiin lyhyesti analyysin ensimmäisessä vaiheessa. Ajan ja materiaalin puutteen vuoksi (maanpintamalli oli käytettävissä vain kohteissa Koloko ja Kehä 3) sen vaikutuksia ei kuitenkaan sovellettu analyysin toisen vaiheen simulointeihin. Tästä syystä analyysin toisesta vaiheesta olisi mielenkiintoista tehdä lisätarkastelu, jossa porakonekairauksille annetaan eri virhejakaumia sen mukaan, miten syvällä mitattu kallionpinta on.

Muita jatkotutkimustarpeita voisivat olla kalliolaadun ja kallion topografian vaikutuksen tarkempi analysointi. Tässä tutkimuksessa mitatun kallionpinnan topografiaa arvioitiin vain sanallisesti, mutta pinnan vaihtelevuutta voitaisiin arvioida myös matemaattisia indikaattoreita hyödyntäen. Esimerkiksi kolmioverkon kolmioiden kaltevuuksien määrittäminen vaakatasoon nähden antaisi pintojen vaihtelevuuksille numeerisia arvoja, joiden vaikutusta kallionpintamallin luotettavuuteen voitaisiin arvioida. Lisäksi esimerkiksi Geologian tutkimuskeskuksen (GTK) kallioperäkarttoja hyödyntämällä voitaisiin arvioida eri kalliolaatujen ja kivilajien vaikutusta porakonekairauksien, ja sitä kautta kallionpintamallin luotettavuuteen.

Myös Kriging -menetelmän hyödyllisyyttä pintamallin muodostuksessa voisi olla syytä tutkia. Kriging -menetelmällä luotua pintamallia vertaamalla perinteiseen kolmioimalla luotuun pintamalliin ja mitattuun pintamalliin voitaisiin arvioida, pystytäänkö tällä menetelmällä pintamallin luotettavuutta merkittävästi parantamaan.

6 Johtopäätökset

Neljästä todellisesta kohteesta aineistona saatuja porakonekairauksia ja mitattua kallionpintaa vertaamalla voitiin todeta, että porakonekairauksissa on usein virheitä, minkä takia niiden pohjalta laadittuja kallionpintamalleja ei voida pitää täysin luotettavina. Parhaimmillaankin porakonekairauksista määritetyt kallionpintatulkinnot poikkesivat mitatun kallionpinnan tasosta keskimäärin noin 0,05 metriä, noin 0,30 metrin keskihajonnalla. Sen sijaan suurimmillaan porakonekairausten keskimääräiseksi virheen suuruudeksi saatiin jopa yli 0,45 metriä. Lyhemmistä porakonekairauksista määritetyt kallionpintatulkinnot todettiin huomattavasti luotettavammiksi kuin syvemmälle ulottuvista kairauksista saadut tulkinnot: Kun tulkittu kallionpinta oli alle kahden metrin syvyydellä maanpinnasta, poikkeaman keskiarvo oli noin nolla ja keskihajonta noin 0,64 metriä. Sen sijaan yli kuuden metrin syvyydellä olevissa tulkinnoissa vastaavat arvot olivat keskiarvolle noin -1,4 ja keskihajonnalle noin 1,66 metriä.

Simuloituille porakonekairauksille asetetuilla virheillä oli huomattava vaikutus pintamallien välisiin tilavuuserotuksiin: Tulosten keskiarvojen todettiin lähestyvän kairausverkon tihentyessä simuloituille porakonekairauksille keskivirheeksi asetettua arvoa. Lisäksi kun kairauksiin asetetut virheet olivat pieniä, tilavuuserotuksien keskihajonnaksi saatu arvo oli alle puolet suurilla virhejakaumilla laskettuihin keskihajontoihin verrattuna. Simuloitujen porakonekairausten virheillä ei kuitenkaan ollut kovin merkittävää vaikutusta pintamallien suurimpiin poikkeamiin.

Maaperän geologisten olosuhteiden todettiin vaikuttavan kallionpintamallin luotettavuuteen monellakin tapaa. Ensinnäkin, hankalien pohjaolosuhteiden, kuten rikkonaisen kallionpinnan ja kivisen maaperän todettiin aiheuttavan todennäköisemmin suurempia virheitä porakonekairaustuloksiin ja sitä kautta kallionpintamalliin. Toiseksi, kallionpinnan topografian vaihtelevuudella havaittiin olevan suuri vaikutus simuloitun kallionpintamallin luotettavuuteen kaikissa tarkastelutapauksissa. Tilavuuserotuksien keskiarvokuvaajista havaitaan, että 30 metrin kairaustiheydellä eri alueille laskettujen tulosten ääriarvojen vaihteluväli on peräti 0,4 m³/m². Poikkeamatarkasteluissa kallionpinnan topografian vaikutus oli vielä suurempi: 30 metrin kairaustiheydellä alueiden suurimmat poikkeamat vaihtelivat useita metrejä, ja kolmiokohtaisessakin tarkastelussa suurimmillaan yli metrin. Kairausverkon tihentyessä kallionpinnan topografian vaihtelevuuden vaikutus kuitenkin tasoittui huomattavasti. Kairausverkon tiheys oli arvioitun kallionpinnan luotettavuuden kannalta merkittävin muuttuja, ja sen vaikutuksen todettiin olevan kaikissa tarkasteluissa sitä suurempi, mitä enemmän mitatun kallionpinnan topografiassa oli vaihtelua.

Kolmiokohtaisen poikkeamatarkastelun perusteella voitiin arvioida, että mikäli arvioidussa kallionpintamallissa ei haluta olevan huomattavia, yli 0,5 metrin virheitä, kairauspisteiden välinen etäisyys ei saisi ylittää 5 metriä. Myös Liikenneviraston (2015) luonnosvaiheessa olevassa ohjeessa on esitetty ohjeelliseksi kairaustiheyden arvoksi 5 metriä tilanteissa, joissa kallionpinnan sijainti halutaan määrittää tarkasti.

Tilavuuserotustarkasteluiden pohjalta määritetyssä likimääräisessä tarkastelussa arvioitiin puhtaasti massalaskennan kannalta riittäviä kairaustiheyksiä. Jotta Liikenneviraston esittämä kalliomasojen määrälaskennan tavoitetarkkuus $-10...+10\%$ täyttyy, on kairausverkon riittävä tiheys riippuvainen louhinnan keskimääräisestä syvyydestä seuraavasti:

1. Louhintasyvyys yli 0,5 metriä, riittävä kairaustiheys 15 metriä.
2. Louhintasyvyys yli 1,0 metriä, riittävä kairaustiheys 20 metriä.
3. Louhintasyvyys yli 2,5 metriä, riittävä kairaustiheys 30 metriä.

On kuitenkin huomioitava, että kallionpinnan ollessa suunniteltavan väylän tasauksen tuntumassa (louhintasyvyys on pieni), on sillä vaikutusta myös kohteen teknisiin ratkaisuihin. Tällöin porakonekairausverkon tulisi olla yllä esitettyä 15–20 metriä tiheämpi. Kallionpinnasta on kuitenkin etukäteen melko harvoin niin hyvää tietoa, että edellä esitettyjä arvioita pystyttäisiin tehokkaasti hyödyntämään pohjatutkimussuunnitelman laadinnassa.

Lähdeluettelo

- Anschütz, H. & Bazin, S. & Pfaffhuber, A.A. 2014.
 . Norges Geotekniske Institutt NGI. Trondheim.
- Baecher, G.B. & Christian, J.T. 2003.
 Chichester, West Sussex, England: John Wiley & Sons Ltd. 605 s. ISBN 0-471-49833-5.
- Brotherus, V. 2014.
 Diplomityö. Oulun yliopisto, ympäristötekniikan koulutusohjelma. Oulu. 107 + 6 s.
- Clayton, C.R.I. 2001. Proc. ICE, Geotechnical Engineering, vol. 149, s. 3-11. ISSN: 1353-2618.
- El-Ramly, H. & Morgenstern, N.R. & Cruden, D.M. 2002.
 . Canadian Geotechnical Journal, vol. 39, s. 665-683. ISSN: 0008-3674.
- EN ISO 22476-12. 2009.
 . Brussels. European Committee for Standardization.
- Fenton, G.A. & Griffiths, D.V. 2003.
 . Canadian Geotechnical Journal, vol. 40, s. 54-65. ISSN: 0008-3674.
- Fenton, G.A. & Griffiths, D.V. 2008. John Wiley & Sons Inc., Hoboken, New Jersey, United States. 461 s. ISBN: 978-0-470-17820-1.
- Geodeettinen laitos. 2012.
 Luentosarja. Saatavilla: <http://www.helsinki.fi/~korpela/MINV12/koordinaatit.pdf> [Viitattu 19.8.2014]
- Griffiths, D.V. & Fenton, G.A. 2004.
 . Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, vol. 130, s. 507-518. ISSN: 1943-5606.
- Hicks, M.A. & Onisiphorou, C. 2005.
 . Géotechnique, vol. 55, s. 123-133. ISSN: 1751-7656.
- Hokkanen, T. 2011. Luentoaineisto. Aalto-yliopisto.
- Honjo, Y. 2011. Challenges in Geotechnical Reliability Based Design. Proceedings from the 3rd International Symposium on Geotechnical Safety and Risk. ISBN 978-3-939230-01-4.
- Houy, L. & Breysse, D. & Denis, A. 2005.
 . Géotechnique, vol. 55, s. 163-170. ISSN: 1751-7656.

Häkkinen, Ilona. 2014. Suunnittelupäällikkö, geosuunnittelu. A-Insinöörit Suunnittelu Oy. Haastattelu 31.10.2014.

Hämäläinen, R. 2014. . Opinnäyte-työ. Oulun ammattikorkeakoulu, rakennustekniikan koulutusohjelma. Oulu. 70 s.

ISO 22476-15. 2014. . Standardiluonnos. The European Committee for Standardization. 39 s.

Jaksa, M.B. & Goldsworthy, J.S. & Fenton, G.A. & Kaggwa, W.S. & Griffiths, D.V. & Kuo, Y.I. & Poulos, H.G. 2005. . Geotechnique, vol. 55, s. 109-121. ISSN: 0016-8505.

Jeong, S. & Murayama, M. & Ymamoto, K. 2005. . Journal of Aircraft, vol. 42, s. 413-420.

Jokinen, J. 2010. . Rakentajain kalenteri 2011. Rakennustieto Oy, Rakennustietosäätiö RTS, Rakennusmestarit ja insinöörit AMK RKL ry. Helsinki. 700 s. ISSN: 0355-550 X. Saatavilla: <https://www.rakennustieto.fi/Downloads/RK/RK110304.pdf>

Jääskeläinen, R. 2011. . 3. painos. Tammertekniikka. Jyväskylä. 387 s. ISBN: 978-952-5491-68-5.

Korkiala-Tanttu, L. & Onninen, H. 2001. . Menetelmäkuvaus TPPT 13. VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka & Tiehallinto. Saatavilla: <http://alk.tiehallinto.fi/tppt/pdf/13-rakennekerros.pdf>

Koutsourelakis, S. & Prévost, J.H. & Deodatis, G. 2002. . Earthquake Engineering & Structural Dynamics, vol 31, s. 851-879.

Lehtinen, M. & Nurmi, P. & Rämö, T. 1998. . Helsinki, Suomen Geologinen Seura ry. 375 s. ISBN 952-90-9260-1.

Liikennevirasto 2011. . 63 + 5 s. ISBN 978-952-255-746-9. Saatavilla: http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf3/lo_2011-23_maastotietojen_hankinta_web.pdf

Liikennevirasto 2012. 40 + 37 s. ISBN 978-952-255-141-2. Saatavilla: http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf3/lo_2012-10_tien_geotekninen_web.pdf

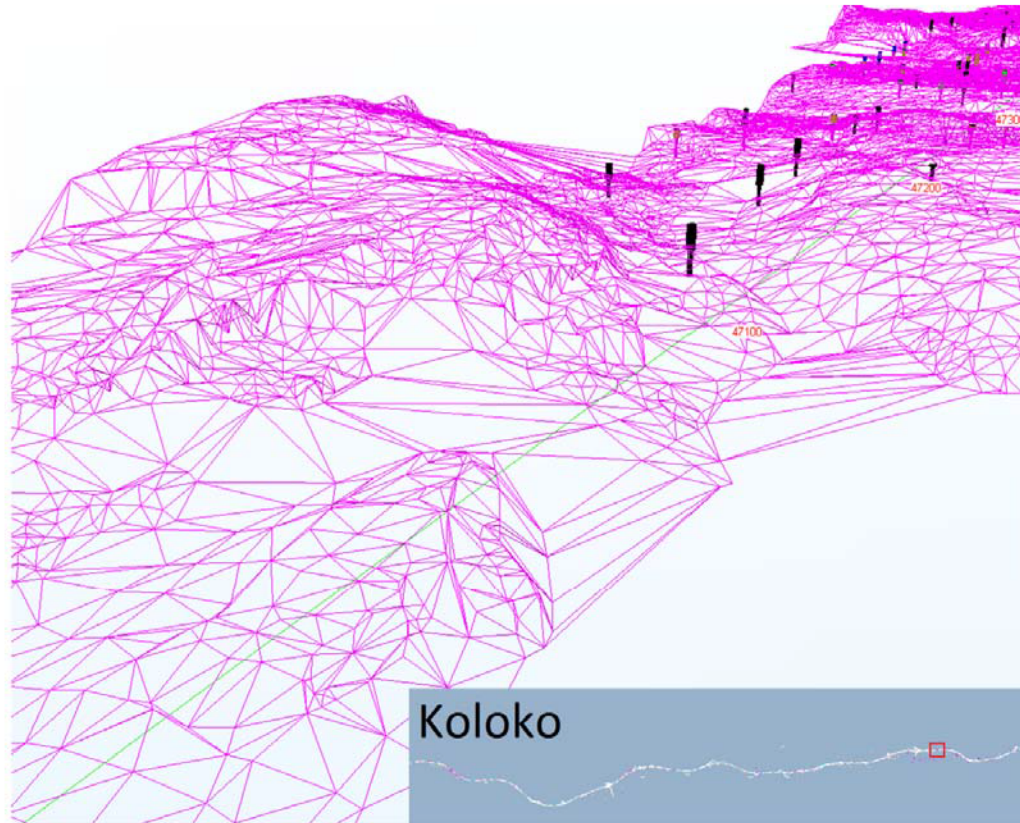
Liikennevirasto 2014a. 36 + 9 s. ISBN: 978-952-255-465-9. Saatavilla: http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf8/lo_2014-20_tiehankkeiden_mallipohjaisen_web.pdf

Liikennevirasto 2014b. 57 + 20 s. ISBN: 978-952-255-414-7. Saatavilla: http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf8/lo_2014-o6_siltojen_tietomalliohje_web.pdf

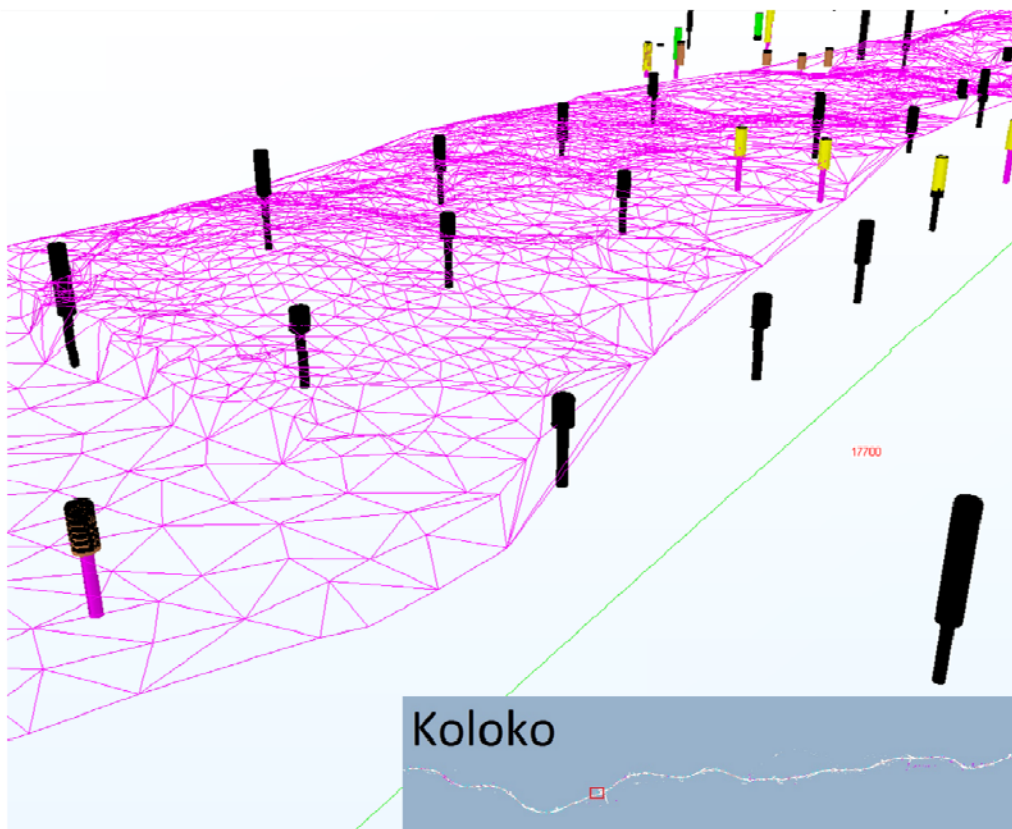
- Liikennevirasto 2014c. . Liikenneviraston kotisivu. Päivitetty 29.8.2014. Saatavilla: <http://portal.liikennevirasto.fi/sivu/www/f/hankkeet/kaynnissa> [Viitattu 30.10.2014]
- Liikennevirasto 2015. . Luonnos 12.1.2015.
- Liukas, J. & Virtanen, J. 2014. . Luonnosversio 1.3. Sito Oy. 19 s. Saatavilla: http://www.rts.fi/infratm/mallinnusohjeita2014/InfraBIM_Mallinnusohjeet_OSA_3_Lahtotiedot_1_3.pdf
- Maanmittauslaitos 2010a. . Maanmittauslaitoksen kotisivu. Päivitetty 3.3.2010. Saatavilla: <http://www.maanmittauslaitos.fi/kartat/koordinaatit/koordinaatti-korkeusjarjestelmat> [Viitattu 19.8.2014]
- Maanmittauslaitos 2010b. . Maanmittauslaitoksen kotisivu. Päivitetty 3.3.2010. Saatavilla: http://www.maanmittauslaitos.fi/sites/default/files/N2000_Valtakunnallinen_korkeusjarjestelma.pdf [Viitattu 19.8.2014]
- Mathworks 2014. . Mathworks:n kotisivu. Saatavilla: <http://www.mathworks.se/products/matlab/> [Viitattu 4.11.2014]
- Moselhi O., Alshibani A. 2009. . Journal of Construction Engineering and Management, vol. 135, s. 948–954. ISSN: 1943-7862
- Noukka, Ari. 2014. Monitoimikairaaja. A-Insinöörit Geotesti Oy. Puhelinhaastattelu 13.11.2014.
- Paice, G. & Griffiths, D. & Fenton, G. 1996. . Journal of Geotechnical Engineering, vol. 122, s. 777-779. ISSN: 1944-8368.
- Perttula, T. 2014. . Luentosarja. Liikennevirasto.
- Popescu, R. & Deodatis. G. & Nobahar, A. 2005. . Probabilistic Engineering Mechanics, vol. 20, s. 324-341.
- Popescu, R. & Deodatis. G. & Prévost, J. 2008. . Kappale 6 kirjassa . Koonnut Phoon K-K. Taylor & Francis. Abingdon, Oxon. 530 s. ISBN: 978-0-415-39630-1.
- Rantanen, T. & Patjas, E. & Arkima, O. 2007. . 36 + 15 s. ISBN 978-951-803-802-6. Saatavilla: <http://alk.tiehallinto.fi/julkaisut/pdf/3201023-stop.pdf>
- Saksi, V. & Laatonen, K. 2011. . VR Track Oy. Luentosarja. Saatavilla: <http://www.rym.fi/attachements/2011-04-20T12-19-0342.pdf>

- SFS-EN 1997-2 + AC. 2007.
Helsinki. Suomen standardisoimisliitto. 154 s.
- SFS-EN ISO 22476-2. 2005a.
. Helsinki. Suomen standardisoimisliitto. 32 s.
- SFS-EN ISO 22476-10. 2005b.
. Helsinki. Suomen standardisoimisliitto. 10 s.
- Serén, K. 2014. . Luonnosversio 0.7. InfraTM/InfraFINBIM. Eurostep Oy. 49 s. Saatavilla: http://www.infrabim.fi/wp-content/uploads/2013/10/InfraBIM_Sanasto_0-7.pdf
- Suomen geoteknillinen yhdistys SGY 1981.
. Rakentajain kustannus Oy. Helsinki: Suomen geoteknillinen yhdistys r.y. ja Rakentajain kustannus. ISBN: 951-676-1275.
- Suomen geoteknillinen yhdistys SGY 1986. . Helsinki: Suomen geoteknillinen yhdistys r.y ja Rakentajain kustannus. ISBN: 951-676-315-4.
- Suomen geoteknillinen yhdistys SGY 2001.
. Helsinki: Suomen geoteknillinen yhdistys r.y ja Rakentajain kustannus. ISBN: 951-98818-1-6.
- Tekla, 2014. . Teklan kotisivu. Saatavilla: <http://www.tekla.com/fi/tuotteet/tekla-civil> [Viitattu 20.11.2014]
- Tekla, 2015. Tekla Civil käyttäjän käsikirja.
- Tiehallinto 1998.
. 90 s. ISBN: 951-726-447-X. Saatavilla: <http://alk.tiehallinto.fi/thohje/pdf2/pehmtutk3200520.pdf>
- Tiehallinto 2008. 55
+ 13 s. ISBN: 978-952-221-066-1. Saatavilla: http://alk.tiehallinto.fi/thohje/pdf/2100057-v-08-geotekniset_tutkimukset_ja_mittaukset.pdf
- Tielaitos 1995.
. 50 s. Painatuskeskus Oy, Helsinki. ISBN: 951-726-155-1. Saatavilla: http://alk.tiehallinto.fi/thohje/pdf2/tieleikkausten_pohjatutkimukset_1995.pdf
- Valjus, T. 2009. . Menetelmäkuvaus. Geologian tutkimuskeskus GTK. Saatavilla: http://projects.gtk.fi/export/sites/projects/TAATA/kartoitus/liitteet/Taata_Painovoimamittaukset.pdf

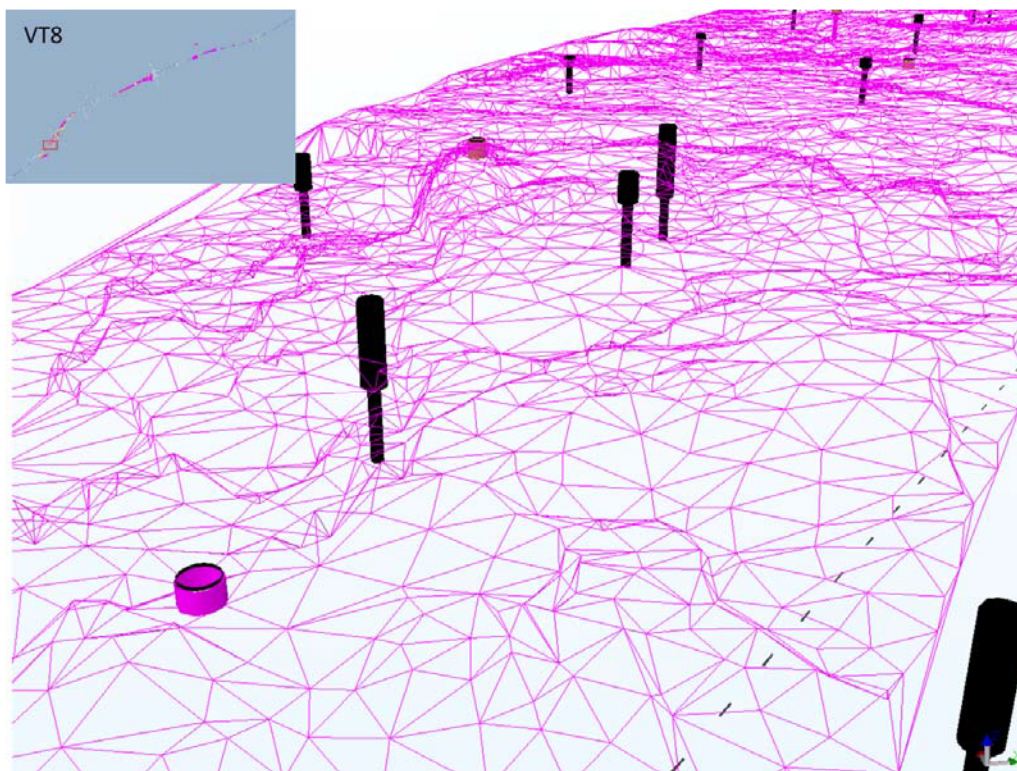
Simuloitavat mitatut kallonpinnat 3D-verkkona ja niiden sijainti kohteen sisällä



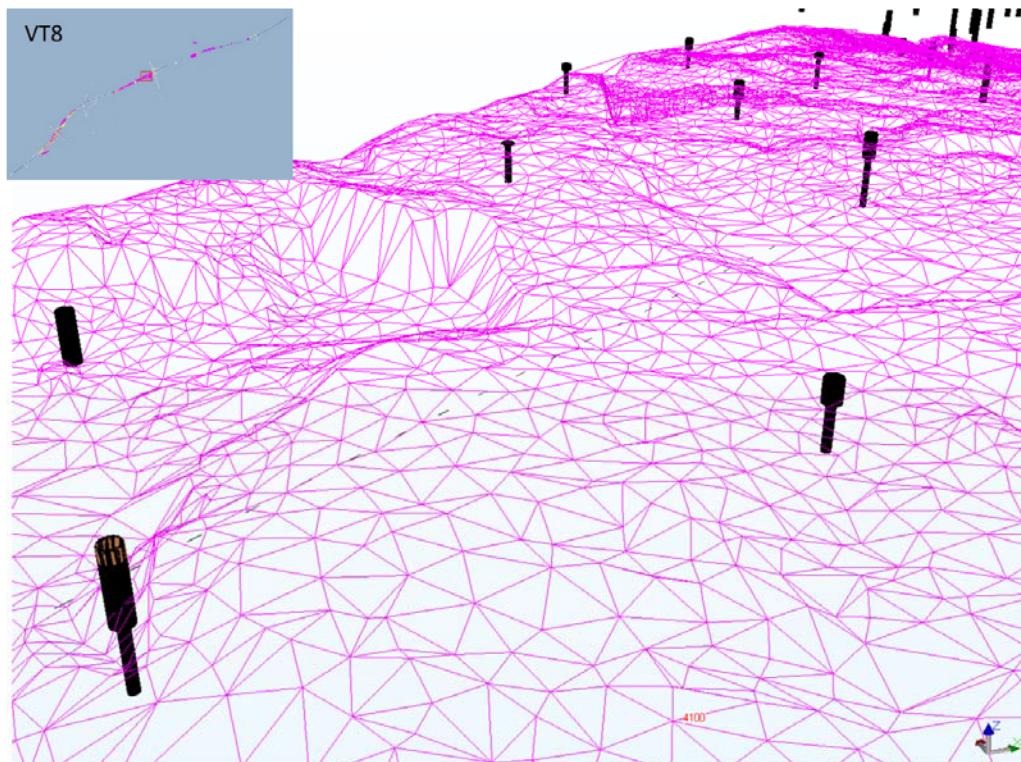
Alue 1



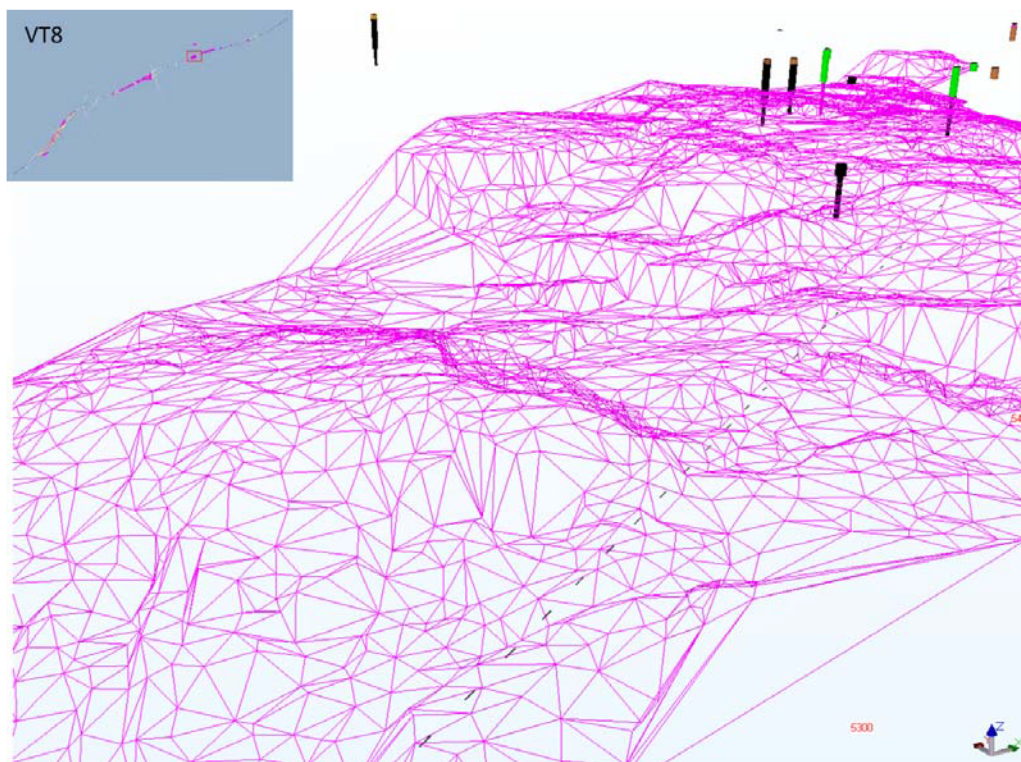
Alue 2



Alue 3



Alue 4

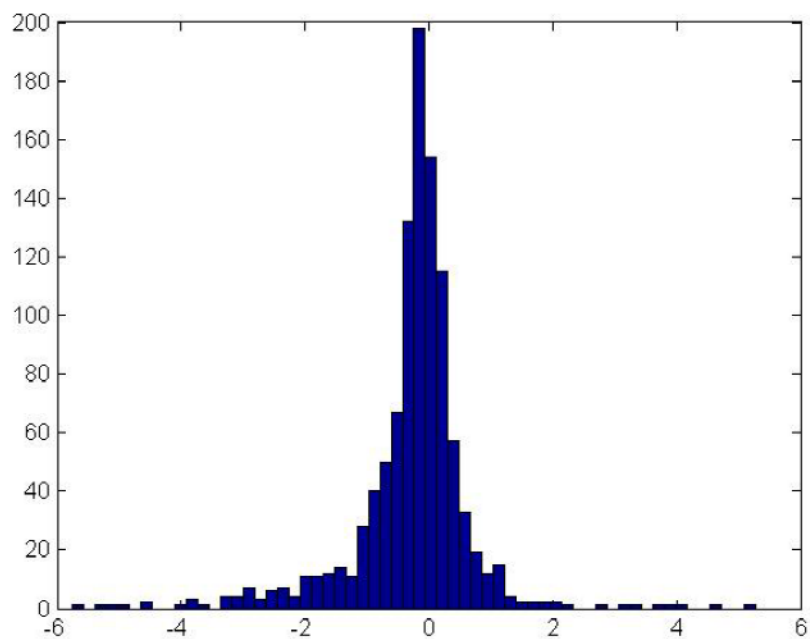


Alue 5

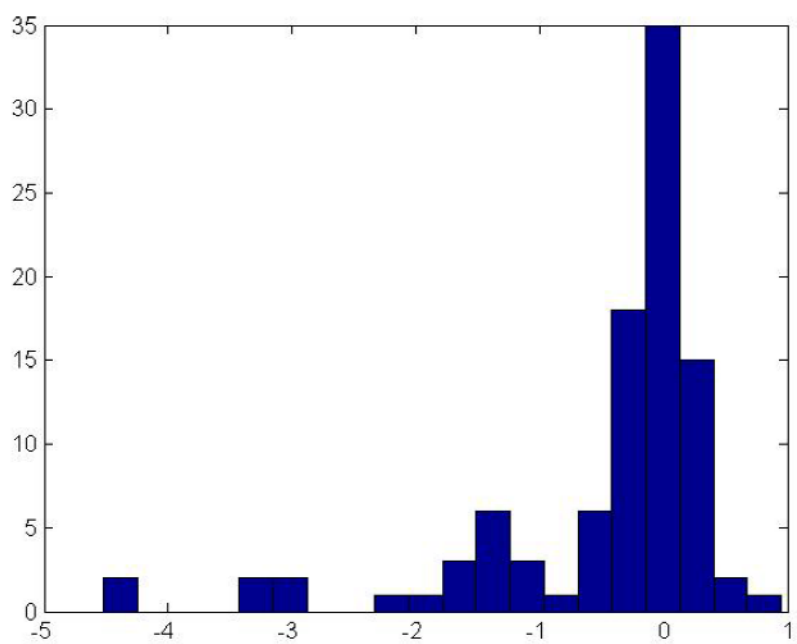
Esimerkki Matlabin luettavasta, taulukkomuotoisesta kairaustiedostosta

Kairauksen X- koordinaatti	Kairauksen Y- koordinaatti	Kairauksen Z- koordinaatti	Kalliopinta- havainnon syvyys	Kallionpinta- havainnon Z- koordinaatti
6681610.174	395494.276	41.835	2.2	39.64
6681627.419	395506.384	43.152	1.8	41.35
6681722.260	395538.142	43.298	0.8	42.50
6681714.934	395556.132	41.881	0.2	41.68
6681738.425	395551.475	41.858	1.8	40.06
6681778.072	395550.960	43.246	0.2	43.05
6681874.140	395538.972	40.591	0.6	39.99
6681915.286	395545.940	40.235	0.6	39.64
6681973.135	395540.909	38.884	1.6	37.28
6682079.760	395641.185	36.878	2.6	34.28
6682099.718	395647.316	36.123	2.7	33.42
6682099.016	395663.569	35.792	0.6	35.19
6682135.014	395663.475	34.777	1.8	32.98
6682121.832	395680.345	34.723	2.5	32.22
6682101.314	395684.932	35.357	0.8	34.56
6682151.087	395690.304	33.119	3.8	29.32
6682124.296	395704.423	33.245	1.6	31.65
6682106.067	395708.421	34.303	1.4	32.90
6682141.972	395714.985	33.273	1.7	31.57
6682169.888	395750.280	31.423	2.9	28.52
6682088.840	395747.578	32.811	1.0	31.81
6682069.793	395755.956	34.26	1.6	32.66
6682068.181	395778.050	32.336	2.0	30.34
6682053.900	395818.556	32.283	1.3	30.98
6682045.680	395810.076	32.613	1.4	31.21
6682036.835	395829.067	32.561	1.0	31.56
6682040.630	395844.061	32.25	2.0	30.25
6682019.206	395839.894	32.693	2.1	30.59
6682027.366	395860.680	32.413	1.6	30.81
6682031.204	395892.029	34.395	0.0	34.40
6682008.539	395922.118	37.421	0.8	36.62
6681956.939	395993.387	32.743	0.4	32.34
6681945.885	395857.138	36.674	0.2	36.47
6681901.119	395860.382	37.039	0.6	36.44
6682091.832	395950.099	32.303	0.6	31.70
6682119.155	395936.452	33.396	0.4	33.00
6682128.618	395916.682	31.096	0.8	30.30
6682168.910	395666.155	32.552	2.4	30.15
6682191.669	395677.628	31.648	0.8	30.85
6682203.234	395659.903	30.213	3.0	27.21
6682205.061	395680.203	32.183	1.6	30.58
6682227.812	395707.884	33.579	1.0	32.58
6682298.054	395792.637	32.753	0.5	32.25
6682281.623	395816.903	33.612	0.0	33.61
6682310.009	395862.136	32.194	0.0	32.19
6682329.095	395888.584	31.304	0.4	30.90
6682311.580	395889.697	31.589	1.0	30.59
6682297.438	395917.428	30.233	0.3	29.93
6682276.706	395933.850	29.326	1.0	28.33
6682209.665	395958.167	29.793	0.2	29.59
6682201.690	395952.551	30.618	0.4	30.22
6682207.572	395971.621	29.061	1.2	27.86

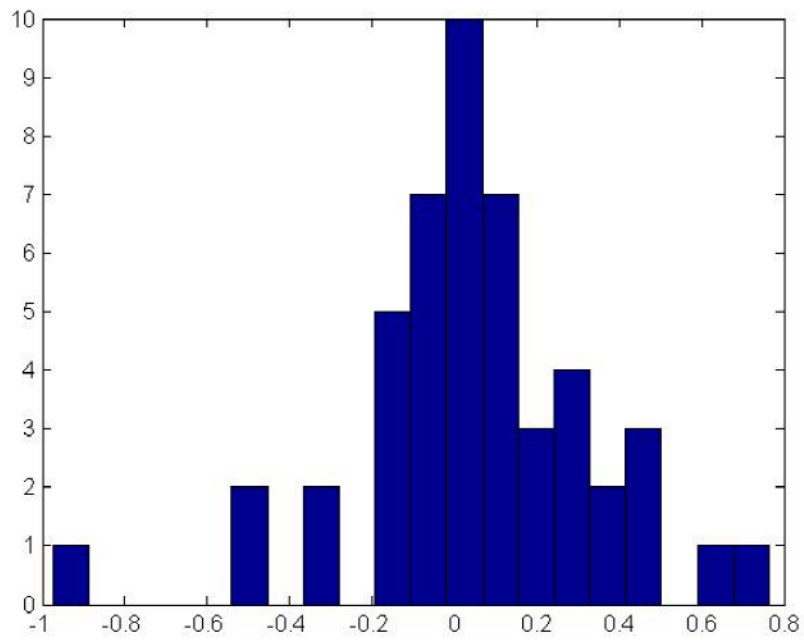
Analysin ensimmäisen vaiheen tulokset: Porakonekairausten virhejakaumat histogrammeina



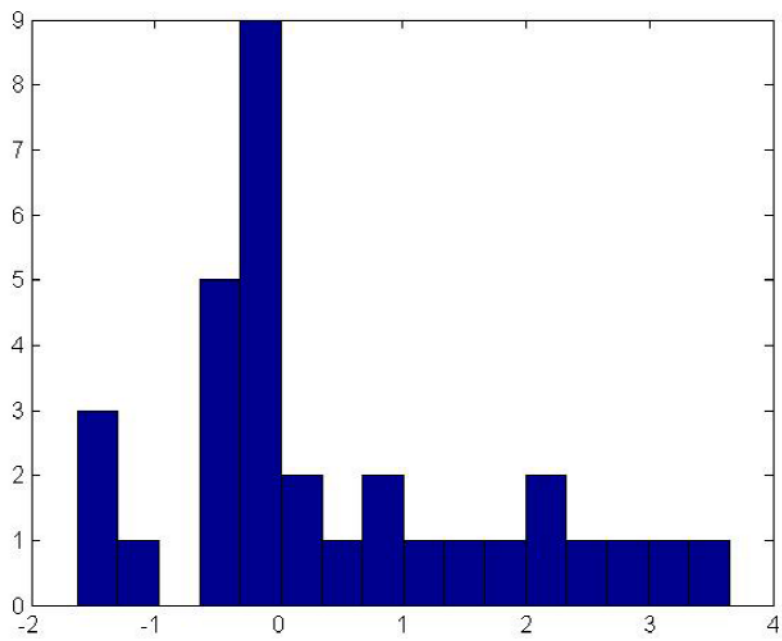
Histogrammi 1



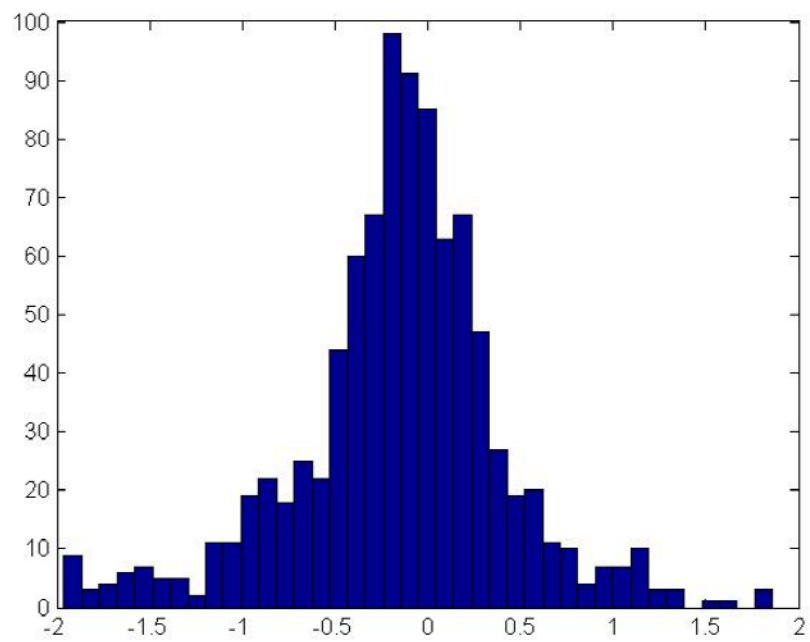
Histogrammi 2



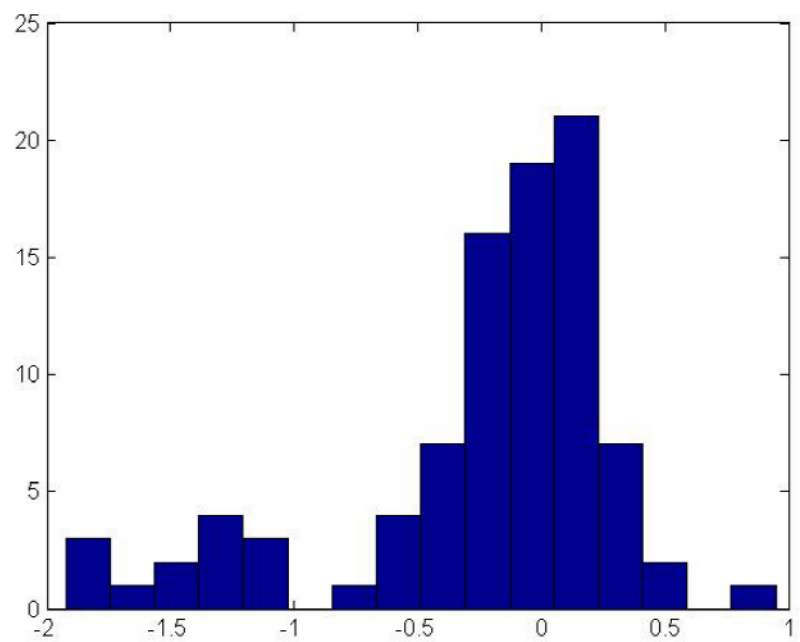
Histogrammi 3



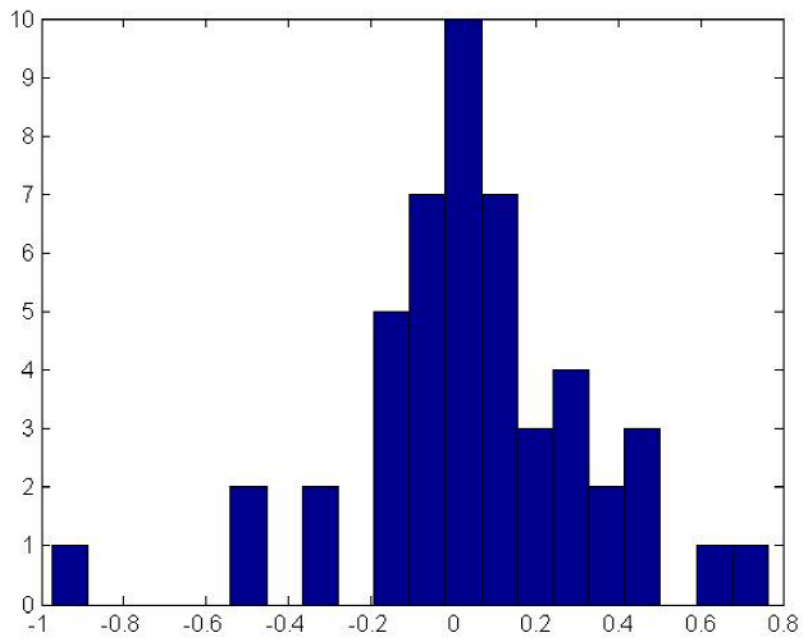
Histogrammi 4



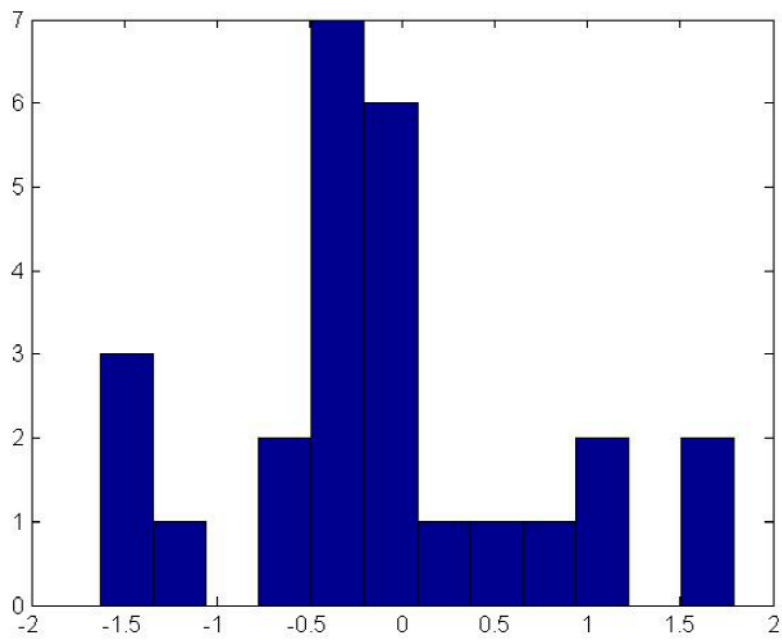
Histogrammi 5



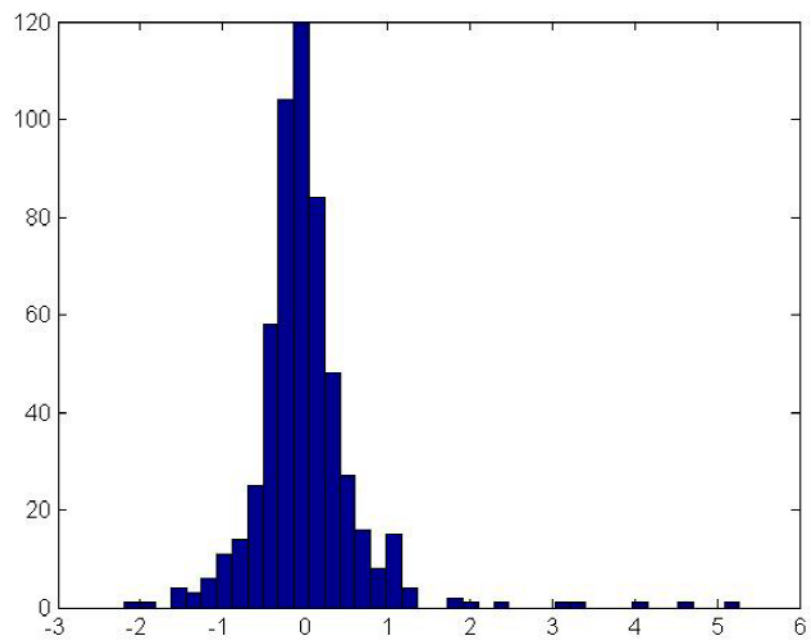
Histogrammi 6



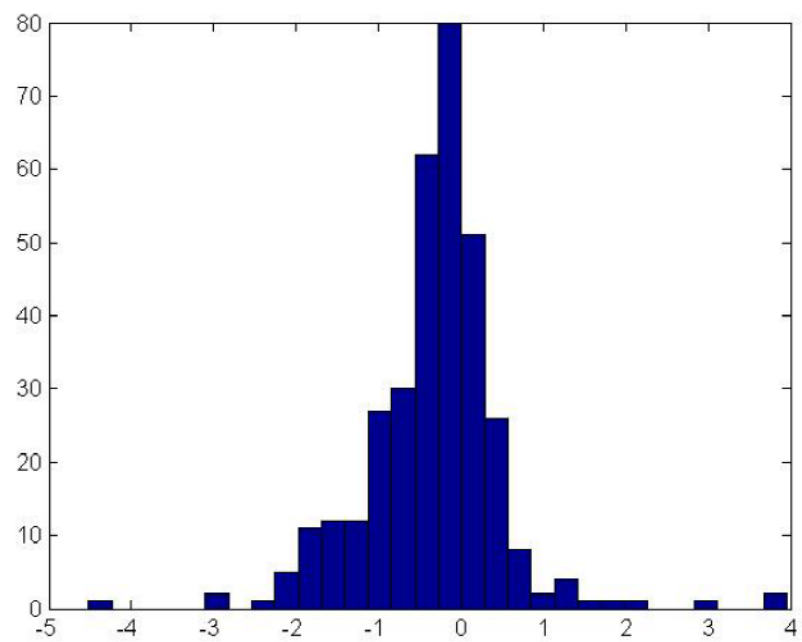
Histogrammi 7



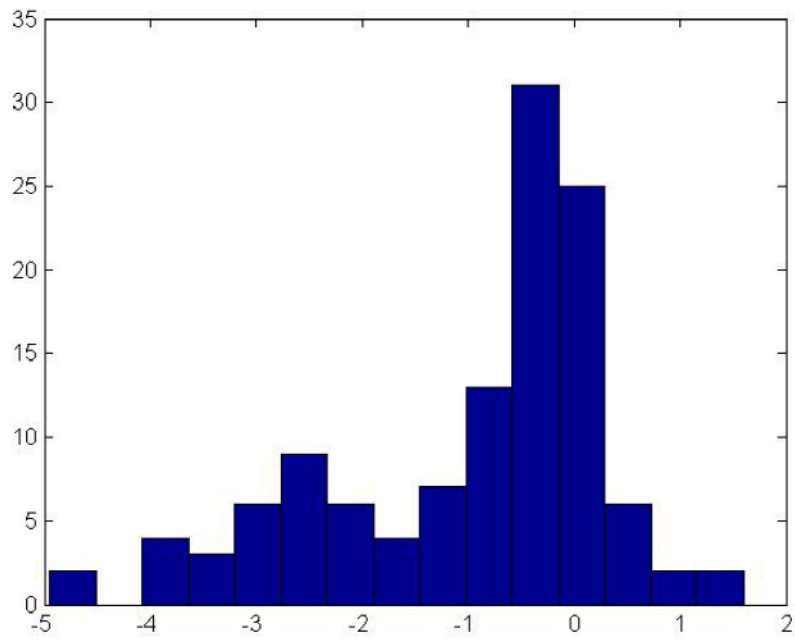
Histogrammi 8



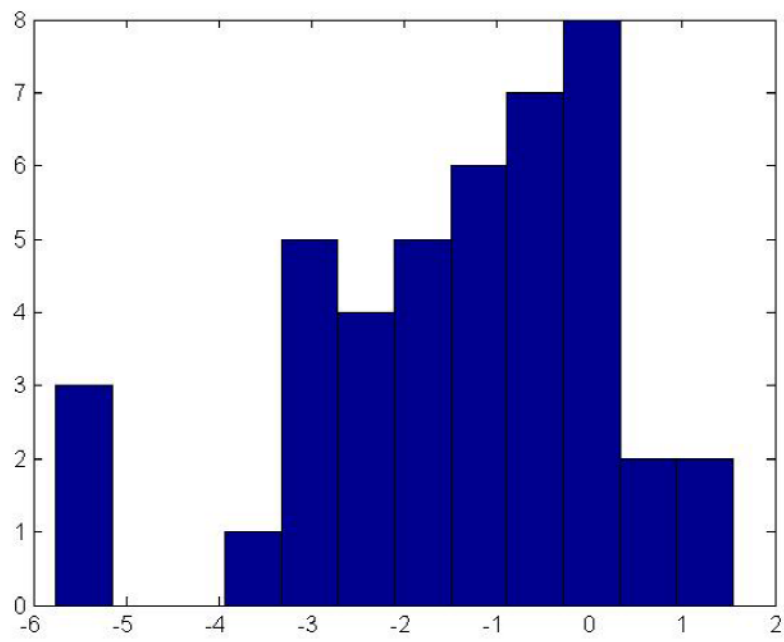
Histogrammi 9



Histogrammi 10

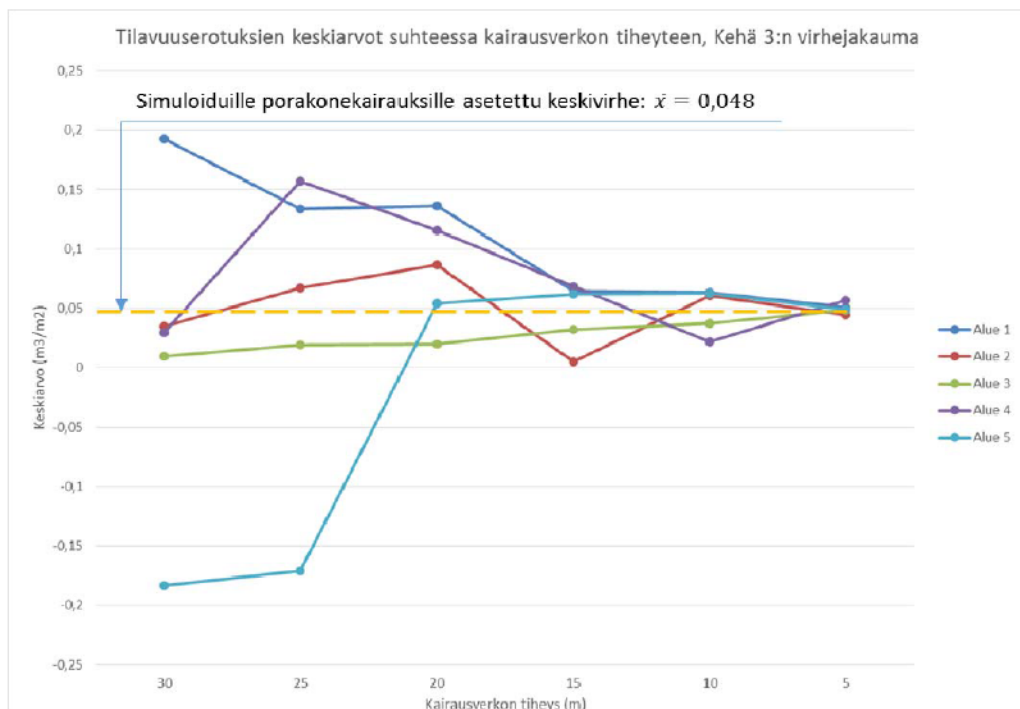
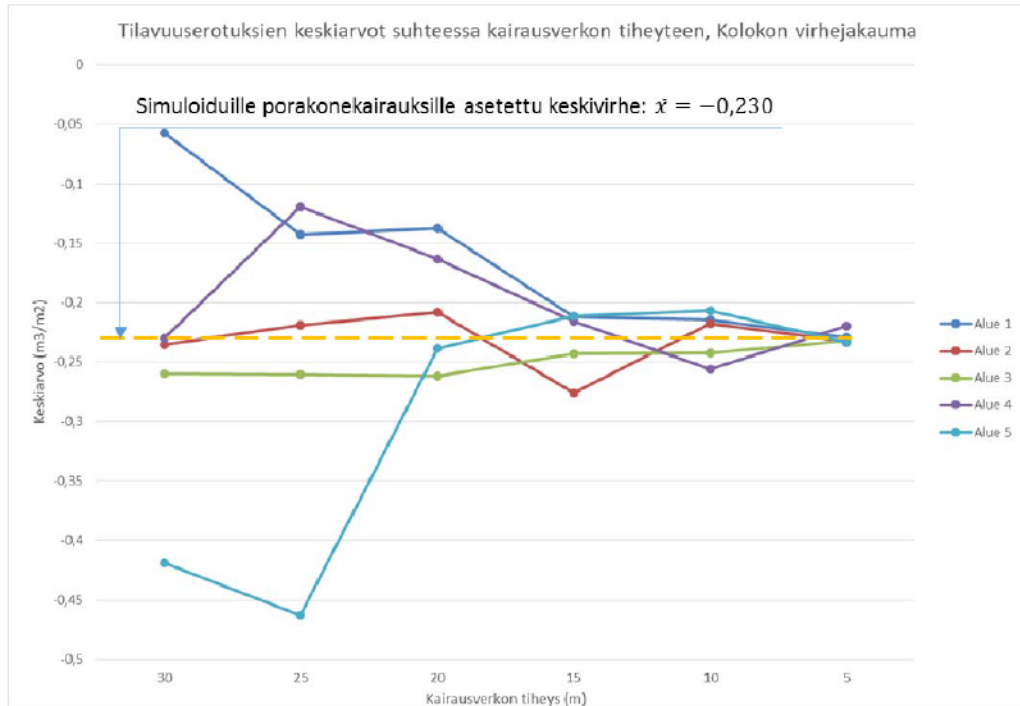


Histogrammi 11

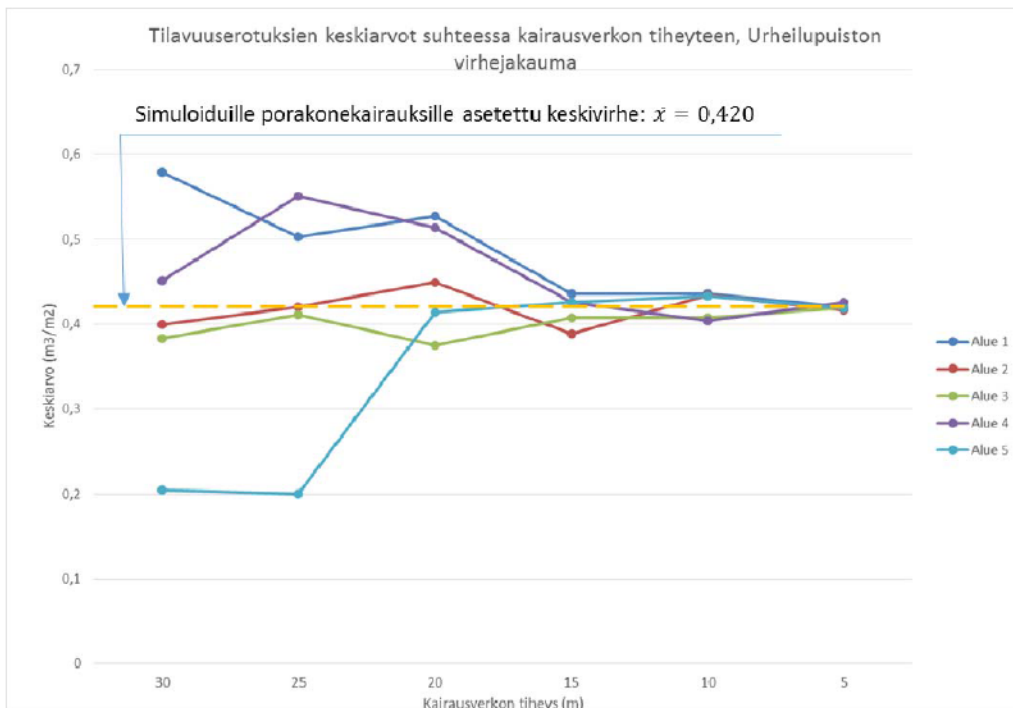
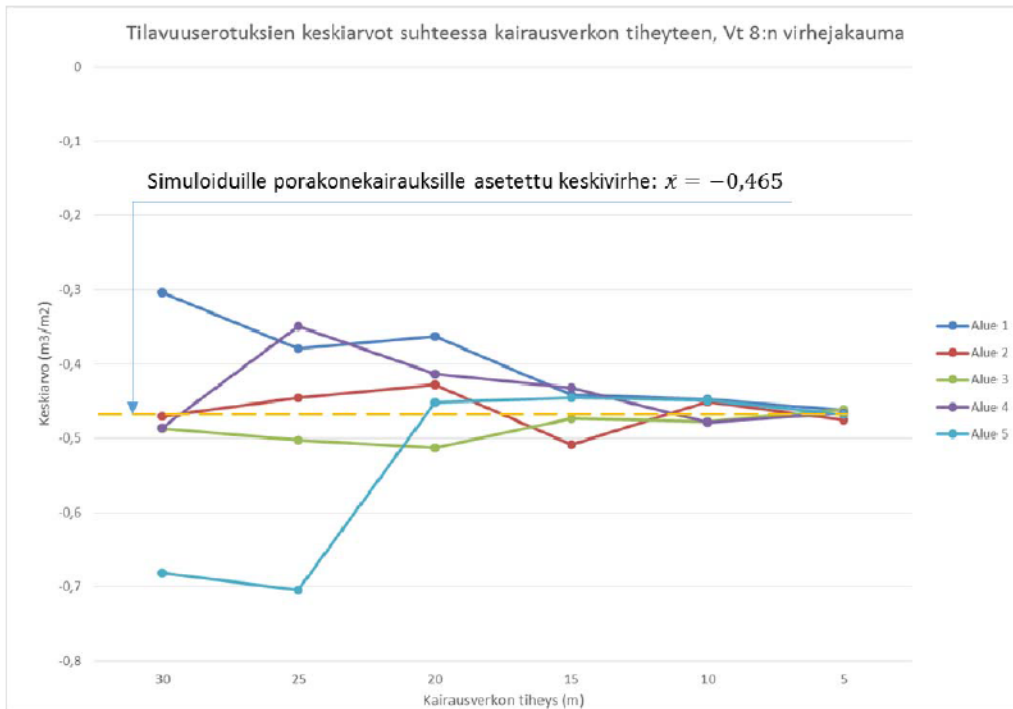


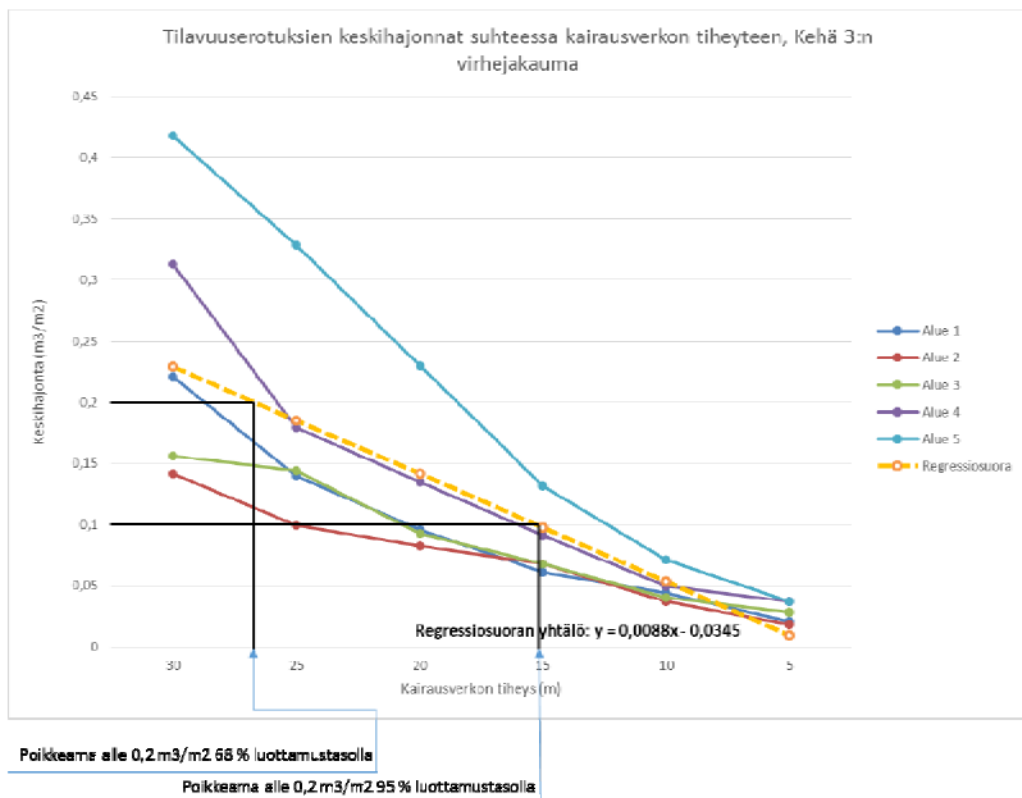
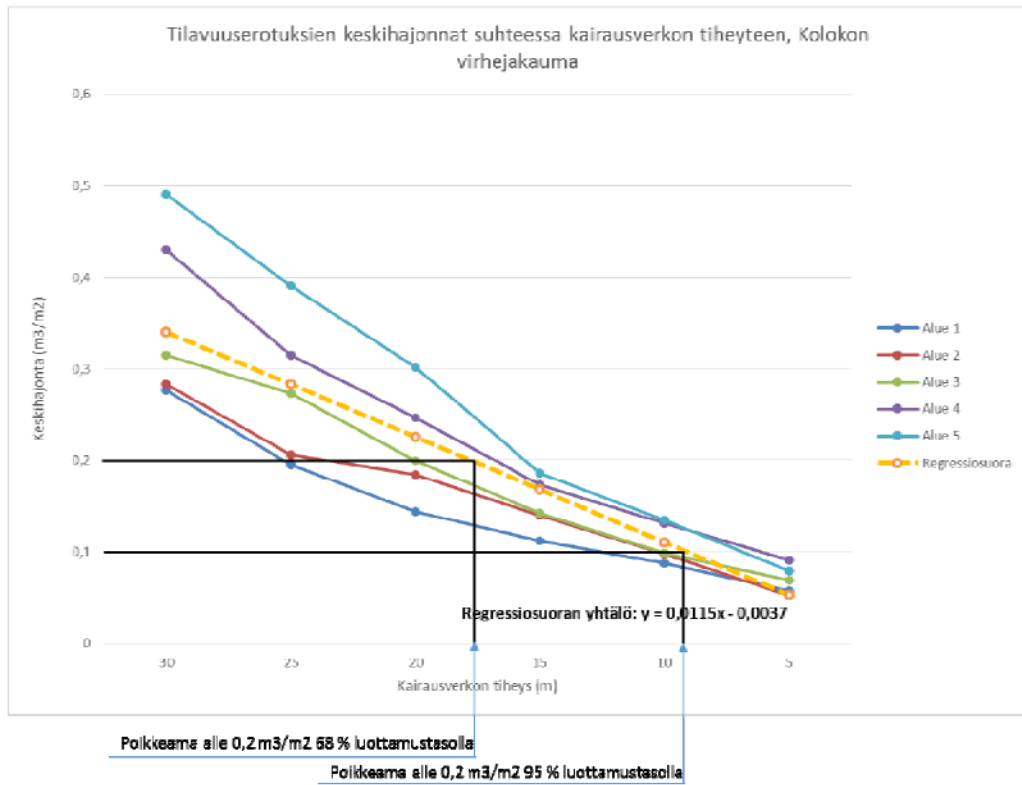
Histogrammi 12

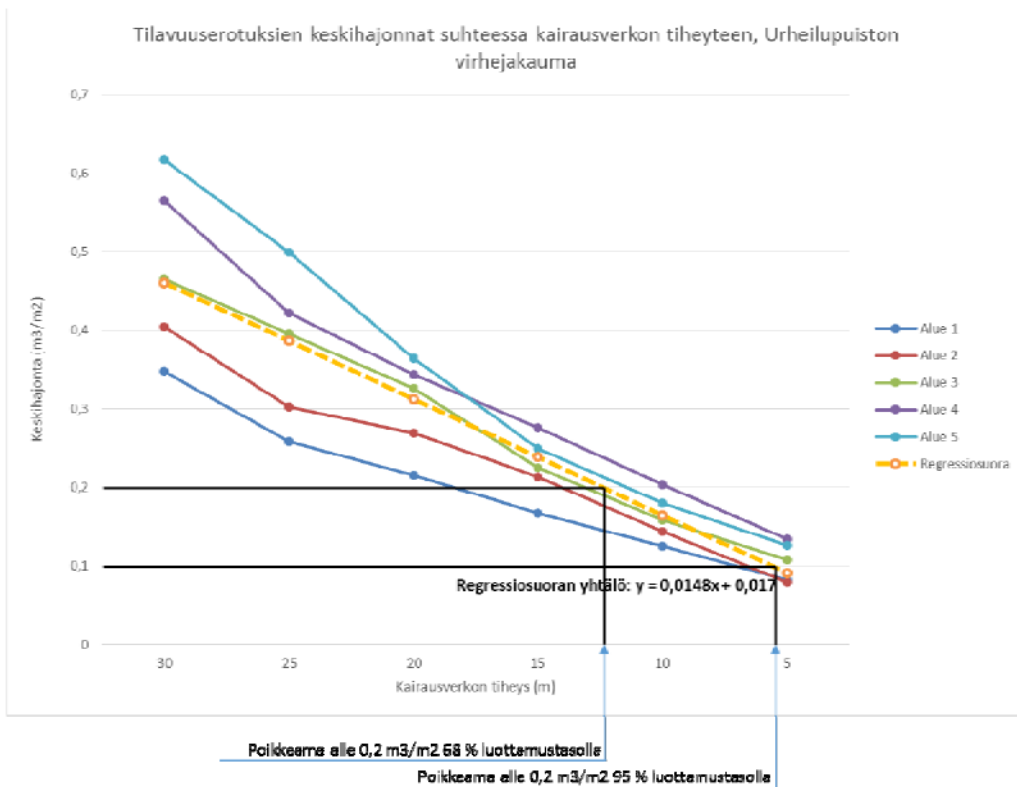
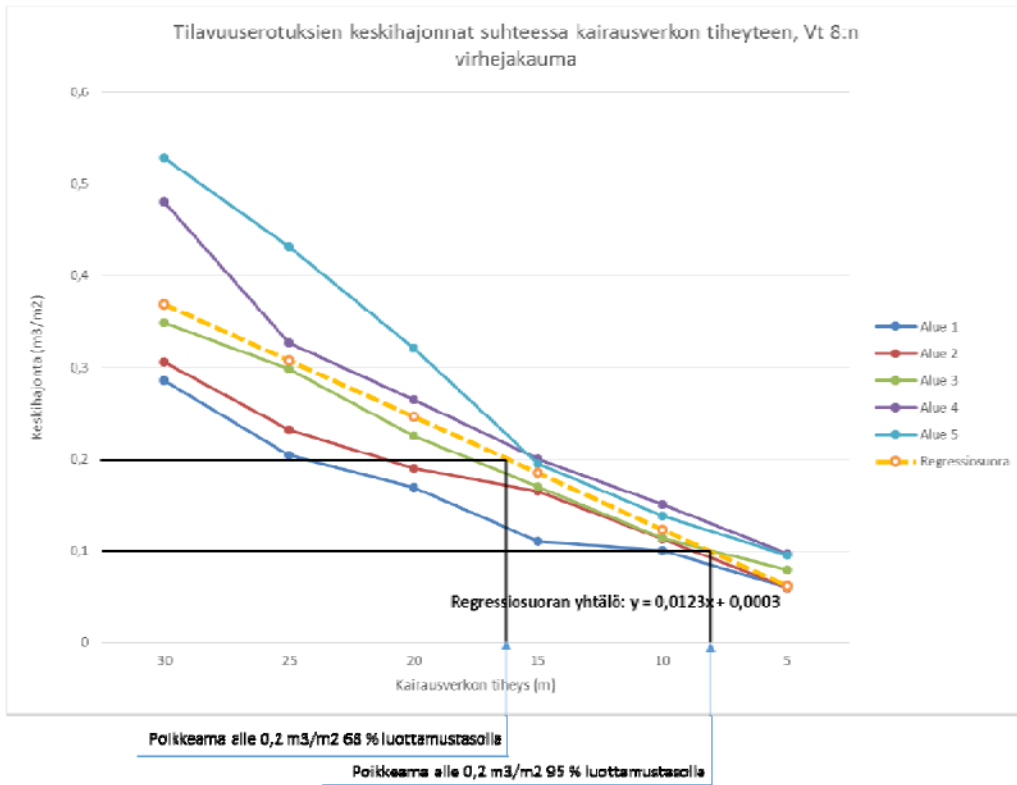
Analyysin toisen vaiheen tulokset: Virhefunktiona tilavuuserot



Liite 4 / 2 (4)

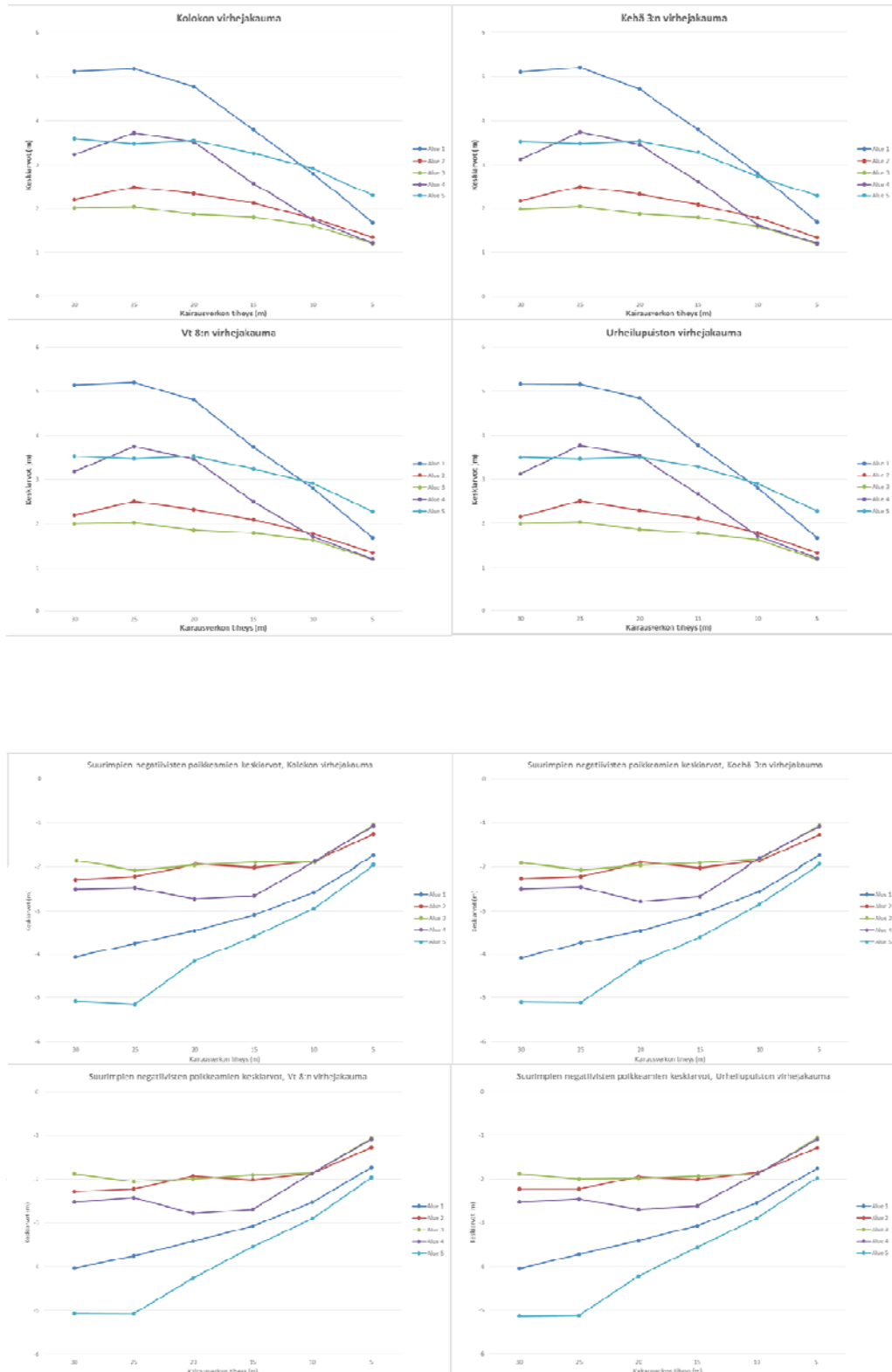






Analyysin toisen vaiheen tulokset: Virhefunktiona suurimmat poikkeamat

Poikkeamatarkastelu aluekohtaisesti:



Poikkeamatarkastelu kolmiokohtaisesti, kohteen Koloko virhejakauma:

