



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

**POHJATUTKIMUSMENETELMÄT JA NIIDEN
POTENTIAALI SUOMESSA**

Matti Saari

PROSESSITEKNIikka

Kandidaatintyö

Marraskuu 2017



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

**POHJATUTKIMUSMENETELMÄT JA NIIDEN
POTENTIAALI SUOMESSA**

Matti Saari

Ohjaaja: Anne Tuomela

PROSESSITEKNIikka

Kandidaatintyö

Marraskuu 2017

TIIVISTELMÄ

OPINNÄYTETYÖSTÄ Oulun yliopisto Teknillinen tiedekunta

Koulutusohjelma (kandidaatintyö, diplomityö) Prosessitekniikan koulutusohjelma		Pääaineopintojen ala (lisensiaatintyö)	
Tekijä Saari, Matti		Työn ohjaaja yliopistolla Tuomela A	
Työn nimi Pohjatutkimusmenetelmät ja niiden potentiaali Suomessa			
Opintosuunta	Työn laji Kandinaatintyö	Aika Marraskuu 2017	Sivumäärä 29 s.
<p>Tiivistelmä</p> <p>Tässä työssä tutustutaan kirjallisuuskatsauksen avulla Suomessa käytettäviin pohjatutkimusmenetelmiin. Tietoa on kerätty sekä niiden suorittamisesta että potentiaalista erilaisissa käyttötarkoituksissa. Menetelmistä syvällisimmin on perehdytty CPTU-kairaukseen sekä 3D-suunnittelun ja -järjestelmien käyttöön geoteknisessä suunnittelussa ja osana pohjatutkimuksia.</p> <p>Työ osoitti, että Suomessa infra- ja rakennusalalla ollaan siirtymässä vanhasta 2D-suunnittelusta kohti älykkäitä tietojärjestelmiä ja 3D-suunnittelua. Myös pohjatutkimusmenetelmät ovat kehittyneet ajan saatossa ja nykyään käytetään lähes yksinomaan erilaisia monitoimikairoja. Lisäksi uudentyypisillä sähköisillä puristinkairoilla voidaan saada luotettavampaa ja lähes jatkuvaa mittaustietoa, minkä avulla voidaan saada parempia arvioita maalajikerrosten määrittelyyn ja luokitteluun, sekä tietoa esimerkiksi kohteen huokosvedenpaineista</p> <p>Asiasanat: pohjatutkimukset, pohjatutkimusmenetelmät, CPTU-kairaus, 3D-suunnittelu</p>			
Muita tietoja			

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ	3
SISÄLLYSLUETTELO	4
1 Johdanto	5
2 Pohjatutkimukset	6
2.1 Yleistä	6
2.2 Pohjatutkimusmenetelmät	7
2.2.1 Maastokatselmus	7
2.2.2 Koekuoppa	7
2.2.3 Geofysikaaliset tutkimukset	7
2.2.4 Kairaukset	8
2.2.5 Näytteenotto	14
2.2.6 Pohjavesitutkimukset	14
2.3 Tutkimuskalustot	15
2.3.1 Kevyt kairausvaunu	16
2.3.2 Keskiraskas kairausvaunu	16
2.3.3 Raskas kairausvaunu	16
3 CPTU-kairaus	17
3.1 Yleistä	17
3.2 Kairausmenetelmien vertailuesimerkki	20
4 Tietomallien hyödyntäminen osana Geosuunnittelua	22
4.1 Yleistä	22
4.2 Koneohjaus pohjatutkimuksissa	23
4.3 Pohdinta	23
5 Yhteenveto	25
Lähteet	26

1 JOHDANTO

Pohjatutkimuksilla on tärkeä rooli infra- ja rakennusalan suunnittelussa. Tutkimuksissa selvitetään riittävässä tarkkuudessa maaperän ominaisuuksia, jotta erilaiset pohjarakennustyöt voidaan luotettavasti toteuttaa. Pohjatutkimusmenetelmistä on julkaistu erilaisia oppaita ja oppikirjoja kuten SFS-EN 1997-2 Eurokoodi 7. Geotekninen suunnittelu sekä SGY:n kairausoppaat, jotka on lueteltu tarkemmin liitteessä 1. Esimerkkejä oppikirjoista ovat Jääskeläinen 2011 Geotekniikan perusteet ja Rantamäki et al 1979 Geotekniikka.

Tässä työssä on kirjallisuuskatsauksen avulla kerätty tietoa eri pohjatutkimusmenetelmien suorittamisesta, tavoitteista ja minkälaiseen maaperään niitä kannattaa käyttää. Työssä valittu näkökulma on pohjatutkimusmenetelmien potentiaali Suomessa, joten eri pohjatutkimusmenetelmät esitetään, miten ne on Suomessa ohjeistettu tekemään. Suomen EU-jäsenyyden myötä myös pohjatutkimuksissa ollaan koko ajan siirtymässä yleisten eurooppalaisten standardien mukaiseen toimintaan, joten sitäkin aihetta sivutaan.

Yhtenä tavoitteena on käydä läpi viimeisimpiä tutkimuksia Suomessa uudemmissa pohjatutkimusmenetelmistä kuten sähköisestä puristinkairauksesta. Työn loppuosassa kerrotaan tietomallien ja uusimpien 3D-järjestelmien tulosta osaksi geoteknistä suunnittelua ja pohjatutkimuksia.

2 POHJATUTKIMUKSET

2.1 Yleistä

Pohjatutkimukset ovat maa- ja kallioperän tutkimuksia, joissa tavoitteena on selvittää maa- ja kallioperän rakennetta ja ominaisuuksia. Yleisesti selvitettäviä asioita ovat muun muassa pohjavesisuhteet, kalliopinnan asema ja rakenne sekä maaperän kerrosten järjestykset ja paksuudet sekä niiden ominaisuudet. (Rantamäki et al. 1979 s.257)

Suomessa liikenneviraston alaisuudessa käytettyjä menetelmäohjeita geoteknisissä tutkimuksissa ovat eurooppalaiset standardit ja spesifikaatiot. Muina ohjeina käytetään esimerkiksi Suomen Geoteknillisen Yhdistyksen (SGY) julkaisemia kairausoppaita (Liikennevirasto 2015 s.24). Eurooppalaiset standardit ja spesifikaatiot on mainittu Eurokoodi 1997:n osassa 2, joka toimii määräävänä lähtökohtana Liikenneviraston ohjeelle (Liikennevirasto 2015, s.8). Liikenneviraston ohjeessa määritellään, että rakenteiden suunnittelemiseksi on tehtävä pohjatutkimuksia sellaisella menetelmällä ja laajuudella, että ne voidaan toteuttaa Eurokoodin ja Liikenneviraston ohjeiden mukaisesti. Pohjatutkimusohjelmaa laadittaessa tulee kiinnittää huomiota kohteen geo- ja kallioteknisiin olosuhteisiin sekä siihen, miten rakentaminen vaikuttaa ympäristöön. Myös suunniteltavan kohteen ympäröivien rakenteiden vaikutus tulee pystyä määrittämään tai arvioimaan. Tutkimusmenetelmä valitaan ottaen huomioon sen soveltuvuus kohteen olosuhteisiin. (Liikennevirasto 10/2015 s.38)

Eurokoodissa SFS-EN 1997-2 kuvataan pohjatutkimuksen etenemisvaiheita, jotka sisältävät alustavat tutkimukset rakenteen sijoittamista ja alueen suunnittelua varten, suunnittelua palvelevat tutkimukset, sekä valvonta ja tarkkailu, jossa määritetään, että hankkeiden toteuttamisen aikana tulee tehdä tarvittaessa erilaisia tarkistuksia ja lisäkokeita (SFS-EN 1997-2 s.25). Yleisiä tarkistettavia asioita ovat muun muassa pohjaveden pinnan tason tai huokospainein vaihtelut, lähellä olevien rakenteiden, putkijohtojen tai maarakenteiden toiminta (SFS-EN 1997-2 s.33).

2.2 Pohjatutkimusmenetelmät

2.2.1 Maastokatselmus

Pohjatutkimukset aloitetaan yleensä suorittamalla silmävaraisiin havaintoihin perustuva maastotarkastelu, jonka perusteella arvioidaan tarvittavien pohjatutkimuksien laatu ja laajuus. Mukana voidaan hyödyntää myös erilaisia geologisia karttoja ja ilmakuvakarttoja. Katselmuksen tavoitteena on saada käsitystä maanpinnan maalajeista ja maaperämuodostumista, kivisyydestä ja lohkaraisuudesta, kuivista ja kosteista alueista, maaston topografiasta, alueella olevat tekemuodoista, kasvillisuudesta sekä rakennuksista ja rakenteista (Suomen geotekninen ry 1986 s.43). Katselmuksessa voidaan kaivaa myös koekuoppia kasvukerroksen alapuolella olevan maan laadun selvittämiseen. (Rantamäki et al 1979 s.257)

2.2.2 Koekuoppa

Koekuoppaa käytetään, kun halutaan saada luotettavaa tietoa maanpintaa lähellä olevista maakerroksista. Koekuopan kautta arvioidaan erilaiset maakerrokset ja maalajit, maan kivisyys ja lohkaraisuus, maan kaivuominaisuudet, kuopan seinämien pysyvyys, pohjaveden korkeustaso sekä kalliopinnan sijainti ja kaltevuus. Koekuopasta on mahdollista ottaa myös näytteitä tarkempia tutkimuksia varten. Koekuopan kaivu on merkittävä pohjatutkimusmenetelmä kivisessä ja kairauksessa vaikeasti läpäistävissä pintakerroksissa. Tällaisissa tapauksissa pohjatutkimuksia voidaan usein myös jatkaa koekupan pohjalta muilla tutkimusmenetelmillä. (Rantamäki et al. 1979 s.258)

2.2.3 Geofysikaaliset tutkimukset

Geofysikaaliset tutkimukset ovat soveliaita, kun tehdään laaja-alaisia tutkimuksia. Geofysikaalisilla tutkimuksilla on mahdollista saada alustavia tietoja kalliopinnan topografiasta, pohjavedenpinnan kaltevuudesta ja korkeustasosta sekä pehmeikköjen paksuudesta. (Suomen geotekniikan yhdistys r.y 1986 s.44)

Geofysikaalisiin tutkimusmenetelmiin kuuluvat muun muassa erilaiset luotaukset kuten maatutkaluotaus, sähköinen vastusluotaus, seisminen luotaus ja kaikuluotaus. Maatutkaluotaus on sähkömagneettinen tutkimusmenetelmä, jonka toiminta perustuu

radioaaltojen heijastuksen rekisteröintiin. Maaperän erot vapaan veden määrässä ja sähköjohtokyvyssä muodostavat tuloksissa näkyviä rajapintoja, joista kerrosrajat voidaan arvioida. Autoon liitettynä maatulkuotain pystyy mittaamaan koko ajan alla olevaa maata ja saada jatkuvan esityksen vallitsevasta tilanteesta. (Jääskeläinen 2011 s. 284 – 285)

Sähköinen vastusluotaus perustuu maaperän sähköjohtamisen vaihteluun. Tuloksena saadaan tietoa eri kohtien sähköisestä vastuksesta, joka riippuu esimerkiksi huokosveden määrästä ja suolapitoisuudesta. Tiedoilla saadaan hahmotusta maaperän vesimäärästä eri kohdilla. Kun tiedetään yleisesti, minkälaisia kosteusprosentteja eri maalajeilla esiintyy, saadaan hahmoteltua kuvaa maaperätilanteesta. Myös sähköisellä vastusluotauksella voidaan saada jatkuvia esityksiä maaperästä. (Jääskeläinen 2011 s.285 – 286)

Seisminen luotaus perustuu paineaaltojen erilaiseen etenemisnopeuteen kallioperässä ja eri maalajeissa. Seismissä luotauksessa seismografi rekisteröi paineaaltojen saapumiseen kuluneet ajat, jolloin maaperän kerrosten rajat ja kalliopohjan syvyys voidaan laskea. Täryaallon aiheuttajana voidaan käyttää esimerkiksi pientä räjäytyspanosta. Menetelmällä saadaan yleispiirteisiä käsityksiä vallitsevista olosuhteista tarkempia tutkimuksia varten. (Jääskeläinen 2011 s.286 – 287)

Kaikuluotaus perustuu ääni-impulssin heijastumiseen takaisin sen kohdatessa erilaisen aineen. Heijastuneen impulssin heijastukseen kuluttaman ajan perusteella laite saa tiedon poikkeavan aineen rajapinnasta. Kaikuluotausta käytetään pääasiassa vesistötutkimuksissa. (Jääskeläinen 2011 s.287)

2.2.4 Kairaukset

Kairauksissa maaperään tungetaan kairaustankoa tai -putkea avuksi käyttäen kairan kärkikappaletta. Tärkeimpänä tavoitteena on yleensä saada tietoa kärkikappaleeseen kohdistuvasta kairausvastustuksesta, jonka vaihtelusta voidaan tehdä johtopäätöksiä kairattavien maakerrosten tiivyydestä, laadusta, lujuudesta ja kantavuudesta. Kairausmenetelmät eroavat pääsääntöisesti kairojen rakenteen ja kairan maahantunkemismenetelmien osalta. Kairausmenetelmät voivat olla staattisia,

dynaamisia tai näiden yhdistelmiä. Staattisissa menetelmissä kairan tunkeutuminen maahan saadaan aikaan hyödyntämällä painoja tai hydraulista puristinta. Dynaamisissa menetelmissä kaira saadaan tungettua maahan iskemällä ja täryttämällä. (Rantamäki et al 1979 s.258)

Kairausmenetelmiä ovat esimerkiksi painokairaus, heijarikairaus, puristinkairaus, puristin-heijarikairaus, siipikairaus, tärykairaus, porakonekairaus ja SPT-kairaus. (Jääskeläinen 2011 s.245). Painokairaus on yleisin ja vieläkin käytössä oleva kairausmenetelmä Suomessa. Viime vuosina yleistynyt puristin-heijarikairaus on kuitenkin syrjäyttämässä perinteisen painokairauksen asemaa yleisimpänä kairausmenetelmänä. Puristin-heijarikairauksessa saatavia etuja painokairaukseen nähden on tiheämmästä havainnoinnista johtuva tarkempi maalajirajaus ja heijarikairausvaiheen avulla saatu arvio paalupituuksista. (Mäkinen 2017 s.12) Taulukosta 1 on esitetty erilaisten kairausmenetelmien suositeltuja käyttötarkoituksia. Taulukosta nähdään esimerkiksi, että siipikairaus on taulukon kairausmenetelmistä ainoa, joka soveltuu maakerrosten lujuuden määrittämiseen tarkasti.

Taulukko 1. Kairausmenetelmien soveltuvuus erilaisiin käyttötarkoituksiin (Mukaihen Suomen geotekninen yhdistys ry. 1986, s.45)

	Kairausmenetelmä	Painokairaus	Heijarikairaus	Puristinkairaus	Puristin-heijarikairaus	Siipikairaus	Tärykairaus	Porakonekairaus
Selvitettävä seikka								
Kallion pinnan sijainti		O	O		O		O	X
Tiiviin pohjakerroksen sijainti		X	X	O	X		X	O
Tiiveydeltään erilaisten maakerrosten rajat		X	O	X	X			
Maakerrosten lujuus likimäärin		O	O	X	X			
Maakerrosten lujuus tarkasti						X		
Maakerrosten tiiveys likimäärin		X	X	X	X			
Maalajiryhmä		X	O	X	X		O	
Lyöntipaalupituuden arviointi		O	X	O	X		O	O
Kairausmenetelmien pääasiallisin käyttötarkoitus								X
Kairausmenetelmien toissijainen käyttötarkoitus tai selvitetävän seikan selvitystarkkuus heikko								O

Painokairauksessa ruuvimaisesti muotoiltua, kärjestään teroitettua kärkikappaletta työnnetään maahan korkeintaan 1 kN voimalla tarvittaessa kairaa kiertäen (Rantamäki et al. 1979 s.259). Painokairauksesta tehdään kairausdiagrammi, johon merkitään eri syvyyksissä tarvittu kairan kuormitus ja kairausvastus. Tulokset ilmoitetaan puolikierrosten määränä kairan tunkeutumisen 20cm kohti. Diagrammissa on myös ilmoitettu eri maakerrosten maalajit symbolimerkinnoin. Tuloksia tutkimalla voidaan määrittää eri kairausvastuksen omaavien maakerrosten rajat ja kerrospaksuudet. (Rantamäki et al. 1979 s.261)

Painokairausta käytetään pehmeiköltä lähtien aina keskitiiviisiin moreeneihin asti (Jääskeläinen 2011 s.246). Kairaustulokset ovat parhaiten tulkittavissa hiekassa, sorassa

ja löyhässä moreenissa. Tiiviissä moreenissa tai sorassa kairaa joudutaan lyömään, jolloin tuloksia on vaikeampi tulkita (Jääskeläinen 2011 s.250). Myös savessa painokairaustuloksia voidaan pitää osittain epäluotettavina eikä liejukerroksia voida päätellä kairaustuloksista, sillä kuivakuorikerrosten aiheuttamat vastukset savessa synnyttävät huomattavia vääristyksiä kairaustuloksiin (Rantamäki et al. 1979 s.261). Tänä päivänä painokairaus tehdään lähes poikkeuksetta telaketjuin liikkuvilla monitoimikairauskoneilla aiempien käsikäyttöisten ja polttomoottorien sekä hydraulikkayksiköillä toimivien laitteiden sijaan. (Jääskeläinen 2011 s.247)

Heijarikairaus on esimerkki dynaamisesta kairausmenetelmästä, jossa kairan tunkeutuminen maahan tapahtuu heijarin lyömänä. Kairausvastus lasketaan kairan maahantunkeutumisen syvyysyksikköä kohden tarvittavista heijarilyöntien määrästä. Heijarikaira työntyy tiiviisiin maakerroksiin painokairaa hieman paremmin. Heijarikairausvastuksen avulla voidaan arvioida maakerroksen suhteellista tiiviyttä karkearakenteisissa maalajeissa sekä moreenimaalajeissa. Heijarikairausta käytetään erityisesti kivettömien maakerrosten läpi lyötävien tukipaalupituuden määrittämiseen. Heijarikairaustuloksia voidaan myös päätellä maan suhteellinen kaivuluokka. Maalajien kerrosrajoja määriteltäessä heijarikairaus ei anna yhtä luotettavia tuloksia kuin painokairaus, eikä heijarikairauksella saa selkeää kuvaa kerrosominaisuuksista pehmeissä hienorakenteisissa maalajeissa. Maapohjan kantavuutta ei myöskään voida arvioida pelkästään heijarikairaustuloksia käyttämällä. (Rantamäki et al. 1979 s.263 – 264) Myös heijarikairaus suoritetaan nykyisin melkein yksinomaan monitoimikairoilla (Jääskeläinen 2011 s.254).

Puristinkairauksessa (CPT-kairaus) standardisoitua kärkikappaletta puristetaan vakionopeudella maahan mitaten samalla kullakin syvyydellä tarvittavia voimia. Mittauksessa saadut voimat antavat tietoa maan ominaisuuksista. Puristinkairalla saadaan maaperästä tarkempaa tietoa kuin painokairalla ja sitä pyritään kehittämään koko ajan, jotta saataisiin yhä laadukkaampia pohjatutkimustuloksia. Puristinkairan käyttöolosuhteet ovat kivettömät ja pehmeät maat eikä se sovellu Suomessa soraa karkeampiin maihin. Ohuiden maakerrosten mittaustulosten tulkinnassa voi olla vaikeuksia, sillä kärkivastukseen vaikuttaa niin mittakohdan ala- kuin yläpuolinen maa. Puristinkairatyyppejä on olemassa useampia. Aikaisemmin käytössä olivat käsi- ja

moottorivoimalla toimivia mekaanisia puristinkairoja. Nykyisin puristinkairat ovat pääosin erilaisia yksikköjä, jotka liitetään monitoimikairoihin tai muihin vastaaviin koneisiin. Mittauksissa käytetään hyväksi sähkölaitteita ja tietotekniikkaa. Mikäli kairan kärkiosasta mitataan myös huokosvesipainetta, kutsutaan laitetta CPTU-puristinkairaksi. (Jääskeläinen 2011 s.263 – 264)

Puristin-heijarikairauksessa puristin- ja heijarikairauksien ominaisuuksia on laitettu yhteen. Koska puristinkaira soveltuu hyvin hienojakoisille kivettömille maille ja heijarikaira on puolestaan paras Suomessa käytettävistä kairoista keskittiiviiseen ja tiiviiseen maahan, toimii puristin-heijarikaira hyvin koko maaperäasteikolla. Puristin-heijarikairauksessa kairataan aluksi puristinkairauksella, kunnes on saavutettu suurin käytettävissä oleva puristusvoima. Tämän jälkeen siirrytään heijarikairaukseen. Heijarikairauksesta voidaan aina tarvittaessa vaihtaa takaisin puristuskairaukseen, mikäli lyöntien määrä 20 cm kohti laskee viiteen tai alle yli 0,4 metrin matkalla. Puristin-heijarikairaus suoritetaan yleensä järeillä monitoimikairoilla. Mikäli puristusvoima halutaan nostaa työn aikana 30 kN:iin, tarvitaan vähintään keskiraskaaseen luokkaan kuuluvaa monitoimikairaa, joka painaa yli 4000 kg. 15 kN:n maksimipuristusvoimaan pyrittäessäkin koneen painon tulisi olla yli 2000 kg. (Jääskeläinen 2011 s.267 - 268)

Siipikairaus on merkittävä kairausmenetelmä, kun halutaan selvittää maaperän välitön leikkauslujuus. Siipikairauksessa maahan upotetaan kairatangon ja sitä ympäröivän putken avulla siiveke. Kaira painetaan maan kuivakuorikerroksen läpi lapio- tai kierrekairalla tehtyyn reikään. Tutkimussyvyydessä siiveke työnnetään ulos suojakotelostaan käyttämällä siiven jatkeena olevaa kairaustankoa. Siipeä aletaan kiertää maan sisässä akselinsa ympäri kairatangon päähän kiinnitettyllä vääntövarrella. Tarvittava vääntömomentti havaitaan laitteen momenttimittarista tai piirturimittarista. Suurimmasta mitatusta vääntömomentista voidaan laskea häiriintymättömän maan leikkauslujuus. Vääntömomentti mitataan myös häiriintyneestä maaperästä. Mittauksia toistetaan tavallisesti noin 0,5 mm syvyysvälein. Kairauspöytäkirjaan merkattavia tuloksia ovat tiedot tutkimussyvydestä, siiven kiertoon tarvitsema aika, siiven kiertokulma sekä kiertoon tarvittu vääntömomentti. Vääntömomentista voidaan laskea kalibrointitaukoilla tai laskentakaavoilla leikkauslujuudet. Siipikairausta soveltuu

käytettäväksi vain hienorakenteisilla maalajeilla sekä eräillä eloperäisillä maalajeilla. (Rantamäki et al. 1979 s.269 – 270)

Tärykairauksessa tavallisesti käytettäviä painokairan tankoja työnnetään maahan kevyen polttomoottorikäyttöisen porakoneen avulla täryttäen. Kairauksessa saadaan tietoa yleensä vain suurista muutoksista kairan painumisnopeudesta, joten kairauksella voidaan tehdä alustavia päätelmiä maakerrosrajoista. Tärykairaus onkin käyttökelpoinen menetelmä, kun halutaan saada nopeasti tietoa, esiintyykö kalliota tietyn kaivutason alapuolella tehtäessä esimerkiksi tieleikkausten ja johtolinjojen pohjatutkimuksia. Se ei kuitenkaan ole täysin luotettava menetelmä kalliopinnan sijainnin määrittämiseksi. (Rantamäki et al. 1979 s.262)

Tärykairauksen käyttöä on vähentänyt porakonekairaus, jolla saadaan pistemäinen, luotettava tieto kalliopinnasta sekä maatutka, jolla saadaan nopeasti ja halvalla viivamainen alustava tieto kalliopinnasta. Tärykairan etuna on kuitenkin helppo kuljetettavuus vaikeassa maastossa sekä vähäiset ympäristövahingot. (Tielaitos 1995 s.23)

Porakonekairaus on menetelmänä selvästi hitaampi tärykairaukseen verrattuna sekä kalustoltaan kalliimpaa ja järeämpää (P. Kamppari 2009 s.6). Porakonekairan voimanlähteenä on erillinen paineilmakompressori. Maakerrosta poratessa maaputki ja kalliopora porautuvat maahan yhdessä. Kun vastaan tulee kallio- tai irtolohkare, maaputki jää paikalleen ja kalliopora jatkaa porautumista. Mikäli kallio osoittautuu lohkariksi, porausta jatketaan myös maaputkella lohkareen läpi. Tärkeimmät käyttökohteet porakonekairaukselle ovat aikaisemmin mainittu kalliopinnan luotettava määrittäminen, näytteenottokairaukset, putkien asennus pohjavesihavaintoja varten sekä suoja-putken asennus muita kaitauksia varten. (Rantamäki et al. 1979 s.267)

SPT-kairaus on Suomessa harvinainen, mutta maailmalla yleinen kairausmenetelmä. Siinä kairausreiän pohjalta lyödään 63,5 kg:n painolla 0,76 metrin korkeudelta maahan paksuseinäistä näytteenotinta kolme kertaa 150 mm matkan. Kahden jälkimmäisimmän iskun yhteenlaskettua summaa sanotaan SPT-vastukseksi N. Luku N siis kuvaa tarvittavien iskujen määrää 0,3 metriä kohden. Mittaukset tehdään noin 1 – 2 metrin välein. Mittauksissa saadaan soraisia maita lukuun ottamatta aina häiriintynyt näyte

tutkittavaksi. Tutkimukset täytyy suorittaa työputken sisällä. Maailmalla on paljon erilaisia laitteistoja työputkien upotukseen, tyhjennykseen ja mittaukseen. Eri laitteistojen tulokset tällöin myös vaihtelevat keskenään. (Jääskeläinen 2011 s.270)

2.2.5 Näytteenotto

Maakerrosten ominaisuuksien selvittämistä varten, maakerroksista otetaan näytteitä joko häiriintyneinä tai häiriintymättöminä. Häiriintyneissä näytteissä maalajin sisäinen rakenne on murtunut, mutta maalajin aineosat ovat kuitenkin alkuperäisessä suhteessa. Häiriintyneitä näytteitä otetaan esimerkiksi koekupasta tai käyttämällä näytteiden ottoon suunniteltuja kairoja kuten kierre- ja lapiokairaa, kannukairaa, pienoismäntäkairaa, avointa putkikairaa tai heijarikairan näytteenotinta. Häiriintyneestä näytteestä voidaan määrittää maalajin humuspitoisuus, rakeisuus ja vesipitoisuus, mikäli näyte sijaitsee pohjavesitason yläpuolella. Häiriintymättömässä näytteessä maalajin rakenne on täysin ehjä, joskin alkuperäinen jännitystila on muuttunut. Häiriintymättömien näytteiden ottamiselle koekuopan lisäksi voidaan käyttää erilaisia mäntäkairoja. (Rantamäki et al. 1979 s.274 – 277) Maanäytteet yleensä tutkitaan silmämääräisten havaintojen lisäksi erilaisissa laboratoriotutkimuksissa, jolloin maalajit voidaan määrittää luotettavasti (Rantamäki et al. 1979 s.280).

2.2.6 Pohjavesitutkimukset

Pohjavesi vaikuttaa keskeisesti pohjarakentamiseen, joten pohjatutkimuksissa tehdään lähes aina pohjaveteen liittyviä havaintoja ja mittauksia. Pohjavesitutkimuksissa selvitettäviä asioita ovat muun muassa pohjavedenpinnan syvyys, pohjavesipinnan vaihtelut, huokosvedenpaine, pohjaveden laatu sekä pohjaveden virtausmäärät. Pohjavedenpinnan korkeushavaintoja voidaan tehdä esimerkiksi kairaus- ja näytteenottorei'istä, avovesistöistä ja kaivoista sekä varta vasten tehdyistä pohjavesiputkista. Mikäli maa on huonosti vettä läpäisevää voi kairaus- tai näytteenottorei'istä saatu tulos olla virheellinen, sillä reiässä oleva vesi saattaa olla tiiviissä maassa pinta- tai vajovettä. Kun halutaan tietoa erilaisten maarakenteiden, kuten penkereiden, maapatojen, luiskien ym. vakavuudesta tulee tietää hienojakoisessa maakerroksessa vallitseva huokosvedenpaine. Huokosvedenpaineen mittauksissa käytettävissä laitteissa on yleensä vahvarakenteinen kärkiosa ja huokoskiviosa, jonka

kautta huokosvesi pääsee siirtymään suojaputken sisällä olevaan mittausputkeen. Mittari osoittaa vedenpinnan korkeushavaintona tai monometrillä. (Rantamäki et al. 1979 s.280 - 281)

Liitteessä 2 olevassa taulukossa on esitetty laajemmin eri kenttätutkimusmenetelmien soveltuvuutta erilaisten tulosten arvioimiseen. Taulukko perustuu standardissa SFS-EN 177-2 esitettyyn taulukkoon. Taulukosta havaitaan esimerkiksi, että Suomessa harvinaisella SPT-kairauksella voidaan arvioida rakeisuutta ja vesipitoisuutta, mikä muilla kairoilla ei onnistu. SPT-kairauksella ei päästä kuitenkaan samaan tarkkuuteen kuin näytteenotoilla. Taulukossa olevien näytteenottomenetelmien luokat on määritelty standardissa: SFS-EN ISO 22475-1: Geotekninen tutkimus ja koestus. Näytteenottomenetelmät ja pohjavesimittaukset. Luokan A näytteenottomenetelmällä voidaan ottaa laatuluokan 1 – 5 näytteitä, luokan B näytteenottomenetelmällä laatuluokan 3 – 5 näytteitä ja luokan C näytteenottomenetelmällä vain laatuluokan 5 näytteitä.

2.3 Tutkimuskalustot

Suomessa tehtäviin pohjatutkimuksiin soveltuvaa pohjatutkimuskalustoa valmistavat muun muassa suomalainen Geomachine Oy ja ruotsalainen Ingenjörfirman. Tarjolla on kevyitä, keskiraskaita ja raskaita kairausvaunuja. Tutkimuskalustojen kehityksessä on tapahtunut suurta edistystä esimerkiksi menetelmien monipuolisuuden ja automaattisen tallennusjärjestelmän osalta. Kairauskoneissa on elektroniset tai hydrauliset anturit kairausparametrien keruuseen sekä automaattinen tiedonkeruujärjestelmä. Perinteiset käsikairauskalustot ovat saaneet väistyä kairauskoneiden alta. Kairauskoneiden paremman tehon ja monipuolisempien näytteenottimien avulla pystytään ottamaan syvemmilläkin laadukkaita näytteitä. Perinteisillä kairoilla on kuitenkin yhä käyttöä paikoissa, johon koneellisesti ei ole pääsyä. (Mäkinen 2017 s.27)

2.3.1 Kevyt kairausvaunu

Kevyet kairausvaunut painavat alle 2000 kg ja soveltuvat hyvin pehmeiköillä suoritettaviin tutkimuksiin. Koneet pystyvät kulkemaan maastossa jättämättä suuria jälkiä ja niitä voidaan kuljettaa myös lava-autoon kiinnitetyn trailerin avulla. Vaunut soveltuvat parhaiten painokairaukseen, siipikairaukseen ja C-luokan näytteenottoon sekä varauksin puristin-heijarikairauksiin. Tällöin kuitenkin kone on ankkuroitava johtuen sen kevyestä painosta. (Mäkinen 2017 s.27) C-luokan näytteenottomenetelmillä ei saada laatuluokkaa 5 parempia näytteitä, jolloin niillä ei voida selvittää kuin maakerrosten järjestys (Liikennevirasto 10/2015 Liite 9).

2.3.2 Keskiraskas kairausvaunu

Keskiraskaat kairausvaunut ovat yli 2500 kg ja alle 5000 kg painavia koneita ja ovat monipuolisuudeltaan erinomaisia. Niitä voidaan käyttää esimerkiksi paino- puristin-heijari- ja siipikairauksissa sekä erilaisissa näytteenotoissa. Riippuen koneesta myös alle 20 m syvyyteen ulottuvat porakonekairaukset ovat mahdollisia. Tällöin porakonekairauksen huuhteluun käytetään koneeseen asennettua vesipumppua tai erillistä vaunukompressoria. (Mäkinen 2017 s.28)

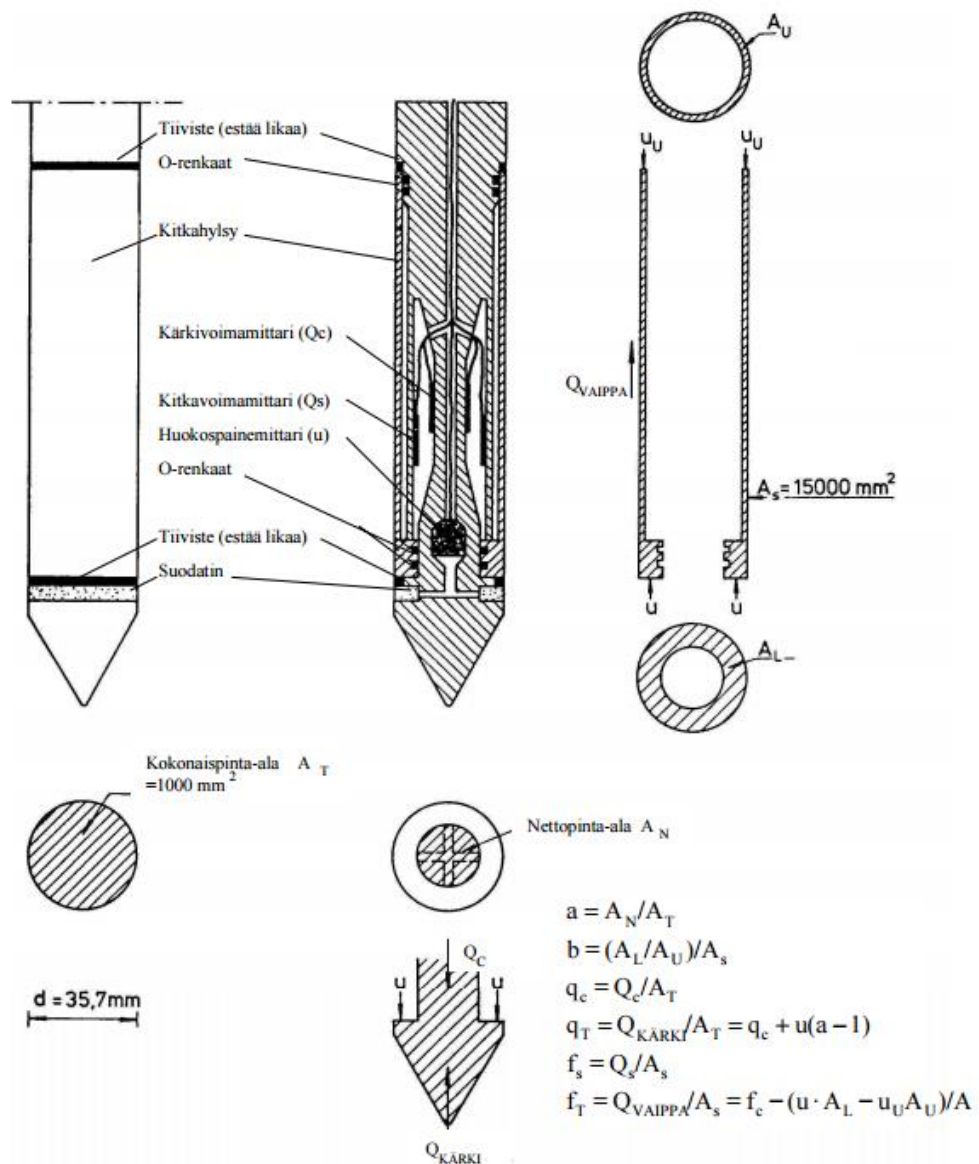
2.3.3 Raskas kairausvaunu

Raskaat kairausvaunut ovat yli 5000 kg painavia ja niillä voidaan tehdä syvätkin porakonekairaukset ja vaativimmatkin näytteenotot. Kevyempien kairausten teko raskailla kairausvaunuilla ei ole kovin taloudellista etenkin, jos kevyempikin vaunu on saatavilla. Lisäksi raskaat vaunut jättävät helposti jälkiä maastoon. Raskaat kairausvaunut ovat varustettuina yleensä 4 – 5 m³/min kompressoreilla, joten erillisiä vaunukompressoreita ei tarvita huuhteluun. Mikäli huuhteluun käytetään vettä, on koneissa myös vesipumput. (Mäkinen 2017 s.28)

3 CPTU-KAIRAUS

3.1 Yleistä

CPTU-kairaus on sähköisellä puristinkairalla suoritettava koemenetelmä, jossa on mukana mittauslaitteisto huokosvedenpaineen mittaukseen kairauksen aikana (SFS-EN 1997-2 s.39). Edellisessä luvussa pohjatutkimusmenetelmät käsiteltiin puristuskairausmenetelmää (CPT-koe) tarkemmin. CPT-kokeessa on tarkoitus maan lävistävän kairan kärkikartion tunkeutumisvastuksen ja kairan vaipan paikallisen kitkan määrittäminen. Puristinkairauskokeessa kairan kärki työnnetään maahan vakiotunkeutumisnopeudella, jonka aikana tunkeutumisvastus ja kitka mitataan (SFS-EN 1997-2 s.39). Tiehallinnon menetelmäkuvaus määrittää CPTU-kairauksen menetelmäksi, jossa maahan puristetaan vakionopeudella (20 mm/s) kärkikartiota, jonka poikkipinta-ala on 1000 mm² ja kärkikulma 60 astetta. Kuvassa 1 on esitetty periaatekuva CPTU-kairan kärkikappaleesta sekä osien sijainnista. (Tammirinne et al. 2001 s.6 - 7)



Kuva 1. CPTU-kairan geometrinen muoto sekä osien nimet (Tammirinne et al. 2001 s.7)

Eurokoodissa SFS-EN 1997-2 on määritelty, että CPTU-kokeen tuloksia käytetään pääasiassa maaprofilin määrittämiseen yhdessä muiden kairaus ja näytteenottomenetelmien kanssa. Vaihtoehtoinen käyttötapa tuloksille on geoteknisten parametrien kuten maan lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksien määrittäminen tai esimerkiksi paalujen pituuden määrittäminen. Kokeet tulee suorittaa niin, että ne noudattavat EN ISO 22476-1 standardia. Koetuloksien arvioinnista tulee huomioida mahdolliset

geotekniset vaikutukset kärkivastukseen. Esim. savissa arviointiin käytetään korjattua kärkivastusta huokosvedenpaineen vaikutusten takia. (SFS-EN 1997-2 s.39)

Liikennevirasto (2011) on käynyt läpi CPTU-kairauksen käytöstä pohjatutkimusmenetelmänä liikenneväylien suunnittelussa sekä kairauksen onnistumiseen vaikuttavia tekijöitä. CPTU-kairauskokeen soveltuvuus on hyvin laaja. Kokeita voidaan tehdä aina karkeaa soraa sisältävästä hiekasta hienorakenteisiin maalajeihin, kunhan kairan kärkeen kohdistuva vastus ei nouse liian suureksi esimerkiksi kivien johdosta.

Vastuksen nousemisen vuoksi CPTU-kairausta ei kannata käyttää ensimmäisenä tutkimusmenetelmänä, vaan kannattaa arvioida paino- tai puristinheijarikairauksella, mihin syvyyteen asti maa on kivetöntä ja CPTU:kairalle sopivaa (Tielaitos 1998 s.20). CPTU-kairausta voidaan käyttää siipikairauksen sijaan maan suljetun leikkauslujuuden määrittämiseen. CPTU-kokeiden tuloksia voidaan käyttää myös maaluokituksessa, maalajikerrosten määrittämisessä sekä hiekan suhteellisen tiiviyyden määrittämisessä. Suurimmat edut CPTU:n käytössä ovat lähes jatkuva mittaustieto, toistettavuus ja luotettavuus sekä kustannustehokkuus (Selänpää 2015 s.9). CPTU-kairauksen tuloksia ei voida kuitenkaan käyttää ainoana tekijänä maaluokituksessa. Luokitukseen tarvitaan myös lisätietoja, joita saadaan maanäytteistä, mitatuista lisäparametreista ja rinnakkaisista kairauksista (Tammirinne et al. 2001 s.21).

Kaksi merkittävää virhelähdettä CPTU-kairauksessa ovat kalibroinnin virheet ja nollakuormituksen aiheuttama virhe, jotka liittyvät voima-antureihin sekä voima-anturin mittaustuloksen muuttamiseen paineeksi kalibroitikertoimen avulla. Tutkimusten mukaan maa-aineen tunkeutumisella liitoksista kärkeen voi olla suuri merkitys kalibroitivirhettä tarkastellessa. Liitoksia tulee tarkkailla ja puhdistaa tarvittaessa. (Selänpää 2015 s.31)

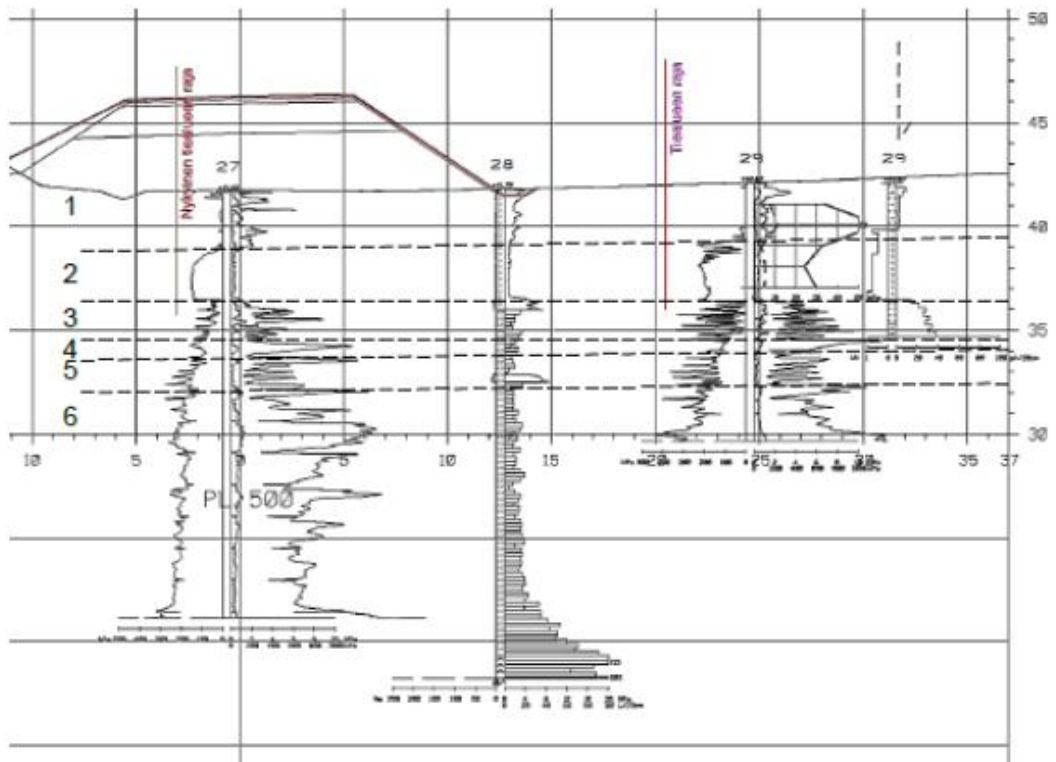
Tutkimuksia eri valmistajien kärkien tarkkuudesta on vähän saatavilla. Kuitenkin yleisesti, venymäliuskoihin perustuvat voima-anturit ovat tarjonneet parempaa tarkkuutta kuin pietosähköiseen ilmiöön perustuvat anturit tai paineanturit. NGI

(Nowegian Geotechnical Institute) osoitti 1980 luvun puolivälissä, että suurikapasiteettisella kärjellä voidaan saavuttaa yhtä hyvä toistettavuus ja mittaustarkkuus kairauksissa verrattuna herkkään kärkeen, jos kärki on tehty laadukkaista komponenteista, kalibroitu sopivalle mittausvälille sekä lämpötilan tasaantuminen on tehty huolella. Kärkien tarkkuus varsinkin herkän kärjen osalta on kuitenkin parantunut kehityksen myötä. (Selänpää 2015 s.31)

Tampereen teknillisen yliopiston maa- ja pohjarakenteiden yksikkö hankki syksyllä 2013 CPTUSR kairan. Laitteisto hankittiin Hollannista ja se sisältää CPTU-kärjen lisäksi seismisen moduulin, resistiivisen moduulin, alhaalta pyörittävän siipikairan sekä kairausvaunun. Vertailtaessa kairaustuloksia herkän ja suurikapasiteettisen kärjen välillä, tarkkuus eroaa etenkin pienillä kuormilla kärjen rakenteesta, resoluutiosta, kalibrintivirheestä ja mittaustarkkuudesta johtuen. Tuloksista voidaan päätellä, että suurikapasiteettisen kärjen mittaustulokset eivät ole kärkivastuksen osalta riittävät parametrien määrittämiseen. (Selänpää 2015 s.47)

3.2 Kairausmenetelmien vertailuesimerkki

Eero Juutin opinnäytetyössä (2014) käytiin läpi Kyröjoen sillan rakentamisen pohjatutkimuksia lähellä Kurikan ja Ilmajoen rajaa vuosina 2013 - 2014. Pohjatutkimuksissa käytettiin paino-, puristin-heijari-, CPTU-, porakone- ja siipikairauksia. Tulosten perusteella CPTU-kairaus oli kaikista tarkin menetelmä maalajirajojen määrittämiseen. Leikkauksesta (kuva 2) pisteessä 27 näkyy CPTU-kairauksen kuvaaja, pisteessä 28 puristin-heijarikairauksen kuvaaja ja pisteessä 29 on CPTU-, paino ja siipikairauksien kuvaaja.



Kuva 2. Kyröjen sillan pohjatutkimusten leikkauskuvaaja (Juuti 2014 s.55)

Puristin-heijarikairauksesta todettiin, että maalajien määrittäminen on vaikeaa kyseisen tapauksen hienojakoisessa maassa. Maalajien arvioinnissa painokairaus ja puristin-heijarikairauksen huomattiin toimivan samantarvoisesti, joskin puristin-heijarikairauksella päästiin syvemmälle. (Juuti 2014 s.55)

4 TIETOMALLIEN HYÖDYNTÄMINEN OSANA GEOSUUNNITTELUA

4.1 Yleistä

Tietomallilla tarkoitetaan rakennelman esittämistä tarvittavine tietoineen kolmiulotteisesti digitaalisessa muodossa. Tarkoituksena on ideaalitulanteessa, että yhden mallin avulla pystytään hallinnoimaan rakennelman elinkaarta aina suunnitellusta toteutukseen ja ylläpidosta elinkaaren loppuun asti. (Palkama 2015 s.10)

3D-suunnittelu on puolestaan tietokoneavusteista suunnittelua, jossa kohde suunnitellaan virtuaalisessa ympäristössä ja tarkastellaan kolmeulotteisesti tietokoneen näytöltä. 3D-suunnittelussa suunnittelutyöhön lisätään X- ja Y-koordinaattien lisäksi myös Z-koordinaatit. Perinteiseen tapaan kaksiulotteisesti suunniteltaessa digitaalinen malli siirretään maastoon merkkien avulla mittamiehen toimesta. Operaatio vaatii suurta työpanosta ja tarkkuutta mittamieheltä ja vie paljon aikaa. Käytettäessä 3D-järjestelmää suunnittelijalta saatu digitaalinen malli voidaan ladata esimerkiksi työkoneissa sijaitseviin ohjausjärjestelmiin, jolloin työkoneet osaavat säätää korot ja kallistukset automaattisesti tai kuljettajaa avustuen. (Palkama 2015 s.14 – 15)

3D-suunnittelu on rakennus- ja infra-alalla vallannut alaa, mutta vielä harva projekti on tehty kokonaan 3D-suunnittelulla (Palkama 2015 s.28). 3D-suunnittelu lisää suunnitelmien monimuotoisuutta mikä puolestaan tuo kustannuksia ja vaikuttaa suunnittelu-aikaan, kun esimerkiksi tiehankkeissa joudutaan suunnitelmaan lisäämään normaalin tierakenteen lisäksi ylimääräisiä rakennusosia tai -vaiheita. Tästä huolimatta yksinkertaisemmissa ja pienissä kohteissa kustannuserot voivat olla pieniä, jolloin 3D-suunnittelun edut ovat kiistattomat. (Palkama 2015 s.33)

Rakentamissuunnitteluvaiheen toteutusmallissa kaikkien taiteviivojen ja niistä muodostuvien pintojen on oltava jatkuvia kauttaaltaan, mikä aiheuttaa muista poiketen haasteita geotekniselle suunnittelulle, sillä kairaustuloksista tulkitut pohjaolosuhteet ovat pistemäistä dataa. Maalajien geometria mittauspisteiden välillä ei myöskään ole täsmällistä pohjatutkimustulosten tulkinnallisuudesta johtuen. Esimerkiksi

laboratoriokokeilla määritetyt geometriset parametrit kuvaavat tilannetta vain näytteenottopisteessä, jolloin muiden kohtien parametrit täytyy määrittää arvioiden. (Brotherus 2014 s.25)

Mikäli kairauspisteistä saatu tulkinta maalajien vaihtumisesta ei vastaa oikeaa tilannetta, voi seurauksena olla pahimmassa tapauksessa esimerkiksi rakennettujen tukimuurien liikkuminen tai kaivantojen sortuminen. Käyttämällä kolmiulotteisessa malleja voidaan kuitenkin havainnollistaa mitä riskejä tulkintaan liittyy. (ViasysVDC 2017)

4.2 Koneohjaus pohjatutkimuksissa

Tutkimuspisteiden paikalleen mittaus tarkoittaa pohjatutkimusohjelman mukaisten teoreettisten tutkimuspisteiden paikalleen mittausta maastoon. Pohjatutkimusprojekteissa laaditaan pohjatutkimusohjelma, jossa kullekin tutkimuspisteelle määritellään koordinaatit esimerkiksi valtakunnallisessa GK24-koordinaattijärjestelmässä. Mittausryhmä mittaa tutkimuspisteet oikeaan kohtaan maastoon ja välittää tiedon tutkimuspisteiden sijainnista kairausryhmän kanssa. Tutkimuspisteet mitataan maastoon x- ja y-koordinaattien teoreettisten arvojen mukaan. Mitatut pisteet toimitetaan tutkimusohjelman laatijalle toteutuneen mukaisina (x,y,z)-koordinaatistossa sisältäen myös korkeustiedon (z) tutkimuspisteistä. Kairaukset ovat 1 – 3 metrin etäisyydellä toisistaan, mikäli samaan tutkimuspisteeseen on ohjelmoitu useampi eri kairauslaji. Jokaisen tutkimuspisteen korkeustieto tarkistetaan ja päivitetään tulostiedostoon. Monitoimikairat on mahdollista varustaa koneohjausjärjestelmillä, jonka avulla kairauskone voidaan ohjata automaattisesti kairauspisteelle. Koneohjausjärjestelmällä voidaan kartoittaa tutkimuspisteen koordinaatit ennen kairauksen aloittamista. Tutkimusohjelman lisäksi koneohjausjärjestelmään voidaan lisätä kaapeli- ja putkitiedot taustakartaksi, minkä ansiosta kairaaja voi tarkistaa, ettei kaapeleita ole lähellä. (Mäkelä 2017 s.32 – 33)

4.3 Pohdinta

Yksi suuri syy tietomallinnuksen käyttämättömyydelle infra-alalla, huolimatta sen olemassaolosta, on aikaisemmin ollut yhteistyön puute. Yrityksissä ollaan kuitenkin

siirtymässä perinteisestä vaiheajattelusta tietomalleja hyödyntävään palvelutuotantoon. Tuottavuus on ollut aikoinaan infra-alan yksi heikkouksista. Tietoja on hukkunut eri vaiheiden välillä johtuen huonosta dokumentoinnista, kommunikoinnista ja tiedonkulusta. Hankkeet ovat usein suuria ja maantieteellisesti laajoja, jolloin jopa 30 prosenttia ajasta saattaa kulua pelkästään lähtötietojen selvittämiseen ja tarkastamiseen. Lähtötietojen esittäminen yhtenevällä tavalla tietomallissa vähentää merkittävästi turhaa työtä ja vääriä tulkintoja. Kun virheet huomataan jo suunnitteluvaiheessa, säästetään toteutusvaiheen kustannuksissa. Parempien suunnitelmien myötä varsinaiselle työsuunnittelulle jää enemmän aikaa. (InfraBIM 2013)

Tietomallista hyötyvät sekä tilaajat ja kustantajat, että asiakkaat ja sidosryhmät. Myös esimerkiksi poliittiset päättäjät ja maanomistajat saavat varmuutta päätöksentekoon nopean ja monipuolisen vaihtoehtojen vaikutusten vertailun ansiosta. (Liikenneviraston 3/2015 s.76)

5 YHTEENVETO

Pohjatutkimukset ovat maa- ja kallioperän tutkimuksia, joissa pyrkimyksenä on saada tietoa maa- ja kallioperän rakenteesta ja ominaisuuksista. Menetelmät, joilla tietoa saadaan ovat pysyneet melko samoina viime vuosikymmeninä, joskin käytettävät välineet ovat vaihtuneet käsin pyöritettävistä ja käytettävistä kairoista nykyisiin monitoimikairoihin, joilla voidaan suorittaa monenlaisia kairauksia ja näytteenottoja. Erilaiset parannukset kairoihin voivat lisätä näitten potentiaalia laadukkaiden tulosten saamisessa entisestään, kuten CTPU-kairauksen osalta on nähty. CPTU-kairauksella saavutettavia etuja ovat esimerkiksi lähes jatkuva mittaustieto, toistettavuus, luotettavuus sekä kustannustehokkuus.

Viime aikoina noussut tietomallien käyttö on tuonut uusia mahdollisuuksia pohjatutkimusten suorittamiseen, kun monitoimikairat voidaan varustaa koneohjausjärjestelmillä, jolloin kairauskone ohjautuu automaattisesti tutkimuspisteelle. 3D-suunnittelun hyödyt esimerkiksi koneohjausjärjestelmissä ovatkin kiistattomat, mutta geoteknisessä suunnittelussa 3D-mallien käyttöä haittaa vielä pohjatutkimustulosten tulkinnallisuus ja pistemäisluonteinen tieto. Rakentamissuunnitteluvaiheen toteutusmallissa kaikkien taiteviivojen ja niistä muodostuvien pintojen kuuluisi olla jatkuvia kauttaaltaan.

Käytettäessä tietomalleja geoteknisessä suunnittelussa lähtötiedot esitetään yhtenevällä tavalla vähentäen näin turhaa työtä ja vääriä tulkintoja, jolloin toteutusvaiheen kustannukset pienenevät. Tietomallista hyötyvät sekä tilaajat, kustantajat että asiakkaat ja sidosryhmät.

LÄHTEET

Brotherus, V., 2014. Inframallintamisen hyödyntäminen geoteknisessä suunnittelussa. Diplomityö. Oulu: Oulun yliopisto Teknillinen tiedekunta. 113 s.

InfraBIM Infratietomalli. Tiedote 10.6.2013. [verkkodokumentti]

Juuti, E., 2014. CPTU-kairaus ja sen tulkinta. Opinnäytetyö. Tampere: Tampereen ammattikorkeakoulu. 75 s.

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

Kamppari, P., 2009. Maatutkaluotaus osana Airix ympäristö Oy:n vesihuollon suunnittelua. Menetelmäkuvaus ja maatutka-aineiston tarkkuustarkastelu. Opinnäytetyö. Mikkeli: Mikkelin ammattikorkeakoulu. 50 s.

Liikenneviraston ohjeita 3/2015. Tietomallien hyödyntäminen tien yleissuunnittelussa [verkkodokumentti]. Helsinki: Liikennevirasto. 110 s.

Liikenneviraston ohjeita 10/2015. Geotekniset tutkimukset ja mittaukset [verkkodokumentti]. Helsinki: Liikennevirasto. 112 s.

Mäkinen, P., 2017. Pohjatutkimukset vaativissa erityisolosuhteissa. Diplomityö. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto. 132 s.

Palkama, T., 2015. 2D- ja 3D-suunnittelutöiden kustannusvertailu ja 3D-järjestelmän hyödyt työmaalla. Opinnäytetyö. Lappeenranta: Saimaan ammattikorkeakoulu. 45 s.

Rantamäki, M., Jääskeläinen, R., Tammirinne, M., 1979. Geotekniikka. 22. painos. Helsinki: Otatieto, 307 s. ISBN: 978-951-672-257-6

SFS-EN 1997-2 Eurokoodi 7. Geotekninen suunnittelu. Osa 2: Pohjatutkimus ja koestus. Suomen standardisoimisliitto SFS 158s.

Selänpää J. 2015. Esiselvitys: CPTU-kairauskokeen käyttäminen liikenneväylien pohjatutkimusmenetelmänä. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 25/2015 [verkkodokumentti]. Helsinki: Liikennevirasto. 61 s.

Suomen geotekniikan yhdistys r.y, (toim.), 1986. ALPO-86 Aluesuunnittelun pohjatutkimukset. Helsinki: Suomen geotekninen yhdistys r.y ja Rakentajain kustannus Oy, 79 s. ISBN 951-676-307-3

Tielaitoksen selvityksiä 28/1998. Geotekniikan informaatiojulkaisuja. Teiden pehmeikkötutkimukset [verkkodokumentti]. Helsinki: Tielaitos. 90 s.

Tielaitoksen selvityksiä 79/1995. Geotekniikan informaatiojulkaisuja. Tieleikkausten pohjatutkimukset [verkkodokumentti]. Helsinki: Tielaitos. 50 s.

Tammirinne M. 2001. CPTU-kairaus. Menetelmäkuvaus [verkkodokumentti]. Espoo: Tiehallinto. 54 s.

Viasys VDC. 2017. Tutustu Suomen kenties suurimpaan pohjarakentamisen hankkeeseen. 3D visualisoinnilla voidaan ehkäistä ongelmia [verkkodokumentti]. [viitattu 1.10.2017] Saatavissa: <http://www.viasys.fi/yleinen/tutustu-suomen-kenties-suurimpaan-pohjarakentamisen-hankkeeseen/>

Liite 1. SGY:n kairausoppaat

SGY: Kairausopas I (Paino-, täry- ja heijarikairaus). Rakentajain kustannus Oy.

SGY: Kairausopas II (Siipikairaus). Rakentajain kustannus Oy.

SGY: Kairausopas III (Maanäytteiden ottaminen). Rakentajain kustannus Oy.

SGY: Kairausopas IV (Pohjavedenpinnan ja huokosvedenpaineen mittaaminen).
Rakentajain kustannus Oy.

SGY: Kairausopas V (Porakonekairaus). Rakentajain kustannus Oy.

SGY: Kairausopas VI (CPTU/puristinkairaus, puristin-heijarikairaus). Rakentajain
kustannus Oy.

Liite 2. Pohjatutkimusmenetelmien soveltuvuus geoteknisten ominaisuuksien määrittämiseen

Kenttätutkimusmenetelmät	Näytteenotto (maa)			Kenttäkokeet				
	Luokka A	Luokka B	Luokka C	CPT & CPTU	Heijarikairaus	Painokairaus	Siipikairauskoe	SPT-koe
Perustiedot								
Maalaji (päämaalaji)	C1 F1	C1 F1	C2 F2	C2 F2	C3 F3	-	-	C2 F1
Kerrostien laajuus 1)	C1 F1	C1 F1	C3 F3	R3	C1 F2	F2	-	C2 F2
Pohjaveden korkeustaso	-	-	-	C2	-	-	-	-
Huokosvedenpaine	-	-	-	C2 F2	-	-	-	-
Geotekniset ominaisuudet								
Rakeisuus (raekoko)	C1 F1	C1 F1		-		-	-	C2 F1
Vesipitoisuus	C1 F1	C2 F1	C3 F3	-		-	-	C2 F2
Atterbergin rajat	F1	F1	-	-		-	-	F2
Irtotiheys	C2 F1	C3F3	-	C2 F2	C2	-	-	C2 F2
Leikkauslujuus	C2 F1	-	-	C2 F1	C2 F3	C2	F1	C2 F3
Kokoonpuristuvuus	C2 F1	-	-	C1 F2	C2 F2	C2	-	C2 F2
Vedenläpäisevyys	C2 F1	-	-	C3 F2	-	-	-	-
Kemialliset kokeet	C1 F1	C1 F1	-	-	-	-	-	-
R1	Hyvin kalliolle		R2	Keskinkertaisesti kalliolle		R3	Huonosti kalliolle	
C1	Hyvin karkearakeiselle maalle		C2	Keskinkertaisesti karkearakeiselle maalle		C3	Huonosti karkearakeiselle maalle	
F1	Hyvin hienorakenteiselle maalle		F2	Keskinkertaisesti hienorakeiselle maalle		F3	Huonosti hienorakeiselle maalle	
-	ei sovellu							
1)	Vaaka- ja pystysuunnassa							

Kuva 3. Kenttätutkimuksien yksinkertaistettu yleiskatsaus (Mukaihen SFS-EN 1997-2)