

Johannes Myllykoski

GEOTEKNIikka – MAALUOKITUKSESTA GEOTEKNISEN
SUUNNITTELUN PERUSTEISIIN

Rakennustekniikan koulutusohjelma
2014

GEOTEKNIikka – MAALUOKITUKSESTA GEOTEKNISEN SUUNNITTELUN PERUSTEISIIN

Myllykoski, Johannes
Satakunnan ammattikorkeakoulu
Rakennustekniikan koulutusohjelma
Maaliskuu 2014
Ohjaaja: Sandberg, Rauno
Sivumäärä: 78
Liitteitä: -

Asiasanat: geotekniikka, geotekninen suunnittelu, maaluokitus, pohjatutkimus

Opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia geotekniikkaan keskeisesti kuuluvia maaluokitusta, pohjatutkimusmenetelmiä sekä eurokoodin mukaisia geoteknisen suunnittelun perusteita. Tarkoituksena oli myös selvittää, miten maaperästä saadaan tarvittavat tiedot maaluokitusta ja geoteknistä suunnittelua varten. Työ laadittiin tutustumalla alan kirjallisuuteen.

Työn alussa esiteltiin maaluokitus vanhan geoteknisen maaluokituksen ja eurokoodin mukaisen ISO-maaluokituksen mukaan sekä vertailtiin näitä kahta luokitusmenetelmää keskenään. Seuraavaksi käytiin läpi luokitusmenetelmissä ja geoteknisessä suunnittelussa tarvittavien tietojen hankkiminen erilaisin pohjatutkimusmenetelmin. Lopuksi esiteltiin eurokoodin mukaisessa geoteknisessä suunnittelussa noudatettavat peruseriaatteet.

ISO-luokituksen ja geoteknisen luokituksen välillä havaittiin eroja, joiden perusteella ISO-luokitukseen siirtyminen vaatii asianosaiselta perehtymistä uuteen luokitusmenetelmään. Geoteknisen luokituksen D_{50} -määrittäminen vaihtuu ISO-luokituksessa nomogrammin menetelmään. ISO-luokitus ei myöskään tunne moreenimaalajeja.

Pohjatutkimusmenetelmien osalta huomattiin, että maastossa tehtäviin tutkimusmenetelmiin kuuluu lukuisia erilaisia kairausmenetelmiä. Suomessa yleisin menetelmä on painokairaus. Kairausmenetelmistä siipikairaus on tärkeä leikkauslujuuden mittaustapa. Laboratoriossa tehtäviin tutkimuksiin liittyy oleellisesti menetelmän teoriapohja, joka on syytä tuntea virheiden välttämiseksi.

Geoteknisen suunnittelun eurooppalaisen standardin Eurokoodi 7 todettiin ohjeistavan varsinaisen suunnittelun lisäksi pohjatutkimusta ja maaluokitusta. Eurokoodin mukainen suunnittelu perustuu osavarmuuslukumenetelyyn.

GEOTECHNICAL ENGINEERING – FROM SOIL CLASSIFICATION TO BASICS OF GEOTECHNICAL DESIGN

Myllykoski, Johannes

Satakunnan ammattikorkeakoulu, Satakunta University of Applied Sciences

Degree Programme in Construction Engineering

March 2014

Supervisor: Sandberg, Rauno

Number of pages: 78

Appendices: -

Keywords: geotechnical engineering, geotechnical design, soil investigation, soil classification

The purpose of this thesis was to study soil classification, ground investigation techniques and basics of geotechnical design according to Eurocodes. Soil classification, ground investigation and geotechnical design are all essential part of the geotechnical engineering. The aim was also to find out how the necessary information required for soil classification and geotechnical design was acquired.

The thesis was started by comparing two different soil classification systems. Next the ground investigation techniques were studied. Finally, the basic principles of geotechnical design according to Eurocodes were clarified.

Differences between the Finnish geotechnical soil classification and the ISO classification were noticed. Based on those differences it is obvious that one must get acquainted with the new classification before changing from old classification to the new ISO classification. D_{50} –method used by geotechnical classification is not used in ISO classification. ISO classification uses nomogram classification system to identify soil. Moraine is not included in ISO classification.

It was found out that different kinds of drilling techniques were used to investigate soil. In Finland the most common technique is weight sounding test. Vane shear test is important method for measuring shear strength of soil. There is a basis of theory one must master when conducting laboratory tests on soil.

European technical standard for geotechnical design (Eurocode 7) contains requirements both for ground investigation and soil classification. Eurocode 7 uses a partial safety factor format.

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	6
1.1	Työn tausta.....	6
1.2	Työn tavoitteet	7
1.3	Työn toteutus	7
2	MAALUOKITUS.....	8
2.1	Geotekninen maaluokitus.....	8
2.1.1	Maalajien luokitus	8
2.1.2	Maalajite	9
2.1.3	Maalajin määrittäminen d_{50} -menetelmällä.....	10
2.1.4	Raekokosuhte	11
2.1.5	Muut luokitusominaisuudet	12
2.2	ISO-maaluokitus	14
2.2.1	Maaryhmät	14
2.2.2	Raekokolajitteet.....	15
2.2.3	Maan luokitus	16
2.2.4	Muut luokitukseen soveltuvat periaatteet.....	19
2.3	Luokitusmenetelmien vertailu	21
2.3.1	Raekoot ja maaryhmät.....	21
2.3.2	Luokitus ja nimeäminen	21
2.3.3	Muut erot luokitusten välillä	22
3	POHJATUTKIMUS	23
3.1	Yleistä	23
3.2	Pohjatutkimusmenetelmät.....	23
3.2.1	Painokairaus	24
3.2.2	Heijarikairaus	26
3.2.3	Siipikairaus	27
3.2.4	Porakonekairaus	29
3.2.5	Puristinkairaus	31
3.2.6	Puristin-heijarikairaus.....	32
3.2.7	Tärykairaus	32
3.2.8	SPT-kairaus	33
3.2.9	Näytteenotto	33
3.2.10	Pohjavesipinnan määrittäminen	35
3.2.11	Muut pohjatutkimusmenetelmät	36
3.3	Laboratoriotutkimukset.....	38
3.3.1	Kosteus	39

3.3.2 Rakeisuus	39
3.3.3 Kapillaarisuus	42
3.3.4 Kuivatilavuuspaino ja tiiviys	44
3.3.5 Vedenläpäisevyys	47
3.3.6 Leikkauslujuus.....	49
3.3.7 Kokoonpuristuvuus.....	55
3.3.8 Konsistenssi ja plastisuus	57
4 GEOTEKNISEN SUUNNITTELUN PERUSTEET	59
4.1 Geoteknisten suunnitteluvaatimusten luokat	59
4.2 Seuraamus- ja luotettavuusluokat	60
4.3 Murtorajatilat	61
4.4 Käyttörajatilat	63
4.5 Mitoitustavat	64
4.6 Osavarmuusluvut	65
4.6.1 Kuormayhdistelmät osavarmuuslukuineen	65
4.6.2 Maaparametrien osavarmuusluvut.....	67
4.6.3 Kestävyyden osavarmuusluvut.....	68
4.7 Mitoitusmenettelyt nosteelle ja hydrauliselle nousulle.....	70
4.7.1 Mitoitus nosteelle	70
4.7.2 Mitoitus hydrauliselle nousulle	71
5 JOHTOPÄÄTÖKSET	73
LÄHTEET.....	77

1 JOHDANTO

1.1 Työn tausta

Geotekniikka käsittelee maa- ja kallioperän teknisiä ominaisuuksia ja niiden soveltamista maa- ja pohjarakentamisessa. Lisäksi geotekniikka käsittää maa- ja pohjarakenteiden mitoitusmenettelyt. Geotekniikka on yhdistelmä geologiaa ja rakennustekniikkaa. Asianmukainen geotekninen tieto ja osaaminen ovat välttämättömiä kaikessa rakentamisessa.

Maaperästä saa alustavia tietoja jo pelkästään havainnoimalla ympäristön pinnanmuotoja, kasvillisuutta, avokallioita, kivisyyttä tai veden liikkeitä. Usein kuitenkin tarvitaan tarkempia tietoja maanpinnan alla olevasta maaperästä. Tällöin tulevat kyseeseen erilaiset maaperän ja maa-aineksen tutkimusmenetelmät. Näitä tutkimuksia kutsutaan nimellä pohjatutkimukset.

Maaperän tutkimusmenetelmillä saatavaa tietoa tarvitaan niin maaluokituksessa kuin geoteknisessä suunnittelussa. Maaluokituksella tarkoitetaan maa-aineksen tunnistamista sen ominaisuuksien perusteella. Geoteknisellä suunnittelulla tarkoitetaan maa- ja pohjarakenteiden suunnittelua ja mitoitusta. Maaperän tutkimusmenetelmät, maaluokitus ja geotekninen suunnittelu ovat keskeisiä geotekniikan osa-alueita.

Suomessa ollaan myös geotekniikassa siirtymässä eurokoodiin eli yhteiseurooppalaiseen suunnittelujärjestelmään. Geoteknisen suunnittelun eurooppalainen standardi on Eurokoodi 7. Se koskee suoraan tai välillisesti muiden standardien kautta niin maaluokitusta, pohjatutkimusta kuin varsinaista suunnitteluakin.

Opinnäytetyön aiheen valintaan vaikutti kiinnostus geotekniikkaan sekä halu perehtyä yksityiskohtaisemmin geotekniikan osa-alueisiin.

1.2 Työn tavoitteet

Opinnäytetyössä on tarkoitus käsitellä pohjatutkimusmenetelmiä, maaluokitusta ja eurokoodin mukaisen geoteknisen suunnittelun perusteita. Työn tavoitteena on kartoittaa yleisimmät pohjatutkimusmenetelmät. Lisäksi menetelmien yhteydessä on tarkoitus selvittää kuhunkin tutkimusmenetelmään liittyvää teoriaperustaa.

Opinnäytetyössä erilaiset tutkimusmenetelmät jaetaan varsinaisiin maastossa tehtäviin pohjatutkimuksiin, kuten erilaisiin kairausmenetelmiin, sekä laboratoriossa suoritettaviin tutkimuksiin. Pohjatutkimusmenetelmiä kartoitettaessa huomioidaan myös maaluokituksessa käytettävien luokitusominaisuuksien selvittäminen.

Työssä esitellään kaksi maaluokitusmenetelmää: geotekninen maaluokitus ja eurokoodin eli yhteiseurooppalaisen suunnittelustandardin mukainen maaluokitus. Geoteknisen suunnittelun peruseräkkeet esitellään opinnäytetyön lopussa eurokoodin mukaan.

1.3 Työn toteutus

Opinnäytetyö toteutetaan kirjallisuusselvityksenä tutustumalla asiantuntijalähteisiin. Keskeisinä lähteinä tulevat olemaan geotekniikan oppikirjat, standardit, menetelmäohjeet ja Suomen Rakennusinsinöörien Liiton (RIL) julkaisut.

2 MAALUOKITUS

Suomessa maalajiluokitus on perustunut 1970-luvun alusta lähtien geotekniseen maaluokitukseen, josta käytetään myös nimitystä GEO-luokitus. Geotekninen maaluokitus on esitetty kokonaisuudessaan VTT:n geotekniikan laboratorion tiedonannossa 14 vuodelta 1974. (RIL 121-2004, 19; Korhonen, Gardemeister & Tammirinne 1974, 4-7.)

Eurokoodien eli yhteiseurooppalaisten suunnittelustandardien myötä maan luokitus, tunnistus ja kuvaus perustuu standardeihin EN ISO 14688-1 ja EN ISO 14688-2 (SFS-EN 1997-2, 51). Nämä standardit on vahvistettu Suomessa ja koottu SFS-käsikirjaan 179-1 Geotekninen tutkimus ja koestus. Osa 1: Maan ja kallion luokitukset 2008. Käsikirjassa esitellään seuraavat maan luokitukseen liittyvät standardit: (SFS-käsikirja 179-1 2008, 3-5.)

- SFS-EN ISO 14688-1 Geotekninen tutkimus ja koestus. Maan tunnistaminen ja luokitus. Osa 1: Tunnistaminen ja kuvaus.
- SFS-EN ISO 14688-2 Geotekninen tutkimus ja koestus. Maan tunnistaminen ja luokitus. Osa 2: Luokituksen perusteet.

Lisäksi käsikirjassa esitellään kallion tunnistamiseen ja luokitukseen liittyvä standardi, jota tässä opinnäytetyössä ei käsitellä. Maaluokitusten vertailussa painotus on kiivennäismaalajeissa. Eloperäiset maalajit käsitellään lyhyesti.

2.1 Geotekninen maaluokitus

2.1.1 Maalajien luokitus

Geoteknisessä maalajiluokituksessa maalajit jaetaan maalajiryhmiin geologisen syntytytavan, humuspitoisuuden ja raekoostumuksen perusteella. Maalajiryhmiä ovat eloperäiset, hienorakeiset ja karkearakeiset maalajit sekä moreenimaalajit (Taulukko 1).

Maalajiryhmiin kuuluvat maalajit nimetään humuspitoisuuden ja raakoostumuksen perusteella. (RIL 121-2004, 19.)

Taulukko 1. Geoteknisen luokituksen maalajiryhmät ja maalajit. (RIL 121-2004, 21)

Maalajiryhmä	Maalaji	Lyhen- nys	Lajitepitoisuus, paino-%			Raekoko d ₅₀ , mm
			Savi d ≤ 0,002 mm	Hieno- aines d ≤ 0,06 mm	Sora d > 2,0 d ≤ 60,0 mm	
Eloperäiset maalajit	Turve Lieju (eloperäistä ainesta > 6 %)	Tv Lj				
Hienorakeiset maalajit	Savi Siltti	Sa Si	≥ 30 < 30	≥ 50	< 5	≤ 0,06
Karkearakeiset maalajit	Hiekka Sora	Hk Sr		< 50 < 5	≤ 50 > 50	> 0,06 - 2 > 2 - 60
Moreeni- maalajit	Silttimoreeni Hiekkamoreeni Soramoreeni	SiMr HkMr SrMr		≥ 50 5 - 50 ≥ 5	≥ 5 5 - 50 > 50	≤ 0,06 > 0,06 - 2 > 2

2.1.2 Maalajite

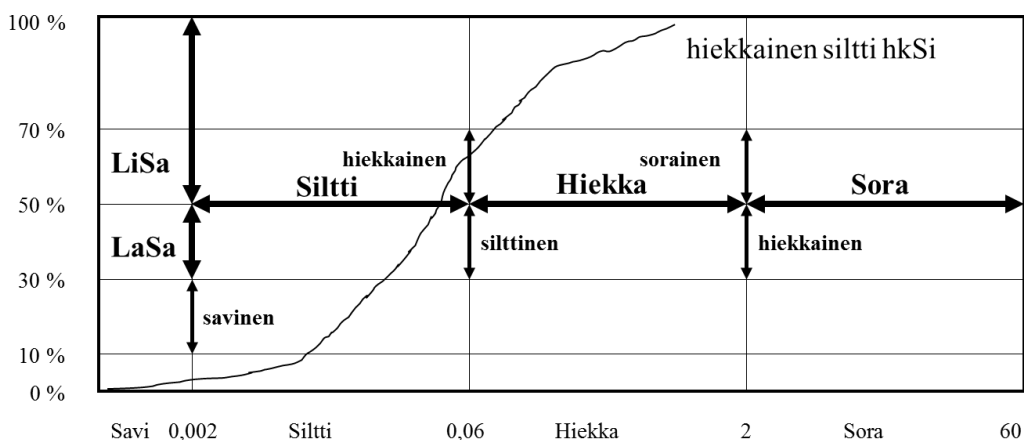
Maalajitteella tarkoitetaan tiettyä raekokoa olevaa maa-ainesta. Kivennäismaalajien lajitteita ovat savi, siltti, hiekka, sora, kivet ja lohkareet. (Rantamäki, jääskeläinen & Tammirinne 1997, 57–58.) Moreenimaalajit ovat lajittumattomia, sillä ne sisältävät useita eri lajitteita. Moreenimaalajeja on geoteknisessä maaluokituksessa kolme: silttimoreeni, hiekkamoreeni ja soramoreeni. Eloperäisiin maalajeihin kuuluvat turve ja lieju. (RIL 121-2004, 19-21.)

Raakoostumusta tutkitaan kuivaseulonnan, pesuseulonnan ja areometrianalyysin avulla. Menetelmien lopputuloksena laaditaan tutkittavan maa-aineksen rakeisuus-käyrä. Humuspitoisuus, eli eloperäisen aineksen määrä voidaan määrittää polttomenetelmällä. (Jääskeläinen 2011, 16-28.)

2.1.3 Maalajin määrittäminen d_{50} -menetelmällä

Kivennäismaalajien nimeämisessä käytetään d_{50} -menetelmää, jossa maa-aineelle annetaan sen lajitteen nimi, minkä alueella rakeisuuskäyrän läpäisyprosentti on 50. Savi nimetään kuitenkin jo pienemmälläkin osuudella. Jos savilajitetta on 30–50 prosenttia, kutsutaan sitä laihaksi saveksi. Kun savilajitetta on yli 50 prosenttia, nimetään maa-aines lihavaksi saveksi. (Jääskeläinen 2011, 23-24.)

Maalajin lisänimeksi annetaan silttinen, hiekkainen tai sorainen, jos kyseistä lajitetta on yli 30 prosenttia maalajin nimen antavan lajitteen ohella. Lisänimeksi tulee savinen, jos savilajitetta on 10–30 prosenttia. Kun hienorakeisen maalajin humuspitoisuus on 2–6 prosenttia, on kysymyksessä liejuinen savi tai siltti. Humuspitoisuuden ollessa 6–20 prosenttia, on maalaji savinen tai silttinen lieju. Kun humuspitoisuus ylittää 20 prosenttia, on kyseinen maa-aines liejua. (RIL 121-2004, 21-22.) Kuvassa 1 on esimerkki maalajin nimeämisestä rakeisuuskäyrältä.



Kuva 1. Kivennäismaalajin nimeäminen rakeisuuskäyrältä.

Pelkästään lajitepitoisuuden perusteella maalaji nimetään moreeniksi, jos se sisältää vähintään 5 prosenttia soralajitetta ja vähintään 5 prosenttia hienoainesta (RIL 121-2004, 20).

Lohkareisuus ja kivisyys perustuu maastossa tehtyihin havaintoihin. Kivellä tarkoitetaan 60–600 mm läpimittaista ja lohkareella yli 600 mm läpimittaista kappaletta. Jos kivien tai lohkareiden osuus on alle 10 prosenttia, voidaan käyttää lisänimeä kivetön

tai lohkareeton. Jos osuus on 10–30 prosenttia, käytetään nimitystä kivinen tai lohka-reinen. Kun kiviä tai lohkareita on aineesta yli 30 prosenttia, käytetään nimitystä runsaskivinen tai runsaslohkareinen. Termiä kivikko tai louhikko käytetään, jos kivien tai lohkareiden osuus maa-aineesta on yli 50 prosenttia. (Jääskeläinen 2011, 25.)

2.1.4 Raekokosuhte

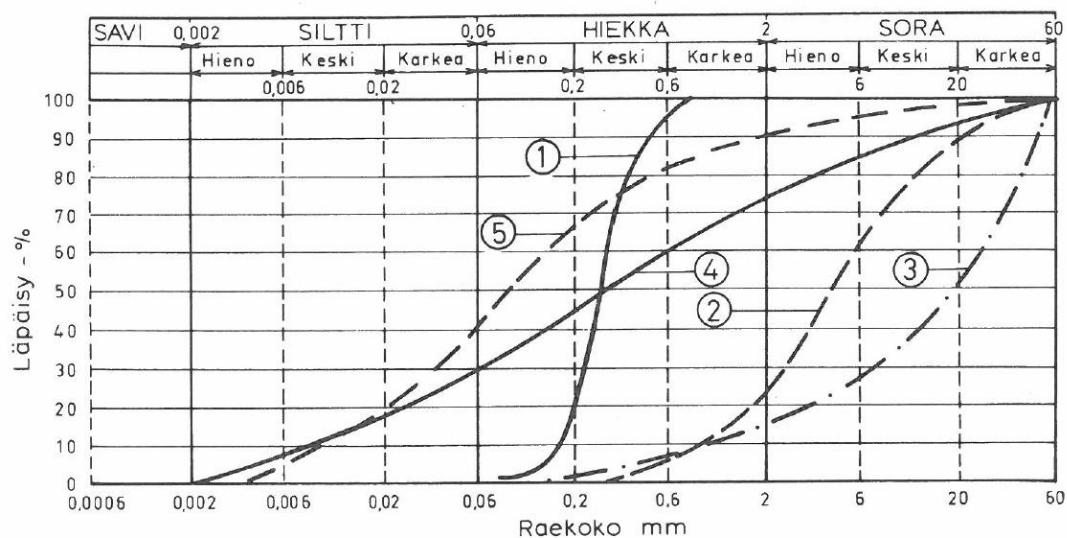
Raekokosuhte lasketaan rakeisuuskäyrän 60 prosentin läpäisyä vastaavan raekoon suhteena 10 prosentin läpäisyä vastaavaan raekokoon (Kaava 1). Luvun ollessa alle 5, on aine tasarakeista. Jos luku on välillä 5–15, on aine sekarakeista. Jos luku on yli 15, on aine suhteistunutta. (Jääskeläinen 2011, 26.) Kuvassa 2 on esimerkkejä rakeisuuskäyristä.

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (1)$$

C_u = raekokosuhte

d_{60} = läpäisyprosenttia 60 vastaava raekoko

d_{10} = läpäisyprosenttia 10 vastaava raekoko



① Tasarakeinen hiekka

② Sekarakeinen sora

③ Suhteistunut sora

④ Hiekkamoreeni

⑤ Osittain lajittunut silttinen hiekkamoreeni

Kuva 2. Esimerkkejä rakeisuuskäyristä. (Korhonen ym. 1974, 14)

2.1.5 Muut luokitusominaisuudet

Muita luokitusominaisuuksia, joita voidaan käyttää maalajien tai maaperän kuvaamiseen ovat rakeiden muoto, plastisuus, tiiviys, vesipitoisuus, sensitiivisyys ja maatuoneisuus. Varsinaisten luokitusominaisuuksien lisäksi maan kuvaamiseen voidaan käyttää geoteknisiä ominaisuuksia kuten lujuusominaisuuksia ja routivuutta. (Korhonen ym. 1974, 8, 17-19.)

Plastisuuden mukaan voidaan käyttää nimityksiä vähän plastinen, kohtalaisen plastinen ja erittäin plastinen (Taulukko 2).

Taulukko 2. Maalajien plastisuus. (Korhonen ym. 1974, 15)

Nimitys	Plastisuusluku, I_p
Vähän plastinen	≤ 10
Kohtalaisen plastinen	$> 10 \dots 25$
Erittäin plastinen	> 25

Tiiviiden perusteella maata voidaan kuvata termeillä löyhä, keskitiivis ja tiivis (Taulukko 3). Myös tarkempaa viisiportaista luokittelua voidaan käyttää. (Jääskeläinen 2011, 52.) Kuivatilavuuspainon lisäksi tiiviyttä voidaan ilmaista huokoisuuden, huokosluvun ja suhteellisen tiiviiden avulla. (Rantamäki ym. 1997, 82.)

Taulukko 3. Maakerrosten rakenteellinen tiiviys. (Korhonen ym. 1974, 17)

Nimitys	Kuivatilavuuspaino γ_d , kN/m^3 *)			
	Hiekkainen siltti	Hiekka	Sora	Moreeni
löyhä	$\leq 14,0$	$\leq 16,0$	$\leq 18,0$	$\leq 19,0$
keskitiivis	$> 14,0 \dots 16,0$	$> 16,0 \dots 18,0$	$> 18,0 \dots 20,0$	$> 19,0 \dots 21,0$
tiivis	$> 16,0$	$> 18,0$	$> 20,0$	$> 21,0$

*) $10 \text{ kN/m}^3 \cong 1 \text{ Mp/m}^3$

Sensitiivisyyden S_t eli häiriintymättömän ja häirityn suljetun leikkauslujuuden suhteen perusteella käytetään nimityksiä vähän sensitiivinen, kohtalaisen sensitiivinen ja hyvin sensitiivinen (Taulukko 4). (Korhonen ym. 1974, 15, 18.)

Taulukko 4. Hienorakeisten maakerrosten sensitiivisyys. (Korhonen ym. 1974, 18)

Nimitys	S_t
vähän sensitiivinen	≤ 10
kohtalaisen sensitiivinen	$> 10 \dots 30$
hyvin sensitiivinen	> 30

Leikkauslujuuden perusteella voidaan luonnontilaisista hienorakeisista maakerroksista käyttää taulukon 5 mukaisia nimityksiä (Korhonen ym. 1974, 17).

Taulukko 5. Hienorakeisten maakerrosten kuvaus lujuuden perusteella. (Korhonen ym. 1974, 17)

Nimitys	Suljettu leikkauslujuus s_u , kN/m ² *)
hyvin pehmeä	≤ 10
pehmeä	$> 10 \dots 25$
sitkeä	$> 25 \dots 50$
kova	$> 50 \dots 100$
hyvin kova	> 100

*) $10 \text{ kN/m}^2 \cong 1 \text{ Mp/m}^2$

Konsolidaatiotilan perusteella voidaan käyttää taulukon 6 mukaisia termejä. Konsolidaatiotilalla tarkoitetaan jossain geologisessa vaiheessa vallinneen kuormituksen p_c ja vallitsevan kuormituksen p_0 suhdetta. (Korhonen ym. 1974, 18.)

Taulukko 6. Maakerrosten konsolidaatiotila. (Korhonen ym. 1974, 18)

Nimitys	p_c/p_0
alikonsolidoitunut	$< 0,8$
normaalisti konsolidoitunut (tai heikosti ylikonsolidoitunut)	$> 0,8 \dots 1,5$
ylikonsolidoitunut	$> 1,5 \dots 10$
voimakkaasti ylikonsolidoitunut	> 10

Turve voidaan luokitella maatumisasteen mukaan kolmeen luokkaan: raakoihin, keskinkertaisesti maatumineisiin ja maatumineisiin turpeisiin. Turvetta voidaan arvioida myös puisuuden mukaan. (Korhonen ym. 1974, 25.)

2.2 ISO-maaluokitus

2.2.1 Maaryhmät

Maat luokitellaan maaryhmiksi raakoostumuksen, plastisuuden, humuspitoisuuden ja syntyvän mukaan. Maa-ainesryhmät ovat hyvin karkea, karkea, hieno, orgaaninen ja keinotekoinen maapohja (Taulukko 7). (SFS-käsikirja 179-1 2008, 50, 62.)

Taulukko 7. Maan luokituksen periaatteet. (SFS-käsikirja 179-1 2008, 62)

Kriteeri	Maa-ainesryhmä	Määrän määrittäminen	Nimeäminen saman ominaisuuden omaaviin ryhmiin		Alaluokituksen käytön tarve	
Kostean maa-aineksen rakeet eivät tartu toisiinsa	hyvin karkea	useimmat rakeet > 200 mm	Bo	xBo	Edellyttää erityistä harkintaa	
		useimmat rakeet > 63 mm	Co	boCo coBo saCo, grCo sagrCo		
	karkea	useimmat rakeet > 2 mm	Gr	coGr cosaGr saGr, grSa sasiGr, grsiSa	Raekoko (rakeisuus) Rakeisuuskäyrän muoto Suhteellinen tiiviys Läpäisevyys	
useimmat rakeet > 0,063 mm		Sa	siGr, clGr siSa, clSa, sacIGr orSa	(Mineralogia) (Raemuoto)		
Kostean maa-aineksen rakeet tarttuvat toisiinsa	hieno	alhainen plastisuus, paisuva	Si	saSi sagrSi sacI Si	Plastisuus Vesipitoisuus Lujuus, sensitiivisyys Kokoonpuristuvuus, jäykkyys (Savimineralogia)	
		plastinen, ei paisuva	Cl	clSi, siCl sagrCl orSi, orCl		
Tumma väri, alhainen tiheys	orgaaninen		Or	saOr, siOr clOr	Edellyttää erityistä harkintaa	
Ei luonnollinen	keinotekoinen maapohja	rakennettu täyte	Mg	xMg	Tehty aines	Edellyttää erityistä harkintaa
				Uudelleen sijoitetut luonnonainekset	Kuten luonnon maa-aineksille	
Tunnusten tulkinta-avain						Tapaukset, jotka vaativat erityistä harkintaa, tulisi luokitella kansallisten tai hankekohtaisten vaatimusten mukaisesti
Maa-aines	Päänimike	Toinen tai kolmas aineosa				
Lohkareet	Bo	bo				
Kivet	Co	co				
Sora	Gr	gr		Gr(gr) ja Sa(sa) voidaan jakaa hienoon		
Hiekka	Sa	sa		F(f), keski- M(m) tai karkeaan C(c)		
Siltti	Si	si				
Savi	Cl	cl				
Humus/Orgaaninen	Or	or				
Keinotekoinen maa	Mg	–				
		x		Mikä tahansa osien yhdistelmä		

Maalajien lyhenteet tulevat niiden englanninkielisistä nimistä. Maalaji nimetään pää-lajitteen mukaan. Päälajitteen lyhenteen ensimmäinen kirjain kirjoitetaan isolla kirjaimella. Toissijaisia lajitteita kuvataan täydentävillä nimikkeillä, jotka merkitään päälajitteen eteen pienin kirjaimin. (SFS-käsikirja 179-1 2008, 20.)

2.2.2 Raekokolajitteet

Rakeisuus määritetään karkeiden lajitteiden osalta seulomalla ja hienojen raekokojen osalta esimerkiksi sedimentaatiolla tai optisilla menetelmillä. Menetelmien tulokset esitetään rakeisuuskäyränä. (SFS-käsikirja 179-1 2008, 52.) Taulukossa 8 esitetään ISO-standardin mukaiset raekokolajitteet.

Taulukko 8. Raekokolajitteet. (SFS-käsikirja 179-1 2008, 20)

Maalajitteet	Alalajitteet	Tunnukset	Raekoot mm
Hyvin karkea maa	Suuret lohkareet	LBo	> 630
	Lohkareet	Bo	> 200...630
	Kivet	Co	> 63...200
Karkea maa	Sora	Gr	> 2,0...63
	Karkea sora	CGr	> 20...63
	Keskisora	MGr	> 6,3...20
	Hieno sora	FGr	> 2,0...6,3
	Hiekka	Sa	> 0,063...2,0
	Karkea hiekka	CSa	> 0,63...2
	Keskihiekka	MSa	> 0,2...0,63
	Hieno hiekka	FSa	> 0,063...0,2
Hieno maa	Siltti	Si	> 0,002...0,063
	Karkea siltti	CSi	> 0,02...0,063
	Keskisiltti	MSi	> 0,063...0,02
	Hieno siltti	FSi	> 0,002...0,0063
	Savi	Cl	< 0,002

Taulukko 9 on taulukkoa 8 vastaava englanninkielinen taulukko, josta nähdään kunkin maalajin englanninkielinen nimi ja siitä tuleva lyhenne. Soran, hiekan ja siltin raekoot jaetaan neljään osaan, joiden perusteella ne saavat tarkentavan nimen, esimerkiksi sora, karkea sora, keskisora ja hieno sora (gravel, coarse gravel, medium gravel, fine gravel). (SFS-käsikirja 179-1 2008, 20.)

Taulukko 9. Raekokolajitteet englanninkielisinä. (SFS-käsikirja 179-1 2008, 21)

Soil fractions	Sub-fractions	Symbols	Particle sizes mm
Very coarse soil	Large boulder	LBo	> 630
	Boulder	Bo	> 200 to 630
	Cobble	Co	> 63 to 200
Coarse soil	Gravel	Gr	> 2,0 to 63
	Coarse gravel	CGr	> 20 to 63
	Medium gravel	MGr	> 6,3 to 20
	Fine gravel	FGr	> 2,0 to 6,3
	Sand	Sa	> 0,063 to 2,0
	Coarse sand	CSa	> 0,63 to 2,0
	Medium sand	MSa	> 0,2 to 0,63
	Fine sand	FSa	> 0,063 to 0,2
Fine soil	Silt	Si	> 0,002 to 0,063
	Coarse silt	CSi	> 0,02 to 0,063
	Medium silt	MSi	> 0,006 3 to 0,02
	Fine silt	FSi	> 0,002 to 0,006 3
	Clay	Cl	≤ 0,002

2.2.3 Maan luokitus

Karkeiden ja hyvin karkeiden maa-ainesten luokitus perustuu pelkästään raekoostumukseen. Jos maa koostuu sekä hienosta että karkeasta aineksesta, luokitus perustuu raekoostumuksen lisäksi plastisuuteen. (SFS-käsikirja 179-1 2008, 52.) Taulukossa 10 esitetään hyvin karkean maan luokitus.

Taulukko 10. Hyvin karkean maan luokitus. (SFS-käsikirja 179-1 2008, 52)

Lajite	Painoprosentti	Nimike
Lohkareet	< 5	pieni lohkarepitoisuus
	5...20	keskimääräinen lohkarepitoisuus
	> 20	suuri lohkarepitoisuus
Kivet	< 10	pieni kivipitoisuus
	10...20	keskimääräinen kivipitoisuus
	> 20	suuri kivipitoisuus

Karkeita lajitteita kuvattaessa erotellaan suhteistuneet, lajittuneet ja epäjatkuvat raekokojakautumat (Taulukko 11). Rakeisuuskäyrän muotoa voidaan kuvata kaarevuussuhteella (Kaava 2) ja raekokosuhteella (ks. luku 2.1.4). Termiä epäjatkuvaa käytetään, mikäli tiettyjä raekokoja puuttuu. (SFS-käsikirja 179-1 2008, 52.)

$$C_c = \frac{(d_{30})^2}{d_{10} \cdot d_{60}} \quad (2)$$

$C_c = \text{kaarevuussuhde}$

$d_{30} = \text{löpäisyprosenttia } 30 \text{ vastaava raekoko}$

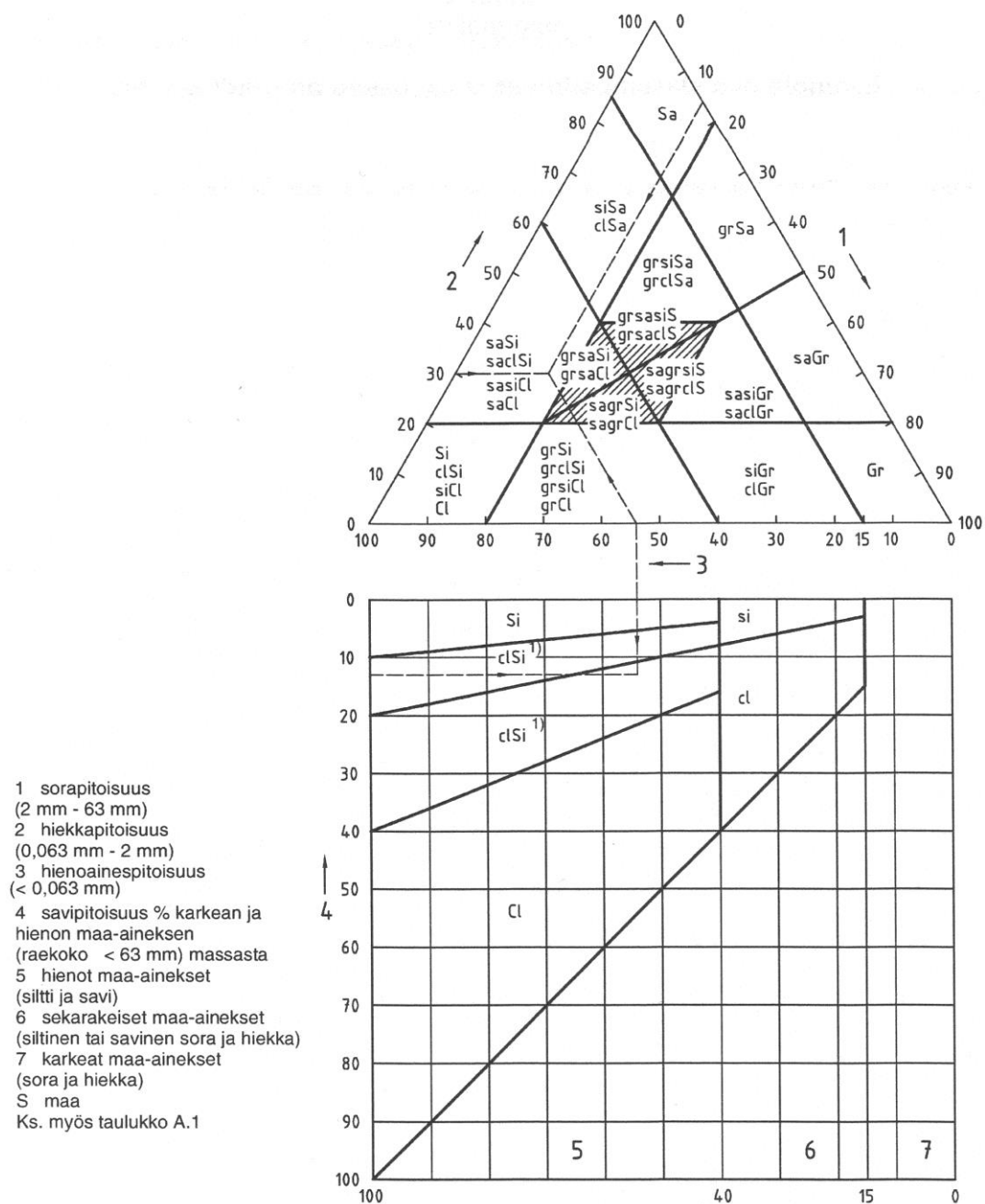
$d_{60} = \text{löpäisyprosenttia } 60 \text{ vastaava raekoko}$

$d_{10} = \text{löpäisyprosenttia } 10 \text{ vastaava raekoko}$

Taulukko 11. Rakeisuuskäyrän muoto. (SFS-käsikirja 179-1 2008, 52)

Rakeisuuskäyrän muoto	C_u	C_c
Suhteistunut	> 15	$1 < C_c < 3$
Osittain lajittunut	6...15	< 1
Lajittunut	< 6	< 1
Epäjatkuva	Yleensä suuri	Mikä tahansa (yleensä < 0,5)

Kuvassa 3 on esimerkki rakeisuuteen perustuvasta maaluokituksesta. Siinä kolmion sivuista ensimmäisellä esitetään sorapitoisuus, toisella esitetään hiekkapitoisuus ja kolmannella esitetään hienoainepitoisuus. Kolmion sivuilta piirretään suorat kolmion sisään samaan pisteeseen siten, että sorapitoisuutta esittävältä sivulta suora piirretään sivun kaksi suuntaisesti, hiekkapitoisuutta esittävältä sivulta suora piirretään sivun kolme suuntaisesti ja hienoainepitoisuutta esittävältä sivulta suora piirretään sivun yksi suuntaisesti. Kolmion alapuolella olevasta ruudukosta määritetään savipitoisuuden perusteella täydentävä nimike. Kuvan 3 esimerkissä maa-aineksen lajitepitoisuuksien mukaan tuloksena saadaan sasiCl eli hiekkainen silttinen savi. (Jääskeläinen 2011, 384-386.)



Kuva 3. Esimerkki vain rakeisuuteen perustuvasta maaluokituksesta. (SFS-käsikirja 179-1 2008, 66) Alapuolisessa ruudukkokuvaajassa alemman clSi tilalla pitäisi olla siCl.

Hienot lajitteet siltti, savi ja savimineraaleja sisältävät maat luokitellaan yleensä plastisuusominaisuuksiensa perusteella. Tämä tehdään laboratoriotestien avulla määrittämällä niiden juoksuraja w_L ja kieritysraja w_P . Plastisuuden aste luokitellaan kuuluvaksi johonkin seuraavista: ei plastinen, vähän plastinen, kohtalaisen plastinen, hyvin plastinen. (SFS-käsikirja 179-1 2008, 54.)

Orgaaniset maa-ainekset on erotettava orgaanista maa-ainesta sisältävistä mineraali-maa-aineksista luokiteltaessa maa-ainesta humuspitoisuuden perusteella (Taulukko 12). Luokiteltaessa karkeita ja sekarakeisia paikalla kerrostuneita orgaanisia maita huomioidaan maa-aines, orgaaninen ainesosa sekä tämän orgaanisen ainesosan alkuperä ja maatumisaste. (SFS-käsikirja 179-1 2008, 54.)

Taulukko 12. Luokitus humuspitoisuuden mukaan. (SFS-käsikirja 179-1 2008, 54.)

Maa-aines	Humuspitoisuus (< 2 mm) paino-% kuiva-aineksesta
vähän humuspitoinen	2...6
humuspitoinen	6...20
hyvin humuspitoinen	> 20

2.2.4 Muut luokitukseen soveltuvat periaatteet

Maata voidaan kuvata myös tiivydellä, suljetulla leikkauslujuudella ja konsistenssiluvulla. Maan luokitteluun erikoistarkoituksessa voidaan käyttää myös esimerkiksi kokoonpuristuvuusindeksiä tai vedenläpäisevyyttä. (SFS-käsikirja 179-1 2008, 54-58.)

Tiivyyttä voidaan kuvata tiiviyysluvun I_d avulla (Taulukko 13). Lukua voidaan verrata kenttäkokeiden kuten heijarikairauksen tuloksiin. Tiiviyysluku on karkeaan maahan liittyvä indeksi, joka riippuu laboratoriossa mitatuista huokosluvusta sekä minimi- ja maksimihuokosluvuista. (SFS-käsikirja 179-1 2008, 50, 54.)

Taulukko 13. Suhteellisen tiivyyden luokitus. (SFS-käsikirja 179-1 2008, 56)

Termi	Suhteellinen tiiviyys I_D %
Hyvin löyhä	0...15
Löyhä	15...35
Keskitiivis	35...65
Tiivis	65...85
Hyvin tiivis	85...100

Suljetun (kuivattamattoman maan) leikkauslujuuden perusteella maata voidaan kuvata taulukon 14 esittämällä termeillä. Hienot maa-ainekset voidaan luokitella myös sensitiivisyyden perusteella. Riippuen sensitiivisyyden saamista arvoista, se on pieni (< 8), keskimääräinen (8–30) tai suuri (> 30). Jos sensitiivisyys on yli 50, kutsutaan maa-ainesta juoksusaveksi (quick clay). (SFS-käsikirja 179-1 2008, 50, 56.)

Taulukko 14. Hienojen maa-ainesten leikkauslujuus. (SFS-käsikirja 179-1 2008, 56)

Savien suljettu leikkauslujuus	Suljettu leikkauslujuus c_u kPa
Erittäin pieni	< 10
Hyvin pieni	10...20
Pieni	20...40
Keskimääräinen	40...75
Suuri	75...150
Hyvin suuri	150...300
Erittäin suuri	> 300
^a Materiaalit, joiden leikkauslujuus on suurempi kuin 300 MPa, voivat käyttäytyä kuten heikot kalliot ja ne tulisi luokitella ISO 14689-1 mukaisesti kallioiksi	

Konsistenssiluvun perusteella käytetään taulukossa 15 esitettyjä termejä. Taulukon jaottelut voivat olla likimääräisiä, etenkin pienen plastisuuden omaavilla aineksilla. Konsistenssiluku lasketaan juoksurajan, luonnontilaisen vesipitoisuuden ja plastisuusluvun avulla. (SFS-käsikirja 179-1 2008, 50, 58.) Konsistenssilla tarkoitetaan hienorakeisten maalajien jäykkyyttä ja muovailtavuutta häirittyinä. (Jääskeläinen 2011, 64.)

Taulukko 15. Silttien ja savien konsistenssiluku. (SFS-käsikirja 179-1 2008, 58)

Silttien ja savien konsistenssi	Konsistenssiluku I_c
Hyvin pehmeä	$< 0,25$
Pehmeä	0,25...0,50
Kova	0,50...0,75
Jäykkä	0,75...1,00
Hyvin jäykkä	$> 1,00$

2.3 Luokitusmenetelmien vertailu

2.3.1 Raekoot ja maaryhmät

Lajitteiden raekokorajat ovat lähes samat geoteknisessä luokituksessa eli GEO-luokituksessa ja Eurooppalaisen standardin mukaisessa luokituksessa. GEO-luokituksessa hienoainekseksi luetaan lajite, jonka raekoko on alle 0,06 mm. ISO-luokituksessa raja on 0,063 mm. Myös muut raekokorajat ovat lähes samoja. Poikkeuksena ovat kivet ja lohkareet, sillä GEO-luokituksen suurimmat kivet (200–600 mm) luetaan ISO-luokituksessa lohkareiksi.

GEO-luokituksen maalajiryhmiä vastaa ISO-luokituksessa maa-ainesryhmät. Maalajiryhmiä hienorakeiset, karkearakeiset ja eloperäiset vastaa maa-ainesryhmät karkea, hieno ja orgaaninen. Lisäksi ISO-luokituksessa omana maa-ainesryhmänä ovat lohkareet ja kivet, jotka kuuluvat maa-ainesryhmään hyvin karkea. ISO-luokituksessa omana maa-ainesryhmänä on myös keinotekoinen maapohja, joka tarkoittaa esimerkiksi uudelleen sijoitettuja luonnonaineksia.

2.3.2 Luokitus ja nimeäminen

GEO-luokitus perustuu humuspitoisuuteen ja raekoostumukseen. ISO-luokituksessa myös plastisuus kuuluu raekoostumuksen ja humuspitoisuuden ohella peruskriteereihin. Tässä ei kuitenkaan varsinaista eroa ole, sillä myös GEO-luokituksen mukaan maalajeja voidaan kuvata plastisuusominaisuuksilla.

Raekoostumukseen perustuvassa maalajien nimeämisessä on luokitusten välillä eroja. GEO-luokituksen menetelmä nimetä maalajit rakeisuuskäyrältä d_{50} -menetelmällä korvataan ISO-luokituksessa nomogrammi-tyyppisellä kolmiomenetelmällä. Lisäksi ISO-luokituksessa maalajilla voi olla täydentäviä nimiä enemmän kuin yksi.

Suurimpia eroja luokitusten välillä on, ettei Eurooppalaisen standardin mukaisessa luokituksessa ole moreenia. GEO-luokituksen moreenimaalajeja siltti-, hiekka- ja

soramoreeneja ei ole lainkaan ISO-luokituksessa. Se ei kuitenkaan tarkoita, etteikö ISO-standardista löytyisi moreenia vastaavaa maalajia, joskaan ei moreeni-nimellä.

2.3.3 Muut erot luokitusten välillä

ISO-luokituksessa tiiviyttä arvioidaan suhteellisen tiiviyden avulla. GEO-luokituksen ohjeissa vuodelta 1974 esitetään ainoastaan rakenteellisen tiiviyden arviointi kuivatilavuuspainon avulla. Kuitenkin myös GEO-luokituksessa käytetään tiiviyden arviointiin suhteellista tiiviyttä.

Hienorakeisten maa-ainesten kuvaamisessa leikkauslujuuden ja sensitiivisyyden avulla on eroja. GEO-luokituksessa leikkauslujuuden perusteella nimeäminen tapahtuu viisiportaisen luokituksen mukaan, kun ISO-luokituksessa käytetään seitsemänportaista luokitusta. Myös lujuuden kuvaamisessa käytetyt termit ovat erilaisia. Sensitiivisyydessä on molemmissa luokitusmenetelmissä kolmeportainen asteikko, mutta arvot, joiden rajoissa nimeäminen tapahtuu, ovat suuruudeltaan hieman erilaiset.

GEO-luokituksen mukaisessa leikkauslujuuden perusteella tapahtuvassa kuvailussa käytetään osin samoja termejä, joita käytetään ISO-luokituksessa konsistenssiluvun avulla tapahtuvassa luokituksessa.

3 POHJATUTKIMUS

3.1 Yleistä

Eurooppalaisen standardin mukaiset pohjatutkimusten yleiset vaatimukset tulevat standardista SFS-EN 1997-2 Eurokoodi 7. Geotekninen suunnittelu. Osa 2: Pohjatutkimus ja koestus. Standardissa on sääntöjä, jotka koskevat pohjatutkimusten suunnittelua ja raportointia, laboratorio- ja kenttäkokeita, koetulosten tulkintaa ja arviointia sekä geoteknisten parametrien määrittämistä. Lisäksi standardissa esitetään esimerkkejä kenttäkoetulosten soveltamisesta suunnitteluun. Standardissa on myös velvoittavia viittauksia muihin julkaisuihin. Standardi on tarkoitettu käytettäväksi yhdessä standardin SFS-EN 1997-1 kanssa. (SFS-EN 1997-2, 13.)

”Geoteknisten tutkimusten tulee tuottaa riittävästi tietoja, jotka koskevat pohja- ja pohjavesiolosuhteita rakennuspaikalla ja sen ympäristössä ja joita tarvitaan oleellisten maapohjan ominaisuuksien asianmukaiseen kuvaamiseen ja mitoituslaskelmissa käytettävien maaparametrien ominaisarvojen luotettavaan arviointiin.” (SFS-EN 1997-1, 35.)

Edelleen käytössä olevien normien mukaisia määräyksiä liittyen pohjatutkimuksiin on esitetty rakentamismääräyskokoelman osassa B3. RakMK:n osa B3 sisältyy kokonaisuudessaan vuodelta 2004 peräisin oleviin pohjarakennusohjeisiin, jossa on lisäohjeita ja viittauksia muihin ohjeisiin liittyen pohjatutkimuksiin. (RIL 121-2004, 3, 7.)

3.2 Pohjatutkimusmenetelmät

Ennen varsinaisiin pohjatutkimuksiin kuten kairauksiin ryhtymistä on syytä tehdä havaintoihin perustuva maastokatselmus, jossa kiinnitetään huomiota muun muassa alueen pinnanmuotoihin, kasvipeitteeseen, avokallioihin ja kivisyyteen. Havaintojen ja käytettävissä olevien geologisten karttojen avulla pyritään tekemään päätelmiä alueen maaperästä ja niiden rakenteesta. Maastokatselmuksen perusteella ratkaistaan pohjatutkimusten laatu ja laajuus. (Rantamäki ym. 1997, 257.)

Seuraavassa on esitelty yleisimmät käytössä olevat pohjatutkimusmenetelmät sekä myös joitakin hieman harvinaisempia menetelmiä. Menetelmät esitellään pääasiassa siten kuin niiden suorittaminen on vakiintunut Suomessa käytettäväksi. Mikäli standardissa SFS-EN 1997-2 on esitetty selvästi jotakin uutta liittyen esiteltävään menetelmään, on siitä mainittu menetelmän kuvauksen yhteydessä.

3.2.1 Painokairaus

Painokairaus on Suomessa käytetyistä kairausmenetelmistä yleisin. Sen avulla saadaan perustietoa maaperästä pehmeiköiltä aina keskittiiviisiin moreeneihin asti. Painokairauksella voidaan selvittää erilaisen kairausvastuksen omaavien maakerrosten rajat, tiiviin pohjakerroksen sijainti sekä maakerrosten suhteellinen tiiviys. (Jääskeläinen 2011, 246; Rantamäki ym. 1997, 272.)

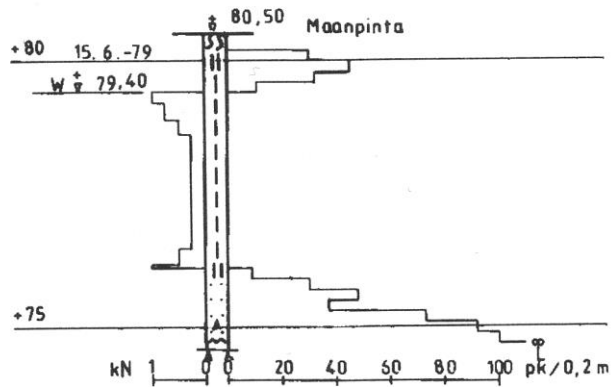
Painokairaus tehdään nykyisin lähes poikkeuksetta telaketjuilla liikkuvilla monitoimikairauskoneilla. Kairaus aloitetaan tekemällä alkukairausreikä, jolloin puhkaistaan lapiolla esimerkiksi juurakkoinen pintamaa tai rikotaan pintarouta. Tarkoituksena on sekä mahdollistaa kairaus että poistaa tulosta vääristävät tekijät. (Jääskeläinen 2011, 247.)

Kierretapin avulla jatkettava kairatanko kärkikappaleineen painetaan maahan alkukairausreikään. Painoja vaihtamalla etsitään pienin massa, jolla kaira painuu vapaasti. Painojen avulla saadaan kuormitusarja 5-15-25-50-75-100 kg. Painuman ylittäessä 50 mm/s, tulee kokeilla pienempää painoa. Alle 20 mm/s painumanopeuksia ei tarvitse odottaa muulloin kuin täysillä painoilla, jolloin kairan painumista odotetaan aina nopeuteen 5 mm/s asti. Tämän painumanopeuden alittuessa tai kun kaira ei painu täysillä painoilla lainkaan, aletaan kiertää. Kairan kierto mitataan puolikierroksina 0,2 metriä kohden. Jos kaira ei kiertämälläkään tunkeudu maahan tai tunkeutuminen 100 puolikierroksella jää alle 0,2 metriä, otetaan painot pois ja kairaa lyödään. Mikäli kaira ei painu lyömälläkään, on kairaus päättynyt. (Jääskeläinen 2011, 247-248; Kairausopas I 1980, 12-20.)

Painokairauksesta pidetään pöytäkirjaa (Kuva 4), josta selviää kairan kuormitus, vaadittu puolikierrosten määrä 0,2 metrin painumaa kohden, lyönnit, kärjen syvyys, painuma ja kairauksen päättymisen syy. Lisäksi pöytäkirjaan merkitään muut havainnot kuten arvioidut maalajit. Pöytäkirjan perusteella piirretään painokairauskuvaaja (Kuva 5). (Jääskeläinen 2011, 248-249.)

SIVI' <u>1</u>		OY KAIRAUSLIIKE AB		KAIRAAJA <u>VL</u>	
PVM <u>15.6.-79</u>		PL/PISTE <u>5</u>		VAS <u> </u> OIK <u> </u>	
TILAAJA/TYÖKOHDDE <u>Puh.keskus Lahti</u> X <u> </u> Y <u> </u>					
TYÖ NO <u>4911</u>		MAAN/VEDENPINNAN KORKEUS <u>+80.50/+79.40</u>			
<input checked="" type="checkbox"/> PAINOKAIRAUS: <input type="checkbox"/> KÄSIN <input checked="" type="checkbox"/> KONEELLINEN <input type="checkbox"/> VAUNU <input type="checkbox"/> HEIJARIKAIRAUS: <input type="checkbox"/> HEIJARIPUKKI <input type="checkbox"/> VAPAAPUDOTUS <input type="checkbox"/> MUU <input type="checkbox"/> TÄRYKAIRAUS:					
Kärjen syvyys m	Painuma m	Kuormitus kN	Puol.k. lyönnin määrä	Arvioidut maalajit	Huom. Kurvakuori, routaraja, alkukairustapa ja -syvyys, vedenpinta, näytteet taut, kairausryitykset ja kallio
0.30	—	—	—	Hm	Kärki lyöty maahan
0.50	0.20	1.00	30	Si, Sa	
0.70	0.20	1.00	45	Si, Sa	
0.90	0.20	1.00	32	Si, Sa	
1.10	0.20	1.00	11	Si, Sa	Veden pinta 1.1m
1.30	0.20	1.00	—	Sa	
1.62	0.32	0.75	—	Sa	
1.90	0.28	0.50	—	Sa	
4.03	2.13	0.25	—	Sa	
4.32	0.29	0.50	—	Sa	
4.40	0.08	1.00	—	Si	
4.60	0.20	1.00	9	Si	
4.80	0.20	1.00	30	Hk	
5.00	0.20	1.00	48	Hk	
5.20	0.20	1.00	37	Hk	
5.40	0.20	1.00	73	Hk	
5.60	0.20	1.00	92	Hk	Kiviä
5.80	0.20	1.00	100	Mr	
5.85	0.05	1.00	100	Mr	
5.96	0.11	1.00	—	Mr	Lyöty 20 kertaa
					Todennäk. kallio
KAIRAUKSEN PÄÄTTYMINEN: <input type="checkbox"/> MÄÄRÄSYV. <input type="checkbox"/> TIIVIS MAAKERROS <input type="checkbox"/> KIVI TAI LOHKARE <input checked="" type="checkbox"/> KIVI, LOHKARE TAI KALLIO <input type="checkbox"/> KALLIO					

Kuva 4. Esimerkki painokairauspöytäkirjasta. (Jääskeläinen 2011, 248)



Kuva 5. Kuvan 4 pöytäkirjaa vastaava painokairausdiagrammi. (Jääskeläinen 2011, 249)

3.2.2 Heijarikairaus

Heijarikairauksessa käytetään tiiviiden ja karkearakeisten maakerrosten tutkimiseen. Menetelmä soveltuu erityisesti tiiviin pohjakerroksen sijainnin selvittämiseen tukipaaluja tavoitetason määrittämiseksi. Pehmeiden hienorakeisten maakerrosten tutkimiseen se ei kuitenkaan sovellu. Myös kerrosrajojen selvillesaanti on epävarmempaa kuin painokairauksella. (Rantamäki ym. 1997, 263-264; Kairausopas I 1980, 37-38.)

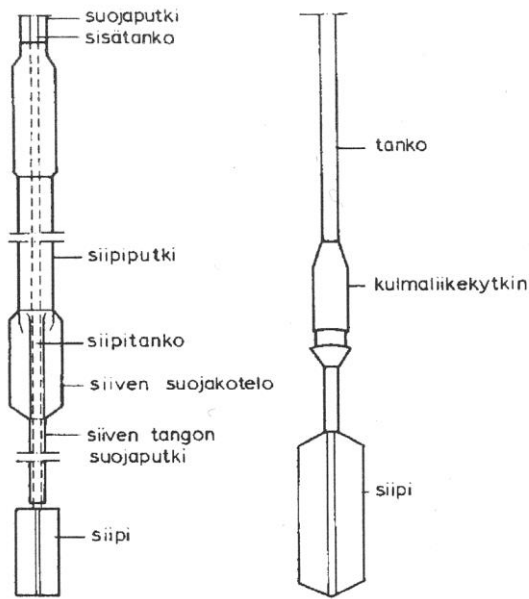
Myös heijarikairaus tehdään nykyään useimmiten monitoimikairalla. Heijarikairauksessa pudotetaan paino eli heijari aina samasta korkeudesta kairatankoon kiinnitettyä iskualustaa vasten. Heijarin massa on 63,5 kg ja pudotuskorkeus 50 cm. Kärkikappale on vakioitu, standardoitu kappale. Jokaiseen 0,2 metrin tunkeumaan vaadittu lyöntien määrä merkitään pöytäkirjaan. Mikäli kairatangot uppoavat maahan ilman lyöntiä, ne painetaan ensin siihen syvyyteen, mistä lyöntiä tarvitaan. Kairaus päättyy annettuun tavoitesyvyyteen, kiveen tai kallioon. Muutoin rajana pidetään yleensä tilannetta, missä pitkään on tarvittu enemmän kuin yksi isku millimetriä kohden. Kairauspöytäkirjan perusteella piirretään heijarikairausdiagrammi. (Jääskeläinen 2011, 253-255.)

3.2.3 Siipikairaus

Siipikairaus on tärkeä maaperän leikkauslujuuden mittaustapa. Se soveltuu hienora-keisten maiden, kuten saven ja savisen siltin tutkimiseen. (Rantamäki ym. 1997, 269-272.)

Siipikairan kärkikappale on nelisakarainen siipi, joka jatkotankoineen upotetaan suo-
japutken sisässä maahan. Sen jälkeen siipi työnnetään suojuksestaan ulos maahan
mittausta varten. Siipeä kierretään maan sisässä tasaisesti ja hitaasti, noin 0,1 astetta
sekuntia kohden. Oleellista on saada kirjattua kiertymiseen tarvittava momentti kul-
lakin hetkellä. Vääntö yrittää pyöräyttää terää maassa ja leikata sylinterinmuotoisen
kappaleen. Suurin siiven kiertymiseen tarvittava momentti vastaa häiriintymättömän
maan leikkauslujuutta. Huippulujuuden jälkeistä jonkin aikaa vakiona jatkuvaa leik-
kauslujuutta kutsutaan jäännöslujuudeksi. Sillä on suunnittelun kannalta merkitystä
varmuuskertoimen määrittämisessä. Maarakenteissa pyritään yleensä siihen, että jänni-
tykset pysyisivät jäännöslujuuden alapuolella. Mittauksen lopuksi siipeä kierretään
20 kierrosta, jonka jälkeen mitataan häirityn maan leikkauslujuutta vastaava mo-
mentti. (Jääskeläinen 2011, 261-263.)

Siipikairauksessa käytetyn suo-
japutken tarkoitus on estää siiven yläpuolella olevien
tankojen hankauksen vaikutus lopputulokseen. Samaan tarkoitukseen voidaan käyt-
tää myös kulmaliikekytkintä (Kuva 6), joka sallii mitattaessa tankojen pyöriä jonkin
aikaa ilman, että se vaikuttaa siipeen. Kun liikevara loppuu, tangon vääntö kohdistuu
myös siipeen. Tällöin on kuitenkin jo saatu selville tankojen hankauksen aiheuttama
osuus momentista, jolloin se voidaan vähentää tulosta laskettaessa. (Jääskeläinen
2011, 261-262.)



Kuva 6. Suojaputkisto ja kulmaliikeytkin. (Jääskeläinen 2011, 261)

Mittauksia tehdään yleensä 0,5 tai 1,0 metrin välein savikon pohjaan asti. Pisteitä valitaan pieniä kohteita lukuun ottamatta kolme tai enemmän, jotta saataisiin selville, vastaako esimerkiksi painokairan jostakin kerroksesta antama vastus aina samaa leikkauslujuutta muissakin pisteissä. Mikäli tällainen yhteys löytyy, havainnot voidaan laajentaa myös niihin pisteisiin, missä siipikairausta ei tehty. (Jääskeläinen 2011, 261.)

Murtohetkellä vallitsevan suurimman vääntömomentin sekä siivekkeen geometriatietojen (Kuva 7) perusteella voidaan leikkauslujuus laskea kaavojen 3 ja 4 avulla. Teräskertoimen kaava on johdettavissa leikkautumista vastustavien sylinterin vaipan ja päätypintojen aloista sekä näiden momenttivarsista. (Jääskeläinen 2011, 115; Rantamäki ym. 1997, 141-142.)

$$\tau_f = k \cdot M \quad (3)$$

$$k = \frac{1}{\pi \left(\frac{D^2 \cdot h}{2} + \frac{D^3}{6} \right)} \quad (4)$$

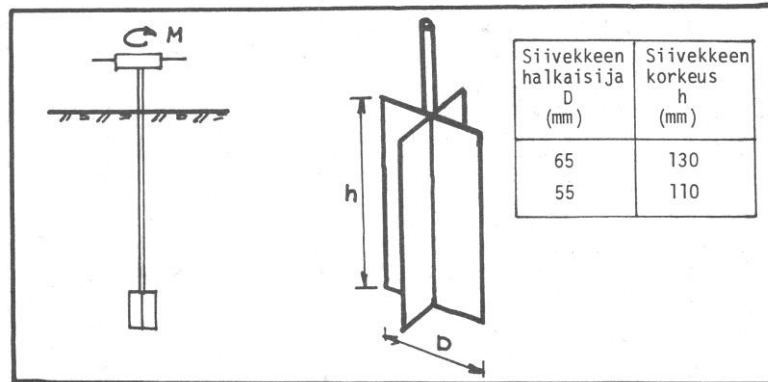
τ_f = leikkauslujuus

k = teräkerroin

M = suurin mitattu vääntömomenti

D = siivekkeen leveys

h = siivekkeen korkeus

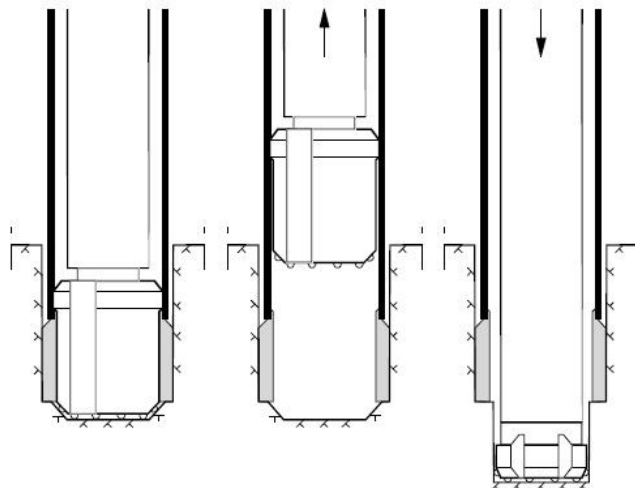


Kuva 7. Siipikairaus. (Rantamäki ym. 1997, 142)

3.2.4 Porakonekairaus

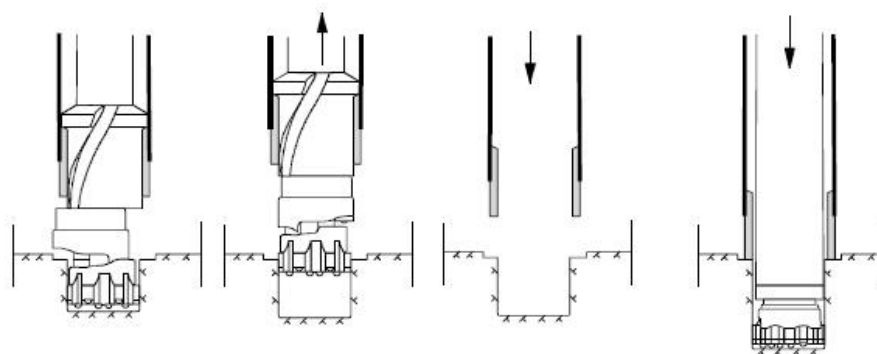
Porakonekairausta käytetään kallionpinnan sijainnin määrittämiseen ja näytteenotto-kairauksiin. Sitä voidaan käyttää myös putkien asentamiseen muita kairauksia tai pohjavesihavaintoja varten. (Rantamäki ym. 1997, 267.)

Usein maakerrosten läpi poratessa tarvitaan apuna suojaputkea. Sen viemisessä maan ja kivien läpi voidaan käyttää kahta erilaista tapaa. Keskinen porausmenetelmä (Kuva 8) perustuu varsinaisen reiän tekevän poran, pilottikruunun ympärillä olevaan avarrinkruunuun. Nykyään on käytössä kaksi erilaista keskistä porausmenetelmää, joista vanhemmassa menetelmässä suojaputki on kiinni avarrinkruunussa siten, että myös suojaputki pyörii. Uudemmassa menetelmässä porausputken alapäähän kiinnitetty avarrinkruunu pääsee pyörimään ilman suojaputken pyörimistä. Porakonekairauksessa poistettavan maa-aineksen huuhteluun käytetään ilmaa, vettä, polymeerejä tai sementtilaastia. (Jääskeläinen 2011, 258; Tiehallinto 2001, 76-78.)



Kuva 8. Keskinen porausmenetelmä. (Tiehallinto 2001, 77)

Epäkeskisessä menetelmässä (Kuva 9) käytetään pilottikruunun ohessa epäkeskistä avarrinkruunua, joka kairaa pilottikruunun tekemän porausreiän hieman suuremmaksi kuin suojaputken halkaisija. Suojaputkea vedetään laitteistolla samanaikaisesti mukana. Kun poraa kierretään vastakkaiseen suuntaan, avarrinkruunu sulkeutuu asentoon, jossa se sopii putken sisään ja pora voidaan vetää ylös. Tällöin saavuttaessa kallion pintaan, putki voidaan jättää paikoilleen ja jatkaa porausta tavallisena kallioporauksena. (Tiehallinto 2001, 75.)



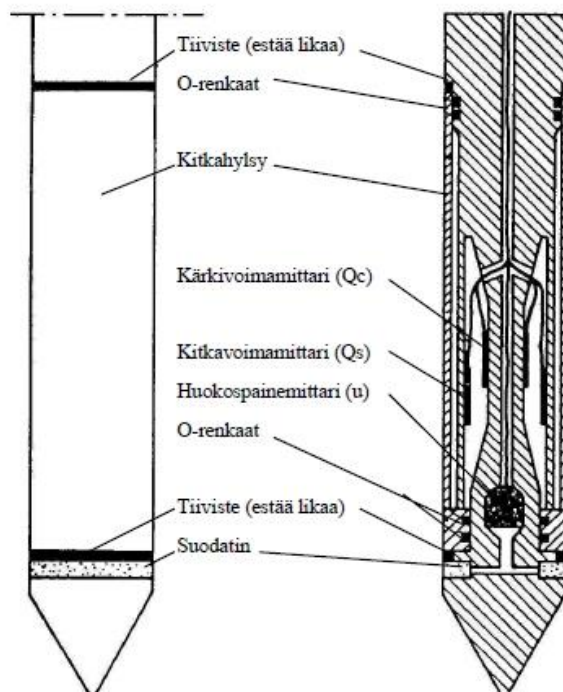
Kuva9. Epäkeskinen porausmenetelmä. (Tiehallinto 2001, 76)

Kallion olemassaolo varmistetaan poraamalla kallioon reikää useampia metrejä. Näin voidaan poistaa epäily esimerkiksi kiveen osumisesta. Porauksen aikana havainnoidaan poran tunkeutumismuutosta, jolloin saadaan selvitettyä kallion laadun vaihtelua. Näytteitä voidaan ottaa porausjauheesta tai sopivalla kalustolla sydännäytteenä kallioista. (Jääskeläinen 2011, 259.)

3.2.5 Puristinkairaus

Puristinkairausta käytetään mittaamaan maaperän lujuus- ja tiivysominaisuuksia sekä maakerrosten rajapinnan sijaintia kivettömissä ja pehmeissä maissa. Menetelmässä standardinmukaista kärkikappaletta puristetaan vakionopeudella 20 mm/s maahan ja samalla mitataan kullakin syvyydellä puristamiseen tarvittavia voimia. (Jääskeläinen 2011, 263-264.)

Kairan kärkiosasta voidaan mitata niin kärkikappaleeseen kohdistuva kärkivastus kuin kärkiosan vaippaan kohdistuva vaippakitka. Lisäksi niin kutsutulla CPTU-kairalla (Kuva 10) on mahdollista mitata huokosvedenpainetta. (Törnqvist, J., Juvankoski, M. & Tamminrinne 2001, 6.) Ottamalla huomioon huokosvedenpaineen vaikutus kärkikappaleeseen saadaan laskettua korjattu kärkivastus ja vaippakitka. Yksi tärkeä tunnusluku on kitkasuhde, joka on korjattu vaippakitka jaettuna korjatulla kärkivastuksella. Kitkasuhteen muutokset viittaavat maalajin vaihtumiseen. (Jääskeläinen 2011, 264-266.)



Kuva 10. CPTU-puristinkairan kärkiosa. (Törnqvist, J., Juvankoski, M. & Tamminrinne 2001, 7)

Edustavien mittaustulosten saaminen ohuista kerroksista on hankalaa, sillä kärkivastukseen vaikuttaa myös mittakohdan ylä- ja alapuolinen maa. Tiiviiltä välikerrokselta vaaditaan noin 0,5 metrin ja löyhältä välikerrokselta noin 0,2–0,4 metrin paksuutta, että tulokset olisivat edustavia. Puristinkairauksen tulkintaa auttaa siihen kehitetyt nomogrammit. (Jääskeläinen 2011, 263-266.)

3.2.6 Puristin-heijarikairaus

Puristin-heijarikairauksessa yhdistetään puristin- ja heijarikairauksen ominaisuuksia yhteen. Näin voidaan yhdellä menetelmällä tutkia sekä pehmeiden maiden että tiiviiden kitkamaiden ominaisuuksia. (Jääskeläinen 2011, 267.)

Kairaus aloitetaan puristinkairauksella. Kairan kärkenä käytetään normaalia heijarikairan kärkeä. Kairaustankoja pyöritetään koko kairauksen ajan noin 12 kierrosta minuutissa. Kiertämisen tavoitteena on pitää kairaustangot suorina ja pienentää kitkaa. Upotusnopeus on sama 20 mm/s kuin tavallisessa puristinkairauksessa. Kärkivastuksen selvittäminen on oleellinen selvitettävä asia. Myös tankojen pyöriytykseen tarvittava momentti mitataan. Kun maksimipuristusvoima on saavutettu, siirrytään heijarikairaukseen. Takaisin puristinkairaukseen siirrytään mikäli heijarikairausvaiheen lyöntien määrä 0,2 metriä kohden jää korkeintaan viiteen yli 0,4 metrin matkalla. Kairaustapaa ei kuitenkaan ole syytä vaihtaa tulosten tulkinnan vaikeutumisen vuoksi silloin, kun tutkimuspaikalla on havaittu maakerrosten vaihtelevan tiheästi. Kairaus päätetään aina heijarikairaukseen. (Jääskeläinen 2011, 268.)

3.2.7 Tärykairaus

Tärykairauksessa kairatangot upotetaan maahan esimerkiksi käsikäyttöisellä kallio-porakoneella. Tankoina käytetään usein painokairan tankoja. Monitoimikairoissa tärytyslaite on yleensä mukana. Tärykairausta käytetään usein apututkimustapana, kun halutaan varmistaa kallion sijainti. (Jääskeläinen 2011, 256.)

Kairauksessa havaitaan yleensä vain suuret muutokset kuten esimerkiksi siirtyminen pehmeästä savesta alla olevaan tiiviiseen moreeniin. Tankoja jatkettaessa voidaan

tehdä äänihavaintoja kairaa pyörittämällä. Parhaiten tärykairaus toimii esimerkiksi johtolinjojen ja tieleikkausten pohjatutkimuksissa, kun tavoitteena on vain varmistaa, ettei kalliota esiinny tietyn kaivutason yläpuolella. Tärykairausesityksissä kaikki kairausyritykset pyritään näyttämään piirustuksissa, sillä esimerkiksi matalaan jääneet kairaukset saattavat kertoa kivisestä maaperästä. (Jääskeläinen 2011, 256-257; Rantamäki ym. 1997, 262.)

3.2.8 SPT-kairaus

SPT-kairausta ei juurikaan Suomessa käytetä, mutta maailmanlaajuisesti se on yleisesti käytetty menetelmä. Siinä kairausreiän pohjalta lyödään 63,5 kg:n painolla 0,76 metrin korkeudelta maahan paksuseinäistä näytteenotinta kolme kertaa 150 mm matkan. Kahdesta jälkimmäisestä kerrasta lasketaan iskut yhteen, jolloin saadaan SPT-vastus. Se on toisin sanoen iskujen määrä 0,3 metriä kohden. Mittaus tehdään 1-2 metrin, yleensä 1,5 metrin välein. Mittauksesta saadaan häiriintynyt näyte tutkittavaksi. Soraisissa maissa näytteenottimen päähän voidaan asettaa umpikärkikappale. SPT-kairauksesta saadaan tulokset mittausvälein. Lisäksi näytteenotto varmentaa saatua tietoa. (Jääskeläinen 2011, 270.)

3.2.9 Näytteenotto

Maanäytteet voivat olla häiriintyneitä tai häiriintymättömiä tavoitteista ja näytteen ottotavasta riippuen. Häiriintymättömän näytteen voidaan ajatella edustavan luonnontilaista maata, jossa maalajin rakenne on säilynyt ehyenä. Häiriintymättömiä näytteitä käytetään laboratoriossa tehtäviin lujuus- ja muodonmuutuskokeisiin. Häiriintyneen näytteen maalajin sisäinen rakenne on särkynyt, mutta ainesosat ovat tallessa alkuperäisessä suhteessa. Häiriintyneistä näytteistä voidaan selvittää muun muassa kosteus, rakeisuus, routivuus ja humuspitoisuus. (Jääskeläinen 2011, 274; Rantamäki ym. 1997, 274.)

Häiriintymättömän näytteen otto

Häiriintymättömän näytteen ottolaitteelle esitetään vaatimuksia kohdistuen muun muassa näytteenottoputken halkaisijaan ja seinämäpaksuuteen. Halkaisijan tulisi olla vähintään 50 mm, sillä liian pieneen reikään puristuessaan maa-aineksella on taipumus pusertua kokoon. Seinämäpaksuuden tulisi olla mahdollisimman pieni, jotta näyte liukuisi sylinteriin häiriintymättömänä. Muita vaatimuksia asianmukaisen näytteen saamiseksi on mahdollisimman pieni kärjen teroituskulma ja mahdollisimman sileä putken sisäpinta. Myös tehtäessä putken suuaukko hieman putken halkaisijaa pienemmäksi vältetään näytteen hankaus putken sisäseinämään. Näytteen pituudelle rajoituksia asettaa maalajin ominaisuudet. (Jääskeläinen 2011, 274-275.)

Häiriintymättömiä maanäytteitä voidaan ottaa koekuopan pohjalta sylinterimäisiin purkkeihin, jotka voidaan sulkea tiiviisti. Häiriintymättömien näytteiden varsinaisia ottovälineitä ovat mäntäkairat. Perusrakenteena niissä on terävällä leikkuureunalla varustettu sylinteri, jonka sulkee tai avaa sylinterissä liikuteltava mäntä. Erityyppisiä mäntäkairoja ovat muun muassa ST-I, ST-II, norjalaistyyppinen ja foliomäntäkaira. (Jääskeläinen 2011, 275; Rantamäki ym. 1997, 277-278.)

Häiriintyneen näytteen otto

Häiriintyneiden maanäytteiden ottamiseen pintakerroksesta käytetään kierre- tai lapiokairaa. Muita häiriintyneiden näytteiden näytteenottimia ovat pienoismäntäkaira, lusikkamäntäkaira, kannukaira tai heijarikairan näytteenotin, jota voidaan käyttää tiiviimmissä kitkamaissa ja moreeneissa. (Jääskeläinen 2011, 276-278.)

Eurokoodin menetelmä- ja laatuluokat

Eurokoodissa SFS-EN 1997-2 viitataan standardiin EN ISO 22475-1 näytteidenoton menetelmäluokkia ja näytteiden laatuluokkia määritettäessä. Näytteenottomenetelmäluokkia on kolme ja mahdollisia näytteiden laatuluokkia viisi. (SFS-EN 1997-2, 31.)

- Luokan A näytteenottomenetelmä: Voidaan saada laatuluokkien 1...5 näytteitä

- Luokan B näytteenottomenetelmä: Voidaan saada laatuluokkien 3...5 näytteitä
- Luokan C näytteenottomenetelmä: Voidaan saada vain laatuluokan 5 näytteitä

Laatuluokkien 1 ja 2 näytteissä maan rakenne ei ole häiriintynyt tai se on häiriintynyt vain vähän. Muiden luokkien näytteet ovat häiriintyneitä. (SFS-EN 1997-2, 31.) Taulukossa 16 on esitelty eräisiin laboratoriokokeisiin käytettävien maanäytteiden laatuluokat ja käytettävät näytteenottomenetelmät.

Taulukko 16. Laboratoriokokeisiin käytettävien maanäytteiden laatuluokat ja käytettävät näytteenottoluokat. (SFS-EN 1997-2, 32)

Maan ominaisuudet / laatuluokka	1	2	3	4	5
Muuttumattomat maan ominaisuudet					
raekoko (rakeisuus)	*	*	*	*	
vesipitoisuus	*	*	*		
tiheys, tiiviysluku, vedenläpäisevyys	*	*			
kokoontuuvuus, leikkauslujuus	*				
Ominaisuudet, jotka voidaan määrittää					
kerrosjärjestys	*	*	*	*	*
kerrostumien rajat – karkeat	*	*	*	*	
kerrostumien rajat – hienot	*	*			
Atterbergin rajat, kiintotiheys, orgaanisen aineksen pitoisuus	*	*	*	*	
vesipitoisuus	*	*	*		
tiheys, tiiviysluku, huokoisuus, vedenläpäisevyys	*	*			
kokoontuuvuus, leikkauslujuus	*				
Näytteenottoluokitus standardin EN ISO 22475-1 mukaisesti	A				
	B				
				C	

3.2.10 Pohjavesipinnan määrittäminen

Pohjavesipinnan korkeus on oleellinen tieto jokaisessa rakennuskohteessa. Sillä saattaa olla vaikutusta esimerkiksi perustamisratkaisuihin ja niissä käytettyihin työtapoihin. Pohjavesipinnan asema on myös tärkeä lähtötieto geoteknisissä laskelmissa. Koska pohjavesipinnan korkeus vaihtelee vuodenaikojen ja sateisuuden mukaan, pitäisi mittauksia tehdä riittävän pitkältä ajanjaksolta pohjavesipinnan vaihtelun selvittämiseksi. Pohjavesipinnan korkeuden tutkimiseen käytetään yleensä pohjavesiputkia. Havaintoja voidaan tehdä myös muiden pohjatutkimusten yhteydessä. (Jääskeläinen 2011, 280.)

Pohjavesiputket ovat yleensä halkaisijaltaan 32–50 mm:n teräsputkia, joiden alaosa on rei'itetty tai uritettu 700–2000 mm:n pituudelta. Pitkäaikaiseen käyttöön tarkoite-

tut putket ovat usein PVC- tai PEH-muoviputkia, joiden halkaisija on 20–60 mm. Muoviputken etuna on ruostumattomuus. Huokosvedenpaineen mittaamiseen käytetään yleensä huokoskärjellä varustettuja putkia, joihin on sijoitettu sähköisiä antureita. (Tielaitos 1998, 75.)

Helppoissa kohteissa pohjavesipinnan korkotaso voidaan määrittää yhden putken avulla. Laajemmissa kohteissa käytetään kolmea tai useampaa putkea, jolloin voidaan selvittää myös pohjavesivirtauksen suunta. Löyhissä kivettömissä maissa metallinen pohjavesiputki voidaan asentaa kairauslaitteistolla lyömällä. Tiiviimmissä maissa putki voidaan upottaa heijarikairalla tehtyyn reikään, ja kovaan maahan putki saadaan porakonekairauksella. Putken alapää upotetaan vettä johtavaan kerrokseen. Maanpinnalta reikä tiivistetään, etteivät pintavedet valu siihen. Putken yläpää ulotetaan noin metrin maanpinnan yläpuolelle, jolloin se on aina löydettävissä. Yläpää on syytä suojata tulpalla. Putkien yläpään vaaitsemisen jälkeen mittajaan tarvitsee mitata vain vesipinnan etäisyys putken päästä. (Jääskeläinen 2011, 280-281.)

3.2.11 Muut pohjatutkimusmenetelmät

Muita pohjatutkimusmenetelmiä ovat esimerkiksi seisminen luotaus, maatulkuuotaus, sähköinen vastusluotaus ja kaikuluotaus. Yhteistä näille menetelmille on se, että laitteistoja kehitetään koko ajan, ja monet laitteet vaativat hyvää geotekniikan tunte-
musta ja laitetuntemusta. Useat näistä menetelmistä ovat myös ainetta rikkomattomia menetelmiä. (Jääskeläinen 2011, 284-287.)

Seisminen luotaus

Seismissen luotauksen avulla selvitetään kallioperän sijaintia ja maakerrosolosuhteita. Mittauksessa aiheutetaan maaperään paineaalto esimerkiksi räjäytyspanoksella. Paineaalto etenee joka suuntaan ja sen nopeus on sitä suurempi, mitä tiheämmässä aineessa se kulkee. Maanpinnalle tasavälein asetetut anturit, geofonit havainnoivat paineaaltoja. Lähimpänä oleville geofoneille signaali tulee suoraan maanpintaa pitkin. Kauempana olevat geofonit saattavat saada ensimmäisen signaalin kallion tai muun

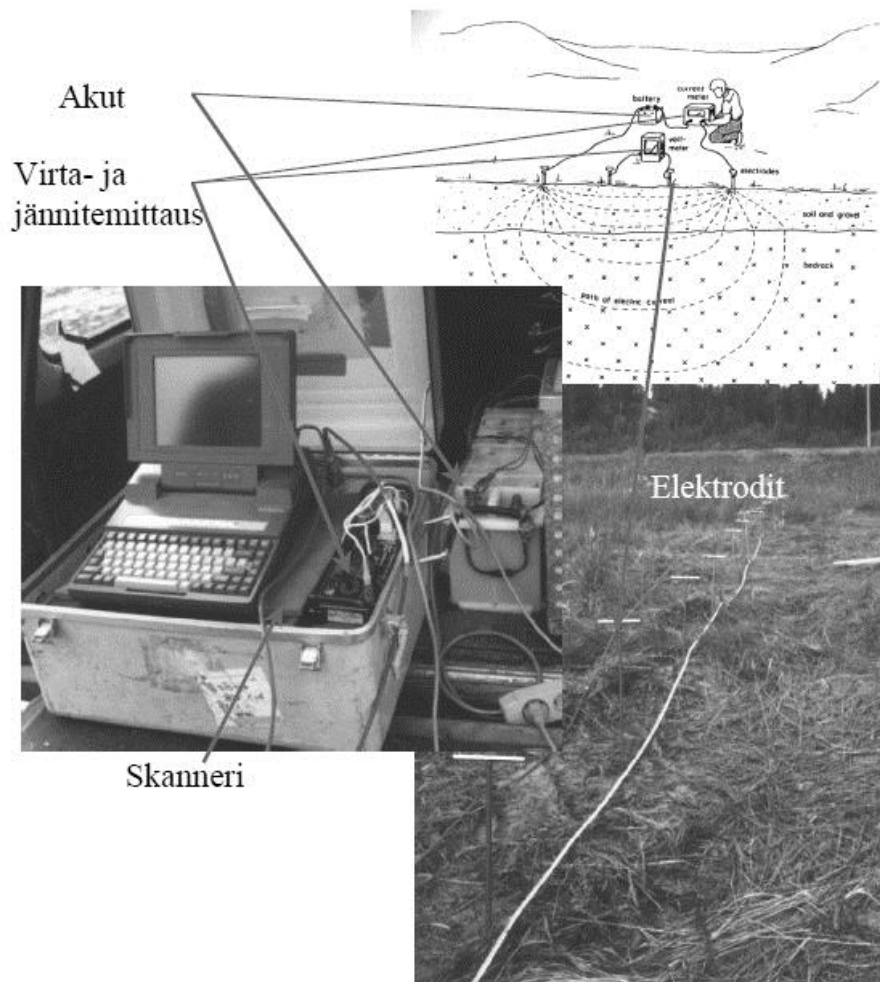
maakerroksen kautta. Eri suuntiin tehtävät mittaukset tarkentavat tulosta, mikäli esimerkiksi kallionpinta mutkittelee. (Jääskeläinen 2011, 287.)

Maatutkaluotaus

Maatutkaluotauksen yleisin laitetyyppi on impulssitutka. Sen toiminta perustuu maaperään lähetettyyn pulssiin. Maatutkaluotauksessa käytetään radiotaajuisia sähkömagneettisia aaltoja taajuusalueella 10-3000 megahertsiä. Osa pulssin energiasta heijastuu takaisin sähköisiltä ominaisuuksilta erilaisten aineiden rajapinnalta, osa etenee edemmäs ja heijastuu takaisin seuraavilta rajapinnoilta. Heijastusten kuluaika ja amplitudi mitataan. Mittauksia tehdään peräkkäisissä maastopisteissä, jolloin maaperän rakenteista saadaan jatkuva luotausprofiili eli tutkakuva. (Tiehallinto 2004, 10.)

Sähköinen vastusluotaus

Sähköinen vastusluotaus (Kuva 11) ei ole maatutkaluotauksen ja seismisen luotauksen tavoin rajapintamenettely, sillä mittaustuloksista ei suoraan nähdä rajapintoja, vaan tuloksena saadaan vastusarvoja. Vastusluotauksella voidaan saada tietoa myös hyvin vesipitoisten maakerrosten alapuolelta, ja siten tunnistaa esimerkiksi savikerroksen alapuolisten tiiviiden maakerrosten tai kallion sijainti. Vaikka saven sähkönjohtavuuteen vaikuttaa myös sen sisältämien sähköä johtavien mineraalien määrä, yleensä vesipitoisuus on saven sähkönjohtavuuden määräävä tekijä. Näin saven ominaisvastus on huomattavasti pienempi kuin karkearakeisten maakerrosten ominaisvastus. Kivennäismaan sähkönjohtavuus riippuu huokosveden määrästä ja sen suolapitoisuudesta. Mittauksen lähtökohtana on ominaisvastusmittaus tietylle vakioetäisyydelle asetettujen mittauselektrodien avulla. Tasavälein asetetuista neljästä elektrodista kaksi uloimmaista elektrodia syöttävät virtaa ja sisemmät elektrodit mittaavat potentiaaliero. Mittauksen erottelukykyä voidaan säätää elektroditiheydellä. Yleisesti käytetään menettelyä, jossa 52 elektrodia asetetaan 102 metrin pituuteen. (Törnqvist, Laaksonen & Juvankoski 2001, 4-7.)



Kuva 11. VTT:n käyttämän sähköisen vastusluotauslaitteiston kokoonpano. (Törnqvist, Laaksonen & Juvankoski 2001, 11)

3.3 Laboratoriotutkimukset

Laboratoriotutkimuksia edeltävä maanäytteiden otto ja käsittely on oltava järjestelmällistä ja näytteet on rekisteröitävä siten, että näyte voidaan kohdentaa oikeaan ottopaikkaansa. Myös asiallisesta säilyvyydestä on huolehdittava ja näytteet on pakattava tarvittaessa esimerkiksi siten, ettei niistä pääse kosteus haihtumaan. (Jääskeläinen 2011, 276.)

Seuraavassa on esitelty yleisimpiä laboratoriotutkimusmenetelmiä sekä myös joitakin hieman harvinaisempia koemenetelmiä.

3.3.1 Kosteus

Hyvin yksinkertainen menetelmä kosteuspitoisuuden mittaamiseen on näytteen kuivatus. Näyte punnitaan, jonka jälkeen se kuivataan uunissa noin 105 asteen lämpötilassa. Suurempaa lämpötilaa ei tule käyttää, sillä se vaikuttaisi myös kivirakeiden kideveteen, joka on kivirakeisiin kuuluvaa rakenteellista vettä. Hienommasta aineksesta kidevesi irtoaa herkimmin. Kuivattu näyte punnitaan, jolloin saadaan massan vähenemä, joka on poistuneen veden massa. Näytteen veden massa jaetaan kuivatun kiviaineen massalla ja lopulta saadaan näytteen vesipitoisuus prosentteina (Kaava 5). (Jääskeläinen 2011, 16; Ronkainen 2012, 23-24.)

$$w(\%) = \frac{m_w}{m_d} \cdot 100 \quad (5)$$

w = vesipitoisuus (%)

m_w = maanäytteen sisältämän vedenmassa (g)

m_d = kuivan maanäytteen massa (g)

3.3.2 Rakeisuus

Raekoostumuksen tutkimiseen voidaan käyttää kuivaseulontaa, pesuseulontaa, areometrianalyysia tai sedigrafia (Ronkainen 2012, 22).

Kuivaseulonta

Kuivaseulonta perustuu seulasarjaan (Kuva 12), jossa neliönmuotoisten reikien koot suurimmasta pienimpään eli päällimmäisestä seulasta alimpaan ovat 64, 32, 16, 8, 4, 2, 1, 0,5, 0,25, 0,125 ja 0,074 mm. Alimmaisena on umpipohja. Kuivattu ja punnittu näyte kaadetaan seulasarjan päälle ja seulasarja asetetaan kannen kanssa tärytinlaitteeseen. Tärytysaika on vähintään 10 minuuttia, jonka jälkeen punnitaan kullekin seulalle ja pohjalle jäänyt ainemäärä, joka muutetaan prosenteiksi koko näytteestä. Kunkin seulan kohdalla lasketaan läpäisyprosentti ja piirretään rakeisuuskäyrä. (Jääskeläinen 2011, 16-17.)



Kuva 12. Seulasarja asennettuna täryttimeen sekä yksittäinen 8 mm seula. (Jääskeläinen 2011, 17)

Pesuseulonta

Pesuseulontaa käytetään, jos maa-aineessa on runsaasti hienoainesta. Tavallisessa kuivaseulonnassa hienoainesrakeet tarttuvat toisiinsa ja isompien rakeiden pinnoille siten, etteivät ne irtoa tärytyksessäkään. Lisäksi hienoaineksen läpäisy hienoimpien seulojen läpi on hyvin hidasta. Esimerkiksi routivuuden arvioinnin kannalta tarkka tieto hienoimpien seulojen läpäisyistä on hyvin tärkeää. Pesuseulonnan ideana onkin pestä ensin hienoimmat rakeet 0,074 mm seulan läpi pois. Ensin näyte kuivataan ja punnitaan. Sen jälkeen näytettä liotetaan veteen ja likaantunut vesi kaadetaan 0,074 mm seulan läpi pois. Tätä toistetaan kunnes vesi pysyy kirkkaana. Sitten seulalle jäänyt aines ja karkeampi pääaines yhdistetään, kuivataan ja punnitaan. Näin saadaan tietää aines, jonka raekoko on pienempi kuin 0,074 mm. Lopuksi suoritetaan kuivaseulonta. Läpäisyprosenttien laskennassa pesussa poistunut ainemäärä lisätään 0,074 mm seulan läpäisseeseen aineeseen. Läpäisyprosentit lasketaan alkuperäisen kuivan aineen kokonaispainosta. (Jääskeläinen 2011, 29.)

Areometrianalyysi

Areometrianalyysilla määritetään hienoimpien maalajien rakeisuus. Menetelmä perustuu Stokesin lakiin, jonka mukaan kappaleen laskeutumisnopeus nesteessä on suoraan verrannollinen kappaleen läpimitan neliöön. Kokeessa sekoitetaan 50 g kuivaa maa-ainesta veteen. Moreeneilla käytetään 100 g näytettä. Näytteeseen otetaan enintään 2 mm läpimitaista ainetta. Liete sekoitetaan ja jätetään laskeutumaan. Kiviainesrakeet alkavat laskeutua astian pohjaan Stokesin lain mukaisella nopeudella. Stokesin laki (Kaava 6) voidaan tällöin esittää kaavan 7 muodossa. (Jääskeläinen 2011, 30-31; Rantamäki ym. 1997, 75.)

$$F_s = 6 \cdot \pi \cdot r \cdot \mu \cdot v \quad (6)$$

$$v = \frac{g \cdot (\rho_s - \rho_w)}{18 \cdot \mu} \cdot d^2 \quad (7)$$

F_s = vastusvoima (N)

r = kappaleen säde (m)

v = kappaleen nopeus (m/s)

g = 9,82 m/s²

ρ_s = kivirakeiden tiheys (2650 kg/m³)

ρ_w = veden tiheys (n. 1000 kg/m³)

d = kappaleen halkaisija (m)

μ = veden viskositeetti (Ns/m²)

Areometrianalyysissa lietteen tiheys astian yläosassa pienenee. Tiheyttä mitataan tiettyin aikaväleihin areometrillä, jonka avulla saadaan välillisesti selville laskeutumisnopeudet, rakeiden koot ja lopulta läpäisyprosentit. Samasta maa-aineksestä saatetaan tehdä sekä pesuseulonta että areometrikoe, jolloin tulokset on yhdistettävä yhdeksi rakeisuuskäyräksi (Kuva 17). Pesuseulonnan antamia tuloksia pidetään perustana alas 0,074 mm:iin asti. Areometrikokeen läpäisyprosentti 0,074 mm kohdalla kerrotaan luvulla, joka muuttaa sen pesuseulonnan tulosta vastaavaksi (Kaava 8). Samalla luvulla kerrotaan myös muut areometrikokeesta saadut läpäisyprosentit raekoosta 0,074 alaspäin. (Jääskeläinen 2011, 30-34; Rantamäki ym. 1997, 75-76.)

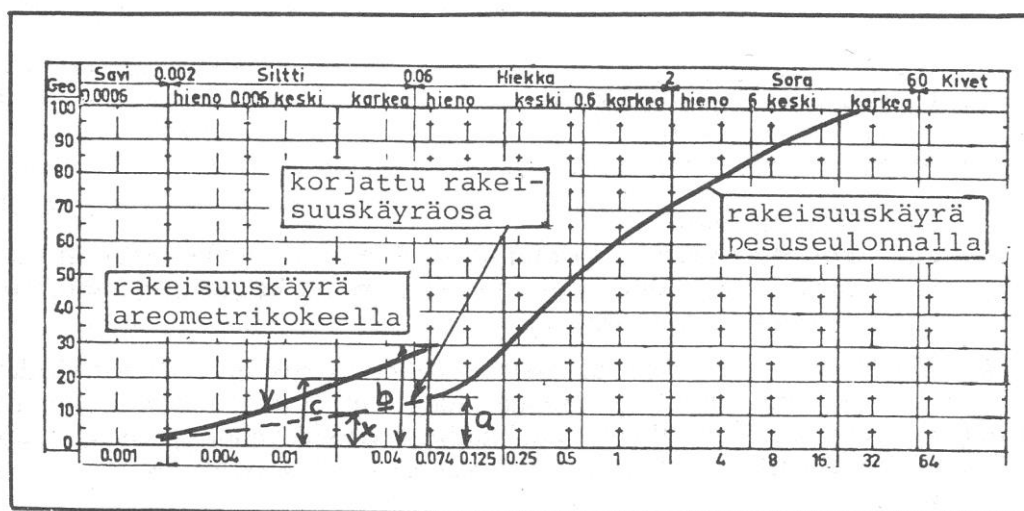
$$x = \frac{a}{b} \cdot c \quad (8)$$

x = korjattu läpäisyprosentti

a = seulontakäyrän läpäisyprosentti 0,074 mm kohdalla

b = areometrikokeen läpäisyprosentti 0,074 mm kohdalla

c = areometrikokeen rakeisuuskäyrän läpäisyprosentti laskettavan raekoon kohdalla



Kuva 17. Areometrikokeella ja seulonnalla saatujen rakeisuuskäyrien yhdistäminen. (Rantamäki ym. 1997, 77)

Sedigrafianalyysi

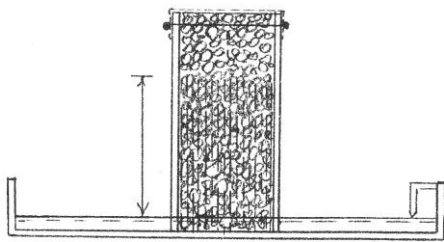
Sedigrafia on partikkelianalysointilaitteisto, jonka toiminta perustuu näytelietteen sedimentoitumisaikaan. Sedigrafia mittaa sedimentoitumisnopeuden näytteen läpäisevän röntgensäteiden vaimenemisen perusteella. Seulonnasta saadut tulokset yhdistetään sedigrafitulosten kanssa yhdistetyksi rakeisuuskäyräksi. (Ronkainen 2012, 22.)

3.3.3 Kapillaarisuus

Kapillaarisuutta voidaan selvittää kapillaarimetrillä. Siinä vedellä kyllästetyn näytteen ala- ja yläpuolen välille aiheutetaan paine-ero. Ilman tunkeutumiseen näytteen läpi tarvittu alipaine vastaa kapillaarista nousukorkeutta. Yleensä tarvitaan useampia

näytteitä ja kokeita vaihteluvälin selvittämiseksi ja koevirheiden poistamiseksi. Menetelmän tuloksia ei pidetä kovin luotettavina. Kapillaarimetrikoetta käytetään esimerkiksi rinnakkaiskokeena arvioitaessa maan routivuutta. Kapillaarinousun ylittäessä 1 metrin, maalaji arvioidaan routivaksi. (Jääskeläinen 2011, 39-40.)

Niin sanottu veden imeytymiskorkeuden mittausta (Kuva 13) on standardoitu kapillaarisuuden mittaustapa. Siinä kuivattu näyte asetetaan läpinäkyvään pystyputkeen. Putken yläpäähän kiristetään muovihuppu. Putken alapää on altaassa joka täytetään vedellä. Näin vesi pääsee vapaasti imeytymään putken alapään koloista näytteeseen. Pidettäessä altaan vesipinta vakiona, saadaan punnitukseen selville myös näytteeseen imeytynyt vesimäärä. Kun vesimäärä ei enää nouse, koe päättyy ja näyte puretaan ylhäältä lähtien ohuin kerroksin. Jokaisen kerroksen kosteus ja kuivapaino mitataan, jolloin saadaan selville näytteen kosteusprosentti eri korkeuksilla. Tietyllä korkeudella kosteus lähenee kyllästetyn tilan kosteutta paljastaen kohdan, mihin asti vesi on kapillaarisesti noussut. (Jääskeläinen 2011, 40-41.)



Kuva 13. Veden imeytymiskorkeuden mittauksen periaatekuva. (Jääskeläinen 2011, 40)

Mittaustuloksen tarkentamiseksi otetaan toinen kuivattu näyte, jonka avulla mitataan kosteus, joka kiviainekseen voi siirtyä hygrooskooppisesti eli ilmasta. Kosteusprosenttikuvaajasta etsitään sen puretun kerroksen kohta, missä kosteus alkaa kasvaa sekä se kohta missä kosteus on hygrooskooppisen kosteuden mukainen. Korkeampi taso on vedenimeytymiskorkeuden suuruus vapaasta vedenpinnasta. (Jääskeläinen 2011, 41.)

3.3.4 Kuivatilavuuspaino ja tiiviys

Kullakin maa-aineksella on luonnossa oma suurin ja pienin kuivatilavuuspainonsa, joiden välissä se esiintyy. Ne on tiedettävä tiiviuden määrittelyä varten. Tiiveimmässä tilassa maa-aineksen lujuusominaisuudet ovat parhaimmillaan ja kokoonpuristuvuus pienimmillään. Kuivatilavuuspainon yksikkönä käytetään kN/m^3 . (Jääskeläinen 2011, 52.)

Kuivatilavuuspainon minimin määrittäminen

Kuivatilavuuspainon minimi voidaan määrittää valuttamalla kuivattua näytettä suppilon kautta mitta-astiaan. Suppilon päässä olevaa kumiputkea kuljetetaan maa-aineksen pintaa hipoen astian sisällä. Tarkoitus on valuttaa maa-aines tasaisesti vyörymättä edellä olevan aineen päälle täyttäen astia. Lopuksi maa-aines tasataan astian pinnan kanssa. Kuivatilavuuspaino lasketaan jakamalla näytteen paino astian tilavuudella. Lopputulos on viiden mittauksen keskiarvo. (Jääskeläinen 2011, 53.)

Kuivatilavuuspainon maksimin määrittäminen

Kuivatilavuuspainon maksimi voidaan määrittää Proctor-kokeella. Menetelmä kehitettiin määrittelemään, millä kosteuspitoisuudella maa saadaan työmaalla jyrättyä haluttuun tiiviyteen. Kokeessa tutkittava aines jaetaan noin 3 kg osanäytteisiin, jotka kostutetaan erilaisiin kosteuksiin. Osanäytteet tiivistetään koesylinterissä koneellisesti 5 kerroksessa. Lopuksi maa-aineksen pinta tasataan teräsviivaimella sylinterin pinnan kanssa samaan tasoon. Näyte punnitaan ja osa siitä kuivataan kosteusprosentin laskemiseksi. Kuivatilavuuspaino lasketaan kaavan 9 avulla. Sama koe tehdään myös muilla osanäytteillä, jolloin tuloksista saadaan piirrettyä kuvaaja (Kuva 14). Kuvaajasta voidaan havaita kuivatilavuuspainon maksimi ja sitä vastaava optimikosteus. (Jääskeläinen 2011, 54-55.)

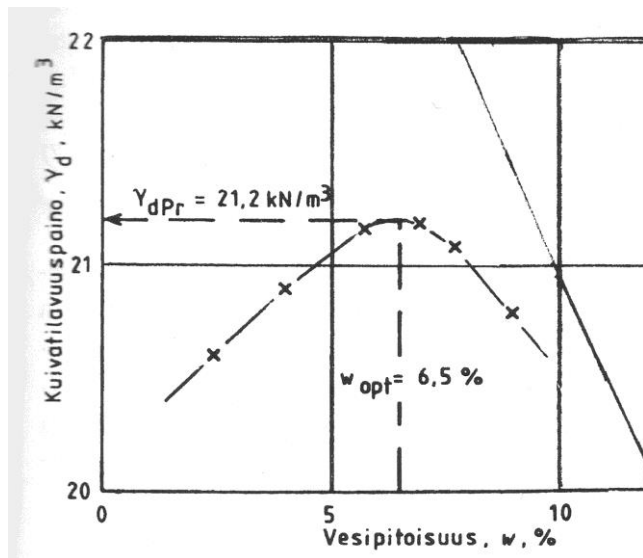
$$\gamma_{d,\max} = \frac{\rho}{1+w} \cdot g \quad (9)$$

$\gamma_d =$ kuivatilavuuspaino (kN/m^3)

$\rho =$ tiheys kosteana (kg/m^3)

$w =$ vesipitoisuus

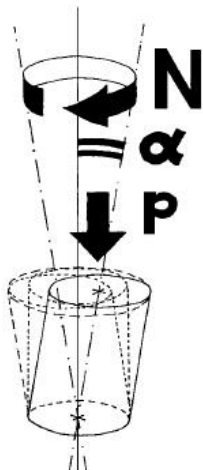
$g =$ maan vetovoiman kiihtyvyyys ($\approx 10 \text{ m}/\text{s}^2$)



Kuva 14. Esimerkki proctor-kokeen tuloksesta. (Jääskeläinen 2011, 55)

Kiertotiivistin (ICT-laite)

ICT-laitteella eli kiertotiivistimellä mitataan rakeisten massojen tiivistymistä. Menetelmässä näyte laitetaan pyöreään sylinteriin, jonka kansi- ja pohjalevyt puristavat näytettä kokoon tasaisella paineella. Levyt ovat koko ajan keskenään samansuuntaiset. Sen sijaan niiden suunta sylinterin seinämään nähden poikkeaa kohtisuorasta. Tällöin sylinterin keskiviivan ja levyjen keskipisteen välillä on kallistuskulma (Kuva 15). Levyt ja sylinteri yhdessä aiheuttavat näytteessä muodonmuutosliukuman. Näyte tiivistyy liukuman ja paineen johdosta. Mittauksen avulla näytteestä voidaan laskea muun muassa tiiveystila ja keskimääräinen muodonmuutoksen leikkausvastus. (Jauhiainen & Törnqvist 2001, 12.)



Kuva 15. ICT-laitteen toimintaperiaate ja muuttujien esittely. (Jauhiainen & Törnqvist 2001, 13)

Kuivatilavuuspainon määrittäminen maastossa

Myös maastossa tapahtuvaan kuivatilavuuspainon mittaamiseen löytyy erilaisia menetelmiä. Näitä ovat muun muassa vesivolymetrikoe, säteilyn avulla tapahtuva mittaaminen ja radiometrinen reikämittaus. Karkeista kivisistä maista kuivatilavuuspainon mittaaminen on työmaalla kuitenkin hankalaa ja tällöin usein siirrytäänkin tekemään kantavuusmittauksia kuten levykuormituskokeita, joista saadaan suoraan tietoa maapohjan kantavuudesta. (Jääskeläinen 2011, 61-64.)

Suhteellinen tiiviys

Maa-aineksen suurimman ja pienimmän kuivatilavuuspainon avulla lasketaan maa-aineksen suhteellinen tiiviys kaavan 10 mukaan (Jääskeläinen 2011, 52; SFS-käsikirja 179-1 2008, 50):

$$I_d = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} \quad (10)$$

I_d = suhteellinen tiiviys (tiivysluku)

e_{\max} = huokosluvun maksimi (kun aine on löyhimmillään ja $\gamma_d = \gamma_{d,\min}$)

e_{\min} = huokosluvun minimi (kun aine on tiiveimmillään ja $\gamma_d = \gamma_{d,\max}$)

e = huokosluvun arvo luonnossa

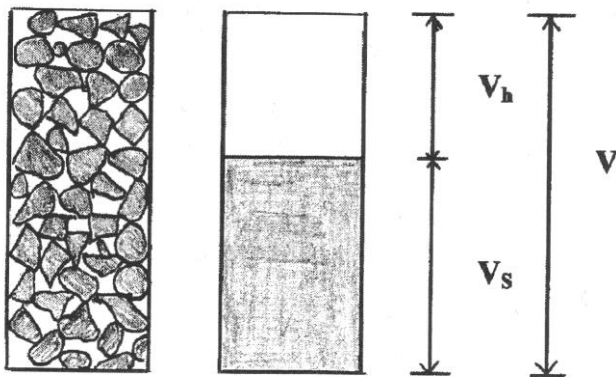
Huokosluku e lasketaan huokostilavuuden ja kivirakeiden tilavuuden avulla kaavan 11 mukaan. Kuvassa 16 on maa-aineksen huokoisuus esitetty yksinkertaistettuna. Huokostilassa on ilmaa ja/tai vettä. Maa sisältää yleensä kosteutta, jonka osuudesta huokostilassa käytetään nimitystä kyllästymisaste. (Jääskeläinen 2011, 49-50.)

$$e = \frac{V_h}{V_s} \quad (11)$$

e = huokosluku

V_h = huokostilavuus

V_s = kivirakeiden tilavuus



Kuva 16. Huokoisuus. (Jääskeläinen 2011, 48)

3.3.5 Vedenläpäisevyys

Kaava 12 esittää Darcyn lakia, jonka mukaan veden keskimääräinen nopeus on maan vedenläpäisykertoimen ja painekehävuuden tulo. Virtaama saadaan kertomalla nopeus poikkipinta-alalla, missä vesi virtaa. (Jääskeläinen 2011, 68.)

$$v = k \cdot H / L \quad (12)$$

$v = \text{veden keskimääräinen nopeus (m/s)}$

$k = \text{maa - aineen vedenläpäisykerroin (m/s)}$

$L = \text{virtausmatka (m)}$

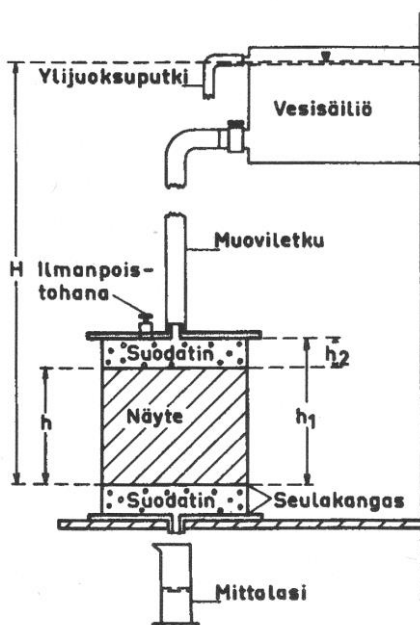
$H = \text{paine - ero virtausmatkan päiden välillä}$

$= \text{vesipintojen korkeusero virtausmatkan päiden välillä (m)}$

Vedenläpäisevyyden määrittämiseksi laboratoriokokeina voidaan tehdä vakio paine-koe tai muuttuvan paineen koe. Maastossa vedenläpäisevyyttä tutkitaan koepumppauksilla. (Jääskeläinen 2011, 69.)

Vakio painekoe

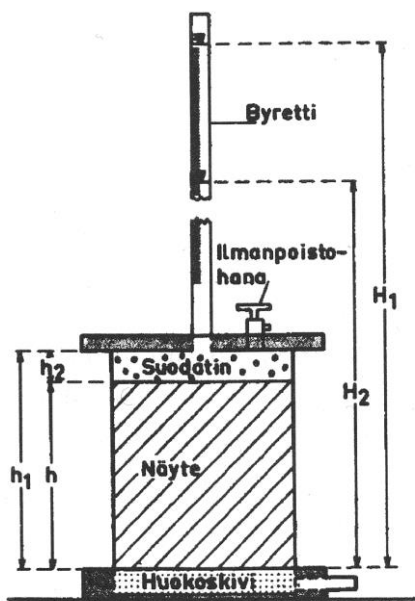
Vakio painekokeessa vettä ajetaan näytteen läpi kuvan 17 mukaisessa koejärjestelyssä. Vesipinnan eli paine-eron pitämiseksi vakiona näytteen yläpuolella olevaan vesisäiliöön juoksetetaan koko ajan vettä. Virtausmatka L on nyt sama kuin näytteen paksuus. Mittalasin täyttymiseen tarvittava aika mitataan. Vedenläpäisevyyskerroin k lasketaan edellisen sivun kaavan 12 avulla. Koe uusitaan useamman kerran ja virtaamana käytetään kokeiden keskiarvoa. (Jääskeläinen 2011, 70.)



Kuva 17. Vakio painekoe. (Jääskeläinen 2011, 70)

Muuttuvan paineen koe

Heikommin vettä läpäisevien maiden vedenläpäisevyys määritetään muuttuvan paineen kokeella (Kuva 18). Siinä vakiopainekokeesta poiketen vesisäiliön tilalla käytetään koeastian päälle asetettavaa läpinäkyvää putkea, josta nähdään veden korkeus kokeen alussa. Veden annetaan virrata näytteen läpi. Kun vedenpinta putkessa mitataan toisella ajanhetkellä, saadaan pois virrannut vesimäärä mitattua putken poikkipinta-alan avulla. (Jääskeläinen 2011, 71.)



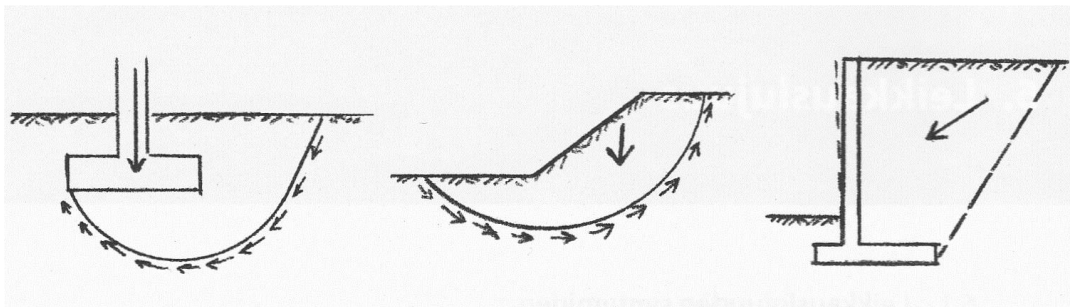
Kuva 18. Muuttuvan paineen koe. (Jääskeläinen 2011, 71)

Yllä esiteltujen niin sanottujen jäykkäseinäisten sellien lisäksi vedenläpäisevyyttä voidaan tutkia joustavaseinäisellä kolmiaksaalisellillä. Sen käyttöä suositellaan huonosti vettä johtavien (vedenjohtavuus alle $1 \cdot 10^{-6}$) maalajien vedenjohtavuuden määrittämiseen. (Jakonen, Middleton & Haavisto 2002, 1.)

3.3.6 Leikkauslujuus

Maaperän lujuusominaisuuksista tärkein on leikkauslujuus. Sillä on suuri merkitys esimerkiksi maapohjan kantavuuteen, maaluiskien vakavuuteen ja maaperästä tukimuureihin ja tukiseiniin kohdistuviin paineisiin. Näissä tapauksissa maahan syntyy

pintoja, joita pitkin maa pyrkii murtohetkellä leikkautumaan (Kuva 19). (Jääskeläinen 2011, 100.)



Kuva 19. Esimerkkirakenteita, joissa leikkauslujuus on merkitsevä. (Jääskeläinen 2011, 100)

Leikkauslujuus koostuu rakeiden välisestä koheesiosta ja kitkasta Coulombin yhtälön mukaan (Kaava 14) (Jääskeläinen 2011, 100; Rantamäki ym. 1997, 123):

$$\tau_f = c + \sigma' \cdot \tan \varphi \quad (14)$$

τ_f = leikkauslujuus

c = koheesio

σ' = tehokas jännitys, raepaine murtopinnalla

φ = maan sisäinen kitkakulma (leikkauskestävyyskulma)

Eurokoodissa kitkakulmaa nimitetään leikkauskestävyyskulmaksi (SFS-EN 1997-1, 16).

Sisäinen kitka aiheutuu rakeiden välisestä hankauksesta. $\tan \varphi$ on kitkakerroin, sama josta fysiikassa käytetään merkintää μ . Maan sisäisen kitkakulman suuruuteen vaikuttavat eniten maan raekoostumus, rakeiden muoto ja pyöristyneisyys sekä maan tiiviys. (Jääskeläinen 2011, 100; Rantamäki ym. 1997, 123.)

Kitkaa aiheuttava puristus tulee ainoastaan raepaineesta. Mahdollinen huokosvesipaine on vähennettävä kokonaispaineesta kaavan 15 mukaan. (Jääskeläinen 2011, 101.)

$$\sigma' = \sigma - u \quad (15)$$

σ' = pystysuora tehokas jännitys
 σ = pystysuora kokonaisjännitys
 u = huokosvedenpaine

Koheesio muodostuu maahiukkasten välisistä kiinnevoimista sekä mineraalihiuk-
 kasia ympäröivien vesivaippojen ja itse hiukkasten välisistä sähköstaattisista voimis-
 ta (Rantamäki ym. 1997, 123).

Karkearakeisissa maalajeissa eli niin sanotuissa kitkamaalajeissa ei esiinny koheesio-
 ta. Tällöin leikkauslujuus muodostuu vain kitkasta (Kaava 16). (Jääskeläinen 2011,
 101.)

$$\tau_f = \sigma' \cdot \tan \varphi \quad (16)$$

τ_f = leikkauslujuus
 σ' = tehokas jännitys, raepaine murtopinnalla
 φ = maan sisäinen kitkakulma (leikkauskestävyyskulma)

Koheesiomaissa, kuten savimaissa, leikkauslujuus muodostuu pelkästään koheesiosta
 (Kaava 17), ellei rasitus ole pitkäkestoinen (Jääskeläinen 2011, 101).

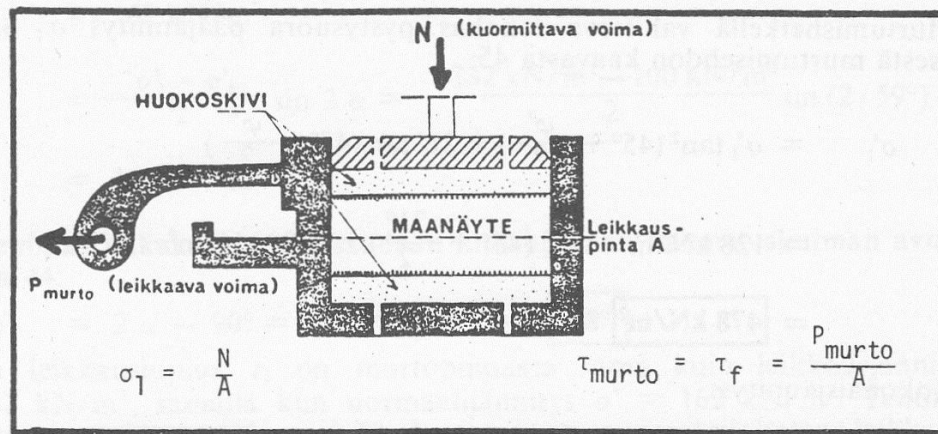
$$\tau_f = c \quad (17)$$

τ_f = leikkauslujuus
 c = koheesio

Rasialeikkauskoe

Leikkauskokeessa (Kuva 20) kuormitetaan koerasiassa oleva näyte tietynsuuruisella
 pystysuoralla kuormituksella, jolloin näytteeseen syntyy vakiona pysyvä pystysuora
 normaalijännitys σ . Koerasia koostuu kahdesta päällekkäin olevasta osasta, joita voi-

daan siirtää vaakasuorassa suunnassa toisiinsa nähden. Osien siirtyminen aiheuttaa leikkausvoiman P , joka saa aikaan leikkausjännityksen τ . Leikkausjännityksen suuruus on leikkaava voima P jaettuna näytteen vaakasuoralla poikkipinta-alalla A . Kun leikkaava voima kasvaa, tapahtuu näytteen halkileikkautuminen vaakasuorassa tasossa. Tällöin vallitseva leikkausjännitys on samalla maan leikkauslujuus τ_f . (Rantamäki ym. 1997, 137.)



Kuva 20. Leikkauskoe. (Rantamäki ym. 1997, 138)

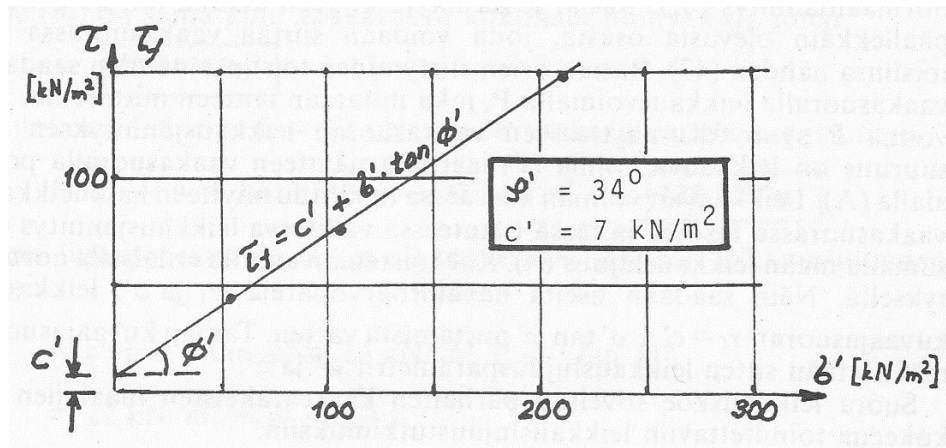
Leikkauskoe toistetaan erilaisilla normaalijännityksillä, jolloin saadaan useita havaintopareja (σ , τ) leikkauslujuuden kuvaajasuoran piirtämistä varten. (Rantamäki ym. 1997, 137.)

Osakoe	Normaalijännitys σ' (kN/m ²)	Murtoleikkausjännitys τ_{murto} (kN/m ²)
1	53	45
2	106	76
3	210	149

Kuva 21. Esimerkki leikkauskokeen havaintopareista. (Rantamäki ym. 1997, 138)

Esimerkissä (Kuva 21) on suoritettu avoin koe, jolloin huokosvedenpaine on nolla ja samalla normaalijännitykset σ ovat tehokkaita normaalijännityksiä σ' . Näin ollen lujuusparametrit ovat myös tehokkaita lujuusparametrejä: tehokas kitkakulma φ' ja tehokas koheesio c' . Tehokas kitkakulma saadaan suoran kaltevuuskulmana ja tehokas

koheesio suoran ja τ -akselin leikkauspisteestä (Kuva 22). (Rantamäki ym. 1997, 138.)



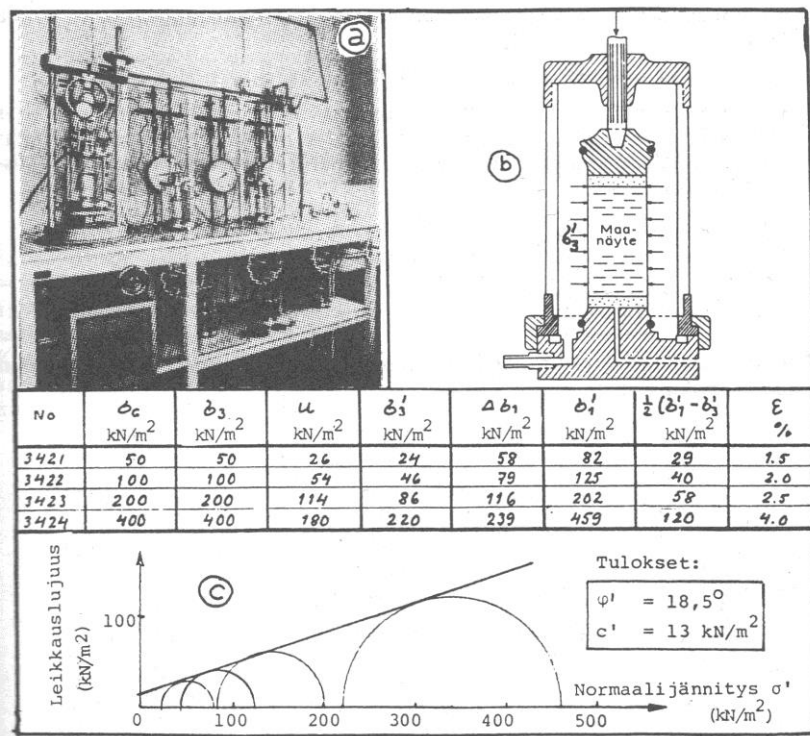
Kuva 22. Kuvan x arvojen perusteella laadittu leikkauslujuuden kuvaajasuora. (Rantamäki ym. 1997, 138)

Kolmiakselikoe

Kolmiakselilaitetta pidetään parhaana leikkauslujuuden mittauslaitteena. Siinä näytteen jännitystilanne saadaan muistuttamaan luonnossa vallitsevaa tilannetta. Kokeessa mitataan aina myös muodonmuutoksia. (Jääskeläinen 2011, 109, 111.)

Kolmiakselikokeessa (tunnetaan myös kolmiakσιαalikokeena) näyte asetetaan sylinterinmuotoiseen selliin. Näytteen ympärille kiristetään kumisukka, joka kiinnitetään myös laitteen ylä- ja alapuolisiin metalliosiin. Sellissä näytteen ulkopuolella on vettä, jonka aiheuttama sellipaine puristaa näytettä joka puolelta. Ylhäältä tulevalla tangolla näytettä puristetaan kunnes saavutetaan murtotilanne. (Jääskeläinen 2011, 109-110.)

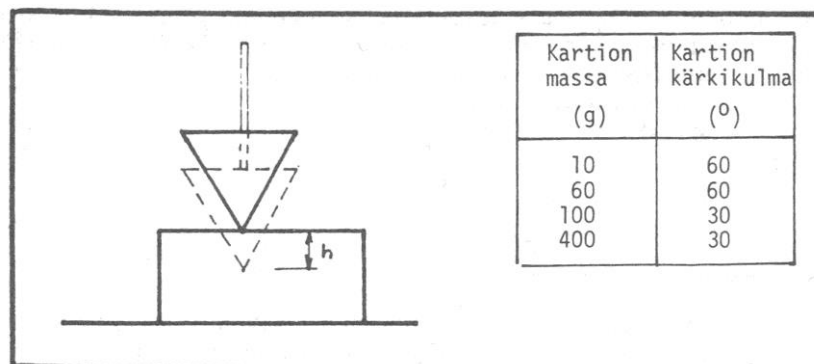
Pystysuora pääjännitys on sellipaineen ja tangolla aiheutetun lisäjännityksen summa. Mahdollisesti vallitseva huokosvedenpaine mitataan. Kokeita tehdään useilla erilaisilla sellipaineilla. Murtotilanteen mukaisista jännitysympyröistä (Mohrin ympyrät) saadaan leikkauslujuuden kuvaajasuora näiden ympyröiden yhteisenä tangenttisuorana kuvan 23 mukaan. (Rantamäki ym. 1997, 134-135.)



Kuva 23. Kolmiakselikoe. a) Laitteisto b) Sellin rakenne c) Leikkauslujuus kolmiakselikokeen tuloksena saatujen murtotilan jännitysypyröiden avulla. (Rantamäki ym. 1997, 135)

Kartiokoe

Kartiokoe on kokemusperäinen menetelmä. Kartiokokeessa (Kuva 24) asetetaan pieni kartio näytteen yläpuolelle siten, että se juuri hipoo näytteen pintaa. Sitten kartion annetaan pudota näytteeseen. Kartion painuman perusteella saadaan taulukoita tai käyrästäjä apuna käyttäen näytteen leikkauslujuus. (Jääskeläinen 2011, 112-113.)



Kuva 24. Kartiokoe. (Rantamäki ym. 1997, 141)

Puristuskoe

Puristuskoe sopii vain hyvin koossa pysyvien savinäytteiden tutkimiseen. Koe suoritetaan yksinkertaisella laitteella puristamalla sylinterin muotoista häiriintymätöntä näytettä pystysuunnassa tasaisesti. Kokeen aikana seurataan pystyjännityksen kasvua ja painumaa. Tietyissä vaiheissa näyte murtuu, jolloin puristava voima ja pystysuora jännitys saavuttavat maksimiarvonsa. Saven leikkauslujuus on puolet puristuspuheen maksimiarvosta. Puristuskoe on teoreettisesti johdettavissa, mutta käytännössä sillä saatavat tulokset ovat kiistanalaisia. (Jääskeläinen 2011, 106-107; Rantamäki ym. 1997, 139.)

Siipikairaus

Siipikairaus on tärkeä hienorakeisten maiden, kuten saven ja hienon siltin, leikkauslujuuden mitoitustapa kenttätutkimuksena (Jääskeläinen 2011, 114). Menetelmä on esitelty tämän opinnäytetyön luvussa 3.2.3.

3.3.7 Kokoonpuristuvuus

Maa-aineen kokoonpuristumisessa voidaan erottaa kolme pääalajia (Jääskeläinen 2011, 120):

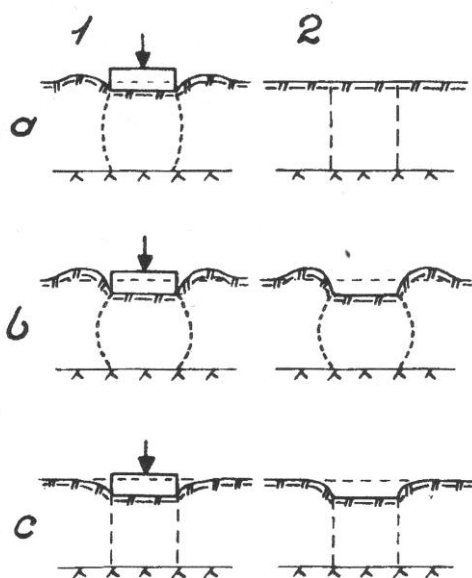
- Kimmoinen muodonmuutos
- Plastinen muodonmuutos
- Konsolidaatio

Kimmoisessa muodonmuutoksessa (Kuva 25, a) kokoonpuristuminen on yleensä vähäistä ja tapahtuu nopeasti kuormituksen alkaessa. Maan tilavuuden muutosta ei tapahdu. Kuormituksen poistuessa muodonmuutokset palautuvat. Kimmoisen muodonmuutoksen käytännön merkitys on vähäinen. (Rantamäki ym. 1997, 145.)

Plastisessa muodonmuutoksessa (Kuva 25, b) kokoonpuristuminen ei palaudu. Plastinen muodonmuutos edellyttää jännitysten kohoamista lähelle murtotilaa, jolloin

syntyy myötäämistä. Käytännössä näin lähelle murtoa ei voida mennä vaan plastisen painumisen esiintyminen torjutaan käyttämällä riittävän suurta varmuutta murtoa vastaan. (Jääskeläinen 2011, 120.)

Konsolidaatioissa (Kuva 25, c) maan kokonaistilavuus pienenee, mikä johtuu huokos-tilavuuden pienenemisestä. Kuormitettaessa maarakeet lähenevät toisiaan ja huokosista poistuu vettä ja ilmaa. Kokoonpuristuminen jää pysyväksi. Konsolidaation aiheuttama painuma on rakenteiden painumisen syistä tärkein. (Rantamäki ym. 1997, 146.)



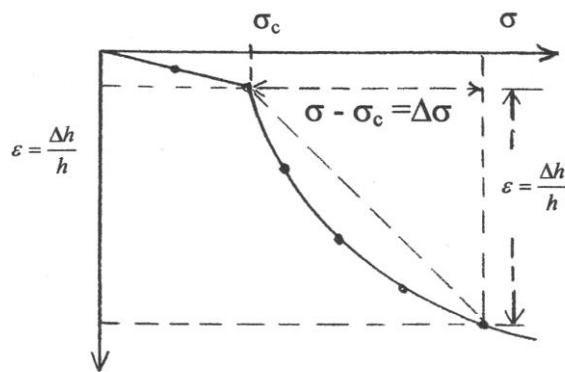
Kuva 25. Kimmoinen (a) ja plastinen (b) muodonmuutos sekä konsolidaatio (c). (Jääskeläinen 2011, 120)

Ödometrikoe

Kokoonpuristuvuusominaisuuksia mitataan yleisimmin ödometrillä. Kokeessa kuormitetaan häiriintymätöntä sylinterinmuotoista näytettä pystysuuntaisella jännityksellä. Näytettä ympäröi teräsrengas, joka estää näytteen laajenemisen sivusuunnassa. Näyte on kokeen ajan veden ympäröimänä, jolloin se pysyy koko ajan veden kyllästämänä. Näytteen puristuessa kokoon vesi pääsee poistumaan ylä- ja alapäädyn huokoskiven läpi. (Rantamäki ym. 1997, 146-147.)

Kokeen aikana mitataan kuormitusta, painumaa ja painumaan kuluva aika. Myös esimerkiksi sellipainetta, huokosvesipainetta ja näytteestä poistuvaa vesimäärää voidaan mitata. (Jääskeläinen 2011, 123-124.)

Kuvassa 26 on erään ödometrikokeen tulos esitettynä jännitys-painuma –kuvaajana. Kuvaajasta voidaan havaita taitekohta, joka paljastaa, minkä jännityksen, esikuormituksen alaisena näyte on aiemmin ollut. Taitekohtaan saakka painuma on ollut pientä. Toisin sanoen kokeen jännityslisäys on ollut aluksi vain tämän esikuormituksen palauttamista. Jännityksen ylittäessä esikuormituksen alkaa varsinainen konsolidaatiokokoonpuristuminen. (Jääskeläinen 2011, 125-126; Rantamäki ym. 1997, 148.)



Kuva 26. Ödometrikoeulos. (Jääskeläinen 2011, 126)

Maan sanotaan olevan normaalikonsolidoitunutta, jos näytteenottosyvyyden, pohjavesipinnan sijainnin ja tilavuuspainojen avulla laskettu näytteenottokohdassa vallitseva jännitys on sama kuin konsolidaatiojännitys. Jos konsolidaatiojännitys on suurempi kuin vallitseva jännitys, sanotaan maan olevan ylikonsolidoitunutta. (Jääskeläinen 2011, 127.)

3.3.8 Konsistenssi ja plastisuus

Konsistenssilla tarkoitetaan maan jäykkyyttä ja muovailtavuutta häirittyinä. Hienora-keisilla maalajeilla on kolme erilaista olomuotoa, joiden välisiä rajoja kutsutaan konsistenssirajoiksi eli Atterbergin rajoiksi. Olomuodot ovat: (Jääskeläinen 2011, 65.)

- Kiinteä

- Plastinen
- Juokseva

Kieritysraja

Kiinteän ja plastisen tilan välinen raja on kieritysraja. Sen mittaamiseksi näytettä kiertetään lasilevyn päällä rihmaksi. Samalla näytteestä haihtuu koko ajan kosteutta. Kun näyte on 3 mm rihmana ja alkaa katkeilla, näytteen kosteusprosentti mitataan. Tämä on kieritysrajan kosteusprosentti w_p . (Jääskeläinen 2011, 65.) Eurokoodissa kieritysrajaa kutsutaan plastisuusrajaksi (SFS-EN 1997-2, 53).

Juoksuraja

Plastisen ja juoksevan tilan välinen raja on juoksuraja. Se määritetään Casagranden menetelmällä. Siinä koputuskojeen kuppiin laitetaan 10 mm paksuinen kerros näytettä. Uranleikkaajalla näytteen keskelle leikataan kupin pohjaan asti ulottuva ura. Tämän jälkeen kuppia pudotetaan 10 mm korkeudelta alustaa vasten. Näytteen kosteus saavuttaa juoksurajan, kun 25 pudotuksella näytteeseen tehty ura valahtaa kiinni 13 mm matkalla. Koe uusitaan eri kosteuteen vaivatuilla näytteillä. Juoksurajan kosteus w_L voidaan interpoloida kokeiden tulosten perusteella. (Jääskeläinen 2011, 65-66.)

Plastisuusluku

Juoksurajan kosteusprosentin ja kieritysrajan kosteusprosentin erotusta kutsutaan plastisuusluvuksi (Kaava 18) (Jääskeläinen 2011, 66).

$$I_p = w_L - w_p \quad (18)$$

I_p = plastisuusluku

w_L = juoksurajan kosteusprosentti

w_p = kieritysrajan kosteusprosentti

4 GEOTEKNISEN SUUNNITTELUN PERUSTEET

Rakennusala on siirtymässä yhteiseurooppalaiseen eurokoodi-mitoitusjärjestelmään myös geoteknisen suunnittelun osalta. Toistaiseksi voidaan talonrakennuspuolella käyttää myös vanhaa suunnittelujärjestelmää. Liikenneviraston silta- ja infrarakentamisessa eurokoodit ovat ainoa käytössä oleva suunnittelujärjestelmä. (Eurokoodi Help Desk 2014.)

Geoteknisen suunnittelun sisältävä Eurokoodi 7 koostuu kahdesta osasta:

- SFS-EN 1997-1. Geotekninen suunnittelu. Osa 1: Yleiset säännöt.
- SFS-EN 1997-2. Geotekninen suunnittelu. Osa 2: Pohjatutkimus ja koestus

Suomalainen suunnitteluohje RIL 207-2009 pohjautuu geoteknisen suunnittelun eurooppalaisen standardin EN-1997-1 lisäksi ympäristöministeriön vahvistamaan kansalliseen liitteeseen. Suunnitteluohje on laadittu käytettäväksi muiden eurokoodien kanssa. (RIL 207-2009, 13.)

Eurokoodin EN-1997-1 mukaan rajatilat tarkistetaan yhdellä tai seuraavien menetelmien yhdistelmällä (RIL 207-2009, 13):

- Laskelmilla
- Ohjeellisten sääntöjen mukaisella suunnittelulla
- Kokeellisilla malleilla ja kuormituskokeilla
- Seurantamenetelmillä

Seuraavassa käydään läpi laskelmiin perustuvan geoteknisen mitoituksen perusperiaatteita Eurokoodin EN-1997-1 mukaan talonrakentamisen osalta.

4.1 Geoteknisten suunnitteluvaatimusten luokat

Geoteknisten suunnitteluvaatimusten määrittämiseen käytetään kolmea geoteknista luokkaa. Geotekniset luokat ovat GL1, GL2 ja GL3. Geotekniset luokat vastaavat RakMK:n A2 vaativuusluokkia B, A ja AA. (RIL 207-2009, 30.)

GL1 Geotekniseen luokkaan 1 kuuluvat pienet ja yksinkertaiset rakenteet, joista ei aiheudu merkittävää riskiä, eikä merkittäviä siirtymiä tai painumia. Geoteknisen luokan 1 menetelmät ovat riittäviä silloin, jos kaivu ei ulotu vedenpinnan alapuolelle tai voidaan osoittaa, että vedenpinnan alapuolelle ulottuva kaivanto on yksinkertainen toteuttaa. (RIL 207-2009, 31.) Geoteknisen luokan 1 kohteissa pohjatutkimusta vastaavaksi selvitykseksi voi riittää ennakolta tehty asiantuntijan suorittama maastokatselmus. Pohjatutkimusta ei tarvitse tehdä, jos rakennuspaikalta on käytettävissä riittävässä laajuudessa aikaisempien pohjatutkimusten tietoja. (RIL 207-2009, 69.)

GL2 Geotekniseen luokkaan 2 kuuluvat tavanomaiset rakenteet ja perustukset, joihin ei liity tavanomaisesta poikkeavia riskejä tai epätavallisen vaikeita pohja- tai kuormitusolosuhteita. Esimerkkejä tavanomaisista rakenteista ovat antura- ja laattaperustukset, yhtenäiset laattaperustukset ja paaluperustukset. (RIL 207-2009, 31.)

GL3 Geotekniseen luokkaan 3 kuuluvat vaativimmat kohteet. Niitä ovat erittäin suuret tai epätavalliset rakenteet ja rakenteet joihin liittyy normaalista poikkeavia riskejä tai joissa on epätavallisen vaikeita pohja- tai kuormitusolosuhteita. (RIL 207-2009, 32.)

4.2 Seuraamus- ja luotettavuusluokat

Geoteknisen luokan lisäksi kohteista arvioidaan seuraamusluokat CCC1, CC2 ja CC3, joihin liitetään myös luotettavuusluokat RC1, RC2 ja RC3 (Taulukko 18). Luotettavuusluokasta riippuvaa kuormakerrointa K_{FI} käytetään kuormien mitoitusarvojen laskennassa. (RIL 207-2009, 41-43.)

Taulukko 18. Seuraamusluokkien määrittely ja luotettavuusluokat. (RIL 201-1-2011, 24)

Seuraamusluokan (CC) kuvaus	Rakennuksia sekä rakenteita koskevia esimerkkejä	Luotettavuusluokka/kuormakerroin K_{FI}
CC3 Suuret seuraamukset ihmishenkien menetysten tai hyvin suurten taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristövahinkojen takia	Rakennuksen kantava runko ¹⁾ jäykistävine rakennusosineen sellaisissa rakennuksissa, joissa usein on suuri joukko ihmisiä, kuten - yli 8-kerroksiset ²⁾ asuin-, konttori- ja liikerakennukset - konserttisalit, teatterit, urheilu- ja näytelyhallit, katsomot - raskaasti kuormitetut tai suuria jännevälejä sisältävät rakennukset. Erikoisrakenteet, kuten esim. suuret mastot ja tornit. Luiskat sekä penkereet ja muut rakenteet hienorakeisten maalajien alueilla siirtymien haittavaikutuksille herkissä ympäristöissä.	RC3 $K_{FI} = 1,1$
CC2 Keskisuuret seuraamukset ihmishenkien menetysten tai merkittävien taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristövahinkojen takia	Rakennukset ja rakenteet, jotka eivät kuulu luokkiin CC3 tai CC1.	RC2 $K_{FI} = 1,0$
CC1 Vähäiset seuraamukset ihmishenkien menetysten tai pienten tai merkityksellisten taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristövahinkojen takia	1- ja 2-kerroksiset rakennukset, joissa vain tilapäisesti oleskelee ihmisiä, kuten esim. varastot. Rakenteet, joiden vaurioitumisesta ei aiheudu merkittävää vaaraa, kuten - matalalla olevat alapohjat, ilman kellaritiloja - ryömintätilaiset vesikatot, kun yläpohja on varsinainen kantava rakenne - sellaiset ulko- ja väliseinät, ikkunat, ovet ja vastaavat, joihin pääasiassa kohdistuu ilman paine-eroista aiheutuva sivuttaiskuormitus ja jotka eivät toimi kantavan tai jäykistävän rungon osana - standardin EN 1993-1-3:n rakenneluokkien (structural class) II ja III muotolevyrakenteet - standardin EN 1993-1-3:n rakenneluokan (structural class) I muotolevyrakenteet levyyn taivutusta aiheuttaville pintaa vasten kohtisuorille kuormille ³⁾ .	RC1 $K_{FI} = 0,9$

4.3 Murtorajatilat

Mitoitustilanteissa tulee tarkistaa, ettei seuraavia rajatiloja EQU, STR, GEO, UPL ja HYD ylitetä (SFS-EN 1997-1, 27).

EQU Rakenteen tai maapohjan tasapainotilan menettäminen, kun sitä tarkastellaan jäykkänä kappaleena, jossa rakennemateriaalien ja maapohjan lujuudet ovat merkityksettä kestävyuden aikaansaamisessa.

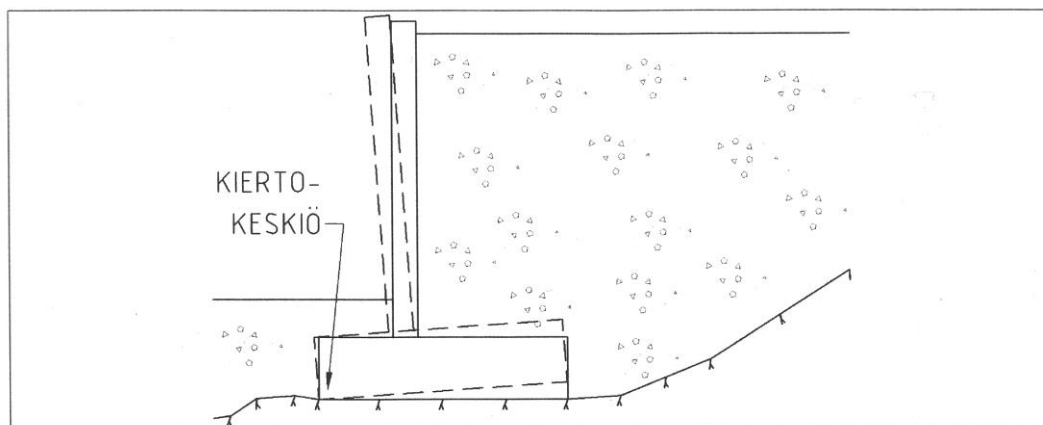
STR Rakenteen tai rakenteellisten osien sisäinen murtuminen tai liiallinen muodonmuutos, mukaan lukien esimerkiksi perustukset, paalut tai kellarinseinät, joissa rakennusmateriaalien lujuus on merkittävä kestävyuden aikaansaamisessa.

GEO Rakennuspohjan murtuminen tai liiallinen muodonmuutos, joissa maan tai kallion lujuus on merkittävä kestävyuden aikaansaamisessa.

UPL Vedenpaineen aiheuttamasta nosteesta tai muista pystysuuntaisista kuormista johtuva rakenteen tai maapohjan tasapainotilan menettäminen.

HYD Hydraulinen maapohjan nousu, sisäinen eroosio ja sisäinen putkieroosio maassa.

Staattinen tasapaino EQU tulee pääasiassa tarkasteltavaksi rakenteellisessa mitoituksessa. Geoteknisessä mitoituksessa sen osoittaminen rajoittuu harvoin tapauksiin. Yksi esimerkkitapaus on jäykkä perustus kallion päällä (Kuva 26). (RIL 207-2009, 47.)



Kuva 26. Jäykkä perustus kallion päällä. (RIL 207-2009, 47)

Murtorajatilaa tai rakenneosan tai maapohjan liiallisen muodonmuutoksen arvoa (STR/GEO) tarkasteltaessa, tulee osoittaa että kaavan 19 yhtälö toteutuu (RIL 207-2009, 48).

$$E_d \leq R_d \quad (19)$$

E_d = kuormien vaikutuksen mitoitusarvo

R_d = kestävyyyden mitoitusarvo

Staattisen tasapainon rajatilaa tai rakenteen tai maapohjan kokonaissiirtymien rajatilaa (EQU) tarkasteltaessa tulee osoittaa, että kaavan 20 yhtälö toteutuu (RIL 207-2009, 48).

$$E_{dst,d} \leq E_{stb;d} + T_d \quad (20)$$

$E_{dst,d}$ = kaatavien kuormien vaikutuksen mitoitusarvo

$E_{stb;d}$ = vakauttavien kuormien vaikutuksen mitoitusarvo

T_d = kokonaisleikkauskestävyyden mitoitusarvo

4.4 Käyttörajatilat

Käyttörajatilassa tarkistetaan, että muodonmuutokset pysyvät vaadittujen käyttökel-
poisuusrajojen sisällä (RIL 207-2009, 56). Eurokoodin mukaan geoteknisessä suunnittelussa käyttörajatila lasketaan ominaisarvoja käyttäen (Jääskeläinen 2011, 344). Osavarmuuslukujen arvoina käytetään käyttörajatilassa arvoa 1,0 (RIL 207-2009, 55).

Perustukset tulee suunnitella siten, etteivät perustusten painumaerojen aiheuttamat muodonmuutokset aiheuta rakenteisiin haitallisia jännityksiä. Rakennusten ja rakenteiden kokonaispainumat ja kallistumat on rajoitettava kohtuullisiksi. Perustusten suunnittelussa pitää esittää raja-arvot perustusten siirtymille. Kansallisessa liitteessä ei esitetä sallittuja arvoja. Suuntaa antavat arvot on esitetty taulukossa 19. (RIL 207-2009, 56-57.)

Taulukko 19. Rakennusten kokonaispainumien ja kantavien rakenteiden kulmakiertymien suuntaa-antavia raja-arvoja. (RIL 207-2009, 57)

Rakennetyyppi	Kokonaispainuman raja-arvoja (mm)	Kulmakiertymien raja-arvojen vaihteluväli	
		Karkearakeinen maapohja	Hienorakeinen maapohja
Massiiviset jäykät rakenteet	100	1/250–1/200	1/250–1/200
Staattisesti määrätyt rakenteet	100	1/400–1/300	1/300–1/200
Staattisesti määräämättömät rakenteet:			
– Puurakenteet	100	1/400–1/300	1/300–1/200
– Teräsrakenteet	80	1/500–1/200	1/500–1/200
– Muuratut rakenteet	40	1/1000–1/600	1/800–1/400
– Teräsbetonirakenteet	60	1/1000–1/500	1/700–1/350
– Teräsbetonielementtirakenteet	40	1/1200–1/700	1/1000–1/500
– Teräsbetonikehärakenteet	30	1/2000–1/1000	1/1500–1/700

4.5 Mitoitustavat

Eurokoodi EN 1997-1 esittää kolme erilaista murtorajatilan mitoitustapaa. Näistä käytetään myös lyhennettä DA (Design Approach). Mitoitustavat eroavat toisistaan tavassa, jolla ne jakavat osavarmuusluvut kuormien (A), maaparametrien (M) ja kestävyyksien (R) kesken. (RIL 207-2009, 52-53.) Mitoitustapaa 1 ei Suomessa käytetä, joten tässä esitellään Suomessa käytössä olevat eurokoodin mukaiset mitoitustavat 2 ja 3.

Mitoitustapa 2 (DA2)

Mitoitustapaa 2 käytetään antura- ja laattaperustusten, paaluperustusten, ankkureiden ja tukirakenteiden mitoituksessa (RIL 207-2009, 53).

Mitoitustavassa 2 käytetään osavarmuuslukujen yhdistelmää $A1''+''M1''+''R2$. Tällöin kuormat kerrotaan osavarmuusluvuilla, maaparametrit otetaan ominaisarvoina ja lopulta vielä kestävyys jaetaan osavarmuusluvulla. (Jääskeläinen 2011, 346.)

Mitoitustavassa 2 on kaksi vaihtoehtoa, joista käytetään merkintää DA2 ja DA2*. Perustavassa DA2 osavarmuusluvut otetaan käyttöön heti laskennan alussa. Mitoitustavassa DA2* laskelma tehdään ominaisarvoilla ja osavarmuuslukuja käytetään vasta laskelman lopussa murtorajatilaehto tarkistettaessa. (RIL 207-2009, 53.) Ensin mai-

nittu menetelmä DA2 saattaa joissain tilanteissa johtaa järeämpään rakenteeseen (Jääskeläinen 2011, 346).

Mitoitustapa 3 (DA3)

Luisien ja kokonaisvakavuuden mitoituksessa käytetään mitoitustapaa 3 (RIL 207-2009, 53).

Mitoitustavassa 3 käytetään osavarmuuslukujen yhdistelmää $A_2 + M_2 + R_3$. Siinä kuormat ja maaparametrit kerrotaan osavarmuusluvuilla, mutta kestävyuden osavarmuuskerroin R_3 on 1,0. (RIL 207-2009, 52-53.)

4.6 Osavarmuusluvut

4.6.1 Kuormayhdistelmät osavarmuuslukuineen

Staattisen tasapainon rajatilan (EQU) tarkastelussa saadaan kuormayhdistelmäksi taulukon 20 mukaan (RIL 207-2009, 47-48):

$$1,1 \cdot K_{FI} \cdot G_{kj,sup} + 0,9 \cdot G_{kj,inf} + 1,5 \cdot K_{FI} \cdot Q_{k,1} + 1,5 \cdot K_{FI} \sum_{i>1} \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \quad (21)$$

Taulukko 20. Kuormien osavarmuusluvut (EQU). (RIL 207-2009, 47)

Kuorma	Merkintä	Arvo
Pysyvä:		
Epäedullinen ^a	$\gamma_{G,dst}$	1,1 K_{FI}
Edullinen ^b	$\gamma_{G,stab}$	0,9
Muuttuva:		
Epäedullinen ^a	$\gamma_{Q,dst}$	1,5 K_{FI}
Edullinen ^b	$\gamma_{Q,stab}$	0

^a Kaatava kuorma

^b Vakauttava kuorma

Luiska- ja kokonaisvakavuustarkasteluissa käytetään mitoitustapaa 3 (DA3), joten kuormien osavarmuusluvuissa käytetään sarjaa A2 (Taulukko 21). Tällöin saadaan lauseke: (RIL 207-2009, 47-48.)

$$1,0 \cdot K_{FI} \cdot G_{kj,sup} + 1,0 \cdot G_{kj,inf} + 1,3 \cdot K_{FI} \cdot Q_{k,1} + 1,3 \cdot K_{FI} \sum_{i>1} \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \quad (22)$$

Taulukko 21. Kuormien tai kuormien vaikutusten osavarmuusluvut (STR/GEO). (RIL 207-2009, 49)

Kuorma	Merkintä	Sarja	
		A1	A2
Pysyvä: Epäedullinen (Yht.6.10a) (Yht.6.10b) (Yht.6.10) Edullinen (Yht.6.10a) (Yht.6.10b) (Yht.6.10)	$\gamma_{Gkj,sup}$	1,35 K_{FI}	1,0 K_{FI}
		1,15 K_{FI}	
	$\gamma_{Gkj,inf}$	0,9	1,0
		0,9	
Muuttuva: Epäedullinen (Yht.6.10b) (Yht.6.10) Edullinen	γ_Q	1,5 K_{FI}	1,3 K_{FI}
		0	0

Muissa tarkasteluissa käytetään kuormien osavarmuusluvuissa sarjaa A1 (Taulukko 21), jolloin kuormien yhdistelmänä käytetään epäedullisempaa kahdesta seuraavasta lausekkeesta: (RIL 207-2009, 49-50.)

$$1,15 \cdot K_{FI} \cdot G_{kj,sup} + 0,9 \cdot G_{kj,inf} + 1,5 \cdot K_{FI} \cdot Q_{k,1} + 1,5 \cdot K_{FI} \sum_{i>1} \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \quad (23)$$

$$1,35 \cdot K_{FI} \cdot G_{kj,sup} + 0,9 \cdot G_{kj,inf} \quad (24)$$

”Kaikkien samasta syystä aiheutuvien pysyvien kuormien ominaisarvot kerrotaan osavarmuusluvulla $\gamma_{G,sup}$, jos kuorman kokonaisvaikutus on epäedullinen, ja osavarmuudella $\gamma_{G,inf}$, jos kuorman kokonaisvaikutus on edullinen. Esimerkiksi kaikkien rakenteen omasta painosta aiheutuvien kuormien voidaan katsoa aiheutuvan samasta syystä.” (RIL 207-2009, 50.)

Lausekkeissa esiintyvän yhdistelykertoimen ψ arvot saadaan taulukosta 22.

Taulukko 22. Yhdistelykertoimien ψ arvot. (RIL 201-1-2011, 36)

Kuorma	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Hyötykuormat rakennuksissa, luokka (katso EN 1991-1-1)			
Luokka A: asuintilat	0,7	0,5	0,3
Luokka B: toimistotilat	0,7	0,5	0,3
Luokka C: kokoontumistilat	0,7	0,7	0,3
Luokka D: myymälätilat	0,7	0,7	0,6
Luokka E: varastotilat	1,0	0,9	0,8
Luokka F: liikennöitävät tilat, ajoneuvon paino ≤ 30 kN	0,7	0,7	0,6
Luokka G: liikennöitävät tilat, 30 kN $<$ ajoneuvon paino ≤ 160 kN	0,7	0,5	0,3
Luokka H: vesikatot	0	0	0
Lumikuorma (katso EN 1991-1-3)*), kun			
$s_k < 2,75$ kN/m ²	0,7	0,4	0,2
$s_k \geq 2,75$ kN/m ²	0,7	0,5	0,2
Jääkuorma (jään painosta johtuva)**)	0,7	0,3	0
Rakennusten tuulikuormat (katso EN 1991-1-4)	0,6	0,2	0
Rakennusten sisäinen lämpötila (ei tulipalossa) (katso EN 1991-1-5)	0,6	0,5	0

4.6.2 Maaparametrien osavarmuusluvut

Geoteknisten parametrien eli maaparametrien ominaisarvot valitaan kenttä- ja laboratoriokokeista saatujen tulosten ja johdettujen arvojen perusteella. Ominaisarvoja täydennetään vertailukelpoisella kokemuksella. (RIL 207-2009, 39.)

Geoteknisten parametrien mitoitusarvot johdetaan ominaisarvoista kaavalla 25 (RIL 207-2009, 44).

$$X_d = X_k / \gamma_M \quad (25)$$

X_d = geoteknisen parametrin mitoitusarvo

X_k = geoteknisen parametrin ominaisarvo

γ_M = geoteknisen parametrin osavarmuusluku

Geoteknisten parametrien mitoitusarvot on mahdollista arvioida myös suoraan, kuitenkin käyttäen taulukoissa esitettyjä osavarmuuslukuja ohjeena riittävään varmuustasoon (RIL 207-2009, 44). Taulukko 23 esittää staattisen tasapainorajatilan (EQU)

tarkastelun yhteydessä käytettäviä maaparametrien osavarmuuslukuja. Taulukossa 24 on osavarmuusluvut maaparametreille murtorajatiloissa STR ja GEO.

Taulukko 23. Maaparametrien osavarmuusluvut (γ_M) (EQU). (RIL 207-2009, 48)

Maaparametri	Merkintä	Arvo
Leikkauskestävyysskulma ^a ("Kitkakulma")	$\gamma_{\phi'}$	1,25
Tehokas koheesio	γ_c'	1,25
Suljettu leikkauslujuus	γ_{cu}	1,5
Yksiakiaalinen puristuslujuus	γ_{qu}	1,5
Tilavuuspaino	γ_{γ}	1,0

^a Tällä varmuusluvulla jaetaan $\tan \phi'$

Taulukko 24. Maaparametrien osavarmuusluvut (γ_M) (STR/GEO). (RIL 207-2009, 51)

Maaparametri	Merkintä	Sarja	
		M1	M2
Leikkauskestävyysskulma ^a ("Kitkakulma")	$\gamma_{\phi'}$	1,0	1,25
Tehokas koheesio	γ_c'	1,0	1,25
Suljettu leikkauslujuus	γ_{cu}	1,0	1,5
Yksiakiaalinen puristuskoe	γ_{qu}	1,0	1,5
Tilavuuspaino	γ_{γ}	1,0	1,0

^a Tällä varmuusluvulla jaetaan $\tan \phi'$

4.6.3 Kestävyyden osavarmuusluvut

Kestävyyden osavarmuuslukuja esittävistä taulukoista valitaan sarja R2 tai R3 käytettävän mitoitusmukan mukaan. Mitoitusmukan 2 (DA2) käytetään sarjaa R2 ja mitoitusmukan 3 (DA3) käytetään sarjaa R3. (RIL 207-2009, 51-52.)

Taulukossa 25 on esitetty osavarmuusluvut antura- ja laattaperustusten kestävyysdel-
le. Taulukko 26 esittää kestäväyden osavarmuusluvut paalujen mitoituksessa. Esi-
jännitettyjen ankkurointien kestäväyden osavarmuusluvut on esitetty taulukossa 27 ja
taulukkoon 28 on koottu tukirakenteiden kestäväyden osavarmuusluvut. Taulukossa
29 on kestäväyden osavarmuusluvut luiska- ja kokonaisvakavuustarkasteluissa, jol-
loin käytössä on mitoitusmukan 3 (DA3) ja kestäväyden osavarmuusluku on 1,0.

Taulukko 25. Antura- ja laattaperustusten kestävyiden osavarmuusluvut (γ_R) (STR/GEO). (RIL 207-2009, 52)

Kestävyys	Merkintä	Sarja R2
Kantokestävyys	$\gamma_{R,v}$	1,55
Liukuminen	$\gamma_{R,h}$	1,1

Taulukko 26. Syrjäyttävien paalujen, kaivettujen paalujen ja CFA-paalujen kestävyiden osavarmuusluvut (γ_R) (STR/GEO). (RIL 207-2009, 52)

Kestävyys	Merkintä	Sarja R2
Kärki	γ_b	1,2
Vaippa (puristus)	γ_s	1,2
Kokonais-/yhdistetty (puristus)	γ_t	1,2
Vedetty vaippa:		
- lyhytaikainen kuormitus	$\gamma_{s,t}$	1,35
- pitkäaikainen kuormitus	$\gamma_{s,t}$	1,5

Taulukko 27. Esijännitettyjen ankkurointien osavarmuusluvut (γ_R) (STR/GEO). (RIL 207-2009, 52)

Kestävyys	Merkintä	Sarja R2
Tilapäinen	$\gamma_{a,t}$	1,25
Pysyvä	$\gamma_{a,p}$	1,5

Taulukko 28. Tukirakenteiden kestävyiden osavarmuusluvut (γ_R) (STR/GEO). (RIL 207-2009, 52)

Kestävyys	Merkintä	Sarja R2
Kantokestävyys	$\gamma_{R,v}$	1,55
Liukumiskestävyys	$\gamma_{R,h}$	1,1
Maan kestävyys (passiivipaine)	$\gamma_{R,e}$	1,5

Taulukko 29. Kestävyiden osavarmuusluvut (γ_R) luiskille ja kokonaisvakavuudelle (STR/GEO). (RIL 207-2009, 52)

Kestävyys	Merkintä	Sarja R3
Maan kestävyys	$\gamma_{R,e}$	1,0

4.7 Mitoitusmenettelyt nosteelle ja hydrauliselle nousulle

4.7.1 Mitoitus nosteelle

Vedenpaineen aiheuttamalle nosteelle (UPL) mitoitettaessa tarkistetaan, että kaatavien pysyvien ja muuttuvien pystysuorien kuormien yhdistelmän mitoitusarvo on enintään yhtä suuri kuin vakauttavien pysyvien pystysuorien kuormien mitoitusarvon ja muun lisäkestävyyden mitoitusarvon summa (Kaavat 26 ja 27). (RIL 207-2009, 54.) Kuormien osavarmuusluvut on esitetty taulukossa 30. Taulukossa 31 on esitetty osavarmuusluvut sekä maaparametreille että kestävyyksille rajatilaa UPL tarkistettaessa.

$$V_{dst,d} \leq G_{stb,d} + R_d \quad (26)$$

$$V_{dst,d} = G_{dst,d} + Q_{dst,d} \quad (27)$$

$V_{dst,d}$ = kaatavien pysyvien ja muuttuvien pystysuorien kuormien yhdistelmän mitoitusarvo

$G_{stb,d}$ = vakauttavien pysyvien pystysuorien kuormien mitoitusarvo

R_d = muu lisäkestävyys

$G_{dst,d}$ = kaatavien pysyvien pystysuorien kuormien mitoitusarvo

$Q_{dst,d}$ = kaatavien muuttuvien pystysuorien kuormien mitoitusarvo

Taulukko 30. Kuormien osavarmuusluvut (UPL). (RIL 207-2009, 54)

Kuorma	Merkintä	Arvo
Pysyvä:		
Epäedullinen ^a	$\gamma_{G,dst}$	1,1 K_{FI}
Edullinen ^b	$\gamma_{G,stb}$	0,9
Muuttuva:		
Epäedullinen ^a	$\gamma_{Q,dst}$	1,5 K_{FI}

^a Kaatava kuorma

^b Vakauttava kuorma

Taulukko 31. Osavarmuusluvut maaparametreille ja kestävyyksille (UPL). (RIL 207-2009, 54)

Maaparametri	Merkintä	Arvo
Leikkauskestävyysskulma ^a ("Kitkakulma")	$\gamma_{\phi'}$	1,25
Tehokas koheesio	$\gamma_{c'}$	1,25
Suljettu leikkauslujuus	γ_{cu}	1,5
Vedetyn paalun kestävyys	$\gamma_{s,t}$	1,5
Ankkurin kestävyys	γ_a	1,5

^a Tällä varmuusluvulla jaetaan $\tan \phi'$

4.7.2 Mitoitus hydrauliselle nousulle

Tarkasteltaessa maassa tapahtuvaa veden suotovirtauksesta johtuvaa hydraulista nousua, tulee osoittaa että kaatavan kokonaishuokosvedenpaineen mitoitusarvo tai suotovoiman mitoitusarvo on pienempi tai yhtäsuuri kuin vakauttava pystysuora kokonaisjännitys tai vakauttavien pysyvien pystysuorien kuormien mitoitusarvo (vedenalainen paino) (Kaavat 28 ja 29). (RIL 207-2009, 55.) Kuormien osavarmuusluvut on esitetty taulukossa 32.

$$U_{dst,d} \leq \sigma_{stb;d} \quad (28)$$

$$S_{dst,d} \leq G'_{stb;d} \quad (29)$$

$U_{dst,d}$ = kaatavan kokonaishuokosvedenpaineen mitoitusarvo

$\sigma_{stb;d}$ = vakauttava pystysuora kokonaisjännitys

$S_{dst,d}$ = kaatavan suotovirtausvoiman mitoitusarvo maassa

$G'_{stb;d}$ = vakauttavien pysyvien pystysuorien kuormien mitoitusarvo
(paino vedessä)

Taulukko 32. Kuormien osavarmuusluvut (HYD). (RIL 207-2009, 55)

Kuorma	Merkintä	Arvo
Pysyvä:		
Epäedullinen ^a	$\gamma_{G,dst}$	1,35 K_{FI} (edulliset pohjaolosuhteet)
Epäedullinen ^a	$\gamma_{G,dst}$	1,8 K_{FI} (epäedulliset pohjaolosuhteet)
Edullinen ^b	$\gamma_{G,stab}$	0,9
Muuttuva:		
Epäedullinen ^a	$\gamma_{Q,dst}$	1,5 K_{FI}

^a Kaatava kuorma (murtava)

^b Vakauttava kuorma

5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Maaluokitus

Vaikka GEO-luokituksen ja ISO-luokituksen välillä monet perusasiat, esimerkiksi raekokorajat lajitteiden välillä, ovat suunnilleen yhtenevät, on menetelmien välillä varsinaisessa nimeämismenetelmässä eroja, joiden vuoksi siirtyminen geoteknisestä maaluokituksesta eurokoodin mukaiseen ISO-luokitukseen vaatii asiaan perehtymistä.

Geoteknisessä luokituksessa rakeisuustutkimuksen yhteydessä laaditulta rakeisuuskäyrältä voidaan suoraan nimetä maalaji D_{50} -menetelmällä. Eurokoodin mukaisessa luokituksessa nimeäminen tapahtuu erilliseltä nomogrammilta niin sanotulla kolmiomenetelmällä. Suomalaisittain iso ero vanhaan geotekniseen luokitukseen on se, että ISO-luokitus ei tunne moreeni-käsitettä. Moreenille löytyy kuitenkin vastaava nimi, sillä ISO-luokitus mahdollistaa usemman kuin yhden täydentävän nimen, jolloin useaa lajitetta sisältävät moreenit on mahdollista nimetä riittäväällä tarkkuudella.

ISO-luokituksessa nimien lyhenteet tulevat englanninkielisistä maalajien nimistä. Suomalaisessa standardissakaan näitä ei ole suomennettu, joten tarkoitus ilmeisesti on, että englanninkieliset lyhenteet jäävät käyttöön. Yhteinen nimikkeistö helpottaa kansainvälistä kanssakäymistä geotekniikan alalla.

ISO-luokitus tuo myös joitain tarkennuksia muihin maan luokitukseen soveltuviin periaatteisiin. Esimerkiksi tiivyyttä arvioidaan suhteellisen tiivyyden mukaan, ei suoraan kuivatilavuuspainon avulla.

Pohjatutkimus

Maastossa tapahtuvia tutkimusmenetelmiä ovat lukuisat kairausmenetelmät. Suomesa yleisin kairausmenetelmä on painokairaus. Siipikairaus on tärkeä maastossa tapahtuva leikkauslujuuden mittaustapa.

Monien pohjatutkimusmenetelmien periaate on säilynyt samanlaisena vuosikymmenien ajan. Käsikäyttöisyydestä on kuitenkin siirrytty monitoimikonekairoihin, jolloin samalla kairalla voidaan tehdä koneellisesti monia erilaisia maaperätutkimuksia. Kairoihin ovat tulleet myös laitteet, joilla kairaustulosten tallentaminen onnistuu automaattisesti. Mittaukset tapahtuvat yhä useammin sähköisin laittein ja tietotekniikkaa hyväksi käyttäen.

Laboratoriossa tehtävät tutkimukset vaativat järjestelmällisyyttä ja käytettävän tutkimusmenetelmän tuntemusta. Tutkimusten tulosten oikeellisuutta on osattava arvioida. Monissa menetelmissä virhemahdollisuuksia on useita. Tutkimusmenetelmän teoriapohja on syytä hallita laskelmia tehtäessä.

Eurokoodin mukaisessa näytteiden otossa on syytä kiinnittää huomiota näytteiden laatuluokkiin ja niiden vaatimukseen. Esimerkiksi leikkauslujuutta voidaan tutkia vain häiriintymättömistä luokan 1 näytteistä. Häiriintymättömien näytteiden ottoon on syytä käyttää varta vasten suunniteltuja välineitä.

Koska maaluokitus nivoutuu maan luokitusominaisuuksien kautta yhteen maaperän ja maa-aineksen tutkimuksen kanssa, vaikuttaa eurokoodien ja uuden ISO-maaluokitusjärjestelmän käyttöönotto myös pohjatutkimukseen. Näin ollen myös eurokoodien mukaisten pohjatutkimusten teossa vaaditaan perehtyneisyyttä yhteiseurooppalaisiin geotekniikkaa koskeviin standardeihin.

Geotekninen suunnittelu

Geoteknisen suunnittelun yhteiseurooppalainen standardi Eurokoodi 7 koskee varsinaisen suunnittelun lisäksi myös pohjatutkimusta ja maaluokitusta, joko suoraan tai välillisesti muiden eurokoodissa mainittujen velvoittavien standardien kautta.

Silta- ja infrarakentamisessa ollaan eurokoodien käyttöönoton etulinjassa. Niissä eurokoodi on ainoa käytössä oleva järjestelmä. Talonrakennuspuolella jatkuu yhä eurokoodien ja vanhan suunnittelujärjestelmän rinnakkaiskäyttö.

Eurokoodissa suunnitteluvaatimukset määritellään geoteknisten luokkien avulla. Luokat ovat vaativimmasta helpoimpaan GL1, GL2 ja GL3. Ne vastaavat käytössä olevia vaativuusluokkia B, A ja AA. Eurokoodissa esimerkiksi tavanomaiset rakenteet antura- ja laattaperustuksineen kuuluvat luokkaan GL2.

Eurokoodin mukainen geotekninen suunnittelu perustuu osavarmuusmenettelyyn, jossa varmuus huomioidaan valitun mitoitus-tavan mukaan kuormien, maaparametrien ja kestävyyksien yhteydessä. Suomeen on valittu käytettäväksi mitoitus-tavat 2 (DA2) ja mitoitus-tapa 3 (DA3). Mitoitus-tavassa DA2 osavarmuus-luvut kohdistetaan kuormiin tai kuormien vaikutuksiin ja kestävyyteen. Mitoitus-tavassa DA3 osavarmuus-luvut kohdistetaan kuormiin ja maaparametreihin. Mitoitus-tapaa DA3 käytetään luiskien ja kokonaisvakavuuden laskemisessa. Mitoitus-tapaa DA2 käytetään perustusten suunnittelussa.

Mitoitus-tavasta DA2 on olemassa kaksi vaihtoehtoa, joissa toisessa osavarmuus-kerroimet otetaan käyttöön heti laskennan alussa. Mitoitus-tavassa DA2* osavarmuus-lukuja käytetään vasta laskelman lopussa murtorajatilaehtoa tarkistettaessa. Koska ensin mainitussa tavassa osavarmuus-luvut otetaan mukaan jo alussa, voi se joissain tapauksissa johtaa järeämpiin rakenteisiin esimerkiksi kasvaneen epäkeskisyyden vuoksi.

Eurokoodissa on esitetty taulukoituna eri tapauksissa käytettävät osavarmuus-luvut kuormille, maaparametreille ja kestävyyksille. Ne valitaan tutkittavan tapauksen mukaan, ja tarkastetaan, ettei kyseessä olevaa rajatilaa ylitetä, toisin sanoen tarkastetaan että rakenteen kestävyys on riittävä.

Eurokoodissa käytettävä sanasto eroaa joiltakin osin vanhastaan käytetystä sanastosta. Esimerkiksi kitkakulma esiintyy eurokoodissa nimellä leikkauskestävyyskulma ja kantokyvystä käytetään nimitystä kantokestävyys.

Lopuksi

Mielestäni opinnäytetyössä saavutettiin tavoitteet, joita olivat yleisimpien pohjatutkimusmenetelmien kartoittaminen, maaluokitusmenetelmien selvittäminen ja eurokoodin mukaisen geoteknisen suunnittelun perusteiden tutkiminen.

Työtä olisi voinut rajata vielä huomattavasti enemmän, esimerkiksi koskemaan pelkästään maaluokitusta, jolloin asioita olisi voitu käsitellä vielä yksityiskohtaisemmin. Toisaalta halusin itse perehtyä geotekniikkaan mahdollisimman laajasti. Vielä aivan loppuvaiheessa työtä karsittiin ja tiivistettiin. Työn edetessä huomasin myös pohjatutkimusmenetelmien suuren määrän. Tähän työhön ei ollut mahdollista ottaa mukaan aivan kaikkia menetelmiä

Itselleni asettamani tavoitteet täyttyivät ja olen hyvilläni voidessani luovuttaa valmiin työn.

LÄHTEET

Eurokoodi Help Desk. 2014. Viitattu 4.3.2014. <http://www.eurocodes.fi/>

Jakonen, M., Middleton, M. & Haavikko, P. 2002. Työohjeet maalajien hydraulisen johtavuuden määrittämiseen laboratoriossa concell-flexible-wall-tutkimuslaitteistolla. Geologian tutkimuskeskus. Viitattu 28.2.2014. <http://arkisto.gtk.fi/p30/P30.001.pdf>

Jauhiainen, P. & Törnqvist, J. 2001. ICT-koe tien rakennekerros materiaalien deformaatioherkkyyden määrittämisessä. Helsinki: Edita. Tiehallinnon selvityksiä 63/2001.

Jääskeläinen, R. 2011. Geotekniikan perusteet. 3. painos. Tampere: Tammertekniikka / Amk-Kustannus.

Kairausopas I. 1980. Painokairaus, tärykairaus, heijarikairaus. Helsinki: Suomen geoteknillinen yhdistys ja Rakentajain kustannus.

Korhonen, K-H., Gardemeister, R. & Tammirinne, M. 1974. Geotekninen maaluokitus. Geotekniikan laboratorio, tiedonanto 14. Valtion teknillinen tutkimuskeskus.

Rantamäki, M., Jääskeläinen, R. & Tammirinne, M. 1997. Geotekniikka 464. 21. muuttum. p. Helsinki: Yliopistokustannus / Otatieto.

Ronkainen, N. 2012. Suomen ympäristö 2 | 2012. Suomen maalajien ominaisuuksia. Helsinki: Suomen ympäristökeskus. Viitattu 30.1.2014. https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/38773/SY2_2012_Suomen_maalajien_ominaisuuksia.pdf

RIL 121-2004. Pohjarakennusohjeet. 3. painos. Helsinki: Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL.

RIL 201-1-2011. Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat. Eurokoodit EN 1990, EN 1991-1-1, EN 1991-1-3, En 1991-1-4. Helsinki: Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL.

RIL 207-2009. Geotekninen suunnittelu. Eurokoodin EN 1997-1 suunnitteluohje. Helsinki: Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL.

SFS-käsikirja 179-1. Geotekninen tutkimus ja koestus. Osa 1: Maan ja kallion luokitukset. 2008. Suomen Standardisoimisliitto SFS. Helsinki: SFS.

SFS-EN 1997-1 Eurokoodi 7. Geotekninen suunnittelu. Osa 1: Yleiset säännöt. 2005. 2. painos. Suomen Standardisoimisliitto SFS. Helsinki: SFS. Viitattu 17.2.2014. <http://www.sfs.fi>

SFS-EN 1997-2 Eurokoodi 7. Geotekninen suunnittelu. Osa 2: Pohjatutkimus ja koestus. 2007. 2. painos. Suomen Standardisoimisliitto SFS. Helsinki: SFS. Viitattu 17.2.2014. <http://www.sfs.fi>

Tiehallinto. 2001. Porapaalutusohje. Helsinki: Edita.

Tiehallinto. 2004. Rakenteen parantamissuunnittelua edeltävät maatulkatutkimukset ja tulosten esitystapa – menetelmäkuvaus. Helsinki: Edita Prima.

Tielaitos. 1998. Teiden pehmeikkötutkimukset. Geotekniikan informaatiojulkaisuja Helsinki: Tielaitos.

Törnqvist, J., Juvankoski, M. & Tammirinne, M. 2001. CPTU-kairaus. Menetelmäkuvaus TPPT 11. Viitattu 29.1.2014. <http://alk.tiehallinto.fi/tppt/pdf/11-cptu.pdf>

Törnqvist, J., Laaksonen, R. & Juvankoski, M. 2001. Sähköinen vastusluotaus tien painumalaskennan lähtötietojen hankkimisessa. Menetelmäkuvaus TPPT 9. Viitattu 28.1.2014. <http://alk.tiehallinto.fi/tppt/pdf/9-vastusluotaus.pdf>