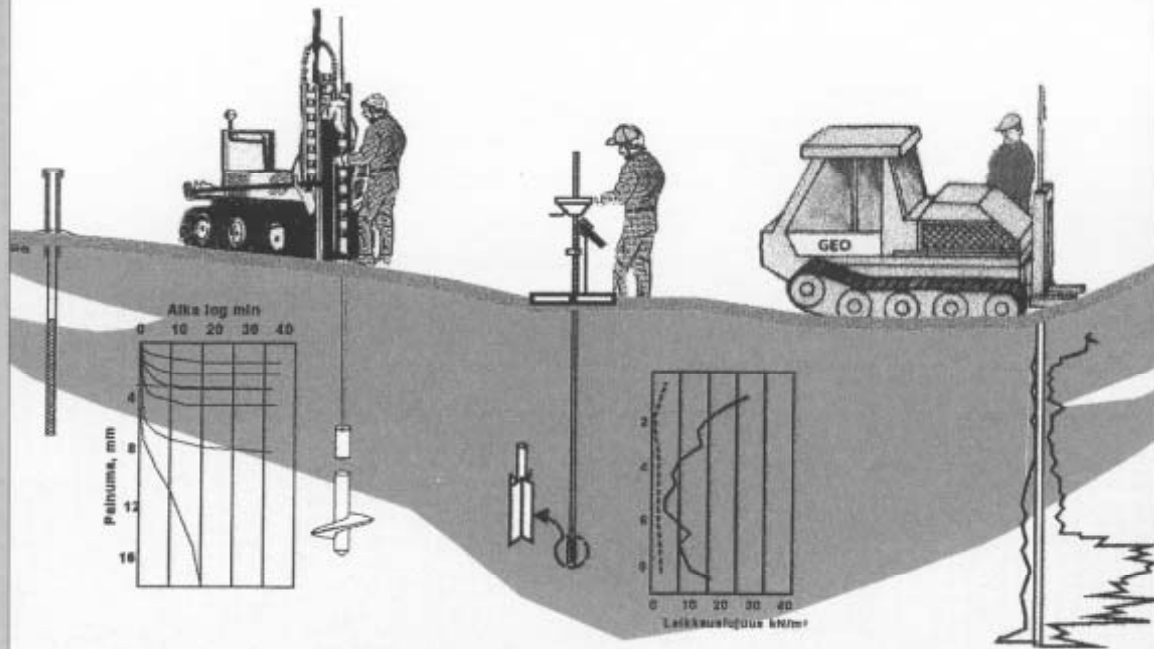




Tielaitos

Geotekniikan informaatiojulkaisu

## Teiden pehmeikkötutkimukset



Tielaitoksen  
selvityksiä

28/1998

Helsinki 1998  
TIEHALLINTO  
Tie- ja  
liikennetekniikka

TUOTANTO  
Konsultointi

Tielaitoksen selvityksiä  
28/1998

Geotekniikan informaatiojulkaisuja  
**TEIDEN PEHMEIKKÖTUTKIMUKSET**

Tielaitos  
TIEHALLINTO  
Tie- ja liikennetekniikka

Helsinki 1998



**Geotekniikan informaatiojulkaisuja. Teiden pehmeikkötutkimukset.** [Grundundersökningar för vägar pD lös jord]. Helsinki 1998, Tielaitoksen selvityksiä 28/1998. 90 sivua.  
ISBN 951-726-447-X. ISSN 0788-3722. TIEL 3200520.

**Aiheluokka:** 61,62  
**Asiasanat** pohjarakennus, pohjatutkimus, kairaukset

## **TIIVISTELMÄ**

Informaatiojulkaisun tarkoituksena on esitellä teiden pehmeikkötutkimusten hyvä käytäntö. Aluksi käydään läpi aiheen piiriin kuuluvien savi-, siltti- ja turvemuodostumien geologian perusteita. Erilaisten pohjatutkimusmenetelmien käyttömahdollisuudet, niillä saatava tieto ja sen tarkkuus sekä tutkimuskustannukset erilaisissa olosuhteissa esitellään tutkimusmenetelmien valinnan helpottamiseksi. Tutkimusmenetelminä esitellään mm. kairaukset, näytetutkimukset, geofysikaaliset menetelmät sekä in situ-tutkimukset.

Tutkimusten toiminnallinen vaiheistus esitetään kolmijakoisena: orientoivat tutkimukset pehmeikköjen toteamiseksi, pohjanvahvistusmenetelmän valintaa palvelevat tutkimukset ja valitun pohjanvahvistusmenetelmän mitoitusta palvelevat tutkimukset. Pohjanvahvistusmenetelmän mitoitusta palvelevat tutkimukset esitetään menetelmäkohtaisesti kiinnittäen huomiota myös mm. pohjanvahvistusten ympäristövaikutuksiin. Työnaikaiset tarkkailutoimenpiteet ja niiden tavoitteet erilaisissa tapauksissa käydään lyhyesti läpi. Lopuksi käsitellään pohjatutkimustulosten esittämistä suunnitelmapiirustuksissa.

**Publications on geotechnical information. Teiden pehmeikkötutkimukset.** [Soil investigations for roads on soft ground]. Helsinki 1998, Finnish National Road Administration. Report 28/1998. 90 p. ISBN 951-726-447-X. ISSN 0788-3722. TIEL 3200520.

**Key words** foundation engineering, soil investigations, soundings

## **ABSTRACT**

The purpose of this publication is to introduce a good practice for the soil investigations for road embankments and cuttings on soft ground. First the basic geology of the relevant clay, silt and peat formations in Finland is introduced. The application possibilities of different soil investigation methods, the accuracy of the information and also the expenses in different conditions are introduced in order to help to choose the right method of investigation. Among these methods are soundings and borings, sampling and laboratory tests, geophysical methods and in situ-measurements.

The soil investigations are divided in three phases: orientating investigations in order to find out soft areas, investigations in order to choose the foundation method of the road and investigations for the final dimensioning of the chosen foundation method. The investigations for the final dimensioning are presented separately for each foundation method such as embankment piling, deep stabilization, vertical drainage, light fill materials and replacement method. Special attention is paid to the environmental influences of the foundation works. The control measurements during the construction and their targets in different cases are presented shortly. Also presenting soil investigation results in profiles is dealt with.

## **Alkusanat**

Tämä tien pohjatutkimuksia pehmeiköillä koskeva julkaisu kuuluu Geotekniikan informaatiojulkaisuja-sarjaan, jonka tarkoituksena on tuottaa geosuunnittelijoille tietoa tämän hetkisestä hyvästä pohjarakentamis- ja perustamiskäytännöstä tienrakentamisen alalta. Tässä julkaisussa käsitellään tutkimusmenetelmien valintaan, tutkimusten ohjelmointiin ja tutkimuskustannuksiin liittyviä näkökohtia sekä penkereiden että savileikkausten osalta. Kovan maan leikkauksista on vuonna 1995 laadittu erillinen julkaisu Tieleikkausten pohjatutkimukset TIEL 3200354.

Työn on pääosin tehnyt Antti Junnila Innogeo Oy:stä. Luvun 3 tekemiseen on merkittävässä määrin osallistunut Hannu Kärkiö Geokeskus Oy:stä sekä varsinkin sähkövastusluotauksen osalta Jouko Törnqvist VTT:sta. Työn yhteydessä on haastateltu rakentamisen, suunnittelun ja pohjatutkimusten asiantuntijoita.

Tilaaajan puolelta työtä ovat valvoneet Pentti Salo, Mikko Smura ja Matti Kolhinen.

Tiehallinto  
Tie- ja liikennetekniikka

Tuotanto  
Konsultointi

## Sisältö

<b>1 JOHDANTO</b>	<b>9</b>
1.1 Ohjeen tarkoitus ja sisältö	9
1.2 Ohjeen liittyminen muihin ohjeisiin	9
<b>2 SUOMEN PEHMEIKKÖJEN YLEISPIIRTEITÄ JA ALUEELLISIA EROJA</b>	<b>10</b>
2.1 Savi- ja silttipehmeiköt	10
2.2 Turvepehmeiköt	13
2.3 Erikoistapauksia	14
<b>3 PEHMEIKKÖJEN POHJATUTKIMUSMENETELMÄT</b>	<b>15</b>
3.1 Yleiskatsaus eri aikoina käytettyihin menetelmiin	15
3.2 Kartta- ja ilmakuvatulkinta	15
3.3 Geofysikaaliset menetelmät	17
Maatutkaluotaus	17
Sähkövastusluotaus	17
Gravimetrinen mittaus	18
3.4 Kairaukset	19
Painokairaus	19
Heijarikairaus	19
Puristinheijarikairaus	20
CPTU-kairaus	20
Siipikairaus	21
Porakonekairaus	21
3.5 Pohjavesitutkimukset	22
3.6 Näytetutkimukset	23
Näytteenotto	23
Indeksiominaisuuksien tutkimukset	24
Ödometrikokeet	25
Kolmiakselikokeet	29
Stabilointikokeet	31
3.7 In situ-tutkimukset	32
Dilatometri	32
Ruuvilevykoe	33
Pressometri	33
3.8 Suunnittelun aikaiset tarkkailumittaukset	33
3.9 Koerakentaminen	34
3.10 Kairausten laatu	35
3.11 Paineellinen pohjavesi	36
3.12 Tutkimuskustannukset	37
Yleistä tutkimuskustannusten muodostumisesta	37
Tutkimusolosuhteiden jaottelu	40
Paino-, puristinheijari- ja CPTU-kairauksen kustannukset	41
Siipikairauksen kustannukset	41

---

Näytteenoton kustannukset	42
Siirtokustannukset	43
Laboratoriotutkimusten kustannukset	43
In situ-menetelmien kustannukset	43
Koerakentamisen kustannukset	44
Hankekohtaiset tutkimuskustannukset	44
<b>4 POHJATUTKIMUSTEN TAVOITTEET JA VAIHEET</b>	<b>45</b>
<hr/>	
4.1 Pohjatutkimusten tavoitteet	45
Pohjanvahvistusten tarpeellisuuden selvittäminen	46
Pohjanvahvistusmenetelmän valinta	46
Ympäristövaikutusten selvittäminen	46
Pohjanvahvistuksen mitoitus	46
Työnaikaisten rakenteiden suunnittelu	47
4.2 Pohjatutkimusten vaiheet ja metodiikka	47
Orientoivat tutkimukset	47
Pohjanvahvistusmenetelmän valintaa palvelevat tutkimukset	
Pohjanvahvistuksen mitoitusta palvelevat tutkimukset	47
<b>5 ORIENTOIVAT POHJATUTKIMUKSET</b>	<b>48</b>
<hr/>	
<b>6 POHJANVAHVISTUSMENETELMÄN VALINTATUTKIMUKSET</b>	<b>49</b>
<hr/>	
6.1 Maakerrosrajojen ja maanpinnan muotojen selvittäminen	49
6.2 Pehmeiden kerrosten lujuustutkimukset	54
6.3 Painumaominaisuuksien selvittäminen	56
6.4 Pohjatutkimukset nykyisen tien kohdalla	57
6.5 Ympäristöön kohdistuvat tutkimukset	58
<b>7 POHJANVAHVISTUKSEN MITOITUSTA PALVELEVAT TUTKIMUKSET</b>	<b>59</b>
<hr/>	
7.1 Tutkimustarkkuuden vaikutus mitoitustarkkuuteen	59
7.2 Pengerpaalutus	60
Paalupituus	60
Kitka- ja koheesiopaalut	62
Paalujen lyöntiä hankaloittavat olosuhteet	64
Pehmeiden maakerrosten lujuus- ja painumaominaisuudet	64
Paalutuksen ympäristövaikutukset	65
7.3 Syvästabilointi	65
Pilaripituus	66
Pehmeiden maakerrosten luonnontilaiset ominaisuudet	68
Stabiloidun maan lujuus	69
Määrämittaiset stabiloinnit	70
Syvästabilointia hankaloittavat olosuhteet	71



7.4 Pystyöjitus	72
Maakerrosten painuma- ja vedenläpäisevyysominaisuudet	72
Maakerrosten lujuusominaisuudet	73
Pystyöjapitus	74
7.5 Maanvarainen pengerrys pehmeiköllä	75
7.6 Pengerryskevennys	75
Maakerrosten lujuusominaisuudet	76
Maakerrosten painumaominaisuudet	76
Vesiolosuhteet	76
Kevennetty pengerrys silttimaalla	76
Nykyisen tien keventämisen erikoispiirteitä	77
7.7 Esikuormitus ja vaiheittain pengerrys	78
7.8 Vastapengerrys	78
7.9 Savileikkausluiskat	78
7.10 Massanvaihto kaivamalla	79
Massanvaihtosyvyys	79
Kaivantoluiskan vakavuus	80
Pohjaveden aleneminen	81
7.11 Pohjaantäyttö	81
7.12 Lujitteet ja telat	82
<b>8 RAKENTAMISEN AIKAISET TARKKAILUTUTKIMUKSET</b>	<b>83</b>
<b>9 TUTKIMUSTULOSTEN ESITTÄMINEN SUUNNITELMISSA</b>	<b>85</b>
<b>10 KIRJALLISUUS</b>	<b>87</b>
<b>LIITE</b>	<b>TIEL:N LABORATORIOTUTKIMUSHINNASTO</b>

# 1 JOHDANTO

## 1.1 Ohjeen tarkoitus ja sisältö

Tässä ohjeessa esitetään hyvä käytäntö pehmeikölle sijoittuvien teiden ja savileikkausten pohjatutkimusmenetelmien valintaa ja tutkimusten ohjelmointia varten. Ohjeen tarkoituksena on yhtenäistää nykykäytäntöä tutkimusmäärien suhteen ja toisaalta havainnollisesti osoittaa, miten tutkimustarkkuusvaatimukset erilaisissa tapauksissa määräytyvät.

## 1.2 Ohjeen liittyminen muihin ohjeisiin

Teiden pehmeikkötutkimusohjetta täydentävät mm. seuraavat pohjatutkimus- ja suunnitteluohjeet:

Tielaitoksen tutkimus- ja suunnittelu- ja valvontaohjeet:

- Pohjanvahvistusmenetelmän valinta, TIEL 3200446, 1996
- Tiegeotekniikan yleiset mitoitusperusteet, TIEL 3200150, 1993
- Pohjanvahvistustyöt, tienrakennustöiden valvontaohje, TVH 732177, 1988
- Geotekniset laskelmat, TIEL 2180002, 1996
- Maanvarainen tiepenger savikolla, suunnitteluohje, TIEL 3200276, 1994
- Pengerpaalutus, TIEL 3200147, 1993
- Nauhapystyöjitus, TIEL 3200251, 1994
- Syvästabiloinnin mitoitusohje, TIEL 3200465, 1997
- Syvästabiloinnin laadunvalvontaohje, TIEL 3200099, 1992
- Massanvaihto, TIEL 3200127, 1993
- Tiepenkereen siirtymärakenteet pehmeiköllä, TIEL 3200248, 1994

Pohjatutkimusmenetelmiä koskevat julkaisut:

- Häiriintymättömien maanäytteiden otto, TIEL 3200400, 1996
- Ödometrikoe, TIEL 3200401, 1996
- Tien pohja- ja päällysrakenteet tutkimusprojekti (TPPT-M33), Projekti 332, Syvästabiloinnin sideaine- ja materiaalitekniologia, Laboratoriotutkimukset, luonnos 14.12.1995, 1995
- Tieleikkausten pohjatutkimukset, TIEL 3200354, 1995
- Kairausopas I, Painokairaus, pisto- ja lyöntikairaus, heijarikairaus, SGY, 1981
- Kairausopas II, Siipikairaus, SGY, 1996
- Kairausopas III, Maanäytteiden ottaminen, SGY, 1972
- Kairausopas IV, Pohjavedenpinnan ja huokosvedenpaineen mittaaminen, SGY, 1987
- Kairausopas V, Porakonekairaus, SGY, 1986
- Puristin-heijarikairaus kairausmenetelmänä, Helsingin kaupungin geoteknisen osaston tiedote 48, 1989
- Geotekniset laboratorio-ohjeet, 1. Luokituskokeet GLO-85,

- SGY/RK Oy, 1985
- Maatutkaluotaus, SGY, 1991
- Geofysikaaliset tutkimusmenetelmät, SGY, 1993

Tutkimustulosten esittämistä koskevat julkaisut:

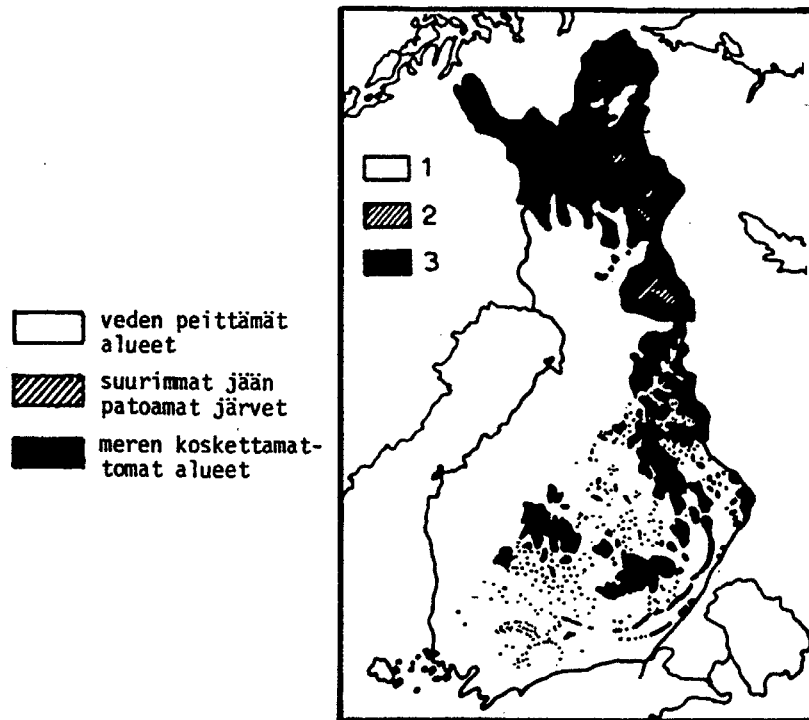
- Pohjarakennussuunnitelmat, esitystapa, TIEL 703435, 1990
- Pohjarakennuspiirustusohjeet PRP-84, SGY/RK Oy, 1984
- Teiden suunnittelu, IX Suunnitelmat, TVH 722308, 1979
- Pohjatutkimusmerkinnät, Nro 201, SGY/RK Oy, 1993

## **2 SUOMEN PEHMEIKKÖJEN YLEISPIIRTEITÄ JA ALUEELLISIA EROJA**

Seuraavassa esitellään tavallisimpien pehmeikkömuodostumien syntytapaa ja rakennetta. Esityksen tarkoitus on auttaa suunnittelijaa tunnistamaan geologisia muodostumia pohjatutkimusmenetelmien valinnan ja tutkimusten ohjelmoinnin helpottamiseksi.

### **2.1 Savi- ja silttipehmeiköt**

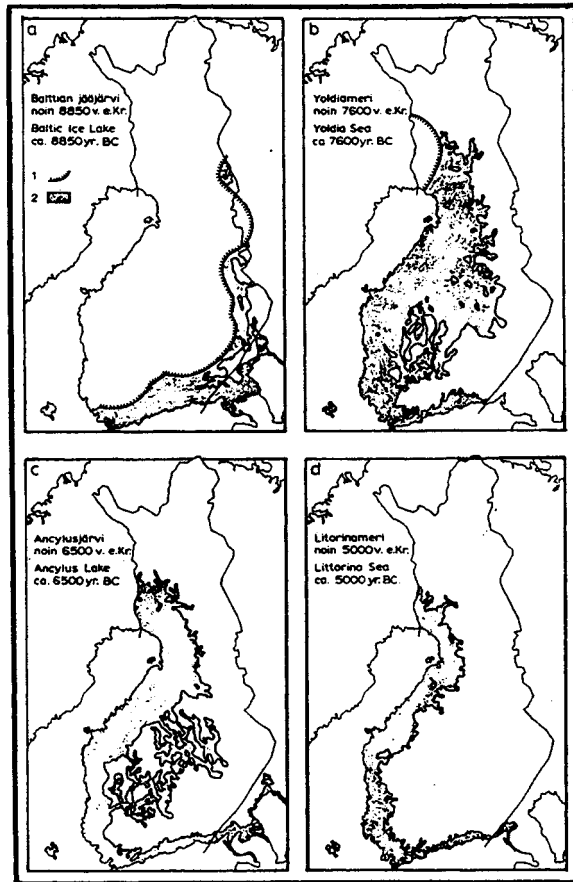
Savi- ja silttikerroksia esiintyy pääasiassa niillä alueilla, jotka ovat Itämeren kehitysvaiheiden aikana olleet veden peittämiä. Kuvassa 1 on esitetty korkeimman rannan yläpuoliset alueet, joilla savia ja silttejä esiintyy vain poikkeuksellisesti joko jään patoamiin järviin laskeutuneina siltteinä tai nykyisiin vesistöihin laskeutuneina ohuina humuspitoisina kerroksina.



Kuva 1: Itämeri ylimmillään (Korhonen, Gardemeister, Tamminne 1971)

Kuvassa 2 on esitetty Itämeren kehityksen päävaiheet, jotka samalla kuvaavat seuraavassa lueteltavien tärkeimpien savikerrostumien esiintymisalueita. Savikerrostumatyytit ovat maanpinnasta alaspäin mentäessä:

- Litorina-mereen suolaiseen veteen noin 5000 eKr laskeutunut, melko homogeeninen, humuspitoinen, muutaman metrin paksuinen savikerros.
- Ancylus-järveen makeaan veteen noin 6500 eKr laskeutunut homogeeninen melko ohut savikerros, joka esiintyy leveämmällä rannikkokaistaleella kuin Litorina-savi.
- Yoldia-mereen kylmään hyvin vähäsuolaiseen veteen noin 8000 eKr laskeutunut kerrallinen, vähän humusta sisältävä savikerros, jota tavataan korkeimman rannan alapuolisilla alueilla, Salpausselän eteläpuolella yleensä nuorempien savikerrosten peittämänä.
- Baltian jääjärveen kylmään makeaan veteen noin 11000 eKr laskeutunut kerrallinen hyvin vähän humusta sisältävä savi- ja silttikerros, jota esiintyy Salpausselkien eteläpuolella.



Kuva 2: Itämeren kehityksen päävaiheet (Korhonen, Gardemeister, Tamminen 1971).

Savikerrostumat voivat esiintyä epämääräisessä järjestyksessä mm. silloin, kun:

- rantavoimat ovat mantereen kohotessa irrottaneet paksujakin savikerroksia varsinkin suuren ulapan puoleisilta rannemailta ja liettäneet ne alemmas, jolloin alkuperäisen saviaineksen ominaisuudet ovat voineet täysin muuttua
- jokiuomat ovat kuluttaneet savikoita ja liettäneet niitä uusiin kohtiin ja aiheuttaneet sortumia, jotka ovat kääntäneet maakerroksia.

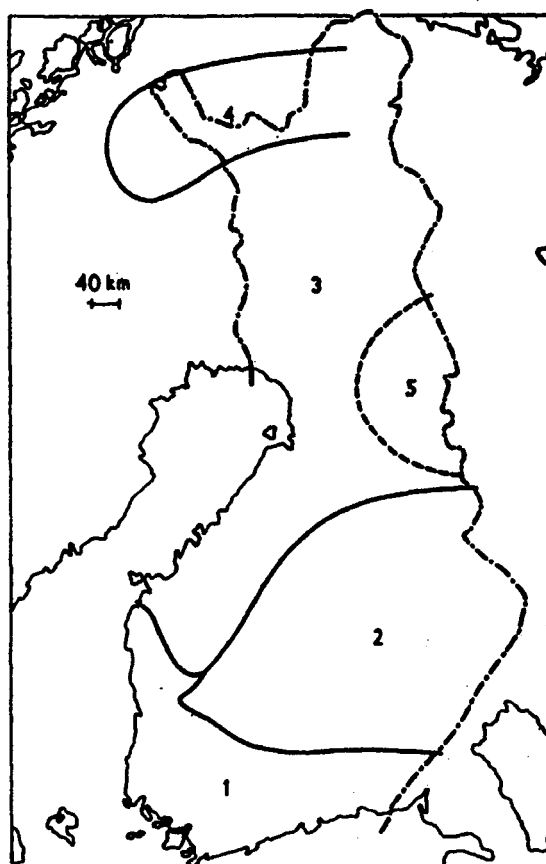
Litorina-savet ovat varsinkin etelä- ja lounaisrannikolla usein lihavia. Pohjanmaan rannikkoalueen Litorina-savet ovat laihempia ja usein rautasulfidien vaikutuksesta mustia. Litorina-savet ovat yleensä normaalikonsolidoituneita. Humuspitoisuuden takia niiden lujuusominaisuudet ovat tavallista hankalammin määritettäviä mm. siipikairalujuuksien redusointitarpeen vuoksi.

## 2.2 Turvepehmeiköt

Suot voidaan luokitella esimerkiksi seuraavasti:

- rämeet: karuja, kituvaa mäntyä kasvavia soita
- korvet: reheviä, koivua tai kuusta kasvavia soita
- nevat: märkiä tai vetisiä, rakkasammalta kasvavia soita
- letot: vetisiä, ruskosammalta kasvavia soita.

Useimmat suot ovat edellä mainittujen tyyppien yhdistelmiä ja alueellisesti voidaan erotella seuraavia suoyhdistymiä, ks. kuva 3:



Kuva 26. Alueelliset suoyhdistymät. (Auer, 1927, 1952) 1, keidas- eli kohosuoyhdistymä. 2, karjeluksen suoyhdistymä. 3, aapasuoyhdistymä. 4, kumpu- eli palasuoyhdistymä. 5, rinnesuoyhdistymä.

Kuva 3: Alueelliset suoyhdistymät (Soveri, Kauranne 1972).

- Etelä- ja Lounais-Suomen kohosuoyhdistymä (vuorottelevia rämemättäitä ja pienoisnevoja). Suon keskiosa on reunoja korkeammalla. Yleensä turpeen pintaosa on puutonta raakaturvetta ja alaosa maatumempaa ja puunjätteitä sisältävää. Turvekerroksen kokonaispaksuus on yleensä alle 4-6 metriä. Turpeen alla on usein liejua.

- 
- Karjalainen suoyhdistymä (rämeitä, varsinkin idässä myös korpia, vesistöjen rannoilla myös nevoja). Turpeen paksuus on yleensä alle 3-4 m. Turpeen kerrostuneisuus on vähemmän säännönmukainen kuin kohosuolla. Turpeen alla on yleensä moreenia.
  - Pohjois-Suomen aapasuoyhdistymä (aukeita nevoja ja lettoja). Suon keskiosa on reunoja alempana. Turve on tavallisesti heikosti maatumutta ja sen kokonaispaksuus on yleensä alle 2-3 m.
  - Kuusamon rинnesuoyhdistymä, joka on maasto-olosuhteista aiheutuva aapasuoyhdistymän muunnos (aukeita lettosoiita ja kaltevia rинnesoiita). Turpeen paksuus on usein alle 1 m.
  - Pohjois-Lapin kumpusuoyhdistymä (korkeita rämemättäitä, joiden sisällä läpi vuoden jäässä olevia turvekumpareita, sekä vetisiä rimpiä).

Kaiken kaikkiaan voidaan todeta, että soista hyvin suurella osalla turvekerroksen paksuus on korkeintaan 1-2 m. Varsin harvoin tavataan 4 m paksuisia turvekerroksia ja suurimmat turvepaksuudet ovat noin 10 m. Tutkimusten, suunnittelun ja rakentamisen kannalta hankalimpia ovat suot, joissa turpeen alapuolella on liejua tai savea ja näitä on soista melko pieni osa, lähinnä kohosuoalueella.

### 2.3 Erikoistapauksia

Vesialueiden pehmeikkötutkimuksiin liittyy mm. seuraavankaltaisia erikoispiirteitä:

- Pehmeät kerrokset voivat pintaosiltaan olla nuorempiakin kuin edellä esitetyt savikerrostumien päätyypit, mutta tällöin yleensä ohuita.
- Pintakerroksissa voi esiintyä saasteita, joten tämäkin näkökohta on otettava näytetutkimuksissa huomioon.
- Jos vesistö jäätyy, tutkimusten tekeminen jäältä on yleensä työsaavutusten kannalta hyvin edullista.
- Avoveden aikaan tehtävät tutkimukset vaativat lauttajärjestelyjä ja muodostuvat näin tavallista kalliimmiksi.
- Veden alla olevien kerrosten kairausvastuksen tulkinnessa voi "ylimääräisistä" tankometreistä aiheutuva paino jossain määrin johtaa harhaan.

Tutkimuksille aiheutuu erikoisvaatimuksia esimerkiksi näytteenoton ja ympäristövaikutuksien selvittämisen osalta, jos tie on suunniteltu ylittämään kaatopaikka-alue.

### **3 PEHMEIKKÖJEN POHJATUTKIMUSMENETELMÄT**

#### **3.1 Yleiskatsaus eri aikoina käytettyihin menetelmiin**

Painokairausta on Suomessa käytetty jo 1920-luvulta alkaen ja se on tavallisin peruskairausten menetelmä erityisesti pehmeikkötutkimuksissa. Moottorikäyttöiset painokairat syrjäyttivät käsin kierrettävät kairat 1960-luvun lopulla ja 1980-luvulla monitoimikairojen käyttö tuli yleisimmäksi painokairaustavaksi.

Painokairauksen rinnalle ja sitä osittain korvaamaan kehitettiin 1980-luvulla puristinheijarikairaus, jossa samaan kairaukseen on yhdistetty puristinkairaus ja heijarikairaus, molemmat jokseenkin standardin mukaisina. Pehmeikkötutkimusmenetelmänä on 1990-luvulla tullut käyttöön CPTU-kairaus, jossa tavanomainen puristinkairaus (CPT) on täydennetty huokospainemittauksella. Sekä puristinheijari- että CPTU-kairaus yleistyvät sitä mukaa kun sopivaa kalustoa tulee käyttöön ja suunnittelijat tottuvat näihin uusiin menetelmiin. Luultavasti painokairaus vastaavasti hiljalleen vähenee.

Siipikairaus on useiden kymmenien vuosien ajan ollut yleinen menetelmä pehmeiden maakerrosten suljetun leikkauslujuuden määrittämisessä ja todennäköisesti pysyy sellaisena. CPTU-kairauksen yleistyminen saattaa ehkä jossain määrin vähentää siipikairaustarvetta alustavissa tutkimusvaiheissa. Siipikairauksissa on 1970-luvun puolivälin aikoihin luovuttu epätarkaksi todetusta momenttimittarin käytöstä.

Geofysikaalisista tutkimusmenetelmistä sähkövastusluotaus on voimakkaimmassa kehitysvaiheessa ja saattaa saada nykyistä yleisempää käyttöä pehmeikkötutkimuksissa. Maatutkaluotauksella on pehmeikkötutkimuksissa muutamia käyttöalueita, kuten turvepehmeiköt ja nykyisten teiden tutkimukset.

In situ-menetelmistä pehmeikkötutkimusten kannalta lupaavimmalta vaikuttaa dilatometri.

Laboratoriotutkimuksissa merkittävin muutos on ollut automaattiodometrikokeiden nopea yleistyminen tavallisimmaksi ödometrikoeityypiksi 1980-90-lukujen vaihteessa. 1970-luvulla siirryttiin RT-maalajiluokituksesta (mm. hieta ja hiesu) GEO-luokitukseen (mm. siltti).

#### **3.2 Kartta- ja ilmakuvatulkinta**

Karttatulkinta perustuu yleistietoon erilaisista geologisista muodostumista, kartan kokonaiskuvan ja yleispiirteiden hahmottamiseen, jotka auttavat yksityiskohtien arviointia ja toisaalta yksityiskohdat selvittävät alueen yleistä luonnetta. Karttatulkinnan



perusasioita on esitetty Vähäsarjan julkaisussa Karttatulkintaopas. Tavallisesti käytetään mittakaavaan 1:20 000 tehtyjä peruskarttoja.

Pehmeikkömuodostumien osalta karttatulkinta on jossain määrin yksioikoisempaa kuin moreeni- ja kitkamaamuodostumien tulkinta, josta lyhyt yhteenvedo on esitetty julkaisussa Tieleikkausten pohjatutkimukset TIEL 3200354. Pehmeikköjen osalta kiinnitetään huomiota mm. seuraaviin seikkoihin:

- Maaston topografia. Laajat alavat tasaiset alueet ovat usein pehmeikköjä.
- Pellot ovat Etelä-Suomessa yleensä savi- tai silttimaita ja niiden reunat ovat usein myös geologisia rajoja. Soihin rajoittuvat reunoiltaan kulmikkaat pellot ovat yleensä raivattuja soita. Itä-Suomessa reunoiltaan kulmikkaat pellot ovat usein rantavoimien huuhtoman moreenialueen yläpuolisia hienompilajitteisia moreenimaita.
- Usein geoteknisesti erityisen hankalia pehmeikköjä ovat entisten joki- ja purouomien kohdat. Kartan yleismuotojen tarkastelu antaa viitteitä mahdollisista tällaisista pehmeiköistä.
- Kasvillisuus. Mäntymetsä viittaa hiekkaan, soraan tai karkeaan moreeniin sekä useimmiten syvällä olevaan pohjaveteen. Kuusimetsä on usein maaperältään silttiä tai hienorakeista moreenia ja pohjavesi on usein lähellä maanpintaa. Lehti- ja sekametsät ovat yleensä maaperältään savea, silttiä tai silttimoreenia ja pohjavesi on varsinkin notkokohtissa lähellä maanpintaa. Korvissa (kosteaa kuusimetsää) turvekerros on yleensä alle 1 m paksuinen, samoin usein myös rämeillä (kitukasvuista mäntyä). Syvempiä turvepehmeikköjä voivat olla varsinkin puuttomat suot.
- Karttasanat (Jaamankangas, Hietala, Suopelto jne.) voivat täydentää muuta informaatiota alueen geologiasta.

Ilmakuvien tulkinta antaa enemmän tietoa kuin karttatulkinta, mutta vaatii enemmän taitoa ja kokemusta. Menetelmiä voidaan hyvin käyttää toisiaan täydentävinä. Ilmakuvatulkinta tehdään stereolaitteella, jolloin saadaan kolmiulotteinen kuva maastosta. Kolmiulotteisuus on välttämätöntä, sillä tulkinta perustuu suuressa määrin pinnanmuotoihin.

Ilmakuvatulkinnan kulku on seuraava:

- Käytetään hyödyksi kaikki asiaan liittyvä muu tieto (maaperäkartat, vanhat pohjatutkimustiedot).
- Ilmakuvat käydään nopeasti läpi, jotta tulkitsija saa alueesta yleiskuvan.
- Ilmakuvat tulkitaan huolellisesti vähintään kahteen kertaan. Käytettävää suurennusta vaihdellaan ko. kohteen tulkinnan tarkkuusvaatimusten mukaan. Ensin käydään läpi helpoimmin tulkittavat kohdat. Tulkinta voidaan dokumentoida

peitepiirroksena.

- Itse tulkintaprosessi jakautuu etsimisvaiheeseen ja todistamisvaiheeseen. Ensimmäisessä vaiheessa oleellista on löytää kuvista mahdollisia tulkintaa helpottavia havaintoja ja toisessa vaiheessa punnitaan havaintojen (usein ristiriitaistenkin) luotettavuutta ja päädytään tulkintoihin ja arvioidaan myös tulkinnan varmuustaso.

Koko Suomen alueelta on saatavissa joko 1:10 000 tai 1:20 000 ilmakuvat, jotka ovat ilmakuvatulkintaan sopivia. Laaja-alaisen maaston yleispiirteiseen tulkintaan voidaan käyttää 1:60 000 ilmakuvia. Suurempimittakaavaiset kuvat kuin 1:5000 eivät sovellu geologiseen ilmakuvatulkintaan. Ilmakuvatulkintaa on tarkemmin esitelty teoksessa *Lärobok i geobildtolkning*.

### 3.3 Geofysikaaliset menetelmät

#### Maatutkaluotaus

Maatutkaluotausta voidaan pehmeikkötutkimuksissa käyttää:

- suopehmeiköillä turvekerroksen paksuuden määrittämiseen
- nykyisten teiden päällystepaksuuden ja pengerpaksuuden tutkimiseen sikäli kuin täyttö ei ole sekoittunut saviseen pohjamaahan.

Maatutkan käyttöä pehmeikkötutkimuksissa rajoittaa se, ettei se sovellu savisten kerrosten tutkimiseen.

Maatutkamenetelmää on lyhyesti kuvattu julkaisussa Tieleikkausten pohjatutkimukset TIEL 3200354.

#### Sähkövastusluotaus

Sähkövastusluotaus ei periaatteessa ole aivan uusi menetelmä, mutta yleisessä käytössä se ei ole toistaiseksi ollut. Viime aikoina menetelmän kehittämisen painopisteenä on Suomessa ollut jatkuvan, painuma-analyysiin perustuvan maastomallin luominen. Tämän mallin periaatteet ovat pääpiirteissään:

- Saven painumaominaisuuksien ja vesipitoisuuden välillä on tunnettu riippuvuus, jonka "kalibrointi" pehmeikkökohtaisin ödometrikokein parantaa tarkkuutta huomattavasti.
- Saven sähkönjohtavuus riippuu merkittävimmin huokosveden määrästä ja sen suolapitoisuudesta ja jossain määrin myös sähköjohtavien mineraalien, kuten kiisujen ja grafiitin määrästä. Saven sähkönjohtavuus on selvästi suurempi kuin karkeampien maalajien.

- Kun saadaan jatkuva maastomalli saven sähkönjohtavuudesta ja se pehmeikkökohtaisella "kalibroinnilla" muunnetaan vesipitoisuusmaastomalliksi, on saatu painumatarkastelun lähtötietomalli.

Maastomallin luominen voidaan jaotella kolmeen työvaiheeseen:

- Sähköinen syväkartoitus (sähköinen tomografia), jossa mittauselektrodit asennetaan maahan vakioetäisyyksille toisistaan (0,5-2 m). Sähköä syöttävien elektrodien kytkentää sekä potentiaaliero mittaavien elektrodien jännitemittausta ohjataan automaattisesti tietokoneella. Tiedot tulkitaan jatkuvaksi ominaisvastusmalliksi.
- Vaaittuna tai GPS-paikannettuna (xyz) mittaustulos on muunnettavissa topografiakorjatuksi ominaisvastusprofiiliksi.
- Ominaisvastuksen muunnos vesipitoisuudeksi määritetään pehmeikkökohtaisesti joko jatkuvan näytteenoton tai radiometrisen vesipitoisuusmittauksen sekä ominaisvastusmittauksen avulla. Ominaisvastusmittaustulokset voidaan ottaa tomografiatulostuksesta, mitata erikseen pistemäisesti tai mitata laboratoriossa häiriintymättömistä näytteistä.

Sähköisen syväkartoituksen tarkkuutta voidaan säätää lähinnä elektrodivälillä. Esimerkiksi sijoitettaessa 51 elektrodia (nykyinen maksimimäärä) 2 m välein, kokonaislevytykseksi tulee 100 m. Tällä mittauksella saadaan tulokseksi pistemäiset ominaisvastukset 2 m pituisia ja 1 m korkuisia "elementtejä" kohden. Syvyysulottuma on 15 % levytyksestä eli tässä tapauksessa 15 m. Mittauksen tarkkuutta voidaan lisätä pienentämällä elektrodiväliä edellä mainitusta 2 metristä, mutta syvyysulottuma pienenee tällöin. Sivusuunnassa mittauksen voidaan arvioida edustavan käytävää, jonka leveys on 20 % pehmeikkösyvyydestä.

Tutkittaessa nykyisen tien parantamista mittausta ei voida tehdä tien kohdalta, vaan esimerkiksi tien molemmin puolin ojien ulkopuolelta.

Kolmiulotteisten mallien käyttö on myös kehitteillä. Tällaista mallia varten tarvittaneen vähintään neljä luotauslinjaa.

### **Gravimetrinen mittaus**

Gravimetrisessä mittauksessa eli painovoimamittauksessa kallionpinnan syvyyttä tutkitaan kallion ja irtomaan tiheyseron perusteella. Menetelmää on käytetty malminetsinnässä koko tämän vuosisadan ajan, mutta sen käyttö geoteknisiin tutkimuksiin on aloitettu vasta 1980-luvun loppupuolella. Mittaus tehdään pistemäisesti esimerkiksi 10-50 m välein käyttäen kannettavaa mittaustilaitetta ja vaaituslaitetta.

Gravimetrisellä mittauksella saadaan sitä parempia tuloksia, mitä paksumpi ja homogeenisempi irtomaakerros kalliota peittää. Yleensä

---

maakerrosten paksuuden tulee olla yli 10 m. Maakerrosrajoista ei tällä menetelmällä saada tietoa. Menetelmää on joskus käytetty erityisen syvien savikoiden alustavaan tutkimiseen ratalinjauksia haettaessa. Mittaus vaatii tuekseen tarkistusluontoisia kairauksia.

### 3.4 Kairaukset

#### Painokairaus

Painokairaus on pääasiassa Suomessa ja Ruotsissa käytössä oleva tutkimusmenetelmä. Se on ollut pehmeikkötutkimuksissa yleisin kairausmenetelmä. Se soveltuu maakerrosrajojen määrittämiseen sekä suuntaa-antavan käsityksen hankkimiseen maakerrosten lujuudesta ja tiivyydestä. Mahdollisuudet maalajin arvioimiseen painokairauksen perusteella ovat heikentyneet painokairauksen kehittyttyä käsinkierrettävästä kairasta erilaisten moottorikäyttöisten kairojen kautta nykyisin yleisimmäksi monitoimikairalla tehtäväksi painokairaukseksi, jolloin ääni- ja tuntohavainnot ovat ratkaisevasti vähentyneet. Kairatankojen läpimitta on ajan myötä kasvanut. Nykyisin käytetään halkaisijaltaan 22 mm tai 25 mm tankoja, joista viimeksi mainittuja yleisimmin monitoimikairoissa. Kun kairan kärki on vakiokokoinen, paksuilla tangoilla on suurempi vaara, että tankojen varsikitka lisää kairausvastusta ja maa vaikuttaa todellista lujemmalta varsinkin syvissä kierron puolella olevissa kairausrei'issä.

Painokairauksessa kairausvastus rekisteröidään yleensä 200 mm välein.

Painokairauksen parhaana soveltuvuusalueena voidaan pitää hyvin pehmeitä ja pehmeitä (suljettu leikkauslujuus  $s_u < 25$  kPa) savikerroksia ja erityisesti näiden pehmeiden kerrosten rajapintoja selvästi lujempiin kerroksiin. Lujemmissa maakerroksissa varsinkin suurilla kairausvyvyksillä epätarkkuudet kasvavat. Parhaalla soveltuvuusalueellaan painokairaus on kelvollinen tutkimusmenetelmä, joskin esimerkiksi puristinheijarikairausta herkempi työnsuorituksen laadulle. Painokairauksen massiivista käyttämistä tulisi välttää sitkeissä ja kovissa savissa, joissa sen ominaisuudet eivät ole parhaimmillaan ja harkita painokairausten korvaamista ainakin osaksi puristinheijarikairauksilla tai CPTU-kairauksilla. Painokairauksen etuna on ainakin toistaiseksi, että se on suunnittelijoiden ja rakentajien parhaiten tuntema kairausmenetelmä.

#### Heijarikairaus

Heijarikairauksen käyttöalue pehmeikkötutkimuksissa on pengervaalutus, jossa heijarikairausta voidaan käyttää tukivaalupituuden määrittämiseen taikka kitkavaalujen tukeutumiskerroksen tiivyyden selvittämiseen. Koheesiomaakerroksissa heijarikairauksen erottelutarkkuus on täysin riittämätön.

## **Puristinheijarikairaus**

Puristinheijarikairaus on Suomessa ja Ruotsissa kehitetty kairausmenetelmä, jossa yhdistetään kansainvälisesti yleinen puristinkairaus (CPT) ja heijarikairaus. Kärkenä käytetään heijarikairan 45 mm irtokärkeä, mutta kairausvastuksen ero puristinkairan kärkeen verrattuna on käytännössä mitätön. Kairaa pyöritetään jatkuvasti, mikä parantaa tulosten luotettavuutta tavanomaiseen heijarikairaukseen verrattuna.

Puristinheijarikairaus soveltuu maakerrosrajojen määrittämiseen ja suuntaa-antavan käsityksen hankkimiseen maakerrosten lujuudesta ja tiivyydestä hyvinkin erilaisissa maakerroksissa. Hyvin pehmeissä ja pehmeissä savissa (suljettu leikkauslujuus  $s_u < 25$  kPa) puristinheijarikairauksen erottelutarkkuus on samaa luokkaa kuin painokairauksella. Sitkeissä ja kovissa savissa puristinheijarikairaus on painokairaukseen luotettavampi.

Puristinheijarikairauksen oleellinen etu on, että samalla kairauskerralla saadaan sekä yleiskäsitys pehmeistä kerroksista että pengerroksien suunnittelua varten tarvittavat heijarikairauksien syvemmällä sijaitsevista maakerroksista.

Automaattisella rekisteröintilaitteella varustetussa puristinheijarikairassa kairausvastus rekisteröityy 40 mm välein.

## **CPTU-kairaus**

CPTU-kairaus on puristinkairaus, jota on täydennetty huokospainemittauksella. Kairan kärkiosassa on kärkivastusanturi, paikallista vaippavastusta mittaava anturi, huokospaineanturi ja kaikki em. tiedot 20 mm välein rekisteröivä muistiyksikkö. Kairaa painetaan tasaisella nopeudella maahan, tangot nostetaan ylös ja kärkiosan tiedot puretaan rekisteröintilaitteeseen. Kairauksen onnistuminen tiedetään vasta tässä vaiheessa.

CPTU-kairauksella saadaan maalajirajoista, maalajeista ja maakerrosten lujuudesta huokospainehavaintojen ansiosta luotettavampaa tietoa kuin puristinheijarikairauksella. Lisäksi saadaan tietoa maakerrosten konsolidaatiotilasta ja vaakasuuntaisesta konsolidaatiokertoimesta.

CPTU-kairaus soveltuu käytettäväksi savissa, silteissä ja löyhissä kivettömissä kitkamaissa. Kivisissä maissa kairan kärki on altis vahingoittumiselle, jolloin kerralla syntyvät kalustotappiot voivat olla 25000 mk luokkaa. Tämän takia CPTU-kairaukseen ei kannata käyttää ensimmäisenä tutkimusmenetelmänä, vaan ensin arvioidaan paino- tai puristinheijarikairauksien perusteella, mihin syvyyteen asti maa on kivetöntä ja sopivasti CPTU:lla kairattavaa.

## Siipikairaus

Siipikairalla määritetään hienorakeisten maalajien suljettu leikkauslujuus maassa. Nimestään huolimatta siipikairaus on periaatteessa enemmän in situ-koe kuin kairaus.

Siipikairaus tehdään tavallisesti 0,5 m syvyysvälein, joskus homogeenisilla savikoilla suurilla syvyyksillä 1,0 m välein. Kun siipi on upotettu kuhunkin syvyyteen, tankoja kierretään vakionopeudella kiertomomenttia piirturimittarilla mitaten, kunnes siipi leikkaa maasta sylinterin muotoisen kappaleen. Mitattu maksimimomentti edustaa häiriintymätöntä leikkauslujuutta. Tämän jälkeen siipeä kierretään vakionopeudella 20 kierrosta, jonka jälkeen mitataan häiriintynyt leikkauslujuus vastaavalla tavalla.

Siipikairalla määritetty lujuus joudutaan redusoimaan savilla, joiden hienousluku on suuri. Erityisen häiriintymisherkissä silttipitoisissa maissa siipi on vaikea saada upotetuksi maahan niin, että maa pysyy riittävän häiriintymättömänä.

Siipikairauksen perusteella voidaan suuntaa-antavasti arvioida maan konsolidaatiojännitystä käyttäen esimerkiksi Hansbon kaavaa (1). Kaavaa käytetään lähinnä sen päättelemiseen, onko maa ylikonsolidoitunutta. Konsolidaatiojännityksen mitoitusarvojen määrittämiseen kaavan tarkkuus ei ole riittävä ainakaan ilman odometrikokeella tehtyä varmistusta.

$$\sigma_c = 2,22 * s_u / w_L \quad (1)$$

jossa

$\sigma_c$  = konsolidaatiojännitys

$s_u$  = siipikairalla mitattu leikkauslujuus

$w_L$  = juoksuraja (.hienousluku F)

Siipikairauskalusto on vaihtelevaa tyyppiltään, laadultaan ja iältään ja eri kalustoilla määritetty leikkauslujuus voi vaihdella jonkin verran. Siipikairakaluston riittävän usein tapahtuvalla kalibroinnilla voidaan tulosten luotettavuutta parantaa.

## Porakonekairaus

Porakonekairausta käytetään pehmeikkötutkimuksissa:

- paalupituuden maksimiarvon määrittämiseen
- häiriintyneiden näytteiden ottamiseen stabilointikokeita varten, koska muilla näytteenottimilla ei saada riittävän isoja näytteitä (porakoneellakin joudutaan ottamaan useampi näyte samalta syvyydeltä)
- häiriintyneiden näytteiden ottamiseen muissakin tapauksissa

- nykyisen tien päällystepaksuuden, päällysrakennepaksuuden tai toteutuneen massanvaihdon tarkistamiseen.

### 3.5 Pohjavesitutkimukset

Pohjavedenpinnan painetaso pehmeiden maakerrosten alapuolella, joka selväpiirteisissä olosuhteissa kuvaa myös pehmeissä kerroksissa vaikuttavaa vedenpainetta, voidaan luotettavasti mitata oikein asennetusta havaintoputkesta, jonka siiviläosa on sijoitettu riittävän läpäisevään maakerrokseen ja jonka toimivuus on tarkastettu. Tarvittaessa voidaan orsivedenpinnan havainnointiin käyttää vastaavanlaista lähempänä maanpintaa sijaitsevaan läpäisevään kerrokseen upotettua pohjavesiputkea.

Pohjavesiputkina käytetään yleisimmin halkaisijaltaan 32-50 mm teräsputki, joiden alapää on rei'itetty tai uritettu 700-2000 mm pituudelta. Pehmeikön alapuoliset läpäisevät kerrokset ovat usein siinä määrin ohuita, että rei'itys- tai urituspituus valitaan em. alarajan tuntumasta. Kun putki on tarkoitettu pitkäaikaiseen käyttöön, käytetään teräsputkien asemasta usein muoviputkia (halkaisija yleensä 20-60 mm), jolloin ruostumishaittoja ei ole.

Tutkittaessa hienorakeisissa kerroksissa vallitsevaa huokosvedenpainetta pohjavesiputki ei maan pienen vedenjohtavuuden takia sovellu. Huokosvedenpaineen mittaamiseen on useita eri menetelmiä. Nykyisin yleisimmin käytetään maahan upotettuihin huokoskärkiin sijoitettuja sähköisiä antureita.

### 3.6 Näytetutkimukset

#### Näytteenotto

Pehmeikkötutkimuksissa käytettävät näytteenottomenetelmät voidaan jaotella seuraavasti:

- Yleissuositus on häiriintymättömien näytteiden ottaminen mäntäkairalla.
- Jos häiriintyneitä näytteitä tarvitaan, suositellaan käytettäväksi porakonekalustoa (tai raskasta monitoimikairaa).
- Häiriintyneitä näytteitä otetaan pienemmillä näytteenottimilla esimerkiksi jos ympäristövahingot on pidettävä mahdollisimman pieninä tai jos alustavassa tutkimusvaiheessa näytteenottokustannukset halutaan erityisesti minimoida.

Häiriintymättömien näytteiden ottaminen ei ole juuri kalliimpaa kuin häiriintyneiden, joten ensin mainitut kannattaa asettaa etusijalle.

---

Julkaisussa Häiriintymättömien maanäytteiden otto TIEL 3200400 on verrattu erilaisella kalustolla otettujen häiriintymättömien maanäytteiden todellista häiriintymättömyyttä. Lopputuloksena todettiin:

- St II:lla saatiin onnistuneimmat näytteet. St II:n huonoin ominaisuus on suuri pinta-alasuhte (näyteputken seinämän poikkileikkausalan suhde koko näyteputken alaan), mikä aiheuttaa näytteen häiriintymistä ennen sen työntymistä näyteputkeen.
- Näytteenottimilla NGI 54 ja TKK 86 näytteet häiriintyivät enemmän. NGI 54:llä heikkoutena on suuri sisälaajennussuhde, jolloin näytteessä tapahtuu muodonmuutoksia sen työntyessä näyteputkeen. TKK 86:lla taas näytteiden pituus suhteessa halkaisijaan on haitallisen pieni.
- Kanadalaisilla Laval- ja Sherbrooke-näytteenottimilla saadaan suuriltakin syvyyksiltä korkealaatuisia näytteitä, mutta menetelmät ovat epätaloudellisen kalliita tavanomaisissa suunnittelutehtävissä.

Porakonekaluston etuja muihin häiriintyneiden näytteiden ottamistapoihin verrattuna ovat:

- Näytteet ovat isoja (pituus 500-1000 mm, halkaisija noin 50 mm), joten ne ovat edustavia ja kertovat maakerrosrajojen sijainnin.
- Näytteet saadaan pehmeistä kerroksista usein vain vähän häiriintyneinä, joten niistä on mahdollista nähdä maan kerroksellisuutta tai kerrallisuutta.
- Mahdolliset kovat kerrokset ovat läpäistävissä ja niistä saadaan samalla kalustolla näytteitä.
- Stabilointikokeita varten tarvittava näytemäärä (noin ämpärillinen, 8-10 litraa, yhdeltä syvyydeltä) saadaan kokoon muutamasta porakonenäytteestä helpommin kuin pienemmällä ottimilla.

Muita häiriintyneiden näytteiden ottamistapoja ovat:

- Kannukaira, joka on sivusta ottava näytteenotin. Kannukairoja on jonkin verran eri tyyppisiä. Varsinkin ns. suokannukaira saattaa joskus olla kätevä väline turvekerroksen paksuuden selvittämiseen suoalueilla.
- Lusikkaotin on periaatteeltaan sama kuin kannuotin, mutta pienempi. Sen etuna saattaa joskus olla, että se voidaan kiinnittää painokairan tankoihin ja sillä voidaan pienellä vaivalla ottaa muutama suuntaa-antava, mutta huonosti edustava näyte.
- Pienoismäntäkaira on periaatteeltaan sama kuin mäntäkaira, mutta otin on siinä määrin pienempi, ettei näytettä käytännössä saada häiriintymättömänä.
- Heijarikairan näytteenottimella saadaan jonkin verran pienempiä näytteitä kuin porakoneella (pituus noin 500 mm, halkaisija 30-35 mm), joten sen edut ovat samansuuntaiset mutta pienemmät kuin porakoneen.



- Kierrekaira ja lapiokaira soveltuvat vain pohjavedenpinnan yläpuolella käytettäviksi, joten niiden hyödyllisyys pehmeikkötutkimuksissa on vähäinen.
- Koekuoppa on havainnollinen menetelmä mm. silmämääräisten havaintojen tekemiseen maakerroksista sekä näytteenottoon. Koekuopasta voidaan ottaa myös häiriintymättömiä näytteitä. Koekuopan rajoituksena nimenomaan pehmeikkötutkimuksissa on, ettei sitä yleensä voida tehdä niin syvänä, että se riittäisi ainoaksi näytteenottomenetelmäksi.

### Indeksiominaisuuksien tutkimukset

Hienorakeisten maanäytteiden tavallisimmista laboratoriotutkimuksista voidaan todeta seuraavaa:

- Vesipitoisuus määritetään jokaisesta näytteestä.
- Hienousluku määritetään jokaisesta näytteestä.
- Silmämääräinen maalajiarvio tehdään jokaisesta näytteestä. Arvio on helpoin tehdä kuivatusta näytteestä. Tärkeää on kirjata havainnot näytteissä havaituista maakerrosrajoista, kerrallisuudesta ja kaikesta tavallisuudesta poikkeavasta.
- Areometrikokeella tehtävien tarkempien rakeisuusmääritysten tarvittava määrä riippuu mm. silmämääräisten maalajiarvioiden luotettavuudesta. Jos silmämääräisen arvion tekee kaksi henkilöä toisistaan riippumatta, voidaan vähentää areometrikokeiden määrää. Yleensä areometrikoe tehdään 30-70 %:lle näytteistä. Rakeisuusmäärittelyn yhteydessä tutkitaan myös humuspitoisuus, jos sen voidaan arvioida olevan 2 % luokkaa tai suurempi.

Edellä mainitut kokeet on mahdollista tehdä sekä häiriintymättömille että häiriintyneille näytteille. Häiriintymättömistä näytteistä määritetään useimmiten lisäksi leikkauslujuus kartiokokeella sekä tilavuuspaino.

Areometrikoe nopeampana hienorakeisten maalajien rakeisuudenmäärittämenetelmänä on kokeiltu lasergranulometriä, joka perustuu erikokoisten maakeiden erilaisiin valontaittamisominaisuuksiin. Menetelmän heikkoutena on tuloksen suuri riippuvuus rakeiden muodosta. Silttirakeet ovat riittävän pyöreitä luotettavan tuloksen saamiseksi, mutta litteämmillä savirakeilla lasergranulometri antaa virheellisen rakeisuuskäyrän. Usein tuloksena on 20 %-yksikköä pienempi savipitoisuus kuin areometrikokeella. Myös näytteiden humuspitoisuus aiheuttaa ongelmia.

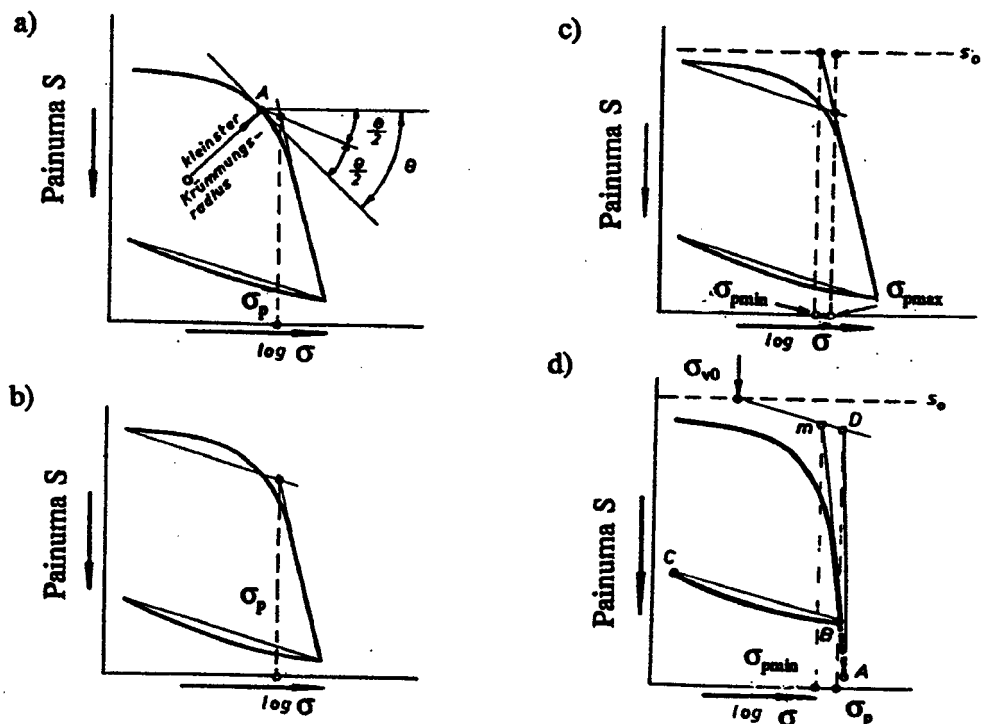
Erittäin suositeltavaa on, että suunnittelija käy laboratoriossa tekemässä henkilökohtaisia havaintoja mm. näytteiden mahdollisesta kerrallisuudesta ja yleensäkin ulkonäöstä taikka näytteenoton onnistuneisuudesta ja edustavuudesta erityisesti silloin, kun pohjasuhteet tai suunnittelutehtävän vaatimus poikkeavat tavanomaisesta.

## Ödometrikokeet

Ödometrikoe on eniten käytetty menetelmä hienorakeisten maalajien painumaominaisuuksien tutkimiseen. Ödometrissa puristetaan noin 20 mm korkuista näytettä jäykän renkaan sisällä niin, että näytteen vaakasuuntainen muodonmuutos on estetty. Huokosvesi pääsee tavallisesti poistumaan näytteen ylä- ja alapinnasta taikka pelkästään yläpinnasta (mm. TTKK:n kehittämä automaattiödometrilaitteisto).

Perinteisessä portaittaisessa ödometrikokeessa kuormitusta lisätään, tavallisimmin kaksinkertaistetaan, 1 vrk välein. Tämän jälkeen tehdään palautus ja tarvittaessa toistokuormitus. Kokeen kokonaiskestoksi tulee tällöin tavallisesti noin yksi viikko.

Portaittaisen ödometrikokeen kuormitus-kokoonpuristuma-käyrältä määritetään konsolidaatiojännitys  $\sigma_c$  ja tämän tärkeimmän parametrin jälkeen muut painumansuuruusparametrit erilaisilla graafisilla tai numeerisilla likimääräismenetelmillä. Kuvassa 4 on esitetty konsolidaatiojännityksen määrittämismenetelmiä. Nämä tarkastelut voivat olla työläitä, mutta niiden etuna on, että suunnittelija joutuu perehtymään tuloksiin ja niiden luotettavuuteen.



Kuva 4: Esijännityksen määrittäminen portaittaisen ödometrikokeen tuloksista a) Casagranden, b) Ohden, c) van Zelstin ja d) Schmertmannin menetelmällä (Hoikkala 1991).

---

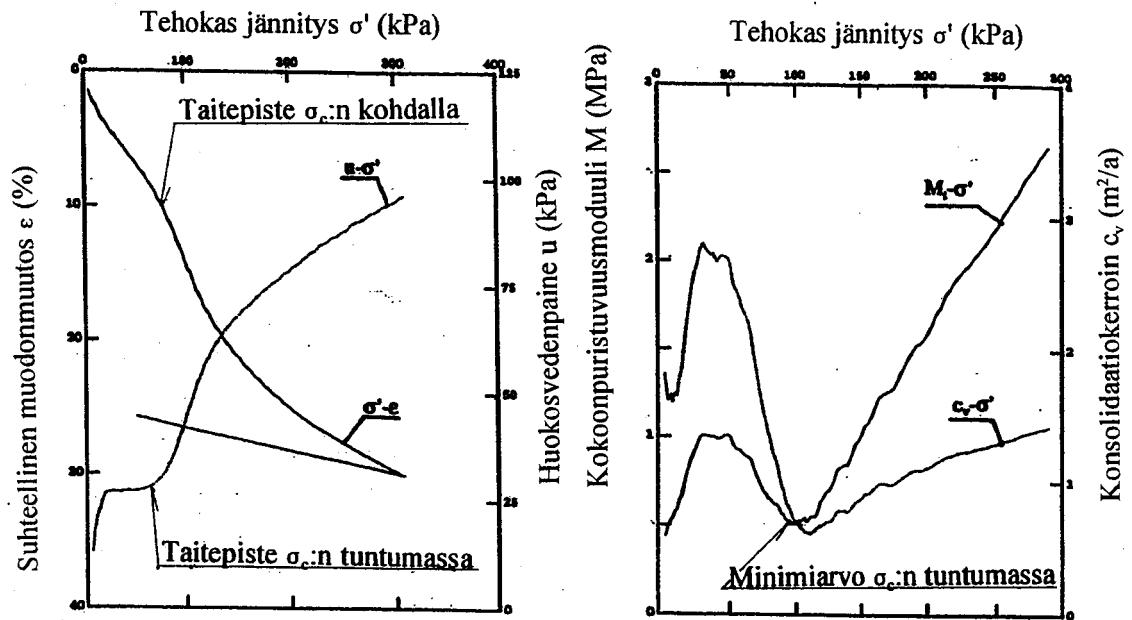
Portaittaisen ödometrikokeen on viime vuosina yhä suuremmaksi osaksi korvannut jatkuvapuristeinen ödometrikoe. Tulostiedostoon tallentuu automaattisesti aika, kokonaiskuormitus, huokosvedenpaine ja kokoonpuristuma. Koelaitteistolla voidaan tehdä seuraavantyyppisiä kokeita:

- Vakiomuodonmuutoskoe (CRS), jossa näytettä puristetaan kokoon ennalta valitulla vakionopeudella. Tämä on yleisin koetyyppi.
- Huokospaineohjattu koe (CPR), jossa huokospaineen ja jännityksen suhde pidetään vakiona.
- Portaittainen huokospaineohjattu koe (ASTD).
- Portaittainen koe vakioportain (STD), joka vastaa perinteistä koetta.

CRS-koe ei kovin hyvin sovellu ainakaan vahvasti ylikonsolidoituneiden maanäytteiden tutkimiseen. CPR-koe on periaatteessa kehittynyt koetyyppi. CPR-kokeen rajoituksia ovat mm.:

- Maanäytteiden pienikin häiriintyminen aiheuttaa suuremman haitan kuin muissa koetyypeissä.
- Kun maakerroksessa vallitseva jännitys  $\sigma_0$  ja konsolidaatiojännitys  $\sigma_c$  ovat pieniä, kokeen sopiva ohjelmointi on erityisen vaikeaa, jotta muodonmuutosnopeus saadaan riittävän pieneksi, jotta suhde  $u/\sigma$  ehtii vakiintua ennen esijännityskohtaa. Humuspitoisella savella kokeen kesto voi tällöin puolestaan venyä kohtuuttoman pitkäksi.
- CPR-koe ei myöskään erityisemmin sovellu ylikonsolidoituneiden maanäytteiden tutkimiseen.

Kuvassa 5 on esitetty CRS-kokeen tulostuskäyriä ja niistä tehtäviä silmämääräisiä arvioita. Kokeen tulostuksessa saadaan numeerisesti valmiiksi tulkitut parametrit.



Kuva 5: CRS-kokeen tulostuskäyriä.

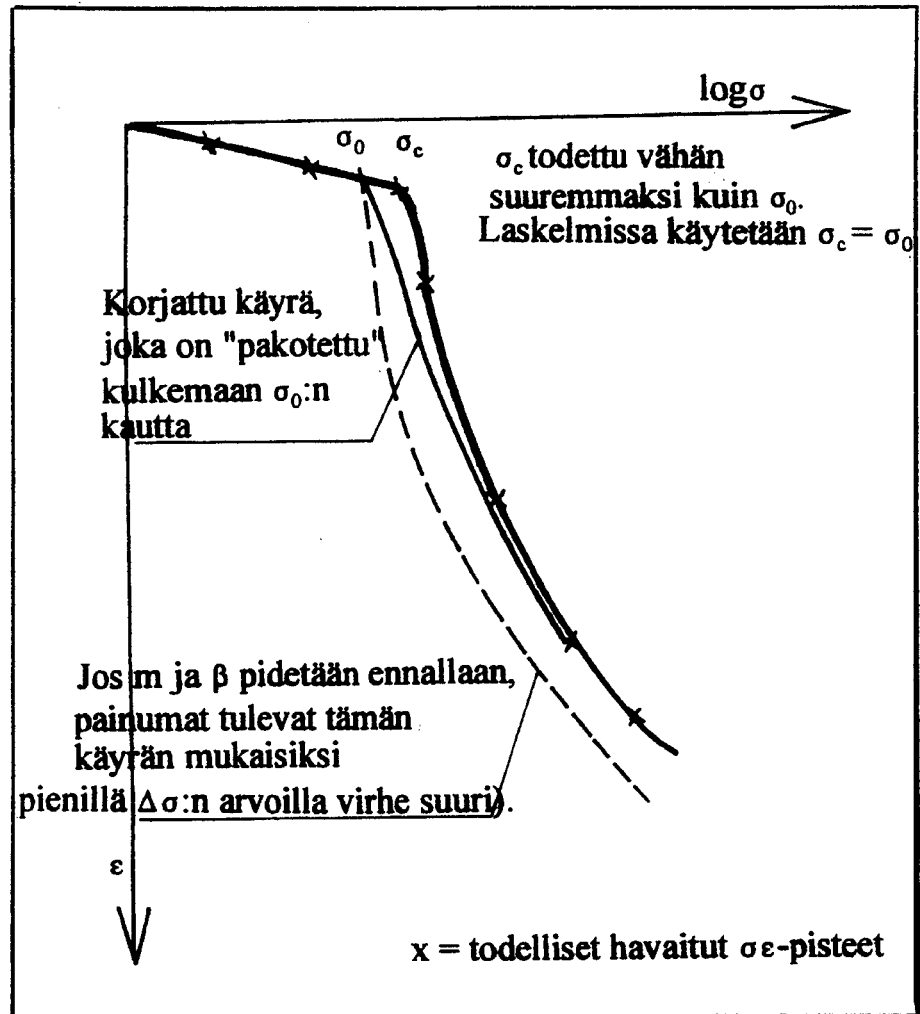
Jatkuvapuristeinen ödometrikoe antaa liian suuria konsolidaatiojännityksen  $\sigma_c$  arvoja. Virhe on sitä suurempi, mitä suurempaa muodonmuutosnopeutta käytetään. Konsolidaatiojännityksen redusointiin on kehitetty menetelmiä, joita on esitetty julkaisussa Maanvarainen tiepenger savikolla TIEL 3200276. Konsolidaatiojännityksen redusoinnin yhteydessä on myös moduuliluku  $m$  ja jännitysekspONENTTI  $\hat{a}$  korjattava em. julkaisussa esitetyllä tavalla. Taulukossa 1 on esitetty CRS-kokeen kuormitusnopeussuosituksia.

Taulukko 1: Standardin ASTM D4186-82 suositusnopeudet CRS-kokeille (1982). Julkaisuluonnoksen Ödometrikoe TIEL 3200401 mukaan vastaava nopeus suomalaisille saville on yleensä 0,4-1,6 %/h ja nopeus tarkistetaan sellaiseksi, että huokosvedenpaine pysyy alle 20 % kokonaisjännityksestä.

Juoksuraja $w_1$ %	Muodonmuutosnopeus $\dot{\epsilon}$ %/h
< 40	2.4
40-60	0.6
60-80	0.24
80-100	0.06
100-120	0.024
120-140	0.006

CPR-kokeessa huokosvedenpaineen ja pystyjännityksen suhteeksi sopii suomalaisille saville noin 5-15 %.

Silloin, kun joko portaittaisen ödometrikokeen tai asianmukaisesti redusoidun jatkuvapuristeisen kokeen perusteella on saatu tulokseksi, että maa on hyvin lievästi ylikonsolidoitunutta, tällainen pieni ylikonsolidaatio useimmiten laskelmissa kokeen epätarkkuuksien takia varmuuden vuoksi jätetään huomiotta. Tällöin on kuitenkin paikallaan korjata kokoonpuristuvuusmoduulia  $M$  taikka moduulilukua  $m$  ja jännitysekspONENTTIA  $\dot{\epsilon}$  vastaavasti jonkin verran "parempaan" suuntaan, jotta tulokseksi ei saada aivan liian suuria painumia. Tätä korjausta on havainnollistettu kuvassa 6.



Kuva 6: Painumaparametrien korjaaminen, kun ödometrikoe osoittaa hyvin lievää ylikonsolidaatiota.

Painumanopeutta kuvaavalle konsolidaatiokertoimelle  $c_v$  jatkuvapuristeinen ödometrikoe antaa suurempia arvoja kuin luotettavampana pidettävä portaittainen ödometrikoe.

Sekundääripainumien määrittäminen on tarpeen esimerkiksi pystyjoituksen ja painumattomampien perustamistapojen rajakohtia suunniteltaessa. Sekundääripainuman parametrien määrittämiseen käytetään tavallista pitkäkestoisempaa portaittaista ödometrikoeita.

### Kolmiakselikokeet

Kolmiakselikokeessa häiriintymätöntä maanäytettä kuormitetaan samanaikaisesti pysty- ja sivusuunnassa, jolloin maassa vallitsevia jännitysolosuhteita jäljitellään parhaiten. Kolmiakselikokeet ovat erikoiskokeita, joita tarvitaan:

- 
- vakavuustarkasteluissa siltimaalla
  - leikkausluiskien vakavuustarkasteluissa
  - erityisen vaativissa tapauksissa savimaalle tehtävän penkereen käyttäytymisen tarkasteluissa numeerisin menetelmin.

Kolmiakselikokeet jakautuvat eri tyypeihin seuraavasti:

- annetaanko näytteen konsolidoitua ennen sen leikkaamista (konsolidoimaton U, konsolidoitu C)
- onko em. konsolidointi isotrooppista (I) vai anisotrooppista (U)
- tapahtuuko murto suljetussa tilassa (U) vai avoimessa tilassa (D)
- tehdäänkö pelkkä konsolidointi (-) vai kuormitetaanko näyte murtoon (C)

Tulkittaessa lujuusparametreja kolmiakselikokeista erittäin tärkeää on kiinnittää huomiota murtotilanteessa tapahtuneeseen muodonmuutokseen ja sen realistisuuteen todellisen rakenteen käyttäytymiseen sovellettuna. Tässä tarkastelussa otetaan huomioon myös maanäytteen murtokäyttäytymisen tyyppi (jännitys-muodonmuutos-käyrän muoto, jäännöslujuus). Usein muodonmuutoksen rajoittaminen esimerkiksi 2-3 % suuruiseksi aiheuttaa tuntuva pienenemisen lujuusparametreihin.

Taulukossa 2 on esitetty vaativissa tarkasteluissa tarvittavien maaparametrien määrittystapoja.

Taulukko 2: Maaparametrien määrittystavat (Korhonen et al 1993).

Parametri	Määrittystapa laboratoriossa	Määrittystapa maastossa
Suljettu leikkauslujuus $s_u$	Kartiokoe, puristuskoee, kolmiaks. UU	Siipikaira (Puristinkaira, Dilatometri, Ruuvilevy, Pressometri)
Tehokkaat leikkauslujuusparametrit $c', \phi$	Kolmiaks. CAUC, CIUC, CADC, CIDC, Leikkauskoe	(Puristinkaira)
Kriittisen tilan jännityssuhde $M$	Kolmiaks. CADC, CIDC, CAUC, CIUC, Leikkauskoe	
Suljetun tilan muodonmuutosmoduuli $E_s$	Kolmiaks. CAUC, CIUC	(Siipikaira, Puristinkaira, Dilatometri, Ruuvilevy)
Avoimen tilan muodonmuutosmoduuli $E_a$	Kolmiaks. CADC, CIDC	(Pressometri)
Poissonin luku $\nu_s$	Kolmiaks. CADC, CIDC	
Lepopaine kerroin $\nu$	Kolmiaks. CADC, CIDC	(Dilatometri), Ruuvilevy, Pressometri
Painumaparametrit $C_c, m, \beta, \sigma_p$	Ödometri	
Konsolidaatiokerroin $c_v$	Ödometri	Puristinkaira, Ruuvilevy
Sekundaaripainuman kerroin $C_{\alpha}$	Ödometri	
Huokospaineparametrit $A, B$	Kolmiaks.	
Kriittisen tilan mallin tilavuudenmuutosparametrit $\lambda, \kappa$	Kolmiaks. CAD, CID, Ödometri	
Myötöpinta	CAD (erilaisia $\eta=q/p$ -arvoja)	
Hvorslevin lujuusparametrit $c', \phi$	Kolmiaks. CADC, CIDC, CAUC, CIUC, Leikkauskoe	

### Stabilointikokeet

Laboratoriossa tehtävien pilari- ja massasyvästabiloinnin ennakkokokeiden tavoitteita ovat:

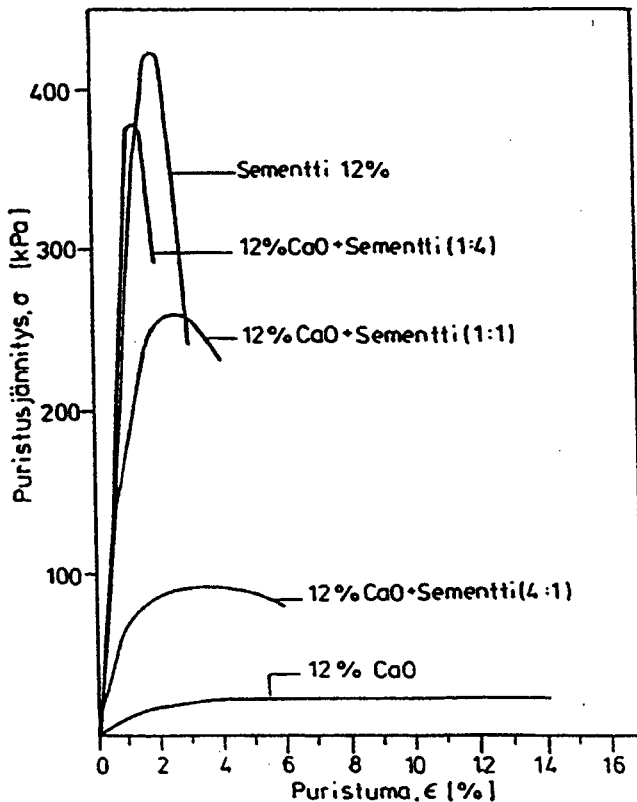
- varmistuminen siitä, että ko. maakerros stabiloituu
- sopivan sideaineen valinta
- sopivan sideainemäärän valinta
- tarvittavan lujittumisajan arviointi
- stabiloidun maan mitoituslujuuden ja muodonmuutosmoduulin määrittäminen.

Tavoitteet on edellä esitetty tärkeysjärjestyksessä. Jos maastossa ei tehdä koestabilointeja, myös listan loppupäässä esitettyjen asioiden selvittämiseksi laboratoriossa asetetaan suuria vaatimuksia.



Maanäytteistä valmistetaan koekappaleet TPPT-M33, projektin 332 Laboratoriotutkimukset ohjeen mukaisesti, jonka pohjalta on tarkoitus laatia TIEL:n ohje.

Tavallisin stabiloiduille näytteille laboratoriossa tehtävä koe on yksiakselialinen puristuskoel. Koska muodonmuutosmoduuli on tärkeä tieto mitoitusohjeeseen, jännitys-muodonmuutos-käyrän automaattinen rekisteröinti on välttämätön. Kuvassa 7 on esitetty stabiloitujen savinäytteiden jännitys-muodonmuutos-käyriä.



Kuva 7: Stabiloidun saven käyttäytyminen yksiakselialisessa puristuskokeessa (Syvästabiloinnin mitoitusohje).

Jos syvästabiloituun rakenteeseen kohdistuu merkittäviä vaakakuormia, on syytä harkita myös suorien leikkauskokeiden tai kolmiakselikokeiden tekemistä.

### 3.7 In situ-tutkimukset

#### Dilatometri

Dilatometri on varsin uusi tutkimusmenetelmä. Se on alunperin kehitetty Italiassa. Mittaustulosten ja maaparametrien väliset yhteydet ovat kokemukseräisiä ja Ruotsissa on 1980-luvun lopulla kehitetty

Pohjoismaiden olosuhteisiin sopivia kaavoja. Menetelmää on Suomessa käytetty toistaiseksi muutamissa kokeiluluontoisissa kohteissa.

Dilatometri on tilavuudenmuutokseen vaaditun paineen mittaamiseen perustuva in situ-kairauslaite. Dilatometri on 15 mm paksu, 95 mm leveä ja 220 mm pitkä teräslevy, jonka toisella sivulla on halkaisijaltaan 60 mm metallikalvo. Dilatometriä painetaan esimerkiksi monitoimikairaa käyttäen maahan kohtisuoraan, painaminen pysäytetään 0,20 m välein ja mitataan kalvon liikkeelle saamiseen tarvittava paine sekä tiettyyn siirtymään vaadittava paine. Kalvon liikkuaessa takaisin päin ja irrotessa maasta mitataan kalvoon vaikuttava pohjavedenpaine. Tulosten perusteella voidaan arvioida maakerrosten lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksia. Menetelmä soveltuu käytettäväksi hiekka-, siltti- ja savikerroksissa lukuunottamatta niin pehmeitä savia, että dilatometrillä maahan painettava reiän seinämä ei säilytä muotoaan.

### **Ruuvilevykoe**

Ruuvilevykoe on kehitetty Norjassa 1970-luvulla. Kokeessa maahan haluttuun syvyyteen kierrettyä halkaisijaltaan 160 mm tai 300 mm ruuvia kuormitetaan esimerkiksi maa-ankkureita tai kuorma-autoa vastapainona käyttäen. Kuormitusta lisätään portaittain. Kuormitusportaiden minimimäärä on 5 kpl mittaustasoa kohti. Normaalisti yhden kuormitusportaan kuormitusaika on 20-30 minuuttia. Kuormitussyvyys on tavallisesti alle 10 m, joskus 15 m. Kokeen perusajatus on korvata painumaominaisuuksien määrittämisessä ödometrikoe silteissä ja hiekoissa, joissa häiriintymättömiä näytteitä ödometrikokeita varten ei onnistuta ottamaan. Savissa ruuvilevykoe olisi epätaloudellisen hidas. Ruuvilevykoetta käytetään myös syvästabiloidun maan tutkimiseen.

### **Pressometri**

Pressometri on Ranskassa kehitetty periaatteeltaan dilatometriä muistuttava tutkimusmenetelmä. Pressometrikokeen onnistunut suorittaminen edellyttää, että maahan tehtävä reikä pysyy häiriintymättömänä. Tämä rajoittaa pressometrin käytön pohjaveden yläpuolisiin kerroksiin. Savessa pohjavedenpinta ei samalla lailla suoranaisesti rajoita pressometrin käyttöä kuin esimerkiksi silteissä, mutta pehmeissä savissa mittauslaitteiden herkkyyys ei ole riittävä. Nämä tekijät rajoittavat pressometrin käyttöalueen maarakenteiden pehmeikkötutkimuksissa lähinnä kuivakuorikerroksen lujuusominaisuuksien selvittämiseen.

## **3.8 Suunnittelun aikaiset tarkkailumittaukset**

Varsinkin suunniteltaessa nykyisten tie- ja siltarakenteiden korjauksia seurataan jo suunnittelun aikana aloitetuin ja riittävästi toistetuin

tarkkailumittauksin nykyisten rakenteiden liikkeitä. Tavallisimpia mittaustapauksia ovat seuraavat:

- Seurataan tien painumien kehittymistä vaaituksin esimerkiksi maalausviivojen kohdalta. Tällöin voidaan päästä noin  $\pm 10$  mm tarkkuuteen, joka riittää silloin, kun seuranta on pitkäaikainen ja painumat melko suuria.
- Kiinnitetään tiehen metallinastoja, jotta mittaukset voidaan uusia tarkalleen samalta kohdalta. Tällöin tarkkuus paranee noin  $\pm 2$  mm:iin. Mittausten yhteydessä havaitaan z-koordinaatin lisäksi tarvittaessa x ja y, jotka saattavat antaa viitteitä sivusiirtymistä.
- Sivusiirtymien maksimiarvot sijaitsevat maanpintaa syvemmillä ja niitä seurataan tarvittaessa inklinometrimittauksin.
- Siltarakenteiden painumia, sivusiirtymiä ja kallistumia seurataan siltaan kiinnitetyistä pulteista. Mittaustarkkuus on noin  $\pm 1$  mm.

### 3.9 Koerakentaminen

Koerakentaminen on havainnollinen ja luotettava tapa tutkia ongelmia, joita tutkimusten ja suunnittelun normaali-keinoilla ei ole riittävällä tarkkuudella saatu ratkaistuksi. Pohjanvahvistusten osalta tyypillisiä koerakentamissovellutuksia ovat:

- koestabiloinnit ja stabiloinnin varaan tehtävät koepenkereet
- koepaalutukset
- maanvaraiset koepenkereet
- koepystyöjitukset pengerryksineen.

Koerakentamisen ohjelmoinnissa yleisperiaatteena pitää olla mittakaavan 1:1 käyttäminen. Pienennetyllä mittakaavalla saatava kustannussäästö on mitätön ja tulosten tulkintaan voi tulla yllättäviä lisähankaluuksia.

Koerakentamisessa on olennaista rakentamisen tarkka dokumentointi ja rakenteiden käyttäytymisen seuranta riittävin tarkkailumittauksin.

Koerakentamisen toteuttamisen kannalta voidaan erotella seuraavat kolme erilaista tilannetta:

- Koerakentaminen toteutetaan suunnittelutyön aikana.
- Koerakentaminen toteutetaan erillisenä toimenpiteenä eri suunnitteluvaiheiden välisen tauon aikana. Tähän pitää mennä yhä useammin, sillä eri suunnitteluvaiheet tehdään nykyisin yleensä toisistaan erillisinä eikä rakennussuunnittelun aikataulu useinkaan salli aikaa vievää koerakentamista.
- Rakentaminen aloitetaan koerakentamisen luontoisesti ja suunnitelmaa tarkennetaan mittaustulosten perusteella. Tämä

---

käy päinsä, kun mitoitus on jäänyt avoimeksi esimerkiksi paalupituuden tai syvästabiloinnin sideainemäärän osalta, jota on mahdollista tarkentaa ilman laajoja suunnitelmamuutostarpeita.

### 3.10 Kairausten laatu

Yleisesti maastotyön laatuun vaikuttaa tutkimusohjelma-aineiston ja maastotöiden järjestelyn ja ohjauksen laatu. Puutteelliset tai vaikeasti luettavat kartat ja kairausohjelmat, huolimaton tehtävänanto ja vähäinen yhteydenpito maastoryhmän ja suunnittelijan välillä lisäävät kaikkien virheiden riskiä.

Kaikissa maastotöissä tutkimuspisteiden paikalleenmittaus on virheille ja sekaannuksille altis työvaihe. Tavallisia virheiden ja epävarmuuden aiheuttajia ovat erilaiset koordinaatistot ja korkeusjärjestelmät, korkeuskiintopisteiden laatu ja puutteet kairauspisteiden vaaituksen systemaattisuudessa, jolloin voidaan saada kairauksia, joista puuttuu luotettava korkeustasotieto.

Turhia työn keskeytyksiä, kuljetuksia ja huonokuntoisesta kalustosta aiheutuvia virheellisiä tutkimustuloksia voidaan välttää pitämällä riittävästi lisälaitteita, varaosia ja kulutustavaraa kairauskaluston mukana. Varsinkin käyrät tangot, epäkeskiset tai vinot tankojen liitokset ja kuluneet tai vioittuneet kairojen kärkikappaleet aiheuttavat kairaustuloksiin virheitä. Kairauslaitteiden riittävän usein tapahtuva kalibroinnilla ja päivittäisellä öljymäärien, letkujen, pulttien ja ketjujen kireyden tarkistamisella parannetaan tutkimustulosten luotettavuutta.

Kairaustyön suorituksessa epätarkkuuksia tuloksiin voi aiheuttaa:

- ylimääräiset tauot kairauksen aikana
- tankojen painuminen vinoon varsinkin kivisessä maassa
- tankojen laskeminen väärin, jolloin syvyyslukemissa on 1 m virhe
- täytemaakerroksesta aiheutuva tankokitka
- maan häiriintyminen, kun kairaus on tehty liian läheltä vanhaa kairausreikää, erityisesti porakonekairausta
- kairauspöytäkirjan puutteellinen täyttäminen.

Painokairauksessa erityinen virhelähde voi olla vapaapainumaosuuden huolimaton suorittaminen, jolloin pienintä kuormitusta ei tule haetuksi. Erilaisten painokairauskalustojen ja tankokokojen vaikutus kairausvastukseen on myös erittäin suuri.

Heijarikairauksessa tankojen pyörittäminen vaikuttaa tankojen pystysuorassa pysymiseen ja tätä kautta kairausvastustulosten luotettavuuteen. Syvemmälle mennessä ”jouluksen muotoisesti”

levevä heijarikairausdiagrammi on usein merkki vinoon kääntyneistä tangoista.

Puristinheijarikairauksessa oleellista on puristinvoiman ja vääntömomentin kalibrointi 6 kk välein sekä nolla-asetus 2-3 kertaa työvuoron aikana. Vähintään 2 kertaa työvuoron aikana on myös tarkistettava puristusnopeuden, pyöritysnopeuden ja iskutiheyden pysyminen toleranssien puitteissa.

CPTU-kairauksessa virhelähteet ovat huokospaineen mittauksessa, joka on taitoa ja huolellisuutta vaativa kairaustyön osa. Tärkeää on mm. huokospaineen mittaustilan pitäminen jatkuvasti vedellä kyllästyneenä sekä suodattimen vaihto riittävän usein.

Siipikairauksessa on useita mahdollisia virhelähteitä, kuten:

- siipiputken tiivisteen ja laakerin kunto
- laitteiston kalibrointi (tehtävä erityisen usein)
- maan häiriintyminen siipeä maahan upotettaessa
- siipi ei aina pysy halutussa syvyydessä, kun maa on erityisen pehmeää
- siiven osuminen kiveen ja vääntyminen
- tankovastuksen mittaamisen unohtaminen
- epäselvyys käytetyn siipikoon dokumentoinnissa
- erityisesti kiertämisnopeuden poikkeaminen ohjeiden mukaisesta.

### 3.11 Paineellinen pohjavesi

Pohjatutkimuksia ohjelmoitaessa on arvioitava paineellisen pohjaveden esiintymismahdollisuuksia ja tarvittaessa varauduttava erikoistoimenpiteisiin vahinkojen varalta. Lähtötietoina tarkasteluissa ovat:

- kartat (peruskartat, maaperäkartat)
- vesistöjen, lähteiden ja kaivojen vedenpintatiedot
- yleinen geologinen tieto
- tiedot paineellisen pohjaveden esiintymisestä ko. seudulla.

Pohjavesi voi olla paineellista lähinnä sellaisissa laaksoissa, rinteissä tai jokiuomien muodostamissa syvänteissä, joissa huonosti vettä läpäisevien maakerrosten alla on vettä johtavia maakerroksia, kuten hiekkaa tai soraa. Paineellista pohjavettä esiintyy paikallisesti eri puolilla Suomea, mutta vahinkotapauksia on sattunut lähinnä laaja-alaisilla savikoilla.

Jos paineellista pohjavettä on syytä olettaa esiintyvän, noudatetaan seuraavia ohjeita:

- 
- Ei jätetä tankoja maahan pitkäksi ajaksi
  - Nostetaan tangot ylös suhteellisen hitaasti
  - Käytetään heijarikairauksessa maahan jäävää irtokärkeä
  - Tehdään painokairausten sijasta mieluummin puristinheijarikairauksia (irtokärki)
  - Varaudutaan kairausreikien välittömään tukkimiseen, jos niistä tulee vettä.

Vuotokohta voidaan välittömästi tukkia esimerkiksi työntämällä siihen latvapuoli edellä hyvin karsittu, suora puunrunko, joka juntataan mahdollisimman tiukkaan. Em. toimenpiteen lisäksi vuotokohta voidaan peittää mahdollisimman paksulla vettä läpäisemättömällä maakerroksella. Puulla tukituissa rei'issä on vaarana puiden mahdollinen myöhempi poistaminen esimerkiksi rakennustöiden yhteydessä. Myös reiän välitön tukkiminen sementillä on joskus ollut tehokasta. Pitkään jatkuneen ja maassa sisäistä eroosiota aiheuttaneen vuodon tukkiminen voi edellyttää esimerkiksi siiviläputken asentamista pohjavesivirtauksen ohjaamiseksi putkeen, joka tukitaan. Kun pelätään, että kairausreiät voivat vuotaa tien käyttöaikana, voidaan esimerkiksi kapeiden teiden tapauksissa sijoittaa kairauspisteet niin, etteivät tulevat rakenteet ole esteinä mahdolliselle myöhemmin tarvittavalle reikien tukkimiselle.

### 3.12 Tutkimuskustannukset

#### **Yleistä tutkimuskustannusten muodostumisesta**

Tutkimuskustannuksiin vaikuttavat muun muassa:

- pääseminen työkohteelle
- liikkuminen kairauspisteeltä toiselle (viljelykset, ojat, suot, puut, luiskat)
- raivausten tarve
- kairausvyvyys
- maalaji, pinnassa mahdollisesti esiintyvä täytemaa
- taito valita mahdollisimman suoraan sopiva tutkimusmenetelmä
- kairauspisteiden tiheys (siirtojen pituus)
- vuodenaika
- etäisyys taajamista ja liikenneyhteydet (majoituskustannukset)

Pelto- ja suoalueilla vuodenajalla on suurin vaikutus tutkimusten sujuvuuteen. Pelloilla edullisin tutkimusajankohta on talvi, sillä kesällä tehtävät tutkimukset ovat usein kohtuuton haitta viljelyksille ja syysateet tms. epäedulliset sääolosuhteet vaikeuttavat pelloilla liikkumista. Vaikeakulkuisilla suoalueilla talvi saattaa olla ainoa kysymykseen tuleva tutkimusajankohta ja silloinkin saattavat jäädytystoimenpiteet olla tarpeen.

---

Taajama-alueilla ja liikennöidyillä teillä tehtävien tutkimusten kustannuksiin vaikuttavia erikoispiirteitä ovat muun muassa:

- kaapeli- ja johtotietojen selvittäminen
- liikenteelle aiheutuvan haitan minimointi esimerkiksi ruuhka-aikana työskentelyä välttämällä, kelin huomioonottaminen esimerkiksi tehtäessä talviaikaan tutkimuksia moottoriteillä
- liikennejärjestelyt, kaistojen sulkemiset, tarvittavat liikennemerkit
- työn luonteesta johtuvat odotusajat
- alkureiän tekeminen porakoneella nykyisten penkereiden ja täyttöjen läpi

Vesialueilla tutkimusten tekeminen jäältä on yleensä työsaavutusten kannalta hyvin edullista. Avoveden aikaan tehtävät tutkimukset vaativat lauttajärjestelyjä ja tulevat näin tavallista kalliimmiksi.

Pisteiden sijoitus ja niiden siirtomahdollisuus tietyissä toleransseissa voivat parantaa kairaustyön tehokkuutta. Pohjatutkimusohjelmassa voidaan esittää valmiiksi harkitut kairauspisteiden sallitut siirrot. Maanomistajien suhtautuminen voi haitata tai helpottaa liikkumista tutkimusalueella. Maanomistajien riittävän aikainen informointi helpottaa tutkimusten sujuvaa suorittamista.

Tutkimusten kustannukset työvuoroa kohti laskettuina muodostuvat taulukon 3 mukaisesti.

Taulukko 3: Työvuorohinnan muodostuminen tavallisimmista maastotöissä.

Työlaji	Työryhmä	Veloitusluokka	Henkilöveloitus, mk/h	Päiväraha/ puolipäiväraha/ ruokaraha, mk/vy	Majoituskulut, mk/vy	Päivittaiset matkat, mk/tv	Peruskalusto, mk/tv	Tutkimuskalusto, mk/tv	Työvuorohinnan vaihteluväli	Huom.
Takymetrimittaus	1+1	05-07	220-140	151/68/37	0-600	50 km á 2,01	60-160	500-800	2900-4743	Esim. 1
Painokairaus, moontorikäytt. kaira	1+1	06-08	180-120	"	"	50 km á 1,97	"	350-400	2663-3861	
Painokairaus, monitoimikaira	1+1	06-08	180-120	"	"	"	"	650-1100	2963-4561	Esim. 2
Heijarkairaus	1+1	06-08	180-120	"	"	"	"	750-1200	3063-4661	
Puristinheijarkairaus	1+1	06-08	180-120	"	"	"	"	1000-1300	3313-4761	Esim. 3
Puristinkairaus, CPTU	1+1	05-08	220-120	"	"	"	"	1300-1500	3613-5281	
Siipikairaus	1+1 1+0	05-08	220-120	"	"	"	"	350-1100	2663-4881	Esim. 4
Häiriintymätt. näytt. monitoimikairalla	1+1	05-08	220-120	"	"	"	"	1100	3413-4881	
Häiriintyneet näytt. monitoimikairalla	1+1	06-08	180-120	"	"	"	"	650-1100	2963-4561	Esim. 5
Häiriintyneet näytt. porakonekairalla, porakonekairaus tanko- tai putkikalustolla	1+1	05-08	220-120	"	"	"	"	1600-2600-3300	3913-7081	Esim. 6
Ruuvilevykoe	1+0 1+1	05-08	220-120	"	"	"	"	1100+ 250/ piste	4313-5881	Esim. 7
Pilarikairaus ja pilarisiipikairaus	1+1	05-08	220-120	"	"	"	"	1300-1500	3613-5909	Esim. 8

Esimerkki 1 8 h \* 220 mk/h + 8 h \* 140 mk/h + 2 \* 151 mk + 300 mk + 50 km \* 2,01 mk/km + 60 mk + 650 mk = 4293 mk/työvuoro  
 Esimerkki 2 8 h \* 180 mk/h + 8 h \* 120 mk/h + 2 \* 151 mk + 300 mk + 50 km \* 1,97 mk/km + 60 mk + 650 mk = 3211 mk/työvuoro  
 Esimerkki 3 8 h \* 180 mk/h + 8 h \* 120 mk/h + 2 \* 151 mk + 300 mk + 50 km \* 1,97 mk/km + 60 mk + 1300 mk = 4461 mk/työvuoro  
 Esimerkki 4 8 h \* 220 mk/h + 1 \* 151 mk + 300 mk + 50 km \* 1,97 mk/km + 60 mk/2-1100 mk = 3440 mk/työvuoro  
 Esimerkki 5 8 h \* 180 mk/h + 8 h \* 120 mk/h + 300 mk + 50 km \* 1,97 mk/km + 60 mk + 650 mk = 3509 mk/työvuoro  
 Esimerkki 6 8 h \* 180 mk/h + 8 h \* 120 mk/h + 300 mk + 50 km \* 1,97 mk/km + 60 mk + 2600 mk = 5262 mk/työvuoro  
 Esimerkki 7 8 h \* 180 mk/h + 8 h \* 120 mk/h + 300 mk + 50 km \* 1,97 mk/km + 60 mk + 1100 mk + 250 mk = 4209 mk/tv  
 Esimerkki 8 8 h \* 180 mk/h + 8 h \* 120 mk/h + 300 mk + 50 km \* 1,97 mk/km + 60 mk + 1400 mk = 4261 mk/työvuoro

Työvuorohintojen lisäksi tulee seuraavia kustannuksia: kaluston siirto, maastotöiden valvonta, korvaukset maanomistajille aiheutuneista vahingoista. Kustannukset on esitetty ilman arvonlisäveron osuutta.



Talviolosuhteiden tutkimuskustannuksia lisäävä vaikutus voidaan arvioida seuraavanlaisiksi:

- painokairaus 18 %
- heijarikairaus 11 %
- puristinheijarikairaus 8 %
- porakonekairaus tangoilla 10 %
- porakonekairaus putkella 20 %
- siipikairaus 13 %
- CPTU-kairaus 10 %
- keskimäärin 14 %

Maatutkaluotauksen kustannus työvuoroa kohti laskettuna on noin 9000-12000 mk, josta noin puolet koostuu tulosten tulkinnasta. Kun kustannukset jaetaan tutkittavalle linjapituudelle, hinnaksi muodostuu ilman mittaus- ja raivaustöitä noin 2000-3000 mk/km.

Sähkövastusluotauksen kustannukset ovat noin 20000 mk/km. Kustannukset saattavat menetelmän kehittyessä alentua vielä kymmeniä prosentteja.

Gravimetrisen mittauksen kustannukset ovat noin 10000 mk/km.

Geofysikaalisten tutkimusten edellyttämät mittaus- ja raivaustyöt saattavat joissain tapauksissa olla itse tutkimusta kalliimpia.

### **Tutkimusolosuhteiden jaottelu**

Pehmeiköt voidaan jaotella syvyyden mukaan:

- mataliin (alle 5 m)
- keskisyviin (5-15 m)
- syviin (yli 15 m)

Maasto voidaan pehmeikkötutkimusten kannalta jaotella pinnanmuodostuksen mukaan seuraavasti:

- helppo liikkua
  - avoin maasto tai pieniä puita harvakseen
  - tiet lähellä
  - loivat pinnat (kaltevuus alle 10 astetta)
- vaikea liikkua
  - ei teitä lähellä
  - suoalue

- 
- pelto, jonka tallaaminen on minimoitava
  - paljon ojia
  - tiheä puusto
  - suuria kaltevuuksia
  
  - erittäin vaikea liikkua
  
  - erityisen vaikeakulkuinen suoalue

### **Paino-, puristinheijari- ja CPTU-kairauksen kustannukset**

Kairausten työsaavutukset (kairausmetriä/8 tuntia tehokasta kairausaikaa) erilaisilla syvyyksillä voidaan arvioida seuraavanlaisiksi:

- alle 5 m syvyys: painokairalla 20-35 m, puristinheijarikairalla 25-40 m, CPTU-kairalla 25-40 m
- 5-15 m syvyys: painokairalla 30-50 m, puristinheijarikairalla 40-70 m, CPTU-kairalla 45-80 m
- yli 15 m syvyys: painokairalla 40-60 m, puristinheijarikairalla 50-90 m, CPTU-kairalla 60-100 m.

Tällöin saadaan tehokkaan kairauksen metrikustannukseksi, kun työvuorohinnat valitaan taulukossa 1 esitettyjen vaihteluvälien keskeltä:

- alle 5 m syvyys: painokairalla 105-190 mk, puristinheijarikairalla 100-160 mk, CPTU-kairalla 110-180 mk
- 5-15 m syvyys: painokairalla 75-125 mk, puristinheijarikairalla 60-100 mk, CPTU-kairalla 55-100 mk
- yli 15 m syvyys: painokairalla 65-95 mk, puristinheijarikairalla 45-80 mk, CPTU-kairalla 45-75 mk

Verrattaessa eri kairausmenetelmien työsaavutuksia ja metrikustannuksia toisiinsa on syytä ottaa huomioon, että CPTU-kairausta tehdään vain pehmeissä kerroksissa, kun taas painokairaus ja varsinkin puristinheijarikairaus ulotetaan syvemmälle, jolloin niiden tiedot ovat myös kovien kerrosten osuuksia sisältäviä keskiarvoja.

### **Siipikairauksen kustannukset**

Siipikairauksen työsaavutukset (kairausmetriä/8 tuntia tehokasta kairausaikaa) voidaan arvioida seuraavanlaisiksi tehtäessä siipikairaus normaalitapaan 0,5 m syvyysvälein:

- alle 5 m syvyys: 8-10 m
- 5-15 m syvyys: 10-12 m
- yli 15 m syvyys: 12-15 m

Tällöin saadaan tehokkaan kairauksen metrikustannukseksi, kun työvuorohinta valitaan taulukossa 1 esitetyn vaihteluvälin keskeltä:

- alle 5 m syvyys: 375-470 mk
- 5-15 m syvyys: 315-375 mk
- yli 15 m syvyys: 250-315 mk

### **Näytteenoton kustannukset**

Seuraavassa on tarkasteltu kolmea pehmeikkötutkimuksissa tyypillisintä näytteenottomenetelmää:

- häiriintymättömien näytteiden ottaminen mäntäkairalla ST2
- häiriintyneiden näytteiden ottaminen raskaalla monitoimikairalla tai kevyellä porakonekalustolla
- häiriintyneiden näytteiden ottaminen kannukairalla (käyttökohde lähinnä suopehmeiköt)

Näytteenoton työsaavutukseksi otettaessa näytteitä 1m välein voidaan arvioida:

- alle 5 m syvyys: ST2:lla 8-12 m, kevyellä porakoneella 10-15 m, kannukairalla 20-25 m
- 5-15 m syvyys: ST2:lla 10-15 m, kevyellä porakoneella 15-20 m
- yli 15 m syvyys: ST2:lla 13-18 m, kevyellä porakoneella 18-25 m

Tästä muodostuu näytteenoton kustannukseksi, kun työvuorohinnat valitaan taulukossa 1 esitettyjen vaihteluvälien keskeltä ja porakoneella suoritettavassa näytteenotossa kalustokustannuksiin lasketaan mukaan näytteenottimesta muodostuva lisäkustannus (SKOL:n kalustoluokittelun kohta 91.20, nykyisin 44 mk/otettu näyte):

- alle 5 m syvyys: ST2:lla 345-520 mk/näyte, kevyellä porakoneella 355-510 mk/näyte, kannukairalla 150-190 mk/näyte
- 5-15 m syvyys: ST2:lla 275-415 mk/näyte, kevyellä porakoneella 275-355 mk/näyte
- yli 15 m syvyys: ST2:lla 230-320 mk/näyte, kevyellä porakoneella 230-300 mk/näyte

Yleisenä johtopäätöksenä edellä esitetystä voidaan todeta, että maanäytteet kannattaa pehmeiköillä pääsääntöisesti ottaa häiriintymättöminä, sillä:

- kustannusero häiriintyneiden näytteiden ottamiseen verrattuna on keskimäärin vain noin 5 %
- useammat laboratoriotutkimukset ovat mahdollisia ja tällöin

- esimerkiksi ödometrikotulokset saadaan nopeammin suunnittelussa hyödynnettäviksi, kun häiriintymättömien näytteiden ottamisen ohjelmointi ei ole erillinen työvaihe.

Jos häiriintyneitä näytteitä otetaan, suositeltavin menetelmä on yleensä porakonekaluston käyttö, koska tällöin saadaan isoja ja edustavia näytteitä ja tarvittaessa voidaan läpäistä kovatkin pinta- tai välikerrokset. Stabilointikokeita varten ei riittävän isoja näytteitä saada muuten kuin porakoneella tai joskus matalilta syvyyksiltä koekuopasta. Otettaessa näytteitä pehmeistä maakerroksista kevyen porakoneen suorituskyky on riittävä eivätkä raskaamman kaluston hiukan paremmat työsaavutukset kompensoi kalustokustannusten kohoamista kuten kovan maan tutkimuksissa. Suoalueilla kannukaira on edullinen menetelmä turvekerroksen paksuuden selvittämiseen.

### **Siirtokustannukset**

Edellä esitetyt kairausten ja näytteenoton työsaavutukset on laskettu tehokasta kairauspisteellä työskenneltyä aikaa kohti. Kokonaiskustannuksen laskennassa tulee lisäksi ottaa huomioon pisteeltä toiselle siirtymisen kustannus. Siirtoaika eri maasto-olosuhteissa on:

- Helppo liikkua: 5-15 minuuttia/piste
- Vaikea liikkua: 15 minuuttia-1 tunti/piste
- Erittäin vaikea liikkua: 1-4 tuntia/piste

### **Laboratoriotutkimusten kustannukset**

Esimerkki laboratoriotutkimusten hinnastosta on esitetty liitteessä 1. Seuraavassa on laskettu mainitun hinnaston perusteella pari yleisimmin tarvittua kustannustarkastelua:

- Tavanomainen pehmeikkönäytteen tutkimus: silmämääräinen maalajimääritys, vesipitoisuus ja hienousluku kaikista näytteistä, tarkempi maalajimääritys areometrikokeella 30-50 % näytteistä, humuspitoisuus 20-40 % näytteistä. Keskimääräiseksi hinnaksi tulee 339-423 mk/näyte. Jos näytteitä on 5-10 kpl/piste, hinta on vastaavasti 1695-4230 mk/piste.
- Automaattiödometrikoe, alle 3 vrk. Hinta 800 mk/näyte. Jos tutkittavia näytteitä on 3-6 kpl/piste, hinnaksi tulee vastaavasti 2400-4800 mk/piste.
- Portaittainen ödometrikoe, kesto 1-2 viikkoa. Hinta 800 mk/näyte.

### **In situ-menetelmien kustannukset**

Ruuvilevykuormituskokeessa tehdään 2-6 havaintoa/työvuoro. Jos työvuorokustannus on 4200 mk, hinnaksi tulee 700-2100 mk/havainto.

Mitä hienorakeisempaa ja hitaammin painuvaa maa on, sitä suuremmaksi tulee kustannus tehtyä havaintoa kohden.

Dilatometrikokeessa tehdään 20-40 havaintoa/työvuoro. jos työvuorohinnaksi oletetaan 4600 mk, hinnaksi tulee 115-230 mk/havainto. Havainnot tehdään tavallisesti pienin syvyysvälein, jolloin metrikustannus saattaa olla tähän verrattuna viisinkertainen.

### **Koerakentamisen kustannukset**

Koerakentamisen kustannukset koostuvat:

- rakennustyön mobilisoinnista
- rakennustyön määristä (painoarvo melko pieni)
- koestuksista ja mittauksista (määrä tapauskohtaisesti harkittava ja painoarvo kustannusten muodostumisessa usein suuri).

Tarvittavia lähtötietoja koerakentamisen kustannusten arvioimiseen löytyy myös julkaisusta Pohjanvahvistusmenetelmän valinta TIEL 3200446.

### **Hankekohtaiset tutkimuskustannukset**

Hankekohtaisten tutkimuskustannusten suuruusluokan arviointiin voidaan käyttää muun muassa seuraavia nyrkkisääntöjä:

- Tutkimusten + mittausten + suunnittelun - sillansuunnittelun kustannukset ovat yleensä 6-10 % hankkeen toteutuskustannuksista.
- Geoteknisen suunnittelun kustannukset ovat maaperästä ja hankkeen erityispiirteistä riippuen 15-40 % suunnittelukustannuksista (ilman sillansuunnittelua).
- Maaperätutkimusten kustannukset ovat 1-2 kertaa geoteknisen suunnittelun kustannukset eivätkä minimoidu yhtä aikaa edellisen kanssa.
- Edellä mainitut oletukset johtavat siihen, että maaperätutkimusten kustannukset vaihtelevat useimmiten 1,5-3,5 % hankkeen toteutuskustannuksista.
- Pehmeikköhankkeissa, joissa tehdään laajoja pohjanvahvistustoimenpiteitä, geoteknisen suunnittelun kustannukset ovat yleensä 5-7 % pohjanvahvistuskustannuksista ja maaperätutkimusten kustannukset vastaavasti 7-11 % pohjanvahvistuskustannuksista.

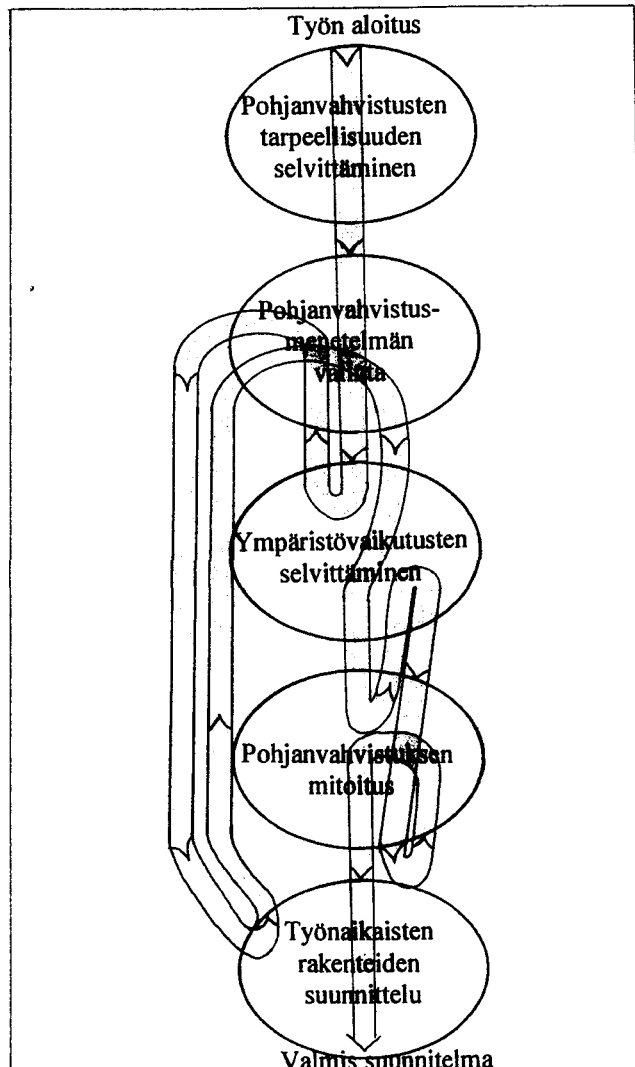
Tähän asti on tiesuunnitelmaa varten yleensä tehty 35-65 % maaperätutkimusten kokonaismäärästä. Nykyinen kehityssuuntaus vaikuttaa siltä, että tiesuunnitelmien taso nousee ja tämä edellyttää aikaisempaa perusteellisempia pohjatutkimuksia.

## 4 POHJATUTKIMUSTEN TAVOITTEET JA VAIHEET

### 4.1 Pohjatutkimusten tavoitteet

Teiden pehmeikkötutkimusten tavoitteiden painopiste siirtyy tutkimusten ja suunnittelun edetessä suunnilleen seuraavasti, ks. myös kuva 8:

- pohjanvahvistusten tai tarkemman pehmeikkösuunnittelun tarpeellisuuden selvittäminen
- pohjanvahvistusmenetelmän valinta
- ympäristövaikutusten selvittäminen
- pohjanvahvistuksen mitoitus
- työnaikaisten rakenteiden suunnittelu



Kuva 8: Tien pehmeikkötutkimusten tavoitteet tutkimusten ja suunnittelun edetessä.

## **Pohjanvahvistusten tarpeellisuuden selvittäminen**

Ensimmäisten pohjatutkimusten tavoite on selvittää, tarvitaanko pohjanvahvistuksia tai pohjanvahvistusten tarpeellisuuden tarkempaa tarkastelua vai ovatko normaalit penger- ja leikkausrakenteet ilman muuta perustettavissa ilman erikoistoimenpiteitä.

## **Pohjanvahvistusmenetelmän valinta**

Kun maaperästä on alustava käsitys ja tien korkeusasema ainakin likimain tunnetaan, on tutkimuksin selvitettävä pohjasuhteet niin, että voidaan tehdä kysymykseen tulevien pohjanvahvistusvaihtoehtojen suuntaa-antava mitoitus menetelmän valinnan edellyttämällä tarkkuudella.

## **Ympäristövaikutusten selvittäminen**

Ympäristövaikutukset aiheuttavat rajoituksia pohjanvahvistusmenetelmän valinnalle. Ympäristövaikutusten selvittämiseen tähtäävät pohjatutkimukset painottuvat samaan vaiheeseen pohjanvahvistusmenetelmän valintatutkimusten kanssa. Myös pohjanvahvistuksen mitoituksessa ja työnaikaisten rakenteiden suunnittelussa tarvitaan usein pohjatutkimuksin tarkennettavaa tietoa ympäristövaikutuksista.

Usein toistuvia pohjanvahvistusmenetelmän valintaan ja suunnitteluun vaikuttavia ympäristövaikutuksia ovat:

- pohjaantäytössä pehmeiden massojen sivusiirtymät
- kaivamalla tehtävässä massanvaihdossa kaivantoluiskan sortuman vaara
- muissakin menetelmissä työnaikaisten kaivutilanteiden aiheuttama vakavuuden huononeminen
- massanvaihdossa kaivumassojen kuljetus ja läjitys
- melu ja tärinä
- esimerkiksi paalutuksen, pystyjoituksen tai syvästabiloinnin aiheuttama pohjamaan häiriintyminen
- rakentamistoimenpiteiden vaikutukset pohjaveteen.

Useimmat näistä ympäristövaikutuksista ovat joko kokonaan työnaikaisia tai työn aikana voimakkaimmillaan esiintyviä. Pysyviä ovat lähinnä pohjaveteen kohdistuvat vaikutukset.

## **Pohjanvahvistuksen mitoitus**

Kun suunnittelussa on päädytty tiettyyn pohjanvahvistusmenetelmään, tarvitaan valitusta menetelmästä riippuen erilaisia lisäpohjatutkimuksia, jotta ratkaisun mitoitus voidaan tehdä suunnitelman tarkkuustavoitteen mukaisesti.

---

## **Työnaikaisten rakenteiden suunnittelu**

Työnaikaisissa tilanteissa tarvitaan pohjanvahvistusratkaisuista riippuen mm. erilaisia kiertoteitä, kaivantoja ja tukirakenteita, jotka on osattava ottaa huomioon pohjatutkimusten ohjelmoinnissa. Työnaikaisilla rakenteilla voi myös olla ympäristövaikutuksia sekä ratkaiseviakin vaikutuksia pohjanvahvistusmenetelmän valintaan, joten niiden alustava huomioonottaminen on tarpeen jo pohjanvahvistusvaihtoehtoja muodostettaessa.

### **4.2 Pohjatutkimusten vaiheet**

Edellä esitettyihin tavoitteisiin tähtäävät pohjatutkimukset voidaan ajallisesti ryhmitellä kolmeen vaiheeseen. Näillä ei ole yksiselitteistä yhteyttä suunnitteluvaiheisiin, varsinkin kun suunnitteluvaiheiden sisältö on jatkuvassa muutostilassa. Voidaan karkealla tarkkuudella todeta, että tiesuunnitelmaa varten tarvitaan ainakin orientoivat tutkimukset ja pohjanvahvistusmenetelmän valintatutkimukset sekä ilmeisesti myös yhä suurempi osa myös pohjanvahvistuksen mitoitusta palvelevista tutkimuksista. Yleissuunnitelmaa varten tarvitaan orientoivat tutkimukset ja tapauksesta riippuen osa pohjanvahvistusmenetelmän valintatutkimuksista.

#### **Orientoivat tutkimukset**

Orientoivilla tutkimuksilla selvitetään, tarvitaanko pohjanvahvistuksia tai pohjanvahvistusten tarpeellisuuden tarkempaa tarkastelua vai ovatko normaalit penger- ja leikkausrakenteet tehtävissä ilman erikoistoimenpiteitä. Orientoivia tutkimuksia ei yleensä tehdä tasaisesti koko tielinjan pituudella, vaan ne keskitetään oleellisille ongelmakohdille.

#### **Pohjanvahvistusmenetelmän valintaa palvelevat tutkimukset**

Pohjanvahvistusmenetelmän valintatutkimukset antavat lähtötiedot pohjanvahvistusmenetelmän valintaa varten. Pohjanvahvistusten alustavien mitoituspärametrien lisäksi selvitetään ympäristövaikutukset ja työnaikaisten rakenteiden suunnittelun lähtötiedot vertailun vaatimalla tarkkuudella.

#### **Pohjanvahvistuksen mitoitusta palvelevat tutkimukset**

Lopullisilla pohjatutkimuksilla selvitetään lähtötiedot pohjanvahvistuksen mitoitusta, ympäristövaikutusten selvittämistä ja työnaikaisten rakenteiden suunnittelua varten rakentamisen vaatimusten mukaisella tarkkuudella.



## 5 ORIENTOIVAT POHJATUTKIMUKSET

Orientoivien pohjatutkimusten ohjelmoinnissa on erityisen tärkeää käyttää hyväksi karttatulkinnan, maastokäynneillä tehtyjen silmämääräisten havaintojen ja vanhojen tutkimusten antama informaatio. Orientoivia pohjatutkimuksia tehtäessä tien tarkkaa linjausta ei yleensä vielä tunneta, mikä on muistettava ottaa huomioon tutkimusten ohjelmoinnissa.

Kun pohjasuhteita ei alustavan aineiston perusteella osata arvioida, orientoivien tutkimusten aloitusvaiheen periaatteeksi voidaan yksinkertaisesti kuvata pehmeikköjen etsiminen ja rajaaminen aloittaen maaston alavimmilta kohdilta. Aluksi sijoitetaan vähintään 2-3 painokairausta mahdollisen pehmeikköalueen alavimmille kohdille, tarvittaessa myös tielinjan sivulle. Tutkimuksia täydennetään tulosten antamien tietojen perusteella.

Silloin kun alustava aineisto viittaa siihen, että kysymyksessä todennäköisesti on pehmeikkö, ohjelmoidaan suoraan harva kairauspisteverkko koko todennäköiselle pehmeikköalueelle, esimerkiksi painokairaukset tielinjan pituussuunnassa 40-100 m välein riippuen pehmeikön pituudesta ja tasalaatuisuudesta ja sivusuunnassa tarpeen mukaan riippuen tien leveydestä, maaston vaihtelevuudesta ja tielinjan muuttumismahdollisuuksista.

Tarkistettaessa lopullisen suunnittelun vaatimalla tarkkuudella, onko kantavaksi arvioidulla maapohjalla pehmeikköä, voidaan noudattaa seuraavia suosituksia tien ollessa penkereellä:

- Moreenialueilla kairauksia tien pituussuunnassa 40-100 m välein notkopaikoista, kaltevassa maastossa penkereen sivulta.
- Harjualueilla vastaavaan tapaan kiinnittäen erityistä huomiota mahdollisten rantakerrostumien tutkimiseen ja läpäisemiseen. Tarvittaessa otetaan näytteitä maakerrosten varmistamiseksi.
- Tarvittavat vähät kairauspisteet kannattaa pyrkiä sijoittamaan esimerkiksi suunniteltujen rumpujen kohdalle, jolloin niillä saatava hyöty lisääntyy.

Tien ollessa leikkauksessa tutkimuksia tarvitaan muista syistä enemmän. Tarvittavia tutkimuksia on esitetty julkaisussa Tieleikkausten pohjatutkimukset TIEL 3200354.

## 6 POHJANVAHVISTUSMENETELMÄN VALINTATUTKIMUKSET

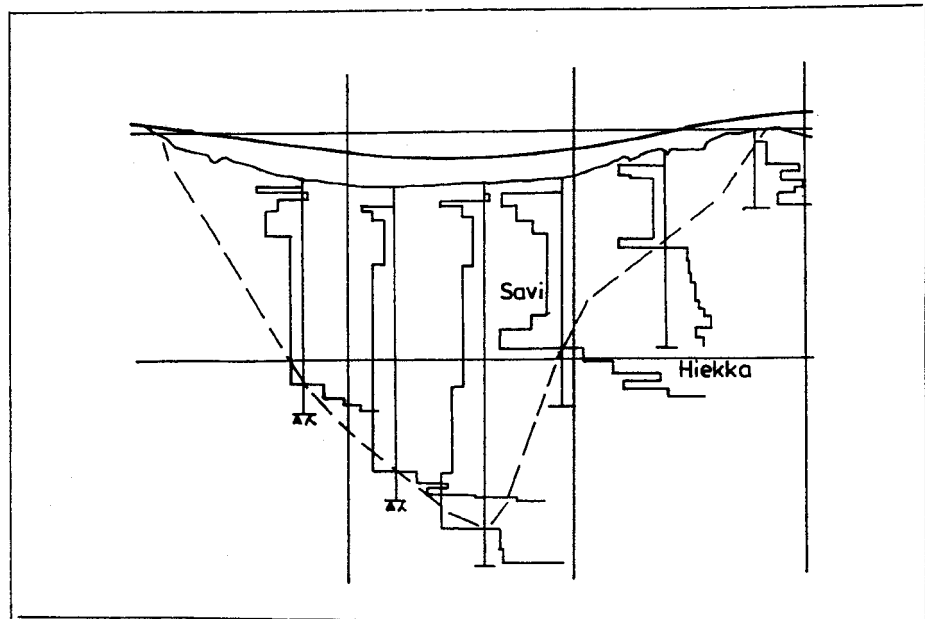
### 6.1 Maakerrosrajojen ja maanpinnan muotojen selvittäminen

Selvitettäessä maakerrosrajoja pehmeikköalueella tärkeimmät ja yksinkertaisissa tapauksissa riittävät tiedot ovat:

- pehmeiden kerrosten alapinta
- kuivakuorikerroksen paksuus
- esiintykö pehmeiköllä turvetta tai liejua.

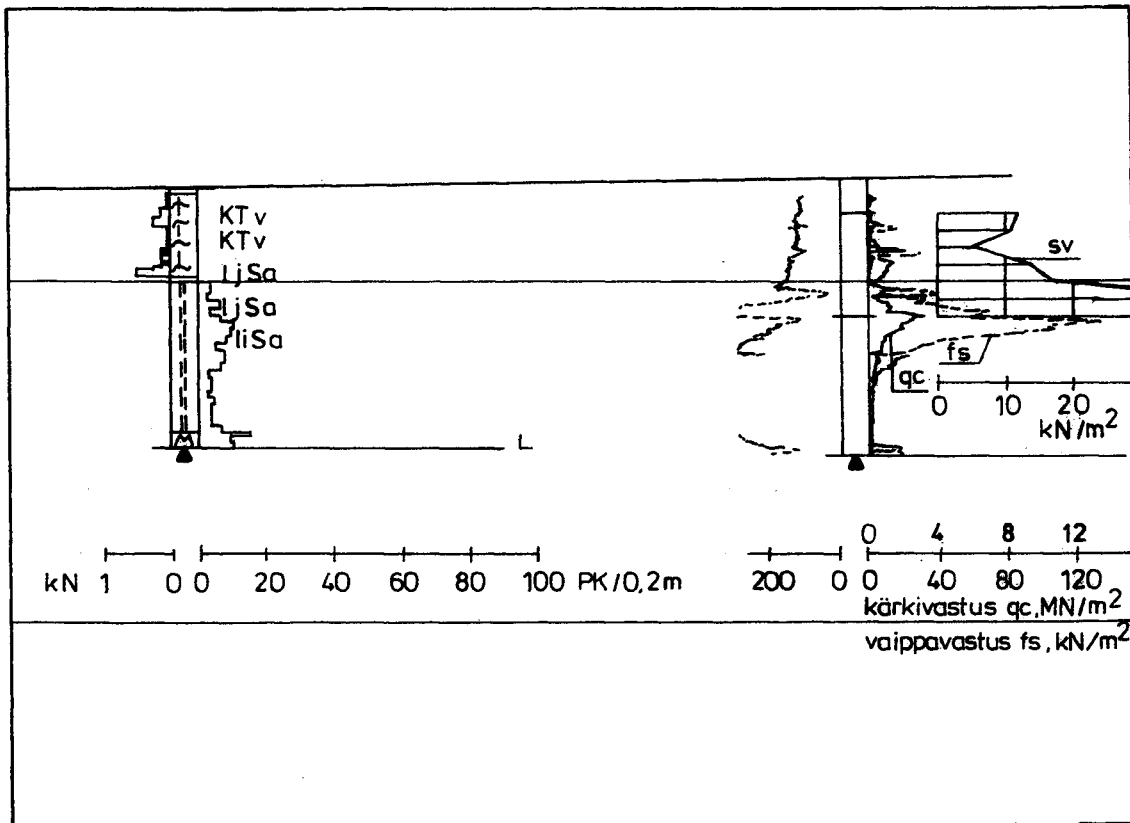
Ennen tutkimusten laajamittaista käynnistämistä on harkittava, käytetäänkö maakerrosrajoja selvittävänä peruskairauksena painokairaus, puristinheijarikairaus vai CPTU-kairaus. Valintaan vaikuttavia näkökohtia ovat maaperä, todennäköiset pohjanvahvistusratkaisut, käytettävissä oleva kalusto ja tutkimuskustannukset. Kuten kohdassa 3.10 on esitetty, ei em. kolmen menetelmän kustannusten välillä ole suuria eroja. CPTU-kairaus soveltuu käytettäväksi silloin, kun etukäteen harvakseltaan tehdyin paino- tai puristinheijarikairauksin on selvitetty, mihin syvyyteen asti maaperä on kivetöntä ja CPTU-kairauksin tutkittavaksi soveltuva.

Pehmeiden kerrosten paksuuden selvittämisessä sekä muidenkin maakerrosrajojen arvioinnissa painokairaus on perinteisesti yleisin menetelmä ja monissa olosuhteissa se edelleen puoltaa paikkaansa. Painokairaus soveltuu, kun geologiset olosuhteet ja maakerrosrajat ovat selväpiirteiset. Tällaista tapausta esittää kuva 9.



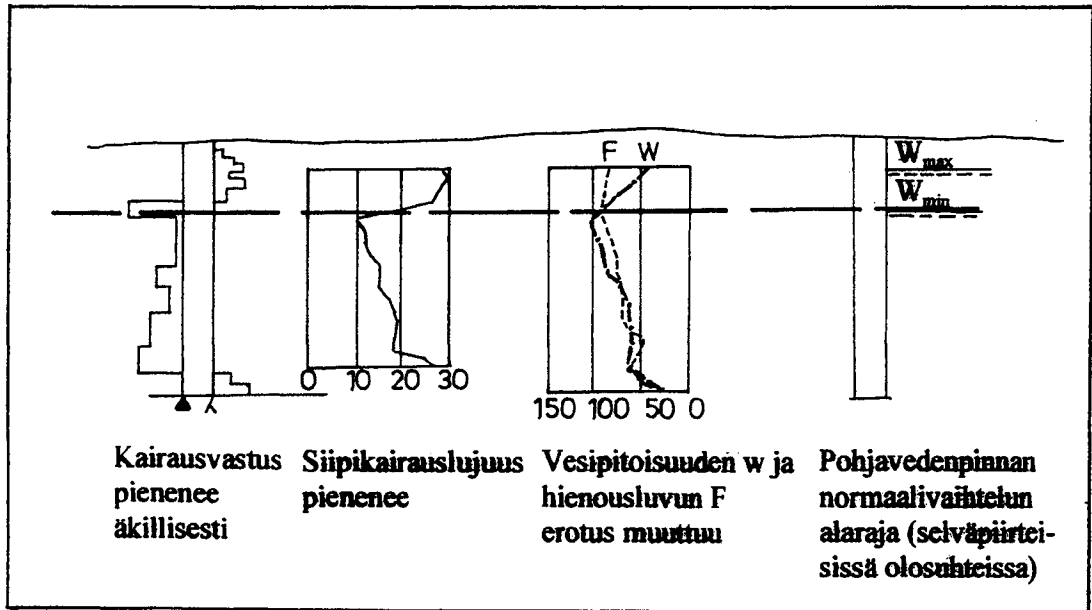
Kuva 9: Painokairauksen käyttö maakerrosrajojen selvittämiseen pehmeiköllä.

Kun maakerrosrajat ovat vaikeammin tulkittavat, painokairausten tueksi tai asemasta tarvitaan muitakin kairauksia. Sitkeillä ja kovilla savilla painokairausten erottelutarkkuus huononee huomattavasti pehmeämpiin saviin verrattuna ja puristinheijarikairaus on soveltuvampi. Erityisesti pitää varoa antamasta maakerrosrajojen tulkinnassa liian suurta painoa painokairausten rajakohdille, joilla kairausvastus siirtyy vapaapainuman puolelta kierron puolelle. CPTU-kairaukset soveltuvat erilaisten savi- ja silttikerrosten erottelamiseen ja esimerkiksi sen tulkitsemiseen, johtuuko kairausvastuksen muutos maan lujuuden muutoksesta vai maalajimuutoksesta. Kuvassa 10 on esitetty tapaus, jossa savikerroksen alaosan lujuus näyttää varsin erilaiselta painokairausten ja CPTU-kairausten perusteella arvioiden.



Kuva 10: Paino- ja CPTU-kairausten vertailua sitkeissä savissa.

Kuivakuorikerroksen alarajan tulkinta perustuu kairauksiin ja näytetutkimuksiin. Kuvaan 11 on koottu tavallisimpia tulkintatapoja, jotka eivät yksittäisinä ole täysin luotettavia, mutta samansuuntaisia tuloksia antaessaan kertovat kuivakuoren alarajan sijainnin.



Kuva 11: Kuivakuorikerroksen alarajan tulkinta.

Pehmeikön pintaosissa esiintyvät turve- tai liejakerrokset aiheuttavat huomattavia rajoituksia, lisähankaluuksia tai lisäkustannuksia kysymykseen tuleville pohjanvahvistusmenetelmille. Vaikutus on pienin, kun todennäköisenä pohjanvahvistustapana on massanvaihto kaikkien pehmeiden kerrosten alarajaan ulotettuna, mutta kaikissa muissa ratkaisuisa suurempi. Eloperäisten kerrosten esiintymisestä saadaan usein aavistus kartta- tai ilmakuvatulkinnan tai maastokäynnillä tehtyjen silmämääräisten havaintojen perusteella. Turve- tai liejakerrostuman alarajan kulkua voidaan tutkia:

- kairauksin (esimerkiksi rajapinta alapuoliseen saveen ei aina tulkittavissa)
- tarvittaessa tiheään sijoitetuilla näytepisteillä
- turvekerrosten osalta maatkalla.

Pehmeän kerrostuman erottelu eriin savi- ja silttikerrokseen ei yleensä onnistu pelkkien kairauksen perusteella, vaan erilaisten kairauksen ja näytetutkimusten antamaa tietoa yhdistellen ja tulkiten.

Sivukalteva maasto aiheuttaa pohjatutkimuksille ja geotekniselle suunnittelulle lisävaatimuksia seuraavista syistä:

- Maakerrosten paksuus, lujuus ja konsolidaatitila muuttuu sivukaltevassa maastossa usein jyrkästi ja aiheuttaa tavallista tiheämpää pohjatutkimustarvetta.
- Harjujen lievealueilla tai entisillä rantavyöhykkeillä voi maanpinnassa esiintyä karkearakeisia, usein kivisiä kerroksia, joiden alla on savea tai silttiä.

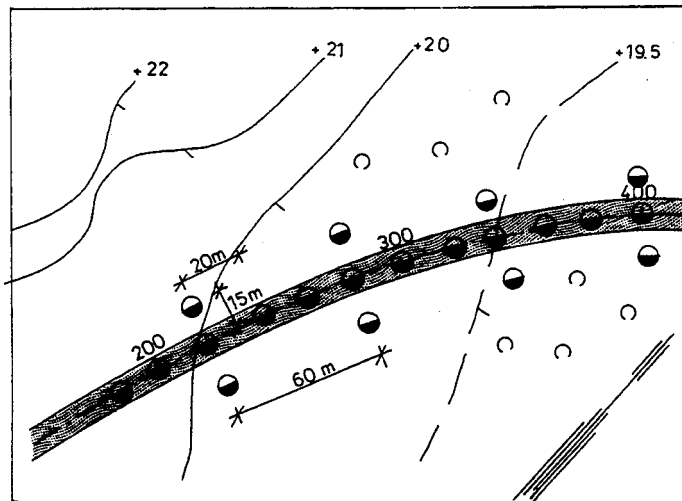
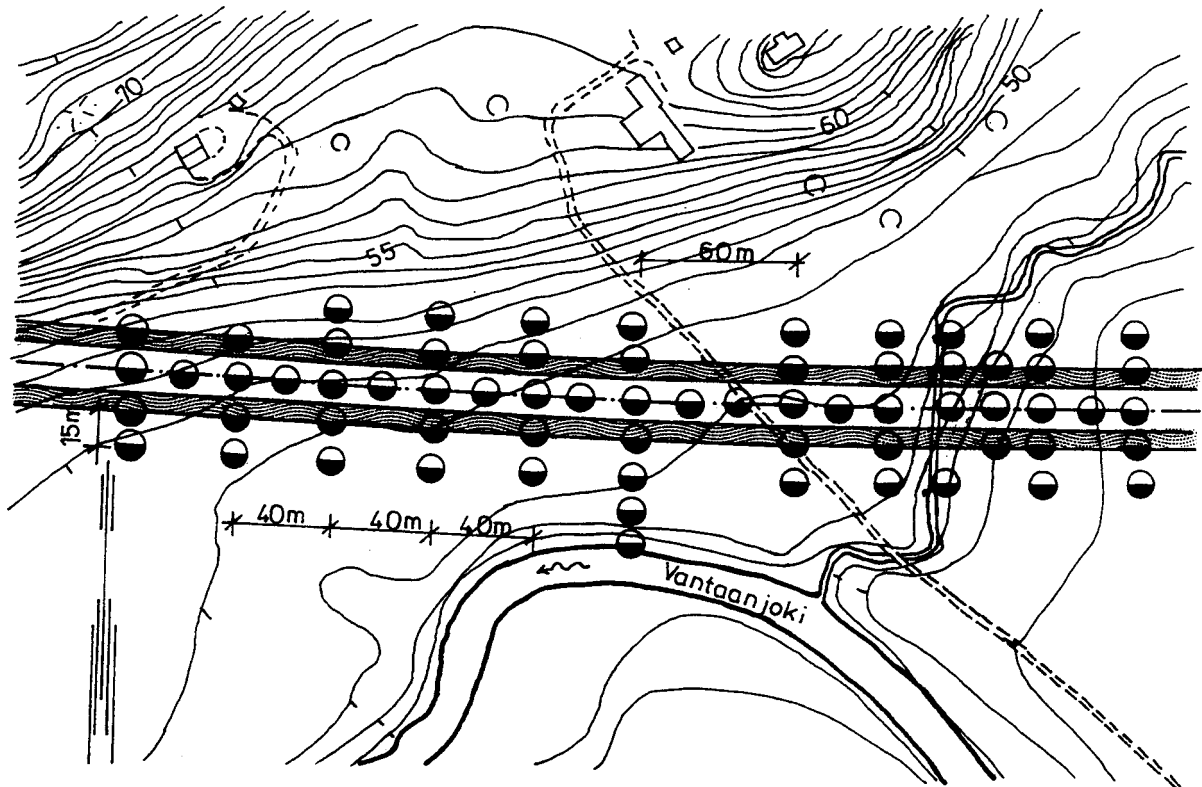
- 
- Alueellinen vakavuus on tarkasteltava ja se on usein määräävä. Tämä antaa aihetta tavallista leveämmän alueen tutkimiseen.
  - Sivukaltevassa maastossa ei aina riitä vakavuuden tarkasteleminen  $n=0$ -menetelmällä, vaan tarvitaan  $cn$ -tarkasteluja, jotka edellyttävät lähtötiedoiksi kolmiakselikokeita ja huokosvedenpaineiden selvittämistä.

Alueellisen vakavuuden tarkasteleminen ja joskus myös  $cn$ -menetelmän käyttö ovat tarpeen myös silloin, kun sivukaltevuus aiheutuu rakentamistoimenpiteistä, kuten esimerkiksi laskuojien kaivusta taikka olemassa olevien uomien perkaamisesta.

Sivukaltevassa maastossa on tarkistettava, että maanpinnan muodot määritetään riittävän leveältä alueelta. Tällöin on myös kiinnitettävä huomiota siihen, ettei vesistöjen pohjan muoto tutkita riittävän tarkasti.

Yleensä maakerrosrajojen selvittämiseen tähtäävä peruskairausverkosto ohjelmoidaan seuraavankaltaisesti, ks. myös kuva 12:

- Kairaukset sijoitetaan poikkileikkaukseen samalla tiheydellä ja samalle leveydelle kuin lopullisissa pohjatutkimuksissa, mutta poikkileikkauksia tutkitaan pidemmin välimatkoin kuin lopullista tarkkuutta tavoiteltaessa. Poikkileikkausten väliin tehdään keskilinjakairaukset.
- Sivukaltevassa maastossa tutkimuspoikkileikkauksia levennetään tapauskohtaisen tarpeen mukaan.
- Poikkileikkausten suositeltava välimatka on lyhyillä pehmeiköillä 40 m ja pitkillä (yli 300 m pituisilla) pehmeiköillä 40-80 m riippuen pohjasuhteiden vaihtelevuudesta.



Kuva 12: Peruskairausverkoston, esimerkiksi painokairausten, ohjelmointi pohjanvahvistusmenetelmän valintaa varten, a) leveä tie sivukaltevassa maastossa, b) kapea tie tasaisessa maastossa.

Kun nykyisen tien viereen rakennetaan uusi tie, esimerkiksi moottoritien toinen ajorata, vanhoista suunnitelmista saatavat nykyisen tien

pohjatutkimustiedot voivat huomattavastikin vähentää pohjatutkimustarvetta etenkin painokairausten osalta.

Alustavat arviot kysymykseen tulevista pohjanvahvistusratkaisuista otetaan tutkimusten ohjelmoinnissa huomioon. Muutamia esimerkkejä tällaisista näkökohdista ovat seuraavankaltaiset:

- Jos vastapenkereitä tai kevennysleikkauksia voidaan tarvita, tämä lisää tutkittavan alueen leveyttä.
- Jos pengerpaalutus vaikuttaa todennäköiseltä perustamistavalta, on tarpeetonta tehdä tiheää painokairausverkostoa, jota lopullista paalupituuden määrittystä varten joudutaan kuitenkin täydentämään heijarikairauksin. Käyttämällä painokairauksen sijasta puristinheijarikairausta saadaan lopullisessa suunnittelussa paremmin hyödynnettäviä tuloksia.
- Tutkimustiheyttä harkittaessa voidaan valita vaihtoehtoisista tiheyksistä parempi, jos tiedetään kysymykseen tulevat pohjanvahvistusvaihtoehdot ja etteivät lisätiedot mene hukkaan minkään vaihtoehdon kohdalla.

Julkaisussa Pohjanvahvistusmenetelmän valinta TIEL 3200446 on esitetty suuntaa-antavasti eri pohjanvahvistusmenetelmien taloudellisuuden riippuvuuksia pengerkorkeudesta, pehmeikkösyvyydestä ja pehmeikön ominaisuuksista.

## 6.2 Pehmeiden kerrosten lujuustutkimukset

Pehmeiden kerrosten leikkauslujuus määritetään yleensä siipikairauksella. Siipikairaukset ohjelmoidaan:

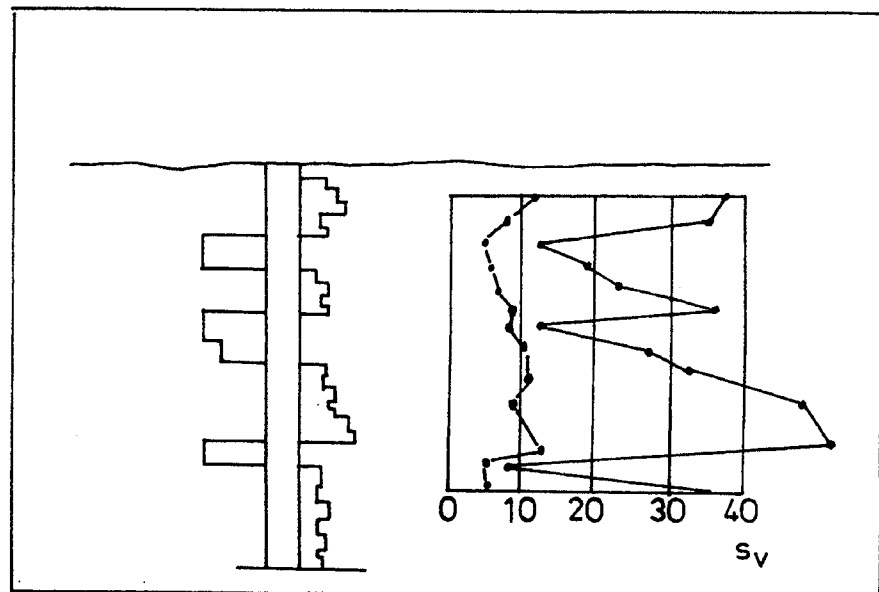
- joko yhtäaikaisesti paino- tai puristinheijarikairausten kanssa, kun on odotettavissa, että maakerrokset ovat hyvin pehmeitä tai pehmeitä (suljettu leikkauslujuus alle 25 kPa),
- tai em. peruskairausten tekemisen jälkeen varsinkin silloin, kun maakerroksista suurin osa on sitkeitä tai kovia, jolloin siipikairaustarve on vähäisempi, siipikairaaminen vaikeampaa ja vähien siipikairausten oikea sijoittaminen oleellisempaa.

Siipikairausten määräksi pehmeillä ja hyvin pehmeillä savikoilla voidaan suositella:

- 20-30 % paino- tai puristinheijarikairausten määrästä, kun pengerkorkeus on alle 4 m
- 10-20 % paino- tai puristinheijarikairausten määrästä suurilla pengerkorkeuksilla, kun kysymykseen tulevia ratkaisuja ovat lähinnä massanvaihto, pengerpaalutus ja syvästabilointi kovilla pilareilla.

Siipikairausten ohjelmointia varten tarvitaan aikaisemmin tehtyjen kairausten suuntaa-antavaa tulkintaa. Tavallisesti painokairausten siirtyessä 100 kg kairausvastuksesta puolikierrosten puolelle maakerrosten suljettu leikkauslujuus on vähintään 20-30 kPa. Ehdottoman luotettavana tätä arviota ei voida pitää varsinkaan silloin, kun pehmeiden kerrosten päällä on täytemaata tai muuta kovaa maata, joka aiheuttaa tankokitkaa, tai yleensäkin suurilla syvyyksillä. Edellä esitetystä voidaan päätellä, että painokairausten ollessa kierron puolella ei alle 3 m penkereillä ole yleensä laajaa siipikairausten tarvetta vakavuuden selvittämistä varten. Tarkistusluontoisia siipikairauksia kannattaa tällöinkin tehdä.

Kovissa kerroksellisissa silttipitoisissa maissa siipikairaus voi antaa harhaanjohtavan huonoja tuloksia, kun maa häiriintyy siipikairaa maahan upotettaessa, jolloin varsinkin erityisen kovan kerroksen alapuolinen ensimmäinen lukema voi olla todellista pienempi. Esimerkki tällaisesta tapauksesta on esitetty kuvassa 13. Tämänkaltaisissa olosuhteissa kannattaa harkita siipikairausten korvaamista muilla tutkimusmenetelmillä.



Kuva 13: Siipikairaus kovassa kerroksellisessa silttipitoisessa maassa.

Kun maakerrosten hienousluku on suuri (yli 80 %), eli varsinkin humuspitoisissa kerroksissa, siipikairalla mitattua leikkauslujuutta ei voida sellaisenaan käyttää laskelmissa, vaan sitä on redusoitava. Tätä tarkoitusta varten varmistetaan, että maanäytteistä määritetään hienousluku häiriintyneen näytteen kartiokokeella. Useimmiten painumaominaisuuksien selvittämistä varten tarvitaan joka tapauksessa enemmän näytteitä kuin pelkästään siipikairausten redusointia varten. Siipikairaustulosten redusointimenettely on esitetty mm. julkaisuissa Tiegeotekniikan yleiset mitoitusperusteet TIEL 3200150 ja Maanvarainen tiepenger savikolla TIEL 3200276.



Pehmeiden kerrosten suljettu leikkauslujuus voidaan myös määrittää häiriintymättömille näytteille laboratoriossa tehtävin kartiokokein. Useimmiten kuitenkin siipikairaustulokset ovat luotettavampia, sillä kartiokoe on herkkä seuraaville virheille:

- Saadaan todellista huonompia tuloksia, jos näytettä ei onnistuta saamaan riittävän häiriintymättömänä.
- Saadaan todellista parempia tuloksia, jos näyte pääsee vähänkin kuivumaan.

### 6.3 Painumaominaisuuksien selvittäminen

Pehmeiden maakerrosten painumaominaisuudet määritetään häiriintymättömille näytteille tehtävin ödometrikokein. Silloin, kun maakerrokset voidaan suhteellisen luotettavasti olettaa normaalikonsolidoituneiksi, voidaan ödometrikokeiden antaman tiedon jatkeena käyttää painumien laskemiseen maan vesipitoisuuteen perustuvia likimääräiskaavoja, joiden pehmeikkökohtainen "korjauskerroin" tarkistetaan harvakseltaan tehdyin ödometrikokein. Vesipitoisuus voidaan määrittää maanäytteistä taikka jatkuvana profiilina sähkövastusluotauksella.

Ödometrikokeiden lukumäärää harkittaessa otetaan huomioon mm. seuraavat näkökohdat:

- Kun pengerkorkeus on maapohjan lujuteen nähden niin suuri, että perustamisratkaisuna tulevat kysymykseen vain pengerpaalutus, massanvaihto tai syvästabilointi kovilla pilareilla, ei mitoitukseen tarvita tarkkoja tietoja pohjamaan painumaominaisuuksista. Kuitenkin päätien penkereen vierellä voi olla matalampia penkereitä, joiden perustamisen suunnittelussa painumaominaisuuksien tunteminen on tarpeen.
- Kun harkittavien ratkaisujen joukossa on esimerkiksi pystyjoitus, ylipenger tai pengerkevennys, ödometrikokeiden tarve on erityisen suuri jo vertailua varten tehtävien alustavien mitoitusten lähtötiedoksi.
- On parempi tutkia ödometrikokein muutamia näytepisteitä riittävän kattavasti syvyysuunnassa kuin useampia pisteitä huonommalla syvyysuuntaisella kattavuudella.
- Näytteenottoa ohjelmoitaessa ei tarvitse vielä ratkaista ödometrikokeiden määrää, sillä lisäkustannus näytteiden ottamisesta häiriintymättöminä on mitätön verrattuna häiriintyneiden näytteiden ottamiseen.
- Osa ödometrikokeista voi epäonnistua esimerkiksi näytteiden häiriintymisen takia ja tästä syystä kokeiden määrän mitoituksessa on syytä tiettyyn varmuusvaraan.

Ödometrikokeiden tiheydeksi suositellaan 1 piste / 150-200 m, kun selvitetään pystyjoituksen, yliperikereen tai pengerkevennyksen soveltuvuutta. Syvästabiloinnin mitoitus on painumaparametreille vähemmän herkkä. Maanvaraisratkaisuisissa ödometrikokeiden antaman tiedon jatkeena voidaan tapauksesta riippuen käyttää myös edellä mainittuja vesipitoisuuteen perustuvia likimääräismenetelmiä.

#### 6.4 Pohjatutkimukset nykyisen tien kohdalla

Nykyiset tiet vaikuttavat tutkimusten ohjelmointiin silloin, kun:

- nykyisen tien vaurioita korjataan
- nykyistä tietä korotetaan tai levennetään
- nykyisen tien viereen rakennetaan uusi tie
- uusi tie risteää nykyistä tietä.

Nykyisen tien perustamistapa selvitetään aloittaen vanhojen suunnitelmien tarkastelusta. Jos perustamistavasta tai sen tarkemmasta toteutumasta jää epävarmuutta, voidaan joutua tekemään tutkimuksia asian varmistamiseksi. Tavallisimpia tapauksia on massanvaihdon toteutuneen syvyyden tarkistaminen porauksin. Samaan tarkoitukseen on joskus käytetty myös maatutkaa, mutta kokeilut eivät yleensä ole olleet onnistuneita. Massanvaihdon täyttömateriaaliin sekoittuu usein siinä määrin pehmeää pohjamaata, että se vaikeuttaa rajakerrosten tulkintaa maatutkalla.

Jos nykyinen tie on rakennettu maanvaraisena tai mahdollisesti kevennystä käyttäen, on painumaominaisuuksien selvittämiseen käytettävissä itse asiassa täysimittakaavainen painumakoe. Tällöin selvitetään:

- toteutuneet lisäpäälystykset aloittaen kunnossapitäjien haastattelemisesta ja merkittävien lisäpäälystysten tapauksessa tarkemmin tutkimuksin
- tien tapahtunut painuma (= tien alkuperäinen korkeus - tien nykyinen korkeus + toteutuneet lisäpäälystykset)
- viitteellisiä tietoja painuman ajallisesta kehityksestä aloittaen em. haastatteluista ja mahdollisesti käynnistämällä järjestelmällinen seuranta suunnitteluajaksi
- toteutuneet kuormitukset, lähinnä päällysrakenteen tai penkereen ja pohjamaan rajapinta sekä mahdollisten kevennysten toteutuma.

Edellä mainituissa päällystekerroksen paksuuden, rakennekerrosten ja penkereen paksuuden ja kevennyspaksuuden tutkimuksissa maatutka on osoittautunut erittäin käyttökelpoiseksi, nopeaksi ja kustannuksiltaan edulliseksi menetelmäksi.

Nykyisen tien rakennekerrokset ja pengertäyte voivat aiheuttaa hankaluuksia tai lisäkustannuksia pengerpaalutuksessa, pystyjoituksessa tai erityisesti syvästabiloinnissa. Hankaluus on sitä suurempi, mitä kivisempää ja lohkareisempaa materiaalia täyttö on ja mitä syvemmälle se ulottuu. Täyteen laadun selvittäminen kannattaa aloittaa vanhojen suunnitelmien tarkastelusta ja rakentajien haastattelusta. Jos muihin tarkoituksiin käytetään maatutkaa, voidaan sillä yrittää saada selville myös täyteen lohkareisuutta, mutta suurta tarkkuutta ei ole odotettavissa esimerkiksi saveen sekoittuneen täytön tutkimisessa. Koekuoppatutkimus voi olla usein välttämätön.

Erityisesti silloin, kun nykyistä tietä korjataan, korotetaan, levennetään tai ylitetään ja perustamistapa on joko nykyisellä tai uudella tiellä maanvarainen tai kevennys, on tutkimuksissa kiinnitettävä huomiota nykyisen tien alla tapahtuneeseen pohjamaan lujuus- ja painumaominaisuuksien muutokseen. Tätä varten:

- tehdään siipikairauksia sekä penkereen alta että luonnontilaisesta maasta
- tehdään ödometrikokeita penkereen alta sekä tarvittaessa myös luonnontilaisesta maasta
- selvitetään mahdollisesti tapahtunut pohjavedenpinnan muutos.

Nykyisen tien suunnitelmasta saadaan pohjatutkimustietoja, joista hyödynnettäviä ovat ainakin pehmeiden kerrosten paksuutta koskevat sekä näytetiedot. Vanhojen siipikairausten luotettavuuden arvioinnissa pitää ottaa huomioon, että ennen 1970-luvun puoliväliä siipikairaukset useimmiten tehtiin momenttiavainta käyttäen, mikä antaa todellista lujempia tuloksia.

Nykyisen tien kohdalla tehtävät tutkimukset vaativat alkureiän tekemisen penkereeseen porakoneella. Samalla dokumentoidaan päällystepaksuus, pengertäytteen laatu ja pengertäytteen alapinta.

Jo tutkimusten ohjelmointivaiheessa selvitetään, pitääkö tutkimuksia tehdä myös mahdollista kiertotietä varten.

## 6.5 Ympäristöön kohdistuvat tutkimukset

Pohjanvahvistusmenetelmän valintaan tähtäävien tutkimusten ohjelmoinnissa otetaan mahdollisten ympäristövaikutusten selvittäminen huomioon:

- ulottamalla tutkimuspoikkileikkaukset lähettyvillä oleviin rakennuksiin tai rakenteisiin asti, kun on pelättävissä esimerkiksi työnaikaisten kaivutilanteiden aiheuttamia vakavuusongelmia, pohjaantäytössä pehmeiden massojen sivusiirtymiä (jopa

- 
- useiden kymmenien metrien etäisyydellä) tai paalutuksesta aiheutuvaa tärinää, sivusiirtymää, painumaa tai huokosvedenpaineen nousua (harvoin yli 20-40 m etäisyydellä)
  - sijoittamalla pohjavesiputkia ja näytepisteitä myös tiealueen ulkopuolella olevien mahdollisessa vaaravyöhykkeessä olevien rakennusten tai rakenteiden viereen, kun on odotettavissa pohjaveden alenemista, joka voi karkeiden maakerrosten välityksellä ulottua satojenkin metrien etäisyydelle
  - tutkimalla arkistoselvityksenä ja vähintään silmämääräisenä tarkasteluna rakennusten ja muiden rakenteiden tyyppi, kunto, perustamistapa ja -taso
  - selvittämällä pohjavesisuojausten tarve pohjavesialueilla
  - selvittämällä paineellisen pohjaveden mahdollinen esiintyminen
  - selvittämällä luonnonsuojelullisista näkökohdista pohjanvahvistusmenetelmille mahdollisesti aiheutuvat rajoitukset.

## **7 POHJANVAHVISTUKSEN MITOITUSTA PALVELEVAT TUTKIMUKSET**

### **7.1 Tutkimustarkkuuden vaikutus mitoitustarkkuuteen**

Pohjatutkimusten epätarkkuus voi aiheuttaa tien pehmeikköratkaisujen suunnitteluun seuraavia periaatteessa erilaisia virheitä tai epätarkkuuksia:

- Pohjanvahvistustoimenpiteen määrää ei tiedetä etukäteen tarkasti, mutta tieto tarkentuu toteutusvaiheessa ilman, että on aiheutunut merkittävää haittaa. Esimerkiksi saven alarajaan ulotettava syvästabilointipilari tehdään ennalta arvioitua pitempänä tai lyhyempänä, kun tieto saven alarajasta on ollut epätarkka.
- Pohjanvahvistustoimenpiteen määrää ei tiedetä etukäteen tarkasti ja tästä aiheutuu vaikeammin korjattavaa haittaa, esimerkiksi hankitaan väärän pituisia paaluja.
- Pohjanvahvistustoimenpide ylimitoitetaan. Esimerkiksi pystyojatiheys, pilaristabilointitiheys tai paalutiheys on tarpeettoman suuri tai valitaan tarpeettoman kallis pohjanvahvistusratkaisu.
- Pohjanvahvistustoimenpide alimitoitetaan tai valitaan liian epävarma pohjanvahvistusratkaisu.

Puutteellisista pohjatutkimuksista aiheutuvia käytännössä esiintyneitä pohjanvahvistusratkaisujen alimitoitustapauksia ovat mm.:

- liian pieni pystyojatiheys
- huono työnaikainen vakavuus pystyojakentän kuormittamisessa
- huomiotta jääneiden painumalajien, kuten sekundääripainuman tai plastisten siirtymien, esiintyminen etenkin pystyojitustapauksissa
- liian matala kevennys

- huono vakavuus työnaikaisissa kaivutilanteissa
- paaluhattujen huono peittävyys tai hattupaalutuksen tekeminen, kun paalulaatta olisi ollut oikea ratkaisu
- massanvaihdon tai pohjaantäytön jääminen tarvittavaa matalammaksi.

Lopullista pohjatutkimustarkkuutta harkittaessa kannattaa tapauskohtaisesti tarkastella, mitä lähtötietoa tarkentamalla olisi saavutettavissa mitoituksien hyötyä. Tyypillisiä mitoituksen kannalta ratkaisevan tärkeitä parametreja ovat:

- pystyjoituksessa vaakasuuntainen konsolidaatiokerroin  $c_h$
- pengerkevennyksessä konsolidaatiojännitys  $\sigma_c$
- syvästabiloinnissa stabiloidun maan lujuus.

## 7.2 Pengerpaalutus

Ryhdyttäessä ohjelmoimaan pengerpaalutuksen vaatimia lopullisia pohjatutkimuksia on yleensä aikaisempien pohjatutkimusten perusteella yleiskäsitys maakerrosrajoista sekä maakerrosten lujuus- ja painumaominaisuuksista. Tarkentavat tutkimukset kohdistuvat:

- ensisijassa paalupituuden tarkentamiseen
- sen tarkistamiseen, aiheutuuko paalutukseen erityisiä työtekniisiä vaikeuksia maakerrosten kivisyydestä tai lohkaraisuudesta, kaltevasta kallionpinnasta, paalutuskaluston vaikeasta liikkumisesta tai paalulaatan vaikeasta rakennettavuudesta
- tarvittaessa maakerrosten lujuus- ja painumaominaisuuksien tarkentamiseen esimerkiksi paalulaatan tai -hattujen alapuolisten täyttöjen vakavuus- ja painumatarkasteluja varten tai muuta negatiivisen vaippahankauksen tarkastelemista varten
- paalutuksen mahdollisten ympäristövaikutusten selvittämiseen ja minimointiin.

### Paalupituus

Tukipaaluna toimivan lyöntipaalun tunkeutumissyvyys määritetään yleensä heijarikairausten perusteella, jolloin useimmiten oletetaan paalujen tunkeutuvan heijarikairausten päättymissyvyyteen.

Painokairaus on paalupituuden määrittämiseen selvästi heijarikairausta epäluotettavampi menetelmä, mutta se kertoo kuitenkin paalupituuden minimiarvon. Kun maakerrostumat ovat sellaiset, että heijarikairausten ja painokairausten tunkeutumissyvyydet ovat lähellä toisiaan ja mieluiten vielä porakonekairauksin varmistettu kallionpinta lähellä kairausten päättymissyvyyttä, painokairauksillekin voidaan paalupituuden

---

määrittämisessä tapauskohtaisen harkinnan mukaan antaa painoa ja näin vähentää heijarikairaustarvetta.

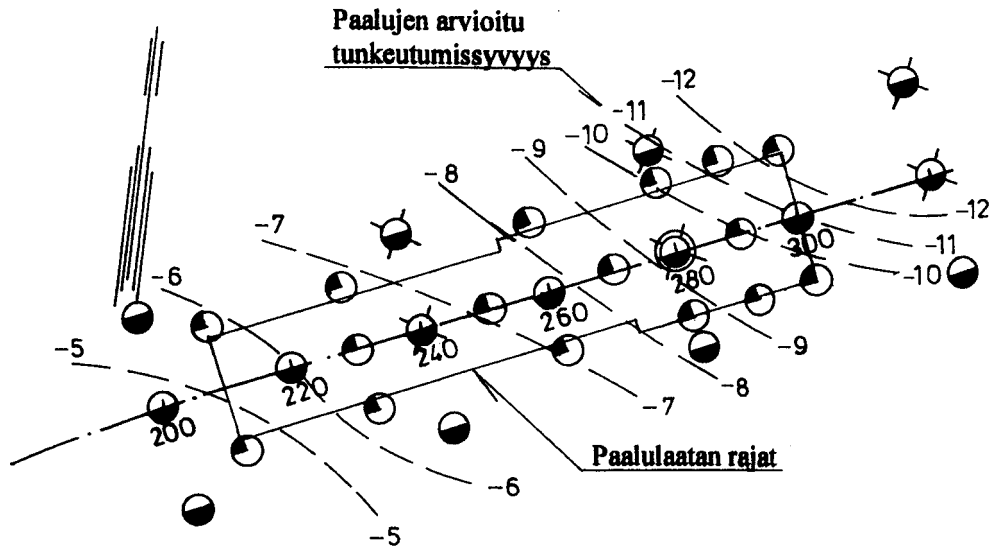
Heijarikairaustiheyttä harkittaessa voidaan ottaa huomioon seuraavia näkökohtia:

- Heijarikairausmetri maksaa keskimäärin hiukan vähemmän kuin 250 mm \* 250 mm teräsbetonipaalumetri. Tätä voidaan käyttää hyväksi verrattaessa yhtä heijarikairausta kohti lyötävää paalumäärää.
- Paalupituuden arvioinnissa taloudellinen optimi on aika lähellä sitä, että 90 %:ssa paaluista jää lyhyt "kanto" ja 10 % paaluista "sukeltaa".
- Paaluja lyötäessä voidaan jossain määrin vielä harrastaa hienosäätöä siten, että paalun jäädessä vaikkapa 3 m arvioitua lyhyemmäksi sen viereen tulevan paalun voidaan myös arvata jäävän suunnitteluvaiheessa arvioitua lyhyemmäksi.
- Kun paalupituus on paalujen jatkamistarpeen rajoilla (noin 15 m), tutkimustarkkuusvaatimukset ovat tavallista suuremmat.
- Kun paalupituus on tavallista pienempi (alle 5 m), tutkimustarkkuusvaatimukset ovat suurimmat.

Edellä esitettyjen näkökohtien perusteella voidaan tehdä seuraavia johtopäätöksiä:

- Usein sopiva yleissuositus on 1 heijarikairaus noin 150 m<sup>2</sup> kohti eli esimerkiksi kairaukset 20 m välein olevista poikkileikkauksista 10 m välein täydennettyinä poikkileikkausten puolivälistä yhdellä kairauksella tai kaksiajorataisilla teillä kahdella kairauksella.
- Tasalaaatuisissa pohjasuhteissa voidaan tyytyä yhteen kairaukseen 200-250 m<sup>2</sup> kohti eli kairaukset likimain 15 m \* 15 m ruutuun.
- Kun paalut saattavat olla lyhyitä (alle 5 m), 1 kairaus 100 m<sup>2</sup> kohti on sopiva suositus.

Paalujen tunkeutumissyvyyttä ja pohjatutkimusten tarkentamistarvetta on havainnollista tarkastella kartalla, johon paalujen arvioitu tunkeutumissyvyys merkitään käyrinä, ks. kuva 14.



Kuva 14: Paalupituuden määrittämistä varten tehtyjä kairauksia ja niiden perusteella laadittu kartta arvioituista paalupituuksista.

Porakonekairausta käytetään paalupituuden määrittämisessä:

- haettaessa paalupituuden maksimiarvoa erityisesti suurissa paalutuskohteissa, joissa saavutettava säästö on merkittävä
- erityisen vaikeissa olosuhteissa esimerkiksi paalujen tukeutuessa vinoon kallionpintaan.

Kun porakonekairauksilla tavoitellaan paalupituuden maksimiarvoa, sopiva tutkimusmäärä on noin yksi porakonekairaus 80-150 lyötävää paalua kohti. Usein pengerraalutukset rajautuvat paaluilla perustettavaan siltaan, jonka tutkimuksista saadaan riittävä käsitys porakone- ja heijarikairaussyvyyden erotuksesta ko. olosuhteissa.

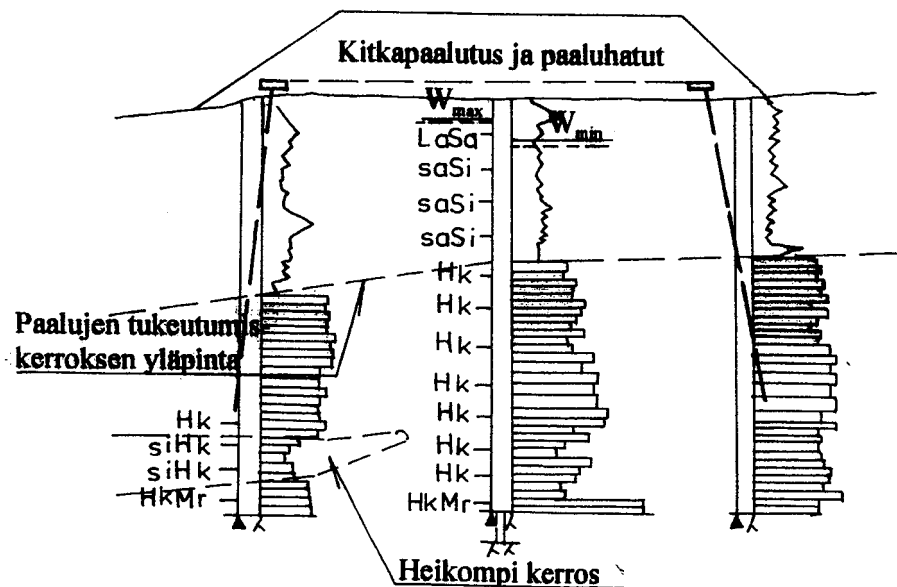
Paalujen tukeutuessa erityisen vinoon kallionpintaan porauksia tehdään tarvittaessa tiheämminkin kuin 5 m välein, jotta kallionpinnan kulku ja erikoistoimenpiteiden tarve saadaan selvitettyksi.

### Kitka- ja koheesiopaalut

Kitkapaalujen suunnittelua varten selvitetään:

- maakerrosrajat kiinnittäen erityistä huomiota paalujen tukeutumiskerroksen yläpinnan sijaintiin sekä siihen, onko paalujen ajatellun päättämistason alapuolella painuvia heikompia kerroksia, ks. kuva 15

- paalujen tukeutumiskerroksen tiiviys heijarikairauksin ja puristin- tai painokairauksin sekä maalaji näytetutkimuksin (näytepisteiden välimatka yleensä 40-80 m).



Kuva 15: Esimerkki kitkapaalutusta varten tehtävistä pohjatutkimuksista ja niillä selvitettävistä kysymyksistä.

Kitkapaalutustapauksessa on oltava tukipaalutusvaihtoehtoa varten riittävästi pohjatutkimustietoja, jotta tarvittaessa voidaan tarkistaa valinta kitkapaalujen ja tukipaalujen käytön välillä.

Kitkapaalujen mitoitusta varten kannattaa usein tehdä koepaalutuksia sekä paalujen dynaamisia tai staattisia koekuormituksia.

Koheesiopaalujen suunnittelua varten tutkitaan:

- maakerrosrajat paino- ja puristinkairauksin
- koheesiomaakerrosten lujuus siipikairauksin
- koheesiomaakerrosten painumaominaisuudet ödometrikokein

Koheesiopaaluja käytetään nykyisin vain erikoistapauksissa alempiuokkaisilla teillä. Myös kitkapaalujen käyttömahdollisuuksia on vähentänyt yhtenäisten paalulaattojen yleistyminen. Paalulaatat eivät yleensä kestä epätasaisia painumia.



## **Paalujen lyöntiä hankaloittavat olosuhteet**

Paalutuksen kannalta haitallisesta kivisyydestä ja lohkareisuudesta kertovat parhaiten porakonekairauksessa tehdyt lohkareiden läpiporaukset. Myös kairausten huomattavan vaihteleva tunkeutumissyvyys samassa maakerroksessa on usein merkki kivisyydestä tai lohkareisuudesta. Tästä syystä on tärkeää, että myös poikkeuksellisen lyhyiksi jääneet kairaukset tulostetaan.

Kun paalujen lyöntiä hankaloittava kerros, esimerkiksi lohkareinen täytemaa, sijaitsee maanpinnassa, koekuoppa on usein sopiva menetelmä ko. kerroksen paalutusta haittaavien ominaisuuksien selvittämiseksi.

Paaluissa käytetään paalun kärjen liukumisvaaran estämiseksi ja paalujen lyönnin aikaisen katkeamisvaaran vähentämiseksi kalliokärkiä seuraavankaltaisissa olosuhteissa:

- Paalut tukeutuvat kaltevaan kallionpintaan.
- Paalut ovat lyhyitä.
- Paalun pituudesta suurin osa on pehmeässä savessa ja vain lyhyt osa paalun alapäästä on maakerroksessa, josta paalu saa sivutukea.
- Maakerrokset ovat erityisen kivisiä tai lohkareisia, jolloin paalun tunkeutuminen sivuvastusta antavaan maakerrokseen on epävarmaa ja toisaalta paalu helposti katkeaa ko. kerrokseen tunkeutuessaan.

Kalliokärkien tarpeen selvittäminen edellyttää tavallista tiheämmin tehtäviä heijarikairauksia ja usein myös porakonekairauksia.

## **Pehmeiden maakerrosten lujuus- ja painumaominaisuudet**

Paalulaattaan tai -hattuihin rajautuvien maarakenteiden stabiliteetti ja mahdolliset painumat ja niistä paaluille aiheutuva lisäkuormitus on selvitettävä ainakin seuraavissa tapauksissa:

- Paalulaatta tai -hatut sijoitetaan alkuperäisen maanpinnan yläpuolelle joko siksi, että näin nimenomaisesti suunnitellaan, tai siksi, että paalutuksen vaatiman työalustan tekeminen johtaa tähän.
- Sivukaltevassa maastossa.
- Siltoihin rajautuvissa paalutuksissa vakavuus silta-aukon suuntaan.
- Kun pohjavesi alenee.
- Luiskien stabiliteetti paalulaatan reunan ulkopuolella.

Pehmeiden maakerrosten lujuus selvitetään tavallisesti siipikairauksin, joita tehdään jo pohjanvahvistusmenetelmän valintaa varten. Tarvittaessa tutkimuksia tihennetään.

---

Maakerrosten konsolidaatiotilan selvittäminen ödometrikokein voi olla tarpeen esimerkiksi, kun maaperä on ylikonsolidoitunutta ja paalulaatta tai -hatut halutaan sijoittaa alkuperäistä maanpintaa ylemmäs ilman, että niiden alla tapahtuu konsolidaatiopainumaa.

### **Paalutuksen ympäristövaikutukset**

Yleensä paalutuksen ympäristövaikutusten tarkka selvittäminen etukäteen pohjatutkimusten ja laskelmien perusteella ei ole mahdollista. Sitä vastoin on erittäin tärkeää tunnistaa mahdolliset odotettavissa olevat vaikutukset, ottaa ne pohjatutkimuksissa ja suunnittelussa huomioon, ohjelmoida työnaikaiset tarkkailututkimukset ja etukäteen alustavasti suunnitella ratkaisujen työnaikainen tarkentaminen.

Paineellisen pohjaveden mahdollinen esiintyminen on paalutustapauksissa aina selvitettävä. Alkuselvytys tehdään karttatarkasteluna ja tarvittaessa asennetaan pohjavesiputkia.

Kun savimaassa on odotettavissa paalujen lyönnistä aiheutuvaa häiriintymistä ja stabiliteettiongelmia, selvitetään:

- saven leikkauslujuusominaisuudet ja häiriintymisherkkyys siipikairauksin ja tarvittaessa myös kartiokokein ja kolmiakselikokein.
- saven vesipitoisuus ja hienousluku.
- maakerrosten kulku.

Kun siiltimaassa tai löyhässä kitkamaassa on odotettavissa paalutuksesta aiheutuvaa huokosvedenpaineen kohoamista ja siitä aiheutuvia stabiliteettiongelmia taikka maakerrosten painumaa, selvitetään edellä mainittujen lisäksi erityisen tärkeänä pohjaveden pinta.

Eryteisesti tiiviitä tai kivisiä maakerroksia paaluilla läpäistäessä aiheutuu tärinää, joka voi olla lähiympäristön rakennuksille tai rakenteille haitallista. Tällaisten maakerrosten esiintyminen selvitetään pohjatutkimuksin, kun työskennellään vaurioitumisherkkien rakenteiden läheisyydessä.

### **7.3 Syvästabilointi**

Syvästabiloinnissa ovat tarvittavien lopullisten tutkimusten kannalta hyvin erilaisia tapauksia muun muassa:

- puolilujan pilaroinnin ulottaminen painuvien kerrosten alarajaan
- myötääviksi mitoitettavat pehmeät pilarit
- lujat pilarit
- määrämittaiset pilaroinnit.

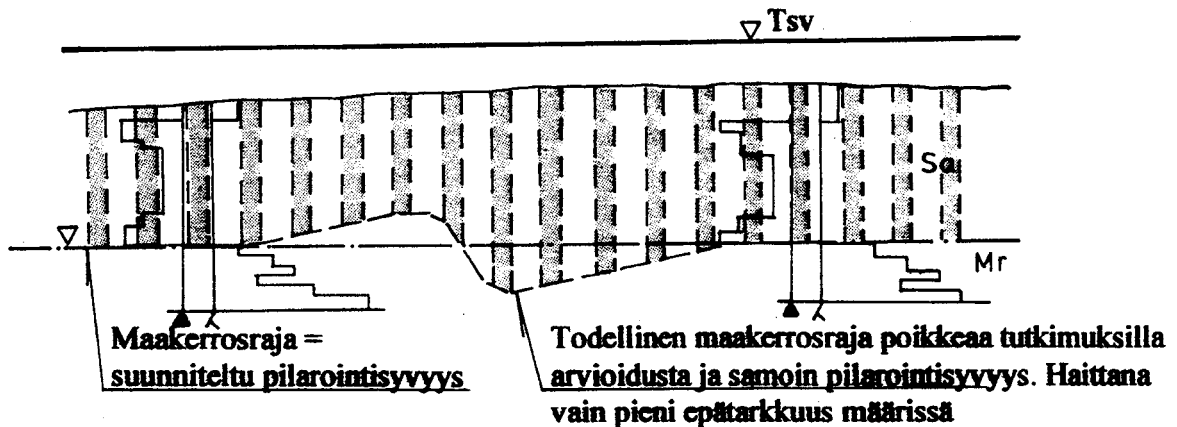
Kaikissa tapauksissa oleellisin tutkimusten kohde on stabiloidun maan lujisuuden selvittäminen. Muiden tutkimusten tarvittava laajuus on esimerkiksi edellä mainituissa tapauksissa hyvin erilainen. Yleensä pohjanvahvistusratkaisua valittaessa on jo hahmottunut käsitys syvästabilointiratkaisun tyypistä ja ainakin jonkinlaisilla stabilointikokeilla on varmistuttu maapohjan stabiloituvuudesta.

## Pilaripituus

Pilaroinnin työtapa on sellainen, että koneen vispilä upotetaan pilarin alapään suunniteltuun tasoon ja sideaineen syöttö ja pilarin sekoittaminen aloitetaan vispilää ylös vedettäessä. Työtavasta johtuen pilaripituuden etukäteen selvittäminen pohjatutkimuksin ei periaatteessa vaadi samaa tarkkuutta kuin esimerkiksi paalupituuden selvittäminen. Pilaripituuden määrittämiseen tähtäävien pohjatutkimusten kannalta erilaiset tapaukset voidaan jaotella seuraaviin kolmeen ryhmään:

- Pilarit ulotetaan selväpiirteiseen saven ja kovemman maakerroksen rajaon, jonka tulkinnasta ei ole epäselvyyttä pilarointikoneen vispilää upotettaessa. Tutkimustarkkuusvaatimukset ovat vähäisimmät.
- Pilarit ulotetaan maakerrosrajaon, jonka tulkinta on epävarmempi, esimerkiksi saven ja siltin rajaon taikka saven ja ylikonsolidoituneemman saven rajaon.
- Pilarit tehdään määrämittäisinä niin, että pilaripituus mitoitetaan painumalaskelmien perusteella. Tutkimuksissa kiinnitetään erityistä huomiota savikerrostuman alaosan painumaominaisuuksiin.

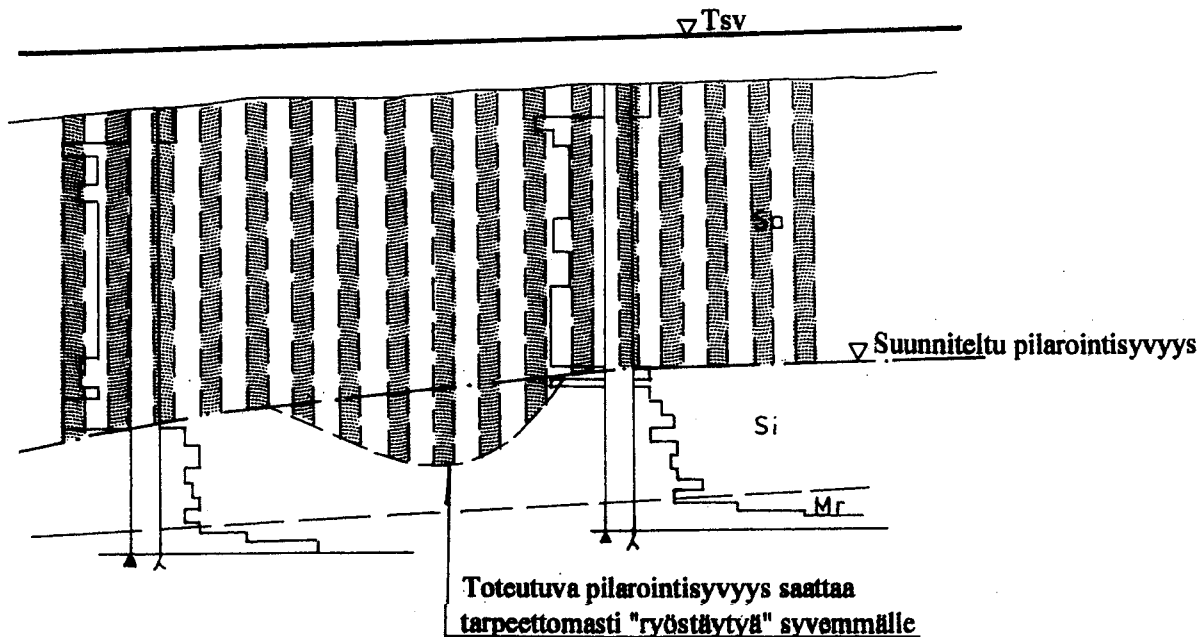
Kuva 16 esittää tapausta, jossa pilarit ulotetaan selväpiirteiseen saven ja kovemman maakerroksen rajaon. Tällöin tehdään pohjanvahvistusmenetelmän valintaa varten aikaisemmin tehtyjen kairausten lisäksi täydentäviä kairauksia, jotka voivat olla painokairauksia, puristinheijarikairauksia tai CPTU-kairauksia. Kairausten tihentäminen palvelee lähinnä massalaskennan tarkentamista ja täydentämistarve voi tasalaatuisissa olosuhteissa olla melko vähäistä. Oleellista on varmistaa, ettei pilaripituus ylitä arvioitua siinä määrin, että valittu ratkaisu pilarien ulottamisesta saven alarajaan olisikin ollut edullisempi korvata tapauksesta riippuen joko määrämittäisellä pilaroinnilla tai esimerkiksi pengerpaalutuksella. Nykyisellä kalustolla pystytään tekemään 18-20 metriä pitkiä pilareita. Usein pengerpaalutus tulee kustannuksiltaan pilarointia edullisemmaksi jo pienemmilläkin syvyyksillä. Erityisen lyhyisiin pilareihin ei liity työtekniisiä tai rakenteen toimintaa koskevia ongelmia, joten ne eivät sinänsä lisää tutkimustarkkuusvaatimuksia samaan tapaan kuin lyhyet lyöntipaalut.



Kuva 16: Syvästabilointi ulottuu saven ja moreenin rajapintaan.

Kun pilarit ulotetaan esimerkiksi saven ja siltin rajaan, ks. kuva 17, taikka saven ja ylikonsolidoituneemman saven rajaan, tutkimuksille aiheutuu lisävaatimuksia seuraavien näkökohtien takia:

- Toteutuva pilarimetrimäärä saattaa tämänkaltaisissa olosuhteissa ylittää suunnittelijan arvioiman, kun pilarointi tavallisesti tehdään metrihinnoilla ja pilarointikoneen vispilä on mahdollista upottaa suunniteltua tasoa syvemmälle. Riittävillä tutkimuksilla ja pilaripituusvaatimusten tapauskohtaisella harkinnalla voidaan varmistaa, ettei pilareita uloteta kerrokseen, jonka pilarointi ei ole tarpeellista.
- Pilaripituuden määritykseen tarvittavien maakerrosrajojen tulkinnassa CPTU-kairaus antaa paremman tarkkuuden kuin painokairaus.
- Lujilla pilareilla on tutkimuksissa kiinnitettävä huomiota maan lujuusominaisuuksiin pilarien päättämistasossa, jotta pilarin alapään geotekninen kantavuus tulee riittäväksi. Tutkimuksina käytetään siipikairauksia ja näytetutkimuksia.



Kuva 17: Syvästabilointi, joka ulotetaan savi- ja silttikerroksen rajaan.

### Pehmeiden maakerrosten luonnontilaiset ominaisuudet

Syvästabiloinnin suunnittelua varten selvitetään pehmeistä maakerroksista:

- laboratoriotutkimuksin maalaji, vesipitoisuus, hienousluku, humuspitoisuus ja rikkipitoisuus sopivien sideaineiden alustavaa valintaa varten, stabiloinnin laboratorio- ja kenttäkokeiden paikan valitsemiseksi ja ko. tarkempien kokeiden edustavuuden arvioimiseksi
- lujuusominaisuudet, jotta voidaan valita stabiloinnin toimintatapa, ja tarvittaessa lisätutkimuksia, jotta stabilointi voidaan mitoittaa vakavuuden kannalta
- ödometrikokein painumaominaisuudet, jotta yhdessä pohjamaan kanssa toimivat stabiloinnit voidaan mitoittaa.

Tavanomaisimmissa stabilointiratkaisuissa, joissa pilarointi ulotetaan saven alarajaan, suuri osa edellä mainituista tiedoista on saatu jo pohjanvahvistusmenetelmän valintaa varten tehdyillä tutkimuksilla ja lopullista mitoitusta varten tarvitaan vain muutamia täydennyksiä. Oleellisinta on tarkistaa näytetietojen riittävyys sen varmistamiseksi, että stabiloinnin laboratorio- ja kenttäkokeet edustavat kyseistä pehmeikköosuutta eikä jollain kohtaa esiinny huomattavasti huonommin stabiloituviksi arvioitavia maakerroksia. Ohjeellinen näytepisteiden välimatka tähän tarkoitukseen on 40-100 m. Tiheimmin sijoitetaan näytepisteitä silloin, kun maakerrokset ovat erityisen humuspitoisia ja varsinkin, kun humuspitoisuus vaihtelee.

Kun vakavuuslaskelmat määräävät stabiloinnin mitoituksen, sopiva siipikairaustiheys on 1-2 siipikairausta 20-40 tiimetriä kohti.

Pehmeän pohjamaan painumaominaisuudet vaikuttavat toisaalta siihen, kuinka suuri osa kuormituksesta menee pilarien kannettavaksi, ja toisaalta myötäväiksi mitoitettavilla pilareilla penkereen painuman suuruuteen. Tavanomaisissa tapauksissa puolilujien pilarien kannettavaksi tulee noin 85-95 % kokonaispengerkuormasta tuloksen olematta erityisen herkkä painumaparametrien vaihtelulle. Myötäävienkin pilarien painuma on lähinnä rakentamisen aikaista ja joka tapauksessa melko pientä, joten painumaparametrien tarvittava tarkkuus ei ole samaa luokkaa kuin esimerkiksi pystyjoituksen suunnittelua varten tarvitaan. Useimmiten yksi ödometrikoe 150-200 tiimetriä kohti riittää. Mitoituksen kannalta oleellisin selvitettävä parametri on mahdollinen pienikin ylikonsolidaatio. Tällöin voidaan harkita maan kokoonpuristuvuusmoduulina käytettäväksi ylikonsolidoituneen alueen moduulia, mikä pienentää pilareille tulevaa kuormaa eikä pilarien väliselle savelle tuleva pieni lisäkuormitus vielä aiheuta painumaa.

Määrämittaiset pilaroinnit käsitellään jäljempänä erikseen.

### **Stabiloidun maan lujuus**

Kaikissa stabilointiratkaisuissa mitoituksen ja kustannusten muodostumisen kannalta olennaisin tekijä on stabiloidulle maalle laskelmissa käytettävä lujuus. Stabiloidun maan lujuus voidaan periaatteessa määrittää:

- joko stabiloiduille koekappaleille tehtävin laboratoriokeuin
- tai tekemällä maastossa koestabilointi ja koestamalla se kairauksin, in situ-mittauksin tai otetuille näytteille tehtävin laboratoriokeuin.

Sekä laboratoriokeiden että maastossa tehtävien koestabilointien ohjelmointi aloitetaan harkitsemalla tapauskohtaisesti kokeella selvitettävien asioiden tärkeys- ja oleellisuusjärjestys ja kunkin selvittämiseen tarvittava vaihtoehtojen määrä esimerkiksi seuraavaan tapaan:

- Sideaineen valinta.
- Sideaineen määrä.
- Työtekniset detaljit, kuten esimerkiksi vispilän nostonopeus.
- Lujittumisaika.

Esimerkiksi koepilarin halkaisija tai muut vastaavat tekijät, joiden merkitys arvioidaan vähäiseksi, pidetään kokeessa vakioina. Oleellista on myös alkuvaiheessa alustavasti valita koestusmenetelmät ja havaintojen tarvittava määrä, jotta hajonnan vaikutus ei pilaa tulosten tulkintaa. Koestabiloinnissa suurin osa kustannuksista syntyy vasta koestusvaiheessa eikä koepilarien määrää pidä mitoittaa liian niukaksi.

Syvästabiloinnin mitoitusohjeen TIEL 3200465 mukaan laboratoriossa saavutetut lujuudet tulee kertoa korjauskertoimella  $f_d$ , jonka arvo vaihtelee välillä 0,5-1,0. Nämä ohjearvot eivät ole ääriarvoja, vaan käytännön kokemuksia on sekä pienemmistä että myös 1,0 ylittävistä  $f_d$ :n arvoista. Korjauskertoimen laaja vaihteluväli osoittaa, että yleensä stabilointikohteissa kannattaa tehdä maastossa koestabilointeja, joiden avulla edellä mainittu epätarkkuustekijä voidaan välttää.

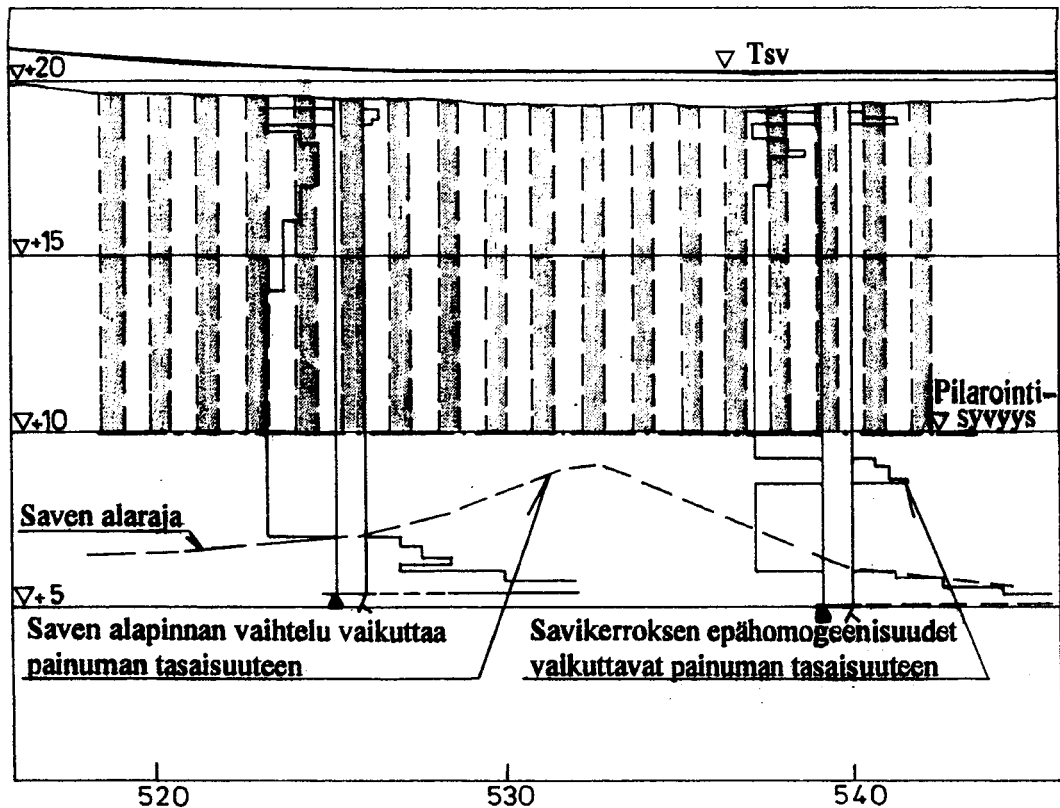
Stabilointikokeiden laatu ja laajuus tulee harkita tapauskohtaisesti. Suuntaa-antavia suosituksia on pyritty esittämään seuraavassa:

- Jo pohjanvahvistusmenetelmän valintatutkimusten yhteydessä tehdään ainakin hankekohtaisesti laboratorioskokeita stabiloinnin onnistumisen varmistamiseksi.
- Lopullisten tutkimusten yhteydessä laboratorioskokeita täydennetään pehmeikkökohtaisiksi.
- Laajoissa stabilointitoissa (esimerkiksi yli 30000 pilarimetriä) tehdään maastossa koestabilointi tai ainakin varmistetaan, että työ on aloitettavissa jonkin pienehkön stabilointiosuuden tekemisellä, koestamisella ja jäljellä olevien stabilointien mitoituksen tarkistamisella.

### **Määrämittaiset stabiloinnit**

Määrämittaisella stabiloinnilla tarkoitetaan tässä ratkaisua, jossa pilareita tai muuta stabilointiratkaisua ei uloteta painuvan kerroksen alarajaan asti, vaan pilaripituus mitoitetaan tarkempien painumalaskelmien perusteella. Ratkaisun mitoitus vaatii tavallista parempia pohjatutkimuksia seuraavista syistä:

- Painuvan kerroksen paksuusvaihtelu voi aiheuttaa epätasaisia painumia, ks. kuva 18.
- Ödometrikokeilla määritettäviä painumaparametreja tarvitaan nimenomaan savikerrostuman alaosasta, josta näytteenotto on tavallista vaikeampaa ja maakerrokset usein epähomogeenisia. Maakerrosten epähomogeenisuus tekee painumanopeuslaskelmat epätarkoiksi ja varsin pienikin ylikonsolidaatio savikerrostuman alaosissa tekee määrämittaisenkin pilaroinnin painumattomaksi.



Kuva 18: Määrämittaisen pilaroinnin pohjatutkimuksiin liittyviä erikoispiirteitä.

Painuvien kerrosten paksuusvaihtelut selvitetään riittävin kairauksin. Kairaustiheys riippuu pehmeikkösyvyyden vaihtelevuudesta. Minimitiheys on kairaukset 20 m välein olevista poikkileikkauksista 15 m välein sivusuunnassa. Kairauksista mahdollisimman suuri osa on suositeltavaa tehdä CPTU-kairauksina, koska nämä kertovat savikerrostuman epähomogeenisuudet paljon paremmin kuin painokairaukset. Meneillään on kokeiluja sähkövastusluotauksen käyttämisestä määrämittaisen pilaroinnin mitoituksen lähtötietojen hankintaan. Ko. menetelmällä saadaan jatkuva vesipitoisuusprofiili pohjamaasta, mikä vähentänee kairaustarvetta. Savikerrostuman painumaominaisuuksien selvittämiseksi suositellaan näytteenottoa ja ödometrikokeiden tekemistä 60-100 m välein olevista pisteistä. Nämä kokeet keskitetään savikerrostuman alaosaan.

### Syvästabilointia hankaloittavat olosuhteet

Syvästabilointityötä hankaloittavia olosuhdetekijöitä voivat olla:

- kiviset ja lohkareiset täytemaakerrokset
- paineellinen pohjavesi



- olemassa olevat tai työnaikaiset luiskat tai penkereet, joiden vakavuutta stabilointityöstä aiheutuva pohjamaan tilapäinen häiriintyminen voi haitallisesti heikentää
- routa.

Pilarointikoneella läpäisemättömien kivisten tai lohkaristen täytemaakerrosten osalta on pohjatutkimuksin varmistettava, että ne ovat poiskaivettavissa. Muussa tapauksessa ne voivat olla esteenä pilarointityön toteuttamiselle. Täytön läpäiseminen pilarikohtaisesti ei ole taloudellisesti mielekäästä.

Paineellinen pohjavesi saattaa purkautua syvemmistä kerroksista pilareita myöten maanpinnalle. Tämän estämiseksi pilarit voidaan joutua suunnittelemaan hiukan savikerroksen paksuutta lyhemmiksi, mikä lisää pohjatutkimusten tarkkuusvaatimuksia.

Joissain tapauksissa stabilointityöstä aiheutuva maapohjan tilapäinen häiriintyminen voi aiheuttaa haitallisen huonoja työnaikaisia vakavuuksia. Näissä tapauksissa pohjatutkimuksissa kiinnitetään huomiota maapohjan lujuusominaisuuksien selvittämiseen, lähinnä siipikairauksin, sekä suunnitellaan työnaikaiset tarkkailutoimenpiteet häiriintymisen suuruuden havaitsemiseksi ja työtapojen säätämiseksi todellisen tilanteen mukaan.

#### 7.4 Pystyjoitus

Kun pystyjoitus on valittu pohjanvahvistusmenetelmäksi, on jo ödometrikokein selvitetty maakerrosten konsolidaatiotila pystyjoituksen soveltuvuuden varmistamiseksi ja muutenkin saatu hyvä yleiskäsitys maakerrosten painuma- ja lujuusominaisuuksista. Tarkentavat tutkimukset kohdistuvat:

- ödometrikokeiden määrälliseen ja laadulliseen täydentämiseen erityisen painopisteen ollessa pystyjoitatiheyteen ratkaisevasti vaikuttavan maakerrosten vaakasuuntaisen konsolidaatiokertoimen  $c_h$  määrittämisessä
- maakerrosten lujuusominaisuuksien määrittämiseen, jotta ylipengerkuormitus voidaan mitoittaa optimaalisesti
- ojaipituuden määrittämiseen ja tarvittaessa muiden olennaisten maakerrosrajojen tarkentamiseen.

Pystyjoituksen vaatimia pohjatutkimuksia on käsitelty myös julkaisussa Nauhapystyjoitus TIEL 3200251.

#### Maakerrosten painuma- ja vedenläpäisevyysominaisuudet

Ödometrikoe pisteiden välimatkaksi suositellaan 60-80 m.

Ödometrikokeet voidaan tehdä joko portaittaina standardikokeina tai CRS-kokeina, joiden antama konsolidaatiojännitys redusoidaan julkaisussa Maanvarainen tiepenger savikolla TIEL 3200276 esitetyllä tavalla. Suositeltavaa on tehdä hankekohtaisesti ainakin muutamia standardikokeita, jolloin redusoinnin oikeellisuus varmistuu.

Vaakasuuntaisissa ödometrikokeissa ja niiden tulkinnassa kiinnitetään huomiota siihen, onko vaakasuuntaisen konsolidaatiokertoimen  $c_h$  ja pystysuuntaisen konsolidaatiokertoimen  $c_v$  välillä ko. maaperäolosuhteissa vakioriippuvuus. Tämän vuoksi vaak- ja pystysuuntaiset ödometrikokeet on tehtävä keskenään vertailukelpoisella tavalla. Edellä mainitun riippuvuuden selkeys vaikuttaa siihen, kuinka suuri osa ödometrikokeista on tarpeen tehdä vaakasuuntaisina.

Sekundääripainuman määrittämiseksi tehdään myös muutamia pitkäaikaisia (>1...3 vrk) portaitaisia ödometrikokeita erityisesti humuspitoisissa kerroksissa ja/tai pystyjoituksen rajautuessa painumattomaan rakenteeseen, kuten pengerraalutukseen tai syvästabilointiin.

Vaativissa olosuhteissa vaakasuuntaisen konsolidaatiokertoimen tai vaakasuuntaisen vedenläpäisevyyskertoimen määrittämiseen käytetään myös in situ-kokeita, kuten vedenläpäisevyyskokeita, huokospainekairauksia ja CPTU-Relax-kokeita.

### **Maakerrosten lujuusominaisuudet**

Pystyjoituksen kuormittaminen, kuormituksen asteittainen lisääminen ja painumista aiheuttavat ylipenkereen korotukset mitoitetaan seuraavien periaatteiden mukaan:

- Kuormitus on koko käytettävissä olevan ajan riittävän suuri mahdollisimman nopean konsolidaatiopainuman aikaansaamiseksi.
- Varmuus sortumista vastaan on sellainen, että plastiset muodonmuutokset pysyvät haitattoman pieninä eli varmuuskerroin on luokkaa 1,5-1,6. Plastisten muodonmuutosten välttäminen aivan täydellisesti ei ole optimaalista.
- Kuormittamisen alkuvaiheessa otetaan huomioon, että maapohja voi olla pystyjoitustyön jäljiltä jossain määrin häiriintyneessä tilassa.
- Suureen tarkkuuteen pyrittäessä otetaan huomioon maakerrosten lujuuden kasvu kuormittamisen vaikutuksesta.

Tavallisissa tapauksissa maakerrosten lujuus määritetään siipikairauksin ja tarkistamalla siipikairausten redusointitarve laboratoriossa tehtävien hienouslukumäärittysten perusteella. Siipikairausten määräksi voidaan suositella 2 kpl / 20-40 m välein oleva poikkileikkaus.

Maapohjan häiriintymisherkkyys arvioidaan yleensä vertaamalla keskenään häiriintymätöntä ja häiriintynyttä siipikairauslujuutta sekä vesipitoisuutta ja hienouslukua.

Maakerrosten lujuuden kasvu kuormituksen vaikutuksesta voidaan määrittää:

- kartiokokeilla ödometrissa konsolidoiduista rinnakkaisista näytteistä
- kolmiakselikokeilla
- työnaikaisilla siipikairauksilla.

Pohjavedenpinnan sijainti ja vaihteluväli ovat tärkeä lähtötieto kaikkiin painuma- ja vakavuuslaskelmiin. Erityinen merkitys näillä tiedoilla on ylipenkereen tehokkuuden arvioimiseen. Pohjavedenpinnan satunnaisvaihtelu voi kumota merkittävän osan ylipenkereen kuormitusvaikutuksesta. Paineellinen pohjavesi saattaa olla esteenä koko pystyjoitusratkaisulle. Jos lievästi paineellisen pohjaveden alueelle suunnitellaan pystyjoitus, tämä lisää tutkimustarkkuusvaatimuksia mm. savikerrosten alarajan kulun selvittämisen osalta.

### **Pystyjojapituus**

Pystyjojapituuden määrittämiseksi tehtäviin pohjatutkimuksiin liittyy jossain määrin samankaltaisia näkökohtia kuin pilaristabiloinnin vastaaviin tutkimuksiin:

- Työtapa on suojojutken upotus, pystyjojan pään ankkurointi, suojojutken nostaminen ja pystyjojanauhan katkaisu. Nauhapituuden tarkka etukäteen tietäminen ei ole välttämätöntä, kun painuva savikerros rajautuu kovempaan kerrokseen.
- Tutkimustarkkuusvaatimukset kasvavat, kun maakerrostumat pystyjojen päättämistasossa ovat vaihtelevammat.
- Jos pystyjojen päättämistason alapuolelle jätetään painuvia kerroksia, tutkimuksille ja mitoitukselle aiheutuu lisävaatimuksia.

Painokairaus soveltuu pystyjojapituuden määrittämiseen helpoissa olosuhteissa, kun painuva savikerros rajautuu selvästi kovempaan kerrokseen. Vaihtelevammassa maakerroksissa CPTU-kairaus on parempi. Pystyjojanauhan ankkuroitumista helpottaa, jos pystyjojan ankkurointia ei tehdä kovin pehmeässä maakerroksessa, joten pieni säästö pystyjojanauhojen menekissä ei aina ole kokonaisuuden kannalta optimaalista.

Vettä johtavat karkeat välikerrokset otetaan painumanopeuslaskelmissa huomioon, kun pyritään hyvään tarkkuuteen. Näiden kerrosten esiintyminen selvitetään CPTU-kairauksin ja näytetutkimuksin.

Pystyjoitusosuuksilla paino-, puristinheijari- tai CPTU-kairauksia tehdään yleensä 20 m välein olevista poikkileikkauksista sivusuunnassa esimerkiksi 15 m välein.

Pystyjoitustyötä hankaloittavat täytemaakerrokset tai muut kovat kerrokset selvitetään koekuopin ja porauksin.

### **7.5 Maanvarainen pengeri pehmeiköllä**

Kun pohjanvahvistusmenetelmän valintaa varten tehtyjen tutkimusten perusteella on päädytty siihen, että pengeri perustetaan pehmeiköllä ilman pohjanvahvistustoimenpiteitä, tutkimusten täydentämistarve lopullista suunnittelua varten on yleensä vähäinen. Tarvittaessa tehdään siipikairauksia vakavuuden tarkistamiseksi, jos on epävarmaa, ovatko aikaisemmin tehdyt tutkimukset osuneet vakavuuden kannalta kriittisimmille kohdille. Tarvittaessa täydennetään ödometrikokeita, kun halutaan tarkentaa käsitystä painuman suuruuden vaihtelusta tien pituussuunnassa tai painumanopeudesta. Ensin mainittuun tarkoitukseen voidaan käyttää myös sähkövastusluotausta. Erikoistapauksissa haluttaessa tarkemmin tarkistaa vakavuuden kehittymistä ajan funktiona tai selvittää maanvaraisesta penkereestä muihin rakenteisiin aiheutuvia rasituksia tai sivusiirtymiä tutkimuksia täydennetään myös kolmiakselikokein. Julkaisussa Maanvarainen tiepengeri savikolla TIEL 3200276 on käsitelty vaativissa tapauksissa tehtäviä vakavuus- ja painumatarkasteluja ja niissä tarvittavia lähtötietoja.

### **7.6 Pengeri-kevennys**

Pengeri-kevennystapaukset voidaan käytettävien mitoituskriteerien perusteella luokitella esimerkiksi seuraavasti:

- Kevennys mitoitetaan vakavuuslaskelmien perusteella.
- Kevennys mitoitetaan painumalaskelmien perusteella.
- Kevennys mitoitetaan suunnitteluvaiheessa alustavasti ja mitoitus tarkentuu työnaikaisen kuormittamisen jälkeen tarkkailumittausten perusteella. Tämä on tyypillistä silteisellä maapohjalla.
- Kevennys mitoitetaan reunaehtojen perusteella. Tehdään esimerkiksi niin paksu kevennys kuin varmuus nostetta vastaan sallii tai kevennystä varten tehtävän kaivannon vakavuus sallii.

Tutkimusten ohjelmoinnin periaate on, että selvitetään, mikä kriteeri on mitoituksessa ratkaiseva ja ohjelmoidaan perusteellisimmat tutkimukset tältä kannalta. Muiden mitoituskriteerien mukaiset tutkimukset ohjelmoidaan yleispiirteisemmällä tarkkuudella tai niiden selvittämiseksi voi olla riittävästi tietoa jo pohjanvahvistusmenetelmän valintaa varten

tehtyjen tutkimusten perusteella. Tyypillisesti suuri osa pengerkevennystapauksista on siirtymärakenteita tms. paikallisia kevennyksiä.

### **Maakerrosten lujuusominaisuudet**

Maakerrosten lujuus selvitetään savimaalla useimmiten siipikairauksin. Silloin, kun tarvitaan tarkempaa tietoa vakavuuden kehittymisestä ajan myötä, tutkimuksia täydennetään kolmiakselikokein. Tällä voi olla merkitystä savimaalla harkittaessa vakavuusmitoituksessa tavoiteltavaa varmuuskerrointasoa sekä erityisesti silttimaalla, kun selvitetään rakennusaikaisen kuormituksen vaikutusta.

Maakerrosten lujuusominaisuuksia koskevat tutkimukset pystytään aikaisempien tutkimustulosten ja alustavien mitoitusten perusteella keskittämään vakavuuden kannalta oleellisimpiin maakerroksiin.

### **Maakerrosten painumaominaisuudet**

Maakerrosten painumaparametreista kevennyksen mitoituksen kannalta ehdottomasti oleellisin on konsolidaatiojännitys  $\sigma_c$ . Niissä kevennyksissä, joissa tavoitteena on painumien kokonaan estäminen, ei muilla parametreilla onnistuneissa tapauksissa olekaan merkitystä. Konsolidaatiojännityksen suuren merkityksen takia ödometrikokeiden ohjelmoinnissa voidaan ottaa huomioon seuraavat näkökohdat:

- Mahdollisimman suureksi osaksi käytetään luotettavimman tuloksen antavaa portaittaista ödometrikoetta.
- Harkitaan lisäkuormitusportaiden, esimerkiksi 75 kPa tai 150 kPa, tarpeellisuus odotettavissa olevan konsolidaatiojännityksen tuntumasta.

### **Vesiolosuhteet**

Tieto ulkoisen vesistön vedenpinnan ja pohjavedenpinnan sijainnista ja vaihtelusta sekä maakerroksissa mahdollisesti vallitsevista huokosveden ylipaineista ovat tarpeen:

- nostemitoitukseen
- työnaikaisten tilanteiden tarkastelemiseen
- vakavuus- ja painumalaskelmien lähtötiedoksi.

### **Kevennetty penger silttimaalla**

Maakerrosten lujuus- ja painumaominaisuudet selvitetään samaan tapaan ja periaatteessa samaan tarkkuuteen pyrkien kuin savimaallakin, jotta pystytään tekemään:

- oleellisimman mitoituskriteerin valinta
- kevennyksen alustava mitoitus ja työjärjestysuunnittelu
- tarkkailumittaussuunnitelma ja
- alustava suunnitelma, mitä muutoksia tarkkailumittaustulokset saattavat aiheuttaa kevennyksen lopulliseen mitoitukseen.

Koska näytteiden saaminen silttimaasta riittävän häiriintymättöminä on vaikeaa ja silttikerrostumat yleensä epähomogeenisempia kuin savikerrostumat, mitoitusparametreihin jää erityisesti painumanopeuden osalta enemmän epätarkkuutta kuin savimaata tutkittaessa. Tarkkailumittausten avulla epätarkkuudesta aiheutuvaa haittaa voidaan kuitenkin vähentää. Tarkkailumittauksina tyypillisiä ovat huokospainemittaukset työnaikaisen vakavuuden seuranta varten sekä painumamittaukset toisaalta painumien päättymisen tarkkailemiseksi ja toisaalta huokosveden ylipaineen häviämisen suunta-antavaksi arvioimiseksi.

Silttimaassa maapohjan lujuusominaisuudet ovat parhaiten selvitettävissä kolmiakselikokeella. Siipikairauksen mahdollisia virhelähteitä on käsitelty kohdassa 6.2.

### **Nykyisen tien keventämisen erikoispiirteitä**

Kohdassa 6.4 on yleisesti selvitetty nykyisen tien kohdalla tehtäviä tutkimuksia. Mitoitettaessa nykyisen tien kevennystä oleellisin ja samalla vaikeimmin tarkasti määritettävä lähtötieto on maapohjan konsolidaatiojännitys. Konsolidaatiojännityksen määrittämiseksi:

- tehdään ödometrikokeita, joiden ohjelmoinnissa pyritään nimenomaan konsolidaatiojännityksen luotettavaan määrittämiseen mieluiten portaittain ödometrikokein ja riittävin kuormitusportain
- kiinnitetään huomiota ödometrikokeiden edustavuuteen tien pituussuunnassa (eri paksuisilla pehmeiköillä konsolidaation eteneminen erilainen)
- analysoidaan nykyisen tien painumista käytettävissä olevat tiedot kohdassa 6.4 esitettyjen periaatteiden mukaan.

Maapohjassa tapahtuvan konsolidaation vaiheen määrittämiseksi voidaan myös selvittää maassa mahdollisesti jäljellä olevan huokosveden ylipaineen suuruus.

Nykyistä tietä kevennettäessä on myös tarpeen selvittää kevennystä varten tehtävän kaivannon vakavuus ja työnaikaisten liikenteenjärjestelyjen vaikutus siihen.

## 7.7 Esikuormitus ja vaiheittain pengerrys

Esikuormitusta voidaan käyttää itsenäisenä pohjanvahvistustoimenpiteenä silttimaalla tai matalilla savipehkeillä. Kun esikuormitusta käytetään sellaisenaan taikka kevennykseen yhdistettynä, tarvittavat pohjatutkimukset ovat hyvin samankaltaiset kuin edellä on esitetty kevennykselle. Erilaisia esikuormitusratkaisuja, jotka perusperiaatteeltaan eivät paljon poikkea toisistaan ja joita voidaan myös yhdistää keskenään, ovat:

- vaiheittain pengerrys, jossa tie ensin pengerretään lopullista alempaan korkeuteen
- tien pengertäminen täyteen korkeuteen ja painuma-ajan varaaminen ennen liikenteelle avaamista
- tien pengertäminen lopullista suurempaan korkeuteen (ylipenkereen käyttö).

Vaiheittain pengerrystä käytetään lähinnä silttimaalla ja tarvittavat pohjatutkimukset ovat samankaltaiset kuin pengerkevennykselle silttimaalla.

## 7.8 Vastapenger

Vastapenkereitä varten täydennetään pohjanvahvistusmenetelmän valintaa varten tehtyjä pohjatutkimuksia seuraavasti:

- Tarkistetaan, ovatko pohjatutkimukset osuneet vakavuuden kannalta kriittisimmille kohdille vai pitääkö niitä täydentää.
- Tarkistetaan pohjatutkimusten riittävyys tien leveyssuunnassa varsinkin sivukaltevassa maastossa.

Vastapenkereitä varten tehdään lähinnä paino- ja siipikairauksia. Jo tutkimuksia ohjelmoitaessa kannattaa selvittää, mikä on vastapenkereen mitoituksessa tavoiteltava tarkkuus vai riittääkö vakavuuden tarkistaminen kriittisimmällä kohdalla riittäväksi. Vastapenger on nimittäin huokea toimenpide ja usein pelkkää säästöä huonojen massojen kauemmas kuljettamiseen verrattuna. Pystyjoituksen yhteydessä käytettävä vastapenger mitoitetaan tarkemmin.

## 7.9 Savileikkauksuiskat

Kevennysleikkauksia varten täydennetään pohjanvahvistusmenetelmän valintaa varten tehtyjä pohjatutkimuksia seuraavasti:

- Tarkistetaan, ovatko pohjatutkimukset osuneet vakavuuden kannalta kriittisille kohdille vai pitääkö niitä täydentää.

- Tarkistetaan pohjatutkimusten riittävyys tien leveyssuunnassa varsinkin sivukaltevassa maastossa.
- Tarkistetaan pohjavesitietojen riittävyys.

Tutkimukset painottuvat paino- tai mielummin CPTU-kairauksiin sekä käytännössä savimaassa yleensä siipikairauksiin, joilla hankitaan yleiskäsitys maapohjan lujuusominaisuuksista. Kolmiakselikokeella selvittävien tarkempien lujuusominaisuuksien tarve harkitaan tapauskohtaisesti alustavasti tehtyjen mitoitustarkkuuksien jälkeen ottaen huomioon ko. tapauksessa tavoiteltava mitoitustarkkuus. Samoin harkitaan maakerrosten vedenläpäisevyysominaisuuksien selvittämisessä tarvittava tarkkuus, jotta voidaan valita luiskan vakavuustarkasteluissa käytettävät pohjavesiolosuhteet.

Kun saviluiskan vahvistuksena käytetään massanvaihtoa kaivamalla, pohjatutkimukset ovat samanlaiset kuin kohdassa 7.9 on esitetty muillekin massanvaihtoille.

Käytettäessä luiskanvahvistuksena naulausta, ponttiseinää tms. erikoisrakenteita tutkimusten pääpaino on maapohjan lujuusominaisuuksien selvittämisessä.

Jos saviluiskan vahvistuksena käytetään syvästabilointia, tutkimuksissa kiinnitetään erityistä huomiota sekä luonnontilaisen että stabiloidun saven lujuusominaisuuksien ja niiden yhteistoiminnan selvittämiseen sekä syvästabiloidun rakenteen vaakakuormakestävyyden varmistamiseen.

### **7.10 Massanvaihto kaivamalla**

Kun pohjanvahvistusmenetelmäksi on valittu massanvaihto kaivamalla, tarkentavat tutkimukset kohdistuvat seuraaviin kysymyksiin:

- Massanvaihtosyvyyden selvittäminen riittävällä tarkkuudella.
- Kaivantoluiskan työnaikaisen vakavuuden selvittäminen silloin, kun luiskan sortuminen tai liikkuminen voi aiheuttaa vahinkoa muille rakenteille taikka kaivussyvyys on poikkeuksellisen suuri.
- Erikoistapauksissa massanvaihtokaivannon vaikutuksesta tapahtuva pohjaveden aleneminen.
- Massojen läjitettävyys ja läjitysalueiden pohjasuhteet.

### **Massanvaihtosyvyys**

Massanvaihtosyvyyden määrittämisessä tavoitteena on massojen selvittämisen ohella erityisesti varmistaa, ettei pehmeiden poiskaivettavien kerrosten alaraja millään kohdalla sijaitse niin syvällä, että massanvaihto kaivamalla osoittautuisi mahdottomaksi tai hankalaksi. Myös ratkaisujen toiseen suuntaan tarkistaminen kannattaa



ottaa huomioon ohjelmoimalla tutkimuksia sen selvittämiseksi, voitaisiinko massanvaihtoa jatkaa esimerkiksi pengerpaalutukseksi kaavaillulle osuudelle ja saavuttaa näin kustannussäästöä. Massanvaihdossa kaivamalla työn luonteeseen kuuluu kaivantoluiskan heikko vakavuus ja vähäiset sortumat, kun varottavien rakenteiden läheisyys ei pakota tarkempaan työtapaan. Vapaassa maastossa massanvaihto kaivamalla voidaan yleensä tehdä 3-5 m syvyyteen asti.

Massanvaihtosyvyyden selvittäminen perustuu yleensä kairauksiin ja niitä täydentäviin näytetietoihin. Tutkimuksille asetettavat vaatimukset riippuvat muun muassa siitä,

- onko massanvaihdon alarajaksi kaavailtu maalajiraja mitoituksen kannalta selkeä vai joudutaanko tekemään vakavuus- ja painumatarkasteluja (pienet pengerkorkeudet lisäävät tarkastelutyömäärää)
- onko massanvaihdon alarajaksi kaavailtu maalajiraja työmaaolosuhteissa helposti tunnistettava

Massanvaihdon alaraja on selkeiden maakerrosrajojen tapauksessa määritettävissä painokairauksin. Kun massanvaihdon alapuolelle jätetään esimerkiksi silttiä tai kovaa savea, parempi tutkimustarkkuus saadaan CPTU-kairauksella. Tällaisissa tapauksissa tarvitaan usein myös siipikairausten ja näytetutkimusten täydentämistä, jotta voidaan päätellä massanvaihtotarve sekä arvioida kaivutilanteen aiheuttama häiriintyminen. Näytetiedoista ovat oleellisia maalaji, vesipitoisuus ja hienousluku sekä tarvittaessa ödometrikokeet.

Massanvaihdon alarajan selvittämiseksi tehdään paino- tai CPTU-kairauksia helpoissa olosuhteissa 20 m välein olevista poikkileikkauksista sivusuunnassa 15 m välein niin, että uloimmat kairaukset tulevat ainakin 10 m massanvaihtokaivannon luiskan ulkopuolelle. Tutkimuksia tihennetään siellä, missä massanvaihtosyvyys lähestyy sopivaksi katsottua maksimia (3-5 m). Massanvaihdon alle jätettävästä kerrostumasta pitää olla tapauksesta riippuvalla tarkkuudella näytetietoja, jotta tunnetaan maalaji ja sen häiriintymisherkkyys. Jos massanvaihto on esimerkiksi suunniteltu ulotettavaksi savikerroksen alarajaan, jonka alapuolella on silttiä, siltti kaivuvaiheessa helposti häiriintyy siinä määrin, ettei sitä silmämääräisesti ole helppo erottaa savesta mutta sen poiskaivaminen "varmuuden vuoksi" voi kuitenkin olla tarpeetonta. Tämä näkökohta voi lisätä myös kairaustiheystarvetta, jotta maakerrosrajojen todellinen kulku saadaan selville.

### **Kaivantoluiskan vakavuus**

Jos massanvaihto tehdään vapaassa maastossa, jossa kaivantoluiskan läheisyydessä ei ole varottavia rakenteita, kaivantoluiskan vakavuudesta on saatu riittävä suuntaa-antava käsitys pohjanvahvistusmenetelmän

valintaa varten tehdyillä siipikairauksilla. Sitä vastoin, kun kaivantoluiskan läheisyydessä on varottavia rakenteita, tutkimuksia täydennetään:

- tihentämällä paino- tai CPTU-kairauksia niin, että massanvaihtosyvyys saadaan tarkasti selville (esimerkiksi 0,3 m virhe kaivussyvyudessa voi aiheuttaa tuntevan virheen vakavuuslaskelmiin)
- tekemällä siipikairauksia ja tarvittaessa täydentämällä tutkimuksia näytteenotolla.

Erikoistapauksissa kaivannon vakavuuden parantamiseksi tehdään tukirakenteita tai muita vahvistustoimenpiteitä, joiden vaatimat tutkimukset ohjelmoidaan erikseen.

### **Pohjaveden aleneminen**

Jos lähettyvillä on rakenteita, joille jo työnaikainen pohjaveden aleneminen massanvaihtokaivannon tekemisen johdosta voi aiheuttaa painumavaurioita tai massanvaihtotäyttö kuivattaa pohjaveden pysyvästi alkuperäistä tasoa alemmas, tarvitaan tutkimuksia pohjavedenpinnan käyttäytymisen arvioimiseksi. Tällöin otetaan maanäytteitä massanvaihdon alapuolisesta pohjamaasta ja mahdollisista ylempänä sijaitsevista vettäjohtavista välikerroksista sekä asennetaan pohjavesiputkia sekä massanvaihdon kohdalle että kauempana sijaitsevien varottavien rakenteiden kohdalle.

### **7.11 Pohjaantäyttö**

Kun pohjaantäyttö on valittu pohjanvahvistusmenetelmäksi, tarkennetaan tutkimuksia, jotta voidaan riittävällä tarkkuudella määrittää:

- pohjaantäyttösyvyys
- maapohjan lujuusominaisuudet: luonnontilainen lujuus, häiriintymisherkkyys ja häiriintynyt lujuus, lujuudenpalautumisominaisuudet häiriintymisen jälkeen, työtä hankaloittavat "liian lujat" välikerrokset
- alkukaivussyvyys ja työtekniikka
- pehmeiden massojen sivusiirtymien ympäristövaikutukset ja niiden minimointimahdollisuudet
- massojen läjitettävyyden ja läjitysalueiden pohjasuhteet.

Maakerrosrajat selvitetään paino- tai CPTU-kairauksin pohjaantäytön alarajan sekä mahdollisten haitallisten lujien välikerrosten selvittämiseksi. Kairaustiheydeksi riittää tavallisissa tapauksissa kairaukset 20 m välein olevista poikkileikkauksista sivusuunnassa 15 m välein. Vaihtelevissa pohjasuhteissa kairauksia tihennetään. Kairaukset ulotetaan sivusuunnassa pitemmälle kuin esimerkiksi suunniteltaessa massanvaihtoa kaivamalla. Sopiva yleissuositus on kairausten tekeminen joka poikkileikkauksessa 20-30 m etäisyydelle pohjaantäytön

reunasta ja vähintään 100 m välein olevista poikkileikkauksista 60-80 m etäisyydelle pohjaantäytön reunasta. Myös silloin, kun selvitetään pehmeiden massojen sivusiirtymien vaikutuksia lähistöllä oleviin rakenteisiin, tutkimusleveyttä kasvatetaan.

Maakerrosten lujuus selvitetään siipikairauksin. Tärkeää on, että siipikairaukset ulotetaan suunniteltavaan pohjaantäyttösyvyyteen asti. Siipikairausten tarvittava määrä riippuu maapohjan lujuudesta pengerkorkeuteen verrattuna. Kun alle 10 m penkereellä esiintyy pohjaantäytön kannalta haitallisen suuria 20 kPa luokkaa olevia leikkauslujuuksia, siipikairauksia sijoitetaan 1-2 kpl 20 m välein oleviin poikkileikkauksiin. Jos taas siipikairauslujuudet ovat 10 kPa luokkaa, voi riittää yksi siipikairaus 80 m kohti. Ympäristövaikutuksia selvitettäessä siipikairauksia sijoitetaan myös kauemmas penkereen sivulle. Häiriintynyt lujuus on pohjaantäyttötapauksissa erityisen tärkeä tieto.

Pehmeistä maakerroksista määritetään näytetutkimuksin maalaji, vesipitoisuus ja hienousluku, jotta osataan arvioida maan häiriintymisherkkyyttä ja lujuuden palautumista (karkeammalla maalla nopeampaa). Häiriintyneetkin näytteet riittävät, ellei erikoistapauksissa osoittaudu tarpeelliseksi tutkia ödometrikokeiden avulla tarvittavaa pohjaantäytön tavoitesyvyyttä. Näytepisteiden välimatkaksi suositellaan 40-80 m.

## 7.12 Lujitteet ja telat

Lujitteita ja teloja käytettäessä voidaan erottaa seuraavia erilaisia tapauksia:

- Lujitteita käytetään pysyvässä rakenteessa itsenäisenä pohjanvahvistuksena.
- Lujitteita käytetään jonkin muun pohjanvahvistustoimenpiteen pienenä täydennyksenä.
- Lujitteen pääasiallinen käyttötarkoitus ovat työnaikaisen tilanteen hallinta.

Kun lujitetta käytetään itsenäisenä pohjanvahvistuksena tai muiden pohjanvahvistustoimenpiteiden oleellisena täydennyksenä, pohjatutkimuksille asetettavat vaatimukset ovat suurimmat. Tietoja maakerrosrajoista, maakerrosten lujuudesta ja painumaominaisuuksista täydennetään erityisesti kuivakuorikerroksen ja sen alapuolisen pehmeimmän kerroksen osalta. Jotta lujitteen ja maan välinen yhteistoiminta voidaan suunnitella, kolmiakselikokeilla hankittavat lujuustiedot ovat yleensä tarpeen.

Kun lujitetta käytetään muiden pohjanvahvistustoimenpiteiden pienenä täydennyksenä, esimerkiksi parantamaan kuormitusten holvautumista kovalle syvästabilointipilareille, tutkimuksille asetettavat vaatimukset ovat vähäisemmät erityisesti pohjamaan osalta.

Kun lujitteet mitoitetaan työnaikaisia rasituksia silmälläpitäen, oleellisia ovat maakerrosten häiriintymisherkkyyteen liittyvät pohjatutkimukset. Vastaavasti kolmiakselikokeiden merkitys vähenee, kun maakerrosten käyttäytyminen riippuu häiriintymisen johdosta alentuneista lujuuksista.

Lujiteratkaisuissa selvitetään lujitteen ja pohjamaan lujuusominaisuuksien lisäksi myös lujitteen kanssa yhdessä toimivan rakennettavan kerroksen lujuusominaisuudet. Tämä on erityisen olennaista luiskanvahvistukseksi suunniteltavien lujiterakenteiden osalta.

## **8 RAKENTAMISEN AIKAISET TARKKAILUMITTAUKSET**

Rakentamisen aikaisten tarkkailumittausten tavoite ja merkitys vaihtelee huomattavasti pohjanvahvistusmenetelmästä ja tapauksesta riippuen. Erilaisia tavoitteita ovat:

- varmistuminen siitä, että pohjanvahvistuksen suunniteltu lopputulos saavutetaan
- lopullisen mitoituksen tarkistaminen tarkkailumittausten perusteella ja kustannussäästön saavuttaminen
- varmistuminen siitä, että ympäristövaikutukset pysyvät sallituissa rajoissa, ja tarvittaessa työmenetelmien muuttaminen, jotta tähän päästään
- lisätiedon saaminen pohjanvahvistusrakenteiden toiminnasta uusien kohteiden suunnittelussa hyödynnettäväksi.

Rakentamisen aikaisia tarkkailumittauksia on tarkemmin käsitelty mm. valvontaohjeessa Pohjanvahvistustyöt TVH 732177, jonka uusiminen on meneillään, sekä syvästabiloinnin osalta Syvästabiloinnin laadunvalvontaohjeessa TIEL 3200099. Seuraavassa käydään pohjanvahvistusmenetelmäkohtaisesti lyhyesti läpi tarkkailumittausten tavoitteet ja merkitys.

### Pengerpaalutus

- Useissa tavanomaisissa kohteissa tarkkailumittausten merkitys on vähäinen.
- PDA-mittauksin varmistutaan paalupituudesta ja paalujen kantavuudesta, kun pohjasuhteet ovat sellaiset, että tukipaalupituutta on ollut vaikea tarkasti määrittää, tai kitkapaaluja käytettäessä.
- Ympäristövaikutusten tarkkailussa mittaukset ovat olennaisia. Tapauksesta riippuen voidaan mm. mitata huokosvedenpaineen kohoamista huokospainemittauksin, saven häiriintymistä siipikairauksin, sivusiirtymiä inklinometrimittauksin tai tärinää tärinämittarein.

### Syvästabilointi

- Kaikissa syvästabilointikohteissa on olennaista stabiloidun maan koestaminen kairauksin ja tarvittaessa näytetutkimuksin. Käytettäviä tutkimustapoja on esitetty Syvästabiloinnin laadunvalvontaohjeessa TIEL 3200099. Tulosten tulkintaa on kuvattu myös julkaisussa Stabiloidun maamassan leikkauslujuuden ja CPT-kairauksen välinen riippuvuus.
- Myötääviä pilareita käytettäessä ja tarvittaessa muulloinkin mitataan stabiloinnin varaan perustetun penkereen painumia.
- Silloin, kun syvästabiloitua rakennetta lyhyen lujittumisajan jälkeen kuormitetaan siten, että stabiloidun ja luonnontilaisen maan välinen yhteistoiminta on mitoituksen kannalta olennaista, voidaan tehdä pilarien välistä luonnontilaisen maan siipikairauksia sen tarkistamiseksi, onko maan lujuus palautunut ennalleen stabilointityön aiheuttaman häiriintymisen jälkeen.

### Pystyjoitus

- Kaikissa pystyjoituskohteissa on välttämätöntä penkereen painumien mittaaminen painuma-ajan riittävyyden varmistamiseksi ja yleensäkin mitoituksen oikeellisuuden tarkistamiseksi.
- Useimmiten ylipenkereen mitoitusta säädellään tarkkailumittausten perusteella mahdollisimman lähelle optimaalista, ks. kohta 7.3. Keinoina ovat painumamittaukset, huokospainemittaukset, siipikairaukset ja inklinometrimittaukset.

### Maanvarainen pengeri pehmeiköllä

- Painumamittauksin voidaan varmistua tehdyn ratkaisun onnistuneisuudesta varsinkin silttimaalla tai matalalla savipehmeiköllä, kun painumat tapahtuvat nopeasti.

### Ylipenger, vaiheittain pengerrys, pengerkevennys silttimaalla

- Rakennusaikaisen kuormittamisen optimoimiseksi tehdään periaatteessa samankaltaisia tarkkailumittauksia kuin edellä on esitetty pystyjoituksen yhteydessä käytettävälle yliperkerelle.

### Pengerkevennys savimaalla

- Yleensä tarkkailumittauksia ei tarvita.

### Vastapenger, kevennysleikkaukset

- Yleensä tarkkailumittauksia ei tarvita

### Massanvaihto kaivamalla

- Tarkkailumittauksia tehdään lähinnä luiskan vakavuuden ja sivusiirtymien selvittämiseksi, kun lähistöllä on varottavia rakenteita.
- Erikoistapauksissa tarkkaillaan pohjavedenpinnan alenemista massanvaihtokaivannon ympäristössä.

### Pohjaantäyttö

- Kaikissa pohjaantäytöissä on olennaista varmistaa halutun lopputuloksen saavuttaminen tutkimalla luiskan toteutunut muoto koetinkairauksilla ja tarkkailemalla painumamittarein pohjaantäyttöpenkereen jälkipainumia ja niiden lakkaamista. Joskus tehdään myös penkereen keskeltä läpiporauksia täyttösyvyyden tarkistamiseksi.
- Pehmeiden massojen sivusiirtymiä tarkkaillaan yleensä inklinometrimittauksin, kun niiden rajoittaminen on tarpeen.

### Lujitteet

- Merkittävässä lujitteiden käyttökohteissa mitataan jännityksiä lujitteissa ja maassa rakenteen suunnitellusta toiminnasta varmistumiseksi ja uusien kohteiden suunnittelussa hyödynnettäväksi.

## **9 TUTKIMUSTULOSTEN ESITTÄMISSUOSITUKSIA**

Pehmeikköjen osalta suositellaan pituusleikkauspiirustuksissa 1:2000/1:200 tai 1:1000/1:100 esitettäväksi seuraavia pohjatutkimustietoja:

- muutamia edustavia kairausdiagrammeja ja näytteiden maalajitietoja
- maakerrosrajoja tapauskohtaisesti harkiten silloin, kun ne ovat mielekkäästi tulkittavissa ja kuvaavat suunnittelun tai toteutuksen kannalta oleellista asiaa.

Paalukohtaisissa poikkileikkauksissa 1:200 tai 1:100 esitetään:

- mahdollisimman perusteellisesti kaikki ko. kohdalta tehdyt pohjatutkimukset, mm. kairaukset ja maalajimääritykset rakeisuuskäyrineen sekä muista laboratoriotuloksista ainakin vesipitoisuus- ja hienouslukuasteikko
- maakerrosrajoja tapauskohtaisesti harkiten.

Paalukohtaiset poikkileikkaukset on yleensä totuttu esittämään 20 m välein. Siellä, missä tutkimuksia on tehty tiheämpään, on poikkileikkauksia syytä tapauskohtaisesti tihentää.

---

Pohjanvahvistussuunnitelman erikoispituusleikkauksissa (mittakaava yleensä 1:200/1:200) esitetään jokseenkin vastaavat tiedot kuin paalukohtaisissa poikkileikkauksissa. Laboratoriotulosten (mm. rakeisuuskäyrien) osalta voidaan jättää esittämättä asioita, jotka kertaalleen ilmenevät paalukohtaisista poikkileikkauksista.

Tarvittaessa tulee kairausten hakuetaisyyskysien piirustuskohtaisella valinnalla huolehtia siitä, että piirustuksiin saadaan riittävästi informaatiota, mutta esitystä ei sotke kairausten liika runsaus tai pohjasuhteiden huomattava vaihtelu leikkauslinjan lähiympäristössä.

Hyvä suositus on, että jokaisessa erillisessä leikkauspiirustuksessa olisi kunkin kairauslajin osalta yhden kerran esitettynä kairausvastusasteikko, varsinkin puristinheijarikairauksen ja CPTU-kairauksen kaltaisten uudempien menetelmien osalta. Näiden toistaminen jokaisen diagrammin yhteydessä on tarpeetonta ja piirustusta sotkevaa.

Pohjatutkimuspisteiden esittäminen kartalla ei ole suunnitelman esitystapaohjeiden mukaan ollut pakollista, mutta sitä kannattaa soveltaa tähänastista enemmän, esimerkiksi seuraavasti:

- Esimerkiksi pohjanvahvistussuunnitelmaan liitetään indeksikartta, jolla on esitetty kaikki hankkeessa tehdyt pohjatutkimuspisteet.
- Tapauskohtaisen harkinnan mukaan merkitään pohjanvahvistussuunnitelman erikoispiirustuksiin, kuten paalukarttaan, syvästabilointikarttaan tai massanvaihtokarttaan pohjatutkimuspisteet, joiden perusteella ratkaisu on suunniteltu, ja mielellään myös käyräesityksenä paalujen tunkeutumissyvyys, pilarointisyvyys, massanvaihtosyvyys tai muu erityisen oleellinen tieto.

---

## 10 KIRJALLISUUS

Aikio, O. Pohjatutkimusten laatu. Insinööritö. Oulun teknillinen oppilaitos. 1993.

Geofysikaaliset tutkimusmenetelmät. Suomen geoteknillinen yhdistys ry., Rakennustieto Oy, Helsinki 1993.

Geotekniset laboratorio-ohjeet, 1. Luokituskokeet GLO-85. SGY/RK Oy 1985.

Geotekniset laskelmat. Tielaitos. Geokeskus. Helsinki 1996. TIEL 2180002.

Geoteknisk fälthandbok. Allmänna rDd och metodbeskrivningar. Svenska Geotekniska Föreningen. Linköping 1996. SGF Rapport 1:96.

Geotekniska undersökningar för vägar. Handbok. Vägverket. Utvecklingssektionen. Borlänge 1984.

Hoikkala, S. Jatkuvapuristeinen ja portaittainen ödometrikoe. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu. Rakennus- ja maanmittaustekniikan osasto. Espoo 1991.

Häiriintymättömien maanäytteiden otto. Helsinki 1996. TIEL 3200400.

Ilmakuvien tulkintaopas. Tie- ja vesirakennushallitus. Helsinki 1976. TVH 2.445.

Kairausopas I, Painokairaus, pisto- ja lyöntikairaus, heijarikairaus. SGY 1981.

Kairausopas II, Siipikairaus. SGY 1996.

Kairausopas III, Maanäytteiden ottaminen. SGY 1972.

Kairausopas IV, Pohjavedenpinnan ja huokosvedenpaineen mittaaminen, SGY 1987.

Kairausopas V, Porakonekairaus. SGY 1986.

Kauranne, L. K., Gardemeister, R., Korpela, K., Mälkki, E. Rakennusgeologia II, Teknillisen korkeakoulun ylioppilaskunta, TKY 304. Espoo 1972.

Korhonen, K-H., Gardemeister, R., Tammirinne, M. Geotekninen maaluokitus. VTT. Geotekniikan laboratorio. Tiedonanto n:o 1. Espoo 1971.



---

Korhonen, K-H., Lojander, M., Karstunen, M. Pehmeikölle maan varaan rakennettavan tiepenkereen geotekniset laskelmat (LR 3). Tielaitos. Geokeskus. Helsinki 1993.

Krav pD geotekniska utredningar för Vägverket Region Stockholm. Stockholm 1997. Vägverket. ANV 1997:0184.

Laaksonen, J. Stabiloidun maamassan leikkauslujuuden ja CPT-kairauksen välinen riippuvuus. Tielaitoksen selvityksiä 94/1995.

Lahtinen, P., Parkkinen, E. Syvästabiloinnin laadunvalvontaohje. Tielaitos. Tiehallitus. Helsinki 1992. TIEL 3200099.

Leroueil, S., Magnan, J-P., Tavenas, F. Embankments on Soft Clays.

Lojander, M. Maanvaraiset tiepenkereet pehmeiköllä. Saven parametrien määrittäminen laboratorioissa (LR 2). Julkaisematon raporttiluonnos 1993.

Maanvarainen tiepenger savikolla, suunnitteluohje. Tielaitos. Geokeskus. Helsinki 1994. TIEL 3200276.

Maatutkaluotaus. Suomen geoteknillinen yhdistys ry., Rakentajain kustannus Oy, Tampere 1991.

Massanvaihto. Tielaitos. Geokeskus. Helsinki 1993. TIEL 3200127.

Melader, K. Puristin-heijarikairaus kairausmenetelmänä. Helsingin kaupungin geoteknisen osaston tiedote 48. Helsinki 1989.

Nauhapystyöjitys. Tielaitos. Geokeskus. Helsinki 1994. TIEL 3200251.

Niva, T. Pohjatutkimuskustannukset. Insinööriyö. Oulun teknillinen oppilaitos. Oulu 1993.

Pengerpaalutus. Tielaitos. Geokeskus. Helsinki 1993. TIEL 3200147.

Pohjanvahvistusmenetelmän valinta. Tielaitos. Geokeskus. Helsinki 1996. TIEL 3200446.

Pohjanvahvistustyöt. Tienrakennustöiden valvontaohje. Tie- ja vesirakennushallitus. Maatutkimustoimisto. Helsinki 1988. TVH 732177.

Pohjarakennuspiirustusmerkinnät, Nro 201. SGY/RK Oy 1993.

Pohjarakennuspiirustusohjeet PRP-84. SGY/RK Oy 1984.

Pohjarakennussuunnitelmat, esitystapa. Helsinki 1990. TIEL 703435.  
Puumalainen, N. Painuman laskeminen numeerisilla menetelmillä. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu. Rakennus- ja maanmittaustekniikan osasto. Espoo 1994.

---

Ritningsexempel för redovisning av geotekniska utredningar. Stockholm 1997. Vägverket. Komplement till ANV 1997:0184.

Siltojen pohjatutkimusohje. Tie- ja vesirakennushallitus. Geopalvelukeskus. Helsinki 1989. TVH 733336.

Smura, M. Pohja- ja laboriotutkimusten kehitysnäkymät. Tiivistelmä esitelmän sisällöstä. Helsinki 1994.

Soveri, U., Kauranne, L. K. Rakennusgeologia I, Teknillisen korkeakoulun ylioppilaskunta, TKY 272. Espoo 1972.

Suomen geomorfologia. Helsingin yliopiston opetusmonisteita. Maantieteen laitos. Helsinki 1979.

Syvästabiloinnin mitoitusohje. Tielaitos. Tuotanto. Konsultointi. Helsinki 1997. TIEL 3200465.

Teiden suunnittelu, IX Suunnitelmat. Helsinki 1979. TVH 722308.

Tiegeotekniikan yleiset mitoitusperusteet. Tielaitos. Geokeskus. Helsinki 1993. TIEL 3200150.

Tieleikkausten pohjatutkimukset. Tielaitos. Geokeskus. Helsinki 1995. TIEL 3200354.

Tien pohja- ja päällysrakenteet tutkimusprojekti (TPPT-M33), Projekti 332, Syvästabiloinnin sideaine- ja materiaalitekologia, Laboriotutkimukset, luonnos 14.12.1995. Helsinki 1995.

Tienrakennustöiden yleiset laatuvaatimukset ja työselitykset TYLT:Perustus-, tukemis- ja lujitustyöt. Helsinki 1991. TIEL 2212458.

Tienrakennustöiden yleiset laatuvaatimukset ja työselitykset TYLT: Leikkaukset, kaivannot ja avo-ojarakenteet. Helsinki 1991. TIEL 2212459.

Tienrakennustöiden yleiset laatuvaatimukset ja työselitykset TYLT: Penger- ja kerrosrakenteet. Helsinki 1994. TIEL 2212460.

Tiepenkereen siirtymärakenteet pehmeiköllä. Tielaitos. Geokeskus. Helsinki 1994. TIEL 3200248.

Uotinen, V-M. Geovahvisteet tiepenkereen leventämisessä pehmeiköllä. Tielaitos. Uudenmaan tiepiiri. Helsinki 1996. Tielaitoksen selvityksiä 20/1996.

Valtatie 3 välillä Toijala-Kulju, yleissuunnittelu, geosuunnittelun menetelmäkehitys. Tielaitos. Hämeen tiepiiri. Julkaisematon raporttiluonnos 1993.

Viberg, L. Lärobok i geobildtolkning. Statens geotekniska institut. Stockholm 1991.

Vähäsarja, P. Karttatulkintaopas. Hämeenlinna 1971.

Ödometrikoe. Helsinki 1996. TIEL 3200401.