

RATAHALLINTOKESKUS

RHK

Ratahallintokeskuksen
julkaisuja

B 15

**RADAN STABILITEETIN LASKENTA,
OLEMASSA OLEVAT PENKEREET**

Helsinki 2005

**RADAN STABILITEETIN LASKENTA,
OLEMASSA OLEVAT PENKEREET**

RHK
RATAHALLINTOKESKUS
KESKUSKATU 8, PL 185
00101 HELSINKI

PUH. (09) 5840 5111
FAX. (09) 5840 5108
SÄHKÖPOSTI: info@rhk.fi

ISBN 952-445-119-0
ISSN 1456-1204

2.6.2005

**RADAN STABILITEETIN LASKENTA,
OLEMASSA OLEVAT PENKEREET**

**Ratahallintokeskus on hyväksynyt "Radan stabiliteetin laskenta,
olemassa olevat penkereet" -ohjeen.**

Voimassa 13.6.2005 alkaen.

Rataverkko-osaston johtaja



Markku Nummelin

Teknisen yksikön päällikön sijainen



Ilkka Saari

ESIPUHE

Tämän julkaisun tarkoitus on esittää kansallinen käytäntö stabiliteetin määrittämiseksi olemassa oleville ratapenkereille. Ohje on tarkoitettu suunnitteluun ja sen tarkastukseen.

Ohjeen kirjoitus on perustunut Ratahallintokeskuksen (RHK) tammi-kuussa 2004 käynnistämään, tätä aihepiiriä koskevaan tutkimushankkeeseen. Tutkimus on perustunut kirjallisuustutkimukseen ja analyttisiin sekä numeerisiin laskentoihin. Työryhmässä ovat olleet mukana Jouko Suomalainen, Mauri Koskinen ja Seppo Hakala Oy VR-Rata Ab:stä, Jaakko Heikkilä Arcus Oy:stä, Jouko Törnqvist VTT:ltä, Tim Länsivaara Tampereen Teknisestä Yliopistosta (TTY), Pauli Vepsäläinen Teknillisestä korkeakoulusta (TKK) sekä turpeen osalta professori Eero Slunga. Ratahallintokeskuksesta mukana ovat olleet Kari Ruohonen sekä Matti Levomäki.

Helsingissä, kesäkuussa 2005

Ratahallintokeskus
Rataverkko-osasto

SISÄLLYSLUETTELO

1	YLEISTÄ	3
2	OHJEEN ASEMA JA LIITTYMINEN MUIHIN OHJEISIIN	3
3	POHJATUTKIMUKSET	3
3.1	Kenttätutkimukset	3
3.1.1	Tutkimusmenetelmät	3
3.1.2	Tarveselvitys	8
3.1.3	Yleis- ja ratasuunnitelma	8
3.1.4	Rakennussuunnitelma	8
3.2	Laboratoriotutkimukset	9
3.2.1	Tarvittavat laboratoriotutkimukset	9
3.2.1.1	Luokituskokeet	9
3.2.1.2	Ödometrikokeet	10
3.2.1.3	Kolmiaksaalikokeet	10
3.2.1.4	Suora leikkauskoe	11
3.2.2	Tehokkaiden lujuusparametrien määrittäminen	11
3.2.2.1	Näytteiden konsolidointi	11
3.2.2.2	Lujuusparametrien määrittäminen	12
4	JUNAKUORMA	13
5	VARMUUSTASO	13
6	LASKENTAMENETELMÄN KÄYTTÖ JA VALINTA	14
6.1	Laskenta käyttäen tehokkaita lujuusparametrejä	14
6.2	Laskenta käyttäen suljettua leikkauslujuutta	15
6.3	Kuivakuoren huomioonotto	17
7	LUJITTUMINEN	18
7.1	Lujittuminen käytettäessä tehokkaita lujuusparametrejä	18
7.2	Lujittuminen käytettäessä suljettua leikkauslujuutta	18
8	LIUKUPINNAN SIJAINTI	20
9	POHJAVAHVISTUSTEN HUOMIOONOTTO	20
10	LASKENTAPROSESSI ERI SUUNNITTELUVAIHEISSA	23
11	TÄRINÄN JA VÄRÄHTELYN VAIKUTUS	25
12	LASKELMIEN ESITYSTAPA	26
	VIITTEET	27

LIITELUETTELO

- Liite 1 Stabiileettilaskentojen vertailutaulukko
- Liite 2 Huokosvedenpaineen nousu dynaamisen junakuorman vaikutuksesta

1 YLEISTÄ

Tämä ohje käsittelee olemassa olevien vanhojen ratapenkereiden stabiliteetin laskentaa. Vanhaksi ratapenkereeksi katsotaan penger, jonka konsolidaatioaste on vähintään 50 %. Tämä edellyttää yleensä vähintään 10 vuoden ikää.

2 OHJEEN ASEMA JA LIITTYMINEN MUIHIN OHJEISIIN

Tämän ohjeen tarkoitus on esittää kansallinen käytäntö stabiliteetin määrittämiseksi olemassa oleville ratapenkereille. Ohje on tarkoitettu suunnitteluun ja sen tarkastukseen. Tarkoitus on saattaa ohjeistus ajan tasalle nykyisen tietämyksen edellyttämällä tavalla. Ohje rajoittuu lähtökohtaisesti staattisen mitoituksen käsittelyyn, mutta reunaehtoja dynaamisesta käyttäytymisestä on myös otettu huomioon.

Ohjeen kirjoitus on perustunut Ratahallintokeskuksen (RHK) tammi-kuussa 2004 käynnistämään, tätä aihepiiriä koskevaan tutkimushankkeeseen. Tutkimus on perus tunut kirjallisuustutkimukseen ja analyttisiin sekä numeerisiin laskentoihin.

Tämä ohje täydentää Ratatekniset määräykset ja ohjeet (RAMO) osan 3 /1/ vastaavia kohtia. Suunnittelun, laboratorio- sekä kenttätutkimusten osalta tätä ohjetta täydentävät Eurocodien vastaavat osat (mm. Eurocode 7: Geotechnical Design /2/), SGY:n laatimat pohjarakentamista koskevat ohjeet (mm. GLO-85) /3/ sekä muut kansalliset määräykset. Edelleen täydentävänä ohjeena voidaan ottaa huomioon mm. Teiden pohjarakenteiden suunnitteluperusteet /4/.

Tämän ohjeen taustalla oleva kirjallinen ja laskennallinen tausta-aineisto julkaistaan erillisenä julkaisuna.

3 POHJATUTKIMUKSET

3.1 Kenttätutkimukset

Tässä luvussa käsitellään stabiliteettitarkastelujen vaatimia pohjätutkimuksia.

3.1.1 Tutkimusmenetelmät

Tutkimuksien teossa noudatetaan SGY:n kairausoppaita /5/ alla esitetyin tarkennuksin.

Pehmeikön paksuuden ja tiiveyden määrittämiseen käytetään yleisesti käytössä olevia kairausmenetelmiä.

CPTU-kairaus

Menetelmää käytetään koheesio- ja turvemaalajien kerrosrajojen määrittämiseen. Tulkintaa tehtäessä käytetään sekä kärkivastus- että huokospainekuvaajia. Tarvittaessa kuvaajat skaalataan vaakasuunnassa siten, että silmämääräinen tarkastelu on mahdollista.

Poikkileikkauksessa tehdään vähintään kaksi kairausta, jotka normaalisti sijoitetaan penkereen eri puolille noin 5 m etäisyydelle luiskan alareunasta.

Ennen CPTU-kairauksen tekoa pehmeikön alapinta määritetään jollakin muulla menetelmällä.

Siipikairaus

Savessa siipikairaus tehdään SGY:n kairausoppaiden esittämällä tavalla /5/. Ylimmän 5 m matkalla tehdään leikkaus 0,5 m jaolla ja tämän jälkeen 1,0 m jaolla. Yleensä kairaus ulotetaan maksimissaan 15 m syvyyteen. Tapauskohtaisesti saattaa olla tarvetta ulottaa siipikairaus 15 m syvemmälle. Tämä tulee kyseeseen lähinnä useampiraiteisilla penkereillä ja paksuilla pehmeiköillä.

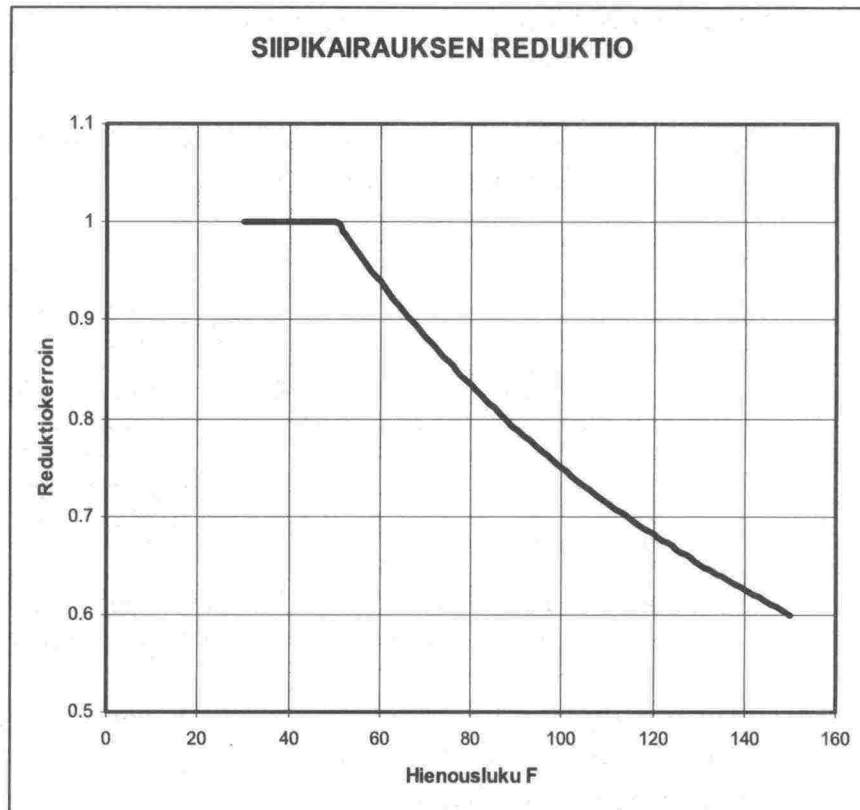
Siltissä standardisiipikairaus ei anna luotettavaa tulosta. Mikäli siipikairauksia tehdään, käytetään suojaputkella varustettua kairatyyppiä. Kun siivikko on painettu tutkittavaan syvyyteen, odotetaan vähintään yksi tunti ennen leikkausta. Myös turpeessa suositellaan käytettäväksi suojaputkella varustettua kairatyyppiä. Turpeessa odotusaika kairan alas painamisen jälkeen ei ole tarpeen.

Suojaputkella varustettua kairatyyppiä suositellaan käytettäväksi savikoilla standardisiipikairauksen rinnalla varmistuksena. Tämän lisäksi suljettu leikkauslujuus tulisi tarkastaa jollakin muulla menetelmällä (kartiokoe, suora leikkauskoe, yksiaksiaalinen puristuskoee).

Turpeessa siipikairausta voidaan käyttää maatuneiden ja keskinkertaisesti maatuneiden turpeiden leikkauslujuuden määrittämiseen. Raakaturpeelle menetelmä ei sovellu.

Poikkileikkauksessa siipikairaukset sijoitetaan pengerialueen juureen ja noin 10...20 m penkereen sivulle. Tarvittaessa tehdään siipikairaus penkereen läpi putkittamalla. Tällöinkin kairaus voidaan yleensä sijoittaa aukean tilan ulottuman (ATU) ulkopuolelle.

Siipikairauksella ja kartiokokeella mitattu suljettu leikkauslujuus redusoidaan kuvan 1 ja kaavan mukaan.



Kuva 1. Siipikairauksen ja kartiokokeen antaman leikkauslujuuden redusointi

$$S_u = S_{\text{mitattu}} * \mu$$

$$\mu = \frac{1.5}{1 + F/100}$$

μ = reduktiokerroin

F = hienousluku

Mikäli $F < 50$ käytetään μ :n arvoa 1,0.

Turpeelle käytetään μ arvoa 0,5.

Hienousluku F määritetään sekä penkereen alta että vierestä.

Leikkauslujuuden lisäksi siipikairaus antaa stabiileetin laskentaa varten hyvän kuvan maan kerrosrakenteesta.

Maalajiin, tiiveyteen ja maatumisasteeseen perustuva lujuuden määrittäminen

Pohjamaan maalajin ollessa silttiä voidaan alustavissa tarkasteluissa lujuusparametrinä ϕ käyttää taulukon 1 arvoja.

Taulukko 1.

Tiiveys	Maalaji					
	Siltti	Hiekka	Sora	Moreeni	Sepeli	Louhe
Löyhä	26°	30°	34°	34°	30°	38°
Tiivis	33°	38°	40°	40°	38°	50°

Taulukossa on lisäksi annettu eri pengermateriaalien kitkakulmia. Vakavuuslaskelmissa tulee käyttää penkereelle löyhän tilan kitkakulmia.

Taulukon käyttö edellyttää rakeisuusmäärittämiseen perustuvaa maalajin määrittämistä. Mikäli laskettu kokonaisvarmuus on alle 2,0, määritetään lujuusparametrit kokeellisesti.

Turpeelle voidaan alustavissa tarkasteluissa käyttää seuraavaa kokemusperäistä yhteyttä:

$$s_u = 140 / w * (100 - 1,1R) \text{ [kPa]}$$

H (von Post) R % (Pjajtschenko)

1	5
2	10
3	15
4	20
5	25-30
6	35
7	45
8	55
9	65

H = von Post:n maatumisaste, raakaturpeelle H = 1–3, keskinkertaisesti maatumuneelle turpeelle H = 4–6 ja maatumuneelle turpeelle H = 7–10.

Huokospainemittaukset

Huokospainemittausten tarkoitus on määrittää huokospaine penkereen alla ja sen vaikutusalueen ulkopuolella. Tällöin voidaan laskennallisesti määrittää penkereen alapuolisen maan konsolidaatioaste ja maapohjan lujittuminen (vrt. 7).

Ennen huokospainekärkien syvyystasojen valintaa määritetään maakerrokset, σ'_c :n jakautuma ja vaarallisimman liukupinnan alustava sijainti.

Huokospainekärjet sijoitetaan pystysuunnassa vaarallisimman liukupinnan syvimmän kohdan syvyydelle ja sen yläpuolelle, määrääviin maakerrokseen (huomioiden σ'_c :n vaihtelu). Poikkisuunnassa yksi mittauspiste (sisältää mahdollisesti useita syvyyksiä) sijoitetaan penkereen alle luiskan yläreunan kohdalle. Asennus tapahtuu yleensä helpoimmin penkereen sivulta kallistettuja putkia käyttäen. Toinen mittauspiste sijoitetaan vähintään $1,5 \cdot$ liukupinnan syvyyden verran penkereen sivulle.

Huokospaine mitataan käyttäen sähköisiä antureita (suljettu menetelmä). Vain poikkeustapauksissa siltissä voidaan käyttää avoimia huokospaineputkia.

Näytteet

Häiriintymätön näytesarja otetaan 10...20 m penkereen luiskan alareunasta sivullepäin. Näyte otetaan joka alkavalta metriltä (Geonor 0,8 m tai St2 3 kpl 0,17 m näyteputkia) samaan syvyyteen kuin siipikairaukset. Ennen kolmiaksaali- tai ödometrikokeiden tekoa tehdään luokituskokeet (γ , s_u , w , F ja humus), joiden perusteella tarkastetaan kerrosrajat ja laboratorio-kokeiden tekotasot. Rakeisuus tutkitaan silmämääräisen analyysin jälkeen jokaisesta erillisestä maakerroksesta (ks. 3.2.1.1).

Häiriintyneet näytteet otetaan suljetulla näytteenottimella (ei kierrekaira) joka alkavalta metriltä samaan syvyyteen kuin siipikairaukset. Häiriintynyt näytesarja otetaan 10...20 m penkereen luiskan alareunasta sivullepäin. Näytteistä määritetään maalaji silmämääräisesti, vesipitoisuus ja hienousluku. Rakeisuus ja humuspitoisuus tutkitaan silmämääräisen analyysin jälkeen jokaisesta erillisestä maakerroksesta, minkä jälkeen silmämääräistä maalajimäärittystä tarvittaessa korjataan.

Penkereen alta tehtyjen siipikairausten redusointi (F) edellyttää joko häiriintymättömän tai häiriintyneen näytesarjan ottamista penkereen alta.

Turpeesta määritetään aina turvetyyppi, maatumisaste ja vesipitoisuus. Tarvittaessa määritetään leikkauslujuus. Turvetyyppi ja maatumisaste voidaan määrittää häiriintyneistä näytteistä. Vesipitoisuuden ja tilavuuspainon määrittäminen edellyttää häiriintymättömien näytteiden ottoa. Häiriintymättömät näytteet otetaan SGI-tyyppisellä näytteenottimella, jonka halkaisija on $d \geq 100$ mm. Penkereen alla voidaan käyttää näytteenotinta, jonka halkaisija on $d \geq 50$ mm.

Koepenger

Koepengertä suositellaan turpeen leikkauslujuuden määrittämiseen. Raakaturpeella se on käytännössä ainoa luotettava tapa.

3.1.2 Tarveselvitys

Työ perustuu pääosin vanhojen tutkimustietojen hyödyntämiseen. Mikäli erityinen tarve niin vaatii, voidaan tutkimuksia täydentää tapauskohtaisesti. Tutkimusmenetelminä käytetään pääasiassa siipikairausta ja painokairausta.

3.1.3 Yleis- ja ratasuunnitelma

Yleis- ja ratasuunnitelmaa laadittaessa täydennetään olemassa olevaa tutkimusaineistoa. Tässä vaiheessa tehdään pääosa pehmeikön paksuuden määrittämiseen tarvittavista tutkimuksista. Ohuella pehmeiköllä kairaustiheys on suurempi (poikkileikkaus n. 20 m välein). Jos pehmeikön paksuus on selvästi suurempi kuin vaarallisten liukupintojen syvyys, voidaan tutkimustiheyttä harventaa (poikkileikkaus n. 40 m välein).

Lujuus määritetään siipikairalla radan pituussuunnassa noin 60...100 m välein penkereen juuresta. Vaarallisimmissa poikkileikkauksissa täydennetään tutkimusta poikkisuunnassa.

Siipikairausten redusointi edellyttää tietoa maan hienousluvusta F, joka saadaan määritettyä häiriintyneestä näytteestä. Näytteitä otetaan vähintään puolet siipikairattavien poikkileikkausten määrästä. Osa näytteistä otetaan häiriintymättöminä.

Pehmeän kerroksen kerrosrajat määritetään CPTU-kairalla samoista poikkileikkauksista, joihin on sijoitettu siipikairaukset. CPTU-kairauksia tehdään aina vähintään kaksi poikkileikkausta kohti.

Huokospainemittaukset liittyvät aina laboratoriossa määritettäviin parametreihin. Ne tehdään samassa poikkileikkauksessa, josta on otettu häiriintymätön näytesarja näytekokeita varten. Huokospainemittauksissa pitää huomioida niiden tarvitsema 1...3 viikon odotusaika. Samasta poikkileikkauksesta tehdään myös siipikairaukset ainakin penkereen juuresta ja 10...20 m penkereen sivusta.

Penkereen alapinnan sijainti selvitetään vähintään kahdella pengermateriaaliin sopivalla kairauksella 40 m välein. Kairaukset tehdään rataa päin kallistettuina penkereen luiskan läpi. Kairaukset voidaan lopettaa 2 m penkereen alapinnan jälkeen.

3.1.4 Rakennussuunnitelma

Rakennussuunnitelmavaiheessa tarkennetaan tutkimuksia kriittisissä kohdissa. Tutkimukset ja tutkimusmenetelmät kohdennetaan paikkoihin, jotka ovat yleissuunnitelmavaiheessa jääneet epävarmoiksi ja/tai niillä on suuri kustannusvaikutus.

3.2 Laboratoriotutkimukset

Laboratoriokokeet on tehtävä yleisesti hyväksytyjen ohjeiden ja määräysten mukaisesti. Tällaisia ohjeita ovat mm. Eurocode 7: Geotechnical design – Part 2: Ground investigation and testing /2/ yleisellä tasolla ja Geotekniset laboratorio-ohjeet, GLO-85 luokituskokeiden yksityiskohtaisten suoritustapojen osalta /3/. Laboratoriokokeiden suoritusta on käsitelty kattavasti myös julkaisussa Teiden pohjarakenteiden suunnitteluperusteet /4/.

Tässä ohjeessa rajoitetaan vanhan ratapenkereen stabiileettitarkasteluun ja siihen liittyviin asioihin. Tarvittavilta osin annetaan joitakin yksityiskohtaisia ohjeita laboratoriokokeiden ohjelmoinnin, suorituksen ja tulkinnan osalta.

3.2.1 Tarvittavat laboratoriotutkimukset

3.2.1.1 Luokituskokeet

Luokitusominaisuudet tulee määrittää ennen ödometri-, kolmiaksaali- ja leikkauskokeiden tekemistä, jotta nämä saadaan ohjelmoitua oikealle syvyyvälille.

Häiriintymättömistä näytteistä tulee ensisijaisesti tehdä ainakin seuraavat luokituskokeet:

- vesipitoisuus
- tilavuuspaino
- rakeisuus
- humuspitoisuus
- kartiokoe (suljettu leikkauslujuus, häiriintymisherkkyys ja hienousluku).

Lisäksi tarvittaessa määritetään:

- plastisuusominaisuudet
- kiintotiheys.

Luokitusominaisuudet rakeisuutta lukuun ottamatta tulee aina määrittää joka näytesarjasta (yksi määrittäminen per alkava metri). Mikäli maakerros on epähomogeenistä, on suositeltavaa, että St2-näytteenottimella otetuista näytteistä määritetään lisäksi jokaisesta näyteputkesta vesipitoisuus ja tilavuuspaino. Rakeisuus tutkitaan silmämääräisen analyysin jälkeen jokaisesta erillisestä maakerroksesta.

Turpeen osalta määritetään:

- turvetyyppi
- maatumisaste
- vesipitoisuus.

3.2.1.2 Ödometrikokeet

Vakavuuden laskennan kannalta ödometrikokeiden tärkein tulos on esikonsolidaatiojännitys. Sen määrittämisellä varmistetaan, että kolmiakσιαalikokeet tehdään oikealla jännitysalueella. Ödometrikokeet tulee tämän vuoksi aina tehdä ennen kolmiakσιαalikokeita. Mikäli esikonsolidaatiojännitystä käytetään lujittumisen laskennalliseen määrittämiseen, ödometrikokeet tulee tehdä joka näytesarjasta (yksi koe per alkava metri). Muussa tapauksessa ödometrikokeet tehdään samoista maakerroksista kuin kolmiakσιαalikokeet.

Ödometrikoe voidaan tehdä joko portaittaiseen tai portaattomaan kuormituslisäykseen perustuvia koemenetelmiä käyttäen. Portaittaisessa ödometrikokeessa tulee käyttää vähintään seitsemää kuormitusporrasta. Kuormitusportaiden kestoajana voidaan yleensä käyttää 24 tuntia. Kesto-aikaa voidaan pienentää esikonsolidaatiojännitystä pienemmillä kuormitusportilla. Yleisin portaattomaan kuormituslisäykseen perustuva menetelmä Suomessa on vakio muodonsuoritusnopeudella tehtävä CRS-koe. CRS-kokeen kuormitusnopeus valitaan taulukon 2 avulla.

Taulukko 2. CRS-kokeiden suositeltavat koenopeudet.

Maalaji	koenopeus %/h	koenopeus 15 mm näytteellä (mm/min)
Lihava savi, lieju	≤ 0,6	≤ 0,0015
Laiha savi, siltainen savi	0,6 ... 1	0,0015 ... 0,0025
Savinen siltti, siltti	1 ... 2	0,0025 ... 0,005

3.2.1.3 Kolmiakσιαalikokeet

Kolmiakσιαalikokeiden näytesyvyudet valitaan luokituskoekoiden ja muiden pohjatutkimusten (siipikairaus, CPTU) perusteella. Ratapenkereiden vakavuuslaskelmissa käytettävät tehokkaat lujuusparametrit määritetään häiriintymättömille näytteille tehtävien konsolidoitujen suljettujen kolmiakσιαalikokeiden avulla. Lujuusparametrien määrittämiseksi tarvitaan pääsääntöisesti kolme leikkausta. Koska näytteiden leikkaaminen tulee tehdä normaalikonsolidoituneella alueella, koheesion arvo on hyvin pieni tai nolla. Mikäli hyvälaatuista näytettä on vähän, voidaan tällöin kiinnittää murto-suora origoon ($c = 0$) ja määrittää lujuusparametrit kahden leikkauksen avulla. Näytteiden ominaisuuksien hajonnan takia lujuusparametreja ei tulisi määrittää ainoastaan yhden kokeen avulla. Verrattain homogeenisessä paksussa maakerroksessa voidaan tarvittaessa tehdä määrittäminen yhdistämällä eri tasoilta otetut näytteet.

Lujuusparametrien lisäksi kolmiakσιαalikokeella voidaan määrittää huokospaineparametri B, joka oletetaan ykköseksi, mikäli mittausta ei suoriteta.

3.2.1.4 Suora leikkauskoe

Keskinkertaisesti maatuneen ja maatuneen turpeen lujuuden määrittämiseen suositellaan suoraa leikkauskoetta. Näytteinä käytetään halkaisijaltaan penkereen sivulla ≥ 100 mm ja penkereen alla ≥ 50 mm näytteitä.

3.2.2 Tehokkaiden lujuusparametrien määrittäminen

3.2.2.1 Näytteiden konsolidointi

Näytteiden konsolidointi voidaan tehdä joko anisotrooppisesti tai isotrooppisesti. Koska anisotrooppisesti konsolidoiduilla näytteillä alkujännitystilalla ennen leikkausvaihetta vastaa huomattavasti paremmin todellista in-situ-jännitystä kuin isotrooppisesti konsolidoiduilla näytteillä, anisotrooppisen konsolidoinnin käyttö on suositeltavaa. Anisotrooppisesti konsolidoiduilla näytteillä kokeen muodonmuutostaso vastaa selvästi paremmin todellista ja kokeista saadaan isotrooppisten kokeiden vastaavan murtolujuuden lisäksi usein määritetty niin sanottu huokospaineraja eli lujuus, jonka jälkeen leikkausjännityskapasiteetti ei enää kasva vaikka kitkakulma kasvaisikin. Edellä mainituista syistä ainakin yksi näyte tutkittavaa maakerrosta kohti pitää konsolidoida anisotrooppisesti. Mikäli havaitaan ristiriitaa anisotrooppisesti ja isotrooppisesti konsolidoitujen näytteiden antamien lujuusparametrien välillä, tehdään kaksi anisotrooppista konsolidointia lisää ja määritetään lujuusparametrit huomioiden vain anisotrooppiset kokeet.

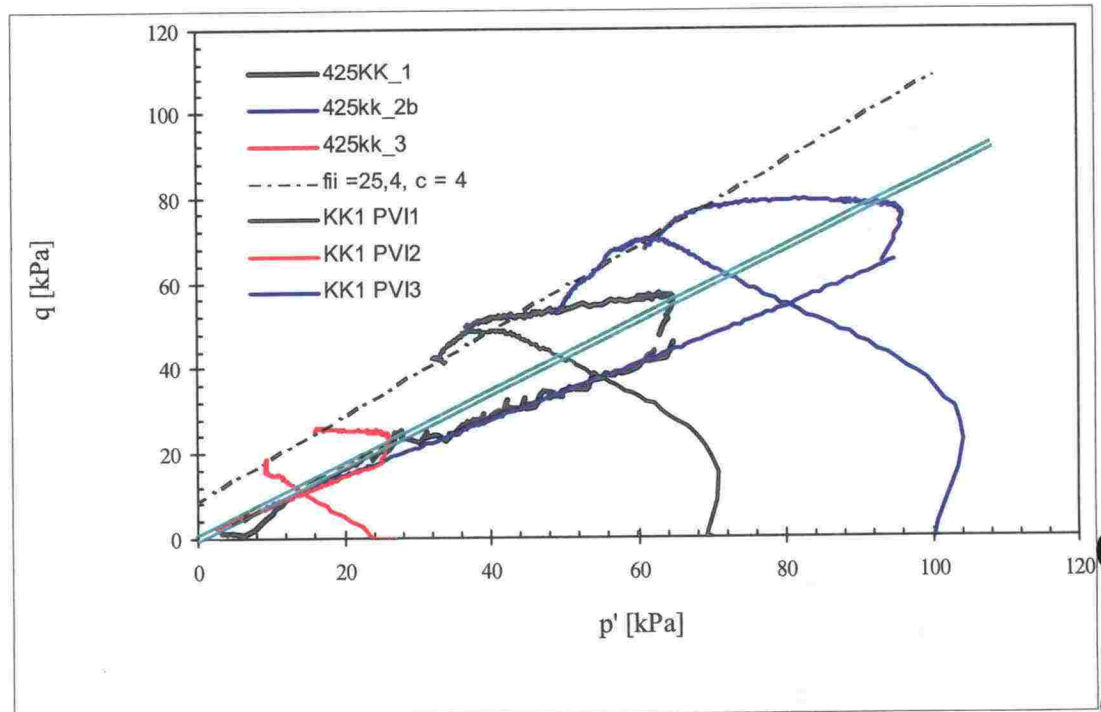
Anisotrooppinen konsolidointi voidaan tehdä K_0 -kokeena tai tätä vastaavalla vakiojännityssuhteella joko portaattomana tai portaittaisena anisotrooppisena konsolidointina. Mikäli käytetään portaittaista konsolidointia, tulee jännityssuhteen ja riittävän alhaisten kuormitusportaiden avulla varmistua, että yksittäisessä kuormituslisäyksessä ei mennä liian lähelle murtotilaa.

Maapohjan murtuminen vanhojen penkereiden alla tapahtuu suomalaisilla savilla lähes poikkeuksetta normaalikonsolidoituneella alueella. Lujuusparametrit tulisi siten myös määrittää normaalikonsolidoituneelta alueelta. Pienin konsolidaatiojännitys voidaan valita esikonsolidaatiojännitystilaa vastaavaksi. Savilla voidaan pienimpänä konsolidaatiojännityksenä käyttää arvoa $p' = 0,8 \cdot \sigma_p$ ja silteillä arvoa $p' = 0,7 \cdot \sigma_p$, missä p' on tehokas hydrostaattinen jännitys (sellipaine isotrooppisessa konsolidoinnissa). Suurin konsolidaatiojännitys tulee määrittää suurinta kuormitustilaa (penger ja junakuorma) vastaavaksi huomioiden matalalla penkereellä lisäksi, että konsolidaatiojännitysten ero on riittävän suuri. Keskimäinen konsolidaatiojännitys valitaan pienimmän ja suurimman keskiväliltä.

3.2.2.2 Lujuusparametrien määrittäminen

Lujuusparametrien määrittäminen tulee aina tehdä jännityspolkukuvaajien perusteella. Eri muodonmuutostasojä vastaavia jännitystiloja kuvaavia Mohrin ympyröitä ei tule käyttää.

Tulkinta tulee tehdä harkiten ottamalla huomioon näytteiden käyttäytymisen koko kokeen ajan. Anisotrooppisesti konsolidoiduista näytteistä saadaan usein määritettyä niin sanottu huokospaineraja, jonka jälkeen leikkajännitys ei enää kasva. Tämä huokospaineraja saavutetaan yleensä verrattain pienellä, noin 1 % muodonmuutostasolla. Lujuusparametrit c ja ϕ määritetään tämän huokospainerajan mukaan. Kuvassa 2 edellä mainittua huokospainerajaa edustaa kaksoisviiva. Isotrooppisesti konsolidoiduilla näytteillä saavutettua murtoa edustaa kuvassa 2 piste-katkoviiva.



Kuva 2. Murtosuoran tulkinta jännityspolkukuvaajasta. Pistekatkoviiva kuvaa isotrooppisesti konsolidoitujen kokeiden murtosuoraa. Kaksoisviiva kuvaa anisotrooppisesti konsolidoitujen näytteiden murtosuoraa ns. huokospainerajaa, jonka mukaan liukupintalaskelmissa käytettävät c ja ϕ määritetään.

Ellei erityisiä perusteita muuhun ole, käytetään koheesion arvona nollaa.

4 JUNAKUORMA

Taulukossa 3 on esitetty vakavuuslaskennassa käytettävät junakuormat. Laskelmat suoritetaan käyttäen tasaista nauhakuormaa (kN/m^2).

Taulukko 3. Vakavuuslaskennassa käytettävät junakuormat

Akselipainot		Kokonaisvarmuus		Osavarmuus	
Mitoitus- akselipaino t	Nauha- kuorma $q_w, \text{kN/m}$	Ominais- kuorma q_{om} kN/m	Ominais- kuorma $q_{om(b=2,5m)}$ kN/m^2	Murto- tilan mitoitus- kuorma q_m kN/m	Murto- tilan mitoitus- kuorma $q_{m(b=2,5m)}$ kN/m^2
17	60	60,0	24,0	78,0	31,2
22,5	80	80,0	32,0	104,0	41,6
24,5	86	86,0	34,4	111,8	44,7
25	88	88,0	35,2	114,4	45,8
30	106	106,0	42,4	137,8	55,1
35	120	120,0	48,0	156,0	62,4

Mitoittava tilanne on pysähtynyt juna. Sysäyskertoimen arvo on 1,0.

5 VARMUUSTASO

Taulukko 4. Vanhojen ratapenkereiden stabiiliteetin laskennassa käytettävät varmuusluvut

Mitoitus- tilanne	kuorman osa- varmuus- luku γ_q	$\tan\phi$ osa- varmuus- luku $\gamma_{\tan\phi}$	koheesion c osa- varmuus- luku γ_c	suljetun leikkaus- lujuuden s_u osavar- muusluku γ_{su}	kokonais- varmuus F_{kok}
Tavanomaiset ratapenkereet	1,3	1,35	1,5	1,4	1,5
Siirtymille herkät rakenteet, $q_{juna} =$ 0 kN/m	1,4	1,5	1,8	1,6	1,8

Taulukon 4 riviä ”Siirtymille herkät rakenteet” käytetään, jos ratapenkereen läheisyydessä on esimerkiksi paalutettuja perustuksia tai muita siirtymille herkkiä rakenteita. Tällöin vaaditaan rivin mukainen varmuustaso ilman junakuormaa niille liukupinnoille, jotka ulottuvat kyseiseen siirtymille herkkään rakenteeseen.

Huokosvedenpaine perustuu mitattuun arvoon sekä uusien ja/tai lyhytaikaisten kuormien lisäjännitykseen. Edellä mainitulle huokospaineen arvolle osavarmuusluku on 1,0.

Penkereen ja maapohjan tilavuuspainolle osavarmuusluku on 1,0.

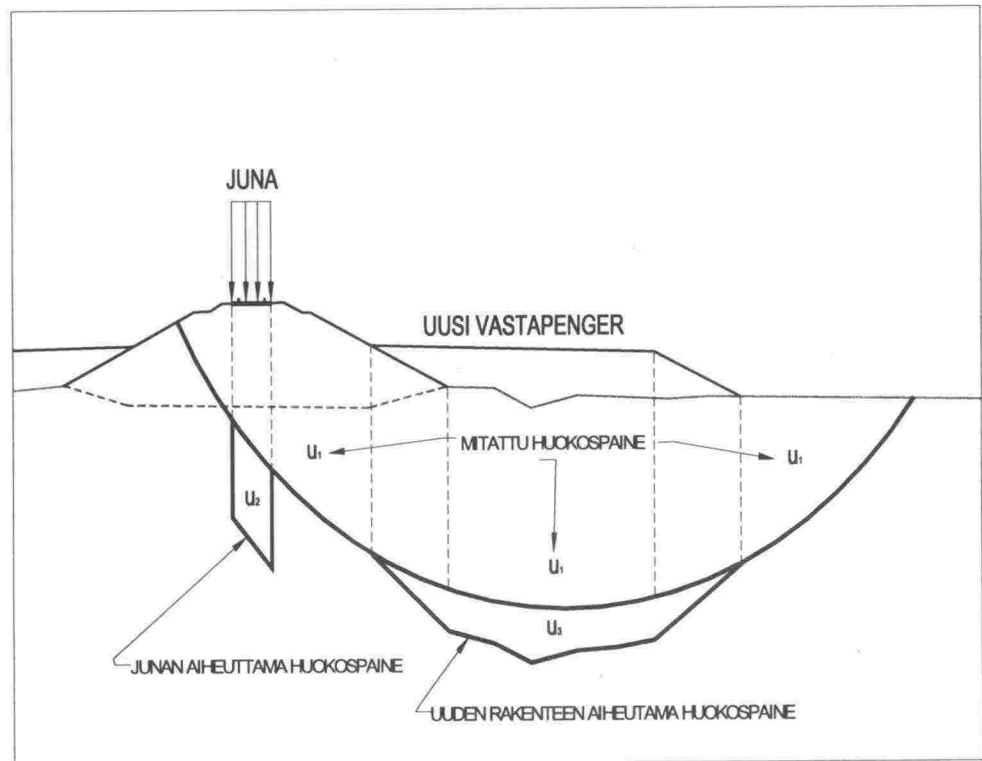
6 LASKENTAMENETELMÄN KÄYTTÖ JA VALINTA

6.1 Laskenta käyttäen tehokkaita lujuusparametrejä

Tässä kappaleessa käsitellään lamellimenetelmällä ja tehokkailla lujuusparametreilla c ja ϕ tapahtuvaa laskentaa. Menetelmä on käyttökelpoinen maalajin ollessa silttiä tai laihaa savea, kun savipitoisuus on alle 35 %. Mikäli maalaji on savea ja savipitoisuus on yli 35 % ja käytetään tehokkaita lujuusparametreja, laskelmat pitää aina tarkastaa elementtimenetelmällä käyttäen kaarevalla myöntöpinnalla varustettua materiaali-mallia (esim. modified cam clay).

Lujuusparametreina käytetään normaalikonsolidoituneelta alueelta määritettyjä arvoja. Murto tulkitaan huokospainerajan mukaan (ks.3.2.2).

Laskennassa käytettävä huokospaine määritetään kuvan 3 mukaan.



Kuva 3. Eri huokospainetta aiheuttavat tekijät lamellimenetelmässä

Laskennassa käytettävä huokospaine määritetään seuraavasti:

$$u_{tot} = u_1 + u_2 + u_3$$

1. Huokospaine u_1 mitataan ennen uusia rakenteita ja junaa. Paine tarkoittaa mitattua kokonaispainetta.

2. Junan aiheuttama huokospaine u_2 mallinnetaan junakuorman (kPa) suuruisena kuorman alla oleviin lamelleihin.
3. Uusien rakenteiden aiheuttama huokospaine u_3 mallinnetaan rakenteen painon (kPa) suuruisena rakenteen alla oleviin lamelleihin.

Huokospaine u_1 tarkoittaa huokospaineen kokonaisarvoa ennen rakentamista ja ilman junakuormaa. Se koostuu maassa ennen radan rakentamista vallinneesta huokospaineesta ja mahdollisesta jäljellä olevasta penkereen aiheuttamasta huokospaineesta. Mikäli samasta pisteestä eri syvyyksiltä mitattujen huokospaineiden nollassa on 0,2 m tarkkuudella sama, voidaan u_1 mallintaa laskelmissa pohjavedenpintana, muuten huokospaine mallinnetaan pisteittäin kattaen koko liukupinnan alue. Huokospaine u_1 on vain poikkeustapauksissa syvyysuunnassa vakio.

Huokospaineiden u_2 ja u_3 mallinnus voidaan toteuttaa käyttämällä parametria (esim. $B_{\text{par}} / \text{Slope}$), jolla erikseen määritetyn maakerroksen painoa vastaava jännitys lisätään huokospaineeseen alapuolisten lamellien kohdille. Junakuorma pitää tällöin ohjelmasta riippuen mallintaa maakerroksena.

Laskennassa käytettävän menetelmän pitää toteuttaa momenttitasapainoehto ja sen pitää huomioida lamellien väliset normaalivoimat. Ehdot täyttäviä menetelmiä ovat mm. Bishop-yksinkertaistettu, Spencer ja Morgenster-Price. Käytettäessä Janbun yksinkertaistettua menetelmää pitää varmistaa, että laskentaohjelma huomioi korjauskertoimen f_0 . Esimerkiksi yleisesti käytetty ohjelma SLOPE/W 2004 ei huomioi kerrointa f_0 . Felleniuksen (tavanomainen) menetelmää ei saa käyttää $c\phi$ -menetelmän yhteydessä.

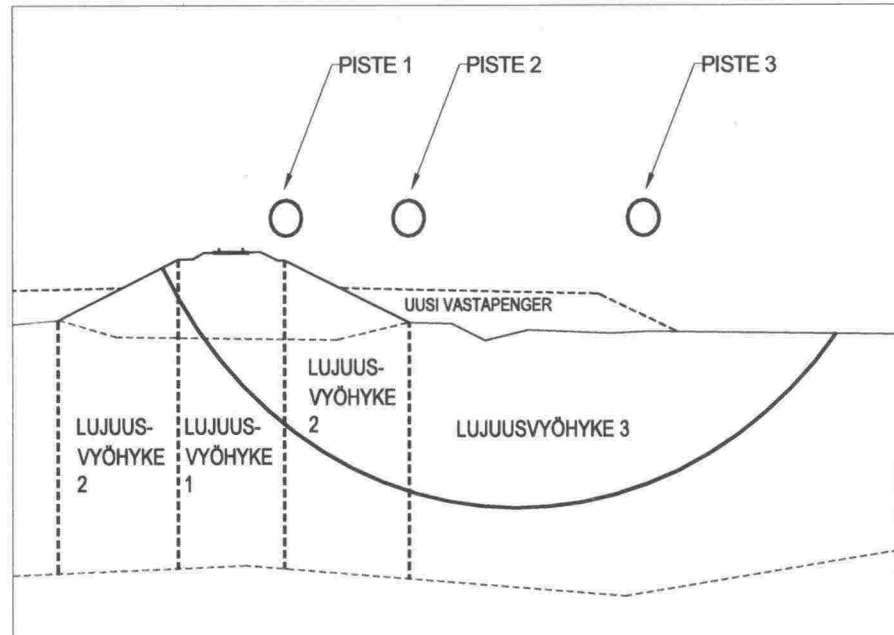
6.2 Laskenta käyttäen suljettua leikkauslujuutta

Tässä kappaleessa käsitellään lamellimenetelmällä ja suljetulla leikkauslujuudella s_u tapahtuvaa laskentaa (kiinteä lujuusprofiili). Menetelmä on käyttökelpoinen maalajin ollessa savea tai savista silttiä ja savipitoisuus on vähintään 25 %.

Pohjamaan ollessa turvetta ja junakuorman vaikuttaessa käytetään mitoituksessa suljettua leikkauslujuutta s_u .

Lujuusparametreina käytetään yleensä siipikairalla määritettyä redusoitua leikkauslujuutta (ks. 3.1.1). Turpeella suositellaan käytettäväksi suoralla leikkauskokeella määritettyä leikkauslujuutta.

Penkereen alla tapahtunut maan lujittuminen huomioidaan jakamalla pohjamaa kuvan 4 mukaan kolmeen lujuusvyöhykkeeseen.



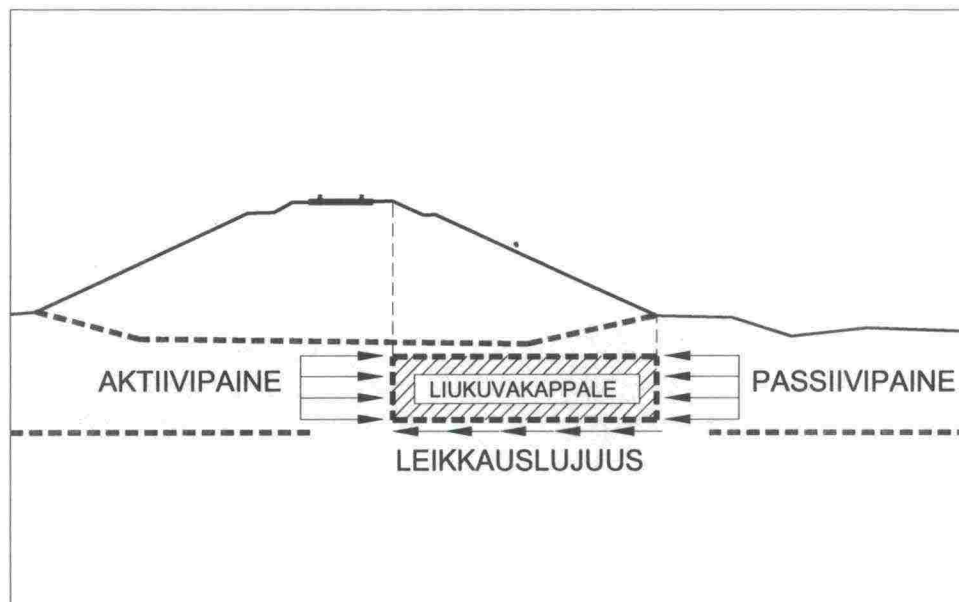
Kuva 4. Maapohjan jako vyöhykkeisiin käytettäessä suljettua leikkauslujuutta.

Kuvan 4 merkintöjä käyttäen määritetään leikkauslujuudet seuraavasti:

1. Lujuus vyöhykkeessä 1 on joko pisteestä 1 mitattu suljettu leikkauslujuus tai laskennallisesti määritetty lujittunut suljettu leikkauslujuus (ks. 7).
2. Lujuus vyöhykkeessä 2 on pisteestä 1 mitatun tai laskennallisesti määritetyn lujittuneen, suljetun leikkauslujuuden ja pisteestä 2 mitatun suljetun leikkauslujuuden keskiarvo.
3. Lujuus vyöhykkeessä 3 on pisteestä 3 mitattu suljettu leikkauslujuus.

Mikäli lujuus 1 on pienempi kuin lujuus 3, tämä on usein merkki erittäin heikosta stabiileetista.

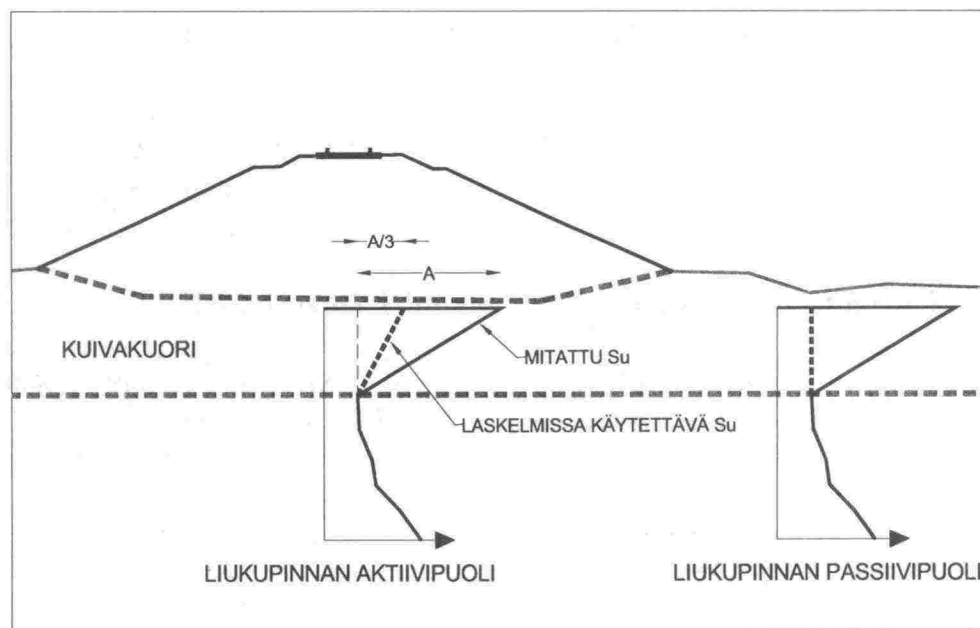
Mikäli pehmeän kerroksen paksuus on niin pieni, että se rajoittaa vaarallisimman liukupinnan kulkua, tarkastetaan, että varmuus penkereen alla olevan maan puristumiselle sivuille on riittävä. Tarkastelu tehdään kuvassa 5 esitettyä murtomekanismia käyttäen.



Kuva 5. Maan "puristuminen" penkereen alta

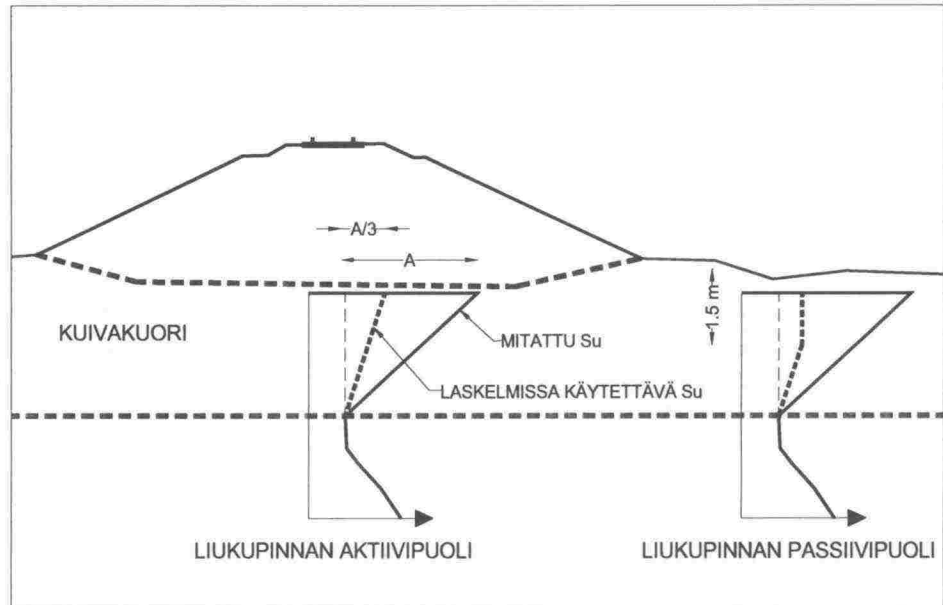
6.3 Kuivakuoren huomioonotto

Kuivakuori huomioidaan vakavuuslaskelmissa kuvan 6 esittämällä tavalla. Vaihtoehtoisesti voidaan $c\phi$ -analyysissä käyttää alapuoleisen maan kitkukulmaa.



Kuva 6. Kuivakuoren lujuus laskelmissa

Mikäli kuivakuoren paksuus ylittää 1,5 m ja on suurempi kuin $0,35 \cdot$ liukupinnan maksimisyvyys, voidaan kuivakuoren lujuus huomioida myös passiivipuolella kuvan 7 mukaan.



Kuva 7. Paksun kuivakuoren lujuus laskelmissa

Kuivakuoren lujuus aktiivipuolella voidaan myös mitata. Parhaiten tarkoitukseen sopii yksiaksiaalinen puristuskoee näytteelle $d \geq 50 \dots 100$ mm. Tällöin voidaan käyttää mitattua jäännöslujuuden arvoa.

7 LUJITTUMINEN

7.1 Lujittuminen käytettäessä tehokkaita lujuusparametrejä

Käytettäessä tehokkaasta jännityksestä riippuvia lujuusparametrejä ja kappaleessa 6.1 esitettyä huokospainetta huomioidaan lujittuminen automaattisesti lamellien pohjien leikkauslujuuksissa. Laskennassa käytettävät lujuusparametrit c ja ϕ ovat samat penkereen alla ja vieressä.

7.2 Lujittuminen käytettäessä suljettua leikkauslujuutta

Lujittumisen määrittämiseen käytetään pääasiassa kahta menetelmää. Suositeltavaa olisi määrittää lujuus penkereen alla tekemällä siipikairaus suoraan penkereen läpi. Toinen tapa on käyttää esikonsolitaatiojännityksen kasvua lujuuden kasvua arvioitaessa. Suoraan mittaukseen perustuva menetelmä on luotettavampi ja antaa yleensä suurempia lujuuksia kuin laskennallinen arvo.

Turpeen osalta voidaan todeta, että penkereen alta otetuista näytteistä mitattu suljettu leikkauslujuus on usein selvästi suurempi kuin vierestä otettujen ja penkereen painoa vastaavaan jännitystilaan konsolidoiduista näytteistä mitattu suljettu leikkauslujuus.

Esikonsolidaatiojännitys penkereen alla voidaan määrittää penkereen alta otetuista näytteistä. Tällöin on kuitenkin usein helpompaa tehdä siipi-kairaus penkereen läpi. Seuraavassa esitetään prosessi esikonsolidaatiojännityksen määrittämiseksi huokospainemittausten ja penkereen sivusta mitattujen tilavuuspainojen avulla.

1. Mitataan huokospaine penkereen alta u_{penger} ja 10...20 m penkereen sivusta u_{luon}
2. Lasketaan penkereen jäljellä oleva konsolidaatio ja vastaava huokospaine du kaavasta

$$du = u_{\text{penger}} - u_{\text{luon}}$$

3. Penkereen alla vallitseva konsolidaatiojännitys on

$$\sigma'_{c \text{ pengler}} = (\text{penkereen painon aiheuttama jännityslisäys}) + \sigma'_{vo} - du$$

missä:

$$\begin{aligned} \sigma'_{c \text{ pengler}} &= \text{penkereen alla vallitseva konsolidaatiojännitys} \geq \sigma'_{c \text{ luon}} \\ \sigma'_{vo} &= \text{luonnontilaisen maan vallitseva jännitys} \\ du &= \text{huokospaine-ero penkereen alla ja sivulla} \end{aligned}$$

Näin määritettyä penkereen alla vallitsevaa konsolidaatiojännitystä voidaan käyttää penkereen alapuoleisen lujuuden arviointiin (lujuus 1. kuva 3) alla esitetyn kaavan mukaan:

$$s_{u \text{ pa}} = \alpha \cdot \sigma'_{c \text{ pengler}}$$

missä

$$\begin{aligned} s_{u \text{ pa}} &= \text{suljettu leikkauslujuus penkereen alla} \\ \alpha &= 0,2 \text{ kivennäismaalajeilla} \\ \alpha &= 0,4 \text{ turpeilla} \\ \sigma'_{c \text{ pengler}} &= \text{konsolidaatiojännitys penkereen alla} \end{aligned}$$

Konsolidaatiojännityksen määrittäminen ödometrikokeella penkereen sivusta ei lujittumisen määrittämiseksi ole välttämätöntä. Se on kuitenkin suositeltavaa, jotta tiedetään σ'_c :n jakautuma kerroksittain (vrt. 3.1.1 Huokospainemittaukset ja 3.2.1.2).

8 LIUKUPINNAN SIJAINTI

Liukupinnan sijainnin suhteen noudatetaan seuraavia periaatteita:

1. Muissa kuin kohdassa 2 esitetyssä tapauksessa ei tarvitse huomioida pölkyn alta lähteviä liukupintoja.
2. Mikäli penkereen paksuus on alle 1,5 m ja penkereen alla olevan kuivakuoren paksuus on alle 0,5 m, tarkastetaan myös pölkyn alta lähtevät liukupinnat.
3. Kohdat 1 ja 2 huomioiden haetaan vaarallisin liukupinta. Penkereen lujuus huomioidaan liukupinnan koko matkalla.
4. Vaarallisimman liukupinnan kokeellisessa haussa pitää liukupintojen lähtöpisteiden kattaa penkereen luiska ja laki kokonaisuudessaan kohta 1 huomioiden.
5. Useampiraiteisten ratojen kuormien yhdistely tehdään RAMOn osan 3 mukaan /1/.

9 POHJAVAHVISTUSTEN HUOMIOONOTTO

Tehtäessä pohjavahvistuksia olemassa olevan ratapenkereen läheisyydessä pitää vakavuuslaskelmissa huomioida ainakin seuraavat asiat:

1. Vastapenkereiden ja muiden täyttöjen vaikutus huokospaineeseen pitää huomioida kappaleessa 6.1 esitetyllä tavalla.
2. Paalutuksen, stabiloinnin tai vastaavan maapohjan häiriintymistä ja huokosvedenpaineen nousua aiheuttavan toiminnan vaikutus huomioidaan seuraavasti:
 - Ensisijaisesti leikkauslujuutta pienentävä vaikutus tutkitaan siipikairalla. Suunnitteluvaiheessa määritetään leikkauslujuuden kriittinen arvo, jonka alle ei rakennusaikana voida mennä. Rakennusaikana leikkauslujuuden pienenemistä seurataan tekemällä siipikairauksia 0,5 m paalun, pilarin tms. pinnasta ja em. rakenteiden puolivälistä. Vertaamalla näitä tuloksia ennen rakentamista tehtyihin siipikairauksiin nähdään lujuuden lasku. Tutkimukset pitää aloittaa ennen vaarallisinta poikkileikkausta, jotta tarvittavat toimenpiteet voidaan ennakoita.
 - Toissijainen vaihtoehto on huokospaineen seuranta. Menetelmä edellyttää vakavuuden laskentaa tehokkailla parametreilla, jonka perusteella määritetään huokospaineen maksimi-arvo. Huokospainekärjet pitää asentaa ennen rakentamista. Niiden tulee kattaa syvyys-suunnassa kaikki merkitsevät maakerrokset. Vaakasunnassa mittaus-

pisteet sijoitetaan 0,5 m rakenteen pinnasta ja rakenteiden puoliväliin. Tutkimukset pitää aloittaa ennen vaarallisinta poikkileikkausta, jotta tarvittavat toimenpiteet voidaan ennakoita.

Työohjeita

Yksittäisen paalun lyönti aiheuttaa huokosvedenylipainetta 3...6 kertaa paalun läpimitan etäisyydelle paalusta. Laaja-alaisessa paalutuksessa vaikutusalue voi ulottua maakerroksiltaan tasaisilla alueilla 20...30 metrin etäisyydelle paalutuksen reunasta.

Alustavissa tarkasteluissa voidaan kyllästyneen huonosti vettä läpäisevän maan huokosveden ylipaineen olettaa olevan yksittäisen paalun vieressä samansuuruinen kuin maan omaa painoa vastaava pystysuora maanpaine.

Vakavuutta voidaan työnaikana parantaa työnaikaisilla vastapenkereillä, jotka poistetaan lujuuden riittävän palautumisen jälkeen.

Huokosveden ylipainetta ja häiriintymistä voidaan vähentää seuraavilla toimenpiteillä:

- Poistamalla savea lyötävän paalun kohdalta esimerkiksi putkiottimella tai auger-kairauksella.
- Varustamalla lyötävä paalu pystyjoilla
- Käyttämällä pieniläpimittaisia teräspaaluja. Tällöin on paalun syrjäyttämän maan ja paalun kantavuuden suhde (m^3/kN) minimoitava.
- Työjärjestyksellä, jossa ensin lyödään osa esimerkiksi joka toinen paalu ja myöhemmin huokosvedenpaineen alennettua loput paaluista.

Mikäli kohde arvioidaan stabiiliteetiltaan kriittiseksi, voidaan siirtymiä seurata inklinometrimittauksilla.

Mikäli tutkitun radan vakavuus ei ole riittävä, voidaan käyttää esimerkiksi seuraavia toimenpiteitä. Toimenpiteet suunnitellaan asianomaisten ohjeiden mukaan.

Nykyisen radan vakavuutta parantavat toimenpiteet kohdistuvat joko nykyisen radan alle, sen viereen tai näiden yhdistelmänä. Valintaan vaikuttaa se, onko mahdollista toimia ATUn sisäpuolella.

1. Nykyisen radan alle tehtäviä toimenpiteitä ovat pengerpaalulaatta (RMYTL 3.3), massanvaihto (RMYTL 3.6) tai kevennys (RMYTL 5.4) /6/.
2. Nykyisen radan vieressä tehtäviä toimenpiteitä ovat vastapenger (RMYTL 5.2.5), tukimassanvaihto sekä stabilointi tietyin reunaehdoin (RAMO 3, taulukko 3.8:5a huomautus 1; RMYTL 3.7.2) /7, 1/.

3. Nykyisen radan vieressä tehtävä, mutta sen alle ulottuva toimenpide on radan vieressä rakennettava, mutta radan alle ankkuroitava tukiseinä.

Vastapenger

Vastapengertä käytetään pohjavahvistustoimenpiteenä, mikäli stabiliteetti sen avulla paranee vaadittuun arvoon. Vastapenger on osa ratarakennetta, joten sen stabiliteetti on laskettava samalla varmuustasolla kuin rata-penkereenkin.

Paalulaatta

Pengerpaalulaatan käytöstä on vaatimuksia RAMOn osan 3 kohdissa 3.7 ja 3.8.6/1/.

Paalulaattaa käytetään lähinnä, kun vastapenkereillä ei saavuteta riittävää stabiliteettia.

Massanvaihto

Massanvaihto voidaan tehdä joko nykyisen raiteen alle tai tukimassanvaihtona liikennöitävän raiteen viereen.

Massanvaihto tulee tehdä vaiheittain lyhyissä osissa siten, että täyttö tehdään heti kaivun perään. Radan välittömässä läheisyydessä tehtävä massanvaihto vaatii raidevarauksen.

Tukiseinä

Kaltevassa maastossa, jossa vastapenkereen stabiliteettia ei saada riittäväksi, raiteen alle maahan tai kallioon ankkuroitu tukiseinä saattaa olla toimiva ratkaisu. Tukiseinä saattaa olla toimiva ratkaisu myös tapauksissa, jossa paalutustyön pelätään aiheuttavan penkereen sortuma-vaaran.

Stabilointi

Stabilointi soveltuu pohjavahvistusmenetelmäksi vain, mikäli rata-penkereen stabiliteetti on RAMOn osan 3, taulukko 3.8:5a huomautus 1 mukainen /1/. Edellä mainitusta kohdasta voidaan poiketa perustellusta syystä silloin, kun radan kuormitus ei kasva.

Liikennöitävän olemassa olevan raiteen alla ei yleensä käytetä stabilointia.

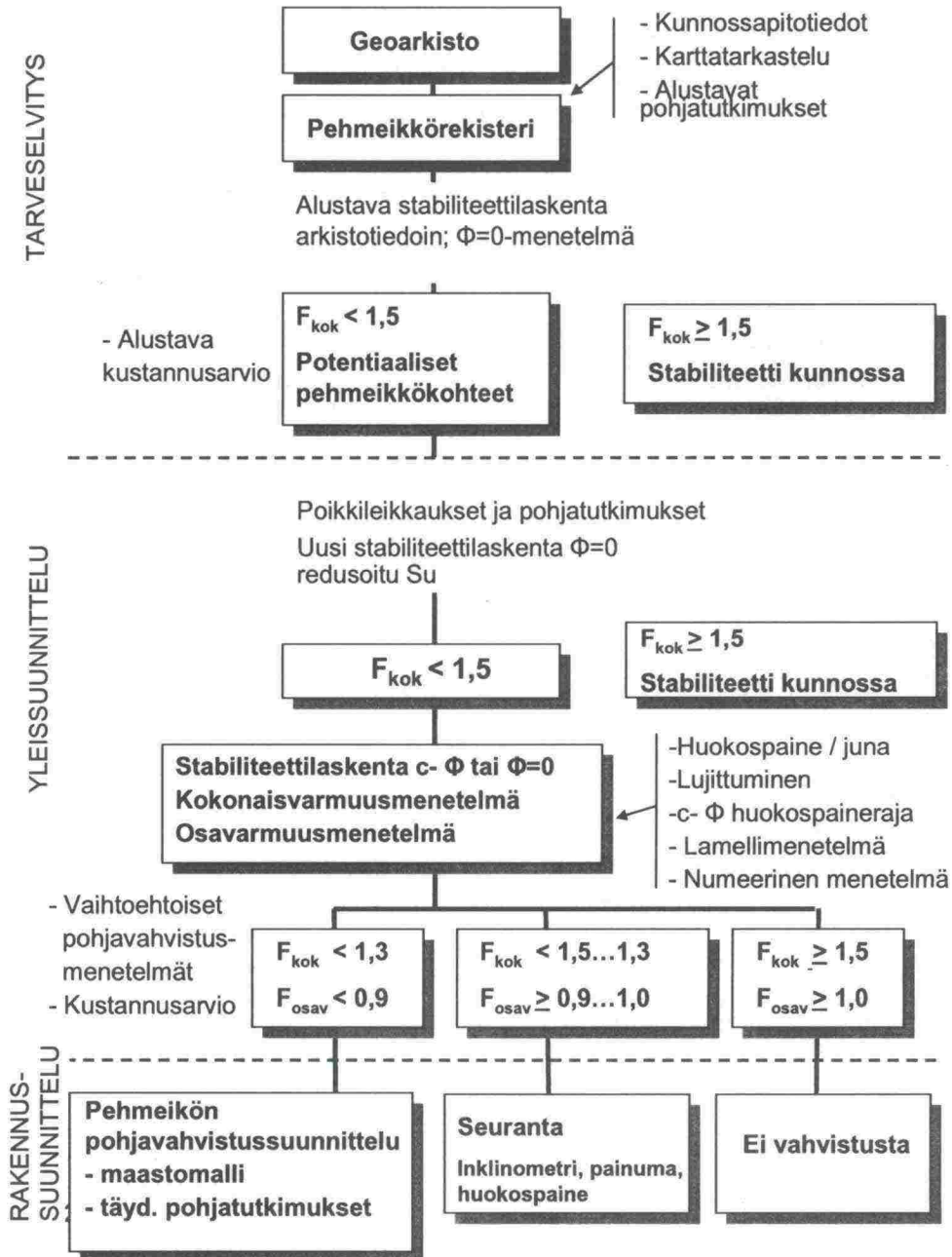
Erillisistä pilareista koostuvaa stabilointia ei käytetä leikkauspinnan leikkauslujuuden parantamiseen.

Massastabilointi soveltuu ratapenkereen stabiiliteetin parantamiseen, kun stabilointisyvyys on alle 5 m.

Stabilointi liikennöitävän radan vieressä tulee tehdä vaiheittain lyhyissä kaistoissa toisistaan riittävän pitkillä etäisyyksillä siten, että tehty kenttä ehtii lujittua ennen kuin viereen aletaan tehdä uutta.

10 LASKENTAPROSESSI ERI SUUNNITTELUVAIHEISSA

Kaaviossa (kuva 8) on esitetty vakavuuslaskennan päävaiheet eri suunnitteluvaiheissa. Kaavio koskee tapausta, jossa vaadittu kokonaisvarmuus on $F_{\text{kok}} = 1,5$. Kohteissa, joissa vaadittu kokonaisvarmuus F_{kok} on 1,8, kerrotaan kaavion kokonaisvarmuudet kertoimella 1,2.



Kuva 8. Vakavuuslaskennan päävaiheet eri suunnitteluvaiheissa

Kaikkia suunnitteluvaiheita koskien etenee vakavuustarkastelu vaiheittain seuraavasti:

1. Poikkileikkauksittain tutkitaan vakavuus kaavalla

$$F = 5,5 \frac{S_{ured}}{q}$$

missä

S_{ured} = suljetun leikkauslujuuden redusoitu arvo
 q = penkereen omapaino lisättyä junakuormalla jaettuna ratapölkkyjen pituudelle ja jakamalla kuorma penkereen alapintaan 2:1 menetelmällä.

2. Edellisen kohdan perusteella vaarallisimmat poikkileikkaukset tutkitaan jollain taulukkolaskentaan pohjautuvalla yksinkertaisella laskentaohjelmalla (esim. ms-vaka) $\varphi = 0$ menetelmällä. Laskentaa jatketaan, kunnes on kartoitettu alue, jolla kokonaisvarmuus on alle vaaditun.
3. Edellisen kohdan perusteella vaarallisimmat poikkileikkaukset tutkitaan tarkemman geometrian, kerros- ja lamellijaon sekä huokospaineen mallintamisen tarjoavalla ohjelmalla käyttäen $\varphi = 0$ tai $c-\varphi$ -menetelmää (vrt. 6). Ohjelmassa tulee olla mahdollisuus leikkauslujuuden lineaariseen muuttumiseen syvyyden mukaan. Vaihtoehtoisesti tämä voidaan toteuttaa käyttämällä tiheää kerrosjakoa.
4. Mikäli vakavuus ei ole riittävä, määritetään penkereen aiheuttama lujittuminen ja toistetaan edellisen kohdan laskelmat.
5. Taloudellisesti merkittävässä kohteissa tehdään vakavuuslaskenta käyttäen numeerista menetelmää ja kaarevalla myötöpinnalla varustettua maamallia (esim. mcc).

11 TÄRINÄN JA VÄRÄHTELYN VAIKUTUS

Pääsääntöisesti mitoittava tilanne syntyy pysähtyneen junan alla. Liitteessä 2 on esitetty menettely tämän asian tarkastamiseksi.

12 LASKELMIEN ESITYSTAPA

Lopputulokset kootaan liitteen 1 taulukkoon. Lisäksi tutkituista poikkileikkauksista esitetään seuraavat asiat:

1. Tutkimuspoikkileikkaus, johon voidaan suoraan lisätä kappaleen 10 mukaisella kantavuuskaavalla laskettu kokonaisvarmuus laskelmineen.
2. Stabiileettilaskelma. Tulosteessa tulee näkyä käytetyt parametrit.
3. Lujuusparametrien määrittäminen
 - $c - \varphi$ analyysissä: laboratoriotuloste, jännityspolut ja murtosuora
 - $\varphi=0$ analyysissä: s_v - tai s_k -diagrammit, tekotapa ja redusointi

VIITTEET

- /1/ Ratatekniset määräykset ja ohjeet (RAMO) osa 3 Radan rakenne, Ratahallintokeskus 2002
- /2/ EN 1997-1 Eurocode 7: Geotechnical Design, CEN TC250 "Structural Eurocodes"
- /3/ Geotekniset laboratorio-ohjeet (GLO-85), Suomen geoteknillinen yhdistys r.y.
- /4/ Teiden pohjarakenteiden suunnitteluperusteet, Tiehallinto 2001
- /5/ Kairausopas I, Painokairaus, tärykairaus, heijarikairaus; Kairausopas II, Siipikairausopas; Kairausopas III, Maanäytteiden ottaminen geoteknillisiä tutkimuksia varten; Kairausopas IV, Pohjavedenpinnan ja huokosvedenpaineen mittaaminen; Kairausopas VI, CPTU/Puristinkairaus, Puristinheijarikairaus, Suomen geoteknillinen yhdistys r.y.
- /6/ Rautatien maarakennustöiden yleinen työselitys ja laatuvaatimukset (RMYTL), osa 3 Perustamis- ja vahvistamistyöt sekä osa 5 Maaleikkaus- ja pengerrystyöt, Ratahallintokeskus 1999

HUOKOSVEDENPAINEN NOUSU DYNAAMISEN JUNAKUORMAN VAIKUTUKSESTA

Uusilla ja sellaisilla perusparannetuilla radoilla, joissa penkereen painoa on lisätty, raskas liikenne voi aikaansaada pehmeissä savissa ja silteissä huokosvedenpaineen kumulatiivista kasvua junan ylityksen aikana. Kasvava huokosvedenpaine pienentää maan lujuutta. Huokosvedenpaine voi kasvaa jonkin aikaa vielä ohituksen jälkeenkin, mutta purkautuu yleensä muutamissa minuuteissa junan ohituksen jälkeen. Vanhalla, muuttamattomalla ratapenkereellä myös ensi kertaa käyttöönotettava, aikaisempaa korkeampi akselikuorma voi aikaansaada kumulatiivista huokosvedenpaineen kasvua. Dynaamisen huokosvedenpaineen merkitys ratapenkereen vakavuuteen pienenee ajan mittaan, kun ratapenkereen mahdollisen painon lisäyksen aikaansaama staattinen huokosylipaine purkautuu ja penkereen alapuoliseen maapohjaan on kohdistunut riittävän monta kertaa junaliikenteen aikaansaama kumulatiivinen huokosylipaine.

Huokosvedenpaineen kasvu riippuu lähinnä telikuormista, penkereen kokonaispaksuudesta ja maapohjan ominaisuuksista penkereen alapuolella. Tavarajunien nopeuseroilla ei ole huokosvedenpaineen kasvun suuruuteen suurtakaan merkitystä. Raiteessa olevat paikalliset taipumat ja muut epäjatkavuudet lisäävät kuitenkin huokosvedenpaineen kasvun paikallista riskiä lisäämällä maahan kohdistuvan toistuvan kuormituksen sysäysvoimia.

Huokosvedenpaine kasvaa sitä enemmän, mitä suurempia muodonmuutoksia maahan syntyy. Vakavuustarkastelussa kriittiset maakerrokset ovat tällöin liukupinnan aktiivivyöhykkeellä välittömästi penkereen alapuolella muutamien ylimpien metrien alueella. Mikäli aktiivivyöhykkeessä lujuuden mobilisoitumisaste nousee yli arvon noin 0,6, riski huokospaineen kumulatiiviselle kasvulle on jo selkeästi olemassa. Mobilisoitumisaste on junakuormituksen ja pengerkuormituksen yhdessä aikaansaaman leikkausjännityksen suhde maan staattiseen leikkauslujuuteen. Mitä suurempi lujuuden mobilisoituminen on, sitä pienemmällä akselimäärällä huokosvedenpainetta syntyy. Jos penkereen alapuolisen maan leikkauslujuus on alle 8 kPa, mobilisoitumisaste ylittää aktiivivyöhykkeellä arvon 1, jolloin maa joutuu penkereen alla suoraan murto-tilaan. Toisaalta huokospaineen nousua ei merkittävämmässä määrin yleensä esiinny, kun maapohjan leikkauslujuus ylittää arvon 15...20 ja penkereen minimipaksuus ylittää arvon 1,5 m.

Savilla ja silteillä huokosvedenpaineen kasvun suuruuteen vaikuttavat maan mineralogisten ominaisuuksien, rakeisuuden, vesipitoisuuden, sensitiivisyyden ja plastisuuden lisäksi useat muutkin tekijät. Huokosvedenpaineen kasvua maamateriaalikohtaisesti voidaan luotettavasti tutkia ainoastaan syklisillä kolmiakselikokeilla. Suljetun tilan staattisilla kolmiakselikokeilla määritetyille kitkan ja koheesion arvioilla voidaan suuruusluokalleen arvioida kumuloituvan huokosvedenpaineen suuruutta, kuten

ilmenee liitteen 2 kuvaajista. Mikäli käytettävissä ei ole kolmiakselikokeiden tuloksia, huokospaineen kasvua voidaan arvioida siipikairaus-tulosten perusteella likimääräisesti.

Junaliikenteen dynaamisuuden aikaansaama huokosveden ylipaine otetaan huomioon vakavuuslaskennoissa kuvan 1 diagrammeilla. Kuvan 1 kuvaajat on laskettu tavarajunalle, jossa on 100 teliä akselikuormilla 250 kN. Sysäyskertoimeksi on oletettu 1,25. Tarkasteluiden taustalla ovat normaalisti konsolidoituneille saviille laboratoriossa määritettyjä kokemus-peräisiä arvoja. Liejupitoisten ja hyvin pehmeiden savien suhteen seuraavassa esitetty menettely voi johtaa epävarmalla puolella olevaan lopputulokseen.

Kuvan 1 soveltaminen tehdään seuraavasti:

1. Arvioidaan penkereen kokonaispaksuus H tukikerroksen pinnasta penkereen alapintaan. Penkereen paksuutena voidaan huomioida karkearakeisista maamateriaaleista tehdyt maalaatikot sekä pehmeiköillä maahan painunut osa penkereestä. Mikäli penkereen alapinnan taso vaihtelee, penkereen kokonaispaksuudeksi valitaan keskimääräinen etäisyys tukikerroksen pinnasta penkereen alapinnan keskimääräiseen tasoon sillä alueella, joka jää ratapölkkyjen päistä 45 asteen kaltevuudessa piirrettyjen viivojen sisälle. Mikäli penkereen alapuolella on selkeästi penkereen aikaansaaman kuorman suhteen ylikonsolidoitunut savikerros, kuivakuorikerros, voidaan sen paksuus lisätä penkereen laskennalliseen kokonaispaksuuteen. Saadaan H .
2. Määritetään penkereen alapuolisen maan kitkakulma ja koheesio suljetussa tilassa (kolmiakselikoe). Mikäli käytössä ei ole kolmiakselikoetuloksia, voidaan lujuusparametrit c ja ϕ määrittää huokospaineen kasvun arviointia varten likimäärin siipikairaus-tuloksista. Määrittely tehdään (vain kumulatiivisen huokospaineen kasvun arvioimiseksi) taulukon 1 avulla olettamalla koheesioksi vakio $c = 8,5$ kPa ja määrittelemällä kuvaa 1 käytettäessä sovellettava kitkakulma ϕ^* .

Taulukko 1. Kitkakulman määrittäminen siipikairausleikkauslujuudesta kumulatiivisen huokosylipaineen arviointia varten. Väliarvot voidaan interpoloida lineaarisesti.

Siipikairausleikkauslujuus, kN/m ²	Koheesio c, kPa	Sovellettava kitkakulma φ^* , astetta
8,5	8,5	0
9	8,5	2
10	8,5	5,5
11	8,5	7,5
12	8,5	9
13	8,5	10,5
14	8,5	12
15	8,5	13,3
16	8,5	15

- Määritetään kumulatiivinen huokospainevedenpainejakauma kuvasta 1. Maapohjan lujuusparametreja c ja φ (tai $c=8,5$ kPa ja φ^* ; käytössä vain siipikairauslujuuksia) käyttäen määritetään ne etäisyydet penkereen yläpinnasta, missä huokospaine saa arvot 1, 4, 10 kPa jne. Mikäli penkereen alapinnan tasolla kumulatiivinen huokosvedenpaine on enintään 4 kPa, kumuloituvan huokospaineen riskiä ei kohteessa tarvitse huomioida.
- Huomioidaan kumuloituva huokosvedenpaine vakavuustarkastelussa. Vakavuuden laskentaohjelmissa, joissa huokospaine voidaan antaa suoraan painearvona eri osissa laskettavaa leikkausta, voidaan laskelmissa käyttää suoraan kuvasta 1 määritettyjä arvoja. Mikäli käytetään laskentaohjelmia, joissa vedenpaine annetaan pohjavedenpinnan tasona, vedenpintaa nostetaan vakavuuslaskelmissa penkereen alapinnan tasossa määritettyä kumulatiivisen huokosveden painetasoa vastaavalla määrällä (10 kPa vastaa 1 m vedenpinnan nousua). Vedenpinta voi tällöin nousta myös vettä johtavan pengermateriaalin sisälle. Nosto tehdään alueella, joka sijoittuu pölkkyjen päistä 45 asteen kaltevuudella vedettyjen viivojen sisäpuolelle, ks. kuva 1. Vakavuustarkastelu tehdään tästä eteenpäin tavanomaisella tavalla.

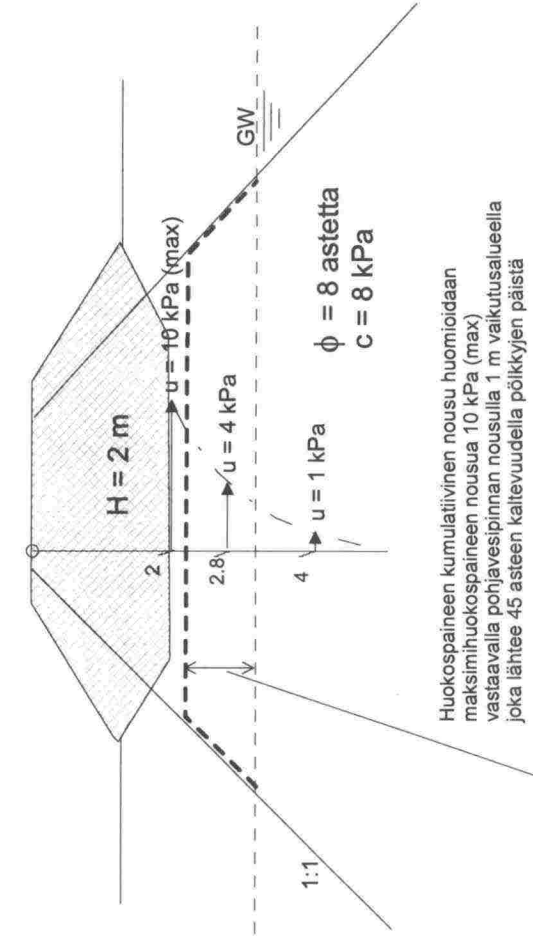
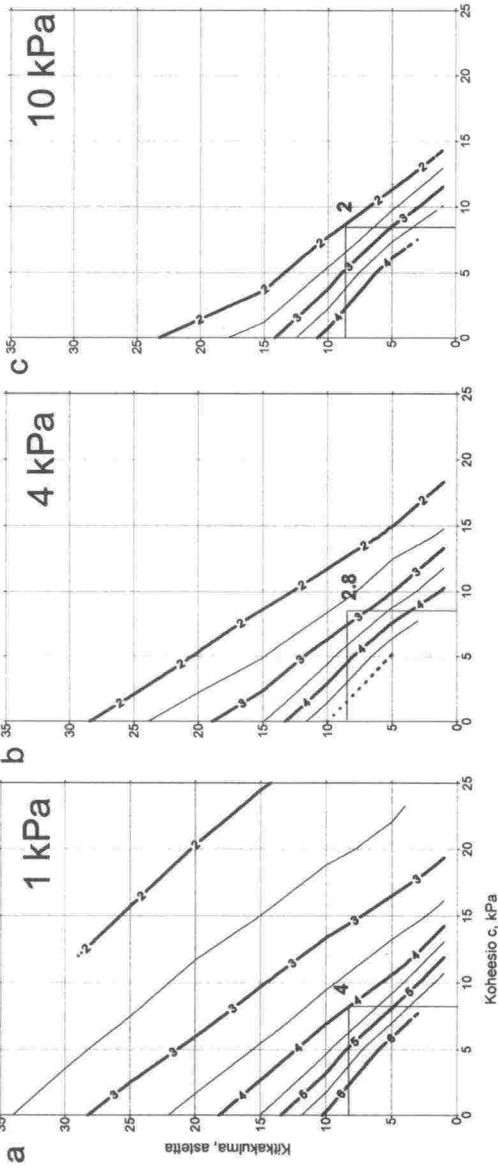
Nostettaessa ratapenkereen korkeutta aikaisemmin vallinneeseen tasoon verrattuna, taikka muuten lisättäessä pengerkuorman suuruutta, staattinen lisäkuorma aikaansaa maapohjaan staattisen, konsolidaation kehittymisen myötä pienentyvän huokosveden ylipaineen. Siinä vaiheessa, jossa staattinen huokosveden ylipaine ei vielä ole purkautunut, staattinen huokosveden ylipaine kasvattaa myös dynaamisen junakuorman aikaansaamaa leikkauslujuuden mobilisointiasetta. Tällöin myös kumulatiivinen, huokosveden ylipaine kasvaa enemmän kuin edellä ja kuvan 1 diagrammien perusteella on arvioitavissa. Staattinen huokosveden ylipaine huomioidaan kasvattamalla vastaavalla määrällä liitteen 2

Radan stabiileetin laskenta, olemassa olevat penkereet

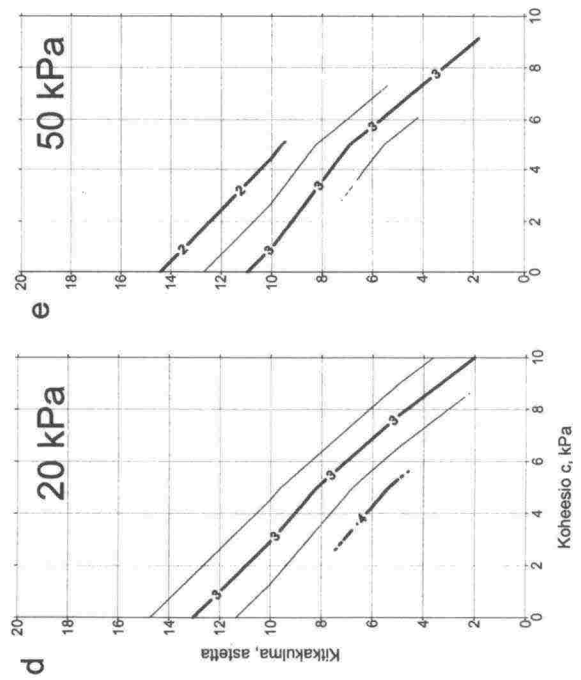
diagrammeista saatavaa etäisyyttä penkereen yläpintaan. Esimerkiksi 20 kPa suuruinen staattinen huokosveden ylipaine penkereen alapuolella huomioidaan lisäämällä kuvan 1 etäisyyksiä määrällä $20/\gamma$. γ on maan märkätilavuuspaino. Tässä tapauksessa esimerkiksi kuvan 1 diagrammissa b 4:ää kPa vastaava etäisyys penkereen yläpinnasta saavutetaan 2,8 m sijasta etäisyydellä $2,8+(20/17) = 4,0$ m penkereen yläpinnasta, jos maakerroksen märkätilavuuspaino on 17 kN/m³.

Kumulatiivinen huokospaineen nousu junakuorman vaikutuksesta (100 teliä, staattinen akselikuorma 25 tonnia, maapohja savea taikka siltiä)

Penkereen paksuudeksi diagrammeja käytettäessä huomioidaan varsinaisen penkereen lisäksi karkearakeinen täyttö sekä penkereen alapuolella oleva mahdollinen kuivakuorikerros (OCR varmuudella yli 2)



Huokospaineen kumulatiivinen nousu huomioidaan maksimihuokospaineen nousua 10 kPa (max) vastaavalla pohjavesipinnan nousulla 1 m vaikutusalueella joka lähtee 45 asteen kaltevuudella pölkkyjen päistä



Kuva 1. Kumulatiivisen huokosylipaineen arviointi dynaamisen junakuormituksen seurauksena c - ϕ -vakavuusanalyysiä varten

- 1
- 2 Yleisohje johdoista ja kaapeleista Ratahallintokeskuksen alueella (B 13 korvannut)
- 3 Teollisuus- ja satamaradat
- 4 Radan suunnitteluohje
- 5 Sähköratamääräykset
- 6 Johtoteiden suunnitteluohjeet
- 7 Maakaapeleiden kaivu- ja asennusohjeet
- 8 Ratojen routasuojaustarpeen selvittäminen, tutkimusohje
- 9 Laittilojen ja valaisimien maadoittaminen
- 10 Sähköturvallisuusmääräysten soveltaminen sähköradan kiinteisiin laitteisiin
- 11 Rautateiden melusteet
- 12 Ratainvestointien hankearviointiohje
- 13 Yleisohje johdoista ja kaapeleista Ratahallintokeskuksen alueella
- 14 Asema-alueiden aidat

RATAHALLINTOKESKUS
KESKUSKATU 8, PL 185
00101 HELSINKI

Lisätietoja: Matti Levomäki, puh. (09) 5840 5183, sähköposti: matti.levomaki@rhk.fi
Jakelu: VR Kirjapaino, puh.0307 25874, faksi 0307 25826