

## Suljettu leikkauslujuus stabiliteettilaskelmissa Suunnittelu lamellimenetelmällä





# Suljettu leikkauslujuus stabiliteetilaskelmissa

Suunnittelu lamellimenetelmällä

Liikenneviraston oppaita 2/2018

Liikennevirasto

Helsinki 2018

*Kannen kuva: Ramboll Finland Oy*

Verkojulkaisu pdf ([www.liikennevirasto.fi](http://www.liikennevirasto.fi))

ISSN-L 1798-6591

ISSN 1798-6605

ISBN 978-952-317-630-0

Liikennevirasto

PL 33

00521 HELSINKI

Puhelin 0295 34 3000

## Esipuhe

Tämä julkaisu toimii osaltaan tausta-aineistona Liikenneviraston ohjeelle Penkereiden stabiliteetin laskentaohje (LO 14/2018). Oppaan on kirjoittanut Ville Lehtonen.

Oppaan tarkoitus on antaa suunnittelijoille taustatietoa epäorgaanisen saven suljettuun leikkauslujuuteen vaikuttavista tekijöistä sekä esittää tapoja sen mallintamiseen stabiliteettilaskelmissa. Pääpaino on lamellimenetelmän käytössä. Lisäksi oppaassa esitellään saven suljetun leikkauslujuuden mallintamiseen soveltuvan HSU-menetelmän (Lehtonen 2015) taustaa sekä menetelmän käyttämät kaavat. HSU-menetelmä on hyväksytty käytettäväksi Liikenneviraston projekteissa.

Helsingissä joulukuussa 2018

Liikennevirasto  
Tekniikka- ja ympäristöosasto

## Sisällysluettelo

1	YLEISTÄ.....	5
2	TAUSTAA JA TEORIAA .....	6
2.1	Stabiliteettilaskenta lamellimenetelmällä.....	6
2.2	Suljettu leikkauslujuus .....	7
2.3	Lujuuden anisotropia .....	8
2.4	Lujuuden aikariippuvuus .....	10
2.5	Lujuuden riippuvuus muodonmuutostasosta.....	11
2.6	Lujuuden redusointi .....	13
3	SULJETUN LEIKKAUSLUJUUDEN MÄÄRITTÄMINEN.....	14
3.1	Yleistä .....	14
3.2	Anisotrooppisen lujuuden käytöstä .....	14
3.3	Lujuuden määrittäminen mittamalla .....	15
	3.3.1 Mitattu isotrooppinen lujuus.....	15
	3.3.2 Mitattu anisotrooppinen lujuus .....	15
3.4	Lujuus mallintamalla (HSU).....	16
3.5	Lujuus korrelaatioilla arvioituna.....	19
	LÄHTEET .....	21
	LIITTEET	
Liite 1	Anisotrooppisen suljetun leikkauslujuuden määrittäminen ja käyttö lamellimenetelmissä	
Liite 2	HSU:n käyttö Excel-laskentapohjalla	
Liite 3	HSU-nomogrammi oletusparametreilla	
Liite 4	Anisotrooppisen lujuuden mallintaminen eri laskentaohjelmissa	
Liite 5	HSU-menetelmän kaavat	

# 1 Yleistä

Tämän julkaisun tarkoitus on opastaa suljetun leikkauslujuuden mallintamisessa pehmeillä pohjamailla sijaitsevien penkereiden ja luiskien stabiliteettilaskennassa. Penkereiden stabiliteettilaskennasta on laadittu Penkereiden stabiliteetin laskentaohje (Liikenneviraston ohjeita 14/2018). Kyseisessä ohjeessa on selostettu käytännöt stabiliteettilaskennasta ja siihen tarvittavista lähtötiedoista. Tämä opas täydentää Penkereiden stabiliteetin laskentaohjetta sen osalta, miten lyhytaikaisen stabiliteetin laskennassa käytettävää suljettua leikkauslujuutta voidaan arvioida ja käyttää laskelmissa.

Oppaassa esitetään lyhyesti saven suljettuun leikkauslujuuteen vaikuttavia tekijöitä ja niiden huomiointia erityisesti lamellimenetelmää käyttävässä stabiliteettilaskennassa. Oppaan pääasiallinen sisältö esittää erilaisia tapoja mallintaa suljettua leikkauslujuutta stabiliteettilaskelmissa. Näitä ovat suoriin mittauksiin tai korrelaatioihin perustuvat menetelmät, sekä suljetun leikkauslujuuden mallintaminen tehokkaisiin lujuusparametreihin ja konsolidaatiotilaan perustuen (HSU-menetelmä).

HSU-menetelmä on kehitetty Liikenneviraston rahoittamassa väitöskirjatyössä (Lehtonen 2015). Menetelmä on kehitetty suunnittelun apuvälineeksi. Tarkoitus on ollut tarjota suunnittelijoille työkalu parantamaan stabiliteettilaskennan tarkkuutta saven lujuuden osalta.

Tässä oppaassa esitettävät suljetun leikkauslujuuden mallintamismenetelmät ovat sallittuja Liikenneviraston projekteissa siltä osin, kuin ne on esitetty Penkereiden stabiliteetin laskentaohjeessa. Valinta eri menetelmien välillä tulee kuitenkin aina perustella ja käytettävien parametrien johtaminen tulee dokumentoida laskelmissa riittävän selkeästi.

Jos Penkereiden stabiliteetin laskentaohjeessa esitetystä suljetun leikkauslujuuden redusoinnista poiketaan, tulee lujuuteen vaikuttavat tekijät (erityisesti anisotropia, muodonmuutostaso ja muodonmuutosnopeus) huomioida muilla tavoilla perustellusti. Esimerkiksi HSU-menetelmän oikealla käytöllä nämä tekijät huomioidaan implisiittisesti.

## 2 Taustaa ja teoriaa

### 2.1 Stabiliteettilaskenta lamellimenetelmällä

Nykyisessä geoteknisessä suunnittelukäytännössä penkereiden ja luiskien lyhyt-aikainen stabiliteetti lasketaan tyypillisesti lamellimenetelmällä. Elementtimenetelmää (FEM) käytetään lähinnä monimutkaisten tai haastavien kohteiden laskennassa ja ”jokapäiväinen” suunnittelu tehdään pääosin lamellimenetelmällä.

Kirjoitushetkellä Suomessa käytetyimmät lamellimenetelmää hyödyntävät laskentaohjelmat ovat GeoCalc, SLOPE/W ja Slide. Nämä eroavat jonkin verran käyttöliittymiltään (erityisesti geometrian luonti ja muokkaus) ja käytettävissä olevilta laskentaoptioiltaan (mm. liukupintojen hakualgoritmit, lujuuden ja huokosvedenpaineen mallintamistavat jne.).

Peruseriaate lamellimenetelmissä on kuitenkin laskentaohjelmasta riippumatta sama: Tutkittavan liukupinnan sisään jäävä maamassa jaetaan pystysuoriin lamelleihin, joiden voima- ja/tai momenttitasapainoyhtälöiden avulla ratkaistaan varmuus  $F$  sortumaa vastaan. Eri lamellimenetelmät (esim. Bishopin yksinkertaistettu, Janbun yksinkertaistettu, Morgenstern-Price, GLE) eroavat toisistaan sen suhteen, mitä oletuksia menetelmässä tehdään tuntemattomien tekijöiden karsimiseksi siten, että tasapainoyhtälöt voidaan ratkaista. Nämä oletukset määräävät mm. sen, mitä tasapainoehtoja tietty lamellimenetelmä toteuttaa. Yleistä taustatietoa eri lamellimenetelmistä voi löytää esim. lähteestä Abramson et al (2002).

Lamellimenetelmää käyttävässä stabiliteettilaskennassa on kaksi perustehtävää: varmuuden laskeminen tietylle liukupinnalle, ja vaarallisimman liukupinnan löytäminen. Vaarallisimman liukupinnan löytämiseksi laskentaohjelma laskee tyypillisesti tuhansia eri liukupintoja. Ohjelman käyttäjän tulisi tietää vähintään peruseriaatteet ohjelman käyttäjästä liukupintojen hakualgoritmista ja -asetuksista, sekä hahmottaa ”insinöörikokemuksen” avulla todennäköisimmät vaarallisten liukupintojen sijainnit.

Varmuuden  $F$  yleinen määritelmä lamellimenetelmissä on:

$$F = \frac{\tau_f}{\tau} \quad (1)$$

missä

$\tau_f$  leikkauslujuus liukupinnalla [kPa]

$\tau$  liukupinnalle mobilisoitua leikkauslujuus, joka vaaditaan menetelmässä käytettyjen tasapainoehtojen toteutumiseen [kPa]



Leikkauslujuus määritellään laskelmissa Mohr-Coulombin kaavalla:

$$\tau_f = c' + \sigma'_n \tan \varphi' \quad (2)$$

missä

$c'$	tehokas koheesio [kPa]
$\sigma'_n$	tehokas normaalijännitys lamellin pohjassa [kPa]
$\varphi'$	tehokas kitkakulma [°]

Käytettäessä suljettua leikkauslujuutta  $s_u$  ( $\varphi = 0$  -menetelmä) merkitään Mohr-Coulombin kaavassa kitkakulmaksi  $\varphi = 0$  ja koheesioksi  $c = s_u$ . Lujuusprofiilin mallintaminen eri ohjelmissa on kuitenkin vapaampaa. Laskentaohjelmissa on mahdollista määrittää esimerkiksi lujuuden kasvu syvyyden mukana tai antaa lujuus pystyjännityksen  $\sigma'_{vo}$  tai esikonsolidaatiojännityksen  $\sigma'_c$  funktiona. Tällöin ohjelma laskee kunkin lamellin pohjalle oikeat, mallinnetun lujuusprofiilin mukaiset lujuusparametrit.

Tärkeä oletus on myös se, että lamellimenetelmissä oletetaan yhtenäinen varmuus koko liukupinnalle. Tämä ei pidä paikkaansa, vaan todellisuudessa murtotila saavutetaan eri aikaan liukupinnan eri osissa. Lisäksi huippulujuus saavutetaan eri muodonmuutostasoilla eri osissa liukupintaa. Nämä tekijät tulee huomioida joko oikeaoppisella suljetun leikkauslujuuden redusoinnilla (kohta 2.3). Vaihtoehtoisesti tulee lujuuden laskenta-arvot valita siten, että keskimääräinen laskentalujuus liukupinnalla ei nouse liian suureksi verrattuna siihen keskimääräiseen lujuuteen, joka liukupinnalle voidaan maksimissaan mobilisoida.

## 2.2 Suljettu leikkauslujuus

$\varphi = 0$  -menetelmässä saven lujuus ilmaistaan suljetulla leikkauslujuudella  $s_u$  ("shear strength, undrained", usein merkitään myös  $c_u$ , "cohesion, undrained"). Suljettu leikkauslujuus voidaan määrittää kokeellisesti tai se voidaan arvioida tai mallintaa epäsuorasti. Suljettu leikkauslujuus ei riipu kokonaisjännityksistä (ts. kokonaisjännityksen vaihtelut kompensoituvat vastaavalla huokospaineen muutoksella), jolloin lujuus voidaan antaa "vakioarvona". Tällöin suljettu leikkauslujuus voidaan ilmaista Mohr-Coulombin lujuuskriteerillä, jossa merkitään  $c = s_u$  ja  $\varphi = 0$ .

Edellä mainitusta ominaisuudesta johtuen suljettuun leikkauslujuuteen liittyy jonkin verran väärinkäsityksiä, esim. se, että suljettu leikkauslujuus on jollakin tavalla "vakio" tietylle maakerrokselle. Tätä joskus toistuvaa käsitystä on saattanut vahvistaa se, että heikkolaatuisissa siipikairauksissa mitattu  $s_u$ :n arvo saattaa olla lähes vakio paksullekin normaalikonsolidoituneelle savikerrokselle.

Suljettua leikkauslujuutta kannattaa mieluummin ajatella lujuutena, joka "näkyvä" tietyntilanteessa. Suljettu leikkauslujuus "sisältää" implisiittisesti tehokkaiden lujuusparametrien, kokonaisjännityksen ja huokosvedenpaineen yhteisvaikutuksen.

Tyypillisesti suljettu leikkauslujuus voidaan ilmaista ennen suljetussa tilassa tapahtuvaa kuormitusta vallitsevan konsolidaatiojännityksen funktiona:

$$s_u = f(\sigma'_{vo}, OCR) = f(\sigma'_c, OCR) \quad (3)$$

Esimerkiksi maailmalla käytetyssä SHANSEP-menetelmässä (Ladd & Foott 1974) suljettu leikkauslujuus voidaan ilmaista seuraavasti:

$$s_u = S \cdot \sigma'_{vo} \cdot OCR^m = S \cdot \sigma'_c \cdot OCR^{1-m} \quad (4)$$

missä S ja m ovat maan ominaisuuksista ja esim. kuormituksen suunnasta ja nopeudesta riippuvia kertoimia. Kertoimien arvot korreloivat tyypillisesti saven plastisuusominaisuuksien kanssa ja riippuvat myös leikkaussuunnasta (anisotropia). Näitä tekijöitä käsitellään erikseen kohdassa 2.3.

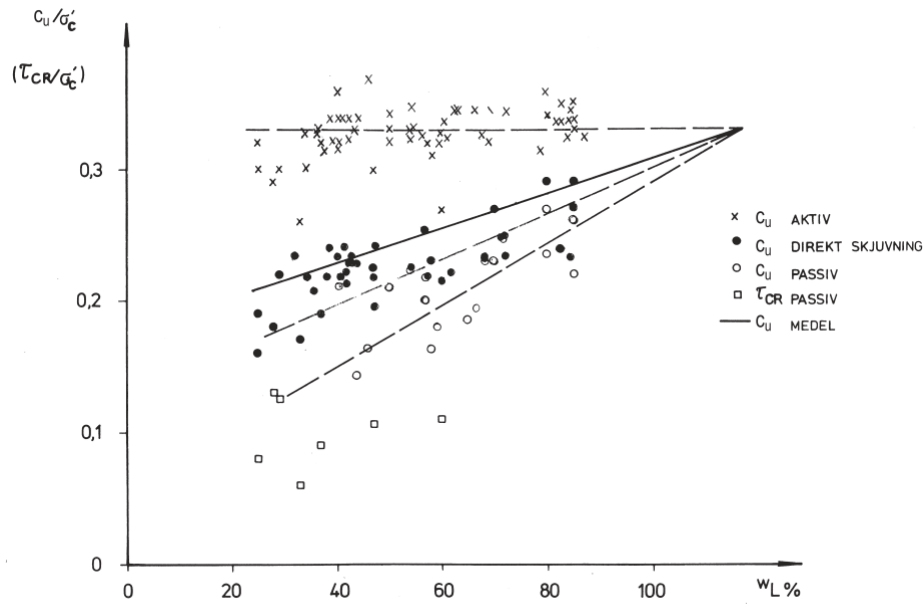
Koska saven suljettu leikkauslujuus voidaan esittää vallitsevan konsolidaatiojännityksen funktiona, on savikerroksen jännitystilän tunteminen hyvin tärkeää. Koska konsolidaatiojännitys tyypillisesti kasvaa syvemmälle mentäessä, voidaan olettaa, että myös saven suljettu leikkauslujuus kasvaa vastaavasti. Myös lujuuden kasvu konsolidoituvan penkereen alla liittyy nimenomaan esikonsolidaatiojännityksen kasvuun.

Tärkeimmät suljetun leikkauslujuuden arvoon vaikuttavat tekijät ovat tehokas jännitystila, anisotropia, kuormitusnopeus (aikariippuvuus), muodonmuutostaso (ja lämpötila).

## 2.3 Lujuuden anisotropia

Saven suljettu leikkauslujuus on anisotrooppinen suure, eli lujuus vaihtelee eri kuormitussuunnissa. Tyypillisesti suurin suljettu leikkauslujuus saadaan kolmiaksaalisessa puristuskokeessa ja pienin kolmiaksaalisessa vetokokeessa. Syy tälle lujuuden vaihtelulle on saven jännityksen ja rakenteen anisotropia: Savi konsolidoituu tyypillisesti KO-jännitystilaan, jolloin pystyjännitys on suurempi kuin vaakajännitys. Lisäksi litteät savipartikkelit kerrostuvat usein ”lapeelleen”, minkä lisäksi savi on voinut kerrostua raekooltaan vaihteleviin vaakasuuntaisiin kerroksiin (kerrallinen savi, Suomessa tyypillisesti Baltian jääjärven ja Yoldiameren aikaiset kerrostumat).

Skandinaavisten savien lujuuden anisotropiaa on tutkittu paljon erityisesti Ruotsissa ja Norjassa. Yleisesti tunnettu, myös suomalaisille saville melko hyvin sovellettavissa oleva tulos on esitetty kuvassa 1.

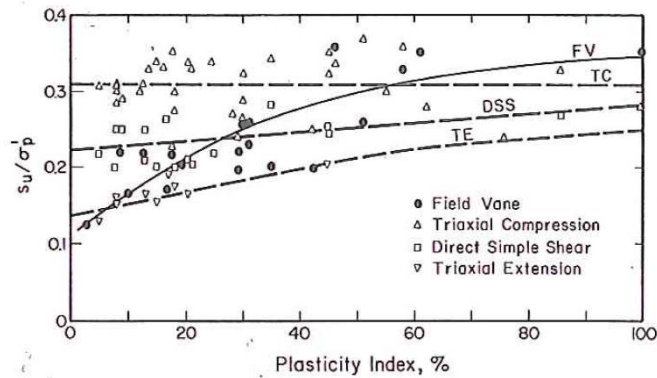


Kuva 1. Skandinaavisten epäorgaanisten savien normalisoituja suljettuja leikkauslujuuksia eri kokeissa. Viiva "c<sub>u</sub> medel" kuvaa aktiivi-, suoran leikkauksen ja passiivilujuuden keskiarvoa. Pisteet, jotka on merkitty "τ<sub>cr</sub> passiv" vastaavat vetokokeessa mobilisoituvaa leikkausjännitystä sillä muodonmuutostasolla, millä puristuskokeen huippulujuus saavutetaan. (Larsson et al 2007)

Kuvan 1 tulokset pätevät normaalikonsolidoituneelle tai lievästi ylikonsolidoituneelle epäorgaaniselle savelle. Tausta-aineistosta (listaus lähteessä Larsson 1980) ei selviä näytteiden laatu (joka vaikuttaa erityisesti puristuslujuuteen). Näytteistä osan ylikonsolidaatioaste ei myöskään ole tiedossa. Joka tapauksessa kuvan perusteella voidaan havaita yleisesti hyväksytyt peruseriaatteen:

- suljettu leikkauslujuus vaihtelee eri kuormitussuunnissa siten, että aktiivilujuus (~kolmiakσιαallinen puristus) on suurin ja passiivilujuus (~kolmiakσιαallinen veto) on pienin
- aktiivilujuus on lähes riippumaton saven plastisuudesta, mutta muissa suunnissa lujuus kasvaa, kun plastisuus kasvaa
- anisotropia on suurinta vähän plastisilla savilla, kun taas hyvin plastiset savet ovat isotrooppisempia

Kuvassa 2 on esitetty lisää tuloksia normalisoidusta suljetusta leikkauslujuudesta. Tässä on merkillepantavaa se, että mitattava siipikairauslujuus kasvaa plastisuuden kasvaessa jopa kolmiakσιαalisen puristuslujuuden tasolle (hajonta tosin on huomattavaa). Koska siipikairalujuutta tyypillisesti käytetään edustamaan "keskimääräistä" lujuutta liukupinnalla, sen redusointi (kohta 2.6) hyvin plastisilla savilla tärkeää.

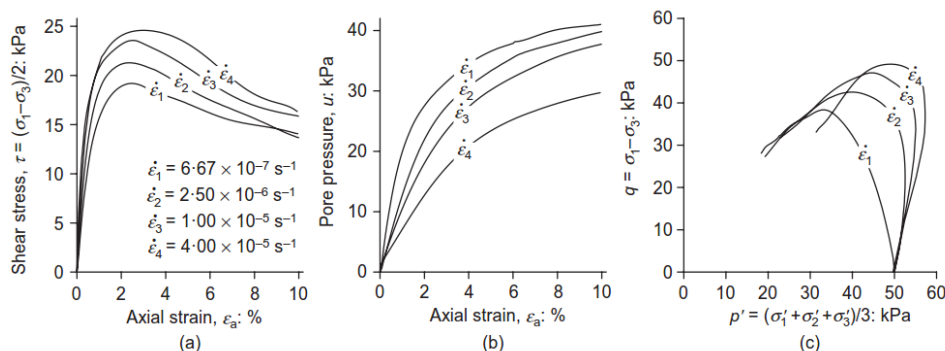


Kuva 2. Normalisoitu suljettu leikkauslujuus eri koetyypeissä (Mesri 1988)

Näytteen laatu (häiriintymisen aste) vaikuttaa myös mitattavaan anisotropiaan. Mitä parempi on häiriintymättömän näytteen laatu, sitä suurempia huippulujuuksia saadaan. Vastaavasti huonolaatuisen näytteen huippulujuus jää ”todellista” pienemmäksi. Tämä vaikutus on nähtävissä erityisesti sensitiiviselle savelle tehtävissä puristuskokeissa, joissa näytteen häiriintyminen saattaa vaikuttaa mitattavaan  $s_u$ :n arvoon kymmeniä prosentteja. Sama vaikutus on nähtävissä myös vetokokeissa, joskin tyypillisesti suhteessa vähäisemmin. Tästä syystä heikkolaatuiset näytteet saattavat vaikuttaa ”isotrooppisemmilta” kuin hyvälaatuiset.

## 2.4 Lujuuden aikariippuvuus

Suljettu leikkauslujuus on huomattavan riippuvainen kuormituksen aiheuttaman leikkausmuodonmuutoksen nopeudesta ja kuormituksen kestosta (yhdistettynä voidaan puhua ”aikariippuvuudesta”). Ehkä tyypillisimmin tämä tulee ilmi siipikairaus-tuloksen nopeusriippuvuudessa siten, että standardinopeutta korkeammalla pyöritysnopeudella saadaan korkeampia lujuuksia, ja päinvastoin. Sama vaikutus on myös nähtävissä eri nopeuksilla tehtävissä kolmiakiaalikoikeissa (kuva 3): korkealla kuormitusnopeudella tehtävissä suljetuissa kolmiakiaalikoikeissa huokosvedenpaine ei ”ehdi” kasvaa leikkausjännityksen kasvaessa, joten tehokas jännityspolku kohtaa murtosuoran korkeammalla kuin hitaasti tehtävissä kokeissa.



Kuva 3. Kuormitusnopeuden vaikutus suljetussa kolmiakiaalikoikeessa määritettyyn a) leikkausjännitykseen, b) huokospaineeseen, c) tehokkaaseen jännityspolkuun (Lehtonen et al 2015)

## Suljettu leikkauslujuus stabiilettilaskelmissa

On huomattava, että suljetun leikkauslujuuden aikariippuvuus ei tässä tapauksessa johdu alkavasta konsolidaatiosta, vaan kyseessä on puhtaasti suljetun tilan ilmiö (suljetussa kolmiakσιαalikokeessa veden ulosvirtaus näytteestä on fyysisesti estetty). Ilmiö johtuu saven rakenteen viskooseista ominaisuuksista.

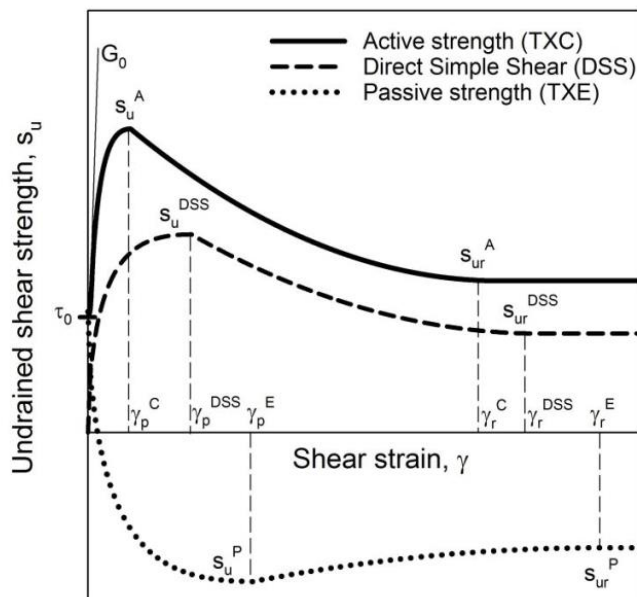
Lujuuden aikariippuvuus havaitaan myös kuormituksen kestoon riippuen: Maa saattaa kestää hyvin nopeasti lisätyn kuormituksen (esim. penkereelle pysähtyvä juna) hetkellisesti, mutta jos kuorma jää paikalleen, vähitellen kasvava huokosvedenpaine saattaa aiheuttaa maan murtumisen. Tässä tyypilliset aikaskaalat vaihtelevat tunneista päiviin, joten merkittävää konsolidaatiota ei tapahdu, ja kyseessä on puhtaasti suljetun tilan kuormitus.

Tyypillisesti suljettu leikkauslujuus kasvaa noin 10 %, kun kuormitusnopeus kymmenkertaistuu (Kulhawy & Mayne 1990). Suomalaisilla savilla on havaittu noin 15–17 % lujuuden kasvu kuormitusnopeuden kymmenkertaistuessa (Mansikkamäki 2015, Länsivaara 1999).

Koska suljetun leikkauslujuuden määrittämiseen käytettävät kokeet ovat tyypillisesti nopeita verrattuina todellisten sortumien muodonmuutosnopeuksiin, myös lujuuden aikariippuvuutta redusoidaan siipikaira- tai kartiokoelujuutta käytettäessä.

## 2.5 Lujuuden riippuvuus muodonmuutos- tasosta

Maahan mobilisoitua leikkausjännitys riippuu huomattavan paljon vallitsevasta leikkausmuodonmuutos- ja muodonmuutosnopeudesta. Tyypillisiä saven jännitys-muodonmuutoskuvaajia esitetään kuvassa 4.



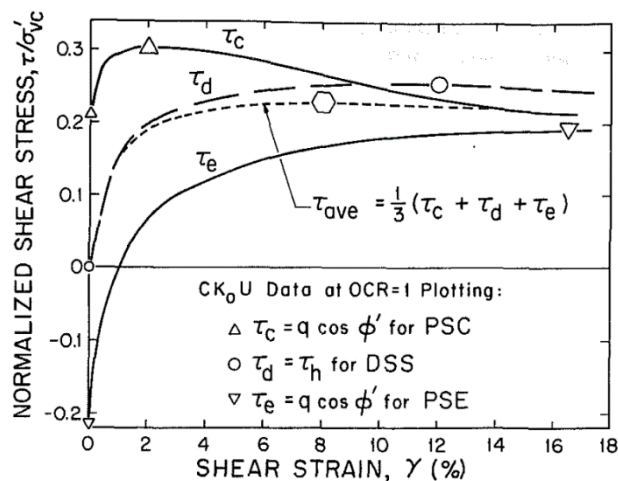
Kuva 4. Leikkausjännitys-leikkausmuodonmuutos-kuvaajia eri suljetun tilan koetyypeillä (D'Ignazio et al 2017).

Suurin mobilisoituva leikkausjännitys (leikkauslujuus) saavutetaan tyypillisesti eri suuruisilla muodonmuutostasoilla eri leikkaussuunnissa. Tyypillisesti aktiivilujuus (puristus) saavutetaan pienemmillä muodonmuutostasoilla kuin passiivilujuus (veto). Lisäksi huomattavan ylikonsolidoituneen maan huippulujuus saavutetaan pienellä muodonmuutostasolla verrattuna normaalikonsolidoituneeseen.

Lamellimenetelmän kannalta lujuuden laskenta-arvoon vaikuttaa se, että lamellimenetelmä olettaa saman mobilisaatioasteen koko liukupinnalle. Todellisuudessa mobilisaatioaste ( $\sim 1/F$ ) vaihtelee liukupinnan eri osissa. Tästä johtuen huippulujuutta ei voida käyttää koko liukupinnalla, sillä todellisuutta huippulujuutta ei saavuteta samanaikaisesti koko liukupinnalla. Todellisuudessa osalla liukupinnasta huippulujuutta vastaava muodonmuutostaso on jo ylitetty, ja osalla ollaan vasta lähestymässä sitä. Paikallinen huippulujuuden ylitys aikaansaa leikkausjännityksen kasvua toisissa liukupinnan osissa, jolloin puhutaan progressiivisesta murtumasta.

Myös muodonmuutostason vaikutus keskimääräiseen suljettuun leikkauslujuuteen on tekijä, joka periaatteessa huomioidaan siipikairalujuuden redusoinnissa. Toinen lähestymistapa on esim. puristuslujuuden huippuarvon reduointi norjalaisessa käytännössä (huomattavan hyvälaatuisia blokkinäytteitä käytettäessä), ks. kohta 3.4.

Ladd (1991) esittää ”strain compatibility” -menettelyä (kuva 5), jossa suljetun leikkauslujuuden ominaisarvona käytetään leikkausjännityksen keskiarvon huippuarvoa. Keskimääräinen mobilisoituva leikkausjännitys oletetaan puristuskokeen, suoran leikkauskokeen ja vetokokeen mobilisoituvan leikkausjännityksen keskiarvoksi (tietyllä muodonmuutostasolla).



Kuva 5. Strain compatibility -menetelmä (Ladd 1991)

$$\tau_{ave} = \frac{\tau_c + \tau_d + \tau_e}{3} \quad (5)$$

missä

$\tau_{ave}$	keskimääräinen mobilisoituva leikkausjännitys [kPa]
$\tau_c$	mobilisoituva leikkausjännitys puristuskokeessa [kPa]
$\tau_d$	mobilisoituva leikkausjännitys suorassa leikkauskokeessa [kPa]
$\tau_e$	mobilisoituva leikkausjännitys vetokokeessa [kPa]

Koska muodonmuutostaso kuitenkin vaihtelee liukupinnan eri osissa, tulisi Laddin menettelytapaa käytettäessä mieluummin valita riittävän pieni ”sallittu” muodonmuutostaso, jota vastaavaa lujuutta käytetään. Vaihtoehtoisesti voitaisiin käyttää suuren muodonmuutostason arvoja (jäännöslujuus).

## 2.6 Lujuuden redusointi

Edellä mainituista lujuuteen vaikuttavista tekijöistä johtuen maasta tai laboratorio-näytteestä mitattava suljettu leikkauslujuus ei välttämättä ole oikea lujuusarvo, jota voitaisiin käyttää lamellimenetelmällä tehtävissä stabiliteettilaskelmissa. Siipikairalujuuden (ja kartiolujuuden) redusointikertoimet (esim. Bjerrum 1973, Helenelund 1977 jne) perustuvat pääosin toteutuneiden sortumien takaisinlaskentoihin, joissa mitattua siipikairalujuutta verrataan lujuuteen, jolla laskennassa saavutetaan kokonaisvarmuus  $F = 1$ . Tällöin laskennassa käytettävä lujuus  $s_u$  on:

$$s_u = \mu \cdot s_v \quad (6)$$

missä  $\mu$  on redusointikerroin ja  $s_v$  on mitattu siipikairalujuus (tai kartiokoelujuus). Redusointikerroin on tyypillisesti plastisuusominaisuuksien (juoksuraja tai plastisuusindeksi) funktio.

Redusointikertoimella saadaan laskennassa käytettävä lujuuden ominaisarvo, joka implisiittisesti huomioi ainakin seuraavat tekijät:

- anisotropian vaikutus siipikairauksessa
- kuormitusnopeus
- muodonmuutostaso ja progressiivinen murtuminen

On kuitenkin huomioitava, että takaisinlaskennoissa käytetyssä aineistossa on huomattavan paljon hajontaa.

Eryteisesti elementtimenetelmässä edistyneiden maamallien käyttö poistaa redusointitarvetta riippuen siitä, miten hyvin malli huomioi mainittuja tekijöitä. Kirjallisuudessa on annettu myös redusointikertoimia, jotka huomioivat vain osan lujuuteen vaikuttavista tekijöistä (esim. Dascal & Tournier, 1975). Tässä ei kuitenkaan oteta kantaa kyseisten redusointitapojen oikeellisuuteen tai käyttökelpoisuuteen.

Yleisesti ottaen redusointikertoimen käytöllä voidaan saavuttaa ”keskimäärin” käyttökelpoinen isotrooppisen lujuuden ominaisarvo, mutta tapauskohtaiset poikkeamat voivat olla huomattavia. Esim. saven anisotropia, myötöpehmenemisominaisuudet ja ajasta riippuvat ominaisuudet, toteutuva muodonmuutosnopeus ja liukupinnan muoto voivat kaikki poiketa redusoinnissa tehdyistä oletuksista. Tällöin tarkin laskentatulokset on saatavissa, jos em. tekijät voidaan ottaa huomioon mahdollisimman tarkasti itse laskentamallissa tai siten, että lujuuden ominaisarvot valitaan nämä tekijät huomioiden.

## 3 Suljetun leikkauslujuuden määrittäminen

### 3.1 Yleistä

Tässä luvussa annetaan opastusta eri tapoihin määrittää suljettu leikkauslujuus lamellimenetelmällä tehtäviä stabiliteettilaskelmia. Esitetyt menettelytavat perustuvat viime vuosina tehtyyn tutkimustyöhön, suunnittelutyössä kerättyihin kokemuksiin ja kirjallisuustutkimukseen. Tarkoitus on esittää yksinkertaisia, perusteltuja menettelytapoja, joilla voidaan osaltaan varmistaa suunnitelmien laatu.

Tässä yhteydessä taustoitetaan suljetun leikkauslujuuden määrittämistapoja sekä niiden soveltamista stabiliteettilaskelmissa. Yksityiskohtaiset menettelytavat anisotrooppisen suljetun leikkauslujuuden määrittämiseen ja mallintamiseen on esitetty liitteissä 1–4 sekä Penkereiden stabiliteetin laskentaohjeessa (LO 14/2018).

Suljettu leikkauslujuus voidaan määrittää laskelmiin joko mittaamalla, mallintamalla tai korrelaatioihin perustuen.

Suomessa tyypillisesti käytettävät suljetun leikkauslujuuden *mittausmenetelmät* (siipikairaus, CPTu, kartiokoe) antavat isotrooppisen suljetun leikkauslujuuden (CPTu:n kärkikerroin voidaan kalibroida myös tiettyä koetyyppiä vastaavaksi). Edistyneempiä laboratoriokeiteita (käytännössä suljettu kolmiaksaalinen puristuskoee), joilla anisotrooppinen suljettu leikkauslujuus voitaisiin määrittää, käytetään harvoin.

Jos suljettu leikkauslujuus *mallinnetaan* mitattuihin maaparametreihin ja jännitystilaan perustuen, käytetään tyypillisesti anisotrooppisia maamalleja. Tässä yhteydessä keskitytään HSU-menetelmän (Lehtonen 2015) käyttöön. HSU on kehitetty suunnittelussa käyttökelpoiseksi työkaluksi erityisesti lamellimenetelmissä.

### 3.2 Anisotrooppisen lujuuden käytöstä

Suljetun leikkauslujuuden anisotropian mallintaminen ei ole tyypillisesti kuulunut suomalaiseen suunnittelukäytäntöön, mutta on kuitenkin esim. ruotsalaisessa ja norjalaisessa käytännössä tavallista. Suomalaistenkaan epäorgaanisten savien osalta ei ole tiedossa mitään tekijöitä, miksi Suomessakin ei voitaisi huomioida lujuuden anisotropiaa suunnittelussa.

Hyviä syitä lujuuden anisotropian mallintamiselle stabiliteettilaskelmissa ovat mm.:

- Tarkempi lujuusprofiilin mallintaminen eri osissa liukupintaa (täten epävarmuuksien vähentäminen)
- Riippuvuuden vähentäminen redusointikertoimista, joiden taustalla olevat oletukset saattavat poiketa laskentatapauksesta huomattavasti
- Laskennan lähtötietojen läpinäkyvyyden lisääminen
- Laskentatulosten tulkinta helpottuu, sillä laskennassa liukupinnalle mobilisoituva jännitystila on lähempänä todellista mobilisoituvaa jännitystilaa (ominaisarvoilla laskettaessa)
- Joissakin tapauksissa tarkalla lujuuden anisotropian mallintamisella voidaan perustellusti saavuttaa suurempia varmuuksia kuin isotrooppisella, redusoitua siipikairalujuutta vastaavalla käytävällä laskennalla (erityisesti silloin, kun suuri osa liukupinnasta kulkee aktiivivyöhykkeessä, missä lujuus on suurin).



## Suljettu leikkauslujuus stabiliteettilaskelmissa

---

Anisotrooppisia lujuuden arvoja EI tule redusoida kertoimella, joka sisältää anisotropian vaikutuksen siipikairaukselle. Lisäksi kuormitusnopeuden ja progressiivisen murtuman (muodonmuutostason) vaikutus tulee huomioida joko erillisillä redusointikertoimilla ja/tai määrittämällä lujuuden ominaisarvot nämä tekijät huomioiden (esim. käytetään huipun jälkeistä arvoa ”hitaasta” kokeesta). HSU-menetelmässä nämä tekijät on implisiittisesti huomioitu, ja menetelmällä määritettyjä lujuuden arvoja voidaan käyttää sellaisenaan laskelmissa.

On myös huomioitava, että tässä esitetyt menettelytavat pätevät vain lamellimenetelmällä tehtäville laskelmille. Elementtimenetelmää käytettäessä laskentamallin yksityiskohdat vaikuttavat siihen, mitä tekijöitä ja kuinka tarkasti laskennassa huomioidaan, ja mallin parametrit tulee valita tätä vastaavasti.

Anisotrooppinen lujuus voidaan mitoituslaskelmia varten määrittää laboratoriokeilla tai mallintamalla. Käytännössä kyseeseen tulee näiden yhdistelmä, jossa yhtä menetelmää täydennetään toisilla lujuuden määrittäytavoilla. Lujuutta ei saa arvioida pelkillä korrelaatioilla. Poikkeuksena voi pitää alustavia tai esim. yleissuunnitelmatasoisia laskelmia, joita ei käytetä suoraan mitoitukseen.

## 3.3 Lujuuden määrittäminen mittamalla

### 3.3.1 Mitattu isotrooppinen lujuus

Suljettu leikkauslujuus määritetään suomalaisessa käytännössä mittamalla tyypillisesti:

- siipikairaamalla
- CPTU-kairauksella
- kartiokokeella

Mainitut menetelmät antavat isotrooppisen suljetun leikkauslujuuden arvon, joka redusoituna antaa oletettavasti mitoituksessa käyttökelpoisen keskiarvolujuuden.

Menettelytavat on esitetty ohjeessa Penkereiden stabiliteetin laskentaohje (LO 14/2018). Erityistä huomiota kannattaa kiinnittää siipikairatuloksen laatuun. Siipikairauksen osalta huomioidaan myös SGY:n Kairausopas II, Siipikairaus ja Liikenneviraston soveltamisohjeet (2018). Mitattu suljettu leikkauslujuus redusoidaan ohjeessa Penkereiden stabiliteettilaskenta esitetyllä kaavalla.

### 3.3.2 Mitattu anisotrooppinen lujuus

Anisotrooppinen suljettu leikkauslujuus voidaan määrittää asiaankuuluvilla suljetuilla laboratoriokeilla häiriintymättömistä näytteistä. Käyttökelpoisia kokeita ovat kolmiakiaalinen puristuskoe, suora leikkauskoe DSS ja kolmiakiaalinen vetokoe.

Kokeita voidaan tehdä yksittäisiä in situ jännitystilaa vastaavasti. Lisäksi voidaan tehdä kokeita eri esikonsolidaatiojännityksen OCR arvoilla, jolloin voidaan määrittää saven normalisoidun suljetun leikkauslujuuden riippuvuus OCR:stä. Esimerkkejä tällaisista menettelytavoista ovat esim. SHANSEP (Ladd & Foott 1974) ja Recompression (Bjerrum 1973) -menetelmät.

Käytännössä kustannus- ja resurssisyistä kokeita ei useinkaan tehdä eri suunnissa (puristus, suora leikkaus, veto), vaan lujuus mitataan yhdellä koetyypillä, jonka tuloksia täydennetään korrelaatioilla. Tämä menettelytapa on esitetty Liitteessä 1.

Tyypillisesti tehdään yksittäisiä, in situ jännitystilaa vastaavia kokeita eri syvyyksiltä, jolloin voidaan määrittää suljetun leikkauslujuuden syvyysprofiili esim. kolmiakσιαaliselle puristuslujuudelle. Tällöin kolmiakσιαalikoe konsolidoidaan mahdollisimman tarkasti in situ- jännitystilaa vastaavasti. Jos koe on isotrooppisesti konsolidoitu, tulee sellipaineena  $\sigma_3'$  käyttää in situ tilannetta vastaavaa keskimääräisen jännityksen  $p'$  arvoa. Kolmiakσιαalikokeen koeparametrit määritetään Penkereiden stabiliteetin laskentaohjeen (LO 14/2018) mukaisesti.

DSS-kokeessa määritetään pystysuuntainen konsolidaatiojännitys in situ-pystyjännitystä vastaavasti. DSS-koe on KO-konsolidoitu.

### 3.4 Lujuus mallintamalla (HSU)

Anisotrooppinen suljettu leikkauslujuus voidaan arvioida laskelmia varten myös tehokkaiden lujuusparametrien avulla. Tällöin on käytännössä kyse mallintamisesta, jossa käytetään anisotrooppista maamallia. Tällaisten maamallein lähtötietoja ovat tyypillisesti ainakin tehokkaat lujuusparametrit, jännitystila sekä maan muodonmuutosominaisuuksia kuvaavat parametrit.

Suunnittelukäyttöön on Suomessa kehitetty HSU-menetelmä (Lehtonen 2015). HSU-menetelmää (Hybrid  $s_u$ ) käytetään laskemaan anisotrooppinen suljettu leikkauslujuus siten, että tulos on suoraan käytettävissä lamellimenetelmän laskentalujuutena. Menetelmä huomioi suljetun leikkauslujuuden anisotropian ja jännitystilarippuvaisuuden, ja välillisesti myös lujuuteen vaikuttavat nopeus- ja muodonmuutos-tekijät.

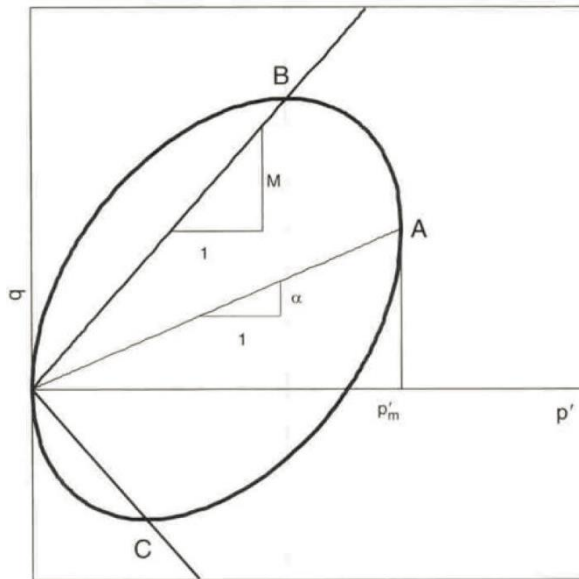
HSU-menetelmän käytännön hyödyntäminen anisotrooppisen lujuuden määrittämisessä on selostettu tämän julkaisun liitteissä 1 ja 2. HSU-menetelmää käyttävä Excel-laskentapohja on saatavilla Liikenneviraston ohjeluettelosta.

Liitteessä 3 on esitetty nomogrammi, jonka avulla voidaan määrittää HSU-menetelmän antama anisotrooppinen lujuus mallin parametrien oletusarvoilla. Tätä voidaan hyödyntää alustavissa laskelmissa.

Liitteessä 4 esitetään tapoja mallintaa anisotrooppista lujuutta eri laskentaohjelmissa.

HSU-menetelmän kaavat on annettu liitteessä 5.

HSU-menetelmä perustuu anisotrooppiseen S-CLAY1 –maamalliin (Wheeler et al 2003, kuva 6). S-CLAY1 on johdannainen yleisesti käytetystä Modified Cam Clay- mallista, johon on lisätty mm. anisotrooppinen myötöpinta.



Kuva 6. S-CLAY1 -maamallin myötöpinta (Wheeler et al 2003)

Sopivia oletuksia käyttäen mallista on johdettu yksikäsitteinen ratkaisu suljetulle leikkauslujuudelle. Alkuperäisestä S-CLAY1-mallista on mm. jätetty pois siinä käytetty myötöpinnan kierto yksinkertaisuuden vuoksi ja huomioitu se kertoimella C. HSU-menetelmän maakerrosparametrit ovat ylikonsolidaatioasteen ja tilavuuspainon lisäksi:

$\varphi'$	tehokas kitkakulma suurella muodonmuutostasolla [°]
$c'$	tehokas koheesio suurella muodonmuutostasolla [kPa]
$\lambda/\kappa$	jännityspolun kontrolliparametri (arvot noin välillä 1,01...100)
C	kerroin $K_{0NC}$ :lle (oletus: C = 1, arvot noin välillä 0,8...1,2)
D	kerroin $K_{0OC}$ :lle (oletus: D = 1, arvot noin välillä 0,5...2)

Maakerrosparametrit annetaan vakioarvoina koko maakerrokselle. Varsinainen lujuus lasketaan erikseen joka lamellin pohjalle (jos lamellin pohja sijaitsee HSU:ta käyttävässä maakerroksessa). Lujuus on tällöin vallitsevan tehokkaan pystyjännityksen, ylikonsolidaatioasteen, lamellin pohjan kaltevuuskulman ja em. maakerrosparametrien funktio:

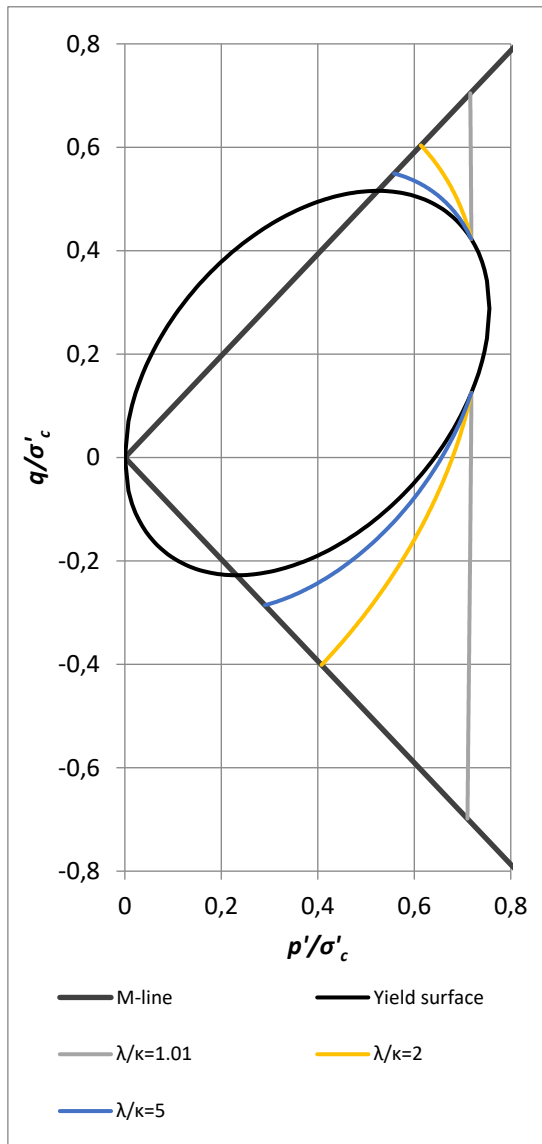
$$s_u = f(\varphi', c', \lambda/\kappa, C, D, \sigma'_{v0}, OCR, \alpha) \quad (9)$$

Koska HSU hyödyntää tehokkaiden jännitysten maamallia, tulee kitkakulma määrittää. Alustavissa tarkasteluissa voidaan kuitenkin suomalaisilla savilla olettaa  $\varphi' = 25^\circ$ , jolloin HSU:ta voidaan käyttää antamaan suuntaa antava käsitys anisotrooppisesta lujuudesta esimerkiksi alustavissa tarkasteluissa. HSU:ta ei kuitenkaan saa käyttää mitoituslaskelmaan täysin ilman tietoa kitkakulmasta.

Esikonsolidaatiojännitys on HSU:n käytössä välttämätön parametri. Mitoituslaskelmissa se tulee määrittää ödometrikokeiden perusteella. Suuntaa-antavissa laskelmissa esikonsolidaatiojännityksen arvoa voidaan arvioida myös muilla käytössä olevilla tiedoilla (esim. arvio penkereen jännityshistoriasta, paikallistuntemus/vastaavat olosuhteet jne.), jolloin tulee kuitenkin tehdä tuloksen herkkyytstarkastelu.

Parametri  $\lambda/\kappa$  vaikuttaa mallin tuottamien tehokkaiden jännityspolkujen suuntiin ja siten mallinnettuun lujuuteen. Parametrit  $\lambda$  ja  $\kappa$  kuvaavat maan kokoonpuristus- ja palautussuorien kaltevuutta  $\ln p' - e$ -koordinaatistossa. Vaikka parametrilla  $\lambda/\kappa$  onkin fyysinen merkitys, tässä yhteydessä sitä voi silti pitää pelkkänä sovituspäarametrina, jonka arvolla ei ole yhteyttä laboratorio-arvoihin.

Kuvassa 7 on esitetty HSU:n kolmiakσιαalisia jännityspolkuja eri  $\lambda/\kappa$ :n arvoilla.



Kuva 7. HSU-menetelmän tuottamia tehokkaita jännityspolkuja eri parametrin  $\lambda/\kappa$  arvoilla.

Kun  $\lambda/\kappa$  lähestyy arvoa 1, jännityspolut ovat pystysuoria (ei leikkautumisesta aiheutuva huokosveden ylipainetta, mikä osapuilleen vastaa nopeaa kuormitusta). Kun arvo on noin  $\lambda/\kappa > 10$ , jännityspolut kulkevat pitkin myötöpintaa (paljon huokosveden ylipainetta, hidas kuormitus). Mallin sovituksissa kolmiakσιαalikoedataan ja tapahtuneiden sortumien takaisinlaskennoissa on havaittu, että tyypilliset (laskennallisesti toimivat)  $\lambda/\kappa$ -arvot vaihtelevat noin välillä 2...5.

**Oletusarvo mitoituksessa on:  $\lambda/\kappa = 5,0$**

Arvo  $\lambda/\kappa = 5,0$  antaa lujuuden arvoja, jotka ovat tyypillisesti hieman tyypillisten huippulujuutta vastaavien laboratorioarvojen tai korrelaatioiden alapuolella. Tämä on tarkoituksellista: HSU-menetelmää on tarkoitettu käyttämään siten, että sen tuottama lujuus vastaisi hitaassa kuormituksessa saatavaa ”huipun jälkeistä” lujuutta, joka ei tarvitsisi redusoida laskennassa. Tästä syystä malli tulee sovittaa siten, että sen tuottamat lujuudet ovat hieman pienempiä kuin kolmiakσιαalikokeissa, erityisesti puristus- kokeeseen nähden. Se, kuinka paljon pienempi mallin lujuuden tulisi olla, riippuu mm. kolmiakσιαalikokeen laadusta ja myötöpehmenemisen ”rajuudesta”. Esim. Norjassa hyvälaatuisten blokkinäytekoekoiden puristuskokeiden lujuusarvoja redusoidaan mitoituksessa 0–15 %, muissa kokeissa 0–10 %.

Jos maa on huomattavan ylikonsolidoitunutta (aktiivipuolella noin  $OCR > 1,5$ , passiivipuolella noin  $OCR > 5$ ), tehokas jännityspolku käy ensin myötöpinnalla ja ”romahtaa” takaisin murtosuoralle. HSU-mallin lujuus murtosuoran ylikonsolidoituneella puolella (”kuivalla” puolella) ei ole myötöpintaa vastaava huippulujuus, vaan murtosuoraa vastaava lujuus. Myös tällä oletuksella tähdätään siihen, että menetelmän tuottamat lujuudet olisivat stabiliteettilaskelmissa sellaisenaan käytettävissä.

Perusohjeet mallin käytöstä on annettu tämän julkaisun liitteissä.

### 3.5 Lujuus korrelaatioilla arvioituna

Korrelaatioita voidaan käyttää mittaamalla tai mallintamalla määritettyjen suljetun leikkauslujuuden arvojen verifiointiin. Lisäksi korrelaatioita voidaan hyödyntää alustavissa tai yleissuunnitelmatasoisissa laskelmissa, joita ei käytetä suoraan seuran mitoitukseen.

Pelkkiin korrelaatioihin perustuva mitoitus ei ole suositeltavaa, sillä korrelaatioiden tausta-aineistossa on tyypillisesti huomattavaa hajontaa. Todellinen lujuus saattaa olosuhteista riippuen olla huomattavan paljon korrelaation antamaa arvoa suurempi tai pienempi.

Vaihtoehtoisia korrelaatioita *reduoidulle* isotrooppiselle suljetulle leikkauslujuudelle ovat:

$$s_u = 0,22 \cdot \sigma'_c \quad (7)$$

tai

$$s_u = 0,244 \cdot \sigma'_c \cdot OCR^{0,76} \quad (8)$$

Kaavan (7) korrelaatio on kirjallisuudessa (esim. Mesri 1989) laajalti esitetty, ja Suomessa yleisesti käytetty tulos.

Kaavan (8) korrelaatio on määritetty suomalaisille saviille tehtyjä siipikairaustuloksia sisältävästä tietokannasta (D’Ignazio 2016). Tulos perustuu Liikenneviraston ohjeiden mukaiseen siipikairalujuuden redusointiin ja pätee CRS-ödometrikokeen tulosta vastaavalle esikonsolidaatiojännitykselle. Ylikonsolidaatioasteen OCR ja esikonsolidaatiojännityksen  $\sigma'_c$  arvot tulisi siis määrittää standardinopeudella tehtyjen CRS-ödometrikoekoiden perusteella, kun käytetään kaavaa (8).

Suomen oloissa epäorgaanisille saviille pääsääntöisesti käyttökelpoinen ruotsalainen korrelaatio anisotrooppiselle suljetulle leikkauslujuudelle (huippulujuus) on esitetty lähteessä Larsson et al (2007). Lujuus ilmaistaan kaavalla:

$$s_u = S \cdot \sigma'_{vo} \cdot OCR^m = S \cdot \sigma'_c \cdot OCR^{1-m} \quad (10)$$

missä parametri  $S$  vaihtelee seuraavasti eri leikkaussuunnissa (ks. kuva 1):

Aktiivileikkaus:  $S \approx 0,33$

Suora leikkaus (DSS):  $S \approx 0,125 + 0,175w_L$

Passiivileikkaus:  $S \approx 0,055 + 0,235w_L$

Eksponentin  $m$  arvo vaihtelee tyypillisesti välillä  $m \approx 0,7 \dots 0,9$ . Usein oletetaan  $m = 0,8$ . Juoksuraja  $w_L$  ilmoitetaan desimaalilukuna.

Annetulla korrelaatiolla lujuuden kasvo syvyyden funktiona riippuu tehokkaan pystyjännityksen kasvusta ja OCR:n muutoksista syvyyden funktiona. Esimerkiksi jos maa on normaalikonsolidoitunutta, lujuuden kasvu on:

$$\Delta s_u = S \cdot \gamma' \quad (11)$$

missä

$\Delta s_u$  suljetun leikkauslujuuden kasvu (kPa/m)

$\gamma'$  tehokas tilavuuspaino (kN/m<sup>3</sup>)

Anisotrooppisen lujuuden korrelaatio on Suomen oloja varten tarkastettu TTY:n laboratoriossa tehdyillä kolmiaksisiaalisilla puristus- ja vetokokeilla sekä suorilla leikkauskokeilla (DSS) eri puolelta Suomea otetuista näytteistä. Kyseisiä koetuloksia ei tämän kirjoitushetkellä ole julkaistu, mutta voidaan kuitenkin todeta, että mittaus-tulokset ovat ruotsalaisen korrelaation kanssa riittävällä tarkkuudella yhteneviä.

Erityisen hyvälaatuisilla näytteillä voidaan mitata korrelaatiota suurempiakin lujuuden huippuarvoja, mutta niiden käyttö sellaisenaan stabiliteetin mitoituksessa ei ole suositeltavaa (katso kohta 2.5). Poikkeuksena on myötöpehmenneiden maamallien käyttö FEM-laskennassa, missä mobilisoituvan leikkausjännityksen riippuvuus muodonmuutostasosta voidaan huomioida.

## Lähteet

Abramson, L.W. 2002, Slope stability and stabilization methods, Second Edition edn, John Wiley & Sons Incorporated.

Bjerrum, L. 1973, "Problems of soil mechanics and construction on soft clays", Proc. of 8th Int. Conf. on SMFE

Dasgal, O. & Tournier, J. 1975, "Embankments on soft and sensitive clay foundation", ASCE Journal of the Geotechnical Engineering Division, vol. 101, no. GT3, pp. 297-314.

D'Ignazio, M., Länsivaara, T. T., & Jostad, H. P. 2017. Failure in anisotropic sensitive clays: finite element study of Perniö failure test. *Canadian Geotechnical Journal*, 54(7), 1013-1033.

Helene Lund, K.V. 1977, "Methods for reducing undrained shear strength of soft clay", Swedish Geotechnical Institute, Proceedings.

Ladd, C. C., & Foott, R. 1974, New design procedure for stability of soft clays. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 100(Proc Paper 10064).

Ladd, C.C. 1991, "Stability evaluation during staged construction", Journal of Geotechnical Engineering, vol. 117, no. 4, pp. 540-615.

Larsson, R., Sällfors, G., Eriksson, L., Bergdahl, U., Bengtsson, P., & Alén, C. (2007). Skjuvhållfasthet-utvärdering i kohesionsjord Statens Geotekniska Institut  
Larsson 1980

Lehtonen, V. 2015, Modelling undrained shear strength and pore pressure based on an effective stress soil model in Limit Equilibrium Method. *Tampereen teknillinen yliopisto. Julkaisu 1337*

Lehtonen, V. J., Meehan, C. L., Länsivaara, T., & Mansikkamäki, J. 2015, Full-scale embankment failure test under simulated train loading. *Géotechnique*, 65(12), 961-974.

Länsivaara, T. 1999, "A study of the mechanical behavior of soft clay", Norwegian University of Science and Technology. NTNU. Doktor ingeniöravhandling, vol. 85

Mansikkamäki, J. 2015, "Effective stress finite element stability analysis of an old railway embankment on soft clay", *Tampereen teknillinen yliopisto. Julkaisu 1287*

Mesri, G. 1989, A re-evaluation of  $S_u (Mob) = 0.22s'p$  using laboratory shear tests. *Can. Geotech. J.*, 26(1).

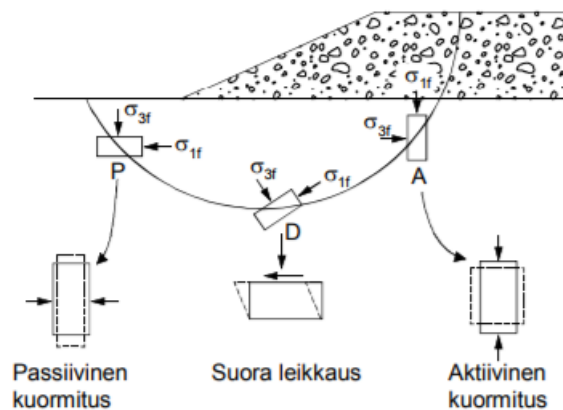
Wheeler, S.J, Näätänen, A., Karstunen, M. & Lojander, M 2003, "An anisotropic elastoplastic model for soft clays", *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 40, no. 2, pp. 403-418.

## Anisotrooppisen suljetun leikkauslujuuden määrittäminen ja käyttö lamellimenetelmissä

Tämä osio vastaa sisällöltään Penkereiden stabiliteetin laskentaohjeen (LO 14/2018) liitettä 2.

Suunnittelijalla on mahdollisuus käyttää anisotrooppista suljettua leikkauslujuutta  $\phi=0$  -analyysissä. Usein tällä tavalla voidaan saada hieman parempia laskennallisia varmuuksia kuin isotrooppisella lujuudella laskettuna, varsinkin jos suuri osa liukupinnasta kulkee aktiivileikkauksen vyöhykkeessä.

Anisotrooppista suljettua leikkauslujuutta käytettäessä määritetään lujuus aktiivileikkauksessa, suorassa leikkauksessa ja passiivileikkauksessa (kuva L1.1). Anisotrooppisen suljetun leikkauslujuuden käytöstä annetaan lisäohjeita julkaisussa Suljettu leikkauslujuus stabiliteetilaskelmissa (Liikenneviraston oppaita 2/2018).



Kuva L1.1. Kuormitustapaukset eri liukupinnan osissa.

Laskelmissa käytettävä suljettu leikkauslujuus voidaan määrittää:

- mittaamalla
- mallintamalla
- korrelaatioihin perustuen

Mitoituslaskelmat tulee tehdä mitattuun suljettuun leikkauslujuuteen perustuen, tai jos lujuus mallinnetaan, käytetyn mallin lujuusparametrit tulee määrittää mittaamalla.

Lähtökohtaisesti anisotrooppinen suljettu leikkauslujuus voidaan määrittää joko **anisotrooppiseen maamalliin perustuen** tai **laboratoriokokeiden perusteella**. Edellisestä tavasta esimerkkinä on tässä esitetty HSU-menetelmä. Jälkimmäisestä esitetään esimerkkeinä kaksi tapaa, missä yhdistellään mittauksia ja korrelaatioita.

**HSU-menetelmää** voidaan käyttää anisotrooppisen suljetun leikkauslujuuden mallintamiseen. Tällöin lähtötiedoiksi tarvitaan saven tehokas kitkakulma suurella muodonmuutostasolla sekä ödometrikoesarjalla määritetty esikonsolidaatiojännityksen jakauma. HSU-menetelmän käyttö on ohjeistettu alla sekä tarkemmin julkaisussa LO 2/2018.



**Suljettu leikkauslujuus stabiliteettilaskelmissa**

Mitattuja tai mallinnettuja anisotrooppisen lujuuden arvoja sovelletaan laskelmissa siten, että lujuus riippuu liukupinnan kaltevuudesta. Lisäksi laskelmissa tulee huomioida suljetun leikkauslujuuden kasvu syvyyden funktiona. Lujuuden riippuvuus liukupinnan suunnasta voidaan laskentaohjelman ominaisuuksista riippuen tehdä jatkuvalla funktiolla, tai määrittämällä maaperään erilliset aktiivileikkauksen, suoran leikkauksen ja passiivileikkauksen vyöhykkeet.

Tässä lujuuden määrittäminen ja sen mallintaminen laskelmissa on esitetty yksinkertaistettuna "tarkistuslistana" selityksin.

**Mittauksiin perustuva lujuuden määrittäminen**

Aktiivi- ja passiivileikkauksen  $s_{uA}$ -arvot voidaan mitata suljetuilla kolmiakselialikokeilla (puristus- ja vetokoe). Suoran leikkauksen suljettu leikkauslujuus voidaan määrittää suljetulla DSS-kokeella.

Määrittäminen voidaan tehdä myös yhdistämällä mittauksia ja korrelaatioita, jos lujuuden määrittäminen eri suunnista ei ole mahdollista. Epäorgaanisille, normaalikonsolidoituneille tai lievästi ylikonsolidoituneille ( $OCR < 2$ ) saviille voidaan soveltaa ruotsalaista korrelaatiota (Larsson et al 2007 mukaan):

$$s_{uA} = 0,33 \cdot \sigma'_c \quad (L1.1)$$

$$s_{uD} = (0,127 + 0,175w_L) \cdot \sigma'_c \quad (L1.2)$$

$$s_{uP} = (0,055 + 0,235w_L) \cdot \sigma'_c \quad (L1.3)$$

missä  $s_{uA}$ ,  $s_{uD}$  ja  $s_{uP}$  ovat suljetut leikkauslujuudet aktiivi-, suorassa ja passiivileikkauksessa,  $\sigma'_c$  esikonsolidaatiojännitys ja  $w_L$  juoksuraja tai hienousluku.

Alla esitetään kaksi yksinkertaista esimerkkiä anisotrooppisen lujuuden määrittämisestä mittausten ja korrelaatioiden yhdistelmänä.

**Esim. 1:** Tehdään kolmiakselialaisia puristuskokeita, joita täydennetään yleisesti käytetyllä korrelaatiolla. Kokeet konsolidoidaan siten, että keskimääräinen konsolidaatiojännitys kokeessa vastaa maassa näytteenotto- ja syvyydellä vallitsevaa keskimääräistä jännitystä. Tällöin määritettävä lujuusprofiili vastaa kyseisessä sijainnissa vallitsevaa konsolidaatiojännitysprofiilia.

Mitään varsinaisia redusointikertoimia ei sovelleta, kun lujuus mallinnetaan anisotrooppisena. Käytettävä koenoisuus tulee olla normaali. Kolmiakselialikokeessa/aktiivileikkauksessa esiintyvän myötöpehmenemisen vaikutusta huomioidaan kertomalla mitattu suljettu leikkauslujuus mallikertoimella  $\xi_{SuA} = 0,9$ .

$$s_{uA} = 0,9 \cdot s_{uA}^{koe} \quad (L1.4)$$

$$s_{uD} = (0,38 + 0,53 w_L) \cdot s_{uA} \quad (L1.5)$$

$$s_{uP} = (0,17 + 0,71 w_L) \cdot s_{uA} \quad (L1.6)$$

**Suljettu leikkauslujuus stabiliteettilaskelmissa**

**Esim. 2:** Käytettävä vertailulujuus voi olla myös suljetulla DSS-kokeella mitattu suora leikkauslujuus (tai siipikairalla mitattu lujuus, joka usein vastaa osapuilleen suoraa leikkauslujuutta). Tällöin lujuudet eri suunnissa voidaan määrittää seuraavasti:

$$S_{uA} = \frac{s_{uD} \cdot 0,33}{0,127 + 0,175w_L} \quad (L1.7)$$

$$S_{uD} = S_{uD}^{koe} \quad (L1.8)$$

$$S_{uP} = \frac{s_{uD} \cdot (0,055 + 0,235w_L)}{0,127 + 0,175w_L} \quad (L1.9)$$

**HSU-menetelmän käyttö, lujuuden määrittäminen mallintamalla**

HSU-menetelmää voidaan käyttää anisotrooppisen suljetun leikkauslujuuden määrittämiseen erityisesti lamellimenetelmissä. Menetelmää voidaan pääosin soveltaa normaali- tai lievästi ylikonsolidoituneisiin epäorgaanisiin saviin. HSU-menetelmällä määritettyjä suljetun leikkauslujuuden arvoja ei redusoida laskentaa varten. Lujuuden anisotropian huomiointi poistaa vastaavan redusointitarpeen. Myötöpehmenemiseen ja kuormitusnopeuteen vaikuttava redusointitarve huomioidaan sovittamalla malli siten, että sen antama lujuus vastaa "huipun jälkeistä" arvoa riittävän hitaassa kuormituksessa. Tämä sovitus on huomioitu HSU:n parametrien oletusarvojen valinnassa.

Maan lujuuden osavarmuus kohdennetaan HSU-menetelmällä määritettyihin suljetun leikkauslujuuden arvoihin. Osavarmuutta ei siis kohdenneta lujuusparametreihin ennen mallin käyttöä, vaan malliin syötetään parametrien ominaisarvot.

Laskenta voidaan tehdä esimerkiksi Liikenneviraston ohjeluettelosta löytyvällä HSU-menetelmän laskentapohjalla.

1. **Määritä esikonsolidaatiojännityksen  $\sigma'_c$  jakauma maakerroksessa (syvyyssuunnassa, eri vaakasijainneissa).** Esimerkiksi penkereen alla, luiskan alla ja luiskan vieressä. Tässä pätevät kohdassa 3.3.4 esitetyt lujittumisen huomiointiin liittyvät säännöt. HSU-menetelmässä
2. **Määritä seuraavat maakerrosparametrit:**
  - **Tehokas kitkakulma  $\phi'$**  (suurta muodonmuutostasoa vastaava arvo)
  - **Tehokas koheesio  $c'$**  (suurta muodonmuutostasoa vastaava arvo, maksimi-arvo 2 kPa)
  - **Lepopainekertoimen sovituskertoimet C ja D (oletukset C = 1 ja D = 1).** Arvoja voidaan säätää mallin sovittamiseksi mittausdataan, mutta oletusarvoista poikkeaminen tulee tehdä varoen.
  - **"Plastisuusparametri"  $\lambda/\kappa$**  (oletus  $\lambda/\kappa = 5$ ). Arvoa voidaan säätää mallin sovittamiseksi mittausdataan, mutta oletusarvosta poikkeaminen tulee tehdä varoen. Tässä on tärkeää, että mallia ei soviteta huippulujuuksiin, vaan huipun jälkeistä lujuutta vastaavasti.
3. **HSU-laskentapohja antaa lujuuden arvot eri leikkaustapauksissa (aktiivi-, suora-, passiivilujuus).**
4. **Määritä anisotrooppinen lujuus laskentaohjelmassa siten, kuin se voidaan kyseisessä ohjelmassa tehdä.**

**Suljettu leikkauslujuus stabiliteettilaskelmissa**

---

**Tapa A:** Geocalc 4.0 implementointi. Määritä laskentaohjelmaan vertailulujuus ja vertailulujuuden kasvu syvyyden funktiona, sekä anisotropiakertoimet, jotka kertovat lujuuden eri suunnissa suhteessa vertailulujuuteen. Vertailulujuus voi olla esimerkiksi mallinnettu (tai mitattu) aktiivilujuus.

HSU-laskentapohja (ohjeen julkaisuaikaan julkaistu versio) tulostaa suoraan GeoCalc 4.0-yhteensopivat parametrit, jotka voidaan syöttää ohjelmaan. Ohjelma interpoloi lujuuden väliarvot eri suunnissa.

**Tapa B:** Syötä ohjelmaan lujuusprofiilit eri liukupinnan kaltevuuksille. Ohjelma interpoloi väliarvot. Esim. ohjelmissa SLOPE/W ja SLIDE anisotrooppinen lujuus voidaan mallintaa näin (hieman toisista eriävillä tavoilla).

**Tapa C:** Luo geometriaan erilliset maakerrokset, joissa on erilliset lujuusprofiilit aktiivileikkaukselle, suoralle leikkaukselle ja passiivileikkaukselle liukupinnan kaltevuuden mukaan. Suuntaa-antavat liukupinnan kaltevuudet eri tapauksille ovat:

- $s_u = s_{uA}$ , kun  $\alpha \geq 25^\circ$
- $s_u = s_{uD}$ , kun  $-15^\circ > \alpha > 25^\circ$
- $s_u = s_{uP}$ , kun  $\alpha \leq -15^\circ$

Tapa C on käytettävissä myös silloin, kun ohjelmassa ei ole suoraa vaihtoehtoa anisotrooppisen lujuuden mallintamiselle. Tavassa C oletetaan tietyt liukupinnan kaltevuudet tietyissä paikoissa ennen laskentaa, mutta tehty maakerrosjako myös ohjaa laskennassa syntyvää liukupinnan muotoa. Tästä syystä maakerrosjakoa aktiivi-, suora leikkaus- ja passiiviosiin tulee päivittää iteratiivisesti ensimmäisten laskentatulosten perusteella.

Huomioi, että konsolidaatiojännityksen vaikutus lujuuteen (esim. lujittuminen vanhan penkereen alla) tulee huomioida erikseen esim. käyttämällä eri maakerroksia penkereen alla tai sivulla, tai sitomalla lujuus tehokkaaseen jännitystilaan. Tämä valinta riippuu ohjelmassa käytettävistä tavoista mallintaa maan lujuutta.

## HSU:n käyttö Excel-laskentapohjalla

Tässä liitteessä on selostettu HSU:n käyttö Excel-laskentapohjan avulla. Laskentapohja on saatavilla Liikenneviraston ohjelueltelosta.

Laskentapohjalla voidaan määrittää anisotrooppinen suljettu leikkauslujuus. Näitä lujuustietoja voidaan hyödyntää erillisillä laskentaohjelmilla tehtävissä stabiliteettilaskelmissa. HSU ei ole sidottu tiettyyn laskentaohjelmaan. Laskentapohjan antamien lujuusarvojen mallintaminen eri ohjelmissa riippuu kunkin ohjelman toiminnoista ja käyttöliittymästä. Laskentapohjassa on huomioitu erityisesti GeoCalc 4.0 -ohjelman käyttö siten, että pohja antaa suoraan GeoCalciin syötettävät lujuusparametrit.

Mallin käyttäjää rohkaistaan tutustumaan eri parametrien vaikutukseen varioimalla niitä, jotta parametrien vaikutus mallin antamaan lujuuteen, jännityspolkuihin jne. tulee tutuksi. Laskelmissa suositellaan kuitenkin käytettäväksi oletusarvoja, jos ei ole perusteltua syytä poiketa niistä ("normaalista poikkeava" mitattu jännityspolku, sovitus mittaustuloksiin, takaisinlaskenta jne).

Laskentapohja toimii kokonaisuudessaan yhdellä sivulla. Ensimmäisenä syötetään **lähtötiedot**.

HSU lähtötiedot			
<b>Maakerrosparametrit</b>			
$\phi'$	30	°	tehokas kitkakulma suurella muodonmuutostasolla
$c'$	0	kPa	tehokas koheesio suurella muodonmuutostasolla (vältä suuria arvoja)
$\lambda/k$	5		jännityspolun kontrolliparametri (oletus: $\lambda/k = 5,0$ ; arvot noin välillä 1,01...100)
C	1		kerroin $K_{0NC}$ :lle (oletus: $C = 1$ , arvot noin välillä 0,8...1,2)
D	1		kerroin $K_{0OC}$ :lle (oletus: $D = 1$ , arvot noin välillä 0,5...2)
<b>Korrelaatiot</b>			
	Larsson et al 2007 alkup.		valitse korrelaation tyyppi
wL	50	%	juoksuraja
<b>Jännitystila ja geometria</b>			
$\sigma'_{v0}$	30	kPa	kerroksen yläreunan tehokas pystyjännitys alkutilassa (ennen kuormitusta)
OCR	1		valitse OCR tai POP ja anna arvo
$\gamma'$ sat	5	kPa	tehokas tilavuuspaino vedenpinnan alapuolella
z ylä	2	m	kerroksen yläreunan syvyys maanpinnasta
z ala	20	m	kerroksen alareunan syvyys maanpinnasta

Kuva L2.1 Laskennan lähtötiedot.

HSU-menetelmän maakerrosparametrit ovat:

$\phi'$	tehokas kitkakulma suurella muodonmuutostasolla [°]
$c'$	tehokas koheesio suurella muodonmuutostasolla [kPa]
$\lambda/k$	jännityspolun kontrolliparametri (arvot noin välillä 1,01...100)
C	kerroin $K_{0NC}$ :lle (oletus: $C = 1$ , arvot noin välillä 0,8...1,2)
D	kerroin $K_{0OC}$ :lle (oletus: $D = 1$ , arvot noin välillä 0,5...2)

Kitkakulma ja koheesio määritetään lähtökohtaisesti kolmiakσιαalikokeiden perusteella. Molemmat tulee määrittää suurta muodonmuutostasoa vastaavasti (kolmiakσιαalikokeissa  $\epsilon_a > 10\%$ ). Kyseessä siis EI ole huippulujuutta vastaavat parametrit, vaan lähinnä kriittisen tilan parametrit. Suuruusluokkatarkasteluissa, joita ei sellaisenaan käytetä mitoitukseen, voidaan olettaa suomalaisen saven kitkakulmaksi  $\phi' \approx 25^\circ \dots 28^\circ$ . **Nollasta poikkeavaa koheesion arvoa ei lähtökohtaisesti suositella.** Jos koetulosten perusteella voidaan osoittaa tehokkaan koheesion olemassaolo suurilla muodonmuutostasolla, mallissa voidaan silti käyttää pientä koheesiota, n.  $c' \approx 0 \dots 3$  kPa.

**Suljettu leikkauslujuus stabiliteettilaskelmissa**

Parametrille  $\lambda/\kappa$  annetaan oletusarvoksi  $\lambda/\kappa = 5,0$ . Tämä on takaisinlaskentoihin ja mallinsovitukseen perustuva arvo, jolla saadaan mm. muodonmuutosnopeuden ja myötöpehmenemisen vaikutus huomioitua. Oletusarvosta poikkeaminen tulee tehdä vain hyvin perustellusta syystä (esimerkiksi mallin sovitus mittausdataan, sortumien takaisinlaskenta jne). Mitoituslaskelmissa ei poikkeamista oletusarvosta suositella lainkaan ilman mallin riittävää tuntemusta.

Parametri C vaikuttaa erityisesti initiaalimyötöpinnan kaltevuuteen ja sitä kautta mallin antamaan anisotropiaan. Oletusarvosta  $C = 1$  poikkeaminen tulee tehdä vain hyvin perustellusta syystä (esimerkiksi mallin sovitus mittausdataan, sortumien takaisinlaskenta jne). Mitoituslaskelmissa ei poikkeamista oletusarvosta suositella lainkaan ilman mallin riittävää tuntemusta.

Parametri D vaikuttaa lähinnä alkutilan jännitykseen. Sen vaikutus lopputulokseen on melko pieni, ja oletusarvosta  $D = 1$  poikkeaminen on käytännössä turhaa.

Kohdassa ”korrelaatio” määritellään juoksuraja julkaisun Larsson et al (2007) mukaiseen korrelaatioon (kohta 3.5). Tämän korrelaation tarkoitus on tarjota vertailuarvo, johon HSU:n tuloksia voidaan varmentaa. Tässä on syytä huomioda, että korrelaation tulokset vastaavat lujuuden huippuarvoja. Maakerrospanparametrien odotusarvoilla HSU:n lujuusarvot ovat ”huipun jälkeisiä”, joissa on huomioitu myötöpehmenemisen vaikutus. Lisäksi korrelaatio perustuu tausta-aineistoon, joka sisältää useita kittakulmaltaan yli 30° savia. Näin ollen korrelaatio antaa usein hieman HSU:ta korkeampia lujuuksia erityisesti kolmiaksisiaalisessa puristuksessa.

Kohdassa ”jännitystila ja geometria” annetaan laskettavan maakerroksen paksuus ja jännityshistoria. Parametri  $\sigma'_{vo}$  vastaa alkutilanteessa ennen kuormitusta vallitsevaa tehokasta pystyjännitystä. Ylikonsolidaatio annetaan suhteessa tehokkaaseen pystyjännitykseen joko OCR:n ( $OCR = \sigma'_c / \sigma'_{vo}$ ) tai POP:n ( $POP = \sigma'_c - \sigma'_{vo}$ ) avulla. Näistä valitaan se, kumpi on paremmin vakio koko maakerroksen läpi.

Lisäksi annetaan maakerroksen tehokas tilavuuspaino sekä kerroksen ylä- ja alareunan syvyys maanpinnasta. Näitä käytetään lujuuden kasvun laskentaan ja visualisointiin tuloksissa.

**Tulokset** annetaan kuvan L 2.2 mukaisesti.

HSU mallinnetut lujuudet					
	su [kPa]	dsu [kPa/m]	su/sig'v0	su/sig'c	
TC	9,42	1,57	0,314	0,314	HSU-mallilla arvioitu kolmiaksisiaalinen puristuslujuus
ACT	9,22	1,54	0,307	0,307	HSU-mallilla arvioitu aktiivilujuus
DSS	5,87	1,15	0,196	0,196	HSU-mallilla arvioitu DSS-kokeen lujuus
PASS	5,27	0,88	0,176	0,176	HSU-mallilla arvioitu passiivilujuus
TE	4,95	0,83	0,165	0,165	HSU-mallilla arvioitu kolmiaksisiaalinen vetolujuus
AVG	6,75	1,18	0,225	0,225	Keskimääräinen lujuus (TC+DSS+TE)/3
HSU anisotropiasuhteet					
DSS/TC	0,62				HSU ei oletusarvoilla anna huippulujuutta (peak), vaan ”huipun jälkeisen”, jota on tarkoitus käyttää ilman redusointia. Tuloksen kuuluu olla pienempi kuin ao. korrelaatiolla saadut arvot.
TE/TC	0,53				
Lujuudet korrelaatiosta (redusoimaton)					
	su [kPa]	dsu [kPa/m]	su/sig'v0	su/sig'c	
Aktiv	9,90	1,65	0,330	0,330	Korrelaatiosta arvioitu aktiivilujuus
Medel	7,17	1,20	0,239	0,239	Korrelaatiosta arvioitu keskimääräinen lujuus
Direkt	6,44	1,07	0,215	0,215	Korrelaatiosta arvioitu suora leikkauslujuus
Passiv	5,18	0,86	0,173	0,173	Korrelaatiosta arvioitu passiivilujuus
Korrelaation anisotropiasuhteet					
Direkt/Aktiv	0,65				HUOM! Nämä perustuvat kokeellisiin huippulujuuksiin (peak strength) eikä niitä tule sellaisenaan käyttää mitoituksessa.
Passiv/Aktiv	0,52				

Kuva L2.2 Laskennan tulokset

**Suljettu leikkauslujuus stabiliteettilaskelmissa**

Tuloksista annetaan kunkin koetyypin suljettu leikkauslujuus kerroksen yläpinnassa, lujuuden kasvu syvyyden funktiona, sekä tehokkaalla pystyjännityksellä ja esikonsolidaatiojännityksellä normalisoidut lujuudet. Eri lujuustyypit eroavat leikkaussuunnan ja keskimmäisen pääjännityksen suuruuden osalta:

TC: lujuus kolmiakσιαalisessa puristuskokeessa;	$\sigma'_2 = \sigma'_3$
ACT: lujuus liukupinnan aktiivivyöhykkeessä;	$\sigma'_2 = \sigma'_3 + 0,3(\sigma'_1 - \sigma'_3)$
DSS: lujuus suorassa leikkauksessa;	$\sigma'_2 = \sigma'_3 + 0,3(\sigma'_1 - \sigma'_3)$
PASS: lujuus liukupinnan passiivivyöhykkeessä;	$\sigma'_2 = \sigma'_3 + 0,3(\sigma'_1 - \sigma'_3)$
TE: lujuus kolmiakσιαalisessa vetokokeessa;	$\sigma'_2 = \sigma'_1$

Lisäksi annetaan keskimääräinen lujuus sekä anisotropiasuhteet.

**Stabiliteettilaskennassa käytettävät lujuudet ovat ACT, DSS ja PASS. Kolmiakσιαalikoe-lujuudet annetaan tässä lähinnä mahdollista koetuloksiin sovittamista varten.** Vastaavat tulokset annetaan vertailun vuoksi myös korrelaatiosta.

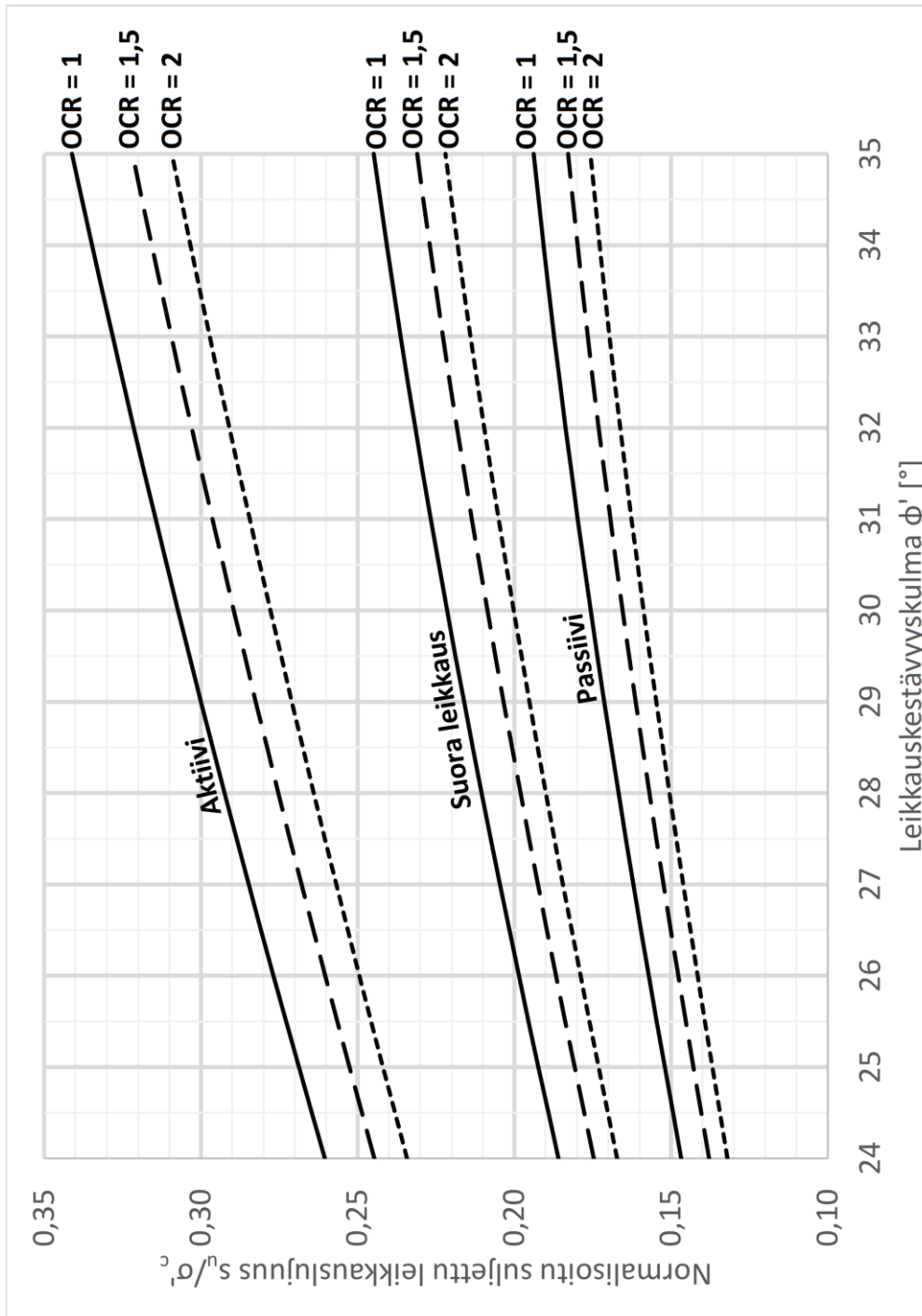
Lisäksi laskentapohja antaa lujuusarvot, jotka voidaan syöttää sellaisenaan GeoCalc 4.0:n Materials-välilehdelle. Laskentapohja antaa lujuuden siten, että syötettävä vertailulujuus on aktiivilujuus. Vertailulujuudeksi voidaan periaatteessa valita mikä leikkaussuunta tahansa, mutta käytännössä anisotropiaa on helppo hahmottaa suhteessa aktiivilujuuteen (~ kolmiakσιαalisen puristuskokeen lujuuteen). Anisotrooppisen lujuuden käytöstä GeoCalc 4.0:ssa katso liite 4.

Geocalciin syötettävät parametrit (ADP)	
$\phi'$	0
$c'$	9,22
$\Delta c'$	
(dependent on layer depth)	1,57
SuA/Su0	1,00
SuD/Su0	0,62
SuP/Su0	0,53

Kuva L2.3 Geocalc-parametrit

## HSU-nomogrammi oletusparametreilla

Oheisen nomogrammin avulla voidaan määrittää esikonsolidaatiojännityksellä normalisoitu suljettu leikkauslujuus HSU-menetelmällä eri suunnissa ja eri esikonsolidaatioasteen OCR arvoilla. Nomogrammissa oletetut parametrit ovat:  $c' = 0$ ;  $\lambda/\kappa = 5,0$ ;  $C = 1$ ;  $D = 1$ .



## Anisotrooppisen lujuuden mallintaminen eri laskentaohjelmissa

Stabiliteettilaskenta anisotrooppisella lujuudella pitää karkeasti sisällään seuraavat vaiheet:

1. Valitaan tapa, millä anisotrooppinen lujuus määritetään (mittaukset, mallintaminen, korrelaatiot, näiden yhdistelmä)
2. Lähtötietojen määrittäminen
3. Laskelmassa käytettävien lujuuden arvojen määrittäminen laskentaohjelman vaatimalla tavalla
4. Laskenta

Tulee erottaa toisistaan kaksi asiaa: Lujuuden määrittäminen ja sen mallintaminen. Anisotrooppinen lujuus voidaan määrittää monella eri tavalla (esim. kolmiakselialikokeet, mallintaminen (HSU-menetelmä), isotrooppisen lujuuden käyttö anisotrooppisiin korrelaatioihin yhdistettynä).

Mallintamisessa määritetty lujuus annetaan laskentaan lähtötietona, minkä lisäksi eri ohjelmissa on erilaisia funktioita lujuuden muutokselle (syvyyden, jännitystilän ja/tai liukupinnan suunnan funktiona).

Seuraavassa annetaan ehdotukset anisotrooppisen lujuuden käytölle eri lamellimenetelmää käyttävissä laskentaohjelmissa siten, kuin niiden toiminnot mahdollistavat kirjoitushetkellä (2018).

### GeoCalc

Versiosta 4.0 eteenpäin GeoCalcissa on toiminto anisotrooppisen lujuuden käytölle (kuva L4.1). Tämä toiminto ei ole sidoksissa HSU-menetelmään, vaan ohjelmaan syötettävä anisotrooppinen lujuus voidaan määrittää millä menetelmällä tahansa (mitatut arvot jne.). HSU-menetelmän laskentapohja on kuitenkin laadittu tätä GeoCalcin toiminnallisuutta silmällä pitäen.

ID	Color	Soil layer	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\gamma_{sat}$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$c$ [kPa]	$\phi$ [°]	$\Delta c$ [kPa/m]	$\Delta \phi$ [°/m]	Material Type	$r_u$	$r_{uq}$	$r_u'$	Anisotropy Type	SuA/Su0	SuD/Su0	SuP/Su0
1	...	Täyttö	19,00	20,00	0,00	36,00			Independent on depth				Isotropic			
2	...	Savi	15,00	15,00	20,00	0,00	1,50	0,00	Dependent on layer depth				Active-Direct-Passive (ADP)	1	0,7	0,5
3	...	Hiekka	17,00	18,00	0,00	30,00			Independent on depth				Isotropic			
4	...	Moreeni	20,00	21,00	0,00	36,00			Independent on depth				Isotropic			

Kuva L4.1 Materials-välilehti, GeoCalc 4.0

Anisotrooppista lujuutta voidaan käyttää valitsemalla Anisotropy Type -> Active-Direct-Passive (ADP). Tällöin koheesio ja kitkakulma toimivat vertailulujuuksina, eli  $c = Su_0$ . Suljetussa tilassa  $\phi' = 0$ . Suhteet  $SuA/Su_0$ ,  $SuD/Su_0$  ja  $SuP/Su_0$  antavat lujuuden eri suunnissa suhteessa vertailulujuuteen.

Ohjelma käyttää tällöin maakerroksessa "Savi" lujuutta  $SuA$  liukupinnan aktiivipäässä ( $\alpha \geq 45^\circ$ ), lujuutta  $SuD$  kun liukupinta on vaakasuora ( $\alpha = 0^\circ$ ) ja lujuutta  $SuP$  liukupinnan passiivipäässä ( $\alpha \leq -45^\circ$ ). Väliarvot interpoloidaan. Ohjelma siis laskee erikseen eri liukupinnoille joka lamellin pohjalle lamellin kaltevuuskulmaa ja syvyyttä vastaavan lujuusarvon.



**Suljettu leikkauslujuus stabiliteetilaskelmissa**

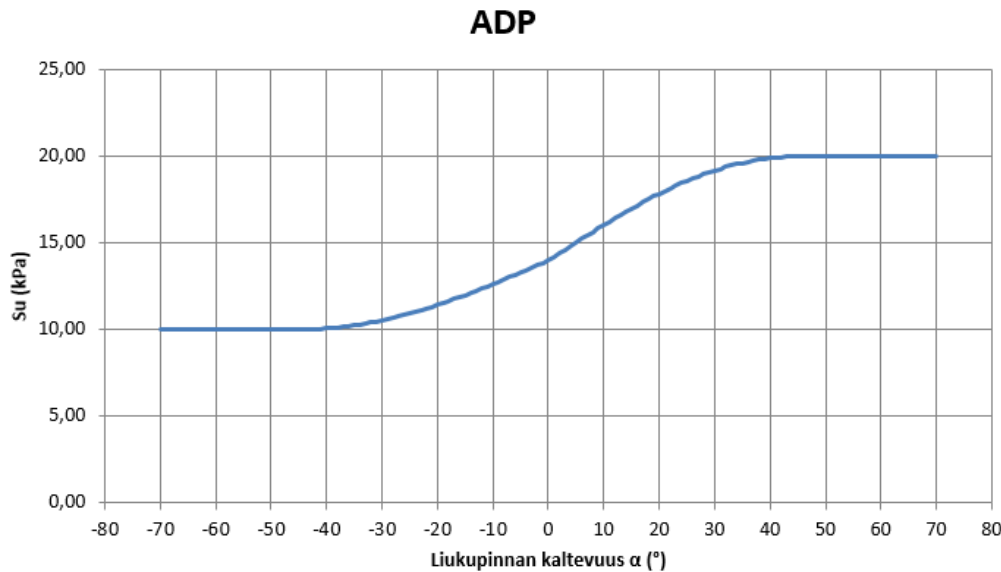
Se, missä suunnassa määritetty lujuus on vertailulujuus  $Su_0$ , on käyttäjän päätettävissä. Kuvassa L4.1 vertailulujuus  $Su_0 = 20 \text{ kPa}$  vastaa aktiivilujuutta  $Su_A$ . Lisäksi voidaan antaa vertailulujuuden kasvu syvyyden mukana. Tällöin ohjelma laskee lujuudet eri suunnissa seuraavasti:

$$\text{suljettu aktiivilujuus } Su_A = 1 \cdot (20 \text{ kPa} + 1,5 \text{ kPa/m}) = 20 \text{ kPa} + 1,5 \text{ kPa/m}$$

$$\text{suljettu suora leikkauslujuus } Su_D = 0,7 \cdot (20 \text{ kPa} + 1,5 \text{ kPa/m}) = 14 \text{ kPa} + 1,05 \text{ kPa/m}$$

$$\text{suljettu passiivilujuus } Su_P = 0,5 \cdot (20 \text{ kPa} + 1,5 \text{ kPa/m}) = 10 \text{ kPa} + 0,75 \text{ kPa/m}$$

Kuvassa L4.2 on esitetty esimerkin lujuudet eri suunnissa maakerroksen yläreunaa vastaavasti.



Kuva L4.2 GeoCalcin laskema suljettu leikkauslujuus eri leikkaussuunnissa maakerroksen yläreunassa.

**Slope/W**

Slope/W (Geo-Slope) -ohjelmassa anisotrooppinen lujuus voidaan antaa kahdella tavalla: Anisotropic Strength tai Anisotropic function

Anisotropic strength -vaihtoehdossa annetaan maan lujuudet pysty- ja vaakasuorassa leikkauksessa. Lujuus näiden ääriarvojen välillä annetaan funktiolla:

$$c = c_h \cos^2 \alpha + c_v \sin^2 \alpha$$

$$\phi = \phi_h \cos^2 \alpha + \phi_v \sin^2 \alpha$$

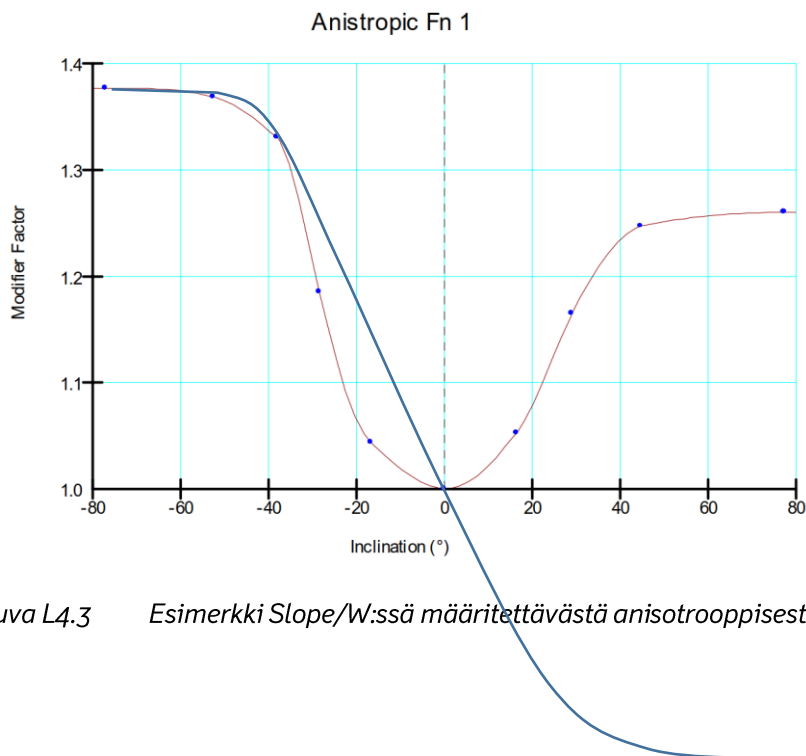
Ongelmana Anisotropic strength -mallissa on se, että suljetun leikkauslujuuden ääriarvot (aktiivi ja passiivi) eivät todellisuudessa löydy pysty- tai vaakasuorassa leikkauksessa, vaan osapuilleen suunnissa:

$$\alpha = 45^\circ \pm \phi' / 2$$

Tästä syystä suositellumpi tapa mallintaa lujuus on käyttää Anisotropic Function -toimintoa, jossa määritetyn vertailulujuuden muuttumiselle annetaan vapaamuotoinen funktio.

**Suljettu leikkauslujuus stabiliteetilaskelmissa**

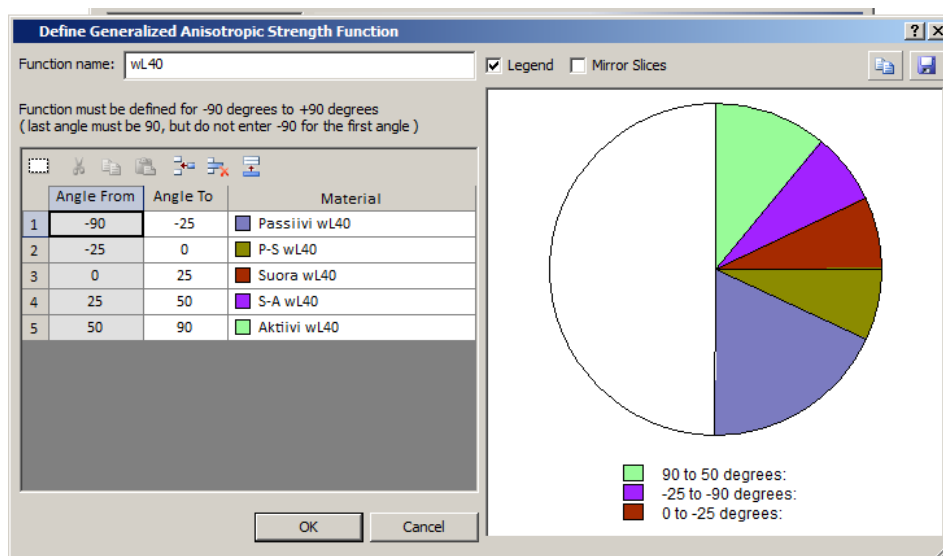
Vertailulujuudelle (esim. kolmiakσιαalinen puristuslujuus) annetaan funktiossa arvo  $f = 1,0$ , ja eri suunnissa lujuudelle annetaan funktion mukainen kerroin (vrt. GeoCalcin käytäntö).



Kuva L4.3 Esimerkki Slope/W:ssä määritettävästä anisotrooppisesta funktiosta

## Slide

Slide-ohjelmassa on useita tapoja mallintaa anisotrooppista lujuutta. Suositeltava tapa on käyttää Generalized Anisotropic -mallia, jossa määritetään, minkälaista lujuuden mallintamistapaa käytetään missäkin suunnassa. Eri suunnissa käytetään siis ”alamalleja”. ”Alamalli” voi olla esim. syvyyden mukaan muuttuva suljetun leikkauslujuuden arvo, tai vallitsevan jännitystilän funktiona muuttuva lujuus. Näin voidaan kerralla mallintaa sekä lujuuden suunta-että syvyysriippuvuus.



Kuva L4.3 Esimerkki Sliden Generalized Anisotropic -mallista. Eri suunnissa käytetään eri lujuuden omaavia ”maakerroksia”

## HSU-menetelmän kaavat

Alla on annettu HSU-menetelmän kaavat siten, kuin ne esiintyvät esim. Excel-laskentapohjaa käytettäessä. Kaavoja voi hyödyntää esim. HSU-menetelmän implementoimiseen muihin sovelluksiin. Kaavojen johtaminen on esitetty lähteessä Lehtonen (2015).

### MAAKERROSPARAMETRIT:

$\varphi'$	Tehokas kitkakulma suurella muodonmuutostasolla [°]
$c'$	Tehokas koheesio [kPa]
$\lambda/\kappa$	HSU:n lujittumisparametri (oletus: $\lambda/\kappa = 5$ )
C	Kerroin normaalikonsolidoituneen tilan K0:lle (oletus : C =1)
D	Kerroin vallitsevalle K0:lle (oletus: D = 1)
OCR	Ylikonsolidaatioaste

Murtosuoran kaltevuus p'-q-koordinaatistossa:

$$M = \frac{6 \cdot \sin \varphi'}{3 - \sin \varphi'} \quad (L5.1)$$

### JÄNNITYSTILAN LASKENTA:

Vallitseva tehokas pystyjännitys  $\sigma'_{v0}$  laskentapisteessä oletetaan tunnetuksi.

Liukupinnan suunta (lamellin pohjan kaltevuuskulma)  $\alpha$  oletetaan tunnetuksi.

Pääjännitysten kiertokulma:

$$\theta = 45^\circ + \varphi'/2 - \alpha \quad (L5.2)$$

Normaalikonsolidoituneen tilan esikonsolidaatiojännitys:

$$K_{0NC} = C(1 - \sin \varphi') \quad (L5.3)$$

Vallitseva K0:

$$K_0 = K_{0NC} \cdot OCR^{D \cdot \sin \varphi'} \quad (L5.4)$$

Vallitseva (alkutilan) tehokas vaakajännitys:

$$\sigma'_{h0} = K_0 \cdot \sigma'_{v0} \quad (L5.5)$$

Vallitseva (alkutilan) keskimääräinen tehokas jännitys:

$$p'_0 = \frac{\sigma'_{v0} + 2 \cdot \sigma'_{h0}}{3} \quad (L5.6)$$

Pystysuora esikonsolidaatiojännitys:

$$\sigma'_c = OCR \cdot \sigma'_{v0} \quad (L5.7)$$

Vaakasuora esikonsolidaatiojännitys:

$$\sigma'_{ch} = K_{0NC} \cdot \sigma'_c \quad (L5.8)$$

Keskimääräinen esikonsolidaatiojännitys:

$$p'_c = \frac{\sigma'_c + 2 \cdot \sigma'_{ch}}{3} \quad (L5.9)$$

Deviatorinen esikonsolidaatiojännitys:

$$q_c = \sigma'_c - \sigma'_{ch} \quad (L5.10)$$

#### LASKENNASSA KÄYTETTÄVÄT JÄNNITYKSET:

Alkuperäinen S-CLAY1-malli on kriittisen tilan malli, jossa ei ole koheesiota. HSU-menetelmässä koheesion käyttö mahdollistetaan siirtämällä koordinaatistoa laskennassa attraktion  $p'_{att}$  verran, katso Lehtonen (2015). Suuria koheesion arvoja (noin  $c' > 5$  kPa) tulisi kuitenkin välttää.

”Koheesio”  $p'$ - $q$ -koordinaatistossa:

$$q_{att} = \frac{2 \cdot c'}{\cos \varphi'} \quad (L5.11)$$

Attraktio  $p'$ - $q$ -koordinaatistossa:

$$p'_{att} = \frac{q_{att}}{M} \quad (L5.12)$$

Keskimääräisen vallitsevan jännityksen laskenta-arvo:

$$p'_{0calc} = p'_0 + p'_{att} \quad (L5.13)$$

Keskimääräisen esikonsolidaatiojännityksen laskenta-arvo:

$$p'_{ccalc} = p'_c + p'_{att} \quad (L5.14)$$

### MYÖTÖPINNAN MÄÄRITYS:

KoNC-suoran kaltevuus p'-q-koordinaatistossa:

$$\eta_{K0NC} = \frac{q_c}{p'_c} = \frac{3 \cdot (1 - K_{0NC})}{1 + 2 \cdot K_{0NC}} \quad (L5.15)$$

Myötöpinnan kaltevuusparametri:

$$\alpha_{rot} = \frac{\eta_{K0NC}^2 + 3\eta_{K0NC} - M^2}{3} \quad (L5.16)$$

Initiaalimyötöpinnan koko:

$$p'_{m0} = \frac{M^2 \cdot p'_{ccalc}{}^2 - 2 \cdot \alpha_{rot} \cdot p'_{ccalc} \cdot q_c + q_c^2}{p'_{ccalc} (M^2 - \alpha_{rot}^2)} \quad (L5.17)$$

### LASKENNASSA KÄYTETTÄVIÄ VÄLITULOKSIA:

$$A = \frac{1}{1 - \frac{\lambda}{\kappa}} \quad (L5.18)$$

Keskimmäisen pääjännityksen kerroin b (Huom! Kolmiaksaaliselle puristukselle b = 0 ja kolmiaksaaliselle vedolle b = 1. In situ-olosuhteissa keskimmäisen pääjännityksen arvoa ei lähtökohtaisesti tiedetä tarkasti. HSU-menetelmässä oletetaan stabiliteettilaskennassa **b = 0,3**):

$$b = \frac{\sigma'_2 - \sigma'_3}{\sigma'_1 - \sigma'_3} \quad (L5.19)$$

$$B = b^2 - b + 1 \quad (L5.20)$$

$$E = \frac{M^2 - \alpha_{rot}^2}{2M^2 + \frac{M \cdot \alpha_{rot}}{\sqrt{B}} \cdot (3 \sin^2 \theta + b - 2)} \cdot \frac{p'_{m0}}{p'_{0calc}{}^A} \quad (L5.21)$$

Keskimääräinen tehokas jännitys murtotilassa:

$$p'_f = e^{\ln(1/E)/(A-1)} \quad (L5.22)$$

### SULJETTU LEIKKAUSLUJUUS:

$$s_u = \frac{p'_f \cdot M}{2} \quad (L5.23)$$



ISSN-L 1798-6591  
ISSN 1798-6605  
ISBN 978-952-317-630-0  
[www.liikennevirasto.fi](http://www.liikennevirasto.fi)

Liik  
enne  
vira  
sto

