

Oppdatering av Janbus N_γ bæreevnefaktor

Hooman Rostami

Geotekniker
DMR Miljø og Geoteknikk AS
e-post:hr@dmr.as

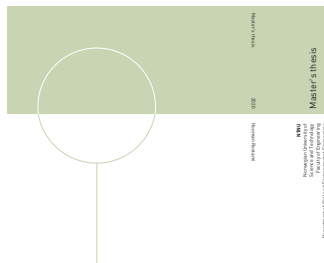
11. November 2021

- Introduksjon
- Bæreevne i klassisk geoteknisk litteratur
- Foreslått løsning for N_γ ifølge Martin [2005]
- Bæreevneberegning ifølge Janbu (praksis i Norge)
- Likevektsberegning "limit analysis"
- OptumG2
- Skrålast på vektløs jord i OptumG2
- Skrålast på jord med vekt i OptumG2
- Laboratorieresultater vs foreslått formel
- Konklusjon

■ Introduksjon

- Bæreevne i klassisk geoteknisk litteratur
- Foreslått løsning for N_γ ifølge Martin [2005]
- Bæreevneberegning ifølge Janbu (praksis i Norge)
- Likevektsberegning "limit analysis"
- OptumG2
- Skrålast på vektløs jord i OptumG2
- Skrålast på jord med vekt i OptumG2
- Laboratorieresultater vs foreslått formel
- Konklusjon

Presentasjonen er en del av masteroppgaven som ble levert i 2020.
Veileder: Arnfinn Emdal



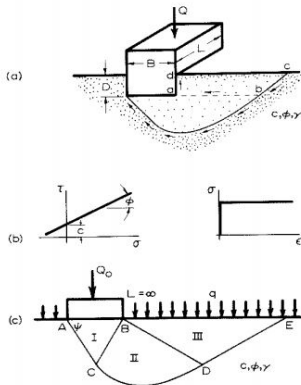
Hooman Rostami

Finite Element Limit Analysis of
Bearing Capacity Problem
Application of Optum

June 2020

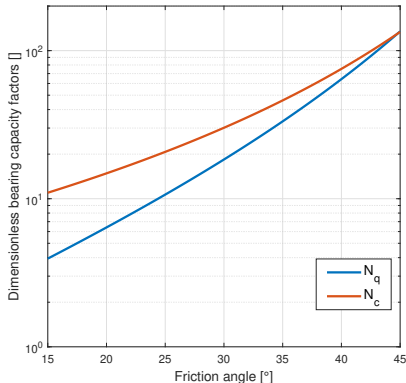
- Introduksjon
- **Bæreevne i klassisk geoteknisk litteratur**
- Foreslått løsning for N_γ ifølge Martin [2005]
- Bæreevneberegning ifølge Janbu (praksis i Norge)
- Likevektsberegning "limit analysis"
- OptumG2
- Skrålast på vektløs jord i OptumG2
- Skrålast på jord med vekt i OptumG2
- Laboratorieresultater vs foreslått formel
- Konklusjon

Bæreevneproblem ifølge Prandtl [1921]:



$$q_{ult} = c \cdot N_c + q \cdot N_q$$

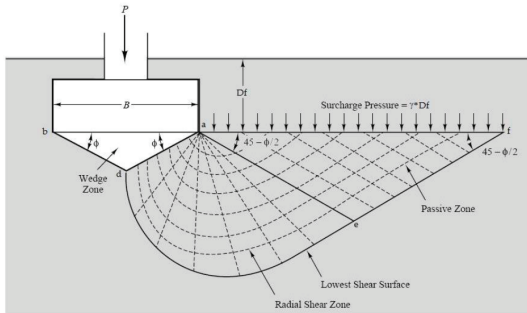
Bæreevnefaktor N_c and N_q etter Prandtl [1921]



$$N_q = \tan^2\left(\frac{\pi}{2} + \frac{\varphi}{2}\right) \cdot e^{\pi \cdot \tan \varphi}$$

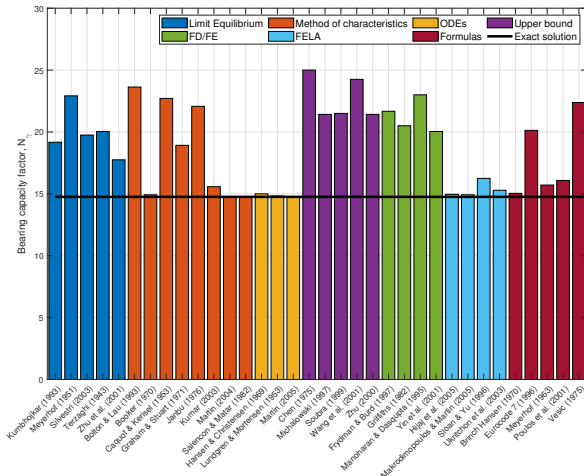
$$N_c = (N_q - 1) \cdot \cot \varphi$$

Superposisjon og bruddflate ifølge Terzaghi (fra Coduto [2001]).



$$q_{ult} = N_c \cdot c + N_q \cdot p' + \frac{1}{2} \cdot N_\gamma \cdot \gamma \cdot B$$

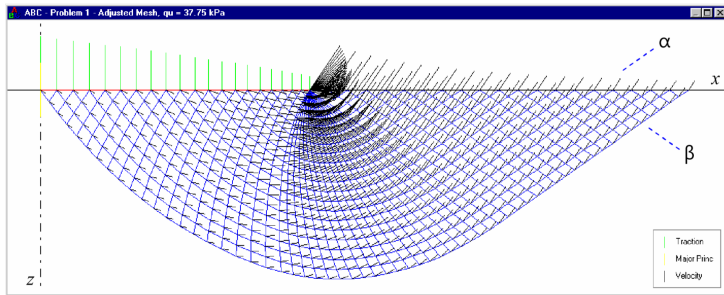
N_γ for $\varphi=30^\circ$ ifølge ulike kilder (fra Martin [2005]):



- Introduksjon
- Bæreevne i klassisk geoteknisk litteratur
- **Foreslått løsning for N_γ ifølge Martin [2005]**
- Bæreevneberegning ifølge Janbu (praksis i Norge)
- Likevektsberegning "limit analysis"
- OptumG2
- Skrålast på vektløs jord i OptumG2
- Skrålast på jord med vekt i OptumG2
- Laboratorieresultater vs foreslått formel
- Konklusjon

Spennings- og hastighetsfelt generert av ABC program

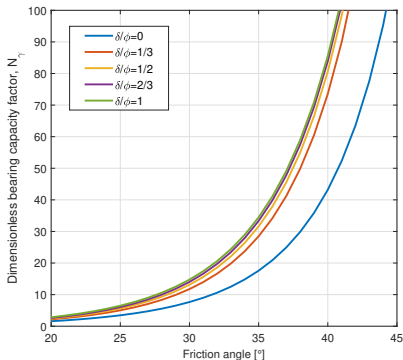
(les mer: geoengineer.org/software/abc)



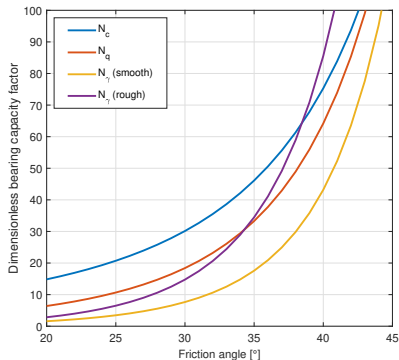
Forutsetningene i modellen:

- Plan tøyning
- Assosiert flyteregel "Associated flow rule", $\psi = \varphi$
- Sentrisk og vertikal last

Bæreevnefaktorer foreslått av Martin [2005]



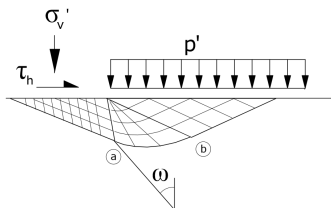
(a) N_γ i glatt/ru fundament



(b) N_c , N_q og N_γ

- Introduksjon
- Bæreevne i klassisk geoteknisk litteratur
- Foreslått løsning for N_γ ifølge Martin [2005]
- **Bæreevneberegning ifølge Janbu (praksis i Norge)**
- Likevektsberegning "limit analysis"
- OptumG2
- Skrålast på vektløs jord i OptumG2
- Skrålast på jord med vekt i OptumG2
- Laboratorieresultater vs foreslått formel
- Konklusjon

Spenningsfelt for en sentrisk skrålast i vektløs jord med overdekning



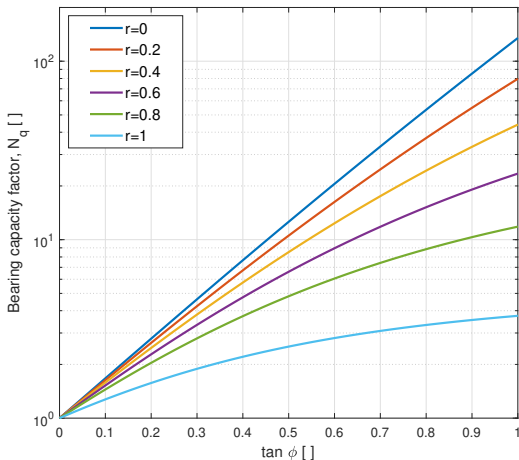
$$\begin{aligned}\sigma'_{vn} &= \sigma'_v - p' \\ \sigma'_{vn} &= (N_q - 1)(p' + a) \\ \tau_h &= r \cdot \tan \rho (\sigma'_v + a) \\ \tan \omega &= f_\omega \tan \alpha_{c+} \\ f_\omega &= \frac{1}{r} (1 - \sqrt{1 - r^2}) \\ \tan \alpha_{c+} &= \tan \rho + \sqrt{1 + \tan^2 \rho} \\ \alpha_{c+} &= \frac{\pi}{4} + \frac{\rho}{2}\end{aligned}$$

$$\sigma'_v = N_q \cdot (p' + a) - a$$

hvor N_q er definert som:

$$N_q = \frac{(1 + f_w^2) \cdot N_+}{1 + f_w^2 \cdot N_+} \cdot e^{(\pi - 2\omega) \cdot \tan \varphi}$$

Eksakt løsning for N_q med ulik ruhet, r



$$d_0 = \sin(\alpha_{c+} - \omega) \cdot e^{(\alpha_{c+} - \omega) \cdot \tan \varphi} \cdot \frac{1}{1.25 \cdot (2 - r)}$$

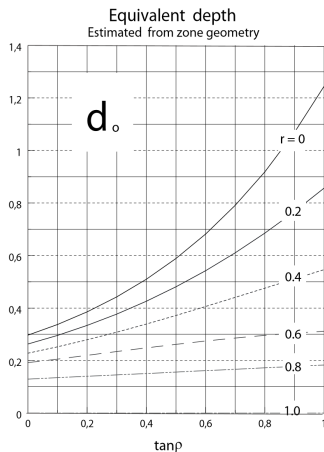
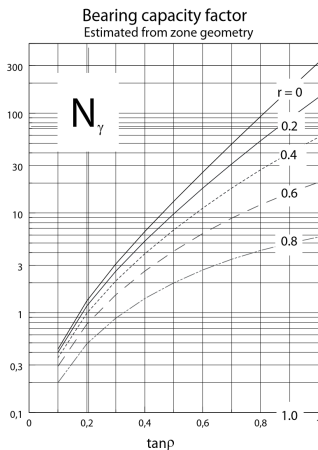
z_0 er relatert til bæreevnefaktoren N_γ :

$$d_0 = \frac{1}{2} \cdot \frac{N_\gamma}{(N_q - 1)}$$

Dermed blir bæreevneformelen:

$$\sigma'_v = (N_q - 1) \cdot (p' + a) + \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot N_\gamma \cdot B_0$$

Figuren viser N_γ ut fra Janbus metode:



- Introduksjon
- Bæreevne i klassisk geoteknisk litteratur
- Foreslått løsning for N_γ ifølge Martin [2005]
- Bæreevneberegning ifølge Janbu (praksis i Norge)
- **Likevektsberegning "limit analysis"**
- OptumG2
- Skrålast på vektløs jord i OptumG2
- Skrålast på jord med vekt i OptumG2
- Laboratorieresultater vs foreslått formel
- Konklusjon

Plastisitets teorem:

- Øvre grense (upper bound)
- Nedre grense (lower bound)
- Uten last-deformasjonskurve

Nedre grense teorem:

- Statisk
- Kollaps under samsvar mellom spenningsfelt og bruddkriteriet

Øvre grense teorem:

- kinematisk
- Kollaps da arbeidshastigheten "rate of work" = hastigheten på intern spredning av energi

- Introduksjon
- Bæreevne i klassisk geoteknisk litteratur
- Foreslått løsning for N_γ ifølge Martin [2005]
- Bæreevneberegning ifølge Janbu (praksis i Norge)
- Likevektsberegning "limit analysis"
- **OptumG2**
- Skrålast på vektløs jord i OptumG2
- Skrålast på jord med vekt i OptumG2
- Laboratorieresultater vs foreslått formel
- Konklusjon

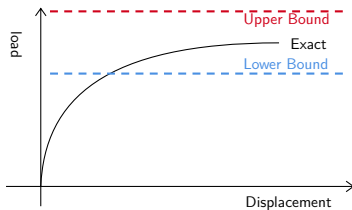
Finite element limit analysis (FELA): en ny type elementmetode som bruker elementmetodens meshing prinsippet for å finne en øvre og nedre grense for en last uten å kjøre hele last-deformasjonskurven.

Denne typen analyse gir mulighet til å utvikle nøyaktigere øvre og nedre grense løsninger for noen av problemene som er vanskelige å utlede med "closed-form" løsning og plastisitets teorem.

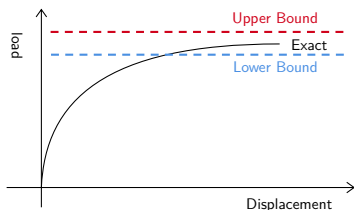
mer info: Lyamin and Sloan [2002a] og Lyamin and Sloan [2002b]

<https://doi.org/10.1002/nme.511> og <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/nag.198>

Plastisitets teoremet prøver å finne øvre og nedre grense for en lastsituasjon uten å lage en last-deformasjons kurve.



(a) Grovt mesh

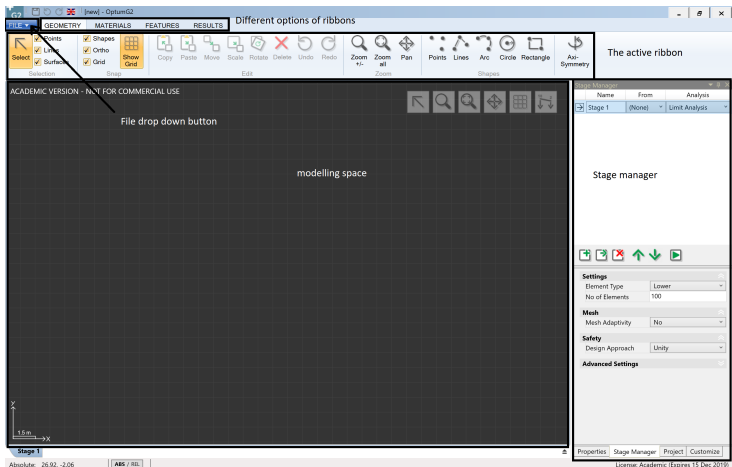


(b) Fint mesh

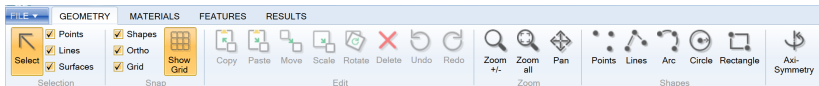
Middelverdi: gjennomsnittet av øvre (upper bound) og nedre grense (lower bound).

Løsningen er en "eksakt" løsning dersom øvre og nedre grense er like.

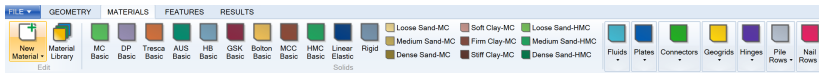
OptumG2 er et nytt elementmetodeprogram som kan kjøre øvre/nedre grense analyser. Dette programmet ble brukt for å gi resultatene som presenteres her.



Geometri:



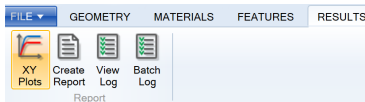
Materialer:

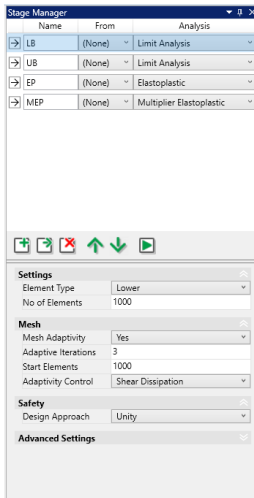


Spesifikasjoner:



Resultater:

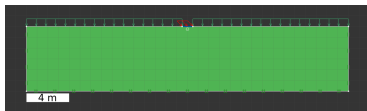




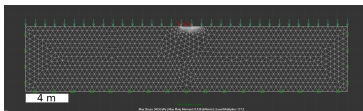
- Introduksjon
- Bæreevne i klassisk geoteknisk litteratur
- Foreslått løsning for N_γ ifølge Martin [2005]
- Bæreevneberegning ifølge Janbu (praksis i Norge)
- Likevektsberegning "limit analysis"
- OptumG2
- **Skrålast på vektløs jord i OptumG2**
- Skrålast på jord med vekt i OptumG2
- Laboratorieresultater vs foreslått formel
- Konklusjon

LB/UB analyser, mesh med 10k elementer. φ fra 15° til 45° , inkrement av 0.25° for $r=0, 0.2, 0.6$ og 0.95 . Analyser med MATLAB API.

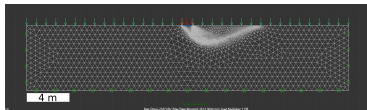
Geometri og mesh ("adaptive meshing"):



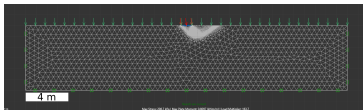
(a) Geometri



(b) Mesh for $\varphi = 45^\circ$ og $r=0.95$

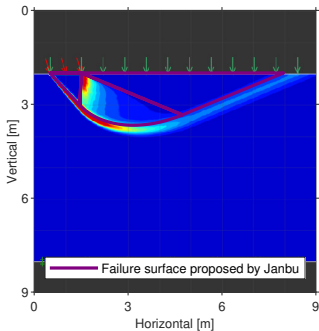


(a) Mesh for $\varphi = 45^\circ$ og $r=0.3$

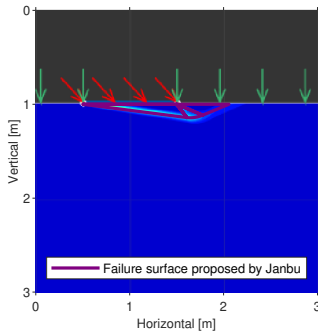


(b) Mesh for $\varphi = 25^\circ$ og $r=0.3$

Sammenligning av bruddfigur (envelope) mellom teoretisk løsning og Optum:

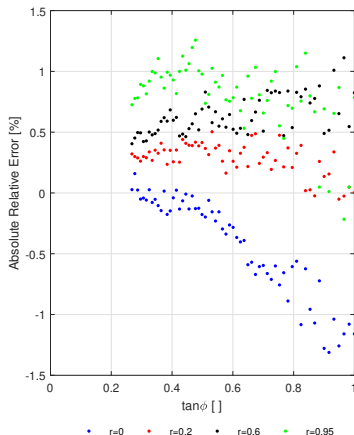
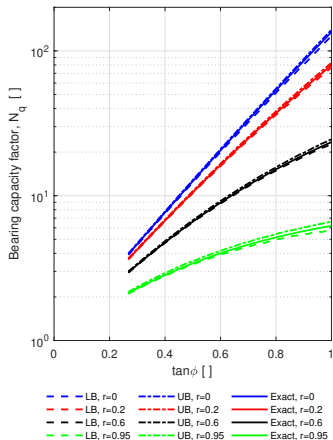


(a) $\varphi=45^\circ$ og $r=0.3$



(b) $\varphi=45^\circ$ og $r=0.95$

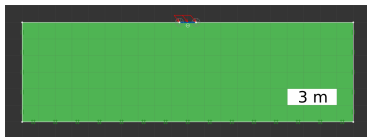
Resultater fra beregninger



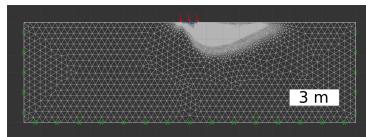
- Introduksjon
- Bæreevne i klassisk geoteknisk litteratur
- Foreslått løsning for N_γ ifølge Martin [2005]
- Bæreevneberegning ifølge Janbu (praksis i Norge)
- Likevektsberegning "limit analysis"
- OptumG2
- Skrålast på vektløs jord i OptumG2
- **Skrålast på jord med vekt i OptumG2**
- Laboratorieresultater vs foreslått formel
- Konklusjon

LB/UB analyser, mesh med 150k elementer. φ fra 15° til 45° , inkrement av 0.5° . Ruhet fra 0 til 0.8 med 0.1 inkrement.

Geometri og mesh for $\varphi=45^\circ$ og $r=0.8$

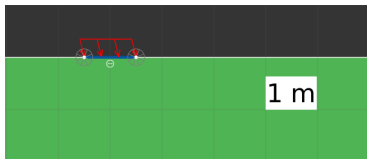


(a) Geometri

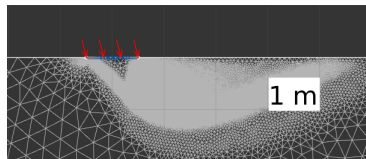


(b) mesh

Geometri og mesh for $\varphi=45^\circ$ og $r=0.25$:

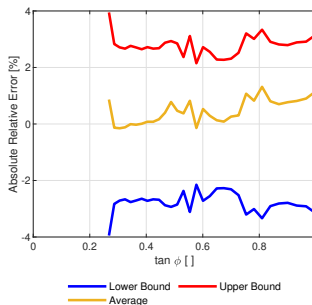
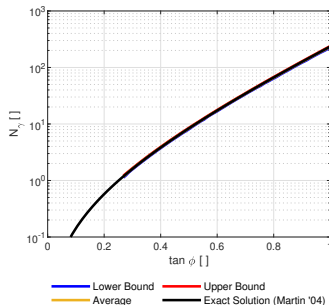


(a) Geometri



(b) mesh

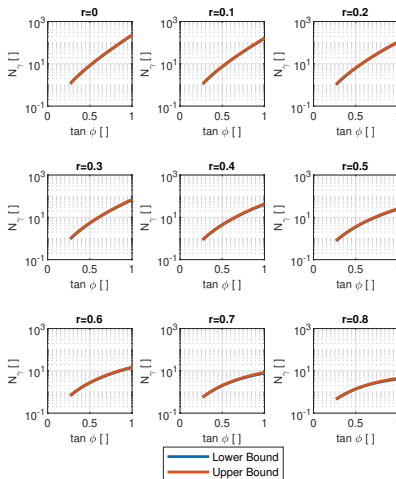
Resultater fra vertikal pålasting:



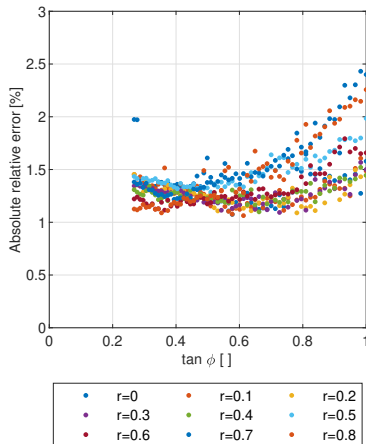
$$N_\gamma = \exp(8.822 \cdot \tan \phi^{0.7002} - 3.335)$$

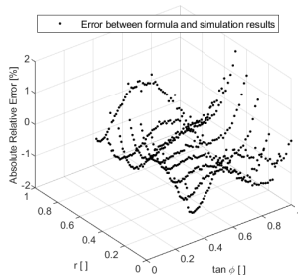
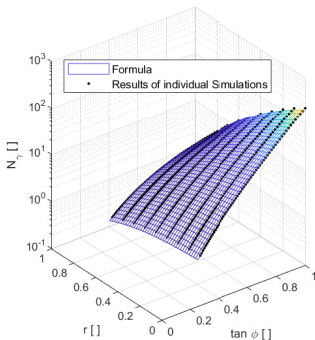
$R=0.9999$, $RMSE=0.0309$ og $SSE=0.0448$.

Resultater fra nedre (LB) og øvre grense (UB) for alle ruheter:



Absolutt relativ feil:

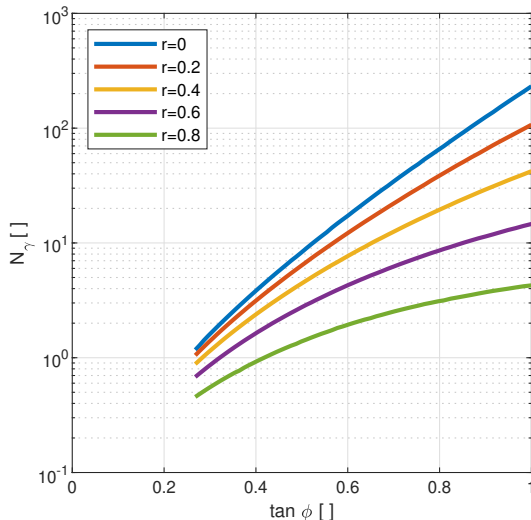




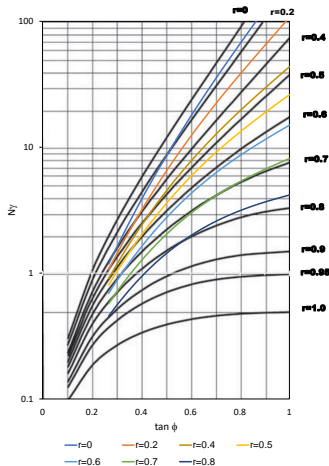
Foreslått ny formel for N_γ :

$$\ln N_\gamma = 12.68 \cdot \tan \varphi + 0.3546 \cdot r - 6.968 \cdot \tan \varphi^2 - 2.419 \cdot \tan \varphi \cdot r - 0.02937 \cdot r^2 + 2.522 \cdot \tan \varphi^3 - 1.569 \cdot \tan \varphi^2 \cdot r - 1.05 \cdot \tan \varphi \cdot r^2 - 0.838 \cdot r^3 - 2.78$$

$R=1.000$, $RMSE=0.0039$ og $SSE=0.0083$.

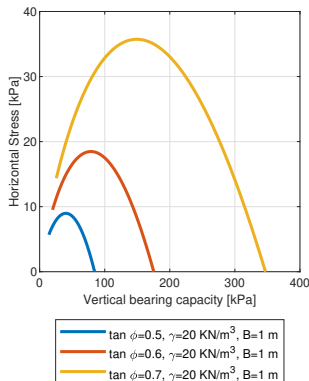


Sammenligning mellom Janbus N_γ og foreslått N_γ



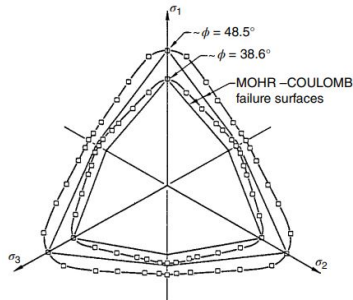
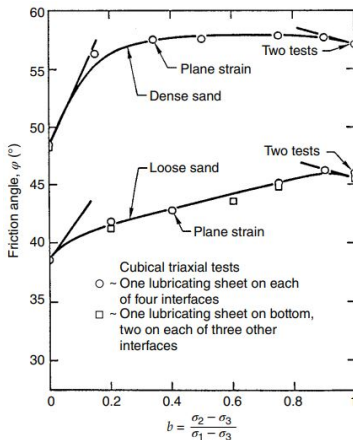
$$\sigma'_v = N_q \cdot (p' + a) + 0.5 \cdot N_\gamma \cdot \gamma' \cdot B_0 - a$$

$$\tau_h = r \cdot \tan \varphi \cdot \sigma'_v$$

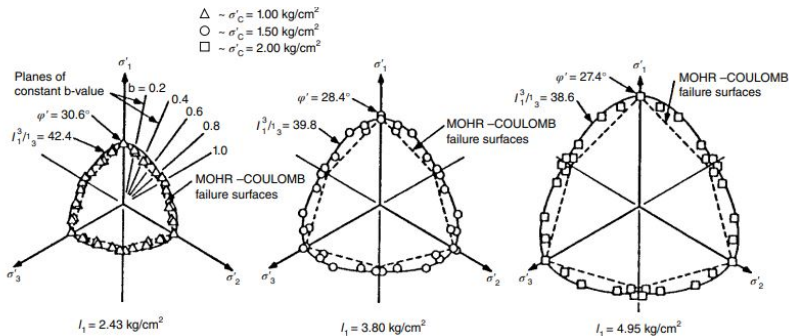


- Introduksjon
- Bæreevne i klassisk geoteknisk litteratur
- Foreslått løsning for N_γ ifølge Martin [2005]
- Bæreevneberegning ifølge Janbu (praksis i Norge)
- Likevektsberegning "limit analysis"
- OptumG2
- Skrålast på vektløs jord i OptumG2
- Skrålast på jord med vekt i OptumG2
- **Laboratorieresultater vs foreslått formel**
- Konklusjon

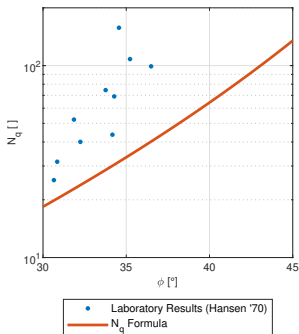
Resultater fra laboratorieundersøkelser på Monterey No. 0 sand (fra Lade [1973])



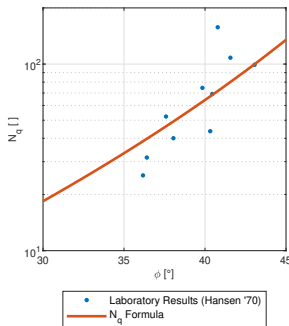
Resultater fra Grundite clay (fra Lade [1973])



Sammenligning mellom bæreevnefaktor, N_q , ved bruk av friksjonsvinkel fra treaks kontra plantøyning (data fra Hansen [1961])



(a) $\varphi_{ps} = \varphi_{tr}$



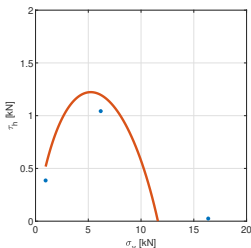
(b) $\varphi_{ps} = 1.18\varphi_{tr}$

Vannlig praksis i Denmark ($\varphi_{ps} = 1.1 \cdot \varphi_{tr}$).

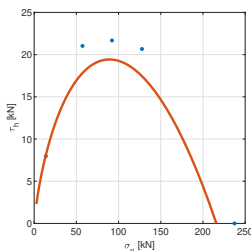
Jordparametere (Leighton Buzzard Sand, egenskaper fra Cavallaro et al. [2001]):

Parameter	sign	value	Unit
Maximum dry density	$\gamma_{dry,max}$	17.94	$[kN/m^3]$
Minimum dry density	$\gamma_{dry,min}$	15.06	$[kN/m^3]$
Specific Gravity	G_s	2.679	$[]$
Friction angle	φ_{tx}	$= 0.238 \cdot D_R + 28.4$	$[^\circ]$

Sammenligning mellom laboratorieresultater utført av Meyerhof [1981] og foreslått formel:

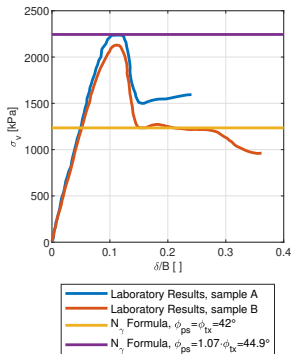


• Laboratory Results (Meyerhof '81)
— N_γ Formula

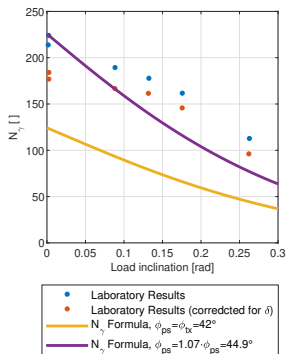


• Laboratory Results (Meyerhof '81)
— Numerical solution

Sammenligning mellom laboratorieresultater fra Aiban and Znidaric [1995] og foreslått formel:



(a) Last vs. deformasjon



(b) N_γ vs. vinkel på last

- Introduksjon
- Bæreevne i klassisk geoteknisk litteratur
- Foreslått løsning for N_γ ifølge Martin [2005]
- Bæreevneberegning ifølge Janbu (praksis i Norge)
- Likevektsberegning "limit analysis"
- OptumG2
- Skrålast på vektløs jord i OptumG2
- Skrålast på jord med vekt i OptumG2
- Laboratorieresultater vs foreslått formel
- **Konklusjon**

Hvordan kan dette sammenlignes med dagens praksis?

Dagens praksis (i Norge):

- N_γ beregnes ut fra Janbus figur (gir høyere N_γ)
- N_γ beregnes med $\varphi = \varphi_{tr}$ (gir lavere N_γ)
- Assosiert flyteregel "Associated flow" blir brukt dvs. $\psi = \varphi$ (gir høyere N_γ)
- Superposisjon brukes (gir lavere bæreevne)

Kansellerer disse fire hverandre?

Kan det være lurt å endre dagen praksis?

- For: Samme N_γ for stripe- og punktfundament.

Takk for oppmerksomheten!