



Aalborg Universitet

AALBORG UNIVERSITY  
DENMARK

## Bæreevne af fundamenter i sandskråninger

Sørensen, Erling Hjort; Sørensen, Anne Kristine Skov Strandløv; Sørensen, Carsten Steen

*Published in:*  
NGM 2004 : Proceedings of the 14th Nordic Geotechnical Meeting

*Publication date:*  
2004

*Document Version*  
Også kaldet Forlagets PDF

[Link to publication from Aalborg University](#)

*Citation for published version (APA):*  
Sørensen, E. H., Sørensen, A. K. S. S., & Sørensen, C. S. (2004). Bæreevne af fundamenter i sandskråninger. I H. Garin (red.), *NGM 2004 : Proceedings of the 14th Nordic Geotechnical Meeting: Ystad, Sweden, 19-21 May 2004* Swedish Geotechnical Society. SGF Report

### General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- ? Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- ? You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- ? You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal ?

### Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at [vbn@aub.aau.dk](mailto:vbn@aub.aau.dk) providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

# Bæreevne af fundamenter i sandskråninger

Erling Hjorth Sørensen & Anne Kirstine Skov Strandløv Sørensen  
 Civilingeniørstuderende, Aalborg Universitet Esbjerg, Danmark,  
 hjorth@ae.auc.dk & akss@ae.auc.dk

Carsten S. Sørensen

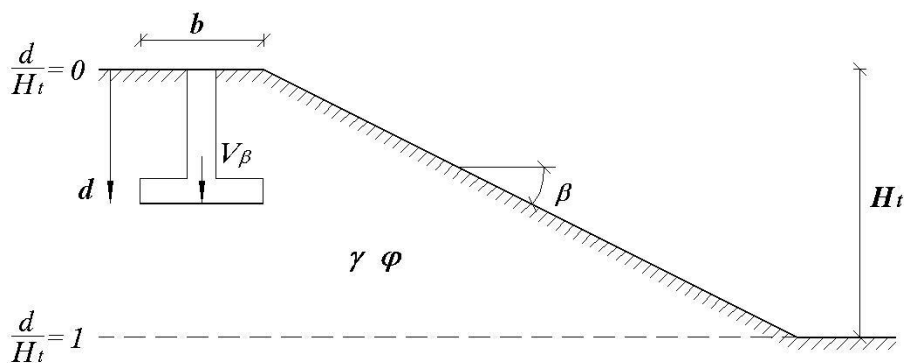
Lektor, Aalborg Universitet, Danmark, i5css@civil.auc.dk

*Abstrakt: Der er gennemført bæreevneberegninger for fundamenter i skråninger med endelig højde med 2 forskellige og uafhængige beregningsværktøjer, nemlig øvreværdimetoden og elementmetodeprogrammet PLAXIS. Ud fra PLAXIS-beregningerne opstilles bæreevnefaktorer som funktion af skråningens hældning, fundamentets placering og bredde samt jordens styrkeparametre i drænet tilstand.*

## 1 INTRODUKTION

I 3. udgave af danske funderingsnorm, DS 415, er der angivet en vejledende bæreevneformel til beregning af bæreevnen af fundamenter placeret i skråninger. Formlen tager dog ikke hensyn til skråningens højde, hvorfor den i nogle situationer er meget på den sikre side. Målet er derfor at opstille en bæreevneformel for fundamenter i skråninger med endelig højde. Funderingssituation ses ved f.eks. vejbroer, hvor fundamenterne ved endevederlag er placeret i skråninger.

Ved brug af elementmetoden er der udarbejdet en mere nøjagtig bæreevneformel. De variable der har indflydelse på bæreevnen af fundamenter i skråninger er: skråningshældning  $\beta$ , skråningshøjde  $H_t$ , dybde  $d$ , fundamentsbredde  $b$ , friktionsvinkel  $\varphi$  og rumvægt  $\gamma$  (Figur 1). Analyserne er udført for kohæsionsløs jord.



Figur 1 Geometriske og styrkemæssige variable der har indflydelse på fundamentets bæreevne.

En bæreevneformel er tidligere opstillet af firmaet COWI ved hjælp af kinematisk korrekte brudfigurer og øvreværdimetoden. Denne metode giver i flere tilfælde resultater svarende til elementmetoden.

## 2 METODE

### 2.1 Dansk funderingsnorm DS 415(1984) & DS 415(1998)

Der er i DS 415(1984) & DS 415(1998) angivet bæreevneformler for fundering ved vandret terræn og fundering i skråning med uendelig højde. Fundering i sand-skråninger med endelig højde ligger mellem disse yderpunkter.

For traditionelle enkelt-, stribe- og pladefundamenter med vandret terræn og vandret fundamentalsflade bestemmes den lodrette drænedede bæreevne af den generelle bæreevneformel:

$$\frac{R'_d}{A'} = \frac{1}{2} \cdot \gamma' \cdot b' \cdot N_\gamma \cdot s_\gamma \cdot i_\gamma + q' \cdot N_q \cdot s_q \cdot i_q \quad (1)$$

De dimensionsløse bæreevnefaktorer,  $N_\gamma$  og  $N_q$ , bestemmes af ligning (2), hvor  $\phi'_d$  er den regningsmæssige plane friktionsvinkel. Det regningsmæssige effektive areal af fundamentalsfladen er givet ved  $A' = b' \cdot l'$ , den stabiliserende tyngde er  $q' = d \cdot \gamma'$  og  $R'_d$  er den ultimative bæreevne. Formfaktorer,  $s$ , og hældningsfaktorer,  $i$ , er dimensionsløse størrelser, der henholdsvis beskriver fundamentets bredde-længdeforhold og bevægelsesretning under belastning.

$$N_\gamma = \frac{1}{4} \cdot \left( (N_q - 1) \cdot \cos \phi'_d \right)^{\frac{3}{2}} \quad N_q = e^{\pi \cdot \tan \phi'_d} \cdot \frac{1 + \sin \phi'_d}{1 - \sin \phi'_d} \quad (2)$$

Ved fundering i en skråning med hældningen  $\beta$  kan bæreevnen på den sikre side bestemmes ved i den generelle bæreevneformel, ligning (1), at multiplicere  $\gamma$ - og  $q$ -leddene med  $(1 - \sin 2\beta)$ . Bæreevnefaktorerne udtrykkes derfor som:

$$N_{\gamma\beta} = N_\gamma \cdot (1 - \sin 2\beta) \quad N_{q\beta} = N_q \cdot (1 - \sin 2\beta) \quad (3)$$

Den stabiliserende tyngde er givet ved  $q' = 1/2 \cdot d \cdot \gamma'$ , hvor  $q'$  er nedsat til det halve, idet skråningens trekantede jordlegeme kun bidrager med den halve tyngde.

## 2.2 Elementmetoden

### 2.2.1 Modellering i PLAXIS

Elementmetodeberegningerne er udført i programmet PLAXIS. Der anvendes materialemodellen Mohr-Coulomb og plan tøjningstilstand, og normalitetsbetingelsen antages opfyldt. Jordmodellens udstrækning er fastsat, således at udviklingen af brudfigurerne ikke forhindres af modellens grænser. Elementnettet er opbygget af 15-knudede trekantede elementer i stort antal som sikrer stor nøjagtighed. Langs fundamentets overflader er der placeret et jordlag uden tykkelse med svækket styrke for at mindske friktionen til jordlegemet. Dette giver fundamentet mulighed for at glide i jorden.

### 2.2.2 Bæreevneformel

Svarende til de danske geotekniske traditioner er det valgt at antage superpositionsprincippet, så bæreevne kan skrives som en sum af et  $\gamma$ - og et  $q$ -led. Bæreevnefaktorerne korrigeres efter samme princip som ved skrånninger med uendelig højde, ligning (3), hvor der justeres med korrektionen  $(1 - \sin 2\beta)$ . Ved at bestemme nye korrektioner kommer bæreevnefaktorerne til at beskrive sandskrånninger med endelig højde bedre.

Ved bestemmelse af den stabiliserende tyngde,  $q$ , er tyngden fra skrånningen fordelt over brudfigurens længde. Når fundamentet er placeret i selve skrånningen bliver  $q' = 1/2 \cdot d \cdot \gamma'$ . Ved anvendelse af denne fordeling ved fundamentsplaceringer under skrånningen overvurderes den stabiliserende tyngde. Faktoren  $1/2$  er derfor ændret til en parameter,  $f$ , der er afhængig af brudfigurens længde,  $L$ , og skrånningens geometri.

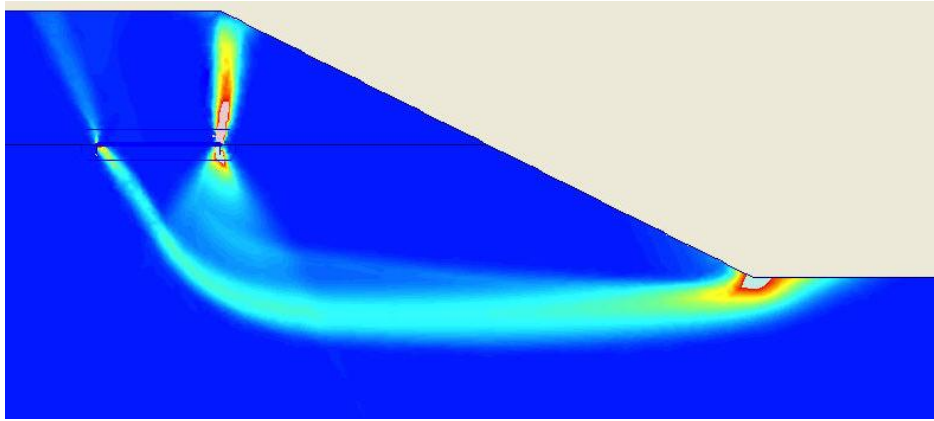
$$q' = f \cdot H_t \cdot \gamma + (d - H_t) \cdot \gamma \quad (4)$$

hvor

$$f = \min \left( \frac{0.5 \cdot \frac{H_t}{\tan \beta}}{L}, 0.5 \right)$$

$$L = \sin^2 \varphi \cdot (105.78 \cdot b - 89.64) - \sin \varphi \cdot (105.79 \cdot b - 97.72) \\ + (27.26 \cdot b + 1.76 \cdot d - 24.47)$$

For at fastsætte størrelsen på bæreevnefaktorerne,  $N_{\gamma\beta}$  og  $N_{q\beta}$ , bestemmes  $\gamma$ - og  $q$ -leddenes bidrag til den samlede bæreevne. Det er valgt at opdele jorden i to områder – et under og et over fundamentet, hvilke henføres til henholdsvis  $\gamma$ - og  $q$ -leddet. Ved at ændre på rumvægten af enten det øverste eller det nederste jordlegeme bestemmes gradienter, der beskriver hver enkelt ledes indflydelse på den samlede bæreevne.



Figur 2 Konturplot af forskydningstøjninger fra PLAXIS svarende til en fuld udviklet brudsituation.

Beregningerne til bestemmelse af bæreevnefaktorerne er gennemført ved systematisk ændring af de forskellige variables størrelser. Resultatet af en beregning består af en bæreevneværdi og en tilhørende brudfigur. På Figur 2 illustreres en brudfigur ved følgende forudsætninger:  $\varphi'_d = 35^\circ$ ,  $\gamma = 18\text{kN/m}^3$ ,  $\beta = 26.57^\circ$  (anlæg 1:2),  $H_t = 6.5\text{m}$ ,  $b = 3\text{m}$  og  $d = 3.25\text{m}$ . Den ultimative bæreevne af stribefundamentet er i eksemplet beregnet til  $3492\text{kN/m}$ .

### 3 RESULTAT OG SAMMENLIGNING

Der er udført ca. 400 beregninger, og på baggrund af dette datagrundlag er afhængigheden af variablene indbygget i bæreevnefaktorerne  $N_{\gamma\beta}$  og  $N_{q\beta}$ . Bæreevnen af fundamenter i sandskrånninger med endelig højde kan herved beregnes ved ligning (5).

$$\frac{R'_d}{A'} = \frac{1}{2} \cdot \gamma' \cdot b' \cdot N_{\gamma\beta} \cdot s_\gamma \cdot i_\gamma + q' \cdot N_{q\beta} \cdot s_q \cdot i_q \quad (5)$$

Bæreevnefaktorernes afhængighed af dybden, fundamentsbredden og skråningshøjden indbygges i de dimensionsløse størrelser  $d_* = d/H_t$  og  $b_* = b/H_t$ .

For  $d/H_t < 1$ :

$$N_{\gamma\beta} = N_\gamma \cdot 0.6 \cdot b_*^{-0.6} \cdot (1.799 \cdot d_* + 0.17 + (\sin \varphi - 0.574) \cdot (-4.498 \cdot d_* - 0.321)) \cdot (1 + (\sin \beta - 0.45) \cdot (5.505 \cdot d_* - 6.249))$$

$$N_{q\beta} = N_q \cdot (-2.502 \cdot b_*^3 + 5.091 \cdot b_*^2 - 3.435 \cdot b_* + 1.761) \\ \cdot (0.777 \cdot d_*^3 - 0.376 \cdot d_*^2 + 0.262 \cdot d_* - 0.004 + (\sin \varphi - 0.574) \cdot (1.302 \cdot d_*)) \\ \cdot (1 + (\sin \beta - 0.450) \cdot (22.990 \cdot d_* - 23.958))$$

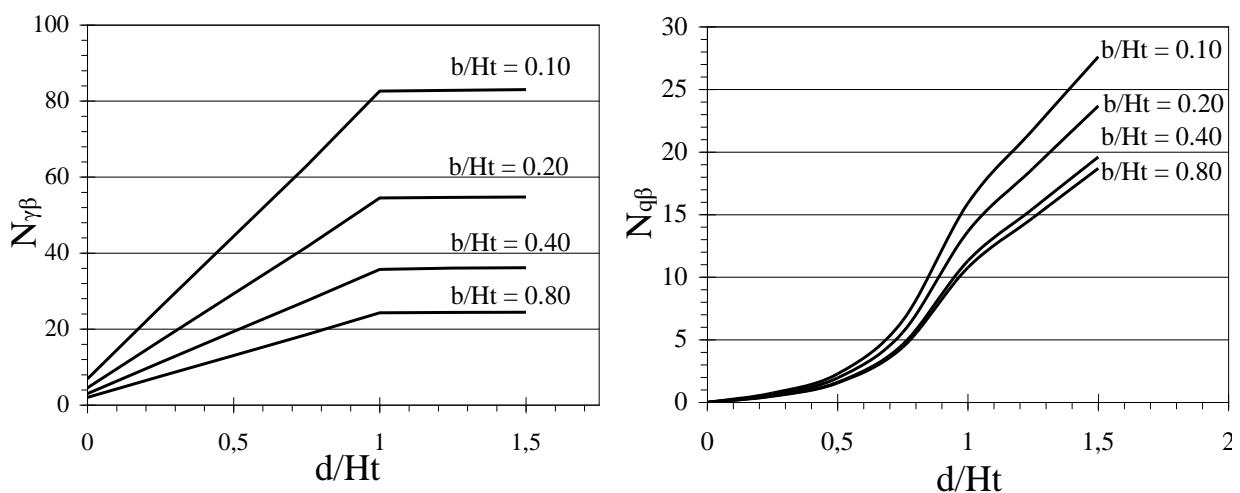
For  $d/H_t \geq 1$ :

$$N_{\gamma\beta} = N_\gamma \cdot 0.6 \cdot b_*^{-0.6} \\ \cdot (0.139 \cdot d_* + 1.866 + (\sin \varphi - 0.574) \cdot (1.560 \cdot d_* - 6.352)) \\ \cdot (1 + (\sin \beta - 0.450) \cdot (0.276 \cdot d_* - 1.097))$$

$$N_{q\beta} = N_q \cdot (-2.502 \cdot b_*^3 + 5.091 \cdot b_*^2 - 3.435 \cdot b_* + 1.761) \\ \cdot (0.793 \cdot d_* - 0.109 + (\sin \varphi - 0.574) \cdot (-1.079 \cdot d_* + 2.379)) \\ \cdot (1 + (\sin \beta - 0.450) \cdot (3.216 \cdot d_* - 4.550))$$

Friktionsvinklen  $\varphi'_d$  og hældningen  $\beta$  indsættes i grader. Formlerne for bæreevn-faktorerne er gyldige i intervallet:  $0.10 < b/H_t < 0.80$ .

Afbilledes bæreevnfaktorerne som funktion af  $d/H_t$  og  $b/H_t$  fås kurver som på Figur 3.



Figur 3 Afbildning  $N_{\gamma\beta}$  og  $N_{q\beta}$  ved anlæg 1:2 ( $\beta = 26.57^\circ$ ) og  $\varphi'_d = 30^\circ$ .

Ved at sammenligne korrekte bæreevner bestemt i PLAXIS med superpositionsformlen, ligning (5), bestemmes nøjagtigheden af udtrykket. Sammenligningen viser, at bæreevneudtrykket altid giver resultater på den sikre side og at bæreevnen i de fleste tilfælde undervurderes med 2-4%. Der er dog enkelte ydersituationer, hvor resultatet er op til 20% på den sikre side.

#### 4 KONKLUSION

Der er udarbejdet nøjagtige formler for bæreevnefaktorer for fundering i sandskråninger. Formlerne kan anvendes for alle størrelser af de geometriske og styrkemæssige variable i intervallet  $b/H_t \in [0.10 ; 0.80]$ . Formlerne er kontrolleret ved elementmetodeberegninger og hvor muligt ved øvre værdimetoden.

#### 5 REFERENCER

Dansk standard (3.udg.) 1984. *DS 415 – Dansk ingeniørforenings norm for fundering*. København: Teknisk Forlag.

Dansk standard (4.udg.) 1998. *DS 415 – Norm for fundering*. København.

Brinkgreve, R. B. J. & Vermeer, P.A. (Version 7) 1998. *PLAXIS – Finite Element Code for Soil and Rock Analyses*. Rotterdam: A. A. Balkema.