

Metodbeskrivning sannolikhet för skred: Kvantitativ beräkningsmodell

*Bo Berggren, Claes Alén,
Per-Evert Bengtsson och Stefan Falemo*

GÄU - delrapport 28

Linköping 2011





STATENS GEOTEKNISKA INSTITUT
SWEDISH GEOTECHNICAL INSTITUTE

Göta älvutredningen - delrapport 28

Metodbeskrivning sannolikhet för skred:
Kvantitativ beräkningsmodell

*Methodology for assessment of landslides probability:
Quantitative model*

Bo Berggren, SGI/Berggren Tech AB
Claes Alén, Chalmers tekniska högskola
Per-Evert Bengtsson, SGI
Stefan Falemo, SGI

**Göta älvutredningen
delrapport 28**

Beställning

Dnr SGI

Uppdragsnr SGI

Statens geotekniska institut (SGI)
581 93 Linköping

SGI
Informationstjänsten
Tel: 013-20 18 04
Fax: 013-20 19 14
E-post: info@swedgeo.se
www.swedgeo.se

6-1001-0036

14094

FÖRORD

Göta älvutredningen (GÄU)

För att kunna möta kommande klimatförändringar och hantera ökade flöden genom Göta älv har Regeringen gett Statens geotekniska institut (SGI) i uppdrag att under en treårsperiod (2009-2011) genomföra en kartläggning av stabiliteten och skredriskerna längs hela Göta älvdalen inklusive del av Nordre älv. Tidigare utförda geotekniska undersökningar har sammanställts och nya undersökningar har utförts längs hela älven. Metoderna för analys och kartering av skredrisker har förbättrats. Nya och utvecklade metoder har tagits fram för att förbättra skredriskanalyser och stabilitetsberäkningar, förbättra kunskapen om erosionsprocesserna längs Göta älv, bedöma effekten av en ökad nederbörd på grundvattensituationen i området, utveckla metodiker för kartläggning och hantering av högsensitiv lera (kvikclera) samt utveckla metodik för konsekvensbedömning. Utredningen har genomförts i samverkan med myndigheter, forskningsinstitutioner och nationella och internationella organisationer.

Denna delrapport är en del i SGI:s redovisning till Regeringen.

Skredsannolikhet

I deluppdraget ”Metodik för beräkning av sannolikhet för skred” har det övergripande syftet varit att ge underlag för bedömning av sannolikhet för skred i en lerslänk i Göta älvdalen. Denna sannolikhet kombinerad med konsekvensen av ett skred ger möjlighet till en skredriskvärdering av hög kvalitet dels för dagens förhållanden och dels med hänsyn till framtida klimatförändringar.

Arbetet har utförts för att utveckla en metodik för beräkning av sannolikheten för skred. Efter en inledande litteraturgenomgång beslutades att vidareutveckla en metod som Claes Alén, Chalmers tekniska högskola, har utvecklat och använt i reella projekt i Göta älvdalen. Dessutom har en förenklad del utvecklats under projektets gång. Målet med metodikdelarna är att de ska vara enkla och tydligt beskrivna så att en erfaren och välutbildad geotekniker kan använda dem utan alltför stor utbildningsinsats. Metodiken beskriver ett sätt att beräkna sannolikheten för skred utifrån osäkerheter och naturliga variationer i de parametrar som påverkar stabiliteten.

Arbetet med detta deluppdrag har utförts av Claes Alén, Chalmers, Per-Evert Bengtsson, Bo Berggren (deluppdragsledare) och Stefan Falemo, SGI. Under arbetets inledande skede har också Suzanne Lacasse, Norges Geotekniske Institutt, och Charlotte Cederbom, SGI, deltagit. Rapporten har granskats och synpunkter inkommit från Göran Sällfors, Chalmers, och Victoria Svahn, SGI.

Linköping 2011

Marius Tremblay

Uppdragsledare, Göta älvutredningen

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

FÖRORD	3
SYMBOLER OCH BETECKNINGAR	6
1 INLEDNING OCH SYFTE	9
2 METODIKENS IDÉ	10
3 SAMMANFATTNING AV METODIKEN.....	12
3.1 Inledning	12
3.2 Sannolikhetsklasser, konsekvensklasser och riskklasser.....	12
3.3 Ursprunglig naturlig slänt	14
3.4 Traditionell beräkning med stabilitetsprogram	14
3.5 Idealiserad modell av slänt – ekvivalent linjär slänt	14
3.6 Beräkningsmodell – deterministisk modell	15
3.7 Beräkning av sannolikhet för skred – idealiserad modell	15
3.8 Tidsberoende - Kontinuerlig förändring över tiden	17
3.9 Metodiken i korthet	19
3.9.1 Metodik A	19
3.9.2 Metodik B	19
4 BESKRIVNING AV METODIKEN	21
4.1 Ingående parametrar.....	21
4.1.1 Indata och osäkerheter.....	21
4.1.2 Ekvivalent linjär slänt beskriven med parametrarna H och B	22
4.1.3 Glidytans geometri, parametrarna X, Z och D	26
4.1.4 Tunghet hos jord, γ	26
4.1.5 Skjuvhållfasthet	27
4.1.6 Yttre last	32
4.1.7 Vattennivå i älven	33
4.2 Klimatförändring	34
4.2.1 Klimatscenario.....	34
4.2.2 Vattennivåer	35
4.2.3 Grundvatten	35
4.2.4 Erosion	35
4.3 Beräkning, Metodik A	36
4.4 Förenklad metodik för skredsannolikhet baserad på kombinerad analys.....	41
5 PÅVERKANDE FAKTORERS VARIATION	43
6 EXEMPEL: GÖTA ÄLV SEKTION 1.....	45
6.1 Främre slänten, A	46
6.2 Bakre slänten, B	51
6.3 Långa slänten, C	55
6.4 Summering av exemplen	59
7 SKREDSANNOLIKHETENS TIDSBEROENDE	60
7.1 Osäkerhetens variation med tiden.....	60
7.2 Sannolikhetsklasser med hänsyn till referenstid	61
7.3 Skredsannolikhet med hänsyn till såväl en kontinuerlig förändring med tiden som en variation av osäkerheten med tiden	64
7.3.1 Modell för beskrivning av tidsberoende	64
7.3.2 Simulering av skredsannolikhet.....	66
7.3.3 Kommentarer.....	66
7.3.4 Exempel	67
7.4 Tidsberoende skredsannolikhet kombinerat med konsekvenser av skred	68
8 REFERENSER.....	69

BILAGA 1 – OSÄKERHET I PÅDRIVANDE TRYCK P_D

BILAGA 2 – OSÄKERHET I STABILITETSTAL N

BILAGA 3 – SENSITIVITETSFAKTORERNA α_i

BILAGA 4 – ANALYTISK BESTÄMNING AV SÄKERHETSFAKTORN FÖR IDEALISERAD SLÄNT

BILAGA 5 – EXEMPEL – BERÄKNING I MATHCAD MED METODIK A

BILAGA 6 - EXEMPEL – BERÄKNING I EXCEL MED METODIK B

SYMBOLER OCH BETECKNINGAR

B		Släntlängd (horisontellt mått)
b		Normaliserad släntlängd, $b = B/H$
Cl		Lerlager
c		Genomsnittlig skjuvhållfasthet
c'		Kohesionsintercept
c _{drän}		Dränerad skjuvhållfasthet
c _{komb}		Kombinerad skjuvhållfasthet
c _u		Odränerad skjuvhållfasthet
d		Normaliserat djup för glidyta, $d = D/H$
D		Glidyta's djup under slänthöjden
2D		Tvådimensionell betraktelse
3D		Tredimensionell betraktelse
e		Naturliga talet
f		Mobiliseringsgrad, $f = 1/F$
F		Säkerhetsfaktor
F _c		Säkerhetsfaktor odränerad analys
F _{komb}		Säkerhetsfaktor kombinerad analys
F _E		Säkerhetsfaktor ekvivalent slänt
F _{cirkulär}		Säkerhetsfaktor cirkulärcylindrisk glidyta
F _{opt}		Säkerhetsfaktor optimerad glidyta
Fd		Fördelning
F ₁		Tyngd av last
F ₂		Tyngd av ekvivalent last
H		Slänthöjd
H _w		Vattendjup i älven
HLW		Högsta årliga lågvattenstånd
i		Index
k		Konstant
K1-K5		Konsekvensklasser
K _i		Nuvärdet av konsekvensen år i
LW		Lågvattennivå, stokastisk variabel
LLW		Lägsta uppmätta lågvattennivå

$\ln$		Naturliga logaritmen
$LN(\mu, V)$		Lognormalfördelning med medelvärde μ och variationskoefficient V .
l_1		Utbredning av last
l_2		Utbredning av ekvivalent last
l_3		Avstånd i horisontalld mellan rotationscentrum och glidytans bakkant
l_4		Avstånd i vertikalld mellan rotationscentrum och ekvivalenta lastens tyngdpunkt
M		Säkerhetsmarginal
m		Index
MLW		Medellågvattennivå
N		Stabilitetstal
N		Antal
N_0		Stabilitetstal
n		Index
n		Antal punkter
P_d		Pådrivande tryck
p		Sannolikhet
p_f		Sannolikhet för skred
p_j		Sannolikhet för referensperioden j år
q		Yttre last på slänt
q_E		Ekvivalent last
q_1		Utbredd yttre last
q_2		Ekvivalent ytlast
$Risk_\Sigma$		Risk under referensperiod längre än ett år
$S1-S5$		Sannolikhetsklasser
T		Torrspäckas djup, torrskorpans mäktighet
u		Portryck
V		Variationskoefficient
V_{cu0}		Variationskoefficient för odränerad skjuvhållfasthet utvärderad ur resultat av befintlig provning
V_F		Variationskoefficient för säkerhetsfaktor
X		Avstånd i horisontalld mellan släntfot och rotationscentrum

X		Variabel
$X_{krön}$		Släntröns koordinat i horisontalled
X_{fot}		Släntfots koordinat i horisontalled
X_N		Normalfördelad variabel
y		Normaliserat läge av rotationscentrum, $y = Y/H$
Z		Avstånd i vertikalled mellan släntfot och rotationscentrum
z		Normaliserad nivå, $z = Z/H$
$Z_{krön}$		Släntröns nivå
Z_{fot}		Släntfots nivå
Z_w		Vattenytans nivå
Z_{gw}		Grundvattenytans nivå
Z_{MLW}		Nivå för lågvattenytans medelvärde
Z_{LLW}		Nivå för lägsta lågvattenyta
α		Sensitivitetsfaktor
α_{glidyt}		Glidytans lutning
α_{ber}		Resultande sensitivitetsfaktor för kunskapsosäkerhet
α_{ober}		Resultande sensitivitetsfaktor för genuin osäkerhet
α_i		Sensitivitetsfaktor i
β		Slänthlutning, grader
β		Säkerhetsindex
γ		Jordens tunghet
γ_w		Vattnets tunghet
ΔH		Ändring i höjdled
Δ_{la}		Delsträcka i aktivzon
Δ_{lp}		Delsträcka i passivzon
$\Phi()$		Standardiserad normalfördelning
φ'		Effektiv inre friktionsvinkel
σ		Standardavvikelse
σ_v		Totalt överlagringstryck
μ		Medelvärde
η_{modell}		Modellfel
η_{ber}		Icke tidsberoende stokastisk variabel för kunskapsosäkerhet
η_{ober}		Tidsberoende stokastisk variabel för genuin osäkerhet

1 INLEDNING OCH SYFTE

I delprojektet ”Metodik för beräkning av sannolikhet för skred” i SGI:s Göta älvutredning har målet varit, som projektnamnet antyder, att utveckla en metodik för beräkning av sannolikheten för skred. Det finns många kvalitativa metodiker att värdera en lerslänths benägenhet för skredutfall, enkla som komplexa. Men det finns få kvantitativa metodiker som ger korrekta lösningar och samtidigt är enkla att använda, överskådliga och transparenta.

Bland de förslag på metodiker som finns i litteraturen beslutades att vidareutveckla den som Claes Alén, Chalmers tekniska högskola, har utvecklat och använt i reella projekt i Göta älv dalen. Dessutom har en förenklad metodik utvecklats under projektets gång. Denna förenklade metodik bygger på kända metoder och subjektiva eller erfarenhetsmässiga bedömningar. Målet med beskrivningen av metodikdelarna i rapporten är att de ska vara så enkla och tydliga att en erfaren och välutbildad geotekniker ska kunna använda dem utan alltför stor utbildningsinsats.

Delprojektets övergripande syfte är att ge underlag för bedömning av ett sannolikhetsmått på skred för en lerslänth för glidytor med olika storlek. Detta tillsammans med konsekvensen av ett skred ger underlag till en riskvärdering av skred i Göta älv dalen för dagens och för framtida förhållanden påverkade av bedömda klimatförändringar.

Övriga syften med metodikbeskrivningen är att utveckla och ge en klar bakgrund till en metodik som med rimlig arbetsinsats ger ett tillförlitligt mått på sannolikheten för skred för ett markparti intill Göta älv samt att ge en tydlig arbetsgång för metodiken. För att beräkna sannolikheten studeras osäkerheten i ingående styrande parametrar, exempelvis odränerad skjuvhållfasthet, vattenstånd i älven, portryck i jordlagren, jordlagrens tunghet, yttre laster och geometriska mått. Om osäkerheten är helt dominerad av den odränerade skjuvhållfastheten kan metodiken förenklas väsentligt.

Hantering av osäkerheter kan göras på olika sätt. Exempelvis ger fler undersökningsresultat oftast mindre osäkerhet. I Göta älv dalens södra del är jordlagerförhållandena relativt homogena gentemot förhållandena i älvens norra del. Någon uttömmande beskrivning av detta ingår inte i metodiken.

Beräkningen av sannolikhet för brott har genomförts enligt metoden FORM, First Order Reliability Method. Denna metod kräver att man beskriver säkerhetsmarginalen som ett analytiskt uttryck och att man beskriver de ingående parametrarna i säkerhetsmarginalen med de statistiska måtten medelvärde och standardavvikelse. Normalt kan några av de ingående parametrarna betraktas som deterministiska. Resultatet blir ett säkerhetsmått i form av ett säkerhetsindex β som omräknas till en brottsannolikhet.

Andra metoder av första ordningen är FOSM, First Order Second Moment och PEM, Point Estimate Method.

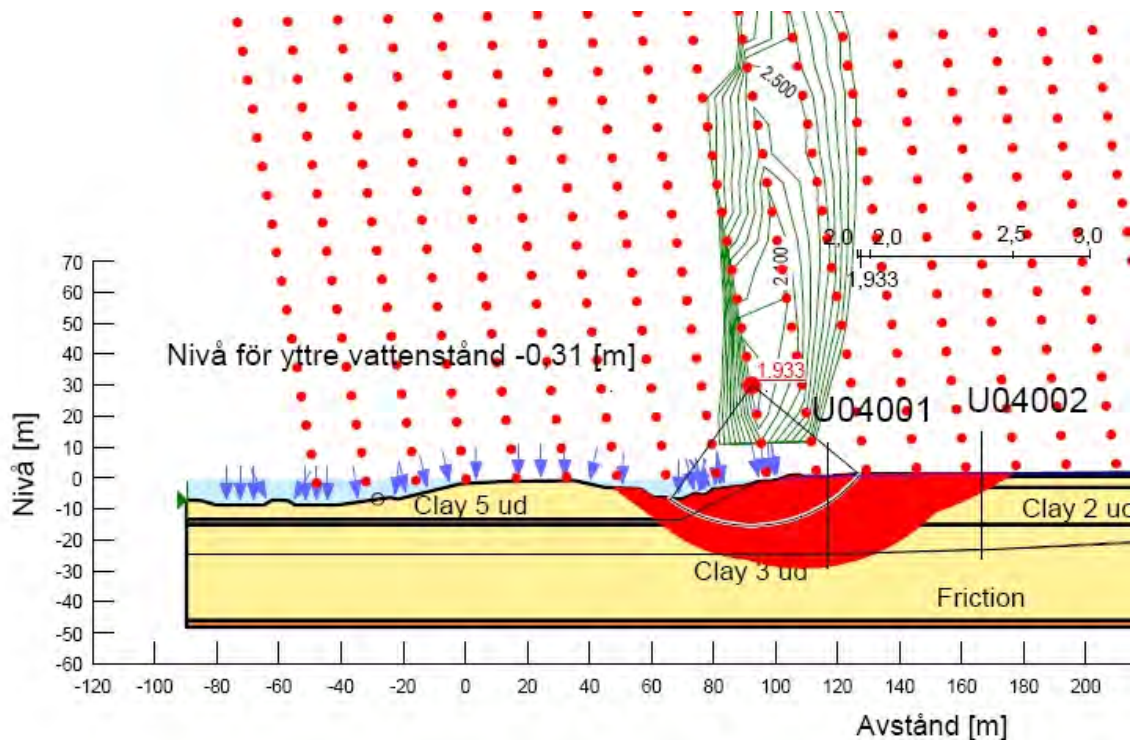
Två begrepp som är bra att känna till är *genuin osäkerhet* och *kunskapsosäkerhet*. Genuin osäkerhet kallas osäkerheter som har en naturlig variation, t.ex. med tiden, medan kunskapsosäkerhet avser den osäkerhet som beskriver en parameter när dess verkliga, icke-föränderliga, värde är okänt.

2 METODIKENS IDÉ

I rapporten beskrivs två metodikdelar som kan användas för bestämning av sannolikheten för skred, del A och del B, där del A bygger på sannolikheteoretisk analys och del B är en enklare del som bygger på erfarenhet. När del A är gjord och man fått en bra förståelse för stabilitetspåverkande faktorerers betydelse för markområdets stabilitetsförhållande eller man översiktligt vill bedöma stabilitetsförhållandena kan man använda del B. Del B är något enklare att utföra och kan användas i mer översiktliga sammanhang, exempelvis vid utredningar av jämförande karaktär.

Metodikens del A går ut på att kombinera resultat från en traditionell deterministisk stabilitetsanalys med en sannolikheteoretisk analys av en förenklad sektion av den som används vid den traditionella stabilitetsanalysen. Härvid måste den förenklade modellen kalibreras med den traditionella modellen för att resultatet ska bli relevant.

Från den traditionella stabilitetsanalysen finns resultat för farligaste glidyten och för glidytor med högre säkerhetsfaktor och med utsträckning längre bak i slänten, se Figur 2.1. Resultatet finns då som geometri och säkerhetsfaktor för aktuell glidyta och då både för fallet cirkulärcylindrisk och optimerad glidyta. Resultat ska också föreligga för fallen odränerad analys och kombinerad analys.



Figur 2.1 Exempel på safety map, här visande glidytor med $F < 2,5$. Uppe till höger i bild visas även skredutbredning för $F=2,0$ och $F=3,0$.

Aktuell slänt räknas om till en ekvivalent slänt, en idealiserad modell, med enklast möjliga geometri; två horisontella plan för släntfoten respektive släntkrönet sammanbundna med ett lutande plan.

Variabler som påverkar stabilitetsberäkningen betraktas som sannolikhetsfördelningar, beskrivna med parametrarna medelvärde och standardavvikelse. Valda värden på parametrar i den traditionella stabilitetsanalysen och resultaten från denna används som medelvärden. Detta förutsätter att man i den traditionella stabilitetsanalysen som deterministiska värden har använt ”bästa uppskattning” eller ”troligaste värden” och inte värden på ”säkra sidan”, se avsnitt 4.1. Osäkerheten i egenskaperna beskrivs med standardavvikelsen och beskriver dels kunskapsosäkerhet, dels genuin osäkerhet. Osäkerhet som går att minska genom att lära sig mer kallas ofta för kunskapsosäkerhet, exempelvis mätfel och modellfel, som kan minskas genom ökade arbetsinsatser. Genuin osäkerhet, eller statistisk osäkerhet, kan man kalla osäkerheter som uppträder naturligt, t ex naturlig variation av vattennivå.

Resultatet blir då för de olika glidyterna ett samband mellan säkerhetsfaktor och sannolikhet för skred.

Metodiken förutsätter att den traditionella beräkningen är relevant och tillförlitlig. Eventuella begränsningar eller brister i en sådan beräkning minskas därför inte med metodiken. Till exempel behandlas inte progressivt brott explicit eftersom detta ej heller görs i en traditionell deterministisk analys. Men genom att beakta förekomsten av deformationsmjuknande brott pga lerans sensitivitet beaktas ändå detta fenomen översiktligt på annat sätt i den totala släntstabilitetsanalysen.

Liksom i många andra analyser blir resultatet inte bättre än kvaliteten av ingående styrande faktorer. Men metodiken ger samma resultat med samma ingående parametervärden för den oerfarne geoteknikern som för den erfarne.

3 SAMMANFATTNING AV METODIKEN

3.1 Inledning

Metodiken beskriver ett sätt att beräkna sannolikheten för skred utifrån osäkerheter och naturliga variationer i de parametrar som påverkar stabiliteten. Vissa av de naturliga variationerna är tidsberoende på kort eller lång sikt, vilket innebär att även sannolikheten för skred är tidsberoende. Beräkning av sannolikheten för skred för ett antal typslänter utgör underlag för att beskriva ett samband mellan säkerhetsfaktor och sannolikhet för skred.

3.2 Sannolikhetsklasser, konsekvensklasser och riskklasser

Sambanden mellan säkerhetsfaktor och sannolikhet för skred utgör sedan underlag för indelning i fem sannolikhetsklasser, S1 – S5 enligt Tabell 3.1. Konsekvensen av skred klassificeras på motsvarande sätt enligt en skala i fem klasser, K1 – K5. Sammantaget ger sannolikheten för skred och konsekvensen av ett skred en riskklass, eller en säkerhetsklass, S_nK_m , där n betecknar sannolikhetsklass och m betecknar konsekvensklass.

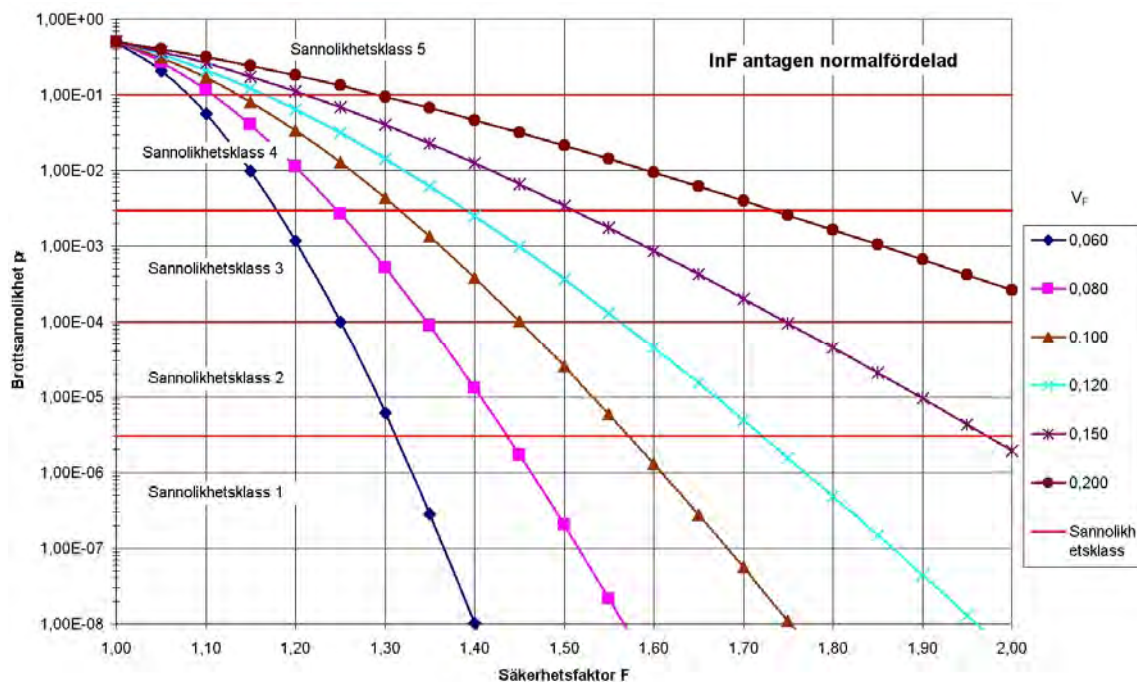
Tabell 3.1. Indelning av sannolikhetsklasser, p_f = sannolikhet för skred. Jämför även med kapitel 7.

Sannolikhetsklass	Sannolikhet för skred
S1	$p_f < 3 \cdot 10^{-6}$
S2	$3 \cdot 10^{-6} \leq p_f < 10^{-4}$
S3	$10^{-4} \leq p_f < 3 \cdot 10^{-3}$
S4	$3 \cdot 10^{-3} \leq p_f < 10^{-1}$
S5	$p_f \geq 10^{-1}$

Med kännedom om de stabilitetspåverkande faktorernas medelvärden och osäkerhet (variation) kan samband upprättas mellan sannolikheten för skred och säkerhetsfaktorn mot skred. En tidig bedömning av detta samband för olika typfall i Göta älvdalen, innan analysresultatet är tillgängligt, framgår av Tabell 3.2, där för Fall A $V_F = 9 \%$, Fall B $V_F = 15 \%$ och Fall C $V_F = 20 \%$, se även Figur 3.1.

Tabell 3.2. Samband mellan sannolikhet för skred och säkerhetsfaktorn för skred i olika typfall.

Sannolik-hetsklass	Sannolikhet p_f för skred	Säkerhetsfaktor	Säkerhetsfaktor	Säkerhetsfaktor
		Typsektion A	Typsektion B	Typsektion C
S1	$p_f < 3 \cdot 10^{-6}$	$F > 1,5$	$F > 2,0$	$F > 2,5$
S2	$3 \cdot 10^{-6} \leq p_f < 10^{-4}$	$1,4 < F \leq 1,5$	$1,75 < F \leq 2,0$	$2,1 < F \leq 2,5$
S3	$10^{-4} \leq p_f < 3 \cdot 10^{-3}$	$1,25 < F \leq 1,4$	$1,5 < F \leq 1,75$	$1,75 < F \leq 2,1$
S4	$3 \cdot 10^{-3} \leq p_f < 10^{-1}$	$1,1 < F \leq 1,25$	$1,2 < F \leq 1,5$	$1,3 < F \leq 1,75$
S5	$p_f \geq 10^{-1}$	$F \leq 1,1$	$F \leq 1,2$	$F \leq 1,3$



Figur 3.1. Samband mellan sannolikhet för skred och säkerhetsfaktorn för skred för olika värde på V .

Konsekvensen av ett skred kan bl a innebära förlust av och negativ påverkan på mark, egendom och människoliv, föroreningsspridning samt stopp i väg-, båt- och tågtrafik. Konsekvenserna kan uttryckas i monetära termer som underlag för klassindelning i konsekvensklasser. Tillsammans med sannolikheten för skred visar de på ett riskmått. Konsekvensen av skred klassificeras på motsvarande sätt som sannolikheten för skred enligt en skala i fem klasser, K1 – K5. För närvarande pågår en uppdatering och viss utveckling av den metodik som tidigare tagits fram inom SGI för att värdera konsekvenser av skred (Berggren m fl, 1991, Alén m.fl., 2000). Detta arbete är ännu inte färdigställt. I Tabell 3.3 redovisas beskrivningen av de olika konsekvensklasserna. Den slutliga indelningen med konsekvensklassgränser uttryckta i monetära värden redovisas i GÄU Delrapport 13, Andersson-Sköld (2011).

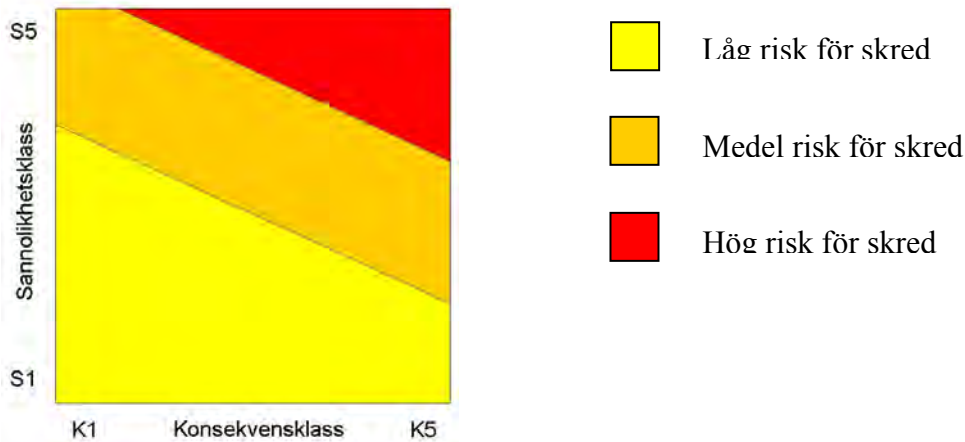
Tabell 3.3. Indelning av konsekvensklasser.

Konsekvensklass	Beskrivning
K1	Lindriga skador
K2	Stora skador
K3	Mycket stora skador
K4	Extremt stora skador
K5	Katastrofala skador

Sammantaget ger sannolikheten för skred och konsekvensen av ett skred en riskklass, eller en säkerhetsklass, $SnKm$, där Sn anger sannolikhetsklass och Km anger konsekvensklass.

Marken utmed Göta älv kommer att värderas med avseende på sannolikhet för skred genom att isolinjer dras mellan de beräknade sektionerna. Det samhällsekonomiska värdet av konsekvenserna av ett skred redovisas i ett 100 m x 100 m raster längs älven. Sannolikheten och konsekvenserna kan sättas samman i ett diagram med sannolikheten

på den vertikala axeln och konsekvensen på den horisontella axeln för att beräkna de slutliga riskklasserna för olika områden längs älven, se Figur 3.2.



Figur 3.2. Skiss för riskmatris med sannolikhets- och konsekvensklasser.

3.3 Ursprunglig naturlig slänt

Den ursprungliga släntens geometri, Figur 3.3a, fås från modellen i den traditionella stabilitetsanalysen.

3.4 Traditionell beräkning med stabilitetsprogram

Resultatet från den traditionella stabilitetsberäkningen används för kalibrering av den idealiserade modellen av den ”verkliga” slänten.

Resultatet av den traditionella beräkningen ska föreligga som:

- geometri för slänt, jordlager och övriga beskrivningar av egenskaper
- geometri för farligaste cirkulärcylindriska glidyta med tillhörande säkerhetsfaktor
- geometri för farligaste optimerade glidyta med tillhörande säkerhetsfaktor

Beräkningsresultatet ska föreligga för odränerad respektive kombinerad analys.

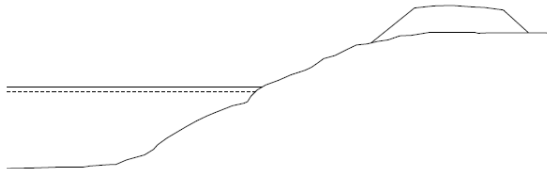
Säkerhetsfaktorn för den farligaste cirkulärcylindriska glidytan jämförs med resultatet från den idealiserade modellen. Om resultaten skiljer sig mer än 5 % görs en revidering av den idealiserade modellen.

Kvarstående skillnad (< 5 %) plus skillnaden i säkerhetsfaktor för optimerad och cirkulärcylindrisk glidyta används som underlag för bedömning av modellfelet i den idealiserade beräkningsmodellen för den ”verkliga” slänten.

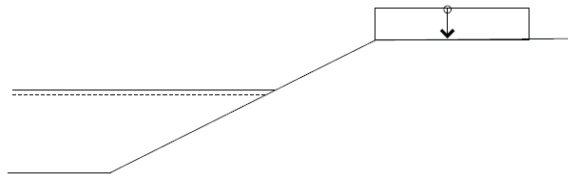
3.5 Idealiserad modell av slänt – ekvivalent linjär slänt

Ett antal inmätta punkter ovan och under vattendragets yta som tidigare använts för att beskriva geometrin i den traditionella stabilitetsberäkningen används här för att beräkna eller subjektivt uppskatta en ekvivalent slänt med enklast möjliga geometri. I detta fall

en geometri i form av en horisontell yta utanför släntfot, en horisontell yta utanför släntkrön och slänten som en rät linje mellan släntfot och släntkrön (uttryckt som fotkoordinat och krön-koordinat), se Figur 3.3b. Vilka punkter som ska ingå vid beräkning av ekvivalent slänt beskrivs närmare i avsnitt 4.1.2.



Figur 3.3a. Den naturliga slänten med en yttre belastning bestående av en bank.



Figur 3.3b. Den idealiserade modellen av slänten. Banken är ersatt av en idealiserad ytlast som beskriver den del av banken som ligger inom aktuell glidyta.

3.6 Beräkningsmodell – deterministisk modell

I beräkningsmodellen beräknas först säkerhetsfaktorn F , se Ekvation 3.1. Genomsnittlig skjuvhållfasthet, c , väljs med hänsyn till jordlagerföljd och för kombinerad analys även med hänsyn till grundvattenytans läge.

$$F = \eta_{\text{modell}} \cdot N \cdot \frac{c}{P_d} \quad (3.1)$$

där η_{modell} = modellfelet
 N = Stabilitetstal = ”Geometrisk formfaktor för slänten”. $N = N_c$ för odränerad analys
 c = Genomsnittlig skjuvhållfasthet längs glidytan, odränerad, c_u , resp. kombinerad c_{komb}
 P_d = Pådrivande tryck = Nettobelastning av egenvikt, yttre last och mothållande vatten

Stabilitetstalet, N , härrör från den så kallade Direktmetoden (Janbu, 1954).

Den genomsnittliga skjuvhållfastheten är en sammanvägning av såväl den odränerade som den dränerade skjuvhållfastheten över den potentiella glidytagens längd.

3.7 Beräkning av sannolikhet för skred – idealiserad modell

Sannolikheten för skred, p_f , kan uttryckas som

$$p_f = p(M < 0) \quad (3.2)$$

där M = Säkerhetsmarginal.

Säkerhetsmarginalen M redovisar samspelet mellan bärförmåga och lasteffekt och för att man ska kunna genomföra en analytisk lösning för brottsannolikheten måste denna säkerhetsmarginal kunna uttryckas som ett analytiskt uttryck.

Säkerhetsmarginalen anges som ett analytiskt uttryck med ingående variabler, där vissa variabler ansätts med deterministiska värden och vissa variabler ansätts som stokastiska variabler.

Om säkerhetsmarginalen $M > 0$ så innebär det att bärförmågan är större än lasteffekten, dvs. skred utbildas inte, och om $M < 0$ så innebär det att skred inträffar.

Ansätt som säkerhetsmarginal

$$M = \ln F \quad (3.3)$$

Observera att $\ln F$ uppfyller kravet för en säkerhetsmarginal enligt ovan, dvs.

$F < 1$, $\ln F < 0$ - skred

$F > 1$, $\ln F > 0$ - ej skred

Sannolikheten för skred p_f kan därmed beräknas som

$$p_f = p(\ln F < 0) = p[(\ln \eta_{\text{modell}} + \ln N + \ln c - \ln P_d) < 0] \quad (3.4)$$

Ansätt η_{modell} , N , c och P_d som stokastiska variabler.

Då erhålls approximativt $\ln F$ som en stokastisk fördelning med parametrarna

$$\mu_{\ln F} = \mu_{\ln \eta_{\text{modell}}} + \mu_{\ln N} + \mu_{\ln c} - \mu_{\ln P_d} \approx \ln \mu_{\eta_{\text{modell}}} + \ln \mu_N + \ln \mu_c - \ln \mu_{P_d} \quad (3.5)$$

$$\sigma_{\ln F}^2 = \sigma_{\eta_{\text{modell}}}^2 + \sigma_{\ln N}^2 + \sigma_{\ln c}^2 + \sigma_{\ln P_d}^2 \approx V_{\eta_{\text{modell}}}^2 + V_N^2 + V_c^2 + V_{P_d}^2 \quad (3.6)$$

där μ = medelvärde, σ = standardavvikelse och V = variationskoefficient.

Ekvation 3.5 och 3.6 förutsätter att η_{modell} , N , c och P_d är av varandra oberoende variabler.

Sista leden i 3.5 och 3.6 är en approximation med god noggrannhet för en variationskoefficient V mindre än 25-30 %, se t.ex. Alén (1998), Appendix A.

Om η_{modell} , N , c_u och P_d antas vara lognormalfördelade, blir $\ln F_c$ en summa av fyra normalfördelningar, vilket innebär att säkerhetsmarginalen i form av $\ln F$ är normalfördelad.

Säkerhetsindex β beräknas därefter som antalet standardavvikelser säkerhetsmarginalens medelvärde utgör, se t.ex. EN1990 (2002).

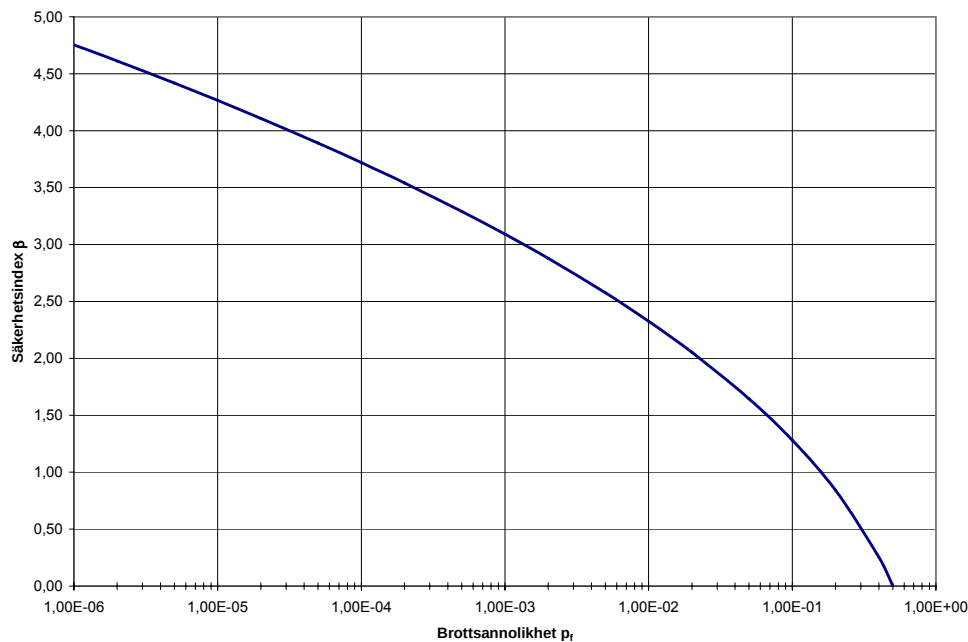
$$\beta = \frac{\mu_M}{\sigma_M} = \frac{\mu_{\ln F}}{\sigma_{\ln F}} \approx \frac{\ln(\mu_F)}{V_F} \quad (3.7)$$

Sannolikheten för skred kan därefter beräknas som

$$p_f = \Phi(-\beta) \quad (3.8)$$

där p_f = sannolikhet för skred
 β = säkerhetsindex
 $\Phi()$ är den standardiserade normalfördelningen, dvs. en normalfördelning med medelvärde = 0 och standardavvikelse = 1.

Samspelet mellan sannolikhet för skred p_f och säkerhetsindex β redovisas grafiskt i Figur 3.4.



Figur 3.4. Samspel mellan säkerhetsindex β och sannolikhet för brott p_f .

3.8 Tidsberoende - Kontinuerlig förändring över tiden

Skredsannolikheten ändras normalt över tiden. Vid riskbedömningar behöver hänsyn tas till detta tidsberoende utifrån två principiellt olika aspekter:

- En kontinuerlig förändring av förutsättningarna för skred med tiden.
- Osäkerhetens variation med tiden.

Den första aspekten behandlas nedan. Den andra aspekten beskrivs närmare i kap 7.

Ett aktuellt exempel på kontinuerliga förändringar med tiden är inverkan av en klimatförändring. Släntens geometri ändras pga. av erosion och förändringar i nederbörden påverkar vattenståndet i älven samt portrycket i slänten. Denna typ av förändringar kan beskrivas med ett eller flera olika tidsscenarier. I den statistiska analysen görs detta genom att man beskriver medelvärdet av säkerhetsfaktorn som en funktion av tiden. Utgångspunkt är ett tänkt scenario över hur förutsättningarna för skred förändras över tiden. Faktorer att ta hänsyn till kan vara erosion, ändrad lågvattennivå och ändrat portryck. Sådana ändrade förutsättningar kan t ex bero på antagna klimatförändringar.

En annan yttre omständighet kan t ex vara ändrade variabla laster pga. ändrad markanvändning. Ingen av de uppräknade faktorernas förändring med tiden kan beskrivas med någon större säkerhet. I en beslutsmodell kan man dock tänka sig ett (eller flera) antagna scenarier och beskriva inverkan över tiden utifrån detta. Det enklaste sättet att göra detta är med en linjär trend. Normalt får man en bättre överensstämmelse om man utgår från mobiliseringsgraden, $f=1/F$, istället för säkerhetsfaktorn F . För en tidsperiod av N år kan då mobiliseringsgraden för ett enskilt år i beskrivas som

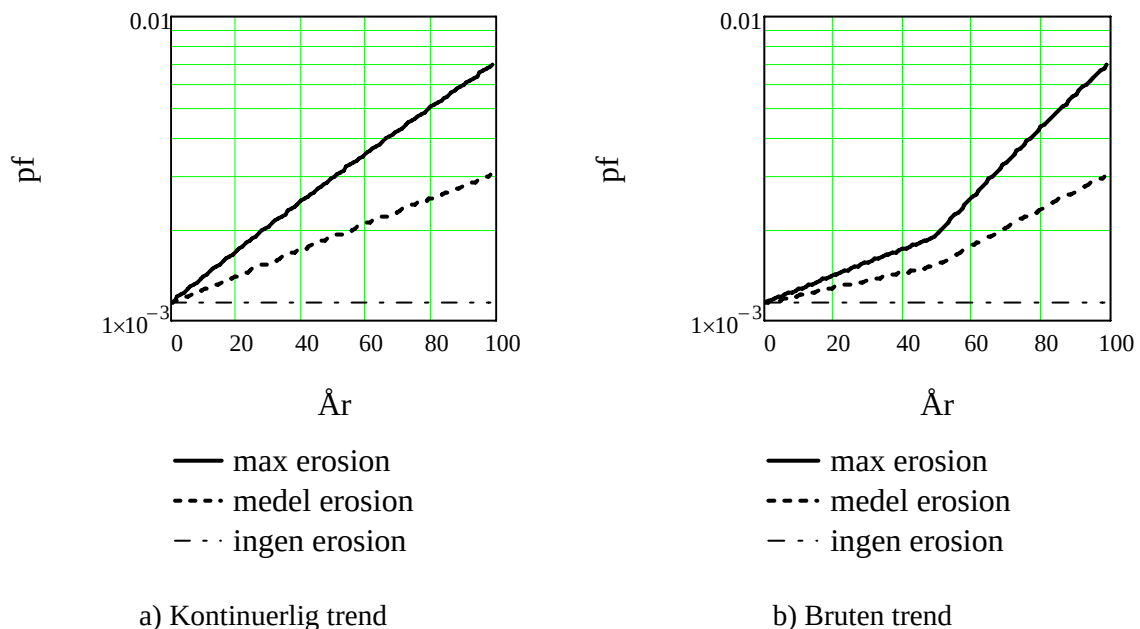
$$f_i = f_0 + \frac{i}{N-1} \cdot (f_N - f_0) \quad (3.9)$$

där f_0 resp f_N är mobiliseringsgraden för första resp. sista året och i är årets ordningsföljd, $i=0 \dots N-1$.

Vid en statistisk beräkning gäller ekvationen för medelvärde av mobiliseringsgraden. På motsvarande sätt ges säkerhetsindex β som

$$\beta_i = \beta_0 + \frac{i}{N-1} \cdot (\beta_N - \beta_0) \quad (3.10)$$

Metodiken innebär alltså att man bestämmer mobiliseringsgrad och säkerhetsindex för det första och sista året av den aktuella tidsperioden. Principiellt är det inget som hindrar att man frångår antagandet om en linjär trend och istället beskriver de sökta variablerna även för ett antal mellanliggande år. Om osäkerheten i tidsscenariot är stor medför detta kanske dock endast en fiktivt ökad noggrannhet. I Figur 3.5 ges exempel för olika scenarier för erosion.



Figur 3.5. Exempel på kontinuerlig förändring med tiden för skred under en given tidsperiod. Det beskrivna exemplet avser en 10 m hög slänt med ett vattendjup före erosion på 6 m. Säkerhetsfaktorn är knappt 1,5 och variationskoefficienten cirka 13%. Erosionen är given som en bottenerosion på 1 m resp 2 m under 100 år, dels a) genom att erosionen är kontinuerlig under hela tidsperioden, dels b) att endast 25% av erosionen sker under de första 50 åren och resterande 75% under de sista 50 åren.

3.9 Metodiken i korthet

Beräkningar för valda slänter utförs för dagens situation och för (den förväntade) situationen om 100 år.

Beräkningsgång för metodiken:

3.9.1 Metodik A

1. Insamla data från traditionell stabilitetsberäkning

1. Geometri
2. Säkerhetsfaktorer: cirkulär och optimerad glidyta för kombinerad resp. odränerad analys
3. Beräkna vägt medelvärde av skjuvhållfastheten utmed glidytan
4. Övriga indata

2. Kalibrera ekvivalent slänt

1. Upprätta ekvivalent slänt med H och B, se Figur 4.6.
2. Ange vattendjup vid släntfot, H_w
3. Ange tunghet, γ
4. Ange yttre last, q, om sådan finns
5. Ange skjuvhållfasthet, c
6. Upprätta farligaste glidyta. Avstånd från släntfot till rotationscentrum, Z och X, samt djup till underkant glidyta, D
7. Beräkna säkerhetsfaktorn F_E för ekvivalent slänt
8. Jämför F_E med resultat från traditionell stabilitetsberäkning. Justera modellen om skillnaden $> 5 \%$

3. Beräkna sannolikheten för skred

1. Ansätt osäkerheter, även modellfelet η_{modell}
2. Beräkna sannolikheten p_f för skred
3. Beräkna sensitivitetsfaktorer för N, c och P_d .

4. Ekvivalent slänt för övriga givna glidytor från den traditionella stabilitetsanalysen

Samma beräkningsgång som ovan används för att bedöma sannolikhet för skred för större glidytor.

5. Dokumentation

Här redovisas, enligt exempel i Tabell 6.5, både indata och beräkningsresultat, samt sensitivitetsfaktorer α_i för N, c och P_d .

3.9.2 Metodik B

I metodik B beräknas sannolikheten för skred genom att utnyttja erfarenheterna från tillämpning av metod A. Metodiken är i princip att man tar lite genvägar relativt metodik A. Dessa genvägar i metod B innebär i ett första skede, se Bilaga 6, att man inte utför den utförliga kontrollen av stabilitetsstalet N enligt metod A och att man vid beräkning av variationskoefficient för säkerhetsfaktorn, V_F , och sannolikhet för brott, p_F , använder samtliga de faktorer som används i metod A. I ett senare läge kan tänkas att Me-

tot B ytterligare förenklas genom att man t.ex. förutsätter vissa storlekar på osäkerheten hos några av de ingående parametrarna.

Med stöd av den idealiserade modellen får man information om

- släntfot, μ_{Zfot} , σ_{Zfot} , μ_{Xfot} , σ_{Xfot}
- släntkrön, $\mu_{Zkrön}$, $\sigma_{Zkrön}$, $\mu_{Xkrön}$, $\sigma_{Xkrön}$
- vattenyta, μ_{Zw} , σ_{Zw}
- X, Z och D för aktuell glidyta
- skjuvhållfasthet, μ_c , σ_c
- tunghet jord, μ_γ , σ_γ
- ytlast, μ_q , σ_q
- tunghet vatten, γ_w
- modellfel, $V_{\eta_{modell}}$ (enligt ovan sätts denna ofta till 0)

Med stöd av denna information beräknas variationskoefficienten för N, V_N enligt Bilaga 2 och variationskoefficienten för P_d, V_{Pd} enligt Bilaga 1.

Man utnyttjar därefter ekvation 3.6 för beräkning av standardavvikelsen för lnF

$$\sigma_{\ln F} = \sqrt{V_{\eta_{modell}}^2 + V_N^2 + V_c^2 + V_{Pd}^2} \quad (3.11)$$

Variationskoefficienten för säkerhetsfaktorn är approximativt enligt ovan lika med standardavvikelsen för lnF

$$V_F \approx \sigma_{\ln F} \quad (3.12)$$

Säkerhetsindex β beräknas enligt ekvation 3.7 dvs.

$$\beta \approx \frac{\ln(\mu_F)}{V_F} \quad (3.13)$$

Sannolikheten för skred fås enligt ekvation 3.8 dvs.

$$p_f = \Phi(-\beta) \quad (3.14)$$

4 BESKRIVNING AV METODIKEN

I metodikens del A beräknas sannolikheten för skred för den farligaste glidyten samt för ett urval av glidytor med högre säkerhetsfaktorer som når längre från älven. Proceduren utförs för dagens situation och för den prognostiserade situationen om 100 år. Beräkningarna hålls enkla utan för mycket detaljer för att ge möjlighet att klassificera markområdena invid älven.

Beräkningarna kan genomföras med stöd av programmen MathCad eller MS Excel.

4.1 Ingående parametrar

Utgångspunkten för metoden är resultat från en traditionell släntstabilitetsberäkning med geometri och säkerhetsfaktor för farligaste glidyta och ett urval av glidytor som når längre från älven. Resultat från analys med både cirkulärcylindriska och optimerade glidytor samt för odränerad och kombinerad analys ska finnas.

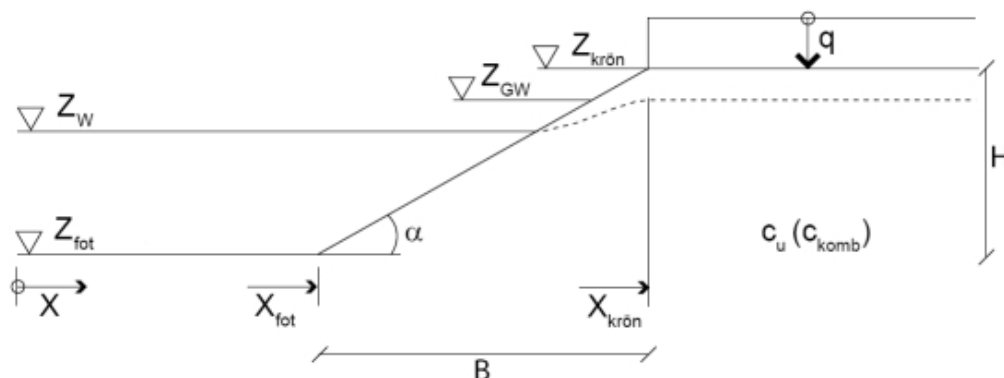
4.1.1 Indata och osäkerheter

De egenskaper som man ska ange osäkerheter för är:

- Geometri
- Skjuvhållfasthet
- Egenvikt och yttre last
- Mothållande vattentryck

Hållfastheten kan vara odränerad eller dränerad skjuvhållfasthet. I det senare fallet föreligger också osäkerheter för kohesionsinterceptet. I båda fallen anges dock osäkerheten i skjuvhållfasthets totalbelopp och inte för de olika effektivspänningsdelarna, eftersom den kombinerade delen normalt inte är dominant i aktuella fall.

Erforderliga indata framgår av igur 4.1 nedan. Beroende på osäkerhetens storlek ges indata som deterministiska värden eller stokastiska variabler. I princip kan alla variabler i igur 4.1 hanteras som stokastiska variabler. För t.ex. odränerad analys innebär det maximalt nio stycken variabler ($Z_{krön}$, Z_{fot} , Z_W , $X_{krön}$, X_{fot} , c , γ , q och γ_w), tio stycken om modellfelet η_{modell} inkluderas. För kombinerad analys tillkommer en beskrivning av porttrycket, dvs. enligt Figur 4.1 en variabel (Z_{GW}).

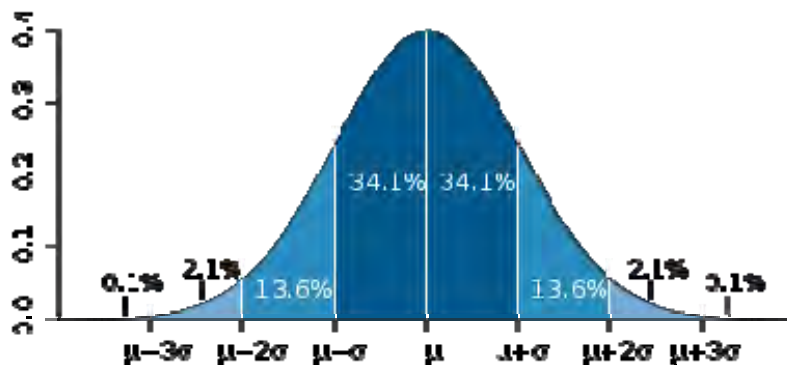


Figur 4.1. Variabler som ingår i skredsannolikhetsberäkningen.

Osäkerheter i geometri kan delas upp i osäkerhet i

- Befintlig geometri
 - bristande (kart)underlag
 - variation längs älven, 3D $\rightarrow$ 2D
 - undervattenstopografi
- Framtida geometri
 - erosion
 - mänsklig påverkan

De stokastiska variablerna anges i form av medelvärde och standardavvikelse eller variationskoefficient. Vid uppskattning av dessa värden kan man i allmänhet utgå från att variablerna är approximativt normalfördelade, varvid man kan uppskatta standardavvikelsen utifrån variabelns spridning kring medelvärdet. I Figur 4.2 redovisas täthetsfunktionen för en normalfördelad variabel. Av figuren framgår även att ett antagande om normalfördelning för fördelningens centrala delar (säg $\mu \pm 3\sigma$) inte innebär att motsvarande behöver gälla vid beräkningen av små sannolikheter ($p_f < 0,1\%$), dvs. för fördelningens svansar. I följande avsnitt går de ingående parametrarna igenom; först beskrivs hur de beräknas, sedan hur osäkerheten bedöms.



Figur 4.2. Normalfördelning och standardavvikelse (Wikimedia 2011).

4.1.2 Ekvivalent linjär slänt beskriven med parametrarna H och B

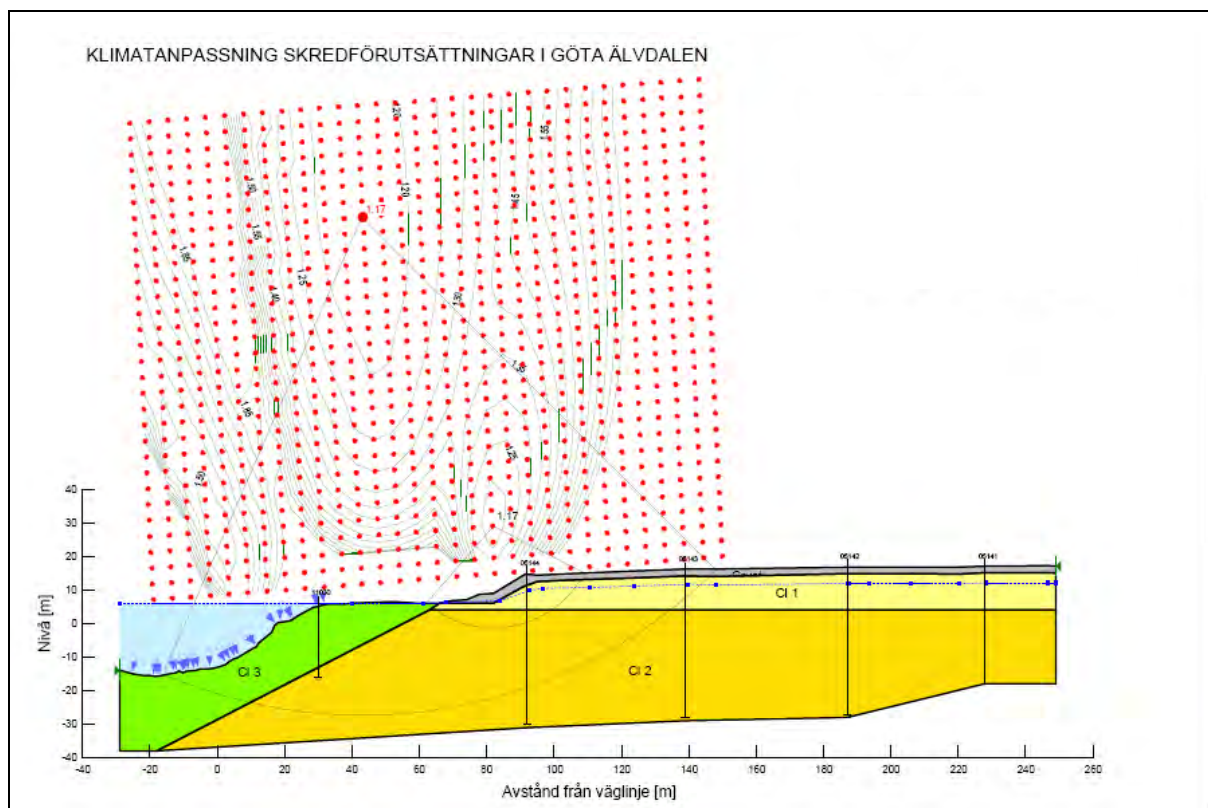
Syftet med att arbeta med en ekvivalent idealiserad slänt istället för en ”verklig” är att kunna beskriva geometrin med ett begränsat antal värden, vilka kan hanteras som stokastiska variabler. Den ekvivalenta slänten bestäms så att aktuell glidvolym får samma volym/tyngd och tyngdpunkt som en glidkropp i den naturliga slänten. Beskrivning av hur detta analytiskt görs finns i SGI Rapport 58 och Alén, 1998, Appendix M. Resultatet av beräkningen är värden för parametrarna H, slänthöjd, och B, slänthöjd. Den ekvivalenta slänten är endast giltig för den glidyta som slänten är beräknad för. Det är inte nödvändigt att använda mer än ett tiotal punkter för att beskriva slänten. Den stora osäkerheten ligger i 3D-effekterna i det område som slänten ska representera.

Beräkning

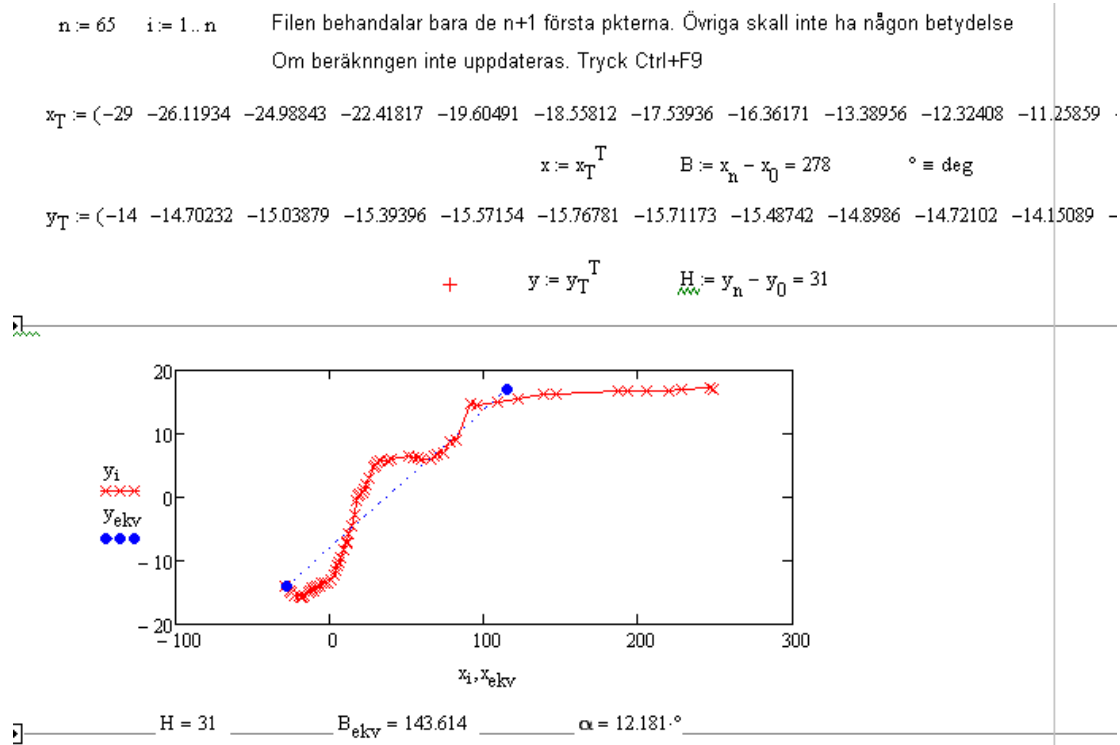
Nedan beskrivs rent praktiskt hur det befintliga MathCad-programmet används. De inmätta punkter som ska användas för att beräkna den ekvivalenta slänten tas från den traditionella släntstabilitetsberäkningen. Detta går att göra antingen genom att ex-

portera de punkter som använts för att rita slänten i beräkningsprogrammet, eller genom manuell inmätning av ett fåtal punkter. Valda punkter matas in i MathCad-filen *Beräkning ekvivalent slänt*.

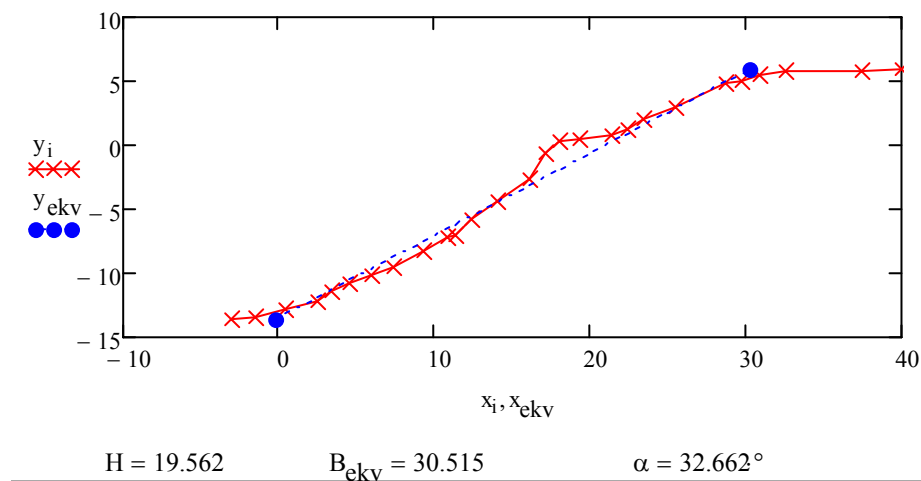
Det är viktigt att välja rätt punkter att inkludera i beräkningen av ekvivalent slänt. Endast punkter som ligger inom glidyntas tas med i beräkningen av ekvivalent slänt. Det är en okulär bedömning vilka punkter som ska ingå, och det är viktigt att stämma av bedömningen med den figur som ritas upp i MathCad. Figur 4.3 visar exempel på en slänt som ska beskrivas. I Figur 4.4 har alla inmätta punkter tagits med vid beräkning av ekvivalent slänt; både främre och bakre slänt och de plana partierna. Resultatet blir en ekvivalent slänt som stämmer bra överens med de inmätta punkterna och som kan användas för att beskriva hela slänten, från främre släntfot till bakre släntkrön. Möjligen har onödigt många punkter tagits med i vänsterkant på figuren, där det börjar luta uppåt igen. I Figur 4.5 har inmätta punkter tagits med från att det börjar luta tills det planar ut, men bara beskriven med punkter i den främre slänten. Den ekvivalenta slänten stämmer bra med de inmätta punkterna och ger en god beskrivning av den främre slänten. För lokala glidytor som bara omfattar den bakre slänten görs på motsvarande sätt för denna.



Figur 4.3. Exempel på naturlig slänt som ska beskrivas med ekvivalent slänt.



Figur 4.4. Ekvivalent slänt med alla inmätta punkter. De inmätta punkterna är markerade med rött och den ekvivalenta slänten är markerad med blått.



Figur 4.5. Ekvivalent slänt för den främre slänten. De inmätta punkterna är markerade med rött och den ekvivalenta slänten är markerad med blått. Koordinatsystemet är samma som i Figur 4.4 och här beskrivs alltså den branta främre slänten.

Osäkerhet

Den ekvivalenta slänten beräknas utifrån geometrin för de punkter som har använts vid den traditionella stabilitetsberäkningen. Därmed är osäkerheten i parametrarna H och B beroende av hur stort antal (och vilka) punkter som har använts till den geometriska

modellen i stabilitetsberäkningsprogrammet, av handläggarens noggrannhet och av mätunderlagets noggrannhet och mätosäkerheter.

Kravet på mätnoggrannhet som skall uppnås vid inmätning inom GÄU motsvarar Mät-noggrannhetsklass B enligt SGF Rapport 1:96, vilket innebär att maximalt acceptabelt fel för inmätta punkter är ± 1 m i plan, och $\pm 0,1$ m i höjd. Även undervattensmätningar med modern teknik uppfyller dessa krav på noggrannhet. Om man utgår från att gränsen för ”maximalt” går vid ca 2 % i en normalfördelning (innebär att 96 % av de inmätta punkterna ligger inom gränsen) så innebär det att osäkerheten för varje inmätt punkt kan uttryckas som $\sigma_{Z,punkt} = 0,05$ m och $\sigma_{X,punkt} = 0,5$ m (Figur 4.2).

Dessa osäkerheter avser endast mätning. Vid tillämpning av metoden måste hänsyn tas till tredimensionella effekter, vilka ger betydligt större osäkerheter. En betydande osäkerhet finns i hur pass representativ den valda sektionen är för den verkliga slänten, dvs. osäkerheten i att beskriva en geometrisk tredimensionell verklighet med en tvådimensionell modell. Denna osäkerhet är viktig, eftersom den i princip kvarstår även om man eliminerar de andra osäkerheterna.

Ofta väljer geoteknikerna i sina utredningar av stabilitetsförhållanden den ”farligaste” sektionen i ett avsnitt där omgivande område bedöms ha större säkerhetsmarginal mot skred. Detta fall innebär att den genomsnittliga brottsannolikheten är lägre men den geometriska osäkerheten är större för ett visst område (tredimensionellt) än för den valda sektionen (tvådimensionellt).

Antalet punkter som används för beräkning av ekvivalent slänt begränsar resultatets noggrannhet. Det är tekniskt möjligt att lägga in alla inmätta punkter från modellen i stabilitetsberäkningsprogrammet, men arbetet blir då mer tidskrävande, ofta onödigt tidskrävande.

Standardavvikelserna för fot- och krönkoordinater för den ekvivalenta slänten uttrycks som $\sigma_{Zkrön}$, $\sigma_{Xkrön}$, σ_{Zfot} och σ_{Xfot} enligt figur 4.1, där $H = Z_{krön} - Z_{fot}$.

Utifrån dessa beräknas σ_B resp σ_H som:

$$\sigma_B = \sqrt{\sigma_{xfot}^2 + \sigma_{xkrön}^2} \quad (4.1)$$

$$\sigma_H = \sqrt{\sigma_{zfot}^2 + \sigma_{zkrön}^2} \quad (4.2)$$

varefter variationskoefficienten för slänthlutningen approximativt kan beräknas som

$$V_b = \sqrt{\left(\frac{\sigma_B}{\mu_B}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_H}{\mu_H}\right)^2} \quad (4.3)$$

Om man tillåter sig en subjektiv bedömning av osäkerheten i nivå (höjddled) och i plan (sidled) så bedömer vi att den ligger inom 0,5 – 1,0 m i nivå och inom 1,0 - 2,0 m i plan. Detta innebär klart större osäkerheter än texten ovan ger. Om vi antar att detta motsvarar övre och nedre 5% i normalfördelningen så får vi $\sigma_Z = (0,5 \text{ till } 1,0) / 1,65$ dvs unge-

får 0,3 till 0,6 m dvs anta 0,5 m och $\sigma_X = (1,0 \text{ till } 2,0) / 1,65$ dvs. ungefär 0,6 till 1,2 m dvs. anta 1,0 m.

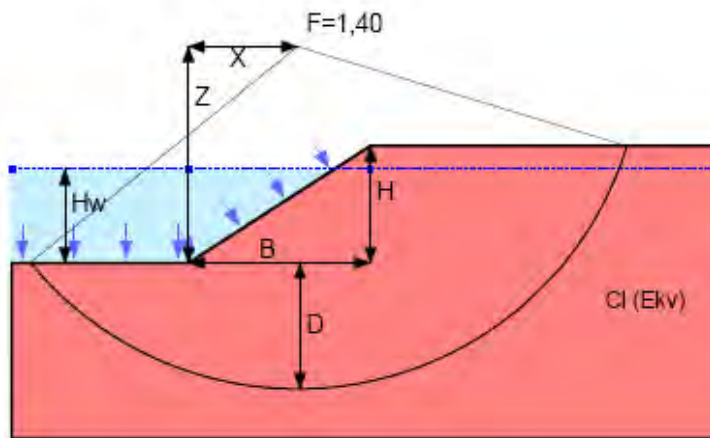
4.1.3 Glidytans geometri, parametrarna X, Z och D

Den cirkulär cylindriska glidytans geometri beskrivs med parametrarna X, Z och D, se Figur 4.6. X och Z är läget för rotationscentrum för glidytan relativt släntfoten i horisontal- resp. vertikalled. D är glidytans djup under släntfoten. X, Z och D används sedan för att beräkna de normaliserade parametrarna x, z respektive d. De är tre av de fyra parametrar som behövs för att beräkna stabilitetsstalet N. Den fjärde parametern är släntlutningen och den fås ur B och H i avsnitt 4.1.2.

X, Z och D mäts in i den ursprungliga stabilitetsberäkningsmodellen och är relaterade till aktuell glidyta, t.ex. den med lägst säkerhetsfaktor, se Figur 4.6.

Z är avståndet i vertikalled mellan släntfot och glidytans rotationspunkt. Det uppmätta värdet på Z anges i beräkningsprogrammet, som beräknar det normaliserade z. I MathCad-programmet returneras även ett optimerat värde på Z som ger lägst N.

D är avståndet i vertikalled mellan underkant av glidytan och älvbotten. I specialfallet att den cirkulär cylindriska glidytan når fast botten och följer denna så anges i första hand det värde på D som motsvaras av den helt cirkulär cylindriska glidytan. Om beräkningsresultatet avviker mycket från resultatet av den traditionella beräkningen ska beräkningar istället göras för den farligaste helt cirkulär cylindriska glidytan.



Figur 4.6. Den ekvivalenta slänten med måtten H, B, D, H_w och Z markerade för redovisad glidyta.

4.1.4 Tunghet hos jord, γ

Genomsnittlig tunghet för jorden inom glidytan bedöms utifrån modellen i den traditionella stabilitetsanalysen. Respektive lagers area och tunghet vägs samman till ett representativt värde för aktuell glidyta för delen ovan älvbotten.

Osäkerhet

Kunskapsosäkerhet finns i det faktum att få kolvprover tas. Ofta genomför man ostörd provtagning i kanske tre borrhälsar per sektion genom provtagning varje meter i övre delen och sedan med större avstånd i höjdlängd. Vid fallet att man gör bedömningen att

man ligger inom samma geologiska formation så kan provtagningen bli mer sparsam och i vissa fall helt utebli. I dessa fall görs jämförelser av resultat från annan provning, exv. sonderingar, för att kontrollera att man inte har avvikande geologiska förutsättningar.

Representativa tungheter och lagerföljder fås genom jämförelse med närliggande sektioner och tecken på jordlagerföljd från övrig provtagning och sondering. I tillägg finns osäkerheter förknippade med hur handläggaren modellerar jordlagerföljd och tunghet i den ursprungliga stabilitetsberäkningsmodellen; är det en erfaren person med stor lokalkännedom eller en oerfaren och försiktig person som utfört bedömningen? Är bedömningen konservativ eller uppskattas troligaste värde?

Om sektionen består av homogen lera kan variationskoefficienten 0,02-0,04 väljas. Som stöd till detta kan följande ligga. Om man antar att tungheten i överkant lagerföljden är ca 16 kN/m³ med en variation mellan 15 till 17 kN/m³ och antar att dessa gränser grovt motsvarar nedre 5 % och övre 95 % så fås $\sigma_\gamma = (17-15) / 2 / 1,65 = 0,6 \text{ kN/m}^3$ vilket ger $V_\gamma = 0,6 / 16 = 0,038$.

För sektioner med andra typer av jordlager kan osäkerheten normalt antas större.

4.1.5 Skjuvhållfasthet

Beskrivningen gäller en genomsnittlig skjuvhållfasthet längs tänkt glidyta. Den kan ges som odränerad skjuvhållfasthet, alternativt som kombinerad skjuvhållfasthet.

Odränerad skjuvhållfasthet

Odränerad hållfasthet för olika jordlager tas från modellen i den traditionella stabilitetsanalysen. Glidytan delas in i lameller och medelvärdet av skjuvhållfastheten, c_{ui} , beräknas för varje lamell i . Lamellernas båglängd används för att väga samman skjuvhållfastheterna till en medelskjuvhållfasthet, se Figur 4.7.

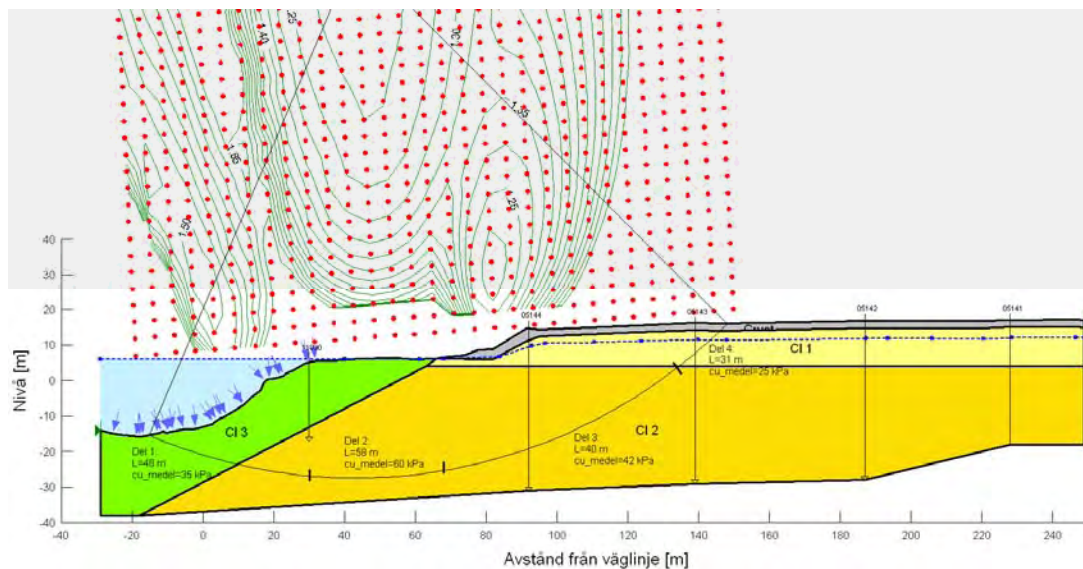
Medelvärdet på odränerad skjuvhållfasthet fås som

$$c_u = \frac{\sum c_{ui} \cdot \Delta l_i}{\sum \Delta l_i} \quad (4.4)$$

där c_{ui} = skjuvhållfasthet i del i
 Δl_i = dellängd av glidyta för del i

I Göta älvutredningen görs beräkningen noggrant med exporterad lamelldata från den traditionella beräkningen.

Vid analys tillämpas ett iterativt förfarande för att kalibrera modellen avseende dränerade parametrar och andelen odränerad skjuvhållfasthet.



Figur 4.7. Indelning av jordlager enligt modellen i den traditionella stabilitetsanalysen (exempel från SLOPE/W). De svarta markeringarna längs glidytan visar indelningen i olika längder för beräkning enligt Ekvation 4.4.

Osäkerhet – odränerad skjuvhållfasthet

Bedömningen av osäkerheten för odränerad skjuvhållfasthet föreslås ske genom en subjektiv bedömning av variationerna i resultaten från de undersökningar som vid den traditionella stabilitetsanalysen har legat till grund för valet av sammanvägt härlett värde på den odränerade skjuvhållfastheten.

Resultatet från undersökningarna av skjuvhållfasthet föreslås redovisas i diagram mot antingen nivå eller djup under markytan. Alternativet beror på om man bedömer att skjuvhållfastheten i aktuell sektion är relaterad till nivå eller djup under markytan.

Med stöd av punkterna från resultatet av provning dras en övre och undre gräns för provresultaten i diagrammet. Avsikten är att dessa gränser grovt ska motsvara 5 respektive 95 percentilen för den odränerade skjuvhållfastheten. Subjektivt är då andemeningen att något eller några resultat kan ligga under respektive över dessa gränser. Det sammanvägda härledda värdet som använts vid den traditionella stabilitetsanalysen läggs också in i diagrammet.

Vid bedömning av osäkerhet är det de lägre värdena i fördelningen hos den odränerade skjuvhållfastheten som ska beskrivas. Med stöd av de två utritade kurvorna för 5 %- respektive 95 %-percentilerna görs en beräkning av vilken standardavvikelse dessa gränser motsvarar. För en normalfördelning gäller att 5 %- respektive 95 %-percentilen ligger 1,65 gånger standardavvikelsen från fördelningens medelvärde. Idealt bör sammanvägt härlett värde för den odränerade skjuvhållfastheten motsvara medelvärdet för den odränerade skjuvhållfastheten.

Vid bedömningen av storleken på standardavvikelsen kan man antingen välja att utnyttja 5 %- och 95 %-percentilen och räkna ut standardavvikelsen som

$$\sigma_{cu} = (c_u^{95\%} - c_u^{5\%}) / 3,3 \quad (4.5)$$

eller att utnyttja 5 %-percentilen och medelvärde och räkna ut standardavvikelsen som

$$\sigma_{cu} = (c_u^{\text{medelvärde}} - c_u^{5\%}) / 1,65 \quad (4.6)$$

Det senare alternativet rekommenderas.

Detta innebär att man kommer att kunna beräkna en standardavvikelse för den odränerade skjuvhållfastheten antingen mot nivå eller mot djup under markytan. Med stöd av standardavvikelsen och medelvärde kan en variationskoefficient beräknas för den odränerade skjuvhållfastheten som funktion av nivå eller djup under markytan.

Vid bedömning av variationskoefficienten för den odränerade skjuvhållfastheten utefter glidytan görs en subjektiv bedömning av denna med stöd av beräknad variationskoefficient mot nivå och till ett djup som motsvarar delen ned till underkant aktuell glidytan.

Variationen i resultatet från provningen innefattar bl.a. naturlig variation i egenskapen samt effekter av provningsmetodik. Det är inte klarlagt hur stor andel av den totala variationen som de två delarna har men troligen är effekter av provningsmetodik dominant. Detta gäller speciellt i de homogena lerlagerprofilerna i södra delen av Göta älvdalen.

Eftersom glidytor upptar olika stor volym och längd bör variansreduktion förutsättas enligt

$$V_{cu} = k \cdot V_{cu0} \quad (4.7)$$

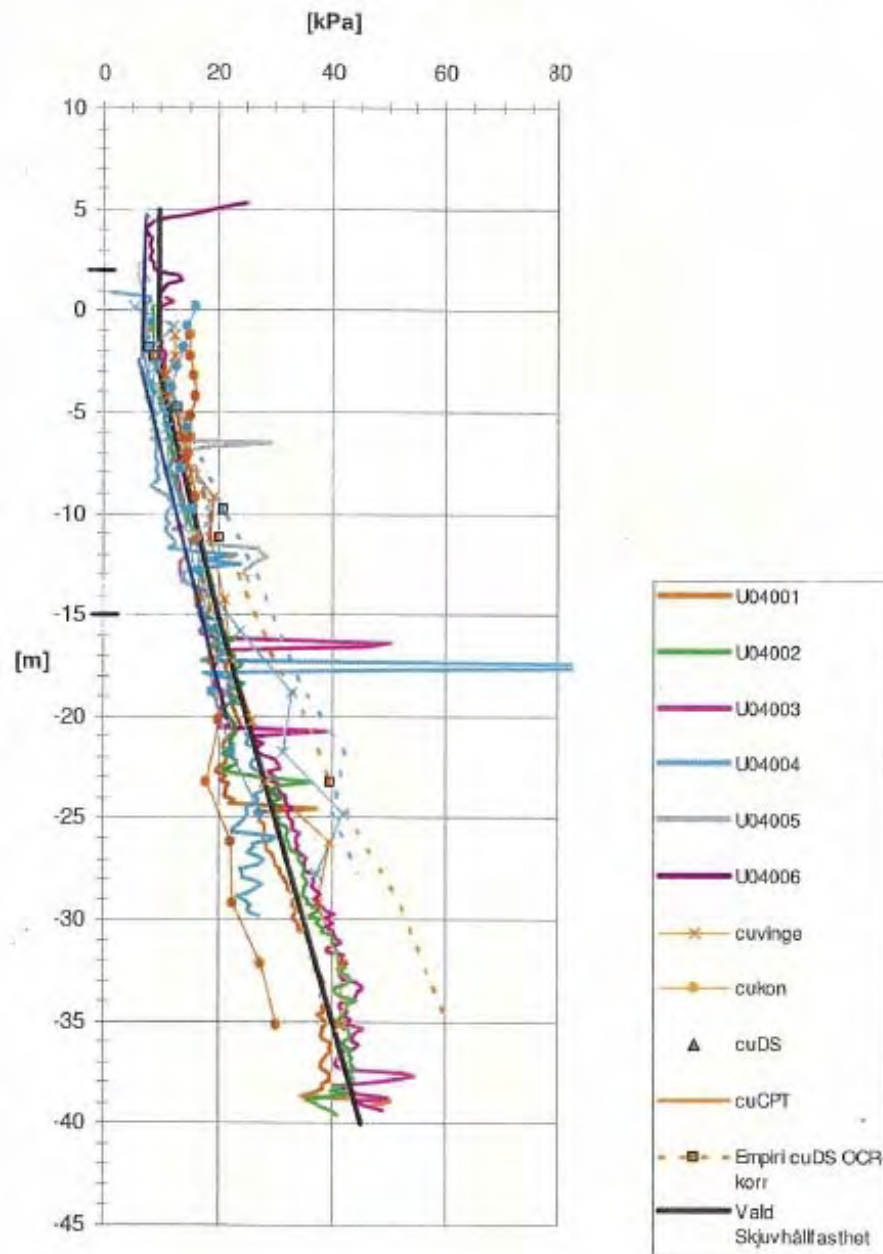
där V_{cu} = variationskoefficient för den odränerade skjuvhållfastheten utefter aktuell glidytan
 k = konstant
 V_{cu0} = variationskoefficient utvärderad ur resultat av befintlig provning

Förslaget är att en faktor $k = 0,6-1,0$ accepteras, med faktorn 0,6 för stora glidytor och 1,0 för små glidytor. Om slänthöjden är mindre än 4 m betraktas glidytan som liten. Om slänthöjden är större än 10 m betraktas glidytan som stor.

Lägre värde på V_{cu} än 0,06 (6%) bör inte användas vid den fortsatta analysen.

I Figur 4.8 redovisas exempel (sektion km 46/900) på hur denna typ av bedömning av osäkerhet som redovisas ovan kan göras. Skillnaden mellan vald skjuvhållfasthet (medelvärde, markeras med svart linje) och 5%-percentilen är 3,1 kPa inom den aktuella glidytan, vilket ger $\sigma_{cu0} = 3,1 / 1,65 = 1,9$ kPa och $V_{cu0} = 11,5$ %. Med variansreduktion för stor glidytan ($k = 0,6$) fås $V_{cu} = 7$ % och $\sigma_{cu} = 1,1$ kPa.

Skjuvhållfasthet - odränerad analys, med nivå. Alla metoder.



Figur 4.8. Tolkning av variationskoefficient hos odränerad skjuvhållfasthet från resultat av befintlig provning. Blå heldragen linje visar bedömd 5%-percentil. Markeringar på z-axeln visar nivåer (RH2000) för aktuell glidyta, dvs. glidyta's djupaste punkt ligger på nivån -15m och dess högsta punkt på +2m.

Kombinerad skjuvhållfasthet

Kombinerad hållfasthet ges ofta som hållfastheten vid aktuellt spänningstillstånd i slänten.

$$c_{komb} = \min \left[\frac{c' + (\sigma_v - u) \cdot \tan(\varphi')}{1 + \frac{\tan(\alpha_{glidya}) \cdot \tan(\varphi')}{F}}, c_u \right] \quad (4.8)$$

Av Ekvation 4.8 framgår att det krävs att säkerhetsfaktorn är känd, vilket normalt kräver ett iterativt beräkningsförfarande. Med ett alternativt och enklare förfarande kan skjuvhållfastheten ges som

$$c_{komb} = \min \left[\frac{c' + (\sigma_v - u) \cdot \tan(\varphi')}{1 + \tan(\alpha_{glidya}) \cdot \tan(\varphi')}, c_u \right] \quad (4.9)$$

Hållfastheten definieras härvid som skjuvspänning vid brott. Eftersom säkerhetsfaktorn är endast något större än 1 för de slänter som är aktuella i Göta älvdalen är skillnaden liten mellan de två uttrycken. För en brottsannolikhetsberäkning, dvs. $p(F < 1)$, ger Ekvation 4.8 och 4.9 samma resultat eftersom hållfastheten blir lika i Ekvation 4.8 och 4.9 för $F = 1$. I den aktuella metodiken där den idealiserade modellen kalibreras mot en traditionell deterministisk beräkning är även säkerhetsfaktorn ”känd” varför i princip inget iterativt förfarande krävs även med användande av Ekvation 4.8.

Den genomsnittliga kombinerade hållfastheten bestäms i princip på samma sätt som för odränerad hållfasthet, dvs. enligt Ekvation 4.4 men med den skillnaden att man bestämmer en delsträcka Δl_p i passivzonen resp. Δl_a i aktivzonen där dränerad hållfasthet är dimensionerande och där hållfastheten bestäms med hjälp av Ekvation 4.8 eller Ekvation 4.9.

Om säkerhetsfaktorn för såväl odränerad som kombinerad analys vid den traditionella beräkningen har beräknats för samma glidyta i de två fallen, krävs dock ingen speciell beräkning av den genomsnittliga kombinerade hållfastheten. Denna erhålls direkt som

$$c_{komb} = \frac{F_{komb}}{F_c} \cdot c_u \quad (4.10)$$

Osäkerhet – kombinerad skjuvhållfasthet

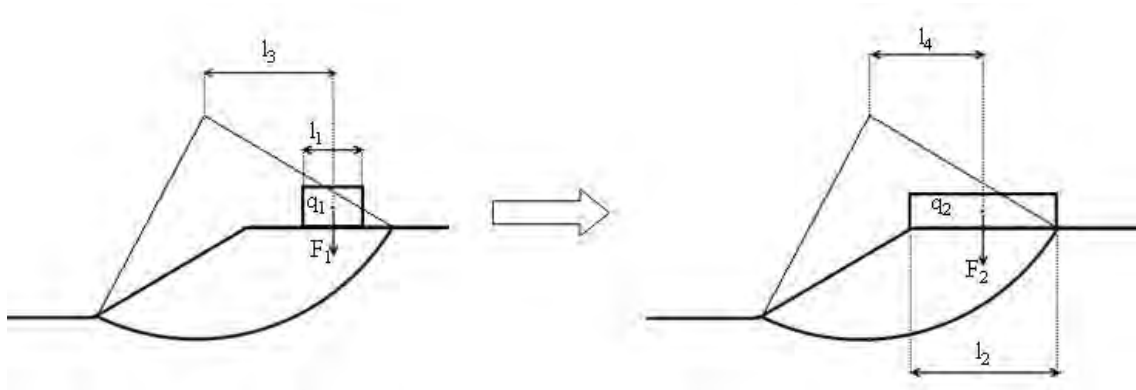
Osäkerheten för den kombinerade skjuvhållfastheten bestäms i princip som ”summan” av osäkerheten för andelen dränerad hållfasthet och andelen odränerad hållfasthet. För de aktuella slänterna i Göta älvdalen är normalt odränerad hållfasthet dominerande. Att ansätta samma variationskoefficient för kombinerad och odränerad skjuvhållfasthet är i sådana fall tillfyllest. I de fall den dränerade hållfastheten har en avgörande betydelse bör en noggrannare analys göras av den dränerade osäkerheten, dvs. speciellt osäkerheten i lerans portryck (Se även avsnitt 4.4).

4.1.6 Yttre last

Det finns både variabla och permanenta yttre laster. Exempel på tillfälliga laster är upplag på industrimark, tyngden av entreprenadmaskiner, trafiklast, etc. Exempel på permanenta laster är tyngden av byggnader och vägar. Yttre last i den idealiserade modellen avser belastning från släntkrön och bakåt. Om den yttre lasten har begränsad utbredning, normalfallet, får den ges som en ekvivalent last med hänsyn till momentjämvikt för glidkroppen.

Utgångspunkten är att använda de laster som finns i den ursprungliga stabilitetsberäkningsmodellen.

I den idealiserade modellen beskrivs yttre last som utbredd last från släntkrön till bakkant glidyta, centrerad på ett visst avstånd från rotationscentrum som ger samma pådrivande moment som den ursprungliga yttre lasten.



Figur 4.9. Beskrivning av hur en yttre last kan räknas om till en utbredd ekvivalent last.

Utbredd ekvivalent last beräknas som:

$$q_2 = \frac{q_1 \cdot l_1 \cdot l_3}{l_2 \cdot l_4} \quad (4.11)$$

Med beteckningar enligt Figur 4.9 där

- F_1 = Lastens tyngd, kN
- F_2 = Ekvivalenta lastens tyngd, kN
- q_1 = Utbredd yttre last, kN/m
- q_2 = Ekvivalent yttre last, kN/m
- l_1 = Lastens utbredning, m
- l_2 = Ekvivalenta lastens utbredning, från ekv släntkrön till glidykans bakkant, m
- l_3 = Avstånd i horisontalled mellan glidykans rotationscentrum och lastens tyngdpunkt, m
- l_4 = Avstånd i horisontalled mellan glidykans rotationscentrum och ekvivalenta lastens tyngdpunkt, m

Osäkerhet

För permanenta yttre laster uppskattas medelvärde för lasten, variationskoefficienten sätts till 0-5%. Osäkerheten är i samma storleksordning och av samma natur som osäkerheten för egentygnd jord.

Variabla laster varierar i tiden. För områden med föreskrivna laster enligt normer är dessa vanligen väl tilltagna (karaktäristiskt värde ca 98 %-fraktilen), samtidigt som variationskoefficienten är stor. Typiska värden är i storleksordningen 50-100%. Utifrån ett karaktäristiskt värde och en uppskattad variationskoefficient kan medelvärdet, μ_q , av en variabel last bestämmas utifrån ekvationen:

$$q_k = q_{98\%} \approx (1 + 2 \cdot V_q) \cdot \mu_q \quad (4.12)$$

För en variationskoefficient på 50-100% ger ekvationen att medelvärdet är 50-30% av det karaktäristiska värdet.

4.1.7 Vattennivå i älven

Vid beräkningarna kan antingen användas ett deterministiskt sätt med älvnivån given som LLW eller dämningnivå, eller älvnivån given som en stokastisk variabel. I Göta älvutredningen används det första alternativet, dvs. att ange älvnivån deterministiskt. Använda nivåer redovisas i Tabell 4.1. Vid sannolikhetsberäkningar i sektioner mellan de angivna platserna interpoleras nivåerna.

Tabell 4.1. Dimensionerande vattennivåer (RH2000) för Göta älv dalen. Den lägsta nivån av LLW och sänkningsgräns enligt vattendom redovisas. Lägsta lågvattenstånd (LLW) perioden 2001-2010.

Lokal	Lägsta nivå	Anmärkning
Vargön övre	42,91	LLW
Vargön nedre	39,25	LLW
Trollhättan övre	38,71	Sänkingsgräns enligt vattendom
Trollhättan nedre G1	6,92	LLW
Trollhättan nedre G14	6,78	LLW
Lilla Edet övre	6,55	Sänkingsgräns enligt vattendom
Lilla Edet nedre	-0,02	LLW
Delning till Nordre älv	-0,70	LLW
Kattegatt (Torshamnen)	-1,09	LLW

Osäkerhet

Osäkerheten kan uppskattas genom jämförelse mellan MLW och LLW där den förra är medelvärdet av en följd av årliga lågvattenmätningar och den senare parametern är lägsta uppmätta vattennivå under en lång tidsrymd. Inverkan av ändrat vattenflöde p.g.a. t.ex. klimatförändringar ges av prognostiserade framtida värden på MLW och LLW.

Baserat på avläsningar av vattenstånd, utförda av Vattenfall, under perioden 2001 – 2010, har värden enligt Tabell 4.2 beräknats inom föreliggande projekt. Värdena ska användas vid olika lokaler utmed Göta älv. Mellan angivna värden ska linjär interpola-

tion tillämpas. I tabellen anges också höjdskillnaden mellan höjdsystem RH00 och RH2000, där RH2000 har större värden än RH00.

I tabellen, som avser nivåer i RH2000, gäller:

- LLW = Lägsta lågvattenstånd, m
- HLW = Högsta årliga lågvattenstånd, m
- MLW = Årligt medellågvattenstånd, m (medelvärde av årliga lågvattenstånd för de 10 år som ingår i mätserien)
- σ_{LW} = Standardavvikelse för lågvattenstånd, m, från perioden 2001-2010
- Diff = Differens mellan höjder i RH00 och RH2000, m

Observera att värdena i Tabell 4.2 är framtagna utifrån observationsperioden 2001-2010 för en serie bestående av det lägsta vattenståndet för varje år.

Tabell 4.2. Lågvattenstånd (RH2000) och standardavvikelser (perioden 2001-2010).

Lokal	LLW	HLW	MLW	σ_{LW}	Diff
Vargön övre	42,91	43,60	43,34	0,19	0,32
Vargön nedre	39,25	39,40	39,33	0,06	0,32
Trollhättan övre	39,02	39,41	39,29	0,11	0,31
Trollhättan nedre G1	6,92	7,02	6,93	0,03	0,31
Trollhättan nedre G14	6,78	7,02	6,90	0,09	0,31
Lilla Edet övre	6,60	6,96	6,81	0,10	0,30
Lilla Edet nedre	-0,02	0,06	0,03	0,02	0,30
Delning till Nordre älv	-0,70	-0,35	-0,57	0,12	0,20
Kattegatt (Torshammen)	-1,09		-0,58		0,20

4.2 Klimatförändring

4.2.1 Klimatscenario

Skredsannolikheten som räknas fram med parametrar beskrivna i Avsnitt 4.1 baseras på dagens situation vad gäller klimatförutsättningar. För att ta hänsyn till förväntade klimatförändringar har SMHI, på uppdrag av SGI, tagit fram ett framtidsscenario för Göta älv dalen. Utredningen gäller till år 2100 och resultatet presenteras i GÄU Delrapport 27, (Bergström et al., 2011) De viktigaste slutsatserna är följande:

- Ökning av extrem dygnsnederbörd beräknas till ca 20% år 2100;
- Såväl höga som låga tappningar från Vänenr kommer att bli vanligare eftersom tillrinning ökar markant under höst/vinter men minskar under vår/ sommar

I ovan nämnda rapporten beskrivs de hydrologiska och meteorologiska förhållandena längs Göta älv och analyser av dagens klimat och regionala scenarier för framtidens klimat i Göta älv dalen redovisas. Dessutom redovisas beräknade ändringar i de framtida flödena i älven samt i dess biflöden.

4.2.2 Vattennivåer

Ökningen av nederbörden beräknas innebära att variationen av vattennivån under året kommer att förändras med en viss ökning av medelvärde. Eftersom älvens nivåer i norra delen regleras av en vattendom och i södra delen av samverkan mellan havsnivåhöjning och landshöjning, har förutsättningarna för uppdraget varit att inga betydande förändringar av vattennivån kommer att ske p.g.a. förändringar av klimatet. Detta innebär att beräkningar utförs med tidigare framtagna nivåer.

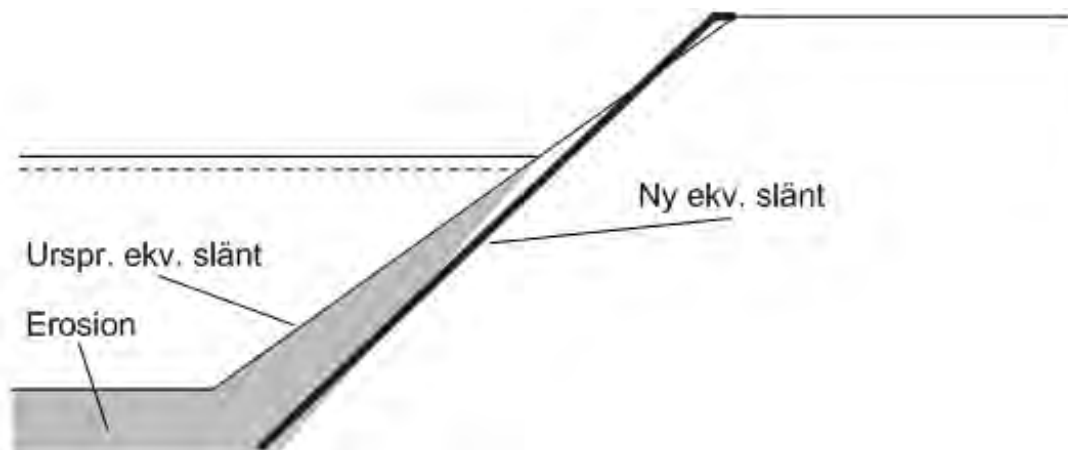
4.2.3 Grundvatten

Grundvattenförhållandena i ett framtida klimat kommer att förändras i relation till de förhållanden som antagits för stabilitetsberäkningarna i rådande klimat. Det förutsätts alltså att en bedömning av grundvattensituationen med, för rådande klimat, höga grundvattennivåer redan har gjorts. I sektioner där en känslighetsanalys likvärdig med den nedan föreslagna redan har gjorts, föreslås att inga nya känslighetsanalyser utförs.

4.2.4 Erosion

Erosion påverkar de geometriska förhållandena för slänter och bottnar och kan därmed påverka slänternas stabilitet. För olika delar av älvsträckan med varierande slänt- och bottenprofil anges hur erosion kan påverka nivåer och lutningar på slänter, med och utan erosionsskydd. Storleksordningar för denna erosion anges för olika delar av älvsträckan och för andra förhållanden som kan påverka dessa processer.

Effekten av framtida erosion på släntens geometri beskrivs med en ny geometri för slänten. Den nya geometrin ges av en ny idealiserad (ekvivalent) slänt, se Figur 4.10.



Figur 4.10. Den nya idealiserade slänten efter erosion.

4.3 Beräkning, Metodik A

Beräkningsmodell

Beräkningsmodell inklusive kalibrering för modellfel:

$$F_c = \eta_{\text{modell}} \cdot N \cdot \frac{c}{P_d} = \frac{\eta_{\text{modell}} \cdot N \cdot c}{\gamma \cdot H + q - \gamma_w \cdot H_w} \quad (4.13)$$

där η_{modell} = kalibreringsfaktor för att hantera modellfel

Ett grundläggande antagande med den beskrivna metodiken är att den traditionella stabilitetsanalysen utgör en relevant beräkningsmodell för de aktuella slänterna i Göta älv-dalen. Eventuella svagheter i den traditionella beräkningsmodellen i sig är inget som hanteras i det aktuella projektet. Avsikten med att införa en modellfaktor är därför att beräkningen för den idealiserade slänten ska ge samma säkerhetsfaktor som den traditionella analysen för större glidytor med plana delar för lika värden på ingående parametrar. Medelvärde för modellfelet η_{modell} väljs som kvoten $F_{\text{opt}} / F_{\text{cirkulär}}$ och justerat med hänsyn till eventuellt kvarvarande kalibreringsfel. Vid denna kalibrering måste indata väljas utifrån samma principer som i den traditionella analysen. Om t ex lågvatten i älven i den traditionella analysen satts till LLW måste detta också gälla för den idealiserade slänten vid kalibreringen. (Efter att kalibreringsfaktorn bestämts kan däremot vattennivån ges som en stokastisk variabel vid den efterföljande stokastiska analysen):

Stabilitetstal:

Analytiska uttryck för N ges av Ekvation 4.14 för en bascirkel

$$N(d, b, z) = \frac{24 \cdot (z + d)^2 \cdot \left(\arccos\left(\frac{z}{z + d}\right) + \arccos\left(\frac{z - 1}{z + d}\right) \right)}{24 \cdot d \cdot z + 12 \cdot d^2 - b^2 + 12 \cdot z - 4} \quad (4.14)$$

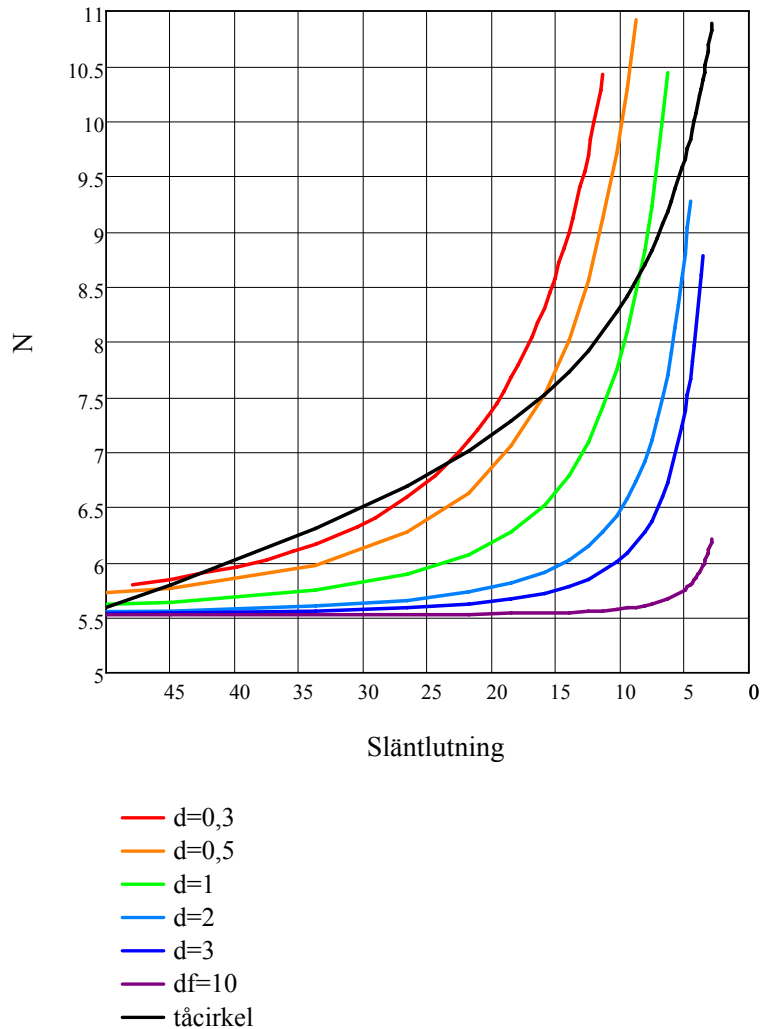
där $d = D / H$
 $b = B / H$
 $z = Z / H$

och där uttrycket är beräknat genom momentjämvikt för en glidytta utan yttre last eller mothållande vatten och med rotationscentrum mitt över slänten, dvs. $X = B / 2$. Detta ger korrekt överensstämmelse med Janbus diagram för bascirkel.

På motsvarande sätt ges för en tåcirkel med rotationscentrum utanför slänthöften N av Ekvation 4.15

$$N(b) = 5,5 \cdot \arctan\left(\frac{1}{b}\right)^{-0,22} - 0,45 \cdot \arctan\left(\frac{1}{b}\right)^{2,5} + 0,25 \quad (4.15)$$

Detta analytiska uttryck är framtaget genom kurvanpassning av linjen för en tåcirkel i Janbus diagrammetod. Se Figur 4.11 för en reproduktion av Janbus diagram med hjälp av Ekvation 4.14 och 4.15. Diagrammet är dock inte någon reproduktion för släntcirklar, jämför avsnitt Släntcirklar längre ner i detta kapitel. Detta innebär att ekvation 4.14 och 4.15 ger korrekt överensstämmelse för bascirklar och god överensstämmelse för tåcirklar. Däremot inte för släntcirklar. I detta fall görs istället med fördel en justering av geometrin, jämför avsnitt Släntcirklar nedan.



Figur 4.11. Janbus diagram, ritat med hjälp av Ekvation 4.14 och 4.15. X-axeln visar släntlutning i grader. Y-axeln visar stabilitets-talet N . $d = D/H$ där D är avståndet från släntfot till underkant glidyta och H är slänthöjden.

Vid användning av Ekvation 4.14 resp. Ekvation 4.15 bör beräkningen kompletteras med korrektionsfaktorer för ytlast μ_q , vattenyta μ_{Hw} och torrskorpa μ_t som används i Janbus direktmetod

$$\mu_q = 1 - \frac{\frac{q}{\gamma_{jord} \cdot H} \cdot \left(1 - \frac{q}{\gamma_{jord} \cdot H}\right) \cdot \left[16 - 11 \cdot \sqrt{\min\{d, (16/11)^2\}}\right]}{25} \quad (4.16)$$

$$\mu_w = 1 - \frac{7}{25} \cdot \frac{H_w}{H} \cdot \left(1 - \frac{H_w}{H}\right) \cdot [2 - \min\{d, 2\}] \quad (4.17)$$

respektive

$$\mu_t = 1 - \frac{\frac{T}{H} \cdot [11 - 8 \cdot \sqrt{\min\{d, (11/8)^2\}}]}{25} \quad (4.18)$$

Ekvation 4.16, 4.17 och 4.18 är framtagna genom kurvanpassning. Som alternativ till Ekvation 4.14-4.18 kan man beräkna säkerhetsfaktorn F med hänsyn till yttre last och vatten, med hjälp av den s.k. vätskeanalogin, se Bilaga 4. Uttryck för detta finns i Alén et al (2000) för bascirkel, dvs. i princip som alternativ till Ekvation 4.14, dock inte med inverkan av torrskorpan. Detta alternativa förfarande är speciellt lämpligt för beräkningar för andra glidytor än farligaste glidytan eftersom rotationscentrum kan väljas fritt i detta fall.

Tåcirkel

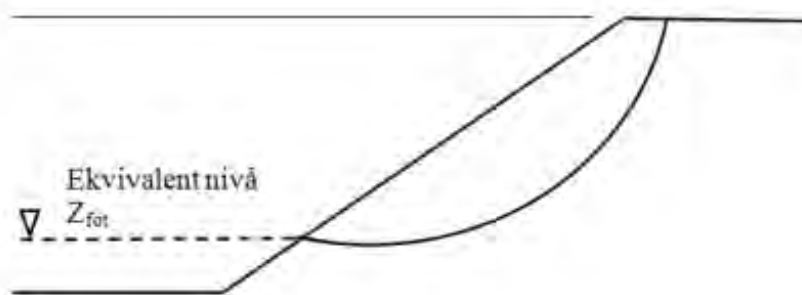
Beräkningsmodellen för bascirkel enligt bilaga 4 kan även användas för tåcirkel, som ett gränsfall av en bascirkel. I det fall att rotationscentrum ligger utanför slänthöjden måste därvid glidytans djup ges så att den verkligen är en tåcirkel enligt:

$$D = \sqrt{X^2 + Z^2} - Z \quad (4.19)$$

Hänsyn tas i detta fall till att glidytan bryts vid slänthöjden, dvs. att den del av glidytan som ligger under slänthöjden inte tas med i jämviktsanalysen, se kommentar i bilaga 4.

Släntcirkel

För släntcirkel kan inte ekvationerna för bascirkel och tåcirkel användas rakt av. För detta fall måste man göra ytterligare en idealisering av slänten genom att man ”höjer” slänthöjden så att den skär slänten där glidytan skär slänten, se Figur 4.12.



Figur 4.12. Ekvivalent släntgeometri för släntcirkel

För denna nya geometri gäller då formlerna för tåcirkel enligt ovan. Aktuella geometriska parametrar måste räknas om utifrån den nya ekvivalenta slänthöjden.

Pådrivande tryck

$$P_d = \gamma \cdot H + q - \gamma_w \cdot H_w \quad (4.20)$$

där γ = tunghet (kN/m³), representativ för slänten
 H = slänthöjd (m)
 q = yttre last (kPa)
 γ_w = vattnets tunghet = 10 kN/m³
 H_w = vattendjup i älven

Osäkerheten (standardavvikelsen) för P_d kan beräknas som (se Bilaga 1 för härledning):

$$\sigma_{Pd} = \sqrt{\sigma_\gamma^2 \cdot H^2 + \sigma_{zkrön}^2 \cdot \mu_\gamma^2 + \sigma_q^2 + \sigma_{zw}^2 \cdot \gamma_w^2 + (\mu_\gamma - \gamma_w)^2 \cdot \sigma_{z fot}^2} \quad (4.21)$$

Beräkningsresultat

Sannolikhet för skred

Om η_{modell} , N , c_u och P_d antas vara lognormalfördelade, blir $\ln F_c$ en summa av fyra normalfördelningar, vilket innebär att säkerhetsmarginalen i form av $\ln F$ är normalfördelad. Skredsannolikheten kan då beräknas enligt Ekvation 3.7 och säkerhetsindex β enligt Ekvation 3.8.

Sannolikhetsfördelningen som beskriver skredsannolikheten är ett resultat av osäkerheterna i beräkningsvariablerna $Z_{krön}$, Z_{fot} , c_u med flera (se Figur 4.1 för en överblick över parametrarna).

Sensitivitetsfaktorer

Sensitivitetsfaktorerna, α_i , visar hur mycket varje parameter bidrar till osäkerheten i resultatet. $\alpha_i = 0$ innebär att parametern inte bidrar alls till osäkerheten, och $\alpha_i = 1$ (eller -1) innebär att parametern förklarar hela osäkerheten. Summan av kvadraterna av sensitivitetsfaktorerna är 1, dvs.

$$\sum_i \alpha_i^2 = 1 \quad (4.22)$$

I metoden First Order Reliability Method, FORM, utnyttjas att man uppfyller brottgränsuttrycket i designpunkten och man får då med sensitivitetsfaktorer α_i som anger parametrarnas betydelse för variationen i brottgränsuttrycket (sannolikhet för brott).

För normalfördelade variabler X_i beskrivs sensitivitetsfaktorer normalt som

$$\alpha_i = - \frac{\partial M / \partial X_i \cdot \sigma_{Xi}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\partial M / \partial X_i \cdot \sigma_{Xi})^2}} \quad (4.23)$$

I vårt fall med ansatsen att N , c och P_d som lognormalfördelade variabler gäller då att man transformerar dessa variabler till normalfördelade variabler $X_N = \ln N$ osv.

I designpunkten innebär detta också då att för de normalfördelade variablerna gäller

$$X_{id} = \mu_{Xi} + \alpha_i \cdot \beta \cdot \sigma_{Xi} \quad (4.24)$$

Vilket för de otransformerade variablerna motsvarar för t ex N

$$N_d = e^{X_{Nd}} = e^{\mu_{\ln N} + \alpha_N \cdot \beta \cdot \sigma_{\ln N}} \approx e^{\ln \mu_N + \alpha_N \cdot \beta \cdot V_N} = \mu_N \cdot e^{\alpha_N \cdot \beta \cdot V} \quad (4.25)$$

OSV.

Man ser av ekvationerna att parametrar för motstånd har negativt α_i och parametrar för lasteffekter har positivt α_i .

I aktuell formulering av brottgränsuttryck, $M = \ln F$, innebär detta att det blir relativt enkla uttryck för sensitivitetsfaktorerna, se Bilaga 3 och ekvation 4.26.

$$\alpha_{\eta_{\text{modell}}} = -\frac{V_{\eta_{\text{modell}}}}{V_{Fc}} \quad \alpha_N = -\frac{V_N}{V_{Fc}} \quad \alpha_c = -\frac{V_c}{V_{Fc}} \quad \alpha_{Pd} = \frac{V_{Pd}}{V_{Fc}} \quad (4.26)$$

Observera tecknen på α_i ovan. Positivt för P_d och negativt för η_{modell} , c och N. I EN1990 (2002) har man gjort tvärtom med tecknen.

Sensitivitetsfaktorerna kan sedan successivt delas upp i sensitivitetsfaktorer för de ingående osäkerheterna utifrån nedanstående principer.

För en summa av två variabler $x + y$

$$\alpha_x = \frac{\sigma_x}{\sigma_{x+y}} \cdot \alpha_{x+y} \quad \alpha_y = \frac{\sigma_y}{\sigma_{x+y}} \cdot \alpha_{x+y} \quad (4.27)$$

respektive produkt $x \cdot y$

$$\alpha_x = \frac{V_x}{V_{x \cdot y}} \cdot \alpha_{x \cdot y} \quad \alpha_y = \frac{V_y}{V_{x \cdot y}} \cdot \alpha_{x \cdot y} \quad (4.28)$$

Dokumentation

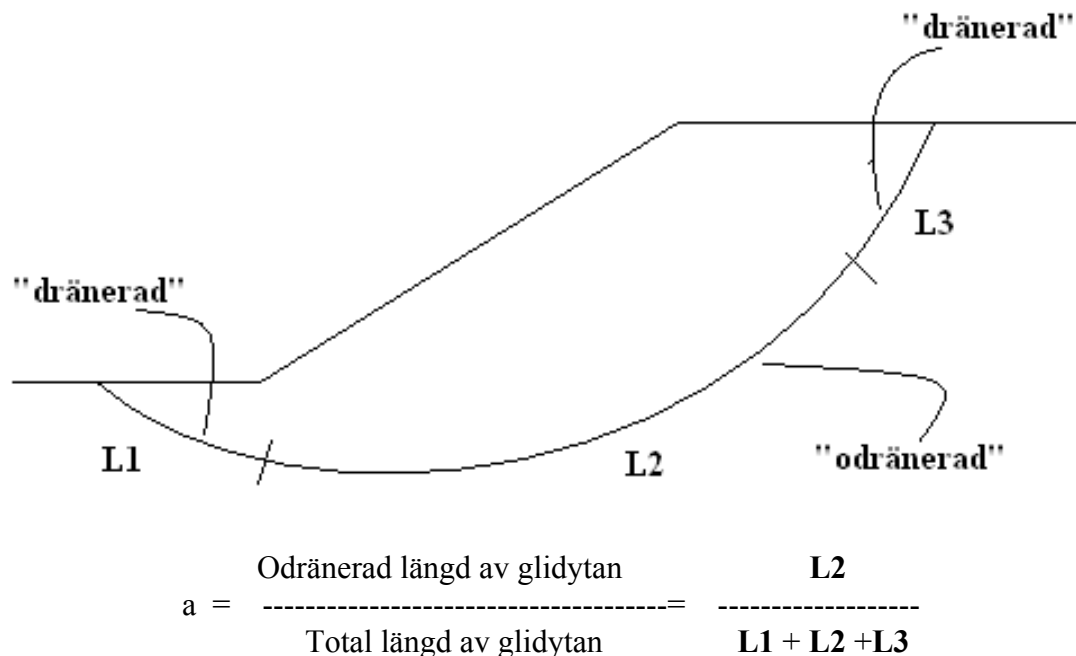
För utförda beräkningar ska indata såväl som underlag för valda osäkerheter redovisas. Indata och resultat redovisas förslagsvis enligt exempel i Tabell 6.3. Underlag dokumenteras exempelvis som i Figur 4.8 och beräkningar som i Kapitel 6. Följande ska dokumenteras:

- Släntens geometri med vald(a) glidytor, säkerhetsfaktor, analysmetod
- Underlag för val av representativ skjuvhållfasthet
- Underlag för val av osäkerheter
- Beräkning – ekvivalent slänt
- Beräkning – analytisk modell
- Sammanställning: indata, utdata, kommentarer

4.4 Förenklad metodik för skredsannolikhet baserad på kombinerad analys

I vissa slänter där den odränerade andelen av glidyten inte är dominerande kan, förutom bedömningen av sannolikheten för skred för fallet odränerad analys, även en uppskattning av skredsannolikheten för fallet kombinerad analys behövas. Resultatet från den kombinerade analysen innebär en något lägre säkerhetsfaktor än den för den odränerade analysen. För den kombinerade analysen bör man ha en annan (lägre) variationskoefficient för säkerhetsfaktorn eftersom variationen i dränerad skjuvhållfasthetsparametrarna är mindre än variationen i odränerad skjuvhållfasthet. Här nedan följer en kort beskrivning hur en sådan variationskoefficient kan erhållas.

Från stabilitetsberäkningarna i SLOPE/W för kombinerad analys får man ut hur stor andel av glidyten som är odränerad respektive dränerad, se Figur 4.13.



Figur 4.13. Beräkning av odränerad andel av glidyten, a .

Den kombinerade skjuvhållfastheten utefter glidyten kan skrivas som

$$c_{\text{komb}} = a \cdot c_u + (1 - a) \cdot c_{\text{drän}} \quad (4.29)$$

Den odränerade skjuvhållfastheten beskrivs med medelvärdet μ_{cu} och variationskoefficienten V_{cu} . Den dränerade skjuvhållfastheten beskrivs med medelvärdet $\mu_{c_{\text{drän}}}$ och variationskoefficienten $V_{c_{\text{drän}}}$.

Medelvärdet för den kombinerade skjuvhållfastheten utefter glidyta blir

$$\mu_{\text{komb}} = a \cdot \mu_{cu} + (1 - a) \cdot \mu_{c_{\text{drän}}} \quad (4.30)$$

Standardavvikelsen för den kombinerade skjuvhållfastheten blir

$$\sigma_{\text{komb}} = a \cdot \sigma_{cu} + (1 - a) \cdot \sigma_{c_{\text{drän}}} \quad (4.31)$$

Vilket ger en variationskoefficient för den kombinerade skjuvhållfastheten av

$$V_{\text{ckomb}} = \sigma_{\text{ckomb}} / \mu_{\text{ckomb}} \quad (4.32)$$

Exempel $a = 0,50$

$$\mu_{\text{cu}} = 30 \text{ kPa}$$

$$V_{\text{cu}} = 0,12$$

$$\mu_{\text{cdrän}} = 10 \text{ kPa}$$

$$V_{\text{cdrän}} = 0,08$$

ger

$$\sigma_{\text{cu}} = 0,12 \cdot 30 = 3,6 \text{ kPa}$$

$$\sigma_{\text{cd}} = 0,08 \cdot 10 = 0,8 \text{ kPa}$$

$$\mu_{\text{ckomb}} = 0,50 \cdot 30 + (1 - 0,50) \cdot 10 = 15 + 5 = 20 \text{ kPa}$$

$$\sigma_{\text{ckomb}} = 0,50 \cdot 3,6 + (1 - 0,50) \cdot 0,8 = 1,8 + 0,4 = 2,2 \text{ kPa}$$

$$V_{\text{ckomb}} = 2,2 / 20 = 0,11$$

Därefter kan Figur 3.1 användas för att bedöma skredsannolikheten.

5 PÅVERKANDE FAKTORERS VARIATION

De faktorer som kan påverka en slänts stabilitetsförhållande kan indelas i geologiska, geometriska, geomekaniska och yttre belastning. Faktorerna är framförallt följande:

Geologiska

- Jordlager
- Jordlagers tjocklek
- Tunghet γ

Geometriska

- Nivå släntfot
- Nivå släntkrön

Geomekaniska

- Odränerad skjuvhållfasthet c_u
- Dränerad skjuvhållfasthet c_d , som beror av kohesionsinterceptet c' , vertikala överlagringstrycket σ_v , portrycket u och leras effektiva inre friktionsvinkel ϕ'
- Sensitivitet S_t

Hydrogeologiska

- Portryck u
- Vattenstånd i älven

Yttre belastning

- Ständig last på markytan
- Dynamisk last på markytan
- Erosion i älven
- Erosion i släntytan ovan vatten i älven

Normala standardavvikelser, variationskoefficienter och deterministiska värden för de faktorer som går att beskriva i Göta älvdalen bedöms vara enligt Tabell 5.1, där

P = Probabilistisk variabel

D = Deterministisk variabel

Tabellen ska ses som en vägledning vid val av olika faktorer variation i Göta älvdalen.

Tabell 5.1. Typiska värden på styrande faktorer variation för dagens situation. Värdena avser Göta älv dalen.

Variationskoefficient - V %	P / D	Stor	Medel	Liten
Tunghet ¹⁾	P	2,5	2	1
Odränerad skjuvhållfasthet ²⁾	P	12	10	8
Dränerad skjuvhållfasthet				
Kohesionsintercept c'	P	10	8	5
Effektiv inre friktionsvinkel hos lera	P	10	8	5
Permanent last ³⁾	P	20	15	5
Variabel last ³⁾	P	40	30	15
Standardavvikelse - σ				
Nivå släntfot ⁴⁾ , m	P	1,0	0,4	0,2
Sidomått släntfot ⁴⁾ , m	P	2,0	0,8	0,4
Nivå släntrön ⁴⁾ , m	P	1,0	0,4	0,2
Sidomått släntrön ⁴⁾ , m	P	2,0	0,8	0,4
Lågvattenstånd ³⁾ , m	P	0,3	0,2	0,1
Portrycksförhöjning, kPa	D	5	10	15

¹⁾ Avser beskrivning av hela jordprofilen.

²⁾ Före eventuell variansreduktion.

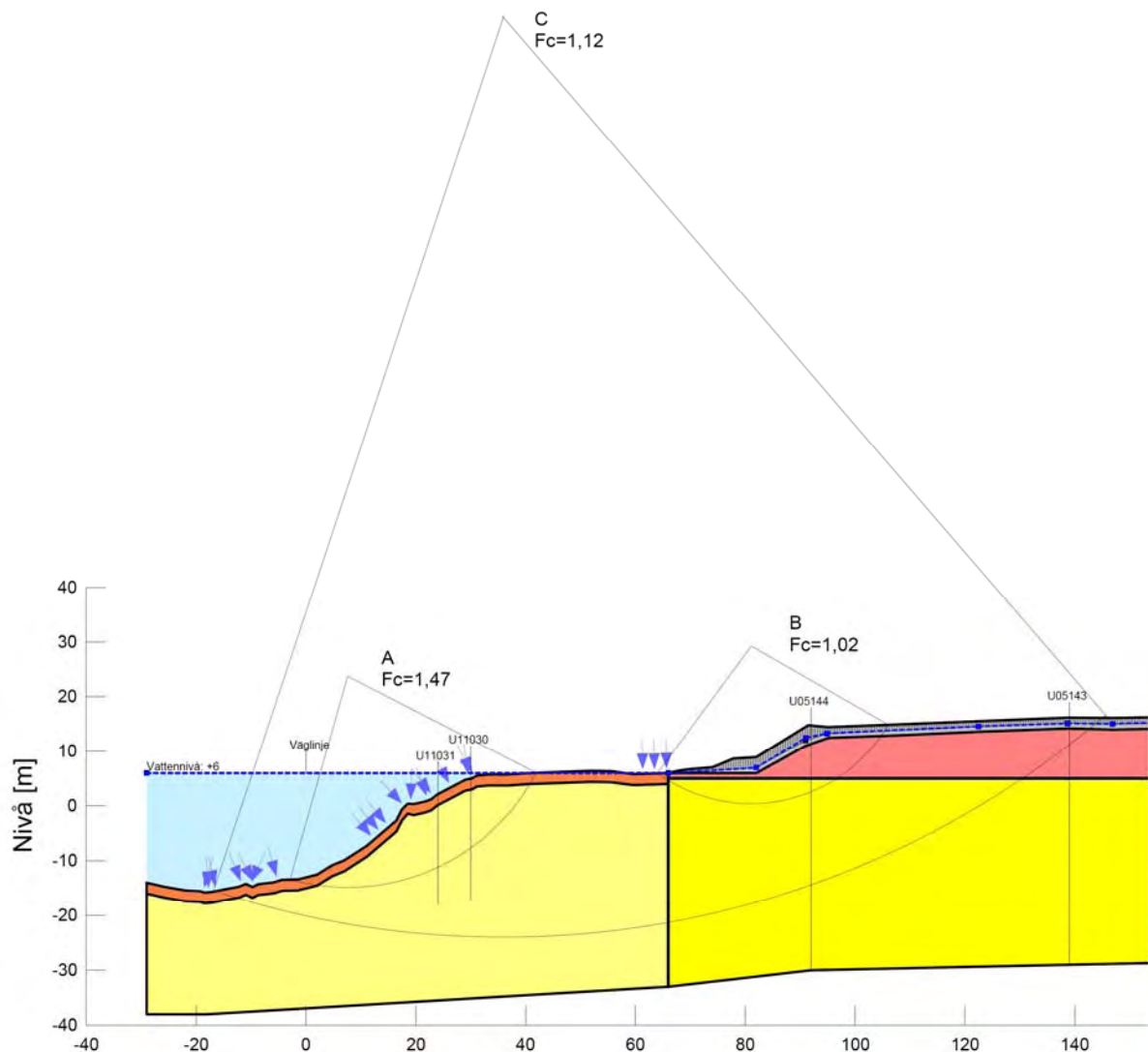
³⁾ Utgångspunkten är att använda dimensionerande last och lägsta lågvattenstånd, inte medelvärde och standardavvikelse.

⁴⁾ Måtten avser beskriva både mätosäkerhet och 3D-effekter. För de avvägda punkterna är osäkerheten större i vertikalled, men de geometriska måtten B och H avser beskriva den idealiserade slänten. Då H är klart mindre än B för slänterna i Göta älv dalen så innebär det att osäkerheten i H får störst betydelse.

6 EXEMPEL: GÖTA ÄLV SEKTION 1

Metodiken illustreras med ett exempel som benämns Sektion 1. Valet av exempelsektion har gjorts med avseende på dess lämplighet för att exemplifiera metodiken. Ytterligare exempel finns i Bilaga 5.

Sektionen består av en undervattensslänt följt av ett plant parti och sedan en toppslänt, vilket ger en lång glidyta och två lokala (Figur 6.1). I exemplet beräknas tre glidytor: främre lokal slänt (A), bakre lokal slänt (B) samt lång ekvivalent slänt (C). I detta kapitel presenteras val av parametrar och beräkningsgång samt en sammanställning av indatata och resultat. I Bilaga 5 visas ett exempel på MathCad-beräkning för den långa slänten. I Bilaga 6 visas ett exempel på beräkning för den långa slänten enligt den förenklade metodiken B.



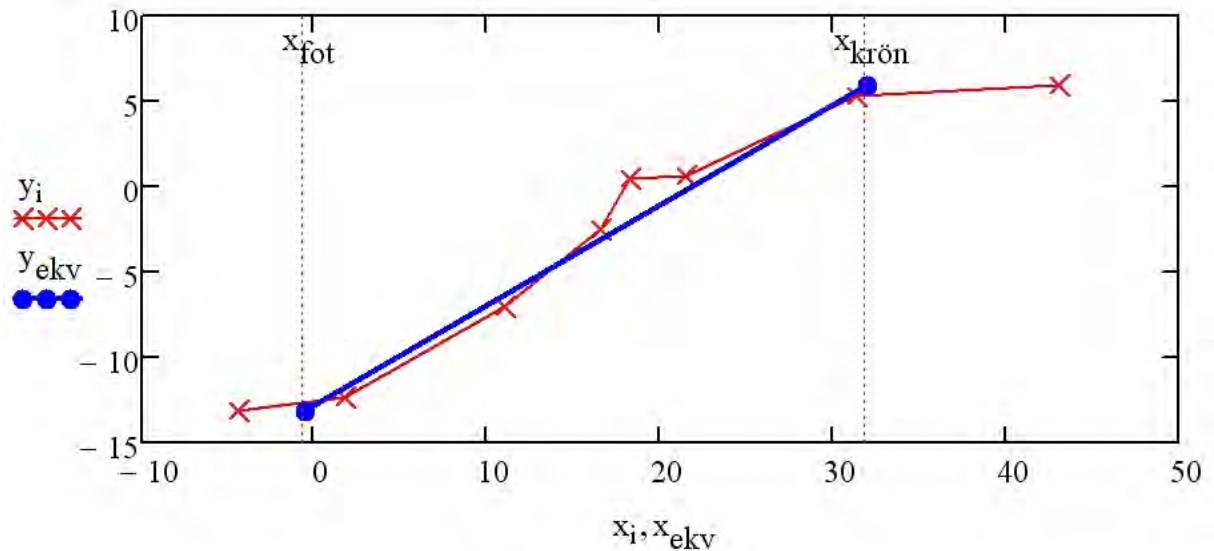
Figur 6.1. Översikt över de tre slänter som beräknas i exemplet. Säkerhetsfaktorer enligt odränerad analys och cirkulär cylindrisk glidyta, F_c , är utskrivna intill släntbeteckningarna A, B och C.

6.1 Främre slänten, A

Ekvivalent slänt beräknas utifrån åtta punkter som tas ur den geometriska modellen för traditionell stabilitetsberäkning (Figur 6.2).

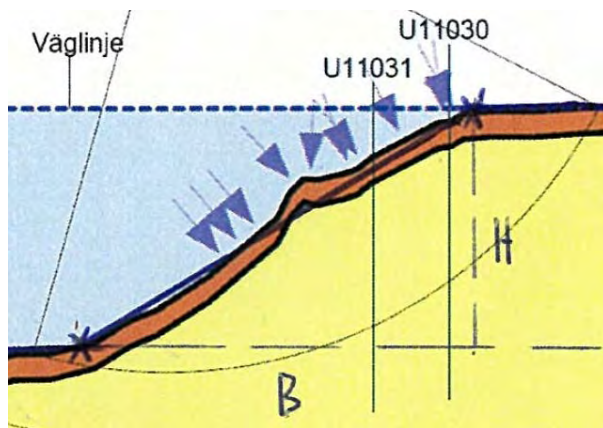
$H = 19,1 \text{ m}$

$B = 32,5 \text{ m}$



Figur 6.2. Beräkning av den främre ekvivalenta slänten (A). De inmätta punkterna är markerade i rött och den ekvivalenta slänten är markerad i blått.

Kontroll av rimlighet i resultatet görs genom mätning i sektionen (Figur 6.3); $H \approx 19\text{m}$, $B \approx 32\text{m}$.



Figur 6.3. Mätning i sektionen för att kontrollera framtagna H och B .

Osäkerheter beror på 3D-effekter, antal inmätta punkter och osäkerhet i mätutrustning. I det här exemplet är vald sektion placerad på en rygg som är brantare än sin omgivning, vilket innebär att säkerhetsfaktorn för sektionen är lägre än i omgivningen. 3D-effekterna anses vara betydande, men den geometriska modellen är gjord med täta inmätta punkter och osäkerheten i mätutrustning är låg. Då är det lämpligt att välja en låg osäkerhet för fot- och krönkoordinaterna för att undvika att 3D-effekterna ger en falsk hög skredsannolikhet. Det är nämligen osannolikt att i det här exemplet någon sektion i omgivningen skulle vara brantare än den som beräknas här. Osäkerheterna bedöms vara:

$$\sigma_{zkrön} = 0,2 \text{ m}$$

$$\sigma_{xkrön} = 0,4 \text{ m}$$

$$\sigma_{zfot} = 0,2 \text{ m}$$

$$\sigma_{xfot} = 0,4 \text{ m}$$

Vattennivå i älven, H_w

Slänten ligger mellan Trollhättan och Lilla Edet, och lägsta lågvatten styrs därför av tillåten dämningnivå i Lilla Edet. Vattennivån väljs deterministiskt och åsätts alltså igen osäkerhet. Detta innebär att man utgår från lägsta tillåtna värde (LLW / lägsta dämningnivå).

$H_w = Z_{LLW} - Z_{fot} = 19,1 \text{ m}$ (mäts ur modellen i den traditionella stabilitetsanalysen). Uppdaterad vattennivå beräknas med hjälp av Tabell 4.1 till $H_w = 19,7 \text{ m}$. Men i det här specialfallet, när vattenytan ligger i nivå med släntkrönet, så påverkas inte beräkningen av en förhöjd vattenyta. Därför behöver ingen omräkning göras efter kalibreringen.

Tunghet, γ

Jordlagrens tunghet redovisas Tabell 6.1.

Tabell 6.1. Tungheten hos respektive jordlager i sektionen.

Beteckning	Tunghet (kN/m ³)
Crust	18
Cl 1	16,8
Cl 2	16,4
Cl 3	16,4
Cl 4	16,4

Glidyten för främre slänten går helt i Cl 3 och Cl 4 vilket ger tungheten $\gamma = 16,4 \text{ kN/m}^3$.

Osäkerheten uttrycks som variationskoefficient och bedöms vara liten, $V_\gamma = 1 \%$ (homogen lera).

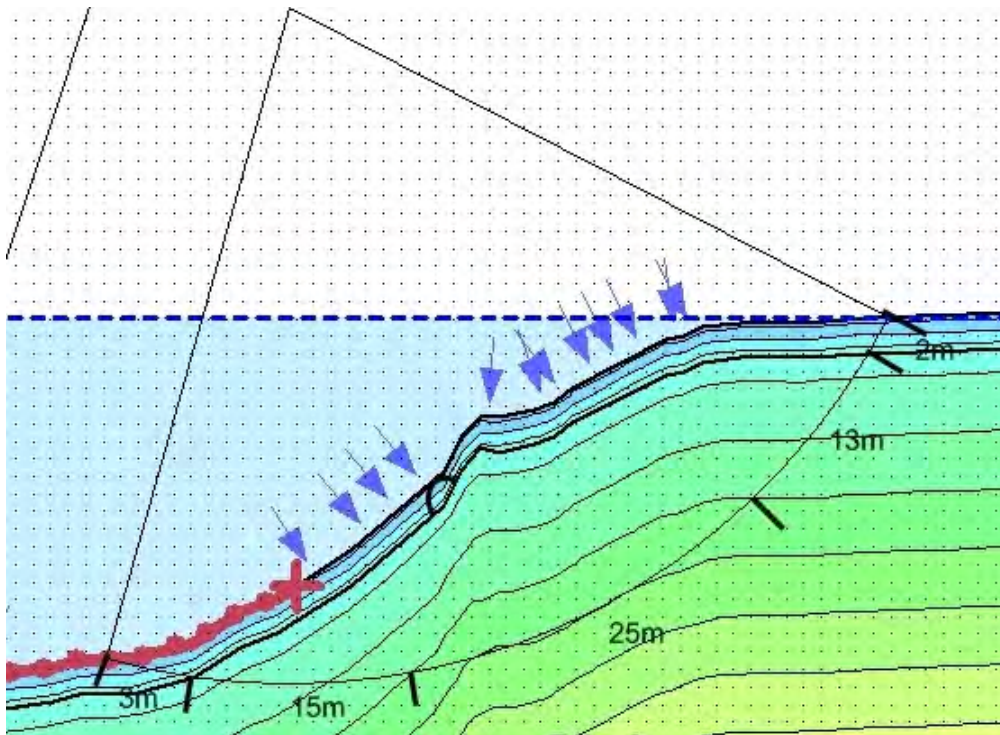
Yttre last q

Ingen last finns för främre slänten.

$$q = 0 \text{ kN/m}^2$$

Odränerad hållfasthet

Sammanvägd odränerad hållfasthet betecknas c_u . Övriga beteckningar avser olika jordlager.



Figur 6.4. Vald indelning för beräkning av representativ skjuvhållfasthet, och segmentens längder.

Tabell 6.2. Längd och skjuvhållfasthet anges från höger till vänster.

Lager	c_u (kPa)	L (m)
Cl 3	10,5	2
Cl 4	24	13
Cl 4	34	25
Cl 4	24	15
Cl 3	10,5	3

$$c_u = \frac{\sum \Delta l_i \cdot c_{ui}}{\sum \Delta l_i} = \frac{2 \cdot 10,5 + 13 \cdot 24 + 25 \cdot 34 + 15 \cdot 24 + 3 \cdot 10,5}{58} = 27,1 \text{ kPa}$$

Osäkerheten i skjuvhållfasthet bedöms vara medelstor, $V_{cu} = 10\%$ före variansreduktion. Glidyten betraktas som stor, vilket ger variansreduktion med $k=0,6$ och resultatet $V_{cu} = 6\%$.

Djup till underkant glidyta relativt slänfot

Glidyten är en bascirkel med $D = 1,8\text{m}$.

Rotationscentrums position relativt slänfoten

Z är rotationscentrums höjd över slänfoten uttryckt i meter, och används för att beräkna den dimensionslösa parametern $z = Z/H$. Förutsatt att origo ligger i slänfoten och att H är slänthöjden:

$$Z = 36,8 \text{ m}$$

X är rotationscentrums avstånd i horisontalld från släntfoten, där ett rotationscentrum i detta fall beläget till höger om släntfoten resulterar i positivt tecken. $X = 8,2$ m.

Vid kalibrering flyttades rotationscentrum i horisontalld för att hitta en farligare glidyta, utan att skapa en släntcirkel: $X = 12$ m.

Säkerhetsfaktorer

Stabilitetsberäkningarna har givit resultatet

$$F_c^{\text{cirkulär}} = 1,47$$

$$F_c^{\text{optimerad}} = 1,41$$

Sammanställning av indata och beräkningar

Kvoten mellan $F_{c, \text{traditionell}}$ och $F_{c, \eta_{klbr}}$ ligger inom 5 % felmarginal, så modellen kan anses kalibrerad.

Tabell 6.3. Indata och beräkningsresultat för den främre slänten.

		Indata				Utdata
		Parameter	Medelvärde μ	Standardavvikelse σ	Variationskoeff. V	Sensitivitets- faktorer α_i
Indata		H (m)	19,1	$\sigma_{zfot} = 0,2$ $\sigma_{zkrön} = 0,2$		0,15 0,38
		B (m)	32,5	$\sigma_{xfot} = 0,4$ $\sigma_{xkrön} = 0,4$		0,05 0,05
		H _{w, kalibr} (m)	19,1			
		H _{w, beräkn} (m)	19,1	-	-	-
		γ (kN/m ³)	16,4	0,16	1 %	0,35
		q _{permanent} (kN/m ²)	0	-	-	-
		q _{variabel} (kN/m ²)	0	-	-	-
		c _u (kPa)	27,1	1,6	6 %	0,84
		D (m)	1,8			
		X (m)	8,2 (opt=12)			
		Z (m)	36,8			
		F _{c, cirkulär}	1,47			
		F _{c, optimerad}	1,41			
Utdata	kalibrering	F _{E,klbr}	1,52			
		η_{mod}	0,931			0
	beräkning med justerad vattennivå					
		F _{E,optimerad}	1,41		7 %	
		N _c	6,8			0,09
		P _d	122			0,54
		β	4,9			
		p _f	6*10 ⁻⁷			

6.2 Bakre slänten, B

Bakre ekvivalent slänt

Den bakre ekvivalenta slänten visas i Figur 6.5 och beskrivs av följande parametrar:

$$H = 9,0 \text{ m}$$

$$B = 28,6 \text{ m}$$

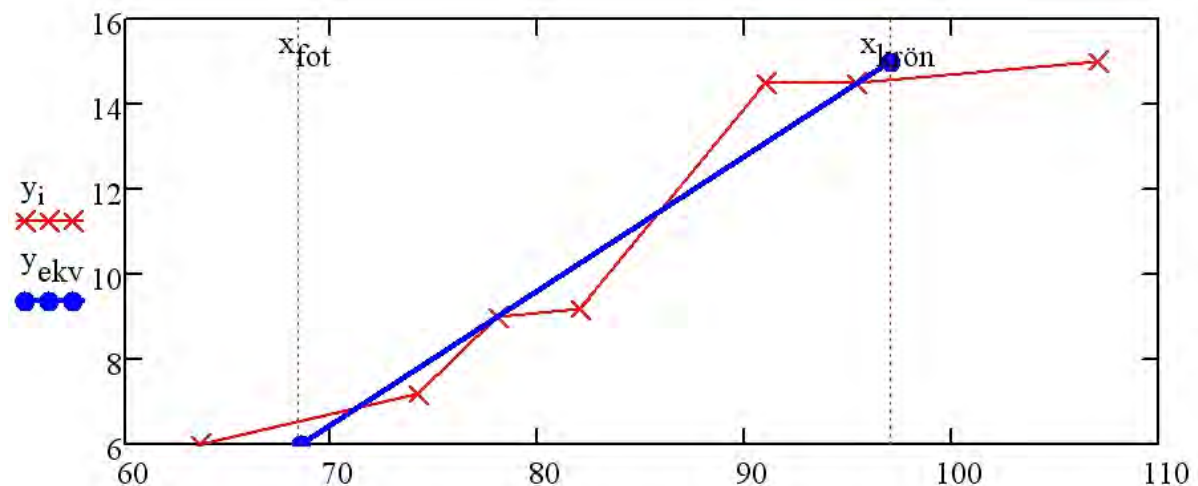
I det här exemplet är vald sektion placerad på en rygg som är brantare än sin omgivning, vilket innebär att säkerhetsfaktorn för sektionen är lägre än i omgivningen. 3D-effekterna anses vara betydande, men den geometriska modellen är gjord med täta inmätta punkter och osäkerheten i mätutrustning är låg. Då är det lämpligt att välja en låg osäkerhet för fot- och krönkoordinaterna för att undvika att 3D-effekterna ger en falsk hög skredsannolikhet. Det är nämligen osannolikt att i det här exemplet någon sektion i omgivningen skulle vara brantare än den som beräknas här. Osäkerheterna bedöms vara:

$$\sigma_{zkrön} = 0,2 \text{ m}$$

$$\sigma_{xkrön} = 0,4 \text{ m}$$

$$\sigma_{zfot} = 0,2 \text{ m}$$

$$\sigma_{xfot} = 0,4 \text{ m}$$



Figur 6.5. Inmätta punkter (röd) och ekvivalent slänt (blå) för den bakre slänten.

Vattennivå i älven, H_w

Slänten ligger mellan Trollhättan och Lilla Edet, och lägsta lågvatten styrs därför av tillåten dämningnivå i Lilla Edet. Vattennivån väljs deterministiskt.

$H_w = Z_{LLW} - Z_{fot} = 0 \text{ m}$ (mäts in i modellen i den traditionella stabilitetsanalysen). Uppdaterad vattennivå beräknas med hjälp av Tabell 4.1 till $H_w = 0,6 \text{ m}$.

Tunghet, γ

Jordens tunghet inom glidytan, γ , uppskattas utifrån respektive jordlagars tunghet till $\gamma = 17,1 \text{ kN/m}^3$ för den bakre slänten.

Osäkerheten bedöms vara medelstor, $V_\gamma = 2 \%$.

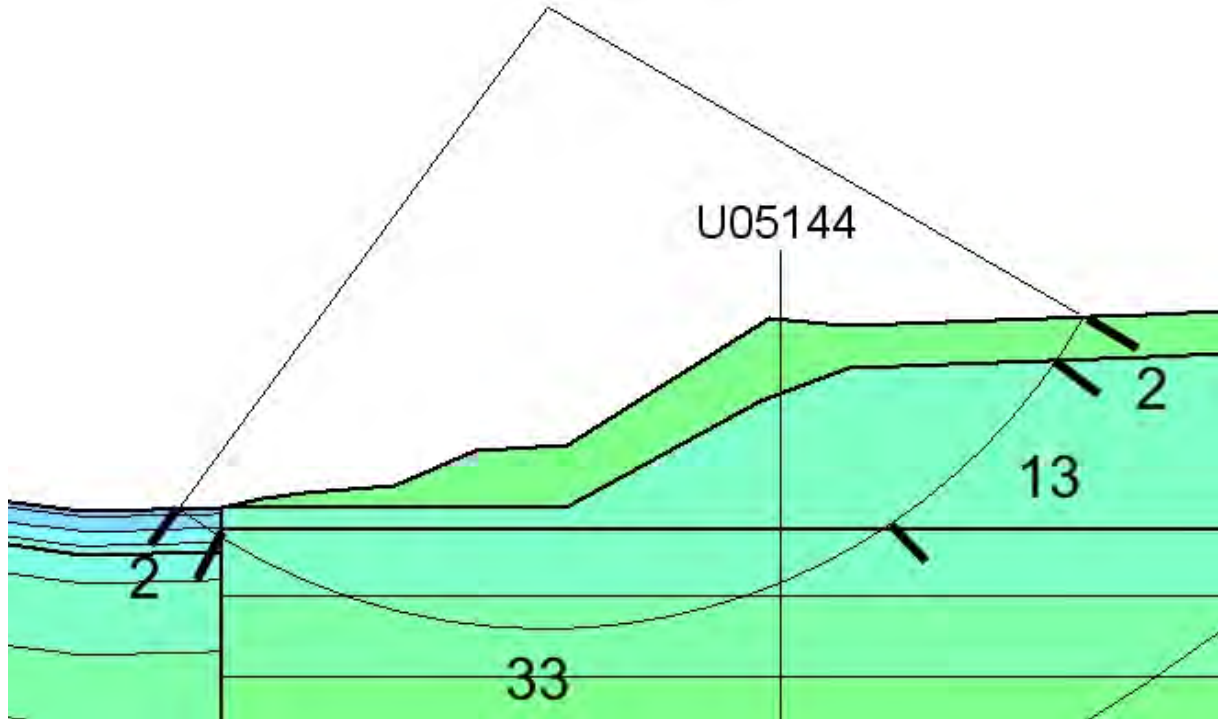
Yttre last q

Ingen last finns för bakre slänten.

$$q = 0 \text{ kN/m}^2$$

Odränerad hållfasthet

Sammanvägd odränerad hållfasthet betecknas c_u . Övriga beteckningar avser olika jordlager.



Figur 6.6. Vald indelning för beräkning av representativ skjuvhållfasthet, och segmentens längder.

Tabell 6.4. Längder och skjuvhållfastheter anges från höger till vänster.

Lager	c_u (kPa)	L (m)
Crust	30	2
Cl 1	21	13
Cl 2	25	33
Cl 3	8	2

$$c_u = \frac{\sum \Delta l_i \cdot c_{ui}}{\sum \Delta l_i} = 23,5 \text{ kPa}$$

Osäkerheten i skjuvhållfasthet bedöms vara medelstor, $V_{cu} = 10\%$ före variansreduktion. Glidyten betraktas som medelstor, vilket ger variansreduktion med $k=0,8$ och resultatet $V_{cu} = 8\%$.

Djup till underkant glidytta relativt slämfot

Avståndet mellan glidyten botten och älvbotten uppmättes till $D = 5,7 \text{ m}$.

Rotationscentrums position relativt släntfoten

Rotationscentrums avstånd i vertikalled från släntfoten är

$$Z = 23,2 \text{ m.}$$

Rotationscentrums avstånd i horisontalled från släntfoten, där ett rotationscentrum i detta beläget till höger om släntfoten resulterar i positivt tecken, är:

$$X = 12,7 \text{ m.}$$

Säkerhetsfaktorer

Stabilitetsberäkningarna har för ursprunglig nivå på vattenytan i älven givit resultatet

$$F_c^{\text{cirkulär}} = 1,02$$

$$F_c^{\text{optimerad}} = 1,00$$

Stabilitetsberäkningarna har för den uppdaterade nivå på vattenytan i älven givit resultatet

$$F_c^{\text{optimerad}} = 1,02$$

Sammanställning av indata och beräkningar

Kvoten mellan $F_{c, \text{traditionell}}$ och $F_{c, \eta_{klbr}}$, ligger inom 5 % felmarginal, så modellen kan anses kalibrerad.

Tabell 6.5. Indata och beräkningsresultat för den bakre slänten.

		Indata				Utdata
		Parameter	Medelvärde μ	Standardavvikelse σ	Variationskoeff. V	Sensitivitets- faktorer α_i
Indata		H (m)	9,0	$\sigma_{zfot} = 0,2$ $\sigma_{zkrön} = 0,2$		0,14 0,28
		B (m)	28,6	$\sigma_{xfot} = 0,4$ $\sigma_{xkrön} = 0,4$		0,05 0,05
		H_w , kalibr (m)	0			
		H_w , beräkn (m)	0,6	-	-	-
		γ (kN/m ³)	17,1	0,3	2 %	0,21
		$q_{\text{permanent}}$ (kN/m ²)	0	-	-	-
		q_{variabel} (kN/m ²)	0	-	-	-
		c_u (kPa)	23,5	1,9	8 %	0,92
		D (m)	5,7			
		X (m)	12,7			
		Z (m)	23,2			
		F_c , cirkulär	1,02			
		F_c , optimerad	1,00			
Utdata	kalibrering	$F_{E,klbr}$	1,06			
		η_{mod}	0,943			0
	beräkning med justerad vattennivå	$F_{E,\text{optimerad}}$	1,02		9 %	
		N_c	6,8			0,14
		P_d	148			0,35
		β	0			
		p_f	0,5			

6.3 Långa slänten, C

Lång ekvivalent slänt

Den långa ekvivalenta slänten visas i Figur 6.7 och beskrivs av följande parametrar:

$$H = 32,0 \text{ m}$$

$$B = 132,4 \text{ m}$$

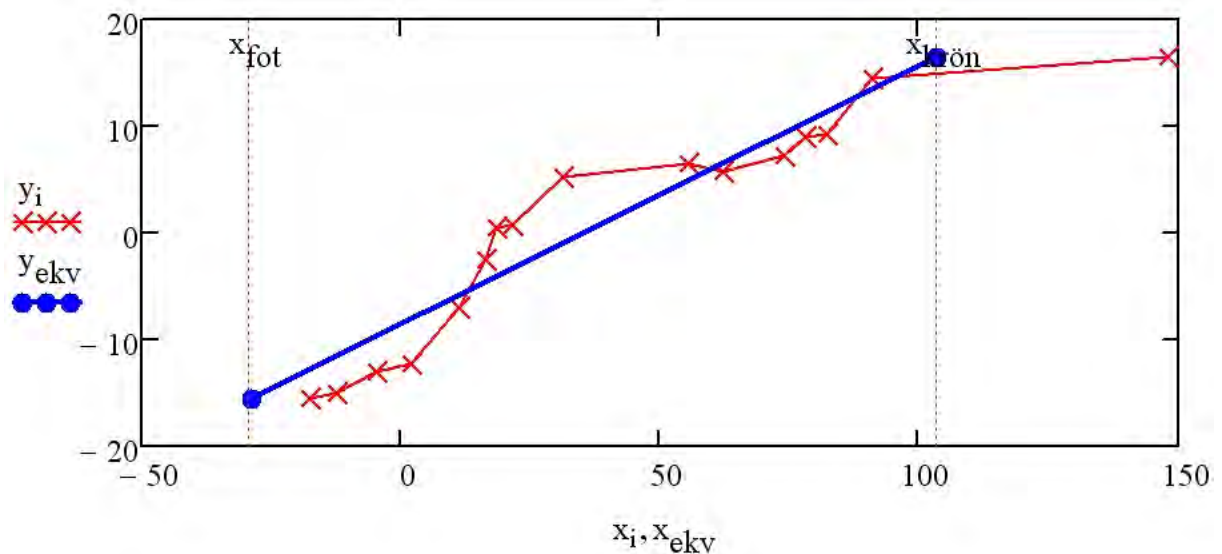
I det här exemplet är vald sektion placerad på en rygg som är brantare än sin omgivning, vilket innebär att säkerhetsfaktorn för sektionen är lägre än i omgivningen. 3D-effekterna anses vara betydande, men den geometriska modellen är gjord med täta inmätta punkter och osäkerheten i mätutrustning är låg. Då är det lämpligt att välja en låg osäkerhet för fot- och krönkoordinaterna för att undvika att 3D-effekterna ger en falsk hög skredsannolikhet. Det är nämligen osannolikt att i det här exemplet någon sektion i omgivningen skulle vara brantare än den som beräknas här. Osäkerheterna bedöms vara:

$$\sigma_{zkrön} = 0,2 \text{ m}$$

$$\sigma_{xkrön} = 0,4 \text{ m}$$

$$\sigma_{zfot} = 0,2 \text{ m}$$

$$\sigma_{xfot} = 0,4 \text{ m}$$



Figur 6.7. Inmätta punkter (röd) och ekvivalent slänt (blå) för den långa slänten.

Vattennivå i älven, H_w

Slänten ligger mellan Trollhättan och Lilla Edet, och lägsta lågvatten styrs därför av tillåten dämningnivå i Lilla Edet. Vattennivån väljs deterministiskt.

$$H_w = Z_{LLW} - Z_{fot} = 21,6 \text{ m (mäts in i modellen i den traditionella stabilitetsanalysen).}$$

Uppdaterad vattennivå beräknas med hjälp av Tabell 4.1 till $H_w = 22,2 \text{ m}$.

Tunghet, γ

Jordens tunghet inom glidytan, γ , uppskattas utifrån respektive jordlagars tunghet till $\gamma = 16,5 \text{ kN/m}^3$ för den långa slänten. Osäkerheten bedöms vara liten, $V_\gamma = 1 \%$.

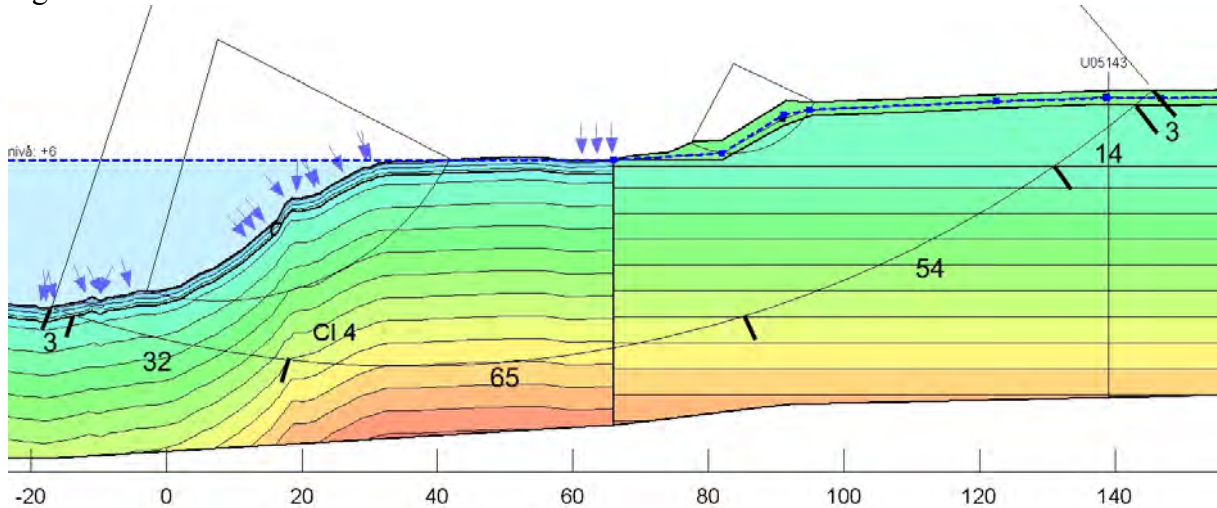
Yttre last q

Ingen last finns för slänten.

$$q = 0 \text{ kN/m}^2$$

Odränerad hållfasthet

Sammanvägd odränerad hållfasthet betecknas c_u . Övriga beteckningar avser olika jordlager.



Figur 6.8. Vald indelning för beräkning av representativ skjuvhållfasthet, och segmentens längder.

Tabell 6.6. Längder och skjuvhållfasthet anges från höger till vänster.

Lager	c_u (kPa)	L (m)
Crust	30	3
Cl 1	21	14
Cl 2	36	54
Cl 2 + Cl 4	57	65
Cl 4	32	32
Cl 3	10	3

$$c_u = \frac{\sum \Delta l_i \cdot c_{ui}}{\sum \Delta l_i} = 41,4 \text{ kPa}$$

Osäkerheten i skjuvhållfasthet bedöms vara medelstor, $V_{cu} = 10\%$ före variansreduktion. Glidyten betraktas som stor, vilket ger variansreduktion med $k=0,6$ och resultatet $V_{cu} = 6\%$.

Djup till underkant glidyta relativt slänfot

$$D = 8,1 \text{ m.}$$

Rotationscentrums position relativt slänfoten

Rotationscentrums avstånd i vertikalled från slänfoten är $Z = 159,6 \text{ m}$.

Rotationscentrums avstånd i horisontalled från slänfoten, där ett rotationscentrum beläget till höger om slänfoten resulterar i positivt tecken, är $X = 65,0 \text{ m}$.

Säkerhetsfaktorer

Stabilitetsberäkningarna har för ursprunglig nivå på vattenytan i älven givit resultatet

$$F_c^{\text{cirkulär}} = 1,12$$

$$F_c^{\text{optimerad}} = 1,07$$

Stabilitetsberäkningarna har för den uppdaterade nivå på vattenytan i älven givit resultatet

$$F_c^{\text{optimerad}} = 1,10$$

Sammanställning av indata och beräkningar

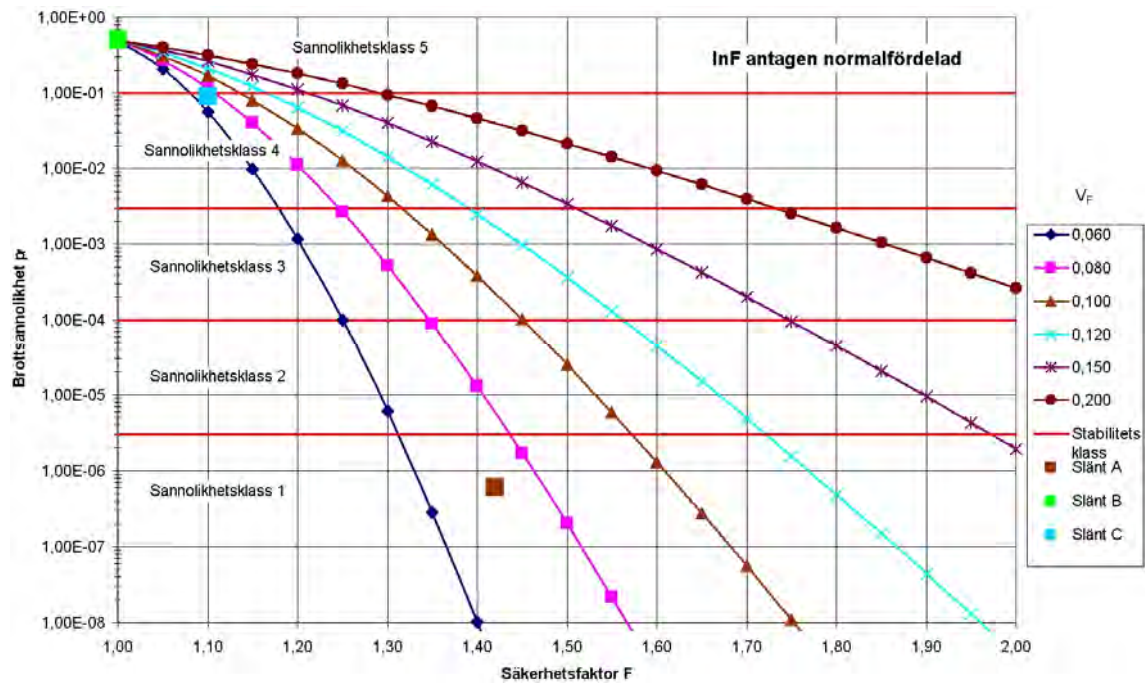
Kvoten mellan $F_{c, \text{traditionell}}$ och $F_{c, \eta_{klbr}}$ ligger inom 5 % felmarginal, så modellen kan anses kalibrerad.

Tabell 6.7. Indata och beräkningsresultat för den långa slänten.

		Indata				Utdata
		Parameter	Medelvärde μ	Standardavvikelse σ	Variationskoeff. V	Sensitivitets- faktorer α_i
Indata		H (m)	32,0	$\sigma_{zfot} = 0,2$ $\sigma_{zkrön} = 0,2$		0,09 0,18
		B (m)	132,4	$\sigma_{xfot} = 0,4$ $\sigma_{xkrön} = 0,4$		0,03 0,03
		H _{w, kalibr} (m)	21,6			
		H _{w, beräkn} (m)	22,2	-	-	-
		γ (kN/m ³)	16,5	0,17	1 %	0,28
		q _{permanent} (kN/m ²)	0	-	-	-
		q _{variabel} (kN/m ²)	0	-	-	-
		c _u (kPa)	41,4	2,5	6 %	0,94
		D (m)	8,1			
		X (m)	65,0			
		Z (m)	159,6			
		F _{c, cirkulär}	1,12			
		F _{c, optimerad}	1,07			
Utdata	kalibrering	F _{E,klbr}	1,13			
		η_{mod}	0,945			0
	beräkning med justerad vattennivå	F _{E,optimerad}	1,10		6 %	
		N _c	8,6			0,08
		P _d	306			0,33
		β	1,1			
		p _r	0,1			

6.4 Summering av exemplen

I Figur 6.9 har glidyterna A, B och C placerats i ett diagram där sambandet mellan säkerhetsfaktor och skredsannolikhet åskådliggörs, och betydelsen av V_F blir tydlig.



Figur 6.9. Samband mellan sannolikhet för skred och säkerhetsfaktorn för skred för olika värde på F_c , med slänterna A, B och C inritade.

7 SKREDSANNOLIKHETENS TIDSBEROENDE

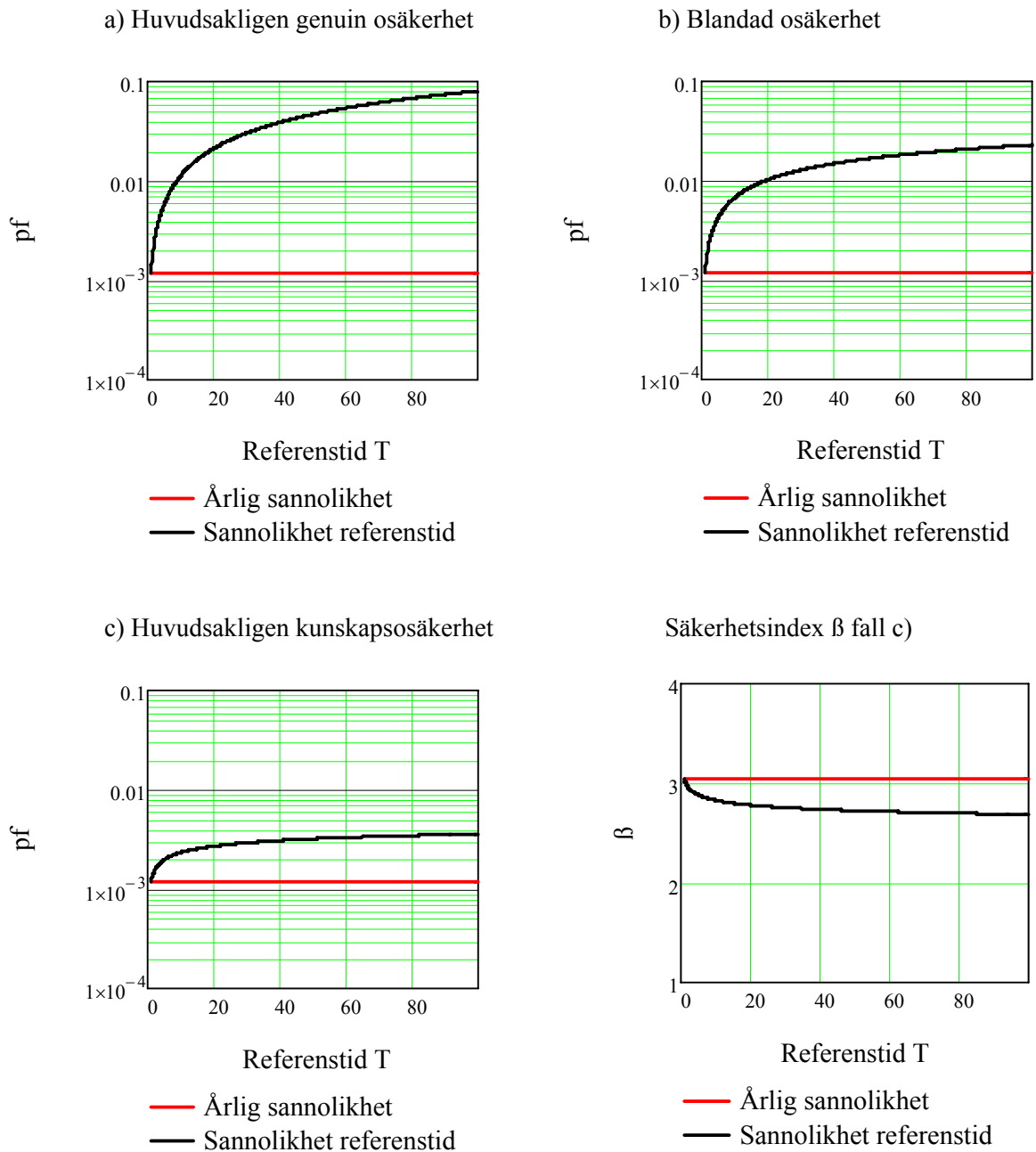
Vid sannolikhetsberäkningar är det vanligt att man anger sannolikheten som en årlig sannolikhet. För t ex samhällsplanering är dock ett år uppenbart en alltför kort planeringshorisont. Beroende på frågeställning är det snarare troligt att man tittar på tidsperspektiv 50/100 år eller mer. I detta kapitel beskrivs därför hur man kan överföra årliga beräknade skredsannolikheter till sådana längre tidsperspektiv.

I avsnitt 3.8 har konstaterats att skredsannolikheten normalt ändras över tiden och att man då behöver ta hänsyn till detta tidsberoende utifrån två principiellt olika aspekter. Det beskrevs där hur man kan behandla kontinuerliga förändringar av förutsättningarna för skred med tiden genom att göra en känslighetsanalys i form av olika tidsscenarier. För att beskriva skredsannolikhetens tidsberoende behöver man emellertid även ta hänsyn till osäkerhetens variation med tiden. En metodik för hur detta kan göras ges nedan samt även hur man kan kombinera de två olika tidsaspekterna i en beräkning.

7.1 Osäkerhetens variation med tiden

Osäkerhetens variation med tiden är nära förknippad med osäkerhetens natur, dvs. om osäkerheten är genuin eller är kunskapsosäkerhet. Genuin osäkerhet orsakas ofta av variabla effekter, t ex flödet i älven, grundvattenytans läge eller variabla laster på släntrönet. Kunskapsosäkerheter däremot är normalt permanenta. En osäkerhet om den odränerade skjuvhållfastheten kommer inte att minska med tiden om vi inte vidtar några åtgärder för att åstadkomma detta, t ex genom mer omfattande geotekniska undersökningar. För att hantera osäkerhetens natur i den statistiska analysen betraktas säkerhetsfaktorn för varje enskilt år som en egen fördelning. Beroendet mellan dessa årliga fördelningar beskrivs med korrelationen mellan de enskilda åren. Permanenta kunskapsosäkerheter är därvid fullständigt korrelerade, korrelationsfaktorn 1, medan genuina, variabla osäkerheter är oberoende från år till år, korrelationsfaktorn 0. Detta senare betyder inte att osäkerheten inte kan vara lika stor från år till år utan bara att t. ex. extremt lågvatten ett år inträffar oberoende av lågvattensituationen närliggande år.

Med utgångspunkt från ovan beskrivna betraktelsesätt kan därvid förutom den årliga sannolikheten för skred även skredsannolikheten för en längre referenstid beräknas. I Figur 7.1 visas resultatet av ett sådant exempel för a) genuin osäkerhet huvudsakligen pga. naturliga variationer över tiden, b) blandad osäkerhet pga. naturliga variationer och kunskapsosäkerhet samt c) huvudsakligen kunskapsosäkerhet. Den röda kurvan visar den årliga skredsannolikheten. Den svarta kurvan visar skredsannolikheten för en längre referenstid under samma tidsperiod. Exemplet i figuren utgår från samma slänt som redovisats i avsnitt 3.8, men för scenariot ingen erosion. För att hantera olika grad av genuin osäkerhet har dock slänthöjden minskats och ersatts med en variabel last på släntrönet, samt hänsyn tagits till variation i lågvattenytan från år till år. Exemplet avser inte att visa en typisk slänt utefter Göta älv utan endast att illustrera det principiella utseendet av skredsannolikheten med hänsyn till olika referenstider och olika grad av genuin osäkerhet. De flesta slänterna i Göta älv kommer säkert likna fall c) eftersom effekter av variabla osäkerheter i allmänhet är små, dvs. den dominerade osäkerheten är kunskapsosäkerhet. För detta sista fall ges också säkerhetsindex β i Figur 7.1.



Figur 7.1. Exempel på skredsannolikhet beräknad för olika referenstider jämfört med årlig skredsannolikhet.

7.2 Sannolikhetsklasser med hänsyn till referenstid

I avsnitt 3.2 har getts en indelning i fem olika stabilitetsklasser baserad på värden för skredsannolikhet. Det har där inte explicit uttalats vilken referenstid som avses. För fallet att man har genuina osäkerheter som varierar med tiden måste man emellertid definiera vilken referenstid som avses för att en angiven skredsannolikhet skall vara meningsfull. Däremot om man endast har att ta hänsyn till kunskapsosäkerhet kan referenstiden utelämnas (Se t ex Thoft-Christensen & Baker, 1982)

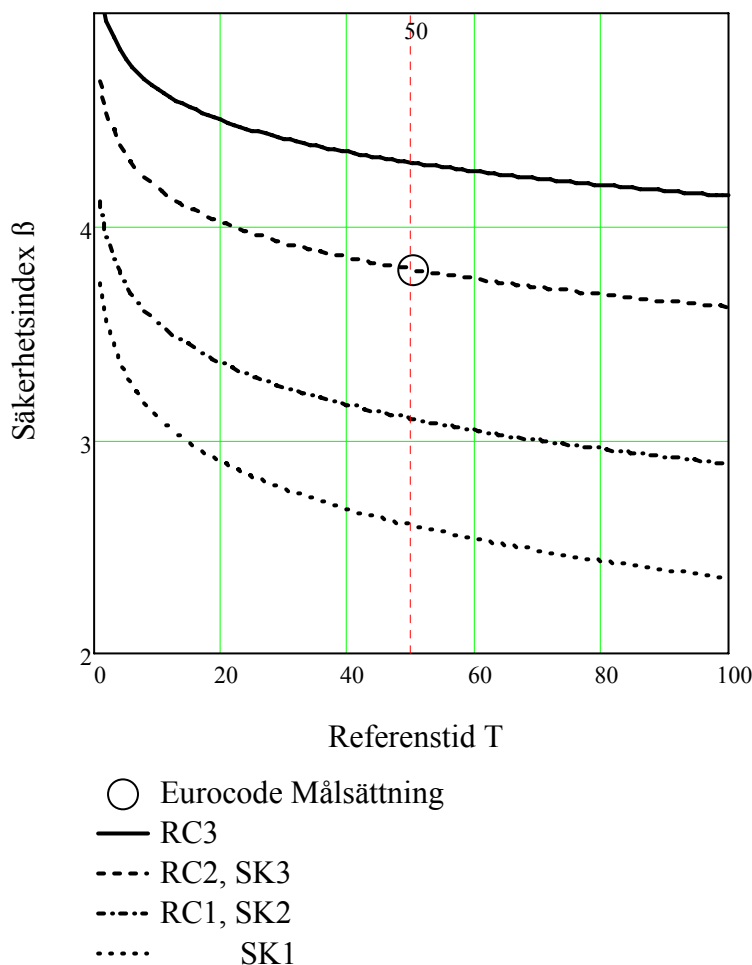
I det säkerhetstänkande som uttrycks i moderna normer t. ex Eurocode (EN 1990) är referenstiden central. I det förslag till värden på partialkoefficienter som ges i de olika

Eurocodedelarna utgår man ambitionsmässigt från ett säkerhetsindex $\beta=3,8$ ($p_f = 7 \cdot 10^{-5}$) för referenstiden 50 år. För det fallet att den dominerande osäkerheten härrör från utfall som är oberoende från år till, dvs. är av typen genuin osäkerhet, kan en omräkning göras till andra referenstider enligt ekvationen (EN1990, Annex C)

$$\Phi(\beta_T) = \Phi(\beta_1)^T \quad (7.1)$$

där β_T = säkerhetsindex för referenstiden T
 β_1 = säkerhetsindex för referenstiden 1 år

Förutom olika värden på β med hänsyn till referenstid kan man även ställa upp olika krav med hänsyn till säkerhetsnivå. Detta har gjorts i Sverige under lång tid genom indelning i olika säkerhetsklasser SK1-SK3. På motsvarande sätt görs en indelning i "Reliability Classes" RC1-RC3 i Eurocode. I Figur 7.2 görs en sammanställning av dessa olika klasser enligt ekvation 7.1. Det är viktigt att understryka att var och en av klasserna avser en definierad säkerhetsnivå, dvs. att värdet på β för en given säkerhetsnivå är beroende av referenstiden.



Figur 7.2. Säkerhetsindex för olika referenstider enligt Eurocode och BKR.

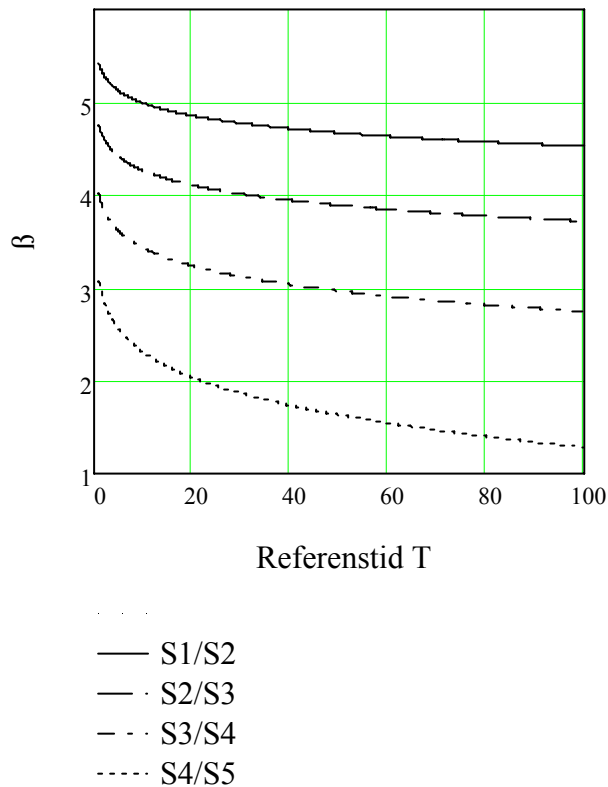
På motsvarande sätt som beskrivits ovan kan indelningen i sannolikhetsklasser för skred göras utifrån en angiven referenstid. Om värdena som angivits i avsnitt 3.2 avses att

gälla en referenstid på 100 år, erhålls för den årliga sannolikheten värden enligt Tabell 7.1.

Tabell 7.1. Indelning av sannolikhetsklasser, p_f = Sannolikhet för skred för referenstiden 1 resp 100 år.

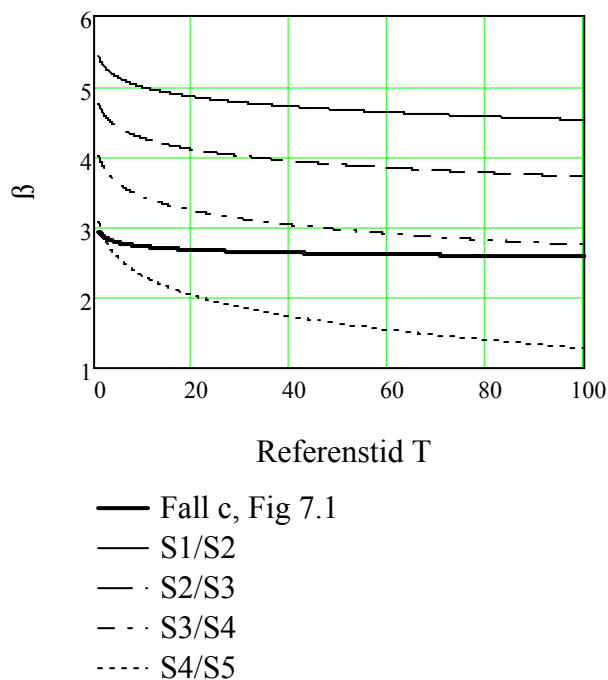
Sannolikhetsklass	Årlig sannolikhet för skred.	Sannolikhet för skred Referenstid 100 år
S1	$p_f < 3 \cdot 10^{-8}$	$p_f < 3 \cdot 10^{-6}$
S2	$3 \cdot 10^{-8} \leq p_f < 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-6} \leq p_f < 10^{-4}$
S3	$10^{-6} \leq p_f < 3 \cdot 10^{-5}$	$10^{-4} \leq p_f < 3 \cdot 10^{-3}$
S4	$3 \cdot 10^{-5} \leq p_f < 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-4} \leq p_f < 10^{-1}$
S5	$p_f \geq 10^{-3}$	$p_f \geq 10^{-1}$

På motsvarande sätt erhålls för en godtycklig referenstid 1-100 år gränser för skredsannolikhet resp säkerhetsindex enligt Figur 7.3.



Figur 7.3. Indelning i sannolikhetsklasser mht referenstid.

Indelningen ovan är baserad på antagandet att den dominerande osäkerheten är genuin, dvs. oberoende från år till år. Detta är emellertid, som påpekats ovan, normalt inte fallet för slänter i Göta älv. Detta kan man ta hänsyn till genom att bestämma vilken referenstid som skall vara styrande. I Figur 7.4 har inlagts fall c från Figur 7.1 tillsammans med indelningen i sannolikhetsklasser.



Figur 7.4. Exempel på säkerhetsindex β beräknat för olika referenstider jämfört med indelningen i sannolikhetsklasser.

Av Figur 7.4 framgår att för det givna exemplet hamnar slänten i sannolikhetsklass S4 utifrån en referenstid på 100 år men på gränsen mellan sannolikhetsklass 4 och 5 baserad på referenstiden 1 år. Hade osäkerheten varit enbart kunskapsosäkerhet hade exemplet givit en horisontell linje varför slänten i stället hamnat i sannolikhetsklass 3. Genom att göra klassindelningen utifrån en referenstid på 100 år kan därigenom hänsyn tas till att kunskapsosäkerhet är mindre allvarlig på sikt än genuin osäkerhet.

7.3 Skredsannolikhet med hänsyn till såväl en kontinuerlig förändring med tiden som en variation av osäkerheten med tiden

Tidigare i avsnitt 3.8 har beskrivits hur skredsannolikheten kan beräknas utifrån kontinuerliga förändringar över tiden. Ovan har beskrivits hur skredsannolikheten kan beskrivas med hänsyn till osäkerhetens natur - genuin osäkerhet eller kunskapsosäkerhet. I nedanstående avsnitt beskrivs kortfattat en metodik hur dessa två principiellt olika aspekter kan kombineras för att beräkna skredsannolikhet med hänsyn till en godtycklig referenstid.

7.3.1 Modell för beskrivning av tidsberoende

Som beskrivits tidigare beror skredsannolikhetens tidsberoende på om osäkerheten är genuin eller av karaktären kunskapsosäkerhet. För de två specialfallen att hela osäkerheten är av den ena eller andra typen kan skredsannolikheten beräknas analytiskt. Detta kan även göras för kombinerade osäkerheter om man inte har några kontinuerliga förändringar över tid även om beräkningarna i detta fall blir mer komplicerade. Exemplet i avsnitt 7.1.1 visar resultatet av en sådan beräkning. För det allmänna fallet finns däremot inga enkla analytiska lösningar, men det kan lösas med matematisk simulering, så kallad Monte Carlo-simulering, se avsnitt 7.3.2 nedan. En enkel modell är att beskriva

mobiliseringsgradens förändring med tiden som en produkt av tre tidsberoende variabler. För ett enskilt år i gäller då

$$f_i = \eta_{ber,i} \cdot \eta_{ober,i} \cdot \mu_{f,i} \quad (7.2)$$

där de två första faktorerna är stokastiska variabler som beskriver osäkerhetens natur. Den första $\eta_{ber,i}$ avser inverkan av faktorer som är lika från år till år, dvs. kunskapsosäkerhet medan den andra $\eta_{ober,i}$ avser genuin osäkerhet. Den tredje faktorn, medelvärde av mobiliseringsgraden enligt avsnitt 3.8, däremot är deterministisk och beskriver den kontinuerlig förändringen över tid. Utifrån ovanstående blir mobiliseringsgraden f_i för ett enskilt år då också en stokastisk variabel.

Tidigare har antagits att säkerhetsfaktorn F är lognormalfördelad vilket då även gäller för dess invers, dvs. mobiliseringsgraden f . För att detta skall gälla måste även de två stokastiska faktorerna vara lognormalfördelningar vilket ger

$$\eta_{ber,i} = LN(1, V_{ber,i}) \quad (7.3)$$

med korrelationen mellan åren lika med 1 och

$$\eta_{ober,i} = LN(1, V_{ober,i}) \quad (7.4)$$

med korrelationen mellan åren lika med 0.

Variationskoefficienterna $V_{ber,i}$ resp $V_{ober,i}$ kan bestämmas om man känner den totala variationskoefficienten för ett enskilt år, $V_{f,i}$, dels sensitivitetsfaktorerna $\alpha_{ber,i}$ och $\alpha_{ober,i}$. Beräkningen av mobiliseringsgraden och säkerhetsindex för första och sista året ger även värden på sensitivitetsfaktorerna för ingående variabler enligt avsnitt 4.2. Utifrån vilka osäkerheter som betraktas som oberoende, t ex yttre last och nivå lågvattenyta, kan då $\alpha_{ber,0}$ resp. $\alpha_{ber,N}$ bestämmas med hjälp av ekvationen

$$\sum_i \alpha_i^2 = 1 \quad (7.5)$$

För variationskoefficienten gäller

$$V_{f,i} = \frac{\ln(\mu_{F,i})}{\beta_i} = \frac{-\ln(\mu_{f,i})}{\beta_i} \quad (7.6)$$

För att bestämma såväl $\alpha_{ber,0}$ och $\alpha_{ber,N}$ som sensitivitetsfaktorerna för mellanliggande år utnyttjas ekvation 7.5 igen på formen

$$\alpha_{ber,i}^2 + \alpha_{ober,i}^2 = 1 \quad (7.7)$$

Slutligen ges variationskoefficienterna som

$$V_{ber,i} = \alpha_{ber,i} \cdot V_{f,i} \quad (7.8)$$

resp.

$$V_{ober,i} = \alpha_{ober,i} \cdot V_{f,i} \quad (7.9)$$

7.3.2 Simulering av skredsannolikhet

I avsnitten ovan har beskrivits hur tidsberoende variabler kan uppskattas. Med kännedom om dessa kan därefter skredsannolikhetens tidsberoende beräknas med Monte Carlo-simulering som

$$f_{i,j} = (\eta_{ber,i})_j \cdot (\eta_{ober,i})_j \cdot \mu_{f,i} \quad (7.10)$$

där i betecknar år och j en simulering. För att säkerställa det rätta förhållandet för korrelationen mellan olika år används simulerade sannolikheter p_j för att simulera η_{ber} , dvs. samma sannolikhet för en simulering j för varje år medan η_{ober} simuleras med en unik sannolikhet $p_{i,j}$ för varje simulering och år. Som resultat av simuleringen erhålls en uppsättning simulerade mobiliseringsgrader $f_{i,j}$. Genom analys huruvida $f_{i,j} > 1$ är större än eller mindre än 1 och summering av utfallen $f > 1$ kan skredsannolikheten beräknas utifrån olika antaganden, t ex skredsannolikheten ett enskilt år i eller sannolikheten för en tidsperiod fram till år i . Korrelationen mellan intilliggande år erhålls som

$$korr_i = \alpha_{ber,i}^2 \quad (7.11)$$

7.3.3 Kommentar

I den beskrivna metodiken för att beskriva tidsberoendet såväl med hänsyn till kontinuerliga förändringar över tiden som till osäkerhetens variation med tiden utnyttjas beräkningar av skredsannolikheten med FORM. Resultatet av en sådan analys är dels ett värde på säkerhetsindex β men också på sensitivitetsfaktorerna α . För att kunna utnyttja beräkningen för att beskriva tidsberoendet enligt ovan måste såväl värdena på β som sensitivitetsfaktorerna α vara beräknade för en årlig sannolikhet. Detta erhålls automatiskt om de tidsberoende variablerna beskrivs med en årsvis fördelning, t ex den årsvisa fördelningen för lågvatten i älven.

Om man däremot istället för att beskriva de tidsberoende variablerna som stokastiska variabler ansätter deterministiska värden på dem bör man inte använda den föreslagna metodiken. I detta fall kommer $\alpha_{ober,i} = 0$ varför $\eta_{ober,i}$ enligt Ekvation 7.2 kommer att anta det konstanta värdet 1 vilket gör beräkningen i praktiken meningslös och överflödig.

Oaktat vad som sägs ovan kan man naturligtvis för alla osäkra variabler, vilka har liten inverkan på beräkningsresultatet, i förenklande syfte ansätta dessa som lämpligt valda deterministiska värden. För tidsberoende variabler måste vid valet av sådana värden hänsyn tas till vilken referenstid som beräkningen avser. Huruvida ett sådant val är en förenkling jämfört med att beskriva variablerna stokastiskt kan diskuteras.

7.3.4 Exempel

I avsnitt 3.8 gavs ett exempel på kontinuerlig variation med tiden i form av olika scenarier för erosion. I avsnitt 7.1 gavs ett motsvarande exempel för osäkerhetens variation med tiden. Vill man kombinera dessa exempel kan man göra det enligt den modell för Monte-Carlosimulering som beskrivits ovan. Nedan kombineras exemplet i avsnitt 7.1 med scenariot med 1m bottenerosion från avsnitt 3.8. Vidare antas att skredsannolikheten analyseras över en period om 100 år. Utifrån analysen av första året erhålls följande värden.

$$F_1 = 1,49, V_{F,1} = V_{f,1} = 13,5\% \text{ och } \alpha_{ober,0} = 0,31$$

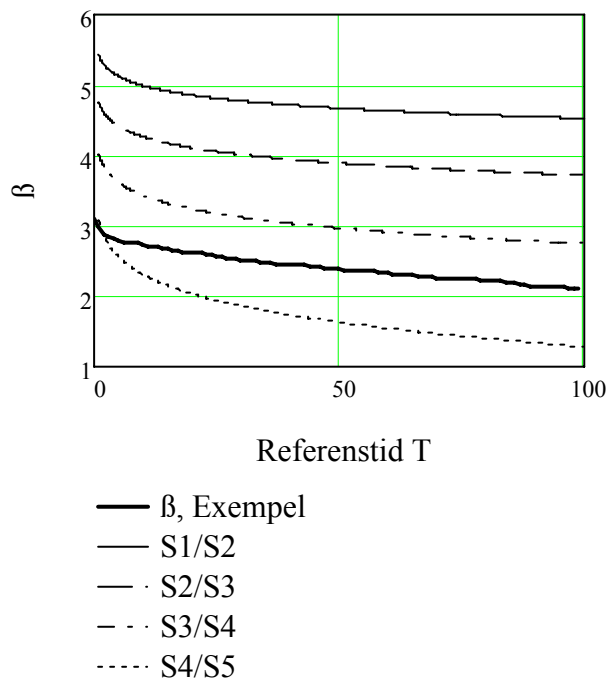
och med hänsyn till att man genom erosion får en högre och brantare slänt får sista året följande värden

$$F_{100} = 1,42, V_{F,100} = V_{f,100} = 13,2\% \text{ och } \alpha_{ober,0} = 0,33.$$

Följande resultat erhålls genom simuleringen:

- Säkerhetsindex för första året $\beta_1 = 2,9$ och efter 100 år $\beta_{100} = 2,0$.
- Korrelationen mellan åren är ganska konstant cirka 0,9.

Resultatet av simuleringen sammanfattas i Figur 7.5.



Figur 7.5. Exempel på förändring av säkerhetsindex β med tiden. Kombination av kontinuerliga förändringar med tiden och variation av osäkerhet över tid.

I detta fall med hänsyn till erosion hamnar slänten i sannolikhetsklass 4, dvs. för detta exempel ingen förändring jämfört med fallet utan erosion, se Figur 7.4.

7.4 Tidsberoende skredsannolikhet kombinerat med konsekvenser av skred

När man beskriver risker i samband med sannolikhetsberäkningar beskrivs risken ofta som förväntad skada, dvs. produkten av skredsannolikheten och konsekvenserna av ett skred. Även om detta angreppssätt är matematiskt enkelt innebär det ofta praktiska svårigheter. Detta skall emellertid inte behandlas här utan beskrivningen nedan avser bara hur man kan behandla den komplikation som det innebär att sannolikheten för skred förändras med tiden.

Utmärkande för analys av sannolikheten för skred för lerslänter typ Göta älvdalen är att allvarligare skred i en slänt endast inträffar en gång. Efter ett skred vidtas normalt åtgärder för att det inte skall inträffa igen. Vid en riskanalys behöver man därför bara kombinera sannolikheten för ett skred med konsekvenserna vid samma tillfälle. I dessa ingår då även kostnader för att förhindra framtida skred. Vid en tidsberoende skredsannolikhet behöver man därför även ta hänsyn till konsekvensernas eventuella tidsberoende. En vanlig modell är att man diskonterar konsekvenserna för ett skred vid ett framtida tillfälle till ett nuvärde. Risken, uttryckt som skredsannolikheten multiplicerad med en konsekvenskostnad, för ett givet år blir då ökningen av den ackumulerade skredsannolikheten jämfört med föregående år multiplicerat med nuvärdet för det aktuella året. Den totala risken för en tidsperiod erhålls sedan genom summering för alla år under tidsperioden.

$$Risk_{\Sigma} = p_0 \cdot K_0 + \sum_{i=1}^{N-1} (p_i - p_{i-1}) \cdot K_i \quad (7.12)$$

där $Risk_{\Sigma}$ = ackumulerad risk under N år (0 till $N-1$),
 p_i = ackumulerad sannolikhet år i och
 K_i = nuvärdet av konsekvensen år i

8 REFERENSER

- EN1990, (2002), Eurokod - Grundläggande dimensioneringsregler för bärverk. Swedish Standards Institute.
- Alén C, (1996), Application of a Probabilistic Approach in Slope Stability Analyses, *Proc. ISL '96 in Trondheim*, Balkema, Rotterdam.
- Alén, C, (1998), *On probability in geotechnics*, Random calculation models exemplified on slope stability analysis and ground-superstructure interaction, Doctoral thesis, Department of Geotechnical Engineering, Chalmers University of Technology, Göteborg.
- Alén, C., Johansson, Å., Bengtsson, P-E., Johansson, L., Sällfors, G., Berggren, B., (1999), Landslide risk analysis in infrastructure planning, *Proc. ICASP8•1999 in Sydney*, Balkema, Rotterdam.
- Alén, C., Bengtsson, P-E., Berggren, B., Johansson, L., Johansson, Å., (2000), *Skredriskanalys i Göta älvdalen-Metodbeskrivning*, Rapport 58, SGI, Linköping.
- Andersson-Sköld, (2011). *Metodik konsekvensbedömning – Känslighetsanalys, klassindelning och applicering av metodik*. SGI. Göta älvutredningen, GÄU. Delrapport 13., Linköping
- Berggren, B., Fallsvik, J., Hintze, S. and Stille, H., 1991. *LerslänTERS stabilitetsförhållanden. Riskvärdering och beslutsteori. Förslag till metod för riskvärdering*, SGI Varia 333, Linköping.
- Bergström, S., Andréasson, J., Losjö, K., Stensene, B. and Wern, L., (2011). *Hydrologiska och meteorologiska förhållanden i Göta älvdalen*, SGI. Göta älvutredningen, GÄU Delrapport 27, Linköping
- Geoteknisk fälthandbok. Allmänna råd och metodbeskrivningar, (1996). Red: Eriksson, UB, Olsson, L. Svenska Geotekniska Föreningen. SGF Rapport 1:96, Linköping.
- Janbu, N. (1954). *Stability analysis of slopes with dimensionless parameters*. Doctoral Thesis. Cambridge. Massachusetts.
- Thoft-Christensen, P. & Baker, M. J. (1982). *Structural reliability theory and its applications*, Springer-Verlag, Berlin.
- Wikimedia, (2011), Standard deviation diagram, tillgänglig:
<http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Standard_deviation_diagram_micro.svg?uselang=sv>.

BILAGA 1 – OSÄKERHET I PÅDRIVANDE TRYCK P_d

Pådrivande tryck tecknas som (Ekvation 4.20):

$$P_d = \gamma \cdot H + q - \gamma_w \cdot H_w \quad (B1.1)$$

Addera osäkerheter för geometrin i form av stokastiska variabler för släntkrön, $\Delta H_{krön}$ resp slänthöjd ΔH_{fot} och på motsvarande sätt för vattenytan ΔH_w . Samtliga dessa variabler har medelvärde 0. Osäkerheten ges som osäkerheten för de aktuella nivåerna, dvs $z_{krön}$, z_{fot} resp H_w . Ekvationen för P_d kan då skrivas om som:

$$P_d = \gamma \cdot (H + \Delta H_{krön} + \Delta H_{fot}) + q - \gamma_w \cdot (H_w + \Delta H_w + \Delta H_{fot}) \quad (B1.2)$$

med de stokastiska variablerna

$$\Delta H_{krön} = Fd(0, \sigma_{zkrön}), \quad \Delta H_{fot} = Fd(0, \sigma_{zfot}), \quad \Delta H_w = Fd(0, \sigma_{zw})$$

och där $Fd(\mu, \sigma)$ betecknar en fördelning. Dessutom gäller på samma sätt att

$$\gamma = Fd(\mu_\gamma, \sigma_\gamma), \quad q = Fd(\mu_q, \sigma_q) \quad \text{medan } H, H_w \text{ och } \gamma_w \text{ räknas som deterministiska.}$$

Ekvation B1.2 kan skrivas om som

$$P_d = \gamma \cdot (H + \Delta H_{krön}) + q - \gamma_w \cdot (H_w + \Delta H_w) + (\gamma_{fix} - \gamma_w) \cdot \Delta H_{fot} \quad (B1.3)$$

Omskrivningen innebär att P_d blir en summa av fyra oberoende termer genom att tungheten γ sätts till ett fixt värde i sista termen. Det är en approximation något på osäkra sidan eftersom det finns en positiv korrelation med första termen. Standardavvikelsen för en produkt kan tecknas som

$$\sigma_{xy}^2 = V_{xy}^2 \cdot \mu_{xy}^2 \approx (V_x^2 + V_y^2) \cdot (\mu_x^2 \cdot \mu_y^2) = \left(\frac{\sigma_x^2}{\mu_x^2} + \frac{\sigma_y^2}{\mu_y^2} \right) \cdot (\mu_x^2 \cdot \mu_y^2) = \sigma_x^2 \cdot \mu_y^2 + \sigma_y^2 \cdot \mu_x^2 \quad (B1.4)$$

Detta ger för standardavvikelsen för P_d

$$\sigma_{Pd} = \sqrt{\sigma_\gamma^2 \cdot H^2 + \sigma_{zkrön}^2 \cdot \mu_\gamma^2 + \sigma_q^2 + \sigma_{zw}^2 \cdot \gamma_w^2 + (\mu_\gamma - \gamma_w)^2 \cdot \sigma_{zfot}^2} \quad (B1.5)$$

BILAGA 2 – OSÄKERHET I STABILITETSTAL N

Nedan ges en enkel diagrammetod för att uppskatta osäkerheten i stabilitetstalet N. Stabilitetstalet N är en funktion av släntlutning och glidlytans djup. För en given glidlyta, dvs. med givet djup är därför endast osäkerheten relaterad till släntlutningen. Standardavvikelsen för N kan skrivas som

$$\sigma_N = \frac{\partial N}{\partial b} \cdot \sigma_b \quad (\text{B2.1})$$

vilket ger

$$V_N = \frac{\partial N}{\partial b} \cdot \frac{1}{N} \cdot V_b \cdot \mu_b \quad (\text{B2.2})$$

$b = \frac{B}{H}$ ger

$$V_b \approx \sqrt{\left(\frac{\sigma_B}{\mu_B}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_H}{\mu_H}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{xkrön}^2 + \sigma_{xfot}^2}{\mu_B^2}\right) + \left(\frac{\sigma_{zkrön}^2 + \sigma_{zfot}^2}{\mu_H^2}\right)} \quad (\text{B2.3})$$

Och

$$\mu_b \approx \frac{\mu_B}{\mu_H} \quad (\text{B2.4})$$

N för en bascirkel ges av Ekvation 4.14. För kvoten mellan derivatan och N erhålles

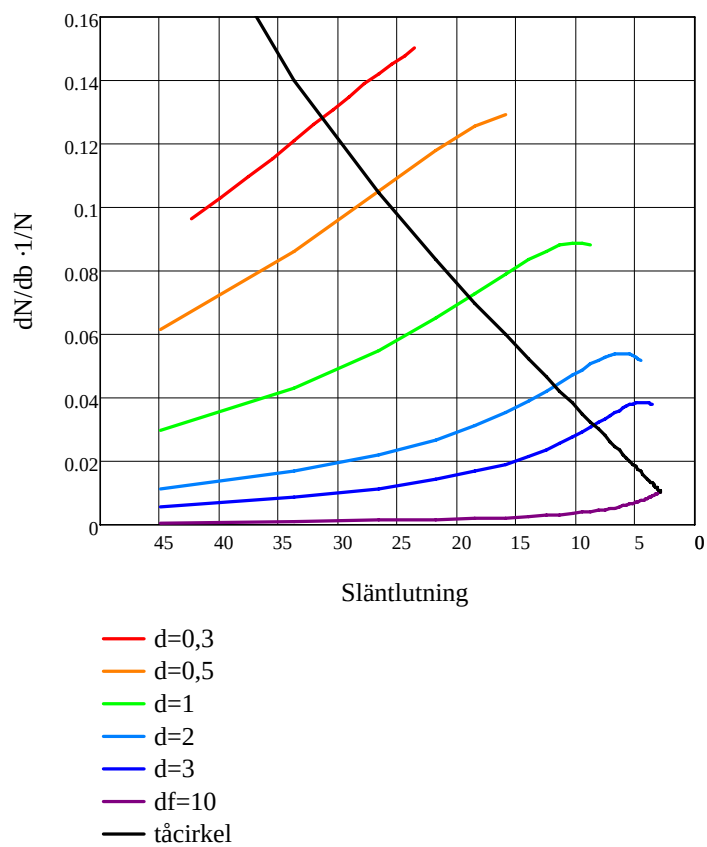
$$\frac{\partial N}{\partial b} \cdot \frac{1}{N} = \frac{2 \cdot b}{12 \cdot (d^2 + 2 \cdot d \cdot z + z) - (b^2 + 4)} \quad (\text{B2.5})$$

Begränsning av N för farligare tåcirkel ges av Ekvation 4.15. På samma sätt kan kvantiteten $dN/db \cdot 1/N$ beräknas för denna ekvation som:

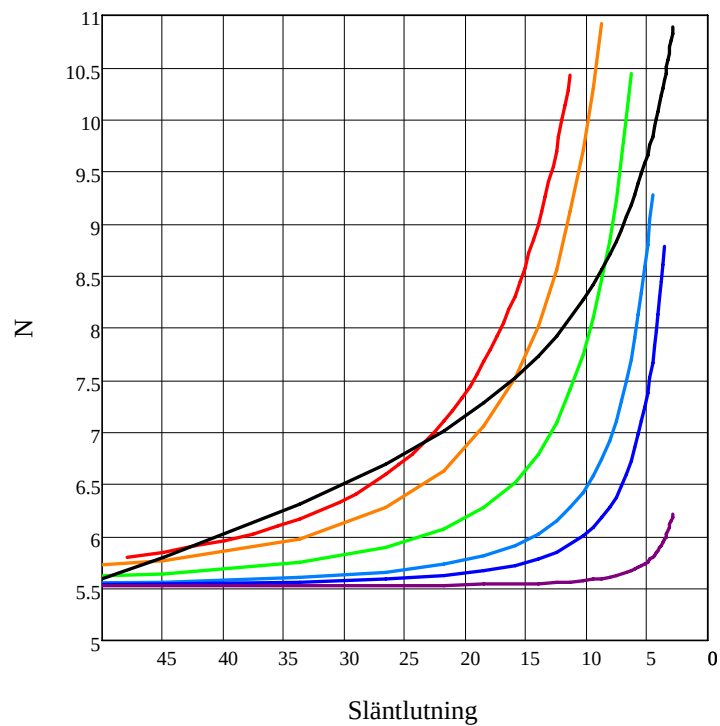
$$\frac{\partial N_{td}}{\partial b} \cdot \frac{1}{N_{td}} \approx \frac{0,9 \cdot \arctan(1/b)^{2,7} + 1}{0,8 \cdot \arctan(1/b)^{1,2} \cdot (b^2 + 1)} \cdot \frac{1}{5,5 \cdot \arctan(1/b)^{-0,22} - 0,45 \cdot \arctan(1/b)^{2,5} + 0,25} \quad (\text{B2.6})$$

Ekvation B2.5 och B2.6 sammanfattas i Figur B2.1a för farligaste glidlyta på samma sätt som stabilitetstalet N, Figur B.2.1b.

Variationskoefficienten för N ges sedan av produkten av kvantiteten i Figur B.2.1a (Ekvation B2.5 resp. B2.6), variationskoefficienten V_b (Ekvation B2.3) och medelvärde μ_b (Ekvation B2.4).



Figur B2.1a. Kvantiteten $\frac{\partial N}{\partial b} \cdot \frac{1}{N}$ som funktion av släntlutning.



Figur B2.1b. Stabilitetstal N som funktion av släntlutning.

Exempel:

H=10m, B=30m och D=6m

$\sigma_{\text{xkrön}}=1\text{m}$, $\sigma_{\text{xfot}}=1\text{m}$, $\sigma_{\text{zkrön}}=0,5\text{m}$, $\sigma_{\text{zfot}}=0,5\text{m}$

Lösning:

Släntlutning = $\arctan(10/30) = 18,5^\circ$ och $d = D/H = 0,6$ ger enligt Figur B2.1b

$$\frac{\partial N}{\partial b} \cdot \frac{1}{N} = 0,11$$

Ekv B 2.3 ger

$$V_b = \sqrt{\left(\frac{1^2 + 1^2}{30^2}\right) + \left(\frac{0,5^2 + 0,5^2}{10^2}\right)} = 8,5\%$$

Ekv B2.4 ger

$$\mu_b = \frac{30}{10} = 3$$

samt slutligen V_N enligt Ekv B2.2

$$V_N = 0,11 \cdot 0,085 \cdot 3 = 3\%$$

BILAGA 3 – SENSITIVITETSFAKTORERNA α_i

Nedan redovisas storlek på sensitivitetsfaktorerna α_i för fallet att säkerhetsmarginalen beskrivs som logaritmen för säkerhetsfaktorn

$$M = \ln F \quad (\text{B3.1})$$

Säkerhetsfaktorn F är formulerad som

$$F = \eta_{\text{modell}} \cdot \frac{N \cdot c}{P_d} \quad (\text{B3.2})$$

Vilket ger

$$M = \ln \eta_{\text{modell}} + \ln N + \ln c - \ln P_d \quad (\text{B3.3})$$

Sensitivitetsfaktorn α_i i FORM beskrivs normalt för normalfördelade variabler som

$$\alpha_i = - \frac{\partial M / \partial X_i \cdot \sigma_{X_i}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\partial M / \partial X_i \cdot \sigma_{X_i})^2}} \quad (\text{B3.4})$$

För aktuell formulering av säkerhetsmarginalen med lognormalfördelade variabler så motsvarar därför variablerna X_i de transformerade variablerna:

$\ln \eta_{\text{modell}}, \ln N, \ln c$ resp. $\ln P_d$

och med standardavvikelserna

$$\sigma_{\ln \eta_{\text{modell}}} \approx V_{\eta_{\text{modell}}}, \sigma_{\ln N} \approx V_N, \sigma_{\ln c} \approx V_c \text{ resp } \sigma_{\ln P_d} \approx V_{P_d}.$$

För de partiella derivatorna fås de enkla uttrycken

$$\partial M / \partial \ln \eta_{\text{modell}} = 1 \quad (\text{B3.5})$$

$$\partial M / \partial \ln N = 1 \quad (\text{B3.6})$$

$$\partial M / \partial \ln c = 1 \quad (\text{B3.7})$$

$$\partial M / \partial \ln P_d = -1 \quad (\text{B3.8})$$

Täljarna enligt ekvation B3.4 för sensitivitetsfaktorerna α_i blir

$$\partial M / \partial \ln \eta_{\text{modell}} \cdot \sigma_{\ln \eta_{\text{modell}}} = V_{\eta_{\text{modell}}} \quad (\text{B3.9})$$

$$\partial M / \partial \ln N \cdot \sigma_{\ln N} = V_N \quad (\text{B3.10})$$

$$\partial M / \partial \ln c \cdot \sigma_{\ln c} = V_c \quad (\text{B3.11})$$

$$\partial M / \partial \ln P_d \cdot \sigma_{\ln P_d} = -V_{Pd} \quad (\text{B3.12})$$

Nämnaren i ekvation B.3.4 blir

$$\sqrt{\sum_{i=1}^4 (\partial M / \partial X_i \cdot \sigma_{X_i})^2} = \sqrt{(V_{\eta_{modell}})^2 + (V_N)^2 + (V_c)^2 + (V_{Pd})^2} = V_F \quad (\text{B3.13})$$

Vilket med stöd av ekvationerna B3.4 och B3.9 till B3.13 ger

$$\alpha_{\eta_{modell}} = -\frac{V_{\eta_{modell}}}{V_F} \quad (\text{B3.14})$$

$$\alpha_N = -\frac{V_N}{V_F} \quad (\text{B3.15})$$

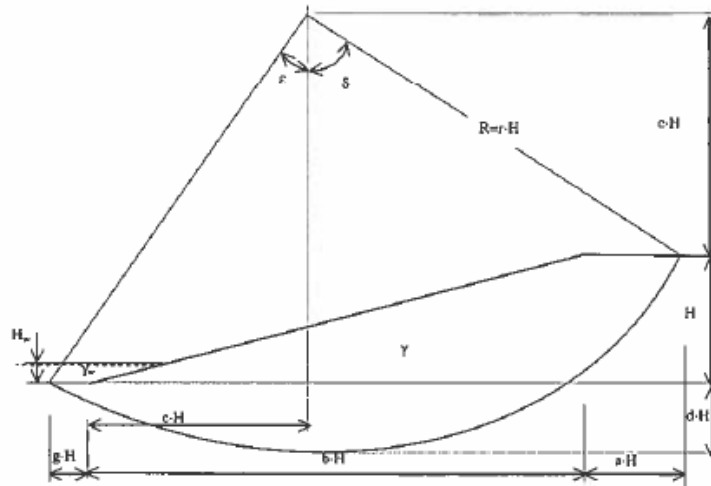
$$\alpha_c = -\frac{V_c}{V_F} \quad (\text{B3.16})$$

$$\alpha_{Pd} = \frac{V_{Pd}}{V_F} \quad (\text{B3.17})$$

BILAGA 4 – ANALYTISK BERÄKNING AV SÄKERHETSAKTOREN FÖR IDEALISERAD SLÄNT

Ur Alén et al, 2000, bilaga A

För en enkel slänt enligt nedan kan pådrivande moment beräknas med vätskeanalogien.



Figur A4. Beteckningar för beräkning av pådrivande och mothållande moment.

Med beteckningar enligt Figur A4 erhålls

$$M_{\gamma} = \gamma \cdot H^3 \cdot \left(\frac{g^2}{2} + g \cdot c + \frac{e}{2} + \frac{1}{3} + \frac{b \cdot c}{2} - \frac{b^2}{6} \right) \quad (\text{A-1})$$

På motsvarande sätt erhålls för minskningen av pådrivande moment av yttre vattentryck

$$M_w = \gamma_w \cdot H_w \cdot H^2 \cdot \left(\frac{g^2}{2} + g \cdot c \right) + \gamma_w \cdot H_w \cdot H \cdot \frac{(b \cdot c + e + 1)}{2} - \gamma_w \cdot H_w^3 \cdot \frac{(b^2 + 1)}{6} \quad (\text{A-2})$$

Mothållande moment av jordens skjuvhållfasthet blir

$$M_{c_u} = (\delta + \varepsilon) \cdot r^2 \cdot H^2 \cdot \overline{c_u} \quad (\text{A-3})$$

där beteckningen $\overline{c_u}$ används för att understryka att det är det genomsnittliga värdet av skjuvhållfastheten längs med glidytan, som skall användas i beräkningen.

Subrutin i Mathcad för att beräkna F_c enligt ovan

$$\eta_q := \frac{q}{\gamma \cdot H} \quad \eta_w := \frac{10}{\gamma} \quad h_w := \frac{H_w}{H} \quad \eta_{cu} := \frac{c_u}{\gamma \cdot H}$$

$$F_c(\eta_q, \eta_w, h_w, \eta_{cu}, d, b, x, z) := \begin{cases} e \leftarrow z - 1 \\ r \leftarrow z + d \\ c \leftarrow x \\ g \leftarrow [d \cdot (2 \cdot z + d)]^{\frac{1}{2}} - c \\ a \leftarrow \sqrt{(z + d)^2 - (z - 1)^2} - b + c \\ R \leftarrow \eta_{cu} \cdot r^2 \cdot \left(\text{sign}(c) \cdot \text{asin}\left(\frac{c + g}{r}\right) + \text{acos}\left(\frac{e}{r}\right) \right) \\ E_\gamma \leftarrow \frac{g^2}{2} + g \cdot c + \frac{e}{2} + \frac{1}{3} + \frac{b \cdot c}{2} - \frac{b^2}{6} \\ E_q \leftarrow \eta_q \cdot a \cdot \left(b - c + \frac{a}{2} \right) \\ E_w \leftarrow \eta_w \cdot h_w \cdot \left[h_w \cdot \left(\frac{b^2 + 1}{6} \right) - \left(\frac{b \cdot c + e + 1}{2} \right) \right] - \left(\frac{g^2}{2} + g \cdot c \right) \\ f_c \leftarrow \frac{E_\gamma + E_q + E_w}{R} \\ F_c \leftarrow f_c^{-1} \end{cases}$$

Tåcirklar: För rotationscentrum till vänster om släntfoten, dvs med c negativt måste ε vara negativt. Kan göras genom att ε beräknas som

$$\varepsilon = -\text{asin}\left(\frac{c + g}{r}\right) \quad \text{men} \quad \varepsilon = \text{asin}\left(\frac{c + g}{r}\right) \quad \text{om } c \text{ positivt}$$

BILAGA 5 - EXEMPEL – BERÄKNING I MATHCAD MED METODIK A

Här presenteras beräkningar för 4 sektioner som beräknats med MathCad och metodik del A:

1. Sektion 1, odränerad analys, glidyta C enligt avsnitt 6.3.
2. Sektion 2, odränerad analys, glidyta med lägst F
3. Sektion 2, kombinerad analys, glidyta med lägst F
4. Sektion 3, odränerad analys, glidyta med lägst F
5. Sektion 4 (från BVV), odränerad analys, glidyta med lägst F

B5.1 Sektion 1, odränerad analys, glidyta C

Nedan följer beräkningen av långa slänten, C , i sektion km 1 enligt beskrivning i avsnitt 6.3 och med indata enligt Tabell 6.7. I beräkningen används den metodik som beskrivs i kapitel 4.

I MathCad markeras parametrar där man själv anger ett värde med $:=$, t.ex. $H:=8$ innebär att användaren har matat in höjden 8 m. Vanligt likhetstecken anger beräkningsresultat.

Sektion: 1
 Glidyta: C, lång glidyta
 Analysmetod: odränerad
 Handläggare: Stefan Falemo
 Datum: 110927



Kalibrering av modell - Deterministisk beräkning

Indata Medelvärden vid β -beräkning

Perm last

Slänt

$$H := 32.0$$

$$B := 132.4$$

$$H_{\text{max}} := 22.2$$

$$\gamma := 16.5$$

$$c_{\text{max}} := 41.4$$

$$q_0 := 0$$

Vald glidyta

Variabel last

$$D := 8.1$$

$$X := 65.0$$

$$Z := 159.6$$

Villkor för D för tåcirklar:

$$q_1 := 0.0$$

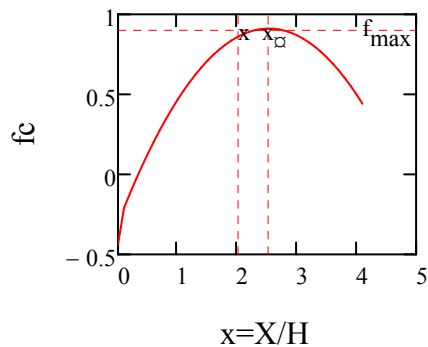
$$D_{\text{tå}} := \sqrt{X^2 + Z^2} - Z = 12.729$$

$$q_{\text{max}} := q_0 + q_1$$

Farligaste glidyta



Ej relevant för branta tåcirklar, dvs med rotationscentrum nedanför släntfot

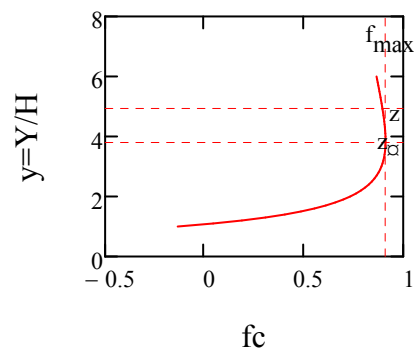
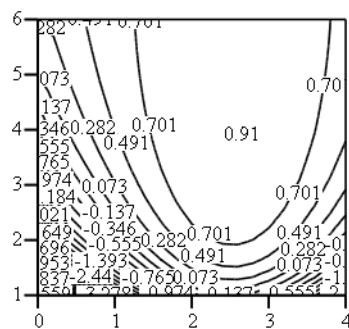


$$X_{\text{opt}} = 80.908 \quad x_0 = 2.528$$

$$Z_{\text{opt}} = 123.095 \quad z_0 = 3.847$$

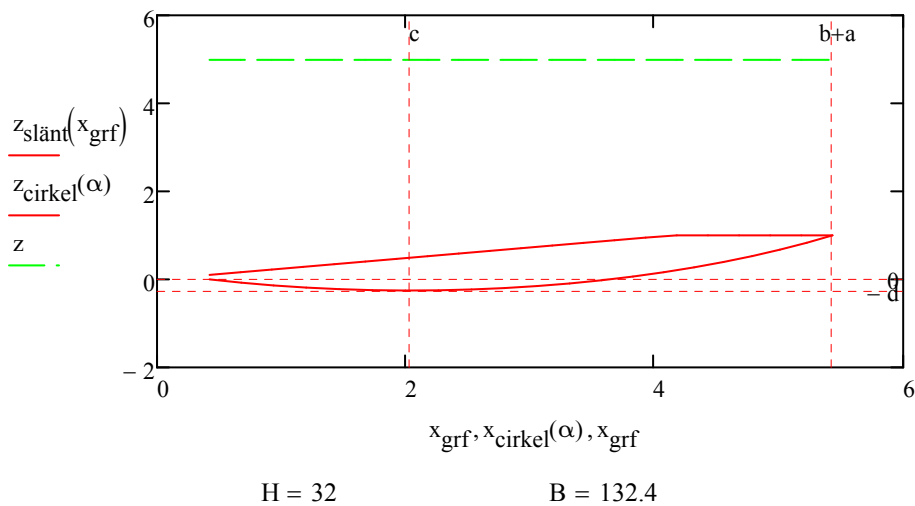
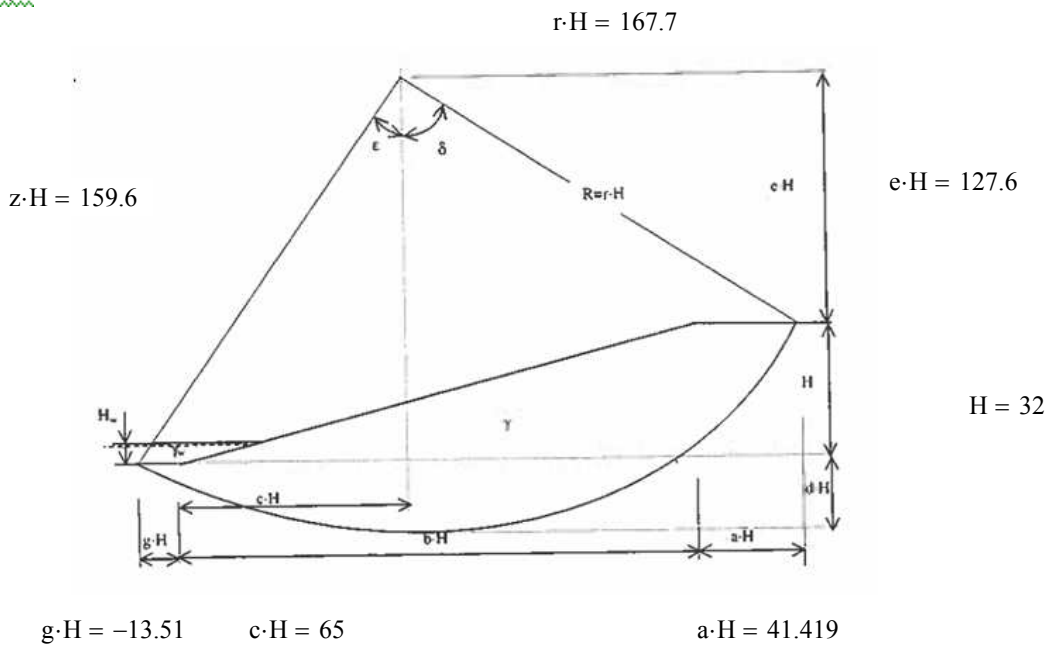
$$f_{\text{max}} = 0.911 \quad f_{\text{xz}} = 0.861$$

$$\frac{f_{\text{max}}}{f_{\text{xz}}} = 1.058 \quad \text{Kontroll}$$



f_{cont}

Uppritning cirkel



Ev justering för släntcirkel (Överkurs?)



Uppritning ekv släntcirkel



Deterministiskt resultat



Beräknad mobiliseringsgrad och säkerhetsfaktor

$$F_c = 1.161$$

$$f_c = 0.861$$

$$N_c = 8.581$$

$$P_d = 306$$

$$c_u = 41.4$$

Beräkning med vätskeanalogin

Justering mot traditionell beräkning - Modellfaktorer

$$F_{cirk} := 1.12$$

$$\eta_{klbr} := \frac{F_{cirk}}{F_c} = 0.965$$

För kalibrering
bör gälla

$$0.95 < \mu_{klbr} < 1.05$$

$$F_{\text{plan}} := 1.07$$

$$\eta_{\text{plan}} := \frac{F_{\text{plan}}}{F_{\text{cirk}}} = 0.955$$

Torrspricka

$$T_{\text{ww}} := 0$$

$$\eta_t := \frac{T}{H} = 0$$

$$\mu_t := \mu_{t0}(\eta_t, d) = 1$$

$$\eta_{\text{mod}} := \eta_{\text{klbr}} \cdot \eta_{\text{plan}} \cdot \mu_t = 0.922$$

Beräkning - Skredsannolikhet

$$V_{\text{mod}} := 0$$

Indata - osäkerheter

$$\sigma_{\text{zfot}} := 0.2$$

$$\sigma_{\text{zkrön}} := 0.2$$

$$\sigma_{\text{zw}} := 0$$

$$\sigma_H := \sqrt{\sigma_{\text{zfot}}^2 + \sigma_{\text{zkrön}}^2} = 0.283$$

$$\sigma_{\text{xfot}} := 0.4$$

$$\sigma_{\text{xkrön}} := 0.4$$

$$\sigma_{q0} := 0$$

$$\sigma_B := \sqrt{\sigma_{\text{xfot}}^2 + \sigma_{\text{xkrön}}^2} = 0.566$$

$$\sigma_{\text{cu}} := 2.5$$

$$\sigma_{\gamma} := 0.17$$

$$\sigma_{q1} := 0$$

$$\sigma_q := \sqrt{\sigma_{q0}^2 + \sigma_{q1}^2} = 0$$

$$V_{\gamma} := \frac{\sigma_{\gamma}}{\gamma} = 1.0\%$$

$$V_q := \frac{\sigma_q}{q} = 0.0\%$$

$$V_H := \frac{\sigma_H}{H} = 0.9\%$$

$$V_B := \frac{\sigma_B}{B} = 0.4\%$$

$$V_{\text{cu}} := \frac{\sigma_{\text{cu}}}{c_u} = 6.0\%$$

Resultat



Beräknade osäkerheter

Säkerhetsindex

Skredsannolikhet

$$V_{\text{Fc}} = 6.4\%$$

$$V_{\text{Nc}} = 0.5\%$$

$$\beta = 1.1$$

$$p_f = 0.1$$

$$V_{\text{mod}} = 0.0\%$$

$$V_{\text{cu}} = 6.0\%$$

$$V_{\text{Pd}} = 2.1\%$$

Sensitivitetsfaktorer

$$\alpha_{\text{zkrön}} = 0.18$$

$$\alpha_{\text{zfot}} = 0.09$$

$$\alpha_w = 0$$

$$\alpha_{\text{cu}} = 0.94$$

$$\alpha_{\text{mod}} = 0$$

$$\alpha_{\text{xkrön}} = 0.026$$

$$\alpha_{\text{xfot}} = 0.03$$

$$\alpha_{\gamma} = 0.28$$

$$\alpha_{q0} = 0$$

$$\alpha_{q1} = 0$$

$$\alpha_{\text{Nc}} = 0.084$$

$$\alpha_{\text{Pd}} = 0.33$$

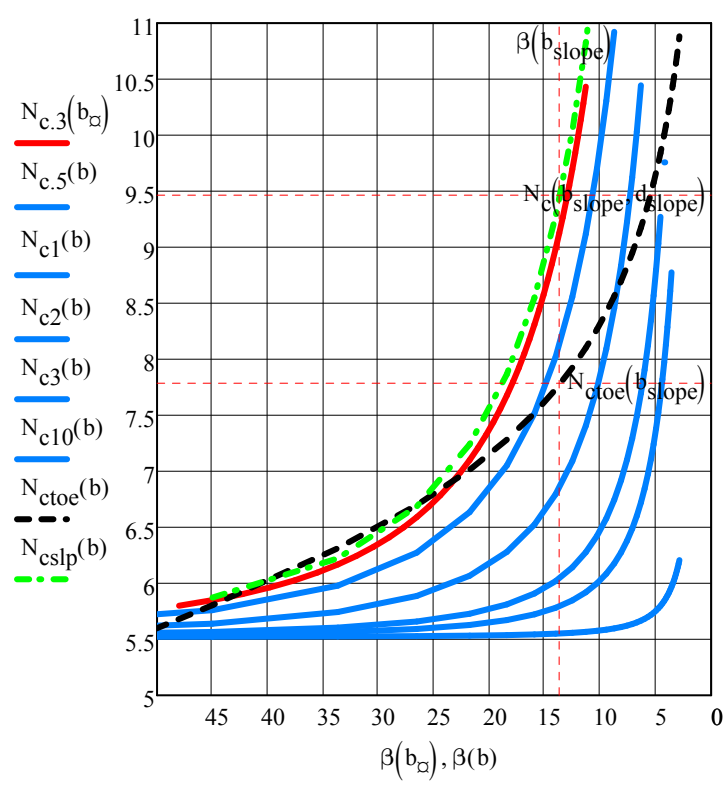
Kontroll

$$\left(\alpha_{\text{zkrön}}^2 + \alpha_{\text{zfot}}^2\right) + \left(\alpha_{\text{xkrön}}^2 + \alpha_{\text{xfot}}^2\right) + \alpha_w^2 + \left(\alpha_{q0}^2 + \alpha_{q1}^2\right) + \alpha_{\gamma}^2 + \alpha_{\text{cu}}^2 + \alpha_{\text{mod}}^2 = 1$$

$$\alpha_{\text{ober}} = 0$$

$$\alpha_{\text{ber}} = 1$$

Kontroll oppritning av "N.c-diagram"



B5.2 Sektion 2, odränerad analys, glidyta med lägst F

Sektion: 2, cirkulär, farligaste glidyta
 Analysmetod: odränerad analys
 Datum: 2011-05-09
 Handläggare: Stefan Falemo

	Indata				Utdata
Indata	Parameter	Medelvärde, μ	Standardavvikelse, σ	Variationskoefficient, V	Sensitivitetsfaktorer, α_i
	H (m)	8	$\sigma_{zfot}=0,5$ $\sigma_{zkrön}=0,5$		
	B (m)	48	$\sigma_{xfot}=1$ $\sigma_{xkrön}=1$		
	H _w (m)	6			
	γ (kN/m ³)	15,7	0,8	5 %	
	q _{permanent} (kN/m ²)	0	0		
	q _{variabel} (kN/m ²)	0			
	c _u (kPa)	16,2	1,9	19 %	0,59
	D (m)	9			
	X (m)	26			
	Z (m)	36			
	F _{c, cirkulär}	1,93			
	F _{c, optimerad}	1,86			
Utdata	F _E	1,85		20 %	
	N _c	7,5			0,07
	P _d	66			0,81
	η_{mod}	1,01			0
	β	3,1			
	P _f	0,1 %			

Kommentarer

Cu_{medel}=16,2 kPa

σ_{cu} tas fram genom diagram för utvärdering av skjuvhållfasthet:

Cu_{undre}=11 kPa (5-percentilen) i området för glidytan (-15m - +2m).

cv_{cu}= 19 % (varsiansreduktion k=0,6)

Tunghet varierar mellan 15,2-17,8 kN/m³. σ_{γ} =0,8 kN/m³ och V=5%.

$$\text{Modellfelet } \eta_{\text{mod}} = \eta_{\text{klbr}} \cdot \eta_{\text{plan}} = \frac{F_{c,\text{cirkulär}}}{F_E} \cdot \frac{F_{c,\text{optimerad}}}{F_{c,\text{cirkulär}}}$$

Beräknad av: Stefan Falemo
 Datum: 110509
 Sektion: 2, odrän, cirkulär, farligaste
 glidyta

$n := 11$ $i := 1 \dots n$

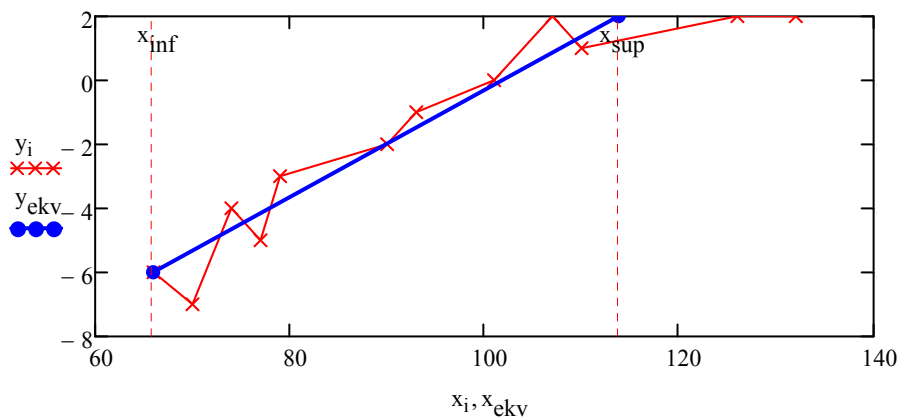
Filen behandlar bara de n+1 första pkterna (0-n). Övriga skall inte ha någon betydelse

Om beräkningen inte uppdateras. Tryck Ctrl+F9

$x_T := (66 \ 70 \ 74 \ 77 \ 79 \ 90 \ 93 \ 101 \ 107 \ 110 \ 126 \ 132)$

$y_T := (-6 \ -7 \ -4 \ -5 \ -3 \ -2 \ -1 \ 0 \ 2 \ 1 \ 2 \ 2)$

$$\begin{aligned} x &:= x_T^T & B &:= x_n - x_0 = 66 & ^\circ &\equiv \text{deg} \\ y &:= y_T^T & \underline{H} &:= y_n - y_0 = 8 \end{aligned}$$



$$x_{\text{inf}} = 65.952$$

$$x_{\text{sup}} = 113.798$$

$$H = 8$$

$$B_{\text{ekv}} = 47.847$$

$$\underline{b} := \frac{B_{\text{ekv}}}{H} = 5.981$$

$$\alpha = 9.492 \cdot ^\circ$$

$$\alpha = 0.166$$

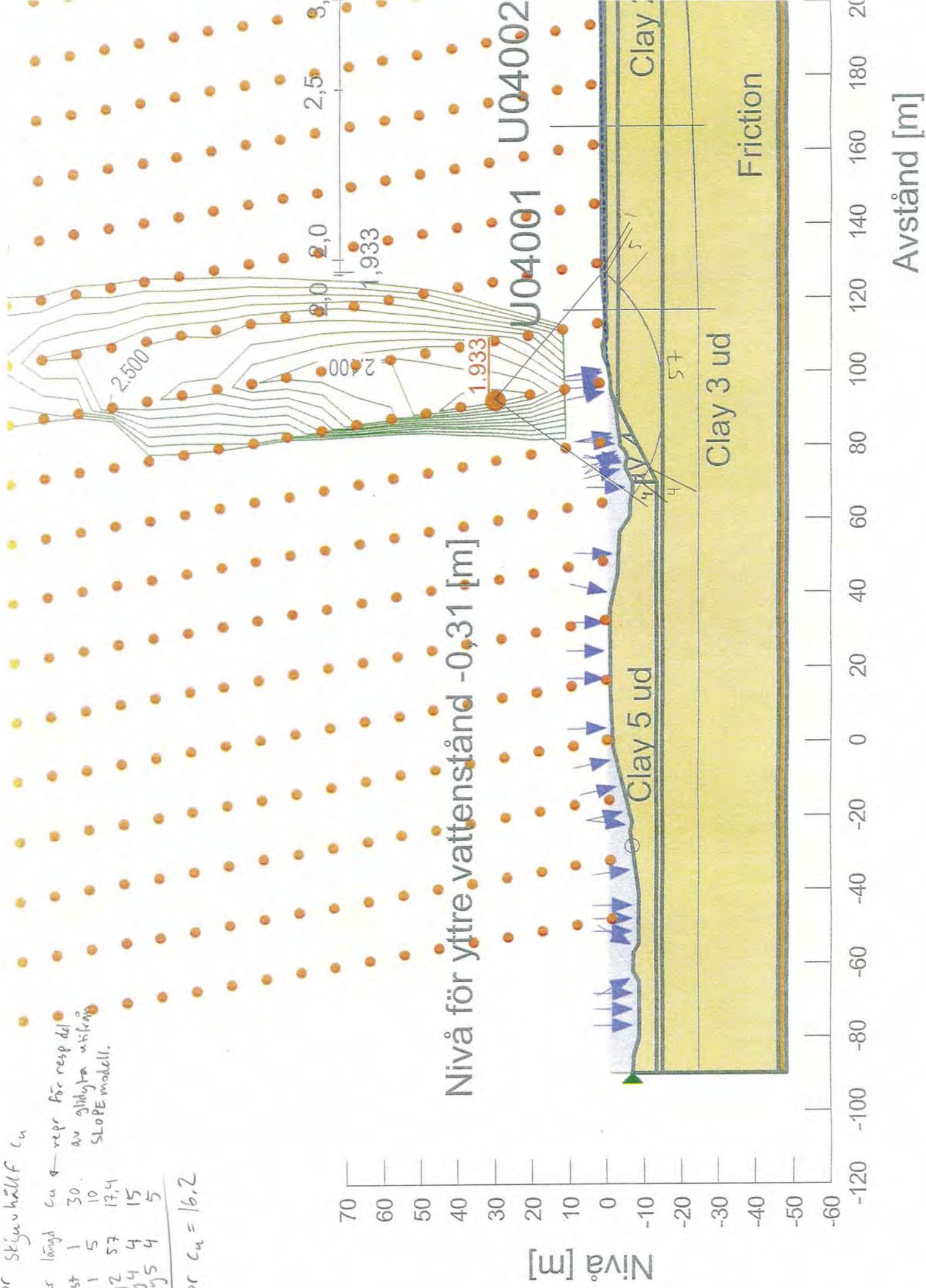


repr skjuv hållf c_u

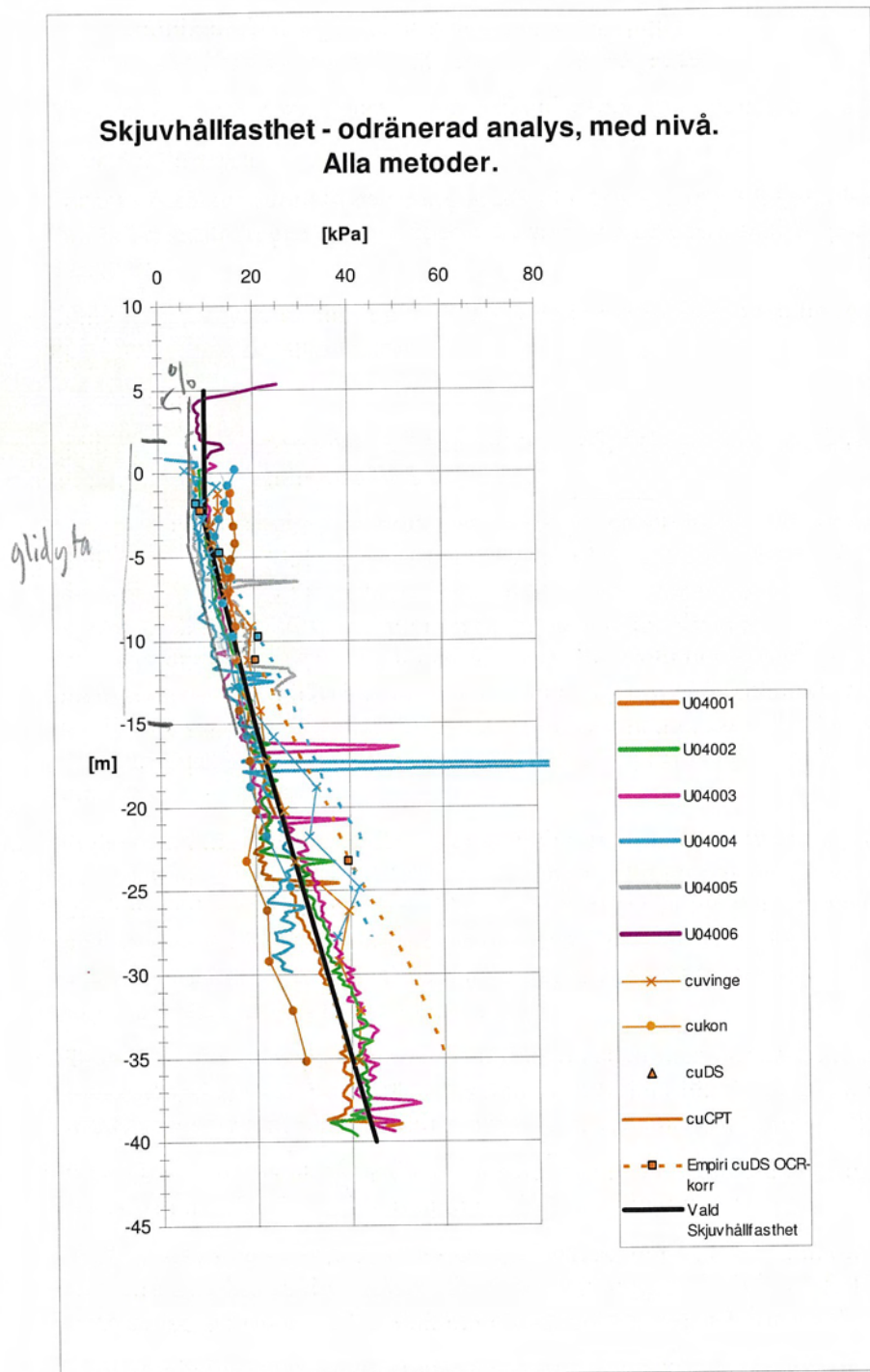
layer längd c_u ← repr för resp del
 crust 1 30
 clay 1 5 10
 clay 2 57 17,4
 clay 4 4 15
 clay 5 4 5

repr $c_u = 16,2$

Nivå för yttre vattenstånd -0,31 [m]



Stefan Falemo
11-05-09



repr skjuvhållf för glidyta

$$c_u^{\text{medel}} = 16.2 \text{ kPa}$$

$$c_u^{5\%} = 11 \text{ kPa}$$

$$\sigma_{cu}^0 = \frac{c_u^{\text{medel}} - c_u^{5\%}}{1.65} \approx 3.1 \text{ kPa}$$

$$v_{cu}^0 = 19\%$$

variansreduktion

$k = 0.6$: stor glidyta

$$v_{cu} = k \cdot v_{cu}^0 = 12\%$$

$$\sigma_{cu} = 1.9 \text{ kPa}$$

Figur 130. Utvärderad skjuvhållfasthet på land.

Tabell 216: Utvärderad skjuvhållfasthet på land, sektion 4

Nivå [m]	Skjuvhållfasthet [kPa]
5 till -3	10 kPa
-3 till -15	10 kPa + 0,83 kPa/m
-15 till -40	20 kPa + 1,25 kPa/m



Beräknad av: Stefan Falemo
Datum: 110509
Sektion: 2 odrän, cirkulär,
farligaste glidyta

Kalibrering av modell - Deterministisk beräkning

Indata Medelvärden vid β -beräkning

Slänt

$H_w := 8$

$B := 48$

$H_w := 6$

$\gamma := 15.7$

$c_u := 16.2$

$q := 0$

Vald glidyta

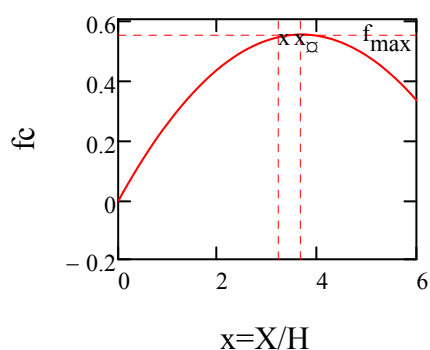
$D := 9$

$X := 26$

$Y := 36$



Farligaste glidyta

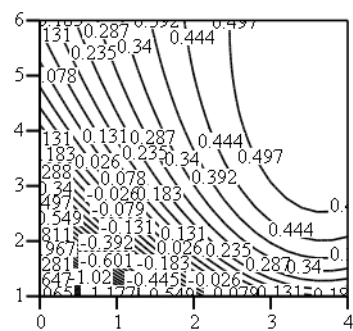


$$X_{\text{opt}} = 29.488 \quad x_{\square} = 3.686$$

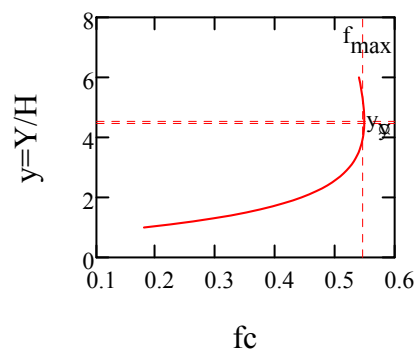
$$Y_{\text{opt}} = 36.436 \quad y_{\square} = 4.554$$

$$f_{\text{max}} = 0.549 \quad \frac{f_{\text{max}}}{f_{xy}} = 1.015$$

$$f_{xy} = 0.541$$



f_{cont}



$$F_{\text{plan}} := 1.86$$

$$\mu_{\text{plan}} := \frac{F_{\text{plan}}}{F_{\text{cirk}}} = 0.964$$

Torrspicka $\frac{T}{H} := 0 \quad \eta_t := \frac{T}{H} = 0$

$$\mu_t := \mu_{t\alpha}(\eta_t, d) = 1$$

$$\mu_{\text{mod}} := \mu_{\text{klbr}} \cdot \mu_{\text{plan}} \cdot \mu_t = 1.007 \quad \mu_{\text{mod}} = 1$$

Befräknng - Skredsannolikhet

Indata - osäkerheter

$$\sigma_{\text{zkrön}} := 0.5$$

$$\sigma_{\text{zfot}} := 0.5$$

$$\sigma_{\text{zw}} := 0$$

$$\sigma_{\text{xfot}} := 1$$

$$\sigma_{\text{xkrön}} := 1$$

$$\sigma_B := \sqrt{\sigma_{\text{xfot}}^2 + \sigma_{\text{xkrön}}^2} = 1.414$$

$$V_{\text{mod}} := 0$$

$$\sigma_{\text{cu}} := 1.9$$

$$\sigma_{\gamma} := 0.8$$

$$\sigma_q := 0$$

$$V_{\gamma} := \frac{\sigma_{\gamma}}{\gamma} = 5.1\%$$

$$V_q := \frac{\sigma_q}{q} = 0\%$$

$$V_B := \frac{\sigma_B}{B} = 2.9\%$$

$$V_{\text{cu}} := \frac{\sigma_{\text{cu}}}{c_u} = 11.7\%$$



Resultat

Beräknade osäkerheter

Säkerhetsindex

Skredsannolikhet

$$V_{\text{Fc}} = 19.9\%$$

$$V_{\text{Nc}} = 1.4\%$$

$$\beta = 3.1$$

$$p_f = 0.1\%$$

$$V_{\text{mod}} = 0\%$$

$$V_{\text{cu}} = 11.7\%$$

$$V_{\text{Pd}} = 16\%$$

Sensitivitetsfaktorer

$$\alpha_{\text{zkrön}} = 0.6$$

$$\alpha_{\text{zfot}} = 0.22$$

$$\alpha_w = 0$$

$$\alpha_{\text{cu}} = 0.59$$

$$\alpha_{\text{xkrön}} = 0.05$$

$$\alpha_{\text{xfot}} = 0.05$$

$$\alpha_{\gamma} = 0.49$$

$$\alpha_q = 0$$

$$\alpha_{\text{mod}} = 0$$

$$\alpha_{\text{Nc}} = 0.071$$

$$\alpha_{\text{Pd}} = 0.805$$

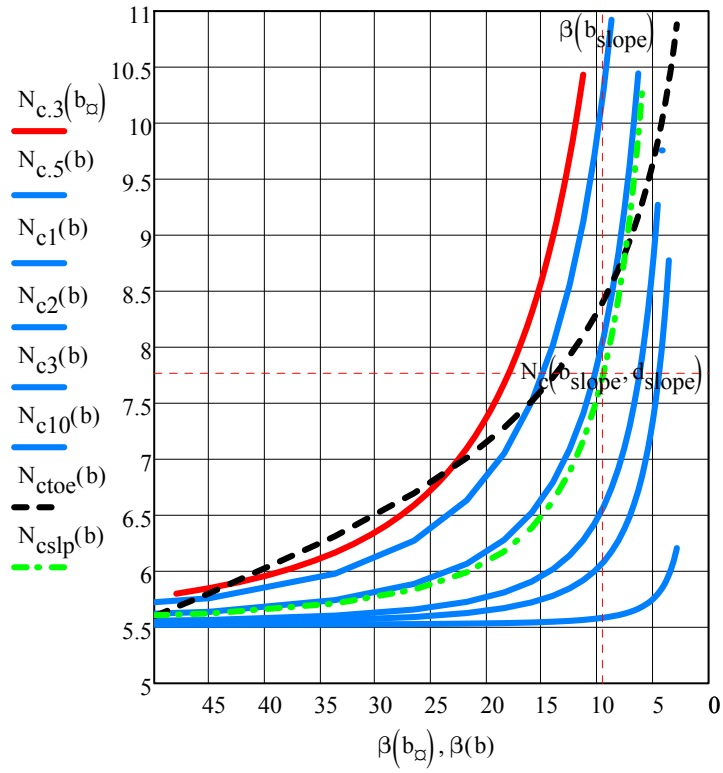
Kontroll

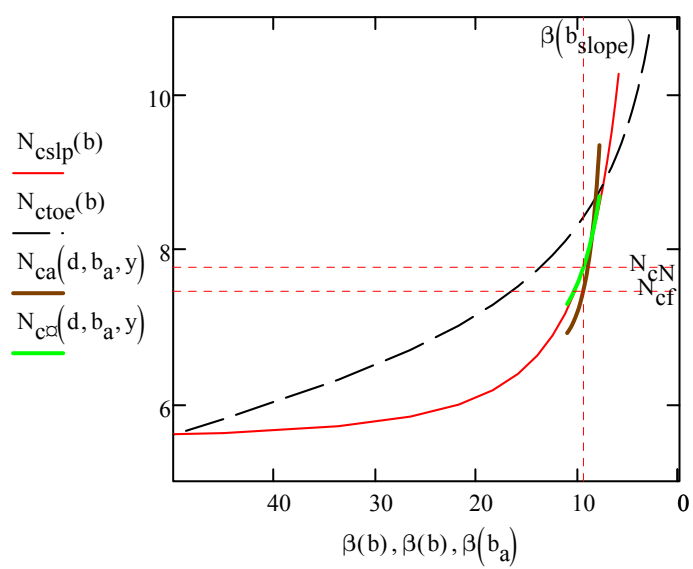
$$\left(\alpha_{\text{zkrön}}^2 + \alpha_{\text{zfot}}^2 \right) + \left(\alpha_{\text{xkrön}}^2 + \alpha_{\text{xfot}}^2 \right) + \alpha_w^2 + \alpha_q^2 + \alpha_{\gamma}^2 + \alpha_{\text{cu}}^2 + \alpha_{\text{mod}}^2 = 1$$

$$\alpha_{\text{ober}} = 0$$

$$\alpha_{\text{ber}} = 1$$

Kontroll oppritning av "N.c-diagram"





B5.3 Sektion 2, kombinerad analys, glidyta med lägst F

Sektion: 2, cirkulär farligaste glidyta
 Analysmetod: kombinerad analys
 Datum: 110621
 Handläggare: Stefan Falemo

	Indata				Utdata
Indata	Parameter	Medelvärde, μ	Standardavvikelse, σ	Variationskoefficient, V	Sensitivitetsfaktor, α_i
	H (m)	9	$\sigma_{zfot}=0,5$ $\sigma_{zkrön}=0,5$		
	B (m)	49,8	$\sigma_{xfot}=1$ $\sigma_{xkrön}=1$		
	H_w (m)	6,7			
	γ (kN/m³)	15,7	0,8	5 %	
	q_{permanent} (kN/m²)	0	0		
	q_{variabel} (kN/m²)	0	0		
	c_{komb} (kPa)	16,7	1,9	11,3 %	0,61
	D (m)	8	0		
	X (m)	35	0		
	Z (m)	53	0		
	F_{c, cirkulär}	1,81	0		
	F_{c, optimerad}	1,75	0		
Utdata	F_E	1,78		19 %	
	N_c	7,9			0,05
	P_d	74			0,79
	η_{mod}	0,983			0
	β	3,0			
	p_f	0,1 %			

Kommentarer

$$\text{Modellfelet } \eta_{mod} = \eta_{klbr} \cdot \eta_{plan} = \frac{F_{c,cirkulär}}{F_E} \cdot \frac{F_{c,optimerad}}{F_{c,cirkulär}}$$

Sehns Falerno
110525

46 900
kombinerad
cirkulär
färdigaste

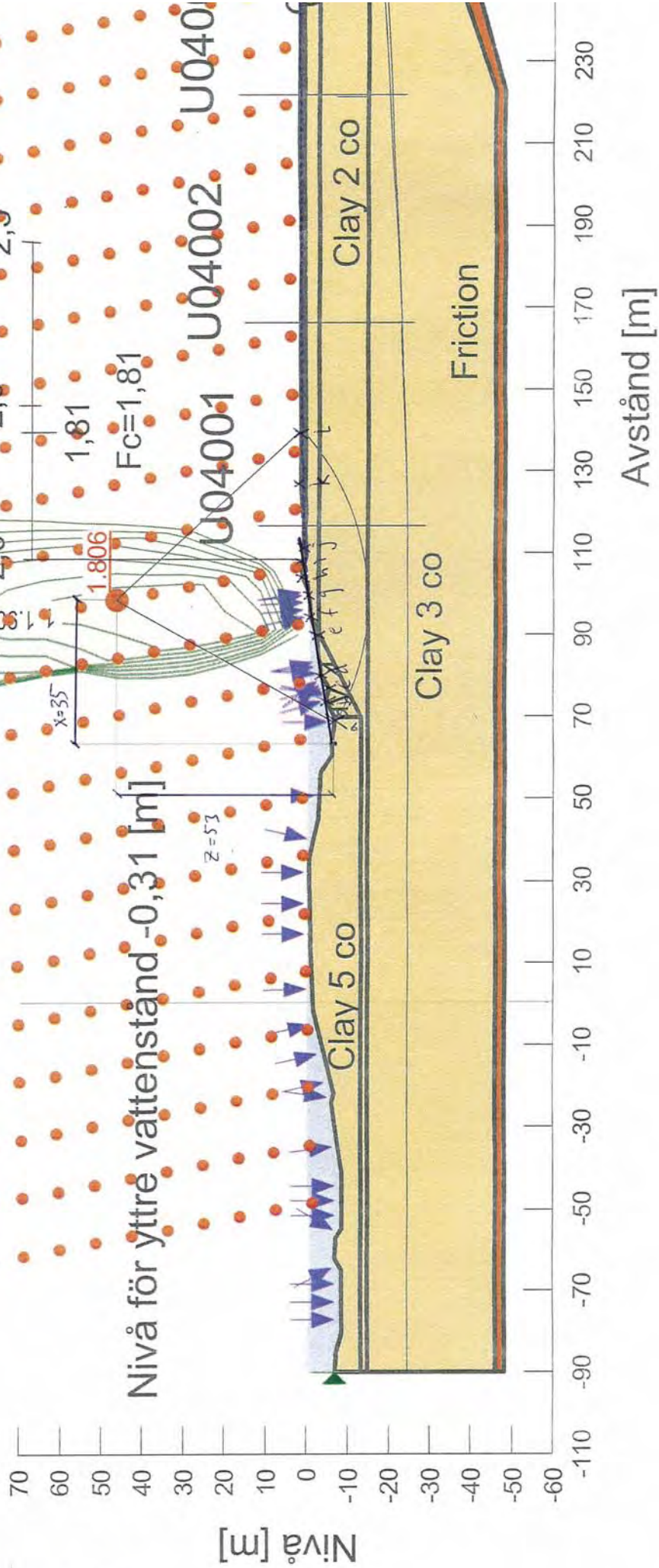
ekv slänt

bet X Z

a	68	-7
b	73	-5
c	77	-6
d	79	-3
e	89	-2
f	94	-1
g	99	0
h	104	1
i	107	2
j	111	1
k	126	2
l	139	2

H = 9

B = 49,8



Beräknad av: Stefan Falemo
 Datum: 110525
 Sektion: 2, kombinerad, cirkulär, farligaste
 glidyta

$n := 11$ $i := 1 \dots n$

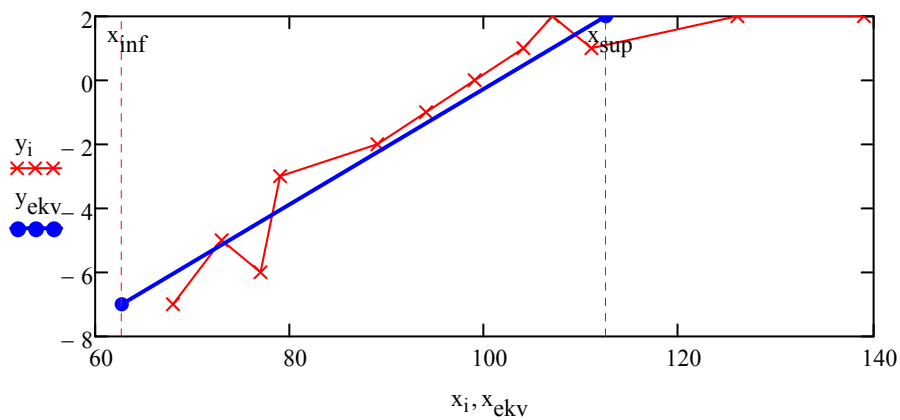
Filen behandlar bara de n+1 första pkterna (0-n). Övriga skall inte ha någon betydelse

Om beräkningen inte uppdateras. Tryck Ctrl+F9

$x_T := (68 \ 73 \ 77 \ 79 \ 89 \ 94 \ 99 \ 104 \ 107 \ 111 \ 126 \ 139)$

$y_T := (-7 \ -5 \ -6 \ -3 \ -2 \ -1 \ -0 \ 1 \ 2 \ 1 \ 2 \ 2)$

$$\begin{aligned} x &:= x_T^T & B &:= x_n - x_0 = 71 & ^\circ &\equiv \text{deg} \\ y &:= y_T^T & \underline{H} &:= y_n - y_0 = 9 \end{aligned}$$



$$x_{\text{inf}} = 62.732$$

$$x_{\text{sup}} = 112.491$$

$$H = 9$$

$$B_{\text{ekv}} = 49.759$$

$$\underline{b} := \frac{B_{\text{ekv}}}{H} = 5.529$$

$$\alpha = 10.252^\circ$$

$$\alpha = 0.179$$



Beräknad av: Stefan Falemo
Datum: 110525
Sektion: 2 kombinerad,
cirkulär, farligaste glidyta

Kombinerad hållfasthet

Indata	Slänt				
$H_w := 9$	$B := 49.8$	$H_w := 6.7$	$G_w := 1$	$\gamma := 15.7$	$\gamma_w := 10$
Vald glidyta	$H_w + G_w < H$				Odränerat - Ingen konsolidering- $q=0$
$D := 8$	$X := 35$	$Y := 53$	$q := 0$		



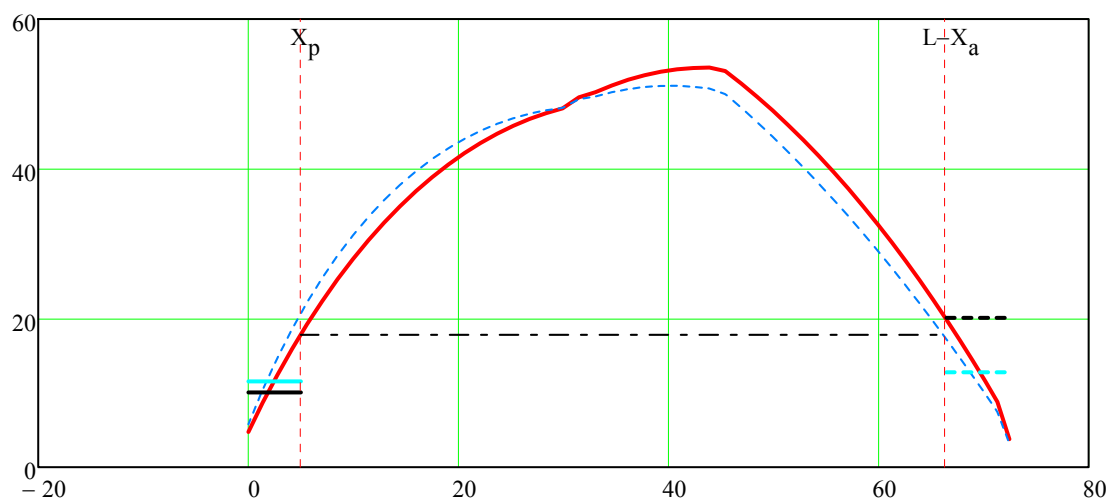
Uppritad slänt



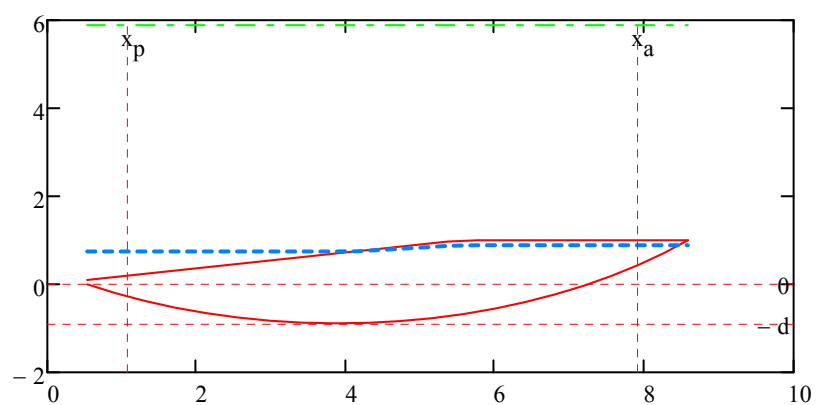
Hållfasthet				
$c'_p := 1$	$c'_a := 2$	$\phi := 30 \cdot \frac{\pi}{180}$	$F_w := 1.81$	$L = 72.449$
$c_{up} := 10$	$c_{ua} := 20$	$c_{u.med} := 17.4$	$X_p := 5$	$X_a := 6$

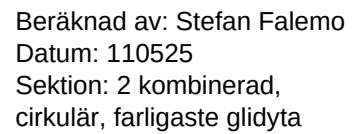


$c_{komb} = 16.668$	$c_{u.med} = 17.4$	$\frac{c_{komb}}{c_{u.med}} = 0.958$	$C_{drp}(F, h_w, g_w) = 0.824$
			$C_{dra}(F, h_w, g_w) = 1.275$



- c.dr, F
- - - c.dr F=1
- Cu.p
- - - Cu.a
- Ckomb.p
- - - Ckomb.a
- . - . Cu.mitt





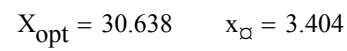
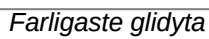
Indata Medelvärden vid β -beräkning

$$\mathbf{H} := 9$$

B := 49.8

$$H_w := 6.7$$
$$\gamma := 15.7$$
$$c_u := 16.7$$
$$q := 0$$
$$D := 8$$

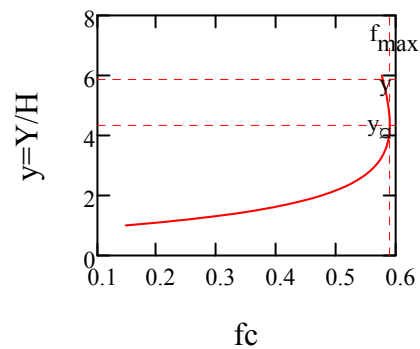
X := 35

$$Y := 53$$


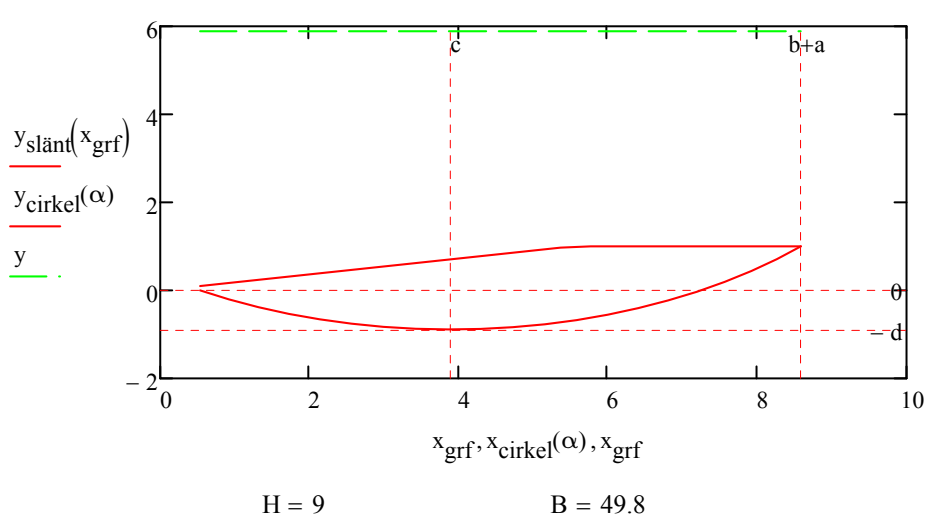
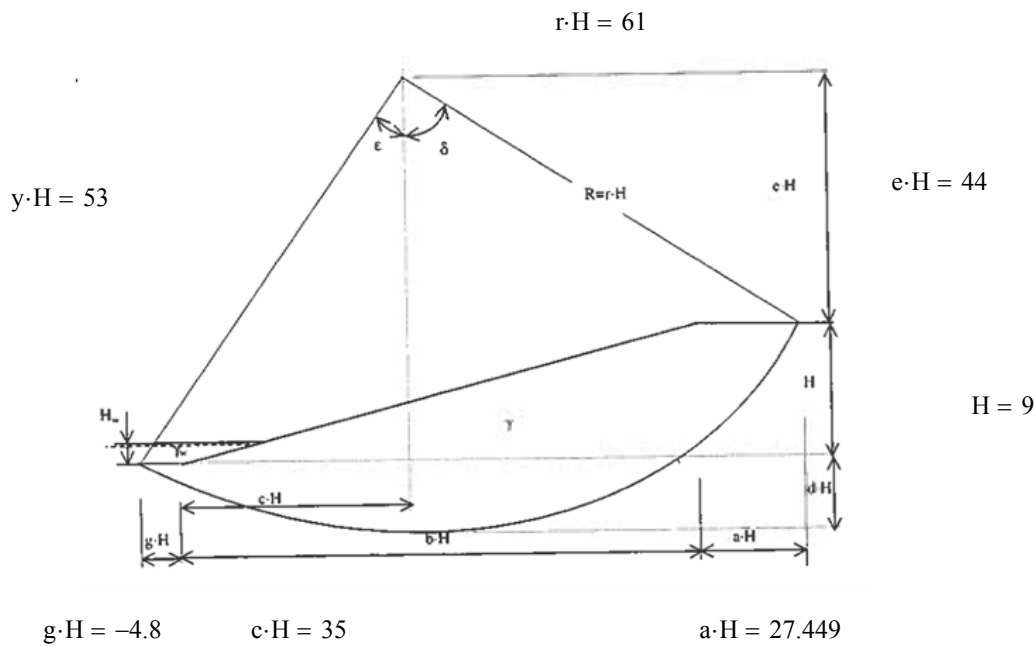
$$Y_{\text{opt}} = 39.231 \quad y_{\square} = 4.359$$

$$f_{\max} = 0.59 \quad \frac{f_{\max}}{f_{xy}} = 1.037$$

$$f_{xy} = 0.569$$

 f_{cont}

Uppritning cirkel



Justering för släntcirkel

Justering:1
Ingen justering :0

Justering := 1

H = 9

B = 49.8



Uppritning ekv släntcirkel



Deterministiskt resultat



Beräknad mobiliseringsgrad och säkerhetsfaktor

$F_c = 1.775$

$f_c = 0.563$

$N_c = 7.896$

$P_d = 74.3$

$c_u = 16.7$

Justering mot traditionell beräkning - Modellfaktorer

$F_{cirk} := 1.806$

$$\mu_{klbr} := \frac{F_{cirk}}{F_c} = 1.018$$

För kalibrering
bör gälla

$0.95 < \mu_{klbr} < 1.05$

$F_{plan} := 1.745$

$$\mu_{plan} := \frac{F_{plan}}{F_{cirk}} = 0.966$$

Torrspicka

$$\underline{\underline{T_w := 0}} \quad \eta_t := \frac{T}{H} = 0$$

$$\mu_t := \mu_{t\alpha}(\eta_t, d) = 1$$

$$\mu_{\text{mod}} := \mu_{\text{klbr}} \cdot \mu_{\text{plan}} \cdot \mu_t = 0.983$$

$$\mu_{\text{mod}} = 1$$

Beräkning - Skredsannolikhet

Indata - osäkerheter

$$\sigma_{\text{zkrön}} := 0.5$$

$$\sigma_{\text{zfot}} := 0.5$$

$$\sigma_{\text{zw}} := 0$$

$$\sigma_{\text{xfot}} := 1$$

$$\sigma_{\text{xkrön}} := 1$$

$$\sigma_B := \sqrt{\sigma_{\text{xfot}}^2 + \sigma_{\text{xkrön}}^2} = 1.414$$

$$\underline{\underline{V_{\text{mod}} := 0}}$$

$$\sigma_{\text{cu}} := 1.9$$

$$\sigma_{\gamma} := 0.8$$

$$\sigma_q := 0$$

$$V_{\gamma} := \frac{\sigma_{\gamma}}{\gamma} = 5.1\%$$

$$V_q := \frac{\sigma_q}{q} = 0\%$$

$$V_B := \frac{\sigma_B}{B} = 2.8\%$$

$$V_{\text{cu}} := \frac{\sigma_{\text{cu}}}{c_u} = 11.4\%$$



Resultat

Beräknade osäkerheter

Säkerhetsindex

Skredsannolikhet

$$V_{\text{Fc}} = 18.7\%$$

$$V_{\text{Nc}} = 0.9\%$$

$$\beta = 3$$

$$p_f = 0.1\%$$

$$V_{\text{mod}} = 0\%$$

$$V_{\text{cu}} = 11.4\%$$

$$V_{\text{Pd}} = 14.8\%$$

Sensitivitetsfaktorer

$$\alpha_{\text{zkrön}} = 0.56$$

$$\alpha_{\text{zfot}} = 0.2$$

$$\alpha_w = 0$$

$$\alpha_{\text{cu}} = 0.61$$

$$\alpha_{\text{xkrön}} = 0.033 \quad \alpha_{\text{xfot}} = 0.03$$

$$\alpha_{\gamma} = 0.52$$

$$\alpha_q = 0$$

$$\alpha_{\text{mod}} = 0$$

$$\alpha_{\text{Nc}} = 0.047$$

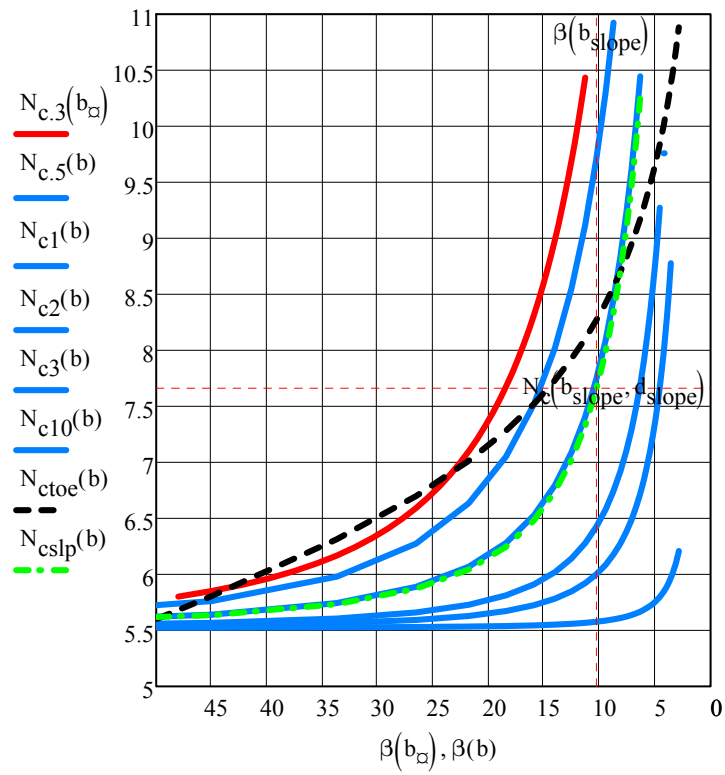
$$\alpha_{\text{Pd}} = 0.793$$

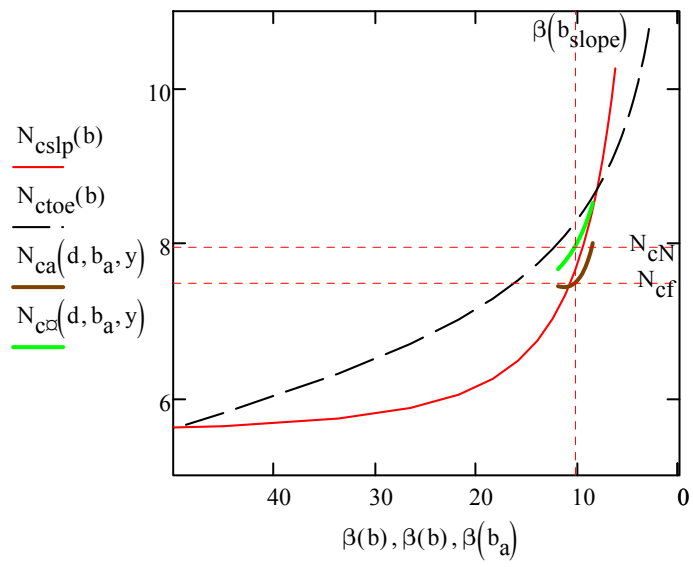
Kontroll

$$\left(\alpha_{\text{zkrön}}^2 + \alpha_{\text{zfot}}^2\right) + \left(\alpha_{\text{xkrön}}^2 + \alpha_{\text{xfot}}^2\right) + \alpha_w^2 + \alpha_q^2 + \alpha_{\gamma}^2 + \alpha_{\text{cu}}^2 + \alpha_{\text{mod}}^2 = 1$$

$$\alpha_{\text{ober}} = 0$$

$$\alpha_{\text{ber}} = 1$$





B5.4 Sektion 3, odränerad analys, glidyta med lägst F

Sektion: 3, cirkulär, farligaste glidyta
 Analysmetod: Odränerad analys
 Datum: 2011-05-10
 Handläggare: Stefan Falemo

	Indata				Utdata
Indata	Parameter	Medelvärde, μ	Standardavvikelse, σ	Variationskoefficient, V	Sensitivitetsfaktorer, α_i
	H (m)	11	$\sigma_{zfot}=0,5$ $\sigma_{zkrön}=0,5$		
	B (m)	66	$\sigma_{xfot}=1$ $\sigma_{xkrön}=1$		
	H_w (m)	7	0		
	γ (kN/m³)	16,7	0,76	5 %	
	q_{permanent} (kN/m²)	7,9	0		
	q_{variabel} (kN/m²)	0	0		
	c_u (kPa)	24	6,5	27 %	0,94
	D (m)	11	0		
	X (m)	36	0		
	Z (m)	54	0		
	F_c, cirkulär	1,48			
	F_c, optimerad	1,46			
Utdata	F_E	1,50		29 %	
	N_c	7,6			0,04
	P_d	122			0,35
	η_{mod}	0,974			0
	β	1,3			
	P_f	10 %			

Kommentarer

Den farligaste glidytan är en släntcirkel sett till hela den naturliga slänten. Det rekommenderas då att göra en ekvivalent slänt av endast den del av naturliga slänten som täcks av glidytan, d.v.s. från (-69,-7) till (-153,4).

Den cirkulära glidyten vill skära fast botten. I detta fall testas först att öka D för att motsvara förhållandena om fast botten ej hade funnits. Detta ger i de flesta fall en högre säkerhetsfaktor, men inte avsevärt högre. Avståndet D mäts i z-led från släntfot till lägsta punkten på cirkeln. Resultatet av beräkningen visas ovan.

Den del av den yttre lasten som ligger inom glidyten räknas om till en ekvivalent last.

$$\text{Modellfelet } \eta_{\text{mod}} = \eta_{\text{klbr}} \cdot \eta_{\text{plan}} = \frac{F_{c,\text{cirkulär}}}{F_E} \cdot \frac{F_{c,\text{optimerad}}}{F_{c,\text{cirkulär}}}$$

Beräkning av Stefan Falemo 110510
 Sektion 3 odrän cirkulär farligaste glidyta

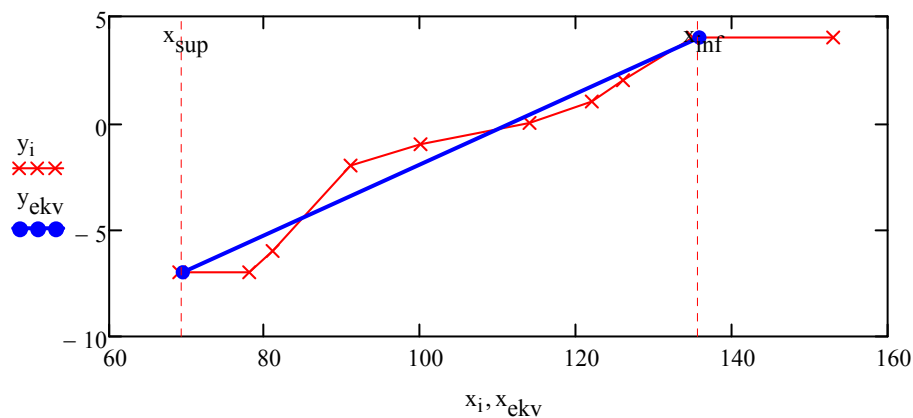
$n := 9$ $i := 1 \dots n$ Filen behandlar bara de $n+1$ första pkterna (0-n). Övriga skall inte ha någon betydelse

Om beräkningen inte uppdateras. Tryck Ctrl+F9

$x_T := (153 \ 135 \ 126 \ 122 \ 114 \ 100 \ 91 \ 81 \ 78 \ 69)$

$y_T := (4 \ 4 \ 2 \ 1 \ 0 \ -1 \ -2 \ -6 \ -7 \ -7)$

$$\begin{aligned}
 x &:= x_T^T & B &:= x_n - x_0 = -84 & ^\circ &\equiv \text{deg} \\
 y &:= y_T^T & H &:= y_n - y_0 = -11
 \end{aligned}$$



$$x_{\text{inf}} = 135.809$$

$$x_{\text{sup}} = 69.464$$

$$H = -11$$

$$B_{\text{ekv}} = -66.345$$

$$b := \frac{B_{\text{ekv}}}{H} = 6.031$$

$$\alpha = 9.414^\circ$$

$$\alpha = 0.164$$

Kommentarer:

endast punkter inom glidytan har använts för att beräkna ekvivalent slänt eftersom det rör sig om en släntcirkel.



Sektion: 3

Delområde: 08, Lilla Edet-Alvhem

Analysmetod: Odränerad
Cirkulär

Slip Surface Option: Grid and Radius

Method: Morgenstern-Price

PWP Conditions Source: Pressure Head Spatial Function

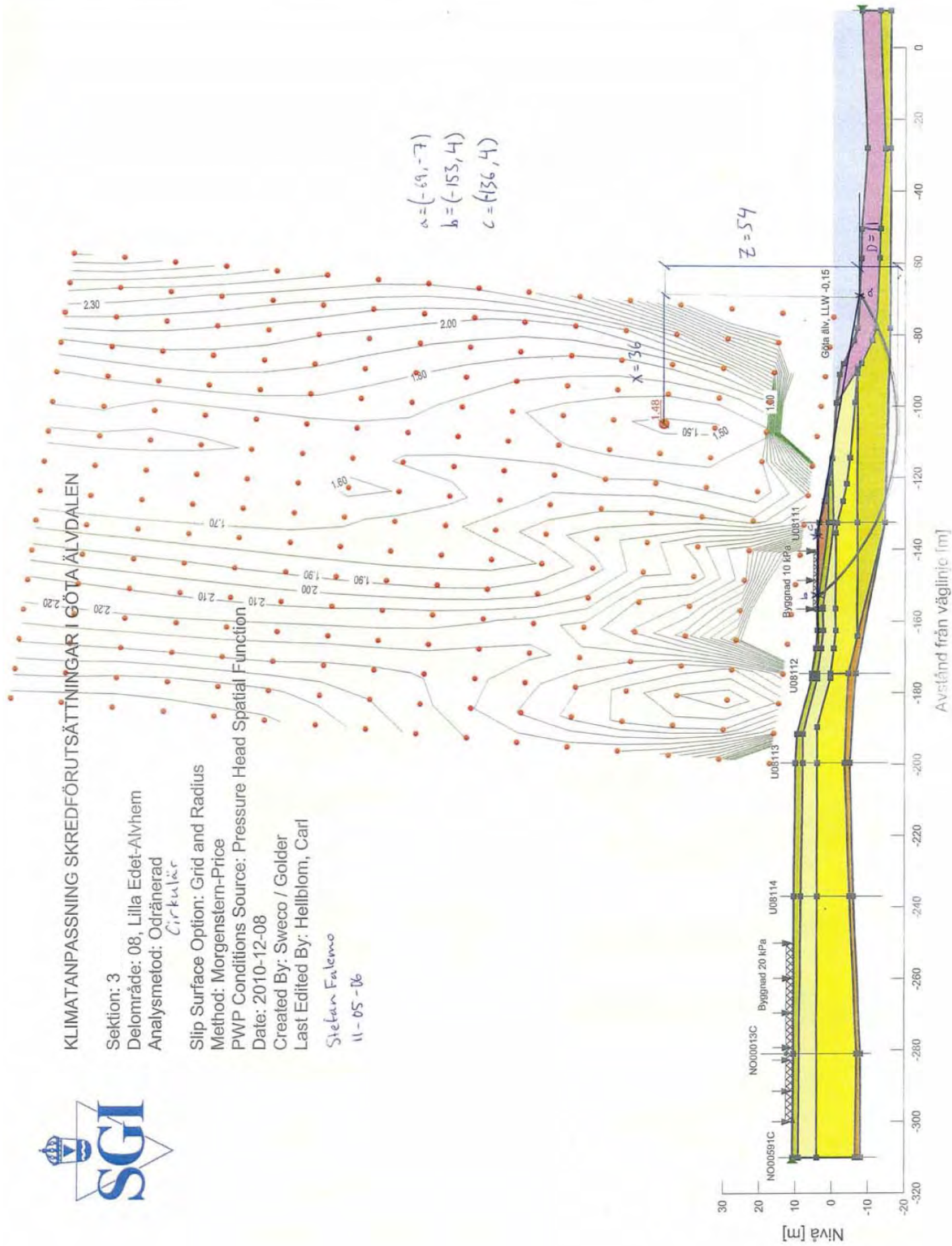
Date: 2010-12-08

Created By: Sweco / Golder

Last Edited By: Hellblom, Carl

Stefan Falemo

11-05-06



Name: F

Model: Mohr-Coulomb
Unit Weight: 18 kN/m³

PHI 35 •

Name: Crust - U
Model: Undrained (Phi=0)

Cohesion:

Name: CI (1) - U

Unit Weight

Cohesion: 20 kPa
 Modulus: 0.1/20 11Model: $S =$

C-Top of Layer: 20 kPa
C-Rate of Change: 1.0%

Running C

Name: Cl (3) - U
Model: S=f(depth)

C-Top of

C-Rate of Change: 1.05 kPa/m
Limiting C: 0 kPa

Name: CI

Model: S=1(depth)
Unit Weight: 16.5 kN/m³
C-Top of Layer: 20 kPa

C-Rate of

Name: Cl (Göta älv) - U

Model. of

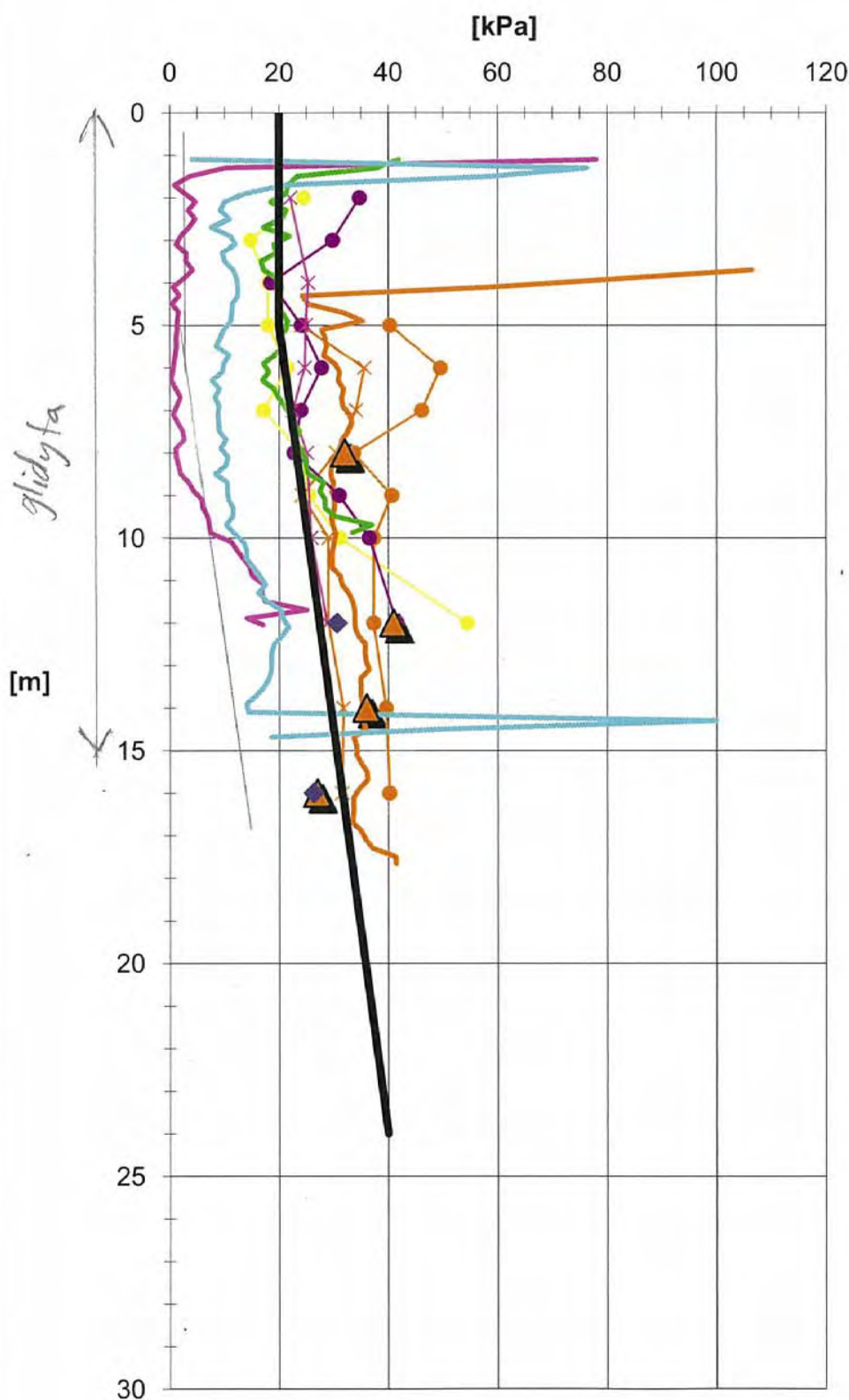
Cohesion Spatial Fn: 35890
Phi: 0°

10

Name: Fr
Model: Mohr-Coulomb

Cultivation of

Skjuvhållfasthet - odränerad analys, med djupet. Alla metoder.



regr skjuvhållf för glidytta
 $C_u^{model} = 24$

$C_u^{5\%} = 6$

$\sigma_{cu}^0 = \frac{C_u^{model} - C_u^{5\%}}{1.65} = 10.9$

$V_{cu}^0 = 45\%$

variansreduktion

$k = 0.6$; stor glidytta

$V_{cu} = k \cdot V_{cu}^0 = 27\%$

$\sigma_{cu} = 6.5$

- U08111
- U08112
- U08113
- U08114
- NO00577C
- NO00580C
-
-
- × cuvinge
- cukon
- ▲ cuDS
- cuCPT
- Vald Skjuvhållfasthet
- ◆ Empiri DS



Handläggare: Stefan Falemo

Datum: 110510

Sektion: 3 odrän, cirkulär,
farligaste glidyta

Beräkningen är justerad för att passa tåcirklar.

Kalibrering av modell - Deterministisk beräkning

Indata Medelvärden vid β -beräkning

Slänt

$H_w := 11$

$B := 66$

$H_w := 7$

$\gamma := 16.7$

$c_u := 24$

$q := 7.9$

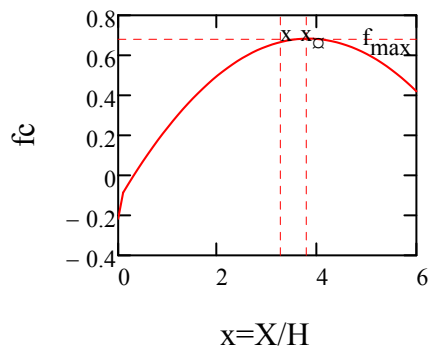
Vald glidyta

$D := 11$

$X := 36$

$Y := 54$

Farligaste glidyta

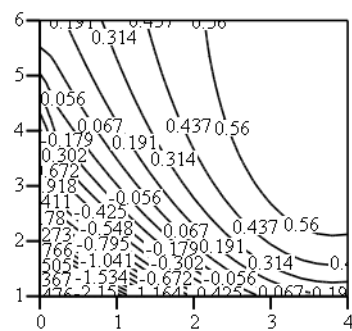


$$X_{\text{opt}} = 42.052 \quad x_{\square} = 3.823$$

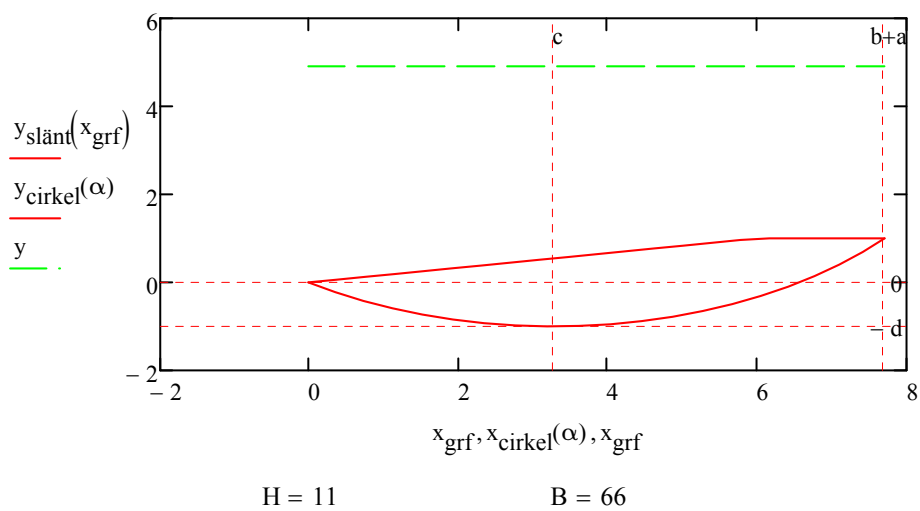
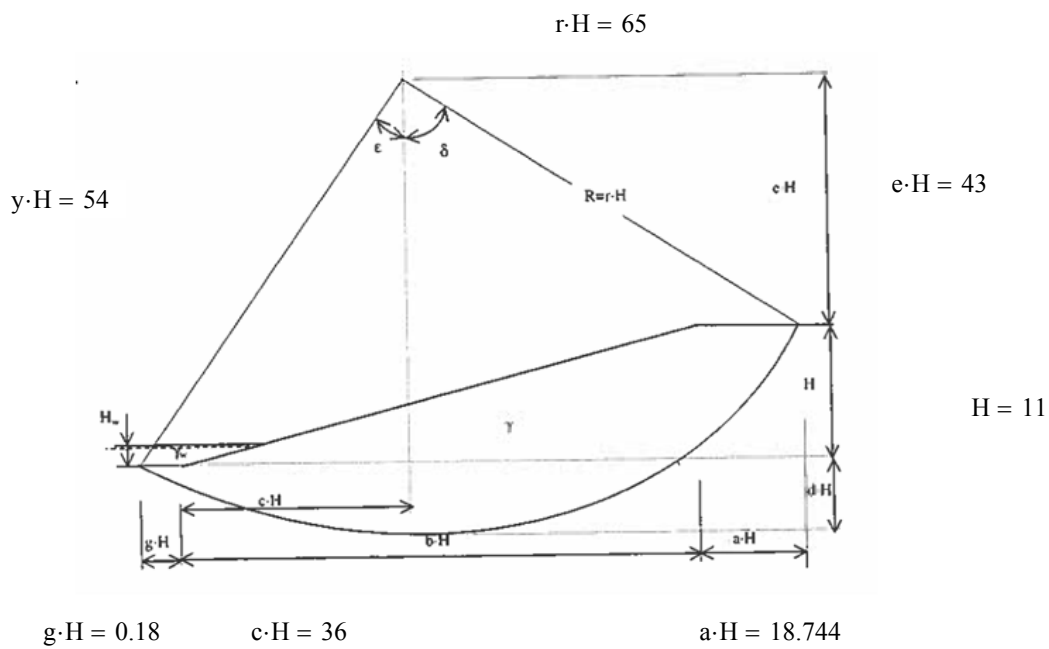
$$Y_{\text{opt}} = 49.905 \quad y_{\square} = 4.537$$

$$f_{\text{max}} = 0.683 \quad \frac{f_{\text{max}}}{f_{xy}} = 1.024$$

$$f_{xy} = 0.667$$



Uppritning cirkel



Justering för släntcirkel

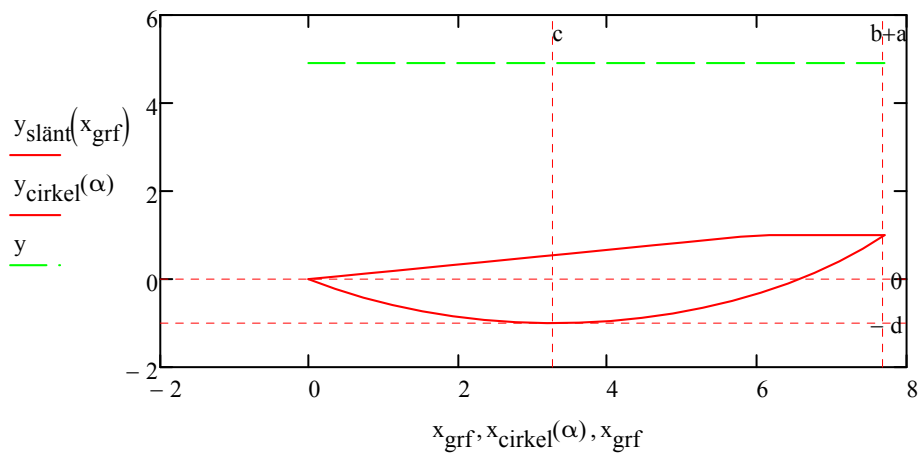
Justering:1
Ingen justering :0

Justering := 0



Uppritning ekv släntcirkel





$H - \Delta H = 11$	$B - \Delta B = 66$	$X - \Delta B = 36$	$\Delta H = 0$
$D + \Delta H = 11$	$H_w - \Delta H = 7$	$Y - \Delta H = 54$	$\frac{H - \Delta H}{H} = 100\%$



Deterministiskt resultat



Beräknad mobiliseringsgrad och säkerhetsfaktor

$F_c = 1.499$	$f_c = 0.667$	$N_c = 7.595$	$P_d = 121.6$	$c_u = 24$
---------------	---------------	---------------	---------------	------------

Justering mot traditionell beräkning - Modellfaktorer

$F_{cirk} := 1.48$	$\mu_{klbr} := \frac{F_{cirk}}{F_c} = 0.987$	För kalibrering bör gälla	$0.95 < \mu_{klbr} < 1.05$
$F_{plan} := 1.46$	$\mu_{plan} := \frac{F_{plan}}{F_{cirk}} = 0.986$		

Torrspicka $\frac{T}{H} := 0$ $\eta_t := \frac{T}{H} = 0$

$\mu_t := \mu_{t\alpha}(\eta_t, d) = 1$

$\mu_{mod} := \mu_{klbr} \cdot \mu_{plan} \cdot \mu_t = 0.974$ $\mu_{mod} = 1$

Befräknng - Skredsannolikhet

Indata - osäkerheter

$\sigma_{zkrön} := 0.5$	$\sigma_{zfot} := 0.5$	$\sigma_{zw} := 0$
-------------------------	------------------------	--------------------

$\sigma_{xfot} := 1$	$\sigma_{xkrön} := 1$	$\sigma_B := \sqrt{\sigma_{xfot}^2 + \sigma_{xkrön}^2} = 1.414$	$V_{mod} := 0$
----------------------	-----------------------	---	----------------

$\sigma_{cu} := 6.5$	$\sigma_{\gamma} := 0.76$	$\sigma_q := 0$
----------------------	---------------------------	-----------------

$V_{\gamma} := \frac{\sigma_{\gamma}}{\gamma} = 4.6\%$	$V_q := \frac{\sigma_q}{q} = 0\%$	$V_B := \frac{\sigma_B}{B} = 2.1\%$	$V_{cu} := \frac{\sigma_{cu}}{c_u} = 27.1\%$
--	-----------------------------------	-------------------------------------	--



Resultat

Beräknade osäkerheter

$$V_{Fc} = 28.9\%$$

$$V_{Nc} = 1\%$$

$$V_{cu} = 27.1\%$$

$$V_{Pd} = 10.1\%$$

Säkerhetsindex

$$\beta = 1.3$$

Skredsannolikhet

$$p_f = 9.5\%$$

$$V_{mod} = 0\%$$

Sensitivitetsfaktorer

$$\alpha_{zkrön} = 0.24$$

$$\alpha_{zfot} = 0.1$$

$$\alpha_w = 0$$

$$\alpha_{cu} = 0.94$$

$$\alpha_{xkrön} = 0.025 \quad \alpha_{xfot} = 0.03$$

$$\alpha_{\gamma} = 0.24$$

$$\alpha_q = 0$$

$$\alpha_{mod} = 0$$

$$\alpha_{Nc} = 0.036$$

$$\alpha_{Pd} = 0.349$$

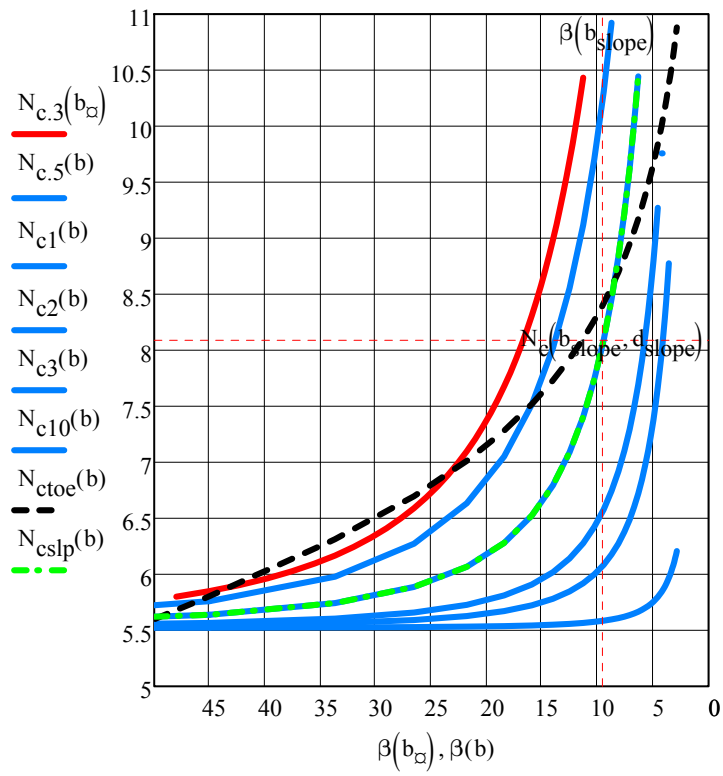
Kontroll

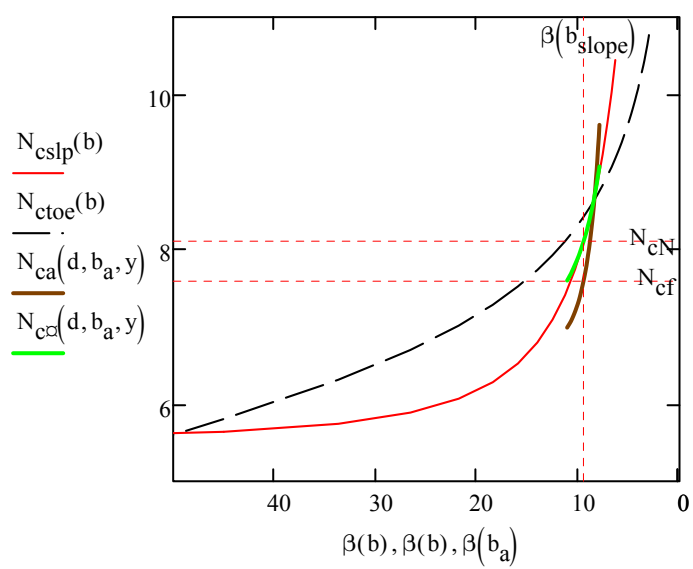
$$\left(\alpha_{zkrön}^2 + \alpha_{zfot}^2\right) + \left(\alpha_{xkrön}^2 + \alpha_{xfot}^2\right) + \alpha_w^2 + \alpha_q^2 + \alpha_{\gamma}^2 + \alpha_{cu}^2 + \alpha_{mod}^2 = 1$$

$$\alpha_{ober} = 0$$

$$\alpha_{ber} = 1$$

Kontroll oppritning av "N.c-diagram"





B5.5 Sektion 4, odränerad analys, glidyta med lägst F

Sektion: 4
 Analysmetod: Odränerad analys, cirkulär, farligaste glidyta
 Datum: 2011-05-11
 Handläggare: Stefan Falemo

	Indata				Utdata
Indata	Parameter	Medelvärde, μ	Standardavvikelse, σ	Variationskoefficient, V	Sensitivitetsfaktorer, α_i
	H (m)	7,5	$\sigma_{zfot}=0,5$ $\sigma_{zkrön}=0,5$		
	B (m)	39,8	$\sigma_{xfot}=1$ $\sigma_{xkrön}=1$		
	H _w (m)	6	0		
	γ (kN/m ³)	15,4	0,6	4 %	
	q _{permanent} (kN/m ²)	0,01	0		
	q _{variabel} (kN/m ²)	0	0		
	c _u (kPa)	11,0	1,1	10 %	0,5
	D (m)	7,8	0		
	X (m)	24,2	0		
	Z (m)	33,5	0		
	F _{c, cirkulär}	1,44			
	F _{c, optimerad}	1,40			
Utdata	F _E	1,43		20 %	
	N _c	7,2			0,20
	P _d	56			0,84
	η_{mod}	0,98			0
	β	1,7			
	P _f	5 %			

Kommentarer

Den farligaste glidytan är en släntcirkel sett till den ekvivalenta slänten. Ekvivalenta slänten beräknas då mha punkter som ligger inom glidytan. För släntcirkel beräknas D enligt:

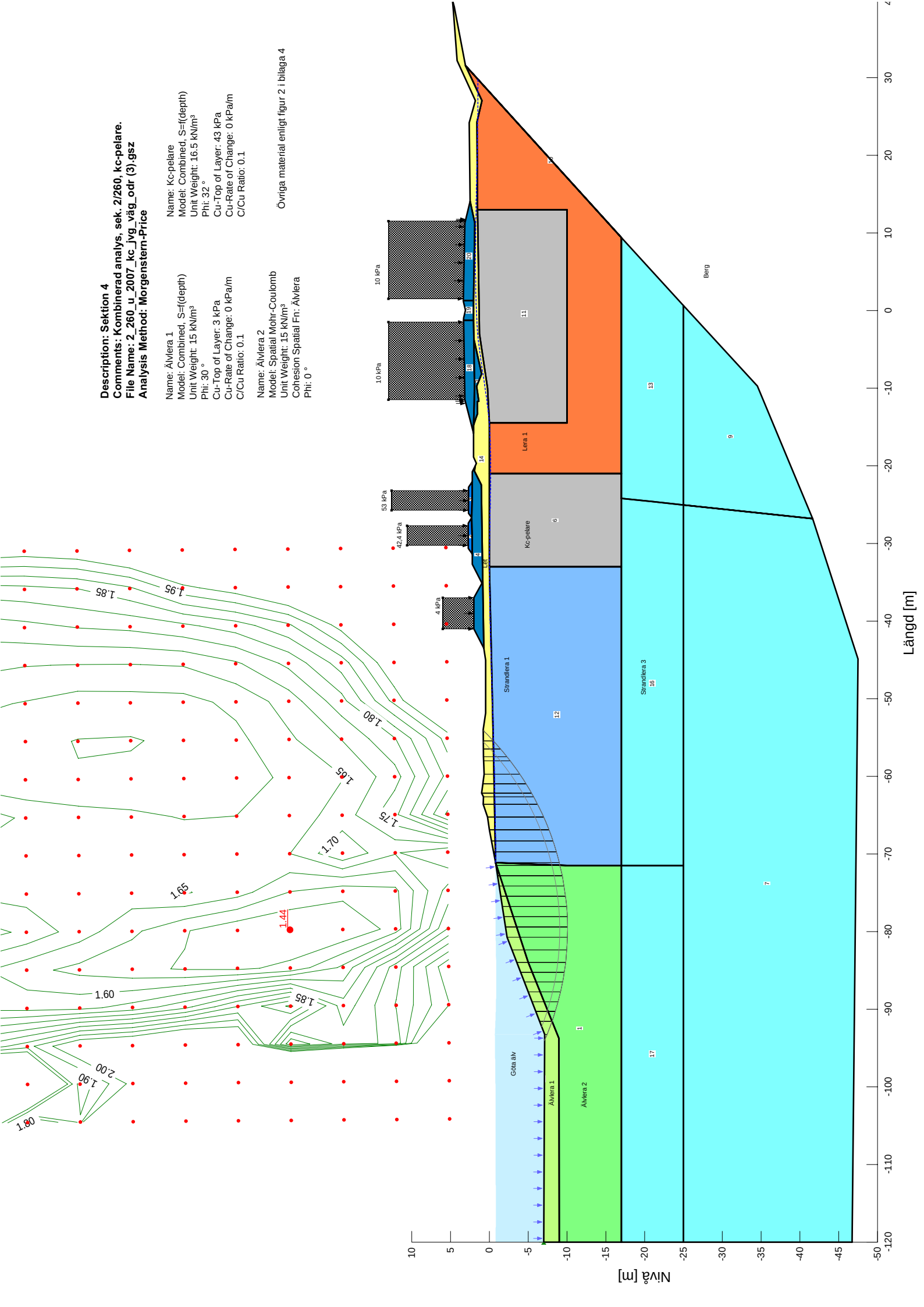
$$D_{tä} = \sqrt{X^2 + Z^2} - Z$$

Uppmätta värden (ur SLOPE/W-modellen) på X=19 och Z=33 ger $F_E=1,69$ och $\eta_{klbr}=0,85$. MathCad-modellen hittar en farligare glidyta för X=24,2 och Z=33,4, vilket ger $F_E=1,43$ och det acceptabla felet $\eta_{klbr}=1,01$. Dessa data och tillhörande D redovisas i tabellen ovan.

Tunghet varierar mellan 15-17 kN/m³. Gränserna antas grovt motsvara nedre 5 % och övre 95 %. Då fås $\sigma_\gamma = (17-15)/2/1,65 = 0,6$ kN/m³ vilket ger $V_\gamma = 0,6 / 15,7 = 0,038$.

Vid beräkningen fanns inte tillgång till uppgifter om osäkerhet i skjuvhållfasthet. V_{cu} antas vara 10 %.

$$\text{Modellfelet } \eta_{\text{mod}} = \eta_{klbr} \cdot \eta_{plan} = \frac{F_{c,cirkulär}}{F_E} \cdot \frac{F_{c,optimerad}}{F_{c,cirkulär}}$$



Beräknad av: Stefan Falemo 110509
Sektion 4, odrän, cirkulär,
farligaste glidyta

$n := 4$ $i := 1 \dots n$

Filen behandlar bara de n+1 första pkterna (0-n). Övriga skall inte ha någon betydelse

Om beräkningen inte uppdateras. Tryck Ctrl+F9

$x_T := (-93 \quad -81 \quad -71.5 \quad -63.5 \quad -54)$

$y_T := (-7 \quad -2.5 \quad -1 \quad -1 \quad 0.5)$

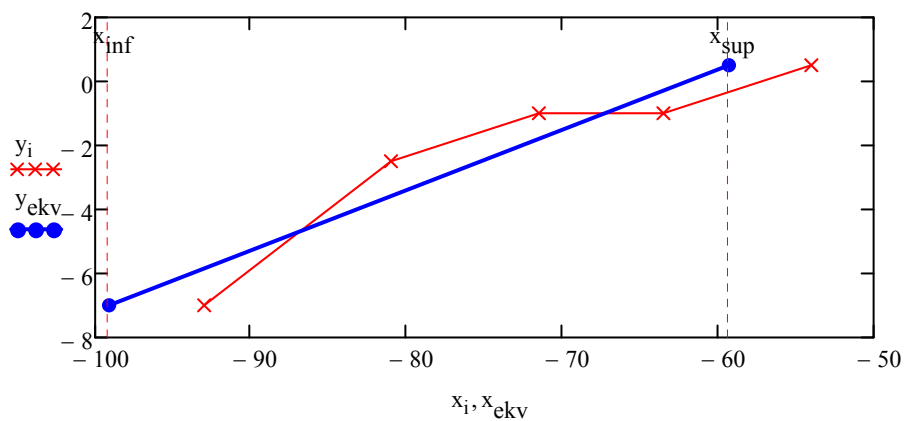
$x := x_T^T$

$B := x_n - x_0 = 39$

$^\circ \equiv \text{deg}$

$y := y_T^T$

$H := y_n - y_0 = 7.5$



$x_{\text{inf}} = -99.107$

$x_{\text{sup}} = -59.293$

$H = 7.5$

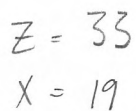
$B_{\text{ekv}} = 39.814$

$b := \frac{B_{\text{ekv}}}{H} = 5.308$

$\alpha = 10.668^\circ$

$\alpha = 0.186$





Description: E45 Norge / Vänerbanan, Agnesberg - Bolus.
Comments: Kombinerad analys, sek. 2/200, ic-polare.
File Name: 2_200_u_2007_ic_jvg_väg_ödr (3).gsz
Analysis Method: Morgenstern-Price

Name: Ålvira 1
Model: Combined, S_{eff}(d_{apli})
Unit Weight: 15 kN/m³
Phi: 30 °
Cu-Top of Layer: 3 kPa
Cu-Rate of Change: 0 kPa/m
C/Cu Ratio: 0.1

Name: Kc-polare
Model: Combined, $S=f(\text{depth})$
Unit Weight: 16.5 kN/m³
Phi: 32 °
Cu-Top of Layer: 43 kPa
Cu-Rate of Change: 0 kPa/m
C/Cu Ratio: 0.1

Name: Älvåra 2
Model: Spatial Mohr-Coulomb
Unit Weight: 15 kN/m³
Cohesion Spatial Fr: Älvåra
Phi: 0°

Övriga material enligt figur 2 i bilaga 4

Sektion: 4
 Glidyta: farligaste glidyta
 Analysmetod: odränerad cirkulär
 Handläggare: Stefan Falemo
 Datum: 110511



Kalibrering av modell - Deterministisk beräkning

Indata Medelvärden vid β -beräkning

Perm last

Slänt

$$H := 7.5$$

$$B := 39.8$$

$$H_{\text{max}} := 6$$

$$\gamma := 15.4$$

$$c_{\text{max}} := 11.0$$

$$q_0 := 0.01$$

Vald glidyta

Variabel last

$$D := 7.846$$

$$X := 24.2$$

$$Z := 33.4$$

Villkor för D för tåcirklar:

$$q_1 := 0.01$$

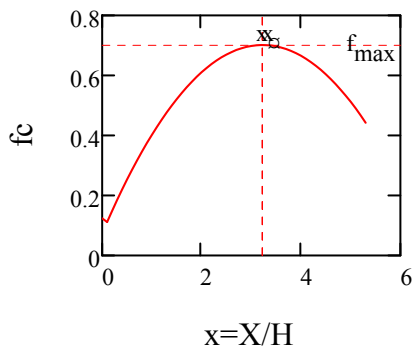
$$D_{\text{tå}} := \sqrt{X^2 + Z^2} - Z = 7.846$$

$$q_{\text{max}} := q_0 + q_1$$

Farligaste glidyta



Ej relevant för branta tåcirklar, dvs med rotationscentrum nedanför släntfot

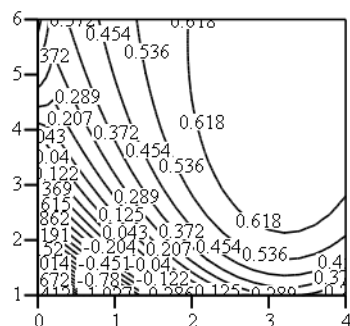


$$X_{\text{opt}} = 24.208 \quad x_{\text{Q}} = 3.228$$

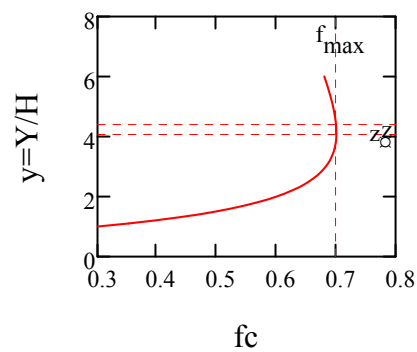
$$Z_{\text{opt}} = 30.862 \quad z_{\text{Q}} = 4.115$$

$$f_{\text{max}} = 0.701 \quad f_{\text{xz}} = 0.7$$

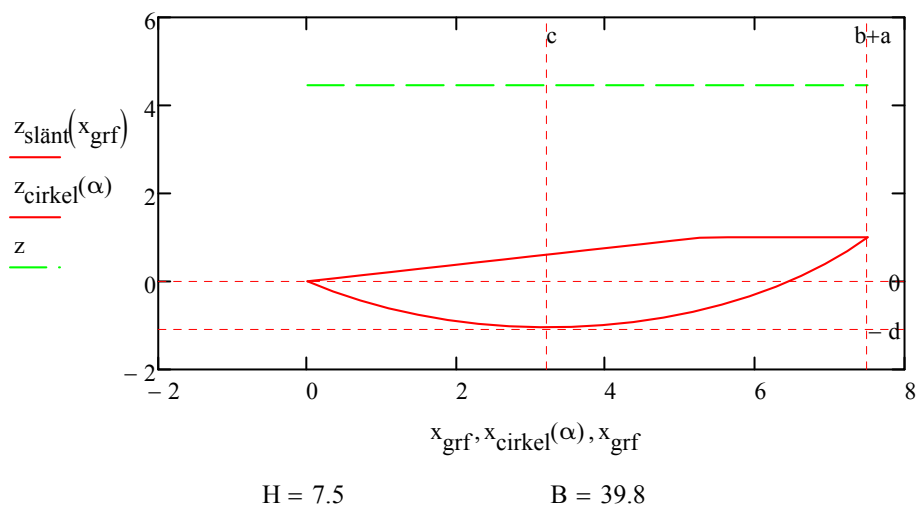
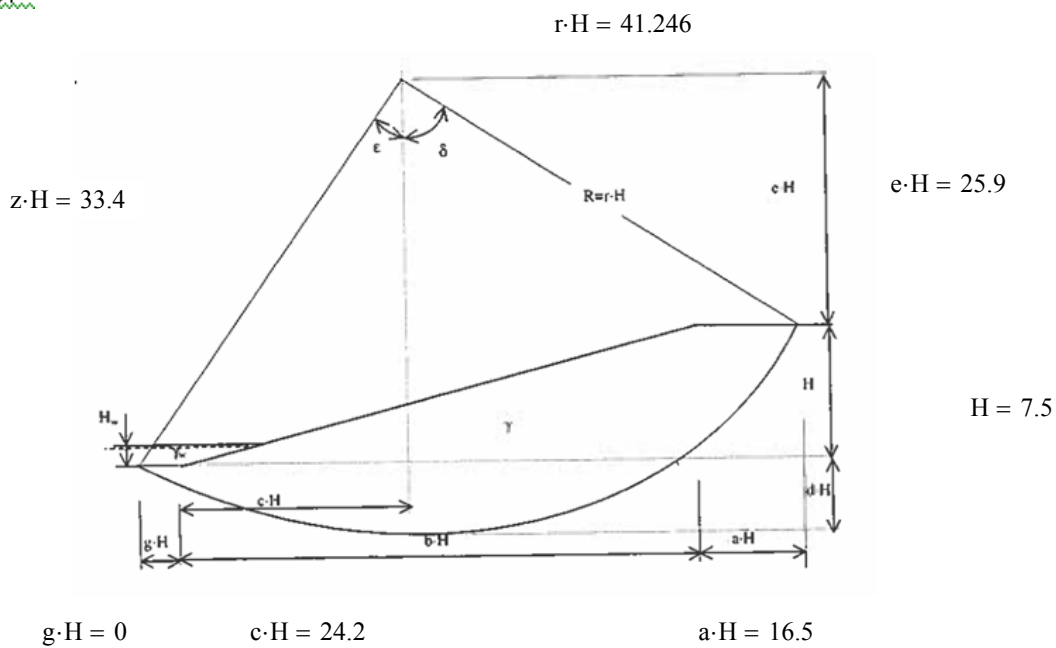
$$\frac{f_{\text{max}}}{f_{\text{xz}}} = 1.001 \quad \text{Kontroll}$$



f_{cont}



Uppritning cirkel

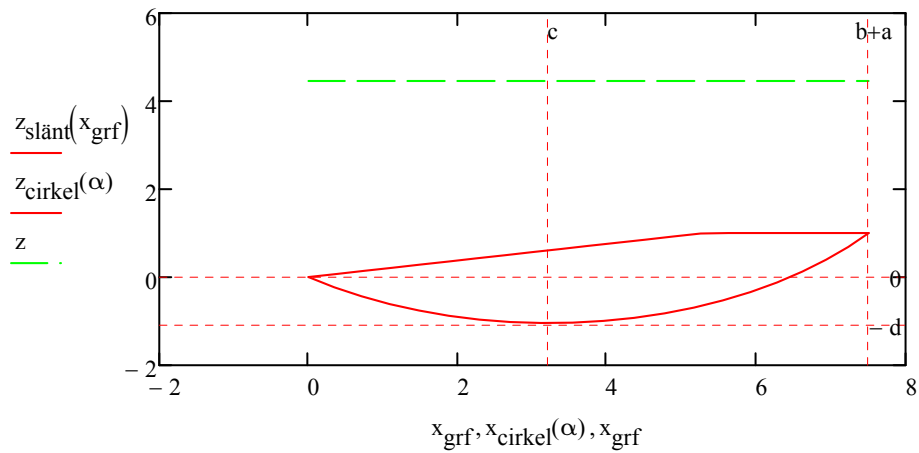


Ev justering för släntcirkel (Överkurs?)



Uppritning ekv släntcirkel





$H - \Delta H = 7.5$	$B - \Delta B = 39.8$	$X - \Delta B = 24.2$	$\Delta H = 0$	$\Delta B = 0$
$D + \Delta H = 7.846$	$H_w - \Delta H = 6$	$Z - \Delta H = 33.4$	$\frac{H - \Delta H}{H} = 100\%$	$\frac{B - \Delta B}{B} = 100\%$



Deterministiskt resultat



Beräkna mobiliseringsgrad och säkerhetsfaktor

$$F_c = 1.429$$

$$f_c = 0.7$$

$$N_c = 7.212$$

$$P_d = 55.52$$

$$c_u = 11$$

Beräkning med vätskeanalogin

Justering mot traditionell beräkning - Modellfaktorer

$$F_{cirk} := 1.44$$

$$\eta_{klbr} := \frac{F_{cirk}}{F_c} = 1.008$$

För kalibrering
bör gälla

$$0.95 < \mu_{klbr} < 1.05$$

$$F_{plan} := 1.40$$

$$\eta_{plan} := \frac{F_{plan}}{F_{cirk}} = 0.972$$

Torrspicka

$$T_w := 0$$

$$\eta_t := \frac{T}{H} = 0$$

$$\mu_t := \mu_{t0}(\eta_t, d) = 1$$

$$\eta_{mod} := \eta_{klbr} \cdot \eta_{plan} \cdot \mu_t = 0.98$$

Beräkning - Skredsannolikhet

$$V_{mod} := 0$$

Indata - osäkerheter

$$\sigma_{zfot} := 0.5$$

$$\sigma_{zkrön} := 0.5$$

$$\sigma_{zw} := 0$$

$$\sigma_H := \sqrt{\sigma_{zfot}^2 + \sigma_{zkrön}^2} = 0.707$$

$$\sigma_{xfot} := 1$$

$$\sigma_{xkrön} := 1$$

$$\sigma_{q0} := 0$$

$$\sigma_B := \sqrt{\sigma_{xfot}^2 + \sigma_{xkrön}^2} = 1.414$$

$$\sigma_{cu} := 1.1$$

$$\sigma_\gamma := 0.6$$

$$\sigma_{q1} := 0$$

$$\sigma_q := \sqrt{\sigma_{q0}^2 + \sigma_{q1}^2} = 0$$

$$V_{\gamma} := \frac{\sigma_{\gamma}}{\gamma} = 3.9\% \quad V_q := \frac{\sigma_q}{q} = 0\% \quad V_H := \frac{\sigma_H}{H} = 9.4\% \quad V_B := \frac{\sigma_B}{B} = 3.6\% \quad V_{cu} := \frac{\sigma_{cu}}{c_u} = 10\%$$



Resultat

Beräknade osäkerheter

$$V_{Fc} = 20\%$$

$$V_{Nc} = 4.1\%$$

$$V_{cu} = 10\%$$

$$V_{Pd} = 16.8\%$$

Sensitivitetsfaktorer

$$\alpha_{zkrön} = 0.71$$

$$\alpha_{zfot} = 0.28$$

$$\alpha_{xkrön} = 0.051$$

$$\alpha_{xfot} = 0.05$$

$$\alpha_{Nc} = 0.203$$

$$\alpha_{Pd} = 0.841$$

Kontroll

$$\left(\alpha_{zkrön}^2 + \alpha_{zfot}^2\right) + \left(\alpha_{xkrön}^2 + \alpha_{xfot}^2\right) + \alpha_w^2 + \left(\alpha_{q0}^2 + \alpha_{q1}^2\right) + \alpha_{\gamma}^2 + \alpha_{cu}^2 + \alpha_{mod}^2 = 1$$

$$\alpha_{ober} = 0$$

$$\alpha_{ber} = 1$$

Säkerhetsindex

$$\beta = 1.7$$

$$\alpha_w = 0$$

$$\alpha_{\gamma} = 0.41$$

Skredsannolikhet

$$p_f = 4.6\%$$

$$\alpha_{cu} = 0.5$$

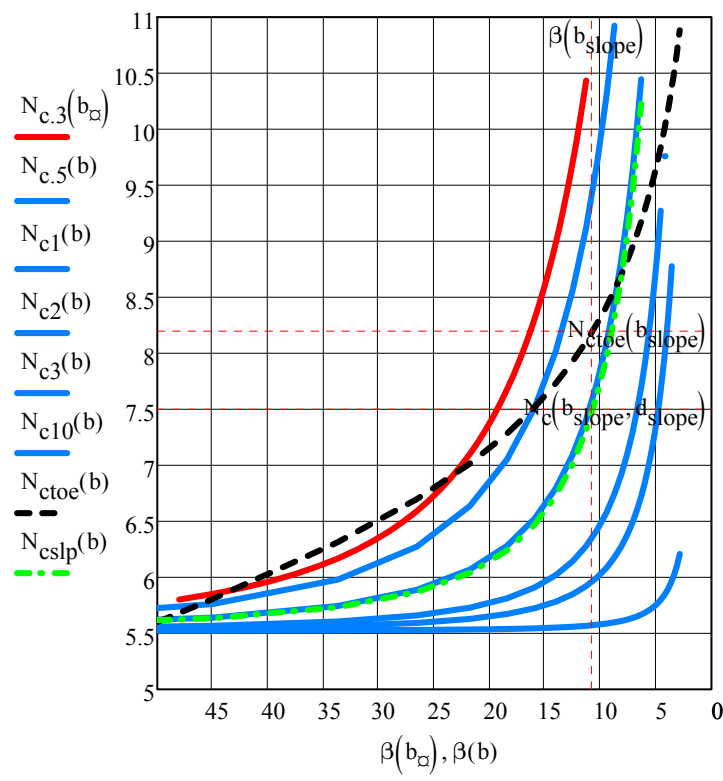
$$\alpha_{q0} = 0$$

$$V_{mod} = 0\%$$

$$\alpha_{mod} = 0$$

$$\alpha_{q1} = 0$$

Kontroll uppritnng av "N.c-diagram"



Graf för $dN/db \cdot 1/N$



BILAGA 6 - EXEMPEL – BERÄKNING I EXCEL MED METODIK B

På följande sidor visas beräkningen av långa slänten i sektion 1 enligt beskrivning i avsnitt 6.3 och med indata enligt Tabell 6.7. Indata är alltså samma som i Bilaga 5, men här används den förenklade metod som beskrivs i stycke 3.9.2.

Göta älv-utredningen

Sannolikhet för skred

Indata från traditionell stabilitetsanalys för en idealiserad slänt

	Medelvärde	Standardavvikelse	Aktuell glidyta	Resultat
$Z_{krön} =$	28,30 m	$\sigma_{Zkrön} =$ 0,50 m	$Z =$ 136,00 m	$\mu_F = 1,10$
$Z_{fot} =$	0,00 m	$\sigma_{Zfot} =$ 0,50 m	$D =$ 14,30 m	$V_N = 0,0059$
$X_{krön} =$	111,30 m	$\sigma_{Xkrön} =$ 1,00 m	$F =$ 1,10	$V_{Pd} = 0,0747$
$X_{fot} =$	0,00 m	$\sigma_{Xfot} =$ 1,00 m		$V_F = 0,1249$
$Z_w =$	19,00 m	$\sigma_{Zw} =$ 0,00 m		$\beta = 0,763$
$c =$	41,00 kPa	$\sigma_c =$ 4,10 kPa	$V_c =$ 0,100	$p_F = 2,228E-01$
$\gamma =$	16,50 kN/m ³	$\sigma_\gamma =$ 0,66 kN/m ³	$V_\gamma =$ 0,040	
$q =$	0,00 kPa	$\sigma_q =$ 0,00 kPa	$V_q =$ 0,000	
$\gamma_w =$	10,00 kN/m ³	$\sigma_{\gamma w} =$ 0,00 kN/m ³	$V_{\gamma w} =$ 0,000	
$\mu_{modell} =$		$\sigma_{\mu_{modell}} =$	$V_{\mu_{modell}} =$ 0,000	

Ruta för INDATA
(Övriga rutor får inte röras)

H =	28,30 m	Nivåskillnad mellan släntens krön och släntens fot
B =	111,30 m	Horisontellt avstånd mellan släntens krön och släntens fot
$\alpha_{\text{slänt}}$ =	14,27 grader	Släntlutning
H _w =	19,00	Nivåskillnad mellan vattenytan i älven och släntens fot

Variationskoefficienter

$V_{\mu_{\text{modell}}} =$	0,0000	
$V_N =$	0,0059	Se flik 'Stabilitetstal N'
$V_c =$	0,1000	
$V_{Pd} =$	0,0747	Se flik 'Pådrivande last Pd'
$V_F =$	0,1249	$V_F = (V_{\text{modell}}^2 + V_N^2 + V_c^2 + V_{Pd}^2)^{0,5}$

Sannolikhet för skred

$\mu_F =$	1,10	
$\mu_{\text{InF}} =$	0,0953	
$\beta =$	0,763	$\beta = \mu_{\text{InF}} / V_F$
$p_F =$	2,228E-01	

Göta älv-utredningen

Sannolikhet för skred

Stabilitetstalet N₀

Indata från traditionell stabilitetsanalys för en idealiserad slänt

H =	28,30 m	Nivåskillnad mellan släntens krön och släntens tå
B =	111,30 m	Horisontellt avstånd mellan släntens krön och släntens tå
$\alpha_{\text{slänt}}$ =	14,27 grader	Släntlutning
D =	14,30 m	Djup till glidyttans underkant relativt släntens tå
Z =	136,00 m	Nivåskillnad mellan medelpunkten för farligaste glidyttan och släntens tå
$\sigma_{Zkrön}$ =	0,50 m	
σ_{Zfot} =	0,50 m	
$\sigma_{Xkrön}$ =	1,00 m	
σ_{Xfot} =	1,00 m	
$\sigma_B = (\sigma_{Xkrön}^2 + \sigma_{Xfot}^2)^{0,5}$		$\sigma_H = (\sigma_{Zkrön}^2 + \sigma_{Zfot}^2)^{0,5}$
$\sigma_B =$	1,41 m	$\sigma_H =$
		$V_b = (V_B^2 + V_H^2)^{0,5} = ((\sigma_B / \mu_B)^2 + (\sigma_H / \mu_H)^2)^{0,5}$
		$V_b =$
		0,0280

Normaliserade mått

b = 3,933 b = B / H
d = 0,505 d = D / H
z = 4,806 z = Z / H

N₀^{bascirkel} = 8,240

N₀^{täcirkel} = 7,704

dN₀/db/N₀^{bas} = 0,0790 V_{N0}^{bas} = 0,0087

dN₀/db/N₀^{tä} = 0,0534 V_{N0}^{tä} = 0,0059

Resultat

N₀^{bascirkel} = 8,240 V_{N0}^{bas} = 0,0087

N₀^{täcirkel} = 7,704 V_{N0}^{tä} = 0,0059

N^{min} = 7,704 V_N = 0,0059

Kontroll av ekvationer

3,929 3,937 Δb/b = 0,001
0,505 0,505
4,806 4,806

8,238 8,243 dN₀/db^{bas} = 0,651115 dN₀/db/N₀^{bas} = 0,0790 V_{N0}^{bas} = 0,0087

7,702 7,706 dN₀/db^{tä} = 0,409184 dN₀/db/N₀^{tä} = 0,0531 V_{N0}^{tä} = 0,0059

Göta älv-utredningen

Sannolikhet för skred

Osäkerhet hos pådrivande P_d

Indata från traditionell stabilitetsanalys för en idealiserad slänt

$H =$	28,30 m	Nivåskillnad mellan släntens krön och släntens tå
$B =$	111,30 m	Horisontellt avstånd mellan släntens krön och släntens tå
$H_w =$	19,00 m	Nivåskillnad mellan vattenytan i älven och släntens tå
$\gamma =$	16,50 kN/m ³	Medeltunghet hos jordlagren
$\gamma_w =$	10,00 kN/m ³	Tunghet hos vattnet
$q =$	0,00 kPa	Ytlast på släntens krön

Variationer i egenskaper

$\sigma_{Zkrön} =$	0,50 m	$V_{Zkrön} =$	0,0177	(Rekommendation att välja ca 0,5 m)
$\sigma_{Ztot} =$	0,50 m	$V_{Ztot} =$	0,0177	(Rekommendation att välja ca 0,5 m)
$\sigma_{ZW} =$	0,00 m	$V_{HW} =$	0,0000	(Rekommendation att välja ca 0,2 m)
$\sigma_{\gamma} =$	0,66 kN/m ³	$V_{\gamma} =$	0,0400	(Rekommendation att välja σ_{γ} så att $V_{\gamma} = 0,04$)

$\sigma_q =$	0,00 kPa	$V_q =$	0,0000	(Rekommodation att välja σ_q så att $V_q = 0,00$)
$\sigma_{\gamma w} =$	0,00 kN/m ³	$V_{\gamma w} =$	0,000	(Rekommodation att välja $\sigma_{\gamma w}$ så att $V_{\gamma w} = 0,00$)

Alternativ A

$\mu_{Pd} =$	276,95 kPa	$\mu_{Pd} = \mu_{\gamma} \cdot \mu_H + \mu_q - \mu_{\gamma w} \cdot \mu_{Hw}$	$V_Z = V_{Zkron}$
$V_{\gamma H1} =$	0,0437	$V_{\gamma H1} = (V_{\gamma}^2 + V_Z^2)^{0,5}$	
$\sigma_{\gamma H1} =$	20,42 kPa	$\sigma_{\gamma H1} = \mu_{\gamma} \cdot \mu_H \cdot V_{\gamma H1}$	
$\sigma_{Pw} =$	0,00 kPa	$\sigma_{Pw} = \mu_{\gamma w} \cdot \sigma_{Hw}$	
$\sigma_{\gamma H2} =$	3,25 kPa	$\sigma_{\gamma H2} = (\mu_{\gamma} - \mu_{\gamma w}) \cdot \sigma_{Ztot}$	
$\sigma_{Pd} =$	20,68 kPa	$\sigma_{Pd} = (\sigma_{\gamma H1}^2 + \sigma_q^2 + \sigma_{Pw}^2 + \sigma_{\gamma H2}^2)^{0,5}$	
$V_{Pd} =$	0,0747	$V_{Pd} = \sigma_{Pd} / \mu_{Pd}$	
$\mu_{Pd} =$	276,95 kPa		
$\sigma_{Pd} =$	20,68 kPa		
$V_{Pd} =$	0,0747		

Alternativ B

$\mu_{Pd} =$	276,95 kPa	$\mu_{Pd} = \mu_{\gamma} \cdot \mu_{(Z_{krön}-Z_{lå})} + \mu_q - \mu_{\gamma_w} \cdot \mu_{(Z_w-Z_{lå})}$			
	dP_d/dX_i	σ_{Xi}	$(dP_d/dX_i \cdot \sigma_{Xi})^2$		
γ	28,30	0,66	348,87	$dPd/d\gamma = Z_{krön} - Z_{tot} = H$	
$Z_{krön}$	16,50	0,50	68,06	$dPd/dZ_{krön} = \gamma$	
q	1,00	0,00	0,00	$dPd/dq = 1$	
$Z_{lå}$	-6,50	0,50	10,56	$dPd/dZ_{tot} = -(\gamma - \gamma_w)$	
Z_w	-10,00	0,00	0,00	$dPd/dZ_w = -\gamma_w$	
γ_w	-19,00	0,00	0,00	$dPd/d\gamma_w = -(Z_w - Z_{tot}) = -H_w$	
		Summa =		427,49	
$\sigma_{Pd} =$	20,68 kPa				
$V_{Pd} =$	0,0747				

Göta älvutredningen, GÄU delrapporter 1-34

- 1 Erosionsförhållanden i Göta älv
- 2 Fördjupningsstudie om erosion i vattendrag
- 3 Hydrodynamisk modell för Göta älv. Underlag för analys av vattennivåer, strömhastigheter och botten-skjuvspänningar
- 4 Transport av suspenderat material i Göta älv
- 5 Ytgeologisk undersökning med backscatter - Analys för Göta älv och Nordre älv
- 6 Bottenförhållanden i Göta älv
- 7 Bedömning av grundvattenförhållanden för slänter längs Göta älv - Allmän vägledning
- 8 Känslighetsanalys för variationer i grundvattennivå och val av maximala portryck i slänter längs Göta älv – Exempel från en slänt
- 9 Bedömd förändring av maximala grundvattennivåer i Göta älvdalen till följd av förändrat klimat
- 10 Studie av portryckens påverkan från nederbörd och vattenståndsvariation i tre slänter längs Göta älv
- 11 Analys av uppmätta portryck i slänterna vid Äsperöd och Åkerström
- 12 Metodik för inventering och värdering av konsekvenser till följd av skred i Göta älvdalen
- 13 Metodik konsekvensbedömning - Känslighetsanalys, klassindelning och applicering av metodik i hela utredningsområdet
- 14 Metodik konsekvensbedömning - Bebyggelse
- 15 Metodik konsekvensbedömning - Kartläggning, exponering, sårbarhet och värdering av liv
- 16 Metodik konsekvensbedömning - Sjöfart
- 17 Metodik konsekvensbedömning - Väg
- 18 Metodik konsekvensbedömning - Järnväg
- 19 Metodik konsekvensbedömning - Miljöfarliga verksamheter och förorenade områden
- 20 Metodik konsekvensbedömning - Naturmiljö
- 21 Metodik konsekvensbedömning - Energi och ledningsnät
- 22 Metodik konsekvensbedömning - VA-system
- 23 Metodik konsekvensbedömning - Näringsliv
- 24 Metodik konsekvensbedömning - Kulturarv
- 25 Metodik konsekvensbedömning - Känslighetsanalyser
- 26 Metodik konsekvensbedömning - Bebyggelse och kartläggning, exponering, sårbarhet och värdering av liv - Fallstudie Ale kommun
- 27 Hydrologiska och meteorologiska förhållanden i Göta älvdalen
- 28 Metodbeskrivning sannolikhet för skred: kvantitativ beräkningsmodell
- 29 Kartering av kvicklereförekomst för skredriskanalyser inom Göta älvutredningen. Utvärdering av föreslagen metod samt preliminära riktlinjer
- 30 Quick clay mapping by resistivity – Surface resistivity, CPTU-R and chemistry to complement other geotechnical sounding and sampling
- 31 Inverkan av förändringar i porvattnets kemi, främst salturlakning, på naturlig leras geotekniska egenskaper – Litteraturstudie
- 32 Hantering av kvicklereförekomst vid stabilitetsbedömning för Göta älv – Riktlinjer
- 33 Metodbeskrivning för SGI:s 200 mm diameter "block-provtagare" - Ostörd provtagning i finkornig jord
- 34 Sjömätning - Göta älv och Nordre älv



Statens geotekniska institut
Swedish Geotechnical Institute
SE-581 93 Linköping, Sweden
Tel: 013-20 18 00, Int + 46 13 201800
Fax: 013-20 19 14, Int + 46 13 201914
E-mail: sgi@swedgeo.se Internet: www.swedgeo.se