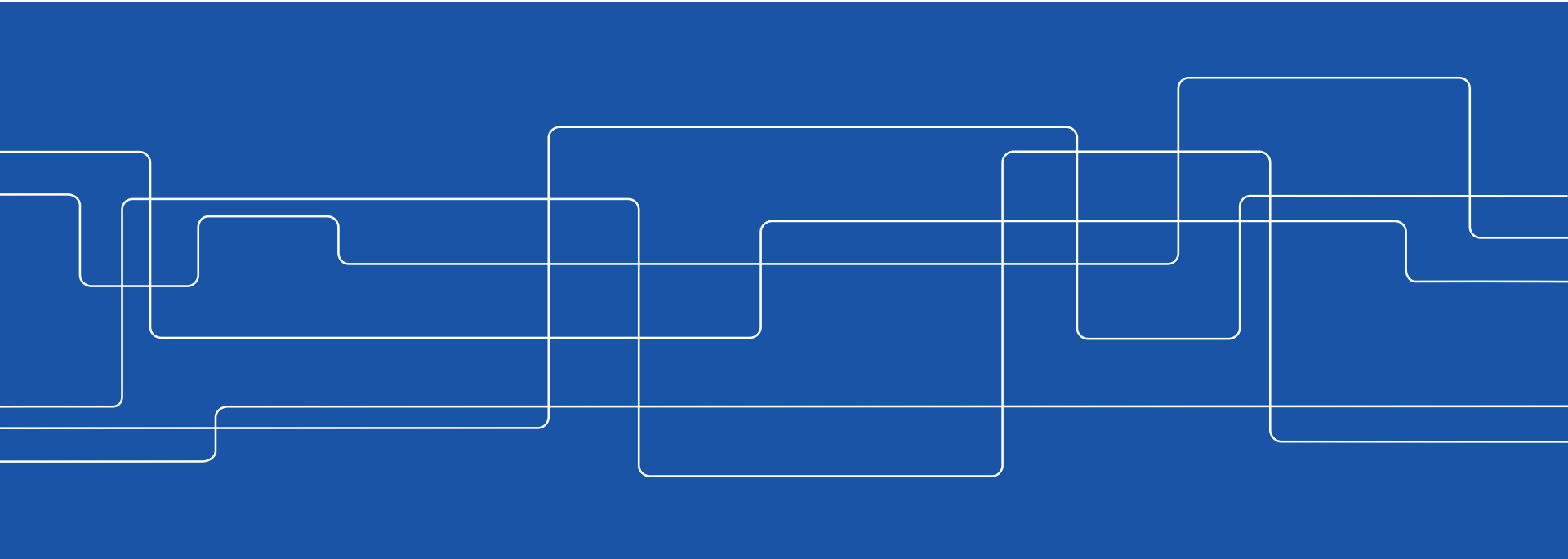




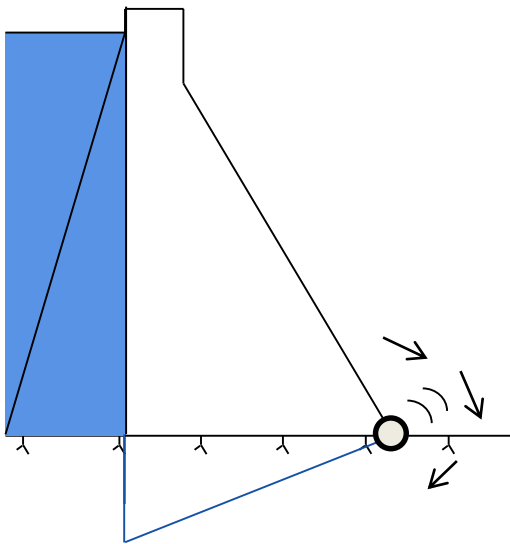
Hantering av osäkerheter vid analys av glidstabilitet för betongdammar grundlagda på berg

Fredrik Johansson KTH/SWECO

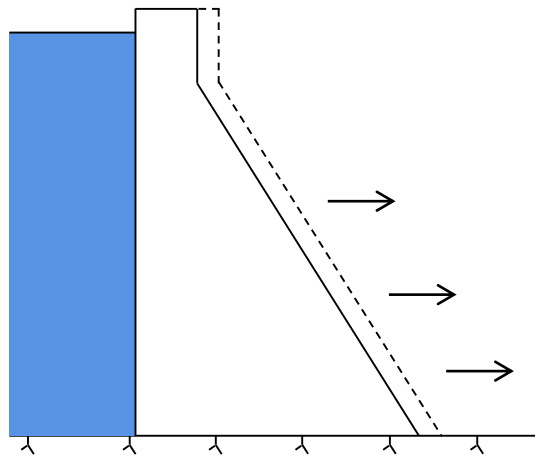
Swedcoldagen - Tema Dammar och grundläggning 10 Oktober 2017



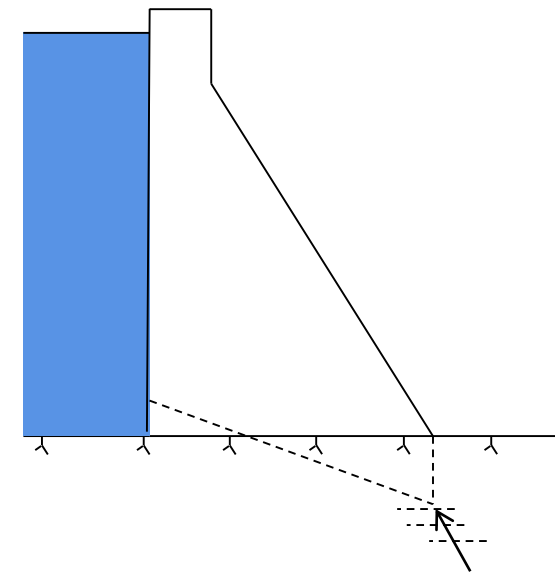
RIDAS – rekommenderade stabilitetskontroller



❖ Stjälpning



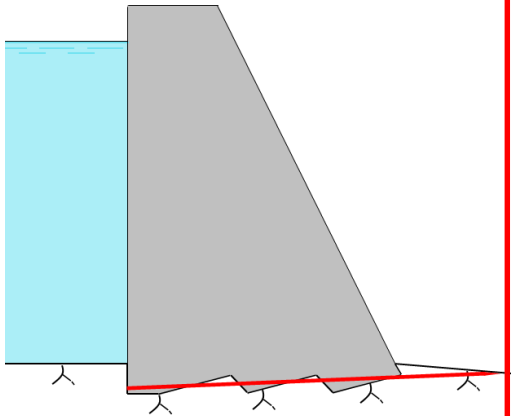
❖ Glidning



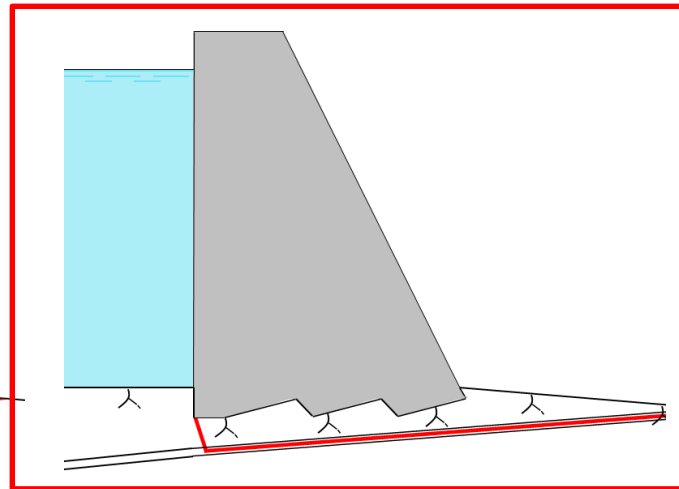
❖ Grundens hållfasthet får inte överskridas

Potentiella brottmoder vid glidning

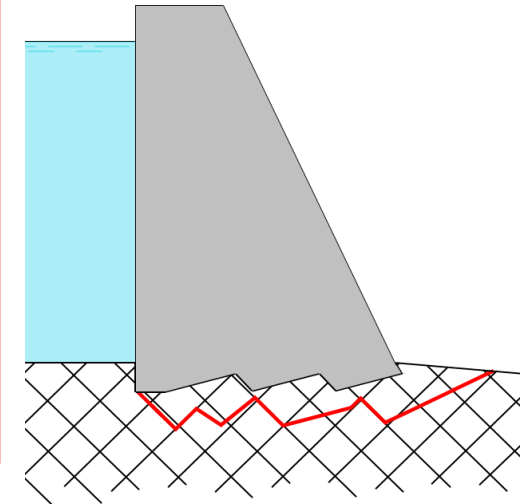
Denna föreläsning fokuserar på
glidning längs sprickplan i berggrunden



Kontaktyta berg-betong (med
eller utan kohesion/vidhäftning)



Sprickplan i berggrunden



I bergmassan

- ❖ Den svagaste av dessa brottmoder bestämmer var brottet inträffar.
- ❖ Brott kan dessutom även inträffa i själva betongkonstruktionen men detta tas inte upp i denna föreläsning.

Dammbrottet vid Malpasset 1959 (Höjd 66 m)



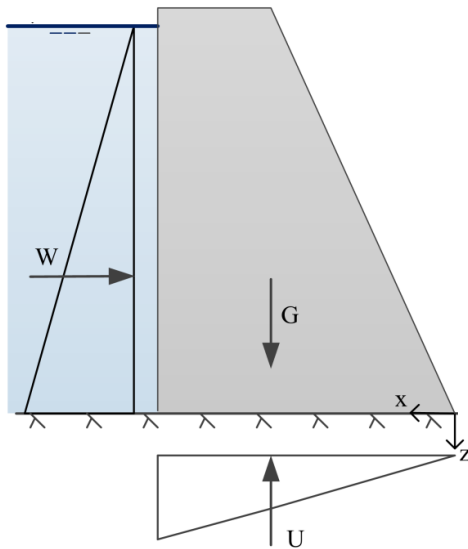
FOTO:ICOLD



Ruinerna av valvdammen Malpasset, Frankrike.
(Foto: Alain Pasquet, Structurae)

- ❖ Trolig orsak till dammbrott var ett **sprickplan i berggrunden** på den vänstra sidan av dammen som skapade en bergkil.
- ❖ Bergkilen i kombination med ett stort **uppträck** initierade en glidning i planet.
- ❖ Glidningen orsakade en **omfördelning av spänningar** i dammen varvid anfangen överbelastades.
- ❖ Totalt omkom **423 personer** och vågen från dammbrottet var initieilt **40 m hög**.

Riktlinjer i Sverige för kontroll av glidstabilitet



- ❖ I Sverige dimensioneras betongdammarna enligt RIDAS, Kraftföretagens Riktlinjer för dammsäkerhet. Glidkontroll ska göras för **anliggningsytan** mellan **betong och berg** samt för eventuella **svaghetsplan i grunden** genom beräkning av en **friktionskoefficient**.

$$\mu = \frac{\sum R_H}{\sum R_V} \leq \mu_{\text{till}}$$

μ = Beräknad friktionskoefficient

R_H = Resultande krafter parallellt glidplanet

R_V = Resultande krafter vinkelrätt glidplanet

μ_{till} = Tillåten friktionskoefficient

- ❖ Rekommenderad friktionskoefficient och säkerhetsfaktor enl. RIDAS för:

Friktionskoefficient Säkerhetsfaktor

Normalt lastfall:	0,75	1,35
Exceptionellt lastfall:	0,90	1,10
Olyckslastfall:	0,95	1,05

- ❖ Säkerhetsfaktorn är baserad på ett antaget brottvärde för grundläggning på berg med $\tan \phi = 1,0$ vilket motsvarar en friktionsvinkel på 45° .



Riktlinjer i andra länder

I andra länder såsom USA, Canada, Norge föreskrivs främst den s.k. ”**Shear friction method**” och beräkandet av en total **säkerhetsfaktor**.

$$SF = \frac{c \cdot A + \sum V \cdot \tan \phi}{\sum H}$$

För den rekommenderade tillåtna säkerhetsfaktorn kan **två linjer** urskiljas, om **kohesion**, c , medräknas eller om den inte medräknas.

Bureau of Reclamation (1974) tillåter att **kohesion medräknas** och rekommenderar följande säkerhetsfaktorer:

Glidyta	Normalt lastfall	Ovanligt lastfall	Extrema lastfall
Betong-berg	3,0	2,0	1,0
I bergmassan	4,0	2,7	1,3

Riktlinjer i andra länder

- ❖ **Federal Energy Regulatory Commission (FERC 2002)** rekommenderar följande säkerhetsfaktorer mot glidning enligt "Shear Friction Method" om **kohesion medräknas**.

Lastfall	Dammar med hög risk Säkerhetsfaktor	Dammar med låg risk Säkerhetsfaktor
Vanligt	3,0	2,0
Ovanligt	2,0	1,25
Efter jordbävning	1,3	1,0

- ❖ Om **kohesion inte medräknas** rekommenderar FERC att följande säkerhetsfaktorer inte underskrids.

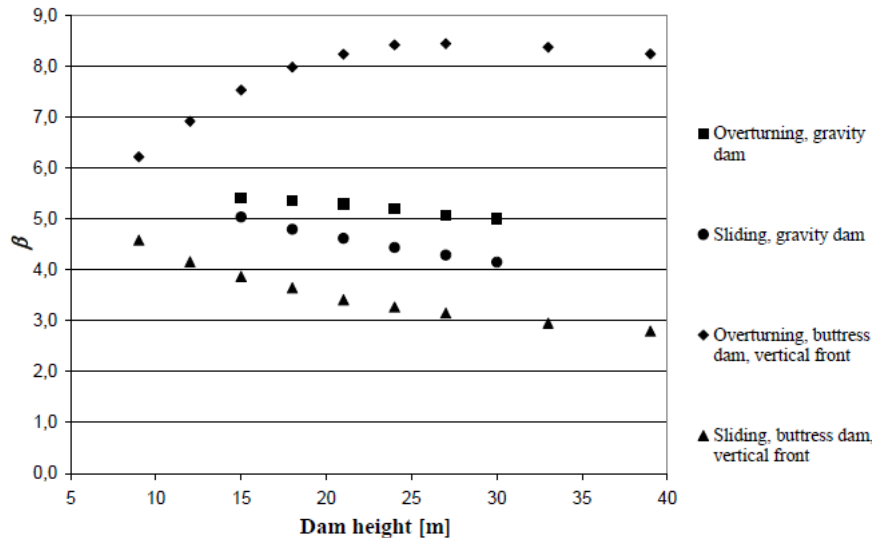
Lastfall	Säkerhetsfaktor
Vanligt	1,5
Ovanligt	1,3
Efter jordbävning	1,3



Jämförelse av riktlinjer mellan Sverige och andra länder

- ❖ En total säkerhetsfaktor bör **återspegla risken** mot brott. Eftersom risken kan uttryckas som produkten av konsekvens och sannolikhet borde detta återspeglas i den rekommenderade säkerhetsfaktorn.
- ❖ Om de Svenska riktlinjerna jämförs med andra länders riktlinjer och dimensioneringsregler kan följande slutsatser dras:
 - Säkerhetsfaktorerna är **något låga** (1,35 mot 1,5 däremot kan kanske brottvärdet anses något konservativt).
 - Erfarenhetsbaserade värden på friktionsvinkeln (**friktionskoefficienten**) används som **enda acceptanskriterie**.
 - Ingen hänsyn** tas vid valet av säkerhetsfaktor till hur parametrarna för skjuvhållfasthet bestämts. Är de **erfarenhetsbaserade** eller baserade på noggranna **undersökningar**.
 - Ingen skillnad** vid valet av säkerhetsfaktor mellan dammar i **olika konsekvensklasser**.
- ❖ Det finns ett behov av **mer nyanserade riktlinjer** i Sverige för utvärdering av glidstabilitet, speciellt vid mer kritiska och svårbedömda fall.

Nackdelar med deterministisk analys



Exempel på resultat som visar på varierande β (brottsannolikhet) vid olika dammhöjd, där samtliga analyserade fall uppfyller RIDAS rekommenderade säkerhetsfaktorer (Westberg & Johansson 2010).

- ❖ Såsom tidigare exempel på riktlinjer visat görs analyserna med **deterministiska jämviktanalyser**.
- ❖ En nackdel vid deterministisk analys (där säkerheten beräknas med enstaka värden på ingående parametrar) är att **spridningen** i ingående parametrar **inte kan beaktas**.
- ❖ Samma säkerhetsfaktor kan ge upphov till **olika brottsannolikhet**.
- ❖ För att uppnå en jämnare säkerhetsnivå på dammarna kan istället **probabilistiska analyser** användas.



Frekventistiskt eller Bayesianiskt synsätt

- ❖ Att tolka en beräknad brottsannolikhet är emellertid inte helt självklart.
- ❖ En ren **frekventistisk** tolkning av brottsannolikhet innebär att vi behöver ha tillgång till ett stort antal data från liknande konstruktioner, underbyggt av teoretiska bevis.
- ❖ Ett annat synsätt är den **Bayesianska** tolkningen av brottsannolikhet. Med denna tolkning ska en beräknad brottsannolikhet ses som en bästa möjliga uppskattning, eller "degree of belief", att konstruktionen går till brott.
- ❖ Tolkningen innebär att brottsannolikheten för ett stort antal konstruktioner är **genomsnittligt korrekt**, men behöver inte nödvändigtvis återspegla den "sanna" brottsannolikheten för den enskilda konstruktionen.
- ❖ För dammar, och även andra geotekniska konstruktioner, är den Bayesianska tolkningen den mest användbara vid dimensionering.



Ingående steg i probabilistisk analys

1. Definiera gränstillstånd, tex. brottgräns, $G(x)$. Gör utifrån felmoder. (ex glidning $G = V \cdot \tan\phi - H$)
2. Beskriv laster, materialparametrar och geometriska parametrar med statistiska fördelningar.
3. Brott inträffar då $G(x) \leq 0$. Beräkna

Säkerhetsindex β , definieras:

$$p_f = P(G \leq 0) = \Phi\left[-\frac{\mu_G}{\sigma_G}\right] = \Phi(-\beta)$$

$$\beta = \frac{\mu_G}{\sigma_G}$$

$-\mu_G$ är medelvärdet (1:a statistiska momentet) för gränstillståndet

$-\sigma_G$ är standardavvikelsen (2:a statistiska momentet) för gränstillståndet

4. Om $\beta > \beta_{\text{target}}$ är konstruktionen tillräckligt säker

Hur bestäms indata till våra beräkningar?



Utskoven vid Krokströmmens valvdamm (Foto: Fredrik Johansson).

- ❖ Beräkningen relativt enkel att utföra.
- ❖ Svårt att identifiera potentiella brottmoder i bergmassan.
- ❖ Svårt att beskriva indata på ingående parametrar då dessa har stora osäkerheter.

Två huvudtyper av osäkerheter



Storskaligt skjuvförsök på bergspricka vid Långbjörns kraftstation (Foto: Fredrik Johansson).

- ❖ **Epistemisk osäkerhet** betecknar när vi saknar kunskap om en egenskap. Kan reduceras med undersökningar.
- ❖ **Aleatorisk osäkerhet**, betecknar ren slumpmässig variation.
 - Denna osäkerhet kan inte reduceras med mer undersökningar.
 - Ofta betraktas rumslig variation som en aleatorisk osäkerhet även om den i princip är epistemisk.
- ❖ För **bergbyggande** generellt, och för brottmoder vid glidning i berg med ingående parametrar är osäkerheterna i **huvudsak epistemiska**.
- ❖ Detta innebär att vi kan **reducera osäkerheterna** genom undersökningar!

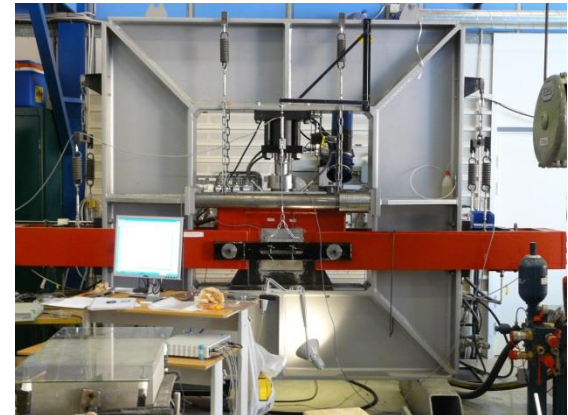
Källor till osäkerhet

Modell

- ❖ Modelfel, exempelvis till följd av **bristfällig kunskap** om den geometriska beskrivningen av glidplanet, eller till följd av **förenklingar** i beräkningsmodellen.

Parameter

- ❖ Inneboende naturlig spridning
- ❖ Statistisk osäkerhet till följd av begränsade antal prov
- ❖ Mätfel
- ❖ Transformationsfel



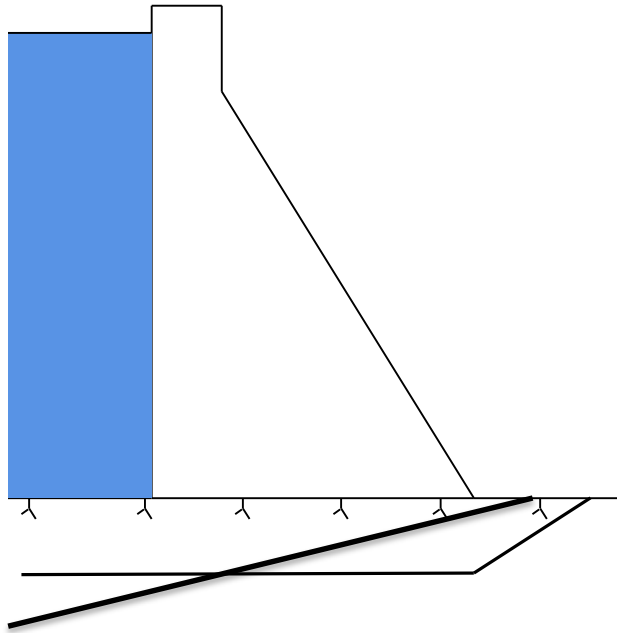
Skjuvbox vid Luleå Tekniska Universitet
(Foto: Fredrik Johansson)

Ett observationsbaserat tillvägagångssätt



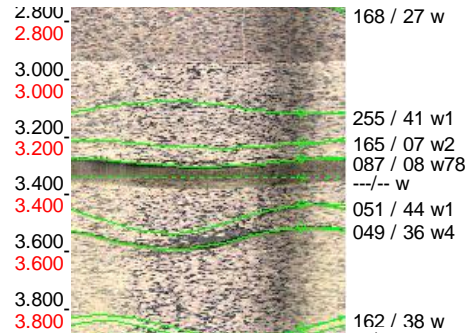
- ❖ Inom **geotekniken** och **bergmekaniken** hanteras epistemiska osäkerheter ofta genom observationsmetoden.
- ❖ Metoden togs fram av **Ralph Peck** (1969) och utgör ett ramverk för dimensionering när osäkerheterna är stora.
- ❖ Metoden bygger på tre huvudprinciper
 - Planera** en preliminär design (ska även täcka samtliga potentiella design scenarier)
 - Observera** relevanta parametrar
 - Genomför fördefinierade **åtgärder** om observationer inte ligger inom acceptabelt intervall.
- ❖ Ett observationsbaserat tillvägagångssätt bör **utgöra grunden** vid stabilitetsanalyser av dammar eftersom vår kunskap om berggrunden ofta är begränsad.

Observationsbaserad metodik for analys av glidplan i berggrund

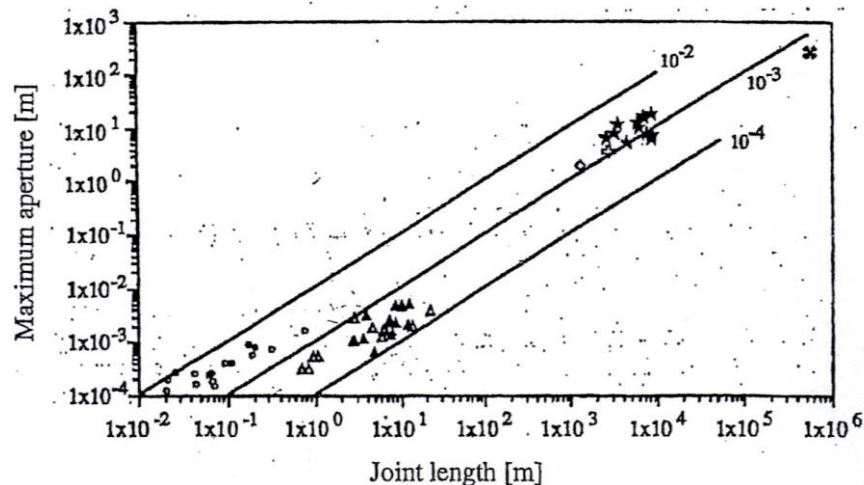


- ❖ Initieellt är vår kunskap om berggrunden dålig. Under dessa förhållanden är det nödvändig att göra en **preliminär analys** med ogynnsam orientering av ett potentiellt sprickplan (oftast visar detta att stabiliteten är otillräcklig).
- ❖ Genomför en **kostnads-nyttoanalys** om dammen bör förstärkas direkt eller om undersökningar sannolikt lönar sig (undersökningar är den vanligaste beslutet).
- ❖ Genomför undersökningar (kärnbörning med filmning av borrhålet) för att reducera osäkerheterna. **Observera** potentiella glidplan.
- ❖ Om **potentiella glidplan identifieras** uppdateras analysen med avseende på det identifierade sprickplanet. Förstärk dammen genom exempelvis försända linstag om stabiliteten är otillräcklig (**Åtgärd**).

Bedömning av spricklängd



Exempel på filmat kärnborrhål med 78 mm öppen spricka.

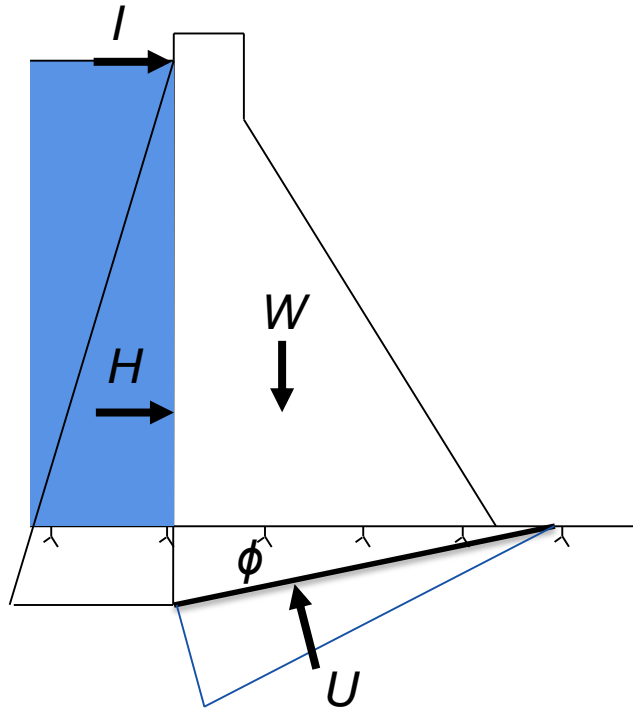


Samband mellan spricklängd och maximal apertur (Vermilye & Scholz 1995).

Vermilye, J. M., & Scholz, C. H. (1995). Relation between vein length and aperture. *Journal of structural geology*, 17(3), 423-434.

- ❖ En av de **viktigaste parametrarna** vid bedömning om glidning kan inträffa är sprickplanetns längd.
- ❖ För att avgöra detta bör **synliga bergtyper**, under dammen eller i anslutning till dammen, **karteras** för att erhålla en förståelse för geologin.
- ❖ Filmning av **kärnborrhål** där sprickbredden (aperturen) har uppmätts utgör ett hjälpmedel för bedömningen.
- ❖ Studier har visat att samband existerar mellan **uppmätt apertur** och **spricklängd**. Exempelvis kan spricklängden överstiga 20 m vid apertur >2 mm.

Ingående parametrar vid analys av glidning i bergsprickor



$$G=(W-U)*\tan\phi-(H+I)=0$$

- ❖ **Laster** utgörs av vattenlast, H , upptryck, U , och istryck, I .
- ❖ **Bärförmågan** bestäms av dammens och bergets tyngd, W , och sprickplanets friktionsvinkel, ϕ .
- ❖ Vattenlast, H , och dammens tyngd, W , är relativt väl kända med **små osäkerheter**.
- ❖ Friktionsvinkel, ϕ , upptryck, U , och istryck, I , är däremot förknippade med **stora osäkerheter** där mätningar och provning, om möjligt, kan behöva genomföras.

Uppdatering genom provning

- ❖ En viktig fråga är hur vi kan **kombinera** tidigare kunskap med resultat från provningar.
- ❖ Vid provning av en parameter kan existerande kunskap uppdateras genom **Bayesiansk uppdatering**.
- ❖ För en normalfördelad variabel **med känd naturlig spridning** kan det uppdaterade (Posterior) förväntade medelvärdet, $E(\mu'')$, och medelvärdets spridning, $Var(\mu'')$, beräknas enligt:

$$E(\mu'') = \frac{m \cdot Var(\mu') + E(\mu') \cdot \left(\frac{\sigma^2}{n}\right)}{Var(\mu') + \left(\frac{\sigma^2}{n}\right)}$$

$$Var(\mu'') = \frac{Var(\mu') \cdot \left(\frac{\sigma^2}{n}\right)}{Var(\mu') + \left(\frac{\sigma^2}{n}\right)}$$

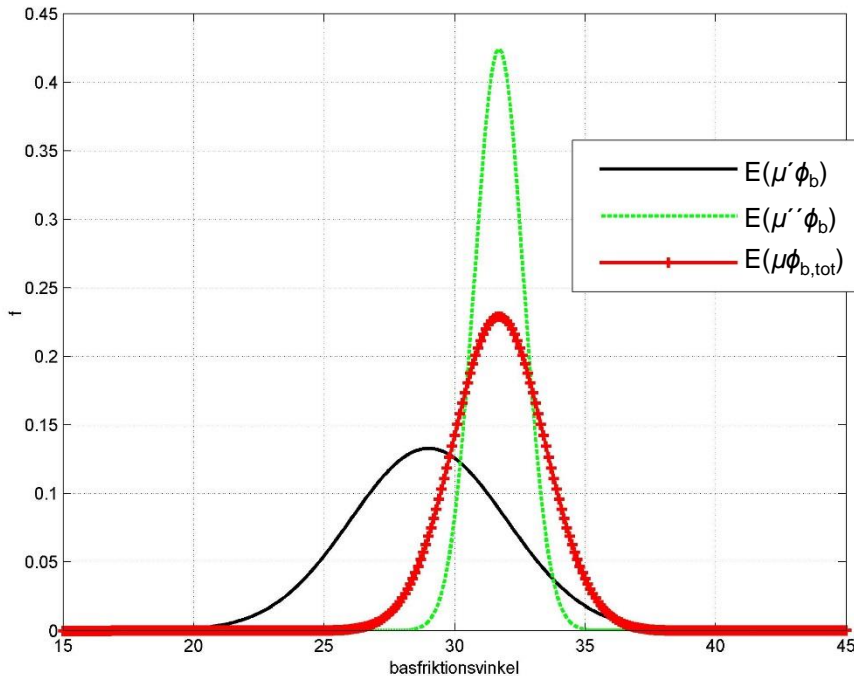
m =medelvärdet från provning

n =antal prov

$E(\mu')$ =A priori uppskattning av förväntade medelvärdet

$Var(\mu')$ =A priori uppskattning av variansen för medelvärdet

Exempel: Uppdatering av basfriktionsvinkeln



Exempel på uppdatering av basfriktionsvinkeln baserad på provning.

- ❖ Hur utnyttjar vi **tidigare kunskap** samt ny kunskap från utförd provning?
- ❖ Basfriktionen för en spricka kan **variera kraftigt** beroende på bergart, förekomst av mineralbeläggningar och mindre mängder fyllnadsmaterial på sprickytan.
- ❖ En **prior** med $E(\phi_b')=29$ grader ansätts, med $\text{Var}(\phi_b')=9$ grader baserad på tidigare kunskap.
- ❖ Den **naturliga inneboende spridningen** antas känd och ansätts med $\text{COV}\phi_b=0,05$.
- ❖ **Två tilt-tester** på prover från borrhärdar utförs. Resultaten är 33 grader och 31 grader.
- ❖ **Uppdatering** enligt föregående ekvationer ger $E(\mu''\phi_b)=31,7$ grader med $\text{Var}(\mu''\phi_b)=0,94$ grader
- ❖ **Totala spridningen** på medelvärdeets variation kan nu beräknas till summan av den naturliga spridningen och den uppdaterade statistiska osäkerheten för medelvärdet:

$$\text{COV } \mu\phi_{b,\text{tot}}^2 = \text{COV}\phi_b^2 + \text{COV } \mu''\phi_b^2$$



Sammanfattning

- ❖ Utvärdering av glidstabilitet för betongdammar är förknippade med stora osäkerheter, vilka i huvudsak är epistemiska.
- ❖ Konventionell stabilitetsanalys enligt RIDAS är onyanserad och riskerar att missa potentiella glidplan i berggrunden eller leda till onödiga förstärkningar.
- ❖ En observationsbaserad metodik baserad på undersökningar och provning rekommenderas.
- ❖ Resultaten från dessa bör inkorporeras i en sannolikhetsbaserad analys, vilken bör utgöra ett komplement till den deterministiska analysen med säkerhetsfaktorer.
- ❖ Genom detta tillvägagångssätt kan en jämn och hög dammsäkerhet uppnås för våra befintliga och nya dammar.



Tack för uppmärksamheten!