Reviderad beräkningsmodell KC-pelare - möjligheter

Stefan Larsson & Wenjun Hua

Dagens innehåll

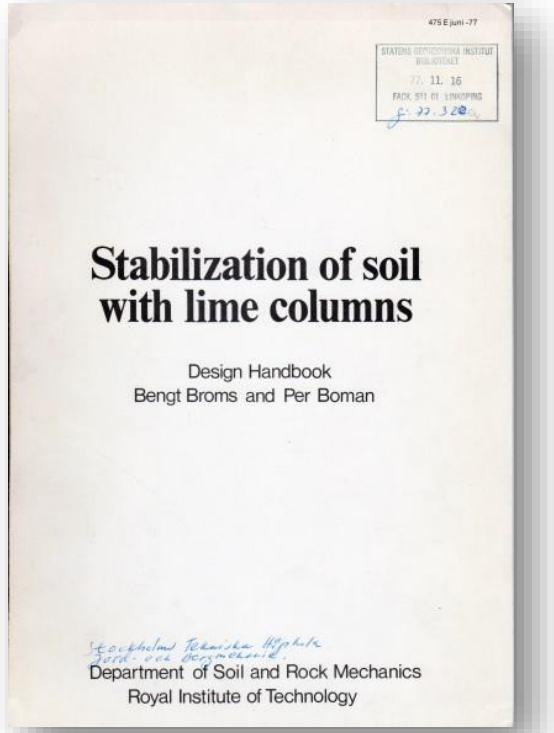
- Stefan - Bakgrund
- Wenjun - Numerical modelling – challenges and obstacles
- Jonas - reflektioner kring forskningsprojektet, Trafikverkets tankar kring alternativa bindemedel samt lite om regelverksarbetet

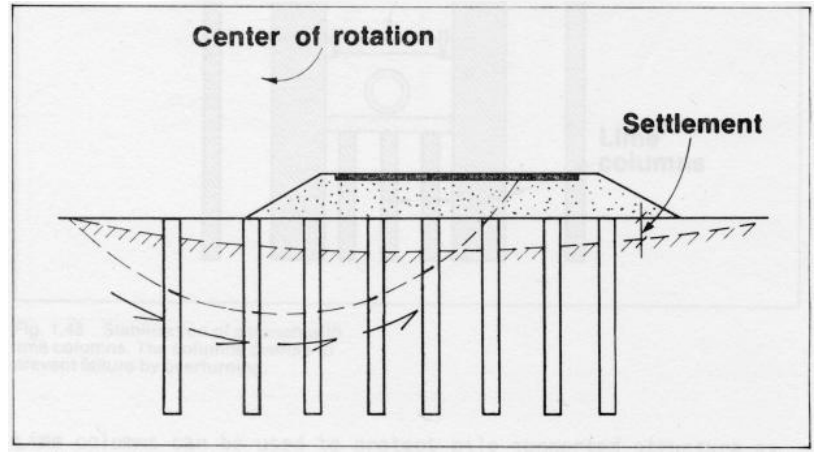


Bakgrund

- Dagens beräkningsmodell för stabilitetsberäkningar är föreslagen/vald i slutet av 1970-talet baserat på att man då precis utvecklat kalkpelarmetoden, där endast bränd kalk användes som bindemedel.
- Då pelarna antogs ha liknande beteende som omgivande jord fast med högre hållfasthet föreslogs en mycket enkel modell i brottstadiet med cirkulärcylindrisk glidyta som går igenom pelare och jord under förutsättning att full samverkan gäller. Metoden förutsätter att pelarna fungerar som dymlingar med ett idealt skjuvbrott genom pelaren

Här är det viktigt att poängtera att inga försök utfördes för att validera modellen





- I slutet av 1980-talet började man använda cement som bindemedel och då erhålls betydligt högre hållfasthet och full samverkan gäller inte längre då pelarna har betydligt lägre brottöjning än omgivande jord.
- Man valde att ändå använda den tidigare modellen men med förutsättningen att man endast får utnyttja en rel. låg hållfasthet (c_u=100 kPa) även om betydligt högre hållfasthet erhålls.
- Senare under 1990-talet började man installera pelare i skivor för att få bättre samverkan.

Återigen viktigt att poängtera att det finns fortfarande idag inte finns några försök som validerar pelarnas och pelarskivors stabiliserande effekt

- Däremot finns teoretiska studier, numeriska modelleringar och modellförsök som påvisar att om man utnyttjar högre hållfasthet så är man påtagligt på osäkra sidan gällande stabilitet.
- Det som dock gör att konstruktionerna generellt har erforderlig stabilitet beror på att hållfastheten i pelarna är betydligt högre vid belastningen och dessutom ökar med tiden.

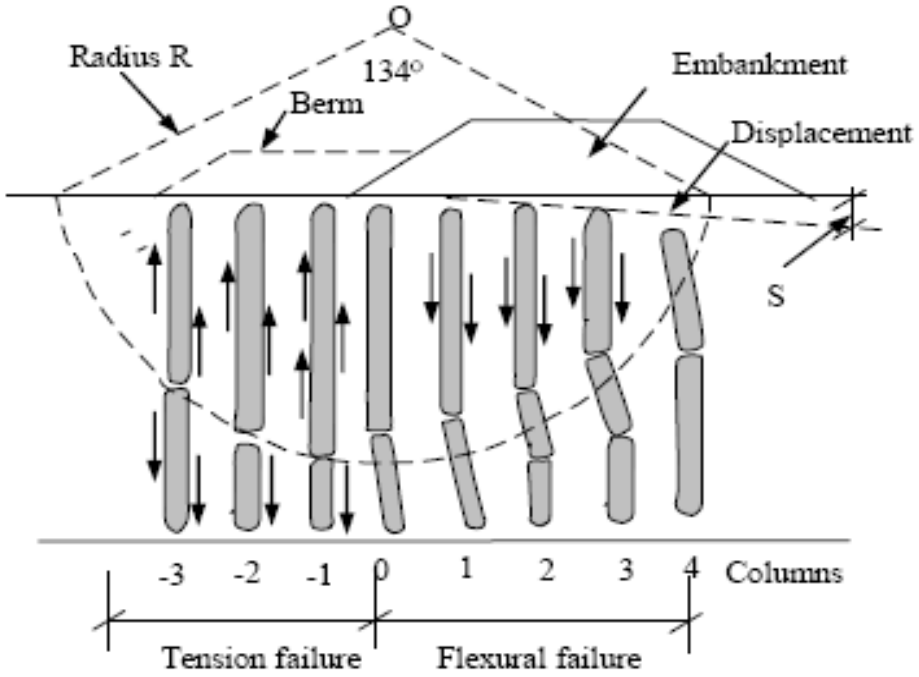
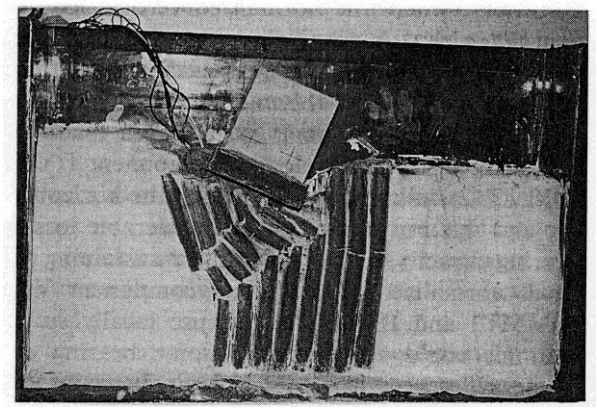


Figure 1. Possible Failure Modes of Columns (Broms, 1999)

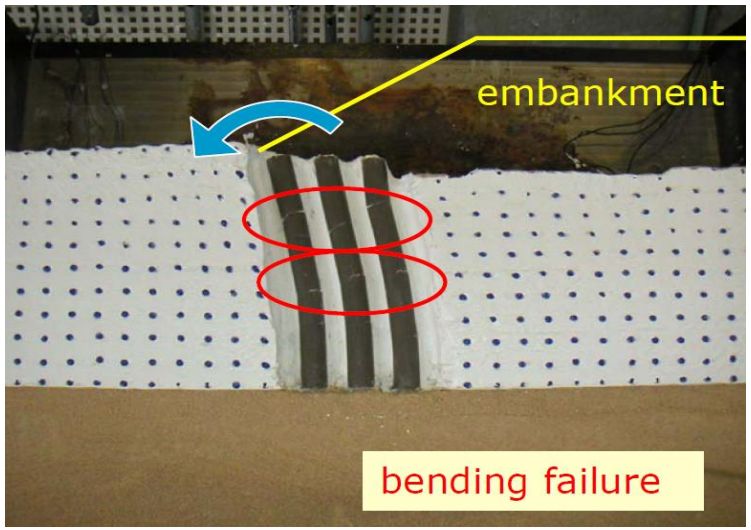


Test by Kitaczume



Test by Larsson





Så vad är då problemet? Ok, vi har en felaktig modell men det verkar funka ändå. Är inte detta ok?

- Idag vill man påtagligt reducera miljöpåverkan genom att utnyttja högre hållfasthet vid dimensionering, vilket leder till reducerat antal pelare. Dessutom vill man påtagligt minska bindemedelsmängderna, samt använda bindemedel med mindre miljöpåverkan. Att då använda i princip samma beräkningsmodell som för kalkpelare (1970-talet) leder sannolikt till för hög beräknad stabilitet och ger således konstruktioner med stabilitet på osäkra sidan.
- Det finns därför ett behov av att se över rådande modeller och vägledning TRVINFRA så att vi får en jordförstärkning med optimal design och med så låga bindemedel som möjligt utan att äventyra säkerheten. En relevant modell betyder också att man med tillräcklig tillförlitlighet kan utveckla metoden vidare.

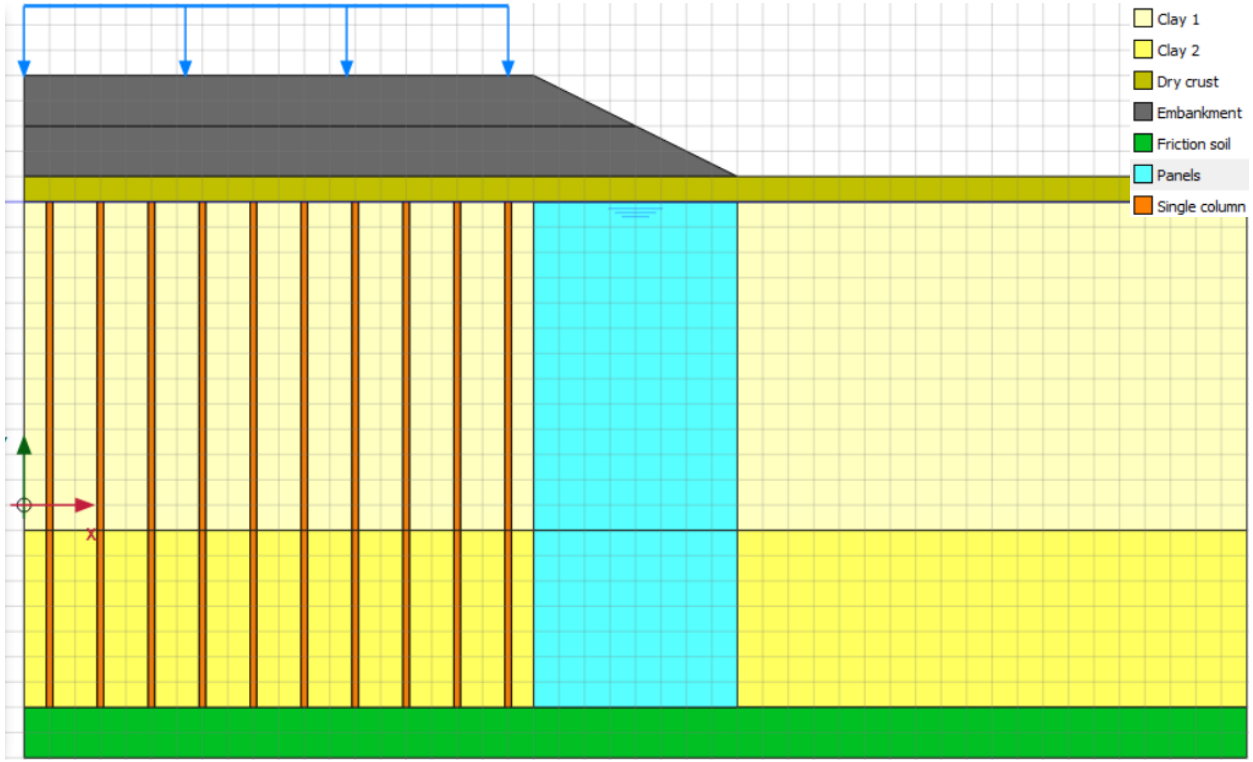
Vad vi nu gör i denna förstudie

- Vi sammanställer den historiska utvecklingen och bakgrunden till rådande vägledning och granskar modeller som används i andra länder och deras vägledningar, samt granskar modeller som föreslagits i vetenskaplig litteratur
- Förstudien utför också en serie avancerade numeriska 3D-simuleringar för ett par typfall för att utreda relevansen för rådande beräkningsmetodik relativt en mer avancerad analys samt kunna uppskatta behovet av utvecklad modell för stabilitetsanalyser.
- Målet är att bedöma huruvida dagens beräkningsmodell avviker från ett mer realistiskt brottmekanism och utifrån det föreslå fortsatt arbete

3D-to-2D conversion

To model the post-peak strength loss (softening), reproduce the development of progressive failure mechanisms, and investigate how softening reduces the factor of safety.

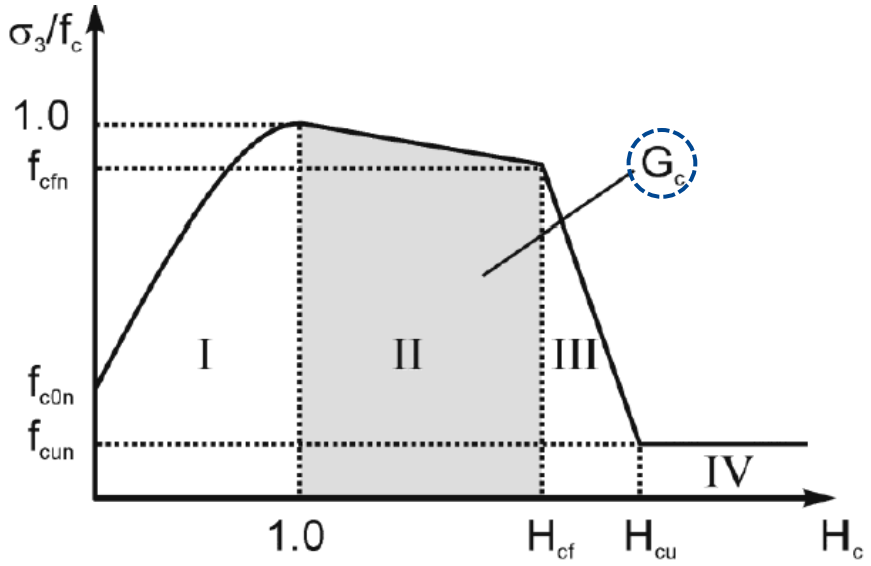
- The *equivalent* method for the columns (matching mechanical properties and transforming geometry) and the *average* method for the panels (modeling panels and soil as a homogeneous block using a_s=0.35).



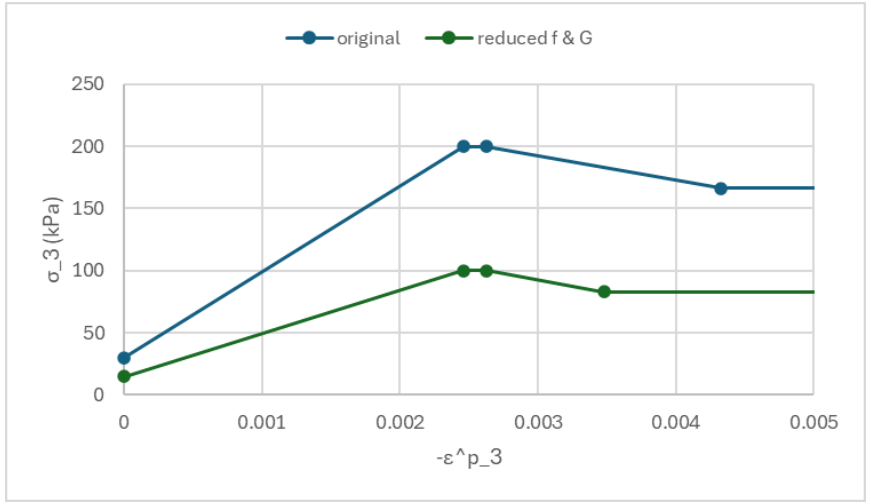
cc	2	m		t_eq	0.25	m
D	0.8	m		a_s	0.3500	
A_col	0.503	m2		(area replacement ratio)		
A_tot	4	m2				
a_r	0.1257	-				
E_col	30000	kN/m2		Su_col	100	kN/m2
E_soil	2000	kN/m2		Su_soil	12	kN/m2
E_eq	11800.00	kN/m2		Su_eq	42.80	kN/m2

Concrete model

- The stress-strain curve in compression is divided into four parts:
  - Part I - quadratic strain hardening
  - Part II - linear strain softening
  - Part III - linear strain softening
  - Part IV - constant residual strength



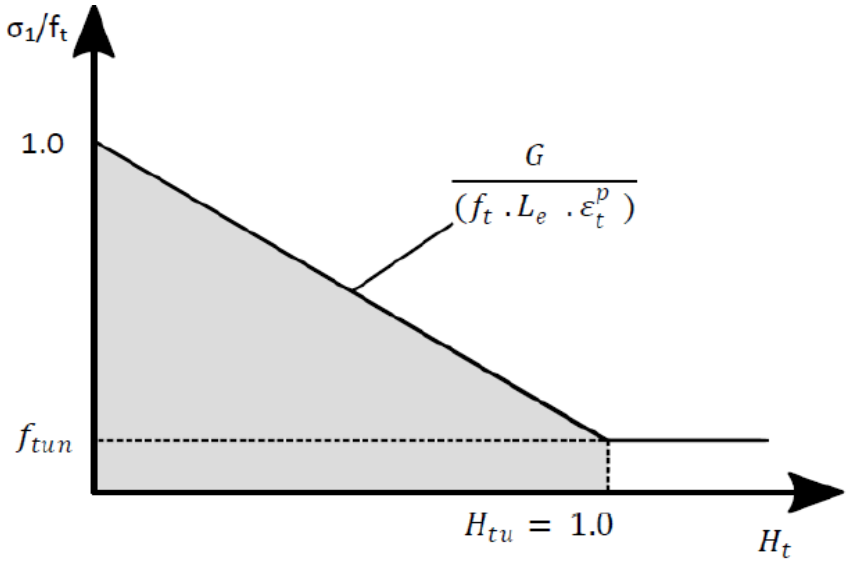
Normalized stress-strain curve in compression



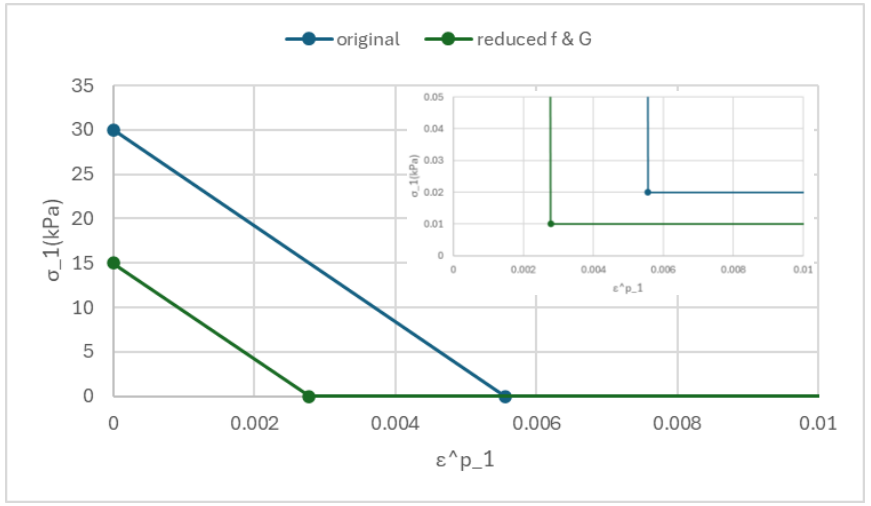
Elastic	original	
E28	40	MPa
nu	0.25	
ϕmax	32	
ψ	0	
Softening - Compression		
fc,28	200	kPa
fc0n	0.15	
fcfn	1	
fcun	0.83	
Gc,28	0.003	kN/m
Softening - Tension		
ft,28	20	kPa
ftun	0.001	
Gt,28	0.005	kN/m

Concrete model

- The behavior in tension is linear elastic until the tensile strength f_t is reached, then softens with a linear strain softening.



Tension softening



Elastic	original	
E28	40	MPa
nu	0.25	
ϕmax	32	
ψ	0	
Softening - Compression		
fc,28	200	kPa
fc0n	0.15	
fcfn	1	
fcun	0.83	
Gc,28	0.003	kN/m
Softening -Tension		
ft,28	20	kPa
ftun	0.001	
Gt,28	0.005	kN/m

Safety factor & Strength reduction

- The ratio of the true strength to the computed minimum strength required for equilibrium (the mobilized strength) is the safety factor.

$$Safety\ \ factor = \frac{S_{maximum\ \ available}}{S_{needed\ \ \ for\ equilibrium}}$$ (where *S* represents the shear strength)

- For soil models using the standard Coulomb failure condition, the safety factor is obtained as:

$$Safety\ \ factor = \frac{c - \sigma_n \tan(\varphi)}{c_r - \sigma_n \tan(\varphi_r)} \qquad \frac{c}{c_r} = \frac{\tan(\varphi)}{\tan(\varphi_r)} = \Sigma Msf$$

- Note that for soil models that do not use the Coulomb failure criterion, the concept of strength reduction remains the same, but with a reduction of strength parameters specific to that soil model.

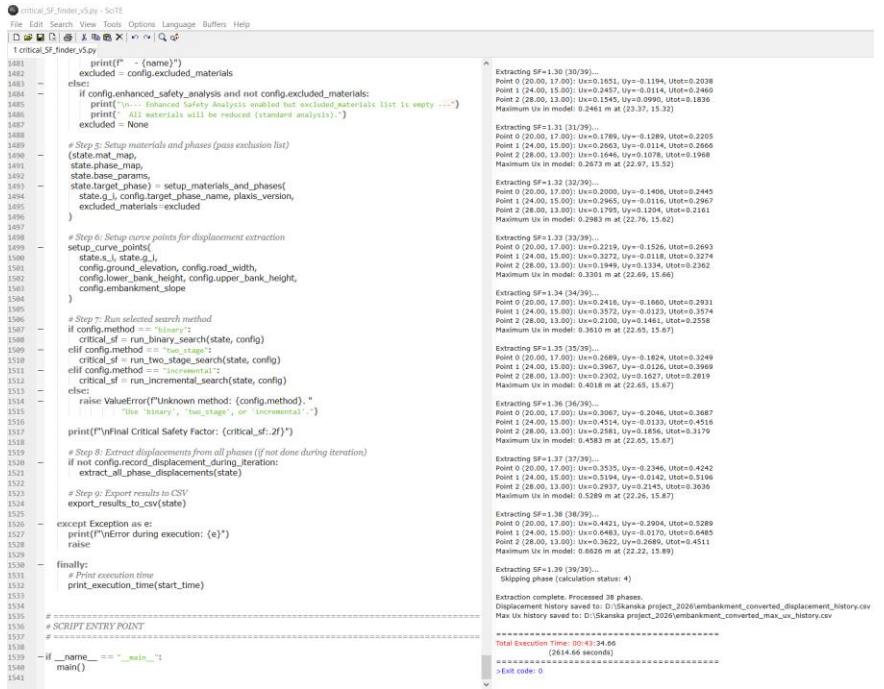
Failure criterion

The main criteria for judging whether a slope has reached critical failure are as follows:

- Using convergence or non-convergence of the numerical calculation as the evaluation criterion, which is related to the finite element algorithm;
- Using the sudden change point in displacement as the evaluation criterion;
- Using whether a continuous through-going (fully developed) failure zone has formed as the evaluation criterion.

Incremental search for the critical safety factor

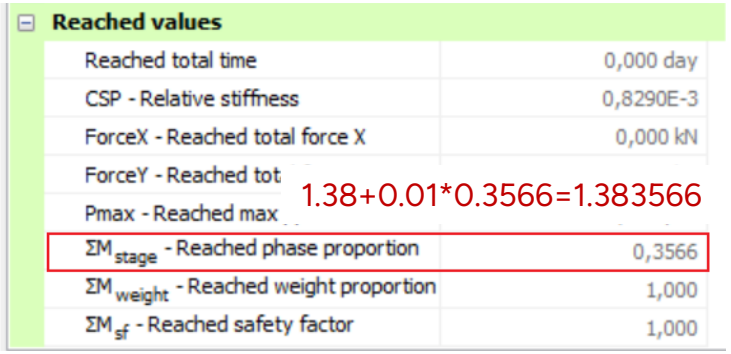
- The Concrete model lacks the φ and c parameters. The strength would not be reduced during the safety analysis, leading to an overestimated global factor of safety.
- A Python script was written to perform an incremental search for the “critical” safety factor.
  - Starts from SF=1.01 and increases with a fixed step size (default 0.01)
  - Each new phase is based on the previous phase (a continuous chain of phases)
  - Stops when the calculation fails to converge

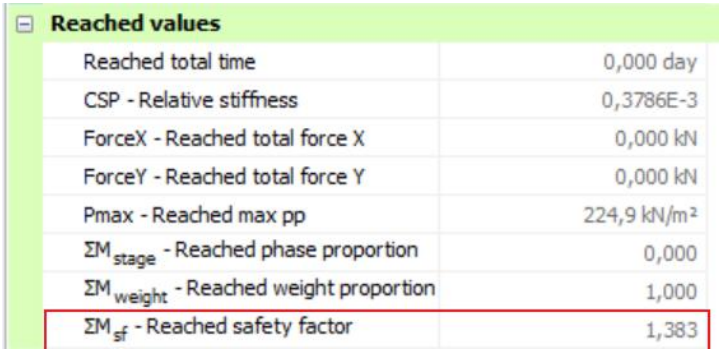


Incremental search for the critical safety factor

- A series of tests, including comparisons between Plaxis's built-in safety analysis and the script when using only the MC model, has been run to ensure the approach is valid.

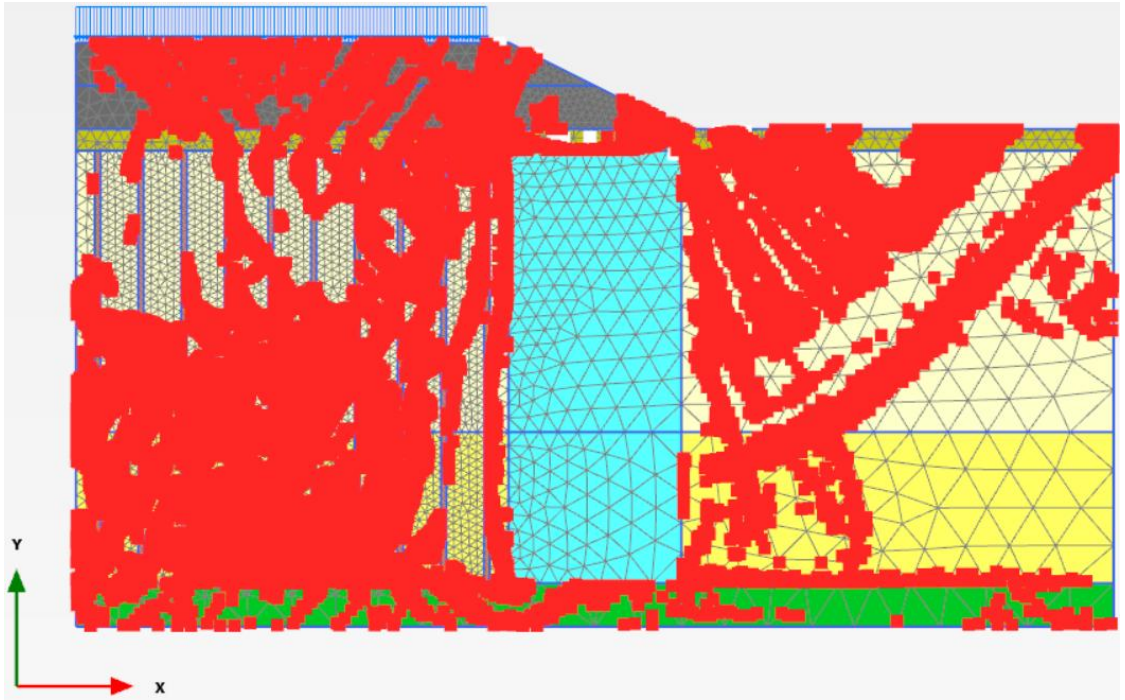




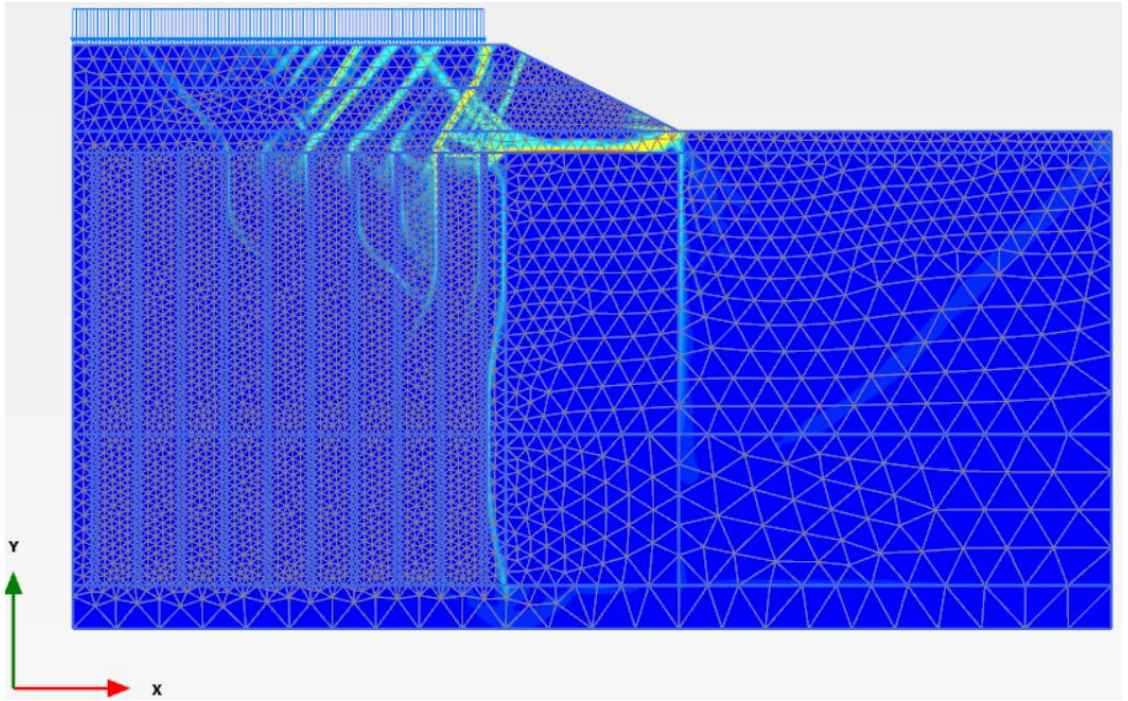


When using only the MC model, the script produces results consistent with the built-in safety analysis, though the computation time is longer.

Selected results



Plastic points

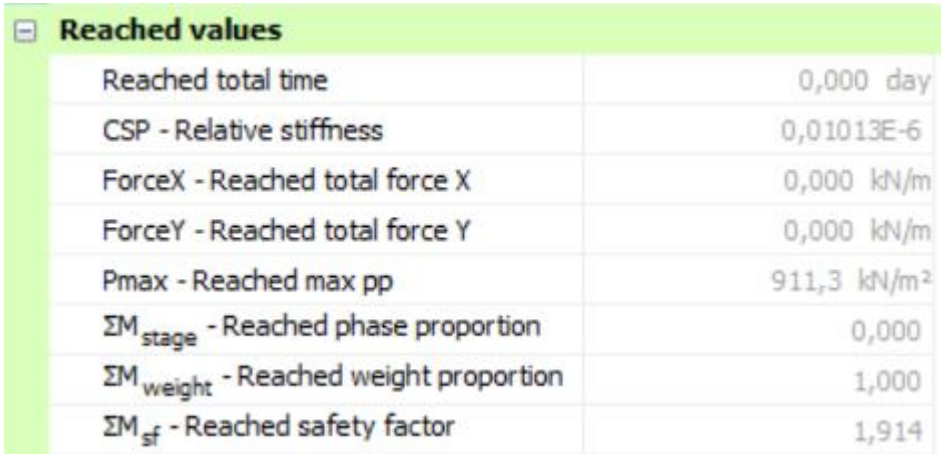


Incremental deviatoric strain $\Delta\gamma_s$

Selected results



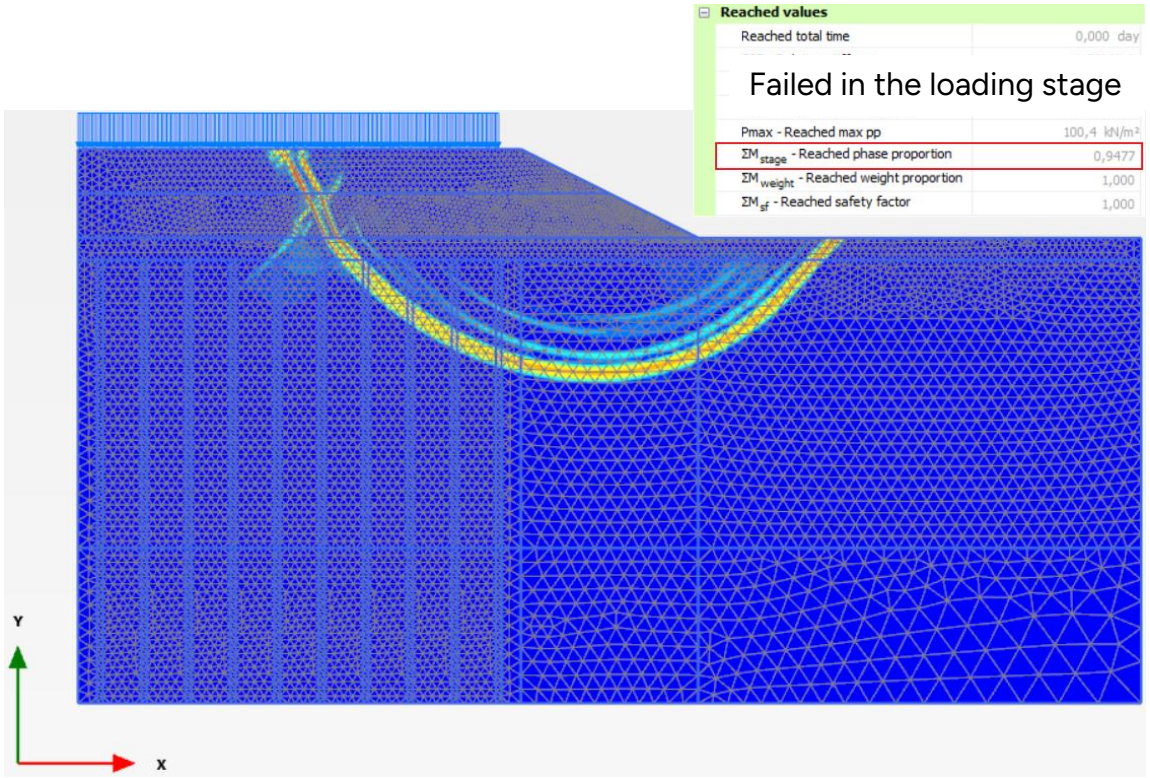
Script



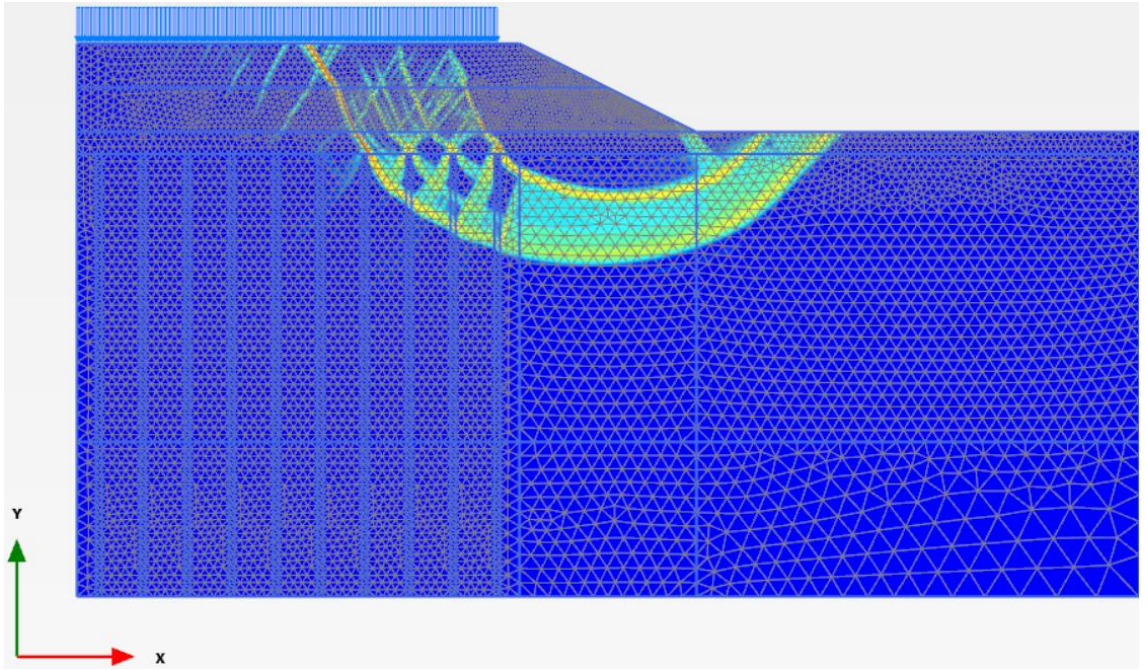
Built-in

- With the built-in safety calculation, the model behaves as a standard Mohr–Coulomb model. However, when the script is used, the hardening effect is included, resulting in a higher safety factor than in the built-in analysis.

Selected results



Set the Single column and the Panels' material to Clay

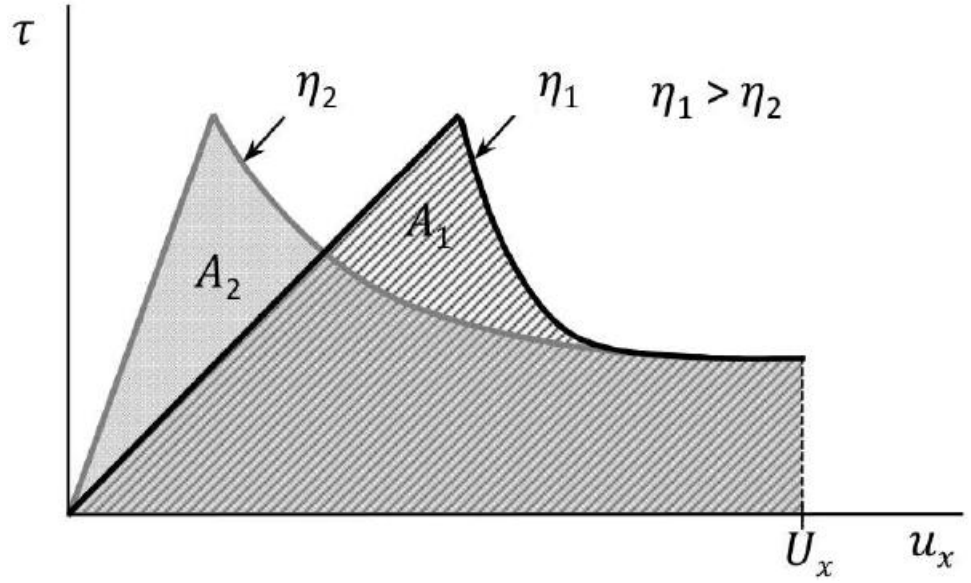


Set the Panels' material to Clay

Incremental deviatoric strain $\Delta\gamma_s$

Mohr-Coulomb Strain Softening (MCSS) model

- An MCSS model has been developed to include strain-softening plasticity.
- The softening behavior is accounted for by reducing the effective strength parameters (φ' and c') with the accumulated equivalent plastic strain ε^p_{eq} according to the following exponential softening rules:



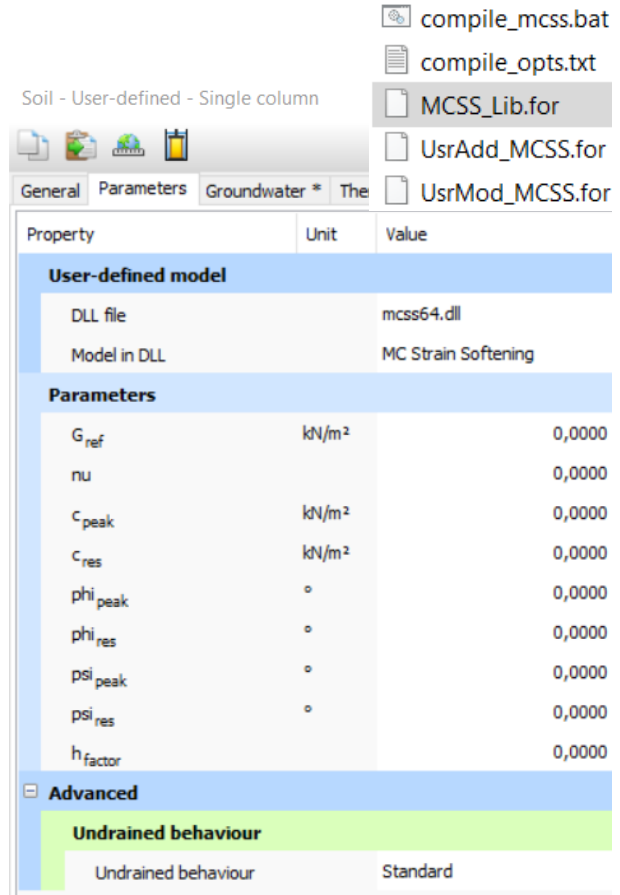
$$c' = c'_r + (c'_p - c'_r)e^{-\eta\varepsilon^p_{eq}}$$

$$\varphi' = \varphi'_r + (\varphi'_p - \varphi'_r)e^{-\eta\varepsilon^p_{eq}}$$

The model requires the specification of peak (c'_p, φ'_p) and residual (c'_r, φ'_r) strengths. An additional parameter η is also necessary to control the rate of strength decrease.

Next steps

- Calibrate the Concrete model's parameters against the standard MC model.
- Combine the MCSS model with the script to simulate strain softening while supporting safety analysis.
- Extend the simulations to 3D, without needing to consider 2D equivalence.
- Quantify the reduction in the safety factor for different levels of softening.



TRAFIKVERKET

Trafikverkets reflektioner kring beräkningsmodeller för djupstabilisering, regelverk och alternativa bindemedel

BIG-Webbinarium
2026-04-17

Jonas Axelsson, Trafikverket
Ansvarig för regelverk Geokonstruktioner
Ämnessamordnare IVta geoteknik
Ansvarig för Kompetensnätverk geoteknik

TRAFIKVERKET

Reflektioner på behov av forskning

- Gjordes mycket forskning och utveckling för 20-25 år sedan
- Dagens regelverket bygger mycket på ”gör vi så här så blir det bra”
- Har historiskt varit tillräckligt bra och djupstabilisering har kunnat konkurrera inom teknik och ekonomi
  - nu kommer miljö- och klimatpåverkan in som en aspekt i större grad



TRAFIKVERKET

Reflektioner på behov av forskning

Vi vet att

- flera antaganden i beräkningsmetodiken inte är riktiga
- flera antaganden och emperi är ofta på säker sida
- lokala erfarenheter utifrån jordegenskaper sällan beaktas
- Beräkningsmodeller innehåller relativt grova förenklingar

- Forskning och utveckling behövs och pågår!

TRAFIKVERKET

Reflektioner på behov av forskning kring beräkningsmodeller

Forskning behövs för att få bättre förståelse för hur en djupstabilisering fungerar i verkligheten och hur vi, med mer avancerade beräkningsmodeller, kan effektivisera användningen av metoden där det behövs

Därtill behövs forskning och utveckling av enklare analys- och dimensioneringsmetoder så de tillräckligt bra liknar resultaten från de avancerade modellerna och beräkningarna

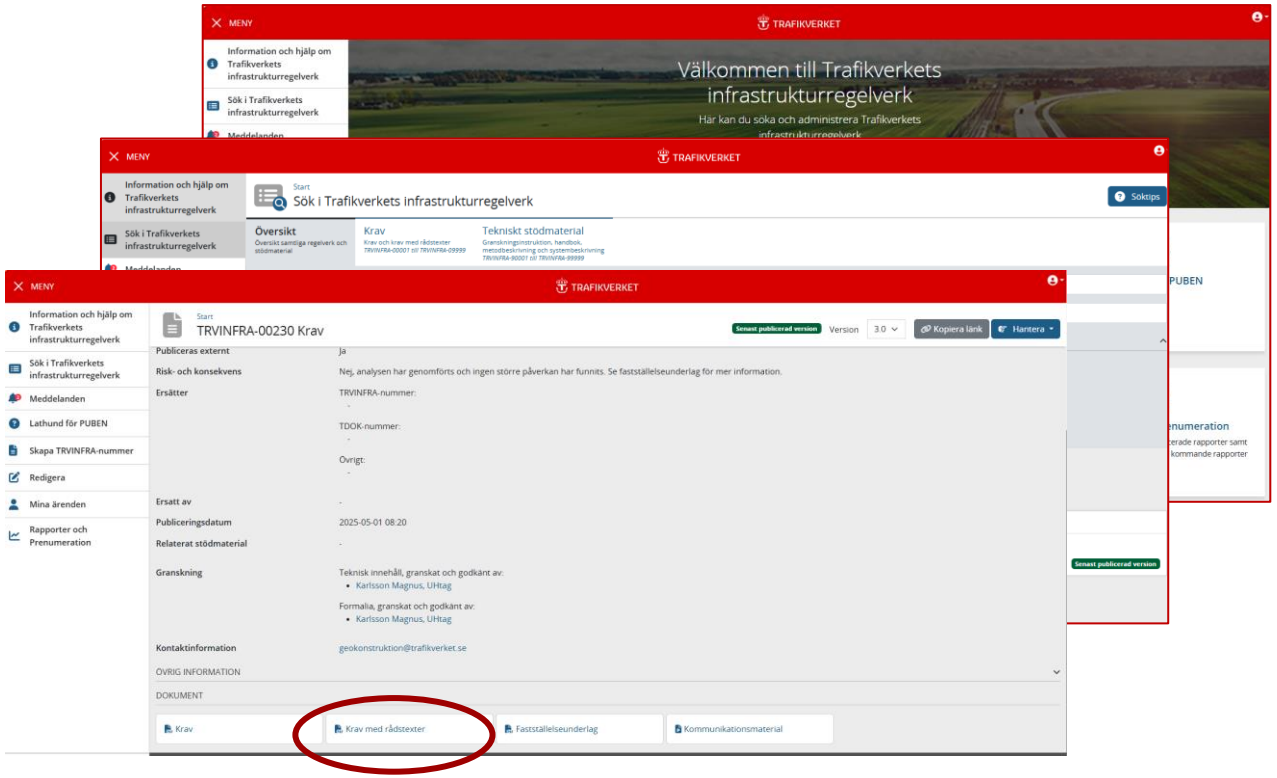
TRAFIKVERKET

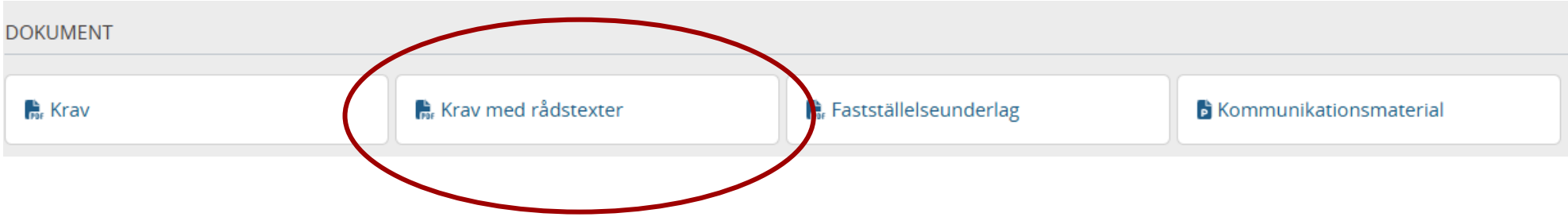
Regelverk TRVINFRA-00230

Geokonstruktion, Dimensionering och utformning

Allmänt

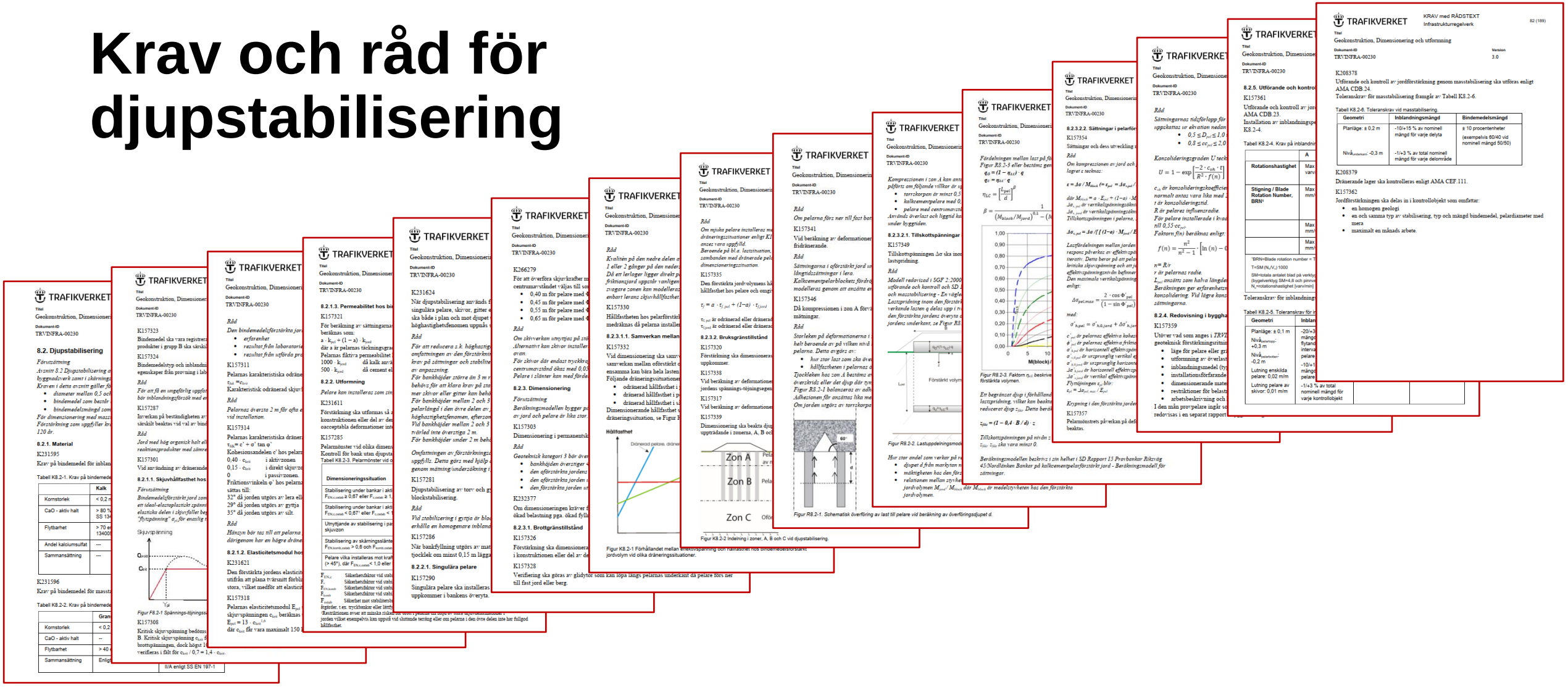
- Trafikverkets regelverk (TRVINFRA) kommer ni åt på PUBEN
- Sök efter ”00230” eller ”Geokonstruktion”
- Använd i första hand versionen med både krav och råd





TRAFIKVERKET

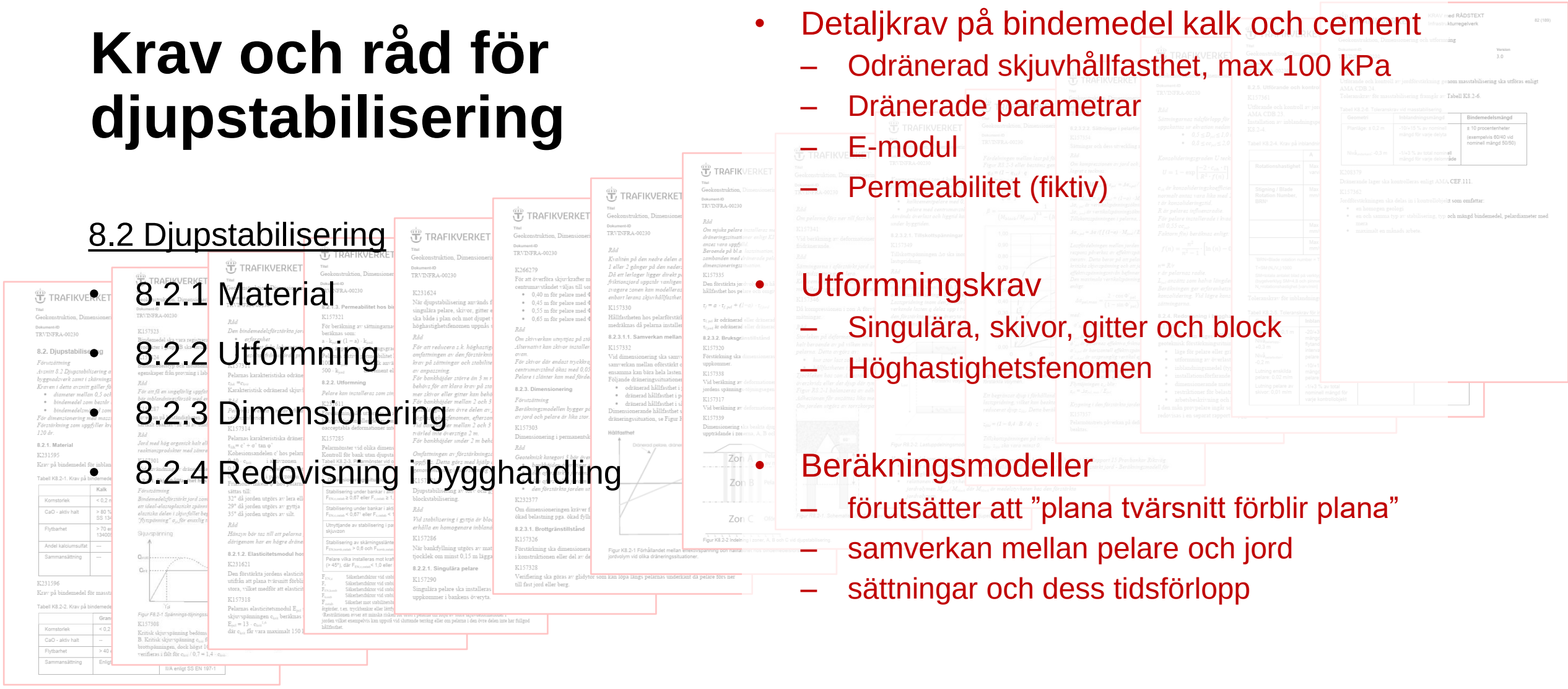
Krav och råd för djupstabilisering



Krav och råd för djupstabilisering

8.2 Djupstabilisering

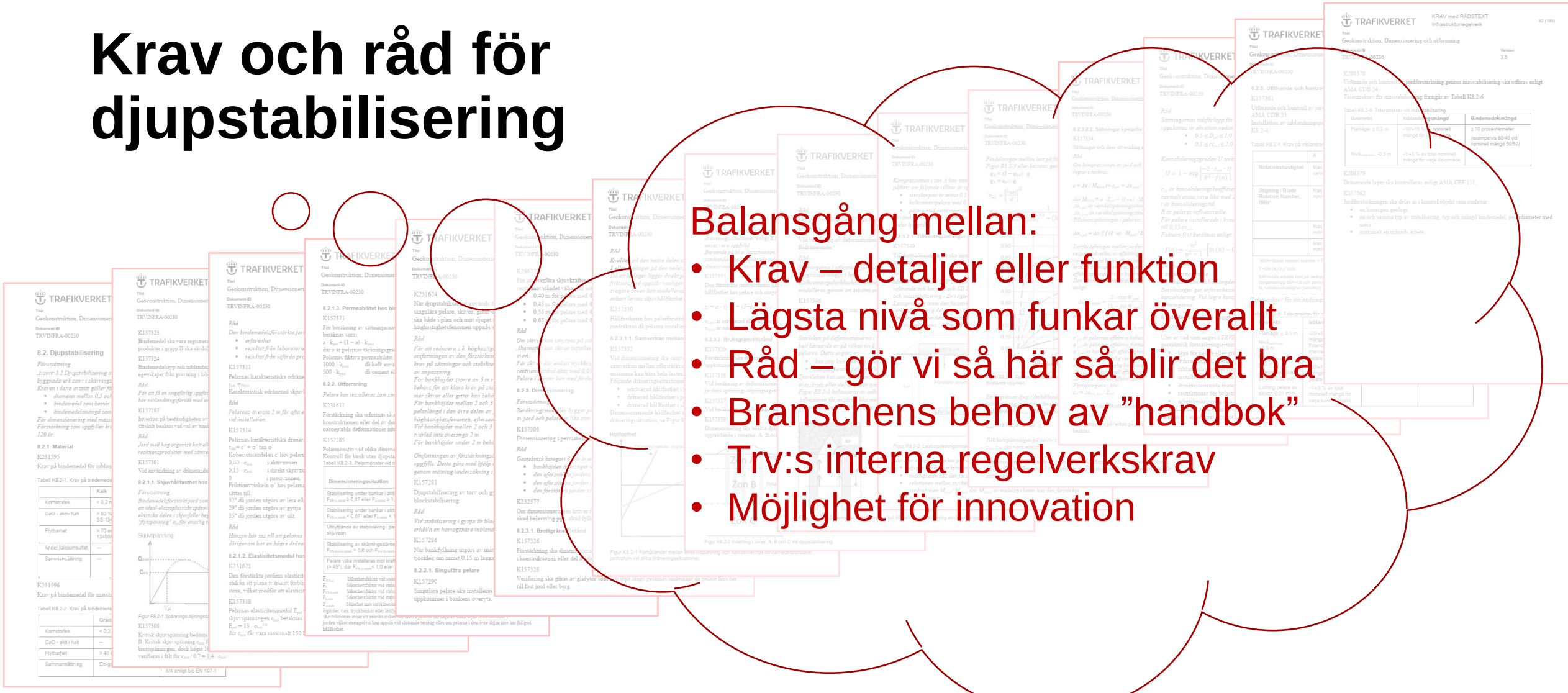
- 8.2.1 Material
- 8.2.2 Utformning
- 8.2.3 Dimensionering
- 8.2.4 Redovisning i bygghandling



- Detaljkrav på bindemedel kalk och cement
  - Odränerad skjuvhållfasthet, max 100 kPa
  - Dränerade parametrar
  - E-modul
  - Permeabilitet (fiktiv)
- Utformningskrav
  - Singulära, skivor, gitter och block
  - Höghastighetsfenomen
- Beräkningsmodeller
  - förutsätter att ”plana tvärsnitt förblir plana”
  - samverkan mellan pelare och jord
  - sättningar och dess tidsförlopp

TRAFIKVERKET

Krav och råd för djupstabilisering



Balansgång mellan:

- Krav – detaljer eller funktion
- Lägsta nivå som funkar överallt
- Råd – gör vi så här så blir det bra
- Branschens behov av ”handbok”
- Trv:s interna regelverkskrav
- Möjlighet för innovation

TRAFIKVERKET

Regelverkets öppningar för innovation och utveckling

Dispens

Särskild kravspecifikation

TRAFIKVERKET

Särskild kravspecifikation eller dispens?

- **Dispens**
  - Skickas in av Trafikverkets projekt till regelverksägaren (IVta).
  - När krav i regelverk frångås/ej kan uppfyllas vid dimensionering/utformning.

- **Särskild kravspecifikation**
  - Tas fram av geokonstruktören till Trafikverket (kontrollerande enhet/geotekniker).
  - Upprättas när detaljkrav för planerad utformning, tillämpning eller material saknas i regelverket.
  - Grundkrav på bärighet, stadga och beständighet ska uppfyllas.
  - Ofta kan flertalet av kraven i regelverket fortfarande gälla

”Samma” krav på innehåll/ dokumentation

TRAFIKVERKET

Förutsättningar i regelverket

TRVINFRA-00230 3.0

8.2. Djupstabilisering

Förutsättning

Avsnitt 8.2 Djupstabilisering avser förstärkning under väg- och järnvägsbankar, und
byggnadsverk samt i skärningsslänter.
Kraven i detta avsnitt gäller för dimensionering av mjuka inblandningspelare med:

- *diameter mellan 0,5 och 0,8 m*
- *bindemedel som består av minst 70% bränd kalk eller cement*
- *bindemedelsmängd som uppgår till minst 70 kg/m³ pelare.*

För dimensionering med masstabilisering gäller avsnitt 8.2 i tillämpliga delar.
Förstärkning som uppfyller kraven enligt avsnitt 8.2 bedöms ha avsedd livslängd på 120 år.

Inom förutsättning
→ Dispens för krav

Ej inom förutsättning
→ SKS tas fram

TRAFIKVERKET

TRVINFRA-00230, version 3.0 – ändringar jämfört med version 2.0

- 8.2 Djupstabilisering
  - Sett över dispositionen + vad som är krav och råd + gjort en del mindre ändringar, bl.a. bindemedelsmängd i förutsättning.
- 8.2.1 Material
  - Ändrat råd till krav för hur elasticitetsmodul beräknas utifrån $c_{krit.}$
  - Ändrat råd till krav för fiktiv permeabilitet i pelarförstärkt jord.
- 8.2.2 Utformning
  - Lagt till värden för totalsäkerhetsmetoden i tabell.
  - Ändrat råd vad gäller pelarmönster för att hantera hastighetsberoende vibrationer baserat på kunskap från Ostlänken.
  - Ändrat råd till krav för c/c-avstånd mellan pelare i skiva.
- 8.2.3 Dimensionering

8.2.1 Material	Justerat hänvisningar i tabell K8.2-1 och K8.2-2. ASTM C25 ersätts med SS134003, sammansättning masugnsslagg med SS-EN 15167-1 och CEM II/A-LL med CEM II/A.
8.2.1.1 Skjuvhållfasthet hos bindemedelsförstärkt jord	Råd R157305 tas bort. Första delen av rådet inkl. figur R8.2-1 skrivs som en förutsättning som inleder avsnitt 8.2.1.1. Den sista meningen kompletterar K157308 som handlar om samma sak.
8.2.1.2 Elasticitetsmodul hos bindemedelsförstärkt jord	Har gjort om råd R157318 till krav och tagit med övre gräns för c_{krit} vid bestämning av E_{pel}.
8.2.1.3 Permeabilitet hos bindemedelsförstärkt jord	Har gjort om råd R157321 om bestämning av pelarnas fiktiva permeabilitet till krav och slagit samman med tidigare K231620 och justerat texterna något.
8.2.2 Utformning	Justerat K157285 så att koppling till tabell K2.8-3 blir tydligare. Kompletterat tabellen med vad som gäller vid användning av totalsäkerhetsmetoden. Kompletterat råden till K231624 rörande pelarmönster för att klara höghastighetsfenomen. För bankhöjder över 3 m behövs inga ytterligare krav. För bankhöjder under 3 m saknas kunskap för att inte använda gitter. Bankhöjden bör vara minst 2 m vid användning av inblandningspelare för att reducera höghastighetsfenomen.
8.2.2.2 Pelare i skivor, gitter eller block	Gjort om råd till K157297 om överföring av skjuvkrafter mellan pelare till krav.
8.2.3.1.1 Samverkan mellan pelare och omgivande jord.	Formulerat om K157332 så det blir tydligare. Beaktas inte samverkan mellan pelare och omgivande jord ska pelaren kunna ta hela lasten ensamt.

TRAFIKVERKET

Alternativa bindemedel

Identifierat behov av ett gemensamt förhållningssätt kring hantering av alternativa bindemedel

Trafikverket avser att (internt i första hand) ta fram ett gemensamt förhållningssätt hur Trafikverket ska hantera alternativa bindemedel för djupstabilisering (”kc-pelare”) i våra projekt.

På sikt även göra förändringar i regelverket.

TRAFIKVERKET

För att

- i de flesta projekt idag projekteras och upphandlas kalk och cement som bindemedel
- i dessa projekt kommer numera alltid frågan om utbyte till (oftast) CKD/C ”Multicem” som ger mindre CO2-påverkan och då ställs vi inför bl.a. att:
  - Projekten/entreprenören trycker på för det ger bättre siffror, miljöbonus etc.
  - regelverket hanterar inte >30% alternativa bindemedel (finns dock detaljkrav på kalk och cement)
  - historiskt har detta hanterats olika i projekt/regioner – bla utifrån olika jordförhållanden och erfarenhet
  - svårt att hantera vid upphandling och få pris i konkurrens (en leverantör)
  - vi behöver resultat från provpelare, dvs i entreprenadsskede, för att veta att det fungerar

TRAFIKVERKET

Hantering av alternativa bindemedel historiskt

- Tillåtit endast 80 % av hållfasthet vid stabilitet
- Tillåtit endast vid pelare för sättningsreduktion
- Varit mer restriktiva vid järnväg än för väg
- Låg stigningshastighet (likställt med cementpelare, 15 mm/varv)
- Efterfrågat provpelare i fält och utvärdering
- Ökad andelen produktionskontroll
- Vissa projekt har haft utökad bevakning/uppföljning från Trafikverkets sida

TRAFIKVERKET

Hur tänker Trafikverket just nu?

Tidiga skeden:

- Alltid prova alternativa bindemedel i lab för att se om det får effekt
- Bedöm ev vinst för CO2 och ekonomi för alternativa bindemedel utifrån projektets förutsättningar

Upprättande av FU/Bygghandling:

- Alltid få med provpelare(-områden) i FU som omfattar alternativa bindemedel
- Funderar på upphandlingsmöjligheter för konkurrens/alternativ

Entreprenadsskede

- Vara öppna för att byta bindemedel, men
  - kräver in underlag motsvarande särskild kravspecifikation
  - kräver att provpelare installeras och utvärderas

TRAFIKVERKET

Tänk även på att…

- det är ok att projektera med lägre än 100 kPa i pelarna
  - t.ex. när det är täckningsgrad eller geometri som styr omfattningen
- det går att få t.ex. CKD/C 30/70-blandning
  - leverantören av Multicem vill sälja 50/50-blandning
  - ofta dyrare än 50/50 om vi väljer efter upphandling
- Det finns fler alternativa bindemedel på marknaden
- det ge lika mycket positiva effekter att gå ned i bindemedelsmängd som att byta bindemedel
- Trafikverket har erfarenheter från många projekt och stödfunktion att koppla in

TRAFIKVERKET

Trafikverket vill ha dialog med er i branschen!

Synpunkter och frågor på regelverket skickas till geokonstruktion@trafikverket.se

Övriga tankar, frågor eller önskemål om vidare presentation och diskussion får ni gärna skicka till mig jonas.axelsson@trafikverket.se

Förslag på forskning till info@big-geo.se