



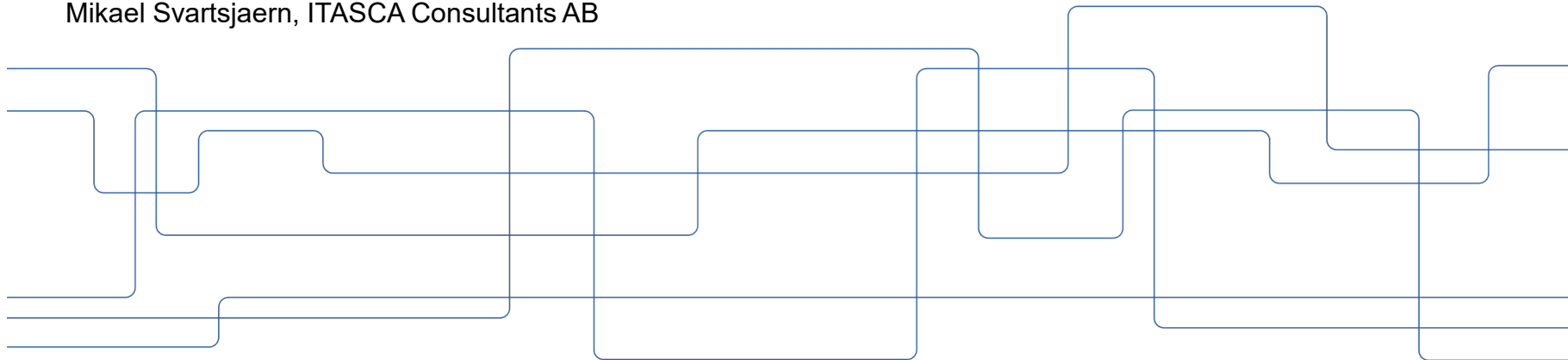
*Ställ dina frågor till
Patrik i chatten!*

Verifiering av analytisk modell för valvstabilitet

BeFo-projekt 409

Fredrik Johansson, KTH

Mikael Svartsjaern, ITASCA Consultants AB



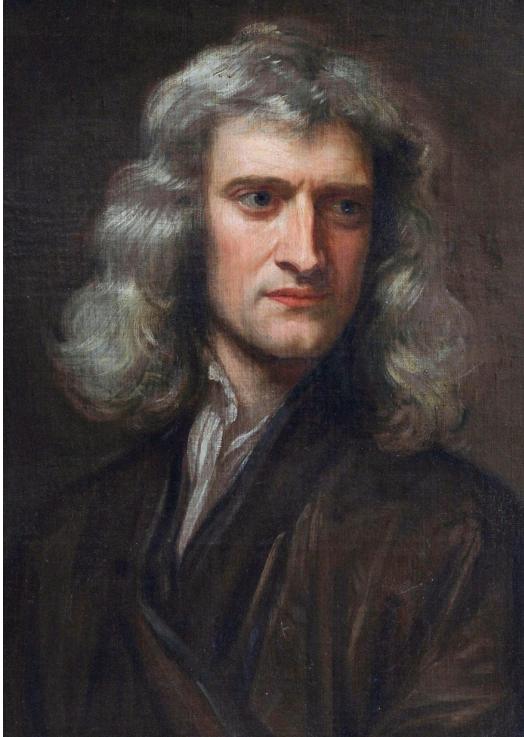
Kort historik om valvbildning



Akvedukt Pont du Gard med tryckta bågar i dåtida romerska Galileen, nutida södra Frankrike) (CC-BY-SA 2.0 [Pont du Gard Oct 2007 - Akvedukt – Wikipedia](#))

- Konsten att använda tryckta valv anses ha utvecklats redan under romarriket.
- Deras akvedukter byggda med tryckta valv är världskända.
- Kunskapen om användandet av tryckta valv inom byggnadskonsten var emellertid i första hand empirisk.

Kort historik om valvbildning



Sir Isaac Newton 1642-1727, en av mekanikens grundare.

[Isaac Newton – Wikipedia](#)

- Utvecklandet av mekaniken under 1700-talet och 1800-talet innebar att den teoretiska kunskapen om tryckta valv ökade.

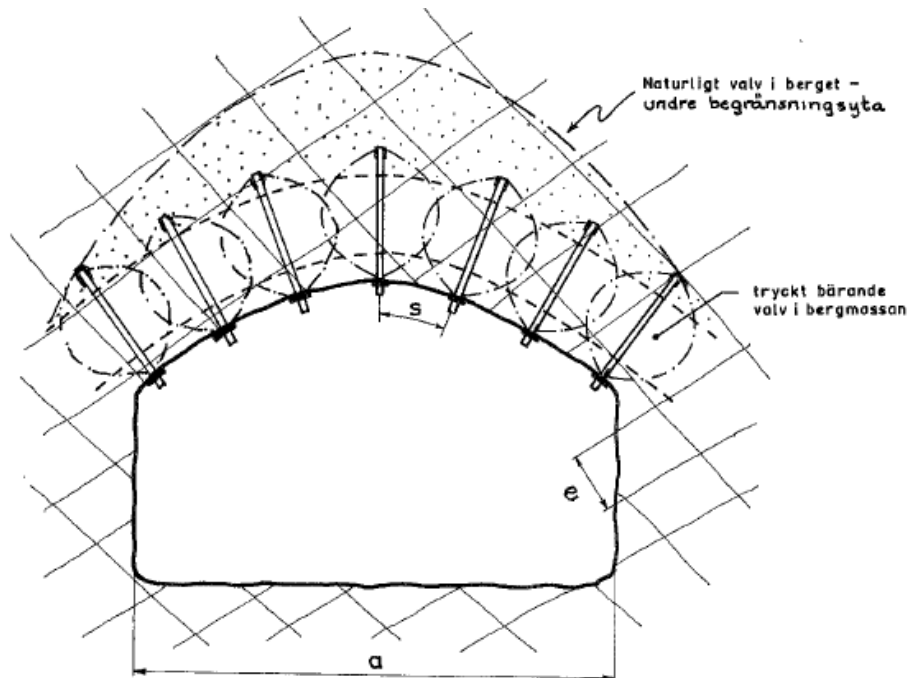
Kort historik om valvbildning inom bergmekaniken



Tunnelportal med bärande valv (Foto: Fredrik Johansson)

- Inom bergmekaniken började grundläggande teori att försöka tillämpas på 70- och 80-talet för att dimensionera förstärkning med hänsyn till valvstabilitet.
- Principerna för dimensionering av förstärkning var emellertid i första hand empiriska.

Valvbildande bultning –Bjurström och Heimersson 1975



Principerna för valvbildande bultning med förspända bultar (Bjurström och Heimersson 1975)

Genom att på ett regelbundet sätt bulta med radiellt placerade förspända bultar kring ett bergrum i sprickigt blockigt berg anser man det möjligt att åstadkomma ett bärande valv längs bergkonturen i princip enligt fig 16. Denna bärande tryckbåge anses vara ett resultat av flera olika mekanismer i samspillet mellan bult och berg, bl a spelar olika typer av kilverkan och tvärtöjning i berget tvärs bulten roll, liksom det förhållandet att bultningen förhindrar berget att röra sig in i berggrummet. Detta har till följd att den uppsprickning och uppluckring som har sin grund i spänningsomlagring vid rummets utbrytning reduceras.

$s \approx 3 e$ Om taket säkras med band, armerad sprutbetong o dyl kan detta mått ökas upp till $6 e$, beroende på säkringens typ

$e =$ representativt sprickavstånd (= medelavst. mellan sprickor inom visst på likartat sätt uppsprucket område). Se fig 16

- **Resulterar i omfattande förstärkning.**
- **Empirisk, säkerheten delvis okänd!**

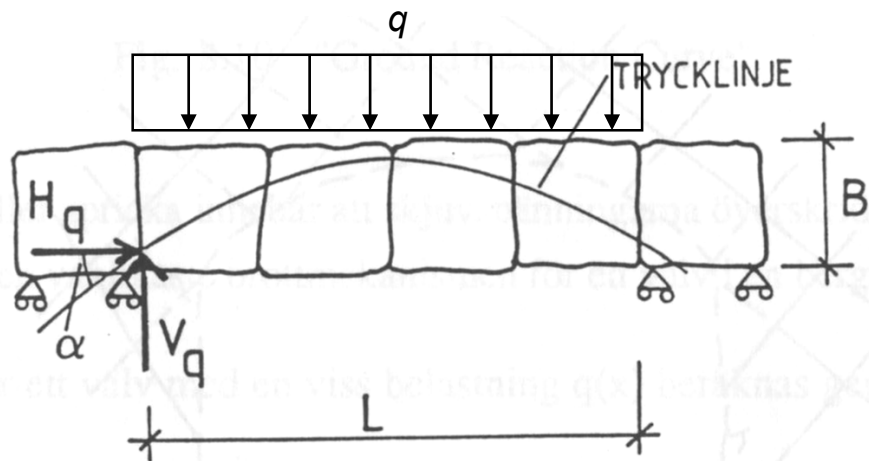
Teori för valvbildning i sprickigt berg – Stille 1980



Gammal stenbro i Dalarna med tryckta valv (Foto: Johan Spross)

- Stille (1980) utarbetade teorier för valvbildning i sprickigt hårt berg.
- Han kom fram till att tre typer av brottmekanismer existerar för valv:
 - Glidning i sprickor
 - Krossning av det intakta berget
 - Rotation av block

Teori för valvbildning i sprickigt berg – Stille 1980



Rad av bergblock med höjden B och spännvidden L . H_q och V_q är horisontella respektive vertikala upplagskrafter (Baserat på Stille 1980).

- Vanligtvis är glidning dimensionerande!
- Beaktar inte samverkan med förstärkning!

Baserat på utvecklad teori föreslog Stille (1980) att den maximala lasten som en rad av bergblock kan belastas med kan bestämmas med följande ekvationer:

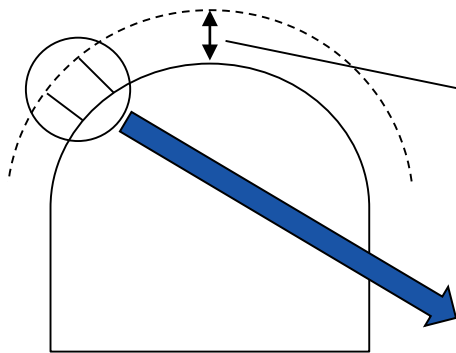
Rotation
$$q_{\max} = \frac{8 \cdot H_q \cdot f_{\max}}{L^2}$$

Glidning
$$q_{\max} = \frac{2H_q \tan \phi}{L}$$

Krossning
$$q_{\max} = \frac{8 \cdot H_q}{L^2} \cdot k \cdot B$$

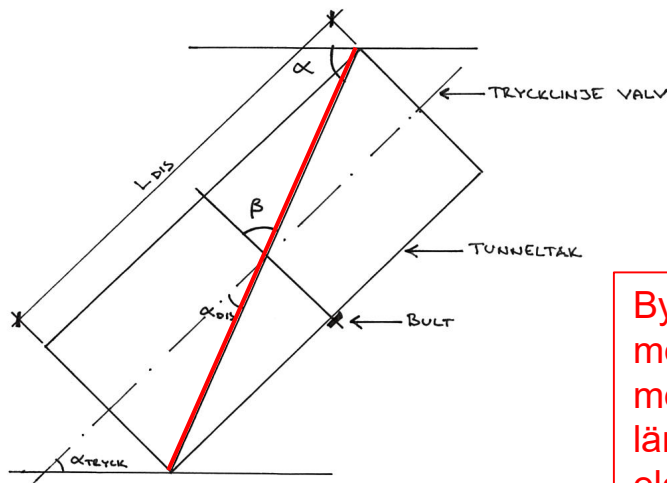
Analytisk modell för valvstabilitet

Det kan antas att förstärkningen och bergmassan samverkar för att motverka glidning.



Antaget lastbärande valv
 $Tjocklek = \text{bultlängd} - \text{förankringslängd}$ bult

Bult och sprutbetong antas mobilisera ett mothållande tryck som motverkar glidning.



Bygger på kraftjämvikt mellan pådrivande och mothållande skjuvkrafter längs en spricka för ett element i valvet.

Analytisk modell för valvstabilitet

Resultanten för trycklinjen i valvet kan delas upp i en skjuvkraft parallell med sprickan T_R och en normalkraft vinkelrätt mot sprickan N_R enligt:

$$T_R = R \cdot \sin(90 - \alpha_{Dis}) \quad (1)$$

$$N_R = R \cdot \cos(90 - \alpha_{Dis}) \quad (2)$$

Förstärkning med sprutbetong

Sprutbetongen antas mobilisera ett mothållande tryck:

$$\sigma_{3,SB} = \frac{f_{cd} \cdot t}{r} \quad (3) \quad \text{där} \quad S_{SB} = \sigma_{3,SB} \cdot L_{Dis} \quad (4)$$

Analytisk modell för valvstabilitet

S_{SB} kan delas in i en skjuvkomponent parallell med sprickan, T_{SB} , och en normalkomponent vinkelrätt sprickan, N_{SB} , enligt:

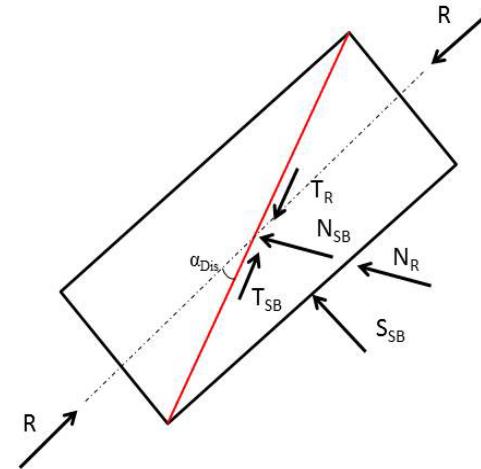
$$T_{SB} = S_{SB} \cdot \sin \alpha_{Dis} \quad (5)$$

$$N_{SB} = S_{SB} \cdot \cos \alpha_{Dis} \quad (6)$$

Den totala skjuvkraften, T_{TOT} , och totala normalkraften, N_{TOT} , över sprickan kan tecknas:

$$T_{TOT} = T_R + T_{SB} \quad (7)$$

$$N_{TOT} = N_R + N_{SB} \quad (8)$$



Observera att T_{SB} är negativ



Analytisk modell för valvstabilitet

Förstärkning med bergbult:

Enligt BBK 04 kan följande ekvation användas för att beräkna mothållande skjuvspänningar i en spricka med bultar:

$$f_f = (\rho \cdot f_{st} + \sigma_{fc})\mu \quad (9)$$

där:

f_f = sprickans skjuvhållfasthet

μ = sprickans friktionskoefficient

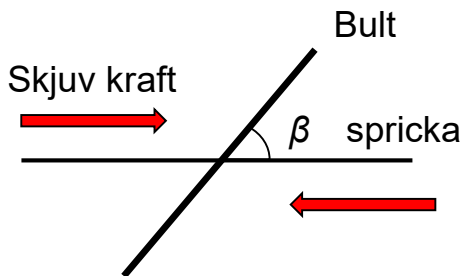
ρ = Förhållandet mellan bultarea och sprickarea

f_{st} = bultens flytspänning

σ_{fc} = tryckspänningen över sprickan

Analytisk modell för valvstabilitet

Inverkan från lutande bultar:



Multiplisera ρ med:

$$\sin\beta + \frac{\cos\beta}{\mu} \quad \text{ger}$$

$$f_f = \left(\rho \left(\sin\beta + \frac{\cos\beta}{\mu} \right) \cdot f_{st} + \sigma_{fc} \right) \mu \quad (10)$$

För att få krafter används:

$$T_B = f_f \cdot A \quad (11)$$

$$N_{TOT} = \sigma_{fc} \cdot A \quad (12)$$

$$A_s = \rho \cdot A \cdot n \quad (13)$$

$$\mu = \tan\phi \quad (14)$$

där A =sprickans area

A_s =bultens area

$$n = \frac{L_{Dis} \cdot 1}{s^2}$$

s =avstånd mellan bultar

Analytisk modell för valvstabilitet

Ekv. (11)-(14) in i (10) ger:

$$T_{BF} = \left[N_{TOT} + \left[\sin\beta + \frac{\cos\beta}{\mu} \right] \cdot n \cdot A_s \cdot f_{yd} \right] \tan\phi$$

Villkor vid dimensionering:

$$T_{BF} \geq T_{TOT} \quad \text{I varje punkt längs trycklinjen i valvet!}$$

Analytisk modell för valvstabilitet

x (m)	y (m)	Lutning trycklinje α_{valv} [°]																		Design OK?		
			α_{dis} [°]*	β [°]	H (kN)	V (kN)	R (kN)	σ_R (kPa)	T_R (kN)	N_R (kN)	L_{dis}^{**}	S_{SB} (kN)	N_{SB} (kN)	T_{SB} (kN)	T_{tot} (kN)	N_{tot} (kN)	η_{bolts}	F_{bolt} (kN)	T_{BF} (kN)		SF= T_{BF}/T_{tot}	Möjlig?
0	2,0	0,0	60,0	30,0	1863	0	1863	621	932	1614	1,7	197	98	-170	761	1712	0,5	96	1410	1,9	Ja	Ja
0,5	2,0	2,0	58,0	32,0	1863	66,25	1864	621	989	1581	1,9	213	113	-181	808	1694	0,5	104	1406	1,7	Ja	Ja
1	2,0	4,1	55,9	34,1	1863	132,5	1868	623	1046	1547	2,0	230	129	-191	855	1676	0,5	113	1404	1,6	Ja	Ja
1,5	1,9	6,1	53,9	36,1	1863	198,75	1874	625	1104	1514	2,2	248	146	-201	903	1661	0,6	122	1404	1,6	Ja	Ja
2	1,9	8,1	51,9	38,1	1863	265	1882	627	1161	1481	2,4	267	165	-210	951	1646	0,6	131	1404	1,5	Ja	Ja
2,5	1,8	10,1	49,9	40,1	1863	331,25	1892	631	1219	1448	2,5	287	185	-219	999	1633	0,7	140	1406	1,4	Ja	Ja
3	1,7	12,0	48,0	42,0	1863	397,5	1905	635	1276	1415	2,7	307	206	-228	1048	1621	0,7	150	1409	1,3	Ja	Ja
3,5	1,6	14,0	46,0	44,0	1863	463,75	1920	640	1333	1382	2,9	329	228	-237	1097	1610	0,8	161	1413	1,3	Ja	Ja
4	1,4	15,9	44,1	45,9	1863	530	1937	646	1391	1349	3,1	351	252	-245	1146	1601	0,8	172	1419	1,2	Ja	Ja
4,5	1,3	17,7	42,3	47,7	1863	596,25	1956	652	1448	1316	3,3	375	278	-252	1196	1593	0,9	184	1426	1,2	Ja	Ja
5	1,1	19,6	40,4	49,6	1863	662,5	1978	659	1505	1282	3,5	400	305	-259	1246	1587	0,9	196	1435	1,2	Ja	Ja
5,5	0,9	21,4	38,6	51,4	1863	728,75	2001	667	1563	1249	3,8	426	333	-266	1297	1582	1,0	209	1445	1,1	Ja	Ja
6	0,7	23,1	36,9	53,1	1863	795	2026	675	1620	1216	4,0	454	363	-273	1348	1579	1,0	222	1457	1,1	Ja	Ja
6,5	0,5	24,8	35,2	54,8	1863	861,25	2053	684	1678	1183	4,3	483	395	-279	1399	1578	1,1	236	1471	1,1	Ja	Ja
7	0,3	26,5	33,5	56,5	1863	927,5	2081	694	1735	1150	4,5	514	429	-284	1451	1578	1,2	252	1486	1,0	Ja	Ja
7,5	0,0	28,1	31,9	58,1	1863	993,75	2112	704	1792	1117	4,8	547	464	-289	1503	1581	1,3	268	1504	1,0	Ja	Ja

* På grund av geometrisk begränsning kan glidning inte inträffa i punkt x,y vid vinklar på α_{dis} som understiger 33°

** Maxlängd på spricka uppgår till 3,0 m baserat på geometrisk begränsning.

q=	133 kPa	Assumed thickness of arch=	3	m	$L_{dis,max}$	6,5 m
B=	15 m				$\alpha_{dis,max}$	25 °
f=	2 m	Bolt spacing=	1,96 m			
Hq=	1863 kN/m	fst=	435 MPa			
Vq=	994 kN/m	ϕ_{25} =	491 mm ²			
R=	2112 kN/m	Compressive strength shotcret	21,3 MPa			
		Thickness shotcrete	0,08 m			
α =	60 [°]	radius of tunnel	15 m			
ϕ =	37 [°]	σ_s , shotcrete (MPa)	0,11 MPa			



Modellens begräsningar

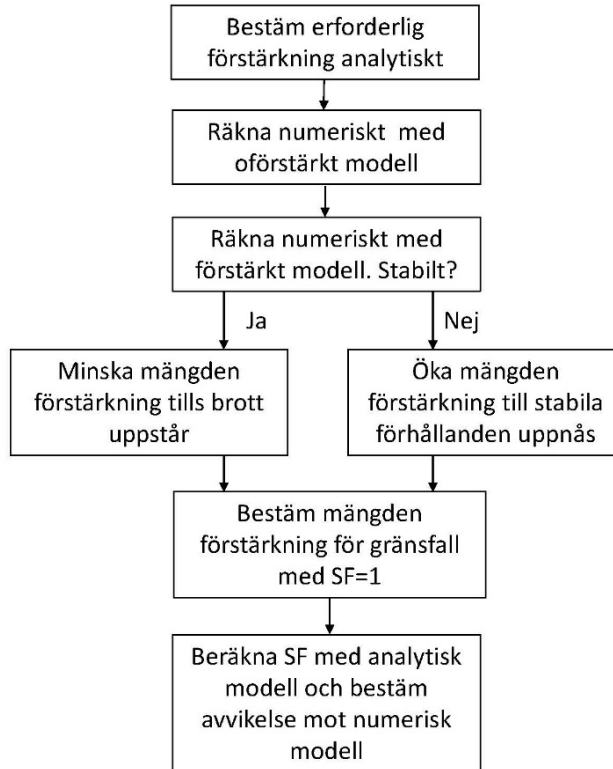
- Antar att sprutbetongen är idealt tryckt och tar inte hänsyn till inverkan från tvärkraft och moment.
- Antar att trycklasten i valvet enbart fördelas i den antagna tryckta bågen.
- Tar inte hänsyn till oregelbundheter som kan uppstå efter sprängning, utan antar ett jämnt tunneltak.
- Tar inte hänsyn till dilatation i sprickorna.

Syfte

- Syftet med projektet var att med hjälp av tvådimensionella numeriska beräkningar i UDEC verifiera den analytiska modellens tillämpbarhet för beräkning av valvstabilitet.
- Detta gjordes genom att analysera den analytiska modellens modellosäkerhet, definierad som:

$$SF_{\text{analytisk modell}} / SF_{\text{UDEC först. strax innan brott i analytisk modell}}$$

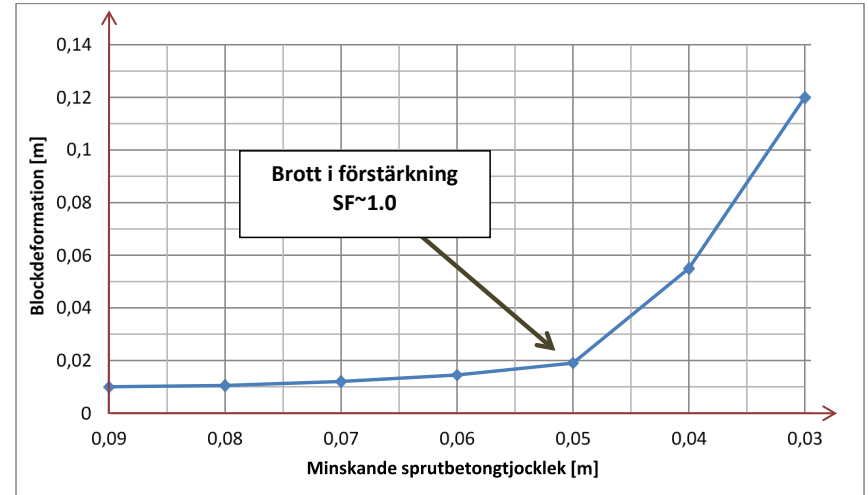
Metodik



- Beräkningarna utgår från en tunnelgeometri baserad på en typsektion med en bredd på 15 m
- Blockstorleken i bergmassan antas till 1 m
- Elastiska förhållanden i blocken
- Materialmodell för sprickorna antas vara Mohr-Coulomb
- Bergtäckning lika med halva spännvidden
- Beräkningar genomförs i UDEC med två korsande sprickplan med vinklarna 0° , 15° , 30° , 45° , 60° , 75° . Totalt 6 st olika modeller.

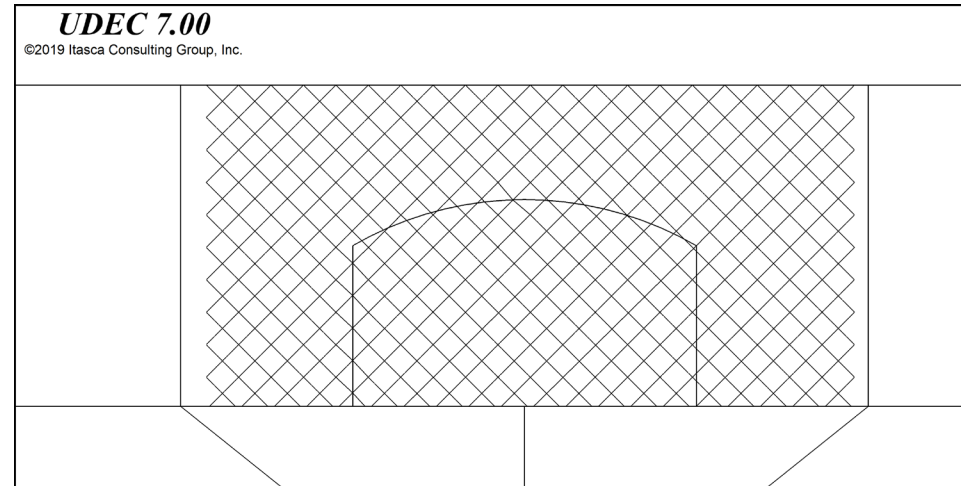
Definition av brott i UDEC

- Dimensionerande förstärkning (SF~1.0) definieras i *UDEC*-modellerna som den minsta förstärkning för vilken ingen signifikant kilrörelse sker.
- Signifikant kilrörelse definieras som punkten då deformationen ökar kraftigt vid en liten minskning av förstärkningen.



Utvärderade fall

- Totalt 6 st "fall" bestående av 2 återkommande sprick-grupper, orienterade vinkelrätt varandra analyserades.
 - Fall 1 & 4 (0/90 & 45/45) är unika.
 - Fall 2 & 6 (15/75 & 75/15) är spegelbilder.
 - Fall 3 & 5 (30/60 & 60/30) är spegelbilder.



Materialegenskaper och indata - berg

- Elastisk bergmassa:

- $E=25$ GPa
- $\nu=0.25$

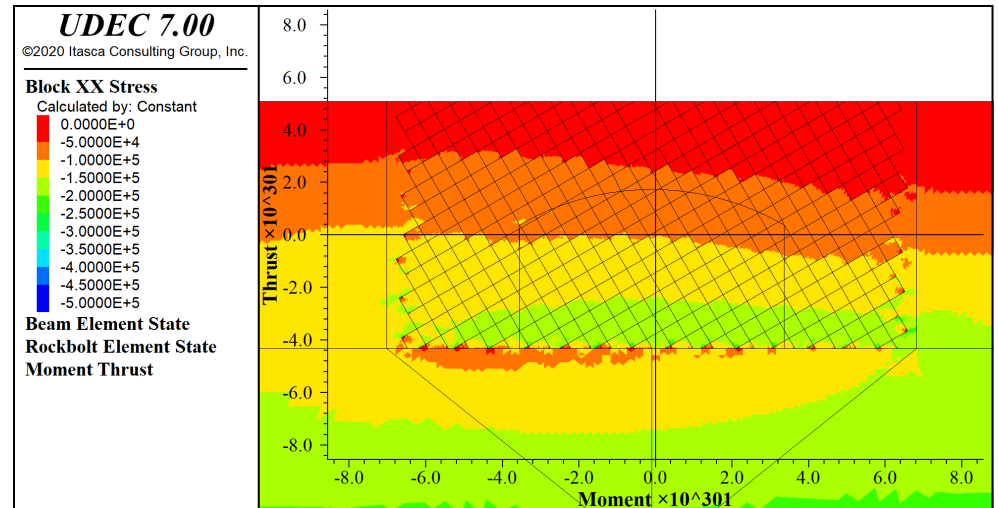
- Elasto-Plastiska sprickor:

- $c=0$ MPa
- $\phi=37^\circ$
- $\psi=0^\circ$
- $Ks=10$ GPa/m
- $Kn=100$ GPa/m

- Gravitativt spänningstillstånd (minst fördelaktigt för valvverkan)

$$> \sigma_v = \rho gh$$

$$> \sigma_H = \sigma_h = \frac{\nu}{(1-\nu)} \sigma_v$$



Materialegenskaper och indata - förstärkning

Sprutbetong

Parameter	Värde	Kommentar/ Källa
ρ	2300 kg/m ³	Betong
ν	0.25	Betong
E	11.7 GPa	FUT
Y_c	21.3 MPa	FUT
Y_t	2.7 MPa	FUT
$Y_{t_{res}}$	0 MPa	FUT
Vidhäftning	330 MPa	Fullständig vidhäftning

Bult

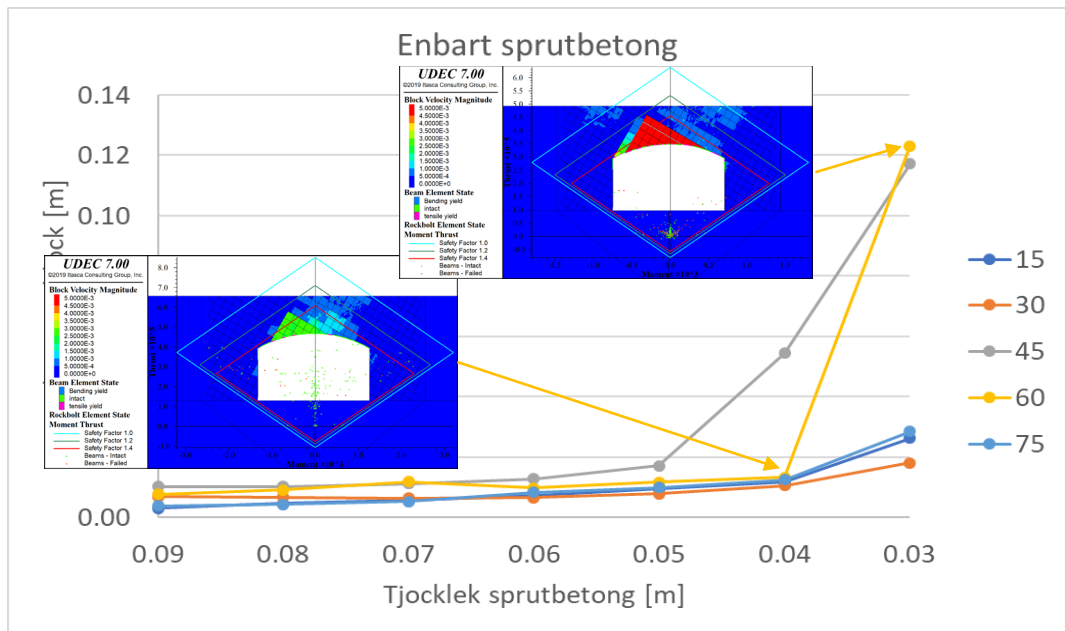
Parameter	Värde	Kommentar/ Källa
ρ	7800 kg/m ³	Stål
D_{bult}	25 mm	
$D_{hål}$	32 mm	
<i>Kohesion ingjutning</i>	0.35 MPa	Cement
<i>Friktionsvinkel ingjutning</i>	32°	Cement
ϵ_{crit}	4.3 %	FUT
Y_t	214 kN	FUT
E	183 GPa	FUT



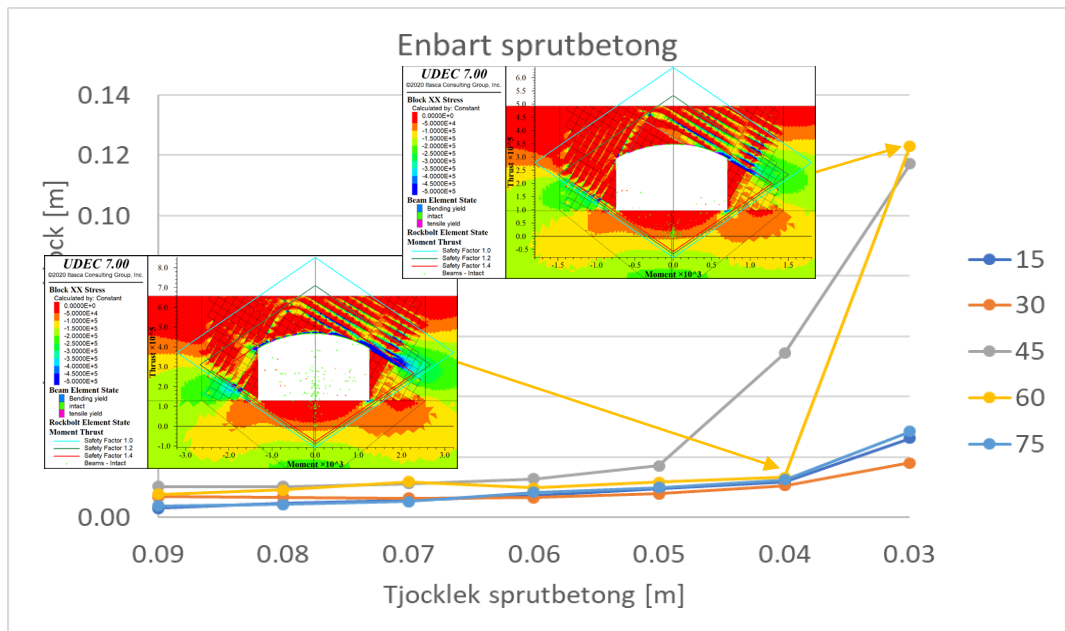
Typmodeller som analyserats

- Enbart sprutbetong
 - Analytisk modell med $SF=1,0$ gav 5-12 cm sprutbetong beroende på sprickstupning
- Enbart bult
 - Analytisk modell med $SF=1,0$ gav $s=1,1$ m
- Kombinerad förstärkning
 - Analytisk modell med $SF=1,0$ gav $s=1,8-2,0$ m med 5-8 cm sprutbetong beroende på sprickstupning

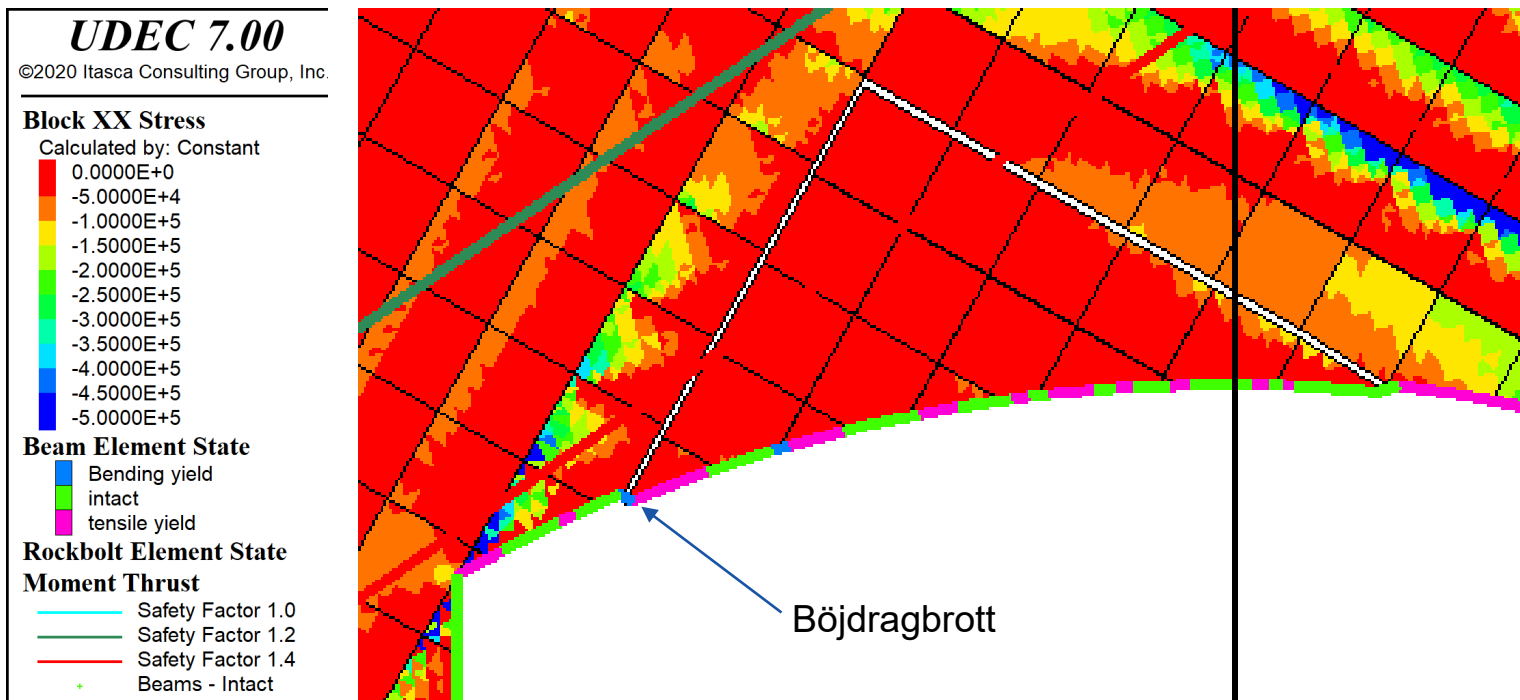
Resultat Sprutbetongmodeller



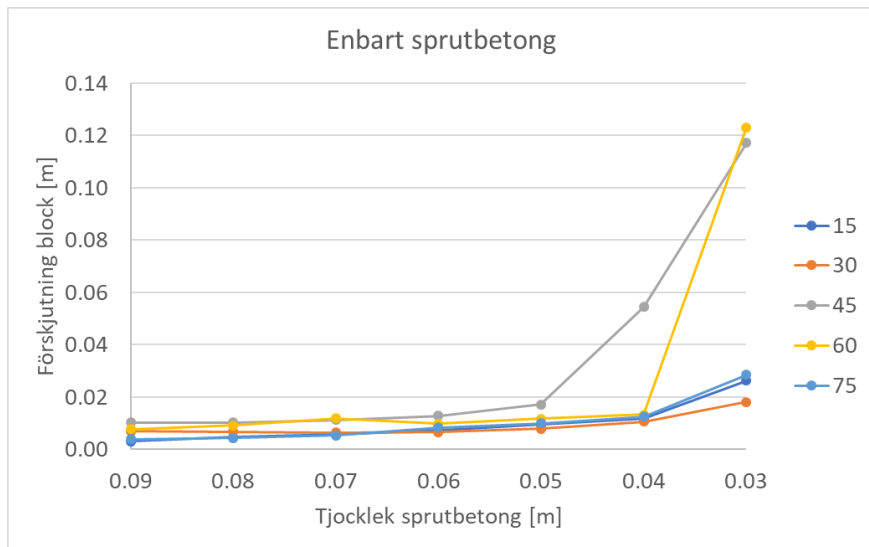
Resultat Sprutbetongmodeller



Resultat Sprutbetongmodeller

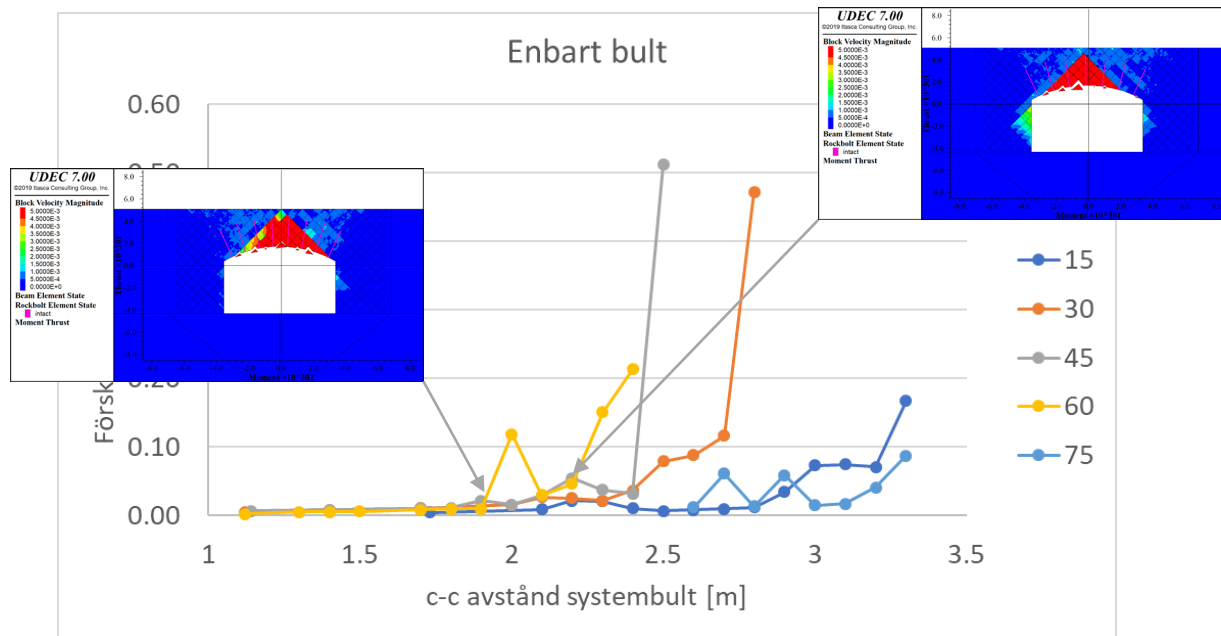


Sammanfattning resultat sprutbetongmodeller

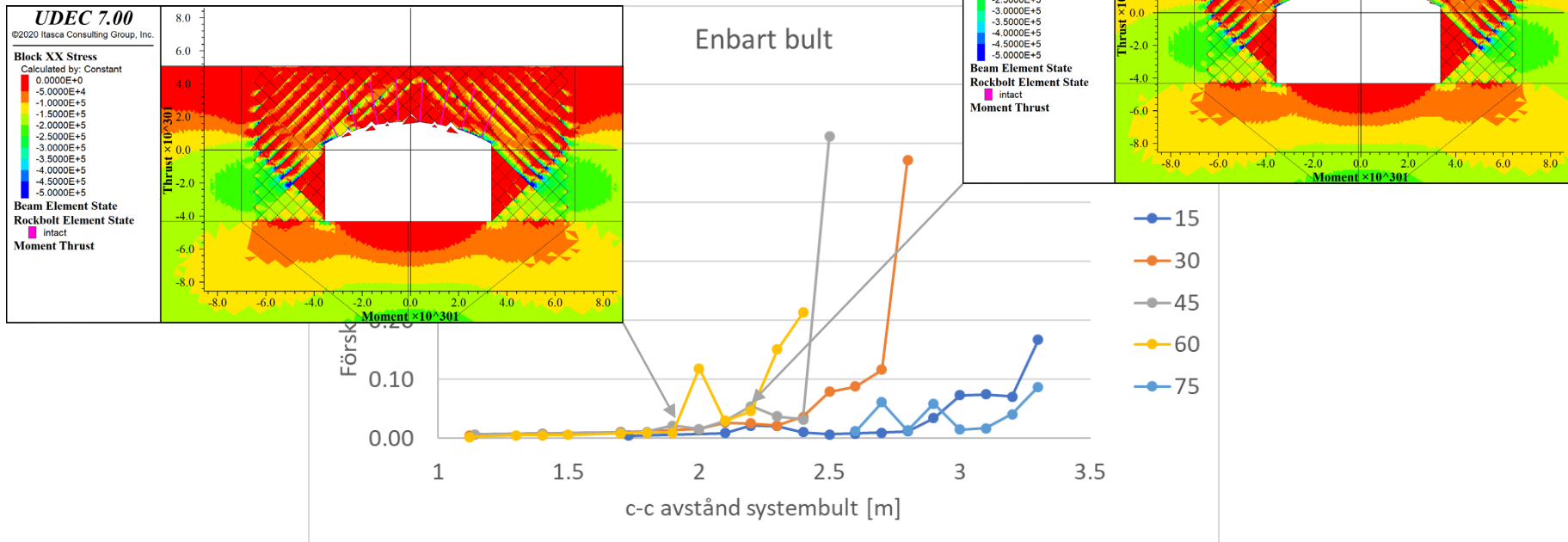


- För modeller med enbart sprutbetong bedöms dimensionerande förstärkning i *UDEC* vara relativt okänslig gällande sprickorientering med undantag för fall 1 (0/90) vilket är självstabiliserande.
- Fall 2-6 bedöms bli ostabila vid mellan 4 och 5 cm sprutbetong (15/75, 30/60, 45/45, 75/15 och 60/30).

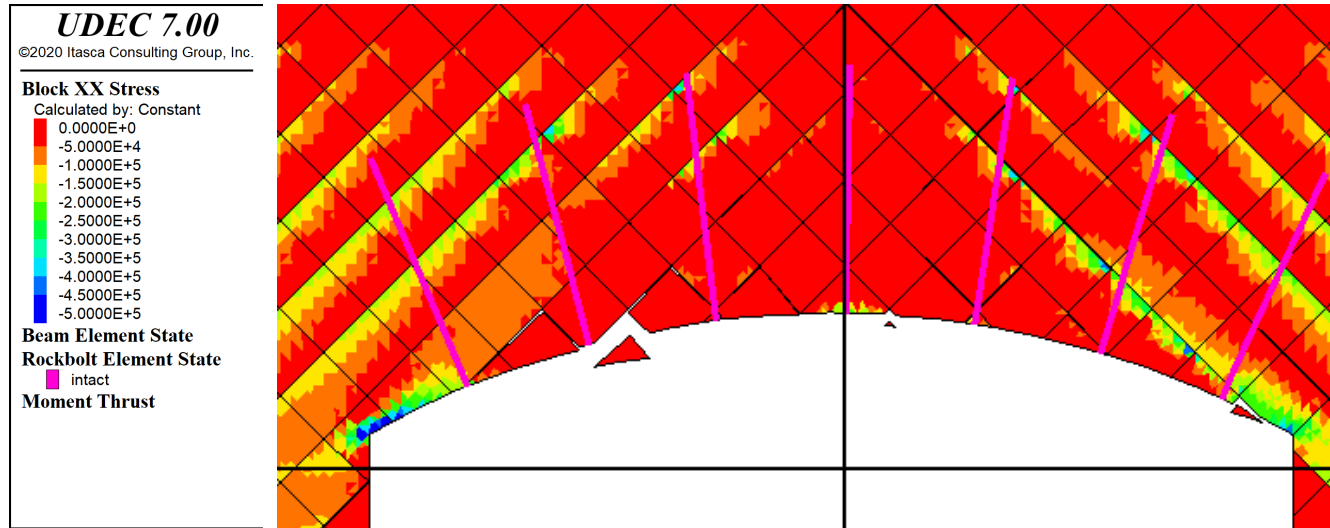
Resultat Bultmodeller



Resultat Bultmodeller

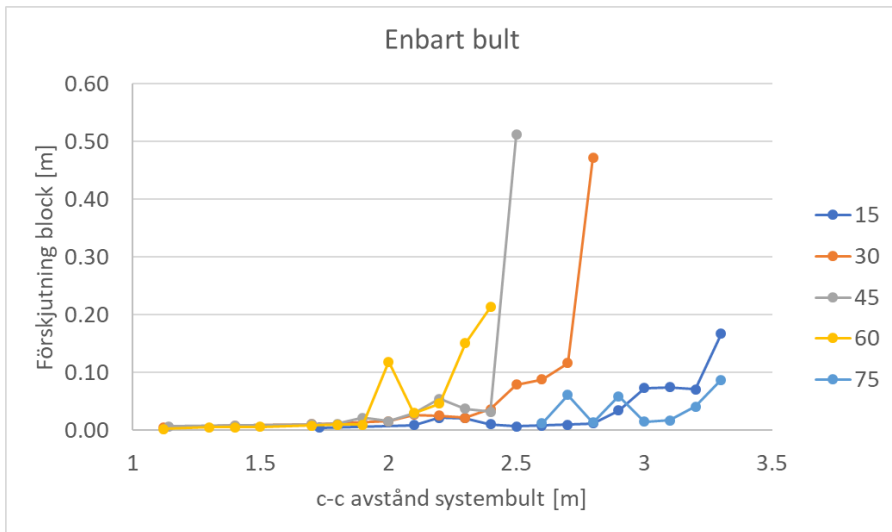


Resultat Bultmodeller



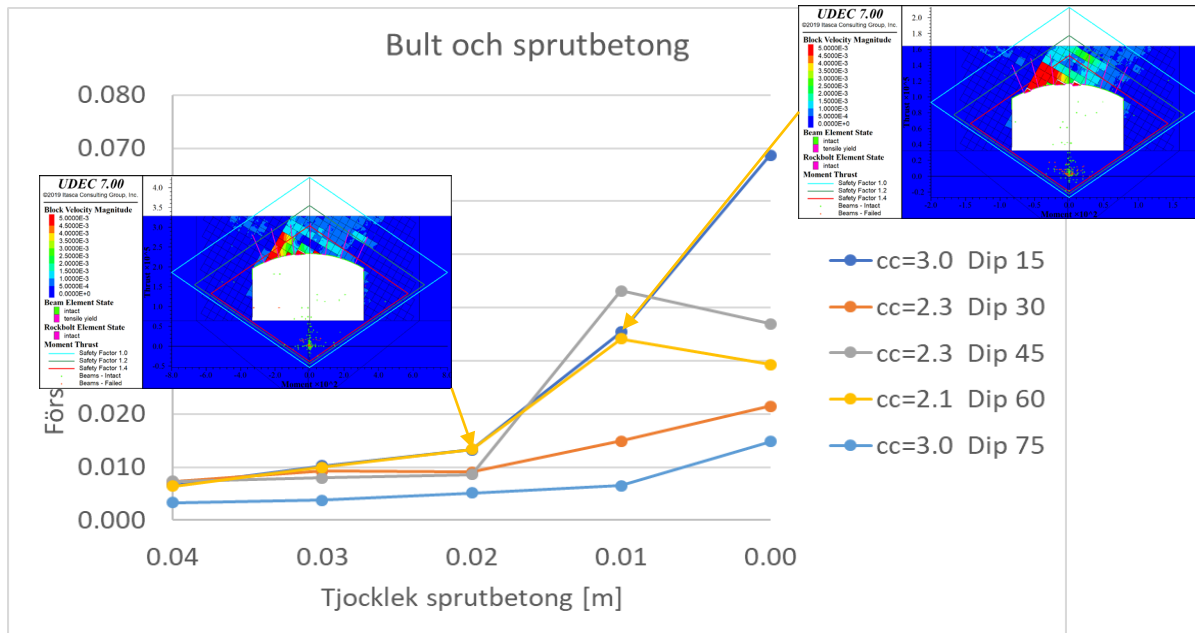
Exempel på spänningsfördelning innan brott.

Sammanfattning resultat bultmodeller

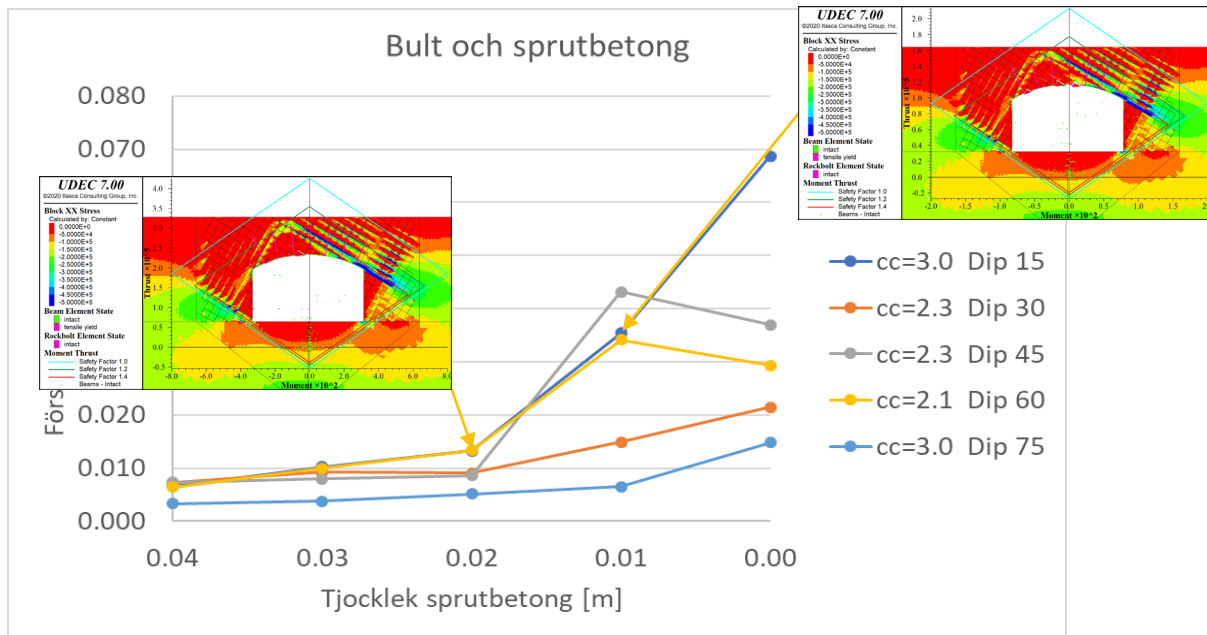


- För fall med enbart bult syns större variation i krav på c/c avstånd än motsvarande krav för sprutbetongtjocklek.
- Även mellan "speglade" fall skiljer sig resultaten något – detta bedöms bero på hur bultarna låser mot specifika kilar/block.
- c/c avstånd vid dimensionerande förstärkning är för stupningar mellan 30-60° 2.1-2.7 m och för 15/75° ca 3.0 m.

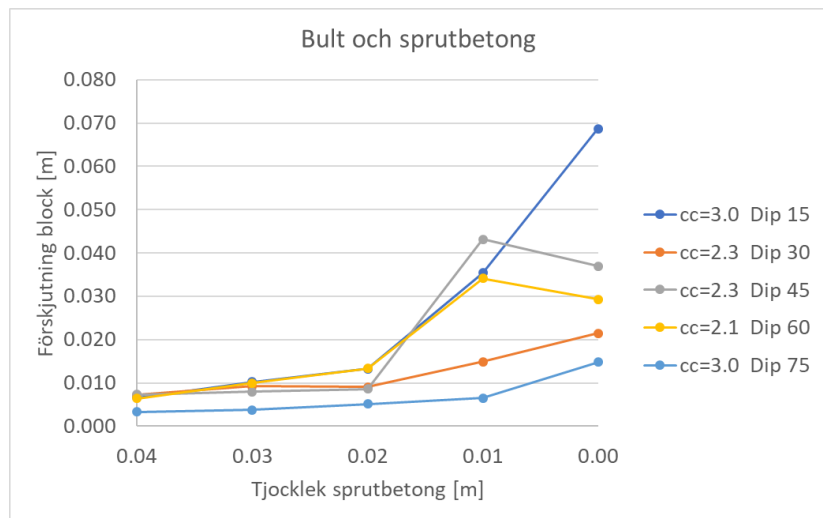
Resultat kombinerade modeller



Resultat kombinerade modeller



Sammanfattning kombinerade modeller

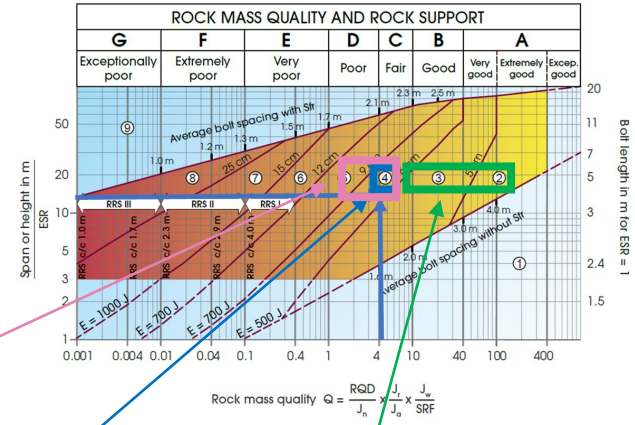


- För de kombinerade modellerna användes en "Q-klass" högre c/c avstånd jämfört med sista stabila konfigurationen i bultmodellerna och sprut-betongens tjocklek varieras.
- Samtliga fall är stabila vid en tjocklek av 2 cm

Beräkning av modellosäkerhet

Fall	Modellosäkerhet bult	Modellosäkerhet sprutbetong	Modellosäkerhet bult+sprutbetong
2 (15/75) + spegel	0.9	0.9	0.9
3 (30/60) + spegel	0.6	0.6	0.6
4 (45/45)	0.5	0.6	0.7

- Jämfört med UDEC är den analytiska modellen något konservativ.
- Förstärkningsmängd rimlig



Förstärkningsklass analytisk lösning $s=1,8-2,0$ m med 5-8 cm sprutbetong (sprickorientering inverkar)

Dimensionerande förstärkningsklass UDEC (sprickorientering inverkar) $s=2,1-2,3$ m med 2 cm sprutbetong

Förstärkningsklass $Q=4$ [uppskattad] $s=2,1$ m med 6-9 cm sprutbetong (oberoende av orientering)



Slutsatser

- För det studerade fallet är den analytiska modell konservativ.
- Modellosäkerheten varierade mellan 0,9-0,5 beroende på sprickornas stupning
- Orsaken till denna variation indikeras i de numeriska modellerna som bl.a. visade att:
 - > Bergmassans har en förmåga att skapa (flera) bärande valv i bergmassan ovanför tunneln.
 - > Komplexiteten på hur krafter och moment fördelas i förstärkningselementen och hur de samverkar med bergmassan är stor.
 - > Den numeriska modellen är känslig för var bultarna placerades i det kritiska blocket, vilket påverkades av bultarnas c/c -avstånd (antal).



Behov av fortsatta analyser

- Följande projekt analyserade enbart modellosäkerheten för en ytlig tunnel med bergtäckning $B_t=B/2$
- Ytterligare studier behövs för att analysera modellosäkerheten för andra förhållanden än ytliga tunnlar, t.ex.:
 - För djupare belägna tunnlar med en löskärna.
 - För bergmassor med enstaka mer distinkta svaghetsplan med lägre hållfasthet kombinerat med en blockig bergmassa.
 - Vad händer vid fyllda sprickor och eventuellt svälltryck.
 - 3D förhållanden såsom portaler.
- Lämpligt för framtida exjobb?

Tack!

Glöm inte att ställa dina frågor till Patrik i chatten!

