

3D-MODELLERING AV SAMVERKAN MELLAN BERG OCH SPRUTBETONG

Anders Ansell

STIFTELSEN BERGTEKNISK FORSKNING
ROCK ENGINEERING RESEARCH

3D-MODELLERING AV SAMVERKAN MELLAN BERG OCH SPRUTBETONG

Förstudie

3D-MODELLING OF THE INTERACTION BETWEEN ROCK AND SHOTCRETE

Preparatory Study

Anders Ansell

KTH Byggvetenskap, Betongbyggnad

BeFo Rapport K33

Stockholm 2009

Förord

De nya Europanormerna med regler för dimensionering av konstruktioner skall vara fullt införda i Sverige under 2009. Normerna är baserade på ett sannolikhetsbaserat betraktelsesätt. Under 2005 tog SveBeFo fram förslag till projektportfölj för samlad bergmekanisk forskning inriktad mot sannolikhetsbaserad dimensionering.

Rapporten sammanfattar och beskriver aktuellt kunskapsläge och forskningsbehov avseende modellering av samverkan mellan berg och sprutbetong. Sprutbetong har utgjort ett angeläget forskningsområde för Stiftelsen Bergteknisk Forskning sedan första hälften av 70-talet. Syftet med studien har varit att bereda väg för ett doktorandprojekt om 3D modellering.

Kunskapssammanställningen är utförd som ett seniorprojekt och sammanfattar befintligt kunnande på såväl betong- som bergmekaniksidan där möjligheterna med datorbaserade modelleringsprogram, som ABAQUS, FLAC och UDEC/3DEC, kommenteras.

Sammanställningen ger en bakgrund till områdets betydelse, diskuterar tidigare modellering och dess kvaliteter. Aktuella modelleringsverktyg och metoder för bergförstärkning redovisas. Dimensionerande typer av lastfall och materialmodeller för berg, stål och sprutbetong redovisas. Studien avslutas med sammanfattande riktlinjer för fortsatt forskning, med förslag inriktade mot anläggningsbyggande och mot problemställningar som främst berör gruvnäring. Projektet har getts som uppdrag till *KTH Bygghälsa*, genomfört av Anders Ansell med stöd av utomstående specialister. Bland dessa märks Lars Malmgren, *LKAB*, Lars Rosengren, *Rosengren Bergkonsult AB*, Jonas Holmgren och Håkan Stille på *KTH*. Arbetet har finansierats inom SveBeFos forskningsprogram.

Stockholm i mars 2009

Mikael Hellsten

Sammanfattning

Tunnlar och berggrum i berg konstrueras oftast med valvformade tak som statistiskt kan bära det omgivande bergets tyngd. Komplicerade 3D geometrier uppkommer vid korsningar med andra tunnlar och öppningar vilket försvårar en analys av samverkan mellan berg, sprutbetong och andra förstärkningselement som till exempel bergbultar. Detta kompliceras ytterligare av den ofta ojämna formen hos tunnelväggarna och den ojämna sprutbetongtjocklek som den också ger upphov till. Konstruktion av effektiva bergförstärkningssystem är endast möjligt om funktionen hos lastbärande sprutbetongbaserade system kan förstås, från direkt efter sprutning av betongen och fram till att ett eventuellt brott inträffar.

Det finns ett behov av en detaljerad studie av samverkan i 3D mellan en oregelbunden, rå bergyta och dess förstärkning bestående av bultar och sprutbetong med varierande tjocklek. Ett lämpligt verktyg för detta är finit elementmodellering som beaktar icke-linjära materialegenskaper och använder formuleringar som tar hänsyn till stora deformationer. Av särskilt intresse är bidraget till lastbärförmågan från sprutbetongens vidhäftning mot berget. Olika fall av lokal instabilitet som kan orsaka brott i sprutbetongförstärkningen bör studeras, till exempel nedfallande bergblock, sönderspruckna bergmassor, brott i bergbultar och fläckvist bom mellan sprutbetong och berg. Tidsberoende faktorer såsom sprutbetongens krypning och krympning samt varierande temperaturer och fuktighet är också av intresse.

Inriktningar för fortsatt forskning föreslås. Resultat från storskalig modellering av tunnlar inuti stora bergvolymen kan användas som randvillkor för mindre modeller i lokalskala. Sådana 3D modeller kan användas vid detaljerade studier av egenskaperna hos gränsskiktet mellan sprutbetong och berg, där också bergbultar, armering och annan förstärkning kan medtas. Det finns behov av geometrisk mätdata från fältet och experimentellt inhämtad materialdata för ung och fullhårdnad sprutbetong.

Nyckelord: Sprutbetong, berg, lokal instabilitet, oregelbunden geometri, finita elementmodeller, icke-linjära materialegenskaper.

Summary

Tunnels and underground openings in hard rock are often constructed with arch-shaped ceilings that statically carry the weight of the rock. Complicated 3D geometries arise at intersections with crossing tunnels and other openings making it difficult to analyse the interaction between rock, shotcrete and other support elements such as rock bolts. This is further complicated due to the often irregular shape of the rock walls and the uneven shotcrete thickness. The design of effective rock support depend on the understanding of the performance of load carrying shotcrete systems, from spraying and until failure occurs.

There is a need for a detailed study of the interaction in 3D between an irregular, rough rock surface supported by bolts and shotcrete with varying thickness. A suitable tool for this is finite element modelling using non-linear material models and formulations capable of describing large deformations. Of special interest is the load carrying contribution from the bonding between rock and shotcrete. Various cases of local instability that may cause failure should be studied, such as falling blocks or heavily jointed rock, bolt failure and drumminess between rock and shotcrete. Time-dependent effects such as shotcrete creep and shrinkage, varying temperatures and humidity are also of interest.

Further research within the field is recommended. Results from large-scale modelling of tunnels in large volumes of rock can be used as boundary conditions for smaller models, in local scale. Such 3D models can be used for detailed studies of the shotcrete-rock interface, also including rockbolts and other reinforcement. There is a need for geometric in situ data and experimentally obtained material data for young and hardened shotcrete.

Keywords: *Shotcrete, rock, local instability, irregular geometry, finite element model, non-linear material properties.*

Innehållsförteckning

1 Introduktion	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte och målsättning	2
1.3 Metodik och avgränsning	2
2 Tidigare modellering	3
2.1 Sprutbetong och berg i 2D	3
2.2 Oregelbundna bergkonturer	3
2.3 Sprutbetong och berg i 3D	6
2.4 Avgränsade modeller av sprutbetong på berg	9
3 Modelleringsverktyg	11
3.1 Analystyper	11
3.2 Distinkta elementprogram	11
3.3 Finita elementprogram	13
4 Berg och förstärkning	15
4.1 Förstärkningsprinciper	15
4.2 Bergbultar	15
4.3 Sprutbetong	16
4.4 Samverkan	20
5 Dimensionerande lastfall	23
5.1 Nedfallande bergblock	23
5.2 Löskärna av berg	26
5.3 Bultbrott	29
5.4 Partiellt vidhäftningsbortfall	29
5.5 Tvångsspänning från krympning	30
5.6 Inverkan av krypning och temperaturrörelser	31
5.7 Dynamisk utstötning av bergblock	33
6 Materialmodeller	35
6.1 Materialbeskrivning	35
6.2 Berg	35
6.3 Stål	36
6.4 Sprutbetong	36
7 Fortsatt forskning	39
7.1 Modellering i stor och liten skala	39
7.2 Samverkan och sprutbetongbrott	39
7.3 Oregelbunden bergyta	40
7.4 Uppmätning i fält	41
7.5 Variation av materialegenskaper	41
7.6 Materialelegenskaper för sprutbetong	42
Erkännanden	43
Litteratur	45

1 INTRODUKTION

1.1 Bakgrund

En pålitlig sprutbetongförstärkning är mycket viktig för säkerheten i tunnlar och berggrum byggda i berg. Sprutbetongen används ofta i kombination med bergbultar men kan även nyttjas utan annan koppling till berget än vidhäftning. Vissa bergförhållanden och typer av förstärkningskonstruktioner kräver att sprutbetongen armeras, med till exempel armeringsnät av stål eller fibrer av stål eller plast. En bergförstärkningskonstruktion med sprutbetong är således en samverkanskonstruktion där det ofta ingår flera olika komponenter av de vanligaste konstruktionsmaterialen, även med berget som en viktig del av det bärande systemet. Det förstärkta berget verkar således ofta både som last och som en del av förstärkningssystemet vilket gör en strukturanalys komplicerad. Det är vid dimensioneringen av förstärkningssystem viktigt att på ett korrekt sätt kunna modellera sprutbetongens förväntade uppträdande, ända fram tills ett eventuellt brott sker. Särskilt är sprutbetongs vidhäftande egenskaper och samverkan med bultförankringar av intresse. Det råder idag relativt stor osäkerhet om ifall vidhäftande sprutbetongs förstärkningseffekt ger överflödigt användning av bultförankring. Berggrum och tunnlar utförs av statiska skäl oftast med valformade tak och det tillsammans med de komplicerade geometrier som kan uppstå vid anslutningar till andra tunnlar och berggrum gör det komplicerat att beskriva samverkan. Lastfördelningen mellan sprutbetong, berg och eventuella bergbultar kompliceras ytterligare av den ojämna formen hos bergytan mot utsprängda berggrum. Sprutbetongs funktion påverkas i hög grad av ojämnheter i bergytan vilket kan påverka bärförmågan både positivt och negativt. Det är dessutom svårt att åstadkomma en jämn sprutbetongtjocklek vid sprutning på en oregelbunden yta.

För att kunna genomföra realistiska analyser av sprutbetongförstärkningars statiska uppträdande måste avancerad numerisk modellering med finita elementmetoden kunna genomföras, med olinjära materialparametrar och beaktande av stora deformationer i tre dimensioner (3D). Den komplicerade 3D situation som råder efter utsprängning av ett berggrum eller tunnel måste kunna beskrivas på en form som är numeriskt hanterbar. Samband för förstärkningselement i samverkan med berget behöver förfinas för att klarlägga den sammantagna förstärkningseffekten av ett sprutbetongskikt med varierande tjocklek över en rå, ojämn bergkontur. För att möjliggöra studier av funktionssättet i interaktionen mellan sprutbetong och bergmassa måste avgränsade geometriska delar modelleras i detalj varefter simulering av olika belastningssituationer och utformningar av förstärkningen därefter kan göras i en större skala. Även tidsaspekten är i vissa fall av betydelse och det bör utredas hur inverkan av sprutbetongens hållfasthetstillväxt under härdningsförloppet påverkar dess fortsatta funktion. Det kan vara av intresse att studera såväl temporära som permanenta sprutbetongförstärkningar.

Funktionen hos sprutbetong som bergförstärkning har tidigare undersökts i forskningsprojekt stödda av *SveBeFo*, de senaste genomförda av bland annat Chang och Brantmark, [8], samt

Nilsson, [36]. Vid *KTH Bygghvetenskap* har det inom avdelningen för *Betongbyggnad* bedrivits forskning om sprutbetong som bergförstärkning sedan första hälften av 1970-talet, se t.ex. [15–18]. Dessa grundläggande forskningsresultat har också resulterat i handböcker och anvisningar som aktivt används för dimensionering av sprutbetongförstärkningar, [19] och [21]. I början av 2000-talet genomfördes ett doktorandprojekt där bärförmågan för en bergförankrad tunnelförstärkning av sprutbetong undersöktes, [20], [36] och [38]. Finita elementberäkningar visade effekten av den ojämna formen på bärförmåga och styvhet. Forskning inom området har även utförts vid *Luleå tekniska universitet (LTU)*, [30] och [32]. Genom att utgå från dagens kunnande bör förståelsen för principerna bakom samverkan mellan berg och sprutbetong kunna ökas genom detaljerad 3D modellering av sprutbetong som belastas till brott.

1.2 Syfte och målsättning

Syftet med den aktuella förstudien är att beskriva och sammanfatta dagens kunskapsläge med särskilt fokus på behoven vid praktisk utformning av förstärkningskonstruktioner i berg. Här bör man utgå från dagens behov vid svenskt bergbyggande. Vidare kartläggs behovet av forskning för att nå förståelse för de mekanismer som styr sprutbetongens verkningssätt i samverkan med berg och eventuell andra förstärkningskomponenter. Studien syftar också till att dra upp forskningsområdets gränser i ett internationellt perspektiv.

Målet är att förstudierapporten ska kunna användas vid planeringen för kommande forskningsprojekt. Det sammanfattande innehållet, och särskilt litteraturförteckningen, ska kunna fungera som referensverk vid fortsatt planering och diskussion. Rapporten avslutas med att inriktningarna för några lämpliga, avgränsade framtida projekt beskrivs.

1.3 Metodik och avgränsning

Förstudien genomförs av en seniorforskare vid avdelningen för *Betongbyggnad* vid *KTH Bygghvetenskap* och baseras på det kunnande som byggts upp vid avdelningen under nära trettio år. En noggrann litteraturstudie genomförs för att sammanfatta vad som har tidigare utförts inom det aktuella och angränsande områden. Urvalet av litteratur baseras på om innehållet anknyter till aspekter viktiga vid den aktuella typen av finit elementmodellering. Bland dessa finns särskilt numeriska beräkningsmetoder, modelleringsaspekter, verkan hos konstruktionselement och beskrivning av materialegenskaper. Val av dimensionerande lastfall är som vanligt en kritisk fråga som noggrant bör övervägas och diskuteras i startskedet av ett modelleringsprojekt. Här beskrivs några fall som är relevanta för analys av bergförstärknings-system med sprutbetong med hjälp av 3D modellering. Några av de redovisade lastfallen (se kapitel 5) har valts för att de ofta används dimensionering av sprutbetongförstärkningar medan övriga har karaktären av olycksfall, händelser som förändrar kraftjämvikten. Ett antal inriktningar för framtida forskning arbetas fram genom studier av den sammanställda litteraturen och diskussion med andra forskare, konstruktörer och byggare.

Studien inriktas mot tunnelbyggande och anläggningar i berg. Frågeställningarna utgår från praktiska problem vid främst svenskt anläggningsbyggande men är ofta även ofta av intresse för bland annat gruvindustrin.

2 TIDIGARE MODELLERING

2.1 Sprutbetong och berg i 2D

Tunnlar modelleras ofta med tvådimensionella (2D) modeller, trots att de i princip uteslutande är konstruktioner med utsträckning i tre dimensioner (3D). Att modeller utförs i 2D beror främst på att analyser med numeriska metoder blir krävande i datorkraft och tid redan vid måttligt omfattande modeller. Då 2D modeller används för att beskriva verkliga 3D geometrier måste särskild omsorg ägnas åt hur de spänningar som uppstår i berg och förstärkning beskrivs. Det är vanligt att den här typen av analyser enbart beaktar samverkan mellan berg och sprutbetong och inte medtar effekten av bergbultar och eventuella irregulariteter i berget, [26].

Genom finit elementmodellering i 2D studerade Karakus, [24], hur hänsyn kan tas till 3D effekter som uppstår vid tunneldrivning. Den studerade tunneln, med en diameter på ca 9 m, drevs genom lera och var förstärkt med 250 mm sprutbetong. Sprutbetongen modellerades i några fall med kontinuumelement och i några med trenoders balkelement. Genom att definiera en "hypotetisk" elasticitetsmodul för sprutbetong undersökte Pöttler, [40], möjligheterna att använda 2D modeller för att beräkna sprutbetongspänningar. Den approximerade spänningssituationen i 3D bedömdes vara tillräckligt noggrann för analysen av en cirkulär tunnel med 9 m diameter, 100 m ned i berg vilket modellerades som rent elastiskt.

I sin doktorsavhandling diskuterar Malmgren, [30], användandet av 2D modeller för modellering av tunnlar. Särskilt två av de ingående artiklarna är av relevans för den här förstudien. Den första av dessa, [32], är en numerisk studie över samspelet mellan sprutbetong, bergbultar och berg, medan den andra, [31], behandlar sprutbetongförstärkta bergkilar som utsätts för sprängningsinducerade vibrationer. Ett exempel förekommer i kommande Figur 3.1.

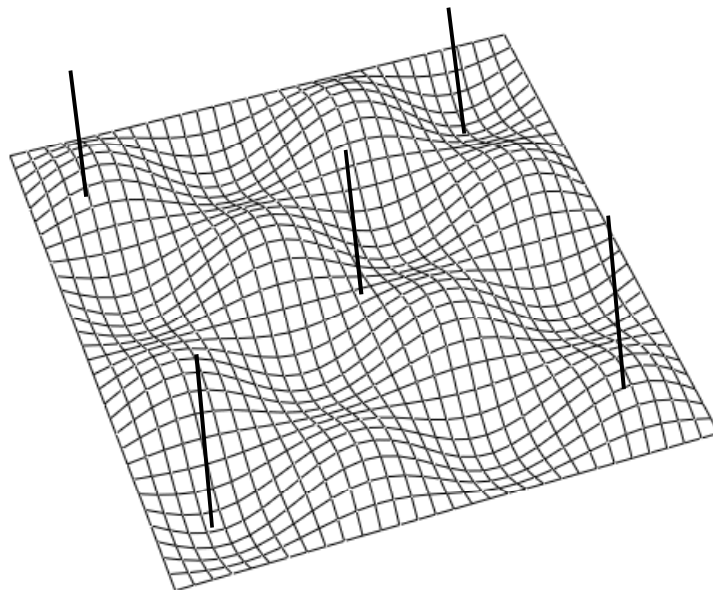
2.2 Oregelbundna bergkonturer

Effekten av irregulariteter i en sprutbetongförstärkt tunnelyta studerades av Chang, [7]. Laboratieförsök genomfördes med en modell som beskrev en 0,5 m tjock kvadratisk bergsektion med måtten $1,6 \times 1,6 \text{ m}^2$. Kvadratens ena hörn var bortskuret av en kvartscirkel med centrum beläget vid hörnet. Tunnelns radie valdes till 0,4 m. Det relativt klena berget i modellen tillverkades av sand, cement, bentonit och vatten medan sprutbetongliningen gjordes med 20 mm pågjuten stålfiberbetong. Att inte spruta betongen bör ha påverkat vidhäftningshållfastheten. Tunnelytorna gjordes dels enkelkrökta och dels dubbelkrökta, med sinusform och ca 3–4 cm skrovlighet. Lasten var påtvingad förskjutning i två riktningar, anbringad längs kvadratens två hela sidor. Försöken följdes upp med numerisk modellering. Tunnelytorna var dels enkelkrökta och dels dubbelkrökta, med sinusform och ca 3–4 cm skrovlighet.

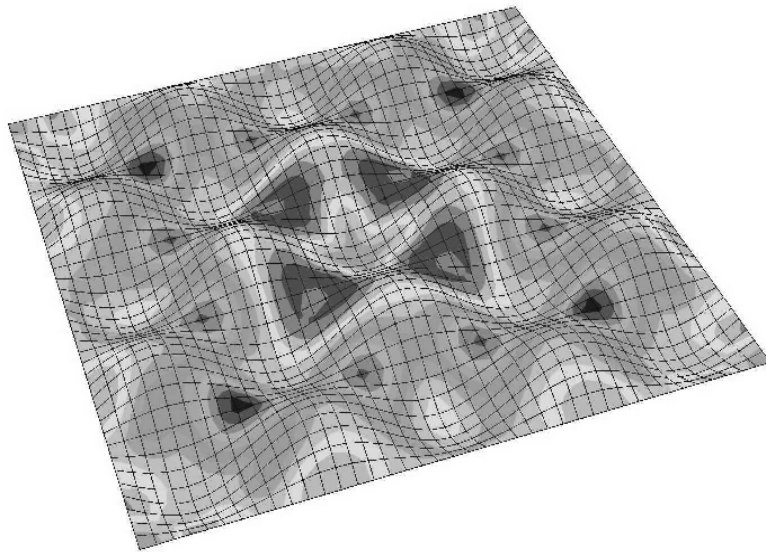
En sektion med ojämna väggar i en utsprängd tunnel studerades av Fotieva och Bulychev, [10]. De utgick ifrån att ojämnheter i bergytan ger varierande tjocklek i sprutbetongen vilket

leder till spänningskoncentrationer med eventuell uppsprickning som följd. Den studerade tunnelns tvärsnitt var ca $8 \times 10 \text{ m}^2$ och väggarnas ojämnhet sattes till 10 cm respektive 20 cm i beräkningarna. Modellen var analytiskt formulerad och omfattade elastiska material, dock med en krypfunktion för berget definierad. Resultaten beräknades numeriskt och visar att spänningarna i den 100 mm tjocka sprutbetongen ökar relativt kraftigt med ojämnheternas amplitud.

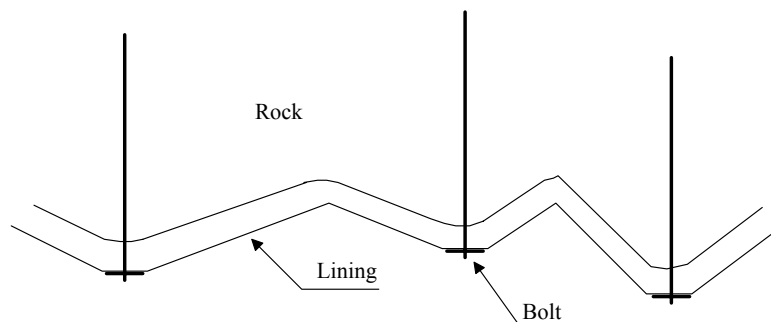
Finit elementmodellering av kvadratiska, plana sprutbetongplattor har gjorts av Nilsson, [37]. Betongplattornas tjocklek var 40–80 mm och dess yttermått upp till $6 \times 6 \text{ m}^2$, vilket resulterade i modeller av den typ som visas i Figur 2.1. Särskilt studerades effekten av bergbultar och hur bucklighet påverkade plattornas bärförmåga. Plattorna modellerades med finita skalelement och dess bucklighet följde sinuskurvor längs plattornas två vinkelräta huvudriktningar. En viktig del av undersökningen var att studera hur placeringen av bergbultar i relation till buckligheten påverkade spänningsfördelningen i sprutbetongen. Ett flertal fall modellerades och resulterade i fördelningar liknande den i Figur 2.2. En viktig slutsats var att bergbultar bör genomgående placeras i punkter med utskjutande bergpartier, så som visas i Figur 2.3. Om bultar placeras i insjunkningar och gropar fås en ofördelaktig spänningsfördelning i sprutbetongen, med för tidiga böjbrott som följd.



Figur 2.1 Vågformad sprutbetongyta upphängd i bergbultar. Från [37].
Wave-shaped shotcrete surface suspended in rockbolts. From [37].

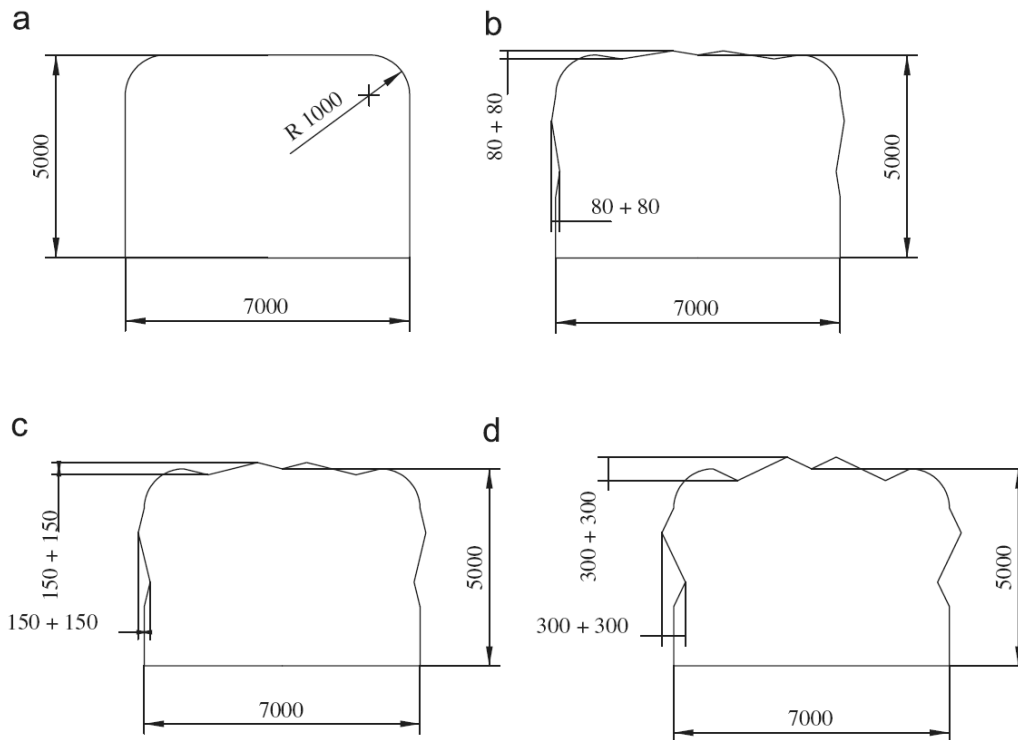


Figur 2.2 Spänningsfördelning i en sprutbetongyta upphängd i bergbultar. Från [37].
Stress distribution in a wave-shaped shotcrete surface suspended in rockbolts. From [37].



Figur 2.3 Bultplacering som gynnar bärförmågan hos sprutbetong på oregelbunden bergyta. Från [37].
Favourable placement of rock bolts with respect to the load carrying capacity of shotcrete on an irregular rock surface. From [37].

Inverkan av berg- och sprutbetongytornas ojämnhet studerades också av Malmgren, [30] och [32]. En tunnelsektion omfattande en sektion bestående av $90 \times 65 \text{ m}^2$ berg, med en tunnelöppning på ca $5 \times 7 \text{ m}^2$ modellerades numeriskt i 2D. Tunnelväggarnas oregelbundenhet gavs en sågtandad, kantig form, med amplituder på 80 mm, 150 mm alternativt 300 mm, så som visas i Figur 2.4. Ojämnheternas våglängd var 2.5 m. Sprutbetongens tjocklek varierades inom 50–150 mm i analyserna och även inverkan av bergbultar studerades.

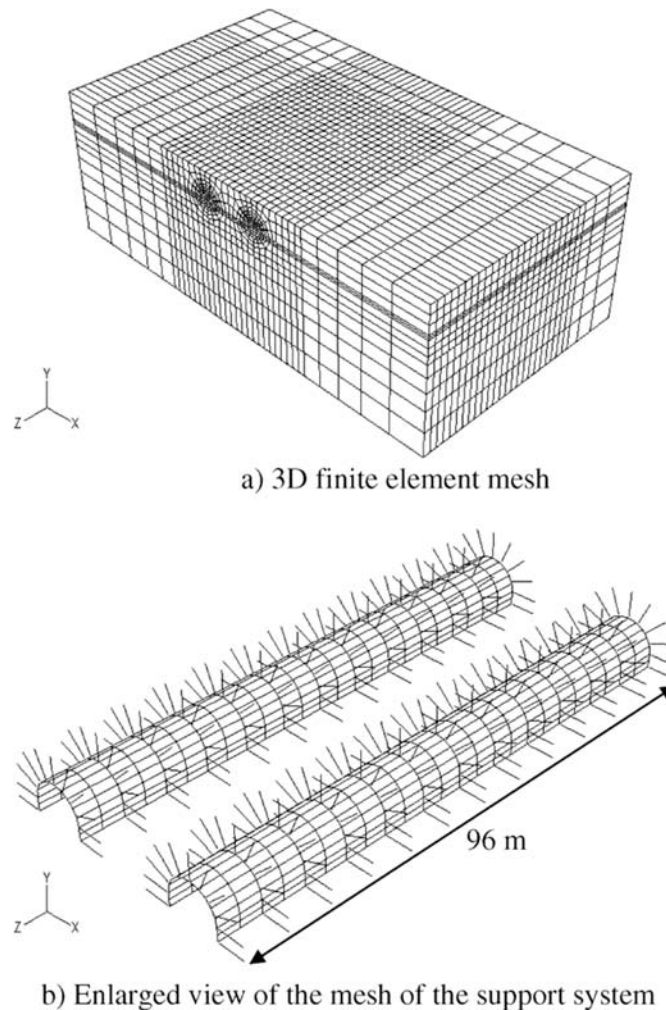


Figur 2.4 Tunnel med a) jämn bergyta samt ojämnheter på b) 8 cm, c) 15 cm och d) 30 cm. Från [32].
Tunnel with a) smooth rock surface and with a roughness of b) 8 cm, c) 15 cm and d) 30 cm. From [32].

2.3 Sprutbetong och berg i 3D

En detaljerad beskrivning av hur berget kring en tunnel samverkar med sin förstärkning och andra omgivande konstruktioner kräver ofta en modell i tre dimensioner. Detta beror främst på 3D geometrin hos tunneln där spänningssituationer kan vara svåra eller omöjliga att beskriva med plana spänningsfall eller axisymmetriska modeller, [26]. Vid komplicerade geometrier som till exempel korsande tunnlar krävs också en beskrivning i 3D, [25]. Även kontakterna mellan berg, sprutbetong och bergbultar är svåra att beskriva i 2D, och därigenom även hela systemets samverkande egenskaper. De olika materialen har dessutom väsentligt skilda mekaniska egenskaper då de utsätts för belastningar och tvångsdeformationer.

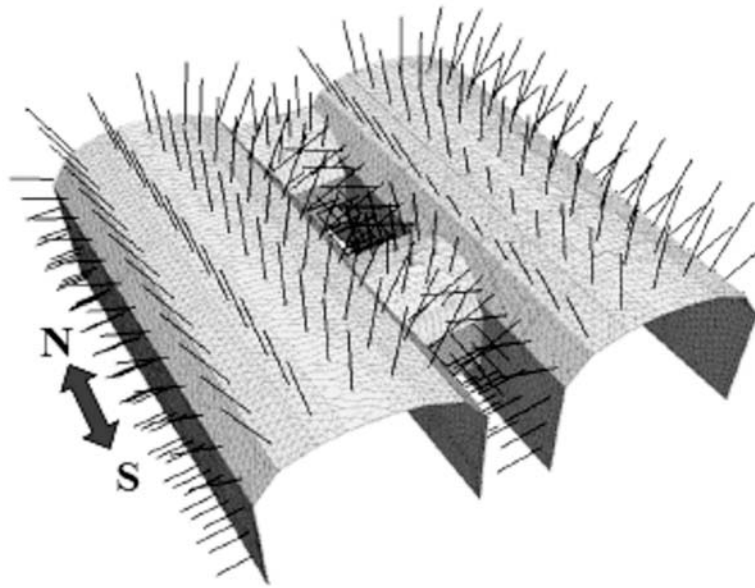
En 3D modellering av tunnlar i berg förstärkta med sprutbetong och bergbultar redovisas av Liu m.fl., [26]. Analysen syftar till att beskriva hur drivandet av en ny tunnel, parallell med en befintlig, kommer att påverka förstärkningssystemen i den förstnämnda tunneln. Tunnlarna har radier på 5 m, ligger ca 10 m under markytan och avstånden dem mellan varierar mellan 15 m och 20 m i analysen. För att beskriva detta medtas ett bergavsnitt på $230 \times 80 \times 128 \text{ m}^3$ (bredd \times höjd \times längd). Denna relativt stora finita elementmodell byggs upp av 16254 solida blockelement för berget, 672 skalelement för sprutbetongen och 1430 balkelement för bergbultarna, så som visas i Figur 2.5. I figuren visas 96 meter drivna tunnlar vilket betyder att tunnelfronterna slutar 32 m framför bergmassans borte avgränsning.



Figur 2.5 Finit elementmodell av förstärkta, parallella tunnlar. Från [26].
Finite element model of reinforced parallel tunnels. From [26].

En omfattande modellering i 3D av bergtunnlar utsatta för explosionslaster presenteras av Brandshaug och Rosengren, [6], och sammanfattas här med fokus på modelleringsaspekter för sprutbetong på berg. De använda modellerna inkluderar bergmassa samt förstärkningselement i form av bergbultar och sprutbetong. I beräkningarna har modeller med dimensionerna $300 \times 250 \times 125 \text{ m}^3$ ($L \times B \times H$) definierats, varav ett exempel visande i modellens sprutbetong och bergbultar ges i Figur 2.6. Arbetet är en fortsättning på modelleringar som tidigare gjorts med tvådimensionella kontinuummodeller, [41–42]. Den efterföljande studien, [6], tillför analyser av inverkan av bergsprickors styvhet, inverkan av begränsad hållfasthet mellan sprutbetong och berg samt bergstabiliteten utan förstärkning. Arbetet syftar till att belysa betydelsen av valet av analysmetod, det vill säga med berget som kontinuum eller diskontinuum, vid belastning med föreskrivna explosionslaster. Analyserna har utförts i två huvudsakliga steg där det första utgörs av en statisk beräkning och det andra av en dynamisk beräkning i vilket explosionslasten appliceras. Effekter av utbrytningen av tunnlar studeras genom den statiska analysen. Efter att elastisk jämvikt uppnåtts i den bergmassa som omsluter

tunnlarna har bergförstärkningen i form av fullt ingjutna bergbultar och stålfiberarmerad sprutbetong installerats samtidigt och medtagits i nästa statiska analyssteg. Bergmassan tilldelas då en begränsad hållfasthet varefter spänningar och deformationer fram till en ny jämvikt, under elastoplastiska förhållanden (Mohr-Coulomb), beräknas. Last överförs till förstärkningen endast om plasticering uppstår i bergmassan. Därmed blir den resulterande responsen i bergförstärkningen ett direkt resultat av eventuell plastisk respons i bergmassan. Beräkningsresultaten visar att påkänningarna i bergförstärkningen är mycket låga i samband med utbrytningen av tunnlar vilka är stabila även utan att bergförstärkning medtas modellen. Den statiska beräkningen gav starttillståndet för den dynamiska beräkningen.



Figur 2.6 Sprutbetong och bergbultar. Del av tunnlar modellerade i 3D. Från [6].
Shotcrete and rock bolts. Part of tunnels modelled in 3D. From [6].

Vid *LTU* pågår i skrivande stund ett projekt, [27], som omfattar analyser som genomförs utifrån Chang's, [7], försöksmodell (1/4-modell av en cirkulär öppning) samt för en fältort med ojämnheter baserat på mätningar, [30]. En av projektets viktiga frågeställningar är om det vid analys går att använda 2D modeller, och i så fall under vilka betingelser. En del av arbetet går alltså ut på att jämföra resultat från 2D och 3D modeller. Den kommande 3D modellering blir relativt omfattande, inkluderande en stor bergvolym beskriven med ett stort antal frihetsgrader. Det kommer på grund av problemets numeriska storlek endast att vara möjligt att medta sprutbetong som ett jämntjockt skal som perfekt följer en ojämn bergyta. Det kommer inte att ingå bergbultar i modellen.

För modelleringen av bergrum för en turbinhall till ett vattenkraftverk i sprickigt berg användes en 3D modell av Chen m.fl., [9]. Genom att försumma angränsande tunnlar i modellen begränsades modellens längd i bergrummens riktning till endast 1 m. Den således modellerade bergvolymen på $450 \times 450 \times 1$ m³ byggdes upp av ca 37000 finita element. Resultaten från en detaljerad modell som återgav uppträdandet i 3D begränsades alltså till att endast ge beräkningsresultat beskrivande 2D förhållanden.

Numerisk modellering i 3D av anläggningar i berg har också genomförts av Stephansson m.fl., [23] och [43], vid *Institutionen för Mark- och vattenteknik* vid *KTH*. Modellen som beskriver berget kring *SKB*:s lager för djupförvaring av kärnbränsle är främst intressant för att den visar hur ett stort berggrum kan beskrivas.

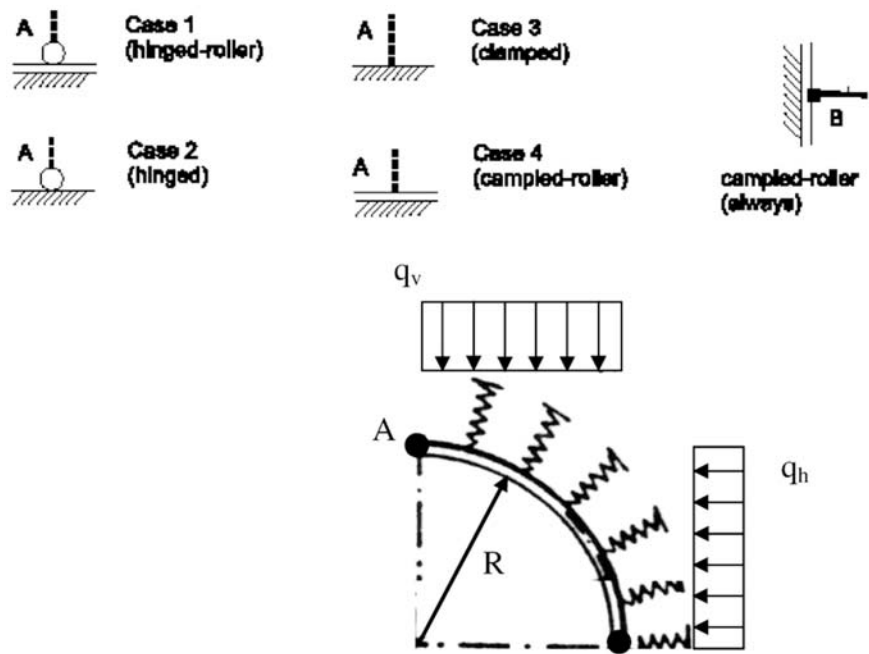
En finit elementmodell av en sprutbetongtunnel genom jord redovisas av Meschke m.fl., [35]. Analysen har gjorts för att demonstrera hur materialparametrar för åldrande sprutbetong påverkar spänningsfördelningarna under tunneldrivningen. Modellen beskriver ett block av jord med dimensionerna ca $40 \times 47 \times 42 \text{ m}^3$ där den cirkulära tunneln har en diameter på ca 6 m. Modellen byggs upp av 1048 stycken 20-noders solida blockelement ("isoparametric brick elements") vilka även beskriver den 200 mm tjocka sprutbetongen.

2.4 Avgränsade modeller av sprutbetong på berg

En finit elementmodell i lokal skala med sprucket berg, sprutbetong och bergbultar redovisas som ett testexempel av Chen m.fl., [9]. Den modellerade bergvolymen är $2 \times 2 \times 3 \text{ m}^3$ vilket modelleras med 96 respektive 4446 element. Syftet är att studera hur en föreslagen implicit modell, med en materialmodell som beskriver hela volymens sammantagna egenskaper, uppträder i jämförelse med en större, explicit modell där förekommande bergbultar och sprickor styrs av separata materialsamband. För detta fall läggs en ytlast på modellen, vinkelrätt mot sprutbetongen som alltså utsätts för skjuvning vid sprickorna (se vidare Figur 4.7).

Ett exempel på modellering av en del av ett sprutbetongskal utsatt för fördelat bergtryck ges av Oreste, [39]. Analysen är gjord i 2D och i den mekaniska modell som används är sprutbetongen representerad av en kvartsdel av en cirkelbåge, så som visas i Figur 2.7. Sprutbetongen är förbunden med berget via elastiska fjädrar och trycket från det omgivande berget är jämnt fördelat och har fått olika storlekar vertikalt och horisontellt. Särskilt studeras inverkan av olika val av upplagsvillkor för sprutbetongdelens ändpunkter. Deras egenskaper ska svara mot kontinuitetsvillkoren att kvartsbågen ska få samma spänningar och deformationer som en full båge. De upplag som undersökts är gångjärnslagrat rullager, gångjärnsled, fast inspänning och fast inspänt rullager.

Effekten av en begränsad hållfasthet mellan sprutbetong och berg undersöktes av Brandshaug och Rosengren, [6], genom en begränsad analys med kontinuummodell. Kontakten mellan sprutbetong och berg visades vara opåverkad efter utbrytningen av tunnlarna, trots den begränsade vidhäftningshållfastheten. I den efterföljande dynamiska analysen orsakade däremot explosionslasten vidhäftningsdragbrott mellan sprutbetong och berg. I diskussionen spekuleras det i att närvaro av bultbrickor i detta fall troligen hade resulterat i en mindre yta som indikerar vidhäftningsbrott.



Figur 2.7 Mekanisk modell över del av sprutbetongskal utsatt för bergtryck. Fyra olika upplagsförhållanden visas. Från [39].
Mechanical model of part of a shotcrete shell exposed to rock pressure. Four alternative support conditions are shown. From [39].

3 MODELLERINGSVERKTYG

3.1 Analystyper

För att beräkna förväntade markrörelser och deformationer i tunnlar och berggrum används vanligtvis empiriska metoder, analytiska metoder eller numeriska metoder. Med de två förstnämnda metodtyperna är det mycket svårt att beskriva samverkan mellan till exempel en tunnel under drivning och omgivande, befintliga lastbärande konstruktioner, [26]. För skattning av det komplexa sambandet mellan sprutbetong och berg används också ofta rent empiriska metoder, [32]. Analytiska metoder som använder parametrar baserade på empiri kan ses som ett sätt att kompensera för förenklade modellantaganden, till exempel användandet av modeller i 2D för att beskriva spänningar och deformationer i verkliga 3D geometrier, [25]. Ofta kan förenklade 2D modeller ge acceptabla approximationer av förskjutningar och fördelade belastningar men inte av böjande moment och skjivkrafter i sprutbetong på berg, [39].

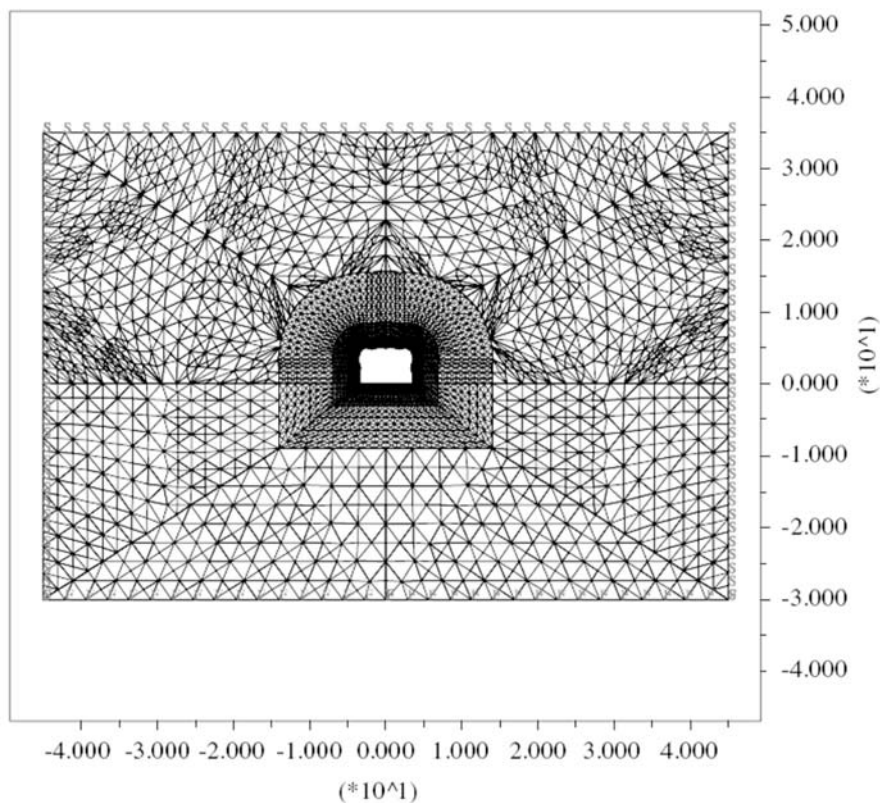
För att effektivt kunna simulera samverkan mellan berg och bergförstärkning, ofta bestående av stålbultar och sprutbetong, behövs numeriska metoder som tar hänsyn till egenskaperna för respektive ingående material. När formuleringar med plana spänningstillstånd används i samband med numerisk 2D modellering av tunneldrivning måste antaganden göras om hur stora deformationer som sker innan förstärkningselement introduceras. Detta diskuteras av Karakus, [24], som jämför sex olika metoder som tar hänsyn till 3D effekter vid finit elementmodellering i 2D. Numerisk modellering av bultar, sprutbetong och även bergsprickor kan genomföras med distinkt (explicit) metod, vilket medför att det individuella uppträdandet av sådana komponenter beskrivs separat, [9]. Alternativet är att använda en ekvivalent (implicit) metod där inverkan av komponenterna integreras i den konstitutiva modellen för bergmaterialet. Den ekvivalenta metoden anses vara lämplig då problem med ett stort antal bergbultar och sprickor studeras, särskilt om bergmassan uppträder rent elastiskt.

3.2 Distinkta elementprogram

Sedan 1980-talet har numeriska beräkningsprogram för användning inom geomekanik och hydrologi utvecklats av *Itasca* i USA, [47], ett internationellt företag som utvecklar och tillhandahåller numeriska beräkningsverktyg och dessutom arbetar som ingenjörskonsulter inom bland annat bergmekanikområdet. Fram till idag har sex olika program ("codes") lanserats. Det först utvecklade programmet var *FLAC* (Fast Lagrangian Analysis of Continua), [48], som är ett program för avancerad tvådimensionell kontinuummodellering för geoteknisk analys av berg, jord och strukturell förstärkning. Programmet finns även i en version för tredimensionell analys, *FLAC3D*, [49]. Programmen är lämpliga för material som kan plasticeras ("plastic flow") när sträckgränsen uppnås. Den analyserade strukturen, ytan eller volymen delas in i element som följer linjära eller icke-linjära samband mellan spänning och töjning. Elementpaketet innehåller även strukturella element ("structural elements") vilka kan kopplas till kontinuumet. Även dessa finns med icke-linjär materialformulering. Effekten av irregulariteter i en sprutbetongförstärkt tunnelyta som studerats i modellförsök i laboratorium av Chang, [7], modellerades också med *FLAC*. I en 2D analys med en mekanisk

modell av en sprutbetongbåge utsatt för bergtryck jämförde Oreste, [39], beräkningsresultat från *FLAC* med en egenprogrammerad finit elementmodell. Resultaten från *FLAC*-beräkningen användes som referens för att verifiera den egna modellen.

Beräkningsprogrammet *UDEC* (Universal Distinct Element Code), [50], är avsett för tvådimensionell analys av jord, berg och förstärkningselement. Programmet simulerar responsen hos belastade diskontinuerliga media utsatt för statisk eller dynamisk belastning, som till exempel solider med sprickzoner eller sprickigt berg ("jointed rock"). Elementbiblioteket omfattar styva och deformerbare block och det är möjligt att hantera stora deformationer som till exempel glidning och spricköppning. Diskontinuiteter beskrivs av gränsvillkor mellan block. Även här finns en uppsättning strukturella element för modellering av förstärkningskomponenter, som till exempel icke-linjära kablar. Den materialmodell (spänning-töjning) som kan användas för sprutbetong är av typen idealelastoplastisk, det vill säga bilinjär med en lutande elastisk del följt av en horisontell plastisk. Programmet finns i en tredimensionell version, *3DEC*, [51]. Ytterligare ett program för diskontinuumanalys är *PFC2D* (Particle Flow Code in 2 Dimensions), [52], som även det finns för tredimensionell analys, *PFC3D*, [53]. Programmet är främst avsett för mikromekanisk analys av geomaterial och partikelsystem, till exempel med interaktion mellan många diskreta objekt. Som exempel nämns flödesanalys av bulkmaterial under varierande friktionsförhållanden.



Figur 3.1 Modell i *UDEC* av tunnel, sprutbetong och berg. Från [32].
Model in UDEC of tunnel, shotcrete and rock. From [32].

Till *SveBeFo*-studien av Brandshaug och Rosengren, [6], har *Itasca*, [47], bidragit aktivt med de numeriska beräkningarna som har utförts med *3DEC*, [22]. Samma program användes

också av Malmgren och Nordlund, [32], i en studie av samverkan mellan berg och bergförstärkning. En 2D *UDEC*-modell av tunneln med omgivande berg och sprutbetongförstärkning visas i Figur 3.1. Undersökningen av samverkan mellan berg och förstärkning drivs vidare av *LTU* genom fortsatt modellering med *UDEC*, [27].

3.3 Finita elementprogram

Finita elementmetoden (FEM) är en mångsidig metod för strukturanalys av bland annat massiva konstruktioner, skal och olika slanka bärande element som till exempel balkar och stänger. Metoden är lämplig för modellering av tunnlar, rum och anläggningar i förstärkt berg eftersom det är möjligt att beakta komplexa geometrier, egenskaper hos heterogena material och samverkan mellan olika materialtyper.

Det främsta verktyget som används för avancerad finit elementmodellering vid *KTH Betongbyggnad* är *ABAQUS*, som marknadsförs av USA-baserade *Simulia*, [54]. Programmet är relativt avancerat och "brett" såtillvida att både statiska och dynamiska analyser för modeller i 2D eller 3D kan genomföras. Dessa kan vara sammansatta av till exempel solidelement och/eller skalelement. Programmet finns i ett flertal versioner. Programversionen *ABAQUS/Standard*, [55], bygger på implicita numeriska lösningsmetoder vilket möjliggör analys av statiska och långsamma förlopp, med linjära och icke-linjära materialformuleringar. För snabba förlopp, dynamiska belastningar och kontaktproblem är det mer lämpligt att använda versionen *ABAQUS/Explicit*, [56]. Den nyttjar explicita lösningsmetoder och kan även den användas med linjära och icke-linjära materialformuleringar. Det är fullt möjligt att utföra delar av en sammansatt analys med olika programversioner vilket kan ge en mycket effektivare lösning av ett komplext problem. I programmets materialbibliotek finns avancerade icke-linjära materialmodeller för beskrivning av elastoplastiskt beteende hos betong vilket möjliggör modellering av sprickbildning och brottförlopp hos sprutbetong.

För att undersöka och utvärdera effekten av skrovliga tunnelytor i genomförda laboratorieförsök använde Chang, [7], *ABAQUS/Standard* till delar av den numeriska simuleringen. Även Nilsson, [37], använde programmet tillsammans med en icke-linjär materialmodell kallad "smeared crack approach". Plana men buckliga sprutbetongplattor modellerades med skalelement som hängdes upp i bergbultar. Effekten av tunneldrivning på en redan befintlig förstärkt tunnel har undersökts med 3D numerisk modellering av Liu m.fl, [26]. För att skapa modellen, som visas i Figur 2.5, användes *ABAQUS/Standard* vilket resulterade i ett system med över 18000 finita element. För berget användes solida block-element ("isoparametric hexahedral elements") med åtta noder medan varje bergbult representerades av ett tvånodigt balkelement. Den 250 mm tjocka sprutbetongen beskrevs av fyrnodiga skalelement med fem integrationspunkter i tjockleksriktningen. Sprutbetongen var kopplad till bergelementen och följde exakt deras rörelse vid deformation. De 286 bergbultarna, vilka modellerades som ospända, integrerades i de solida elementen som inbäddade element ("embedded elements"). Detta är även ett vanligt sätt att representera armeringsstänger i betong och på detta sätt kan bultarna töjas över hela sin längd istället för i diskreta punkter. Även Golser, [13], har använt *ABAQUS/Standard* för att i 3D modellera spänningsförändringar under tunneldrivning.

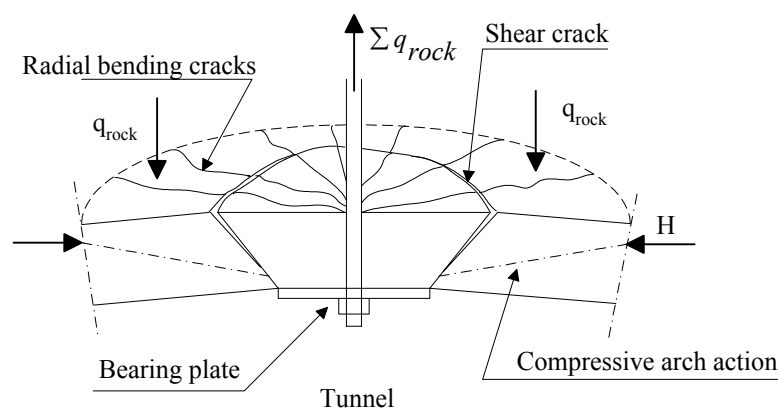
4 BERG OCH FÖRSTÄRKNING

4.1 Förstärkningsprinciper

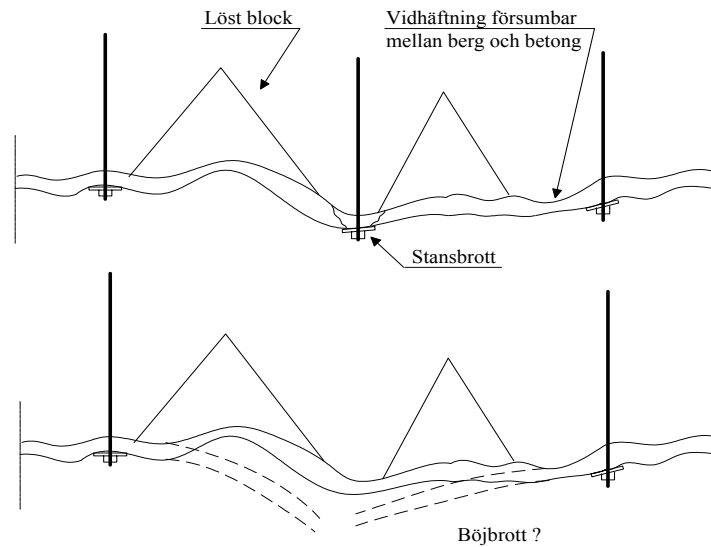
Med bergförstärkning menas åtgärder som vidtas för att skapa stabila hålrum under jord, [45]. Ofta används flera förstärkningsmaterial i samverkan, till exempel sprutbetong, gjuten betong, bergbultar, stålågar och andra prefabricerade element. Huvud-principen vid bergförstärkning är att med förstärkningselement hålla ihop berget så att detta kan bära lasterna från bland annat den omgivande bergmassans tyngd. Bergförstärkning bidrar också till stabiliteten hos en tunnel genom att sprutbetongen håller potentiellt instabila block på plats och bultarna binder ihop block så att berget bidrar till sin egen stabilisering.

4.2 Bergbultar

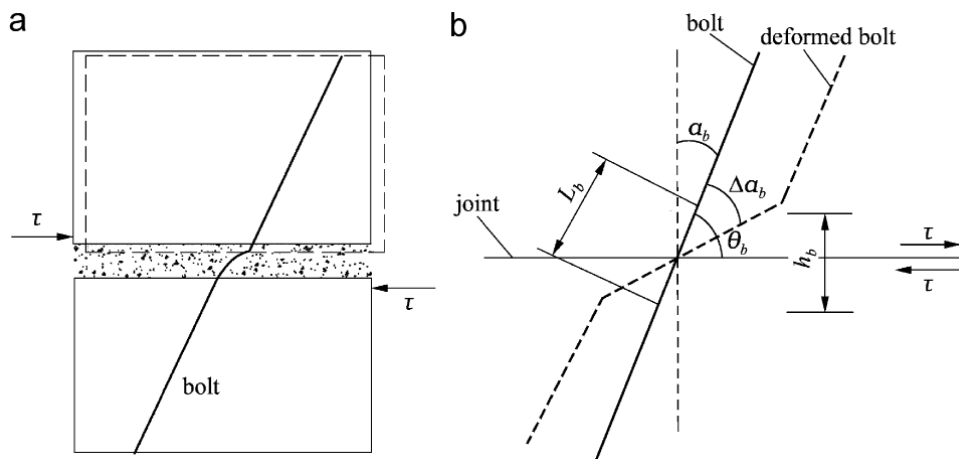
Sprutbetong förankras med bergbultar av stål då vidhäftningen mot berget är dålig eller om berget är mycket uppsprucket, [11]. Sprutbetongen överför då last till brickförsedda bultar genom balk- eller plattverkan. Möjliga brottmoder är i detta fall böjbrott eller genomstansning av bultbrickor, se Figur 4.1–2. Det anses allmänt, se till exempel [18], att risk för genomstansning normalt inte föreligger med bultbrickor som har “normala” dimensioner, det vill säga $\phi 160$ mm eller 160×160 mm². När bergbultar utsätts för skjuvrörelser i en bergspricka utvecklas två plastiska flytleder i bulten, så som visas i Figur 4.3. I och med detta kan bultarna ta upp relativt stora skjuvlaster tills den plastiska deformationen når kritiska värden och stålet går till brott, [9].



Figur 4.1 Detalj av genomstansning av sprutbetong upphängd i bergbult. Från [37].
Detail of punching failure through shotcrete suspended by a rock bolt.
 From [37].



Figur 4.2 Genomstansning av bultupphängd sprutbetong. Från [37].
Punching failure of shotcrete suspended by rock bolts. From [37].

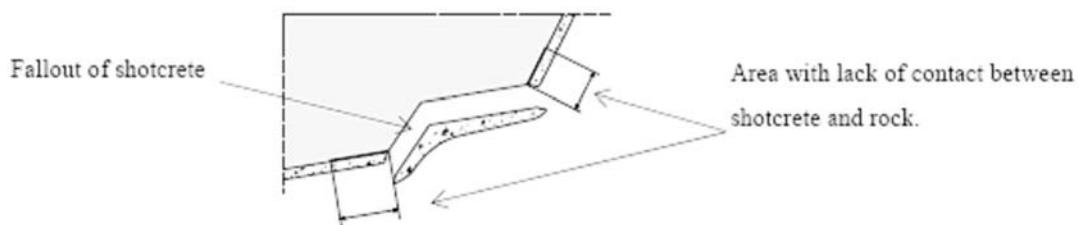


Figur 4.3 Deformation av en bergbult nära en spricka. Från [9].
Deformation of a rock bolt close to a crack (rock joint). From [9].

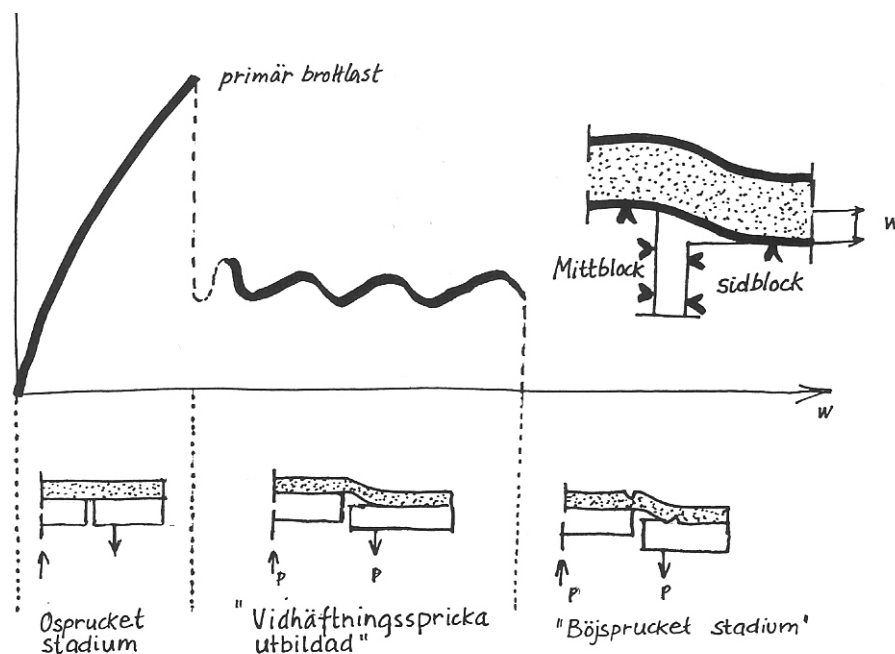
4.3 Sprutbetong

Sprutbetongs lastupptagande förmåga kan beskrivas genom den indelning i tre verkningsätt som ges av Holmgren, [18–19]. Dessa är, i ordning motsvarande ökande deformation: vidhäftning, balkverkan och membranverkan. Särskilt då en tunnells takform är välvd kan lastupptagning genom balkverkan bli aktuell, men för till exempel Södra Länkens tunnlar med relativt flacka tak förväntades inte detta bidrag bli av stor betydelse, [11]. Bärigheten med hänsyn till vidhäftning beror bland annat på bergytans råhet och bergarten, vilket redovisas av Hahn, [14]. En enbart vidhäftande sprutbetongförstärkning kan med fördel utföras tunn då ökad tjocklek kan leda till en ökad grad av vidhäftningsbrott, [32]. Partier med ingen eller

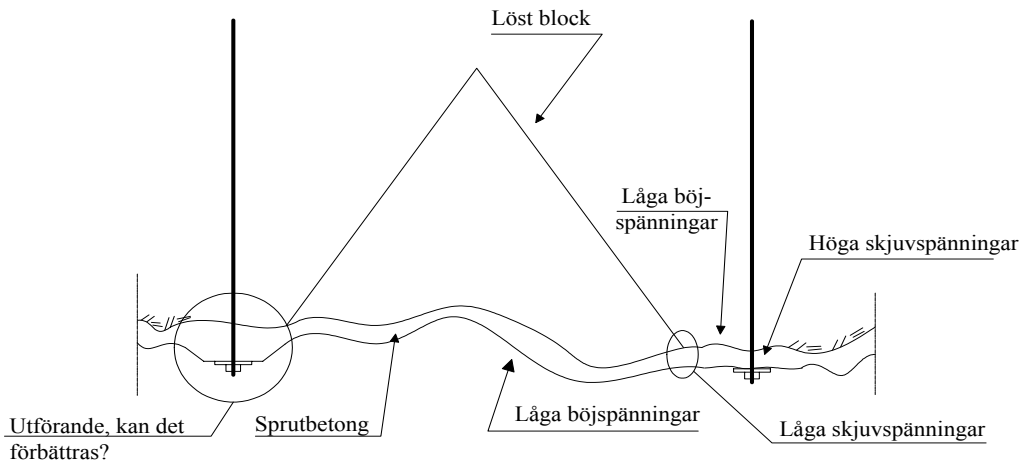
bristfällig vidhäftning mellan berg och sprutbetong kan däremot orsaka nedfall av sprutbetongpartier, vilket visas i Figur 4.4. Vid oarmerade försök med stansbelastad sprutbetong observerades de stadier i brottutvecklingen som illustreras i Figur 4.5 (se [19]). De brottyper för sprutbetong som behöver beaktas vid dimensionering är ofta vidhäftningsbrott för oarmerad sprutbetong och böjmomentbrott förmåga hos fiberarmerad sprutbetong, [11]. Den momentupptagande kapaciteten hos ett förankrat, fiberarmerat sprutbetongskikt beror av tjockleken, fiberhalten och fiberns sträckgräns. I det uttryck för praktisk dimensionering som föreslås av Fredriksson, [11], ingår också en empirisk faktor som beskriver utnyttjandegraden av fibrerna, angivet med tabellerade värden enligt Fredriksson och Stille, [12]. Bultförankrad sprutbetong som belastas av lösa bergblock kommer förutom av böjspänningar även att utsättas för skjuvspänningar, i princip så som visas i Figur 4.6.



Figur 4.4 Nedfall av sprutbetong på grund av bristfällig vidhäftning. Från [30].
Fallout of shotcrete due to bond failure. From [30].



Figur 4.5 Principiell brottutveckling för ett stansbelastat sprutbetongskikt. Från [19].
Stages towards failure for a shear loaded layer of shotcrete. From [19].

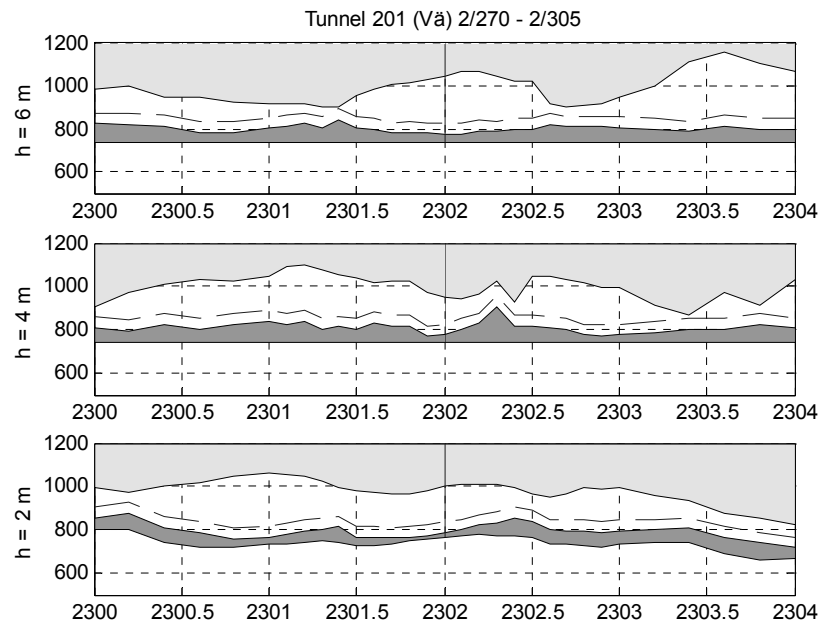


Vad händer vid ett stansbrott av en bergförankrad upphängningsbricka?

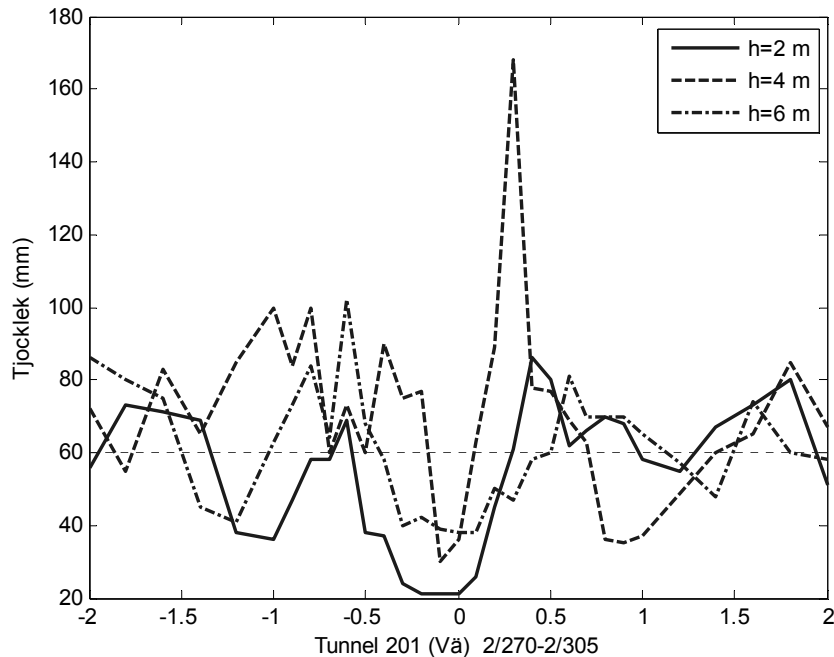
Figur 4.6 Spänningar i belastad sprutbetong upphängd med bergbultar. Från [37].
Stresses in loaded shotcrete anchored with rock bolts. From [37].

I samband med undersökning av sprickor i sprutbetong på dräner i Södra Länkens tunnlar, [5], mättes även sprutbetongtjockleken och dränmattornas avstånd till bakomliggande berg. Sprutbetongen undersöktes visuellt och de ca 900 sprickor som observerades protokollfördes med avseende på läge, utbredning och sprickbredd. Ett exempel från uppmätningen av ett 35 m långt parti visas i Figur 4.7. På höjden $h = 2$ m visas sprutbetongytans uppmätta krökning medan dessa uppmätningar saknas på nivåerna 4 och 6 m varför ytan där visas med horisontella linjer. Dränmattornas tjocklek 50 mm visas med streckade linjer och den spricka som förekommer vid längskoordinaten 2302 har märkts ut med en heldragen vertikal linje. Sprutbetongen dimensionerades i detta fall som bestående av ett 30 mm tjockt inre lager armerat med stålfibrer och ett yttre, oarmerat lager på 30 mm. Sprutbetongens tjockleksvariation över den betraktade sträckan visas i Figur 4.8. Som synes är variationen relativt stor, trots att dränmattorna som här har utgjort underlag är betydligt jämnare än det bakomliggande berget.

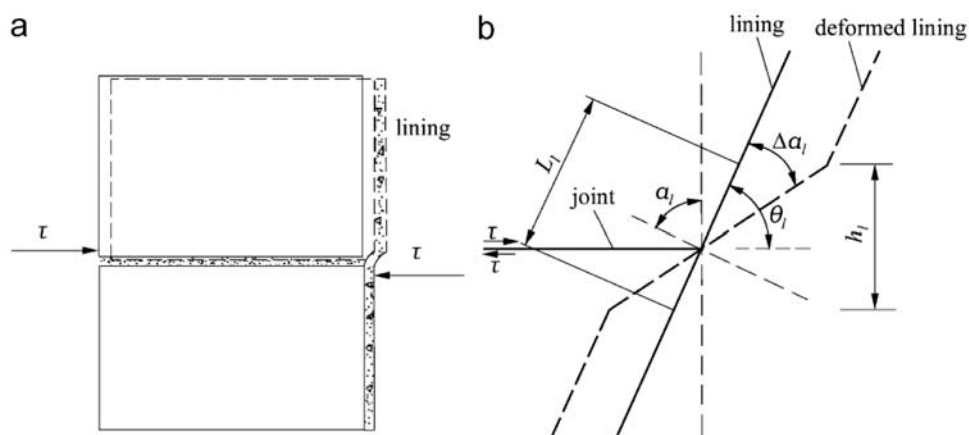
Liksom för bergbulten utsatt för skjuvrörelser i Figur 4.3 så utvecklas också två plastiska flytleder i sprutbetong som belastas på samma sätt, Figur 4.9. Sprutbetongen deformeras kraftigt i området omedelbart omkring sprickan, [9].



Figur 4.7 Profiler av berg, dräner och sprutbetong. Uppmätt i Södra Länken. Från [5].
Profiles of rock, drains and shotcrete. Measured in the Southern Link tunnels. From [5].



Figur 4.8 Tjockleksvariation hos sprutbetong. Uppmätt i Södra Länken. Från [5].
Thickness variation of shotcrete on drains. Measured in the Southern Link tunnels. From [5].



Figur 4.9 Deformation av sprutbetong nära en spricka. Från [9].
Deformation of a shotcrete lining close to a crack (rock joint). From [9].

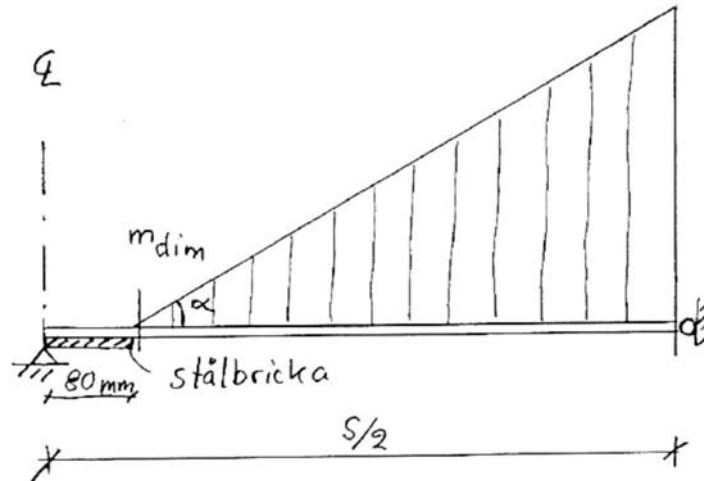
4.4 Samverkan

Samverkan mellan berg och sprutbetong är relativt komplex och styrs av ett flertal faktorer. Viktigast är bergytans oregelbundenhet, bergytans råhet, bergets mekaniska egenskaper, bergspänningarna, den av utsprängning spruckna zonen kring tunnelperimetern ("excavation damage zone"), bergbultar, sprutbetongtjockleken och egenskaperna i gränsskiktet mellan berg och sprutbetong, [32]. Det har visats att bergytans oregelbundenhet var den viktigaste av ovanstående parametrar och påverkade antalet dragbrott i sprutbetongen och vidhäftningsbrott mellan berg och sprutbetong.

Det går inte alltid att räkna med att önskad vidhäftning mellan sprutbetong och berg går att uppnå. Så som redan har diskuterats i föregående avsnitt så fås önskad bergförstärkningseffekt i sådana fall genom en samverkan mellan sprutbetong och brickförsedda bergbultar, vilket även illustreras i Figurer 4.1–2 och 4.4. Det maximala, dimensionerande böjmoment som uppstår i sprutbetongskiktet kan beräknas på olika sätt beroende på om det uppstår i fältmitt mellan bultarna eller vid en bultbricka, [11]. Det maximala moment som uppstår vid en bultbricka kan modelleras med en rotationssymmetrisk modell så som visas i skissen i Figur 4.10. I vertikalplanet motsvarar detta en balk belastad med en triangulär last, vilket alltså motsvarar en konisk last i det 3D fall som modelleras. Det dimensionerande snittet uppstår vid lastens spets där balkänden är fast inspänd, låst av stödet som motsvarar bergbult och bricka. Balkens andra ände är belägen på en symmetrilinje mitt emellan två bultar och fri att förskjutas i vertikalriktningen men förhindrad att vinkeländras. Modellen kan jämföras med lastsituationerna som beskrivs i Figur 5.8–9 längre fram.

Samverkan mellan bergbultar och sprutbetongen har inte simulerats i analyserna gjorda av Brandshaug och Rosengren, [6]. Bultarna och sprutbetongen i modellen kunde därmed deformeras oberoende vilket motsvarar att det inte fanns bultbrickor applicerade utanpå sprutbetongskiktet. Anledningen till denna förenkling är att det inte var möjligt att åstadkomma koppling mellan de olika förstärkningselementen med befintliga algoritmer i beräkningsprogrammet *3DEC* eftersom bultändarnas noder inte hade samma startkoordinater som noder hos sprutbetongelementen. Vid modelleringen placerades bultarna med ett specifikt avstånd medan sprutbetongens noder kopplades till modellnätets nodpunkter. I diskussionen av

resultaten anges att samverkan mellan bult och sprutbetong är viktig om belastningen orsakar vidhäftningsbrott varvid brickorna i realiteten skulle bidra till att hålla sprutbetongen på plats. Kontakten mellan sprutbetong och berg har i [6] beskrivits med en elastisk materialmodell varigenom sprutbetongen har getts en obegränsad, infinit hållfasthet med avseende på skjuvning och separation. Detta innebär att varken skjuvbrott eller vidhäftningsbrott kunde uppstå mellan sprutbetongen och berget. Allmän information om hur samverkan mellan sprutbetong och berg kan modelleras praktiskt ges till exempel i manualen för beräkningsprogrammet *3DEC*, [22].

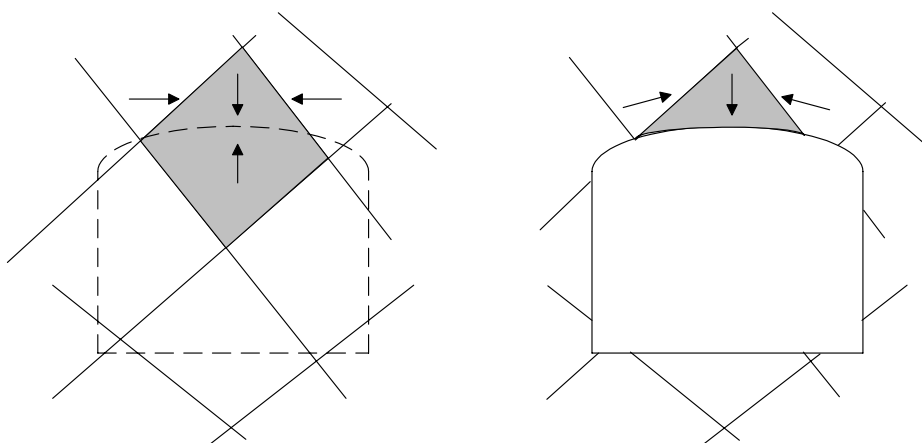


Figur 4.10 Rotationssymmetrisk modell av berglast, sprutbetong, bergbult och bricka. Skiss från [11].
Rotational symmetric model of rock-load, shotcrete and rockbolt with washer. Outline from [11].

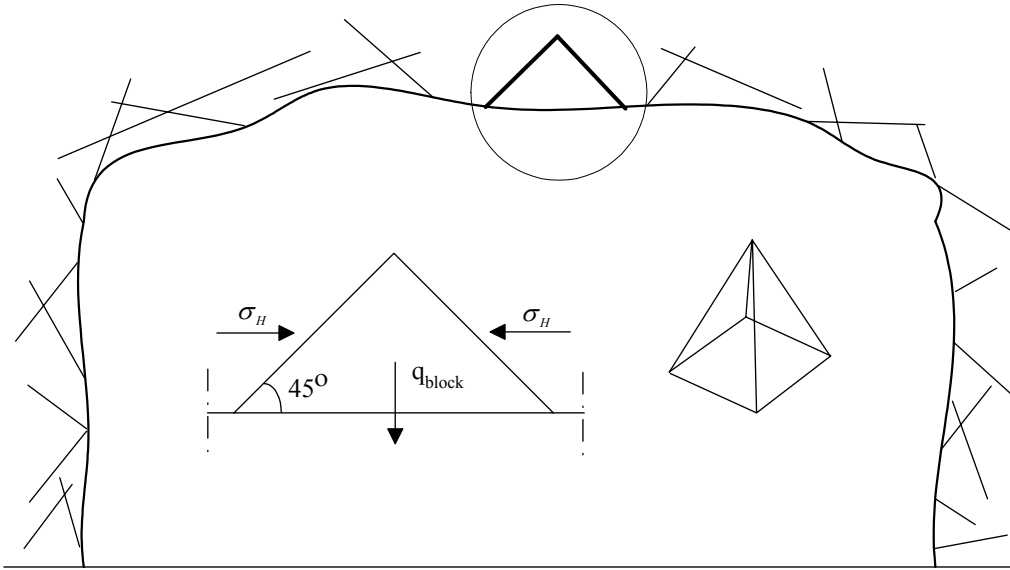
5 DIMENSIONERANDE LASTFALL

5.1 Nedfallande bergblock

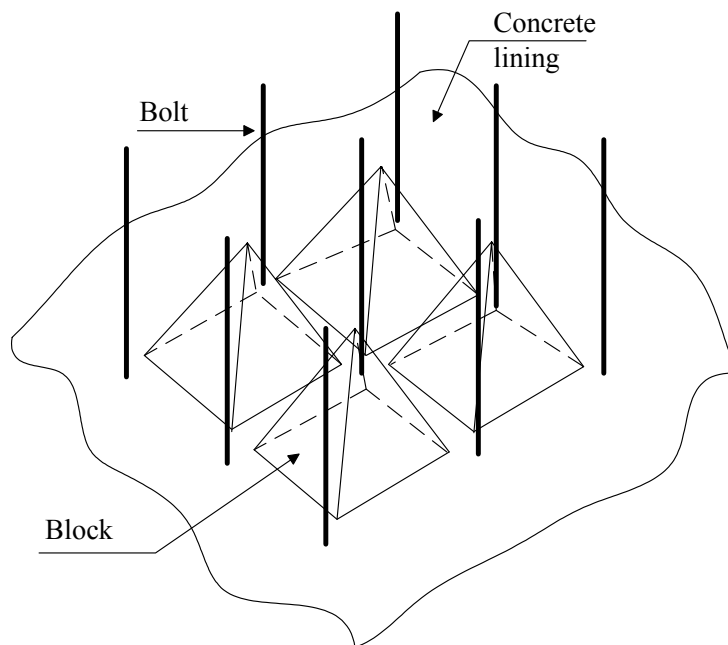
Olika fall av lokal instabilitet i berget kommer att vara dimensionerande för en sprutbetongförstärkning. Ett sprutbetongskal i ett tunneltak med välvd form kan tänkas bli belastat av lösa block eller "stenar", med triangulär eller pyramidisk form, som av spänningar i berget pressas mot och eventuellt igenom sprutbetongskalet, så som visas i Figur 5.1–2. Sådana antaganden ligger till grund för dimensioneringen av sprutbetongkonstruktioner i bland annat Södra länken, vilket sammanfattas i ett PM, [11]. Förutsättningen är att sprutbetongen sitter på berg där blocken anses vara avgränsade av spricksystem i berget och nedfall förutsätts kunna ske mellan förstärkningens bergbultar, vilket bland annat har diskuterats av Nilsson, [37]. Här visas några typfall i Figur 5.3–4. För sprutbetongförstärkningens lastbärförmåga ges ett uttryck i [11] där vidhäftningen ingår tillsammans med det burna blockets omkrets och det lastbärande områdets bredd, med referens till Stille m.fl., [44]. I sammanhanget diskuteras också tänkbara blockgeometrier som kan tänkas falla ut mellan bergbultar. En systematisk bergbultning i ett kvadratisk mönster förutsätts och de nedfallande blocken antas vara formade antingen som en kon, en pyramid eller en långsträckt kil, så som visas i Figur 5.4. Vanliga toppvinklar antas vara 45° eller 60°. För dessa blocktyper redovisar ovan nämnda PM, [11], grafer över den erforderliga vidhäftningen för 40 mm och 80 mm tjock sprutbetong som funktion av avståndet mellan bultarna.



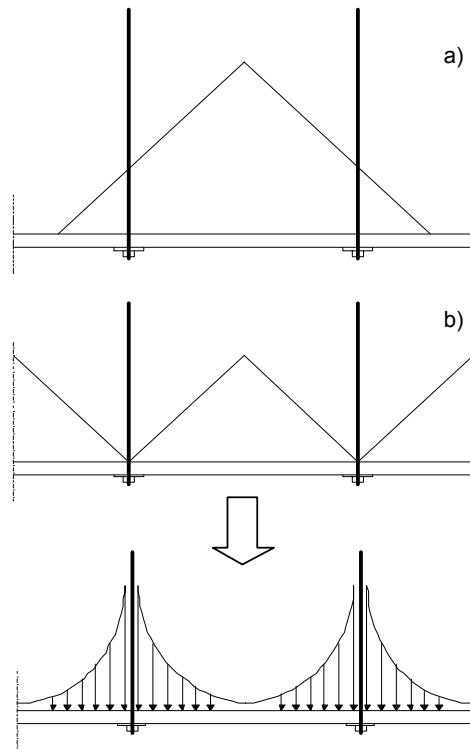
Figur 5.1 Sprickzoner i berg, före och efter utsprängning av en tunnel. Från [37].
Fracture zones in rock, before and after the excavation of a tunnel.
From [37].



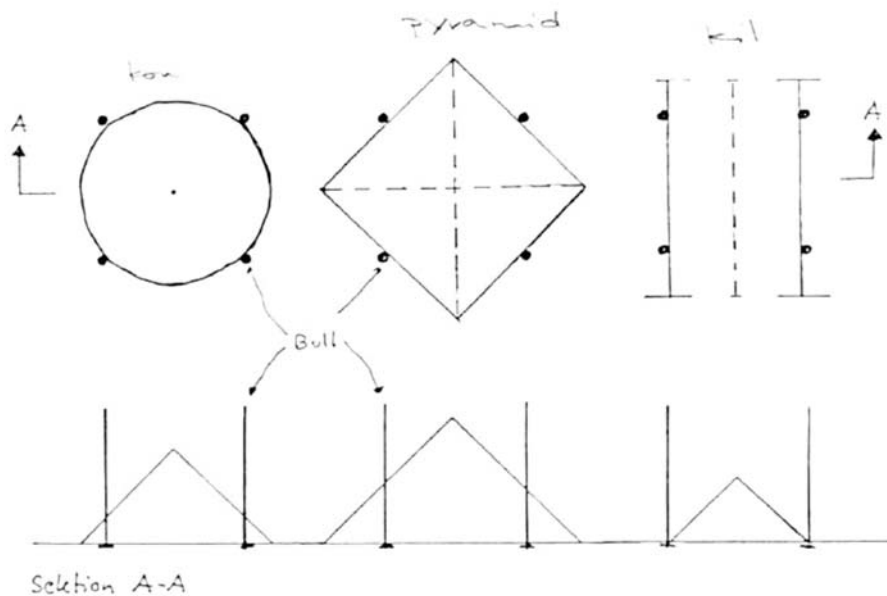
Figur 5.2 Möjlig form hos ett löst bergblock vid tunnelyta. Från [37].
Possible shape of a loose block of rock at the tunnel surface. From [37].



Figur 5.3 Styva bergblock mellan bergbultar, kvarhållna av sprutbetong. Från [37].
Stiff blocks of rock between rock bolts, supported by shotcrete. From [37].



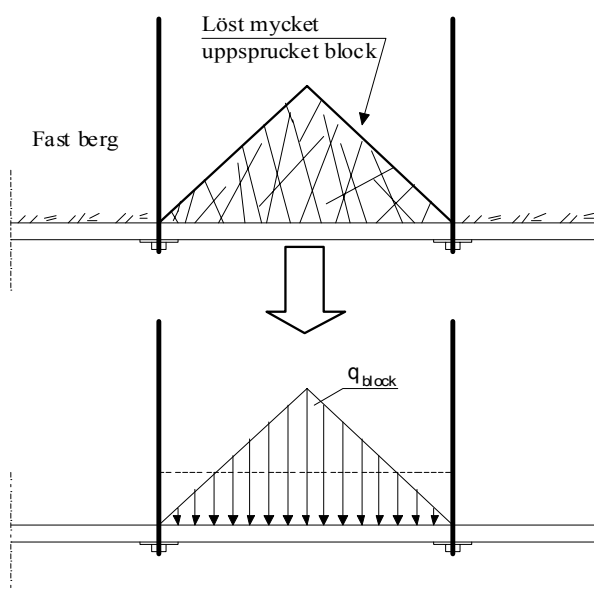
Figur 5.4 Last på sprutbetong och bergbultar från (a) ett enstaka löst block större än bultavståndet och (b) block mellan bultarna. Från [37].
Load on shotcrete and rock bolts from (a) a single loose block of rock, larger than the distance between bolts and (b) blocks between the bolts. From [37].



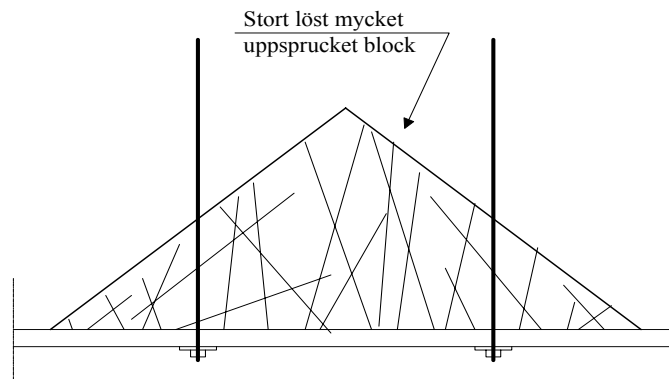
Figur 5.5 Största möjliga utsträckning av lösa bergblock. Koner (a), pyramider (b) och kilar (c), enligt [11].
The largest possible volume of loose blocks of rock. Cones (a), pyramids (b) and wedges (c), according to [11].

5.2 Löskärna av berg

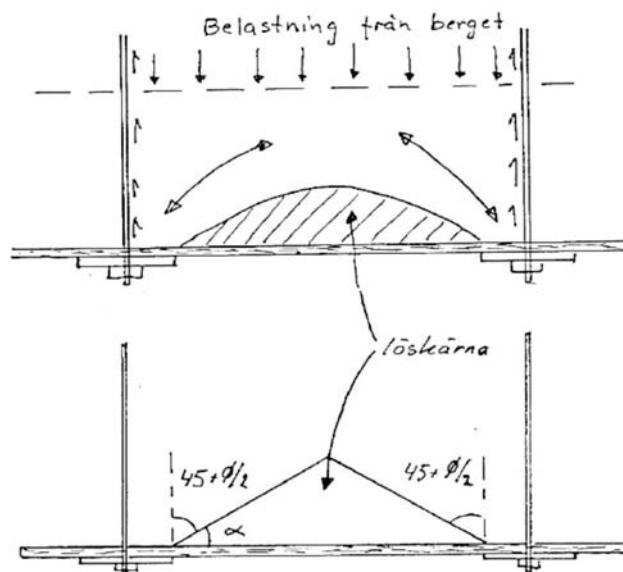
Då ett löst bergblock även är söndersprucket, uppsprucket eller vittrat har blocket ingen böjstyvhet. Detta innebär att ett mothållande sprutbetongskikt kommer att utsättas för en annan typ av last än den som ges av sammanhållna block. I sådana fall benämns ofta det lösa bergmaterialet "löskärna" och denna karakteriseras av att den, till skillnad mot ett block, är formbar. Detta ger en flexibel ytlast på sprutbetongen och dess storlek kan bestämmas utifrån bergmassans inre friktionsvinkel. Lastfallet visas i Figur 5.6 vilket ska jämföras med belastningen från homogena block som visas i Figur 5.4. När det gäller vittrat och uppsprucket berg är det mer realistiskt att anta att en löskärna har en naturligare form än ett triangulärt eller pyramidformat block. En löskärna med formen av en halv sinus-period visas i Figur 5.8, där även trycket från ovanliggande, homogena bergmassan har skissats. Figuren visar även hur löskärnan kan approximeras med en triangulär form som beror av materialets inre friktionsvinkel ϕ . Det omgivande berg antas vara av god kvalitet och bärs direkt av bultarna genom valvverkan, [11]. Då det uppspruckna berget har stor utsträckning blir momentfördelningen i det bultupphängda sprutbetongskiktet detsamma som i ett pelardäck där bergbultarna med brickor motsvarar pelarna, se Figur 5.9. Om motsatsen gäller, det vill säga en löskärna med liten utsträckning, så blir lastsituationen den som visas i Figur 5.10, en utbredd last av godtycklig utsträckning som kan stå var som helst mellan bultarna, [37]. De två lastfall som kan behöva beaktas vid uppsprucket berg är således de som visas i Figur 5.11, en jämn belastning över en större yta och en asymmetriskt placerad utbredd belastning. Jämmt fördelade utbredda laster på sprutbetong förekommer ibland som approximation av bergtryck, se till exempel Figur 2.7 som visar ett fall från [39]. En sådan approximation måste bygga på god kunskap om bergets egenskaper som eventuellt måste inhämtas genom mätning i fält.



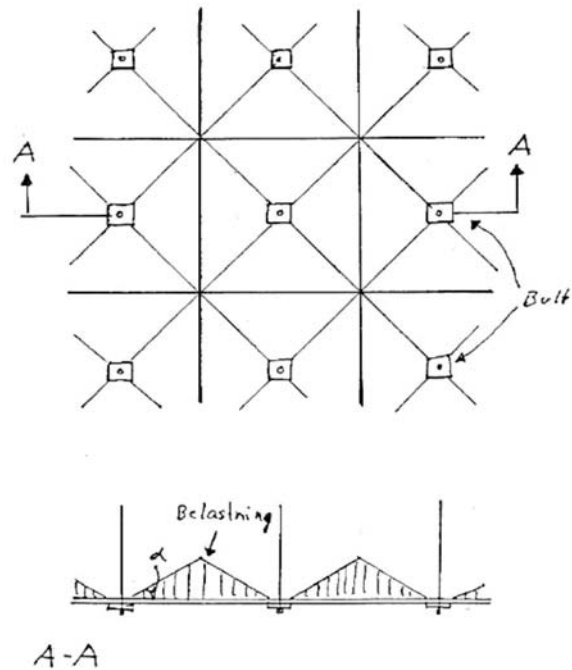
Figur 5.6 Ett uppsprucket bergblock (utan böjstyvhet) uppburet mellan bergbultar av sprutbetong. Från [37].
A cracked block of rock (without bending stiffness) supported between rock bolts by shotcrete. From [37].



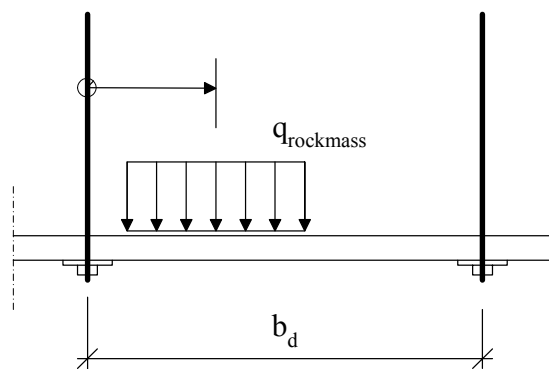
Figur 5.7 Ett uppsprucket bergblock (utan böjstyvhet) uppbyggt av bergbultar och sprutbetong. Från [37].
A large cracked block of rock (without bending stiffness) supported by rock bolts and shotcrete. From [37].



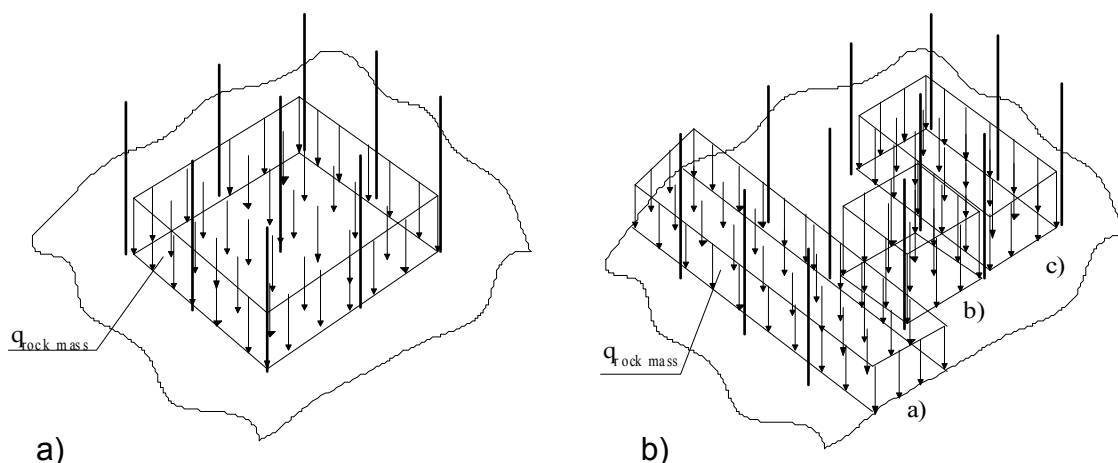
Figur 5.8 En löskärna av berg som hålls uppe av sprutbetong och bergbultar. Från [11].
A cracked rock mass supported by shotcrete and rock bolts. From [11].



Figur 5.9 Fördelad belastning från uppsprucket berg som hålls uppe av sprutbetong och bergbultar. Från [11].
Distributed load from a cracked rock mass supported by shotcrete and rock bolts. From [11].



Figur 5.10 Fritt placerad fördelad belastning från uppsprucket berg. Från [37].
Arbitrarily placed distributed load from cracked rock mass. From [37].



Figur 5.11 Fördelad belastning från uppsprucket berg, (a) jämnt fördelad och (b) fritt placerad. Från [37].
Distributed loads from cracked rock mass, (a) uniformly distributed and (b) arbitrary. From [37].

5.3 Bultbrott

Enstaka bergbultar kan gå till brott på grund av oväntade rörelser i bergsprickor men också till exempel på grund av korrosionsskador, feldimensionering eller felaktig installation. Om en eller flera bultar går av kommer funktionen hos en bergförstärkning av sprutbetong och bultar att förändras, oftast drastiskt. Ett bultbrott kan leda till stora, hastiga deformationer vilket påverkar sprutbetongen och dess vidhäftning mot berget. Det sker en förändring i lastfördelningen och därigenom också i spänningsfördelningen i såväl sprutbetong som kvarvarande intakta bultar.

5.4 Partiellt vidhäftningsbortfall

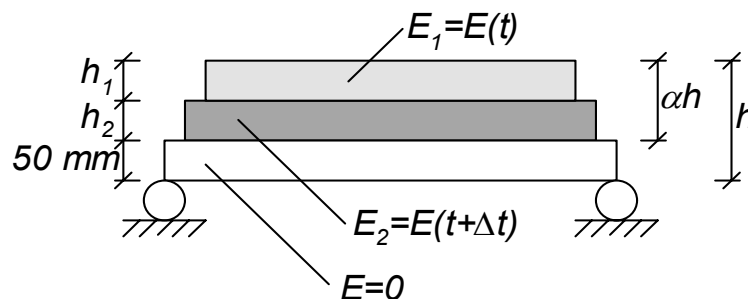
Vidhäftningen mellan sprutbetong och berg är ofta av avgörande betydelse för funktionen hos en bergförstärkning. Vid vidhäftningsprovning eller bomknackning av sprutbetong upptäcks ofta att det förekommer små eller större partier där vidhäftningen mot berget är obefintlig, [28]. Det kan röra sig om enstaka eller ett stort antal partier och dess storlek kan vara uppemot någon eller några meter. Vidhäftningshållfastheten kan också variera mellan olika partier. Detta kan styra brottförloppet hos en överbelastad sprutbetong och dessutom vid olyckliga kombinationer vara den utlösande brottfaktorn. Vidhäftningshållfastheten beror på bergart, bergytans beskaffenhet (grov eller slät), ytans renhet, förekomst av rinnande vatten samt om sprutbetongen är homogen vid spruttillfället. Sprutbetongens krympning kan bidra till att bom uppstår. Sprutbetongens vidhäftningsutveckling är dessutom känslig för koncentrationer av cement och skadligt höga doser av tillsatsmedel, såsom accelerators. Kraftiga förändringar i temperatur i luft och på bergytan under härdningsförloppet kan påverka. Även sprutprocessen spelar in så att angränsande partier får olika noggrannhet i utförandet, vilket till exempel kan bero på sprututrustningens tekniska kondition eller ett byte av personal.

5.5 Tvångsspänning från krympning

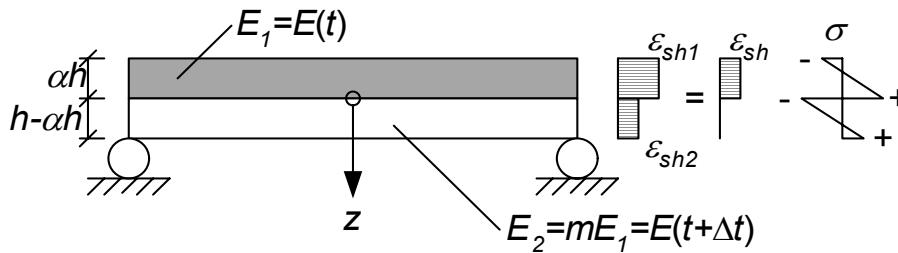
Krympning hos sprutbetong kan leda till att höga spänningar uppstår i betongskiktet, [1]. Spänningsökningen kan leda till sprickbildning vilket i sin tur påverkar bergförstärkningens funktion och förmåga att fördela laster. Betongens krympning är främst en följd av att cementpastan drar ihop sig i samband med att vatten lämnar porsystemet under betongens uttorkningsprocess. Tunna konstruktioner har en snabbare krympning än grova och våtsprutad betong innehåller dessutom normalt accelerators vilka ökar krympningens storlek. Det förekommer i praktiken oftast alltid någon form av mothåll, till exempel i form av friktion till underlag. Då betongkonstruktionen är förhindrad att röra sig uppkommer tvångsspänningar i betongen, vilka ibland kallas för krympspänningar. De faktorer som inverkar på risken för sprickbildning är krympningens storlek och tidsförlopp, graden av mothåll, betongens elasticitetsmodul och dess spänningsrelaxation. När krympningen är förhindrad genom mothåll från omgivande konstruktionsdelar uppstår sprickor vinkelrätt mot rörelseriktningen. Sådana sprickor är nästan alltid genomgående och deras bredd varierar mycket och beror på antalet sprickor samt den totala rörelsen.

Genom att armera sprutbetong med till exempel nät eller fibrer kan dess dragupptagande kapacitet höjas så att sprickbildning uteblir eller att vida sprickor undviks genom att deformationen fördelas på ett stort antal tunna sprickor istället. Fiberbetongs egenskaper under krympning vid förhindrade deformationsmöjligheter diskuteras av Malmberg, [28]. För sprutbetongpartier på berg innebär användning av stålfiber att partierna kan utföras långa och fogfria. Utan fibrer medför underlagets orörlighet att beläggningens krymprörelser (och temperaturrörelser) måste styras till speciella fogar. Även Vandewalle, [46], anger att små fibertillskott kraftigt kan reducera sprickvidder.

Vid undersökning av sprickor i sprutbetong på dräner i Södra Länkens tunnlar, [2] och [5], konstaterades att underlagets eftergivlighet i hög grad bidrog till uppkomsten av få men vida krympsprickor. Sprutbetongen bestod i detta fall av ett inre lager armerat med stålfibrer och ett yttre, oarmerat lager. Modellen som användes i den uppföljande analysen, [2], består av den fritt upplagda dubbelskiktetsbalk som visas i Figur 5.12, där inverkan av den 50 mm tjocka dräneringsmattan kan försummas. Den resulterande balken visas i Figur 5.13 där även fördelningen av krympningen ε och tvärsnittsspänningen σ och krympspänningarna σ visas.



Figur 5.12 En fritt upplagd tvåskiktets sprutbetongbalk på dräneringsmattor. Från [2].
A simply supported beam of two layers of shotcrete on top of soft drains.
 From [2].

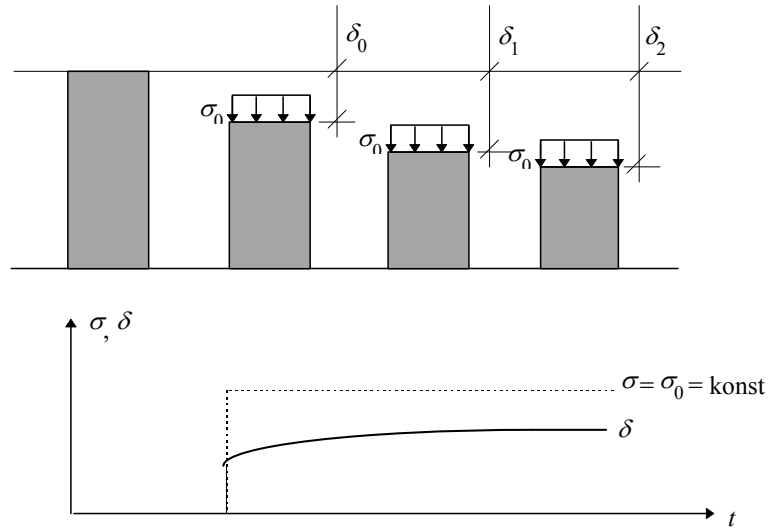


Figur 5.13 En fritt upplagd tvåskiktssprutbetongbalk. Fördelning av krympning och spänning. Från [2].
A simply supported beam of two layers of shotcrete. Distributed shrinkage strain and stresses. From [2].

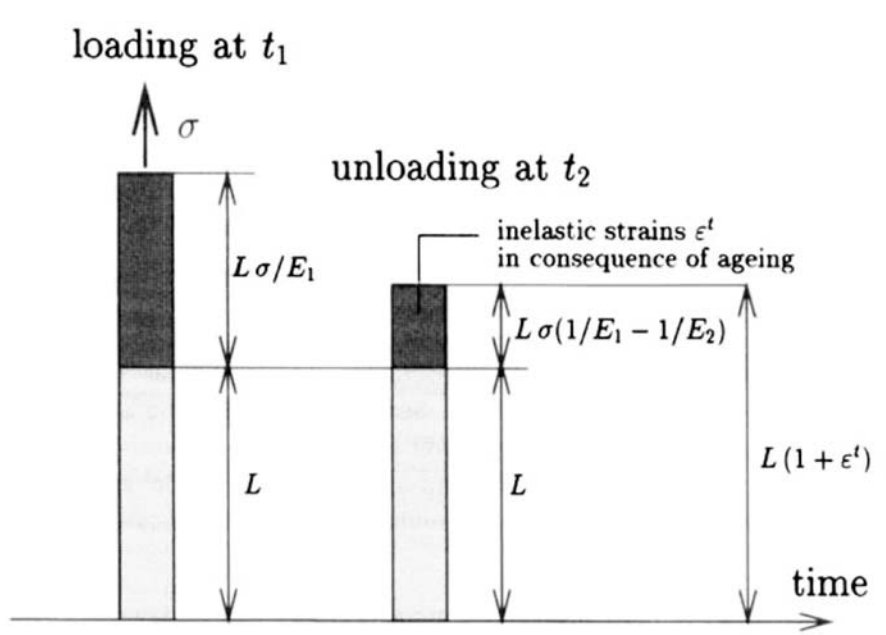
5.6 Inverkan av krympning och temperaturrörelser

Då en betongkonstruktion belastas kommer denna att deformeras omedelbart, [4]. Om lasten ligger kvar kommer deformationerna så småningom att öka. Fenomenet som kallas krympning kan illustreras med exemplet i Figur 5.14. Ett betongprisma belastas av en tryckspänning σ_0 och förkortas omedelbart svarande mot den elastiska deformationen δ_0 . Om tryckspänningen ligger kvar ökar deformationen från δ_0 till δ_1 och δ_2 . Deformationskillnaden $\delta_1 - \delta_0$ respektive $\delta_2 - \delta_0$ utgör krypdeformationen. Denna ökar successivt med tiden, men ökningen går snabbast i början. Om belastningen är konstant ökar deformationerna till följd av betongens krypning. Motsvarande beskrivs för dragbelastad betong av Meschke, [34]. Figur 5.15 visar hur ett betongprisma vid tidig ålder först utsätts för en dragande kraft vilken sedan tas bort då betongen åldrats och uppnått en högre elasticitetsmodul. Skillnaden i elasticitetsmodul leder till en kvarstående deformation som i det visade fallet är en förlängning av det obelastade prisma. Om prismats ovansida trycks ned ett stycke δ_0 , som i Figur 5.16, uppkommer en elastisk normalspänning σ_0 omedelbart. Om deformationen ligger kvar kommer spänningen så småningom att sjunka så att betongen mjuknar, det vill säga relaxerar. Krypning hos sprutbetong kan således med tiden leda till stora deformationer vilka i sin tur kan påverka lastfördelningen och vidhäftningen mot berget. Relaxation leder till en spänningsreducering i sprutbetongen men detta kan i sin tur påverka bergbultar och andra samverkande element.

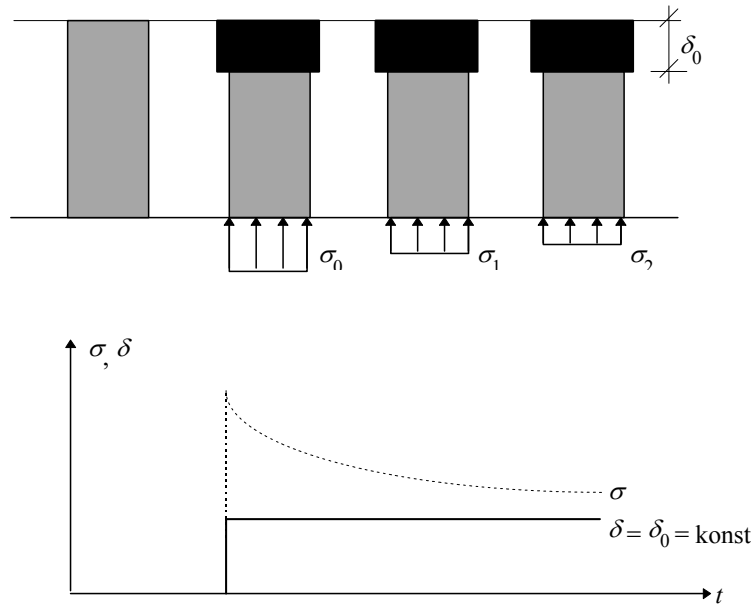
Temperaturvariationer i omgivande luft och i berget ger också upphov till belastningar som varierar med tiden, men i det här fallet rör det sig ofta om cykliska variationer. Inverkan av temperatur på sprickbildning är i princip densamma som vid krypning, [1], och ger ibland upphov till genomgående sprickor orienterade vinkelrätt mot rörelseriktningen. Det är i många fall den kombinerade effekten av temperatur- och krympningsrörelser som orsakar sprickbildning och då temperaturrörelsen är reversibel kommer sprickbredden att variera.



Figur 5.14 Betongens krypning. Deformationerna under en konstant pålagd spänning ökar över tiden. Från [4].
Concrete creep. Deformations due to a constant external stress increases with time. From [4].



Figur 5.15 Ej återgående deformation orsakad av betongens åldrande. Från [34].
Inelastic strains as a result of concrete aging. From [34].



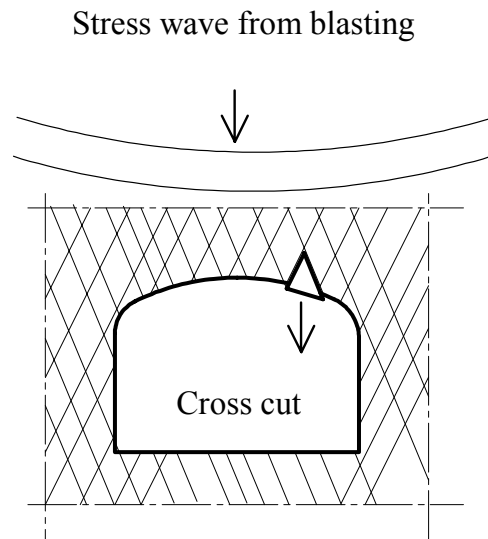
Figur 5.16 Betongens relaxation. Spänningen under en konstant deformation sjunker över tiden. Från [4].

Relaxation of concrete. The stresses due to a constant deformation decreases with time. From [4].

5.7 Dynamisk utstötning av bergblock

Vid sprängning eller seismiska händelser, som till exempel "smällberg", kan block och stenar frigöras, i princip så som beskrivits i avsnitt 5.1. Om de spänningsvågor som når blocket ifrån bergsidan är kraftiga kan detta komma att stötas ut, ibland med relativt hög hastighet så som visas i Figur 5.17. Problematiken med hur en sprutbetongförstärkning påverkas av detta har till viss del studerats av Malmgren, [29], samt Malmgren och Nordlund, [31]. Med enkla massa-fjädermodeller med en frihetsgrad påvisades att sprutbetongförstärkning kan motstå genomstansning av de block som eventuellt stöts ut vid storskalig driftsprängning i Kirunagruvan.

Vibrationståligheten hos sprutbetong på osprucket berg studeras inom ett pågående forskningsprojekt vid *KTH Bygghälsa*, se till exempel [3]. I detta fall är det dragbrott i sprutbetongen eller vidhäftningsbrott mellan sprutbetong och berg som är den vanliga brottorsaken. Vid verkliga dynamiska belastningsfall är det troligtvis en kombination av stöt-vågsreflektion vid fria bergytor och utstötta bergblock som kommer att belasta en sprutbetongförstärkning och så även eventuellt förekommande bergbultar.



Figur 5.17 Utstötning av ett bergprisma. Från [29].
Ejection of a rock prism. From [29].

6 MATERIALMODELLER

6.1 Materialbeskrivning

Beteendet hos alla konstruktioner styrs av egenskaperna hos de material de är tillverkade av. Vid numerisk simulering av verkliga konstruktioner är det därför av största vikt att använda materialmodeller som på ett korrekt sätt återger de karakteristiska materialegenskaperna. För en studie av bergförstärkning krävs därför främst relevanta modeller för berg och sprutbetong. Även modeller för stål behövs för att kunna inkludera bergbultar och armering i form av stänger, nät eller fibrer. För detaljerad modellering av sprutbetongförstärkningars brottbeteende behövs icke-linjära materialmodeller som även beskriver plasticering och sprickbildning där så krävs. I följande avsnitt kommenteras några olika aspekter av materialmodeller för de ovan nämnda tre viktiga materialen.

6.2 Berg

Materialmodeller för osprucket berg baseras ofta på elastoplastiska samband baserade på Mohr-Coloumb teori, se vidare till exempel [25–26] och [32]. Materialmodellerna finns ofta integrerade i numeriska analysprogram som till exempel *ABAQUS/Standard*, [55], och *UDEC*, [50]. För att uppskatta bergets hållfasthet kan brottkriterium enligt Hoek-Brown användas empiriskt, se till exempel [32]. Även viskoplastiska materialmodeller baserade på teori enligt Drucker-Prager används för att beskriva osprucket berg, [9] och [25].

Vid 3D modelleringen gjord av Brandshaug och Rosengren, [6], har två modelltyper använts för att simulera brott- och deformationsmekanismer i bergmassan. Berget beskrivs med de olika modellerna antingen som ett kontinuum eller ett diskontinuum. Med kontinuummodellen fördelas effekten av sprickor och intakt berg till en homogen och isotrop bergmassa, ett "ekvivalent kontinuum", som kan deformeras elastiskt och perfekt plastiskt. Modellen beskriven som ett diskontinuum motsvarar en bergmassan bestående av (elastiskt) deformerbare block som åtskiljs av deformerbare sprickor med begränsad normal- och skjuvhållfasthet vilket leder till en anisotrop respons vid belastning. För diskontinuumanalyserna måste bergsprickornas egenskaper uppskattas separat. Det poängteras särskilt att det finns en fundamental mekanisk skillnad mellan kontinuum- och diskontinuummodellerna vilket påverkar beräknade deformations- och brottmekanismer. Detta gäller speciellt i lokal tunnelskala och analysmetoden måste därför väljas så att den är kompatibel både med rådande bergförhållanden och med analysens syfte. I sammanganget nämns också att diskontinuumanalyser är relativt ovanliga i bergbyggnadssammanhang i Sverige.

Kontinuummodeller leder vid modelleringen, [6], till att den resulterande plasticeringen av bergmassan blir begränsad vilket ger små laster i bergförstärkningen. Med diskontinuummodeller sker glidning och separation längs sprickplan i bergmassan vilket bland annat ger höga axiella bultkrafter när bultarna belastas av de relativa rörelserna mellan närliggande block. Med diskontinuummodeller påvisas också en risk för draguppsprickning i sprutbetongen, orsakat av blockrörelser runt tunnelperiferin. Beräkningsresultaten visar att bergförstärkningen i detta fall är effektiv och nödvändig för att stabilisera tunnlarna.

Diskontinuummodeller beskriver således den lokala interaktionen mellan berg och bergförstärkning medan kontinuummodeller däremot bara kan ge en genomsnittlig skattning av responsen i bergförstärkningen. I diskussionen av resultaten påpekas att de båda analysmetoderna ger liknande resultat med avseende på deformationer, men av helt skilda orsaker.

Diskontinuummodeller användes också av Malmgren och Nordlund, [32], för att studera hur förekomsten av en eller många diskontinuiteter i bergmassan kring en tunnel påverkar en sprutbetongförstärkning. Även berg helt utan diskontinuiteter analyserades med samma analysverktyg (*UDEC*), men då med en kontinuerlig bergmodell.

6.3 Stål

Stålmaterialet i modellerade bergbultar styrs ofta av rent elastiska samband eller av bi-linjära, idealelastoplastiska samband. I de modeller som används av Brandshaug och Rosengren, [6], har bergbultar i form av K500 ingjutna stålbultar $\phi 25$ mm medtagits. Bultstålet följer där en elastoplastisk materialmodell integrerad i programmet *3DEC* vilket medför att de kommer att plasticera då dragkrafterna når stålets dragbärförmåga, [22]. Modellen tar även hänsyn till ingjutningsmaterialets styvhet och hållfastheten mellan stålet och ingjutningen.

6.4 Sprutbetong

Vid numerisk analys är det relativt vanligt att sprutbetongens spänning-töjningssamband beskrivs av relativt enkla bi-linjära samband som ger idealelastoplastiska samband, vilket är fallet i bland annat [26]. Viskoplastiska materialmodeller baserade på Drucker-Prager teori kan i vissa fall används för beskriva sprutbetong plasticering, [9].

En materialmodell för sprutbetong, baserad på plasticitetsteori för åldrande material presenteras av Kropik och Mang, [25]. Även Meschke, [34], Meschke m.fl, [35] och Mang m.fl, [33], beskriver modellen som har använts för att analysera drivning av tunnlar i jord eller löst berg med metoden som kallas "New Austrian Tunnelling Method". Sprutbetongen är i sådana fall lastbärande tidigt och därför är tillväxten av dess hållfasthet av intresse. Materialmodellen beskriver ett töjningshårdnande beteende som följer Drucker-Prager teori kombinerat med Rankine teori. Modellen, som ges i elastoplastisk och viskoplastisk form, beskriver sprutbetongens töjning som en summa av upp till fem termer. Dessa representerar elastisk töjning, krympning, temperaturberoende töjning, viskoplastisk töjning och åldersberoende töjning, motsvarande de fenomen som visas i Figur 5.14–16. Betongens uppsprickning beskrivs av en så kallad "smeared crack model". Modellen verifieras och materialparametrar för åldrande sprutbetong identifieras av Meschke m.fl, [35]. Materialmodellen benämns som en "thermochemomechanical material model" av Mang m.fl, [33]. En liknande modell som beaktar elastisk töjning, krympning, viskoelastisk töjning och viskoplastisk töjning används av Golser, [13].

I tunnlar som modellerats av Brandshaug och Rosengren, [6], ingår 100 mm stålfiberarmerad sprutbetong av hållfasthetsklass C32/40 i bergförstärkningen. Sprutbetongens deformationsegenskaper beskrivs här med en rent elastisk materialmodell enligt teorierna för tunna skal, [22]. Detta innebär att sprutbetongen teoretiskt kan motstå oändligt höga

belastningsnivåer. De elastiska dragkantspänningar från kombinerad normal- och böjbelastning vilka uppstår i sprutbetongens jämförs vid utvärderingen med den karakteristiska böjdraghållfastheten som är satt till 4 MPa. Risken för potentiell uppsprickning i sprutbetongen uppskattas på detta sätt men det måste noteras att det endast är en jämförelse mellan de elastiskt beräknade spänningarna och sprutbetongens karakteristiska böjdrag-hållfasthet, inte de spänningar som i verkligheten uppstår då sprutbetongen spricker upp och deformeras plastiskt innan brott uppstår. Som slutsats framläggs att en plastisk respons för sprutbetongen troligen skulle resultera i att dragbrott lokaliseras längs sprickor på ett fåtal ställen. Resonemanget baseras bland annat på tidigare tvådimensionella beräkningar, [41–42], där explosionslaster resulterade i elastisk och plastisk respons i sprutbetong.

7 FORTSATT FORSKNING

7.1 Modellering i stor och liten skala

En studie av samverkan mellan berg och bergförstärkning i form av sprutbetong och bergbultar bör genomföras med detaljerade modeller som i 3D tar hänsyn till variationer i geometri, sprutbetongtjocklek, mm. Även armering och annan förstärkning kan medtas i sådana modeller vilket möjliggör en detaljerad visning av spänningar, deformationer, skador och eventuellt sprickor hos bland annat gränsskiktet mellan sprutbetong och berg. En viktig del av arbetet blir att avgöra hur stor geometrisk del av en tunnel som bör modelleras. Även om en "lokal" modell används måste randvillkoren bestämmas utifrån det "globala" upp-trädandet. Resultat från storskalig modellering av tunnlar inuti stora bergvolymmer kan användas som randvillkor för detaljerade modeller i lokalskala.

Det är viktigt att på ett representativt sätt beskriva bergets beteende vid belastning utifrån realistiska data som beskriver spricksystem, geometrin av möjliga block, sprickornas egenskaper och valvformen hos den analyserade tunneln. Metodvalet måste alltid baseras på de speciella tunnel- och bergförhållanden som råder för det aktuella fall som ska studeras, möjliga brottmekanismer och syftet med analyserna. Den metod som bör användas för analys av deformationer och stabilitet av tunnlar i berg beror på den aktuella blockgeometrin och blockens storlek relativt tunnelns dimensioner. Det kan vara rimligt att betrakta bergmassan som ett kontinuum när denna är tillräckligt uppsprucken för att respondera homogent och isotropt men annars bör hänsyn tas till enskilda sprickors mekaniska respons.

En detaljstudie av ett begränsat parti (ca $6 \times 6 \text{ m}^2$ eller liknande) sprutbetongförstärkt berg kan alltså baseras på resultat framtagna av en kunnig bergmekaniker som beräknar bergets spänningssituation och deformationer med hjälp av storskaliga 3D modeller. Storlek och läge för det berg och sprutbetongparti som ska detaljstuderas bör göras i samarbete mellan en betongkunnig strukturanalytiker som är expert på avancerad finit elementmodellering och en bergmekaniker som förstår bergets uppträdande i stort. De olika, intressanta lastfall som kan studeras bör renodlas och utifrån de resultat en storskalig berganalys ger kan randvillkor för modellen i lokalskala identifieras.

7.2 Samverkan och sprutbetongbrott

Modellering av funktionssättet i interaktionen mellan sprutbetong och bergmassa bör ske med 3D modeller med begränsad utsträckning, beaktande olika fall av lokal instabilitet i berget. Det lämpligaste verktyget för numerisk analys på sådan detaljnivå är finit elementmodellering, med statiska eller långsamt varierande laster eller förskjutningar, eventuellt definierade som randvillkor. Då det är av intresse att försöka simulera beteendet hos system med berg och förstärkning ända fram tills brott uppstår i förstärkningen måste de konstitutiva ekvationerna som styr materialens uppträdande kunna beakta stora deformationer i 3D. För de flesta lastfall som blir aktuella här (se avsnitt 5.1–4) kommer berget att beskrivas som sammansatt av block, lösa eller förbundna till "fast berg". Deformationsegenskaperna för varje bergblock kommer att kunna beskrivas med elastiska samband medan förbindningen

blocken emellan (“rock joints”) beskrivs med plastiska, bergmekaniska formuleringar, så som diskuterats i avsnittet ovan.

I modellerna på “lokalskala” kommer berget att uppfattas som fast men elastiskt, eller som fria block som hålls fast av sprutbetong, bergbultar och eventuellt andra element. Rörelsen hos de lösa blocken väljs erfarenhetsmässigt eller beskrivs som randvillkor baserade på storskaliga bergmekaniska beräkningar (se avsnitt 7.1). För betong och stål måste spänning-töjningssambanden beskrivas med olinjära materialparametrar. Det måste vara möjligt att simulera plasticering i stål bultar och eventuell armering samt sprickbildning i sprutbetongen. Även inverkan av eventuell fiberarmering ska medtas. Av särskilt intresse kommer modelleringen av sprutbetongens vidhäftning till berg att vara. Detta kan modelleras som relativt komplicerade kontaktproblem. Bergbultar med brickor ger upphov till spänningskoncentrationer i sprutbetongen och här är bultarnas inbördes avstånd, deras töjbarhet samt brickornas form och storlek intressanta parametrar.

Med en avgränsad modell är det möjligt att simulera olika belastningssituationer och studera hur variationer i utformning av förstärkningen påverkar lastbärförmågan och sprutbetongförstärkningens brottförlopp. Olika fall som kan orsaka brott bör studeras, till exempel nedfallande bergblock, sönderspruckna bergmassor, brott i bergbultar och fläckvist bom mellan sprutbetong och berg. Hänsyn bör också tas till den komplicerade 3D situation som råder efter utsprängning av en tunnel eller ett bergrum i berg. En lämplig storlek på betraktad bergsektion kan vara som i Nilssons avhandling, [37], men detta bör utredas i förstudiestadiet.

7.3 Oregelbunden bergyta

Komplicerade 3D geometrier uppkommer vid korsningar med andra tunnlar och öppningar vilket försvårar en analys av samverkan mellan berg, sprutbetong och andra förstärknings-element som till exempel bergbultar. Även krökta bergytor, till exempel i tunneltak, kommer att ha inverkan på bärligheten hos samverkanskonstruktionen sprutbetong–berg. Taggar, piggas och gropar i bergytan greppar tag i “sprutbetongskalet” och ger varierande grader av samverkan och tvång då spänningarna i sprutbetongen går mot brottgränsen. Detta kompliceras ytterligare av den ofta ojämna formen hos tunnelväggarna och den ojämna sprutbetongtjocklek som det också ger upphov till.

Inverkan av en oregelbunden bergyta, slät eller ojämn, bör särskilt studeras för att kunna klarlägga den sammantagna förstärkningseffekten av ett sprutbetongskikt som dessutom kan ha en varierande tjocklek. Sprutbetongen kommer att jämna ut bergets kantiga kontur så att dess yta blir betydligt rundare i formen (sinusformad) än sprutbetongens inre kontaktyta mot berget. Sprutbetongens tjocklek varierar oftast över sådana partier så att en mjuk tredimensionell yttre sprutbetongyta fås. Sprutbetongens tjocklek kommer alltså att vara variabel, vilket kan leda till att det uppstår tunna, kritiska partier med nedsatt förmåga att ta upp laster. I dessa partier kan sprickbildning komma att initieras.

Modellens storlek bör här vara den samma som för de modeller som kan användas för de studier som beskrivs i avsnitt 7.2. Även motsvarande lastfall kan användas och analyserna som beskrivs i de två avsnitten kan med fördel samordnas. För de pålagda lasterna, tunnelgeometrier och andra antaganden gäller att ett sådant här *KTH*-projekt bör inriktas mot anläggningsbyggande av tunnlar och andra anläggningar i berg. Samordning bör ske med ett

pågående projekt vid *LTU*, vilket dock är mer bergmekanikinriktat och fokuserar på problemställningar hos *LKAB* och den övriga gruvnäringen.

7.4 Uppmätning i fält

Det är svårt att utan underlag ställa upp representativa geometriska modeller av bergytor som tar med "gropar", utstickande "berggaddar" och liknande imperfektioner. Uppmätningar från verkliga tunnlar bör användas för att få en bra beskrivning av bergets ojämnhet. Det är också viktigt att ha tillgång till realistiska uppmätningar av sprutbetongens ojämna yta eftersom skillnaden mellan dessa två ytor ger sprutbetongens tjocklek. Det finns således ett behov av att inhämta geometrisk mätdata från fältet. Beroende på ambitionsnivå och tillgängliga resurser kan den här typen av data erhållas från mer eller mindre glest placerade mätpunkter eller som mycket detaljerad information från laserscanning av stora ytor.

Det finns också behov av annan data som också beskriver förhållanden ute på fältet. För att kunna beakta tidsberoende rörelser i sprutbetongförstärkningen är tidsberoende faktorer såsom varierande temperaturer och fuktighet av intresse. Långsiktiga mätserier bör eftersträvas vilket ställer krav på att permanenta mätstationer upprättas med rutiner för att hämta in, lagra och presentera mätdata.

7.5 Variation av materialegenskaper

En intressant fråga är hur en optimalt verkande sprutbetong för bergförstärkning ska sammansättas och hur det kan varieras för olika typfall. Med dagens betongmaterialkunnande är det möjligt att anpassa proportioneringen av betong så att dess egenskaper på bästa sätt fungerar i förstärkningssystem tillsammans med bland annat bergbultar, också anpassat efter aktuellt lastfall. Det används idag ett flertal tillsatser, som till exempel accelerators, vilka påverkar sprutbetongen i relativt stor utsträckning och det är därför av intresse att studera hur sprutbetongens hållfasthetstillväxt under härdningsförloppet inverkar på dess slutliga egenskaper och långtidsbeteende, till exempel krypning. Tidsberoende faktorer såsom varierande temperaturer och fuktighet är viktiga parametrar som påverkar betongens krypning. Beroende på om en temporär eller permanent förstärkning studeras kan det vara av intresse att använda materialparametrar för sprutbetong vid olika åldrar. Det kan alltså finnas behov av att utföra analyser där modellernas materialparametrar varieras så att de i vissa fall beskriver ung istället för fullhårdnad sprutbetong.

Effekten av fiberarmering med stål- och plastfibrer bör också kunna inkluderas i modellerna och om lämpligt också effekten av nätarmering. Även för dessa material kan det vara av intresse att studera hur variationer i materialegenskaperna påverkar ett studerat bergförstärkningssystem i stort. Även insprutade konstruktioner, till exempel bågar och dräner, kan eventuellt tas in i modellerna. Sprutbetong på mjuka dräner utgör ett mycket intressant fall som kan studeras särskilt, men med liknande modeller. Dränerna, som ibland sätts i stora sammanhängande partier, utgör ett mycket mjuk elastiskt underlag varpå sprutbetong anbringas som mekaniskt skydd och som brandskydd. Underlaget ger mycket litet motstånd mot krympspänningar i sprutbetongen och breda sprickor bildas relativt lätt där det finns tunna sprutbetongpartier. Med 3D modellering kan risken för att krympsprickor uppstår uppskattas.

7.6 Materialegenskaper för sprutbetong

Så som diskuterades i föregående avsnitt kommer variationer i materialegenskaperna att ge skillnader i bärförmåga hos de sprutbetongbaserade förstärkningarna. En realistisk modellering som påvisar effekten av sådana variationer är beroende av korrekta och detaljerade materialdata. Det finns behov av att dels sammanställa materialdata från litteraturen och dels att komplettera med ny, experimentellt inhämtad data för ung och fullhårdnad sprutbetong.

Forskningen vid *KTH Betongbyggnad* har resulterat i en relativt hög kompetens när det gäller betongmaterialkunnande och erfarenheter av att genomföra beräkningar med avancerade finita elementmodeller, med icke-linjära materialmodeller som styr betongens uppträdande. Det pågår laborativt inriktad forskning kring sprutbetongs materialegenskaper vilket är en stor tillgång för den typ av modelleringsprojekt som beskrivs här. Det är därför viktigt att samordna pågående forskningsprojekt med inriktning på sprutbetong som bergförstärkning.

Erkännanden

Förstudien har genomförts vid *KTH Bygghvetenskap*, avdelningen för *Betongbyggnad* på uppdrag av *Stiftelsen Svensk Bergteknisk Forskning (SveBeFo)*. Under arbetets gång har givande diskussioner framförallt förts med Lars Malmgren, *LKAB*, och Lars Rosengren, *Rosengren Bergkonsult AB*, samt *KTH*-professorerna Jonas Holmgren och Håkan Stille. Till dessa och alla andra som lämnat synpunkter riktas ett stort tack för det givande samarbetet!

Stockholm i februari 2009

Anders Ansell

Litteratur

Tryckta källor

1. Ansell, A., *Utredning angående sprickor i sprutbetong på dräner i Södra Länken - Litteratursammanställning och provningsresultat*, PM 2004-01-16, Vägverket, Stockholm, 2004.
2. Ansell, A., *Utredning angående sprickor i sprutbetong på dräner i Södra Länken - Analys av trolig skadeorsak*, PM 2004-01-19, Vägverket, Stockholm, 2004.
3. Ansell, A., "Recommendations for shotcrete on rock subjected to blasting vibrations, based on finite element dynamic analysis", *Magazine of Concrete Research*, 57(3), 123–133 (2005).
4. Ansell, A., Silfwerbrand, J., Sundquist, H., *Krympning, pågjutningar och samverkan hos betongkonstruktioner*, Rapport 102, KTH Betongbyggnad, Stockholm, 2006.
5. Ansell, A., Slunga, A., *Utredning angående sprickor i sprutbetong på dräner i Södra Länken - Sprickbild i fält*, PM 2004-01-20, Vägverket, Stockholm, 2004.
6. Brandshaug, T., Rosengren, L., *3D Numerisk analys av explosionslaster i bergtunnlar*, SveBeFo Rapport 89, Stiftelsen Svensk Bergteknisk Forskning, Stockholm, 2008.
7. Chang, Y., *Tunnel support with shotcrete in weak rock - A rock mechanic study*, Doctoral thesis, Report 94/1, KTH Soil and Rock Mechanics, Stockholm, 1994.
8. Chang, Y., Brantmark, J., *Ung sprutbetong som bergförstärkning*, SveBeFo Rapport 24, Stiftelsen Svensk Bergteknisk Forskning, Stockholm, 1996.
9. Chen, S.-H., Fu, C.-H., Isam, S., "Finite element analysis of jointed rock masses reinforced by fully-grouted bolts and shotcrete lining", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46(1), 19–30 (2009).
10. Fotieva, N.N., Bulychev, N.S., "Design of sprayed concrete tunnel lining upon static and seismic effects", In: *Proceedings of the second International Symposium on Sprayed Concrete.*, 23–26 September 1996, Gol, Norway. Ed. Barton, Kompen & Berg, 70–74 (1996).
11. Fredriksson, A., *Bergmekanik - Dimensionering av sprutbetong*, Södra Länken PM 94-02-15, Södra Länken Konsulterna, Stockholm, 1994.
12. Fredriksson, A., Stille, H., *Bergförstärkningsprinciper för olika typfall i svenska gruvor*, G200 92:07, 1992.
13. Golser, J., "Behaviour of early-age shotcrete", In: *Shotcrete for Underground Support VIII*, São Palo, Brasil, 11–15 April 1999. Ed. Celestino & Parker, 83–93 (1999).

14. Hahn, T., *Sprutbetongs vidhäftning mot olika bergtyper*, 55:1/83, BeFo, Stockholm, 1983.
15. Holmgren, J., *Undersökning av verkningssätt och bärförmåga hos plana sprutbetongskikt*, Bergmekanikdagen 1974, Stiftelsen Bergteknisk Forskning, Stockholm, 1974.
16. Holmgren, J., *Undersökning av verkningssätt och bärförmåga hos stansbelastade sprutbetongskikt*, Bergmekanikdagen 1975, Stiftelsen Bergteknisk Forskning, Stockholm, 1975.
17. Holmgren, J., *Punch loaded shotcrete linings on hard rock*, doktorsavhandling, Rapport 7:2/79, Stiftelsen Bergteknisk Forskning (även Fortifikationsförvaltningen Rapp nr 121:6, FortF), Stockholm, 1979.
18. Holmgren, J., *Bolt anchored steel fibre reinforcement linings*, 73:1/85, BeFo, Stockholm, 1985.
19. Holmgren, J., *Handbok i bergförstärkning med sprutbetong*, Vattenfall Vattenkraft, Vällingby, 1992.
20. Holmgren, J., Nilsson, U., "Load bearing capacity of steel fibre reinforced shotcrete linings", In: *International Conference on Engineering Developments in Shotcrete*, Hobart. Ed. Bernard (2001).
21. Holmgren, J., Sundquist, H., *Verkningssätt och dimensionering av sprutbetongförstärkningsar*, Publ nr 21 Bk/1968 och Suppl nr 2 Bk/1976, Fortifikationsförvaltningen, Stockholm, 1976.
22. Itasca, *3DEC (3-Dimensional Distinct Element Code), Version 4.1*, Itasca Consulting Group, Inc., Minneapolis, 2008.
23. Jing, L., Stephansson, O., *Fundamentals of discrete element methods for rock Engineering*, Elsevier Publishers, Oxford, 2007.
24. Karakus, M., "Appraising the methods accounting for 3D tunnelling effects in 2D plane strain FE analysis", *Tunnelling and Underground Space Technology*, 22(1), 47–56 (2007).
25. Kropik, C., Mang, H.A., "Computational mechanics of the excavation of tunnels", *Engineering Computations*, 13(7), 49–69 (1996).
26. Liu, H.Y., Small, J.C., Carter, J.P., "Full 3D modelling for effects of tunnelling on existing support systems in the Sydney region", *Tunnelling and Underground Space Technology*, 23(4), 399–420 (2008).
27. LTU, *Projekt: Bergförstärkning i samverkan med berg*, Luleå tekniska universitet, Luleå, 2007.

28. Malmberg, B., *Stålfiberbetong under fri och förhindrad krympning*, Fiberbetong–Delrapporter, Nordforsk & Cement- och betonginstitutet, Stockholm, 1977.
29. Malmgren, L., *Shotcrete Rock Support Exposed to Varying Load Conditions*, Licentiate Thesis, Report 2001:64, Luleå University of Technology, Luleå, 2001.
30. Malmgren, L., *Interaction between shotcrete and rock: Experimental and numerical study*, Doctoral thesis, Report 2005:48, Luleå tekniska universitet, Luleå, 2005.
31. Malmgren, L., Erling Nordlund, “Behaviour of shotcrete supported rock wedges subjected to blast-induced vibrations”, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 43(4), 593–615 (2006).
32. Malmgren, L., Nordlund, E., “Interaction of shotcrete with rock and rock bolts □ A numerical study”, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 45(4), 538–553 (2008).
33. Mang, H.A., Hellmich, C., Lackner, R., Pichler, B., “Computational structural mechanics”, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 52(5–6), 569–587 (2001).
34. Meschke, G., “Consideration of aging of shotcrete in the context of a 3-D viscoplastic material model”, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 39(18), 3123–3143 (1996).
35. Meschke, G., Kropik, C., Mang, H.A., “Numerical analyses of tunnel linings by means of a viscoplastic material model for shotcrete”, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 39(18), 3145–3162 (1996).
36. Nilsson, U., *Bärverkan hos bergförankrad fiberarmerad sprutbetong*, SveBeFo Rapport 64, Stiftelsen Svensk Bergteknisk Forskning, Stockholm, 2003.
37. Nilsson, U., *Structural behaviour of fibre reinforced sprayed concrete anchored in rock*, Doctoral thesis, Bulletin 71, KTH Structural Engineering, Stockholm, 2004.
38. Nilsson, U., Holmgren, J., “Design of steel fibre reinforced shotcrete linings”, In: *Nordic Concrete Research Meeting*, Reykjavik (1999).
39. Oreste, P.P., “Appraising a numerical approach to the hyperstatic reaction method for the dimensioning of tunnel supports”, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 22(2), 185–205 (2007).
40. Pöttler, R., “Time-dependent rock-shotcrete interaction. A numerical shortcut”, *Computers and Geotechnics*, 9, 149–169 (1990).
41. Rosengren, L., Brandshaug, T., *Numerisk analys av explosionslaster i bergtunnlar*, Rosengren Bergkonsult rapport till Vägverket, Borlänge, 2001.

42. Rosengren, L., Brandshaug, T., *Numerisk analys av explosionslaster i bergtunnlar – Etapp 2*, Rosengren Bergkonsult AB rapport till Vägverket, Borlänge, 2002.
43. Shen, B., Stephansson, O., Rinne, M., Lee, H.S., Jing, L., Roshoff, K., “A fracture propagation code and its applications to nuclear waste disposal”, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Engineering*, 41(3), 448–449 (2004):
44. Stille, H., Johansson, R., Nord, G., “Rock support and excavation under various conditions”, In: *Int. Symp. On Tunnelling for Water Resources and Power Projects*, New Delhi (1988).
45. Stille, H., Nord, G., *Bergmekanik del 2*, Inst. för Jord- och bergmekanik, KTH, Stockholm, 1990.
46. Vandewalle, M., *Tunnelling the world*, N.V. Bekaert S.A., Zwevegem, 1998.

Internetbaserade källor

47. <http://www.itascacg.com>
48. <http://www.itascacg.com/flac/>
49. <http://www.itascacg.com/flac3d/>
50. <http://www.itascacg.com/udec/>
51. <http://www.itascacg.com/3dec/>
52. <http://www.itascacg.com/pfc2d/>
53. <http://www.itascacg.com/pfc3d/>
54. <http://www.simulia.com>
55. http://www.simulia.com/products/abaqus_standard.html
56. http://www.simulia.com/products/abaqus_explicit.html



Box 5501
SE-114 85 Stockholm

Tlf: 08- 762 62 20 • info@svebefo.se
Besöksadress: Storgatan 19

ISSN 0281-4714

tbk.