



<http://www.diva-portal.org>

This is the published version of a paper published in *Tidskriften Betong*.

Citation for the original published paper (version of record):

Ahmed, L. (2012)

Ökad kunskap om sprutbetong ger hållbara tunnlar.

*Tidskriften Betong*, (6): 50-52

Access to the published version may require subscription.

N.B. When citing this work, cite the original published paper.

Permanent link to this version:

<http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:kth:diva-196016>



AV LAMIS AHMED,  
BETONGBYGGNAD, KTH

# Ökad kunskap om sprutbetong ger hållbara tunnlar

**En modell för att se hur sprutbetong fungerar när den utsätts för sprängkrafter har tagits fram i en doktorsavhandling vid KTH. Tack vare förståelsen som modellen ger kan överdimensionering undvikas när en tunnel drivs fram och även byggtiden kan kortas.**

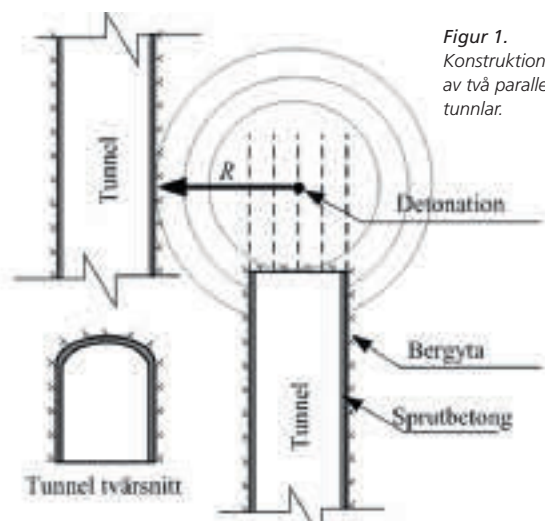
**V**ID DRIVNING AV tunnlar är det önskvärt att veta hur nära sprutbetong sprängning kan ske och dessutom hur lång härdningstid som krävs innan sprutbetongen uppnått tillräcklig hållfasthet. De väntetider och överdimensioneringar som idag måste accepteras motsvarar stora merkostnader vilket försvårar ett säkert och kostnadseffektivt bergbyggnad.

För att uppnå avsedda långa tekniska livslängder och en hög grad av säkerhet krävs att sprutbetongkonstruktionerna utformas och anpassas så att dessa inte skadas redan under byggskedet, vilket kan få allvarliga konsekvenser för den framtida driften och underhållet av tunnelarna. I de flesta underjordsarbeten i hårt berg används sprängämnen för att möjliggöra borttransport av bergmassor. Detta ger upphov till vibrationer i berget vilka fortplantas som spänningsvågor fram emot eventuella frilagda bergytter som förstärkts med sprutbetong.

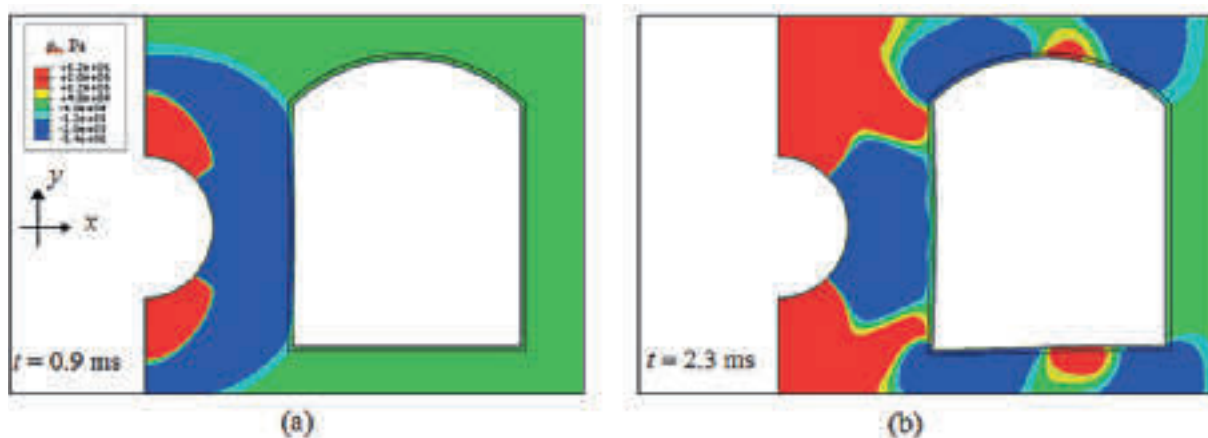
Höga spänningsnivåer kan leda till bortfall av vidhäftning mellan berg och sprutbetong eller utstötning av hela sprutbetongpartier. Problem kan till exempel uppstå när parallella tunnlar drivs nära varandra eller när sprutbetong används nära tunnelfronten, se figur 1. Genom den ökade kunskapen om sprutbetong i vibrationsutsatt miljö kan produktionstiden reduceras samt

diget som kvaliteten hos bergförstärkningarna kan höjas.

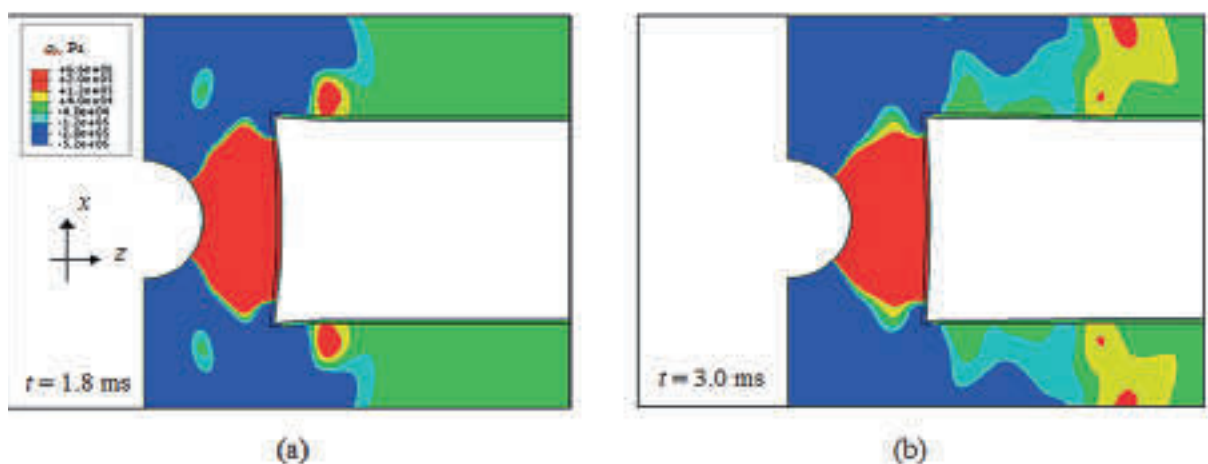
För att skapa förutsättningar för riktlinjer för praktiskt bruk i samband med byggande i berg har ett forskningsprojekt nyligen genomförts vid KTH [1]. Projektet innebär utveckling av dynamiska finita elementmodeller för vilka insamlad information och data används som beräkningsunderlag. Inom projektet har arbetet foku-



Figur 1.  
Konstruktion  
av två parallella  
tunnlar.



Figur 2. FE-analys av en tunnelprofil. Spänning i x-riktningen ( $\sigma_x$ ) av tunneln vid (a) 0,9 ms och (b) 2,3 ms efter sprängning.



Figur 3. FE-analys av en tunnelfront. Spänning i x-riktningen ( $\sigma_x$ ) av tunneln vid (a) 1,8 ms och (b) 3,0 ms efter sprängning.

serats på jämförelser mellan resultat från framarbetade numeriska beräkningsmodeller och kunskap och erfarenheter från byggverksamhet. Målet är att öka kunskan- det om hur nära, i tid och avstånd, nysprutad betong sprängning kan ske.

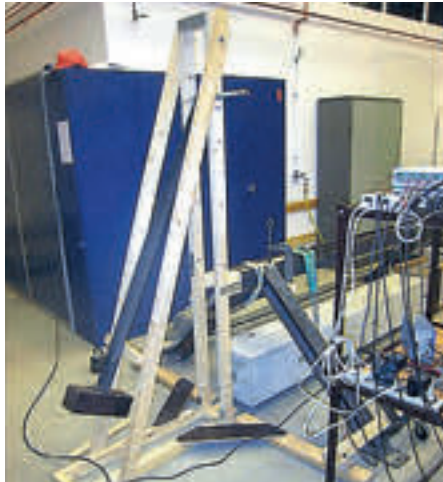
Inom projektet har ett flertal beräkningsmodeller jämförts och utvärderats genom jämförelse med data från fältmätningar och laboratorieförsök. De modeller som provats är dels baserade på endimensionell elastisk spänningsvågsteori, dels på strukturdynamiska modelleringsprinciper. I det senare fallet har modeller med fjädrar, massor och elastiska balkar använts för att beräkna de spänningar som uppstår i sprutbetong på vibrerande berg, enligt samma principer som används för byggnader på mark utsatt för vibrationer, se [2,3]. Fördelen med dessa relativt förenklade modeller är att beräkningar kan genomföras snabbt och effektivt och därigenom, med relativt liten beräkningsansträngning, gör det möjligt att genomföra jämförelser med ett stort antal observationer och fältmätningar.

Det visades att de presenterade och jämförda modellerna gav jämförbara resultat [4], även om definitionen av de dynamiska lasterna skiljer sig åt. För en spänningsvågmodell definieras den dynamiska belastningen som en tidsberoende hastighet medan tidsberoende ac-

celerationer används för de strukturdynamiska modellerna. Dessa förenklade modeller bygger på linjär elastiskt materialteori och kan därmed inte användas för att beräkna effekten av delvis skadad vidhäftning mellan sprutbetong och berg.

Modellerna kan emellertid användas för att identifiera gränsen för skada genom serier av beräkningar med ökande belastningsnivå, tills antingen draghållfastheten eller vidhäftningshållfastheten överskrids. Som en fortsättning av modelleringsarbetet har mer sofistikerade dynamiska beräkningsmodeller tagits fram med finita elementprogram [1]. Dessa har anpassats för att presentera spänningsvågors fortplantning kring en tunnel i ett berg, såsom visas i figur 2 och 3. De tvådimensionella spänningsfälten, som här visar en tunnelprofil och ett horizontalsnitt av en tunnel och dess front, kan användas för att identifiera höga spänningskoncentrationer i gränssnittet mellan berg och sprutbetong, samt i bergmassan och i sprutbetongskalet.

Vid de genomförda beräkningarna med de finita elementmodellerna har betongens åldersberoende egenskaper varierats för att undersöka skadebenägenheten hos ung och nysprutad betong på olika avstånd från en detonerande laddning. På så sätt har funktionen hos ung och hårdnande sprutbetong som utsätts för höga vibra-



Figur 4. Laborieförsök med modell av sprutbetong på berg utsatt för stötvågor från en mekanisk impuls.

tionsnivåer undersökts för att identifiera säkra avstånd och sprutbetongåldrar för undermarks- och tunnelbyggnad. Arbetet har fokuserats på att finna samband mellan numeriska resultat, mätresultat och observationer från tunnelbyggnad. Resultaten har utvärderats genom jämförelser med mätningar och observationer gjorda i fältmiljö varvid gynnsamma och ogynnsamma förhållanden kunnat identifieras.

En simulering av spänningsvågutbredning genom granit av god kvalitet, från en explosiv laddning mot sprutbetong på en bergyta, har genomförts i laboratorium vid KTH [5]. Det icke-förstörande försöket utfördes med P-vågutbredning längs en betongbalk, med egenskaper som liknar berg. På grund av praktiska skäl ersattes berget av betong med liknande dynamiska egenskaper. Cementbaserat bruk med egenskaper liknande sprutbetongs applicerades på ena änden av balken vilket bildade en platta med samma tvärsnitt för att motsvara sprutbetong på bergytan i en tunnel. Spänningsvågor, liknande dem som observerats i fält, inducerades vid den motsatta änden av balken med en stålhammare, se figur 4.

Testerna simulerade inkommande spänningsvågor vilka ger upphov till tröghetskrafter som orsakas av accelerationerna som verkar på sprutbetongen. Dessa kommer i sin tur att reflekteras i gränssnittet mellan sprutbetong-berg (platta-balk), vilket kan orsaka bortfall av vidhäftning. Formen på de spänningsvågor som når sprutbetongen registrerades med accelerometrar placerade längs balken. Finita elementmodeller har använts för att verifiera testresultaten, som visade att experimentmodellen med en påverkande hammare kan användas för att initiera samma typ av spännings-

vågor som från sprängning i berg av god kvalitet.

För utvärderingen har bland annat också resultat från tidigare genomförda fältförsök använts [6]. Sprutbetong på tunnelväggar i Kirunagruvan utsattes för vibrationer från sprängning inne i berget varvid de uppnådda accelerationsnivåerna registrerades och skadorna karterades.

Slutsatsen från tidigare undersökningar visar att sprutbetong kan tåla höga vibrationer (partikelhastigheter) utan att allvarliga skador uppstår. Oarmerad sprutbetong kan vara oskadd efter att ha utsatts för så höga vibrationsnivåer som 0,5–1 m/s medan partier med förlorad vidhäftning till berget kan uppträda vid vibrationshastigheter högre än 1 m/s, se till exempel [3,7,8]. Dessa resultat har verifierats av de nu genomförda beräkningarna [1,4] och laborieförsöken [5]. De redovisade beräkningsexemplen och beskrivna beräkningsmetoderna bidrar till ett ökat kunnande om sprutbetongs motståndskraft mot vibrationer. De framtagna

Tabell 1.

Rekommenderat minimiavstånd för 100 mm tjock sprutbetong utsatt för detonation av Q (kg) sprängämne.			
Avstånd från explosiv R	Detonation Q		
	0,5 kg	1,0 kg	2,0 kg
2,2 m	12 tim.	18 tim.	*
3,0 m	10 tim.	13 tim.	21 tim.
5,0 m	7 tim.	9 tim.	12 tim.

\* Inte möjligt att uppnå en tillräckligt hög vidhäftning.

numeriska beräkningsmodellerna ska användas för att ta fram riktlinjer för praktisk användning vid berg och tunnelbyggnad med sprutbetong. Riktlinjernas exaktitet beror av detaljeringsgraden i de indata som finns tillgänglig, till exempel information om bergets kvalitet och egenskaper samt tunnelgeometri. De exempel på riktlinjer som ges [1] visar på beroendet av avstånd till laddningen, laddningsvikt och sprutbetongtjocklek, se tabell 1.

En vidareutveckling av den presenterade typen av finita elementmodeller kommer att vara en viktig uppgift för framtida forskning. Det vidare arbetet ska inriktas på att ta fram och fastställa detaljerade riktlinjer för sprutbetonganvändning på vibrationsutsatt berg. Med mer detaljerade gränsvärden kan onödiga väntetider och överdimensioneringar minskas eller elimineras vilket motsvarar stora merkostnader som i sin tur omintetgör ett säkert, miljövänligt och kostnadseffektivt bergbyggnad vilket är av stort värde för anläggningsentreprenörer, vid till exempel tunnelbyggnad, och för gruvnäringen. ■

REFERENSER: 1. Ahmed L. Models for analysis of shotcrete on rock exposed to blasting. Licentiatuppsats, KTH Bygghälsa, Stockholm, 2012. Ansell A. 'Shotcrete on rock exposed to large-scale blasting', Magazine of Concrete Research, 59, 663–671 (2007). 2. Ansell A. 'Dynamic finite element analysis of young shotcrete in rock tunnels', ACI Structural Journal, 104, 84–92 (2007). 3. Ahmed L., Ansell A. 'Structural dynamic and stress wave models for the analysis of shotcrete on rock exposed to blasting', Engineering Structures, 35, 11–17 (2012). 4. Ahmed L., Ansell A. 'Laboratory investigation of stress waves in young shotcrete on rock', Accepterad för publikation i Magazine of Concrete Research, maj 2012. 5. Ansell A. 'In situ testing of young shotcrete subjected to vibrations from blasting', Tunneling and Underground Space Technology, 19, 587–596 (2004). 6. Ansell A. 'Recommendations for shotcrete on rock subjected to blasting vibrations, based on finite element dynamic analysis', Magazine of Concrete Research, 57, 123–133 (2005). 7. McCreath DR., Tannant DD., Langille CC. 'Survivability of shotcrete near blasts'. Nelson PP, Laubach SE, editors. Rock Mechanics, Balkema, Rotterdam, 277–284 (1994).