

Vibrationstålig sprutbetong

Anders Ansell

Teknisk rapport 2003:1, Betongbyggnad. ISSN 1404-8450

Vibrationstålig sprutbetong

Anders Ansell

Teknisk rapport 2003:1, Betongbyggnad

Kungl Tekniska Högskolan
Inst för byggvetenskap
100 44 STOCKHOLM

FÖRORD

Projektet bedrivs inom forskningsgruppen i *Betongbyggnad* vid *Institutionen för Byggetenskap* vid *KTH*, vilken leds av Professor Jonas Holmgren. Projektet har letts och genomförts av undertecknad. Som projektets referensgrupp fungerar *Sveriges Byggindustrier/FoU-Väst* med Pär Åhman som samordnare. I projektgruppen ingår Jonas Holmgren och Nils Olof Sandell från *BESAB*. Projektet har finansierats med forskningsmedel från *SBUF* genom *Sveriges Byggindustrier/FoU-Väst*.

Till samtliga ovanstående riktas ett varmt tack för gott samarbete!

Stockholm 2003-01-22

Anders Ansell
1e forskare, Tekn.dr.

INNEHÅLL

1. Inledning	3
1.1 Bakgrund	3
1.2 Syfte	3
2. Genomförande	4
3. Finita elementmodeller	5
4. Beräkningsexempel	7
4.1 Avståndsberoende – 28 dygn gammal sprutbetong	7
4.2 Åldersberoende – sprutbetong 4 m från laddning	9
4.3 Åldersberoende – sprutbetong 2 m från laddning	10
5. Slutsatser	12
5.1 Resultatens praktiska tillämpningar	12
5.2 Föreslagna gränsvärden	12
5.3 Reservationer och begränsningar	13
5.4 Behov av fortsatt forskning	13
Referenser	15

1. INLEDNING

1.1 Bakgrund

Vid projektets start fanns ingen eller mycket begränsad kunskap om sprutbetongs motståndskraft mot vibrationer genererade av sprängning eller liknande. Vid byggande i berg är detta till stor nackdel, särskilt för entreprenörer vilka måste kunna planera och samordna resurser och olika insatser. Till exempel vid drivning av tunnlar vill man veta hur nära sprutbetong man kan spränga och dessutom hur lång härdningstid som krävs innan sprutbetongen uppnått tillräcklig hållfasthet. De väntetider och överdimensioneringar som idag måste accepteras motsvarar stora merkostnader vilket omintetgör ett säkert och kostnadseffektivt bergbyggande.

Problemet med ung vibrationsutsatt sprutbetong på berg har tidigare studerats genom fältförsök i Kirunagruvan och numerisk modellering med elastisk vågteori. Arbetet har avrapporterats som en del i en doktorsavhandling från *Institutionen för Byggnadskonstruktion* på *KTH*, [1]. Projektet har följts upp genom ett mätprojekt vid trafikleden Södra länken i *SveBeFo* s regi, [2] och en förstudie i finit elementmodellering, [3].

Inom det aktuella forskningsprojektet föreslås finita elementmodeller som även medtar effekten av uppsprucket berg som uppstår vid utsprängning kring en tunnel eller ett bergtrum. I motsats till den tidigare använda endimensionella vågmodellen är de föreslagna modellerna tvådimensionella. Beräkningsresultaten är därmed i form av tvådimensionella förskjutningsfält som även kan visa förskjutningsvågrörelser över sprutbetongytan. Betongens åldersberoende egenskaper, som t.ex. elasticitetsmodul, tryck- och vidhäftningshållfasthet, kan enkelt varieras för att undersöka skadebenägenheten hos ung och nysprutad betong. Effekten på sprutbetong på olika avstånd från en detonerande laddning kan bestämmas genom att använda de skallagar som styr partikelvibrationshastigheter i berg. De föreslagna modellerna har testats och jämförts med fältnätningar och observationer från de tidigare utförda provningarna i Kiruna.

1.2 Syfte

Forskningsprojektet syftar primärt till att skapa riktlinjer för praktiskt bruk i samband med byggande i berg. Sekundärt ska resultaten kunna fungera som underlag för eventuell fortsatt provningsverksamhet. Målsättningen är även att presentera arbetet i några internationella tidskriftsartiklar och konferensbidrag.

2. GENOMFÖRANDE

En utförlig litteraturundersökning har genomförts, bland annat för att kunna möjliggöra användandet av pålitliga materialdata, särskilt beträffande sprutbetongens styrka, deformationsegenskaper och vidhäftning mot berg. Genom att använda insamlad material- och mätdata för modellering med finita elementmetoden ökas förståelsen för de styrande mekanismerna bakom vibrationsutsatt sprutbetongs tålighet. De kunskaper och erfarenheter om finit elementmodellering som finns på *Institutionen för Bygghälsa* på *KTH* har kunnat tas till vara. Beräkningsresultaten har jämförts med den information som kan fås från observationer gjorda vid fältmätningarna i Kiruna. Projektet har omfattat följande arbetsmoment:

- Litteraturstudie, materialegenskaper - redovisas i [4]
- Framtagande av två prototyper till finita elementmodeller
- Utvärdering av beräkningsresultat, jämförelse med fältförsök
- Beskrivning och presentation av beräkningsexempel - redovisas i [5].

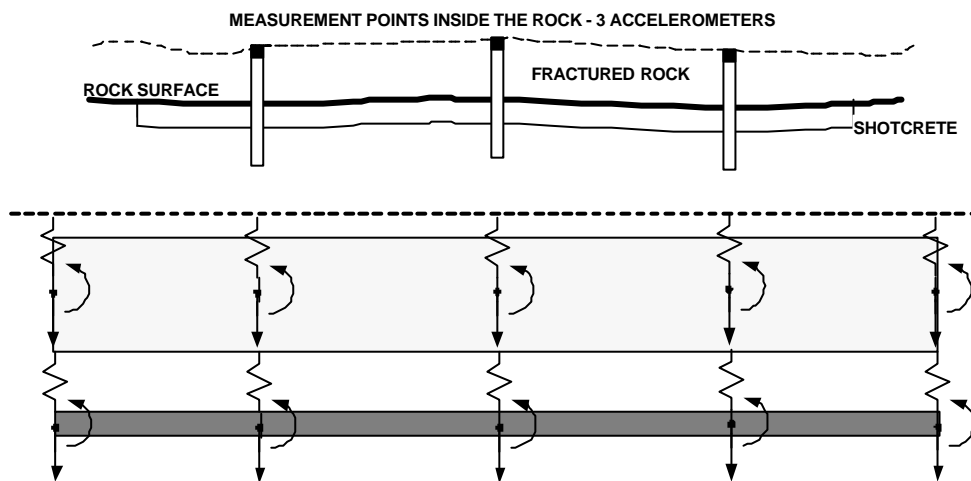
I rapport [5] ges beräkningsexempel som demonstrerar modellernas användbarhet. De presenterade exemplen visar:

- Deformationsförloppet hos sprutbetong
- En jämförelse mellan två modeller
- Modellering av två av försöken från Kirunagruvan
- Vidhäftningsspänningarnas beroende av avståndet till vibrationskällan
- Vidhäftningsspänningarnas beroende av sprutbetongs ålder
- Deformationsförloppet av vibrationer från ytligt belägen, avlägsen laddning.

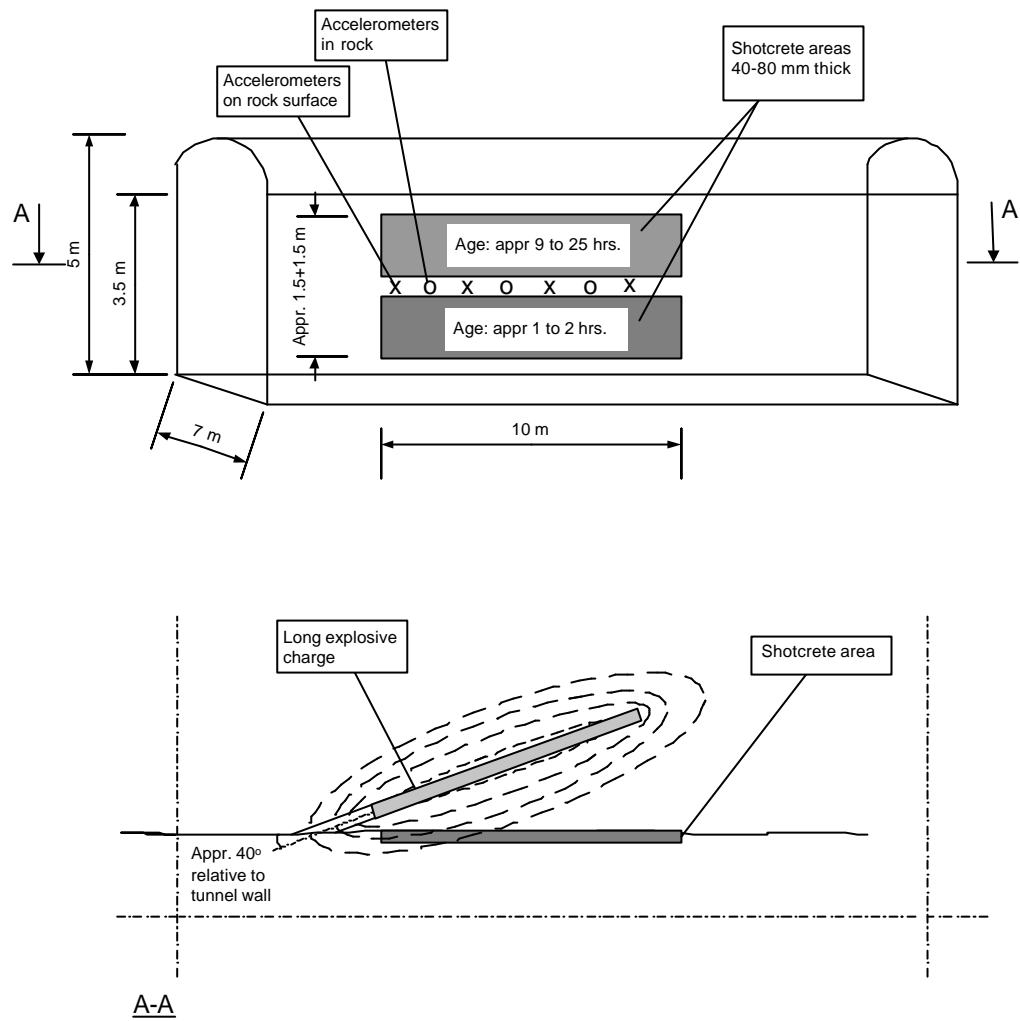
Projektet har även presenterats vid en nordisk betongkonferens, [6].

3. FINITA ELEMENTMODELLER

De presenterade finita elementmodellerna består av balkelement och fjädrar, där sprutbetongens böjstyvhet och massa ges av balkarna och vidhäftningen mellan berg och sprutbetong av fjädrarna. I Figur 3.1 visas hur sprutbetong på berg i princip kan modelleras. Notera att den skissade modellen endast har 20 frihetsgrader medan i beräkningarna har använts modeller med över 200 frihetsgrader. Modellen innehåller en balk av uppsprucket berg, ca 500 mm tjock, och en av sprutbetong vilka kopplas samman med elastiska fjädrar. De maximala fjäderdeformationerna bestäms av bergets och sprutbetongens draghållfastheter och vidhäftningshållfastheten mellan dessa. Lasten består av uppmätta eller antagna accelerationsförlopp som, i det här fallet, angriper vid bergbalkens upplag. Figur 3.2 visar försöksuppställningen vid Kirunaförsöken.



Figur 3.1: Dynamisk finit elementmodell av sprutbetong på en tunnelvägg utsatt för vibrationer. Modellen består av en tjock balk av uppsprucket berg, en tunn av sprutbetong samt fjädrar.

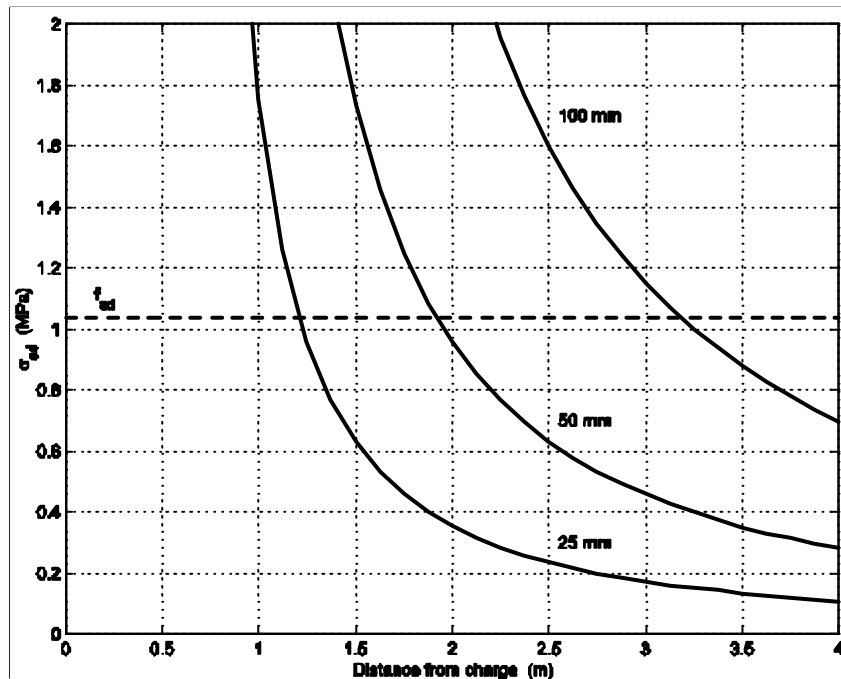


Figur 3.2: Försöksuppställning vid Kirunaförsöken, [1]. Två sprutbetongpaneler på tunnelvägg, accelerometrar på bergytan och 0,5 m in i berget samt bakomliggande sprängladdning.

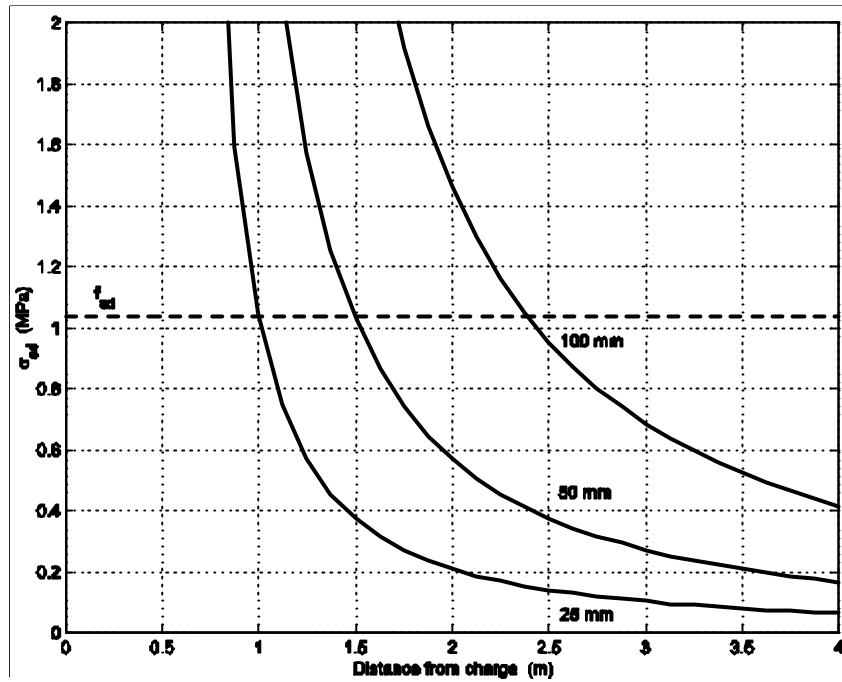
4. BERÄKNINGSEXEMPEL

I de tre följande avsnitten redovisas beräkningsresultat från modellering av sprutbetong på vibrationsutsatt granit. Exemplet innehåller och kompletterar två av de beräknings-exempel som ges i rapport [5]. I avsnitt 4.1 visas för 25, 50 och 100 mm tjock sprutbetong den maximala vidhäftningsspänning σ_{ad} som uppträder mellan berg och 28 dygn gammal sprutbetong, som utsätts för vibrationer från en detonerande laddning. Laddningarnas storlekar är 0,5, 1 och 2 kg ANFO. Kurvornas skärningar med den horisontella linje som representerar vidhäftningshållfasthet f_{ad} ger de minsta tillåtna avstånden mellan sprutbetong och laddning. I avsnitt 4.2 visas σ_{ad} som funktion av sprutbetongens ålder upp till 72 timmar. I detta fall är laddningen belägen 4 m från sprutbetongen och f_{ad} representerad av en kurva med positiv lutning. I det följande avsnitt 4.3 visas motsvarande beräkningsresultat för avståndet 2 m.

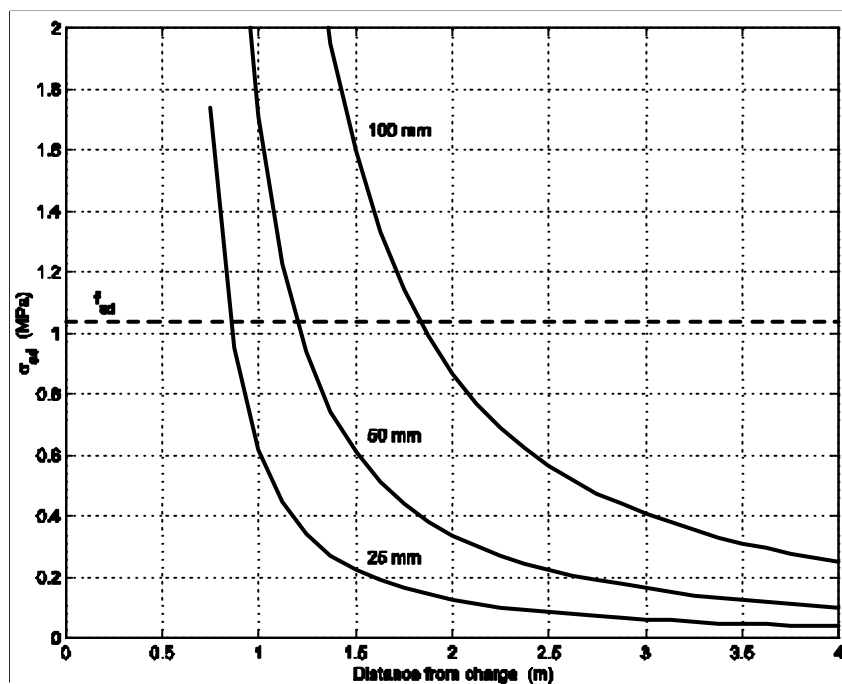
4.1 Avståndsberoende – 28 dygn gammal sprutbetong



Figur 4.1: Högsta uppträdande vidhäftningsspänningar mellan berg och 25, 50 och 100 mm tjock sprutbetong för 28 dygn gammal sprutbetong från en detonerande laddning på 2 kg ANFO.

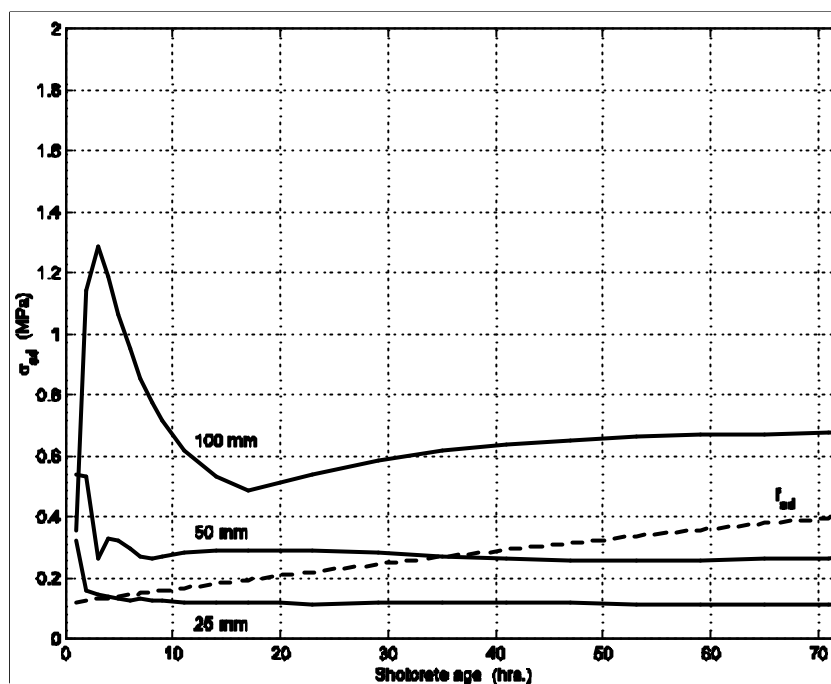


Figur 4.2: Högsta uppträdande vidhäftningsspänningar mellan berg och 25, 50 och 100 mm tjock sprutbetong för 28 dygn gammal sprutbetong från en detonerande laddning på 1 kg ANFO.

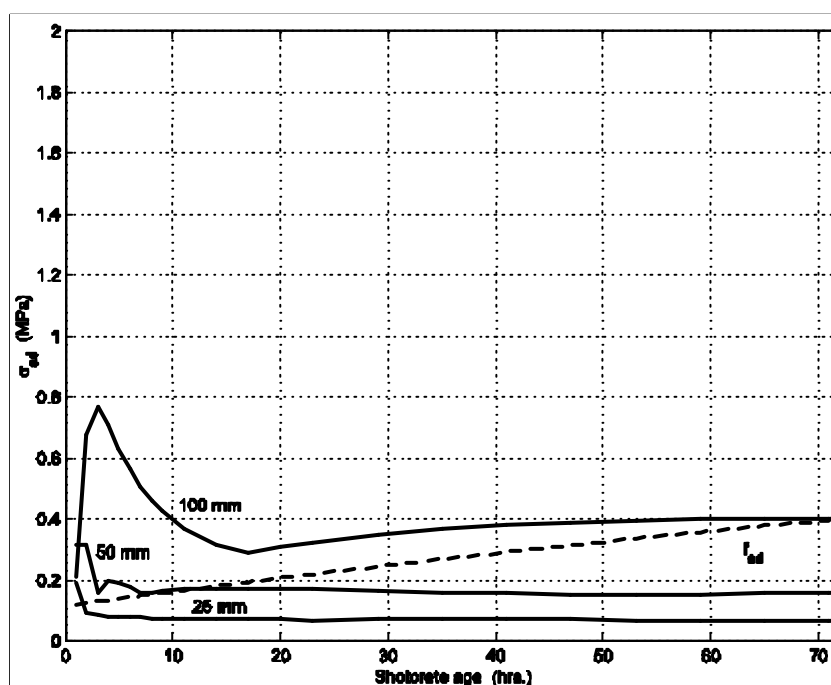


Figur 4.3: Högsta uppträdande vidhäftningsspänningar mellan berg och 25, 50 och 100 mm tjock sprutbetong för 28 dygn gammal sprutbetong från en detonerande laddning på 0,5 kg ANFO.

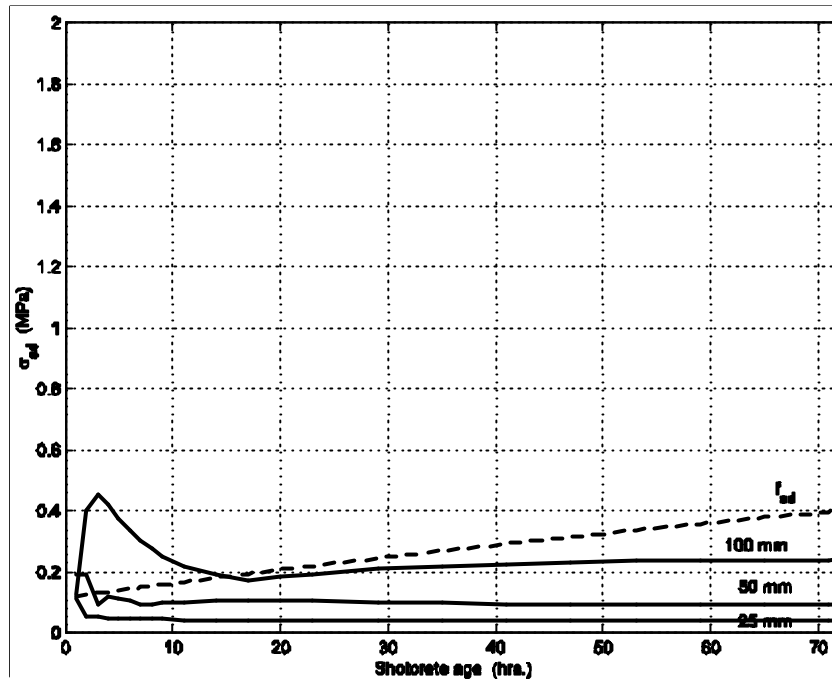
4.2 Åldersberoende – sprutbetong 4 m från laddning



Figur 4.4: Högsta uppträdande vidhäftningsspänningar mellan berg och 25, 50 och 100 mm tjock sprutbetong 4,0 m från en detonerande laddning på 2 kg ANFO.

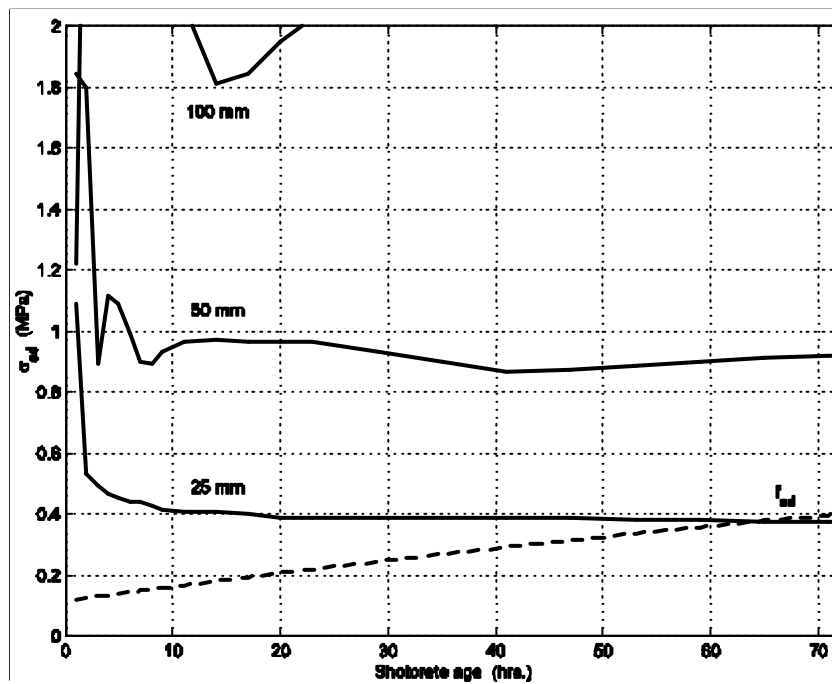


Figur 4.5: Högsta uppträdande vidhäftningsspänningar mellan berg och 25, 50 och 100 mm tjock sprutbetong 4,0 m från en detonerande laddning på 1 kg ANFO.

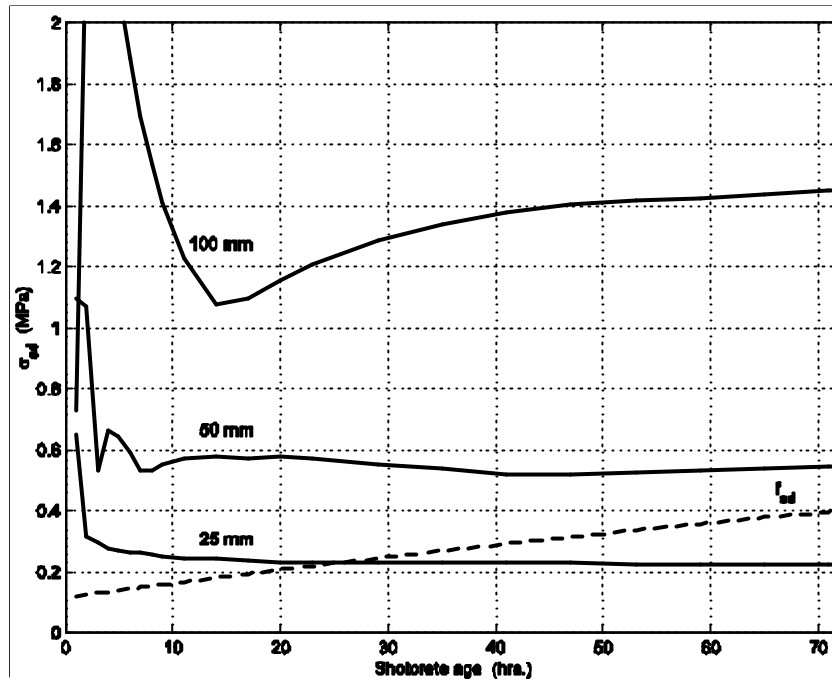


Figur 4.6: Högsta uppträdande vidhäftningsspänningar mellan berg och 25, 50 och 100 mm tjock sprutbetong 4,0 m från en detonerande laddning på 0,5 kg ANFO.

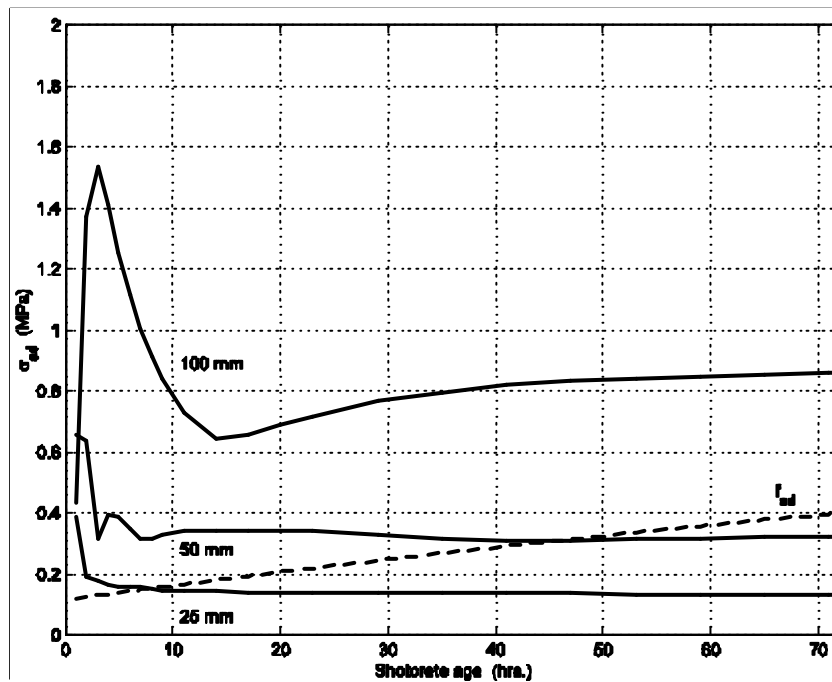
4.3 Åldersberoende – sprutbetong 2 m från laddning



Figur 4.7: Högsta uppträdande vidhäftningsspänningar mellan berg och 25, 50 och 100 mm tjock sprutbetong 2,0 m från en detonerande laddning på 2 kg ANFO.



Figur 4.8: Högsta uppträdande vidhäftningsspänningar mellan berg och 25, 50 och 100 mm tjock sprutbetong 2,0 m från en detonerande laddning på 1 kg ANFO.



Figur 4.9: Högsta uppträdande vidhäftningsspänningar mellan berg och 25, 50 och 100 mm tjock sprutbetong 2,0 m från en detonerande laddning på 0,5 kg ANFO.

5. SLUTSATSER

5.1 Resultatens praktiska tillämpningar

Beräkningsresultat, baserade på realistiska materialdata och accelerationer från sprängning, kan användas för att upprätta riktlinjer för praktiskt användande vid undermarksbyggande. Dessa resultat måste jämföras med skadeobservationer från t.ex. pågående tunnelbyggnad. När de i fält observerade skadorna överensstämmer med dem som ges av en finit elementmodellberäkning baserad på accelerationer uppmätta på samma plats, kan kommande ev. skador enkelt predikteras. Då de accelerationslaster som genereras av kommande sprängningar är okända måste dessa approximeras. Detta kan göras genom att använda skallagar för partikelvibrationers avståndsberoende vid sprängning i berg. För att nå målet med fastställda riktlinjer måste:

- Fler fältmätningar och observationer finnas tillgängliga
- Vidhäftningsutvecklingen hos ung sprutbetong undersöks experimentellt
- Omfattande jämförelser mellan beräkningar, mätningar och observationer görs.

I det följande ges rekommendationer baserade på de här redovisade beräkningsresultaten. Särskild vikt ska läggas på de förutsättningar, reservationer och begränsningar som anges. Slutligen ges rekommendationer för praktiskt bruk.

5.2 Föreslagna gränsvärden

Tabell 5.1: Minsta rekommenderade avstånd mellan 28 dygn gammal sprutbetong och en detonerande laddning Q (ANFO).

Sprutbetongens tjocklek:	Laddningsvikt:		
	Q=0.5 kg	Q=1 kg	Q=2 kg
25 mm	0,8 m	1,0 m	1,2 m
50 mm	1,2 m	1,5 m	1,9 m
100 mm	1,8 m	2,3 m	3,2 m

Tabell 5.2: Minsta rekommenderade ålder för sprutbetong 2 m och 4 m från en detonerande laddning Q (ANFO).

Sprutbetongens tjocklek (avstånd):	Laddningsvikt:		
	Q=0.5 kg	Q=1 kg	Q=2 kg
25 mm (4 m)	1 tim	2 tim	4 tim
(2 m)	8 tim	25 tim	65 tim
50 mm (4 m)	3 tim	11 tim	35 tim
(2 m)	45 tim	>72 tim	>72 tim
100 mm (4 m)	15 tim	72 tim	>72 tim
(2 m)	>72 tim	>28 dygn	>28 dygn

5.3 Reservationer och begränsningar

- Rekommendationerna är baserade på numeriska beräkningar – ej verifierade mot försöksdata.
- Beräkningsmodellen är dock kalibrerad genom jämförelser mellan försöksdata och beräknade resultat.
- Rekommendationerna gäller för oarmerad, våtsprutad standardbetong utan accelerators.
- I beräkningarna har medtagits en sprutbetongarea på $10 \times 3 \text{ m}^2$.
- Rekommendationerna gäller för svensk normalgranit med ett antaget sprickavstånd på 500 mm.
- Ett område på 500 mm kring tunnelns periferi antas uppsprucket på grund av utsprängning. Resterande berg antas vara homogent.
- Beräkningarna har skett för en punktladdning i berget, belägen längs symmetrilinjen vinkelrätt mot sprutbetongytans centrum.
- Rekommendationerna är ej direkt tillämpliga för tunnelväggar och tak vid sprängning i tunnelfront.
- Rekommendationer ges för diskreta värden. Interpolering däremellan bör ske med omdöme, extrapolering bör ej tillämpas.
- Inga säkerhetstillägg har gjorts, dvs. tabellerade värden avser en säkerhetsfaktor på 1,0.

5.4 Behov av fortsatt forskning

De lastfall som har undersökts bygger på att en punktladdning detoneras i berg beläget direkt bakom sprutbetong på en fri bergyta. I fortsättningen bör inverkan av bergrummets geometri undersökas. Vid sprängning i tunnelfront fortplantas spänningsvågor längs den utsprängda tunnelns väggar och tak. Det är i nuläget ej undersökt hur de olika typerna av spänningsvågor, P, S och R-vågor, fortplantas och reflekteras vid skarpa hörn. De nuvarande modellerna bygger på antagandet att sprutbetongen belastas

av en punktladdning. Det bör undersökas hur en långsträckt laddning förändrar belastningssituationen och även den effekt som detonerande laddningar i sekvens har. Fördröjningstiden dem emellan kan vara en viktig parameter som ska jämföras med sprutbetong-bergmodellens svängningstider.

Det är av intresse att även undersöka funktionen hos bergförankrad, armerad sprutbetong, till skillnad från oförankrad, oarmerad betong som hittills har studerats. Bergbultar fungerar som kraftiga elastiska fjädrar till vilka armeringen överför krafter. Det kan vara aktuellt att studera både nätarmerad och stålfiberarmerad betong.

Sprutbetongens sammansättning och miljö påverkar dess egenskaper. Olika hållfasthetsparametrar, t.ex. vidhäftning, elasticitetsmodul och draghållfasthet kan eventuellt utvecklas olika då härdningstemperatur och luftfuktighet förändras eller då t.ex. en accelerator tillsätts. Det kan även förekomma skillnader mellan våt- och torrsprutad betong. Effekten av varierande bergegenskaper, t.ex. sprickighet, bör undersökas vidare. Uppsprucket berg fungerar som ett dämpande filter som reducerar amplituder och frekvensinnehåll hos inkommande spänningsvågor.

Det måste slutligen påpekas att numeriskt beräknade resultat måste verifieras mot mätdata och observationer från fältet för att slutgiltiga riktlinjer ska kunna fastställas. Det finns också ett stort behov att experimentellt undersöka materialparametrar som t.ex. vidhäftningstillväxten mellan berg och hårdnande sprutbetong.

REFERENSER

1. A. Ansell, *Dynamically Loaded Rock Reinforcement*, Doctoral thesis, Bulletin 52, Dept. of Structural Engineering, Royal Institute of Technology, Stockholm, 1999.
2. L. Reidarman, U. Nyberg, *Vibrationer bakom front vid tunneldrivning i Södra länken – Betydelse för nysprutad betong?*, SveBeFo Rapport 51, SveBeFo, Stockholm, 2000.
3. A. Ansell, *En förstudie i modellering av vibrationsutsatt sprutbetong på berg med finita elementmetoden*, Teknisk rapport 2000:17, Institutionen för Byggkonstruktion, KTH, Stockholm, 2000.
4. A. Ansell, *Material properties for dynamic analysis of shotcrete on rock*, Technical report 2002:7, Dept. of Civil and Architectural Engineering, Royal Institute of Technology, Stockholm, 2002.
5. A. Ansell, *Finite element models for dynamic analysis of shotcrete on rock*, Technical report 2002:8, Dept. of Civil and Architectural Engineering, Royal Institute of Technology, Stockholm, 2002.
6. A. Ansell, 'Modelling of shotcrete on rock subjected to blast induced vibrations', *Proceedings Nordic Concrete Research Meeting*, Helsingør, Denmark (2002).