© 2001 Svenska Bergteknikföreningen och författare

SPRUTBETONGS TÅLIGHET MOT VIBRATIONER - UPPMÄTTA VIBRATIONSNIVÅER BAKOM DRIVNINGSFRONT I SÖDRA LÄNKEN, STOCKHOLM

Ulf Nyberg, SveBeFo, Stockholm
Lena Reidarman, Vägverket Region Stockholm

Sammanfattning

Sprutbetong har länge använts rutinmässigt för förstärkning av tunnlar. Den har använts under drivning såväl som för slutlig bergförstärkning. Tunnelsprängning ger upphov till vibrationer som utbreder sig genom bergmassan och utmed tunnelytorna. Dessa vibrationer kan tänkas orsaka skador på sprutbetongen. Mekanismerna bakom eventuella skador på sprutbetong är dock för närvarande inte helt kända; speciellt intressant är påverkan på nysprutad betong.

I vissa bygghandlingar anges att sprutbetong måste uppnått en hållfasthet av 6 MPa före dynamisk belastning, den maximala tillåtna svängningshastigheten är 150 mm/s inom 24 timmar från sprutning och att betongsprutning inte är tillåten närmare än 50 meter från en drivningsfront.

Erfarenheter har emellertid visat att sprutbetong klarar vibrationspåverkan mycket bra nära sprängsalvor. Detta tyder på att föreskrivna maximala svängningshastigheter kan vara olämpligt valda.

Målet med detta arbete var att mäta upp bergvibrationer som kan skada sprutbetongen. SveBeFo genomförde detta under mars månad 2000 i en tunnelvägg i Södra Länken, Stockholm. Vibrationssignalerna mättes i 7 mätpunkter för kartläggning av vibrationsnivåerna utmed en mätprofil på avstånden 5-50 meter bakom drivningsfronten. I varje mätpunkt satt två accelerometrar som var riktade längs respektive horisontellt tvärs tunnelaxeln. Mätresultaten lagrades på band av DAT-typ.

Fyra salvor analyserades. Dessa hade en tvärsnittsarea på ca 120 m^2 med ca 200 spränghål laddade med så kallad Site Sensitised Emulsion, SSE-sprängämne. Spränghålen var 5,2 meter långa, fyllda 3,7 meter med sprängämne och hade en diameter av 48 mm respektive 54 mm.

Resultaten visar att uppmätta värden inte överskred 80 mm/s bakom fronten för någon mätkomponent. Första svängningsmaximum har använts för att resultaten ska vara jämförbara med andra liknande mätningar. I analysen togs inte hänsyn till senare annorlunda vågformer, upprepning av belastning eller frekvensberoende. Vi har inte heller inspekterat någon sprutbetong för eventuella skador.

I rapporten slår vi fast att vibrationsnivåerna nära fronten ligger under det föreskrivna värdet på 150 mm/s. För att få en uppfattning om eventuella samband mellan skador på sprutbetongen och vibrationsnivåer bör en kartläggning av vidhäftning mot berg, hållfastheten och skador utföras före och efter salva.

© 2001 Svenska Bergteknikföreningen och författare

Inledning

Sprutbetong används rutinmässigt i Sverige för förstärkning av tunnlar, oftast i kombination med bergbultning. Sprutbetongen används både som driftförstärkning och som slutlig förstärkning. Ibland accepteras driftförstärkningen som en ingående del av den slutliga, ibland inte. Beroende på hur man ser förstärkningens uppgift i olika skeden har man formulerat kraven på utförande och hållfasthet på olika sätt. En viktig fråga i sammanhanget är huruvida sprutbetongen under härdningsförloppet kan skadas av vibrationer (och stensprut) från närliggande sprängning. Något skadekriterium för svängningshastigheten som kan kopplas till sprutbetong mot bergytan har inte hittats i litteraturen. Erfarenheter av vibrationspåverkan på gjuten betong har dock undersökts med hänsyn till trafikvibrationer [6]. Inom SveBeFos ramprogram 1997-99 har undersökningar gjorts i form av fältförsök i LKABs gruva i Kiruna för att klarlägga effekten från sprängningshål på olika avstånd bakom sprutbetong av olika ålder [1] och [2].

Erfarenheter tyder på att sprutbetongen klarar påverkan av sprängning även nära drivningsfronten. Detta behöver dock undersökas mera systematiskt för att man ska kunna avgöra vilken påverkan som sker på tryckhållfasthet och vidhäftning. För att renodla frågeställningen genomfördes mätningar av faktiska vibrationsnivåer som kan tänkas påverka sprutbetongen [5]. Vid tunnelarbetena för Södra Länken finns i den tekniska beskrivningen ett avsnitt där man idag har restriktioner för vad sprutbetongen får utsättas för, vilket omsatts i ett minsta tillåtet avstånd från sprängning till sprutade ytor.

Ett första steg avsåg alltså att kartlägga vibrationsnivåerna genom att mäta accelerationen i berget nära tunnelväggen. Detta skulle visa de nivåer som sprutbetongen typiskt kan utsättas för.

Mål och omfattning

Målet för projektet var att mäta vibrationsnivåerna som uppkommer vid en tunnelsprängning. Vibrationerna skulle mätas upp nära front (5-50m) i det ytnära berget i tunnelns vägg. Resultaten redovisas som vibrationsnivån beroende på avståndet.

Projektet hade endast uppgiften att kartlägga vibrationsnivåerna bakom drivningsfronten. Att sedan tala om hur dessa nivåer kan komma att påverka nyutförd sprutbetongs hållfasthet och vidhäftning ingick inte i projektet.

Gränsvärden för vibrationsutsatt sprutbetong

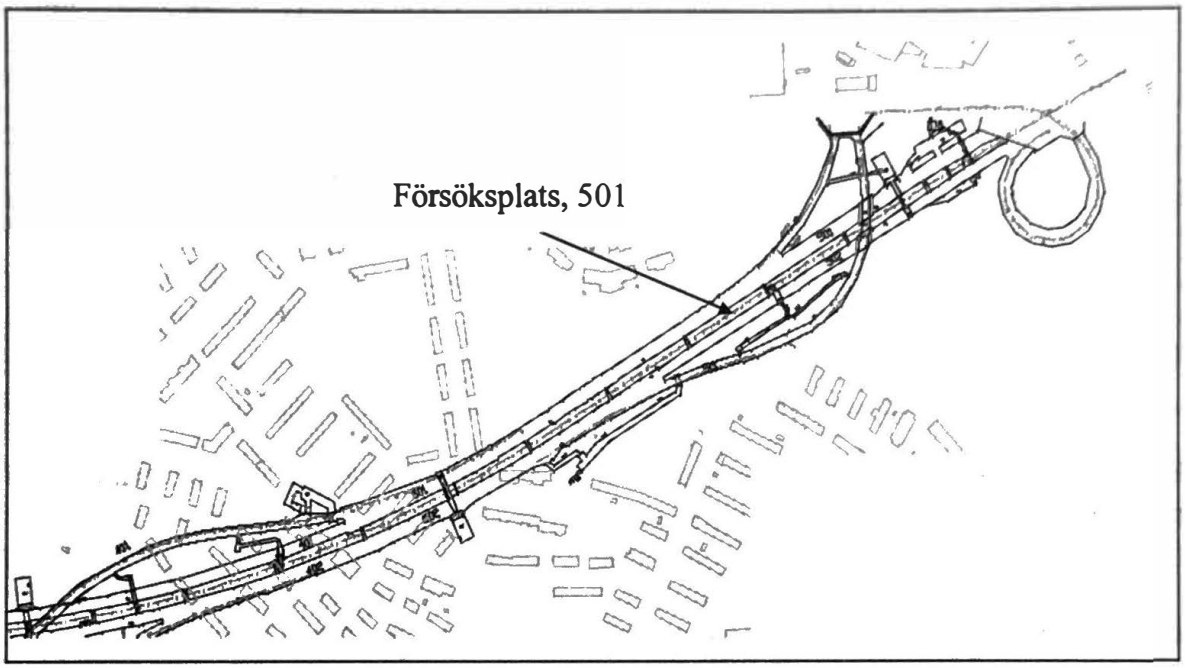
För vibrationsutsatt sprutbetongen gäller för närvarande i Södra Länken ett enkelt gränsvärde på 150 mm/s vid tryckhållfastheten 6 MPa. Detta stämmer rätt bra med publicerade värden för gjuten betong som anses mest känslig vid 10-20 timmars ålder [1] och [2]. För övrigt konstateras i rapporterna [1] och [2] dels att ung betong kan klara impulslaster upp till 250 mm/s, dels att det saknas publicerade undersökningar som

© 2001 Svenska Bergteknikföreningen och författare

gäller vibrationsförsök med ung sprutbetong. Däremot hittades uppgifter som rör vibrationsutsatt fullhärdad sprutbetong.

Försöksplats

Den utvalda tunnelsträckan uppfyllde vissa ställda krav; Den skulle vara relativt rak och inte ha några tvärtunnlar eller dylikt i närheten. Allt för att kunna renodla försöken så långt som möjligt. En översikt över försöksplats 501, en del av Södra Länken visas nedan (Figur 1).



Figur 1. Översikt av Södra Länken, SL03, 501 och 502 vid Hammarby.

Mätningar genomfördes i ett område med huvudsakligen sedimentgnejs och gnejsgranit med en genomsnittlig densitet ρ = 2500 kg/m^3 och approximativ vågutbredningshastighet v = 5300 m/s.

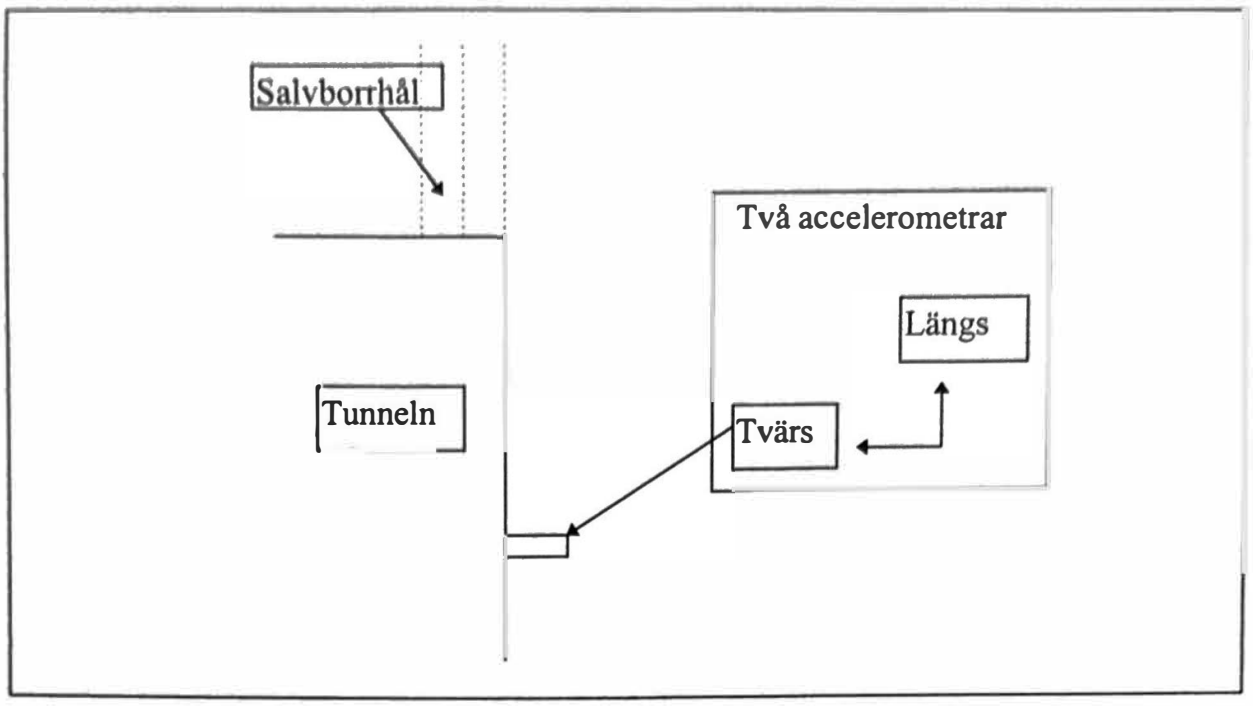
Mätningsförfarande

Vibrationerna som uppkommer vid tunnelsprängningen mättes med hjälp av accelerometrar i tunnelväggen. Mätningarna genomfördes i två riktningar den ena riktningen tvärs och den andra längs med tunnelaxeln (Figur 2). Dessa två vibrationsriktningar antogs vara mest intressanta.

Accelerometrarna placerades ut i ca 0,3 m djupa borrhål. Det vore kanske mer lämpligt att placera mätpunkterna på bergytan, eftersom det är påverkan av vibrationer på själva betongen som skall studeras.

© 2001 Svenska Bergteknikföreningen och författare

Av erfarenhet så vet man dock att registreringar vid ytmontering kan vara svårtolkade. Borrhålsdjupet valdes därför med tanke på att mätningarna skulle vara så ytnära som möjligt och med en liten risk att mätningarna utfördes i lösa block.



Figur 2. Accelerometrarnas riktningar och placering i botten av mäthål sedda i ett horisontalplan.

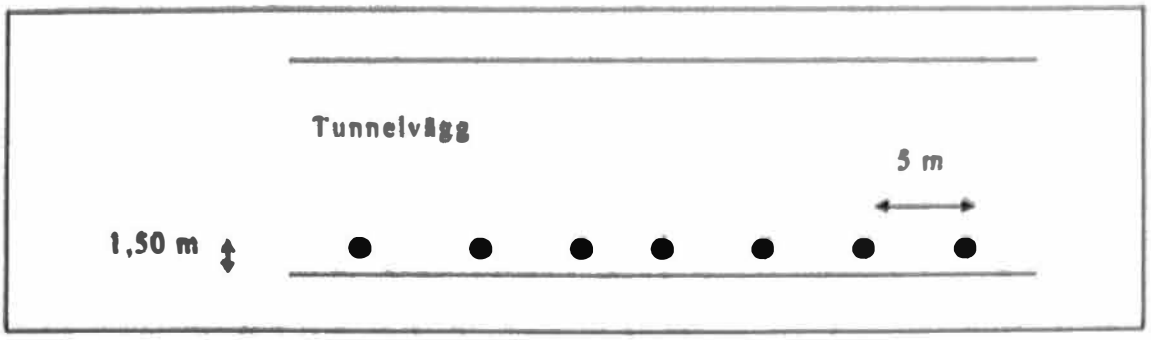
Tekniska data för mätsystemet med mätpunkter i botten av ϕ102 mm:s mäthål (Figur 2).

Mätning av acceleration

- I mätpunkterna: Kistler Typ 8704 B5000 fastskruvad vid aluminiumankare
- Koppling till berg: Aluminiumankare fastgjutet i botten av mäthål
- Mätområde: ±5000 g
- Känslighet: ca 1 mV/g
- Transversell känslighet: 0,5 %
- Resonansfrekvens: 54,0 kHz
- Bandspelare: DAT-typ med en signalbandbredd på DC - 20 kHz.
- Koaxialkablar: Typ RG58 50 ohm

För att uppskatta vibrationernas avståndsberoende så placerades 14 stycken accelerometrar i sju mätborrhål i linje utmed tunnelväggen med ett avstånd sinsemellan av ca 5 m. Borrhålen placerades på en lämplig arbetshöjd från sulan det vill säga ca 1,50 m (Figur 3).

© 2001 Svenska Bergteknikföreningen och författare



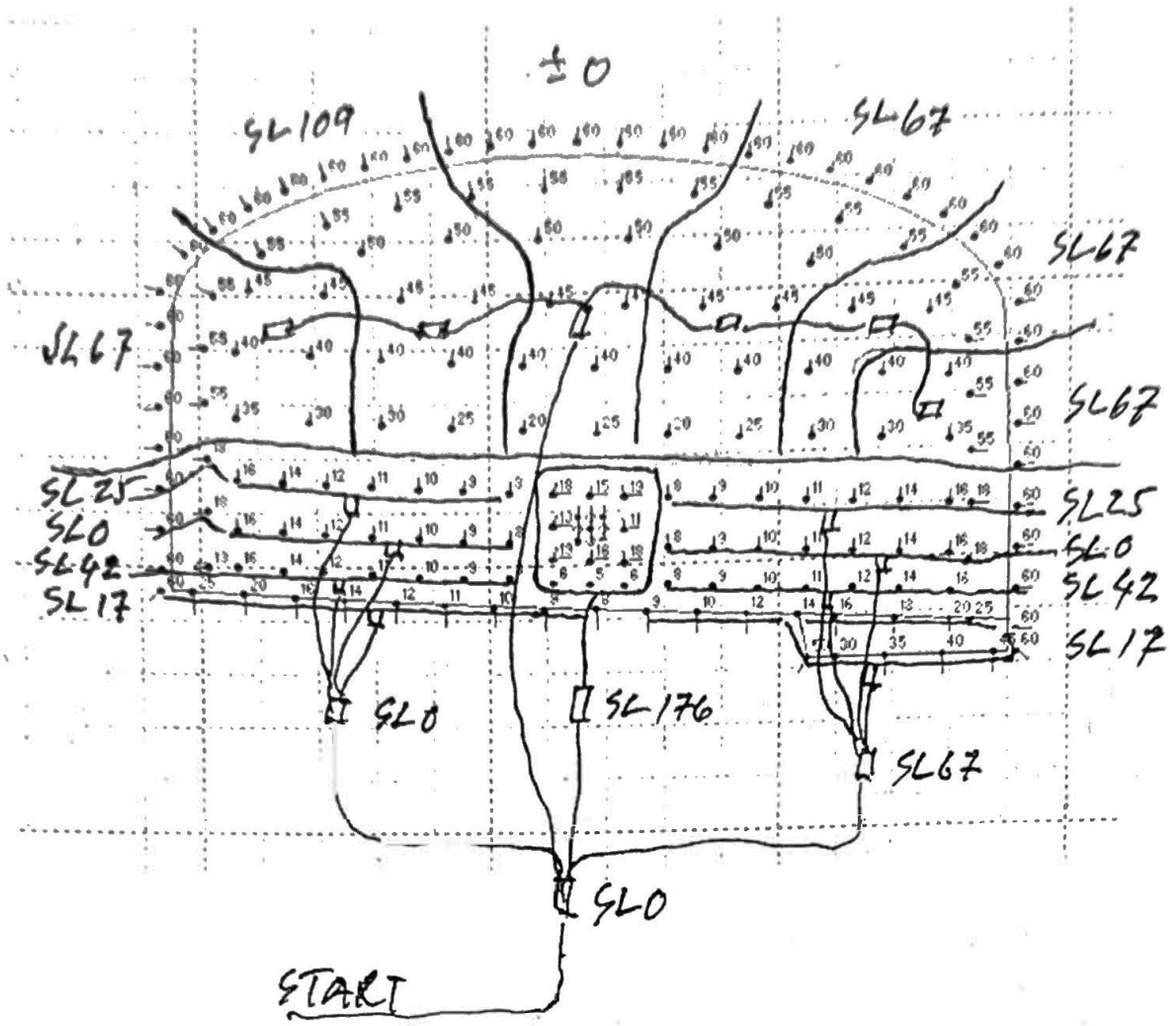
Figur 3. Mätborrhålens placering utmed en linje i tunnelväggen.

Laddning av sprängsalvor

Sprängsalvorna laddades med ett sprängämne av typen "SSE- slurry" (Site Sensitive Emulsion). SSE systemet baseras på fabrikstillverkad matris, vilken ej är explosiv. I samband med laddningen och pumpningen av matrisen, känsliggjordes denna genom kemisk kallgasning till att bli sprängämne. Samverkande laddningsmängd var ca 8,6 kg som också var den maximala sprängämnesvikten per borrhål. Sprängämnets detonationshastighet var ca 4500 m/s med densiteten 993 kg/m^3.

Borrhålsdiametern för strosshålen var ϕ54 mm och för kontur- hjälpare och bottenborrhålen ϕ48 mm. Borrhålen var ca 5,2 m långa och avladdades ca 1,5 m. Nedan (Figur 4) visas den ena av borr- och initieringsplanerna som användes vid försöken och som innehöll ca 200 borrhål. Tunnelarean var ca 120 m^2 och bredden ca 15m.

© 2001 Svenska Bergteknikföreningen och författare



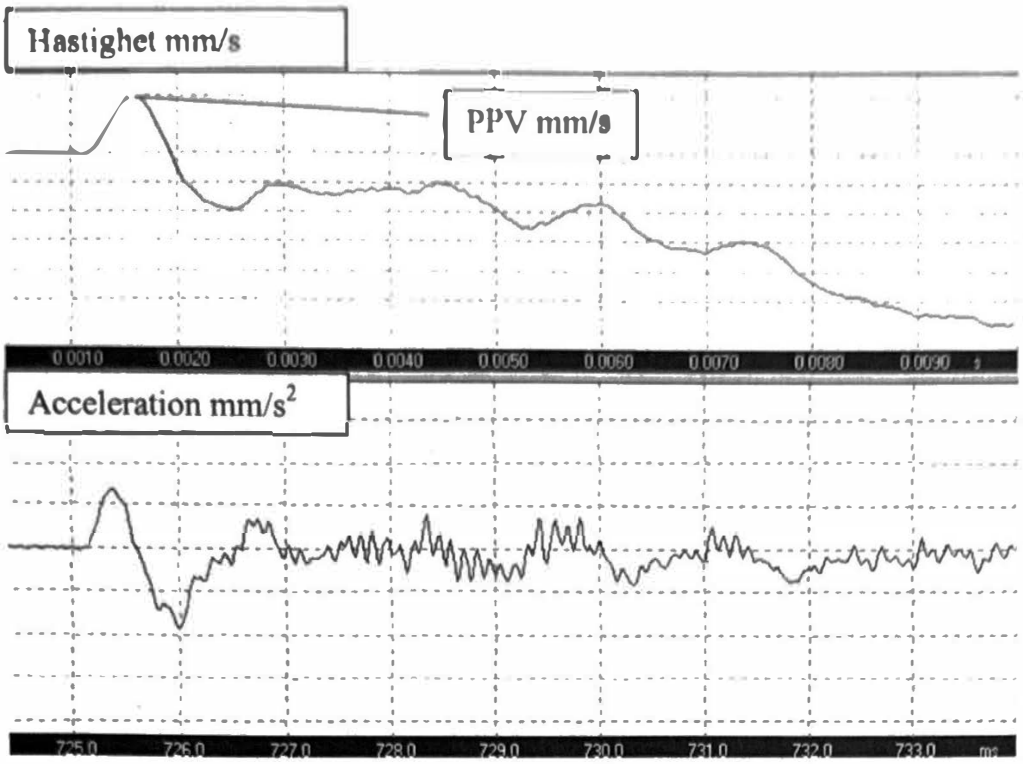
Figur 4. Blockupptändning av en salva i Södra Länken.

Analys av mätdata

Mätningarna genomfördes under mars månad år 2000. Från dessa mätningar har vi kunnat använda totalt 98 stycken värden för svängningsriktningen längs tunneln. Tvärs tunneln har 69 stycken värden använts.

Analysen av mätningarna består i att sortera ut ostörda accelerationssignaler från enskilda laddningar, integrera dessa och läsa av toppvärdet PPV, (Peak Particle Velocity) av svängningshastigheten. Figur 5 nedre bilden visar en uppmätt accelerationssignal från en detonerande laddning. Den övre bilden visar den framintegrerade svängningshastigheten. Första toppvärdet är avläst som PPV.

© 2001 Svenska Bergteknikföreningen och författare



Figur 5. Svängningsförloppet för en mätkomponent från första hålet i salva två. Avståndet till fronten var ca 15 m. Acceleration (nedre Figuren) och hastighet (övre Figuren). För det aktuella fallet var accelerationens toppvärde PPA ca 70 mm/s², toppvärdet för hastigheten PPV var ca 20 mm/s. OBS att tidskalan inte anger förfluten tid från initiering av salvan. (Att den övre signalen inte återgår till noll inom det aktuella tidsavsnittet orsakas av en svag relativt långvågig nätstörning på 50 Hz).

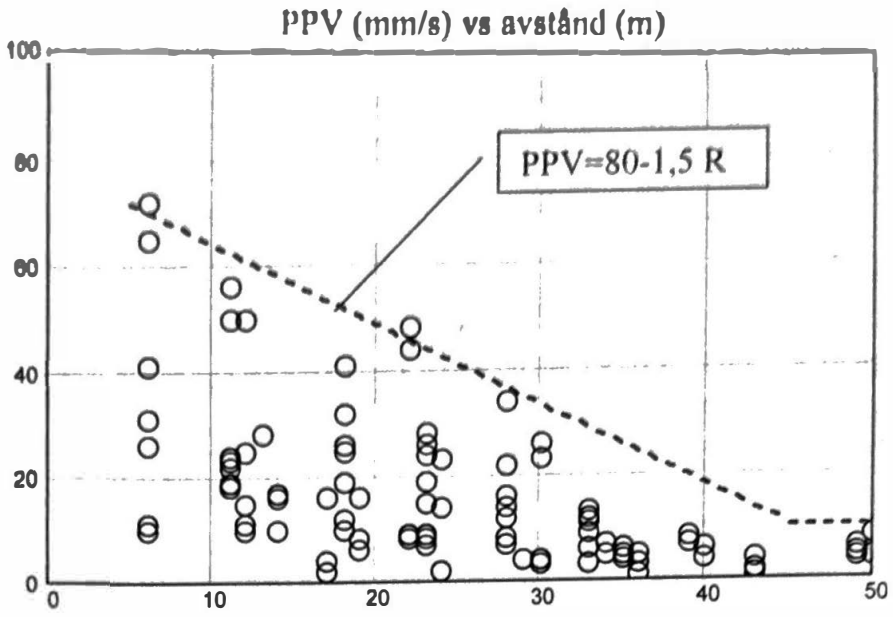
I nästa avsnitt visas en sammanställning av de utvärderade svängningsriktningarna längs respektive tvärs tunneln. Varje ring representerar ett PPV-värde för den integrerade signalen (Figur 5, övre).

Praktiska vibrationsnivåer vid tunneldrivning

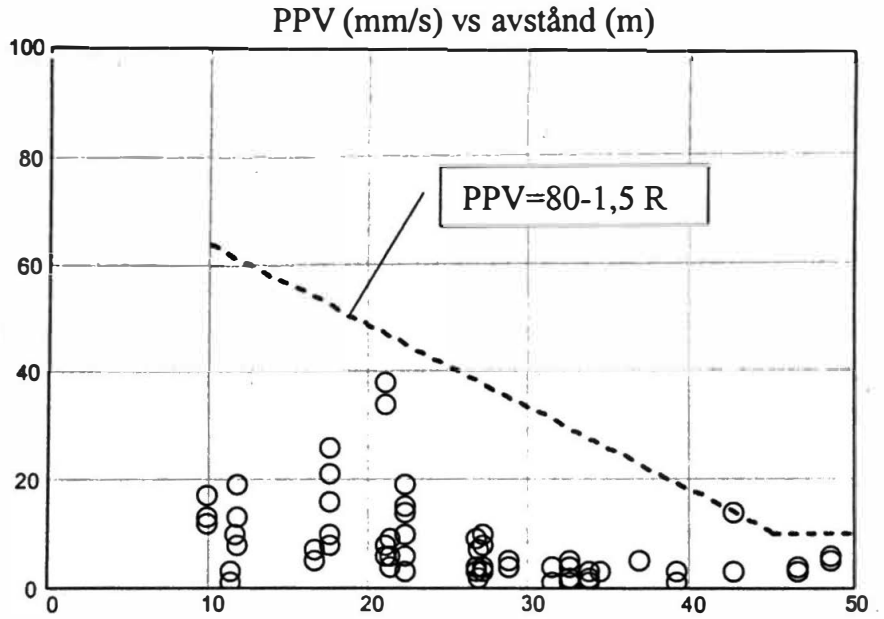
Vid tunnelsprängning som i Södra Länken kan den maximala nivån beroende på avståndet R som inga värden överskrider vara mest intressant. Denna nivå har beskrivits med linjen (PPV = 80–1,5R) (Figur 7 och 8) som visar att värdena inte överskrider 80 mm/s för någon komponent.

En genomgående tendens är att värdena längs med tunneln är högre än värdena tvärs. Men för enkelhetens skull anges samma linje (PPV=80-1,5R) för de två svängningsriktningarna. De maximala nivåerna visas alltså i figurerna nedan.

© 2001 Svenska Bergteknikföreningen och författare



Figur 6. Linjen visar de maximala värdena som inte har överskridits för avstånden R=5-50 m från fronten för svängningsriktningen längs med tunneln.



Figur 7. Linjen visar de maximal värdena som inte har överskridits för avstånden R =10-50 m från fronten för svängningsriktningen tvärs med tunneln.

Mätningar från Japan [3] har dock visat på svängningshastigheter (vektor PPV) högre än de uppmätta i Södra Länken. En bedömning av PPV i Södra Länken utifrån en skalningslag för Nunobiki formationen skulle för 8 kg sprängämne 10 m bakom salvan kunna ge nivåer upp till en faktor 4 större än de uppmätta nivåerna i Södra Länken.

© 2001 Svenska Bergteknikföreningen och författare

Utvärdering och resultat

I detta projekt har vi mätt upp accelerationen på ca 0,3 m djup in från tunnelväggen, 5 – 50 m från fronten vid pågående tunneldrivning. Signalerna har integrerats till hastighet och toppvärdet PPV har lästs av för den första signalen från enskilda laddningar. Mätdjupet valdes som en kompromiss mellan att mäta på bergytan med risk för störda signaler och på stort djup som normalt ger bra signaler. Det senare skulle ge missvisande resultat när avstånden från mätpunkt till sprutbetong skulle vara stora.

Accelerationsvärdena plockades huvudsakligen från spränghål som detonerat under salvornas tidigare skeden (ca 0-1 s). Någon exakt identifiering av de spränghål som genererat de använda värdena var inte möjlig. Utsorteringen av användbara accelerationssignaler har baserats huvudsakligen på visuell tolkning och integrerbarhet.

Den kanske mest praktiska nivån på avstånden R har bedömts utifrån maximala PPV beroende av R. Denna visas med linjen PPV=80-1,5R (Figurerna 6 och 7).

En faktor vid bedömningen av risken för skador på sprutbetongen är den låga noggrannheten i avståndsdata. Avstånden mellan mätpunkterna och de använda spränghålen i salvan varierade ganska mycket, sannolikt upp till ¼ av salvornas bredd. Detta beror på att en exakt identifiering av spränghål – PPV-värden inte var möjlig och att därför ett linjärt avstånd från en punkt på salvans front vid väggen till mätpunkterna användes. Avstånden är alltså utmed en mätprofil (Figur 3) längs mätväggen för alla mätningar från de fyra salvorna. Någon korrigering för avståndsvariationerna från vägg till aktuella spränghål har inte gjorts.

När det gäller omfattningen av analysen så har det första maximala värdet (svängningshastigheten PPV) från enskilda laddningar använts. Höga värden som eventuellt fanns efter första maximum (tidsberoende svängningar som i Figur 5) har inte använts. Inte heller effekten av samtidig initiering inom vissa intervall har analyserats. Sammanlagt 69 stycken värden tvärs tunneln och 98 stycken värden längs tunneln har använts på avstånden 5-50 meter.

Den slutliga uppskattningen visar dels att värdena i Södra Länken är lägre än 80 mm/s i någon komponentriktning. Dels att värdena är lägre på korta avstånd än värden från mätningar utförda i LKABs Kirunagruva [4] och från Japan [3].

Slutsats

Det uppsatta gränsvärdet på 150 mm/s för svängningshastigheten vid belastning av sprutbetong har inte överskridits för någon mätkomponent ens på 5 meters avstånd från salvans front. Med tanke på begränsningarna diskuterade i förra avsnittet är det dels viktigt att notera att spränghål som detonerat nära slutlig kontur (salvans avslutningsfas och ej analyserade) befinner sig närmare väggen. Dessa skulle alltså generera något högre PPV-värden i mätpunkterna än de här framtagna förutsatt att sprängämnen och håldiametrarna är jämförbara. Dels skulle samtidig initiering att kunna ge högre värden än de här redovisade förutsatt att vibrationerna samverkar.

© 2001 Svenska Bergteknikföreningen och författare

Vi har inte dragit några slutsatser om någon av komponenterna eller signalernas frekvensinnehåll och varaktighet har någon speciell betydelse.

Vi har inte heller dragit några slutsatser om huruvida väggarna faktiskt fått skador från de aktuella vibrationsbelastningarna. Kartering ingick inte i projektet.

Fortsatt arbete

Detta projekt har avsett att kartlägga typiska vibrationsnivåer på olika avstånd från en avancerande tunnelfront. Vi har inte alls behandlat frågor om gränsvärdet och skador på sprutbetongen. För att få kunskaper om effekten på sprutbetong måste man klargöra vilken typ av skador som uppkommer under olika förhållanden i en tunnel. Viktiga faktorer blir då a) om effekten av olika vågtyper, signalfrekvens, svängningsriktning och varaktighet kan ha betydelse för skador på betongen och b) betydelsen av sprutbetongens ålder och vidhäftningsförmåga [1].

Referenser

1. Ansell A, 1999: Dynamically loaded rock reinforcement, Doctoral Thesis, *Bulletin 52, Dept. of Structural Engineering*, Royal Institute of Technology in Stockholm.

2. Ansell A, 2000: Dynamiskt belastad ung sprutbetong, *SveBeFo Rapport 47 sid. 6*, Stockholm.

3. Hagimori K, M Terada, F Ouchterlony, K Furukawa och K Nakagawa, 1993: Using slot drilling to reduce vibrations and damage from tunnel blasting in urban areas, *Proc. of the Fourth Int. Sym. on Rock Fragmentation by Blasting, Fragblast-4*, Rotterdam, Balkema.

4. Nyberg U, S Fjellborg, M Olsson och F Ouchterlony, 2000: Bedömning av sprängskador i ortkontur, *SveBeFo Rapport 50,* Stockholm.

5. Reidarman L & U Nyberg 2000: Vibrationer bakom front vid tunneldrivning i Södra Länken, *SveBeFo Rapport 51*, Stockholm.

6. Silfwerbrand J, 1992: The influence of traffic-induced vibrations on the bond between old and new concrete, *Bulletin no 158, Dept. of Structural Mechanics and Engineering, Royal Institute of Technology*, Stockholm.