

## **VIBRATIONER BAKOM FRONT VID TUNNELDRIVNING I SÖDRA LÄNKEN - Betydelse för nysprutad betong?**

Lena Reidarman  
Ulf Nyberg

STIFTELSEN SVENSK BERGTEKNISK FORSKNING  
SWEDISH ROCK ENGINEERING RESEARCH

**VIBRATIONER BAKOM FRONT VID  
TUNNELDRIVNING I SÖDRA LÄNKEN  
- Betydelse för nysprutad betong?**

**BLAST VIBRATIONS IN THE SOUTHERN LINK  
TUNNEL  
- Importance for fresh shotcrete?**

Lena Reidarman  
Ulf Nyberg

SveBeFo Rapport 51

Stockholm 2000  
ISSN 1104-1773  
ISRN SVEBEFO-R--51--SE

## Förord

Sprutbetong används rutinmässigt i Sverige för förstärkning av tunnlar, oftast i kombination med bergbultning. Den 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 olika krav på utförande och hållfasthet. En fråga har varit om sprutbetongen under härdningstiden kan skadas av vibrationer från närliggande sprängning, vilket lett till att man föreskrivit efter vilken tid och på vilket avstånd från nysprutad betong sprängning kan accepteras. I SveBeFos tidigare program har därför genomförts ett mindre fältförsök i Kiruna för att undersöka effekten från sprängning i hål på olika avstånd bakom sprutbetong av olika ålder, vilket redovisats som del av en doktorsavhandling och i SveBeFo-rapport 41 (Ansell).

Erfarenheterna från ovanstående undersökning och från tunneldrivning, exempelvis för Arlandabanan, tyder på att sprutbetongen klarar påverkan av sprängning även på nära håll. För att renodla frågeställningen beslöts att man skulle undersöka faktiska vibrationsnivåer på olika avstånd från en avancerande tunnelfront för att få en bild av aktuella värden som skulle kunna tänkas påverka sprutbetongen. Därefter skulle övervägas om försök bör göras i laboratorium för att undersöka om skador kan uppstå av sådana vibrationer.

Vid tunnelarbetena för Södra Länken fanns avsnitt med restriktioner för betongsprutning nära tunnelfronten, varför både beställaren, Vägverket, och entreprenören, Selmer Anläggning, var intresserade av att mäta upp vibrationsvärden. Samfinansierat med dessa har SveBeFo genomfört de här rapporterade mätningarna. Uppmätta vibrationsnivåer visade sig vara betydligt lägre inom avståndet 5 - 50 m från fronten än det värde om 150 mm/s som använts som gränsvärde. Någon djupare analys av resultaten har inte gjorts, men de aktuella nivåerna är sådana att det rimligen finns anledning att se över de restriktioner som hittills gällt. Det har ännu inte närmare diskuterats om de uppmätta värdena ger anledning till ytterligare provning av eventuell skadeverkan av vibrationer på dessa nivåer.

Stockholm i november 2000

Tomas Franzén

## 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 tunnelväggen. 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 tunnelfront.

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 vibrationer utmed en tunnelvägg. SveBeFo genomförde detta i en tunnel i Södra Länken, Stockholm. Vibrationssignaler mättes i 7 mätpunkter för kartläggning av vibrationsnivåer utmed en mätprofil på avstånden 5-50 meter bakom fronten. I varje mätpunkt satt två accelerometrar som var riktade längs respektive horisontellt tvärs tunnelaxeln. Mätresultaten lagrades på band av DAT-typ.

Vibrationsnivåerna (Peak Particle Velocity, PPV) uppskattades först med hjälp av två olika metoder. De uppskattade nivåerna jämfördes sedan med de aktuella värdena i tunnelväggen.

Fyra salvor analyserades. Salvorna hade ett tvärsnitt på ca 120 m<sup>2</sup> med 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 konsistenta 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 och skador utföras före och efter salva.

## Summary

Shotcrete has been used routinely in Sweden as rock support in tunnels to help rock to maintain its integrity. It has been used during excavation as well as final rock support. The tunnel blasting results in vibrations that propagate through the rock and along the tunnel wall. The vibrations may damage the shotcrete. The mechanisms are not well understood and of particular interest are the effects of vibrations on the fresh shotcrete.

Technical specifications state that shotcrete should have reached a strength of 6 MPa before loading, the maximum allowable vibration level is 150 mm/s within 24 hours after spraying and that spraying of shotcrete is not allowed closer than 50 m from the front.

Experience from practice shows that the shotcrete resists vibrations very close to the tunnel front. This indicates that prescribed critical vibration levels may be inappropriate.

The objectives in this project were to characterise the vibrations along tunnel walls. SveBeFo carried out the test in a tunnel in Södra Länken, Stockholm. Vibration data were collected at seven stations for mapping the levels along a profile from approximately 5 - 50 meters behind the tunnel front. Two component acceleration data were collected close to the tunnel wall and stored on DAT-tape.

The blast vibration levels (Peak Particle Velocity, PPV) were first predicted by two different methods. The predictions were then compared with the actual first arrived PPV along the wall.

Vibrations from four tunnel rounds were monitored. The rounds were 120 m<sup>2</sup> with 200 holes and charged with Site Sensitised Emulsion SSE explosives. The holes were 5.2 m long with 3.7m long explosive columns. Blast hole diameters were  $\phi$ 54 mm and  $\phi$ 48 mm.

The result shows that the PPV-values from single blast holes did not exceed 80 mm/s in any test point for any component. In this case the first arrivals were used to be consistent with other similar investigations. The analysis did not include estimation of the effects of later waveforms, repetitive waves and frequency. No inspection of actual damage was done.

From the report we conclude that the vibration levels are below the prescribed value of 150 mm/s 5-meter to the front. To get a good evaluation of possible damage with vibrations the adhesive strength between rock and shotcrete as well as damage must be mapped before and after blast.

## Innehållsförteckning

<b>1</b>	<b>INLEDNING</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>MÅL</b> .....	<b>1</b>
<b>3</b>	<b>ANVÄNDBARHET</b> .....	<b>1</b>
<b>4</b>	<b>OMFATTNING</b> .....	<b>2</b>
<b>5</b>	<b>ORGANISATION</b> .....	<b>2</b>
<b>6</b>	<b>FÖRUTSÄTTNINGAR</b> .....	<b>2</b>
6.1	PROJEKTINDELNING.....	2
6.2	BERÄKNING AV FÖRVÄNTADE VIBRATIONSnivåer .....	2
6.3	FÖRSÖK MED ENSKOTTSLADDNINGAR .....	5
<b>7</b>	<b>FÖRSÖKSPLATS</b> .....	<b>5</b>
<b>8</b>	<b>MÄTNINGSFÖRFARANDE</b> .....	<b>6</b>
8.1	PLACERING AV ACCELEROMETER PÅ TUNNELVÄGG.....	6
8.2	ÅNTAL ACCELEROMETER PÅ VARJE MÄTPLATS .....	6
8.3	ACCELEROMETRARNAS PLACERINGSdjUP PÅ TUNNELVÄGG .....	6
8.4	MÄTBORRHÅLENS PLACERING PÅ TUNNELVÄGG.....	7
8.5	MONTERING AV ACCELEROMETRAR I MÄTBORRHÅLSBOTTEN .....	7
<b>9</b>	<b>KABELANORDNING</b> .....	<b>8</b>
<b>10</b>	<b>UTRUSTNING</b> .....	<b>8</b>
<b>11</b>	<b>DATAÖVERFÖRING</b> .....	<b>9</b>
<b>12</b>	<b>MÄTNINGSSERIE</b> .....	<b>9</b>
<b>13</b>	<b>SPRÄNGÄMNE OCH LADDNING</b> .....	<b>10</b>
<b>14</b>	<b>BORR - OCH LADDPLAN</b> .....	<b>10</b>
<b>15</b>	<b>UTFÖRANDE</b> .....	<b>11</b>
<b>16</b>	<b>UTVÄRDERING</b> .....	<b>12</b>
16.1	REGISTRERADE TIDER FRÅN SALVORNA.....	13
16.2	MÄTNING 2.....	13
16.3	MÄTNING 3.....	15
16.4	MÄTNING 5.....	16
16.5	MÄTNING 6.....	17
<b>17</b>	<b>SAMTLIGA VIBRATIONSmÄTNINGAR</b> .....	<b>19</b>
<b>18</b>	<b>PRAKTISKA VIBRATIONSnivåER VID TUNNELDRIVNING</b> .....	<b>20</b>
<b>19</b>	<b>UTVÄRDERING OCH RESULTAT</b> .....	<b>22</b>
<b>20</b>	<b>SLUTSATS</b> .....	<b>23</b>

21	<b>FORTSATT ARBETE</b> .....	23
22	<b>ERKÄNNANDE</b> .....	24
23	<b>REFERENSER</b> .....	24
24	<b>BILAGOR</b> .....	25

## 1 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 (Silfwerbrand 1992). I SveBeFos ramprogram 1997-99 har också gjorts undersökningar i form av fältförsök i Kiruna för att klarlägga effekten från sprängningshål på olika avstånd bakom sprutbetong av olika ålder (Ansell 1999) och (Ansell 2000).

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 har föreslagits att man dels skulle göra uppföljningar av faktiska vibrationsnivåer som kan tänkas påverka sprutbetongen, dels planera fältförsök med sprutbetong i olika ålder på ytor som bedöms mest utsatta för höga vibrationer. 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 skulle avse en kartläggning av vibrationsnivåer med en sådan uppläggning att den visar de nivåer sprutbetongen typiskt kan utsättas för. Beroende på resultaten av den här föreslagna undersökningen kommer man sedan att planera för prov på sprutbetong i utsatta lägen. Ytterligare inventering av kunskapsläget för påverkan på nysprutad betong kommer då också att göras.

## 2 Mål

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 presenteras sedan i ett diagram där man redovisar hur vibrationsnivån beror av avståndet.

## 3 Användbarhet

Detta projekt förväntas leda till att man får en större kunskap om vilka vibrationsnivåer som råder bakom en drivningsfront. Detta ger en uppfattning om vilka vibrationsnivåer som sprutbetongen maximalt skulle kunna utsättas för.



## 4 Omfattning

Detta projekt 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 projekt. Beroende på resultatet kommer man sedan att planera för prov på sprutbetong i utsatta lägen.

## 5 Organisation

Projektet genomfördes vid SveBeFo med Lena Reidarman som projektledare i samverkan med Ulf Nyberg som svarat för en stor del av utvärderingsarbetet.

## 6 Förutsättningar

### 6.1 Projektindelning

I den första delen av projektet gjordes prognoser av vibrationsnivåerna. Två lämpliga formler valdes för detta. I brist på bättre har vi använt konstanter som gäller i LKABs gruva i Kiruna. Andra delen var att utföra en seismisk mätning utmed en profil i tunnelväggen. Tredje delen och huvuddelen var att utföra vibrationsmätningar i sju mätpunkter strax bakom tunnelväggen för sex salvor.

### 6.2 Beräkning av förväntade vibrationsnivåer

Vid skadeprognoser utgår man ofta från förenklingen att första maximum i signalerna (svängningshastighet i mm/s) från enskilda laddningar kan användas för beräkning av kritiska vibrationsnivåer nära känsliga objektet. Dessa grundar sig på samband mellan svängningshastighet och töjning (t ex Bjarnholt & Skalare 1981). För att kunna bedöma skador utifrån nivåerna kopplas ett skadekriterium (normalt baserat på analys av objektets materialegenskaper) till mätvärdena. I prognoserna nedan utgår vi också från första maximum i signalerna.

För vibrationsutsatt sprutbetongen gäller för närvarande ett enkelt gränsvärde på 150 mm/s vid tryckhållfastheten 6 MPa. Detta stämmer rätt bra med publicerade (se t ex Ansell 2000). Enligt sprutbetongsspecialister är gränsvärdet huvudsakligen satt för att god vidhäftning skall erhållas. En uppskattning av vibrationsnivåerna (Peak Particle Velocity PPV) har utförts med hjälp av två empiriska PPV-lagar. Skalningslagen (1) (Holmberg & Persson 1980) har tre fria parametrar och kan skrivas,

$$PPV = A ((g(H/R) Q)^{\alpha} / R^{\beta}) \quad (1)$$

med maximala svängningshastigheten PPV, korrektion för utsträckt laddning  $g(H/R)$ , laddningsvikten  $Q$ , laddningslängd  $H$  och avståndet  $R$ . Platskonstanterna (parametrarna) som varierar med grundförhållanden betecknas med  $A$ ,  $\alpha$  och  $\beta$ .

Dämpningslagen (2) (Hustrulid m.fl 1992) använder inte laddningsvikten utan istället borrhålstrycket  $P_h = \rho_e/8 VOD^2 (\phi_e/\phi_h)^{2\gamma}$  (se t ex Nie m fl 2000) som viktigaste variabel med sprängämnesdensiteten  $\rho_e$ , detonationshastigheten  $VOD$  och frikopplingseffekten  $(\phi_e/\phi_h)^{2\gamma}$  som anger en minskning av spränghålstrycket när laddningsdiametern  $\phi_e$  är mindre än spränghålsdiametern  $\phi_h$ . Exponenten  $2\gamma$  anses kunna variera 2,4-2,6. Denna lag har endast en fri parameter som är dämpningen  $I$ . Ekvationen lyder:

$$PPV=0,61 (P_h / \rho \cdot c) (\phi_h / R) e^{-IR} \quad (2)$$

Här är också akustiska impedansen för berg  $\rho \cdot c$ , platskonstanter. Konstanten 0,61 är en geometrisk faktor från omräkning av sfärisk till cylindrisk laddning i den del av borrhålet som ligger närmast riskobjektet.

Lagen ovan har använts på två sätt; på formen (2) och modifierad med fritt intercept (Nyberg m fl 2000) för bästa datapassning. Detta för att uppskatta svängningshastigheten beroende på avståndet från enskilda laddningar. Nedan (bild 1) visas en första ansats till förväntade vibrationsnivåer för försöken i SL03. Den horisontellt heldragna linjen i diagrammet markerar 150 mm/s (0,15 m/s). Diagrammet visar att på avstånd större än ca 9 m från ett hjälparhål (två övre linjerna) kommer vibrationsnivån att understiga nivån 150 mm/s. Från ett konturhål (två undre linjerna) är avståndet ca 2 m vid denna nivå. Notera att linjerna beräknade ur de två lagarna skiljer sig rätt lite åt i detta fall.

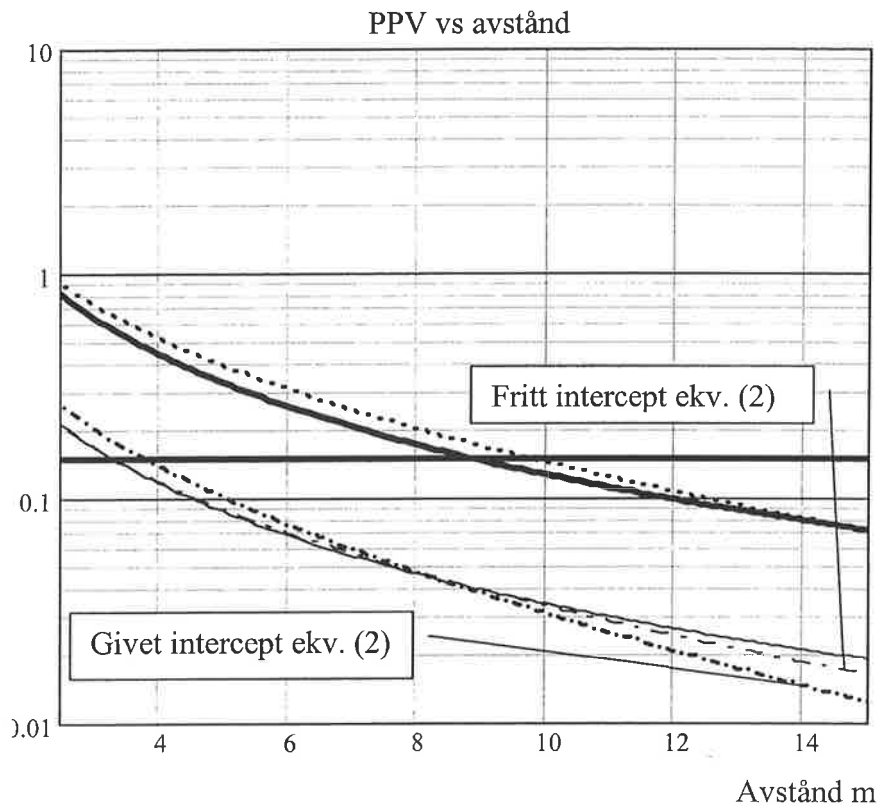


Bild 1. Prognoser för SL 03. Övre två linjerna visar nivåerna (m/s) för hjälparhålen. Nedre tre linjerna gäller konturhålen. För konturhålen med emulsion  $\phi 21$  mm i hål  $\phi 48$  mm gäller att ekvation (2) har  $2\gamma = 1,8$ . Ekvationerna (1) och (2) har heldragna- respektive punkt- linjer.

De använda platskonstanterna i skalningslagen gäller alltså för en syenit i LKAB. Dessa är  $A = 0,7$  m/s respektive  $\beta = -1,4$  (ekvation ett med kvadratrotsskalning  $d \propto v^s$   $PPV = A (\sqrt{(g(H/R)Q)/R^\beta})$  för heldragna linjer ovan). För svenskt urberg anses  $A$  kunna variera mellan 0,7-0,9 m/s med  $\alpha = 0,7$  och  $\beta = 1,5$ .

Platskonstanten i dämpningslagen är satt till  $I = 0,1$ , detonationshastigheten = 4500 m/s, densiteten  $\rho_e = 993$  kg/m<sup>3</sup>. I Södra Länken är densiteten  $\rho = 2500$  kg/m<sup>3</sup> och våghastigheten  $c = 5300$  m/s.

### 6.3 Försök med enskottsladdningar

Litteraturen är sparsam med information om hur sprutbetong påverkas av t.ex. svängningshastighet, svängningsriktning, frekvens och varaktighet. I syfte att få kännedom om vilka olika vågtyper som fortplantar sig i det ytnära berget så utfördes en försöksserie med enskottsladdningar. Enskottsladdningar valdes för att dessa är lättare att kontrollera än salvor som innehåller flera laddningar. Resultaten bedömdes också vara lättare att utvärdera. En noggrann karakterisering av hela svängningsförlopp i tunnelväggen från enskilda laddningar var alltså önskvärd.

Stötvågorna genererades genom att små laddningar (ca 50-400 gram) placerades i borrhål i tunnelväggen. Mätningarna utfördes i samma mätpunkter som för huvudförsöken. I princip skulle de olika vågfaserna identifieras med hjälp av kända vågteorier för P-, S- och R – vågor (P är så kallade primärvågor som utbreder sig snabbast, S är sekundärvågor och R en Rayleigh – våg i tunnelväggen).

Om dessa teorier går att använda vid tunnelsprängning har inte undersökts. Det skulle krävas viss signalanalys som inte rymts inom projektet. Vi har alltså använt den vanliga formuleringen av lagarna (avsnitt 6.2).

## 7 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 få en så enkel försöksplats som möjligt. Bild 3 visar en översikt över försöksplats 501, en del av Södra Länken. Tunnelarean är ca 120 m<sup>2</sup>.

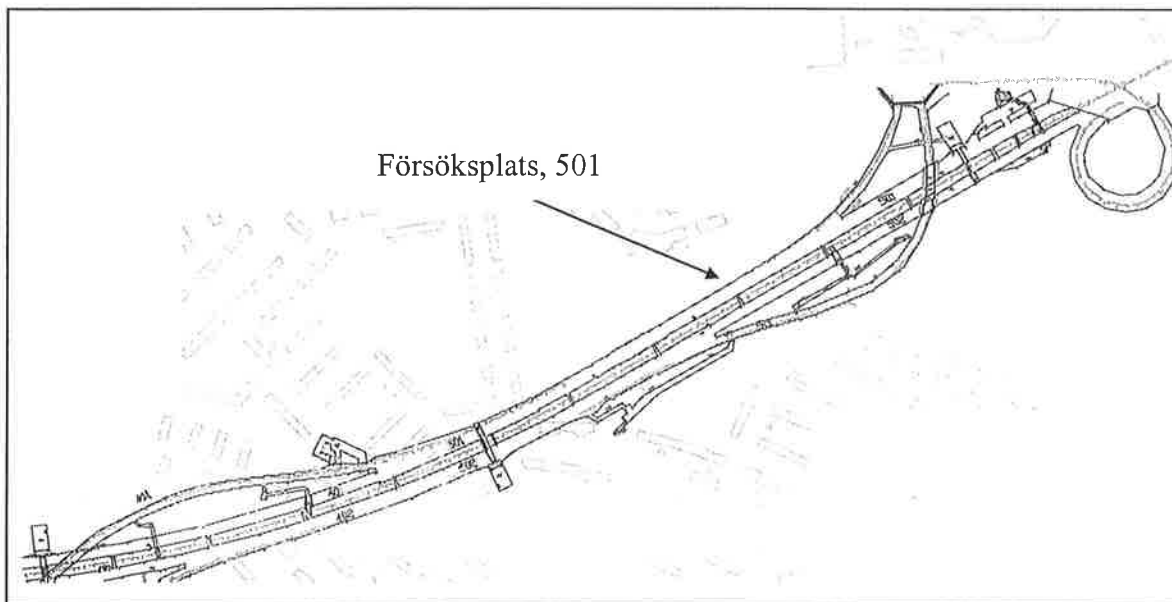


Bild 3. Översiktsbild på del av Södra Länken, SL03, 501 och 502 vid Hammarby.

## 8 Mätningförfarande

### 8.1 Placering av accelerometer på tunnelvägg

Vibrationerna som uppkommer vid tunnelsprängningen mättes med hjälp av accelerometrar i tunnelväggen på den sida av tunneln som inte är en bergpelare. Detta för att bergpelaren bedömdes åstadkomma reflektioner av vibrationerna i sina gränssytor.

### 8.2 Antal accelerometer på varje mätplats

Mätningarna genomfördes i två dimensioner (två accelerometrar tillsammans utgjorde en mätstation i ett mätborrhål), den ena riktningen tvärs och den andra längs med tunnelriktningen. Dessa vibrationsriktningar antogs vara mest intressanta. Detta innebar också att vi kunde mäta i flera punkter då antalet mätkanaler var begränsat till 16 stycken.

### 8.3 Accelerometrarnas placeringsdjup på tunnelvägg

Accelerometrarna placerades ut i ca 0,3 m djupa borrhål, se bild 4. Det vore kanske mer lämpligt att placera accelerometrarna på bergytan, eftersom det är påverkan på själva betongen som skall studeras.

Av erfarenhet så vet man att registreringar vid sådana placeringar är mycket svårtolkade. Borrhålsdjupet valdes därför med tanke på att det skall vara så ytnära som möjligt men med en liten risk att sitta i ett löst bergblock. Borrhålens diameter var  $\phi 102$  mm.

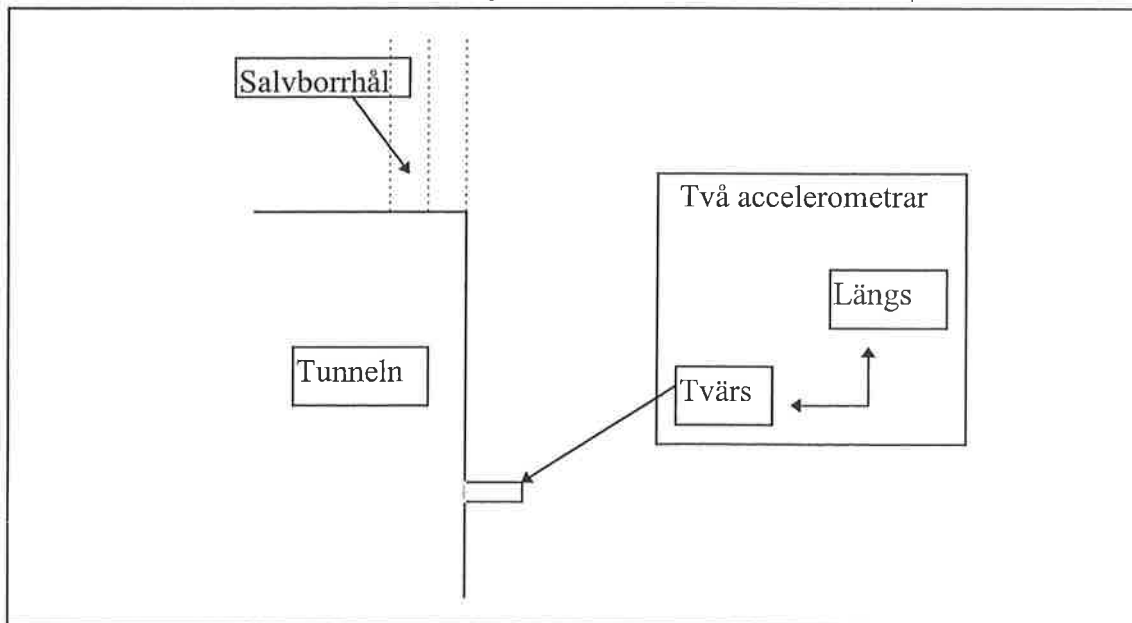


Bild 4. Accelerometrarnas riktning i för hållande till tunneln.

#### 8.4 Mätborrhålens placering på tunnelvägg

För att uppskatta vibrationernas avståndsdämpning 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 dvs ca 1,50 m, se bild 5.

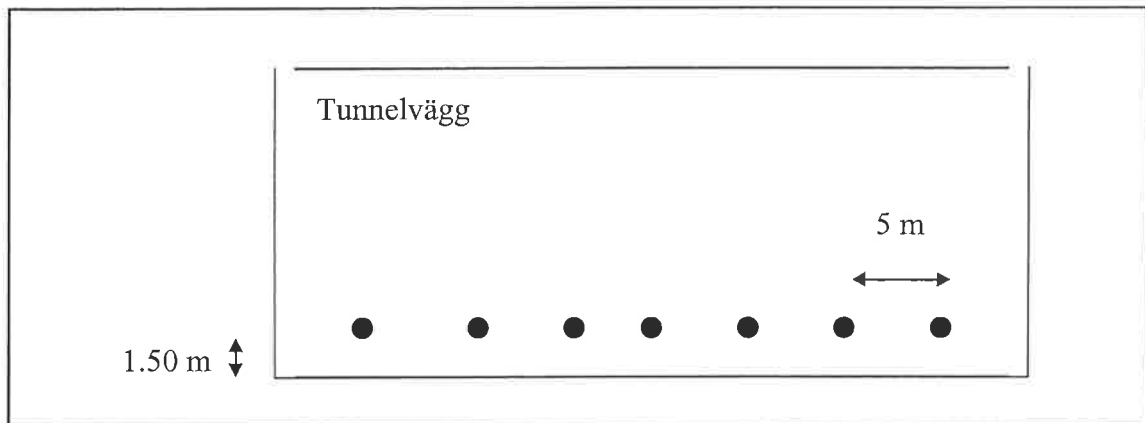


Bild 5. Mätborrhålen placeras på linje i tunnelväggen.

#### 8.5 Montering av accelerometrar i mätborrhålsbotten

I borrhålen infördes betong. I betongen göts en anordning av aluminiummankare och ett PVC-rör fast. Rørets diameter var  $\phi 76$  mm. Røret fungerade som skydd bland annat vid monteringen. När betongen så småningom härdat skruvades accelerometrarna (föremonterade på en aluminiumfot) fast på det då redan ingjutna ankaret i borrhålet, se bild 6.

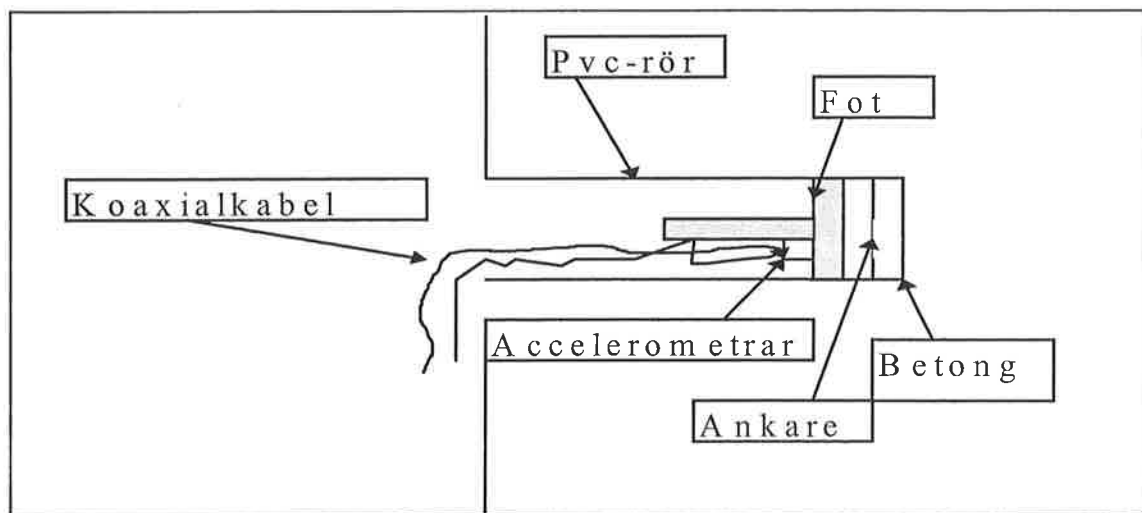


Bild 6. Montering av accelerometer i mätborrhål.

## 9 Kabelanordning

Koaxialkablar från mätpunkterna anslöts sedan i tur och ordning till två andra koaxialkablar, till en kabelstock och till en permanent kabelstock. Vi räknade med att koaxialkablarna mellan mätborrhålen och den permanenta kabelstocken med stor sannolikhet skulle utsättas för flygande sprängsten. Därför planerades byten till nya kablar inför varje ny mätning. Den permanenta kabelstocken (ca 300-350 m lång) drogs genom en passage till den parallella tunneln 502, dit mätutrustningen kördes fram inför mätning/sprängning, se bild 7. Kabelstocken var konstruerad för att skyddas från påverkan så som yttre våld och vatten.

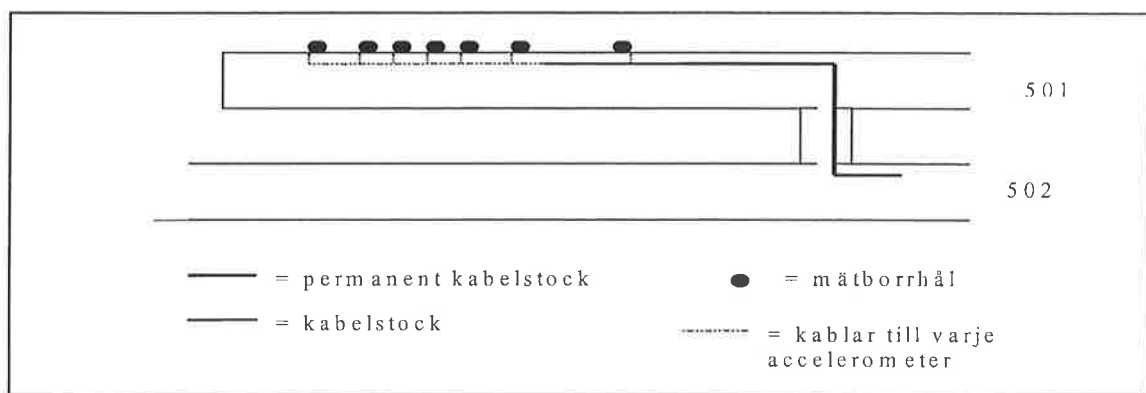


Bild 7. Kabelanordning och dess placering.

## 10 Utrustning

Kabelstocken anslöts till en så kallad signal conditioner (Isotron Mod. 2793) som i sin tur anslöts till mätenheten som var Sony DAT-bandspelare med 16 kanaler och en signalbandbredd på ca 25 KHz, bild 8. All denna utrustning placerades under mätningstillfällena i en bil i tunnel 502 bredvid passagen till tunnel 501. Accelerometrarna som användes var av typen Kistler 8704B5000. Fakta om accelerometrarna finns i bilaga 2.

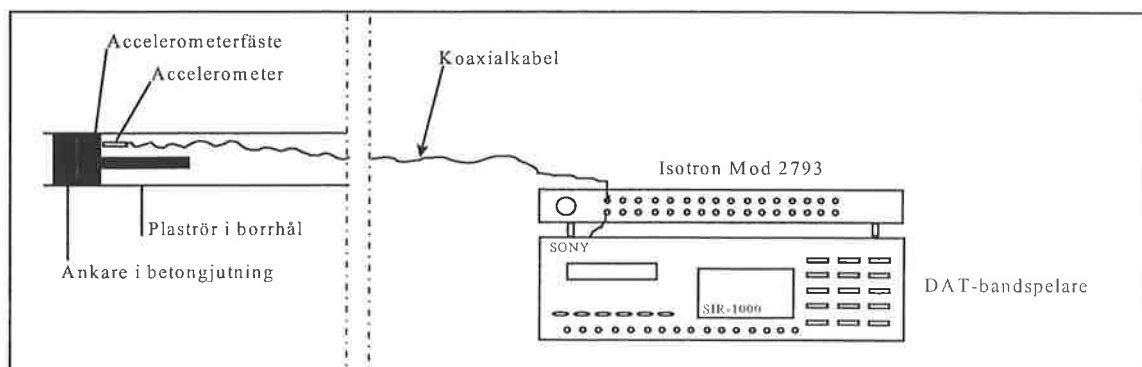


Bild 8. Principbild över mätutrustningen.

## 11 Dataöverföring

Efter varje mätning överfördes mätsignalerna till ett utvärderingsprogram, Sonypcscan III som användes i en vanligt pc-dator.

## 12 Mätningsserie

För att kunna mäta nära fronten så borrades fler mäthål allt eftersom tunnelfronten avancerade, se tabell 1. Tabell 2 redovisar antalet mätningar för ett visst avstånd från fronten.

Tabell 1. Planerad mätningsserie.

Mätbh	Mätning 1 (m)	Mätning 2 (m)	Mätning 3 (m)	Mätning 4 (m)	Mätning 5 (m)	Mätning 6 (m)	Borr- omgång
1	45	50					1
2	30	35					1
3	25	30			45	50	1
4	20	25	30	35			1
5	15	20	25	30			1
6	10	15	20	25	30	35	1
7	5	10	15	20	25	30	1
8			10	15	20	25	2
9			5	10	15	20	2
10					10	15	3
11					5	10	3
12			45	50			2

Tabell 2. Planerad mätningsserie. Antal mätningar för olika avstånd.

Avstånd i från front (m)	Antal mätningar
5	3
10	6
15	6
20	6
25	6
30	6
35	3
45	3
50	3
Totalt:	42



### 13 Sprängämne och laddning

Sprängämnet var av typen "SSE- slurry" (Site Sensitive Emulsion). SSE systemet baseras på fabriksstillverkad matris, vilken ej är explosiv. I samband med laddning, pumpning av matrisen, känsliggjordes denna genom kemisk kallgasning till att bli sprängämne. Samverkande laddningsmängd var ca 8,6 kg som också var den maximala sprängämnesvikter per borrhål.

### 14 Borr - och laddplan

Borrhålsdiametern för strosshålen var 54 mm och för kontur- hjälpare och bottenborrhålen 48 mm. Borrhålen var ca 5,2 m långa och avladdades ca 1,5 m. Nedan visas uppkopplingen av en salva med ca 200 spränghål.

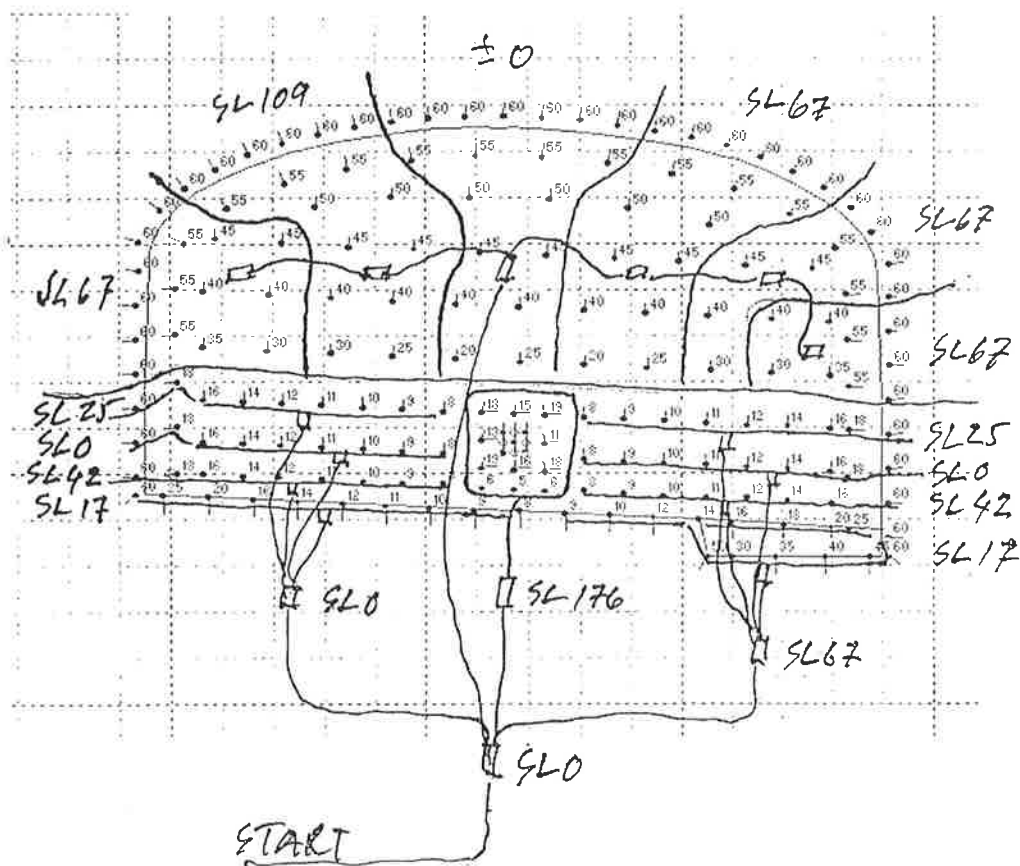


Bild 9. Blockupptändning med Nonel av en salva i Södra Länken. Fördröjningstiderna från start anges i millisekunder. Sprängkapslarna har individuell tidsfördröjning med intervallnummer 0-60 (tider 25 - 6000 ms).

## 15 Utförande

Mätningarna utfördes i mars 2000. Av sex planerade genomfördes fyra. De andra två genomfördes inte beroende på strömavbrott (mätutrustningen var beroende av tunnelns elsystem). En diesel driven generator ordnades fram så att mätningarna kunde genomföras med egen strömförsörjning från och med mätning 2.

Som befarat så gick mätkablarna sönder beroende på flygande sprängsten och de två mätborrhålen närmast fronten täcktes oftast av salvhögen.

Vibrationsmätning utfördes för salvorna 97, 98, 100 och 101.

Dessa sprängdes:

Salva 97; 00-03-15,

salva 98; 00-03-17,

salva 100; 00-03-21 och

salva 101; 00-03-27.

Den planerade mätningsserien utgick från ett kortaste avstånd från front av 5 m och det längsta 50 m. Avstånden emellan borrhålen var planerade till 5 m. De verkliga avstånden emellan borrhålen varierade mellan 5-8 m. Det kortaste avståndet från fronten blev ca 5 m, i mätning 3. Den längsta avståndet blev ca 54 m, i mätning 6. Att de verkliga avstånden avviker från de planerade beror på att man har utnyttjat redan befintligt mätborrhål för att på så sätt minska borrhålsarbetet. Variationen i avstånd gjorde att antalet mätningar för ett visst avstånd inte blev som planerat. I tabell 3 redovisas de verkliga avstånden från front. Bild 10 visar hur mätborrhålen är placerade i tunnelväggen för samtliga mätta salvor.

Tabell 3. Verklig mätningsserie och avstånd från front.

Mätning.	2	3	5	6
Mätborrhål	(m)	(m)	(m)	(m)
1	46,3			
2	36,3	42,2		
3	31,4		48,6	54,1
4	26,4	32,3		
5	21,3	27,2		
6	16,4	22,3	33,6	39,1
7	11,6	17,5	28,8	34,3
8		9,8	21,1	26,6
9		5,2	16,5	22,0
10			11,3	16,8
11			6,3	11,7

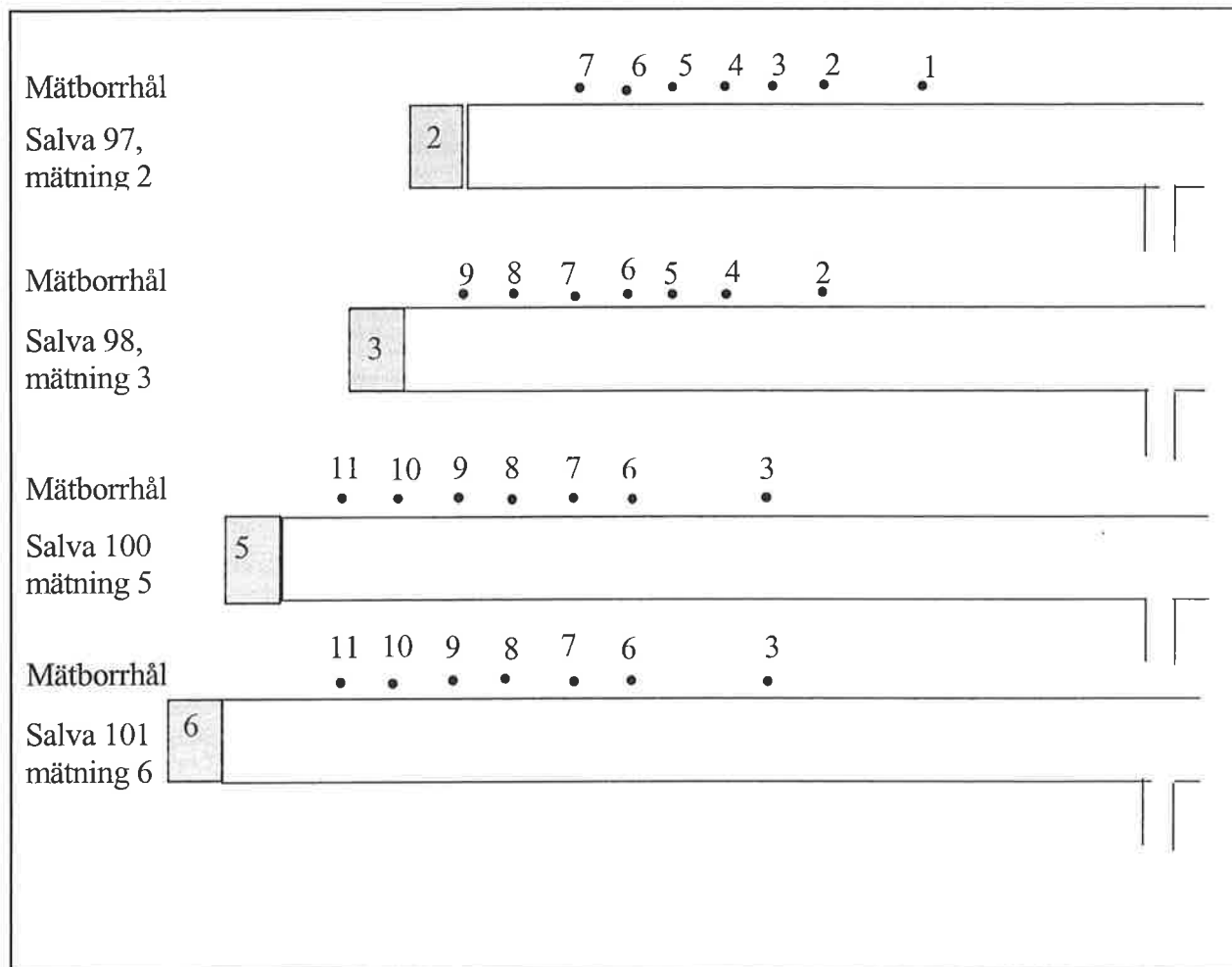


Bild 10. Mätborrhålens placering i tunnelväggen för salvorna 97, 98, 100 och 101.

## 16 Utvärdering

Utvärderingsmaterialet var mycket stort. I princip så kunde en hel salvregistrering innehålla ca 2800 vibrationsvärden. Detta värde grundade sig på att varje accelerometer registrerade från samtliga salvborrhål (ca 200 stycken) och att det fanns 14 stycken accelerometrar i tunnelväggen.

Accelerationssignalerna  $a(t)$  från enskilda laddningar har analyserats i några få steg: 1) Korrigering för så kallat offset, 2) visuell inspektion och utsortering av användbara signaler, integration av  $a(t)$  till hastighet  $v(t)$  och 3) avläsning av första maximum  $v(t)_{\max} \equiv \text{PPV}$  från enskild laddning för att få resultaten konsistenta med andra liknande arbeten.

I utvärderingen relateras alla tider till den först noterade vibrationen vid tiden 0 ms det vill säga tidsangivelsen 108 ms är 108 ms efter den första vibrationen. För övrigt var tiderna svåra att identifiera med nominella tider.

### 16.1 Registrerade tider från salvorna

Innan mätningarna påbörjades så insåg man att accelerometrarna som var placerade nära salvan skulle utsättas för höga påfrestningar. Det fanns en risk att vissa accelerometrar inte skulle registrera hela tidsförloppet som var ca 6 sekunder. Även de accelerometrar som monterats på stort avstånd från fronten befarades få avbrott i sin registrering vilket kunde bero på att kablarna utmed tunnelvägg träffats av flygande sprängsten.

För att säkerställa kommande mätningar så kopplades accelerometrarna bort från kablarna mellan salvorna. Då konstaterades det att många kablar var avklippta på grund av flygande sten. De accelerometrar som var placerade närmast fronten fick inte lika hög avbrottsfrekvens som de andra. Vad detta kan bero på är oklart. Av den totala mättiden av 6 sekunder per salva erhöles 24 - 58 %. Vanligast var registrering under den första sekunden.

### 16.2 Mätning 2

Mätning 2 utfördes för salva 97 den 15 mars 2000 kl. 18.30. Bild 11 visar registreringen för första händelsen (tid 0) i salvan för samtliga 14 kanaler (tiden på den horisontella axeln och accelerationen på den vertikala). Bilden visar att vibrationerna från salvan når de 7 mätpunkterna (två accelerometrar i varje) med ökande tid och avstånd från front.

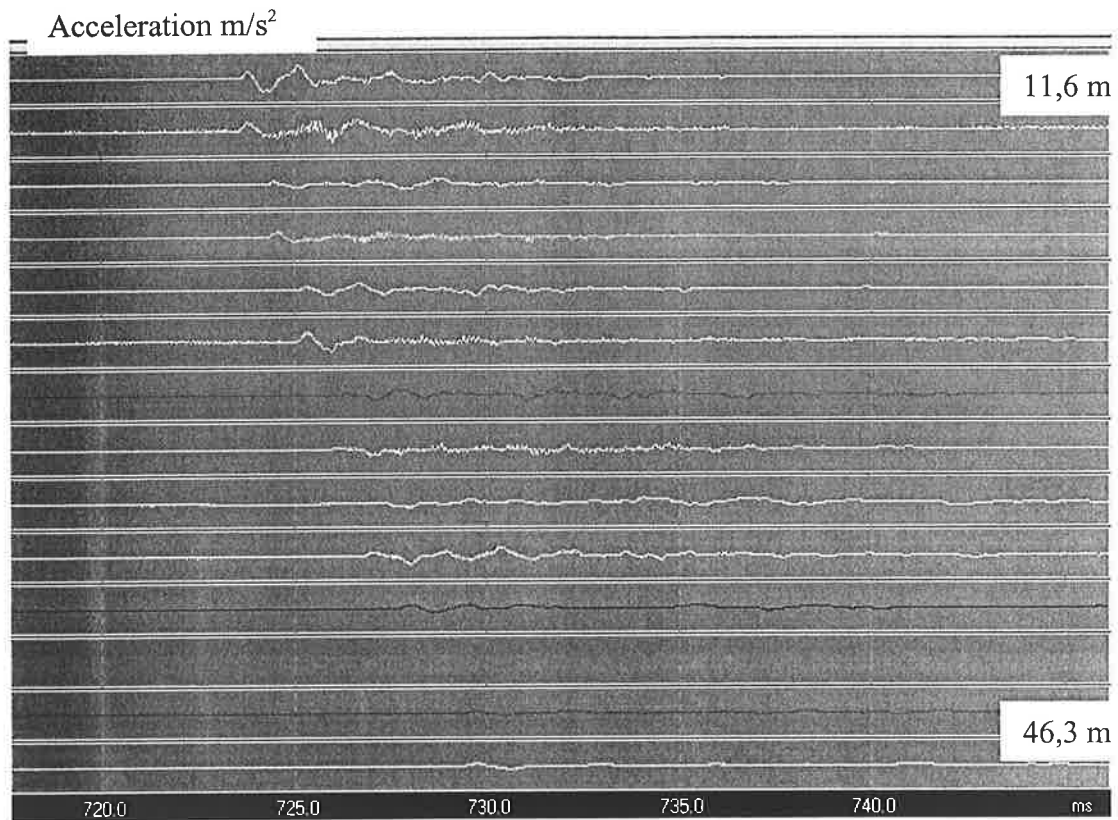


Bild 11. Mätning 2, första registrerade vibrationer (0 ms) för samtliga 14 accelerometrar. Avstånden var 11,6, 16,4, 21,3, 26,4, 31,4, 36,3 och 46,3 m.

I diagram 1 har tiderna 0, 108 och 259 ms studerats. Vibrationsnivåerna är presenterade för svängningsriktningarna tvärs respektive längs tunneln. På ett avstånd av ca 12 m från salvan var vibrationsnivån ca 20 mm/s för att avta med ökat avstånd. Mätdata finns i bilaga 3.

## PPV-avstånd för mätning 2

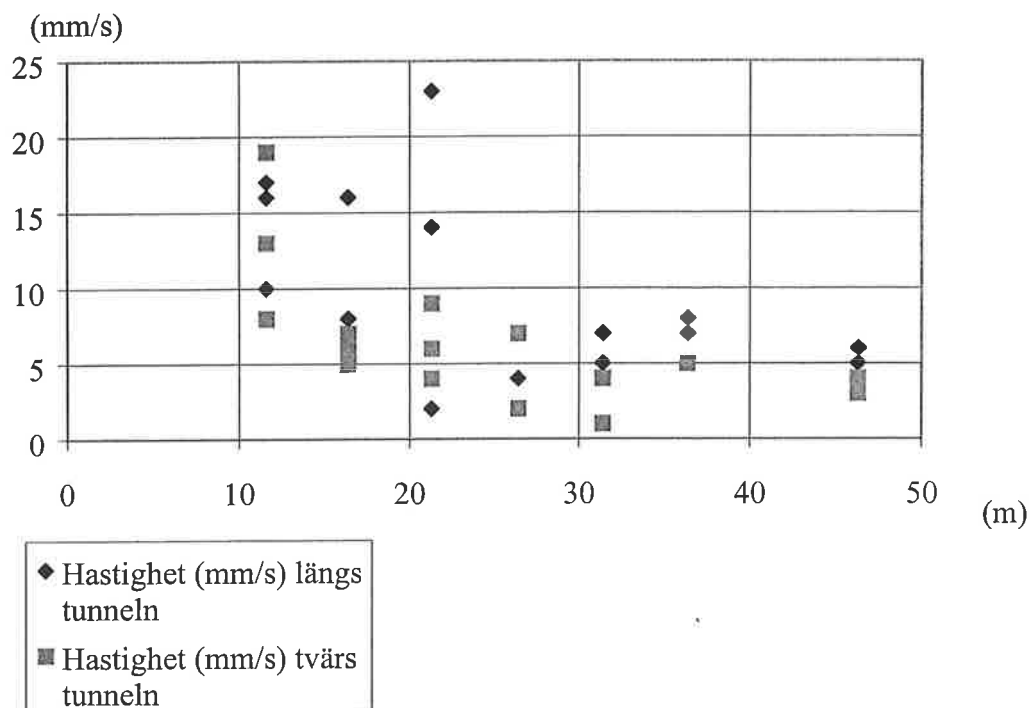


Diagram 1. Mätning 2, salva 97, PPV som funktion av avståndet.

### 16.3 Mätning 3

Mätning 3 utfördes för salva 98 den 17 mars 2000 kl. 07.10. Vibrationsvärdena i diagram 2 är tagna för tiderna 0, 100, 254, 691, 938, 1213, 1255 ms. På ett avstånd av ca 5 m från fronten var PPV-värdena längs med tunneln drygt 70 mm/s. Vibrationen kommer från en händelse som är registrerad 938 ms efter första händelsen. Mätdata finns i bilaga 4.

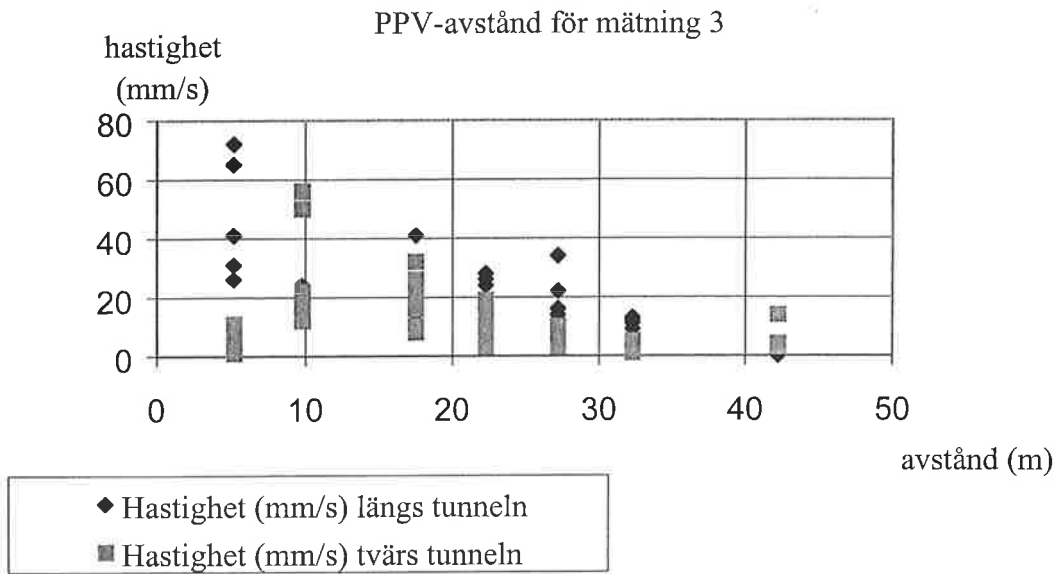


Diagram 2. Mätning 3, salva 98, PPV-värden som funktion av avståndet.

#### 16.4 Mätning 5

Mätning 5 utfördes för salva nr 100 den 21 mars 2000 kl.15.30. Vid ett avstånd av ca 11 m från fronten var PPV-värdena längs tunneln ca 50 mm/s ca 6200 ms efter den första vibrationen i salvan. Mätdata finns i bilaga 5.

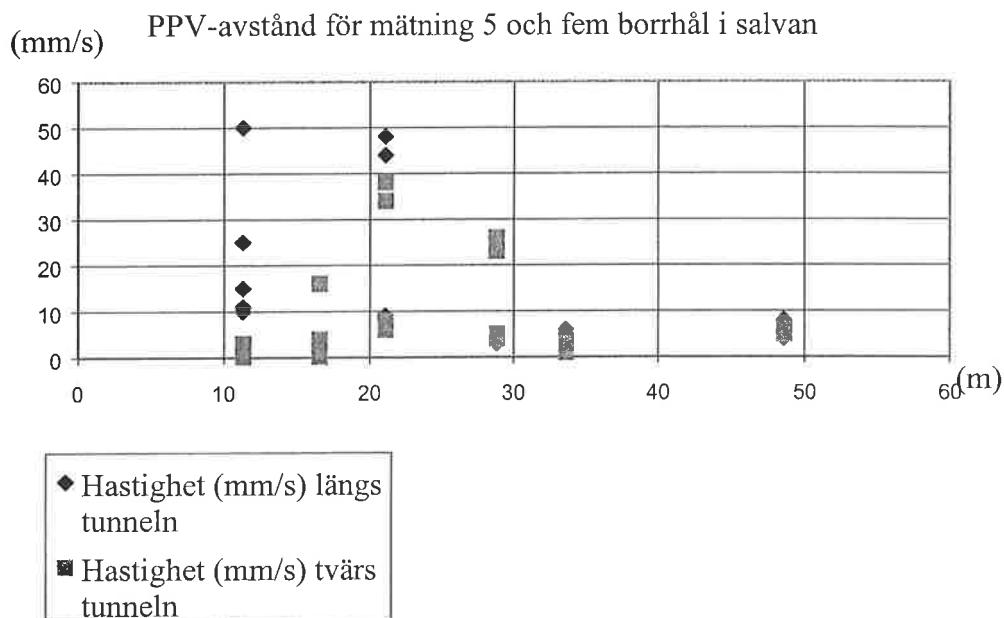


Diagram 3. Mätning 5, salva 100, PPV-värden som funktion av avståndet.

### 16.5 Mätning 6

Mätning 6 utfördes på salva nr 101 den 27 mars 2000 kl. 16.30. Bild 12 visar det högsta PPV-värdet i denna salva (övre bilden) som var ca 29 mm/s. Det inträffade för den första händelsen som registrerades och det var för accelerometern som var placerad på ett avstånd av 11,7 m från fronten och riktad längs med tunneln. I diagram 4 visas PPV-avståndets diagrammet för tiderna 0, 160 och 260 ms. Mätdata finns i bilaga 6.

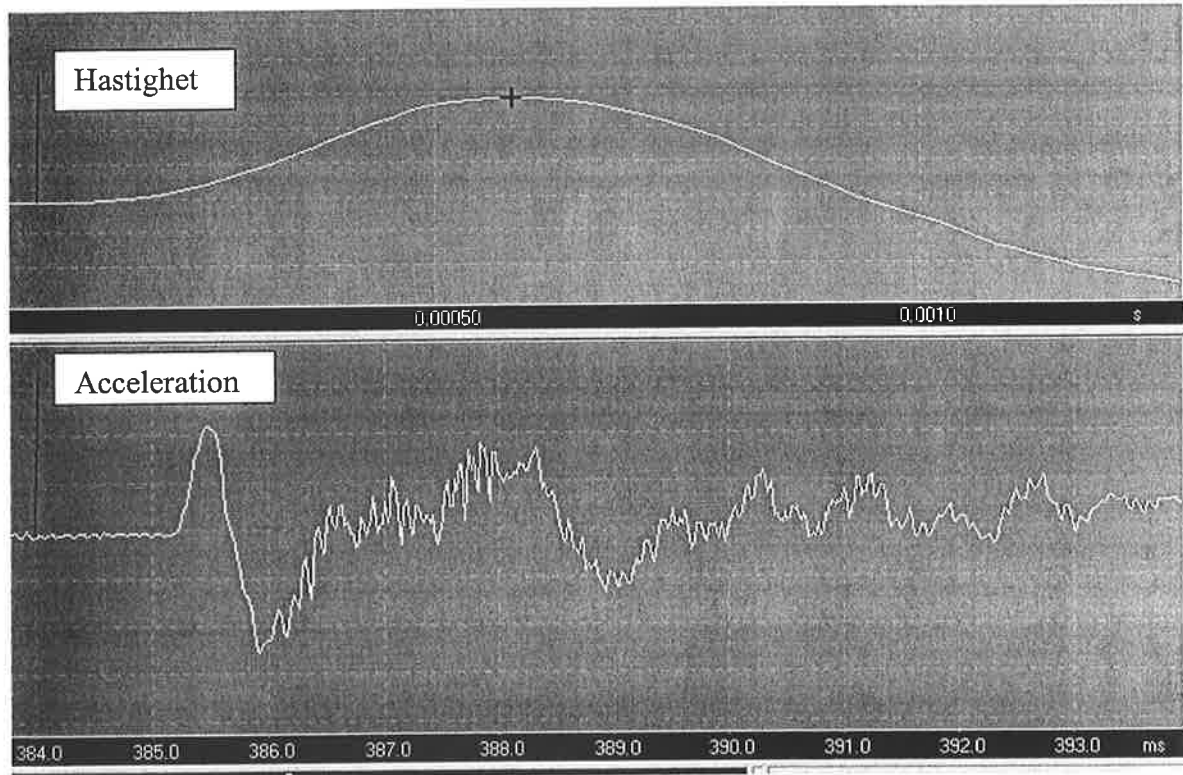


Bild 12. Integration av uppmätt acceleration (nedre bilden) till hastighet (övre bilden). PPV- värdet avlästes vid det svarta korset. Notera att tidskalan i övre bilden har expanderats.



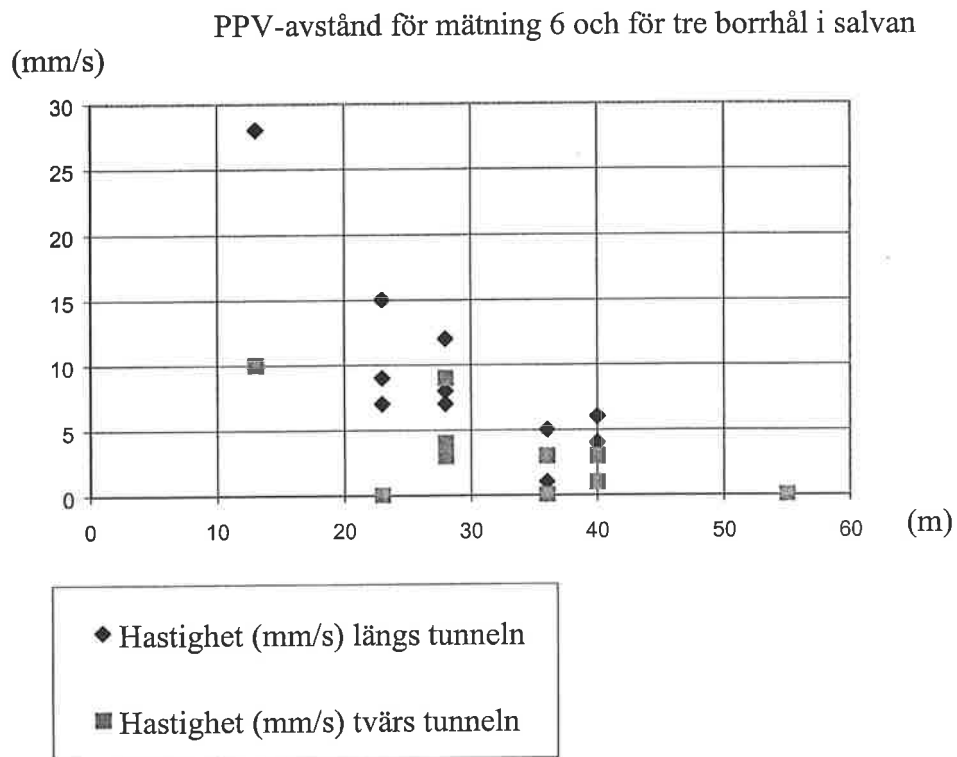


Diagram 4. Mätning 6, salva 101, PPV-värden som funktion av avståndet.

## 17 Samtliga vibrationsmätningar

En sammanställning av samtliga utvärderade vibrationsvärden visas i två diagram (diagram 5 och 6 nedan) för svängningsriktningarna längs respektive tvärs tunneln. Totalt är det 98 stycken värden som är utvärderade för svängningsriktningen längs tunneln. Tvärs tunneln är 69 stycken värden utvärderade.

Medelvärdeslinjen 1 (diagram 5) beskriver uppskattade värden (dämpningslagen (2)) med givet borrhålstryck  $P_n$  (avsnitt 6.2). Trycket ges av  $P_n = 1/8 \rho_c VOD^2 = 1/8 \cdot 993 \cdot 4500^2$  för fulladdade hål i salvan. Denna linje representerar inte mätvärden speciellt bra som diagram 5 visar. I en modifierad form av lagen med två fria parametrar i stället för en (som den ursprungliga ekvationen (2) anger) beskrivs värdena betydligt bättre vilket visas med linje 2. Den extra fria parametern uppkommer alltså vid passningsräkningen genom frisläppning av konstanterna (0,61/8) i ekvation (2).

Notera att PPV anges i m/s i diagram 5 och 6.

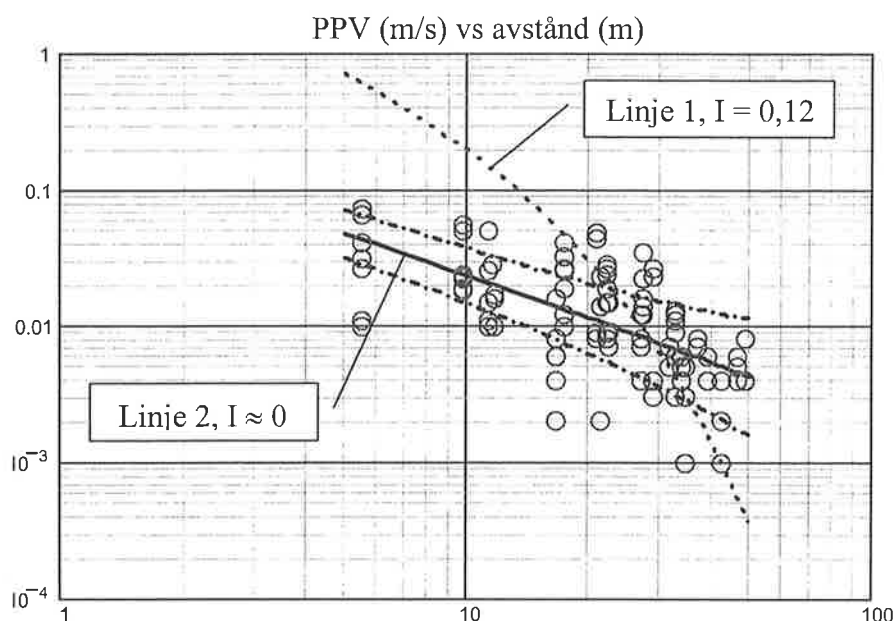


Diagram 5. Samtliga mätningar med vibrationsriktningar längs med tunneln för salvorna 97, 98, 100 och 101. Linje 1 anger passningen från ekvation (2) i sitt originalutförande. Linje 2 anger passningen för en modifierad form av ekvation (2). De två streckade linjerna omkring medellinjen 2 anger ett konfidensintervall på ca 95% för PPV-värdena på avstånden 5-50 m.

Värdena tvärs tunnelväggen (diagram 6) är genomgående lägre än de som har mätts upp i svängningsriktning längs väggen (diagram 5) och en linje som ovan (linje 1) skulle därför representera värdena ytterligare något sämre. Linjen finns alltså inte i diagram 6.

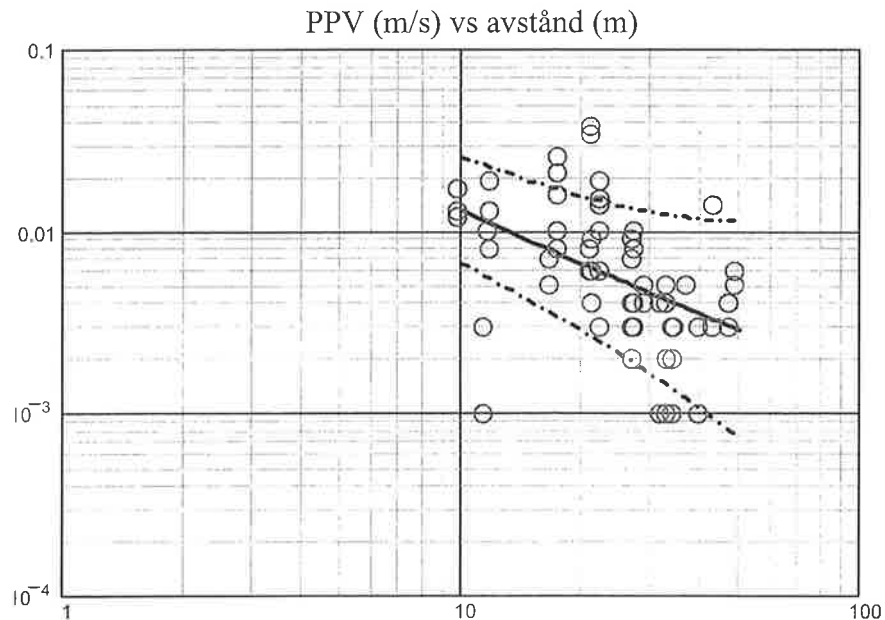


Diagram 6. Samtliga mätningar tvärs med tunnel, salvorna 97, 98, 100 och 101. De två streckade linjerna anger ett konfidensintervall på 95% omkring medellinjen (heldragen). Notera att PPV-värdena finns på avstånden 10-50 m.

Mätningar från Japan (Hagimori m.fl 1993) har för övrigt 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 kunna ge nivåer upp till en faktor 3 större än prognoserna (avsnitt 6.2) och ca en faktor 4 större än de uppmätta nivåerna i Södra Länken. Detta gäller för ca 8 kilo sprängämne på avståndet 10 m bakom salvan.

### 18 Praktiska vibrationsnivåer vid tunneldrivning

Vid tunnelsprängning som i Södra Länken kan den maximala nivån beroende på avståndet  $R$  som inga värden överskrider vara mer intressant än en medellinje som användes vid linjepassning (avsnitt 6 och 17). En sådan maximalnivåslinje ( $PPV = 80 - 1,5R$ ) (diagram 7 och 8) 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 ( $PPV=80-1,5R$ ) i de två fallen. De maximala nivåerna för de två svängningsriktningarna visas alltså i diagrammen nedan.

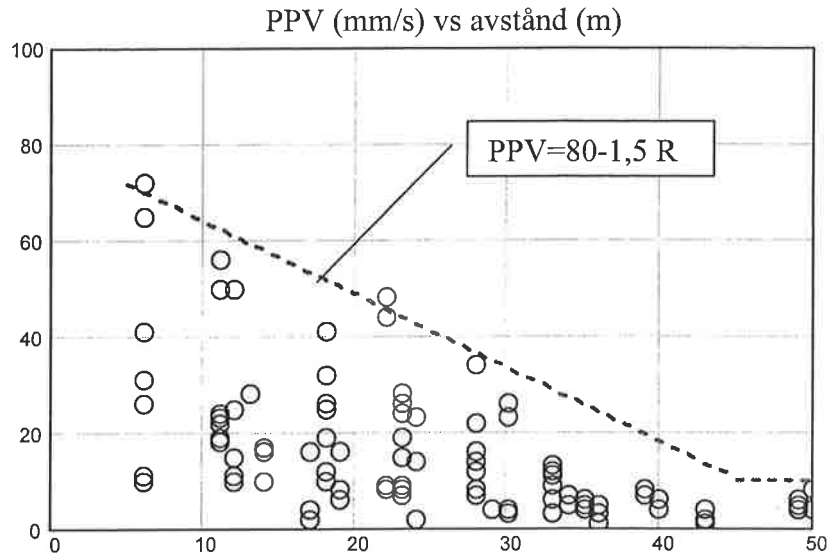


Diagram 7. Linjen visar de maximala värden som inte har överskridits för avstånden R 5-50 m från fronten för svängningsriktningen längs med tunneln.

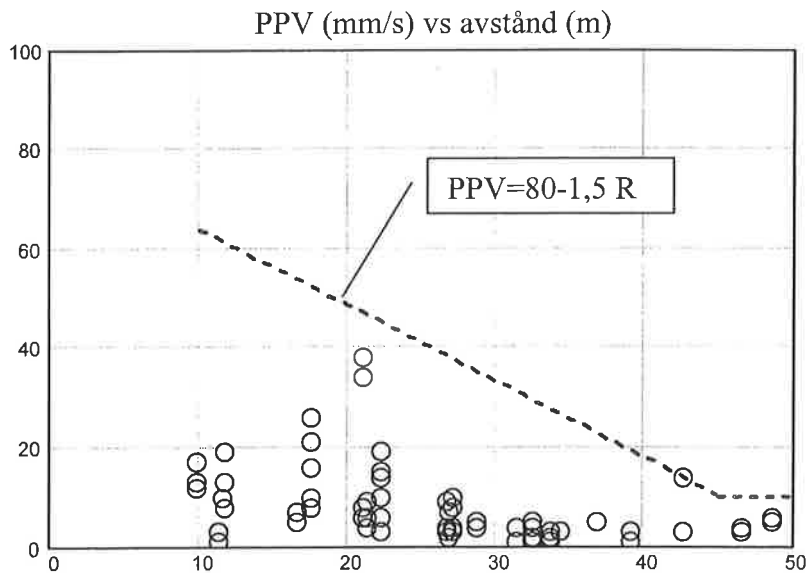


Diagram 8. Linjen visar de maximala värden som inte har överskridits för avstånden R 10-50 m från fronten för svängningsriktningen tvärs med tunneln.

## 19 Utvärdering och resultat

I detta projekt har vi utgått från prognoser av svängningshastigheten med hjälp av två så kallade PPV-ekvationer (avsnitt 6.2) för att kunna uppskatta vibrationerna i tunnelväggen från salvor. Den ena (Holmberg & Persson 1980) är en skalningslag som använts för att studera skadezonen runt spränghål utifrån uppmätta värden för svängningshastighet PPV, (Peak Particle Velocity eller svängningshastighetens toppvärde) från detonerande utsträckta laddningar med känd sprängämnesvikt. Den andra (Hustrulid med flera 1992) är en dämpningslag som utgår ifrån beräknat tryck i spränghål för bestämning av bergets dämpning utifrån PPV-värden.

För prognoserna (avsnitt 6.2) valdes parametrar utifrån tidigare mätningar i en syenit i LKABs gruva i Kiruna vilken kan antas jämförbar med graniten i Södra Länken. För skalningslagen sattes intersept  $A = 0,7$  m/s och lutning  $\beta = -1,4$ . I den modifierade dämpningslagen användes dämpningsvärdet  $I = -0,1$ . Prognoserna visar på högre PPV-värden än vad som var fallet i Södra Länken.

Mätningar av accelerationen i väggen bakom fyra salvor genomfördes i ett område med huvudsakligen sedimentgnejs och gnejsgranit med en genomsnittlig densitet  $\rho = 2500$  kg/m<sup>3</sup> och approximativ vågutbredningshastighet  $v = 5300$  m/s. Salvornas håldiameter var  $\phi 48$  mm i kontur, hjälpare och botten. Strossen hade  $\phi 54$  mm. Hålen var fulladdade med ett så kallat SSE-sprängämne (Site Sensitised Emulsion) med densitet  $\rho = 993$  kg/m<sup>3</sup> och en approximativ detonationshastighet  $VOD = 4500$  m/s.

Salvornas ytor var ca 120 m<sup>2</sup> med en bredd av ca 15 m. PPV-värdena plockades huvudsakligen från spränghål som detonerat under salvornas tidigare skeden (ca 0-1 s). Någon exakt identifiering av de spränghål som genererat de använda PPV-värdena var inte möjlig. Utsorteringen av användbara accelerationssignaler baserades huvudsakligen på visuell tolkning och integrerbarhet.

För den slutliga uppskattningen av PPV (medellinjen med regressionsanalys) i Södra Länkens tunnelvägg valdes en modifierad form av dämpningslagen (2). Detta beror främst på att det beräknade trycket  $P_h$  (avsnitt 17) i lagens ursprungliga form ger en överdriven dämpning  $I$  (jämför linje 1 och 2, diagram 5).

Den slutliga maximala och kanske mest praktiska nivån på avstånden  $R$  har bedömts utifrån maximala PPV-R. Denna visas med linjen  $PPV=80-1,5R$  (diagram 7 och 8).

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  $\frac{1}{4}$  av salvornas bredd. Detta beror på att en exakt identifiering av spränghål – PPV-värden inte var möjlig och att därför ett linjärt avståndet från en punkt på salvans front vid väggen till mätpunkterna användes. Avstånden (diagram 5, 6, 7 och 8) är alltså utmed en mätprofil 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 bilderna 11 och 12) 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 använts på avstånden 5-50 meter.

Den slutliga analysen visar för det första att de i Södra Länken uppmätta värdena är lägre än 80 mm/s i någon komponentriktning. För det andra är värdena lägre på korta avstånd än prognoserna baserade på mätningar i LKABs Kirunagruva.

## 20 Slutsats

Det uppsatta gränsvärdet 150 mm/s på 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 och alltså genererar något högre PPV-värden i mätpunkterna än de här framtagna förutsatt att sprängämne och håldiameter är den samma. Dels kommer samtidig initiering att kunna ge högre värden än de här redovisade förutsatt att vibrationerna samverkar.

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.

## 21 Fortsatt arbete

Detta projekt har inte alls behandlat frågor om gränsvärdet och skador på sprutbetongen utan endast avsett att kartlägga typiska vibrationsnivåer på olika avstånd från en avancerande tunnelfront. 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 (Ansell, 1999).

## 22 Erkännande

Projektet har genomförts inom ramen för SveBeFos forskningsprogram med kompletterande finansiering från Vägverket och Selmer Anläggning. Följande personer har bidragit i planering och genomförande; Tommy Ellison (initiativtagare till projektet), Magnus Gunnarsson, Hans Helle, Bo Karlsson, Arild Melchiorsen, Michael Myhré, Roland Nyqvist, Bosse Persson och Mats Tenne.

## 23 Referenser

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

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

Bjarnholt G & Skalare H 1981: Instrumenterad bergsprängning –inledande försök i betongblock, *SveDeFo rapport DS 1981:16*, Stockholm.

Hagimori K, Terada M, Ouchterlony F, Furukawa K och Nakagawa K, 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.

Holmberg R & Persson P A, 1980: Design of tunnel perimeter blasthole patterns to prevent rock damage, *Trans Inst Mining and Metallurgy vol. A, pp 37 – 70*, London.

Hustrulid W, Bennet R, Ashland F and Lenjani M, 1992: A new method for predicting the extent of the blast damage zone, *Proc. Blasting Conference, paper no. 3*, Nitro Nobel, Gyttorp.

Nie S, Deng J och Ouchterlony F, 2000: Expansionsarbete av ett emulsionssprängämne i borrhål – mätning och simulering, *SveBeFo Rapport 48 sid. 14*, Stockholm.

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

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.

## 24 Bilagor

<b>Mätning 2</b>				
Borrhålsnr. eller salvnr.	X-koord	Y-koord.	Avstånd från salva 97 (m)	Avstånd mellan bh (m)
Salva 97				
Punkt vänster front	75279,000	102424,000		
Enligt Intelicad 2000	75290,000	102419,000		
Bh-7	75296,229	102428,805	11,6	
Bh-6	75298,825	102432,870	16,4	4,8
Bh-5	75301,096	102437,236	21,3	4,9
Bh-4	75303,825	102441,524	26,4	5,1
Bh-3	75306,308	102445,804	31,4	4,9
Bh-2	75308,729	102450,152	36,3	5,0
Bh-1	75314,055	102458,584	46,3	10,0

<b>Mätning 3</b>				
Borrhålsnr eller salvnr	X-koord	Y-koord.	Avstånd från salva 98 (m)	Avstånd mellan bh (m)
Salva 98	75276	102420		
Enligt Intelicad 2000	75287,1	102413,9		
Bh-9	75290,385	102417,967	5,2	
Bh-8	75292,389	102422,179	9,8	4,7
Bh-7	75296,229	102428,805	17,5	7,7
Bh-6	75298,825	102432,870	22,3	4,8
Bh-5	75301,096	102437,236	27,2	4,9
Bh-4	75303,825	102441,524	32,3	5,1
Bh-3				
Bh-2	75308,729	102450,152	42,2	9,9
Bh-1				



<b>Mätning 5</b>				
Borrhålsnr eller salvnr	X-koord	Y-koord.	Avstånd från salva 100 (m)	Avstånd mellan bh (m)
Salva 100	75269,048	102411,016		
Enligt Intelicad 2000	752281,1	102404,3		
Bh-11	75285,046	102409,152	6,3	
Bh-10	75287,366	102413,705	11,3	5,1
Bh-9	75290,385	102417,967	16,5	5,2
Bh-8	75292,389	102422,179	21,1	4,7
Bh-7	75296,229	102428,805	28,8	7,7
Bh-6	75298,825	102432,870	33,6	4,8
Bh-5				
Bh-4				
Bh-3	75306,308	102445,804	48,6	14,9
Bh-2				
Bh-1				

<b>Mätning 6</b>				
Borrhålsnr eller salvnr	X-koord	Y-koord.	Avstånd från salva 101 (m)	Avstånd mellan bh (m)
Salva 101	75266,511	102406,707		
Enligt Intelicad 2000	75278,4	102399,5		
Bh-11	75285,046	102409,152	11,7	
Bh-10	75287,366	102413,705	16,8	5,1
Bh-9	75290,385	102417,967	22,0	5,2
Bh-8	75292,389	102422,179	26,6	4,7
Bh-7	75296,229	102428,805	34,3	7,7
Bh-6	75298,825	102432,870	39,1	4,8
Bh-5				
Bh-4				
Bh-3	75306,308	102445,804	54,1	14,9
Bh-2				
Bh-1				

Tekniska data för accelerometrar  
Kistler 8704B5000  
Mättningsområde  $\pm 5000g$   
Känslighet, 1,001 mV/g  
Resonans frekvens, 54.0 kHz

## Mätning 2

Tid i salvan	Mätning	Kanal	Avstånd (m)	Hastighet (mm/s) längs tunneln	Hastighet (mm/s) tvärs tunneln	Offset (m/s <sup>2</sup> )
Första	2	1	11,6		13	16
0 ms	2	2	11,6	17		16
	2	3	16,4		6	18
	2	4	16,4			10
	2	5	21,3		6	6
	2	6	21,3	2		13
	2	7	26,4		7	11
	2	8	26,4	4		8
	2	9	31,4		4	6
	2	10	31,4	7		10
	2	11	36,3		5	26
	2	12	36,3	8		19
	2	13	46,3		3	18
	2	14	46,3	5		23
Tredje	2	1	11,6		19	10
108 ms	2	2	11,6	16		21
	2	3	16,4		7	16
	2	4	16,4	16		3
	2	5	21,3		9	-2
	2	6	21,3	23		7
	2	7	26,4			6
	2	8	26,4			12
	2	9	31,4		4	16
	2	10	31,4	7		14
	2	11	36,3		5	26
	2	12	36,3	8		14
	2	13	46,3		4	15
	2	14	46,3	6		26

Sjätte	2	1	11,6		8	18
259 ms	2	2	11,6	10		9
	2	3	16,4		5	13
	2	4	16,4	8		10
	2	5	21,3		4	5
	2	6	21,3	14		15
	2	7	26,4		2	10
	2	8	26,4	4		8
	2	9	31,4		1	4
	2	10	31,4	5		6
	2	11	36,3		5	22
	2	12	36,3	7		15
	2	13	46,3		3	17
	2	14	46,3	4		23

## Mätning 3

Tid i salvan	Mätning	Kanal	Avstånd (m)	Hastighet (mm/s) längs tunneln	Hastighet (mm/s) tvärs tunneln	Offset (m/s <sup>2</sup> )
Första	3	1	5,2		1	11
0 ms		2	5,2	26		12
		3	9,8		12	14
		4	9,8	18		4
		5	17,5		8	3
		6	17,5	10		8
		7	22,3		3	9
		8	22,3	8		10
		9	27,2		4	10
		10	27,2	12		13
		11	32,3		1	21
		12	32,3	3		15
		13	42,2		3	11
		14	42,2	1		21
Fjärde	3	1	5,2		1	11
100 ms		2	5,2	31		11
		3	9,8		13	17
		4	9,8	23		5
		5	17,5		10	2
		6	17,5	12		6
		7	22,3		3	9
		8	22,3	9		9
		9	27,2		4	11
		10	27,2	14		14
		11	32,3		2	20
		12	32,3	6		14
		13	42,2		3	11
		14	42,2	2		20

Fil: S13-1

Fil: S13-3

254 ms	3	1	5,2		1		Fil: sl3-254
		2	5,2	41			
		3	9,8		17		
		4	9,8	24			
		5	17,5		16		
		6	17,5	19			
		7	22,3		6		
		8	22,3	15			
		9	27,2		8		
		10	27,2	22			
		11	32,3		4		Svagt utslag
		12	32,3	11			
		13	42,2		4		
		14	42,2				syns ej
691 ms	3	1	5,2		4		
		2	5,2	65			
		3	9,8		22		
		4	9,8			ingen reg	
		5	17,5		21		
		6	17,5	25			
		7	22,3		10		
		8	22,3	19			
		9	27,2		3		
		10	27,2	16			
		11	32,3				syns ej
		12	32,3				
		13	42,2				Störning
		14	42,2				Störning
938 ms	3	1	5,2		6		Fil: sl3-938
Bandtid:		2	5,2	72			
970 ms		3	9,8		19		
		4	9,8			ingen reg	
		5	17,5		26		
		6	17,5	41			
		7	22,3		14		
		8	22,3	26			
		9	27,2		10		
		10	27,2	34			
		11	32,3		5		
		12	32,3	12			
		13	42,2		14		
		14	42,2	0			

1213 ms	3	1	5,2		10		Fil: sl31213
bandtid:		2	5,2			ingen reg	
1245 ms		3	9,8		56		
		4	9,8			ingen reg	
		5	17,5		32		
		6	17,5			ingen reg	
		7	22,3		19		
		8	22,3	28			
		9	27,2			ingen reg	
		10	27,2			ingen reg	
		11	32,3			ingen reg	
		12	32,3	13			
		13	42,2			ingen reg	
		14	42,2			ingen reg	
1255 ms	3	1	5,2		11		Fil: sl31255
Bandtid:		2	5,2			ingen reg	
1287 ms		3	9,8		50		
		4	9,8			ingen reg	
		5	17,5		26		
		6	17,5			ingen reg	
		7	22,3		15		
		8	22,3	24			
		9	27,2			ingen reg	
		10	27,2			ingen reg	
		11	32,3			ingen reg	
		12	32,3	9			
		13	42,2			ingen reg	
		14	42,2			ingen reg	

## Mätning 5, 00-03-21

Tid i salvan	Mätning	Kanal	Avstånd (m)	Hastighet (mm/s) längs tunneln	Hastighet (mm/s) tvärs tunneln	Offset (m/s <sup>2</sup> )		
Första	5	1	6,3			Ej inkopplad pga	Fil: S15-1	
0 ms	5	2	6,3			att pvc-röret var löst		
	5	3	11,3		0	10	(rätt = - 15)	
	5	4	11,3	15		4		
	5	5	16,5		0	0		
	5	6	16,5					
	5	7	21,1		8	5		
	5	8	21,1	9		7		
	5	9	28,8		5	5		
	5	10	28,8	4		6		
	5	11	33,6		2	18		
	5	12	33,6	5		13		
	5	13	48,6			11		
	5	14	48,6			17		
Tredje	5	1	6,3			Ej inkopplad p.g.a.		Fil: S15-3
	5	2	6,3			att pvc-röret var löst		
	5	3	11,3		1	15 ?	(rätt = - 11) (rätt = - 2)	
	5	4	11,3	11		11 ?		
	5	5	16,5		2	-2		
	5	6	16,5					
	5	7	21,1		6	7		
	5	8	21,1	8		10		
	5	9	28,8		4	10		
	5	10	28,8	3		8		
	5	11	33,6		1	20		
	5	12	33,6	4		10		
	5	13	48,6			syns ej		
	5	14	48,6			syns ej		
Sjätte	5	1	6,3			Ej inkopplad p.g.a.		Fil: S15-6
	5	2	6,3			att pvc-röret var löst		
	5	3	11,3		3	12	(rätt = - 10) (rätt = - 4)	
	5	4	11,3	10		0		
	5	5	16,5		4	0		



	5	6	16,5			
	5	7	21,1		6	8
	5	8	21,1	8		8
	5	9	28,8		4	6
	5	10	28,8	4		8
	5	11	33,6		3	20
	5	12	33,6	6		15
	5	13	48,6			syns ej
	5	14	48,6			syns ej
6107 ms	5	1	6,3			ingen reg
Bandtid:	5	2	6,3			ingen reg
6220 ms	5	3	11,3			ingen reg
	5	4	11,3	25		-2
	5	5	16,5		16	-5
	5	6	16,5			ingen reg
	5	7	21,1		38	12
	5	8	21,1	48		7
	5	9	28,8		26	8
	5	10	28,8			ingen reg
	5	11	33,6			ingen reg
	5	12	33,6			ingen reg
	5	13	48,6		6	12
	5	14	48,6	4		19
6200 ms	5	1	6,3			ingen reg
Bandtid:	5	2	6,3			ingen reg
6310 ms	5	3	11,3			ingen reg
	5	4	11,3	50		-1
	5	5	16,5		16	0
	5	6	16,5			ingen reg
	5	7	21,1		34	8
	5	8	21,1	44		5
	5	9	28,8		23	5
	5	10	28,8			ingen reg
	5	11	33,6			ingen reg
	5	12	33,6			ingen reg
	5	13	48,6		5	18
	5	14	48,6	8		26

Fil: sl56

Band 2, id 34

Längd: 7 s

(rätt = - 25)

Adress: 0.3 s

(rätt = - 4)

(rätt = - 50)

(rätt = - 8)

## Mätning 6

Tid i salvan	Mätning	Kanal	Avstånd (m)	Hastighet (mm/s) längs tunneln	Hastighet (mm/s) tvärs tunneln	Offset (m/s <sup>2</sup> )
Första	6	1	11,7		10	20
Första	6	2	11,7	28		-2
Första	6	3	16,8			
Första	6	4	16,8			
Första	6	5	22,0		0	0
Första	6	6	22,0	15		16
Första	6	7	26,6		9	0
Första	6	8	26,6	12		8
Första	6	9	34,3		3	2
Första	6	10	34,3	5		6
Första	6	11	39,1		3	16
Första	6	12	39,1	4		24
Första	6	13	54,1			syns ej
Första	6	14	54,1			syns ej
Efter	6	1	11,7			
160 ms	6	2	11,7			
från	6	3	16,8			syns ej
första	6	4	16,8			syns ej
	6	5	22,0		0	0
	6	6	22,0	7		16
	6	7	26,6		4	-2
	6	8	26,6	7		7
	6	9	34,3		0	8
	6	10	34,3	1		9
	6	11	39,1			syns ej
	6	12	39,1			syns ej
	6	13	54,1			syns ej
	6	14	54,1			syns ej

Fil: Sl6-1

Fil: Sl6-4

Efter	6	1	11,7			Ingen justering gjord	Fil: S16-6?
260 ms	6	2	11,7			Ingen justering gjord	
från	6	3	16,8			Ingen justering gjord	
första	6	4	16,8			Ingen justering gjord	
	6	5	22,0		0	Ingen justering gjord	
	6	6	22,0	9		8	
	6	7	26,6		3	-3	
	6	8	26,6	8		5	
	6	9	34,3		3	29	
	6	10	34,3	3		23	
	6	11	39,1		1	20	
	6	12	39,1	6		7	
	6	13	54,1		0	0	
	6	14	54,1			?	