© 2000 Svenska Bergteknikföreningen och författare

TRAFIKERADE BERGTUNNLAR –RIKTVÄRDEN FÖR SPRÄNGNINGSINDUCERADE VIBRATIONER

Författare: Sven-Erik Johansson, Nitro Consult AB
Anders Fredriksson, Golder Grundteknik AB
Kennert Röshoff, BergByggKonsult AB

Sammanfattning

Vägverket Region Stockholm och SL Bansystem har gemensamt sponsrat en utredning för att ta fram riktvärden för sprängningsinducerade vibrationer i trafikerade bergtunnlar. Syftet med utredningen har varit att fastställa riktvärden som är giltiga för olika typer av bergtunnlar.

Fältförsöken omfattade provsprängningar i inspända borrhål rakt ovanför en T-banetunneln samtidigt som vibrationerna registrerades i ett flertal mätpunkter i tunnelkonturen. Före, under och efter försöken gjordes geohydrologiska och seismiska mätningar i bergmassan runt konturen samt konvergensmätning och bomknackning av bergkonturen. Sprängningarna genomfördes med successivt ökande vibrationsnivå i närmaste mätpunkt.

Resultatet av provsprängningarna har använts för att ta fram en beräkningsformel för riktvärden där hänsyn tas till tunnelstatus. Tunnelstatus beskrivs med ett antal faktorer där bergmassans kvalité, typ av bergförstärkning, ytförstärkningens status bland annat ingår.

Om tunnelstatusen efter särskild undersökning kan visas vara bra finns möjlighet att tillämpa högre gränsvärden än vad som i dag är brukligt vid sprängning intill trafikerade bergtunnlar.

Bakgrund

I samband med utsprängning av arbetstunnlarna för de planerade vägtunnlar i projektet Norra Länken vid Roslagstull passerade arbetstunnlarna strax ovanför Tunnelbanan. Ett flertal liknande korsningar mellan väg- och befintliga tågtunnlar planeras i samband med utbyggnaden av Stockholms trafikleder. Vid passagen ovan Tunnelbanan vid Roslagstull blev entreprenören tvungen att kraftigt reducera indriften för att inte överskrida satta vibrationsnivåer för Tunnelbanan.

SL Bansystem har sedan lång tid tillämpat restriktioner för uppmätta vibrationer och accelerationer alstrade vid sprängning. För bergytor är restriktionerna indelade i två klas-

© 2000 Svenska Bergteknikföreningen och författare

ser. Vibrationsnivår lägre än 10 mm/s innebär att tågtrafiken kan passera under sprängning medan värden mellan 10-30 mm/s medför tågstopp samt efterföljande besiktning av tunnelstatus. Om svängningshastigheten överstiger 30 mm/s kan SL Bansystem kräva stopp för fortsatt sprängning tills entreprenören utrett orsak till övertramp samt presenterat vilka åtgärder som skall vidtagas för att innehålla kraven.

Med erfarenheter från bl.a. Roslagstull ställde Vägverket 1997-01-08 en skrivelse till SL Bansystem där Vägverket framförde förslag till omprövning av gällande vibrationsrestriktioner. Skrivelsen ledde efter hand fram till en gemensam utredning för att ta fram riktvärden för sprängningsinducerade vibrationer i trafikerade bergtunnlar.
Syftet med utredningen har varit att fastställa riktvärden som är giltiga för olika typer av trafikerade bergtunnlar baserad på uppmätta vibrationsvärden alstrade av sprängning som ej är skadlig för en befintlig bergtunnel och dess bergförstärkning. Resultatet av undersökningarna i projektet har resulterat i två rapporter (1) och (2). Detta föredrag utgör en sammandrag av dessa.

Organisation

Projektet organiserades så att huvudmännen, SL Bansystem AB och Vägverket Region Stockholm, bildade projektets ledningsgrupp. I denna ingick från början

SL Bansystem AB	Vägverket Region Stockholm
Göran Nyberg	Per Olof Sahlström
Kenneth Skoglöf	Per Olof Karlsson
Jan Lundin	Mats Friberger

Under projektets genomförande har Vägverket ersatt personerna i ledningsgruppen med:

Björn Terstad
Åke Svensson
Bo Karlsson
Ulrika Hamberg
Karl-Åke Johansson

Ledningsgruppen utsåg en arbetsgrupp vilken skulle ansvara för projektets genomförande. Arbetsgruppen bestod av följande personer:

Anders Fredriksson	Golder-Grundteknik
Sven-Erik Johansson	Nitro Consult
Kennert Röshoff	BergByggKonsult

Fältarbetet har i huvudsak genomförts av en verkställande grupp bestående av:

Gösta Bodén	Nitro Consult
Gösta Rundqvist	Nitro Consult

© 2000 Svenska Bergteknikföreningen och författare

Stefan Bognar — Golder-Grundteknik
Alf Nilsson — BergByggKonsult

I projektet förekommande entreprenadarbeten har utförts av Stockholm Entreprenad under ledning av Hans Alneskog och Nils Niemi.

Målsättning

Målsättningen med Hjulsta-projektet var att genom kontrollerade fältförsök framtaga riktvärden för sprängningsinducerade vibrationer för bergförlagda trafiktunnlar eller för andra befintliga tunnlar.

I arbetet studerades påverkan på bergmassans status avseende mekaniska och hydrauliska egenskaper samt påverkan och status på befintlig bergförstärkning särskilt sprutbetong. Målet har varit att analysera vibrationernas påverkan på tunnelstatus både på kort och lång sikt.

SL Bansystem har dessutom gjort kompletterande studier avseende vibrationernas påverkan på installationer i Tunnelbanan. Arbetet har utförts efter ett särskilt program.

Program

Under hösten 1997 och våren 1998 utarbetade Arbetsgruppen ett program för genomförande samt undersökte platser för fältförsöken. Slutligt val för dessa blev uppställningstunneln väster om Hjulsta T-banestation, en tunnel med tre parallella spår, en spännvidd av 12.2 m och höjd ca 6 m. Bergtäckningen varierar något och är ca 13-14 m. Ett avsnitt på ca 50 m av tunneln avsattes för testområde.

Fältprogrammet daterat 1998-03-16 godkändes av ledningsgruppen och fältarbetet startade i april 1998.

En sammanfattning av utförda undersökningar presenteras i tabell 1.

Alstring av vibrationerna åstadkoms genom sprängning i inspända borrhål från markytan. Borrhålen placerades i 5 tvärsektioner med tre borrhål i varje sektion. Avståndet mellan sektionerna valdes till 5 m. Sprängning utfördes med ett borrhål i taget med successivt ökad laddningsmängd för varje borrhål. Laddningen detonerade ca 8 m ovan tunneltaket.

© 2000 Svenska Bergteknikföreningen och författare

Stefan Bognar — Golder-Grundteknik
Alf Nilsson — BergByggKonsult

I projektet förekommande entreprenadarbeten har utförts av Stockholm Entreprenad under ledning av Hans Alneskog och Nils Niemi.

Målsättning

Målsättningen med Hjulsta-projektet var att genom kontrollerade fältförsök framtaga riktvärden för sprängningsinducerade vibrationer för bergförlagda trafiktunnlar eller för andra befintliga tunnlar.

I arbetet studerades påverkan på bergmassans status avseende mekaniska och hydrauliska egenskaper samt påverkan och status på befintlig bergförstärkning särskilt sprutbetong. Målet har varit att analysera vibrationernas påverkan på tunnelstatus både på kort och lång sikt.

SL Bansystem har dessutom gjort kompletterande studier avseende vibrationernas påverkan på installationer i Tunnelbanan. Arbetet har utförts efter ett särskilt program.

Program

Under hösten 1997 och våren 1998 utarbetade Arbetsgruppen ett program för genomförande samt undersökte platser för fältförsöken. Slutligt val för dessa blev uppställningstunneln väster om Hjulsta T-banestation, en tunnel med tre parallella spår, en spännvidd av 12.2 m och höjd ca 6 m. Bergtäckningen varierar något och är ca 13-14 m. Ett avsnitt på ca 50 m av tunneln avsattes för testområde.

Fältprogrammet daterat 1998-03-16 godkändes av ledningsgruppen och fältarbetet startade i april 1998.

En sammanfattning av utförda undersökningar presenteras i tabell 1.

Alstring av vibrationerna åstadkoms genom sprängning i inspända borrhål från markytan. Borrhålen placerades i 5 tvärsektioner med tre borrhål i varje sektion. Avståndet mellan sektionerna valdes till 5 m. Sprängning utfördes med ett borrhål i taget med successivt ökad laddningsmängd för varje borrhål. Laddningen detonerade ca 8 m ovan tunneltaket.

© 2000 Svenska Bergteknikföreningen och författare

Tabell 1. Sammanfattning av gjorda undersökningar samt metod

Metod för undersökning	Undersökning av Bergmassans karaktär	Grundvatten-förhållanden	Förstärkning	Deformationer	Sprängskador
Besiktningar på ytan	Okulär besiktning, Kartering	Gvy läge i borrhål från markytan	Bomknackning	Okulär besiktning	Bomknack-ning
Vattenförlust-mätning, Falling head		Mätning från mar-kytan och inne i tunnel			
Geofysiska metoder. Seismik	TSP-mätning P-vågs mätning				TSP-mätning P-vågs-mätning
Deformations-mätning	Konvergens-mätning			Konvergens-mätning	
Vidhäftning sprutbetong/ berg			Utdragstest på sprutbetong		

Problemställning

Vid uttag av en tunnel eller bergrum påverkas omgivande berg och anläggningar på olika sätt dels sker en statisk påverkan på grund av att berget avlägsnas och dels en dynamisk påverkan av själva uttagsmetoden dvs sprängningen. Den statiska påverkan behandlas ej här.

Dynamisk påverkan

- Kring den sprängda tunneln förändras bergmassans egenskaper på grund av den skadezon (uppsprickning) som sker kring spränghålen.
- Bergmassan och omgivningen utsätts för vibrationer som kan förändra egenskaperna ge upphov till uppsprickning samt lastväxlingar som kan ge permanenta deformationer.
- Vibrationerna ger en lastökning som kan orsaka utfall av block eller sprutbetong med dålig vidhäftning.

När man skall studera effekten av uttag av en tunnel på omgivande berg, tunnlar eller konstruktioner måste effekter av dessa faktorer studeras var för sig. Vissa av dessa är svåra att särskilja t ex kan flera av faktorerna ge en uppsprickning av bergmassan.

© 2000 Svenska Bergteknikföreningen och författare

Påverkan från vibrationer alstrade av sprängning

Sprängningar i berg alstrar vibrationer som påverkar själva mediet, i vilket sprängningen sker. Vibrationerna kan dels påverka själva bergmassan så att dess egenskaper förändras vad gäller hållfasthet, elasticitetsmodul och hydraulisk konduktivitet. Dels kan vibrationerna öka belastningen på bergblock och sprutbetong så att utstötning kan ske.

Begränsningar med hänsyn till installationer

Dagens trafikerade tunnlar och berganläggningar är ofta försedda med utrustningar som är mer eller mindre känsliga för vibrationer. För att kunna garantera dessa utrustningars ostörda funktion så gäller de gränsvärden som brukaren/tillverkaren fastställt. Då dessa gränsvärden kan vara mycket lägre än gränsvärdet för själva tunneln kan detta innebära ytterligare begränsningar när det gäller sprängningsarbetenas utförande.

Alstring och registrering av vibrationer

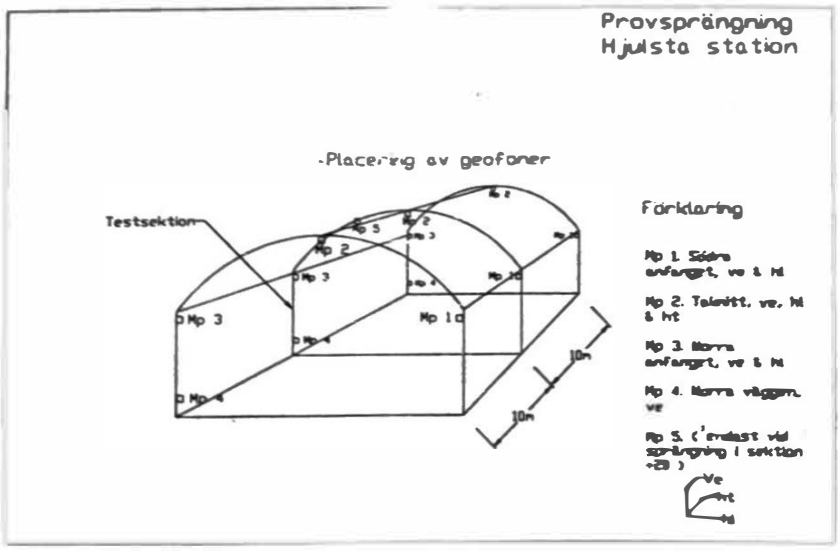
Sprängningarna vid fältförsöken i Hjulsta utfördes med slangladdningar av typ Dynamex M och Emulite i inspända borrhål utan fritt utslag åt något håll. Håldjupet varierande mellan 3.7 – 10.2 m för borrhålen i provsektionerna ovanför tunneln. Hela tiden var avståndet mellan borrhålsbotten och tunneln ca 8 m.

Provsprängningarna för testerna på installationerna utfördes i ca 22 m djupa borrhål borrade ca 5 m utanför närmaste bergvägg.

Laddningsmängden ökades successivt från 0,3 kg till som mest 1,8 kg.

Vibrationsmätning utfördes i mätpunkterna enligt nedan (fig. 1). Mätpunkterna på norra väggen valdes som referensmätpunkter för att göra jämförelser med de mätpunkter som gav de högsta vibrationerna.

Figur 1. Placering av mätpunkter i tunneln



© 2000 Svenska Bergteknikföreningen och författare

Registrerade vibrationer i bergtunnel

En sammanställning av de högsta registrerade vibrationerna i varje provsektion redovisas i tabell 2. Registreringarna har gjorts med 1000 Hz frekvensfilter i instrumentet och sedan filtrerats vid analys med 315 Hz lågpassfilter (LP).

Tabell 2. Högsta svängningshastigheterna för varje provsektion. Värden inom parentes har lågpassfiltrerats med 315 Hz

Sektion	00	05	10	15	20
Laddningsmängd, kg	0,75	1,0	1,5	1,8	1,1
Mätpunkt	Svängningshastighet, mm/s				
1, ve – södra anfanget	5,3 (4,9)	12,0 (11,6)	19,0 (15,3)	29,5 (15,1)	28,5 (21,7)
1, hl	6,8 (6,0)	9,5 (8,7)	16,5 (13,6)	29,5 (20,6)	42,8 (23,8)
2, ve – takmitt	35,5 (22,7)	55,3 (30,3)	77,5 (37,8)	78,5 (34,4)	***108,8 (88,3)***
2, hl	35,5 (20,6)	29,3 (19,3)	***99,8 (49,1)***	154 (92,4)	38,3 (35,0)
2, ht	19,4 (10,8)	23,0 (18,7)	31,5 (16,9)	93,5 (23,1)	64,3 (56,5)
3, ve – norra anfanget	***60,0 (31,1)***	***68,5 (60,5)***	90,3 (47,9)	***164,0 (96,7)***	14,0 (9,7)
3, hl	25,3 (12,0)	25,3 (12,2)	43,0 (21,8)	84,3 (40,1)	27,5 (12,0)
4, ve – norra väggen	35,5 (18,9)	54,3 (32,3)	32,0 (22,4)	105,0 (60,8)	9,3 (7,4)

Anmärkning: ve = vertikalt, hl = horisontellt vinkelrätt tunnelns längdriktning, ht = horisontellt parallellt tunnelns längdriktning

I provsektion 15 registrerades den högsta svängningshastigheten, 164 mm/s (LP filtrerat, 96,7 mm/s) vid en laddningsmängd av 1,8 kg på ett avstånd av 8 m. Den högsta vibrationen i nästan varje provskott registrerades i vertikal riktning.

Vibrationernas storlek längs tunnelkonturen

Innan fältförsöket påbörjades gjordes numeriska beräkningar av vibrationsamplituden längs en tunnelkontur vid sprängning på olika ställen i förhållande till tunneln. Resultatet av dessa analyser finns redovisade i rapporten "Analys av dynamisk belastning på befintlig tunnel" (3). För en sprängning rakt över tunneln är förhållandet mellan den största svängningshastigheten i vertikalled och referensvärdet mitt på väggen 4,9, se figur 2. Om sprängplatsen förflyttas till sidan av tunneln men på samma nivå över tunnel går detta förhållande mot 1,0, dvs största svängningshastigheten fås i väggen.

Uppmätta maximala värden på svängningshastigheten i förhållande till mätningarna i referensmätpunkten på väggen, vid sprängning mitt över tunneln, var i fältförsöken 1,6 – 16,4 gånger. Medelvärdet på förhållandet är 7,9. Det uppmätta medelvärdet ligger något högre än resultatet från de numeriska beräkningarna.

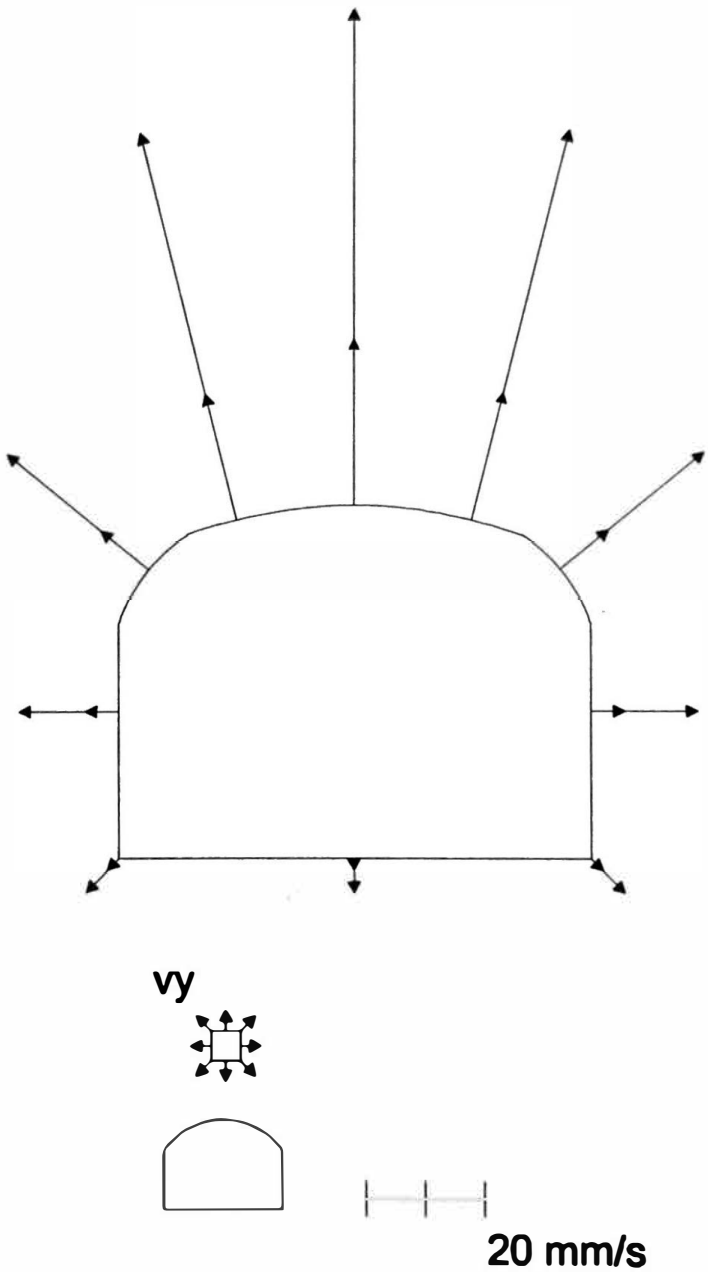
Vid sprängning mitt över anfanget varierar förhållandet mellan mätpunkten med högst svängningshastighet och referensmätpunkten i väggen mellan 1,0 – 2,4. Medelvärdet på

© 2000 Svenska Bergteknikföreningen och författare

förhållandet är 1,7. Ibland fås högsta svängningshastigheten i anfanget och ibland inträffar den i väggen.

Vid sprängning strax utanför konturen varierar förhållandet mellan 1,0 – 4,1. Medelvärdet är 2,2. Punkten där största vibrationen uppmätts vid dessa sprängningar är ibland i väggen och ibland i mätpunkten i anfanget.

Mätningarna visar att det är mycket viktigt hur mätgivarna placeras i förhållande till sprängningen. Mätningarna ger samma trend var de största vibrationerna uppträder som de utförda numeriska analyserna.



Figur 2. Beräknade vertikala svängningshastigheter kring tunnelkonturen vid sprängning mitt över tunneln.

© 2000 Svenska Bergteknikföreningen och författare

Installationer/utrustning

Tester utfördes på installationer/utrustning som används i Tunnelbanan. Mätning borde helst ske i relähusmiljö för att mätresultatet skall bli så lika verkligheten som möjligt. I detta fall kunde detta ej ske. För att efterlikna relähusmiljö göts ett betongfundament på rensat berg. Detta fundament motsvarar golvplattan i ett relähus. Två relästativ monterades på gängse sätt. För att dämpa vibrationer används vanligen en metod där relästativet ställs på en hårdgummimatta, typ novibramatta. För att prova funktionen av denna metod monterades det ena relästativet på gummimatta medan det andra monterades direkt på betongfundamentet. Vardera stativ bestyckades med ett antal reläer för att få en relevant vikt. Någon utvärdering av signalreläernas funktion vid olika vibrationsnivåer har ej gjorts ur fältförsöken utan provades vid Statens Anläggningsprovning.

På de två relästativen och ett teleskåp som monterats på betongfundament utfördes vibrationsmätningar i sammanlagt 7 mätpunkter. Vibrationsmätningar utfördes också i en mätpunkt på en kabelstege fastmonterad i berget och i en mätpunkt på bergväggen närmast sprängningarna.

I samtliga mätpunkter registrerades accelerationen. Provsprängningarna utfördes i djupa hål med botten på samma nivå som grundläggningsnivån för betongfundamentet. Avståndet i sidled var 4,5 – 5,5 m.

Resultat

De högsta accelerationerna registrerades i närmaste bergvägg, som högst var accelerationen 188,0 m/s^2 (18,8 g). På installationerna var vibrationerna betydligt lägre än i bergväggen. Dämpningsgraden varierar dock i olika delar av installationerna och mellan olika provskott.

I tabell 3 nedan redovisas en sammanställning av max och min accelerationsvärdena i procent av den högsta registreringen (i bergväggen) i varje provskott.

Tabell 3. Sammanställning av min respektive max värde i procent av max värdet i närmaste bergvägg för provsprängningar i djuphålen

Placering Mätpunkt	Acceleration i % av max värde i bergväggen	
	Min	Max
Betongfundament	21	96
Reläskåp 1 nedre del 2	9	22
Reläskåp 1 övre del 3	5	8
Reläskåp 2, nedre del 4	11	26
Reläskåp 2 övre del 5	6	31
Teleskåp, nedre del	10	24
Teleskåp, övre del	7	16
Kabelstege	8	23

© 2000 Svenska Bergteknikföreningen och författare

På reläskåpen där gränsvärdet som tillämpas idag är 15 m/s^2 (1.5 g) var accelerationen 5 till 31 % av registreringen på bergväggen. Det ger en dämpning av vibrationerna med 69 – 95 %. Accelerationen i närmaste bergvägg kunde ha varit 3 till 20 gånger högre än på relästativet, det vill säga 45 m/s^2 till 300 m/s^2 utan att gränsvärdet överskridits. Resultatet visar också att vibrationsisoleringen med hårdgummimatta inte absorberar vibrationerna så effektivt som är önskvärt.

Tunnelstatus i korta perspektivet

Befintliga tunnlars och bergrums stabilitet i samband med sprängningsalstrade vibrationer kan ändras på olika sätt, beroende av lokala förutsättningar. Fältförsöken genomförda i Hjulsta möjliggör en tämligen noggrann analys av påverkan i det korta perspektivet.

Bergstabiliteten i tunneln

Den aktuella tunnelsträckans stabilitet har övervakats för att kunna konstatera eventuella ändringar i bergrummets totalstabilitet respektive ytstabilitet.

Totalstabiliteten

Tunnelsträckans totalstabilitet har kontrollerats via:

- ytseismiska mätningar i anfang. Mätning av gånghastigheten ger utslag om bergmassans elastiska egenskaper förändras. En uppsprickning av bergmassan medför att bergmassans elasticitetsmodul minskar.
- mätning av gånghastighet i tunneltak med TSP (4). Mätningen ger utslag om bergmassans elastiska egenskaper förändras mot djupet i bergmassan.
- konvergensmätningar. Mäter de kvarstående deformationerna.

Ytseismiska mätningar

Bearbetning av de ytseismiska mätningar visar att ytvågornas gånghastighet ej ändrats nämnvärt under sprängningarnas gång. Detta innebär att ändringar som har påverkat bergmassans elastiska egenskaper längs tunnelperiferin vid anfanget och strax utanför är försumbara.

Mätning av gånghastighet i tunneltak (TSP)

Mätmetodiken har möjliggjort studier av bergmassans beteende på ca 1,0 - 2,5 ms djup utanför tunnelkonturen. Bearbetning av mätningarna visar en liknande tendens som de ytseismiska mätningar, nämligen att ändringarna i bergmassans elastiska egenskaper är så små att det bedöms att de ej påverkar tunnelns totalstabilitet.

© 2000 Svenska Bergteknikföreningen och författare

De ytseismiska mätningarna och mätning av gånghastigheten i tunneltak visar inte på några förändringar av bergmassans elastiska egenskaper som har påverkat tunnelstabiliteten.

Konvergensmätningar

Utförda konvergensmätningar visar en trend som uppenbarligen kan förknippas med terrängens lutningsförhållanden och de genomförda sprängningarna. Dessa två faktorer har på ett avgörande sätt påverkat deformationsbilderna. Tendensen är den att hjässan häver sig i de sektioner där sprängning bara har skett över tunneln i hjässan, över anfang och strax utanför anfanget. Förskjutningen har samma riktning som bergöverytans lutning.

I den sektion där sprängning även skett i borrhål som går ned under tunnelbotten har däremot hjässan satt sig och den horisontella rörelsen är riktad mot den sida där sprängning under tunnelbotten skett.

De uppmätta permanenta förskjutningarna är små (< 2 mm) och beror troligen på den statiska förändringen av spänningstillståndet kring tunneln som skett när bergmassan kring själva spränghålen spricker upp och därmed fått andra elastiska egenskaper än det övriga berget.

Ytstabilitet

Förändringar i ytstabiliteten har studerats genom bestämning av vidhäftningshållfastheten mellan berg och sprutbetong före och efter sprängning samt bomknackning före och efter sprängning samt kontroll av nedfall i samband med sprängning.

Iakttagna förändringar hos ytstabiliteten

Inga nedfall har inträffat i samband med sprängningarna.

Utförda bomknackningar visar ett tydligt samband mellan storleken av de sprängningsinducerade vibrationerna och förändring av samverkansgraden mellan sprutbetong och berg. Få nya platser med bomma partier har uppstått. De ställen där nya bompartier uppträder är så små att de varit svåra att upptäcka och kan även ha funnits innan sprängningen påbörjades.

De partier som från början varit bomma har utvidgats i storlek.

Vidhäftningsprovningen före och efter sprängning gav ett litet underlag för statistisk bearbetning på grund av den stora spridning som finns hos den uppmätta vidhäftningshållfastheten. En tendens kan dock ses att vidhäftningshållfastheten är lägre efter sprängning än före.

© 2000 Svenska Bergteknikföreningen och författare

Slutsats av kontroll av ytstabilitet är att de spänningsinducerade vibrationerna ger en utvidgning av bomma partier. Nedfall sker troligen när de bomma partierna blivit tillräckligt stora. För att förhindra att bomma partier bildas måste det finnas en viss vidhäftningshållfasthet mellan sprutbetong och berg. Storleken på nödvändig vidhäftningshållfasthet ökar med ökande svängningshastighet.

Tunnelstatus i långa perspektivet

Totalstabiliteten

Provsprängningarna i Hjulsta har med all sannolikhet inte medfört några bestående ändringar i tunnelsträckans stabilitet. För att kontrollera detta kommer kontrollmätning av konvergensmätsträckorna att utföras en tid efter avslutning av fältförsöken.

Ytstabiliteten

Eventuella tidsberoende ändringar i ytstabiliteten p g a vibrationer från sprängning är möjliga i de sprutbetongpartier som haft tvivelaktig vidhäftning från början eller t o m varit bomma. För att kontrollera detta kommer bomknackning att utföras en tid efter avslutade fältförsök.

Grundvatten

Förändringar i bergmassans hydrauliska konduktivitet har övervakats via vattenförlustmätningar. Uppmätta vattenförlustsvärden, v_f, har omvandlats till konduktivitetsvärden med följande formel:

$k=0{,}7 \cdot v_f 10^{-7}$ [m/s] där v_f är angiven i liter/m, min och MPa

Vattenförlustmätningar från markytan

Vattenförlustmätningarna från markytan har utförts med den s k "falling head" metoden. Bearbetning av mätningsresultat visar en ganska entydig tendens, nämligen att bergmassans konduktivitet ökar något i takt med sprängningsfrontens närmande, vilket kan förklaras med att det befintliga spricksystemet luckras upp eller att nya sprickor uppstår som en följd av de inspända laddningarnas effekt. Efter det att sprängningsfronten passerat kan en tydlig minskning noteras. Minskning tenderar att återgå till tillståndet före sprängningsarbetenas början.

Slutsatsen är alltså att sprängningsalstrade vibrationer har temporärt ökat konduktiviteten i sprängplatsens närhet, men effekten var inte långvarig. Förändringarna har dock varit så små att de inte har någon praktisk effekt.

© 2000 Svenska Bergteknikföreningen och författare

Kontrollmätning av bergmassans konduktivitet kommer att utföras en tid efter avslutade fältförsök.

Vattenförlustmätningar i tunneltaket

Vattenförlustmätningar i tunneltak har utförts i fyra sektioner med ca 0,6 Mpa övertryck. Vid nollmätningen var samtliga geohydrologiska hål täta. Efter nollmätningen har tre hål visat sig vara täta vid alla mätningar, medan hålet i sektion 20 visat en viss ökning och sedan minskning av konduktiviteten. Det sistnämnda hålet har kommunikation med en intilliggande dräin och kan därför inte anses som representativt för bergmassan i stort eftersom urspolning av en propp i en befintlig spricka kan ha skett under provningen.

Slutsatsen är att de sprängningsalstrade vibrationer inte har påverkat bergets konduktivitet strax utanför tunnelkonturen.

Förslag till riktvärden

Inledning

Erfarenheterna från projektet Hjulsta har visat att sprängningsalstrade vibrationer ej påverkat den aktuella tunnelsträckans storstabilitet. Kontrollmätningar av vidhäftningshållfastheten mellan berg och sprutbetong har däremot visat att ytstabiliteten försämrats. Denna rapports tidsramar möjliggör dock inte att kartlägga långtidseffekter och den utmattningseffekt som upprepade sprängningar kan medföra.

Beträffande grundvattenförhållanden har konstaterats att de sprängningsalstrade vibrationer ej gett någon permanent förändring av bergmassans konduktivitet kring tunneln.

Styrande faktorer

När man skall bestämma riktvärden för sprängningsalstrade vibrationer delas tunnlarna i två huvudgrupper beroende på förstärkningens verkningssätt.

En huvudgrupp är tunnlar som har en betonginklädnad vilken är dimensionerad att ta all last av överliggande jord och vatten, dvs förstärkningen samverkar inte med intilliggande berg för att bära lasten. Riktvärden för sprängningsalstrade vibrationer för dessa tunnlar åsätts enligt Svensk Standard SS 460 48 66.

Resten av tunnlarna där lasten bärs av bergmassan eller bergmassan i samverkan med förstärkning i form av bultar och ytförstärkning (sprutbetong eller nät) åsätts riktvärden för sprängningsalstrade vibrationer enligt det förslag som ges i denna skrift.

© 2000 Svenska Bergteknikföreningen och författare

Tillåtna riktvärden för sprängningsalstrade vibrationer bör med ledning av de genomförda fältförsöken och studierna vara beroende av följande faktorer:

- Bergmassans kvalité
- Typ av bergförstärkning
- Typ av ytförstärkning
- Ytförstärkningens status
- Avståndet mellan tunneln och sprängningen
- Tunnelns användning (funktion).

I nästa avsnitt presenteras ett förslag hur man tar hänsyn till dessa faktorer.

Förslag till riktvärden med hänsyn total- och ytstabilitet

Riktvärden för största vibrationer längs tunnelkonturen

Baserat på erfarenheterna från provsprängningarna i Hjulsta och från ett antal genomförda projekt har följande förslag till framtagning av riktvärden för största tillåtna vibrationer längs tunnelkonturen upprättats.

För en bergtunnel där lasten tas i samverkan mellan berg och bergförstärkning beräknas riktvärdet, v, för den största svängningshastigheten längs tunnelkonturen enligt följande formel:

$$v = v_0 \cdot R_F \cdot R_Q \cdot R_K \cdot R_S \cdot R_D \ [mm/s]$$

där v_0 = okorrigerad svängningshastighet = 70 mm/s

R_F = är en faktor som tar hänsyn till tunnelns/bergrummet användning, se avsnitt, *Användningsfaktor.*

R_Q = är en faktor, som beaktar inverkan av bergmassans kvalité, se avsnitt, *Bergmassans kvalitet.*

R_K = är en faktor, som beaktar inverkan av typ av bergförstärkning, se avsnitt, *Typ av förstärkning.*

R_S = är en faktor, som beaktar ytförstärkningens status, se avsnitt, *Ytförstärkningens status.*

R_D = avståndsfaktor, som beaktar inverkan av avståndet mellan sprängnings plats och mätpunkt, se avsnitt, *Avståndsfaktor.*

© 2000 Svenska Bergteknikföreningen och författare

Användningsfaktor, R_F

Användningsfaktorn är beroende av tunneln/bergrummets användning enligt nedanstående tabell. Det förutsätts att trafiken stängs av vid själva sprängningen och släpps på direkt efter sprängningen om uppmäta vibrationsvärden ligger under riktvärdena.

Tabell 4. Användningsfaktor, R_F

	Tunnelns/bergrummets användning	R_F
A	Regelbundet trafikerad tunnelsträcka	1,00
B	Oregelbundet trafikerad tunnelsträcka	1,10
C	Ej trafikerbar tunnel/bergrum	1,25

Bergmassans kvalité

Faktorn, R_Q, beror på bergmassans kvalité i tunneltak och väggar och väljs med ledning av nedanstående tabell. Bergmassans kvalité klassas enligt Q-systemet.

Tabell 5. Faktor, R_Q

	Bergkvalité	R_Q
A	Q < 4	0,7
B	Q = 4-10	0,9
C	Q > 10	1,1

Bergmassans kvalité skall bestämmas utgående från kartering av bergrumsväggar, analys av borrkärnor eller bestämning av tryckvågens gånghastighet med seismik. Om ingen bestämning av bergmassans kvalité görs skall R_Q sättas till 0,7.

Typ av förstärkning

Faktorn, R_K, som beror på typ av förstärkning i tunneln/bergrummet väljs med ledning av nedanstående tabell.

Tabell 6. Faktor, R_K

	Konstruktion	R_K
A	Ingen förstärkning, bultning c/c större 2 m	0,8
B	Systembultning, c/c max 2 m	0,9
C	Sprutbetong ev. med selektiv eller systembultning, ej i samverkan	1,1
D	Stång/fiberarmerad sprutbetong i samverkan med systembultning	1,2

© 2000 Svenska Bergteknikföreningen och författare

Ytförstärkningens status,

Faktorn, R_S, som beror på ytförstärkningens status väljs med ledning av nedanstående tabell. Ytförstärkningens status bestäms genom bomknackning ev. kombinerat med vidhäftningsprovning.

Tabell 7. Faktorn, R_S

	Ytförstärknings status	R_S
A	Ingen ytförstärkning. Bomma bergpartier ej identifierade och ej åtgärdade.	0,8
B	Ingen ytförstärkning. Bomma bergpartier identifierade och åtgärdade.	1,1
C	Bomma sprutbetongpartier ej identifierade och ej åtgärdade.	0,8
D	Bomma sprutbetongpartier identifierade och åtgärdade.	1,2

För att sätta R_S=1,2 måste man visa genom provning att $\sigma_{vidh} \geq 0,3$ MPa. Vid $\sigma_{vidh} < 0,3$ MPa sätts R_S=0,8.

Avståndsfaktor, R_D

Avståndsfaktorn, R_D, som tar hänsyn till avståndet mellan sprängplats och tunnel/bergrum beräknas enligt $R_D = 2.57 \cdot d^{-0.42}$ där d = kortaste avstånd mellan sprängsalvan och den berörda tunnelns kontur. För d < 10 m sätts $R_D = 1,0$.

Placering av givare

Vid mätning av svängningshastigheten placeras geofonerna så att största svängningshastigheten längs tunnelkonturen mäts. För placering av givarna kan nedanstående tabell vara till ledning

Tabell 8. Rekommendationer för geofonplacering

Sprängplats	Placering av geofon
Över	Hjässa
Intill	Närmaste tunnelvägg, anfang
Under	Botten eller tunnelvägg nära botten

Placeras inte givarna där den största svängningshastigheten förväntas måste riktvärdet reduceras med en faktor av storleksordningen 5.

© 2000 Svenska Bergteknikföreningen och författare

Tillämpning

Riktvärden för största vibrationen längs tunnelkonturen har beräknats för olika kvalitéer på bergmassan, olika förstärkningar och olika åtgärder innan sprängningen påbörjas. Beräknade värden har avrundats till närmast undre 5-tal (tabell 9).

Vid den lägsta klassen på bergkvalitén varierar riktvärdet mellan 30 mm/s upp till 60 mm/s beroende på förstärkning och om bomma partier har åtgärdats innan sprängningen påbörjas för en tunnel med regelbunden trafik (tabell 9).

Vid medelbra berg varierar riktvärdet mellan 40 mm/s upp till 90 mm/s beroende på förstärkning och om bomma partier har åtgärdats innan sprängningen påbörjas (tabell 9).

Vid bra berg varierar riktvärdet mellan 45 mm/s upp till 110 mm/s beroende på förstärkning och om bomma partier har åtgärdats innan sprängningen påbörjas (tabell 9).

Tabell 9. Beräknade riktvärden för största och lägsta svängningshastigheten vid dåligt, medelbra resp. bra berg.

Förklaring av värdena för $R_{Q,K,S}$				**$v_{10\,m}$ för olika R_F, mm/s**		
	R_Q	**R_k**	**R_s**	**1,0**	**1,1**	**1,25**
Dåligt berg, ingen förstärkning och eventuella bomma partier ej identifierade och ej åtgärdade	0,7	0,8	0,8	30	30	35
Dåligt berg, sprutbetong i samverkan med bultar och eventuella bomma partier ej identifierade och ej åtgärdade	0,7	1,2	0,8	45	50	60
Medelbra berg, ingen förstärkning och eventuella bomma partier ej identifierade	0,9	0,8	0,8	40	40	40
Medelbra berg, sprutbetong i samverkan med bultar och eventuella bomma partier identifierade och åtgärdade	0,9	1,2	1,2	90	100	115
Bra berg, ingen förstärkning och eventuella bomma partier ej identifierade och ej åtgärdade	1,1	0,8	0,8	45	50	60
Bra berg, sprutbetong i samverkan med bultar och eventuella bomma partier identifierade och åtgärdade	1,1	1,2	1,2	100	120	140

© 2000 Svenska Bergteknikföreningen och författare

Rekommendationer

Förundersökningsprogram

I avsnitt *Förslag till riktvärden* presenteras modellen för framtagning av riktvärden. Modellen baseras på att ett antal faktorer avseende tunnelstatus bestäms. Bestämning av faktorerna kan innebära att kunskapen om tunnelns status ökar och därmed kan högre vibrationer vid sprängning accepteras än om ingen bestämning utförs. För att tillämpa reduktionsfaktorerna skall dessa bestämmas på plats genom förundersökningar. Om ingen undersökning görs eller faktorn ej kan bestämmas gäller lägsta värde för den faktorn.

Tunnelstatus beskrivs av tre faktorer nämligen bergkvalitet bestämd genom Q-värdet, utförd förstärkning samt status på ytförstärkningen.

Förundersökningsprogrammet skall även innehålla program för placering, typ och omfattning av mätgivare som skall registrera de alstrade vibrationerna.

Finns vibrationskänslig utrustning skall särskilt program upprättas för denna.

Mätteknik

De utförda proven har visat på de stora variationer i vibrationsnivåer som erhålls i olika delar av en tunnel. Det är framför allt avståndet till sprängplatsen och geologiska faktorer som avgör vilket vibrationsnivå som registreras. Nya gränsvärden förutsätter att krav ställs på mätutrustning, placering, montering och mätriktning. Genom att mätningen utförs i punkter närmast sprängplatsen så får man en bättre kontroll på vilka krafter som tunneln utsätts för.

Baskravet för mätutrustning skall vara de krav som ställs i gällande Svensk Standard, SS 460 48 66 – Riktvärden för sprängningsinducerade vibrationer i byggnader – kapitel 6, Instrumentspecifikation.

Instrumentspecifikationen innebär kortfattat att mätsystemet som innefattar givare, givarförstärkare, registreringsenhet samt erforderliga förbindelsekablar klarar av att utföra mätning enligt följande:

- Frekvensområdet 5 – 300 Hz.
- Fasresponsen får ej medföra ett större mätfel än 5 %.
- Mätområdet 1,0 – 250 mm/s.
- Vid toppvärdesdetektering får mätfelet inom angivet mätområde inte överstiga 5 %.
- För samplande system bör samplingsintervallet högst vara 300 µs.

© 2000 Svenska Bergteknikföreningen och författare

Givare skall fästas stumt i mätobjektet. Vid mätning i tunneltak med vertikala geofoner skall inverterade givare användas. Givare skall monteras i den del av anläggningen som är närmast sprängplatsen.

- För att kunna utnyttja högre gränsvärden krävs att vibrationsmätning närmast salvan utförs med givare i tre riktningar, vertikalt och två horisontellt ortogonala riktningar.

- Om sprängning utförs rakt ovanför tunnlar bredare än 8 m och bergtäckningen är mindre än 12 m krävs mätning även i närmaste anfang/-en.

- Om sprängningar skall utföras på stora områden för en stor schakt, vägar eller dylikt krävs givare på var tionde meter tunneln. Vid stora bergtäckningar <20 m kan avståndet mellan givarna ökas till 20 m.

- För sprängningar av mindre omfattning typ plansprängning eller liknande och där det inte av praktiska/ekonomiska skäl är möjligt att montera givare i tunneltak så kan givare monteras så högt upp på väggen/-arna närmast sprängningarna. Vid denna typ av mätning gäller lägre gränsvärden än för den typ av mätning som specificerats ovan, se tidigare avsnitt *Förslag till riktvärden.*

- För mätning på installationer skall givare placeras både på fundament och på den känsligaste delen av installationen.

Här skall kompletteras med anvisningar hur mätning skall utföras på utrustningen. Det kommer att utföras när arbetsgruppen har tillgång till SL:s resultat från skakproven av utrustningar.

Osäkerheter

Osäkerheter gäller i högsta grad status på befintlig förstärkning särskilt när bergytan är täckt av sprutbetong och tidigare dokumentation av utförda förstärkningsarbeten är dålig. I sådana fall bör en konservativ syn tillämpas såvida man inte utför en kompletterande förstärkning. Förstärknings ålder och kvalitet skall också tas med vid denna bedömning. Sprutbetongens tjocklek och kvalitet är andra parametrar som man måste ta hänsyn till.

Bestämning av bergkvaliteten utgör också ett problem när bergytan är täckt med sprutbetong. Andra metoder måste då användas t.ex seismiska mätningar eller kärnborrning.

© 2000 Svenska Bergteknikföreningen och författare

Riktlinjer för handlingsprogram vid vibrationsmätningar

Ett handlingsprogram för att adekvat använda föreslagen modell vid vibrationskontroller skall omfatta:

- Förundersökning av tunnelstatus
- Bestämning av reduceringsfaktorer
- Program för placering av givare
- Koordinering på arbetsplatsen
- Kontrollplaner
- Efterkontroll av tunnelstatus
- Eventuell provsprängning

Förundersökning av tunnelstatus innebär att bergkvalitetens bestäms. Detta kan utföras genom bergkartering, kärnborrning eller seismisk gånghastighetsmätning tex med TSP. Kombinationer mellan de olika metoderna kan bli nödvändig att använda, bla med hänsyn till kostnader.

Status på befintlig förstärkning kan vara svårt att fastställa. Bergbultar kan ibland okulärt besiktigas, relationshandlingar kan ge information om mängder och utförande.

Sprutbetongens tjocklek och status kan undersökas vid en urborrning. Denna kan då med fördel kombineras med utdragstester för att erhålla en uppfattning om vidhäftningen mellan sprutbetong och berg. Valet av undersökningsplats är viktig så att ett representativt resultat kan erhållas.

Urborrning ger dock endast en punktvis information.

Bomknackning av bergytans kontur eller på sprutbetongen ger relativt god information om tunnelns status och status på ytförstärkningen. Bomma partier skall markeras med sprayfärg så att den procentuella delen av bomma partier lätt kan bestämmas.

Med underlag från förundersökningen kan faktorerna i vibrationsmodellen bestämmas. I många fall särskilt för faktorn R_k är det frågan om en bedömning.

Vid all bestämning måste hänsyn tas till de osäkerheter som kan förekomma av vilka några finns beskrivna under tidigare avsnitt, *Osäkerheter*. Vid osäkerhet skall alltid det lägsta faktorvärdet användas.

Givare för vibrationskontrollen skall placeras så att största svängningshastigheten mäts. Detta inträffar vanligen vid det kortaste avståndet mellan salva och tunnelkontur. Generell guide för placering presenteras under tidigare avsnitt, *Placering av givare*.

© 2000 Svenska Bergteknikföreningen och författare

Andra faktorer som kan påverka placeringen är geologiska lokala förhållanden, status på tunnelavsnittet, tunnelbredd, bergtäckning mellan skjutplats och tunnelkontur.

Särskilda krav gäller för placering av givare på fasta installationer. Generellt gäller att mätningen skall utföras på den känsligaste delen av installationen.

Koordinering på sprängplatsen är nödvändig vid sprängning i tät bebyggelse och med hänsyn till närhet till bil- och tågtrafik. Sprängningsarbetet kan innebära att tåg- och biltrafiken stoppas tillfälligt, vilket medför särskild bevakning och insatser från Banverket, Vägverket, SL Bansystem och polisen.

För att sprängningsarbetet under sådan förhållanden skall fungera krävs att klara arbetsrutiner utarbetas och koordineras mellan olika intressenter.

För SL Bansystem gäller i sådana fall bevakning med personal med särskild behörighet och radiokontakt med trafikledare för aktuell bana.

Kontrollplan för sprängningsarbetet och vibrationskontrollen skall utarbetas så att optimal sprängning och kontroll kan utföras samt att resultat återförs till sprängentreprenören för eventuella justering av borr- och laddplan.

Syneförrättning skall utföras före och efter avslutat sprängningsarbete för kartläggning av eventuella skador.

Referenser

(1) Provsprängningar i Hjulsta. Redovisning av mätdata. Stockholm 1998-11-03.

(2) Trafikerade Bergtunnlar – Riktvärden för sprängningsinducerade vibrationer – Slutrapport från fältförsök i Hjulsta, 1999-03-16.

(3) Analys av dynamisk belastning på befintlig tunnel. ADG Grundteknik 1997-05-14.

(4) Investigation of rock main structures and characteristics in front of the face using TSP Tunnel Seismic Prediction at Hallandsåsen project. Bergmekanikdagen 1996.