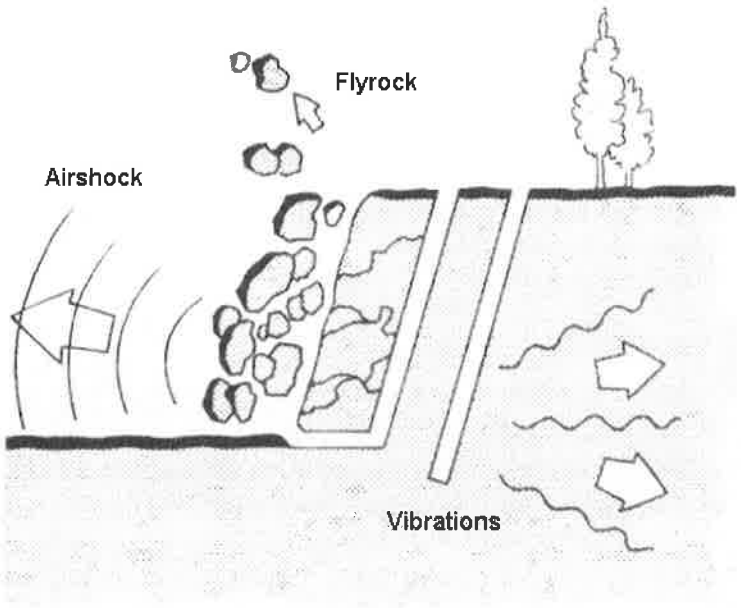
© 2005, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors

RISKANALYS FÖR SPRÄNGNINGSARBETEN – ETT VIKTIGT DOKUMENT FÖR PROJEKTERING OCH GENOMFÖRANDE.

Bengt Niklasson, Magnus Björkman, Skanska Teknik AB
Donald Jonson, Sven-Erik Johansson, Nitro Consult AB

Inledning

Forskning om sprängningens energi och alstring av seismiska vågor i form av vibrationers påverkan har förekommit ända sedan Alfred Nobels dagar. I slutet av 1800-talet utfördes tester av en amerikan vid namn C.G Knott; *Reflexion and refraction of elastic waves with seismological application* som tog upp teorierna runt detta. I mitten av 1940 talet studerades detta mer praktiskt inom Nitro Nobel via Langefors och Kihlström då dagens vibrationskriterier grundades. Under de 50 åren som bergsprängningskommittén funnits har ett 100- tal föredrag hållits i nära anslutning till dessa frågor och på tillämpningar av Svensk Standard för olika projekt.
Riskanalysen, som begrepp med tillåtna vibrationskriterier, är och har därmed varit ett viktigt dokument för projekteringen och vid genomförandet. Därför ställs stora krav på kunskaper om byggnaders grundläggningar och konstruktion samt befintliga utrustningars känslighet. Lika viktigt att känna till är bergets sprängbarhet och dess vibrationsdämpande egenskaper. För att få en så rättvis och korrekt bestämning av gällande gränsvärden krävs därför tidiga och noggranna utredningar. Provsprängningar kan då vara en bra metod för att dimensionera kommande sprängningar. Man skulle därmed undvika störningar och skador samt underlätta i anbudsgivningen och produktionsplaneringen av entreprenaden samt få framdriften bättre kalkylerbar. Genom provsprängningar ökar även i många fall förståelsen för sprängningsarbetet hos tredje man.



Figur 1

© 2005, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors

Historia-Bakgrund

Först en liten historisk tillbakablick på de forskningar och utredningar som ligger bakom de beräkningsgrunder som används för att forma en riskanalys. Därefter lite reflektioner på den "sprängstandard" som har använts sedan 15 år i branschen.

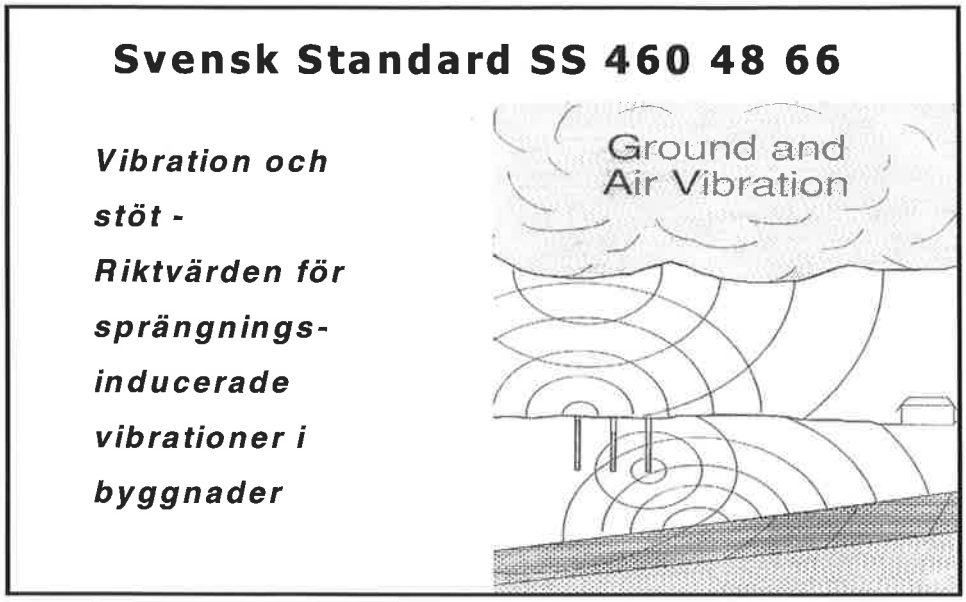
Riskanalys, som begrepp med tillåtna vibrationsnivåer, har funnits med i tekniska handlingar sedan 1970-talet och varit ett tema på BK- dagen då och då under de 50 år som bergsprängningskommittén haft sina årliga möten. Att sprängningar kan påverka omgivningen är ingen senkommen insikt. Historiskt kan man gå tillbaka ända till slutet av 1800–talet, och hitta dokument som visar att man var medveten om vilka skador sprängningar kan ge på omgivningen. Här citeras några valda stycken ur ett tidigare föredrag från våra BK-möten, som mycket väl stämmer in även i dessa dagar, hur viktigt tidiga utredningar som riskanalys är i anbudsförfarandet samt för ett bra genomförande av ett projekt.

E.Ismael från Göteborgs Stads Gatukontor hade ett föredrag på mötet 1969, dvs. för 36 år sedan, som handlade om; PM om grundundersökningar med avseende på anbudshandlingar och bergsprängningsteknik.
Han började i sitt föredrag med att säga "Bergsprängningstekniken och de därmed sammanhängande arbetena har genomgått en relativt snabb och betydelsefull utveckling, särskilt under de senaste årtiondena. Bergrumsarbetena har med tiden och i flera fall blivit avsevärt svårare, särskilt i tätorterna, där exempelvis tunnlar eller bergrum ofta måste läggas i omedelbar närhet av befintlig bebyggelse..." Han sa vidare "... att tunnlarna är relativt bestämda i sina lägen med hänsyn till stadsplanen i övrigt, varför bygget således utgör en dyr lösning på ett svårt problem. Dessa till bergrumsarbetenas hörande problemen jämte samhällets ökade krav på kvalitet, standard och säkerhet mm framtvingar en mycket noggrann planläggning och sedan noggrant utförande av arbetena"
Vidare sa han att "höga krav måste ställas på att arbetena utförs störningsfritt och att de bedrivs med minsta möjliga stilleståndd (pga. maskin och arbetskostnader). Drivningsmetoden, sprängningstekniken mm är bl.a. i hög grad beroende av bergets beskaffenhet, varför vid bearbetning av föreslagen till tunnelförstärkningar och sprängning mm stor hänsyn bör tagas till undersökningsresultat och till tolkning eller utvärdering av desamma. Grundundersökningarna bör således med hänsyn härtill utföras så noggrant som möjligt att resultaten blir tillfredsställande och resultaten redovisas på ett ändamålsenligt och lättolkat sätt"

Han avlutade med att " Sammanfattningsvis kan sägas att "triangelsamverkan" mellan sprängningstekniker (som utför arbetena) – bergexperter (som utför och redovisar undersökningarna) - konstruktörer (som upprättar förslag för förstärkningar, arbetsförfarande samt programhandlingar för anbudsförfrågan mm) är utan tvivel av stor betydelse för uppnående av en teknisk-ekonomisk totalkostnad för hela projektet. Den bästa samverkan av parterna bör således efterstävas i möjligaste mån, både före och under arbetenas gång samt om möjligt efter arbetenas slutförande. I detta sammanhang borde alltså ifrågasättas huruvida detta samarbete som är praxis idag, är tillfredställande eller om det skulle kunna intensifieras ytterliggare".
Dessa tänkvärda ord kan inte sägas eller skrivas bättre idag.

© 2005, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors

Riskanalys – Svensk Standard



Figur 2

Den svenska vibrationsstandarden SS 460 48 66 har nu funnits i drygt 15 år och tillämpas på i stort sett alla bygg- och anläggningsarbeten där sprängningsarbeten utförs i närhet av befintliga byggnader och anläggningar. För att titta lite tillbaka hur den kom till och hur den har tillämpats får man gå tillbaka till 1946 då man utförde tester på detoniklaboratoriet i Vinterviken. De berömda herrarna Ulf Langefors och Björn Kihlström gjorde både tester i labmiljö och i större skala. På den tiden utfördes vibrationsmätningarna med Cambridge vibrografen för att snart ersättas med ampligraf och combigraf. Den verkliga förflyttningen av byggnaden i vertikal riktning uppmättes i µm. Man fann ganska snart att vibrationernas svängningshastighet stod i proportion till utbredningshastigheten det vill säga med vilken hastighet vibrationsvågen (p-vågen) utbreder sig under byggnaden. Den slutliga bedömningen av tillåtna gränsvärden byggde naturligtvis vidare på byggnadens konstruktion och kondition (skjuvningen). Förhållandet mellan dessa parametrar följer formeln:

$v = \gamma^* c$

v = svängningshastigheten mm/s
γ = skjuvningen mm/m
c = utbredningshastigheten m/s

Standarden, som de flesta i den här församlingen känner till, kom i tryck första gången 1989 och uppdaterades i en andra version 1991 som gäller fortfarande idag. Den bygger på typ av undergrund, byggnadskonstruktion och byggnadsmaterial. För att även ta med den förväntade frekvensreduktion som sker med ökat avstånd från sprängningskällan samt genom vibrationens fortplantning genom olika berggrunds- och jordmaterial så har avståndsfaktorer tagits fram. Denna multipliceras med de övriga ”kända” faktorerna enl. formeln:

© 2005, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors

$v = v_0 * F_k * F_m * F_d$, mm/s där:

v_o= okorrigerad svängningshastighet ; 70 för berg, 35 för morän, 18 för lera
$F_{k=}$ Faktor beroende på typ av konstruktion
$F_{m=}$ Faktor beroende på typ av byggnadsmaterial
$F_{d=}$ Faktor beroende på avstånd mellan sprängplats till objekt

Det kan tyckas att denna formel på många sätt är allt för enkel för att kunna ge en hundraprocentig säkerhet. Normalt är säkerhetsfaktorn även för kosmetiska skador betryggande, men att för varje enskilt objekt fastställa den exakta skadegränsen är förstås omöjligt. Under alla de år som föregick vibrationsstandardens tillkomst och därefter så har inga nya erfarenheter eller rön tillkommit som skulle göra det befogat att radikalt omvärdera den. På stora avstånd från sprängningar där det i de flesta fall inte gjorts besiktningar av byggnaderna så är det inte ovanligt att det uppstår problem med att fastställa vad som kan var orsak till anmälda skador. I det sammanhanget kan det vara av intresse att nämna de vibrationsmätningar som gjorts vid de stora sprängningar som genomförs dagligen i malmfälten. I byggnader som regelbundet besiktats sedan 1970-talet har inga påvisade sprängskador konstaterats trots ofta uppmätta vibrationsnivåer på 15-20 mm/s på ett avstånd av 250 - 300 meter.

De synpunkter som ändå finns beträffande standarden och dess tillämpning är följande:

1. Delad grundläggning och var man ska mäta är inte heller alltid klarlagt då det kan finnas partier under objektet som inte har samma bärighet som under andra delar av objektet. Det vill säga undergrund kan ha blandad hållfasthet om det är fast berg eller partier av lösare material morän eller lerpartier.

2. Liten hänsyn tas till konstruktionens svaga punkter där det är inspänt mellan balkar, pelare och väggar och där böjpåkänningarna är som störst.

3. Önskemål att i instrumentet kunna läsa det värde som skall jämföras med gränsvärdet beroende på frekvensen utan att behöva veta avståndet mellan salva och objekt.

För att ta första synpunkten (1) med typ av undergrund så är den betydelsefull för överföringen av vibrationer mellan salvan och objektet.. En och samma byggnad kan stå på olika undergrund och därmed kan olika registreringar erhållas beroende på var mätaren är placerad. På längre avstånd har det mindre betydelse på grund av att frekvensen oftast då är relativt låg. Men på nära håll dämpas vibrationssignalen mindre där det är fastare undergrund och tvärtom om det är lösare. Detta kan naturligtvis ställa till problem om man anger att delad grundläggning råder exempelvis lera/berg och därmed satt ett lågt värde som relaterar till lera men mäter där det är berg. I detta fall kan entreprenören få svårigheter att klara gränsvärdena. Om man istället mäter på ett hörn av byggnaden där det är lera och resten av huset är berg och gränsvärdet är satt för berg, då kan värdena visserligen te sig bra men skador kan uppkomma.

© 2005, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors

I de flesta fall är typ av undergrund känd men bergets överföringsfaktor består av så många fler faktorer såsom, typ av bergart, typ och antal sprickor samt jordlagrens mäktighet etcetera. I flera fall då projektet är stort kan det vara motiverat för att inte säga nödvändigt med provsprängningar. Riskanalysen kan i dessa fall kompletteras med en avstånds- och laddningstabell. Detta förekommer också i en del fall men kanske allt för sällan. Exempel på detta skall senare redovisas. Tyvärr är denna metod för de flesta sprängningsarbeten svår att genomföra både ur teknisk och ekonomisk aspekt.

Den andra synpunkten (2) att det finns partier i byggnader som är svagare än andra är också förståligt. Men att göra en konstruktionsskadebedömning, där böj- och dragpåkänningars samband ur byggnadens alla hållfasthets kriterier skall bestämmas då talar vi om stora tekniska insatser och därmed kostsamma utredningar. Detta är inte bara orealistiskt utan också onödigt. Byggnader utsätts kontinuerligt för påkänningar från väder och vind och daglig verksamhet i byggnaden. De erfarenheter som vi i branschen samlat på oss genom åren styrker oss i vår uppfattning att om de riktlinjer som ligger till grund för riktvärdena i Svensk Standard tillämpas på avsett sätt så erhålls en acceptabel säkerhet även mot kosmetiska skador.

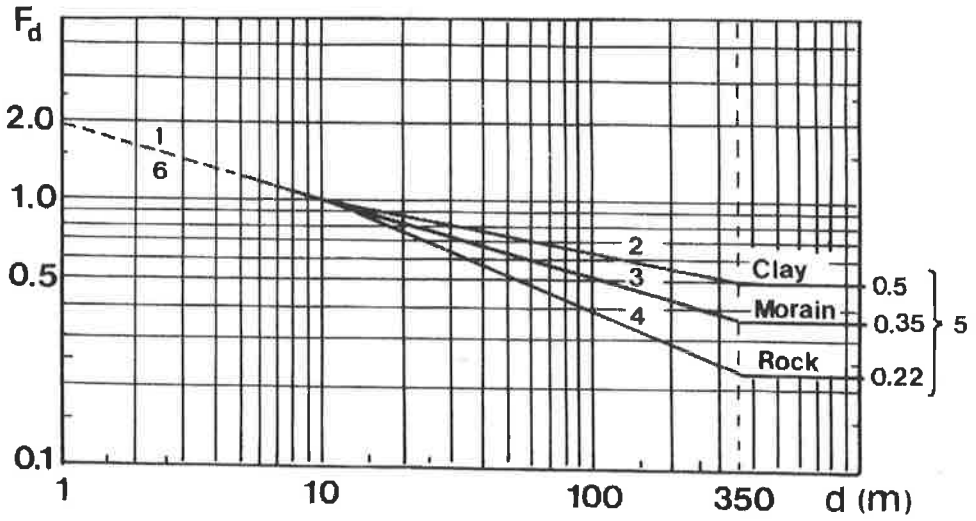
För synpunkten under punkt 3 ovan vill vi återspegla något historiskt igen. Som säkert många minns så sattes gränsvärdet i riskanalyserna, innan standarden började tillämpas, lika oavsett avstånd. För byggnader grundlagda på berg angavs i Stockholm 50 mm/s oberoende av avståndet. Att man under arbetets gång oftast inte kom upp i dessa värden är en annan historia. På den tiden var sprängningar för byggnader och infrastruktur bättre accepterat av de som bodde och verkade i omgivningen. Om vi var tåligare då eller vad det kan bero på är en annan diskussion som vi inte hinner gå in på här.

Det skall dock i sanningens namn nämnas att ofta i de riskanalyser som då gjordes fanns en avståndstabell med såkallade laddningsnivåer. Laddningsnivåerna byggde på att K-värdet (bergkonstanten) ändrades från 400 ner mot 20 ju längre från sprängningen byggnaden var och typ av undergrund. Vi återkommer lite mer om detta senare i föredraget. Det är också den kunskapen som ligger med i dagens Svenska Standard.

En något förenklad bedömning görs då istället genom att använda diagrammet eller formeln i Svensk Standard

1. $F_d = 1.91d^{-0.28}$
2. $F_d = 1.56d^{-0.19}$
3. $F_d = 1.91d^{-0.29}$
4. $F_d = 2.57d^{-0.42}$
5. $F_d = 0.5$ för berg; 0.35 för morän och 0.22 för lera vid avstånd > 350 m
6. För avstånd närmare än 10 m tas speciell hänsyn med risk för lyftning

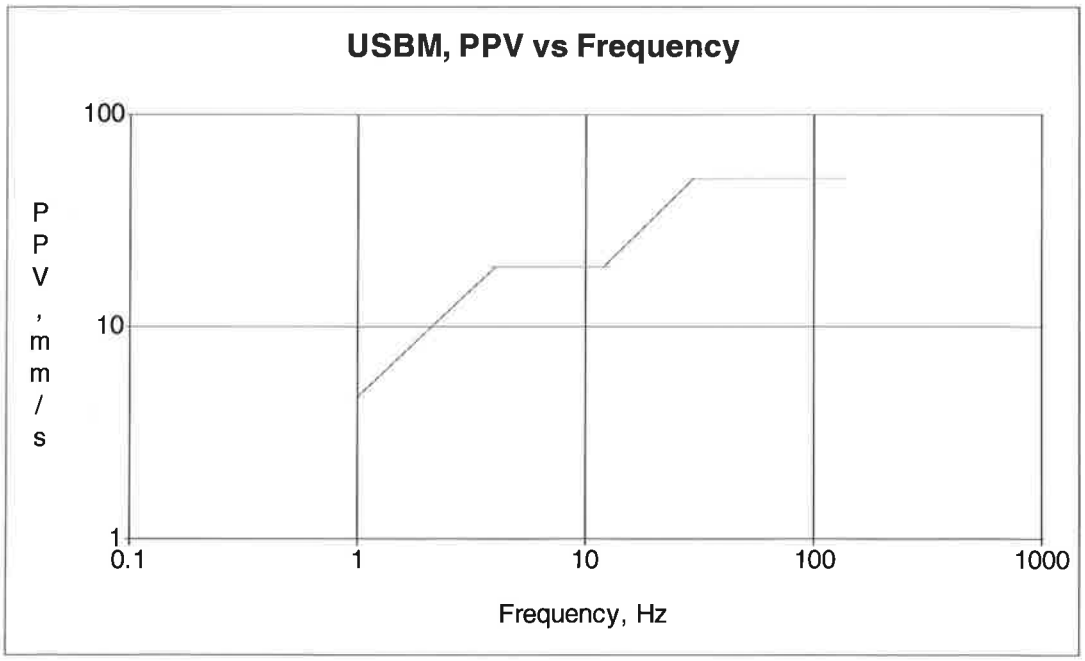
© 2005, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors



Figur 3

Eftersom fastställande av gränsvärden inte är en exakt vetenskap räcker det i de flesta fall, inte minst när man tar fram tabeller över riktvärden för olika avstånd, med att ange värdet avrundat till närmaste femtal. Definitivt bör man undvika att ange gränsvärden med decimaler (ex 26.4mm/s i beräkningen bör vara 25 mm/s).

För att få en mera rättvis bedömning av frekvensen som funktion av riktvärdet måste man använda instrument som anger frekvens i förhållande till svängningshastigheten. Enligt exempelvis USBM (Bureau of Mines standard i USA) plottas alla uppmätta mätpunkters vibrationsvärde i förhållande till frekvensen i ett dubbellogaritmiskt diagram, se figur nedan.



Figur 4

© 2005, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors

Uppmätta värden bör ligga under kurvan i diagrammet. Man får direkt vetskap om man innehåller riktvärdet. Frekvensen i instrumenten beräknas som inverterade värdet av dubbla tiden för de största toppvärdena.

Metoden fungerar bra när vibrationerna byggs upp av endast en frekvens. Men så är sällan verkligheten utan tidsförloppet utgörs av en sammansättning av flera frekvenser som interfererar. Detta är också anledningen till att vi i Sverige inte valt USBM:s metod. Förhoppningsvis skall vi i framtiden kunna få fram klarare samband mellan frekvens om riktvärden och instrument som klarar att göra korrekta frekvensanalyser.

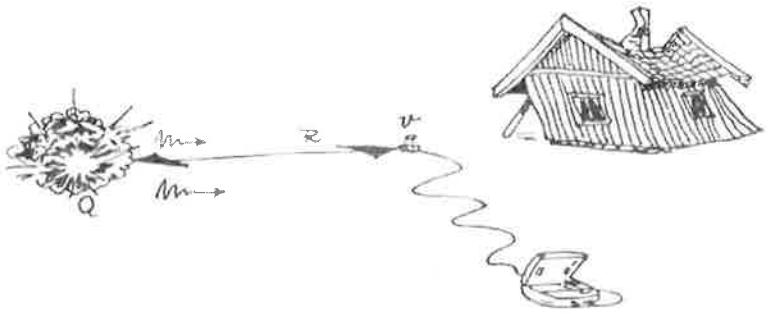
Svensk Standard anser vi, trots vissa brister, är så bra man kan åstadkomma och utgör därmed ett viktigt tekniskt dokument som kan och skall användas för att göra beräkningar av riktvärden i en riskanalys som sedan skall gälla för alla som räknar på ett jobb.

Den "triangelsamverkan" som Ismael föredrog 1969 bör i dessa sammanhang vara av en stor portion förståelse och samförstånd. Visserligen pratar vi här om vibrationskriterier som grundar sig på mycket erfarenhet och tidigare utredningar och forskningsresultat, men det finns ändå en hel del okända parametrar eller faktorer som om de inte är korrekta kan ge upphov till problem. Detta kan bero på brist av och/eller felaktig information från teknisk dokumentation på byggnaders status. Det kan även vara mänskliga faktorn som spelat in eller vibrationsmätarens brister. Eller det kan även vara den utförande entreprenörens bristande kunskaper i sprängningsteknik.

Ett botemedel mot detta är till stor del att man redan i de tekniska dokumenten som finns med i förfrågningsunderlaget, där bland annat riskanalysen utgör en del av, har kunnat fånga in detta redan innan arbetena startar och gjort kompletterande utredningar för att därmed göra arbetena bättre kalkylerbara.

Ett sätt att göra riskanalysen mer kalkylerbar för den anbudsgivande entreprenören är att få större säkerhet vilka överföringsfaktor som gäller i olika delar av schakten eller på olika tunnelsträckor för att beräkna samverkande laddningsmängder för sprängningarna.

Provsprängning – regressionsanalys



Figur 5

© 2005, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors

Förhållandet mellan den samverkande laddningens energi som alstrar en vibrationsvåg genom berggrundsmaterialet fram till ett objekt kan uttryckas i följande formel, ur Langefors - Kihlström (The Modern Technique of Rock Blasting)

$$V = K\,(Q/R^{1.5})^{0.5}$$

K, specifik konstant för platsen, 20-400; Högre värde om sprängningen är närmare och/eller om byggnaden är grundlagd på berg och lägre värde om byggnaden är grundlagd på lösare grund och/eller längre avstånd.

R, avståndet, m mellan sprängning och objekt
Q, maximala laddningen/intervall, kg (samverkande laddningsmängd)
v, svängningshastigheten, mm/s

För den erfarna sprängaren är denna formel lätt att kalkylera med och därmed uppskatta den troliga vibrationsnivån. Nackdelen är att man måste kalkylera eller gissa K-faktorn före varje sprängning.

En annan metod, som gör det möjligt att matematiskt datainsamla värdena från flera salvor via linjär regressionsanalys, är genom skallagsformeln:

$$V = A\,(R/Q^{0.5})^{B}$$

A, B = plats specifika konstanter

Konstanterna A och B kalkyleras genom linjär regressionsanalys och man erhåller i ett dubbellogaritmiskt diagram en rak medellinje dvs. där 50% av värdena ligger över och 50% under medellinjen. Säkerhetsnivån kan därefter höjas genom att multiplicera A faktorn med en eller två standardavvikelser som ger 84% eller 98% säkerhet.

Formeln kan lätt uppdateras med nya sprängdata.

Platskonstanterna A och B varierar betydligt mellan olika arbetsplatser och typ av sprängning. Typiska värden kan vara:

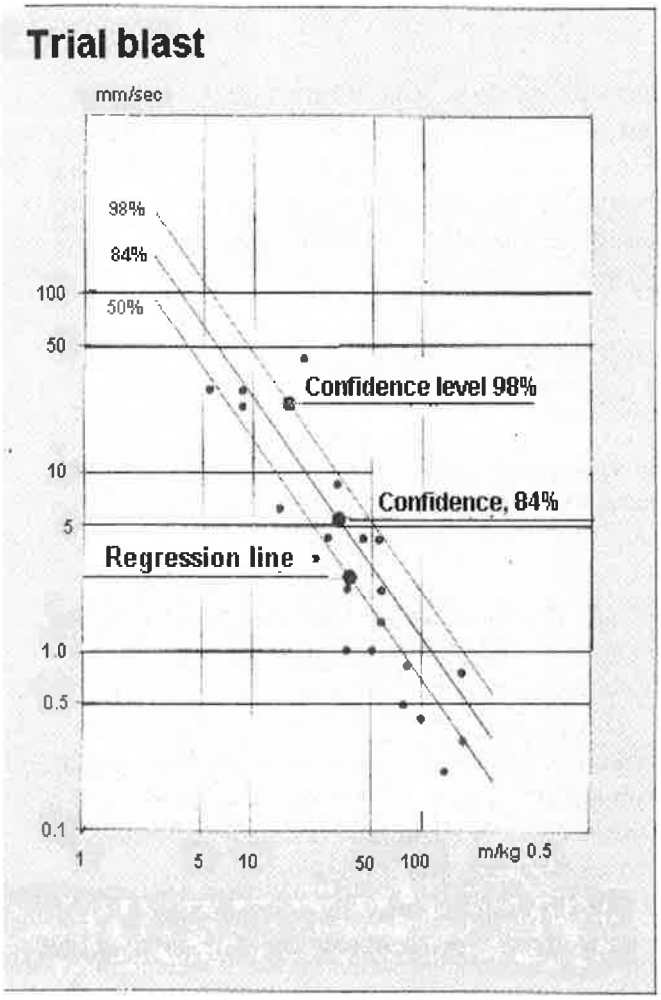
A = 200 - 3000
B = -2.0 - -1.0 (lutningen)

Pallsprängning ger normalt lägre A och B värden än tunnelsprängning.
Tunnelsprängning ger en brantare linje vilket medför att linjen får en högre skärningspunkt på den vertikala axeln än i jämförelse med pallsprängning.

Här kommer ett par exempel på provsprängningar med gott resultat och en som vi hoppas skall bli till god hjälp vid kommande anbudsräkning:

1. Aswan 1981
2. Moderna museet 1995
3. Norra Länken 2004

© 2005, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors



Charging table for level 18 mm/s

Distance in meter	Coordinated charge quantity in kg		
	98%	84%	50%
10	0,2	0,5	1,3
20	0,9	2,1	5,3
30	2,0	4,8	11,9
40	3,5	8,6	21,2
50	5,4	13,4	33,1

Charging table for level 35 mm/se

	98%	84%	50%
10	0,6	1,4	3,4
20	2,3	5,7	13,8
30	5,2	12,9	31,1
40	9,2	22,9	55,3
50	14,5	35,7	86,4

Charging table for level 0.25 g

	98%	84%	50%
10	0,0	0,1	0,3
20	0,1	0,4	1,3
30	0,3	1,0	3,0
40	0,6	1,8	5,3
50	0,9	2,8	8,3
60	1,3	4,0	11,9
70	1,8	5,4	16,2
80	2,4	7,1	21,2
90	3,0	9,0	26,8
100	3,7	11,1	33,1

Figur 6 Provsprängning från Moderna Museet

Provsprängning Norra Länken, delen Roslagstull

Projektering av Norra Länken startade i april 2004 och kommer att färdigställas under innevarande år. Norra Länken blir en förbindelse mellan E4 vid Norrtull och fram till Värtan. Byggstarten för de första etapperna är planerade under innevarande år. Vägverket Region Stockholm är beställare och projektörer för etappen Roslagstull, K3 är Sweco och Carl Bro med Nitro Consult som underkonsult.

Under före detta Roslagstulls Sjukhusområde kommer sprängning att utföras för sex tunnlar. En omvandling av sjukhusområdet till ett universitetsområde startade strax efter det att Norra Länken stoppades 1997. Tanken var från början att tunnelsprängningarna i området skulle vara avklarade innan det nya Fysikcentrum, som numera kallas Albanova Universitetscenter, var klart för inflyttning. Så blev det nu inte utan Albanova

© 2005, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors

är sedan några år tillbaks igång med sin verksamhet som i huvudsak är forskning och undervisning.

Forskningsområdena omfattar ämnen som nanostrukturfysik, biomedicinsk fysik, bioteknologi, atomfysik och molekylfysik. Blotta namnen antyder att det kan finnas mycket vibrationskänslig utrustning. Men överraskningarna stannade inte med det utan redan i de inledande mötena med representanter för nanostrukturfysik uttryckte de oro för att vibrationerna från borrningarna skulle kunna störa deras elektronstråle litografi utrustning. Tillverkaren har fastställt följande gränsvärden i tersband:

- frekvensområde 1 -16 Hz, 0,5 µm/s, RMS
- frekvensområde 16 – 250 Hz, 1 µm/s, RMS

Det är kanske inte svårt att föreställa sig deras bekymrade miner när vi berättade vilka vibrationer man kan förvänta sig vid tunnelsprängning bara 7 meter under deras grundläggning.

Hur mycket instrumentet tål i viloläge kunde inte tillverkaren ange mer än att det tål avsevärt högre vibrationer än i drift. På grund av de extrema vibrationskraven är instrumentet vibrationsisolerat med luftdämpare.

För att forskarna på Albanova skulle få ökad information om hur instrumenten reagerar och beställare och projektörer skulle få en uppfattning om vilka riktvärden som skall tillämpas och vilka åtgärder som skall vidtas innan entreprenaden startar beslutades att provsprängningar skulle genomföras. Provsprängningarna kompletterades med vibrationsmätning vid borrningarna. Provsprängningarna utfördes i laddningar i inspända borrhål. Delar av det preliminära resultatet presenteras i de följande avsnitten.

Borrningar

För att komma ner med laddningarna till den blivande huvudtunneln som skall drivas som närmast 7 meter under grundläggningsnivån på Albanova utfördes borrningarna med ett ovanjordsaggregat typ borrigg Commachio försedd med sänkborrhammare (DTH-hammare).

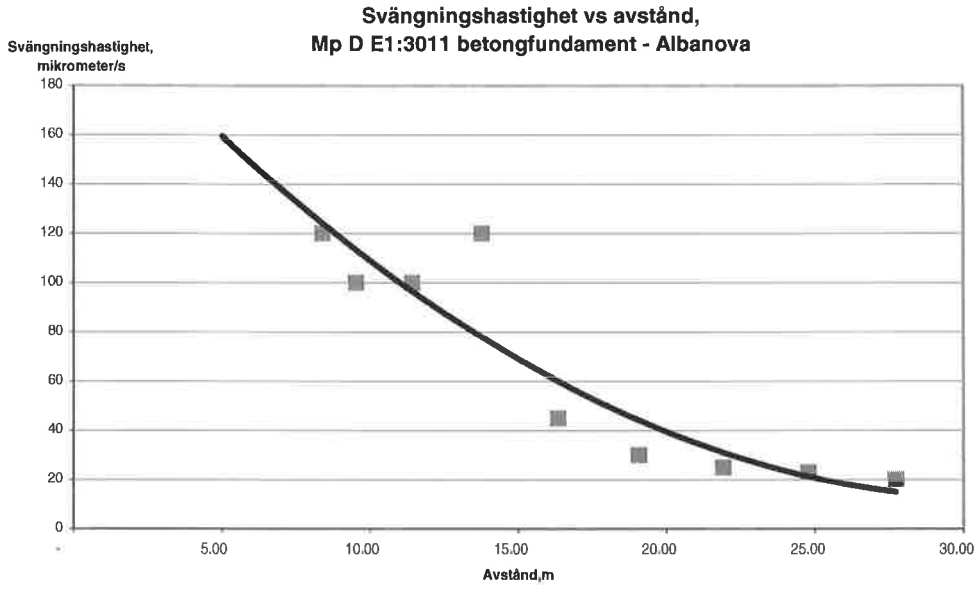
Sänkborrhammaren drevs av en kompressor, typ Ingersoll Rand 1070 med arbetstrycket 1800 kPa vid foderrörsborrning (ϕ 165 mm) och 2400 kPa vid borrning med sänkhammare, ϕ 96 mm. De första tre metrarna i varje borrhål (i BH 1 och BH 2, sex meter foderrörsborrning), borrades med foderrör, ϕ 165 mm. Resterande del av borrhålen borrades med 96 mm borrkrona. Totalt genomfördes borrningarna i fem borrhål där de djupaste var drygt 40 meter.

Vibrationsmätning

Vibrationsmätningen utfördes med instrument UVS 1500 och geofoner av typ UVS HD, frekvensområde 1 – 1000 Hz användes. För att kunna mäta stomvibrationer från borrningarna användes en lågbrus-signalförstärkare som gjorde det teoretiskt möjligt att mäta ner till 0.05 µm/s (34 dB referens 1 nm/s) i mätområdet 250 µm/s.

© 2005, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors

Vibrationsmätning gjordes på berggrundlagt betongfundament under elektronstråle litografi utrustningen. Resultatet av vibrationsmätningen i en mätpunkt redovisas i figur nedan. En trendlinje har anpassats till mätdata för att göra en prognos för injekterings- och salvborrning. Trendlinjen har extrapolerats för avstånd kortare än 8 meter. På avståndet 5 meter så kan man förvänta sig att stomvibrationerna från borrningen uppgår till cirka 0.16 mm/s. Vi bedömer att det kommer att krävas en dämpningsgrad på minst 97 % för att undvika störningar på utrustningen när borrningar genomförs mitt under den del av Albanova där nanostrukturfysik har sina lokaler.



Figur 7

Borrningarna alstrar stomljud som också registrerades i samband med vibrationsmätningen. Men den problematiken är ett kapitel för sig och hinner inte tas med i detta föredrag.

Provsprängningar

I samband med provsprängningarna utfördes vibrationsmätningarna på 27 mätpunkter och i tre riktningar i ett flertal av mätpunkterna.

Provsprängningar utfördes i fyra av borrhålen. Sprängningar genomfördes på tre till fyra nivåer i varje borrhål. Laddningsmängden var som mest 2,0 kg, Dynomit. Störningar registrerades på analyser som gjordes på den känsliga elektronstråle litografiutrustningen redan vid laddningsmängden 0.4 kg och avståndet 80 meter.

Resultatet av vibrationsmätningarna analyserades med hjälp av skallagsformeln:

$$v = A \times \left(\frac{R}{\sqrt{Q}} \right)^{B}, \text{ där} \quad (1)$$

© 2005, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors

A och B = överföringskonstanter
v = svängningshastighet, mm/s
Q = samverkande laddningsmängd, kg
R = avstånd, m
Resultatet redovisas i en laddnings- och avståndstabell nedan för olika konfidensnivåer. Tabellen förutsätter att vibrationskänslig utrustning kan vibrationsisoleras så att byggnaden blir dimensionerande.

Avstånd, m	**Samverkande laddningsmängd, kg**		
	50%	**84%**	**98%**
6.0	2.0	1.1	0.6
8.0	3.2	1.8	1.0
10.0	4.6	2.6	1.5
15.0	8.1	4.6	2.6
20.0	12.3	6.9	3.9
30.0	22.1	12.5	7.1

Tabell 1

För normal indrift i aktuella tunnlar bör den samverkande laddningsmängden ligga på cirka 5 kg. Flera tunnlar skall sprängas under den cirka 160 meter långa och 30 till 50 meter breda Albanova byggnaden, varför närheten kommer att starkt påverka arbetena genom begränsningar i salvlängd. För att balansera mellan byggandets framdrift och störningar, för personal och verksamhet i byggnaden, och optimera tunneldriften kommer det att krävas att beställare, entreprenörer och konsulter har ett förtroendefullt samarbete med varandra och med representanterna för Albanova. Detsamma gäller även för övriga institutioner, företag och boende som finns utefter den drygt 5 kilometer långa sträckningen för Norra Länken.

Riskanalysens betydelse för entreprenören i samband med anbudsarbetet

Bakgrund

Riskanalysen för sprängningsarbeten i samband med losshållning av berg är kanske mer betydelsefull än vad de flesta i branschen inser och detta framför allt i anbudsfasen. Det underlag som presenteras i handlingen får en direkt konsekvens på tider och därmed på kostnader. Detta gäller givetvis både för rena utförandeentreprenader som för total- och funktionsentreprenader. Det samband som knyter samman riskanalysen med tid och kostnad kan enkelt beskrivas:

⇒ *Riskanalysen* ger begränsningar i svängningshastighet och acceleration, som ger
⇒ *Samverkande laddning*, mängd sprängämne per tidsenhet prognostiseras utifrån tidigare erfarenheter i området eller liknande förhållanden, som ger

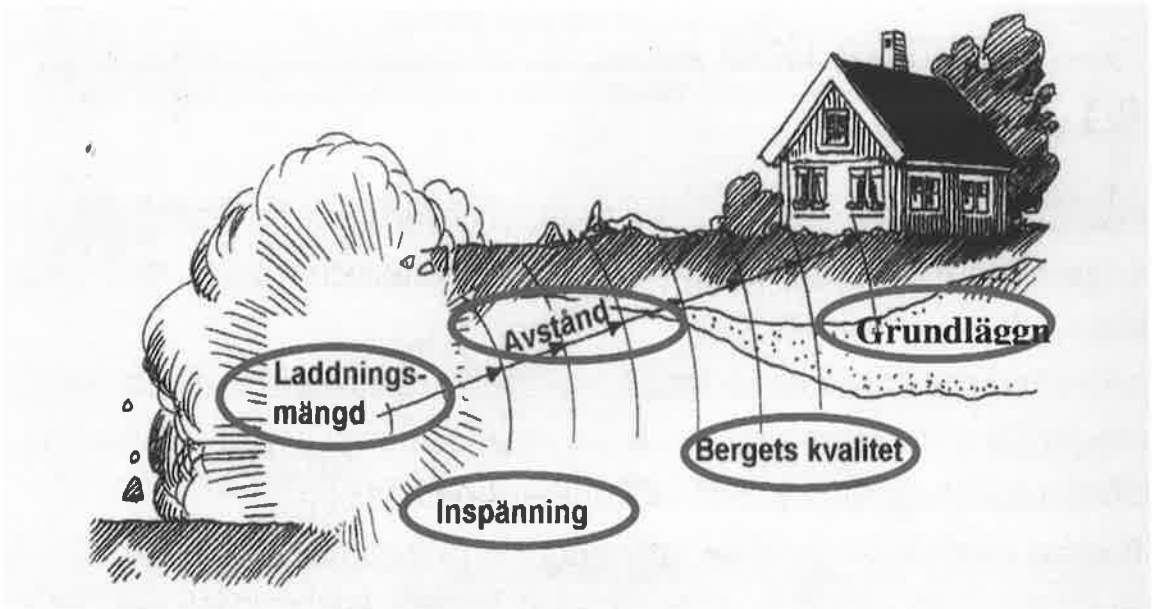
© 2005, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors

⇒ *Borrgeometri*, borrlängd, borrmönster, håldiameter beräknas från samverkande laddning, som ger
⇒ *Framdrift* - kapacitet, m tunnel/vecka erhålls då salvlängder och tid/salva är känd

Riskanalysens uppgifter om tillåtna värden på svängningshastigheter räknas om till en största samverkande laddning som i sin tur ger en borrgeometri och en salvlängd som slutligen resulterar i en tunneldrivningskapacitet. Största svårigheten ligger i att räkna fram den samverkande laddningen eftersom denna till stor del styrs av de sammanräknade dämpningsegenskaperna av berget, de ovanliggande jordlagren samt fastighetens grundläggning. Som tidigare nämnts kan en provsprängning vara till god hjälp även om en sådan sällan ger alla svar.

Om vi exempelvis utifrån satta gränsvärden i riskanalysen varierar tillåten samverkande laddningsmängd mellan ca 5,5 kg och 3,9 kg motsvarar detta en ungefärlig skillnad i salvlängd på 2 m - 6 respektive 4 m. Om vi sedan approximativt räknar ut hur lång tid det tar att driva 1000 m tunnel så innebär det 26 veckor med 6 m långa salvor och 32 veckor med de kortare 4 m salvorna. I pengar utgör skillnaden ca 50 000.-/vecka beroende på storleken på projektet, skiftgång mm då förstärkning och injekteringsarbetena frånräknas.
Av detta framgår med all tydlighet att riskanalysens underlag är oerhört viktig i samband med att en sprängningsentreprenad ska räknas.

Uppgifterna i riskanalysen ligger alltså till grund för den prognos över framdrifter som upprättas i kalkylskedet för de olika tunneldelar ett projekt innehåller. I figur 8 ser vi de faktorer som samverkar.



Figur8 visar de parametrar som mer eller mindre påverkar nivån på svängningshastigheten i fastighetens grund. Efter S.O. Olofsson här med tillägget "grundläggning".

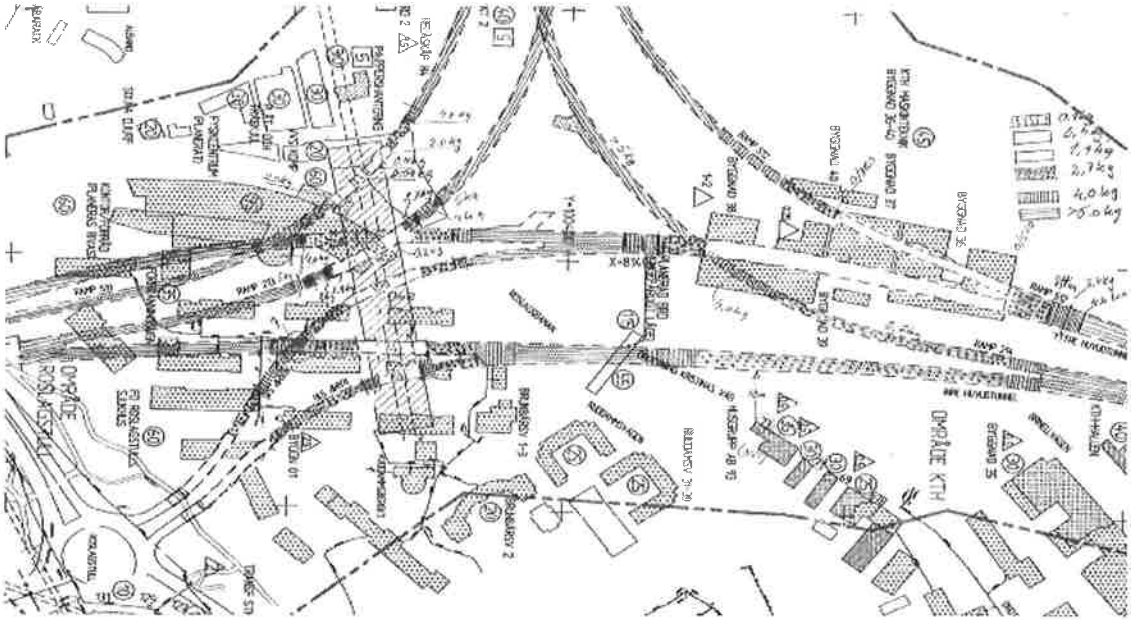
Figur 9 visar i grafisk form den prognos som upprättas i anbudsskedet över tillåtna samverkande laddningar baserade på uppgifter i riskanalysen och gjorda uppskattningar

© 2005, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors

av det tidigare visade k-värdet, nämligen dämpningsegenskaperna i berg, jord och grundläggning.

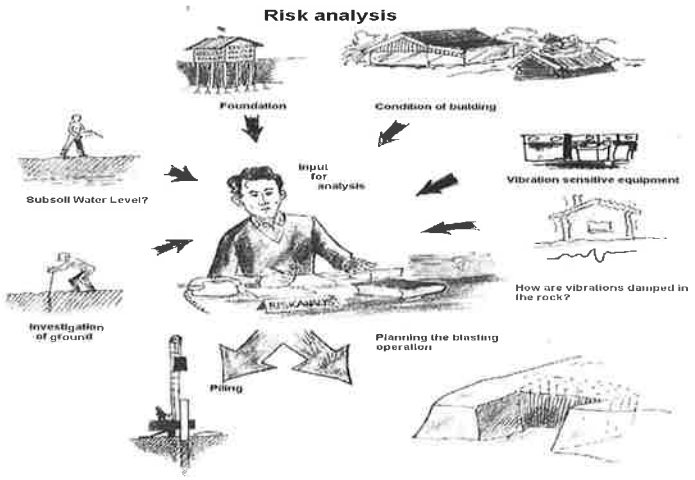
Som tidigare beskrivits så ska riskanalysen innehålla en hel del uppgifter som inte alltid är lättillgängliga men som bör finnas i en riskanalys för sprängningsarbeten.

- ”Bör innehålla risker förenade med geologiska förhållanden”
- ”Redovisning av närliggande fastigheters grundläggning och konstruktion”
- Som därefter räknas om till ett ”Tillåten Vibrationsnivå”



Figur 9 visar en grafisk bild över prognostiserade samverkande laddningar där olika färger representerar olika viktsintervaller. Tunnelsystemet som visas kommer från projekt Norra Länken.

Redan 1982 visade Roger Holmberg m.fl. med all tydlighet på omslaget av boken ”Vibrationer i samband med trafik och byggverksamhet” hur många faktorer som den unge ingenjören i figur 10 har att brottas med i sin riskanalys.



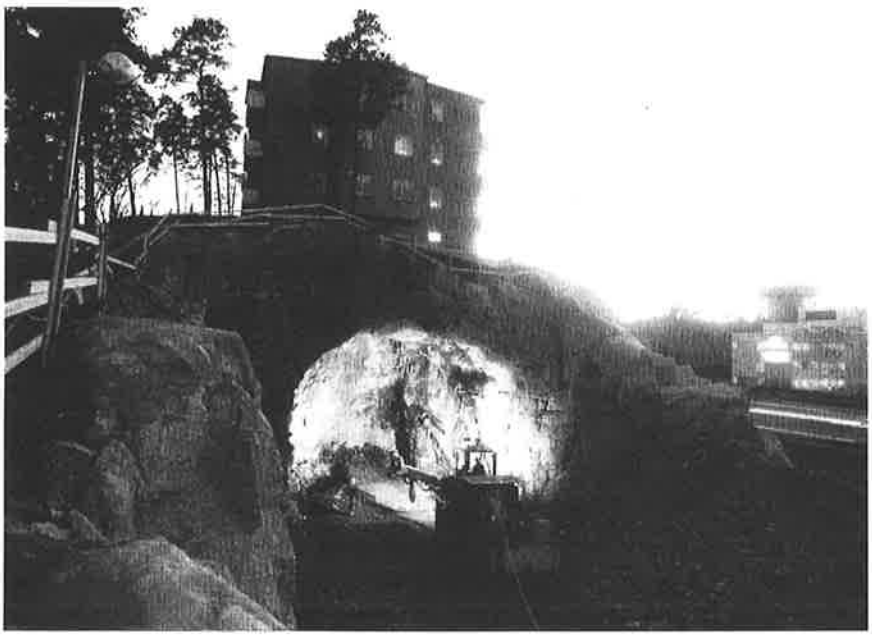
Figur *10*

© 2005, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors

Dagsläget

Det sätt som tillåtet värde räknas fram på kan anses vara nog så bra. Vi använder Svenska Standard på ett likartat sätt inom branschen och visst finns det utrymme för förbättringar som tidigare antytts men i stort så fyller den sitt syfte. Däremot finns det stort utrymme för förbättringar när det gäller att ta fram *underlaget* för framräknandet av tillåten vibrationsnivå.
Som tidigare poängterats kan innehållet i detta underlag påverka beräknad drivningshastighet. Det är därför viktigt att branschen nu enas om att lägga större vikt, tid och pengar på att ge ett korrekt underlag när det gäller grundläggningen av t.ex. fastigheter eller bergytans läge i förhållande till tunnel och ovanliggande bebyggelse.
Vid en informell rundringning till några konsulter som utför denna typ av riskanalys sade sig de flesta skaffa underlaget från kommunernas byggnadsnämndens arkiv samt att i de flesta fall görs en översiktlig okulärbesiktning av området. Vissa tog sig tid att kontakta enskilda husägare för att på så sätt söka bättre underlag.
De flesta konsulter medgav att priserna var relativt pressade på denna typ av uppdrag och att det inte fanns utrymme för någon djupdykning i ämnet.

I vissa projekt är det givetvis lättare att ta fram underlag än i andra. Om grundläggningsförhållandena i figur 11 råder det ingen tvekan.



Figur 11 visar en typisk berggrundläggning

Detta har nu givetvis uppmärksammats utav oss entreprenörer eftersom vi i kalkylskedet måste sätta stor tillit till de uppgifter vi får i riskanalysen.

© 2005, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors

Framtiden

I (AB) Allmänna Bestämmelserna och därmed även nya AB -04 framhålls "kalkylerbarhet" som en av grundprinciperna. Det innebär att det under anbudsfasen, på lika villkor ska finnas underlag för att lämna pris på en sprängningsentreprenad. Det ska helst inte finnas utrymme för att spekulera i dämpningsegenskaper eller om byggnadsnämndens uppgifter på grundläggningar stämmer eller inte. Hur ska vi då agera framöver? Skall K-värden anges i FU. Skall färdig tabell över avstånd och samverkande laddning finnas redan i FU, vilket har förekommit vid ovanjordsprojekt? Alla modeller som syftar till att öka kalkylerbarheten medför en förbättring. Det får dock inte bli så styrt och stelbent att det förhindrar att den bästa och mest ekonomiska lösningen aldrig kommer till praktiskt bruk.
Ett sätt som provats och som möjligtvis ökar kalkylerbarheten är att redan i FU och utifrån aktuell bergprognos ange någon form av drivningsklass. Förmodligen är det så att förskriven drivningsklass i dessa fall baseras mera på skonsamhetskrav eller bergmekaniska förhållanden än på vibrationskrav.
Då finns det minst två vägar att gå. Det ena är att satsa mer på att ta fram ett fylligare och bättre underlag för riskanalysen. Det andra är att konstruera en regleringsmodell där man i efterhand reglerar ersättningen beroende på hur bergets egenskaper påverkade vibrationssignalen. Det finns inget hinder för att kombinera dessa.

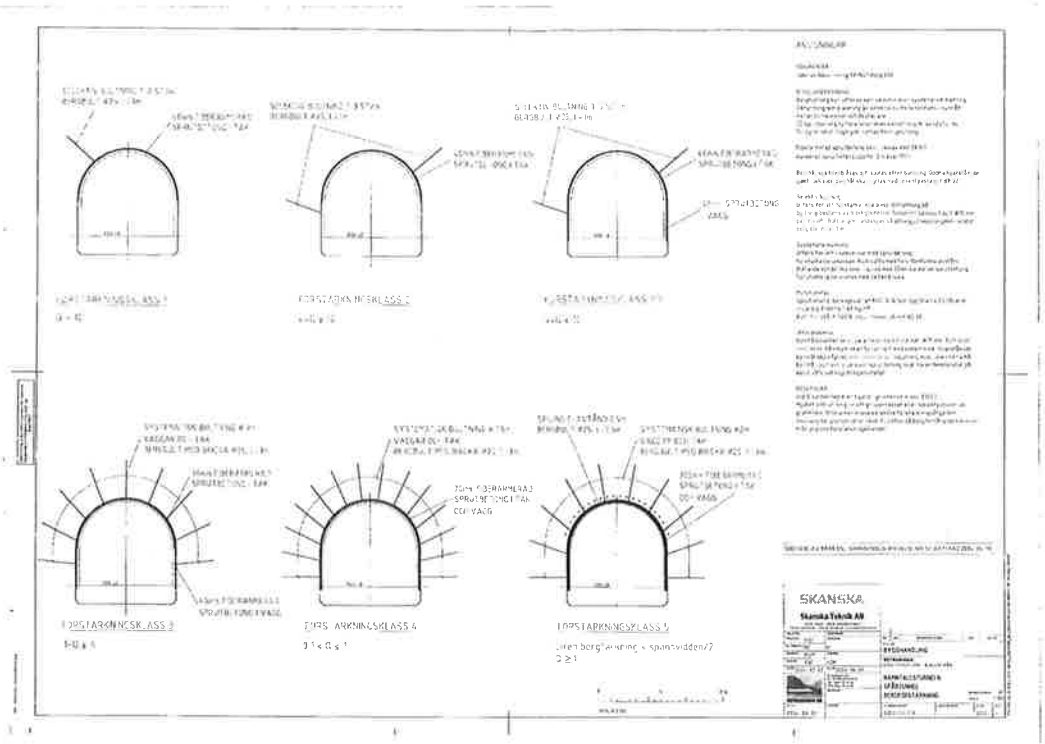
Förbättrad riskanalys

Det som saknas idag är en enhetlig syn på hur underlaget ska samlas in och hur kvalitetssäkringen ska göras så att så riktiga uppgifter som möjligt hamnar som grund för vibrationsvärdena. Någon form av standardiserat tillvägagångssätt borde upprättas. Vad ska samlas in och på vilket sätt ska detta göras. Det är fullt tänkbar att olika nivåer för detta arbete sätts, beroende på projektets storlek eller art. Det finns exempel på s.k. förenklade riskanalyser för mindre entreprenader, men i de fall som detta fördrag handlar om är det mer frågan om en utökad insats som är behövlig. Arbetssättet vid upprättandet av riskanalysen är alltså en del som kan förbättras.
Den andra delen som kan förbättras är den tekniska undersökningsdelen. Möjligheten att få bättre information om fastigheters grundläggning och/eller mäktigheten av ett moräntäcke finns redan idag men används oftast inte. Anledningen kan vara att det fortfarande inte anses finnas ekonomiska motiv till detta.
Den metod som idag finns tillgängliga är sonderingsborrning, främst jord/berg sondering. Förenklade seismiska metoder för att klarlägga bergytans läge kan användas. Markradarteknik kan anpassas för samma syfte.
Om man lämnar de tekniska hjälpmedlen så är det förmodligen enklare insatser som kan öka kunskapen effektivast, om ett områdes geologiska och byggnadstekniska innehåll. Tillgång till mer tid för att samla in uppgifter är troligen den åtgärd som ger bäst utdelning. Mer tid för att kartera ett område - för att läsa in och tolka geologin. Mer tid för att kontakta husägare, gå igenom byggnadshandlingar mm. Mer pengar behövs också för att utföra en eller flera provsprängningar. Metodiken vid provsprängningar kan förbättras. Mätning i olika riktningar och på olika avstånd är ofta nödvändig för att en provsprängning ska ge ett bättre och användbart resultat.

© 2005, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors

Ersättningsmodell

Vid reglering av förstärknings-, injekterings- och dräneringsarbeten i tunnelprojekt används oftast en mängdregleringsmodell som tar hänsyn till bergmassans egenskaper. Eftersom ingen förundersökningsteknik i världen klarar av att exakt beskriva vad som väntar tunneldrivaren framme vid fronten så jobbar branschen med olika sätt att klassificera bergmassan och utifrån bergklassen så sätts förutbestämda åtgärder in i form av t.ex. en specifik förstärkningsklass. Figur 12 visar en bergförstärkningsritning där respektive bergklass, i detta fall uttryckt som ett intervall i Q systemet, kopplats med någon av de 6 typförstärkningarna.



Figur12 visar exempel på en typförstärkningsritning.

Eftersom samma förutsättningar gäller för dämpningsegenskaperna i berg och jord, nämligen att de är omöjligt att exakt förutsäga, så borde en liknande regleringsmodell kunna fungera även för att drivningsmässigt hantera vibrationsnivåer. Redan i anbudet lämnar entreprenören pris på ett antal, exempelvis 3-5 drivningsklasser som motsvarar lika många samverkande laddningsvikter. Under arbetets gång kan dessa klasser modifieras beroende på faktiska förhållanden, ändring av laddningsutrustning eller av andra anledningar. Beroende på uppmätta vibrationsvärden och beroende på hur nära gränsvärdet beställaren vill ligga så väljs drivningsklass. Metoden brukar kallas "Observationsmetoden" eller ibland "Aktiv Design". Ersättning betalas beroende på klassen och innefattar naturligtvis även tid.
Rent praktiskt innebär det i första hand att de olika klasserna utgörs av salvor i olika längder vilket har störst påverkan på kostnaden, men det kan även förekomma variationer i antalet borrhål och laddningskoncentrationer. Dessa klasser kan givetvis

© 2005, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors

även inrymma eventuella skonsamhetskrav genom att de traditionella skadezonskraven införlivas i klasserna.

Slutsats

Med ambitionen att få ett förfrågningsunderlag så kalkylerbart som möjligt, måste kraven på att klara satta vibrationsnivåer jämställas med kraven på att uppnå ett satt täthets- eller förstärkningskrav. Eftersom förutsättningarna är desamma för dessa d.v.s. att vi jobbar i en långt ifrån känd bergmassa så borde ersättningsmodellen vara densamma. Detta hindrar inte utan förstärker motivet för att ta fram en mer underbyggd riskanalys. Detta innebär att både Beställare och Entreprenör är bättre förberedda inför tunneldrivningen och att rätt drivningsklass finns i startblocken när fronten närmar sig ett känsligt område, samt att den ekonomiska och tidsmässiga regleringen kan utföras betydligt enklare än idag. Rimligtvis innebär det också att en hel del diskussioner mellan beställare och entreprenör försvinner och tiden kan ägnas åt mera konstruktiva frågor.