

Vibrationsproblem vid tunnelsprängning i bebyggda områden

INGRESS

Den 30 maj 2007 anordnade SGFs Markvibrationskommitté ett seminarium med ämnet: "Vibrationer vid tunnelarbeten: Projektering - utförande – kontroll." Frågeställningen belystes ur olika perspektiv, med ett inledande föredrag av Dr. Trevor Orr, Trinity College som berättade om vibrationsproblem i samband med TBM-tunnelborrning i Dublin. Dessutom presenterades svenska tunnelprojekt, där vibrationsfrågor är av stor teknisk och ekonomisk betydelse. Därefter belystes olika aspekter av markvibrationer vid tunnelarbeten. En dokumentation av föredragen i elektronisk form kan beställas genom SGFs Markvibrationskommitté. Denna artikel sammanfattar några av frågeställningarna som togs upp av olika föredragshållare.

Tunnelarbeten i tätbebyggda områden

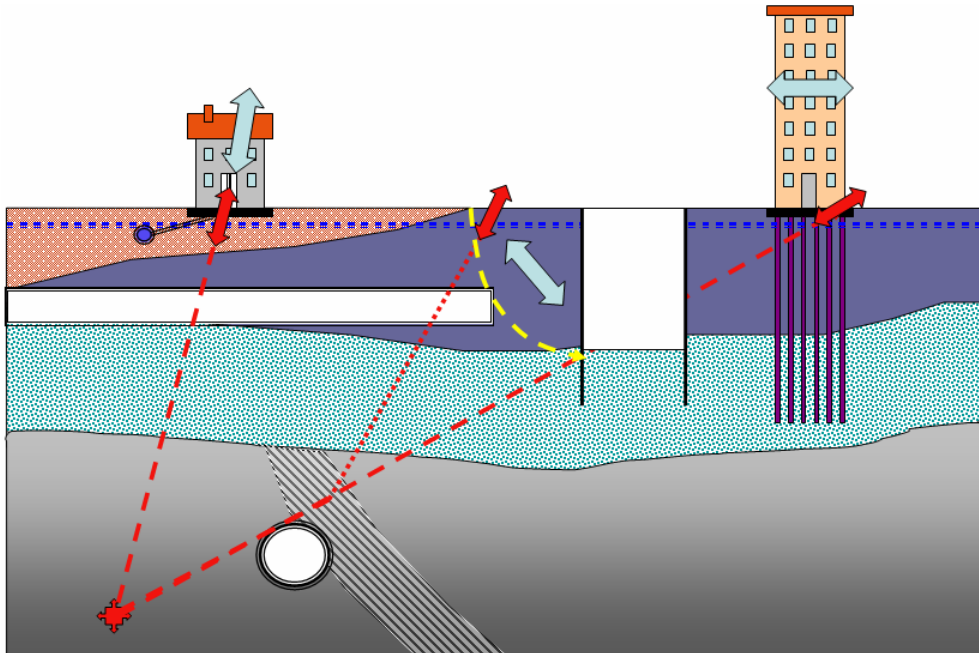
I samband med stora tunnelprojekt i tätbebyggda områden kan vibrationer och buller uppstå på grund av borrhings- eller sprängningsarbeten, men även schaktning, jordpackning eller slagning av spont kan ge upphov till omgivningspåverkan. TBM metoden är relativt skonsam men kan under ogynnsamma förhållanden medföra störande vibrationer, främst i form av stomljud och buller. I Sverige sker tunneldrivning ofta genom sprängning. I samband med stora infrastrukturprojekt såsom Norra länken och Citybanan i Stockholm samt Götatunneln i Göteborg måste sprängningsarbeten utföras i närhet av befintliga tunnlar eller direkt under vibrationskänsliga byggnader.

Omgivningspåverkan i form av vibrationer och bullerstörningar har stor betydelse för tidplanen och kostnaderna av dessa projekt. Därför utförs under projekterings- och genomförandefasen detaljerade riskanalyser, som kontinuerligt uppdateras genom omfattande vibrationsmätningar. Provsprängningar kan vara av stor nytta när sprängning skall utföras i närheten av vibrationskänsliga anläggningar.

Vid T-Centralen i Stockholm till exempel passerar under rusningstrafiken upp till 30 tåg per timme i varje riktning och en avstängning eller begränsning av tunnelbanetraffiken har därför stora ekonomiska men även sociala konsekvenser. Sprängnings- och anläggningsarbeten i närhet av SLs spåranläggningar regleras genom olika anvisningar. Den högsta tillåtna vibrationsnivån som får förekomma utan avstängning av tunneltraffiken är 10 mm/s. Om högre vibrationsnivåer än 30 mm/s skall tillåtas krävs särskilda utredningar.

Vågutbredning vid tunnelsprängning

Vid sprängningsarbeten i tunnlar påverkas befintliga tunnlar, undermarksanläggningar samt byggnader på markytan. Vågutbredningens riktning och vibrationers karaktär påverkas av de geologiska förutsättningarna, såsom förkastningszoner, sprickor i berg och jordlagars dynamiska egenskaper. Vibrationernas dominerande svängningsriktning styrs av sprängplatsens läge i förhållande till den påverkade byggnaden. Det är således inte ovanligt att tunnelsprängning kan resultera i höga horisontalsvängningar, jfr Figur 1.



Figur 1. Vibrationer som alstras vid bergsprängning kan påverka befintliga byggnader och anläggningar både under och ovanpå markytan.

De vibrationer som alstras vid sprängningen fortplantas från sprängplatsen i form av olika vågtyper. Vid tunnelsprängning kan antas att P-vågen dominerar innan vågorna når markytan. För beräkning av förväntade vibrationsnivåer används ofta den så kallade skallagsformeln

$$v = K \left(\frac{R}{Q^{0.5}} \right)^n \quad (1)$$

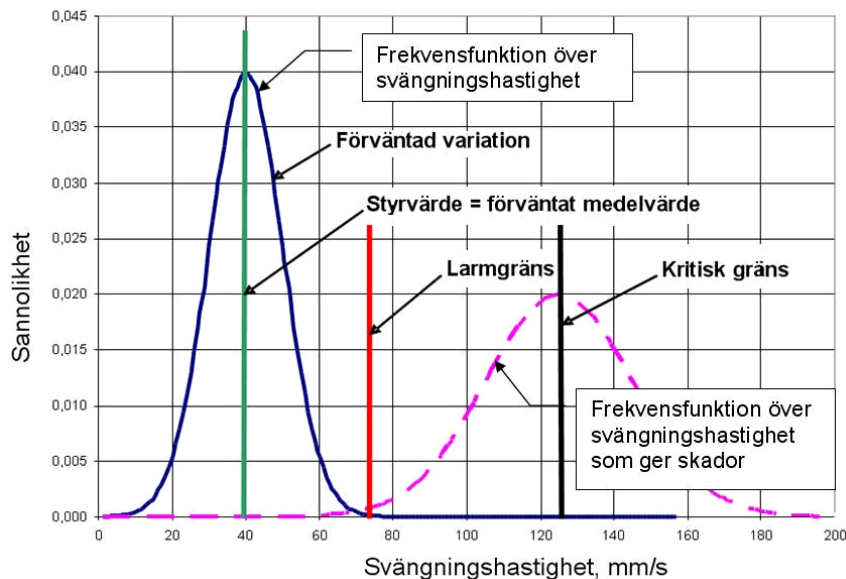
där v är svängningshastigheten (mm/s), R är avståndet från sprängplatsen till mätpunkten (m), Q är den samverkande laddningsmängden (kg), K är den så kallade bergkonstanten, och n är en parameter som beskriver vågutbredningen. Både K och n är empiriskt bestämda faktorer.

Riskbedömning vid sprängningsarbeten

När vågorna från sprängning når ett objekt (t ex en byggnad, tunnel eller en installation) finns risk för skador. Risken för skador beror på ett flertal faktorer, såsom vibrationskällans karakteristik (vibrationsintensitet och frekvens), jord och bergs dynamiska egenskaper, byggnadens dynamiska respons och avståndet mellan vibrationskällan och objektet. För att kunna bedöma skaderisken används ofta riktvärden enligt svensk standard SS 460 48 66 där toppvärdet av vibrationen i vertikal riktning används. Standarden gäller beräkning av riktvärden för sprängningsinducerade vibrationer i byggnader. Dessa riktvärden skall användas vid bestämning av tillåtna vibrationsnivåer, gränsvärden, vid sprängningsarbeten. I svensk standard används begreppen "gränsvärde" och riktvärde utan att förtydliga skillnaden mellan dessa. I SLs Allmänna anvisningar Fö-I-364 ges en tydligare vägledning: **Gränsvärde:** Arbeten

avbryts. Orsak till överskridande ska utredas och åtgärder vidtagas. Arbetena får sättas igång endast efter godkännande av SL. **Larmvärde:** Meddelande och mätvärde ska tillsändas ansvarig person inom SL samt orsak till överskridande ska utredas och åtgärder vidtagas i samråd med SL.

Svensk Kärnbränslehantering AB har genomfört en omfattande utredning för en planerad Inkapslingsanläggning inom CLAB (Centralt Lager för Använt Bränsle) och tagit fram rekommendationer för användande av larmsystem, som upprättades efter genomförandet av CLAB-2, Olsson och Stille (2001). De framhåller betydelsen av att skilja mellan: kritisk gräns, larmgräns, styrvärde och förväntat värde, jfr Figur 2.



Figur 2. Exempel på styrvärde, larmgräns och kritisk gräns i förhållande till frekvensfunktionerna vid sprängning och vid skada.

Kritiska gränsen: en gräns där skador förväntas med en oacceptabelt hög sannolikhet.

Larmgränsen: ett förutbestämt värde på en eller en kombination av mätstorheter som om den överskrids utlöser ett förutbestämt agerande. Sätts så att fara verkligen är nära och åtgärder behövs omgående vid överskridande. Ett för konservativt val ger onödiga larm och tilltron till systemet urholkas.

Styrvärde: ett vibrationsvärde satt så att sprängningarna kan ske optimalt med tillräckligt låg sannolikhet att överskrida larmgränsen.

Förväntat värde: det mest sannolika värdet som inträffar vid en given design av salvorna.

Skador förorsakade av sprängningsarbeten – löser Svensk Standard alla problem?

Svensk Standard bygger på erfarenheter från en tidsperiod då vibrationsmätningar var både komplicerade och dyra. Därför mättes huvudsakligen vibrationer endast i en (vertikal) riktning. Som framgår av Figur 1 sker vibrationsutstrålning vid tunnelsprängning i olika riktningar. I vissa fall är det därför av intresse att mäta vibrationsamplituden i tre riktningar. Särskilt vid sprängning intill befintliga tunnlar beror

vibrationspåverkan i hög grad på det relativa läget mellan sprängplatsen och det påverkade objektet.

Riktvärdet vid sprängning avser vibrationsvärdet i grundläggningsnivån och kan beräknas med hjälp av följande formel

$$v = v_0 F_k F_d F_t \quad (2)$$

där v_0 är den okorrigerade svängningshastigheten (mm/s), som är beroende av typ av undergrund. Det är anmärkningsvärt att inverkan av grundvattennivån inte omnämns eftersom den har stor betydelse för vågutbredningen. Om en noggrannare bestämning av v_0 erfordras kan tryckvågens utbredningshastighet mätas och följande formel användas (mätning skall ske i grundläggningsnivå)

$$v_0 = \frac{C_p}{65} \quad (3)$$

där v_0 anges i mm/s och C_p i m/s. Tabell 1 visar typiska värden av P-våghastigheten för olika jordmaterial och grundvatten samt v_0 enligt ekv. (3). Det i svensk standard rekommenderade värdet (18 mm/s) skiljer sig väsentligt från v_0 beräknad enligt ekv. (3) för lösa jordlager.

Tabell 1. Beräknad v_0 -värde för olika jordarter enligt ekv. (3).

Jordart (torr)	C_p m/s	v_0 mm/s
Lös sand och silt	200	3
Medelfast sand	400	6
Mycket fast sand	600	9
Lös grus och singel	800	12
Fast morän	1000	15
Grundvatten	1450	22
Vattenmättad morän	1600	25
Sandsten	3000	46

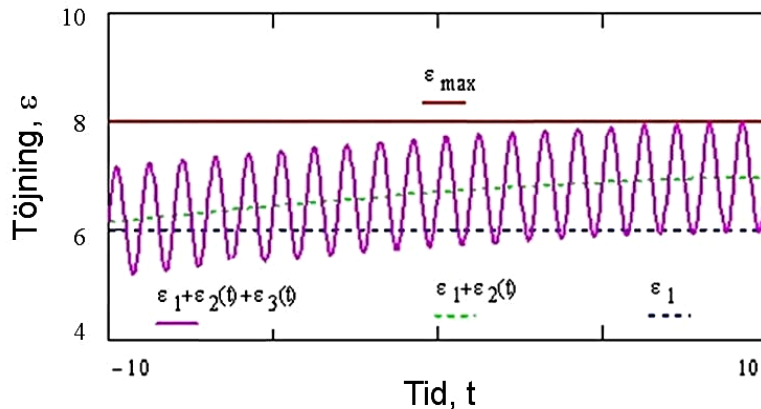
Svensk Standard anger som skadekriterium den vertikala svängningshastigheten men även andra dynamiska parametrar såsom vibrationens frekvensinnehåll (våglängd) och varaktighet (antalet svängningscykler) kan vara av betydelse för skadeverkan.

Skador i samband med vibrationer

Risker och problem som kan uppstå på grund av vibrationer i jord och berg vid sprängningsarbeten kan vara:

- Sprickor och mindre skador på byggnader
- Skador på byggnadens bärande delar (vanligtvis inte aktuellt)
- Utfall av mindre block eller sprutbetong i närliggande berggrum/bergtunnlar
- Risk för ökade vattenläckage i undermarksanläggningar
- Risk för försämrad stabilitet för hus grundlagda på branta sluttningar
- Risk för sättning i lösa sandlager
- Risk för skador på eller funktionsstörning av vibrationskänsliga utrustningar
- Störning av människor/djur på grund av buller och vibrationer

Skador på byggnaders bärande delar är tänkbart om en mycket kraftig sprängning sker på kort avstånd. Vanligtvis uppstår i samband med välplanerade sprängningsarbeten endast ”kosmetiska” sprickor i byggnader. För att sprickor skall kunna uppstå krävs att töjning i materialet som förorsakas av olika faktorer överskrider ett kritiskt värde, jfr Figur 3. Sprickor i samband med sprängningsarbeten inträffar oftast i byggnader med inbyggda spänningar, t ex byggnader med ojämn grundläggning eller sättningsskadade hus.



Figur 3. Sprickor förekommer i materialet om summan av töjning pga. statisk belastning, ε_1 , cykliska laster som till exempel temperaturändringar, ε_2 , och dynamisk belastning på grund av vibrationer, ε_3 överskrider en kritisk töjning, ε_{max} .

För höga vibrationsnivåer kan ibland resultera i utfall av block i berggrum eller tunnlar. Detta brukar undvikas genom begränsning av vibrationsnivåerna. I det fall en begränsning av vibrationsnivå inte är ekonomiskt motiverad kan olika förstärkningsåtgärder användas, t.ex. sprutbetong eller/och bultning öka den tillåtna vibrationsnivån.

Vibrationer kan ge upphov till kompaktering av lösa sandlager och därigenom sättningar som i sin tur kan medföra skador på byggnaders grundkonstruktion. Vibrationer kan också medföra en temporär ökning av porvattentryck och motsvarande minskning av skjuvhållfasthet, som kan leda till jordförvätskning ("liquefaction"). Dessa frågeställningar behandlas inte i Svensk Standard men kan under ogynnsamma förhållanden förorsaka sättningsskador eller stabilitetsproblem (jordförvätskning).

Utvecklingsbehov

Svensk Standard kan användas vid konventionella vibrationsproblem och för mer komplexa frågeställningar ger standarden en indikation vilka riktvärden som kan tillämpas. Det senare är dock inte alltid tillräckligt utan för vissa konstruktioner/förhållanden krävs mer ingående beräkningar och analyser för att ta fram underlag för vibrationsrestriktioner.

Innehålls gränsvärdena så blir det normalt inga skador. I de fall skador uppstår är dessa ofta kosmetiska skador där det i många sammanhang är diskussioner om förbesiktningen var tillräckligt noggrann. Erfarenheter från vibrationsmätningar och besiktningar vid

stora sprängningar i Malmfälten visar att svensk standard ger ett realistiskt bedömningsunderlag. Även där riktvärdena överskridits har i många fall inga skador påträffats.

Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond, SBUF, har initierat en studie av utvecklingsbehov vid sprängningsarbeten i tätbebyggda områden.

Sprängteknisk FoU har hittills fokuserat på fragmentering och losstagning av berg i gruvor och tunnlar. Däremot har ingen samordnad forskning bedrivits med avseende på vibrationsutbredning i jord och berg samt vid vilka vibrationsnivåer olika typer av skador, på byggnader och underjordsanläggningar, uppkommer. Det finns heller ingen samlad kunskapsbank av erfarenheter utan kunskaperna ligger hos enskilda konsulter och sprängentreprenörer som utifrån praktiska erfarenheter kan göra mer eller mindre tillförlitliga vibrationsprognoser. Med tanke på de stora infrastrukturprojekt som är på gång i tätbebyggda området finns det all anledning att ett samlat grepp tas för att utifrån erfarenheter från Svensk Standard fördjupa kunskaperna för att kunna optimera sprängningsarbetet på ett rationellt sätt.

Den snabba utvecklingen inom elektronikområdet samt effektiva datainsamlings- och analysmetoder gör det möjligt att utföra omfattande vibrationsmätningar som kan ligga till grund för mera realistiska vibrationsprognoser. Med hjälp av moderna mät- och övervakningssystem kan givare installeras inom riskområdet och varningsmeddelanden erhållas när larmvärden överskrids. Med stöd av vibrationsmätningar kan en databas byggas upp som kan ligga till grund för kostnadseffektiva sprängningsarbeten även vid mycket komplexa förutsättningar, som ofta uppstår vid sprängning i storstadsområden.

Litteraturhänvisningar

Allmänna anvisningar Fö-I-364: Sprängningsarbeten inom eller i närhet av AB Storstockholms Lokaltrafik spåranläggningar: utgåvenummer 3, gäller från 2006-11-01.

Allmänna anvisningar Fö-I-365: Riktvärden för sprängningsinducerade vibrationer inom eller i närhet av AB Storstockholms Lokaltrafik spåranläggningar: utgåvenummer 3, gäller från 2006-11-01.

Allmänna anvisningar Fö-I-366: Anläggningsarbeten i jord och berg inom eller i närhet av AB Storstockholms Lokaltrafik spåranläggningar: utgåvenummer 3 gäller från 2007-07-01..

Olsson, L, Stille, H: Larmgränser - ett redskap för design av undermarksanläggningar; Föredrag vid Bergmekanikdag i Stockholm 14 mars 2001. Stiftelsen Svensk Bergteknisk Forskning och Svenska Bergmekanikgruppen

SIS: Svensk Standard. SS 460 48 66. Vibrations och stöt – Riktvärden för sprängningsinducerade vibrationer i byggnader. Utgåva 2, fastställd 1991-12-04. 10 s.

Författarna

Mehdi Bahrekazemi, Golder Associates: mehdi_bahrekazemi@golder.se

Anders Bodare, KTH, jord- och bergmekanik: bodare@kth.se

Sven-Erik Johansson, Nitro Consult: sven-erik.johansson@orica.com

K. Rainer Massarsch, Vibisol Interantional AB: rainer.massarsch@vibisol.com

