

Planering och övervakning av sprängningsarbeten i bebyggda områden

Infrastrukturprojekt i tätbebyggda områden kräver ofta omfattande sprängningsarbeten, där vibrationsnivåer många gånger styr hela projektets ekonomi och tidplan. Sprängning projekteras och utförs ofta med ledning av praktisk erfarenhet från tidigare projekt, men skulle kunna göras mer effektiv genom bättre förståelse av vågutbredningen i berg och jordlager. En annan viktig frågeställning är risken för skador, som kan uppstå vid dynamisk påverkan i byggnader eller undermarksanläggningar, såsom tunnlar. I många fall används riktvärden enligt svensk sprängstandard, som är framtagna för konventionella vibrationsproblem. Till skillnad från exempelvis tågtrafik eller anläggningsarbeten, har endast begränsade forskningsinsatser hittills ägnats åt sprängningsproblematiken. I artikeln redovisas nya kunskaper om vågutbredningen och dynamisk samverkan mellan sprängningsinducerade vibrationer och tunnlar i berg. Detta kan utnyttjas för säkrare och kostnadseffektiv sprängning i tätbebyggda områden.

I Sverige finns en lång och gedigen erfarenhet från konventionella sprängnings-

arbeten samt hur vibrationer påverkar byggnader på markytan. I samband med stora infrastrukturprojekt i storstadsområden utförs sprängningsarbeten i vissa fall mycket nära befintliga byggnader eller på större djup intill befintliga tunnlar och andra undermarksanläggningar. Fortfarande saknas väldokumenterad projekterfarenhet om hur vibrationer förorsakade av sprängning utbreder sig i berg och hur dessa påverkas av grundvatten och olika jordlager. Vibrationsprognoser bygger i många fall på en kombination av enskilda projektörers erfarenhet och ibland mycket förenklade teoretiska samband. Riskanalyser begränsas ofta till inventering av vibrationskänsliga objekt och utrustningar, utan beaktande av undergrundens geologiska och geotekniska förutsättningar, *Massarsch et al* (2008). Inom jordbävningens område, off-shoretekniken och pålningsområdet, har värdefulla kunskaper om vågutbredningen och jords dynamiska egenskaper tagits fram som kan tillämpas även på sprängningsproblem. Dessutom erbjuder den snabba utvecklingen inom elektroniken och datatekniken helt nya möjligheter att registrera och analysera vibrationer. Informationen kan snabbt överföras via internt till databaser. Till skillnad från tidigare ligger idag begränsningen inte längre i mättekniken utan i kunskapen om hur mätningar ska utföras och erhållna registreringar analyseras.

Projektering och genomförande av sprängningsprojekt omfattar följande arbetsuppgifter:

- prognos av vibrationsutbredning från sprängplatsen till omgivningen
- bedömning av gränsvärden för byggnader och installationer
- sprängningsdimensionering och genomförande
- kontroll och övervakning av vibrationer i samband med sprängningsarbetet.

I artikeln behandlas nya kunskaper som kan användas vid prognos av vibrationsutbredning, samt vid kontroll och övervakning av sprängningsinducerade vibrationer.

Svensk forskning inom jord- och bergdynamik

Svensk sprängningsteknik och detonikforskning har under lång tid varit internationellt ledande, *Langefors & Kihlström*

(1980). Svensk forskning med anknytning till sprängningsfrågor bedrevs ursprungligen inom ramen för Stiftelsen Bergteknisk forskning (BeFo), som grundades 1970. Våren 1993 etablerades Stiftelsen Svensk Bergteknisk Forskning (SveBeFo) genom samgående mellan de tidigare forskningsstiftelserna BeFo och Stiftelsen Svensk Detonikforskning (SveDeFo). Inriktningen har varit huvudsakligen mot problemställningar för gruv- och berganläggningsindustrin. Vibrationsforskning med anknytning till sprängningsfrågor bedrivs sedan 1983 också genom olika kommittéer av Skandinaviska Vibrationsföreningen (SVIB). Flera värdefulla skrifter med anknytning till sprängningsarbeten har publicerats, till exempel *Lundborg et al* (1978), *Holmberg et al* (1981) eller *Holmberg* (1982). Däremot har dessa organisationer endast i begränsad omfattning ägnat sig åt jorddynamiska frågor vid sprängning, det vill säga faktorer som påverkar vibrationsutbredningen i jord och berg och dynamisk samverkan med konstruktioner och byggnader.

Vid Kungliga tekniska högskolan (KTH) i Stockholm har forskning och undervisning inom jord- och bergdynamiken pågått sedan mer än 25 år. Inom ramen för flera examens-, licentiat- och doktorsarbeten har vibrationsutbredningen i jord och berg studerats, bland annat från tågtrafik och vid jordbävningsproblem. Avancerade numeriska metoder finns idag tillgängliga för att analysera vibrationspåverkan på olika konstruktioner och byggnader. Även frågeställningar kring pålars bärförmåga och vibrationspåverkan från pålningsarbeten har undersökts och nya dynamiska modeller har tagits fram.

Internationellt har kunskapen om jord och bergs dynamiska egenskaper utvecklats mycket snabbt tack vare stora satsningar inom off-shore och jordbävningens område. Det är angeläget att dessa nya kunskaper även kommer till nytta inom andra problemområden, såsom sprängningstekniken.

Pålars bärförmåga har höjts med 300 procent

I Sverige används slagna pålar i stor utsträckning och årligen installeras cirka två miljoner meter. I slutet av sextioalet låg den maximala bärförmågan hos slagna på-



Artikelförfattare är
Carl Wersäll,
K. Rainer
Massarsch och
Anders Bodare,
Geo Risk &
Vibration Scan-
dinavia AB, Solna.



lar omkring 200 till 400 kN, beroende på påltyp, slagningsförfarande och geotekniska förutsättningar. Bärförmågan bestämdes på empirisk väg eller med hjälp av grovt förenklade beräkningsmetoder. Under mitten av sjuttioalet introducerades nya dynamiska analysmetoder, främst tack vare ett nära samarbete mellan högskolor, Statens geotekniska institut, olika myndigheter samt en aktiv pålningsindustri. Målinriktade forskningsprojekt, där nya teorier utvecklades och kompletterades med detaljerade fältmätningar, samt kunskapsuppbyggnad och utbildning genomfördes inom ramen för Pålkommision. Avancerad fältutrustning har tagits fram för att i fält kunna utvärdera pålarnas integritet och bärförmåga. Mätningar ger också information om vibrationer som uppstår vid pålslagningen.

Acceptansen av dynamiska mät- och analysmetoder inom pålningsområdet, som startades under mitten av sjuttioalet, en tid då det fortfarande var svårt att utföra avancerade dynamiska mätningar i fält, har gått snabbt. Tack vare erfarenheterna från stötvågsmätningar kunde pålarnas bärförmåga gradvis höjas med upp till 300 procent, och detta har inneburit stora kostnadsbesparingar för byggherarna. Även internationellt har, tack vare introduktionen av stötvågsmätningar, pålars bärförmåga kunnat ökas. I Eurokod SS-EN 1999 kan vid stötvågsmätningar (där hänsyn tas till antalet provade pålar och kvalitet av mät- och analysmetod) den tillåtna pålbärförmågan höjas och lägre partialkoefficienter tillämpas. Anordnandet av *Stress Wave*-konferenser – den första hölls 1980 i Sverige och den senaste i Portugal 2008 – har lett till en effektivisering av den internationella pålningstekniken och inneburit att Sverige idag intar en ledande position inom detta område.

Hur ska svensk sprängstandard tillämpas?

Risken för skador från vibrationspåverkan bedöms i allmänhet på empirisk väg eftersom frågeställningen länge har ansetts vara för komplicerad för en teoretisk analys. En värdefull informationskälla vid bedömning av skaderisken för byggnader är den svenska sprängstandard SS 460 48 66 – *Vibration och stöt – Riktvärden för sprängningsinducerade vibrationer i byggnader*. Den fastställdes 1991 men bygger huvudsakligen på erfarenhet från sextio- och sjuttioalet. Under denna tidsperiod fanns fortfarande stora mättekniska begränsningar som påverkade vibrationsmätningars tillförlitlighet. Standarden ska tillämpas inom användningsområden för vilka den är avsedd för, det vill säga skaderisken för konventionella byggnader belägna på eller nära markytan. Vid komplicerade sprängningsarbeten bör sprängstandardens tillämpas med försiktighet, särskilt vid projekt där konsekvensen av skador kan vara allvarlig,

Begränsningarna som anges i svensk sprängstandard:

- Standarden gäller vid beräkning av riktvärden för sprängningsinducerade vibrationer i byggnader.
- Riktvärdena avser toppvärdet av den vertikala svängningshastigheten.
- Ifall samband mellan skaderisken och tillåten vibrationsnivå inte visar sig vara relevanta bör detta förhållande belysas genom utvidgad mätning, till exempel trekompontentsmätning.
- Mätningar ska göras av svängningshastigheter mellan 1,0 och 250 mm/s.
- För konventionell övervakning av anläggningssprängningar ska enligt standarden mätsystemet omfatta minst 5 till 300 Hz.
- För speciella mätningar, till exempel där vibrationernas karaktär ej är känd bör ett mätsystem med större frekvensområde användas.

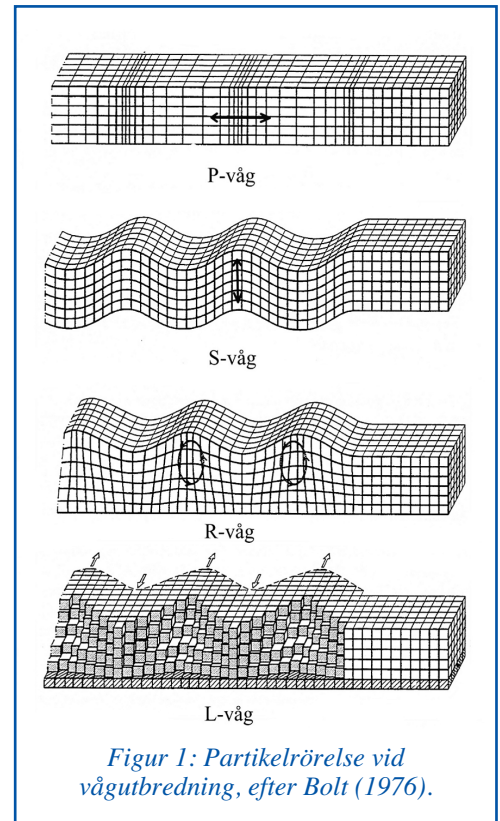
Bahrekaezemi et al (2008). Detta gäller särskilt vid sprängning intill befintliga tunnlar, som inte kan jämföras med byggnader på markytan.

Nytan av nya mät- och analysmetoder

Tack vare den snabba utvecklingen inom mättekniken och tillgången till kraftfulla datainsamlings- och analysprogram har det blivit möjligt att mäta vibrationer från sprängningar i ett stort antal mätpunkter och i flera riktningar. Mätresultaten kan överföras nästan omedelbart till internetbaserade databaser, där salvans utformning, sprängningsområdets läge och givarnas koordinater anges. Genom den digitala registreringen av hela svängningsförloppet är det möjligt att bestämma flera olika, för vågutbredningen viktiga, parametrar. Det är inte längre tekniskt eller kostnadsmässigt motiverat att endast mäta vibrationer i en (vertikal) riktning. Om hela svängningsförloppet registreras utan filtrering erhålls värdefull information som kan ligga till grund för mer tillförlitliga vibrationsprognoser. Tack vare moderna mät- och analysmetoder kan dessa prognosmodeller gradvis förbättras, som i sin tur leder till mer kostnadseffektiva och säkra sprängningsarbeten.

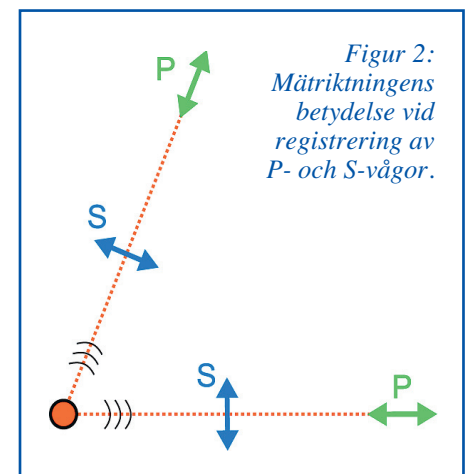
Vågutbredning i jord och berg

Nära detonationspunkten, där bergmassan spräcks upp, är vibrationerna mycket komplexa och svårbedömda. Med ökande avstånd (på avstånd större än cirka en våglängd) kan vibrationsutbredningen analyseras med hjälp av elasticitetsteorin. Huvudenergin utstrålas radiellt från sprängningsområdet i form av elastiska vågor. I ett kontinuerligt medium (det vill säga inga gränssytor) förekommer två vågtyper, P-vågor och S-vågor. P-vågen är en kompressionsvåg där partiklarna svänger i samma riktning som vågens utbreddningsriktning, *Bodare* (1997). S-vågen är en skjuvvåg där partikelrörelsen sker vinkelrätt mot utbreddningsriktningen. Längs en fri yta (markytan) finns ytvågor, *Rayleigh*-vågor (R) och i skiktade material förekommer dessutom andra vågtyper såsom *Love*-vågor (L), se *figur 1*.



Figur 1: Partikelrörelse vid vågutbredning, efter Bolt (1976).

Informationen i figur 1 är av praktisk betydelse vid val av en vibrationsgivares mätriktning, eftersom dess orientering i förhållande till vågutbreddningsriktningen bestämmer vilka vågtyper som registreras. Valet av en givares mätriktning förutsätter att sprängpunktens position i förhållande till respektive mätpunkt är känd, jämför *figur 2*. För att kunna jämföra vib-



Figur 2: Mätriktningens betydelse vid registrering av P- och S-vågor.

rationsmätningar i olika mätpunkter bör samma vågtyp registreras. Eftersom sprängningsinducerade vibrationer ofta domineras av P-vågor är det nödvändigt att vibrationsgivaren orienteras i vågutbredningsriktningen. De dominerande frekvenserna hos P-vågor är ungefär dubbelt så höga som hos S-vågor. Dessutom är vibrationsamplituden hos S-vågen normalt lägre än hos P-vågen vid sprängning. Ett alternativ är att utföra vibrationsmätningar i tre riktningar, och sedan beräkna den radiella komponenten.

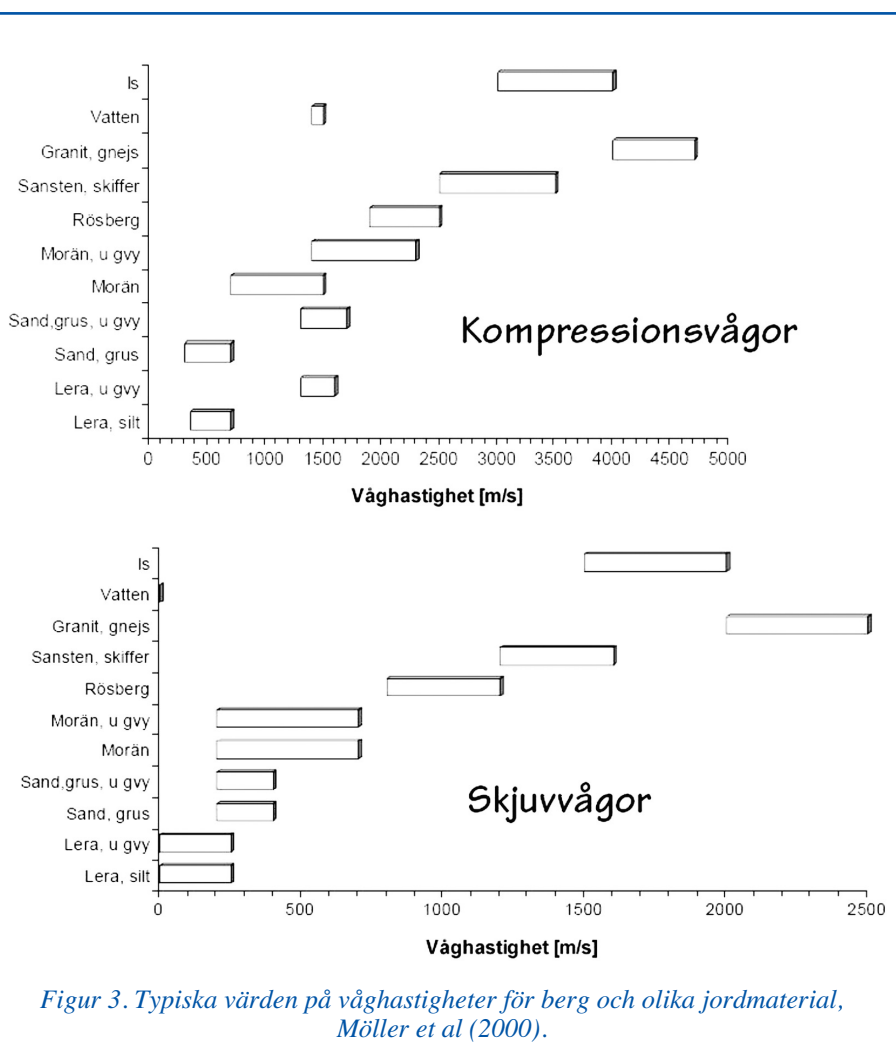
Våghastigheter i jord och berg

Vågor rör sig med en karakteristisk hastighet genom ett material, vågutbredningshastigheten, vilken är olika för P- och S-vågen. P-vågshastigheten, c_P , är den snabbaste och når först fram till observationspunkten. S-vågshastigheten, c_S , och ytvågshastigheten (R-vågen), c_R , är ungefär hälften så stor som P-vågshastigheten. En viktig aspekt är att P-vågshastigheten i vattenmättade material och i grundvatten är som lägst 1440 m/s. Typiska värden på våghastigheter visas i figur 3.

Sprängningsvibrationers egenskaper

En vibration kan beskrivas med hjälp av olika parametrar. Den vanligaste mätstorheten vid sprängningsarbeten är svängningshastighet, v (mm/s), som inte ska förväxlas med den ovan nämnda vågutbredningshastigheten. Svängningshastigheten anger hastigheten med vilken partiklarna rör sig kring en jämviktspunkt och är ett mått på vibrationsintensiteten. En vibrations variation med tiden kan också beskrivas genom accelerationen, a (m/s²) eller förskjutningen, u (m). Relationen mellan dessa tre parametrar bestäms av svängningsfrekvensen, f (Hz), som anger antal svängningar per sekund. Genom att registrera svängningsfrekvensen erhålls värdefull information. En typisk vibrationssignal från en produktionssprängning på cirka 40 m avstånd visas i figur 4. Varaktigheten är i detta fall cirka sex sekunder och den största svängningshastigheten är 53 mm/s.

Vid sprängning registreras vibrationers svängningshastighet ofta med geofoner. Alternativt kan mätningen utföras med accelerometrar, där svängningshastigheten fås genom integrering av accelerationen. Accelerometern har fördelen att den kan monteras i önskad riktning medan geofoner måste orienteras antingen i vertikal eller i horisontell riktning. Svängningshastighet är dock inte alltid den mest relevanta parametern för att beskriva en vibration. Dessutom har geofoner mättekniska begränsningar (mättriiktning, frekvensområde, dynamisk respons med mera). Vid bedömning av skaderisken kan det i vissa fall vara nödvändigt att även bestämma vibrationens förskjut-

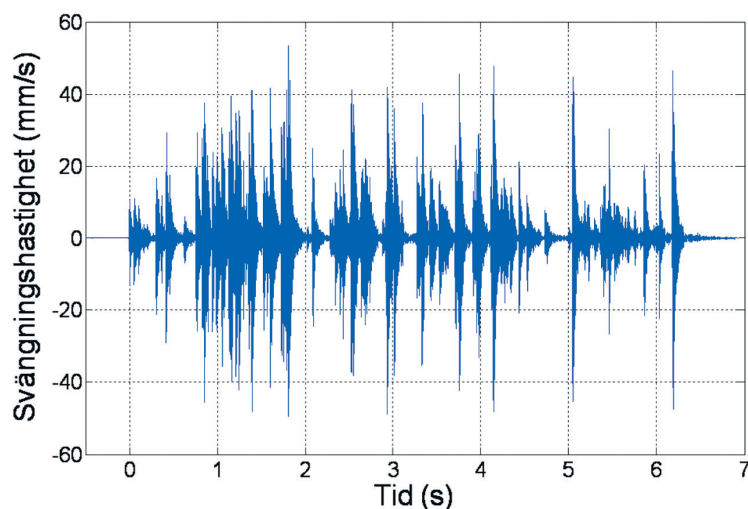


Figur 3. Typiska värden på våghastigheter för berg och olika jordmaterial, Möller et al (2000).

ningsamplitud, som erhålls genom integration av svängningshastigheten.

En viktig informationskälla för samverkan mellan en sprängning och omgivningen är vibrationssignalens frekvensinnehåll. Tack vare modern mät- och analys teknik är det enkelt att bestämma frekvensspektrumet. I figur 5 på sidan 68 visas frekvensspektrumet för vibrationssig-

nalen enligt figur 4. Två tydliga frekvenstoppar kan identifieras, vid 270 Hz respektive 380 Hz. Notera att en frekvensfiltrering enligt svensk sprängstandard skulle ha inneburit att en av frekvenstopparna hade filterats bort! Hade vibrationsgivaren registrerat S-vågen istället för P-vågen så hade den dominerande vibrationsfrekvensen varit betydligt lägre.



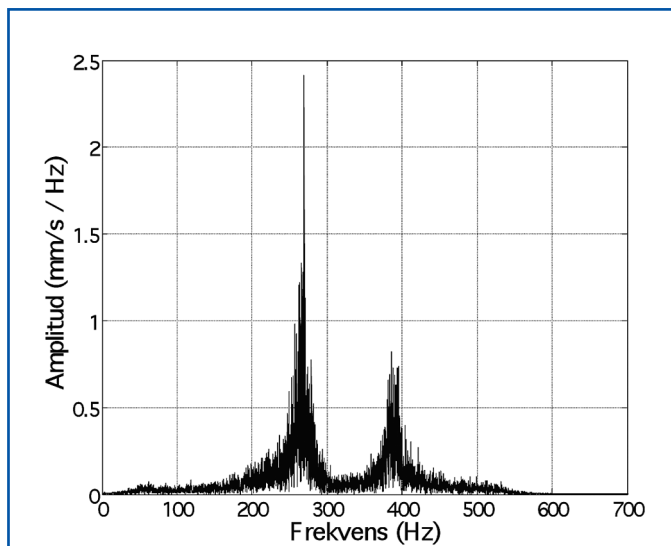
Figur 4: Vibrationssignal uppmätt i samband med tunnelsprängning: vertikal svängningshastighet i berg vid sprängning med samverkande laddningsmängd 1,6 kg.

Frekvensspektrumet visar den samverkande dynamiska responsen av givaren och dess underlag. Om underlaget består av uppsprucket berg så skulle frekvenstopparna förskjutas mot lägre frekvenser, en förändring som inte skulle kunna observeras i vibrationssignalens tidsförlopp. Vid installation av vibrationsgivare borde den dynamiska responsen av varje givare dokumenteras genom en impuls (hammarslag) på ett fastställt avstånd från givaren. Genom en sådan kontrollmätning skulle det vara möjligt att säkerställa att varje givare är fast förankrad i underlaget.

En annan viktig parameter är antalet svängningscykler, N , särskilt i material som är känsliga för utmattnings. Ett typiskt exempel är löst lagrad friktionsjord, där upprepade belastningscykler kan medföra sättningar eller hållfasthetsnedsättning. I figur 6 visas antalet svängningscykler från vibrationssignalen i figur 4. Det totala antalet svängningscykler, N , för denna salva är cirka 2600 svängningar. Det kan noteras att cirka 600 cykler har en svängningshastighet som är högre än 10 mm/s. En närmare diskussion av vibrationer från sprängningsarbeten har redovisats av Massarsch et al (2008).

Analys av vibrationssignalen

Vid vibrationsövervakning i samband med sprängningsarbeten är det vanligt att endast toppvärdet noteras, trots att ofta hela vibrationsförloppet registreras. Dessutom filtreras i många fall vibrationssignalen enligt svensk sprängstandard inom intervallet 5 till 300 Hz. Genom filtre-



Figur 5: Frekvensspektrum för vibrationssignalen enligt figur 4 med två frekvenstoppar vid 270 respektive 380 Hz.

ringen förändras vibrationssignalens utseende. Denna aspekt har stor betydelse vid prognos av vibrationsutbredningen, som diskuteras nedan.

En vibrationssignal innehåller mycket värdefull information som kan användas vid bedömning av vibrationspåverkan. Att endast beakta toppvärdet kan vara missvisande eftersom en "spik" i vibrationssignalen inte behöver vara representativ för den totala dynamiska belastningen av en struktur. Väl planerade och korrekt utförda vibrationsmätningar kan användas, inte enbart för passiv registrering av vibrationsgränsvärden, utan även som kontroll- och övervakningsmetod enligt "aktiv design"-principen.

Omfattande mätningar från produktionssprängningar har visat att frekvensspektrumet hos väl monterade vibrationsgivare har likartat utseende för olika

sprängsalvor, även vid varierande avstånd från mätpunkten. När den dominerande frekvensen av en vibrationssignal efter en sprängning sjunker indikerar detta att en förändring har skett, antingen hos givarens infästning eller i underlaget där givaren är monterad. En sådan förändring ger en förvarning – ofta i ett tidigt skede innan mer omfattande skador uppstår.

Konventionellt valda gränsvärden, till exempel enligt svensk sprängstandard, är till sin natur konservativa. Vid en kontinuerlig kontroll av vibrationers frekvensspektra skulle betydligt högre rikt- och gränsvärden kunna tillämpas. Entreprenören skulle dessutom få värdefull information om utformningen av en sprängsalva. Trots att det idag

inte finns några mättekniska begränsningar utnyttjas endast i undantagsfall informationen som väl utförda vibrationsmätningar innehåller. Samtidigt kan felmonterade vibrationsgivare ge missvisande information och leda till felbedömningar av sprängningspåverkan.

Val av vibrationsgränsvärden

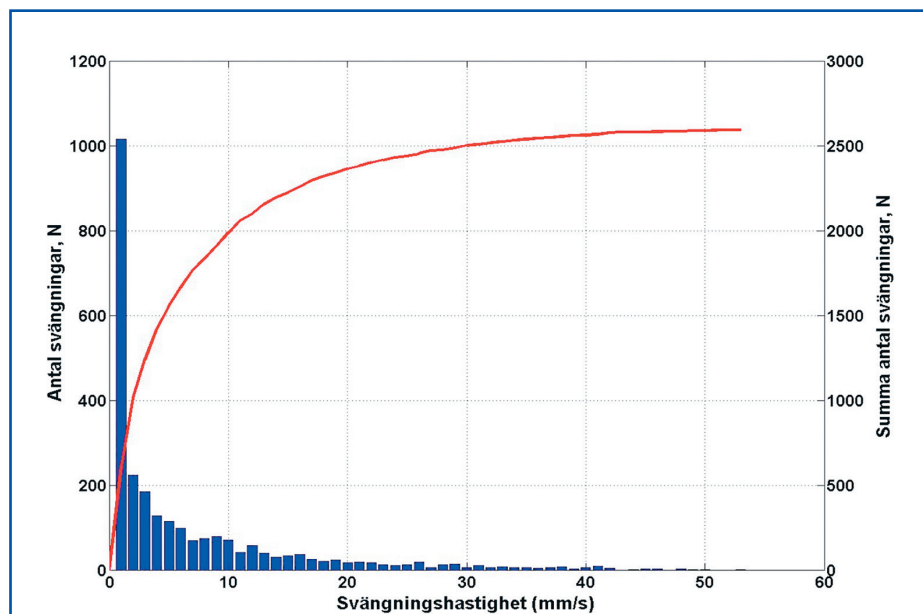
Sprängstandarderna gäller vid konventionella sprängningsarbeten för byggnader på eller nära markytan. Tillämpning av riktvärden enligt sprängstandarderna vid projekt som standarderna inte är avsedd för innebär att projektspecifika förutsättningar inte kan beaktas på ett ändamålsenligt sätt; ibland med negativa konsekvenser för projektets ekonomi och tidplan. För tunnlar i berg eller robusta anläggningar ger dessa riktvärden ofta allt för låga vibrationsnivåer – särskilt om avståndsfaktorn tillämpas – vilket kan innebära merkostnader.

Med hjälp av dynamiska samverkansanalyser är det möjligt att beräkna en konstruktions respons vid vibrationspåverkan. Genom val av frekvensberoende vibrationsgränsvärden (respons- och designspektra) som är vanliga inom strukturdynamiken, skulle i många fall sprängningsarbeten kunna utföras mera effektivt utan risk för skador.

En för sprängningstekniken viktig fråga är skadepotentialen av enstaka höga vibrationsvärden (högfrekventa spikar) i en salva, jämför figur 4. Genom tillämpningen av "ekvivalenta svängningscykler", där skadepotentialen av en enda hög vibrationsamplitud jämförs med ett större antal lägre vibrationsamplituder – ett förfarande som är vanligt inom bland annat jordbävningssområdet – skulle det vara möjligt att utföra sprängningsarbeten mer ekonomiskt utan avkall på säkerhet.

Vibrationsgivare i bergtunnlar

Montering av geofoner är betydligt svårare att utföra tillfredsställande i berg-



Figur 6: Svängningshastigheten som funktion av antalet svängningscykler N (blå staplar, vänster axel) samt uppsumeringen av antalet svängningscykler under en salva (röd kurva, höger axel).

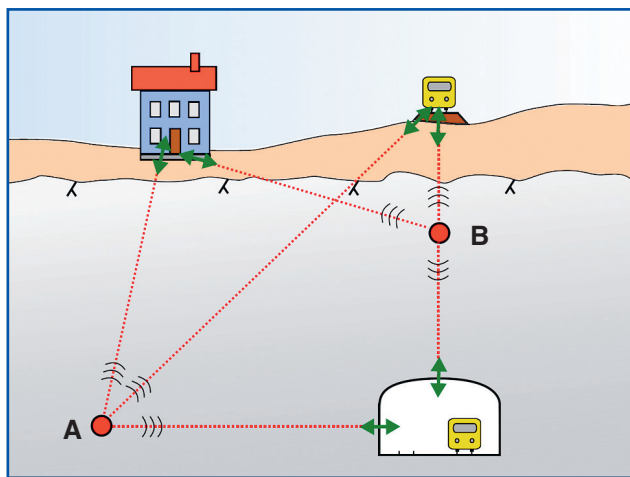
tunnlar än på byggnadsverk. Det kan vara svårt att orientera geofonen i lämplig mätriktning. Det är inte ovanligt att två närläggna geofoner på en tunnelvägg uppvisar stora skillnader i mätvärden. Svårigheten att få korrekta mätvärden beror bland annat på geofonens känslighet för avvikelser från den vertikala eller horisontella mätriktningen. Fel i mätresultat uppstår redan när geofonens lutning är större än cirka fem grader. Dessutom är underlaget, där givaren ska monteras, ofta ojämnt. Montering av geofoner i tunnlar borde därför utföras i två steg, där först en fästplatta spänns fast mot underlaget. Därefter borde givaren sättas fast med hjälp av en justerbar platta. Ett alternativ är att istället för geofoner använda accelerometrar, som kan monteras lutande eftersom de är helt okänsliga för mätriktning.

Ytterligare en faktor av betydelse är de höga accelerationsnivåerna som kan uppstå i berg på grund av höga frekvenser. Exempelvis erhålls vid en svängningshastighet av 100 mm/s och en frekvens av 500 Hz en acceleration på över 30 g, ett värde för vilket konventionella geofoner inte är dimensionerade. Då accelerationen förväntas vara hög (vilket kan antas inträffa vid sprängning i berg med svängningshastigheter över cirka 100 mm/s) bör därför mätning ske med accelerometrar. En god förankring av givaren i underlaget (berg eller sprutbetong) är en förutsättning för tillförlitliga vibrationsmätningar. Det är därför viktigt att infästningsbulten sitter tillräckligt styvt i underlaget, vilket kan garanteras med en momentnyckel som dras åt med ett förutbestämt vridmoment. Infästningen av givaren ska ske på ett ändamålsenligt sätt. I en med sprutbetong försedd tunnelvägg erhålls olika mätvärden om givaren bultas fast i det underliggande berget eller ytligt på sprutbetongsskiktet.

Vågutbredning i berg

Vid tunnelsprängning på större djup under markytan sker vågutbredningen radiellt från sprängplatsen i olika riktningar. Mätriktningens betydelse illustreras i figur 7. I bilden antas ett homogent material men i verkligheten påverkas vågutbredningsriktningen av de geologiska och geotekniska förutsättningarna, såsom förkastningar i berg, grundvatten och olika jordlager, Massarsch et al (2008).

Vid sprängning i punkt A sker utbredningen av P-vågen horisontellt mot tunnelväggen och nästan vertikalt mot byggnadens bottenplatta på markytan. För registrering av samma våg (P-våg) måste mätningen ske radiellt från sprängplatsen, det vill säga horisontellt i tunnelväggen och vertikalt i byggnadens fundament.



Figur 7: Vibrationsutbredning från två olika sprängplatser (A) och (B) till tunnlar, byggnader och anläggningar på markytan.

Om mätningen i tunnelväggen skulle utföras i vertikal riktning erhålls, enligt figur 2, S-vågens komponent, med lägre vibrationsamplitud och lägre frekvensinnehåll. Vid sprängning i punkt B, ovanför den befintliga tunneln, bör P-vågen mätas i tunneltaket i vertikal riktning. Den horisontella vibrationsgivaren i tunnelväggen registrerar däremot S-vågen, som har andra dynamiska egenskaper. Däremot infaller P-vågen i byggnadens fundament närmast i horisontell riktning.

Omfattande mätningar i samband med stora tunnelsprängningsprojekt har visat att den dominerande vibrationsfrekvensen hos P-vågen inte minskar nämnvärt med ökande avstånd vid utbredning i berg. Detta skulle innebära att avståndsfaktorn enligt svensk sprängstandard inte gäller vid tunnlar i berg.

Vibrationsdämpning i jord och berg

Vibrationsutbredningen kan analyseras med hjälp av elasticitetsteorin, Bodare (1997). Om endast geometrisk dämpning beaktas (det vill säga inga energiförluster

på grund av materialdämpning) kan vibrationsamplituden v_2 på avståndet r_2 beräknas med hjälp av ekvation (1) om vibrationsamplituden v_1 på avstånd r_1 antas vara känd

$$v_2 = v_1 \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^{-n} \quad (1)$$

där exponenten n är lika med 1 för P-vågor och n är lika med 0,5 för R-vågor. Vågens energi minskar inte enbart på grund av den geometriska dämpningen utan påverkas också av materialets dämpningsegenskaper. För att ta hänsyn till materialdämpningen införs en exponentialfunktion som multipliceras med ekvation (2), vilket ger följande samband

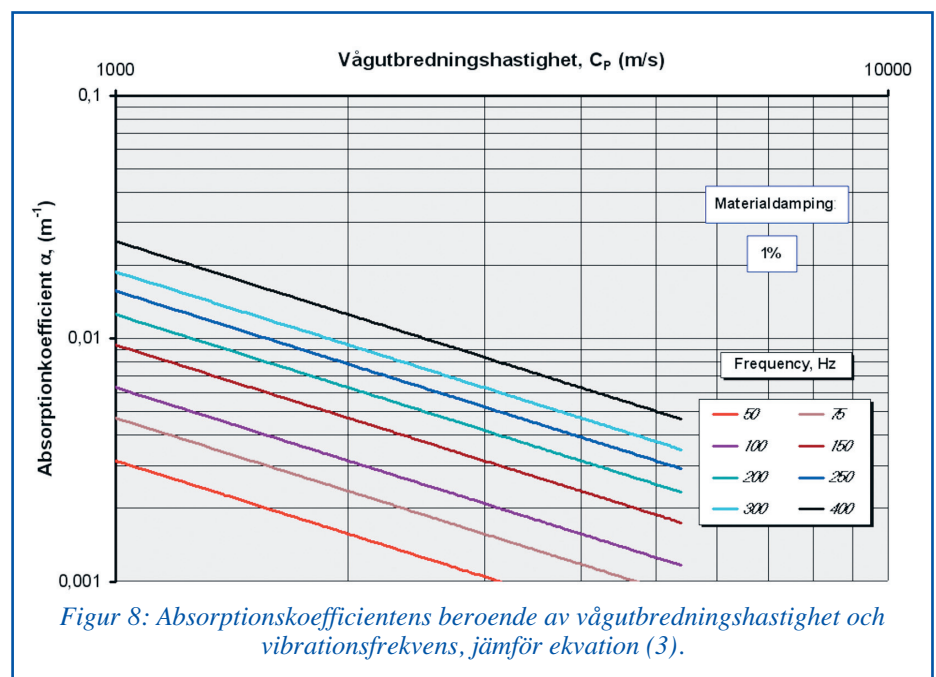
$$v_2 = v_1 \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^{-1} e^{-\alpha(r_2 - r_1)} \quad (2)$$

där α är en absorptionskoefficient som definieras enligt följande

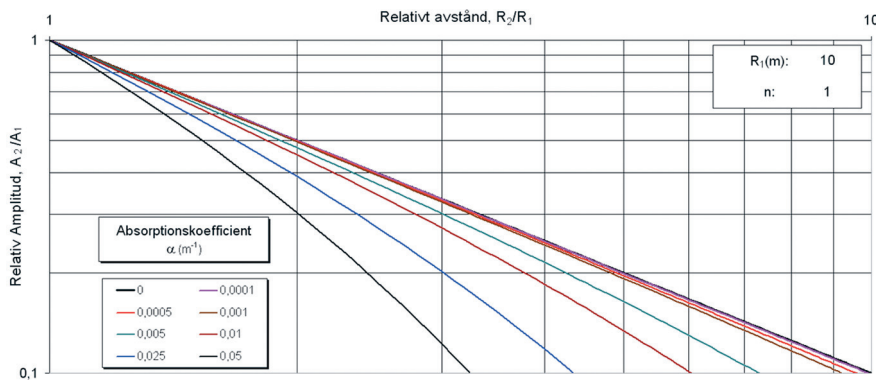
$$\alpha = \frac{2\pi D f}{C} \quad (3)$$

Absorptionskoefficienten α återspeglar materialets hysteretiska (friktions) dämpning och antas vara beroende av materialdämpningen D , vibrationsfrekvensen f och vågutbredningshastigheten C (P-vågshastigheten vid sprängning i berg). Vid små töjningar kan antas att materialdämpningen, D , är liten, av storleksordningen en procent. I figur 8 redovisas sambandet enligt ekvation (3).

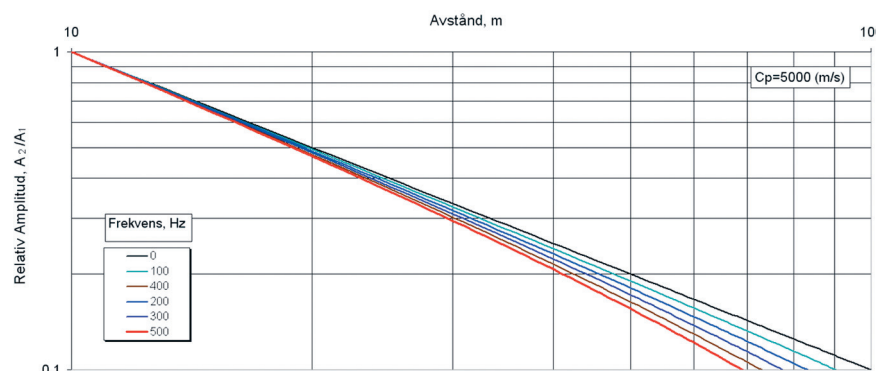
Absorptionskoefficienten minskar med sjunkande frekvens och ökande vågutbredningshastighet. I fast berg med en P-vågshastighet av 5000 m/s och en vibrationsfrekvens av 300 Hz fås α lika med 0,0037 m^{-1} och för 100 Hz är α lika med 0,0013 m^{-1} . I berg med sprickor eller förkastningszoner sjunker våghastigheten



Figur 8: Absorptionskoefficientens beroende av vågutbredningshastighet och vibrationsfrekvens, jämför ekvation (3).



Figur 9: Normaliserat diagram som visar inverkan av absorptionskoefficienten på P-vågor vibrationsdämpning i berg vid sprängning. Referensavstånd 10 m.



Figur 10: Dämpning av vibrationsamplituden som funktion av vibrationsfrekvensen mellan 10 och 100 m i fast berg.

markant och därmed ökar också absorptionskoefficienten. I löst berg med en P-våghastighet av 2000 m/s ökar absorptionskoefficienten vid 300 Hz till α lika med 0,0094 m^{-1} och vid 100 Hz till α lika med 0,0031 m^{-1} . I figur 9 redovisas som exempel vibrationers avståndsdämpning för P-vågor enligt ekvation (3) för olika värden på absorptionskoefficienten α .

Det är viktigt att beakta att kurvans lutning i figur 9 bestäms av vågtypen, det vill säga exponenten n , som för P-vågor är 1,0. Med hjälp av ekvationerna (2) och (3) är det möjligt att uppskatta den frekvensberoende avståndsdämpningen, jämför figur 10.

Utöver den hysteretiska dämpningen (det vill säga inverkan av antalet svängningscykler) kan även den viskösa dämpningen påverka vibrationsdämpningen. Denna effekt bedöms dock ha mindre praktisk betydelse vid vågutbredning i berg.

Inom sprängningstekniken har det varit vanligt att vibrationsprognoser görs på empirisk väg, genom regressionsanalyser från vibrationsmätningar, enligt den så kallade "skallagen". En i Sverige vanligen förekommande skallagsformel är

$$v = K \left(\frac{R}{\sqrt{Q}} \right)^{-n} \quad (4)$$

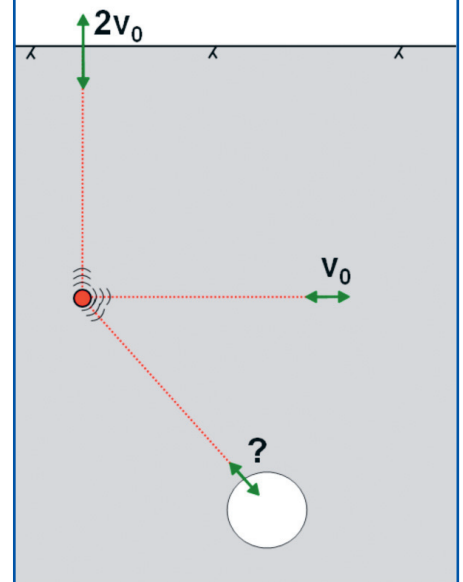
där v är maximal svängningshastighet (mm/s), R är avstånd från sprängplats till

mät punkt (m), Q är samverkande laddningsmängd (kg) och K och n är empiriskt bestämda konstanter. Olika skallagsformler har tagits fram och resultaten från sprängningar visar stor spridning. Skallagen kan vara av stor nytta när den används i områden med samma geologiska förutsättningar och om givarnas mätriktning registrerar samma vågtyp.

Vibrationspåverkan på tunnlar

Vid dynamisk påverkan på en bergtunnel råder helt andra förhållanden än för byggnadsverk på eller nära markytan. En bergtunnel utgör dessutom ett hålrum i ett nägorlunda kontinuerligt material, till skillnad från en byggnad på markytan med en huvudsaklig vertikal utsträckning och massor fördelade över olika våningsplan.

I figur 11 visas hur vibrationsamplituden från en sprängning i berg påverkas när den utbreder sig i olika riktningar. Den horisontellt propagerande vågen utbreder sig i ett oändligt medium och vibrationsamplituden antas vara v_0 . När den vertikalt utbreddande vågen reflekteras mot markytan fördubblas vibrationsamplituden, $2v_0$. Om en våg reflekteras mot en kavitet (tunnel) med begränsad dimension sker en vibrationsförstärkning, som är beroende av olika faktorer, såsom tunnelns geometri och vågens frekvens (våglängd). Denna frågeställning är komplex och har inte behandlats ingående i den



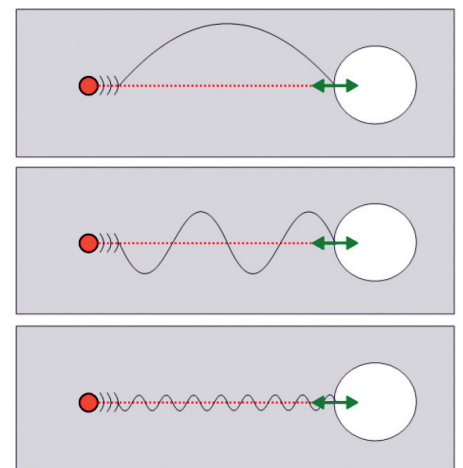
Figur 11: Vibrationsamplituden vid vågutbredning i berg i olika riktningar.

sprängtekniska litteraturen. Samverkan mellan en plan våg som utbreder sig i berg och cirkulär cylindrisk tunnel har analyserats ett examensarbete vid KTH, Wersäll (2008), och några av slutsatserna redovisas nedan.

När en vågfront träffar en tunnel med begränsat tvärsnitt reflekteras en del av vågenergin. Vibrationsamplituden beror på tunnelns storlek i förhållande till våglängden. Våglängden λ är en viktig, men sällan beaktad, faktor i samband med vibrationsproblem och kan bestämmas enligt följande ekvation

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (5)$$

där c är vågutbredningshastigheten och f är vibrationernas dominerande frekvens. Våglängden minskar med ökande frekvens. Som exempel kan antas att P-vågens utbredningshastighet i fast berg är 5000 m/s. Vid en dominerande frekvens av 500 Hz erhålls enligt ekvation (5) en våglängd av 10 m, som är av samma storleksordning som diametern av konventionell



Figur 12: Sambandet mellan tunneldiameter och våglängd vid vibrationsutbredning i berg.

nella tunnlar. I figur 12 illustreras relationen mellan våglängden och tunneldiametern. När våglängden är mycket större än tunneldiametern passerar vågfronten utan att vibrationernas karaktär ändras avsevärt. Vid korta våglängder sker en närmast fullständig reflektion av vibrationsamplituden. Som visats ovan är våglängden i berg ungefär av samma storleksordning som tunneldiametern och frågeställningen är komplex. Dels inträffar en reflektion av vibrationen längs den fria ytan, dels kan resonansförstärkning förväntas uppstå, liknande den hos byggnader på markytan.

Vibrationsförstärkning

Problemställningen har analyserats för en plan våg som träffar en cylindrisk kavitet. I figur 13 visas sambandet mellan förstärkningsfaktorn v_r/v_0 som funktion av tunnelns (kavitets) omkrets normaliserad med våglängden. Sambandet gäller för den radiella förstärkningen i den punkt där en plan P-våg infaller mot en cirkulär cylindrisk tunnel i ett homogent material. För vanligt förekommande tunnlar och sprängning i berg är tunnelns omkrets av samma storleksordning som våglängden (grått markerat fält). Vid stora våglängder (till vänster i figuren) är vibrationsförstärkningen försumbar. Vid korta våglängder uppstår en vibrationsförstärkning (fördubbling) av vibrationsamplituden (till höger i figuren).

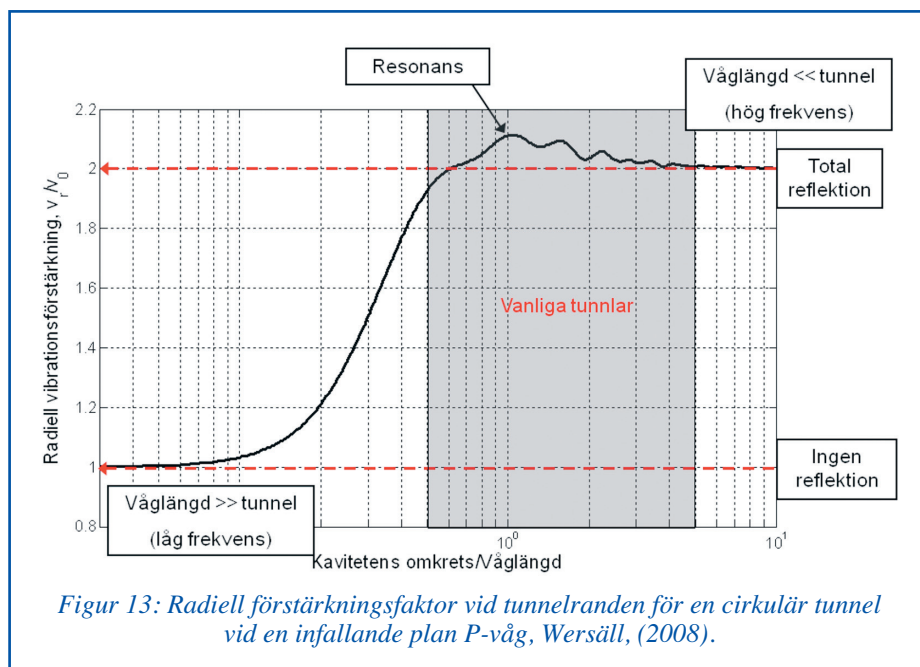
Tunnelns resonansfrekvens f_T kan beräknas ur följande samband

$$f_T = \frac{c_P}{2\pi r} \quad (6)$$

där c_P är P-vågens utbredningshastighet och r är tunnelradien ($2\pi r$ är tunnelns omkrets). Som exempel kan antas att tunneldiametern varierar mellan 8 och 16 m och att P-vågshastigheten är 5000 m/s. Tunnelns resonansfrekvens för P-vågor ligger då i detta fall mellan 100 och 200 Hz, ett vanligt förekommande intervall för dominerande frekvenser vid sprängning i berg.

Enligt figur 13 kan antas att vibrationsförstärkningen under normala omständigheter är cirka 2,0 i tunnelväggen. Kvoten mellan tunnelns omkrets och våglängden varierar i praktiken mellan cirka 0,5 och 10, vilket innebär att den radiella förstärkningen i princip alltid är två. Med ledning av figur 13 kan slutsatsen dras att resonansförstärkningen i tunnelväggen är låg (cirka tio procent) och i praktiken försumbar, till skillnad från vibrationsförstärkningen i jordlager eller byggnader på mark.

Inverkan av vågfronten på en cirkulär tunnels dynamiska spänningsfördelning har undersökts med hjälp av finita element metoden, Wersäll (2008). Av figur 14 framgår att de största tryckspänningarna (lila färg) uppstår i taket och i botten av den cirkulär cylindriska tunneln.



Figur 13: Radiell förstärkningsfaktor vid tunnelranden för en cirkulär tunnel vid en infallande plan P-våg, Wersäll, (2008).

Dynamisk spänningsändring

Den dynamiska spänningsvariationen, $\Delta\sigma$, överlagrar den befintliga, statiska spänningen och den maximala spänningsökningen runt tunneln kan uppskattas med hjälp av följande förenklade samband

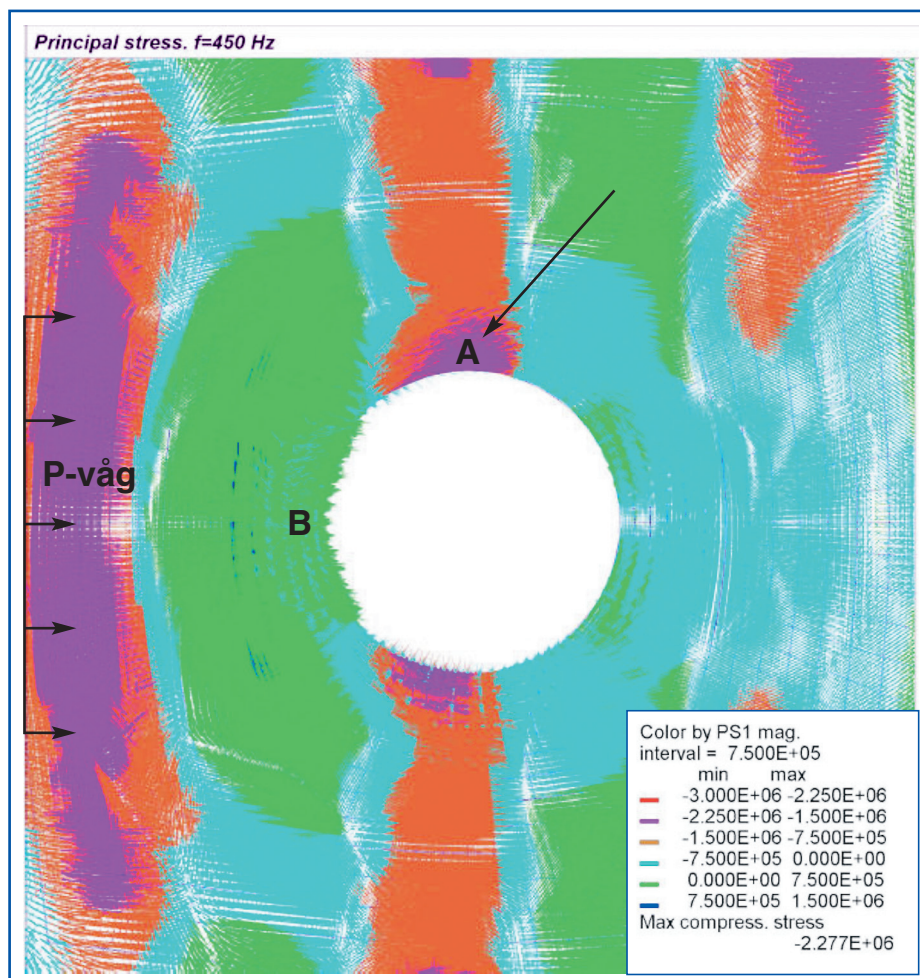
$$\Delta\sigma_{\theta\theta} \leq 3 z_P v_0 \quad (7)$$

där z_P är materialets specifika impe-

dans som kan beräknas om materialets densitet ρ och P-vågshastigheten c_P är känd

$$z_P = \rho c_P \quad (8)$$

Om bergmaterialets densitet antas vara ρ lika med 2,65 t/m³ och P-vågshastigheten c_P är lika med 5000 m/s erhålls materialets impedans för P-vågen z_P lika med



Figur 14: Dynamisk spänningsfördelning kring en cirkulär tunnel från en plan vågfront, där pilen indikerar den största dynamiska tryckspänningen, efter Wersäll (2008).

13 250 kPa/m³. Med hjälp av ekvation (7) kan den maximala dynamiska spänningsökningen i tunneltaket uppskattas. Vid ett vibrationsgränsvärde av v_0 lika med 100 mm/s erhålls en maximal tangentialsänkning i tunneltaket av 3 975 kPa (nästan 4 MPa), en tryckspänningsökning som inte är försumbar.

Spänningsbilden i figur 14 är av praktisk betydelse även för placeringen av vibrationsgivare för sprängningsövervakning, jämför mätpunkterna A och B. Mätpunkten B ger vid tunnelväggen en fördubbling av vibrationsamplituden, men i punkt A sker ingen vibrationsförstärkning. Detta innebär att den horisontella vibrationshastigheten kan förväntas vara dubbelt så stor i mätpunkt B jämfört med mätpunkt A. Däremot är svängningshastigheten i punkt A avgörande för den största spänningsökningen.

Slutsatser

Stora framsteg har gjorts inom jord- och bergdynamiken, som har inneburit ökad effektivitet och lägre kostnader för olika typer av anläggningsprojekt. Satsningen på forskning inom sprängningsområdet har dock varit begränsad, trots stora infrastrukturprojekt som utförs i tätbebyggda områden. Nya kunskaper inom jord- och bergdynamiken samt tillgången till effektiva mät och analysmetoder skulle kunna användas vid projektering, genomförande och övervakning av sprängningsarbeten. Svensk sprängstandard fyller en värdefull funktion vid konventionella projekt och inom tillämpningsområden för vilka standarden är avsedd, det vill säga för byggnader på mark, men bör användas med försiktighet vid komplexa problemställningar.

Med ledning av grundläggande principer inom jord och bergdynamiken, som diskuteras inom föreliggande artikel, kan följande slutsatser dras:

- Sprängningsarbeten förorsakar huvudsakligen P-vågor som utbreder sig radiellt från sprängplatsen. Vibrationsmätningar måste utföras i samma riktning som vågutbredningen. Mätriktningen beror på den

relativa positionen mellan sprängplatsen och mätpunkten. Vibrationsmätningar vinkelrätt mot vågutbredningsriktningen registrerar vibrationer från S-vågor, som skiljer sig från P-vågor.

- Vågutbredningen i berg och jordlager kan beräknas med ledning av elasticitetsteorin under beaktandet av den geometriska dämpningen och inverkan av inre dämpning.

- Konventionella skallagsformler bygger på regressionsanalyser, ofta utgående från registreringar i olika mättriaktningar. Dessutom påverkar frekvensfiltreringen enligt svensk standard mätresultatens tillförlitlighet, särskilt i sprängplatsens närområde.

- När vibrationer träffar en fri yta (till exempel markyta) fördubblas vibrationsamplituden. Dynamisk samverkan mellan vågor och tunnlar i berg är komplex, men kan analyseras teoretiskt. Våglängden har stor betydelse för den dynamiska samverkan. Vibrationer med korta våglängder reflekteras (fördubblas) längs tunnelväggen.

- Den dynamiska spänningsändringen kan vara betydande, av storleksordningen 1 till 4 MPa och bör beaktas vid riskanalyser av bergtunnlar.

- Resonansförstärkningen i tunnlar är låg jämfört med byggnader på markytan.

- Valet av rätt vibrationsgivare, placeringen i en tunnel och mättriaktningen är av stor betydelse för en tillförlitlig övervakning av sprängningsinducerade vibrationer.

- I många fall är det önskvärt att vibrationsmätning utförs med treaxiella givare, eftersom de ger värdefull information om vågutbredningen. ■

Referenser

1980. *Application of Stress-Wave Theory on Piles*, Proceedings, International Conference, Stockholm, 1980, Edited by H. Bredenberg, Balkema, Rotterdam.

1991. *Vibration och stöt – Riktvärden för sprängningsinducerade vibrationer i byggnader*. SIS/TK 111, SIS Förlag AB, Stockholm, 10 s.

Bahrekazemi, M., Bodare, A., Johansson, S.E. & Massarsch, K. R., 2007. *Vibrationsproblem vid tunnelsprängning i bebyggda områden*. Väg- och Vattenbyggen, no 4, pp 32–37

Bodare, A., 1997. *Jord och bergdynamik*. Kompendium, institutionen för jord och bergmekanik, KTH.

Bolt, B. A., 1976. *Nuclear explosions and earthquakes*. W. H. Freeman and Company, New York.

Holmberg, R., Lundborg, N. & Rundqvist, G., (1981). *Markvibrationer och skadekriterier*. Byggforskningsrådet. Rapport; R85:1981, 38 s.

Holmberg, R., (1982). *Vibrationer i samband med trafik- och byggverksamhet*. Byggforskningsrådet T43:1982, 112 s.

Lundborg, N., Holmberg, R. & Persson, P-A., (1978). *Markvibrationers avstånds- och laddningsberoende*, Byggforskningen. Rapport nr R11:1978 (Statens råd för byggnadsforskning), 90 s.

Langefors, U. & Kihlström, B., 1978. *The modern technique of rock blasting*. Almquist & Wiksell Förlag AB, Stockholm, Third edition. 438 s..

Massarsch, K. R., Jonsson, M. & Wersäll, C., 2008. Riskhantering vid sprängningsarbeten, Bygg & teknik, Vol. 100, no 1, s. 56–60.

Möller, B., Larsson, R., Bengtsson, P-E & Moritz, L., 2000. *Geodynamik i praktiken*. Statens Geotekniska Institut, Linköping, Information Nr. 17. 56 s.

Wersäll, C., 2008. *Blast-Induced Vibrations and Stress Field Changes around Circular Tunnels*. Master of Science thesis ISSN 1652-599X, Division of Soil and Rock Mechanics, Royal Institute of Technology, 82 s.