

Riskhantering vid sprängningsarbeten

Stora infrastrukturprojekt planeras och genomförs för närvarande i Sverige, ofta i tätbebyggda områden. Vid anläggningsarbeten, såsom sprängning och schaktning, uppstår i många fall buller och vibrationer som kan påverka boendemiljön och industriell verksamhet i omgivningen. Otillräckligt projektunderlag, brist på finansiella resurser, felprioriteringar, okunnighet hos projektörer eller felbedömningen av vibrationsproblem kan leda till skador, ökade kostnader och oväntade förseningar. För att begränsa konsekvenserna av vibrationspåverkan krävs i ökande utsträckning riskanalyser. Tyvärr saknas ofta förståelse för hur den tekniska riskhanteringen bör genomföras. Bristande kunskaper om risker vid sprängningsarbeten kan dessutom leda till en för konservativ projektering, med onödiga kostnader och förseningar till följd. Genom tillämpningen av en strukturerad riskhanteringsprocess vid sprängningsarbeten kan anläggningsprojektens kostnadseffektivitet höjas utan att riskerna ökar.

Anläggningsarbeten kan innebära olika risker, som ofta kan hänföras till specifika projektaktiviteter. Vid större byggprojekt har myndigheter, finansiärer, projektägare och även försäkringsindustrin börjat ställa krav på en strukturerad hantering av de

tekniska riskerna. Målsättningen är att genom riskhantering kunna åstadkomma en konstruktiv samverkan mellan berörda parter (dels projektören, entreprenören och ägaren/nyttjaren, men även grannar och tredje man). Därigenom skapas också en säkrare arbetsmiljö och ett ökat förtroende hos allmänheten. På så sätt kan riskerna sänkas till en nivå, som är tekniskt acceptabel och uppfyller projektets krav med avseende på ekonomi, tidplan, kostnader med mera.

Projekteringen och genomförandet av större anläggningsprojekt i bebyggda områden kan vara en komplex uppgift med ibland många involverade parter. Riskhanteringen bör därför ingå som en integrerad del i byggprocessens planering och genomförande – och inte behandlas som en skrivbordsprodukt eller från verkligheten isolerad aktivitet. Rätt använt utgör riskhantering ett effektivt styrinstrument för projektledningen.

Projektets planering och genomförande styrs och/eller påverkas av olika, ibland konkurrerande, villkor och regleringar, se *figur 1*. Anläggningsarbeten kan ha negativa effekter under byggskeendet men även påverka omgivningen på längre sikt (till exempel under drift- eller nyttjandeperioden). Genom tillämpningen av ett strukturerat riskhanteringskoncept kan oönskade effekter och negativa konsekvenser av olika aktiviteter identifieras och styras så att konsekvenserna kan hållas på en acceptabel nivå. Om riskhanteringen tillämpas i ett tidigt skede finns större möjligheter att kontrollera riskerna

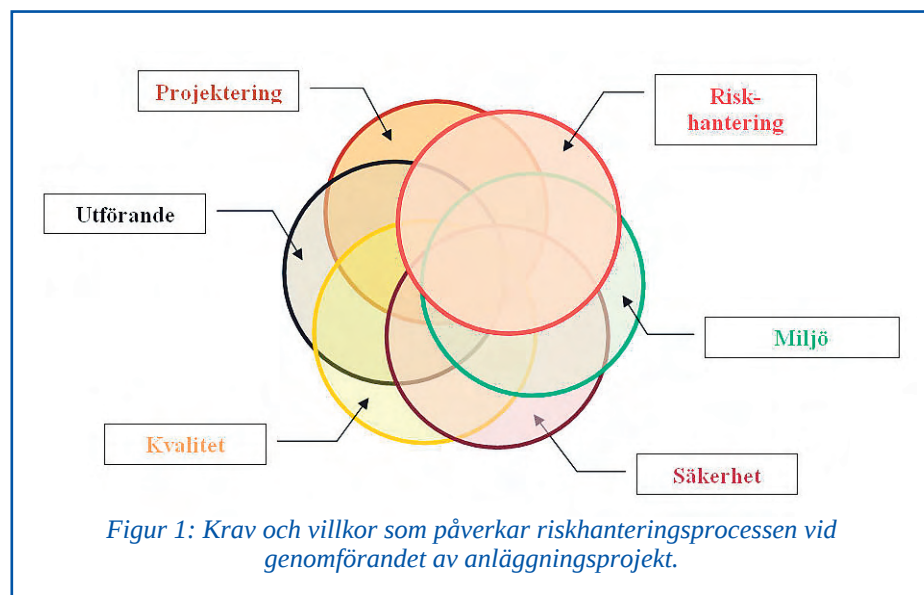
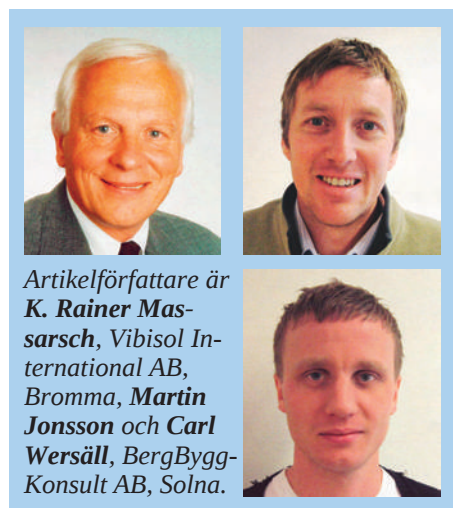
så att projektet kan optimeras med avseende på tidplan, kvalitetskrav, säkerhet och kostnader. Riskövervakning är kanske av ännu större betydelse vid mindre anläggningsprojekt eftersom skador eller förseningar i dessa fall kan orsaka proportionellt större konsekvenser.

Riskhanteringsprocessen bör koordineras med andra, relaterade projektaktiviteter, såsom miljökonsekvensbeskrivningen, utformningen av arbetsmiljöplanen och övervakningen av projektets specifika krav och förutsättningar.

Hantering av tekniska risker

Vid anläggningsarbeten förekommer huvudsakligen tekniska risker, men även naturliga risker (nederbörd, översvämningar, frost och i andra länder jordbävningar) kan bli aktuella. Syftet med en teknisk riskanalys är att i samband med projekteringen identifiera olika aktiviteter som kan påverka projektet och dess omgivning på ett negativt sätt. Ofta används begreppet ”riskanalys” utan förståelse för dess innebörd och praktiska tillämpning. Ibland blandas därför tekniska utredningar (till exempel vibrationsberäkningar) samman med riskanalyser. Riskanalysen har en mycket bredare målsättning än en teknisk utredning och ingår som en del i riskhanteringsprocessen.

En teknisk riskanalys utgår från oönskade händelser som kan uppstå i samband med olika byggaktiviteter. Eftersom det sällan finns tillräckligt statistiskt underlag för att uppskatta skaderisken måste riskbedömningar ofta baseras på subjek-



tiv erfarenhet, utgående från de projektspecifika förutsättningarna. Till skillnad från naturliga risker kan dock projektets händelser i högre grad styras och påverkas. Riskhanteringsprocessen vid anläggningsprojekt består av flera etapper som redovisas i figur 2.

1. Val av riskkategorier: Syftet är att samla likartade risker i en och samma grupp. Det är av fördel att begränsa antalet riskkategorier så att riskhanteringen förblir överskådlig. Riskkategorierna ska därför väljas utgående från projektets karaktär och specifika förutsättningar. Vid anläggningsprojekt kan riskkategorier exempelvis delas upp i följande grupper: 1) geoteknik/geohydrologi, bergmekanik, 2) miljö (mark, luft och vatten etcetera), 3) byggnader och konstruktioner på och under mark, 4) brand och explosioner, 5) gaser, kemiska risker, 6) samhällspåverkan (människor, industrier och annan verksamhet).

I en bredare riskanalys kan andra riskkategorier behöva tas med, såsom finansiella risker, förseningar, projektbeman-

ning, förtroende hos tredje man, brist på resurser (kompetens, material eller utrustning), politiska och administrativa förändringar (på lokal, regional och nationell eller internationell nivå).

Av sprängning förorsakade, oönskade händelser och faror kan tillhöra flera riskkategorier, eftersom dessa kan påverka geoförhållanden (till exempel sättningar i jordlager, hållfasthetsnedsättning genom uppspräckning av berg), miljö (buller, vibrationer, inverkan på jord och bergs stabilitet, utstötning av block i tunnelväggar, tryckvåg eller luftstöt), byggnader (skador i byggnader och deras grundkonstruktion), brand och explosion (feltändning, dolor, hantering av sprängämnen), gas och kemiska risker (giftiga ämnen i luft, förorening av sprängsten och grundvatten) samt samhällspåverkan (störningar för boendemiljön, inverkan på transporter och kommunikationer, driftstörningar i industriell verksamhet).

2. Beskrivning av projektaktiviteter: Till skillnad från naturliga risker uppstår vid anläggningsprojekt oönskade händel-

ser, och därmed förknippade faror, huvudsakligen på grund av planerade aktiviteter. Alla potentiellt farliga aktiviteter bör finnas upptagna och beskrivna i projektplanen, såväl i tid som i läge. Därför är det nödvändigt att identifiera och uppdatera dessa under projektets gång. Exempel på aktiviteter vid byggprojekt, som kan medföra oönskade händelser, är: sprängning, slagning av pålar eller spont, schaktning, fyllning och packning av jord- och bergmassor, lastning och transporter ovan och/eller under mark, borrhning, pumpning, injektering, ventilation samt förvaring av kemikalier och andra farliga ämnen. Projektaktiviteter blandas ibland samman med ovan nämnda riskkategorier.

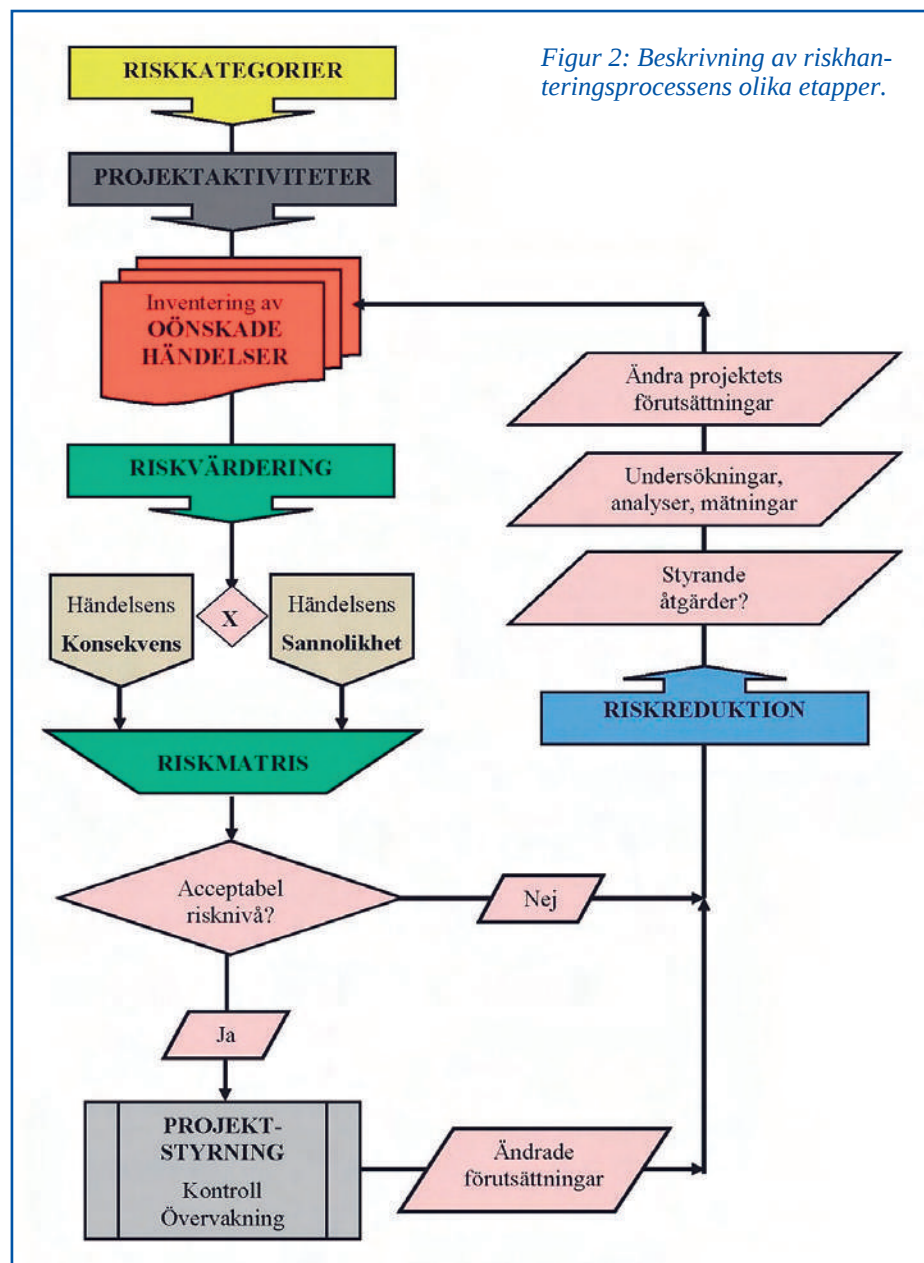
Sprängningsrelaterade aktiviteter bör fastställas i projektplanen med avseende på tid och position. Omfattningen kan variera från projekt till projekt. Sprängning anses ofta vara en specialistkompetens som endast kan planeras och utförs på empirisk väg, med stöd av erfarenhet från tidigare projekt. Därför överläts sprängningsarbeten ofta till underentreprenörer som inte alltid har full insyn i projektet som helhet. Därmed ökar risken för missförstånd, bristande kommunikationer och oklara ansvarsförhållanden vid eventuella skadefall.

3. Identifiering av oönskade händelser: Varje projektaktivitet kan medföra oönskade händelser som ofta identifieras utgående från erfarenheter från tidigare projekt. Arbetet utförs lämpligen med stöd av en riskmatris, som kan länkas till projektplanen och kontinuerligt uppdateras.

Under projekteringsskedet kan ett flertal aktiviteter innebära risker. Som exempel kan nämnas otillräcklig information om de geotekniska och bergtekniska förutsättningarna, brister i kartläggningen av byggnaders grundläggningsförhållanden, felbedömning av vibrationsutbredningen i olika geologiska formationer och val av relevanta vibrationsgränsvärden för byggnader, maskiner eller elektronisk utrustning. Under denna fas fastställs också ofta laddningsplaner utgående från liknande projekt, empiriska samband eller provsprängningar. I många fall installeras vibrationsmätare på vibrationskänsliga byggnader och andra anläggningsdelar eller i närbelägna tunnlar för att kunna övervaka och dokumentera eventuella överskridanden av gränsvärden.

Även under de förberedande och inledande sprängningsarbetena kan oönskade händelser uppstå, till exempel stömljud vid borrhning, buller och vibrationer från provsprängningar, stenkast, gaslukt och damm med mera. Det är inte ovanligt att de flesta klagomålen erhålls under ett tidigt skede av projektet. Därför är det angeläget att allmänheten informeras i god tid och på ett ansvarsfullt sätt. I denna strategi ingår också besiktning av

Figur 2: Beskrivning av riskhanteringsprocessens olika etapper.



byggnader (dokumentation av eventuella skador), provtryckning av röckanaler samt inventering av vibrationskänsliga anläggningar och processer.

De flesta och största riskerna uppstår dock i samband med produktionssprängningen. Borrningen och dess precision (position och lutning) måste kontinuerligt övervakas och dokumenteras. Val av samverkande laddningsmängd, typ av sprängämne, laddningsplan och tändfördröjning måste anpassas till de specifika förutsättningarna och eventuellt ändras under projektets gång. För detta ändamål är det viktigt att resultaten från vibrationsmätningar på relevanta mätpunkter utvärderas och bedöms på ett korrekt sätt.

4. Riskvärdering: Olika värderingsmodeller förekommer. Vid anläggningsprojekt sker riskvärdering ofta enligt "Delphi"-modellen, där ett flertal experter (som helst täcker olika teknikområden) granskar projektets aktiviteter med avseende på faror och oönskade händelser. Eftersom riskvärderingen avser byggprocessen bör även entreprenörens roll och ansvar (arbetsmiljöplanen) beaktas. Den tekniska riskvärderingen baseras normalt på sammanvägningen av två parametrar; **sannolikheten** för att en oönskad händelse inträffar, och **konsekvenser** som denna händelse kan ha för projektet och omgivningen. Värderingsskalan varierar från mycket låg till mycket hög, ofta uppdelad i fem steg. Risknivån beräknas genom multiplikation av sannolikheten och konsekvensen av den oönskade händelsen. Projektören (i samråd med entreprenören) har ofta den bästa kunskapen om olika aktiviteters utförande och kan därför lättast bedöma sannolikheten för att oönskade händelser inträffar. Vid bedömningen av händelsernas konsekvens bör däremot, utöver projektören (entreprenören), också berörda parter tillfrågas, eftersom de kan ha bättre kunskaper om aktiviteters konsekvenser.

Riskvärdering av sprängningsarbeten utförs ofta på empirisk väg, med stöd av erfarenheter från tidigare projekt under likartade förutsättningar. Eftersom sprängningsarbeten ofta utförs av underentreprenörer bör ansvarsfördelningen för eventuella skador klarläggas genom avtal. Det är dock viktigt att en riskansvarig utses inom projektledningen som har överblick över projektets olika aktiviteter och förutsättningar.

Bedömning av sannolikheten att oönskade händelser inträffar utförs lämpligen av en utsedd riskansvarig i samråd mellan projektören och entreprenören. Vid stora anläggningsprojekt kan konsekvensbedömningen av sprängningsarbeten vara en komplex uppgift som kräver omfattande resurser.

Bedömningen av konsekvenserna av olika projektaktiviteter involverar däremot också tredje part, till exempel ägare

av anläggningar och verksamheter inom riskområdet, som måste ges möjlighet att delta i beslutsprocessen. Många gånger bygger konsekvensbedömningen på subjektiva värderingar (till exempel inverkan av buller och vibrationer) som kan vara svåra att fastställa (till exempel vibrationspåverkan på maskiner eller känslig elektronisk utrustning). Ibland måste kompromisser göras mellan kravnivån och kostnader för skyddande åtgärder eller finansiell kompensation för skador.

5. Riskmatris: Resultatet av riskvärderingen sammanställs i en riskmatris, där risknivån för olika projektaktiviteter och/eller påverkan av dessa på specifika objekt registreras. Det finns olika sätt att skapa en riskmatris som ofta utförs med datastöd (genom upprättandet av ett riskregister). Riskmatrisen ska vara ett "levande dokument" som skapas under ett tidigt skede av projektet och sedan uppdateras kontinuerligt. Förändringarna i riskmatrisen ska kunna spåras. Riskmatrisen är nyckelverktyget för en strukturerad riskhanteringsprocess, eftersom den kan länkas till, och avstämmas med, olika ibland samtidigt pågående projektaktiviteter.

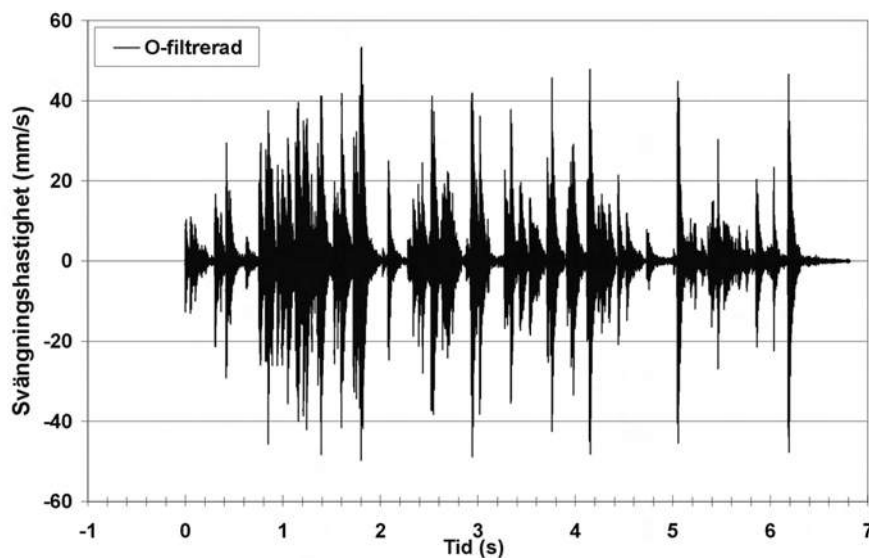
6. Projektstyrning: Riskmatrisen utgör ett verktyg för projektstyrningen och riskövervakningen bör ingå i projektledningens verksamhet, lämpligen med en särskild person som riskansvarig. Som ovan nämnt påverkar och påverkas riskhanteringen av flera olika frågeställningar, samt gällande lagar (miljöbalken, arbetsmiljölagen), kvalitetskrav, försäkringsvillkor med mera. När risknivån bedöms vara acceptabel för en specifik aktivitet kan risken "stängas" varvid detta också noteras i projektplanen. Skulle projektets förutsättningar eller villkor ändras så kan det vara nödvändigt att upprepa riskanalysen för denna aktivitet.

7. Riskreduktion: Om risknivån bedöms vara oacceptabel måste riskreducerande åtgärder vidtas. Detta kan ske genom styrande åtgärder (förändrade arbetsmetoder, förstärkningsåtgärder, kompletterande undersökningar och/eller analyser) samt tillämpningen av "active design"-konceptet (kontroll och övervakning i samband med projektutförandet samt förberedelse av skyddande åtgärder). Det är viktigt att en ansvarig utses för varje riskreducerande åtgärd, som ansvarar för att åtgärden utförs enligt tidplanen, i erforderlig omfattning och värderar konsekvensen med avseende på risknivån. Om styrande åtgärder inte finns tillgängliga måste projektets förutsättningar förändras (till exempel genom omprojektering eller val av annan bygglösning). En positiv bieffekt av att identifiera riskreducerande åtgärder är att om oönskade händelser inträffar så är organisationen förbered och en handlingsplan kan enkelt sättas in för att minimera eventuella störningar av projektet.

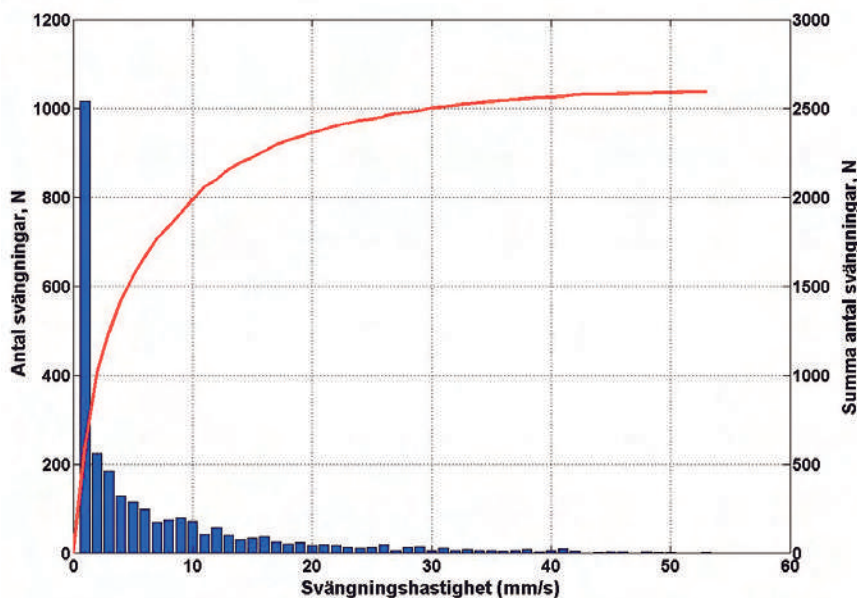
Vibrationer förorsakade av sprängningsarbeten

Vid sprängningsarbeten frigörs energi som har till uppgift att spräcka upp berg, till exempel i samband med tunnelprojekt. Salvorna kan bestå av ett stort antal detonationer som pågår under flera sekunder. Figur 3 visar svängningshastigheten som funktion av tiden och illustrerar att svängningsförloppet består av flera intensiva svängningscykler som motsvarar antalet intervaller i salvan.

I figur 4 på sidan 56 visas en utvärdering av svängningsförloppet med avseende på antalet svängningscykler, N. Stapeldiagrammet anger antalet svängningscykler inom olika intervall av svängningshastigheten. Dessutom har antalet svängningscykler summerats. Det totala



Figur 3: Vibrationsmätning i samband med tunnelsprängning: Vertikal svängningshastighet (maximalamplitud: 47,6 mm/s) uppmätt i berg vid sprängning med samverkande laddningsmängd 1,6 kg.



Figur 4: Svängningshastigheten som funktion av antalet svängningscykler, N , (blå staplar, vänster axel) samt uppsummeringen av antalet svängningscykler under en salva (röd kurva, höger axel).

antalet svängningscykler under salvan var 2 600, varav 600 var högre än 10 mm/s. Stapeldiagrammet visar att svängningshastighetens spridning vid högra amplituder är relativt stor och inte följer ett tydligt statistiskt samband.

Det är uppenbart att omgivningen vid endast en salva utsätts för ett stort antal svängningar och att vissa material, som är känsliga för cyklisk belastning (till exempel friktionsjord) eller för utmattnings (sprutbetong, bruk eller uppsprucket berg), kan påverkas negativt.

Svängningsrörelser karakteriseras av amplitudens variation med tiden (förskjutning, hastighet eller acceleration), men även av frekvensinnehållet (det vill säga antalet svängningscykler per se-

kund). För att kunna studera inverkan på byggnader, byggnadsdelar, väggar eller utrustningar med olika dynamiska egenskaper (resonansfrekvenser) kan det vara av betydelse att undersöka svängningsförloppets frekvensinnehåll. Ett inom strukturdynamiken vanligt förekommande sätt är att studera hur svängningsförloppet påverkar ett massa/fjäder-system vid olika frekvenser, Dowding (1985). I figur 5 visas ett så kallat responsspektrum, där vibrationens frekvensinnehåll har avsatts mot svängningshastigheten i ett dubbellogaritmiskt diagram. Där åskådliggörs dels den ofiltrerade signalen enligt figur 3, dels en filtrerad signal (filtrerad vid 300 Hz enligt svensk standard). Det är uppenbart att den maximala sväng-

ningshastigheten i figur 3 (som ofta används som skadekriterium) endast ger begränsad information om den potentiella skadeverkan av ett svängningsförlopp.

En fördel med redovisningen av ett svängningsförlopp i form av ett responsspektrum i dubbellogaritmisk skala är att man i samma diagram utöver svängningshastigheten även kan avläsa motsvarande förskjutningsamplitud och acceleration. Vibrationssignalen uppnår den maximala pseudohastigheten vid cirka 250 Hz. Begreppet "pseudohastighet" användas för att betona att detta värde är beräknat för ett fiktivt massa-fjäder-system med dämpning. Förskjutningsamplituden är vid denna frekvens cirka 0,3 mm och accelerationen cirka 70 till 80 g. I diagrammet kan tydliga resonanseffekter observeras vid flera frekvenser (22, 50, 250 och 300 Hz). Särskilt vid högre frekvenser påverkas svängningsamplituden genom filtreringen, vilket också kan ses i figur 5.

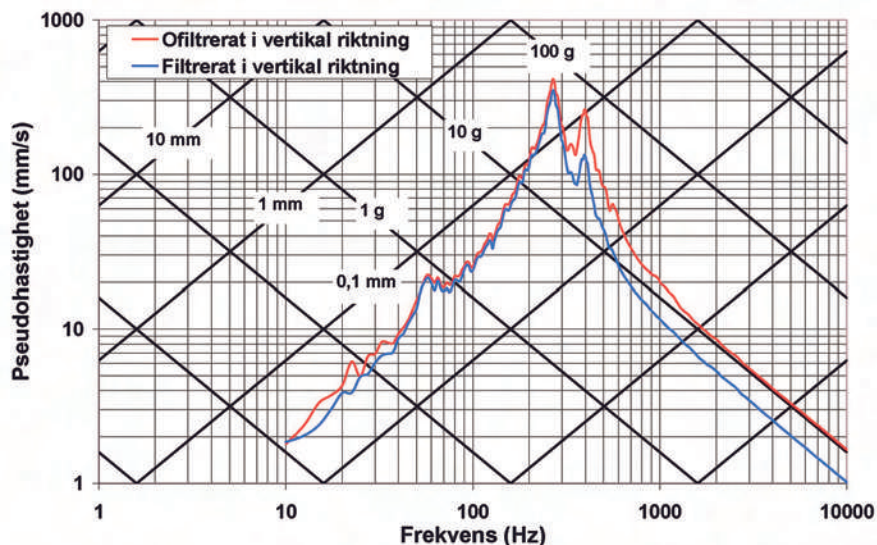
En vibrationsanalys med stöd av responsspektra ger värdefull information om påverkan på vibrationskänsliga byggnader, men även på byggnadsdelar (väggar), tunnlar och maskiner.

Sprängningsarbeten i bebyggda områden

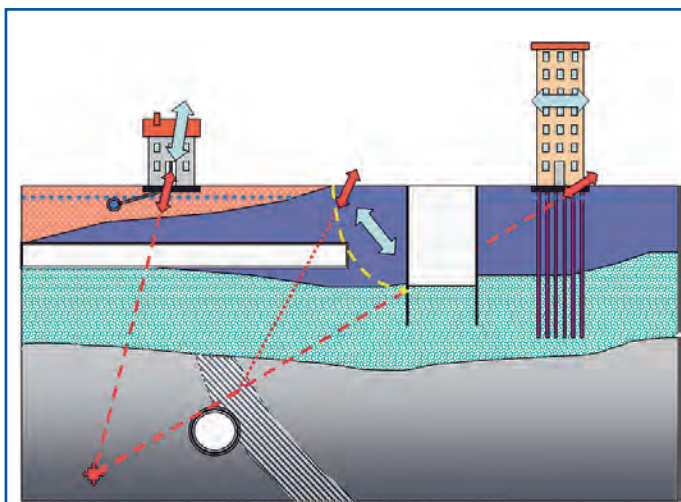
Vid sprängning i berg alstras huvudsakligen kompressionsvågor (P-vågor), som utbreder sig radiellt från sprängningsområdet. Vågutbredningens riktning och vibrationernas karaktär påverkas dock av de geologiska förutsättningarna, såsom förkastningszoner, sprickor i berg och de olika jordlagrens dynamiska egenskaper. Vibrationernas dominerande svängningsriktning styrs av sprängplatsens läge i förhållande till olika riskobjekt. I bebyggda områden påverkas byggnader och anläggningar på, men även tunnlar och installationer under markytan, se figur 6. Utförs sprängning direkt under en byggnad så kommer den vertikala svängningsrörelsen att dominera. Förkastningar och sprickzoner kan medföra en böjning och reflektion av vågutbredningen. Byggnader på större avstånd kan även utsättas för höga vibrationer i horisontell riktning.

En annan viktig fråga, som ofta förbises, är de geologiska och geotekniska förutsättningarna mellan sprängplatsen och olika riskobjekt. I figur 7 visas en geologisk karta av ett riskområde. En sprick- eller förkastningszon kan genom reflektion och refraktion ge upphov till vibrationsförstärkning framför, och avskärmningseffekter bakom en sprickzon.

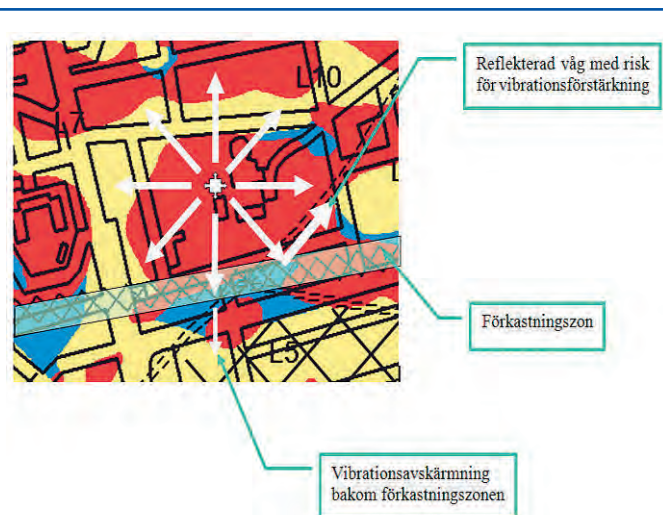
Under senare tid har effektiva numeriska beräkningsmetoder utvecklats, som möjliggör simulering av dynamiska problem i två och tre dimensioner. Kunskapen om berg och jordlagrens dynamiska egenskaper kan beaktas vid datasimulering. I figur 8 visas FEM-beräkningar som ska illustrera vågutbredningen i jord från en sprängning under mark. Beräk-



Figur 5: Responsspektrum av svängningsförloppet för en ofiltrerad och en filtrerad vibrationssignal, jämför figur 3 (responsspektrat är beräknat vid tre procent dämpning).



Figur 6: Vibrationer som alstras vid bergsprängning kan påverka byggnader och anläggningar både under och ovanpå markytan, Bahrekazemi et al. (2007).



Figur 7: Geologisk och geoteknisk bedömning av vågutbredningen vid sprängningsarbeten.

ningen visar vågutbredningsmekanismen, där kompressionsvågorna dominerar. På ytan bildas dessutom ytvågor som utbreder sig till omgivningen. De stora förskjutningarna som markerats med rött i figuren beror på en uppförstoring av deformationerna med en faktor 1000 för att enklare visualisera vågutbredningen.

Moderna beräkningsmetoder öppnar nya möjligheter att simulera vågutbredningen, men också den dynamiska samverkan mellan undergrunden och olika typer av byggnadsverk eller tunnlar. Datasimulering används rutinmässigt inom till exempel jordbävningstekniken eller vid dimensionering av off-shore-anläggningar. Det är något överraskande att datasimulering av sprängningsinducerade vibrationer sällan utnyttjas, trots de stora potentiella vinsterna av en mera tillförlitlig vibrationsprognos.

Riskbedömning enligt svensk standard

Svenska ingenjörer och entreprenörer har lång erfarenhet från sprängningsarbeten under mycket svåra förhållanden, *Langefors & Kihlström*, (1978). Svensk standard SS 460 48 66 (*Vibrationer och Stöt – Riktvärden för sprängningsinducerade vibrationer i byggnader*) används ofta med stor framgång som underlag vid riskbedömning. Under kapitel 5 (*Övrig kon-*

troll) nämns några frågeställningar som bör tas upp i en riskanalys:

- *Bedömning av risker förenade med geologiska förhållanden, geotekniska förhållanden och grundvattenförhållanden samt stabilitetsproblem och behov av sättningskontroller. När sådana risker föreligger bör en geoteknisk utredning utföras.*
- *Redovisning av närliggande byggnaders grundläggning och konstruktion.*
- *Förteckning över befintliga ledningar, tunnlar och bergrum.*

Tyvärr ger standarden ingen vägledning hur riskbedömningen bör utföras, samtidigt som det saknas anvisningar hur markvibrationsproblemen kan analyseras. Geotekniska frågeställningar behandlas dessutom på ett bristfälligt sätt. Exempelvis antas samma jorrdynamiska egenskaper för så skilda material som löst lagrad morän, sand, grus och lera. Ett sådant förfaringsätt vore otänkbart vid till exempel dimensionering av dynamiskt belastade fundament eller jordbävningsproblem.

Svensk standard bygger på erfarenheter från en tidsperiod då vibrationsmätningar var både komplicerade och dyra. Därför begränsades mätningen till endast en (vertikal) riktning. Som framgår av figur 6 och 8 sker vibrationsutstrålning vid sprängning under mark i olika riktningar. För en vibrationsprognos är det nödvän-

digt att mäta vibrationerna i tre riktningar. Eftersom endast då kan den resulterande svängningsresultanten bestämmas, jämför figur 6 och 7. Särskilt vid sprängning intill befintliga tunnlar har vågutbredningsriktningen stor betydelse och mätningar bör utföras i olika punkter längs tunnelväggen.

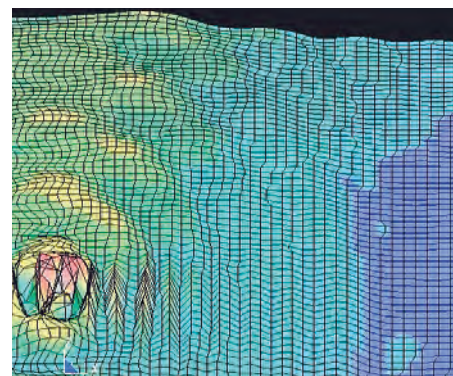
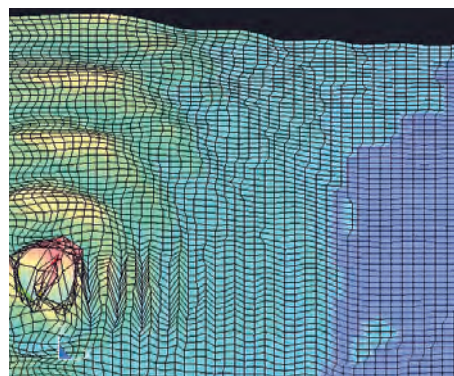
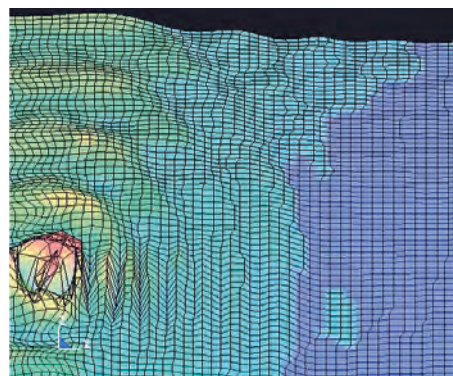
I Svensk standard beräknas gränsvärdet v med hjälp av följande empiriska formel

$$v = v_0 F_k F_d F_t \quad (1)$$

där v_0 är den okorrigerade svängningshastigheten (mm/s), som är beroende av typ av undergrund. För lösa jordlager (löst lagrad morän, sand, grus och lera) rekommenderas v_0 lika med 18 mm/s. Det är anmärkningsvärt att inverkan av grundvattennivån inte omnämns eftersom den har stor betydelse för vågutbredningen. För en noggrannare bestämning av v_0 rekommenderar standarden att tryckvågens utbredningshastighet (P -vågen), C_P , bestäms i grundläggningsnivå och v_0 beräknas enligt följande samband

$$v_0 = \frac{C_P}{65} \quad (2)$$

där v_0 anges i mm/s och C_P i m/s. *Tabell 1 på nästa sida* visar typiska värden för P -vågshastigheten i olika jordarter, samt i grundvatten. Vid tillämpningen av ekva-



Figur 8: Simulering av vågutbredningen i jord förorsakad av sprängning, simulerad med 2D-FEM program.

tion (2) med de i tabell 1 angivna värden på P-vågshastigheten skulle orimligt låga värden på den okorrigerade svängningshastigheten v_0 erhållas.

Det i svensk standard rekommenderade värdet (18 mm/s) motsvarar P-vågshastigheten i jordar under grundvattenytan. Värdena v_0 i torra jordar är orimligt låga och därför borde ekvation (2) inte användas.

I Svensk standard rekommenderas "som gräns för det område som besiktning skall omfatta avståndet 50 m för byggnader grundlagda på berg och 100 m för byggnader grundlagda på lera i områden med sammanhängande bebyggelse". Detta tolkas ofta som riskområdets utsträckning, trots att denna gräns endast avser besiktningen av byggnader. I många fall kan det vara motiverat att studera de geologiska förutsättningarna inom ett betydligt större område. Även de geologiska förutsättningarna mellan sprängplatsen och olika riskobjekt har stor betydelse för vibrationsutbredningen och borde omnämnas och värderas i en riskanalys.

En annan, allvarlig brist i standarden är att den inte närmare beaktar betydelsen av byggnaders grundläggning, exempelvis skillnaden mellan pålgrundlagda byggnader eller byggnader på löst lagrad friktionsjord (som är mycket sättning-skänslig). Särskilt vibrationskänsliga är byggnader med blandad grundläggning, där exempelvis en del av byggnaden är grundlagd på berg eller fast morän, och en del på ofta otillräckligt packade fyllnadsmassor. En vanligt förekommande – men ur jordodynamisk synvinkel felaktig – uppfattning är att pålgrundlagda byggnader kan jämföras med byggnader grundlagda på fast jord. Pålgrundlagda byggnader är styva i vertikalriktning men mycket känsliga för horisontalsvängningar, eftersom pålarna har mycket låg sidostyvhet.

Vid sprängning i närheten av en slänt, schakt, fyllning eller vägbank måste risken för släntrörelser beaktas. Det har visat sig att hållfastheten av en homogen lera inte nämnvärt påverkas av vibrationer. Däremot är varviga leror och leror med skikt av silt och sand mycket känsliga eftersom gränsskikten mellan sand och lera ofta består av kvicklera. Vid en temporär ökning av porvattentrycket kan effektivspänningen i friktionsjorden minska, med ökad risk för jordrörelser eller skred. Förekomsten av dessa riskjordar kan undersökas genom exempelvis geologisk karte-

Tabell 1. Beräknad okorrigerad svängningshastighet för olika jordarter samt motsvarande v_0 -värde enligt ekvation (2).

Jordart	Typisk P-vågshastighet, C_p m/s	Okorrigerad svängnings- hastighet, v_0 mm/s
Lös sand och silt ^{*)}	200	3
Medelfast sand ^{*)}	400	6
Mycket fast sand ^{*)}	600	9
Löst grus och singel ^{*)}	800	12
Fast morän ^{*)}	1 000	15
Grundvatten	1 450	22
Vattenmättad, fast morän	1 600	25
Sandsten	3 000	46

^{*)} ovanför grundvattenytan

ring, upptagning av jordprover eller trycksondering med porttrycksmätning (CPTU).

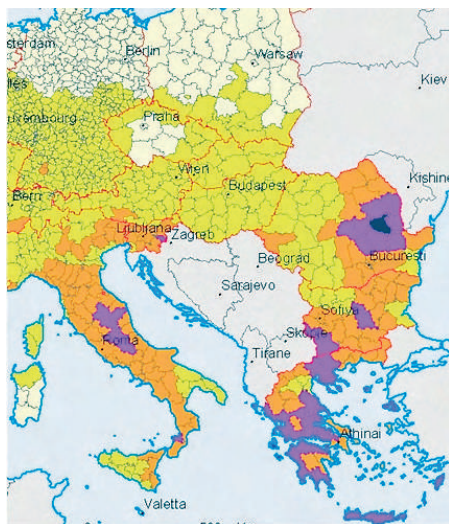
Standarden gäller för sprängningsinducerade vibrationer i byggnader. Dessa riktvärden ska användas vid bestämning av tillåtna vibrationsnivåer. I svensk standard används begreppen "gränsvärde" och "riktvärde" utan att skillnaden mellan dessa definieras. I SL:s Allmänna anvisningar Föl-364 ges en tydligare vägledning för val av gränsvärde respektive larmvärde. **Gränsvärde:** Arbeten avbryts. Orsak till överskridande ska utredas och åtgärder vidtagas. Arbetena får sättas igång endast efter godkännande av SL (TeBA Tekniska). **Larmvärde:** Meddelande och mätvärde ska tillsändas TeBA. Orsak till överskridande ska utredas och åtgärder vidtagas i samråd med TeBA. Den praktiska användningen av gränsvärden och styrvärden vid sprängningsarbeten beskrivs av Bahrekazemi et al. (2007).

Exempel på riskhantering inom EU

Riskhanteringskonceptet i föreliggande rapport bygger på erfarenheter från flera EU-finansierade forskningsprojekt (CALAR, GeoTechNet och ESPON) i vilka svenska organisationer och företag har medverkat. Riskbedömning tillämpas inom EU i ökande omfattning för att begränsa olika faror. Ett intressant exempel är det ännu pågående och mycket omfattande projektet ESPON (European Spatial Planning Observation Network) i vilket 27 europeiska nationer deltar, däribland Sverige genom SMHI. En viktig uppgift för ESPON är kartläggningen av naturliga risker (till exempel jordbävningar, översvämningar, jordskred), tek-

nologiska risker (till exempel kärnkraft, kemiska tillbud eller flygolyckor) eller kombinerade risker (till exempel klimatförändringar) i Europa. I ESPON:s Rapport 1.3.1 "Natural and technological hazards and risks in European regions" ges även en detaljerad beskrivning av riskhanteringsprocessen, samt hur den tillämpas i praktiken. ESPON-projektet utgår från en kartläggning av faror som bedöms enligt en expertbaserad beslutsmodell (Delphi-metoden). I Europa dominerar naturliga risker med 74 procent (till exempel översvämningar: 15,6 procent, skogsbränder: 11,4 procent och jordbävningar: 11,1 procent) jämfört med tekniska risker (bland annat kemiska olyckor, olyckor i kärnkraftverk, miljöfarligt avfall, sjötransporter och stora dammar), som utgör totalt 26 procent av alla risker. Utgående från ESPON-projektet har geologiska och geotekniska risker i samband med grundläggningsprojekt i Europa beskrivits av Massarsch & Topolnicki (2005).

En annan viktig aspekt vid riskbedömningen enligt ESPON-modellen är möjligheten att påverka olika faror och deras konsekvenser, samt hur samhället kan reagera. Resultaten från ESPON-studien används redan som underlag av beslutsfattare inom EU vid hantering av olika risker, exempelvis jordbävningar. Figur 9 visar inventeringen av jordbävningsfaran i sydöstra Europa. I figur 10 anges risknivån för jordbävningar utgående från deras intensitet och områdets sårbarhet. Figur 11 beskriver jordbävningsrisken enligt ESPON-metoden i samma region. En jämförelse mellan figur 9 och 11 visar att en motsvarande hög fara inte nödvändigtvis



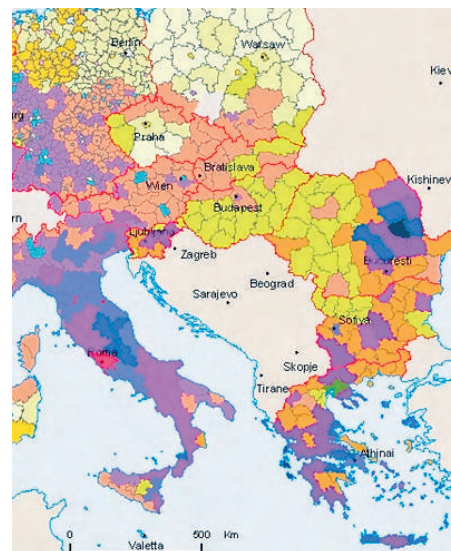
Figur 9: Fara för jordbävningar i sydöstra Europa enligt ESPON Rapport 1.3.1. Mörka färger indikerar högre fara för jordbävningar.

innebär en ökande risk eftersom risken enligt figur 10 också beror på områdets/samhällets sårbarhet (det vill säga möjligheten att stå emot yttre påverkan samt kapaciteten att återhämta sig från påverkan).

Inom ramen för EU:s olika forskningsprogram har ett flertal georelaterade, men mindre omfattande, riskhanteringsprojekt genomförts. Som exempel kan nämnas projektet CALAR (Concerted Action on Forecasting, Prevention and Reduction of Landslide and Avalanche Risks) som initierades och administrerades av Statens geotekniska institut, (SGI). CALAR behandlade risker i samband med jordskred och snölaviner samt andra typer av jord/stenrörelser.

Ett annat relevant EU-projekt är GeoTechNet, där forskare, konsulter men även entreprenörer, myndigheter och försäkringsbranschen medverkade. Inom ramen för projektet (Work Package 1: Con-

sultable database) etablerades en internetbaserad informationsdatabas (www.geotechnet.org). Work Package 4 ("Recommendations for improved health and safety conditions during geotechnical construction") behandlade säkerhetsfrågor på arbetsplatser och risken för skador i samband med grundläggningsarbeten. Europeiska entreprenörföreningen (European Federation of Foundation Contractors, EFFC) spelade en aktiv och viktig roll inom projektet. Work Package 5 ("Practice Document for Geotechnical Working Methods vs Environmental Impact") behandlade miljöpåverkan vid olika anläggningsarbeten. Naturliga risker inom geområdet behandlades inom Work Package 6 ("Determination of socio-economic impact of natural disasters"). All information från GeoTechNet-projektet är tillgänglig via internet.



Figur 11: Jordbävningsrisk i sydöstra Europa enligt ESPON Rapport 1.3.1.

Intensitet	Sårbarhet				
	1	2	3	4	5
1	2	3	4	5	6
2	3	4	5	6	7
3	4	5	6	7	8
4	5	6	7	8	9
5	6	7	8	9	10

Figur 10: Risknivå vid jordbävningar utgående från farans intensitet och områdets/samhällets sårbarhet för en fara (ESPON Rapport 1.3.1).

Slutsatser

Vid anläggningsarbeten förekommer i huvudsak planerade aktiviteter, som kan hanteras genom strukturerad riskhantering. Riskhanteringsprocessen bör ingå som en naturlig del i projektledningen, även vid mindre projekt. Det är möjligt

att genom en strukturerad riskhanteringsprocess minska eller begränsa riskerna samt att i god tid förbereda olika skydds- eller förstärkningsåtgärder. Riskhanteringen anses ofta vara en skrivbordsprodukt utan förankring i projektets verklighet. Rätt använd kan riskhanteringen leda till höjd projektkvalitet, kontroll av kostnader och tidplaner samt ett ökat förtroende hos allmänheten.

Vibrationer från en enda salva förorsakar komplicerade svängningsförlopp, som pågår under många sekunder och kan omfatta flera tusen svängningscykler. En mera realistisk beskrivning av vibrationers inverkan på byggnads-

verk eller tunnlar erhålls med hjälp av responspektra, där förskjutning, svängningshastighet och acceleration visas som funktion av svängningsfrekvensen. En korrekt bedömning av sprängningsinducerande vibrationer förutsätter att hänsyn tas till vågutbredningen i vertikal och ho-

risontal riktning. För en tillförlitlig bedömning av vågutbredningen inom ett riskområde måste de geologiska, bergtek-niska och geotekniska förutsättningarna beaktas.

Dynamiska påkänningar från sprängning kan simuleras med hjälp av numeriska metoder som beaktar jords och bergs dynamiska egenskaper. Dessa moderna beräkningsmetoder öppnar nya möjligheter att simulera vågutbredningen men också den dynamiska samverkan mellan undergrunden och olika typer av byggnadsverk eller tunnlar.

Svensk standard bygger på lång erfarenhet och kan användas som projekteringsunderlag vid konventionella sprängningsprojekt. Vid komplicerade projekt som kan innebära stora risker är standarden dock inte tillräckligt tydlig, och i vissa avseenden missvisande. Standarden ger ingen vägledning hur vanliga grundläggningsförhållanden såsom pålgrundläggning, plattor på friktionsjord eller inverkan av grundvatten ska behandlas. En vibrationskänslig jordart är vattenmättad sand och silt, som är mycket sättning-skänslig och kan förlora hållfastheten även vid relativt låga vibrationsnivåer. Det bör också påpekas att svensk standard gäller för sprängningsinducerade vibrationer i byggnader, vilket ofta glöms bort när den tillämpas på andra typer av konstruktioner (till exempel tunnlar under

jord eller vibrationskänsliga byggnadsverk).

Referenser

Bahrekazemi, M., Bodare, A., Johansson, S-E., & Massarsch, K. R. (2007). *Vibrationsproblem vid tunnelsprängning i bebyggda områden*. V-byggaren, Nummer 4, s. 32–37.

CALAR. (2000). Concerted Action on forecasting, prevention and Reduction of Landslide Avalanche Risks (CALAR). Contract No. ENV4-CT97-0551. Final report + Appendices. Eds: Berggren, B, Berglund, C. Statens geotekniska institut, SGI. Varia 496. 2000, 41 s + 304 s. (Appendices).

Dowding, C. H., (1985). *Blast vibration monitoring and control*, Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, NJ, 297 s.

ESPON (2006). Natural and Technological Hazards and Risks Affecting the Spatial Development of European Regions. Report ESPON 1.3.1. Geological Survey of Finland, Espoo 2006 P. Schmidt-Thomé (Editor), www.espon.lu.

Langefors, U., & Kihlström, B., (1978). *Modern technique of rock blasting*, AWE/Gebers, Stockholm, 3 ed, 438 s.

Massarsch, K. R., & Topolnicki, M. 2005. Regional Report: European Practice of Soil Mixing Technology. Proceedings, Intern. Conf. On Deep Mixing, Stock-

holm, 23–25 May, 2005. Vol. 1, s. R1 – R28.

SIS (1991). Vibrationer och Stöt – Riktvärden för sprängningsinducerade vibrationer i byggnader, Svensk standard SS 460 48 66. SIS TK 111, Utgåva 2, SIS Förlag AB, 10 s.

SL (2007). Allmänna anvisningar FöI-364: Sprängningsarbeten inom eller i närhet av AB Storstockholms Lokaltrafik spåranläggningar: utgåvenummer 3, gäller från 2006-11-01, 19 s.