

Explosionsbelastade betongkonstruktioner

Institutionen för konstruktions- teknik/Betongbyggnad på Chalmers utvecklar tillsammans med Räddningsverket en FEM-baserad analysmetodik för splitterbelastning mot betongkonstruktioner. Avsikten är att kunna värdera befintliga och planerade byggnaders skyddsförmåga. Detta gäller såväl vanliga byggnader som mer speciella lokaler och funktioner såsom skyddsrum och räddningscentraler.

Samhällets beredskap att klara olika former av kriser och svåra påfrestningar avser betydligt mer än att bara utnyttja armerad betong för att bygga skyddsrum och räddningscentraler. Det handlar om ett helt krishanteringssystem, där en särskilt utformad byggproduktion endast ska tillgripas i den omfattning som verkligen är motiverad. Men när inget annat

hjälp måste betongen kunna ta upp såväl stötvåg som splitter. För detta krävs kunskap om snabba belastningsförlopp, en kunskap som är en förutsättning för förmågan att skapa fysiskt skydd för människor. Är kunskapen stor blir också förmågan stor och då kan tillämpningen bli kostnadseffektiv och genomförandet ske vid rätt tillfälle.

Krishanteringssystemets basförmåga utgörs av den grundläggande robusthet och motståndskraft som finns inbyggd i samhället. Denna avser främst normala fredstida störningar och vardagsolyckor, men också händelser med mer omfattande konsekvenser. Ett viktigt tillägg till denna basförmåga är samhällets särskilda beredskap mot ett väpnat angrepp. Sammantaget ska denna verksamhet syfta till att ge samhället förmåga att skydda befolkningen och samhällsviktig verksamhet mot allvarlig skadegörelse eller åverkan på grund av sabotage, terrorism och krigshandlingar. I denna förmåga ingår att upprätthålla och utveckla en kontinuerlig kompetens samt de grund-



Artikelförfattare är (fv) tekn lic **Josef Leppänen**, Chalmers Tekniska Högskola, civilingenjör **Björn Eken-gren**, Räddningsverket, professor **Kent Gylltoft**, Chalmers Tekniska Högskola, tekn dr **Morgan Johansson**, Reinerntsen AB och tekn dr **Mario Plos**, Chalmers Tekniska Högskola.

läggande åtgärder som kan krävas för en anpassningsprocess i de fall åtgärder skjuts på framtiden.

Vid krigshandlingar av större omfattning måste särskilda åtgärder vidtas för att fysiskt skydda befolkningen mot vapenverkan och andra hot. Det är Räddningsverket som har uppgiften att säkerställa att befolkningen kan få ett sådant skydd. Med den hotbild som råder är det dock inte nödvändigt att för närvarande ha en ytterligare produktion av skyddsrum utöver det stora bestånd som hittills skapats, utan det handlar i stället om att ha en förmåga att vid rätt tillfälle kunna vidta åtgärder. Att ha denna förmåga innebär att kunna identifiera problem, lösa dessa, se alternativa lösningar, balansera insatser och välja tid för genomförande. Nödvändig förmåga måste därför sökas,



Figur 1: Exempel på byggnadsverk där det finns risk för explosionsbelastning.

uttryckas, prövas, systematiseras och ställas redo.

Man måste naturligtvis i denna situation ställa sig frågan om man har denna förmåga. Det kan vara en stor skillnad i att låta det tekniska kunnandet finnas och leva i en löpande produktion och att genom en fristående kunskapsuppbyggnad systematiskt få upp en förmåga som gör att en produktion är möjlig att genomföra vid det tillfälle man väljer utifrån en föränderlig hotbild. I det förra fallet riskerar kunskapsförnyelsen att bli eftersatt, medan det senare fallet visserligen vinner i kunskapsdjup, men samtidigt riskerar att tappa verklighetskontakt om man inte har tillräckligt många tillämpningsobjekt. Kunskap och produktion är således kommunicerande kärl och för det fysiska skyddet är det en klar kvalitetsfördel om kunskapsdelen får väga tyngst. Därmed är förutsättningarna för en rätt produktion goda i ett anpassningsskede. Satsningen på forskning för att ta fram kvalificerade analysverktyg är således här en strategisk nödvändighet.

Forskning – en nödvändighet!

Inom konstruktions- och mekanikområdet håller den ökade och förändrade datoranvändningen på att kraftigt ändra analys- och dimensioneringsprocessen. I forskningen har det lett till att datorbaserade analysmetoder kan användas i kombination med laboratorieexperiment på ett kraftfullt men annorlunda sätt än tidigare. Laboratorieexperiment sker i allt kortare serier men med noggrannare mätningar. Detta ger indata till datormodellerna, som sedan verifieras stickprovsmässigt med större försök i laboratorium. Kombinationen experiment och datoranalyser är ett effektivt och fruktbart sätt att öka kunskapen om det mekaniska verkningssättet och i förlängningen också kunna utveckla dimensionerings- och konstruktionsprocessen.

Den ständiga utvecklingen inom materialområdet, nya tillämpningar för betongkonstruktioner och alltmer extrema belastningssituationer gör att ny forskning inom konstruktionsområdet ständigt måste bedrivas. Ett mycket påtagligt exempel på extrema belastningssituationer är just här aktuellt område, med bombdetonationer, splitter och projekttilgenomträngning av betongväggar till bland annat skyddsrum. Här uppstår dynamiska situationer i kombination med extremt höga tryck och höga temperaturer med materialomvandlingar som följd. Dessa tillämpningar ger mycket utmanande och intressanta problem att lösa samtidigt som konstruktionerna är av fundamental betydelse för i detta fall skyddsrummets fortbestånd vid angrepp. Vid Chalmers Betongbyggnad har sedan ett flertal år bedrivits ett mycket gott och förtroendefullt samarbete med Räddningsverket inom området bärförmåga hos skyddsrum. Forskningen har givit ett för båda parter mycket fruktbart resultat både i form av nya forskningsresultat och underlag för

regelverk samt utbildning i form av nyexaminerade forskarstuderande. Denna typ av samarbete ger ett mycket effektivt utnyttjande av forskningsresultaten och visar fram emot att denna arbetsform kan få fortsatt tillämpning inte bara inom detta projekt utan också inom flera andra forskningsområden.

Finita elementmetoden (FEM) är idag ett allmänt använt ingenjörsverktyg för dimensionering och analys av bärande konstruktioner. Med FEM kan godtyckliga geometrier och tredimensionella spänningstillstånd modelleras för såväl statisk som dynamisk belastning. Med hjälp av FE-analyserna fås en mycket överskådlig överblick av deformationer, svängningar, spänningar etc i konstruktionen.

Oftast utförs FE-analyserna under antagande om linjärelastisk respons hos konstruktionen. I betongkonstruktioner uppstår dock sprickbildning som regel redan för brukslaster, och vid högre belastning plasticerar armering och betongen kan krossas i tryck. För att verkningssättet hos en betongkonstruktion ska kunna återspeglas på ett riktigt sätt i FE-analysen måste därför olinjära FE-analyser utföras, där materialens olinjära respons beaktas.

Denna typ av olinjära analyser utförs idag regelmässigt inom forskningen på Chalmers, där den används i strategisk kombination med experimentell verksamhet. Därvid används kommersiellt tillgängliga programvaror, men utveckling sker samtidigt av egna materialmodeller etc, vilka kopplas till de använda pro-

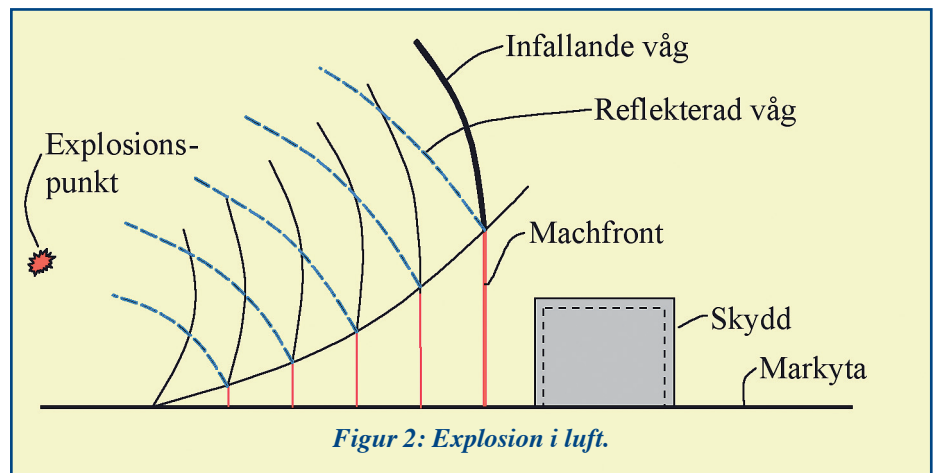
grammen. Även kommersiellt har olinjära FE-analyser av betongkonstruktioner börjat användas, främst för utvärdering av befintliga konstruktioners bärförmåga, såsom för broar, kärnkraftverk och offshorekonstruktioner.

Explosionslaster

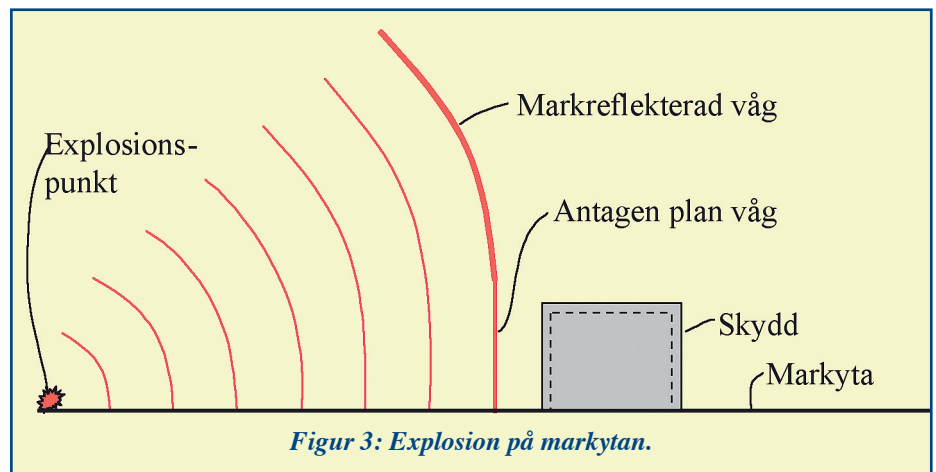
Kravet på det fysiska skyddet utmärks främst av att belastningsförloppet är avsevärt snabbare än normalt. De skyddsrum och räddningscentraler som behövs ska ge skydd mot de direkta och indirekta verkningarna av bland annat explosionslaster och dessa laster ska då hanteras utöver gängse husbyggnadslaster. Här handlar det om stötvåg genom luft och mark samt belastning via splitter som kommer från en bomb genom att bombhöljet fragmenterats vid explosionen.

Vid en explosion av en bomb frigörs det mängder av energi, en stötvåg utbreder sig och splitter kommer farande mot konstruktionen. Beroende på avståndet och explosionens storlek kan antingen stötvågen eller splittret träffa konstruktionen först, alternativt att de träffar konstruktionen samtidigt.

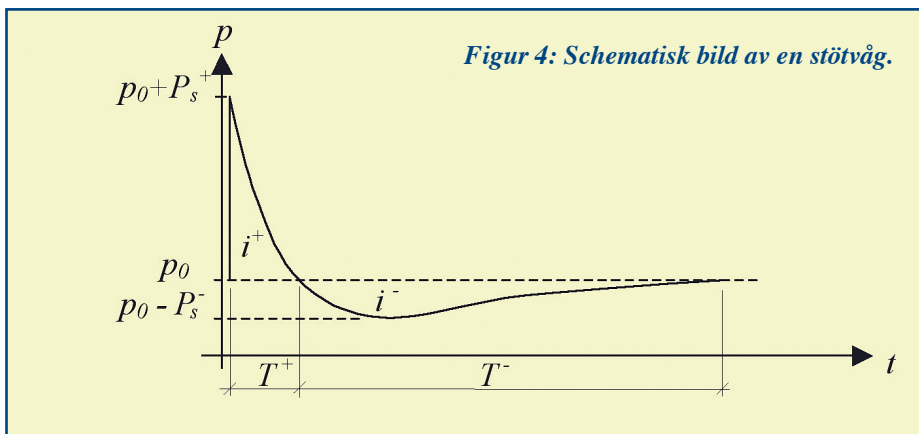
Karaktern av en stötvåg är beroende på var explosion sker. Vid en explosion i luft, kommer stötvågen att reflekteras när den når marken. Den infallande och den reflekterade stötvågen sammanfaller och bildar en tredje stötvåg kallad Machfront, se figur 2. I fallet då bomben exploderar i markhöjd, reflekteras stötvågen omedelbart, se figur 3, med följden att energin i



Figur 2: Explosion i luft.



Figur 3: Explosion på markytan.



Figur 4: Schematisk bild av en stötvåg.

stötvågen blir ungefär dubbel så stor än om den hade briserats i luften.

Tryckets variation med tiden för en stötvåg kan något förenklat illustreras i figur 4. Varaktigheten är beroende på laddningens storlek och avstånd till målet. Tryckförändringen indelas i två faser, en positiv fas och en negativ fas. Karakteriserande för en stötvåg är en plötslig tryckhöjning från atmosfäriskt tryck p_0 till övertrycket $p_0 + P_s^+$. Därefter klingar trycket snabbt av till atmosfäriskt tryck under tiden T^+ , den positiva fasen. Varaktigheten för den positiva fasen är normalt några få millisekunder, vilket följs av en negativ fas vilket varar under tiden T^- , där trycket $p_0 - P_s^-$ (undertryck) understiger atmosfärtrycket. Tryckamplituden är betydligt lägre, men vanligen med en betydligt längre varaktighet i den negativa fasen.

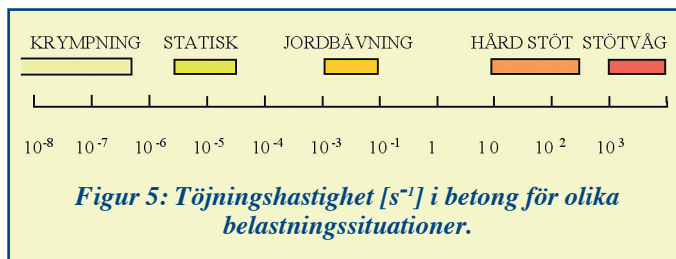
Impulstätheten, i , är arean under tryck-tid sambandet, vilket utgör själva belastningen för konstruktionen. Normalt försummas den negativa fasen i beräkningar på betongkonstruktioner på grund av dess låga tryck (den negativa fasen kan dock vara betydelsefull för exempelvis i dimensionering av pansarglas). Utöver stötvågen, bildas splitter när höljet sönderfaller, vilket kastas ut i alla riktningar från bomben. Splittrets hastighet varierar beroende på sprängämnets massa och på höljets storlek. Som illustration kan nämnas att de tekniska reglerna för skyddsrum ska ett skyddsrum ovan mark kunna tåla verkan av en tryckvåg motsvarande den som åstadkoms av en 250 kg minbomb med 50 viktprocent trotyl (TNT) som briseras i det fria fem meter från skyddsrummets utsida. Från en 250 kg minbomb innehållande 125 TNT, varierar splittrets hastighet från cirka 1 100 m/s till cirka 2 100 m/s beroende på splittrets storlek.

Utöver stötvågen, bildas splitter när höljet sönderfaller, vilket kastas ut i alla riktningar från bomben. Splittrets hastighet varierar beroende på sprängämnets massa och på höljets storlek. Som illustration kan nämnas att de tekniska reglerna för skyddsrum ska ett skyddsrum ovan mark kunna tåla verkan av en tryckvåg motsvarande den som åstadkoms av en 250 kg minbomb med 50 viktprocent trotyl (TNT) som briseras i det fria fem meter från skyddsrummets utsida. Från en 250 kg minbomb innehållande 125 TNT, varierar splittrets hastighet från cirka 1 100 m/s till cirka 2 100 m/s beroende på splittrets storlek.

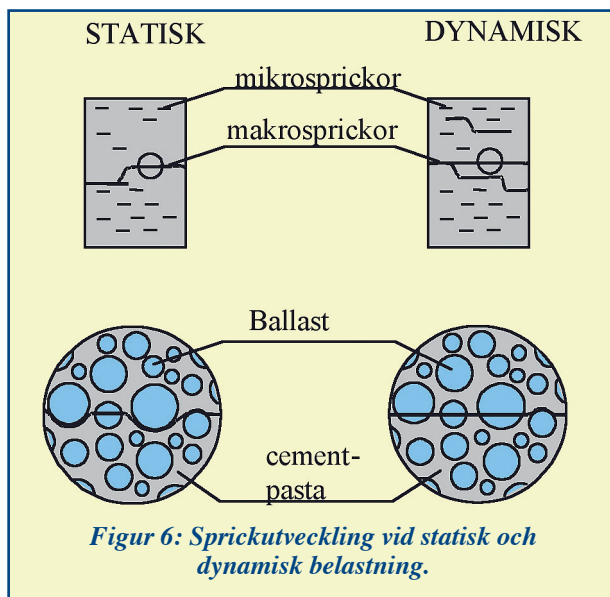
Betongens egenskaper vid extrema belastningar

Vid snabba belastningar ökar töjnings-

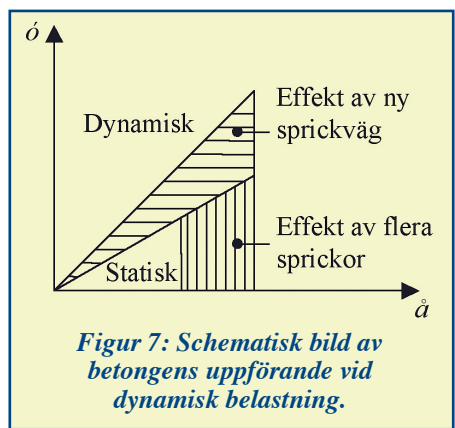
hastigheten i betongen. Det medför att betongens styvhet, hållfasthet och deformationskapacitet kan öka avsevärt vid snabba belastningar. För de flesta material förändras egenskaperna vid olika töjningshastigheter. I figur 5 visas intervall för töjningshastigheten i olika belastningssituationer.



Figur 5: Töjningshastighet [s^{-1}] i betong för olika belastningssituationer.



Figur 6: Sprickutveckling vid statisk och dynamisk belastning.



Figur 7: Schematisk bild av betongens uppförande vid dynamisk belastning.

Vid höga töjningshastigheter, vid belastningsfallen hård stöt (exempelvis splitterbelastning) och stötvågsbelastning kan betongens tryckhållfasthet mer än fördubblas jämfört med den statiska tryckhållfastheten. Motsvarande kan draghållfastheten öka med upp till fem till sju gånger jämfört med den statiska draghållfastheten. Den förhöjda hållfastheten förklaras med att vid långsam belastning kan spricktillväxten ske genom att sprickan tar den enklaste vägen, runt ballastkornen, vilket illustreras i figur 6. Vid snabba belastningar tvingas sprickan gå en kortare väg och därmed passera ballastkornen. Betongen får därmed en högre energiupptagande förmåga. Andra fysikaliska fenomen som förklarar den förhöjda hållfasthetsökningen är viskösa effekter och masströghetskrafter.

Dessa brottmekanismer har en direkt koppling till betongens materialegenskaper. I figur 7 visas principen för vilken inverkan dynamisk belastning har på spän-

nings- töjnings sambandet för betongen. Ballasten i betongen är för normalbetong betydligt styvare än cementpastan, eftersom sprickan tvingas gå genom ballastkornen ökar betongens styvhet. Effekten av flera sprickplan medför att betongens deformationskapacitet ökar vid dynamisk belastning.

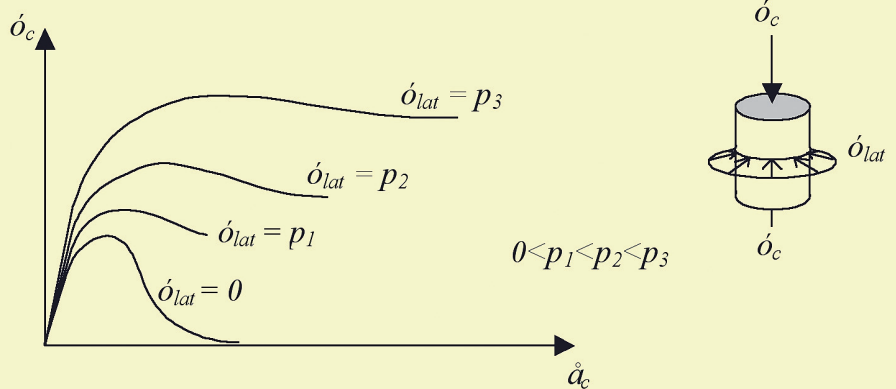
Vid statisk belastning kan betongens hållfasthet och deformationskapacitet öka om den förhindras att expandera, den så kallade omslutningseffekten. Ju högre omslutning betongen utsätts för, desto mer ökar betongens hållfasthet och deformationskapacitet, vilket illustreras i figur 8 på sidan 58. Statiska försök med normalbetong (med en tryckhållfasthet på 46 MPa) med ett omslutningstryck på 400 MPa har visat att betongens tryckhållfasthet uppnås till 800 MPa.

Vid explosionslaster utsätts betongen för oerhörda tryck, där omslutningstrycket ökar på grund den snabba belastningen och av att betongen förhindras att expandera av omgivande betong och armering. Detta ger i sin tur att betongens motståndsförmåga ökar ytterligare.

Typiska skador vid stötvågs- och splitterbelastning

Under belastningen av stötvågen och splittrets inträngning kommer konstruktionen att skaka och vibrera, och omfattande krossning och sprickutveckling sker. På belastningssidan av konstruktionen uppstår flera kratar genom splittrets kontaktverkan och utstötning kan ske på baksidan av konstruktionen. Då splittret tränger in i betongen kan även armeringen klippas av.

Själva penetrationsdjupet bestäms av betongens tryckhållfasthet, medan kraterstorleken är mest beroende på betongens



Figur 8: Spännings-töjnings samband för betong med ökande omslutningstryck.

draghållfasthet. Då splitter träffar konstruktionen fortplantar sig en tryckvåg och när den når baksidan av konstruktionen reflekteras den i form av en dragvåg. Denna dragvåg kan orsaka utstötning eftersom betongen har betydligt lägre draghållfasthet än tryckhållfasthet. Utstötning av betong kan även fås om splittret eller projektilen inte perforerat betongen.

Exempel på finita elementanalyser – projektilinträngning i betong

Betongbyggnad på Chalmers och Räddningsverket har under ett antal år lagt stora resurser på ett fördjupat studium av först stötvågens och nu splitterbelastningens förlopp och mekanismer. Ett övergripande syfte har varit att kunna finna effektiva dataverktyg baserade på främst finita element, så att det för framtiden finns en större möjlighet till repeterbarhet i analysarbetet än vad som till rimliga medel är möjligt genom provningsverksamhet. Provning är visserligen en fortsatt viktig del av kunskapens uppbyggnad och vidmakthållande men bör så långt möjligt bli ett komplement till tillförlitlig datahantering.

Med dagens avancerade olinjära finita elementprogram är det möjligt att följa vad som händer vid ett penetrationsförlopp. För att kunna studera denna komplicerade belastningssituation är det lämpligt att börja med en väldefinierad betongkropp med kända randvillkor. Här handlar det om en projektil som träffar en oarmrad betongkropp. När denna kunskap om ett penetrationsförlopp är väl etablerad går det att arbeta vidare och successivt öka komplexiteten i analyserna.

Finita elementprogrammet Autodyn har nyttjas för olinjära finita elementanalyser. Programmet är ursprungligen ett flödesprogram och har vidareutvecklats för att analysera fasta material. Detta program är speciellt utvecklad för att kunna analysera denna typ av belastningar. Programmet har teknik för att beskriva förlopp med stora deformationer och materialmodeller där betongens egenskaper kan beskrivas vid dynamiska förlopp, såsom olinjära materialegenskaper, töjningshas-

tighetsberoende och känslighet för varierande omslutningstryck.

Finita elementanalyser har jämförts med experiment utförda av Foa, se Hansson (1998). I försöket användes en projektil, vilken avfyrades mot en betongcylinder som var ingjuten i en ståltunna. Projektilen hade en massa på 6,28 kg, diameter på 75 mm och längd på 225 mm. Betongcylindern var 2 m lång och hade en diameter på 1,6 m. Tryckhållfastheten för betongen var 40 MPa (kubhållfasthet). En FE-modell av försöket redovisas i figur 9. Modellen är axi-symmetrisk, och uppbyggd av 128 x 320 element för cylindern.

Då projektilen träffar betongkroppen uppstår en stor krater på framsidan och projektilen penetrerar kroppen. I försöket var inträngningsdjupet för projektilen 655 mm och maximala kraterdiametern var cirka 0,8 m. Finita elementanalyser med Autodyn ger resultat som överensstämmer mycket väl med försöken. Inträngningsdjupet i analysen blev 649 mm och maximal kraterdiametern överstämde väl med försöket.

Alternativa applikationer

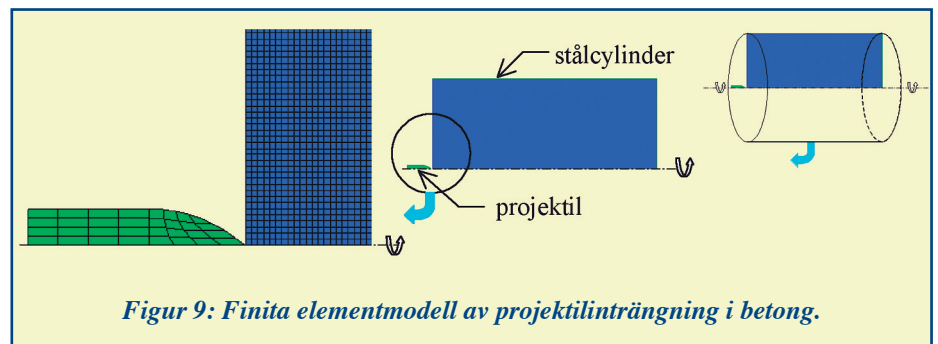
Det kan tyckas att kunskap rörande explosioner och deras inverkan på sin omgivning endast har att göra med militära ändamål. Så är dock inte fallet. För Räddningsverket gäller det exempelvis att upprätthålla ett lämpligt skydd för civilbefolkningen i händelse av krig och även om detta mål har uppenbara kopplingar till ett militärt händelseförlopp finns det även en mångfald andra områden i det civila samhället där hotet/risken för explosioner eller andra exceptionella belast-

ningar finns närvarande. Nedan görs en översikt över några ytterligare berörda områden i samhället.

Inledningsvis kan det konstateras att med den politiska situation vi har i världen idag har risken för olika former av terroristhandlingar ökat påtagligt. Attentatet mot World Trade Center och andra installationer har med oönskad tydlighet visat hur sårbart vårt samhälle kan vara. Händelserna den 11 september 2001 har skakat om allmänhetens säkerhetsuppfattning i dess grundvalar och maktthavare världen över har på allvar insett behovet att se över säkerheten för det civila samhället. I ljuset av detta ter sig kunskapen om explosioner och dess verkningar mer aktuell än på länge och det finns anledning att ta eventuella terroristhandlingar i beaktande även i konstruktionsarbetet. Detta gäller främst speciella byggnader och installationer, såsom kärnkraftverk, dammar, raffinaderier, kemiska fabriker etc, av särskild vikt för att samhället ska fungera normalt och/eller där ett attentat kan få oanade konsekvenser på omgivningen. Terroristhandlingar i sig kan dock klassas som extrema och vi har i Sverige så här långt varit tämligen befriade från dylika incidenter. Detta betyder dock inte att eventuella åtgärder ej ska utföras för särskilt utvalda objekt.

Det kanske mest påtagliga exemplet där explosionslaster används vid dimensionering av civila installationer är tunnlar. Dessa dimensioneras idag för att klara effekterna av en invändig explosionslast – dels för en kortvarig högintensiv impulsbelastning som svarar mot vad som händer nära explosionscentrum och en mer långvarig last som motsvarar det övertryck som uppstår i hela tunneln av en sådan explosion. Det finns även sådana byggnader som via den aktivitet som pågår där löper en större risk att utsättas för exceptionella laster. Objekt kopplade till brottslig verksamhet kan exempelvis vara polishus (celler), fängelser, eller banker (pengaförvaring). Andra objekt som kan vara aktuella är de i närheten av explosionsfarliga ämnen – exempelvis raffinaderier, kemiska fabriker eller tankar för förvaring av gas. Detta gäller till viss del även byggnader i närheten av transportleder för transport av farligt gods.

Det effektivaste sättet att skydda sig mot en explosion är att se till att vara tillräckligt långt ifrån densamma. Detta kan synas självklart men är i många samman-



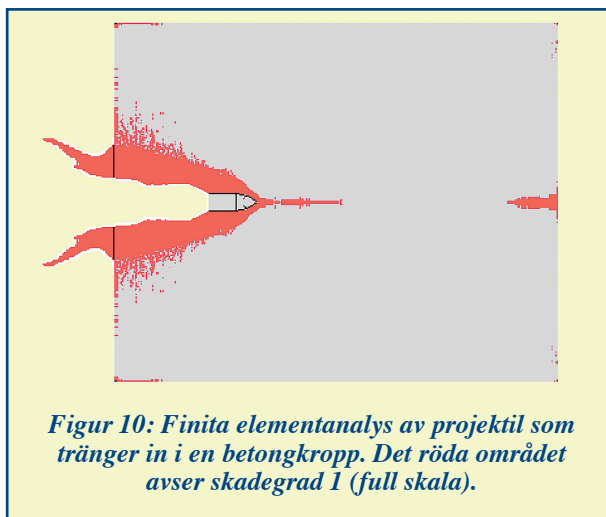
Figur 9: Finita elementmodell av projektilinträngning i betong.

hang inte möjligt att uppfylla utan vidare. Inom ett industriområde ligger det normalt i ägarens intresse att så långt som möjlig uppnå bästa möjliga säkerhet varvid erforderligt avstånd mellan hotade byggnader i regel kan uppnås redan vid projekteringen. För byggnader i närheten av transportleder där det går explosionsbenäget gods kan situationen dock vara en annan. I tätbebyggda områden kan ofta bebyggelsen stå tämligen nära större genomfartsleder och det är då kanske inte möjligt att säkerställa tillräckligt stort avstånd till en led där farligt gods får fraktas.

Transport av farligt gods styrs av lagar och förordningar och vid bedömning av huruvida det är tillåtet att frakta sådant längs en given led ingår någon form av riskanalys som grund. I denna bedöms risken för att en olycka ska inträffa samt vilken skada en eventuell sådan kan orsaka. För att på ett bra sätt kunna utföra en sådan bedömning krävs dock bland annat kunskap om vad för typ av belastning som kan uppstå samt hur denna påverkar sin omgivning.

Med anledning av ovan berörda hot behövs, som komplement till ordinarie dimensionering vid nybyggnader en riskanalys genomföras för att bedöma vilken inverkan på explosionsrisken som det planerade objektet medför på sig själv och sin omgivning. För bostadshus och kontorshus är denna risk normalt så liten att den inte behöver beaktas vid dimensioneringen. För byggnader med speciella ändamål (ambassadbyggnader, polishus, etc) kan så dock vara fallet. Vidare kan byggnadens läge i förhållande till sin omgivning vara av stor betydelse – exempelvis ökar risken för att utsättas för en explosion om byggnaden befinner sig i närheten av en transportled där explosionsbenäget gods transporteras.

Andra olycksfall med liknande inbörd men som inte härrör från en explosion är påkörningslast av fordon/båtar. Vid dimensionering av såväl broar som husbyggnader kontrolleras olika typer av olyckslaster som härrör från dylika händelser. I regel nyttjas dock en ekvivalent statisk last som tagits fram för att under-



Figur 10: Finita elementanalys av projektil som tränger in i en betongkropp. Det röda området avser skadegrad 1 (full skala).

lätta dimensioneringsarbetet för konstruktören. Bakgrunden till denna ekvivalenta last framgår oftast inte varför det vid ändrade förutsättningar är svårt för konstruktören att göra en riktig bedömning av hur situationen ska beräknas. För att en given olycksituation ska kunna omvandlas till ett belastningsfall krävs det således djupare förståelse och kunskap om dels lastens uppförande och dels den drabbade konstruktionens respons. Dimensionering av dylika byggnader baseras idag på befintlig kunskap. Det finns dock alltid en risk att vara nöjd med förenklade antaganden och dimensioneringsverktyg eftersom den bakomliggande fysiken till dagens regler då lättare faller i glömska. I sådana fall är risken stor att fel begås då en situation utöver den normala uppstår. Utan en dylik djupare kunskapsbas blir det också svårt att exempelvis göra en översiktlig bedömning av vilken skada som en befintlig byggnad tagit vid en eventuell explosion, något som med kort varsel kan vara nog så nödvändigt om olyckan varit framme.

Slutord

Explosionslast, särskilt splitterbelastning är intressant ur många aspekter, inte bara när det gäller fysiskt skydd vid väpnat angrepp. Det handlar om relativt okontrollerade förlopp på så sätt att fragmentering, och därmed såväl hastighet som lokal skada, kan variera avsevärt. Många liknande situationer kan uppstå såsom var-

dagsolyckor på grund av till exempel materialutmattningar. Den relativt enkla vardagsolyckan kan också lätt bli en komplex och svårkontrollerbar händelse, men den fördjupade kunskapen om stötvåg och splitter är här tillämplig såväl i den lilla olyckan som i den komplexa händelsen. Strävan att klarlägga splitterbelastade betongkonstruktioners dynamiska verknings sätt bör därför kunna resultera i bra analysinstrument både för det stora komplexa fallet som sällan eller aldrig inträffar som för det lilla som kan hända desto oftare i vardagen. Traditionellt har fokus mest legat på de stora problemen, men man ska

inte glömma att sådana här explosionsstudier också kan ge ett mycket värdefullt komplement till den vanliga statiska betongdimensioneringen. Det nödvändiga problemlösandet för en sällan förekommande situation kan alltså som en bonus få en god tillämpning även i andra sammanhang. ■

Referenser

- Ekengren B. (1998): *Skyddsrumregler SR*. Räddningsverket, Karlstad.
- Hansson, H. (1998): *Numerical simulation of concrete penetration*. Foa Rapport 98-00816-311, Tumba.
- Johansson M. (2000): *Rationell armeringsutformning i impulsbelastade betongkonstruktioner*. Bygg & teknik 7/00, 17–20.
- Leppänen J. (2002): *Dynamic Behaviour of Concrete Structures subjected to Blast and Fragment Impacts*. Institutionen för konstruktionsteknik/Betongbyggnad, Chalmers tekniska högskola, Licentiatavhandling, Publikation 02:4, Göteborg.
- Leppänen J., Gylltoft K. (2002): *Numerical simulation of concrete penetration with a steel projectile*. XVIII Symposium on Nordic Concrete Research, Elsinore, Danmark, 2002, 273–275.
- Plos M. (1994): *Splicing of Reinforcement in Frame Corners: Experimental Studies*. Nordic Concrete Research, Publication 14, 1/94. The Nordic Concrete Federation, 103–121.