

Splitterbelastade betongkonstruktioner

Räddningsverket har ansvaret för byggande och bevarande av skyddsrum i Sverige och har under många år arbetat med att bygga upp en kunskapsbas om explosionsbelastning på betongkonstruktioner. Själva produktionen av nya skyddsrum är låg för närvarande, men det betyder inte att kunskapen inte kan ökas eftersom kunskap ger en förmåga att göra rätt sak vid rätt tillfälle och att vidta åtgärder när det behövs. Avdelningen för Konstruktionsteknik/Betongbyggnad på Chalmers tekniska högskola har tillsammans med Räddningsverket vidareutvecklat ett numeriskt verktyg för att studera stötvågs- och splitterbelastning på betongkonstruktioner.

Explosions- och splitterbelastning är intressant på flera sätt, inte enbart för skyddsrum där användningen för sitt ändamål sällan eller aldrig inträffar, utan även vid dimensionering av vanliga byggnader där risk för explosionslast existerar. Vid dimensionering nyttjas vanligtvis ekvivalent statisk last vars bakgrund ofta är okänd. I denna artikel diskuteras betongens materialegenskaper vid extrema belastningsfall, såsom stötvågs- och splitterbelastning. För att öka förståelsen för de

bakomliggande mekanismerna har experiment och numeriska analyser genomförts, där splitter har skjutits mot oarmerad betong. Med avancerade numeriska metoder är det idag möjligt att studera splitterinträngning i betong. För att kunna följa ett penetrationsförlopp i betong med numeriska metoder behövs materialmodeller och kunskap om hur betongen uppför sig vid dynamiska förlopp och höga tryck.

Betongens materialegenskaper vid extrema belastningar

Vid splitterbelastning utsätts betongen för extrem påfrestning. Betongen erhåller kraftig sprickbildning och kratrar uppstår när splittret träffar betongen. När splittret penetrerar djupt, kan utstötning ske på motsatta sidan av anslaget, eller till och med leda till genomträngning. Betongens materialegenskaper vid splitterbelastning kommer att skilja sig avsevärt jämfört med den vanliga statiska belastningen. Betongens tryck- och draghållfasthet samt den initiala styvheten ökar på grund av den snabba belastningen. Vidare bidrar splitterbelastningen till ett fleraxiellt spänningstillstånd med betydande omslutningstryck, vilket ytterligare ökar betongens bärförmåga och seghet.

Betong utsatt för höga tryck kan karakteriseras med sin tillståndsekvation. Denna visas principiellt i *figur 1* och uttrycker sambandet mellan hydrostatiskt tryck (p), det vill säga medelspänningen av de tre huvudspänningarna, och densitet (ρ).

För låga belastningar gäller linjärelastiska förhållanden och densiteten är omkring 2400 kg/m^3 . Dessa förhållanden motsvarar normal statisk belastning. För ökad hydrostatisk pålastning uppstår mikrosprickbildning i betongen och porerna i betongen kollapsar, vilket medför att responsen blir icke-linjär, den så kallade kompakteringsfasen. Vid ytterligare pålastning kompakteras betongen tills alla

porer har kollapsat och förhållandet mellan hydrostatiskt tryck och densitet blir åter linjärt. När detta inträffar har betongens densitet ökat till omkring 2700 kg/m^3 .

Vid stötvågs- och splitterbelastning kan trycket bli så stort att kompakteringsfasen nås. Detta leder till att betongen når den icke-linjära delen av tillståndsekvationen och är en viktig del för att förklara betongens respons vid höga tryck.

Dynamisk belastning innebär ökad töjningshastighet i betong jämfört med statisk belastning. Töjningshastigheten definieras som töjning per tidsenhet, det vill säga ett mått på hur snabbt materialet töjs. Ökad töjningshastighet medför att betongens styvhet och hållfasthet kan öka avsevärt. De flesta material har ett töjningshastighetsberoende. *Figur 2* visar töjningshastigheten för olika belastningssituationer. För betong, vid töjningshastigheter över 10 s^{-1} , exempelvis vid stötvågs- och splitterbelastning, kan tryckhållfastheten mer än fördubblas och draghållfastheten kan öka upp till sju gånger mer än den statiska hållfastheten.

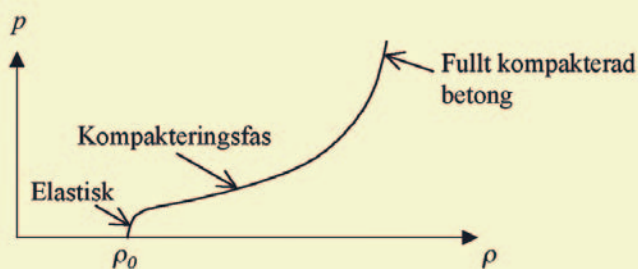
Den förhöjda hållfastheten förklaras med att spricktillväxten vid långsam belastning kan ske genom att sprickan tar den väg som är mest energibesparande, runt ballastkornen i betongen, vilket illustreras i *figur 3*. Vid dynamisk belastning ges inte den tid som behövs för sprickan att gå runt ballastkornen, varför den ofta tvingas skära rakt igenom ballasten. Eftersom ballast har högre hållfasthet än cementpastan resulterar detta i att betong får en högre hållfasthet. Andra fysikaliska fenomen som förklarar den förhöjda hållfastheten är viskösa effekter som orsakas av vatteninnehållet i betongen och mass-tröghetskrafter.

Experiment med splitterbelastning

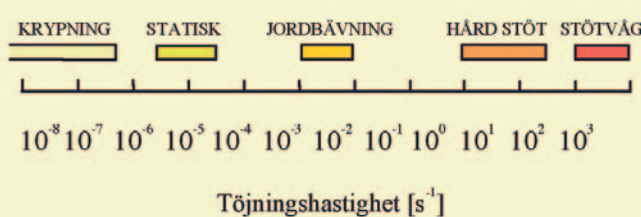
Splitter som kommer farande mot en betongkonstruktion med hög hastighet kan



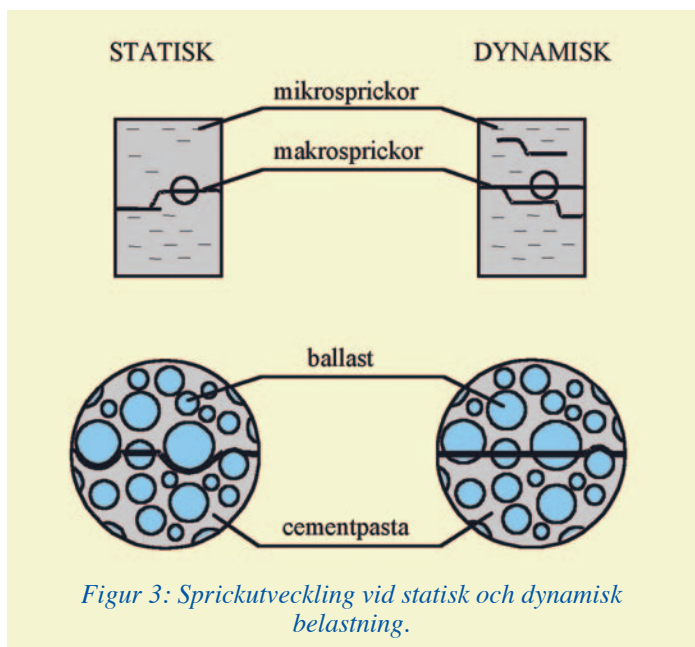
Artikelförfattare är **Joosef Leppänen**, tekn dr, Chalmers tekniska högskola, Göteborg.



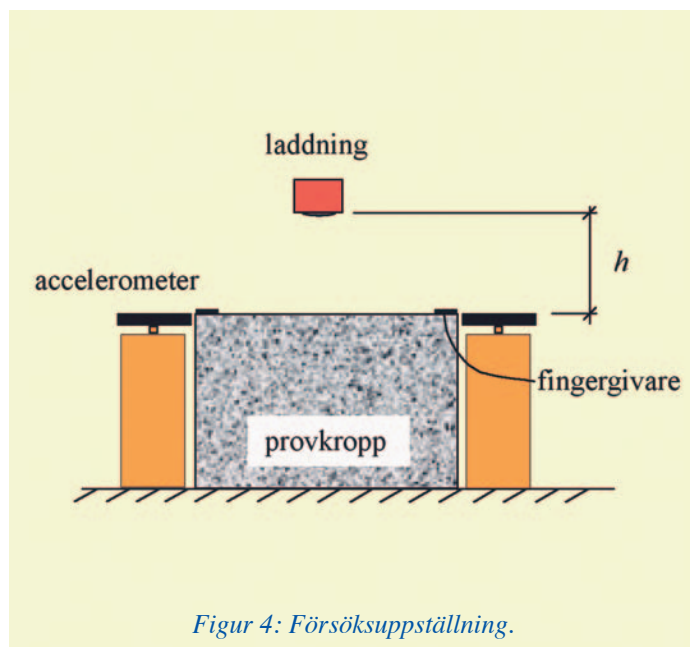
Figur 1: Tillståndsekvationen för betong.



Figur 2: Töjningshastighet i betong för olika belastningssituationer.



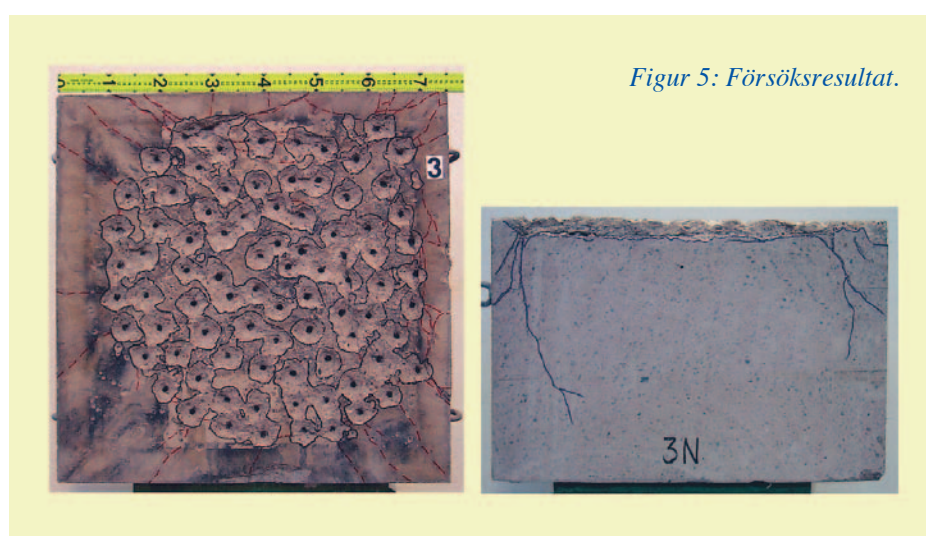
Figur 3: Sprickutveckling vid statisk och dynamisk belastning.



Figur 4: Försöksuppställning.

orsaka stor skada i form av sprickbildning, där splittret penetrerar eller till och med perforerar betongen. Dessutom uppstår kratrar vid anslagsytan och utstötning kan ske på baksidan av konstruktionen. Skadan på betongen beror dels på splittrets egenskaper och dels på betongens materialegenskaper och armeringsinnehåll. Med empiriska uttryck kan exempelvis inträngningsdjupet av splittret bestämmas. För att bättre förstå hur betongens materialegenskaper ändras av splitterbelastning har experiment genomförts av Chalmers i samarbete med FOI (Totalförsvarets forskningsinstitut). Avsikten med experimenten var att karakterisera hur en splitterbelastning påverkar betongens materialegenskaper, såsom tryck- och draghållfasthet, samt sprickbildning. Både enstaka splitter och en hel splittersvärm avfyra mot betongblock med tjocklek på 500 mm. Här behandlas dock enbart försöken med splittersvärmen. Betongblocken i dessa försök hade dimensionerna 750 x 750 x 500 mm³. Själva splittret bestod av sfäriska kulor som avfyra genom att detonera en laddning på 1,3 kg hexotol eller oktol. Totalt avfyra sju laddningar och splitterhastigheten var omkring 1 650 m/s. Försöksuppställningen visas i figur 4. Förutom splitterbelastningen utsattes betongblocken även för en stötvågsbelastning, vilken orsakades av detonationen.

Efter beskjutning fotograferades och sågades betongblocken itu för att studera uppkommen sprickbildning. Figur 5 visar bilder från ett av betongblocken, där skadan från splittersvärmen visas ovan och i tvärsnitt. Kraterdiametern blev cirka 50 mm för belastning med splittersvärm och penetrationsdjupet varierade mellan 30 och 50 mm, där den största inträngningen erhöles i anslagscentrum. En tydlig avskalning orsakas på ytan, vilket kan ses på ett fotografi taget på tvärsnittet. När tryckvågen, orsakad av stötvågen och



Figur 5: Försöksresultat.

splitterbelastningen, när ränderna av blocket reflekteras den som en dragvåg. Eftersom betongens draghållfasthet är betydligt lägre än dess tryckhållfasthet orsakades även kraftig sprickbildning vid ränderna.

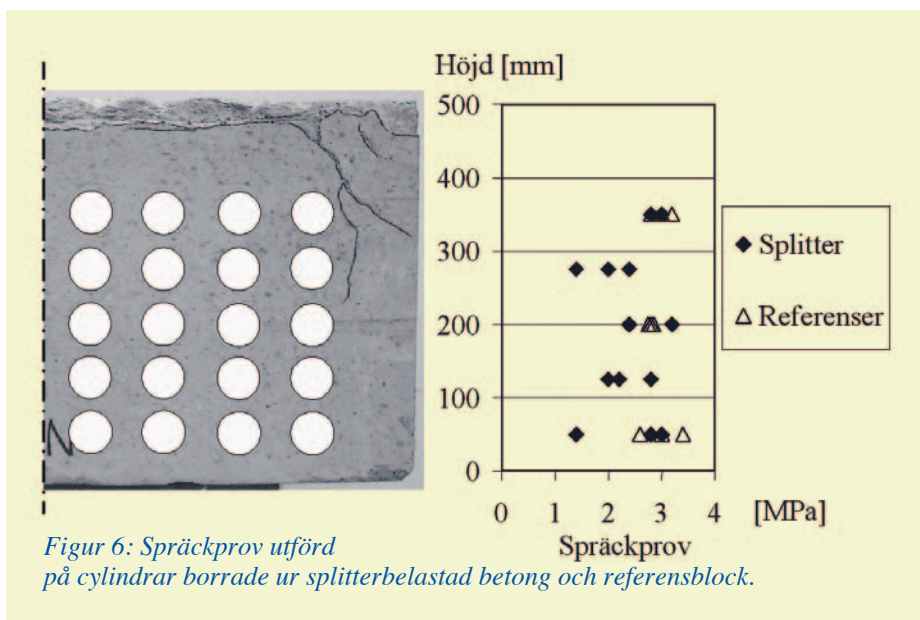
För att studera hur hållfastheten påverkades av splitterbelastning har borrkärnor borrats ur de betongblock som var belastade med splittersvärm, från vilka tryck- och spräckprov har genomförts. Storleken på proven var 50 x 100 mm. Figur 6 på nästa sida visar resultat från dessa spräckprov samt resultat från referensprover (spräckprov från borrkärnor borrade från betongblock som ej var belastade med splitter). Proverna visade att hållfastheten var opåverkad på ett avstånd som var drygt två gånger det maximala penetrationsdjupet för splittret. Dock var hållfastheten lägre vid ränderna, där den reflekterade stötvågen hade orsakat mikrosprickbildning.

Numerisk modellering av splitterbelastning

Numeriska metoder är idag ett allmänt använt ingenjörswerktyg för dimensionering

och analys av konstruktioner och detaljer. Finita elementmetoden är den vanligaste använda metoden. Dock, för splitterbelastning, där stora deformationer uppkommer är det mer lämpligt att använda en strömningskod (*hydrocode* på engelska) som bygger på en kombination av finita elementmetoden, finita differensmetoden och finita volym. I analyser genomförda här har programmet Autodyn nyttjats.

Med numeriska metoder för stötvågs- och splitterbelastning kan mycket mer information fås om konstruktionens uppförande än det är möjligt med experimentell verksamhet. Mätningar vid dynamiska förlopp är mycket svåra och kostnadskrävande, där varaktigheten enbart uppgår till någon millisekund. Med numeriska metoder går det att följa ett händelseförlopp steg för steg och därmed öka förståelsen för de grundläggande mekanismerna på ett helt annat sätt. Med numeriska verktyg kan exempelvis spänningsvariationer över tiden, inre sprickbildning, fortplantning av spänningsvåg som orsakas av stötvåg och/eller splitterbelastning följas. Experimentell verksamhet är dock en viktig del i kun-

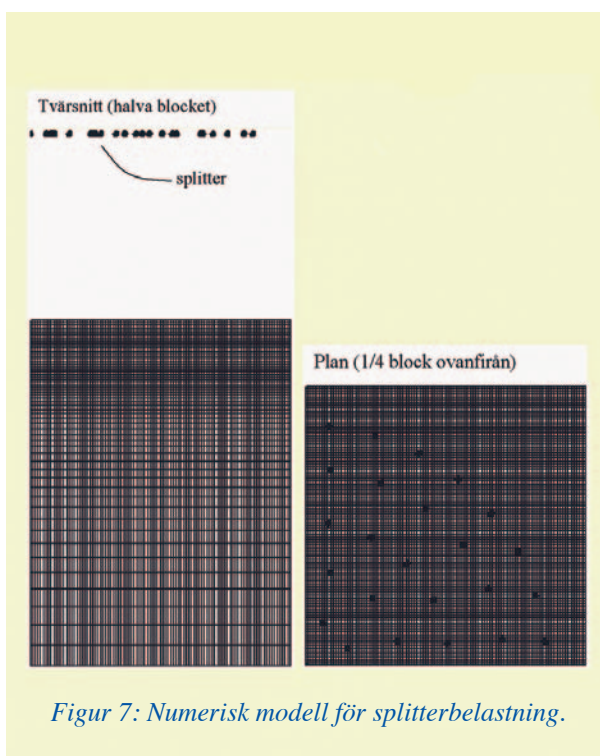


Figur 6: Spräckprov utförd på cylindrar borrade ur splitterbelastad betong och referensblock.

skapsuppbyggandet samt ett nödvändigt komplement till avancerade numeriska verktyg.

Numeriska simuleringar med splitterbelastning har genomförts av experimenten med splittersvärmen. För god noggrannhet i splitteranalyser behövs ett väldigt tätt elementnät. En modell för splitteranalys visas i figur 7, där betongblocket består av 100 x 100 x 57 element, totalt 570 000 element. Elementen sattes tätare vid splitteranslaget och vid 100 mm från anslagsytan ökar elementstorleken successivt mot botten av betongblocket.

För att avfyra splittersvärmen nyttjades laddningar. Av detta bestämdes tryck-tidsambandet med programmet Conwep. I den numeriska analysen, för att simulera trycket från detonationen, belastades ytan med spänningen 25 MPa som avtog stegvis ner till noll på tiden 0,42 ms enligt figur 8.



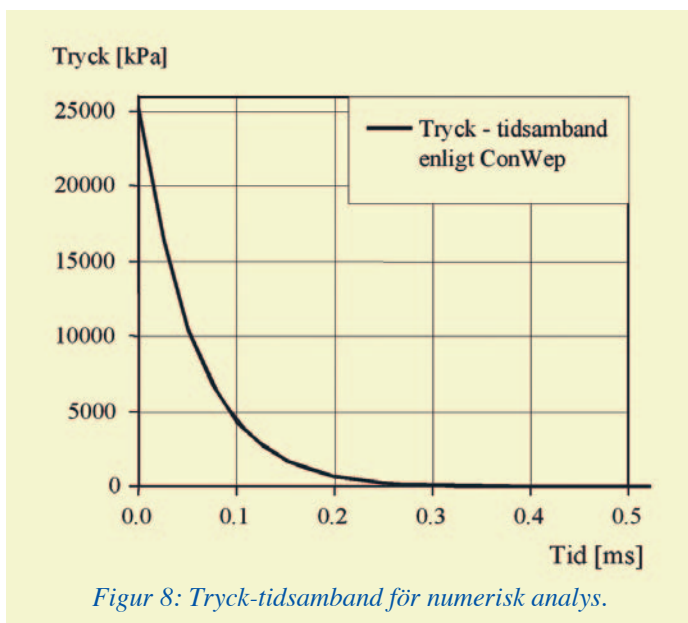
Figur 7: Numerisk modell för splitterbelastning.

Resultaten från analyserna visas i figur 9. Analyserna överstämmer väl med experimenten. Kratrar som uppkommer av splitteranslaget sammanfaller med varandra och fångas väl upp i analysen. Tvärsnittet i figur 9 visar att det i analyserna fås en avskalad yta vid splitteranslaget, samt att betongen är oskadad på ett avstånd drygt två gånger det maximala penetrationsdjupet, vilket stöds av de materialprover som utfördes. Vidare uppstår skada vid ränderna på grund av den reflekterade stötvågen, vilket också fångas upp i analysen.

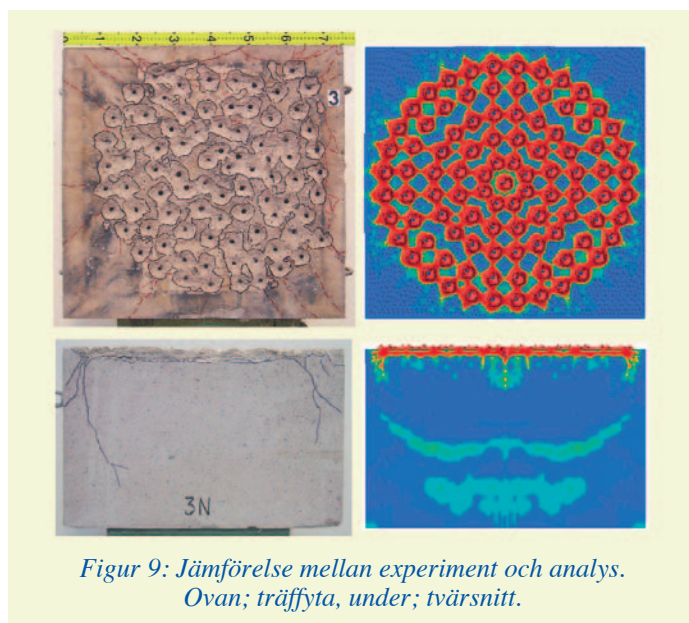
För att öka noggrannheten i de numeriska analyserna för splitterbelastning har en befintlig materialmodell i programmet Autodyn vidareutvecklats. Den ursprungliga materialmodellen nyttjar linjärt mjuknande för betong i drag. Ett bilinjärt samband har implementerats i materialmodellen, vilket följer betongens mjuknande på ett mer realistiskt sätt. Mjuknandet i betongen är baserat på spänning/ spricköppningssambandet. För att beräkna spricköppningen (w_u), vilket är den spricköppning då spänningen har fallit ner till noll, används brottenergin (G_F) och betongens draghållfasthet (f_t), vilket visas i figur 10 på sidan 64. Dock fördelas sprickan över volymen på ett element i den numeriska modellen, till följd av det används spänning/töjningssamband. Den maximala spricktöjningen beräknas utifrån den maximala spricköppningen, där sprickan fördelas över längden på elementet enligt ekvation 1.

$$\epsilon_u = \frac{w_u}{l} = \frac{4G_F}{f_t l} \quad (1)$$

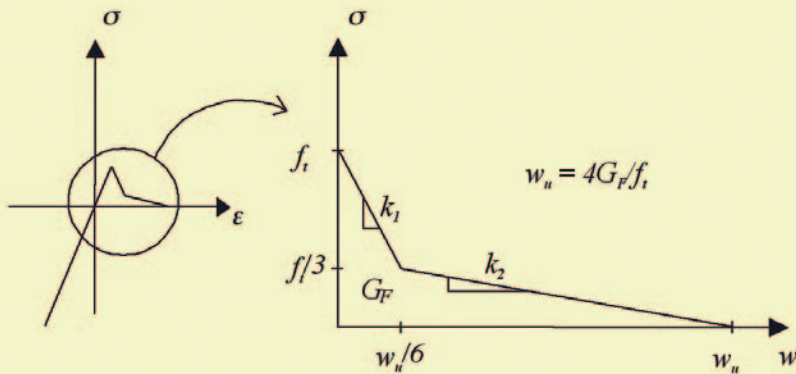
Betong utsatt för drag är väldigt känsligt för varierande töjningshastighet. Vid töjningshastighet omkring 1 s⁻¹ ökar plötsligt betong-



Figur 8: Tryck-tidsamband för numerisk analys.



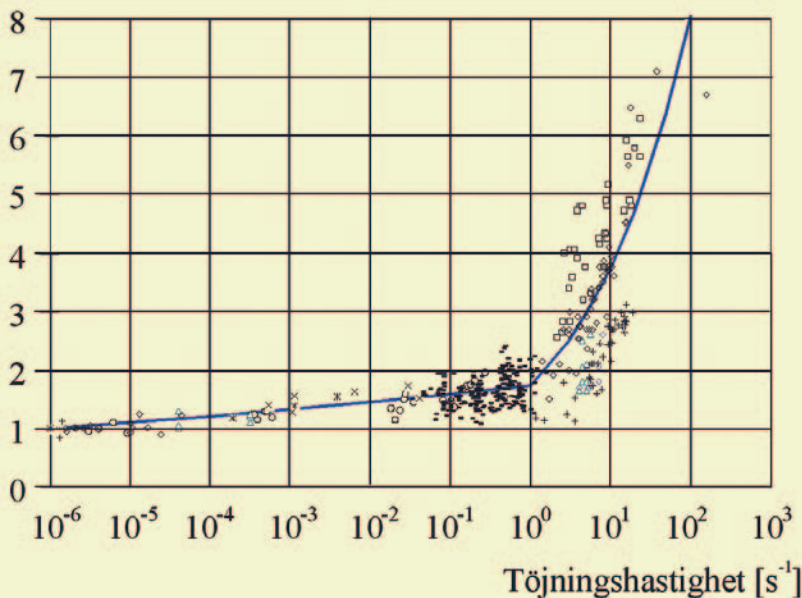
Figur 9: Jämförelse mellan experiment och analys. Ovan; träffyta, under; tvärsnitt.



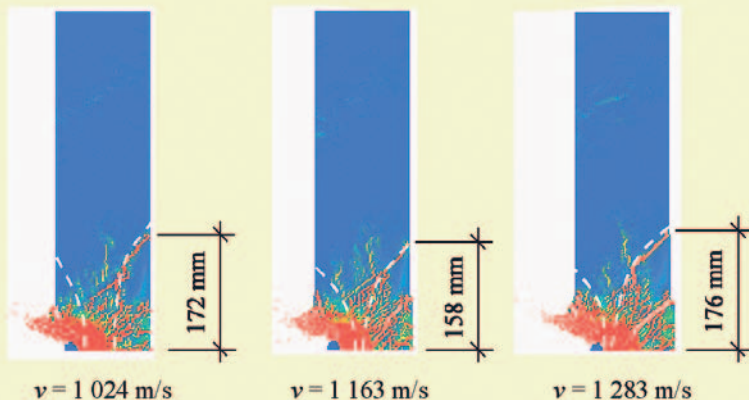
Figur 10: Implementerat bilinjärt samband för betong i drag.

ens draghållfasthet. Ett töjningshastighetsberoende har implementerats i materialmodellen som följer experiment väl, vilket illustreras i figur 11.

Dynamisk förstöringsfaktor



Figur 11: Försöksresultat och implementerad töjningshastighetsberoende för betong i drag.



Figur 12: Numeriska analyser av splitterbelastning. Streckade linjer visar försöksresultat.

Numeriska analyser visas i figur 12 av splitterbelastning mot betongplattor med den förbättrade modellen. Betongens kubhållfasthet är 69 MPa och dimensionerna 1 000 x 1 000 mm med en tjocklek på 140 mm. Splitterhastigheten varierar mellan 1 024 m/s och 1 238 m/s. Analyserna visar att det går att följa ett penetrationsförlopp av splitterinträngning i betong. Utstötningen fångas väl upp i analyserna och ingångskratern stämmer väl med experimentella resultat.

Slutord

Traditionellt har splitterstudier varit av experimentell karaktär. Experiment är fortfarande en viktig del i kunskapsuppbyggande med för att minska samt effektivisera det experimentella arbetet används idag även avancerade numeriska verktyg. Ett problem kan analyseras med datorkraft ett flertal gånger och parameterstudier kan göras för att sedan göra ett fåtal experiment som verifierar de numeriska analyserna. Med avancerade numeriska metoder kan djupare förståelse fås, vilket i förlängningen leder till att ett säkrare samhälle kan byggas. Detta gäller inte enbart skyddsrum utan framtagna kunskap kan vara användbart även för den vanliga dimensioneringen av betongkonstruktioner, där risken för explosionslaster finns i exempelvis kärnkraftverk, raffinaderier och kemiska fabriker. ■

Referenser

- Ekengren B. (2003): *Skyddsrumregler SR*. Räddningsverket, Publikation B54-141/03, Karlstad, 126 sid.
- Johansson M. (2000): *Rationell armeringsutformning i impulsbelastade betongkonstruktioner*. Bygg & teknik 7/00, 17–20.
- Johansson M. (2000): *Structural Behaviour in Concrete Frame Corners of Civil Defence Shelters, Non-linear Finite Element Analyses and Experiments*. Institutionen för konstruktionsteknik, Betongbyggnad, Chalmers tekniska högskola, Doktorsavhandling, Publikation 00:2, Göteborg, 204 sid.
- Leppänen J., Ekengren B., Gylltoft K., Johansson M. och Plos M. (2002): *Explosionsbelastade betongkonstruktioner*. Bygg & teknik 7/02, 54–59.
- Leppänen J. (2004): *Concrete Structures Subjected to Fragment Impacts: Dynamic Behaviour and Material Modelling*. Institutionen för konstruktion och mekanik, Betongbyggnad, Chalmers tekniska högskola, Doktorsavhandling, Publikation 04:4, Göteborg, 127 sid.

Välkommen till
Bygg & tekniks hemsida:
byggteknikforlaget.se