

Explosionsbelastad betong

Dynamiska aspekter av materialets respons i numeriska simuleringar

Efterhand som datorernas prestanda och de numeriska teknikerna har förbättrats har numeriska simuleringar blivit ett allt vanligare verktyg för att analysera och förstå olika fenomen förknippade med explosionsbelastning av betong och betongkonstruktioner. Lasternas höga intensitet ger en respons som är starkt påverkad av dynamiska effekter, både på material- och strukturnivå. Det är därför väsentligt för simuleringarnas verklighetsanknytning att dessa effekter kan beskrivas på ett så riktigt sätt som möjligt. I numeriska simuleringar beskrivs betongens beteende med en så kallad materialmodell. Denna måste beskriva alla väsentliga effekter som uppstår i materialet för den avsedda lasten – för explosionsbelastning innebär detta att beteendet för såväl kvasi-statiska, enaxiella, spänningstillstånd som högst dynamiska, multiaxiella, spänningstillstånd ska beskrivas.

Myndigheten för samhällsskydd och beredskap (MSB) och avdelningen för Konstruktionsteknik/Betongbyggnad vid Chalmers tekniska högskola bedriver genom ett mångårigt samarbete forskning inom området explosionsbelastade betongkonstruktioner. I ett av de nu pågående forskningsprojekten tas en ny materialmodell för explosionsbelastad betong fram. Detta arbete kan delas in i olika delar där arbetet med den teoretiska uppbyggnaden av modellen och implementeringen och verifikationen av denna är självklara. Minst lika viktigt är dock arbetet med att definiera

vilka materialbeteenden som är väsentliga och valideringen att dessa simuleras på rätt sätt. I denna artikel belyses de dynamiska effekter som uppträder vid explosionsbelastning av betong och vilken påverkan dessa har på materialegenskaperna.

Stötvågs- och splitterbelastning

Explosionsbelastning är ett mycket generellt begrepp som kan innefatta all typ av belastning som uppkommer vid någon typ av explosion. Dessa laster är starkt beroende av till exempel det exploderande föremålets egenskaper, dess omgivning och avståndet till den exponerade strukturen för vilka lasterna ska specificeras. Generellt kan dock sägas att explosioner genererar två typer av laster på sin omgivning; stötvågsbelastning och splitterbelastning.

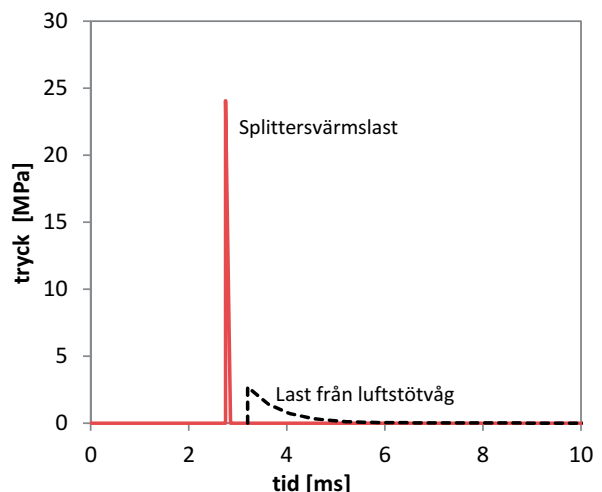
Splittret kan vara av primär eller sekundär typ. Primära splitter bildas om det explosiva ämnet är inneslutet i någon typ av hölje. När det explosiva ämnet antänds ökar temperaturen och trycket i höljet och gör att detta sväller, vilket ger sprickor. De bitar som bildas när höljet till slut spricker upp kastas ut i omgivningen och utgör det primära splittret. Under uppsprickningen frigörs även den gas som varit innesluten och den energi som kvarstår, efter att ha fragmenterat höljet och kastat iväg splittret, leder till bildandet av en luftstötvåg. Både luftstötvågen och det primära splittret sprids ut från explosionens centrum och kan träffa omkringliggande objekt. En del av den luftburna stötvågen reflekteras då och en del sprider sig in i objektet. Både splittret och stötvågen kan leda till bildandet av sekundär splitter om objektet går sönder och delar av det slungas ut i luften. Även när stötvågen träffar marken reflekteras en del av stötvågen medan en del propagerar ner i marken, vilket kan leda till en markburen stötvåg. Belastningen av en struktur orsakad av en explosion utgörs därför av:

- en luftburen stötvåg som kan ha reflekterats på marken och omgivande objekt innan den nått fram till strukturen

- primärt och sekundärt splitter av olika storlek, material och hastighet
- en markstötvåg.

På grund av luftmotstånd minskar splittrets hastighet med ökande avstånd från explosionens centrum. Likaså minskar tryckvågens (både mark- och luftburna) intensitet och maxtryck med ökande avstånd. Detta ger en mycket komplex belastningssituation som är starkt beroende av det studerade fallet och som oftast måste idealiseras för att kunna användas i analytiska sammanhang.

I den svenska handledningen för konstruktion av skyddsrum, de så kallade *Skyddsrumreglerna*, hänvisas till arkivbomben; se *Ekengren* (2006). Skyddsrum ska enligt dessa regler klara belastningen (stötvågen och splittret) orsakad av denna bomb om denna briserar på ett avstånd av 5 meter ifrån skyddsrummet. Arkivbomben är en fiktiv bomb vars lasteffekt på ett avstånd av fem meter kan idealiseras enligt *figur 1* under antagande att alla splitter som träffar strukturen har samma form och massa (fem gram) och att de är jämt fördelade över hela den exponerade ytan. Om istället ett större enskilt splitter beaktas kan trycket när detta träffar strukturen bli flera gånger högre. Detta innebär alltså att den armerade betongkonstruktionen (skyddsrummet) ska klara trycknivåer som är flera gånger högre än betongens hållfasthet. Dessutom är både splitterlasten och stötvågslasten mycket kortvariga, från en bråkdel av en millisekund för splitterlasten till mellan ett fåtal och ett tiotal millisekunder för den luftburna stötvågen. Detta innebär att det är starkt



Figur 1: Idealiserad explosionsbelastning från arkivbomben.



Artikelförfattare är **Ulrika Nyström**, tekn lic, och **Kent Gylltoft**, professor, Avdelningen för Konstruktionsteknik, Chalmers tekniska högskola, Göteborg.

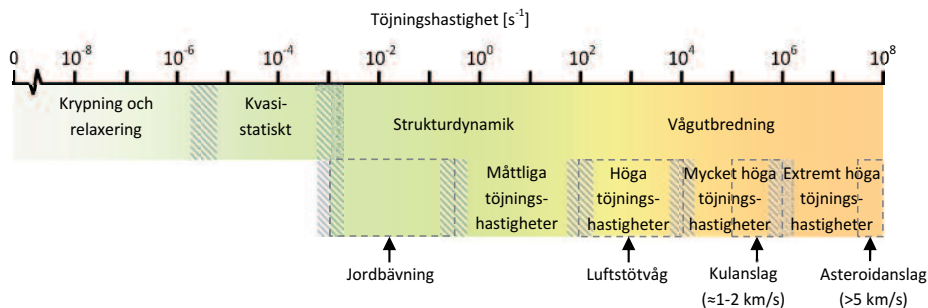
dynamiska laster, vilket påverkar responsen.

Dynamiska effekter

De snabba belastningsförlöpp och höga trycknivåer som karaktäriserar lasterna orsakade av en explosion leder till höga töjningshastigheter i den utsatta betongkonstruktionen. Töjningshastigheten är ett mått på hur snabbt en kropp eller struktur deformeras och dess storlek kan ha stor inverkan på responsen, både på material- och strukturnivå. *Figur 2* visar vilka olika tidsberoende effekter som dominerar beteendet för olika töjningshastigheter och som måste beaktas vid problemlösning och analyser. Det är dock viktigt att poängtera att det inte finns några skarpa gränser för vilka effekter som är viktiga för att beskriva responser utan att det snarare är övergångszoner där eventuellt flera effekter måste beaktas.

Inom mekaniken innebär *statiskt* att ett system är i statisk jämvikt och att dess tillstånd, som karaktäriseras av till exempel dess spänning och deformation, är konstant och därmed tidsberoende. För många material som utsätts för långvariga laster fås dock krypning och/eller relaxering, vilket påverkar materialets tillstånd och gör det tidsberoende. De töjningshastigheter som är kopplade till dessa effekter är mycket låga och effekten kan bortses från när töjningshastigheten kommer upp i nivåer kring 10^{-5} s^{-1} . Vid denna nivå kan ofta kvasi-statiskt beteende antas. Detta innebär att även om betydande töjningshastigheter uppnås i materialet är belastningen tillräckligt långsam för att de dynamiska effekterna ska kunna försummas. För ökande töjningshastighet ökar dock effekten av masströghet i systemet och strukturdynamiska effekter så som vibrationer kan vara av stor betydelse. Ytterligare ökning av töjningshastigheten ger även en ökad effekt av vågutbredning i strukturen, vilket gör att antaganden som kan göras för statiska och strukturdynamiska problem inte längre är tillräckliga för att beskriva responsen.

Informationen som sprids i en struktur med hjälp av spänningsvågor vare sig belastningen sker långsamt eller snabbt, och vågutbredning i materialet är därför inte specifikt för höga töjningshastigheter. Spänningsvågorna färdas med ljudets hastighet i materialet och för kvasi-statisk belastning är lastens varaktighet tillräckligt lång för att spänningsvågorna ska hinna spridas i hela strukturen och reflekteras flera gånger; se *figur 3a*. Detta innebär att systemet kan antas vara i jämvikt och att vågutbredningen inte behöver beaktas explicit. För måttliga och höga töjningshastigheter hinner dock inte informationen om lasten spridas i hela strukturen innan området nära lasten börjar deformeras och responsen blir annorlunda än för



Figur 2: Töjningshastighetens inverkan på problembeskrivningen; efter bland annat Zukas (2004) och Ramesh (2008).

det kvasi-statiska fallet. Även om de strukturdynamiska effekterna dominerar beteendet i detta fall kan vågutbredningen behöva beaktas specifikt och begreppet blir aktuellt. I fall med mycket eller extremt höga töjningshastigheter kan belastningen vara så snabb att det mesta av deformationen har ägt rum innan informationen har hunnit spridas till andra delar av strukturen och skadan blir mycket lokal; se *figur 3b*. Dessa fall får därför betraktas som vågutbredningsproblem och strukturdynamiska effekter kan komma att vara av sekundär betydelse.

Tröghetseffekterna gör även att vid mycket snabb belastning fås tillstånd som är närmre plan töjning än plan spänning även för enaxiell belastning eftersom materialet inte har tid att deformeras i sidled. Detta innebär att omslutande spänningar byggs upp och för explosionsbelastning, som normalt orsakar höga eller mycket höga töjningshastigheter, kan omslutningstrycken bli mycket höga och trycknivåerna i strukturen kan överskrida materialets enaxiella hållfasthet flera gånger om.

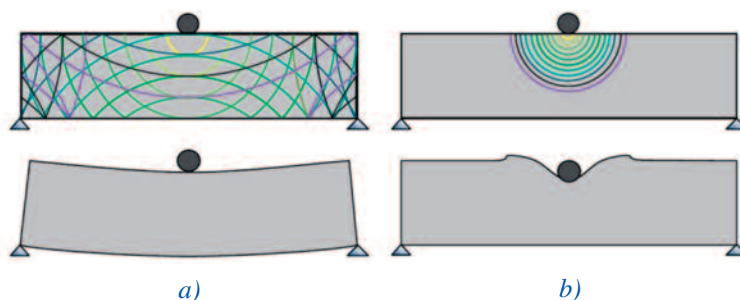
En ytterlighet av vågutbredningseffekten kan vara bildandet och utbredningen av en stötvåg i strukturen. En stötvåg är en spänningsvåg som har en nära nog diskontinuerlig front, och som orsakar en abrupt ändring i materialets tillstånd. Stötvågor bildas som en konsekvens av materialens icke-linjära kompressionsbeteende och innebär att snabbare delar av spänningsvågorna som propagerar i strukturen hinner ikapp långsammare de-

lar med lägre trycknivåer. För solida material, som har en mer eller mindre markant linjärelastisk fas för lägre trycknivåer, och som kan efterföljas av en fas med starkt minskad kompressionsmodul måste trycknivåerna uppnå en viss miniminivå för att bildandet av en stötvåg ska vara möjlig. Eftersom de snabbare delarna av spänningsvågen också måste ha chans att hinna ifatt de långsammare delarna måste belastningen vara tillräckligt snabb för att detta ska vara möjligt. Detta är också anledningen till varför stötvågor inte bildas för kvasi-statisk belastning även om höga trycknivåer uppnås.

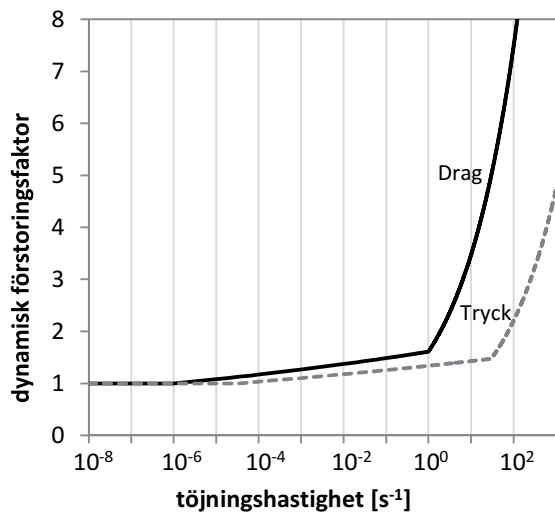
Stötvågor och deras abrupta karaktär kan ha en betydande inverkan på materialresponsen. Den nära nog direkta ändringen från ett stadie till ett annat när stötvågsfronten passerar innebär att den värme som bildas när materialet kompakteras (som en konsekvens av friktion och/eller plastiska deformationer) inte hinner transporteras bort, vilket kan leda till höga temperaturer. För material som karaktäriseras av en hög termisk expansionskoefficient och hög styvhet kan detta leda till en betydande ökning av trycket när den termiska expansionen hålls emot. De höga temperaturerna kan också innebära att materialet genomgår fasförändring, det vill säga smälter eller förångas.

Betongens egenskaper

Betong är ett traditionellt använt material och dess egenskaper vid kvasi-statisk belastning är välkända. Dess relativt höga tryckhållfasthet är en av betongens starka



Figur 3: Vågutbredning och strukturens respons för a) långsam respektive b) mycket snabb belastning.



Figur 4: DIF-kurvor för betong i enaxiellt drag och tryck.

fördelar. Däremot är dess låga hållfasthet och spröda beteende i drag två stora nackdelar för materialet i konstruktionssammanhang, något som går att åtgärda genom att armera betongen. Betongens stora energiuptagande förmåga för höga tryck, och om rätt armerat, sega beteende i drag, gör det också lämpligt att använda för konstruktioner som ska skydda människor, utrustning eller andra omkringliggande konstruktioner för explosionslaster. Som beskrivits ovan gör dessa extrema dynamiska belastningar det nödvändigt att även känna till betongens respons för höga töjningshastigheter och höga fleraxiella tryck.

Höga töjningshastigheter. Vid snabba belastningsförlopp fås en förhöjd hållfasthet i betongen på grund av dynamiska effekter. Detta karaktäriseras ofta genom så kallade DIF-kurvor, där DIF kommer från engelskans *Dynamic Increase Factor* och syftar på kvoten mellan den dynamiska och den statiska hållfastheten. Figur 4 visar DIF-kurvorna för betong i enaxiellt drag respektive tryck, framtagna enligt Malvar & Ross (1998) respektive CEB-FIP Model Code 1990 (1993), för en betong med tryckhållfastheten 35 MPa.

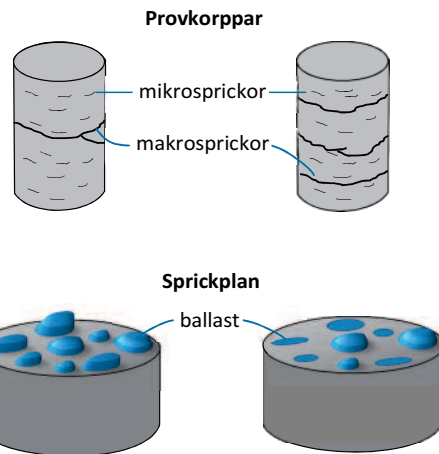
Även om många studier har gjorts inom området är det inte helt klart vilka dynamiska fenomen som ger upphov till denna hållfasthetsökning. Dock tror man att en del av ökningen beror av viskösa effekter av det porvatten som finns i betongen. Detta ger dock måttliga ökning av hållfastheten och för högre töjningshastigheter kommer andra effekter in. I tryck får man en strukturell effekt där tröghet ger ett omslutningstryck, och därmed högre hållfasthet. Detta ger en stark påverkan av hållfastheten och tros vara av avgörande betydelse för den markanta ökningen som observerats för töjningshastigheter över ett visst tröskelvärde, i figuren är detta 30 s^{-1} . I drag tros den skarpa ökningen av hållfastheten vid töjningshastigheter över cirka 1 s^{-1} bero på bland annat ändrade skademönster i betongen. Detta innebär att fler mak-

rosprickor bildas och istället för att söka den svagaste, minst energikrävande, vägen runt ballasten som vid kvasi-statisk belastning kan sprickorna gå rakt igenom dessa, se figur 5.

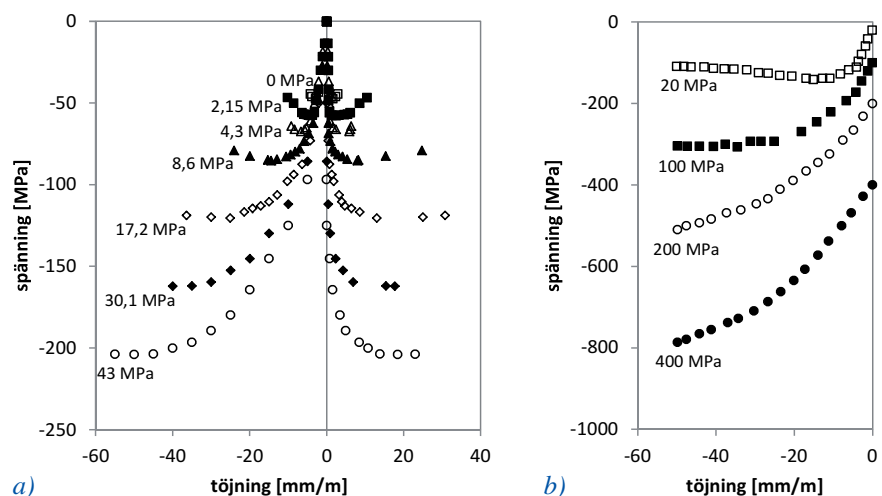
Fleraxiell tryckbelastning. Hållfastheten i betong är alltså starkt beroende av det rådande spänningstillståndet i materialet. Detta visar sig även vid försök med multiaxiell belastning, det vill säga där provkroppen belastas i olika riktningar samtidigt. I figur 6a, visas hur spänningstöjningskurvan för betong påverkas för ökande omslutning i tryck. Redan för relativt små omslutningstryck ses en markant ökning av hållfastheten och när omslutningstrycket når upp till nivåer omkring den enaxiella tryckhållfastheten har hållfastheten ökat flerfaldigt. För splittringsslag kan det omslutande trycket som byggs upp i betongen bli extremt högt och nivåer på hundratals megapascal, eller högre, kan uppstå. Figur 6b visar spänningstöjningskurvor från kvasi-statiska försök med omslutningstryck på dessa ni-

våer. Här kan man se hur betongen får ett segare beteende med ökade plastiska töjningsnivåer vid brott, samt den kraftigt ökade hållfastheten vilken nu är tiotals gånger större än för enaxiell belastning.

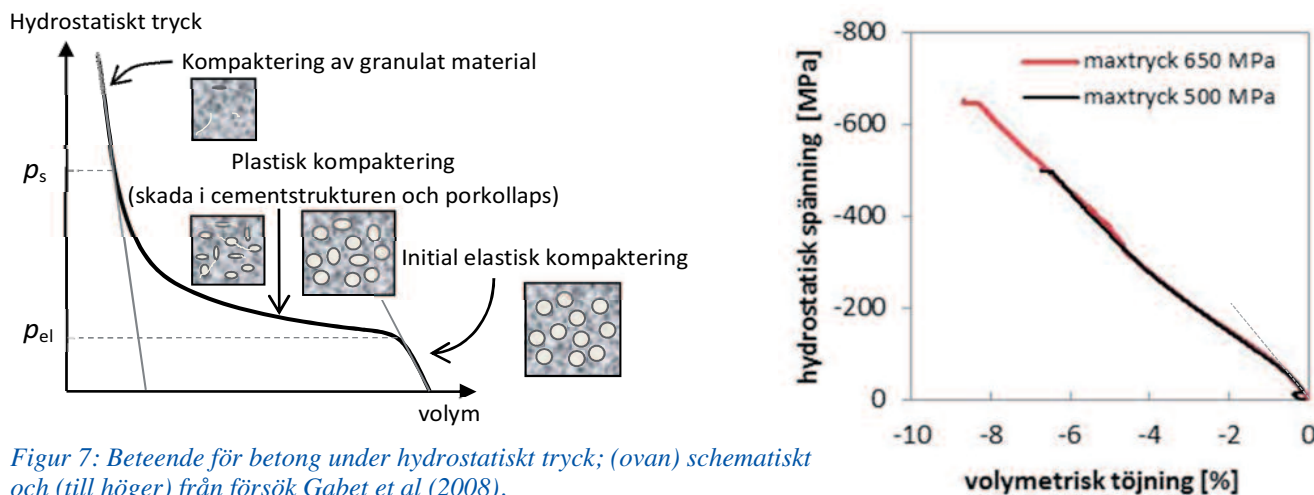
Hydrostatiskt tryck, där trycket på betongen är lika i alla riktningar, kan ses som en ytterlighet av omslutning. På grund av sin sprödhets och porositet har betong en relativt icke linjär kompressionskurva, vilket visas schematiskt i figur 7a på sidan 46. Initialt kompakteras betongen näst intill linjärelastiskt och skadan begränsas till bildandet av mikrosprickor i cementstrukturen. För ökande trycknivå ökar också andelen mikrosprickor och för en viss nivå (markerad som ρ_{el} i figuren), har cementstrukturen försvagats så pass mycket att porväggar börjar kollapsa och man får en plastisk kompaktering. Detta har en stark inverkan på styvheten som minskar drastiskt. Med stigande trycknivå ökar även andelen mikrosprickor i cementstrukturen och fler och fler porer kollapsar, vilket leder till att styvheten åter ökar. När alla po-



Figur 5: Schematisk bild av den dynamiska inverkan på sprickbildningen i enaxiellt drag. Till vänster: långsam belastning, till höger: snabb belastning.



Figur 6: Betongens respons i tryck med relativt a) låga och b) höga omslutningstryck; efter försök av Imran & Pantazopoulou (1996) respektive Caner och Bažant (2000).



Figur 7: Beteende för betong under hydrostatiskt tryck; (ovan) schematiskt och (till höger) från försök Gabet et al (2008).

rer har kollapsat fås åter igen ett näst intill linjärelastiskt beteende, där styvheten är högre än i den initiala elastiska fasen. Detta kan förklaras med att materialet nu har blivit ett kompakt, porfritt, granulat material där styvheten är starkt beroende av beståndsdelarnas styvhet, det vill säga av ballastens styvhet. För hydrostatiskt tryck fås därför aldrig brott i den bemärkelsen att betongen inte kan ta högre laster eftersom man kan fortsätta att trycka på betongkroppen även om betongen skadas kraftigt.

I figur 7b visas spännings-töjningskurvor för betong under hydrostatiskt tryck, med maximala trycknivåer på 500 respektive 650 MPa; från Gabet et al (2008). Dessa maxtryck är i storleksordningen för hur höga hydrostatiska tryck man kan nå under kvasi-statiska förhållanden, men är inte tillräckligt höga för att kompaktera betongen till ett porfritt material. I figuren kan man däremot urskilja den inledande, linjärelastiska fasen och hur styvheten minskar efter denna för att sedan åter öka när trycket ökar. För att prova materialresponsen för betong vid högre trycknivåer än i storleksordningen 0,5 GPa används ofta försök som innefattar detonationer och plana stötar.

Höga trycknivåer – stötvågsbelastning.

För laster med hög dynamisk intensitet och höga trycknivåer kan en stötvåg bildas i materialet. Detta innebär att responsen i materialet kan påverkas av temperaturökningar som en konsekvens av att det inte finns tid för materialet att transportera bort den värme som bildas när betongen skadas. Försöken som utförs för att prova betongens respons vid höga trycknivåer är därför påverkade av temperaturen och det är svårt att kvantifiera denna effekt. Förutom att dessa provningar är dyra att genomföra är det svårare att styra provningarna, mäta responsen och att utvärdera resultaten än i kvasi-statiska försök.

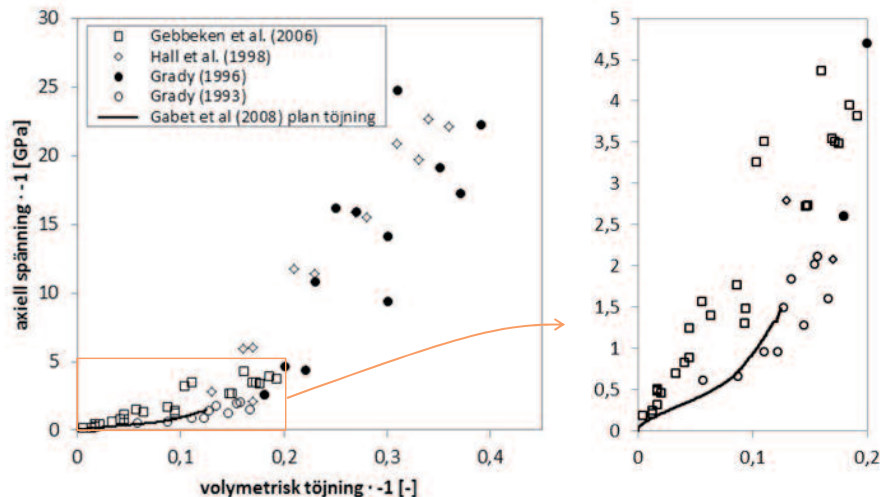
På grund av de många svårigheterna kopplade till denna typ av försök är tillgången till dessa materialdata begränsad. I figur 8 visas dock data för betong från

olika försöksserier med starkt dynamiska laster tillsammans med en kvasi-statiskt uppmätt kurva från ett försök med plan töjning. Valet att jämföra resultaten för de dynamiska försöken med ett kvasi-statiskt försök med plan töjning är motiverat med att stötvågsbelastning ger ett stadiet av just plan töjning i materialet. För extremt höga trycknivåer blir dock skillnaden mellan spänningstillståndet för plan töjning approximativt lika med det för hydrostatiskt tryck eftersom skjuvhållfasthetens andel av det totala trycket då är försumbart liten.

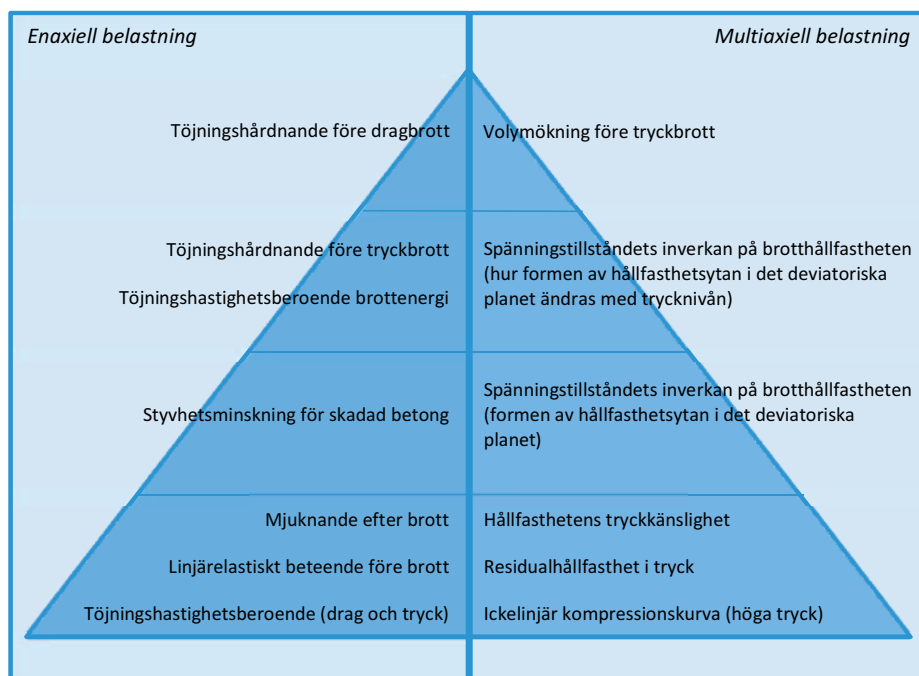
För försök där en stötvåg bildas i materialet fås ingen kontinuerlig lastkurva som i fallen med kvasi-statisk belastning, utan endast punkter i spännings-töjningsplanet kan tas fram. Detta beror på att man endast kan uppskatta tillståndet före och efter passagen av stötvågsfronten. Vidare kan man inte binda ihop punkter från dessa försök och anta att detta är lastkurvan eftersom varje punkt representerar just en direkt tillståndsändring från ett visst initialt stadiet. En sådan kurva skulle istället representera de tillstånd som kan nås genom passagen av en stötvåg, och

beroende på dess styrka nås olika punkter på kurvan. Det som ibland kallas betongens Hugoniot-kurva är en sådan kurva.

I figuren ses tydligt betongens icke-linjära kompression, och de tre olika faserna som nämnts tidigare kan urskiljas. Temperaturens inverkan på resultaten kan uppskattas som skillnaden mellan uppnådda trycknivåer vid starkt dynamisk belastning och kvasi-statisk belastning. Även för relativt låga trycknivåer är det dock svårt att kvantifiera denna effekt eftersom det är olika betonger som har provats. Olika betongblandningar, med olika egenskaper och vatteninnehåll ger olika respons. I Gebbeken et al (2006) har till exempel en betong med högre hållfasthet (cirka 50 MPa) används än i de övriga fallen (cirka 35 till 40 MPa). Detta är åtminstone en anledning till att dessa punkter ligger högre än övriga för volumetriska töjningar över minus femton procent. Generellt kan dock sägas, att för trycknivåer upp till några gigapascal verkar effekten av temperaturen vara begränsad och behöver inte nödvändigtvis beaktas. De begränsade trycknivåerna för kvasi-statiska försök gör det däremot mycket



Figur 8: Försöksdata från detonations- och plan-stöt-provningar tillsammans med data från kvasi-statiska försök under plan töjning.



Figur 9: Betongens karaktäristiska materialegenskaper och inbördes väsentlighet för simuleringarnas validitet (nerifrån och upp).

svårt att uppskatta temperaturens effekt för högre trycknivåer.

Slutord

Det är en stor utmaning att modellera betongens beteende vid explosionsbelastning. Både lasten och responsen, på såväl material- som strukturnivå, är mycket komplex och framtagandet av relevanta resultat kräver god kännedom om alla dessa områden.

Även om modellering av betong kan göras mycket detaljerad innebär detta stora kostnader räknat i simuleringstid. Till exempel kan de olika komponenterna i betongen (cementstrukturen, ballasten, porerna och bindningarna mellan dessa) modelleras separat. Detta är motiverat för detaljerade studier av materialresponsen och komponenternas inverkan och interaktion vid olika typer av belastningar. För större strukturer är denna detaljerade respons av sekundär betydelse och andra begränsningar som till exempel idealisering av randvillkor, utgör en större felkäl-

la än en mer approximativ materialbeskrivning skulle göra. Istället innebär den höga detaljnivån att modelleringen blir extremt kostsam. Därför är det viktigt att välja rätt nivå på komplexiteten i den numeriska modellen – det är inte nödvändigt för simuleringarnas riktighet att beskriva alla materialegenskaper in i minsta detalj, men väsentliga egenskaper får inte approximeras bort.

Figur 9 visar de karaktäristiska materialbeteendena för betong som anses vara av betydelse för simulering av stötvågs- och splitterbelastade konstruktioner. De mest väsentliga egenskaperna utgör basen av pyramiden, och är avgörande för simuleringarnas validitet. Ju längre upp i pyramiden en egenskap befinner sig, ju mindre betydelse anses den ha för resultaten. ■

Referenser

Caner F.C. & Bažant Z.P. (2000): *Microplane model M4 for concrete: II. Algorithm and calibration*. Journal of Engineering Mechanics 126, 954–961.

CEB-FIP Model Code 1990 (1993): CEB-FIP Model Code 1990. Design Code, Thomas Telford, Lausanne, 437 sid.

Ekengren B. (2006): *Skyddsrum SR06*. Räddningsverket, 113 sid.

Gabet T., Malécot Y., & Daudeville L. (2008): *Triaxial behaviour of concrete under high stresses: Influence of the loading path on compaction and limit states*. Cement and Concrete Research 38, 403–412.

Gebbeken N., Greulich S., & Pietzsch A. (2006): *Hugoniot properties for concrete determined by full-scale detonation experiments and flyer-plate-impact tests*. International Journal of Impact Engineering 32, 2017–2031.

Grady D.E. (1993): *Impact Compression Properties of Concrete*. Proceedings of the Sixth International Symposium on Interaction of Nonnuclear Munitions with Structures, May 3–7 1993, Panama City Beach, Florida, 172–175.

Grady D.E. (1996): *Shock Equation of State Properties of Concrete in Structures under Shock and Impact IV*. Editerad av N. Jones et al., Computational Mechanics Publications, Southampton, 405–414.

Hall C.A., Chhabildas L.C., & Reinhart W.D. (1998): *Shock Hugoniot and release states in concrete mixtures with different aggregate sizes from 3 to 23 GPa*. AIP Conference Proceeding 429/119, American Institute of Physics, 119–122.

Imran I. & Pantazopoulou S.J. (1996): *Experimental study of plain concrete under triaxial stress*. ACI Material Journal 93, 589–601.

Malvar L.J. & Ross C.A. (1998): *Review of Strain Rate Effects for Concrete in Tension*. ACI Materials Journal 95/6, 735–739.

Ramesh K.T. (2008): *High strain rate and impact experiments i Springer Handbook of Experimental Solid Mechanics*. Editerad av W.N. Sharpe, Jr., Springer, 874 sid.

Zukas J. (2004): *Introduction to hydrocodes*. Elsevier Science, 326 sid.