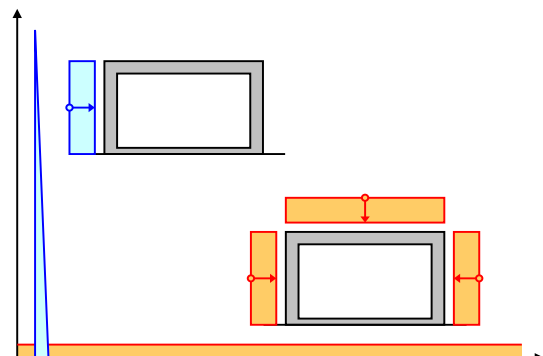
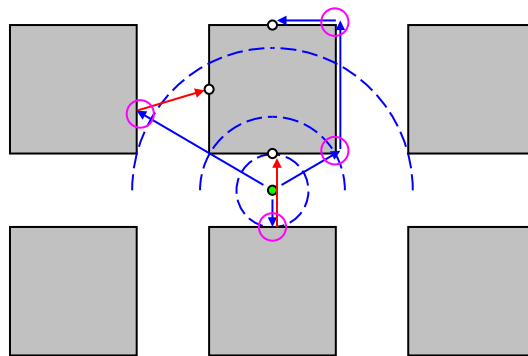
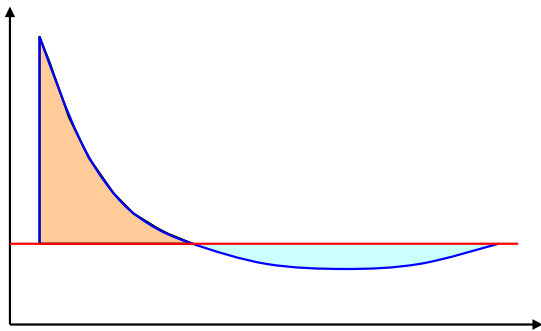


Bebyggelsens motståndsförmåga mot extrem dynamisk belastning

En introduktion



Bebyggelsens motståndsförmåga mot extrem dynamisk belastning
En introduktion

Publikationen utgör ett koncentrat av tre forskningsrapporter utarbetade av
Morgan Johansson, Reinertsen Sverige AB och Leo Laine, LL Engineering

Bearbetning och urval för denna publikation har gjorts av
Stefan Bernson, Sweco AB och Björn Ekengren, MSB

2012 MSB

Publikationsnummer: MSB481

ISBN: 978-91-7383-283-0

Inledning

En viktig samhällsuppgift är att utveckla och stödja förmågan att hantera olyckor och kriser, både genom förebyggande åtgärder och genom beredskap att hantera dem när de inträffar. Det handlar om att hålla en samlad kunskap om hur denna typ av händelser uppträder och hur de påverkar bebyggelsen.

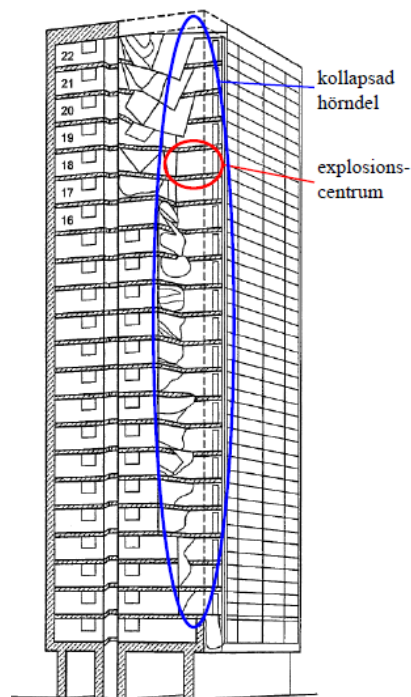
Ett grundläggande arbete för området explosionsbelastningar i bebyggd miljö har gjorts i studien Bebyggelsens motståndsförmåga mot extrem dynamisk belastning. Denna studie finns dokumenterad i tre forskningsrapporter benämnda Last av luftstöt-våg, Explosion i gatukorsning och Kapacitet hos byggnader.

Föreliggande redovisning är ett kraftigt koncentrat av dessa tre rapporter och utgör därmed en introduktion till ämnesområdet. För att tjäna detta syfte har alla formler och ekvationer utelämnats. I rapporterna finns dock på sedvanligt forskningsmanér alla förlopp tydligt redovisade och alla samband härledda. Där finns också en heltäckande referensförteckning.

Studien Bebyggelsens motståndsförmåga mot extrem dynamisk belastning är ett omfattande forskningsprojekt och har utförts som ett led i områdets kunskapsamlande. Förenklat kan detta uttryckas som hur en explosionslast verkar inne i tät bebyggelse och hur den påverkar olika typer av byggnader.

Denna studie skall ses som en inkörsport till en omfattande kunskapsuppbyggnad om dynamisk påverkan på byggnader. Denna dynamiska påverkan avviker väsentligt från konventionell statisk påverkan.

Olyckslast i form av påkörning, explosion o.d. finns med som dimensioneringsförutsättning i tillämpliga byggregler främst för att minimera risken för fortskridande ras inom en byggnad. Denna förutsättning aktualiserades efter gasolyckan vid Ronan Point i London år 1969, där ett hörn av en byggnad kollapsade efter en gasexplosion uppe i byggnaden, se figuren nedan.



Ronan Point-olyckan i London 1969.

Föreskrifterna i svenska konstruktionsregler skall minimera risken för att en explosion medför att stora delar av byggnaden kollapsar. En explosion antas åstadkomma en primär skada och denna får endast kunna påverka byggnaden lokalt. I reglerna diskuteras inte hur explosionen uppkommer eller dess storlek utan enbart effekten av en skada av en angiven omfattning i en enskild byggnad.

Den utförda studien har haft som ingående uppdrag att ta reda på hur en explosion i en samlad bebyggelse uppträder och hur den påverkar de byggnader som utsätts för explosionslasten.

När det inträffar en explosion i tät bebyggelse blir de personer som vistas där helt inneslagna. Genom kunskap om hur byggnader reagerar på sådana belastningar går det att utveckla förhållningssätt till detta. Ett förebyggande sätt är att bygga in skyddsrum eller andra skyddade utrymmen i byggnaden. Ett annat är att kontrollera om byggnaden i sig ger tillräckligt skydd i sin konstruktion eller måste förstärkas. Instängdheten medför oftast att utrymning inte löser problemet, utan det måste lösas inom själva bebyggelsen.

Hotbildsbeskrivning

I fallet vid Ronan Point var det en explosion inne i en byggnad som utlöste händelsen. Det finns andra exempel där tankbilar med gas vält inne i tät stadsbebyggelse och gasen antänts och exploderat. Under senare tid har även risken för terrordåd kommit i blickpunkten. Sverige har hittills förskonats från omfattande sådana dåd, men det har förekommit bomber som exploderat under bilar och motsvarande, se omslagsbilden.

Eftersom de som utför dessa dåd verkar mycket okänsliga för om den hämnd det hela ofta är uttryck för drabbar tredje man, kan man räkna med att det i framtiden kan komma betydligt kraftigare explosioner i bebyggd miljö, vilka kan få en direkt inverkan på intilliggande byggnaders stabilitet.

De terrordåd som på senare år utförts i bl.a. London och Madrid har direkt varit riktade mot tredje man genom bomber placerade i transportsystemen och där har byggnadspåverkan inte varit så omfattande. Dock finns det inget som säger att bomber inte kan komma att placeras i eller invid byggnader också.

I vissa länder i Asien förekommer detta i skrämmande stor omfattning. I dagsläget bedöms inte risken för sådana dåd utförda i Sverige vara stor, men Sveriges engagemang i olika krigshärda utomlands och reaktionerna på provokationer som rondellhundar och Muhammedteckningar visar att terrordåd kan komma att inträffa även här.

Terrorism är inte på något sätt ett nytt fenomen som enbart är kopplat till ovannämnda händelser. I och med attentat som det i New York har medvetenheten för dylika hot dock ökat påtagligt, vilket medfört att hotet tas på större allvar. Detta har t.ex. resulterat i att Sveriges kärnkraftverk beslutat uppgradera det fysiska skyddet för att motverka eventuella sabotage mot känsliga anläggningar samt att Samverkansrådet mot terrorism skapades i februari 2005. Säkerhetspolisen graderar hoten för terrorism i en femgradig skala och när information om skärpt hotbild föreligger ges en varning i form av att hotbildsnivån höjs.

För fysiska skydd såsom skyddsrum är explosionslaster en dimensionerande förutsättning och i denna ingår att de byggnader som utsätts för explosionen kan kollapsa och rasa ner över skyddet.

Av mer allmänt intresse är hur explosionslaster av olika magnitud påverkar en byggnad. Dels beroende på hur bebyggelsen är utformad med gathörn, bredd på gator, byggnaders höjd o.d., dels beroende på respektive byggnads egenskaper i konstruktivt hänseende.

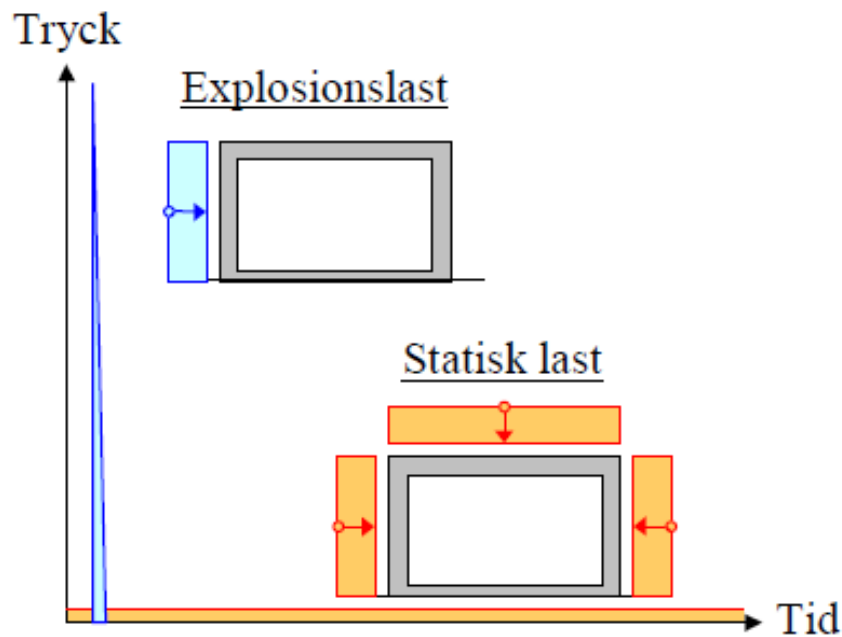
Samlad kunskap

Det är av stor vikt att utveckla och samla ihop kunskap om bebyggelsens förmåga att absorbera och motstå de avsevärda påfrestningar den utsätts för vid extrema dynamiska belastningar.

De explosionsrisker i samband med terrordåd som beskrivs ovan, och som kan drabba byggnader, kan med viss sannolikhet härledas till ett antal specifika byggnader såsom ambassader, myndighetsbyggnader och andra officiella institutioner som kan bli föremål för hämndaktioner och motsvarande. Möjligheten för gasexplosioner från fordon och motsvarande händelser kan sannolikt härledas till vissa transportleder.

I dagens regelverk saknas det klara anvisningar på hur dessa dynamiska laster skall beaktas mer detaljerat. Vidare är dokumentationen av de förutsättningar och antaganden som använts vid framtagning av idag accepterade statiska dimensioneringsmetoder i regel bristfällig och oklar.

I figuren nedan visas den principiella skillnaden mellan den verkliga dynamiska explosionslasten på ett skyddsrum och en statisk ekvivalentlast som används vid konventionell dimensionering av skyddsrum.



Principiell skillnad i nivå och varaktighet hos belastning på skyddsrum när denna betraktas som explosionslast respektive ekvivalent statisk last.

Genom att utnyttja en samlad kunskap om hur bebyggelse reagerar vid explosionslaster kan "riskbyggnader" analyseras och beredskapsåtgärder vidtas. I en del fall kan viss förstärkning kanske utföras. I varje fall kan evakuering efter inträffad explosion planeras. I byggnader som ännu inte uppförts finns möjligheter att utföra dessa med en stomme som i viss utsträckning kan motstå verkan från explosioner.

Det gäller att identifiera de extrema laster som kan tänkas uppstå i en bebyggelse. Vidare handlar det om att ta fram en metodik för att bestämma aktuella laster från en definierad hotbild samt hur utbredningen blir av en luftstöt våg efter en explosion i stadsmiljö.

Det gäller också att utreda bebyggelsens möjlighet att motstå de laster som uppstår vid en explosion inne i den samt vilka parametrar som är av vikt för att byggnader skall ha tillräckligt god motståndskraft. Det är även av intresse att ta reda på hur stor återstående kapacitet som en skadad byggnad har.

Definition av explosion

En explosion karakteriseras av att materia plötsligt expanderar till en mycket större volym än den ursprungliga. En fysikalisk eller kemisk tillståndsförändring hos ett material ger upphov till en plötslig omvandling av potentiell energi till mekaniskt arbete. På grund av det betydande övertryck som uppstår sprider gasen sig över en större volym, vilket medför att den omkringliggande luften tvingas undan.

En explosion rubriceras som en detonation, vilken karakteriseras av att tryckspridningen sker i överljudshastighet och tidsskalan räknas i mikrosekunder.

Det finns även en långsammare typ av kemisk explosion, deflagration, vilken innebär att omgivande medium antänds av den temperaturökning som erhålls då närliggande material förbränns. Detta sker i underljudshastighet och resulterar i en lågexplosiv explosion. Tidsskalan räknas då i millisekunder.

Antändningen av ett gasmoln är ett exempel på deflagration medan antändning av ett militärt sprängmedel såsom TNT är ett exempel på en detonation. Om inget annat anges syftar benämningen explosion på en detonerande explosion.

Magnituden hos en explosion anges i den energimängd som släpps fri. Frigjord energimängd mäts i enheten Joule men av praktiska skäl kan det vara mer informativt att uttrycka explosionens styrka på ett mer tillämpligt sätt. En allmänt accepterad måttreferens på explosioner av sprängämnen är den effekt som erhålls vid en detonation av 1 kg TNT, vilket motsvarar en energimängd på cirka 4,6 MJ.

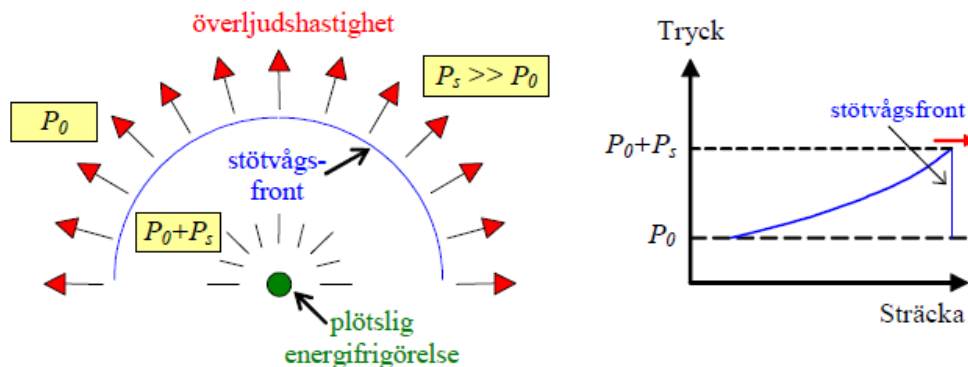
I tabellen nedan ges en kortfattad sammanställning av de stöt-
vågsstorheter som förekommer vid ett explosionsförlopp.

Bebyggelsens motståndsförmåga - En introduktion

Benämning	Be-teckning	En-het	Beskrivning
Tryck	P	Pa	Luftryck. För ostörd luft uppgår det normala luftrycket till omkring $P_0 = 101,3$ kPa.
Stötvågs-hastighet	U_s	m/s	Den hastighet med vilken stötvågsfronten rör sig. Stötvågen rör sig per definition i överljuds-fart.
Densitet	ρ	kg/m ³	Anger hur tätt sammanpackade luftpartiklarna är. Densiteten för ostörd luft $\rho_0 \approx 1,226$ kg/m ³
Ankomsttid	t_a	s	Den tid det tar för stötvågen att nå från en explosionskälla till studerad punkt
Övertryck	P^+	Pa	Storleken på det tryck som överstiger det normala luftrycket.
Undertryck	P^-	Pa	Storleken på det tryck som understiger det normala luftrycket. När stötvågen har passerat uppstår ett undertryck eftersom luftpartiklarna i det passerade området slungats iväg.
Varaktighet	T	s	Total varaktighet vid en explosion. Delas upp i positiv och negativ varaktighet. Positiv varaktighet är den tid som övertrycket är över noll och negativ varaktighet är den tid som undertryck råder. Allmänt gäller att den negativa varaktigheten är längre än den positiva.
Impuls-intensitet	i	Pa s	Den inneslutna ytan (tidsintegralen) mellan tryck-tidskurvan och trycket för ostörd luft av tryck-tidssambandet för en explosionslast. Vid kortvariga belastningsförlopp är det denna, snarare än trycket, som beskriver den verkande lastens egenskaper.
Impuls	I	Ns	Impulsintensitet som verkar på en yta. I dagligt tal används ibland benämningen impuls när det egentligen är impulsintensiteten som åsyftas.

Bildandet av en luftstöt våg

En explosion i luft ger upphov till en kompakt gas med stort energiinnehåll som under högt tryck tvingar tillbaka den omgivande atmosfären. Detta ger upphov till en stöt våg som i överljudshastighet rör sig ut från explosionens centrum, se figuren nedan.



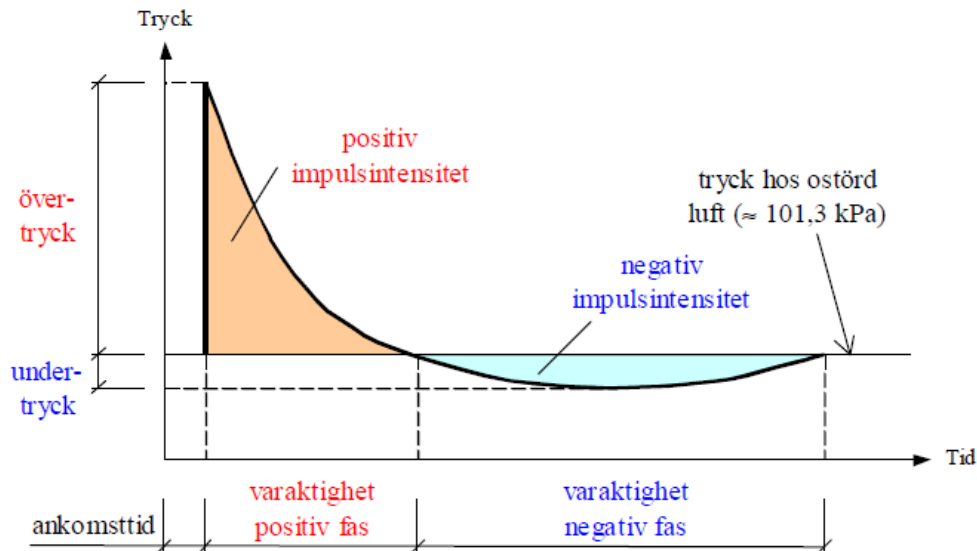
Principiell bild av en explosion och den efterföljande stöt vågsutbredningen som sker i överljudshastighet.

Omedelbart bakom stöt vågsfronten finns en region där tryck, temperatur, densitet samt luftpartiklarnas hastighet kan vara markant högre än i den ostörda luften framför stöt vågsfronten. Allt eftersom stöt vågen avlägsnar sig från explosionens källa, avtar dock energiintensiteten i den påverkade volymen, vilket leder till att ovanstående parametrar snabbt återgår till sitt ursprungliga läge.

Varaktighet hos en luftstöt våg

En stöt vågs påverkan på omgivningen beror framförallt på energiinnehållet i explosionen samt av avståndet från explosionens källa. Vid dimensionering av en konstruktion används resulterande storheter såsom övertyck, undertryck, varaktighet samt impulsintensitet.

Figuren nedan visar en principiell tryck-tidkurva hos en ideal stötvåg, där dessa storheter presenteras. Med ideal avses att luftstötvågen utvecklas i det fria utan hinder som påverkar dess utbredning.



Principiell bild av ett typiskt tryck-tidssamband för en luftstötvåg vid fri avlastning.

En ökande energimängd i explosionen leder till högre tryck och större impulsintensitet. Dessa båda parametrar minskar dock med ökande avstånd från explosionskällan medan belastningens varaktighet ökar med ökande avstånd.

Explosioner i slutna utrymmen skiljer sig påtagligt mot explosioner i det fria. Den begränsade volymen på vilken explosionsgaserna kan breda ut sig gör att belastningen genom så kallade fördämningseffekter blir mer komplicerad än i det idealiserade fallet.

Förutom ökat övertryck, orsakat av de många reflexioner som uppstår, så kommer även tryckets varaktighet att öka betydligt. Detta leder i sin tur till ökad belastning mot omgivningen.

Verkan av en luftstötvåg

I princip går det att skilja på tre olika fall av stötvåg, vilka samtliga kan ge betydliga bidrag till den totala lastpåverkan på omgivningen. Dessa fall är:

- Utlöst energi koncentreras till förflyttning av stötvågen i en styrd riktning, t.ex. längs en gata.
- Ökat antal reflexioner, stötvågen studsar mot väggarna.
- Kvarhållna spränggaser, genom att de är inneslutna i omgivande bebyggelse.

Den förstnämnda punkten syftar på den effekt som fås vid explosion i exempelvis en tunnel eller på en gata mellan två byggnader. Gatans utformning, med två öppna ändar samt fri avlastning i vertikalled, möjliggör avlastning men i princip enbart i två riktningar. Därmed kommer aktuell energiintensitet på en given sträcka från explosionscentrum också att bli högre än vad fallet för fri avlastning ger upphov till. Detta leder i sin tur till ökat tryck men framförallt ökad varaktighet hos den resulterande belastningen.

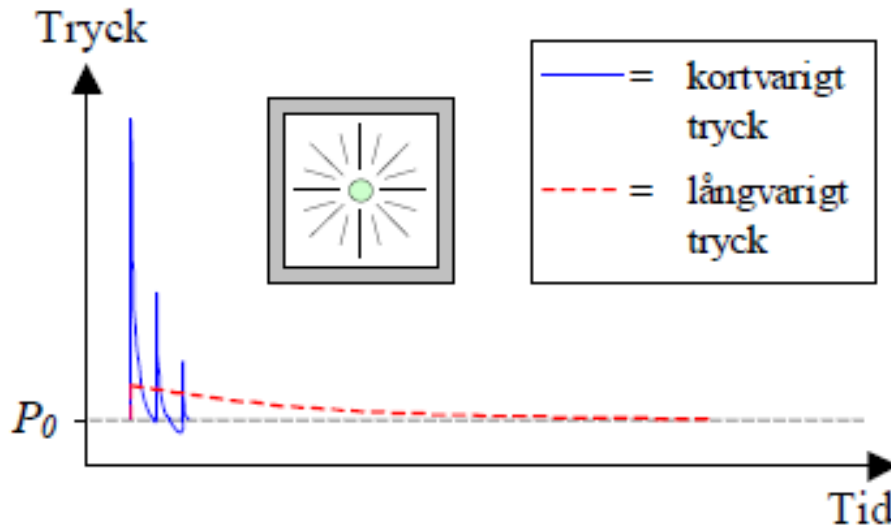
Vidare resulterar en dylik fördämning i att explosionslasten kan bibehålla en betydande storlek även på långa avstånd från explosionscentrum, något som är av intresse vid exempelvis explosion i stadsmiljö.

Den andra punkten syftar på att andelen reflexioner ökar i ett slutet utrymme. Beroende på utrymmets beskaffenhet ger detta upphov till en komplicerad serie av sekundära reflexioner.

Den första reflexionen i det slutna utrymmet är identisk med motsvarande reflexion för explosion med fri avlastning. Skillnaden består i att det i det slutna utrymmet även uppstår en serie av efterföljande reflexioner med överlappande trycktoppar.

Den tredje punkten härrör från att en begränsning av stötvågens möjlighet att utvidgas gör att de spränggaser som frigörs i sam-

band med en explosion inte kan ventileras bort i tillräcklig omfattning och därför ger upphov till ett långvarigt tryck. Detta tryck är betydligt lägre än det maximala tryck som fås vid den första kortvariga reflexionen, men dess varaktighet ökar också markant. Detta resulterar normalt i en impulsbelastning som vida överstiger den impuls som fås av de inledande reflexionerna, se figur nedan.

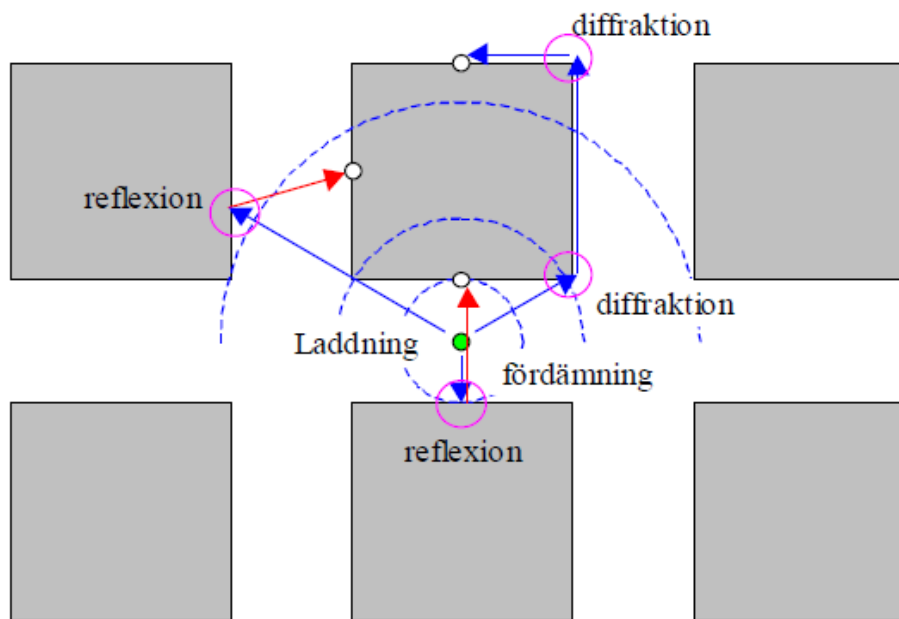


Schematisk jämförelse av kortvarigt och långvarigt tryck som erhålls vid explosion i slutet utrymme.

Explosion i bebyggelse

Med bebyggelse avses i detta sammanhang en samling byggnader men även de människor som vistas där. Det skiljs således på termerna bebyggelse och byggnad. Förenklat uttryckt kan sägas att bebyggelsen består av byggnader med mellanrum där människor vistas.

I en komplex geometrisk omgivning som en stadsmiljö kommer fenomen såsom diffraktion, reflexion, fördämning och överlagring att få betydande inverkan på den resulterande lastbilden, se figuren nedan.



Schematisk illustration av stötvågsfenomen som uppstår vid explosion i bebyggelse.

Reflexion uppstår när stötvågen träffar en byggnad, vilket leder till en flerfaldig tryckökning som beror på stötvågens ingående tryck samt anslagsvinkel. Diffraktion är en försvagning av stötvågen som inträffar när den rör sig runt ett hörn hos en byggnad. Slutligen uppstår fördämning av stötvågor när spridningen av denna förhindras av omgivningen, vilket leder till att den energiuttuning som skulle ha uppstått vid en oförhindrad sfärisk utbredning senareläggs.

Den resulterande lasteffekten av en explosion kommer därför att variera beroende på hur stötvågens utbredningsmöjligheter ser ut. För att sedan kunna bedöma vilken reell effekt som denna lastpåverkan har på en given byggnad eller byggnadsdel krävs en närmare kontroll av den aktuella lastupptagningsförmågan hos denna.

Olika utformning av gator, täthet mellan byggnader och byggnadernas höjd, fasadutformning m.m. påverkar explosionsförloppet och genom att variera dessa variabler i datakörningar kan en beräkningsmodell verifieras. Det finns ett mycket använt amerikanskt program, ConWep, som beskriver empiriskt framtagna effekter av olika parametrar. Datakörningarna kan relateras till

bl.a. detta för att kontrollera hur bra den framtagna beräkningsmodellen stämmer med tidigare data.

För att bedöma en tänkbar explosion är det värdefullt med en sammanställning av de olika sprängämnesmängder som beroende på transportmedel kan vara tänkbara att använda vid bomber i "fredstid" i bebyggelse.

Belastningar av vapenverkan

För att kunna analysera hur allvarlig effekten av en specifik explosion i bebyggelse är, är det viktigt att känna till byggnaders tålighet för utvändigt explosion.

Försvarets forskningsanstalt har tagit fram en omfattande vapenverkansmodell som resulterat i simuleringsverktyget Vebe (verkan i bebyggelse). Detta redovisar konventionell vapenverkan i bebyggelse.

Beräkningsmetoden för väggras hanterar explosioner som har ett övertryck med lång respektive kort varaktighet.

Gasexplosioner har en lång varaktighet jämfört med utsvängningstiden hos belastad byggnadsdel, exempelvis en vägg, men också ett förhållandevis lågt tryck. Konventionella sprängmedel ger en explosion med högt tryck men en varaktighet som oftast är betydligt kortare än utsvängningstiden hos belastad byggnadsdel.

Ytterlighetsfallen av dessa båda belastningsfall illustreras i figuren nedan, där p_c anger det karakteristiska trycket för en oändligt lång stötvåg och i_c anger den karakteristiska impulsintensiteten för en belastning med en ideal impulsbelastning (oändligt högt tryck och oändligt kort varaktighet). Vid lång och kort varaktighet är det det karakteristiska trycket respektive den karakteristiska impulsintensiteten som är dimensionerande för utsatt byggnadsdel.

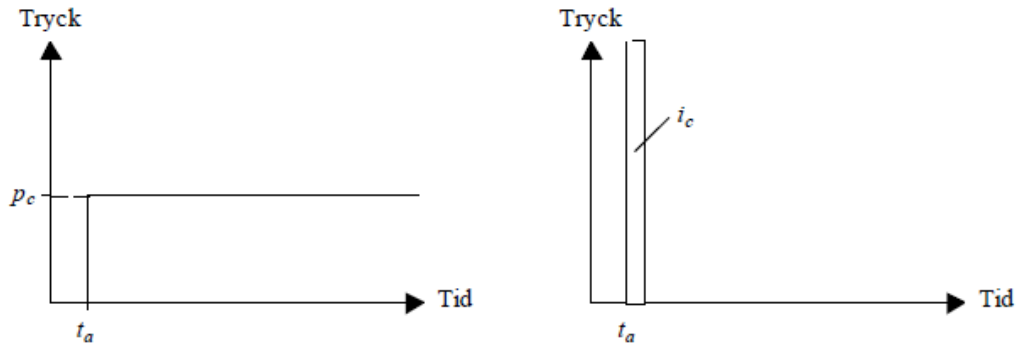


Illustration av karakteristiskt tryck p_c och karakteristisk impulsintensitet i_c .

Byggnaders tålighet mot explosion

För att vika verkan både från karakteristiskt tryck p_c och impulsintensitet i_c används ofta tryck- och impulsintensitetsdiagram, så kallade skadekurvor, där p_c och i_c utgör asymptoter, se figuren nedan.

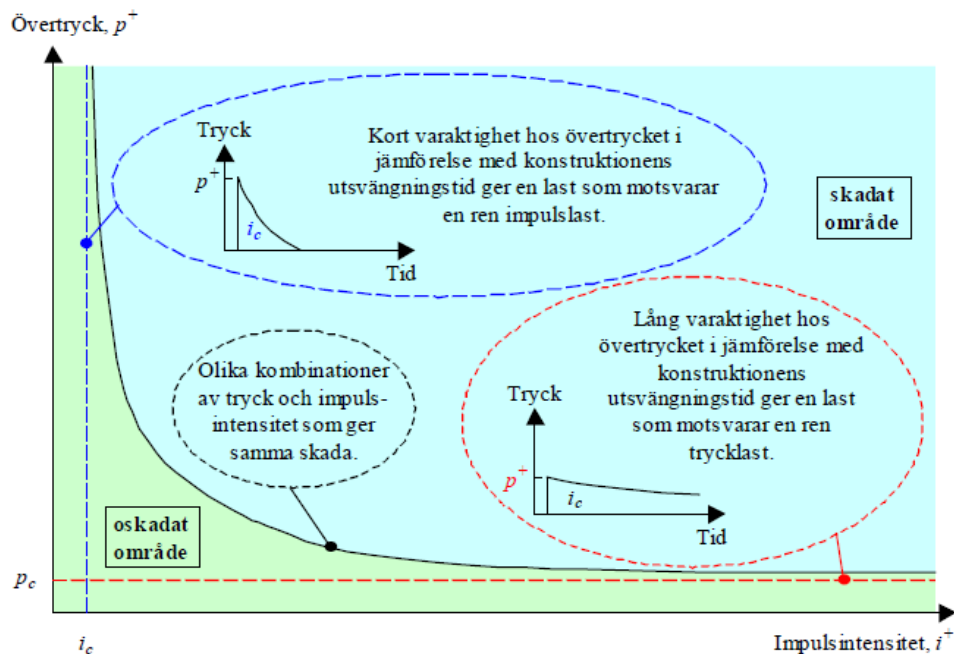


Illustration av hur en skadekurva för en byggnadsdel kan se ut i ett tryck-impulsintensitetsdiagram där p_c och i_c utgör asymptoter där minst båda måste överskridas för att skada på byggnadsdelen ska uppstå.

Med vetskap om en byggnadsdels specifika skadekurva är det möjligt att utgående från aktuell belastning avgöra om byggnadsdelen har fått bestående skada. En sådan kurva beskriver vilka kombinationer av maximallast och impuls som för avsett system genererar samma maximala förskjutning.

Med utgångspunkt från tillåten förskjutning blir det därmed möjligt att utforma dessa skadekurvor så att det snabbt går att avläsa om en given dynamisk last medför en viss förskjutning (skada) eller inte och kan därmed utgöra ett viktigt hjälpmedel för att enkelt beskriva en konstruktions bärförmåga.

Karaktäristiskt tryck och impuls varierar med vilken typ av konstruktion som studeras. Lite förenklat kan sägas att en lättare konstruktion, exempelvis en trävägg, är känslig för höga tryck och låga impulser medan en tyngre konstruktion, till exempel en betongvägg, tål högre tryck och impulsnivåer. Karakteristiska tryck p_c och karakteristiska impulsintensiteter i_c för kollaps av olika byggnadstyper sammanställs lämpligen i tabeller.

Människors tålighet mot explosion

Det är intressant att jämföra byggnaders tålighet mot verkan av explosioner med människokroppens tålighet. Människors tålighet mot en explosion kan kategoriseras i direkta och indirekta skador från stötvågen.

Direkta skador på människor från explosioner uppstår först i trumhinnorna, vilket är det tryckkänsligaste organet. Därefter är det lungorna som blir skadade. Experiment och observationer visar på stora variationer för vilka värden trumhinne rupturer uppstår vid luftstötvåg. Ett tröskelvärde för när detta kan uppstå vid luftstötvåg med snabb tryckstigning och en varaktighet på 3 ms (millisekunder) anges till 5 psi (pounds per square inch, 35 kPa). Detta används också ofta som gränsvärde för när en människa kan råka ut för skada.

Vid kortare varaktighet tål människan högre trycknivåer. Om varaktigheten är kortare än 10 ms så ökar tåligheten markant för vilket tryck som skada i lungor och överlevnad kan uppstå. Det

är lungorna som är det känsliga organet. Tålighetsvärdena beror också i hög grad på hur kroppen är orienterad i förhållande till stötvågen och hur nära intill en reflekterande yta kroppen är. En person med låg vikt är dessutom mer utsatt än en person med hög vikt.

Indirekta skador på människor åsamkas av splitter som accelereras direkt av laddningen och detta är en stor skadekälla. Ytterligare indirekta skador uppstår genom att kroppen kastas av stötvågen. Stötvågen accelererar upp kroppen och när denna sedan slår emot en fast yta så uppstår skador. Ras av byggnadsdelar kan medföra ytterligare skador på människan.

En jämförelse av tillåtna tryckvärden för byggnader och människor kan ge den missvisande bilden att människor är tåligare än byggnader vad gäller explosioner. Ur ett rent tryckperspektiv är detta visserligen sant, men en människokropp i det fria kan inte motstå en tryckvåg utan att slungas iväg och slår då oftast mot ett hårt underlag. Således är det inte de direkta skadorna av trycket som nödvändigtvis är farligt för människan utan snarare indirekta skador orsakade av flygande föremål eller att man slungas iväg.

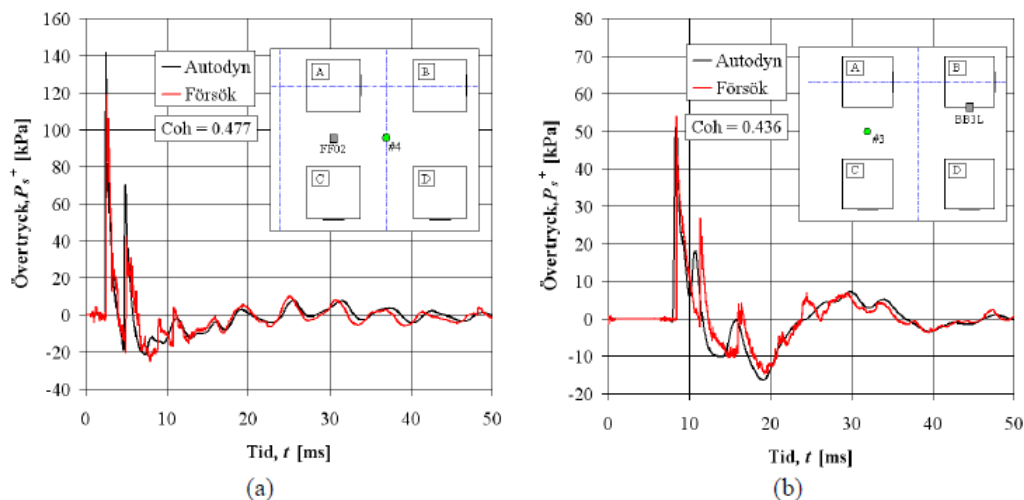
Försök för att verifiera analysresultat

Det är mycket dyrt och nästintill omöjligt att genomföra explosionsförsök i bebyggelse i full skala. Av den anledningen har det tagits fram s.k. skallagar baserade på experimentella observationer och teoretiska studier. Dessa gör det möjligt att jämföra effekten av olika sprängladdningar på olika avstånd. Det gäller allmänt för en stötvåg orsakad av en explosion att dess egenskaper dels beror på explosionens energiinnehåll och dels på hur långt från explosionskällan stötvågen har färdats.

Den vanligast förekommande av dessa lagar är Hopkinsons skallag, vilken säger att två olika explosioner kan förväntas ge upphov till likvärdiga stötvågor på avstånd som är proportionella mot kubikroten av den frigjorda energin hos respektive explosion. En utveckling av detta ger motsvarande samband för övertryck, impulsintensitet och varaktighet.

Genom att utföra modellförsök kan teoretiskt beräknade skalade resultat verifieras mot försöksresultaten. Resultaten får sedan analyseras i flera separata steg i en, två och tre dimensioner, där varje vald modell får anpassas för att vara så enkel som möjligt.

Det är önskvärt att enkelt kunna kontrollera överensstämmelse mellan försöksresultat och analys. Ett sådant mått är koherensmättet, C_{oh} . Detta återspeglar avvikelsen mellan försök och analys. I princip är $C_{oh} = 1 - k_i$, där k_i är en avvikelsefaktor som har integralen av trycket som funktion av tiden i täljaren och totala impulsintensiteten ($i^+ + i^-$) i nämnaren. $C_{oh} = 1,0$ innebär således en nära nog perfekt överensstämmelse, eftersom avvikelsefaktorn då är i stort sett 0, men redan $C_{oh} = 0,5$ svarar mot en mycket god överensstämmelse. Figuren nedan visar ett exempel på analysresultat.



Överensstämmelse av resultat från försök och analyser i genomförd studie när $C_{oh} \approx 0,50$. Baserat på detta bedöms $C_{oh} \geq 0,50$ svara mot en mycket god överensstämmelse.

I studien om bebyggelsens motståndsförmåga genomfördes analyserna i programmet Autodyn. Dessa analyser visar att detta program uppvisar mycket god överensstämmelse med utförda försök och därmed fungerar bra för att ta fram resulterande laster på byggnader från en explosion i bebyggelse.

En nackdel med ett program som Autodyn är dock dels att det är dyrt, dels att det kräver stor kunskap av användaren. Detta med-

för att det inte alltid är möjligt, eller ens önskvärt, att använda. Det är därför bättre med enklare och mer generellt användbara verktyg för att kunna analysera en given bebyggelse. Därigenom kan man se hur sårbar den är för explosioner och om den, om så erfordras, kan förstärkas eller på annat sätt förbättras för att bättre klara explosionslasterna.

Förenklad analys

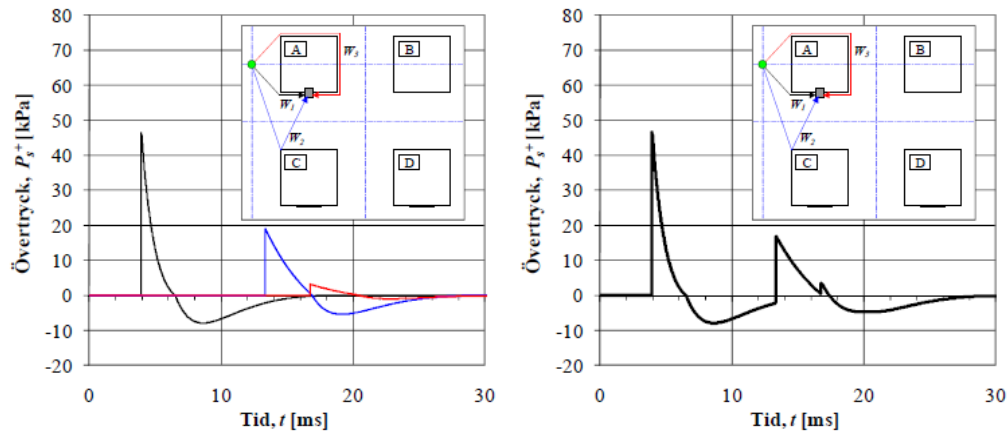
Empiriska och semi-empiriska metoder är i regel mer lättanvända än datakörningar i avancerade program som Autodyn och de bidrar sannolikt också till en bättre förståelse för hur olika lastsituationer uppstår och utvecklas. Även komplexa sådana och de fenomen som dessa kan medföra kan studeras utan att beräkningsmängden blir ohanterlig.

En djupare förståelse är också nödvändig för att förhindra att avancerade beräkningsprogram utvecklas till att fungera som så kallade ”svarta lådor”, där förståelsen av vad som händer inne i lådan går förlorad. Man stoppar in en mängd data och får ut ett resultat utan att egentligen ha någon möjlighet att kontrollera om resultatet verkar rimligt.

Ett enklare beräkningsverktyg kan också i flera fall vara fullt tillräckligt för att ge en erforderligt god bild av resulterande lastnivåer från en komplex explosionsanalys.

En utgångspunkt för en sådan beräkning är att identifiera hur de stötvågor, som kan tänkas påverka den byggnad som skall undersökas, tar sig fram och modifiera dessa med hänsyn till diffraktion (vad som händer när stötvågorna passerar hörn) samt slutligen superponera dem (addera delresultaten), för att få ett slutligt tryck-tidssamband.

Tryck-tidssambandet i en given punkt bestäms via en serie beräkningar. Först definieras samtliga stötvågsvägar från en tänkt explosionspunkt till den byggnad man önskar studera, se figuren nedan.



Schematisk bild av summering av flera samverkande stötvågor vid bestämning av resulterande lasteffekt i en punkt bakom en byggnad.

Utifrån avstånd och laddningskaraktistika bestäms storleken på ett antal stötvågsparmetrar och tryck-tidshistorien för respektive stötvågsväg beräknas med användande av dessa stötvågsparmetrar. Aktuell diffraktionskoefficient för respektive stötvåg, $C_{diff,i}$, bestäms sedan och produkterna summeras till det resulterande totala trycket explosionen medför på den studerade byggnaden.

Stötvågsparmetrarna kan bestämmas via enkla beräkningar eller på sikt i nomogram och diagram. Diffraktionskoefficienten $C_{diff,i}$ innebär en reducering av trycket för respektive stötvåg. Vilket värde en sådan reduktionsfaktor skall ha är komplext att bestämma och framtagna försöksresultat visar på en möjlighet att använda en approximativ och övergripande metod. Diffraktionskoefficienten kan då approximativt skrivas som $C_{diff,i} = 0,6^m$, där m är antal hörn som stötvågen passerar.

Dessa beräkningar går att utföra i programmet Excel. Därigenom erhålls snabbt en grov men ändå acceptabel uppfattning om vilken trycklast som verkar i en given punkt vid en explosion i en komplex geometrisk omgivning. Observerade lastvärden skiljer sig med omkring 20 % mot vad som observerats i försök, vilket kan anses vara en tillräckligt god noggrannhet för ändamålet med beräkningarna. Ingångsdata beträffande explosionslastens storlek är ändå baserade på antaganden. Det viktiga i sammanhanget är att få fram storleksordningen på effekten av en explosion.

Dynamisk kontra statisk last

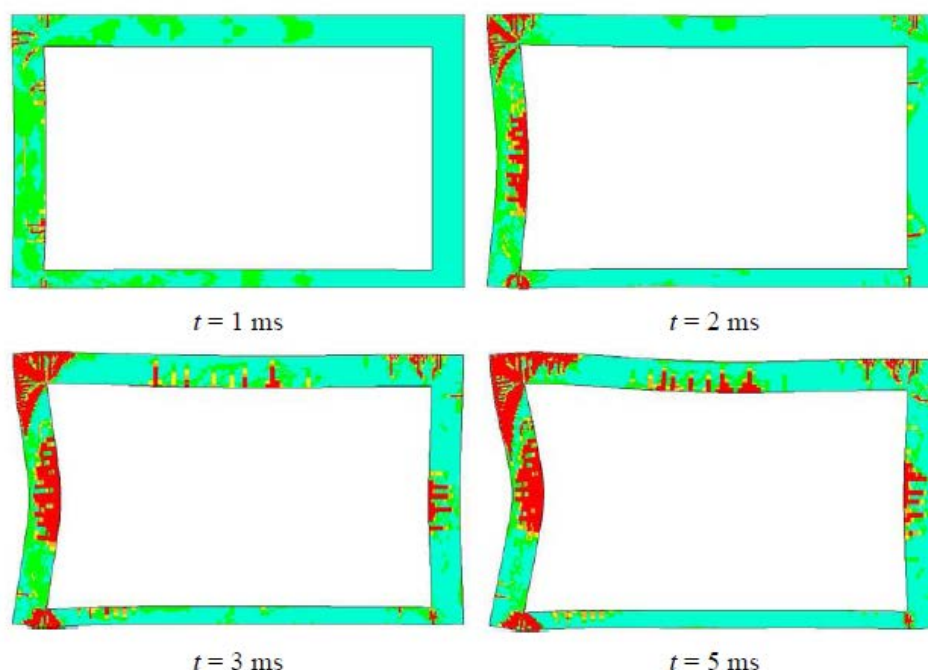
En konstruktions verkningssätt är radikalt olika om konstruktionen utsätts för en statisk last eller om lasten är dynamisk. Detta gäller särskilt om den dynamiska lasten utgörs av en intensiv men kortvarig impulslast.

Många gånger används dock vid dynamiska lastpåverkan förenklade statiska belastningsfall, vilka grundar sig på beräkningsmodeller som på olika sätt beaktar det dynamiska skeendet. En sådan metodik är att bestämma storleken hos den statiska last som genererar motsvarande yttre arbete som aktuell dynamisk last. Denna last benämns statisk ekvivalentlast. Förenklat uttryckt är det yttre arbetet den totala energi som åtgår för att deformera konstruktionsdelen, dvs. konstruktionsdelens massa gånger utböjningen.

I figuren nedan visas erhållen deformation och sprickbildning hos en skyddsrumsvägg 1, 2, 3 och 5 ms efter påbörjad belastning. Efter omkring 5 ms, vilket är ungefär 2 ms efter det att explosionslasten försvunnit, dvs. passerat vidare, fås de största påkänningarna i den främre väggen och det är i princip detta skede hos den främre väggen som beskrivs av den dimensionerande ekvivalenta statiska lasten.

Den initiala trycklasten som väggen utsätts för uppgår till omkring 5 MPa, men lastens varaktighet är mycket kort – redan efter omkring 3 ms har trycket sjunkit till nästan noll. Detta kan jämföras med den statiska last på 50 kPa som används vid dimensionering av ett skyddsrum utsatt för explosionslast. Det maximala trycket hos aktuell impulslast är således omkring 100 gånger större än trycket för den ekvivalenta statiska lasten.

Det är viktigt att inse att den statiska ekvivalentlast som tagits fram för en given kombination av dynamisk last och belastad konstruktionsdel bygger på vissa bestämda förutsättningar. Om dessa förutsättningar inte uppfylls gäller inte heller framtagna ekvivalentlast. Det behövs därför verktyg för att kunna bedöma hur en given konstruktion reagerar när den utsätts för dynamiska laster.



Reaktion i ett skyddsrum av explosion mot den vänstra väggen. Deformationerna är uppförstorade 20 gånger och röd färg markerar fullt utvecklade sprickor.

Den befintliga bebyggelsen genomgår en ständig förändring i form av nybyggnation och kompletterande funktionsändringar. Inom byggandet pågår dessutom en ständig utveckling av material, byggteknik och konstruktionslösningar.

Förutsättningarna för bebyggelsen kan därmed förändras i sådan grad att de dimensioneringsmetoder som idag används för att beakta dynamiska påfrestningar blir otillräckliga i framtiden.

Det är dessutom risk för att den bakomliggande fysiken lätt kommer i skymundan eller faller i glömska. Ändrade förutsättningar kan således medföra att dagens beräkningsanvisningar inte längre är representativa för det som önskas kontrolleras, något som gör att det finns en ökad risk att ödesdigra misstag begås.

Primära skyddsåtgärder

För att skydda sig mot effekten av en explosion är de primära skyddsåtgärderna kopplade till avstånd och massa. Ett ökande avstånd medför att frisläppt energi tunnas ut över en större volym, något som medför en lägre last. En ökad massa kräver en större energimängd för att sättas i rörelse och därmed minskar effekten av den last som verkar på en konstruktion.

Det enklaste och effektivaste sättet att skydda en byggnad från explosionslaster är därför att se till att explosionen inte kan inträffa intill byggnaden. Olika typer av barriärer skyddar normalt inte särskilt effektivt mot själva explosionen, men de hindrar en potentiell explosionskälla från att komma för nära den byggnad eller verksamhet som önskas skyddas.

Ett annat sätt att säkerställa tillräckligt avstånd från en möjlig hotkälla kan vara att placera sin verksamhet tillräckligt högt upp i luften. Detta innebär att önskat säkerhetsavstånd uppfylls genom att aktuella lokaler förläggs på exempelvis tionde våningen i en robust byggnad, varvid ett tillräckligt avstånd till eventuella hot på gatunivå effektivt kan uppfyllas.

Det är givetvis inte alltid möjligt att uppfylla önskat avståndskriterium, så när en konstruktion väl utsätts för en extrem belastning måste den ha erforderlig förmåga att hantera detta. För en byggnad som förväntas utsättas för extrem impulsbelastning är det därför av vikt att den är rätt utformad så att den reagerar segt med bibehållen bärförmåga. Byggnaden skall således tåla relativt stora deformationer utan att kollapsa.

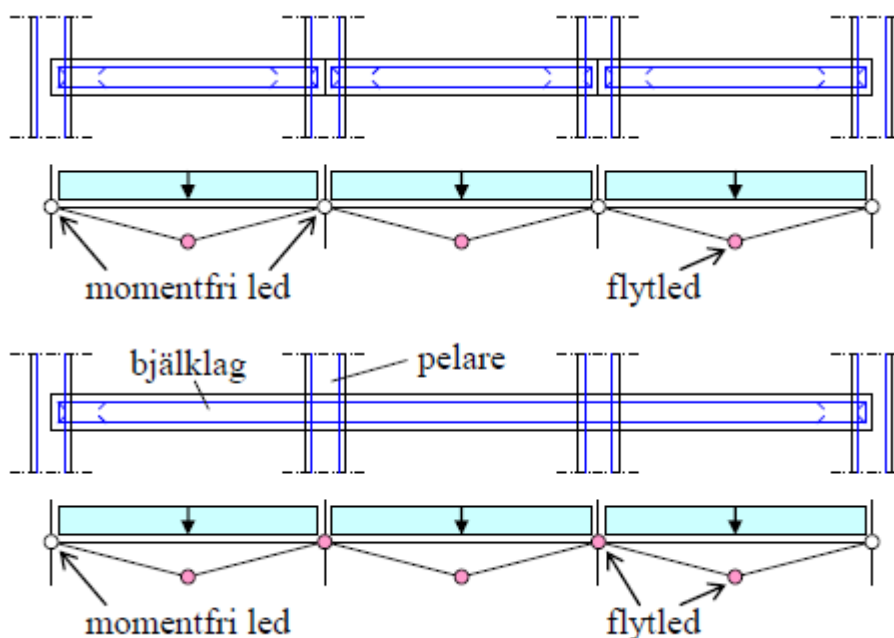
Kritiska parametrar

Det är inte ett tvärtnitts maximala lastkapacitet som är av primärt intresse utan det är dess totala energiupptagande förmåga, dvs. dess deformationsförmåga i kombination med tillhörande lastupptagning som avgör hur byggnaden klarar sig. Därvid gäller att för en styv konstruktion fås små deformationer men

stora krafter, medan det för en vek konstruktion blir stora deformationer i kombination med små krafter.

Ett exempel på hur utformningen av byggnadsdelar har direkt inverkan på hur byggnaderna beter sig vid explosionslast är armeringsutformningen. Allmänt gäller att små armeringsmängder i en betongkonstruktion resulterar i bättre deformationsförmåga än stora armeringsmängder. Detta förutsätter dock att brott inte erhålls i armeringen, utan att det är den tryckta betongen som utgör tvärsnittets svaga punkt. Om armeringen slits av minskar rotationskapaciteten drastiskt, vilket kan medföra kollaps av byggnadsdelen.

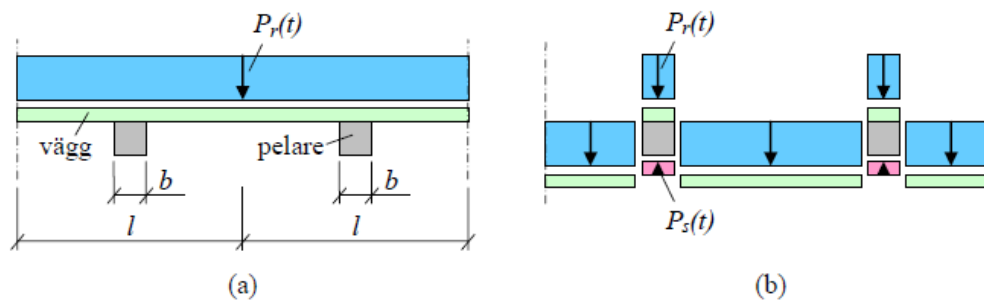
Genom att utföra väggar och bjälklag med momentinspända kopplingar, såsom schematiskt visas i figuren nedan, säkerställs en ökad motståndsförmåga mot explosionslast hos en byggnad. En kontinuerlig dragen armering genom bjälklagen resulterar i en ökad möjlighet till kraftomlagring i konstruktionen eftersom det då kan uppstå fler s.k. flytleder än vad som är fallet när bjälklaget enbart läggs upp på respektive pelarupplag. Detta senare är många gånger fallet vid prefabricerade stommar.



Schematisk bild av bjälklag med enskild respektive kontinuerlig uppläggning av balk. De momentfria lederna upptar ingen energi, vilket gör att bjälklaget med kontinuerlig armering har större energiupptagande förmåga.

En byggnad som har en inbyggd redundans, dvs. reservkapacitet, har större förmåga att motstå explosionslaster. Kontinuerligt armerade bjälklag är ett sätt att uppnå detta. Ett annat är att bjälklagen skall kunna verka i båda riktningarna, så att om en bärande del slås ut skall lasten kunna upptas av de bärande delarna i den andra riktningen.

Om en byggnad har pelarstomme med lätta utfackningsväggar är den väsentligt mindre känslig för explosionslaster. En tidig kollaps av fasaden medför att den totala lasten på byggnaden minskar, eftersom denna beror på lastens impulstäthet och den lastupptagande area som byggnaden utgör. En byggnad med pelarstomme och eftergivliga väggar kan därmed få en märkbart lägre lastverkan på det bärande systemet jämfört med motsvarande byggnad vars stomme exempelvis utgörs av en bärande fasad av betongväggar, se figuren nedan.



Schematisk bild av last på pelarstomme med (a) oeftergivliga, bärande väggar och (b) eftergivliga, ej bärande väggar.

Tillämpning

Det är viktigt att ingenjörer som har övergripande ansvar för bebyggelseutformning och olika hotbilders inverkan på denna lär sig att tänka i dynamiska förlopp. Vid ett statiskt betraktelsesätt är det stor risk för att väsentliga aspekter på stommens stabilitet och förmåga att klara explosionslaster försummas. Det är inte fråga om att utföra ”bombsäkra” byggnader utan om att se hur skador på byggnader många gånger med relativt begränsade åtgärder kan minskas.

För detta ändamål erfordras en analys av vilka hot som kan vara tänkbara och var inom bebyggelsen som hoten kan tänkas vara aktuella. Analysen skall också peka på vilken dynamisk påverkan detta kan ha på studerade byggnader.

Vid en stötvågsbelastning går förloppet så fort att hela byggnaden inte hinner reagera på stötvågen innan den har passerat. Detta avviker avsevärt från de statiska laster som ingår i normal dimensionering av byggnader. För att rätt kunna beakta dessa dynamiska fenomen krävs en analys av såväl explosionsförloppet som byggnaden.

Vid analys av en byggnad är byggnadens förmåga att omlagra energi mycket viktig. Byggnadsdelarna skall ha redundans, dvs. de skall vara utformade med ”både hängslan och livrem”. I andra sammanhang upplevs detta ofta som något onödigt lyxigt, men vid dynamisk påverkan kan förmågan till redundans vara helt avgörande för hur en byggnad klarar en explosionslast.

Bebyggelsens motståndsförmåga mot extrem dynamisk belastning är således avhängig av att följande punkter noggrant beaktas:

- Analys av tänkbara hot
- Byggnadens placering i bebyggelsen
- Dynamisk påverkan på byggnaden
- Förmåga att omlagra energi
- Redundans hos byggnadsdelar.

Litteratur

Den ovanstående redovisningen utgör ett koncentrat av studien Bebyggelsens motståndsförmåga mot extrem dynamisk belastning. Studie består av följande delar, vilka finns tillgängliga på Myndigheten för samhällsskydd och beredskaps hemsida:

Del 1: Last av luftstötvåg (publikation MSB449)

Del 2: Explosion i gatukorsning (publikation MSB450)

Del 3: Kapacitet hos byggnader (publikation MSB142).

