

Inventering av kunskapsbehov i byggbranschen med hänsyn till explosioner i en förtätad stadsmiljö

Morgan Johansson, Anders Ansell, Mikael Hallgren, Joosef Leppänen

RAPPORT ACE 2020:16

Inventering av kunskapsbehov i byggbranschen med hänsyn till explosioner i en förtätad stadsmiljö

MORGAN JOHANSSON
ANDERS ANSELL
MIKAEL HALLGREN
JOOSEF LEPPÄNEN

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik
Avdelningen för Konstruktionsteknik
Betongbyggnad
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, 2020

Inventering av kunskapsbehov i byggbranschen med hänsyn till explosioner i en förtätad stadsmiljö

MORGAN JOHANSSON

ANDERS ANSELL

MIKAEL HALLGREN

JOOSEF LEPPÄNEN

© MORGAN JOHANSSON, ANDERS ANSELL, MIKAEL HALLGREN, JOOSEF LEPPÄNEN, 2020

Rapport ACE 2020:16
Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik
Chalmers tekniska högskola, 2020

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik
Avdelningen för Konstruktionsteknik
Betongbyggnad
Chalmers tekniska högskola
412 96 Göteborg
Telefon: 031-772 10 00

Framsida:

Schematisk illustration av hur riskhantering, explosionslast och strukturens respons är sammankopplade för explosioner i en förtätad stadsmiljö.

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik
Chalmers reproservice, Göteborg

Inventering av kunskapsbehov i byggbranschen med hänsyn till explosioner i en förtätad stadsmiljö

MORGAN JOHANSSON
ANDERS ANSELL
MIKAEL HALLGREN
JOOSEF LEPPÄNEN

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik
Avdelningen för Konstruktionsteknik
Betongbyggnad

Sammanfattning

Med syfte att frigöra attraktiv markyta för vidare bebyggelse finns det på många orter idag ett önskemål att genomföra en förtätning av den befintliga stadsmiljön. En sådan förtätning resulterar dock i minskade avstånd mellan byggnader och transportled, vilket medför ökade krav med hänsyn till bland annat explosioner. Hantering av explosioner i en förtätad stadsmiljö kan övergripande sägas bestå av tre delområden – riskhantering, explosionslast samt strukturens respons. I en explosionssituation har alla dessa delområden en avgörande inverkan på den slutliga utformningen av närliggande byggnader och för att erhålla en bra helhetslösning krävs att delområdena hanteras som en sammanhängande enhet. Detta gör att problematiken blir tvärvetenskaplig och därmed också mer komplex. I dagens hantering av explosioner finns det dock betydande brister inom samtliga delområden, något som till stor del beror på att kompetensen om explosioner i byggbranschen är otillräcklig.

Ett övergripande syfte med detta arbete har varit att bidra till en ökad nationell kompetens om explosioner samt explosionsbelastade strukturer. Detta har gjorts genom att inventera och sammanställa aktuella frågeställningar, behov samt specifika tillämpningsområden som för branschen är kopplade till explosioner i en tät stadsmiljö. Målet med arbetet har varit att skapa ett underlag för ett framtida, större samverkansprojekt, vilket närmare kan studera hur identifierade frågeställningar bör hanteras. Arbetet har genomförts via en kombination av litteraturstudier och intervjuer. De senare har utgjort en central del av arbetet och dessa har genomförts med personer av varierande bakgrund i byggbranschen, vilka på olika sätt har en nära anknytning till explosioner i en förtätad stadsmiljö. Som komplement till detta presenteras även författarnas funderingar kring frågor kopplade till explosionslast och strukturens respons.

Av utförd inventering kan konstateras att det råder konsensus bland de intervjuade om att det i branschen finns ett stort behov av ökad kunskap om explosioner. Vilka behov som identifieras varierar dock eftersom de intervjuade har olika roller. Ett samstämt önskemål finns dock i form av att en branschgemensam handbok bör tas fram som kan användas som stöd vid hantering av explosionsbelastning. En viktig uppgift för en sådan handbok blir då att främja samverkan mellan olika kompetenser kring explosion – särskilt den mellan riskanalytiker och konstruktör – samt att den bidrar till en ökad koppling mellan explosionslast och konsekvens mot omgivningen. Handboken behöver vidare behandla samtliga delområden och kan lämpligen ges ut av Trafikverket i en form liknande den som Trafikverkets projekteringshandböcker.

Nyckelord: förtätad stadsmiljö, explosioner, riskhantering, explosionslast, strukturens respons, kunskapsbehov, byggbranschen

Innehållsförteckning

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | INTRODUKTION | 1 |
| 1.1 | Bakgrund | 1 |
| 1.2 | Syfte och mål | 4 |
| 1.3 | Metod | 4 |
| 1.4 | Begränsningar | 5 |
| 2 | INTERVJUER | 7 |
| 2.1 | Orientering | 7 |
| 2.2 | Erik Egardt, MSB | 8 |
| 2.3 | Ulf Lundström, Trafikverket | 10 |
| 2.4 | Henric Modig, Trafikverket | 12 |
| 2.5 | Jesper Niland, Trafikverket | 14 |
| 2.6 | Maria Nilsson, Trafikverket | 15 |
| 2.7 | Patrik Jonsson och Rebecka Thorwaldsdotter, Länsstyrelsen Västra Götalands län | 17 |
| 2.8 | Marie Sjölander, Spets Projektledning | 19 |
| 2.9 | Herman Heijmans, Norconsult | 21 |
| 2.10 | Mathias Lööf, Projektstaben | 23 |
| 2.11 | Thomas Järphag, NCC | 25 |
| 2.12 | Per-Ola Svahn, Skanska | 29 |
| 2.13 | Costin Pacoste, ELU | 31 |
| 2.14 | Mikael Hallgren, Tyréns | 33 |
| 3 | KUNSKAPSBEHOV OM EXPLOSIONSLAST OCH STRUKTUR RESPONS | 35 |
| 3.1 | Orientering | 35 |
| 3.2 | Explosionslast | 36 |
| 3.2.1 | Explosionslast vid gasolycka | 36 |
| 3.2.2 | Läckage av last genom öppning | 36 |
| 3.2.3 | Omgivningens inverkan på resulterande explosionslast | 37 |
| 3.2.4 | Effekt av flerfaldiga reflexioner i slutna utrymmen | 38 |
| 3.3 | Strukturrespons | 39 |
| 3.3.1 | Orientering | 39 |
| 3.3.2 | Inverkan av tryckande normalkraft | 39 |
| 3.3.3 | Explosionslast mot flera konstruktionsdelar samtidigt | 40 |
| 3.3.4 | Tryckande normalkraft på grund av uppsprickning | 42 |
| 3.3.5 | Upplyft av konstruktionsdel med otillräcklig bärförmåga | 42 |
| 3.3.6 | Invändig explosion i tunnel med omgivande jordmassor | 43 |
| 3.3.7 | Strukturrespons med linverkan och membranverkan | 44 |
| 3.3.8 | Materialegenskaper vid tvärkraftskontroll | 45 |
| 3.3.9 | Trycksträvans vinkel vid tvärkraftsarmering | 46 |
| 3.4 | Dynamiska skjuvbrott | 46 |
| 3.4.1 | Orientering | 46 |
| 3.4.2 | Förekomst av skjuvbrott vid dynamisk belastning | 46 |
| 3.4.3 | Spänningsvågor och brottmoder | 49 |

| | | |
|-------------------------|--|----|
| 4 | DISKUSSION | 53 |
| 4.1 | Hantering av explosioner i Sverige idag | 53 |
| 4.1.1 | Riskhantering | 53 |
| 4.1.2 | Riskhantering | 53 |
| 4.1.3 | Explosionslast | 53 |
| 4.1.4 | Strukturrespons | 53 |
| 4.2 | Inventering av kunskapsbehov om explosioner | 54 |
| 4.2.1 | Intervjuer | 54 |
| 4.2.2 | Explosionslast och strukturrespons | 58 |
| 5 | SLUTSATSER | 59 |
| 5.1 | Sammanställning | 59 |
| 5.2 | Förslag på fortsatt arbete | 60 |
| 6 | REFERENSER | 61 |
| BILAGA A RISKHANTERING | | 67 |
| A.1 | Definition av risk | 67 |
| A.2 | Riskhantering | 67 |
| A.2.1 | Orientering | 67 |
| A.2.2 | Riskanalys | 68 |
| A.2.3 | Riskvärdering | 71 |
| A.2.4 | Riskreducerande åtgärder | 73 |
| A.2.5 | Tillförlitlighet hos riskanalys | 74 |
| A.3 | Indata till riskanalys med hänsyn till explosion | 75 |
| A.4 | Statistik för transport av farligt gods | 75 |
| BILAGA B EXPLOSIONSLAST | | 77 |
| B.1 | Definition av explosion | 77 |
| B.2 | Luftstöt våg | 77 |
| B.3 | Reflexion | 79 |
| B.4 | Explosion i slutna utrymmen | 81 |
| B.5 | Spegling | 82 |
| B.6 | Diffraktion | 83 |
| B.7 | Empiriska samband | 84 |
| B.7.1 | Skalat avstånd | 84 |
| B.7.2 | TNT | 86 |
| B.7.3 | Gasexplosion | 88 |
| B.8 | Explosionslast i regelverk | 91 |
| B.8.1 | Orientering | 91 |
| B.8.2 | Trafikverket – Krav Tunnelbyggande | 91 |
| B.8.3 | Eurokod 1, Del 1-7 | 93 |

| | | |
|----------|--|-----|
| BILAGA C | STRUKTURRESPONS | 95 |
| C.1 | Hur skyddar man sig mot en explosionslast? | 95 |
| C.2 | Motståndsförmåga | 95 |
| C.2.1 | Struktur- och materialrespons | 95 |
| C.2.2 | Princip kring energibalans | 97 |
| C.2.3 | Energiupptagningsförmåga | 99 |
| C.2.4 | Hur säkerställa en god deformationsförmåga | 99 |
| C.3 | Beräkningskoncept | 101 |
| C.3.1 | Orientering | 101 |
| C.3.2 | Ekvivalent statisk last | 102 |
| C.3.3 | Linverkan | 104 |

Förord

Detta arbete har utförts som ett gemensamt projekt av deltagare på Chalmers, Konstruktionsteknik, samt KTH, Betongbyggnad, och utgör en förstudie om kunskapsbehovet i byggbranschen med hänsyn till explosioner i en förtätad stadsmiljö. Rapporten utgör Etapp 2 i projektet Impulsbelastade betongkonstruktioner, vilket är ett samarbetsprojekt mellan Chalmers, KTH, Fortifikationsverket och Trafikverket, och har, via BBT, finansierats av Trafikverket.

I detta arbete har bland annat ett antal personer, med varierande funktion i byggbranschen, intervjuats i syfte att inhämta information om vilka kunskapsbehov som finns i branschen kopplat till explosionslast i en förtätad stadsmiljö. Författarna till rapporten är djupt tacksamma till denna medverkan och önskar med detta rikta ett stort tack till följande personer: Erik Egardt (MSB), Ulf Lundström, Henric Modig, Jesper Niland och Maria Nilsson (Trafikverket), Marie Sjölander (Spets Projektledning Marie Sjölander AB), Patrik Jonsson och Rebecka Thorwaldsdotter (Länsstyrelsen Västra Götaland), Thomas Järphag (NCC), Per-Ola Svahn (Skanska) Herman Heijmans (Norconsult), Mathias Lööf (Projektstaben) samt Costin Pacoste (ELU/KTH). Vidare riktas ett särskilt tack till Emma Dahlén, Norconsult, som via sitt examensarbete, starkt bidragit till innehållet i föreliggande rapport.

Arbetet med den här rapporten har utförts under perioden hösten 2018 till hösten 2020 av en projektgrupp bestående av följande personer:

- Morgan Johansson, Adjungerad professor, Chalmers/Norconsult
- Anders Ansell, Professor, KTH
- Mikael Hallgren, Adjungerad professor, KTH/Tyréns
- Joosef Leppänen, Universitetslektor, Chalmers

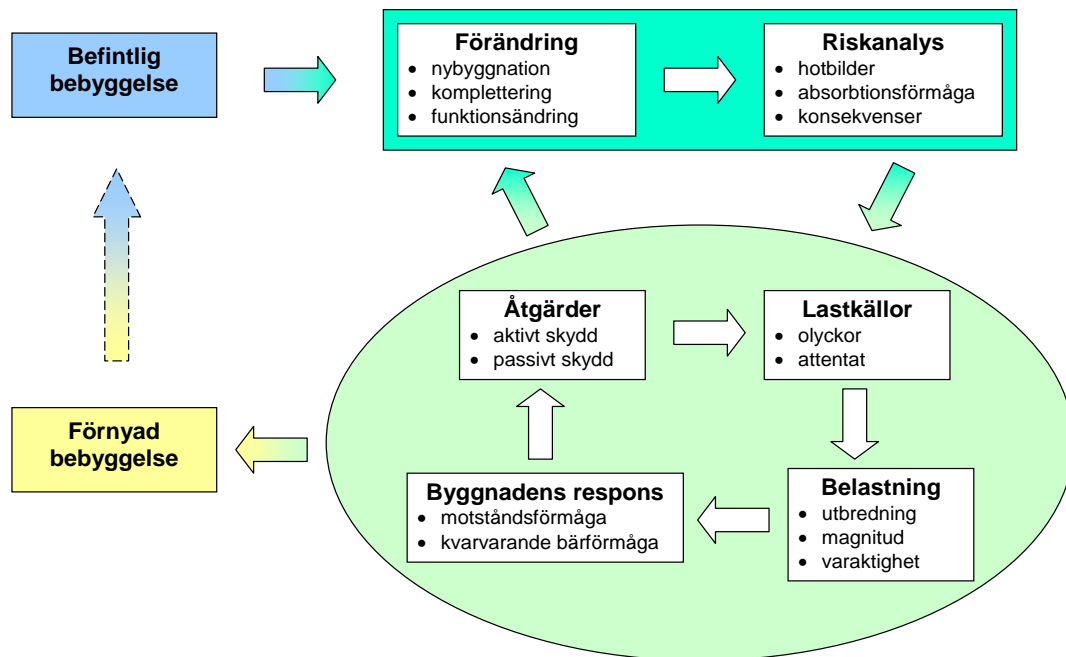
1 Introduktion

1.1 Bakgrund

Det finns i Sverige idag en betydande utmaning i hur stadsutvecklingen på många orter ska genomföras. I våra större tätorter finns önskemål att ett välfungerande transportsystem ska kombineras med en förtätad bebyggelse i befintlig stadsmiljö, se t.ex. Göteborgs stad (2018), Malmö stad (2018) samt Stockholms stad (2017). Ett konkret sätt att skapa möjlighet för en sådan förtätning är att bättre utnyttja mark i utsatta lägen, t.ex. genom att minska det faktiska avståndet mellan enskild byggnad och befintlig transportled för farligt gods (Länsstyrelserna, 2006). Detta kan åstadkommas genom att tillåta ett minskat säkerhetsavstånd mellan byggnad och transportled eller genom att använda så kallade överdäckningar, dvs. att klä in transportleden i en tunnliknande konstruktion, så att markytor frigörs för byggnader och annan aktivitet invid och/eller ovanpå den därmed skapade ytan.

Med syfte att frigöra attraktiv markyta för vidare stadsbebyggelse har i Stockholm en sådan överdäckning nyligen uppförts över Essingeleden i Hagastaden (Stockholms stad, 2018) och flera ytterligare sådana är planerade, bland annat en över banområdet vid Stockholms central (Stockholms stad, 2017). På motsvarande sätt överdäckas Götaleden i centrala Göteborg när den ursprungliga sträckningen av Götatunneln förlängs genom att däcka över befintlig trågkonstruktion och uppföra nya byggnader i anslutning till denna (Göteborgs stad, 2017). Liknande projekt och planer finns även i flera svenska tätorter, t.ex. Allingsås (Allingsås kommun, 2017). På många orter finns även långt framskridna planer att uppföra nya byggnader intill befintlig trafikled med väsentligt minskade avstånd jämfört med tidigare praxis. En dylik förtätning är dock inte problemfri eftersom ett minskat avstånd mellan trafikled och byggnad också kan medföra en ökad risk. Om det på den aktuella transportleden är tillåtet med transport av farligt gods finns exempelvis risk att omkringliggande byggnader bland annat kan komma att utsättas för en explosion i händelse av en olycka. Det bästa skyddet mot en sådan olycka är att säkerställa ett tillräckligt stort avstånd mellan byggnad och explosionskälla. Detta kriterium hamnar dock i direkt konflikt med önskemålet att förtäta stadsmiljön, varför en alternativ lösning behövs.

Det finns flera komplexa frågor kring explosionsbelastning i tät stadsmiljö som är aktuella att hantera för en olycka på en transportled med farligt gods. Exempel på sådana frågor är hur lastkällan ska definieras, hur den resulterande explosionslasten sedan ska bestämmas samt vilka krav som ska ställas på omgivande bebyggelse för sådana laster. Detta är frågor som bör behandlas i en integrerad process eftersom en given del kan få stor inverkan på hur övriga delar behandlas, se Figur 1.1. I Sverige finns det idag dock inga enhetliga riktlinjer för hur dessa frågor ska besvaras. Istället blir det upp till varje enskilt projekt att hantera dessa frågor. Detta kan också få till följd att hanteringen av likartade situationer kan variera betänkligt – även för fall där de aktuella byggnaderna uppförs med några 100 m mellanrum utefter samma transportled, se Alvarsson och Jansson (2016) samt Dahlén (2019). Effekten av de beslut som tas kan också bli omfattande. För exempelvis överdäckningar av en transportled för farligt gods kan de explosionslasten som behöver beaktas vid dimensionering bli många gånger större än vad som är fallet för tunnelkonstruktioner genom vilka sådana transporter inte görs (Johansson, 2019). Sådana situationer kan också medföra mycket höga krav på den omgivande konstruktionen, vilket i sin tur kan resultera i omfattande kostnadsökningar (Löf, 2019).



Figur 1.1 Process för bebyggelsens förändring. Från Johansson och Laine (2012c).

Vid uppförandet av en byggnad nära en transportled för farligt gods genomförs en riskhantering för att bedöma den potentiella konsekvensen av identifierade olycksfallsscenarioer (Länsstyrelserna, 2006). Denna process kan delas in i tre steg – riskanalys, riskvärdering och riskreduktion (Nilsson, 2003). I riskanalysen identifieras potentiella olycksscenarioer varvid risken, dvs. produkten av sannolikhet och konsekvens, av respektive scenario beräknas. Av detta görs en riskvärdering gentemot de risknivåer som i samhället anses vara acceptabla. Om de bedömda riskerna inte är tillräckligt små genomförs även riskreducerande åtgärder för att minska risken ytterligare. Denna process är komplex och oftast iterativ samt kräver varierande typer av indata i de olika stegen. En viktig indata är att bestämma vilken potentiell lastkälla som utgör grunden för ett givet olycksscenario, t.ex. typen och storleken av utsläppt gas som leder fram till en explosion. Utgående från en känd lastkälla kan den resulterande explosionens lastmagnitud mot omgivningen bestämmas. Denna utgör i sin tur grunden för den strukturella utformning av närliggande byggnader som genomförs för att leva upp till de krav som tagits fram i riskhanteringen.

I Sverige finns det idag på många håll en god kompetens att utföra riskanalyser inom skilda områden. Kunskapen bland dagens riskanalytiker om hur stor en explosionslast blir, eller vad en sådan innebär för byggnader i sin omgivning, bedöms dock vara förhållandevis begränsad. Den samlade kompetensen på nationell nivå om explosionslast och explosionsbelastade strukturer är idag också förhållandevis svag (Johansson, 2019) – för de flesta av landets konstruktörer inom byggbranschen är detta ett ämnesområde som de sällan eller aldrig kommer i kontakt med. En starkt bidragande anledning till detta är förmodligen att vi i Sverige under en lång tid inte har ansett oss ha anledning att prioritera denna typ av frågeställningar. Det Kalla krigets slut i början av 1990-talet följdes av en kontinuerlig åtstramning av Sveriges försvarsmakt, och med detta även en motsvarande minskning i nyinvesteringar i olika typer av fortifikatoriska anläggningar. De individer som dessförinnan varit sysselsatta med denna typ

av frågor hittade till stor del alternativa sysselsättningar och återrekryteringen in i ämnesområdet blev av naturliga skäl också starkt begränsad. Som exempel på sådana åtstramningar kan exempelvis nämnas:

- Mängden nya skyddsrum i Sverige begränsades till omkring 10 st/år under en tidsperiod om 15-20 år (Gråbergs, 2019).
- Nedmontering av försvaret, inga nya fortifikatoriska anläggningar, fortifikatorisk utbildning inom försvarsmakten lagd på is under flera år.

Idag, cirka 30 år efter Berlinmurens fall, när intresset för denna typ av frågeställningar åter har vaknat till liv, har övervägande delen av de individer som dagligdags var aktiva med dylika frågor dock hunnit gå i pension. Som grupp kan dagens konstruktörskår i byggbranschen därför påstås vara tämligen oförberedd att hantera frågor om explosioner samt strukturrepons orsakade av sådana laster.

Det finns, ur ett kunskapsperspektiv, dock några ljuspunkter på området. Efter terrorattentaten i New York den 11 september 2001 blev det åter ett ökat intresse för denna typ av frågeställningar och exempelvis landets kärnkraftverk gjorde omfattande insatser för att öka det fysiska skyddet på sina anläggningar, något som bidragit till en allmän förhöjning av befintlig kunskapsnivå.

Under åren 2000-2005 genomfördes vidare, på uppdrag av Försvarsmakten, en försöksserie på KTH med syfte att klargöra betongkonstruktioners rotationskapacitet vid varierande armeringstyp under statiska och dynamiska förhållanden. Syftet var bland annat att undersöka hur nyare typer av armeringsstål som infördes i samband med nytt regelverk för betong, BBK 94 (Boverket, 1994), påverkade konstruktionernas egenskaper och hur variationer i materialegenskaperna överensstämmer med de rekommendationer och konstruktionsanvisningar som då varit i bruk i Sverige sedan 1970-talet. Undersökningen genomfördes av Carl Bro Teknikkonsult i samarbete med KTH Betongbyggnad, som svarade för de sju omgångar laborieförsök som genomfördes, se bland annat rapporterna av Ansell och Svedbjörk (2000, 2002, 2003a, 2003b, 2005).

Från och med år 2001 bedrevs också forskning vid KTH Betongbyggnad med fokus på betongelement i skyddskonstruktioner påverkade av luftstötsvågor. Laborieprovade armerade betongbalkar studerades, särskilt med avseende på risken för skjubbrott. Arbetet, som resulterade i en licentiatuppsats och en doktorsavhandling (Magnusson, 2007, 2019), finansierades av Fortifikationsverket, RISE, Grontmij, Tyréns, KTH, Totalförsvarets forskningsinstitut samt Fortifikationskåren.

Sedan 2007 har Fortifikationsverket, på Regeringens uppdrag (SFS, 2007), ansvaret för att vidmakthålla samt utveckla kompetensen rörande skydds- och anläggningsteknik i Sverige. Detta har bland annat resulterat i framtagandet av uppdaterade konstruktionsregler samt en handbok för skydd av byggnader, se Fortifikationsverket (2011, 2016). Sedan några år tillbaka har även Försvarshögskolan i Stockholm återupptagit sin utbildning av officerare inom fortifikationsområdet.

MSB har, via sin skyddsrumsverksamhet och de arbeten som har utförts inom detta ämnesområde, starkt bidragit till att upprätthålla en, för Sverige, acceptabel grundkompetens. Via MSB har det i omkring 25 år utförts forskningsarbeten på Chalmers, Konstruktionsteknik, vilket bland annat har resulterat i fyra avhandlingar (Johansson, 2000; Leppänen, 2004; Nyström, 2013; Ekström, 2017) samt knappt 20 examensarbeten med fokus på explosions- och/eller stötlast. Vidare har MSB låtit ta fram en omfattande dokumentation om impulsbelastade konstruktioner, både för bakom-

liggande teori och tillämpande exempel avsedda att användas av den verksamme konstruktören att utgå ifrån för att bättre sätta sig in i den aktuella problematiken (Johansson och Leppänen, 2014). Sedan omkring 2017 har också nybyggnationen av skyddsrum i Sverige skyddsrum ökat drastiskt igen – under 2020 finns det omkring 50-100 skyddsrum som antingen planeras, projekteras eller byggs i landet (Gråbergs, 2019).

1.2 Syfte och mål

Ett övergripande syfte med denna rapport har varit att bidra till en ökad nationell kompetens om explosioner samt explosionsbelastade strukturer, för att därigenom säkerställa att det finns tillräcklig kompetens inom ämnesområdet för civila tillämpningar. Detta har gjorts genom att inventera och sammanställa aktuella frågeställningar, behov samt specifika tillämpningsområden som för branschen är kopplade till explosioner i en tät stadsmiljö. Ett visst fokus har riktats mot infrastrukturprojekt i form av tunnlar men även andra aspekter kopplade till explosion behandlas.

Målet med rapporten har varit att skapa ett ramverk för ett framtida, större samverkansprojekt, vilket vidare studerar hur identifierade frågeställningar bör hanteras. Avsikten är således att de behov som identifieras i förstudien ska ligga till grund för fortsatt forskningsarbete inom ämnesområdet.

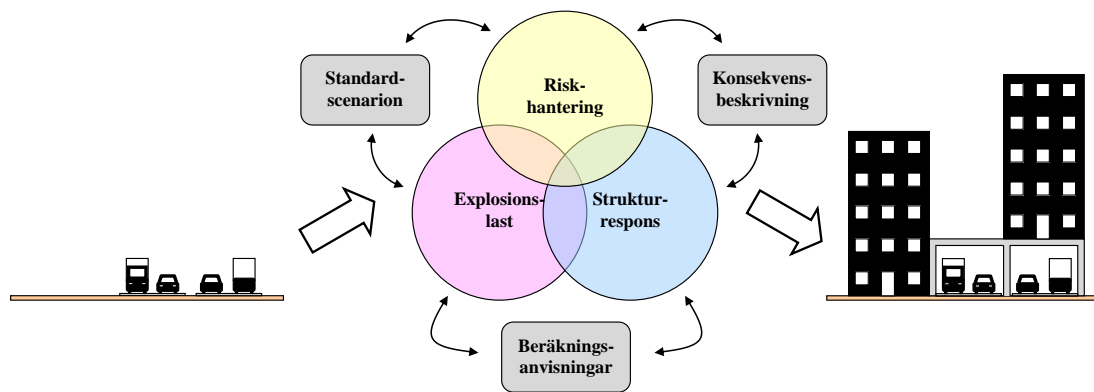
1.3 Metod

Arbetet med denna rapport har genomförts via en kombination av litteraturstudier och intervjuer. Utförda intervjuer har utgjort en central del av förstudien och dessa har genomförts med personer i byggbranschen som på olika sätt har en nära anknytning till explosioner i en förtätad stadsmiljö, se kapitel 2. För att ge en så heltäckande bild som möjligt har individer med olika funktioner intervjuats. Utgående från detta har sedan en sammanställning gjorts av identifierade kunskapsbehov. Som komplement till detta presenteras i kapitel 3 även författarnas funderingar kring frågor kopplade till explosionslast samt strukturrepons hos byggnader som utsätts för sådana laster.

Baserat på beskrivningen i avsnitt 1.1 kan hantering av explosioner i en förtätad stadsmiljö övergripande sägas bestå av tre delområden, se Figur 1.2:

- Riskhantering
- Explosionslast
- Strukturrespons

Utgående från en riskhantering beslutas vilka potentiella olycksscenarier som finns samt hur dessa ska beaktas. Baserat på detta är det möjligt att definiera en lastkälla som sedan kan utgå från för att bestämma den last som bedöms kunna verka mot omgivningen. För en definierad last kan sedan omgivande strukturer utformas så att de kan leva upp till de krav som ställs i riskanalysen. Varje delområde har sina respektive svårigheter och utmaningar men gemensamt för alla tre är att de, i en explosionssituation, samtliga har en avgörande inverkan på den slutliga utformningen av närliggande byggnader. Om besluten i ett av dessa delområden vilar på en felaktig grund finns det risk att den valda lösningen påverkas negativt, t.ex. i form av otillräcklig säkerhet för omgivningen eller att valda lösningar blir onödigt omfattande och kostsamma.



Figur 1.2 Schematisk illustration av hur riskhantering, explosionslast och strukturrespons är sammankopplade för explosioner i en tätad stadsmiljö.

För att erhålla en bra helhetslösning gentemot explosioner i en tätad stadsmiljö krävs det att alla delområden samordnas och hanteras tillsammans som en sammanhängande enhet. Detta gör att problematiken blir tvärvetenskaplig och därför har denna rapport också försetts med bilagor, vars innehåll övergripande beskriver respektive ämnesområde, se Bilaga A till Bilaga C. Syftet med detta upplägg har varit att förse läsaren med en grundläggande information inom respektive ämnesområde, sådan att de synpunkter som framkommer i presenterade intervjuer (kapitel 2) samt identifierade kunskapsbehov om explosionslast och strukturrespons (kapitel 3) ska bli lättare att ta till sig.

1.4 Begränsningar

Kunskapsinventeringen har begränsats till ett antal intervjuer av personer som bedömts varit lämpliga att representera olika delar inom byggbranschen. Detta urval utgör visserligen enbart ett axplock av de personer som hade kunnat ingå i en mer gedigen genomgång men det aktuella underlaget bedöms ändå vara tillräckligt för att ge en god indikation på vilka behov som finns inom byggbranschen idag med hänsyn till explosioner i en tätad stadsmiljö

Så som illustreras i Figur 1.2 så kräver explosioner i en tätad stadsmiljö en tvärvetenskaplig hantering, dvs. riskhantering, explosionslast samt strukturrespons. I denna rapport finns ingen ambition att i detalj söka täcka in samtliga dessa områden, läsaren hänvisas därför till Bilaga A till C för en översikt samt till de därifrån angivna referenserna för mer detaljerad information.

Denna förstudie utgår från situationer som uppstår i samband med olyckor och explosionslast som har sitt ursprung från antagonistiska handlingar, kopplat till t.ex. kriminalitet eller terrorism, berörs därför inte i denna rapport.

2 Intervjuer

2.1 Orientering

En central del av denna förstudie, för inventering av kunskapsbehov, har varit att genomföra intervjuer av personer i byggbranschen med nära anknytning till explosioner i en förtätad stadsmiljö. För att ge en så heltäckande bild som möjligt har representanter med olika funktioner intervjuats:

- **Myndigheter:** MSB, Trafikverket
- **Kommun och Länsstyrelse:** Länsstyrelsen i Västra Götalands län
- **Byggherrar:** Spets Projektledning (projektledningsstöd)¹
- **Entreprenörer:** NCC, Skanska
- **Konsulter:** Riskanalytiker, Konstruktörer (flera olika företag)

Intervjuade personer listas i Tabell 2.1. Här anges även övergripande information om organisation samt funktion enligt ovan listade kategorier. En mer detaljerad beskrivning av respektive intervjuperson ges också i samband med respektive intervju i avsnitt 2.2 till 2.14.

Tabell 2.1 Sammanställning av personer som har intervjuats inom detta projekt.

| Namn ¹⁾ | Organisation | Funktion |
|-----------------------------|---------------------------|----------------|
| Erik Egardt (*) | MSB | Myndighet |
| Ulf Lundström (*) | Trafikverket | Myndighet |
| Henric Modig (*) | Trafikverket | Myndighet |
| Jesper Niland | Trafikverket | Myndighet |
| Maria Nilsson (*) | Trafikverket | Myndighet |
| Patrik Jonsson (*) | Länsstyrelsen V. Götaland | Länsstyrelsen |
| Rebecka Thorwaldsdotter (*) | Länsstyrelsen V. Götaland | Länsstyrelsen |
| Marie Sjölander (*) | Spets Projektledning | Byggherre |
| Thomas Järphag | NCC | Entreprenör |
| Per-Ola Svahn | Skanska | Entreprenör |
| Herman Heijmans (*) | Norconsult | Riskanalytiker |
| Mathias Lööf (*) | Projektstaben | Riskanalytiker |
| Costin Pacoste | ELU / KTH | Konstruktör |
| Mikael Hallgren | Tyréns / KTH | Konstruktör |

¹⁾ En markering (*) bakom namnet indikerar att personen är intervjuad av Emma Dahln, med deltagande av Morgan Johansson, och finns dokumenterade i Dahln (2019). Här återges en något förkortad version av dessa intervjuer, se Dahln (2019) för mer detaljerad information.

¹ Byggherrar kan även utgöras av t.ex. Trafikverket (Myndighet) eller NCC och Skanska (Entreprenörer). Här har dock valts att låta Byggherrarna representeras av en person som fungerat som projektledningsstöd åt olika byggherrar i flera husbyggnadsprojekt.

2.2 Erik Egardt, MSB

Om den intervjuade

Erik Egardt arbetar som brandingenjör på MSB i Karlstad och fungerar där som expert för hantering av bland annat brand- och explosiva varor. Egardt har även en stor erfarenhet av hur räddningstjänstens arbete fungerar kring denna typ av frågor.

Hur hanterar du explosioner i ditt arbete?

MSB som myndighet arbetar med explosioner på många olika sätt:

- Är den myndighet i Sverige som ansvarar för regler avseende transport av farligt gods.
- Har ansvar för regler om hur brandfarliga och explosiva varor ska hanteras.
- Har ett nära samarbete med räddningstjänsten.
- Förvaltar landets skyddsrumbestånd och utför forskning om explosioner kopplat till detta.

Finns det ett behov av ökad kunskap om explosioner?

Egardt anser att det finns flera anledningar till ett ökat behov av kunskap om explosioner. Det finns många olika sekvenser i ett händelsetråd som kan leda fram till en potentiell explosion och det finns därför också behov av att bättre kunna bedöma sannolikheten för dessa. Egardt anser att det finns en tillräckligt god kunskap om den stötvåg som uppstår vid en explosion men att kunskapen om primära och sekundära splitterutkast från en sådan händelse är otillräcklig. Egardt resonerar att i det öppna så kommer skadeverkan från utslungade splitter vara större än den som fås av stötvågen. Detta är särskilt aktuellt för räddningstjänstens personal när denna gör insatser i olika typ av händelser som kan leda fram till en explosion.

Hur hanteras risken för explosioner?

Enligt Egardt finns det flera exempel där hanteringen av explosionsrisk i gasfordon – både bussar och sopbilar – har varit otillräcklig. I de aktuella fallen följs de internationella bestämmelser som finns för denna typ av fordon men genom en annorlunda utformning skulle denna typ av olyckor kunnat undvikas helt. Ett problem här, enligt Egardt, är dock att fordonstillverkarna avsiktligt blundar för denna typ av frågeställning.

Vad behöver förbättras vid hanteringen av explosioner i ditt arbete?

Egardt efterlyser en ökad explosionssäkerhet i tunnlar. Många tunnlar som byggs idag har två tunnelrör med en avskiljande vägg med dörrar. Denna vägg och dörrar är dock vanligen inte dimensionerade för att motstå en kraftig explosionslast. Om en explosion inträffar i ett tunnelrör kommer därför även det andra tunnelröret att påverkas och det kommer inte vara säkert att använda som en nödutgång eftersom det kommer vara fyllt med inläckande gaser från bränder som uppstått i det första tunnelröret.

Egardt anser att gasdrivna fordon borde utformas på ett sådant sätt att säkerheten mot potentiella gasexplosioner ökar. Ett sätt att göra detta skulle kunna vara att kommunerna ställer ökade krav på de fordon som köps in. Detta skulle vara ett betydligt billigare alternativ än att behöva ta höjd för potentiella explosionsolyckor genom att utforma byggnader nära trafikleder så att de kan hantera en uppkommen explosionslast. Det finns även behov att förbättra nuvarande metoder för att uppskatta sannolikheten att sådana gasexplosioner inträffar. Att exempelvis förbjuda användandet av gasbussar i tunnlar där explosionssäkerheten är låg vore, enligt Egardt, en lämplig åtgärd.

Egardt efterlyser en ökad kunskap om vad som kan utlösa en explosion från den typ av gasfordon som vanligen används idag samt hur en sådan explosion kan utvecklas. Särskilt information om splitterutkast från denna typ av händelse skulle vara önskvärt att veta mer om. Denna typ av information skulle vara mycket användbar för räddningstjänsten eftersom det skulle ge stöttning om beslut om hur ett närmande till ett förolyckat fordon säkrast skulle kunna göras utan att utsättas för splitterutkast eller en jetflamma.

Finns det behov av förbättrade underlag för riskanalyser?

Egardt anser generellt att det finns bra metoder för att genomföra riskanalyser, exempelvis TNO (2005), ett nederländskt regelverk som behandlar bland annat effekten av explosioner. Egardt medger dock att det, genom att utgå från detta koncept, även finns en risk att de slutliga lösningarna blir dyra. I Nederländerna, med sin begränsade yta, finns det, resonerar Egardt, förmodligen ett ökat incitament att använda sådana metoder medan vi i Sverige till större del borde kunna utnyttja våra större ytor och därmed placera farliga objekt på längre avstånd från bebyggelsen.

I dagens riskanalyser utgås från antal omkomna i en olycka. Egardt efterlyser dock ett vidare perspektiv i dessa, t.ex. vilka konsekvenser som det får på samhället om det inträffar en explosion i en viktig tunnel som gör att denna tvingas tas ur bruk under flera månader.

Egardt anser att utvärderingen av vilka effekter som riskreducerande åtgärder har är värt att förbättra. En viss åtgärd kan medföra en positiv effekt för en given situation eller händelse men kan samtidigt även medföra en förhöjd risk för en annan situation – exempelvis skulle en mur vid en byggnad kunna medföra minskade laster mot byggnaden men samtidigt även medföra ökade laster mot objekt som befinner sig på trafikleden, något som skulle kunna resultera i minskade möjligheter att evakuera personer därifrån. Antalet personer som skulle kunna bidra med sådana typer av kunskaper är dock en bristvara. Det skulle därför vara önskvärt om en handbok, som beskriver dylika typsituationer, kunde tas fram och som riskanalytiker sedan kunde använda som stöd vid värdering av explosionsrisk. En sådan handbok skulle också kunna bidra till att överbrygga den kunskapslucka som uppstår mellan riskanalytiker och konstruktörerna som dimensionerar de utsatta byggnaderna.

Egardt anser även att det är vanligt att riskanalytiker vanligen enbart fokuserar på effekten av luftstötavgång medan det för människor i det öppna är en större fara att utsättas för effekten av utkastat splitter.

Tillgång till förbättrad statistik över transport av farligt gods skulle, enligt Egardt, öka kvaliteten på dagens riskanalyser. Detta är också något som har diskuterats inom MSB. Problemet ligger dock inte i hur denna typ av information ska samlas in utan att

berörda företag, av säkerhetsskäl, ogärna delar med sig av sådan data på grund av risk för antagonistiska handlingar. När den tidigare utförda undersökningen genomfördes 2006 uppfattades inte detta som ett problem.

Finns det behov av bättre kommunikation mellan företag och myndigheter avseende explosioner?

Egardt anser att MSB redan idag har ett väl fungerande samarbete med olika berörda myndigheter.

2.3 Ulf Lundström, Trafikverket

Om den intervjuade

Ulf Lundström arbetar med tunnelsäkerhet på nationell nivå på Trafikverket. Han har även en bakgrund från Länsstyrelsen i Stockholm och var där bland annat inblandad i tunnelfrågor på Södra Länken.

Hur hanterar du explosioner i ditt arbete?

I egenskap av expert på tunnelsäkerhet är det vanligt att Lundström kopplas in på tunnel- och överdäckningsprojekt i hela Sverige.

Finns det ett behov av ökad kunskap om explosioner?

Enligt Lundström finns det ett behov av ökad kunskap om explosioner. I dagsläget finns många oklarheter kring explosioner, vilket medför att det är vanligt att omfattande gissningar görs i bakomliggande riskanalyser. Upprepade gissningar riskerar på sikt leda till att de uppfattas som sanningar. Dylig kunskapsbrist gör att det är en stor risk att berörda strukturer dimensioneras för laster som är onödigt stora. Lundström anser att alltför många händelser som aldrig eller nästan aldrig inträffar tas i beaktande även om så inte nödvändigtvis borde vara fallet. Detta kan resultera i stora fördyrningar av berörda projekt, vilket i sin tur kan medföra att de aldrig genomförs (t.ex. överdäckning av väg E20 i Allingsås). Lundström medger att det är svårt att bedöma vilken säkerhetsnivå som ska beaktas men poängterar samtidigt att bristen på kunskap om explosionsfrågor begränsar samhällsplaneringen.

Hur hanteras risken för explosioner?

Lundström förklarar att explosionsrisker beaktas för de tunnlar och överdäckningar som byggs i Sverige idag samt att fokus på explosionsrisken är extra hög i de fall när något byggs ovanpå tunneln (bergtäckning < 20 m) eller överdäckningen. I Trafikverkets regelverk finns riktlinjer för hur inverkan av små explosioner ska beaktas. För fall med transport av farligt gods saknas dock motsvarande anvisningar. För sådana situationer är det också vanligt att beakta mycket kraftfulla explosioner och det förekommer då att explosionskällan inne i tunneln är större än vad som beaktas utanför. Enligt Lundström finns det idag en tendens att kravbilden ökas så snart begreppet tunnel kommer på tal, något som han finner vara frustrerande – närvaron av en tunnel skulle, resonerar han, istället kunna medföra en minskad risk för omgivningen.

Lundström förklarar att det sedan 2000 har blivit ett ökat fokus på tunnelsäkerhet och enligt honom är det Räddningstjänsten, Länsstyrelsen samt inblandade riskkonsulter som varit drivande för utvecklingen inom detta område. Enligt Lundström har projekt Hagastaden i Stockholm utvecklats till en måttstock av hur explosioner ska hanteras i tunnelprojekt i Sverige. Detta är enligt Lundström olyckligt – han anser att man här har tagit höjd för alltför stora explosionslaster. Innan Hagastaden låg det ett större fokus på sannolikheten att ett givet scenario skulle inträffa men idag beaktas händelser som i verkligheten aldrig ens har inträffat. Lundström anser att det är underligt att så stora explosionslaster beaktas i Sverige när motsvarande krav inte ställs någon annanstans i världen. Han efterlyser därför en nationellt accepterad metod som alla inblandade parter kan komma överens om. När alltför stora explosionslaster beaktas ökar också kostnaden för tunneln betänkligt, bland annat på grund av behovet att införa olika riskreducerande åtgärder.

Vad behöver förbättras vid hanteringen av explosioner i ditt arbete?

Lundström anser att det är angeläget att minska antalet gissningar som man idag tvingas göra i en riskanalys samt att få en bättre uppfattning om vilken inverkan som olika typer av riskreducerande åtgärder har.

Andra saker av värde är att öka kunskapen om hur en byggnad ovanpå en överdäckning kan utformas för att bättre motstå effekterna av en explosion inne i överdäckningen. Lundström lyfter även fram behovet av att veta mer om riskreducerande effekter, t.ex. inverkan av sprinklersystemets inverkan på brandinducerade explosioner, eller vilken typ av händelse som krävs för att initiera en explosion i en lastbil med farligt gods.

Finns det behov av förbättrade underlag för riskanalyser?

Enligt Lundström kan riskanalysen ha en avgörande inverkan på ett tunnelprojekt, både vad gäller slutlig kostnad men även om projektet överhuvudtaget genomförs. Lundström efterlyser en bredare diskussion av värdet för samhället att minska risken för människor i den direkta omgivningen av en tunnel/överdäckning. Dessa pengar skulle istället kunna användas mer optimalt på andra åtgärder i samhället, t.ex. införandet av andra, mer allmänna, trafiksäkerhetshöjande åtgärder.

Lundström lyfter fram ett beräkningsexempel från en opublicerad Trafikverks-PM där han argumenterar för att det är högre sannolikhet att en byggnad i Stockholmsområdet träffas av ett störtande flygplan är vad det är att en tunnel utsätts för en explosion av ett massexplodivt ämne på 500 kg eller mer. Vanliga husbyggnader skulle dock aldrig dimensioneras för lasten från ett störtande flygplan medan det finns tunnlar/överdäckningar som dimensioneras för att motstå en sådan explosion. Kopplat till detta resonemang anser Lundström därför att det idag finns ett för stort fokus på konsekvensen samt att undvika potentiella katastrofer. Istället, menar han, borde större vikt läggas på sannolikheten att en händelse inträffar. Lundström ifrågasätter även om riskanalytiker har tillräcklig kunskap om vilken effekt olika typer av riskreducerande åtgärder har. Enligt hans erfarenhet är det vanligt att samma typ av riskreducerande åtgärder föreslås utan att inverkan av dessa är fullt förstådda.

Lundström håller med om att ett förbättrat statistiskt underlag skulle öka riskanalysernas korrekthet. Han påpekar dock att det för massexplosiva ämnen även finns en potentiell fara i en sådan statistik eftersom den ökar risken för antagonistiska hot. Det skulle dock vara av intresse att förbättra det statistiska underlaget för andra typer av explosiva ämnen.

Finns det behov av bättre kommunikation mellan företag och myndigheter avseende explosioner?

Enligt Lundström är det sällan som representanter från företag som producerar, transporterar samt handhar massexplosiva ämnen deltar i diskussionen om explosionsrisk i tunnlar. Deras inspel skulle dock vara värdefullt och Lundström önskar ett ökat samarbete med dessa aktörer.

Det finns även ett behov av en förbättrad kommunikation med de riskanalytiker som utfört de ursprungliga riskanalyserna. Det kan ofta gå lång tid från det att de inledande riskanalyserna genomfördes och att tunneln dimensioneras, något som kan medföra att beslut som tagits i ett tidigt skede kan vara svåra att genomföra. Det skulle även vara önskvärt att involvera konstruktörer i ett tidigare skede – idag är det sällan som denna yrkeskategori deltar i ett tidigt skede och det finns därför också ett betydande glapp mellan riskanalytiker och konstruktör.

2.4 Henric Modig, Trafikverket

Om den intervjuade

Henric Modig arbetar som brand- och riskingenjör på Trafikverket i Stockholm och är mycket involverad i stora tunnelprojekt, med fokus på installationer och tunnelsäkerhet.

Hur hanterar du explosioner i ditt arbete?

Frågor som Modig varit mycket involverad i är hur inverkan av en explosion ska utvärderas för fall där byggnader placeras ovanför tunneln samt för fall med korsande tunnlar. Det enklaste sättet skulle vara att säkerställa att det finns ett tillräckligt stort säkerhetsavstånd mellan tunnel och närliggande byggnader/tunnel – i en stadsmiljö är detta dock inte alltid möjligt.

Finns det ett behov av ökad kunskap om explosioner?

Enligt Modig finns det behov att öka kunskapen om explosioner inom samtliga berörda områden – det finns idag för få personer i Sverige som har sådana kunskaper. Modig efterfrågar bland annat ökad kunskap om hur sannolikheten till att en explosion utvecklas vid en olycka, exempelvis en brand eller en krock. Vilken inverkan som riskreducerande åtgärder, t.ex. användning av ett effektivare släckningssystem i en tunnel, har på explosionsrisken är något som vore värdefullt att ha mer information om. Modig önskar även en diskussion om vilka krav som är rimliga att ställa på avskiljande väggar i en tunnel – om en kraftig explosion inträffar i en tunnel, hur många av dessa kan förväntas överleva så att de är i behov av en utrymning?

Hur hanteras risken för explosioner?

Modig önskar en mer konsekvent hantering av explosioner. Han anser inte att explosionsrisken underskattas eller att den hanteras i otillräcklig grad – dock tror han att dagens hantering av explosioner kan medföra onödigt dyra lösningar som eventuellt inte behövs. Modigs uppfattning är även att fokus på explosioner under senare år har ökat i väg- och tunnelprojekt – tidigare utgicks främst från gasutsläpp och brand till att idag även inkludera explosionsrisk från sprängämnen.

Vad behöver förbättras vid hanteringen av explosioner i ditt arbete?

Modig efterlyser ett mer standardiserat synsätt på hur explosioner ska hanteras. Behovet av att göra riskanalyser skulle fortfarande finnas kvar när säkerhetsavståndet mellan transportled/tunnel och byggnad är alltför litet men för dessa fall skulle då riskanalytikern även kunna få ett användbart stöd via ett standardiserat synsätt. I vissa situationer skulle det vara användbart att utgå från en standardiserad explosionslast, exempelvis vid dimensionering av tunnlar.

Istället för att lägga resurser på ökade armeringsmängder eller tjockare betongväggar tror Modig att det vore bättre att fokusera på att öka kunskapen om vad som verkligen kan hända i olika olycksscenario. Här skulle avancerade finita elementberäkningar förmodligen kunna komma till sin rätt eftersom komplexa scenarion kan vara svåra att återskapa i ett försök.

Finns det behov av förbättrade underlag för riskanalyser?

Modig anser att inverkan av stora explosioner i tunnlar hanteras på ett lite underligt sätt – i sådana riskanalyser finns det en tendens att för stort fokus läggs på konsekvensen samtidigt som sannolikheten att händelsen inträffar delvis bortses från. Detta kan medföra att tunnlar dimensioneras för explosionslaster som är direkt olämpliga att ha som dimensioneringskriterium. Modig lyfter fram att Trafikverkets inställning är att undvika katastrofer samt åtgärder för att minska risken att sådana inträffar.

Det finns ett behov av ett förbättrat statistiskt underlag för transport av farligt gods – kombination av antal samt storleksmängd – som passerar längs en given sträcka. Andra typer av statistiskt underlag som Modig anser skulle vara användbart är vad som krävs för att en explosion ska uppstå vid exempelvis en brand eller en bilkrasch, eller vilka effekter som olika typer av riskreducerande åtgärder – t.ex. ett sprinklersystem – har på explosionsrisken. Förbättrade data för denna typ av scenarion skulle, enligt Modig, också medföra märkbart bättre riskanalyser.

För riskreducerande åtgärder är det Modigs uppfattning att det förekommer mycket gissningar/grova uppskattningar om hur effektiva dessa är. Det kan också vara svårt att ge bra åtgärdsförslag i ett tidigt skede eftersom det då kan vara många saker i projektet som det ännu inte tagits något beslut om. Det är inte heller ovanligt att föreslagna åtgärder kan vara svåra att genomdriva i projekt som pågår under lång tid. Om exempelvis en skyddande vägg har föreslagits i ett tidigt skede så kan det vara svårt att veta vad väggen ska klara av att motstå när det väl är dags att dimensionera den. För sådana fall är det enklare att ha en god kommunikation och kunskapsöverföring inom projekten om projekten är stora – i mindre projekt kan detta dock vara svårt att upprätthålla på grund av resursbrist.

Finns det behov av bättre kommunikation mellan företag och myndigheter avseende explosioner?

Modig efterlyser en ökad samverkan i branschen, både med andra myndigheter men också med verksamma inom berörda expertområden kopplade till hantering av explosioner. Modig upplever det som att många myndigheter och företag saknar de resurser som krävs för hantering av explosioner – något som kan tyda på att det saknas tillräckligt med personer som innehar rätt kompetens inom ämnesområdet. Det finns därför ett behov att sprida kunskap om explosioner till fler personer i branschen men även att bättre sprida vetskapen om de experter som finns.

2.5 Jesper Niland, Trafikverket

Om den intervjuade

Jesper Niland arbetar på Trafikverket och är teknisk chef i projekt Förbifart Stockholm.

Hur hanterar du explosioner i ditt arbete?

I projekt Förbifart Stockholm används endast de explosionslaster som anges i Trafikverkets regelverk. Många tunnelprojekt utgörs av Cut-and-Cover-konstruktioner och en minimiansats avseende explosioner görs då enligt Trafikverkets gällande regelverk. Varje projekt gör dock en egen bedömning om det är tillräckligt. Vid vissa typer av konstruktioner, t.ex. bergtunnlar med extremt låg bergtäckning, görs konsekvensbedömningar tidigt.

Finns det ett behov av ökad kunskap om explosioner?

Generellt finns det ett rätt stort behov att öka kunskapen. Det finns experter för den praktiska tillämpningen, men det saknas koppling till mer avancerade, teoretiska ansatser för tillämpning i mer komplicerade fall. Länsstyrelsen har ett klassningssystem av tunnlar med avseende på farligt gods och robusthet. Kunskapen och konsekvenserna av dessa klassningar bör nog spridas mer.

Hur hanteras risken för explosioner?

Explosionsrisken (och brand) kommer upp som planfrågor i tidiga skeden om man ska få köra med farligt gods i tunneln. Detta leder till en konsekvensbeskrivning. Det är dock mycket fokus på brand och därmed behovet av sprinklersystem (eller inte), men det tas även hänsyn till explosionsrisken. Explosion och brand kopplas ihop som ett olycksfall.

Vad behöver förbättras vid hanteringen av explosioner i ditt arbete?

Niland anser att hanteringen av explosioner är tillräcklig i det generella fallet. Det finns idag inget som tyder på andra explosionsrisker än de som idag hanteras i normala projekt. I speciella fall, menar Niland, kan det dock behövas speciella lösningar vilket får hanteras från projekt till projekt.

Niland påpekar även att en viss förbättring av hur explosioner hanteras möjligen behövs framöver för att beakta att vi bygger tätare och tätare. Från att bygga tunnlar i jungfrulig mark går vi nu mer mot att bygga tunnlar och överdäckningar i tät bebyggelse. Redundanta bärverkssystem kan då behövas utvecklas för att hantera explosioner.

Finns det behov av förbättrade underlag för riskanalyser?

För traditionella konstruktioner anser Niland att man idag hanterar det bra. För speciella konstruktioner med stora konsekvenser på omgivningen, t.ex. med bebyggelse ovanför, görs det riskanalyser där även explosioner hanteras. Hanteringen är då projekthanpassad.

Niland anser att ett förbättrat underlag för riskanalyser är av intressant, han är dock inte i direkt behov av detta i sitt eget arbete. Han poängterar dock att det är viktigt att återkopplingen med data beaktar kombinationen brand och explosion – det är osäkert om det överhuvudtaget finns olycksfall med endast explosion utan brand i tunnlar under driftsskedet. Vidare, menar Niland, så utgör explosioner under byggskedet ett undantag som hanteras separat och explosioner av antagonistiska handlingar beaktas inte alls på grund av den mycket låga sannolikheten.

Finns det behov av bättre kommunikation mellan företag och myndigheter avseende explosioner och explosionsrisker?

Niland tror att det finns en god kommunikation i vissa led, dvs. bland de experter som explicit hanterar dessa frågor. Frågor kring explosioner upplevs dock generellt vara lite för smal för att intressera alla aktörer/roller i projekten. Därmed blir kommunikationen inte heller alltid så bra mot dem som inte är experter.

2.6 Maria Nilsson, Trafikverket

Om den intervjuade

Maria Nilsson, Trafikverket, är specialist på tunnelsäkerhet och arbetar med räddningsinsatser och utrymning. Nilsson har även en bakgrund från Räddningsverket (nuvarande MSB) samt som riskanalytiker på konsultfirman Flygfältsbyrå/Cowi.

Hur hanterar du explosioner i ditt arbete?

För närvarande är Nilsson fullt involverad med tunnelsäkerhetsfrågor i Västlänken, Göteborg. Detta tågprojekt är avsett för persontågstrafik och involverar därför inga transporter för farligt gods. I utformning av tunnelrör och stationer beaktas dock fortfarande risk för explosioner, bland annat från antagonistiska handlingar. Vidare medför projektet att befintliga spår, som idag används för transport av farligt gods, kommer flyttas närmare befintlig bebyggelse, vilket således medför en förhöjd explosionsrisk för närliggande byggnader.

Finns det ett behov av ökad kunskap om explosioner?

Nilsson anser att det finns ett behov av förbättrade anvisningar om hur explosionslaster ska hanteras. Trafikverket har idag vissa sådana riktlinjer för tunnlar men det finns även behov av sådana för väg och järnväg ovan jord samt för stationer.

Enligt Nilsson önskar Trafikverket undersöka hur explosionslast ska hanteras för byggnader nära transportleder för farligt gods. Idag kan framtagna laster variera beroende på inblandad riskanalytiker. Nilssons uppfattning är dock att de explosionslaster som används idag inte är för låga – antingen utgås från rimliga värden eller så är lasten för stor. Användandet av för stora explosionslaster resulterar dock i onödigt höga projektkostnader, vilket är en anledning till trafikverkets intresse för frågan.

Hur hanteras risken för explosioner?

-

Vad behöver förbättras vid hanteringen av explosioner i ditt arbete?

Nilsson önskar studier som undersöker var tillgängliga resurser bör sättas in – t.ex. på händelser med högre sannolikhet men mindre konsekvens eller händelser med lägre sannolikhet men hög konsekvens.

Finns det behov av förbättrade underlag för riskanalyser?

Vilken mängd, typ samt frekvens av farligt gods som transporteras på våra väg- och järnvägar – idag såväl som i framtiden – har en betydande inverkan på den bedömda risknivån. Nilsson anser att det skulle vara värdefullt med ett förbättrat statistiskt underlag av detta men påtalar även att det, med hänsyn till antagonistiska handlingar, finns potentiella säkerhetsrisker med en sådan förbättrad statistik. Nilsson påtalar även behovet av en förbättrad statistik för att bedöma sannolikheter för att olika typer av händelser utvecklas till en explosion.

Finns det behov av bättre kommunikation mellan företag och myndigheter avseende explosioner?

Nilsson efterlyser ett utökat samarbete med MSB – hennes erfarenhet är att de resurser som MSB förfogar över är otillräckliga för att de ska kunna vara involverade i Trafikverkets projekt i en sådan grad som Trafikverket hade önskat. Nilsson anser dock att samarbetet med riskanalytiker kåren fungerar bra – branschen är liten, vilket gör att Trafikverket har en god överblick av tillgänglig kompetens. – samt att berörda länsstyrelser har tillräcklig kunskap för att göra goda bedömningar rörande explosionsrisker. Bland konstruktörerna är Nilsson medveten om att explosionsbelastning inte är något som är allmän kännedom och att det kan vara nödvändigt att koppla in specialister. Generellt anser hon dock att explosionslaster hanteras bra även om det ibland kan ta tid att hitta personer som innehar rätt kompetens.

2.7 Patrik Jonsson och Rebecka Thorwaldsdotter, Länsstyrelsen Västra Götalands län

Om de intervjuade

Patrik Jonsson och Rebecka Thorwaldsdotter arbetar båda två som riskingenjörer på Länsstyrelsen, Västra Götalands län. Thorwaldsdotter har även en mångårig bakgrund som riskanalytiker på konsultfirman Flygfältsbyrå/Cowi.

Intervjun utfördes av de båda vid ett och samma tillfälle och eftersom deras svar kompletterar varandra återges intervjun här i samma avsnitt – det framgår dock fortfarande vilken person som framfört den angivna åsikten.

Hur hanterar ni explosioner i ert arbete?

Enligt Thorwaldsdotter och Jansson arbetar Länsstyrelsen med explosioner via den fysiska stadsplaneringen. I detta arbete ingår flera olika typer av risker, varav explosioner utgör en. När kommunerna önskar göra en ny detaljplan, eller en justering av en befintlig dito, som är placerad vid en väg på vilken transport av farligt gods är tillåten så utförs en riskanalys. Framtaget förslag på detaljplan skickas till Länsstyrelsen, som här representerar statens samlade bedömning, varvid dess riskingenjörer genomför en granskning. Detta kan resultera i förslag på justeringar men även att Länsstyrelsen pekar ut krav som måste uppfyllas. En process i flera steg mellan kommun och länsstyrelse resulterar så småningom i att Länsstyrelsen upphäver eller godtar detaljplanen. För detaljerad information om hur denna process går till hänvisas till Boverket (2020).

Finns det ett behov av ökad kunskap om explosioner?

-

Hur hanteras risken för explosioner?

Enligt Thorwaldsdotter så kan kvaliteten på detaljplanens riskanalyser, med avseende på explosioner, variera betänkligt – det finns även fall där riskanalytikern har missat att explosionsrisker är något som överhuvudtaget ska beaktas.

Det är viktigt att de riskreducerande åtgärder som föreslås i en riskanalys också blir en del av den slutliga detaljplanen. Jansson förklarar dock att eftersom detaljplanen har begränsat utrymme så är det dock inte alltid möjligt att få med all information som önskas. För sådana fall är det dock, enligt Jansson, möjligt att inkludera sådan information i kontrakt – denna metod eftersträvas dock inte. Thorwaldsdotter nämner även att det i vissa fall är möjligt att i detaljplanen referera till en given sida i ett dokument och att detta kan vara ett sätt komplettera med ytterligare information. Hon påpekar dock även att detta synsätt inte är allmänt accepterat på Länsstyrelsen.

Vad behöver förbättras vid hanteringen av explosioner i ditt arbete?

Jansson anser att det vore bra om det fanns nationella anvisningar om hur explosioner ska hanteras inom byggsektorn. Han tvivlar dock på att Boverket skulle uppskatta en sådan lösning eftersom de föredrar platsspecifika värderingar, något som kan vara svårt att uppfylla med en nationell standard. Thorwaldsdotter tror att standarder på en mer allmän nivå skulle kunna användas men att regelverk liknande de som används i Nederländerna (TNO, 2005) inte kommer att tas fram.

Thorwaldsson är av uppfattningen att metodiken som används i de flesta riskanalyser ofta är likvärdig. Ett sätt att förbättra hanteringen av explosioner i detaljplanen skulle, enligt henne, vara om dessa frågor väcktes i ett tidigt skede samt att då även inkludera explosionsexperter. Därmed skulle exempelvis hanteringen av riskreducerande åtgärder kunna förbättras. Ofta föreslås olika standardlösningar men Thorwaldsson poängterar att det finns behov av ett ökat fokus på vilken lösning som är lämplig för det specifika fallet, t.ex. för ett fall där den utsatta byggnaden är placerad nära en väg med transport av farligt gods.

Finns det behov av förbättrade underlag för riskanalyser?

Enligt Thorwaldssons erfarenhet finns det en varierande uppfattning hos riskanalytiker om vad som ingår i deras uppgift i en riskanalys – i vissa fall är riskbedömning och de riskreducerande åtgärderna väl beskrivna medan de i andra fall endast beskrivs i vaga ordalag. Jansson anser att kommunerna behöver bli bättre på att ställa de rätta frågorna. De kan bli mer specifika på vad det är för typ av hjälp de förväntar sig av riskanalytikern. Om kommunerna inte är tillräckligt specifika i sin frågeställning kommer de också få vaga förslag på riskreducerande åtgärder men inga krav på vad som verkligen behövs.

Jansson anser att det statistikunderlag för transporter av farligt gods som vanligtvis används idag är otillräckligt. Enligt honom är det ett stort problem att det idag inte finns någon part som ansvarar för att ta fram sådan statistik. Han nämner ett projekt som utfördes i Gnistängstunneln i Göteborg (Strand, 2015) där man med hjälp av kameror lyckades samla in information om transporter för farligt gods i nära 90 % av fallen. Jansson tror dock att den använda metoden kan vara både dyr och komplicerad att genomföra, att det finns en risk med att en sådan förbättrad transportstatistik skulle kunna hamna i fel händer samt det även behövs metoder för att uppskatta hur mängden trafik påverkas med tiden.

Ett förbättrat statistikunderlag baserat på mätningar enligt ovan skulle ge information om antalet transporter med farligt gods på en viss vägsträcka. Det säger dock inget om vilken mängd explosiva varor som finns på respektive transport. Thorwaldsson och Jansson anser att det är ett problem hur mängden explosiva varor hanteras i dagens riskanalyser. Att t.ex. för massexplosiva ämnen utgå ifrån att den maximala mängden på 16 ton fraktas i varje fordon bedöms inte vara ett realistiskt antagande och är något som Länsstyrelsen också brukar kommentera.

Finns det behov av bättre kommunikation mellan företag och myndigheter avseende explosioner?

Jansson förklarar att Länsstyrelsen, i frågan om explosioner, ofta enbart har kontakt med kommunerna, även om det också förekommer att riskanalytikern som genomfört riskanalysen, på kommunens begäran, deltar i sådana diskussioner. Thorwaldsdotter anser att Länsstyrelsen generellt har en god kontakt med både riskanalytiker och räddningstjänsten, där den senare utgör ett stöd för kommunen i riskfrågor. Ofta har man liknande syn på dessa frågor. Jansson påpekar dock att detta är baserat på deras perspektiv att arbeta i en större stad som Göteborg och att det kan se annorlunda ut i olika delar av landet.

2.8 Marie Sjölander, Spets Projektledning

Om den intervjuade

Marie Sjölander arbetar med projektledning på Spets Projektledning och erbjuder stöd till byggherrar inom varierande områden, t.ex. kontakt med myndigheter, kvalitet och miljö. Som intervjuperson representerar Sjölander byggherrarnas syn på hantering av explosioner. Vidare har hon god insyn i vilken slutlig effekt som antaganden i riskanalysen har på den slutliga byggnadens utformning.

Hur hanterar du explosioner i ditt arbete?

Sjölander hanterar inte personligen explosionsrisker men kommer ändå ofta i kontakt med denna typ av frågor via de riskanalyser som är kopplade till projekt som hon är involverad i.

Finns det ett behov av ökad kunskap om explosioner?

Sjölander anser att det finns ett behov av ökad kunskap om explosioner. Hon pekar särskilt ut behovet av nationella anvisningar om hur explosionsrisken ska utvärderas och hanteras. Detta skulle kunna lösas på ett sätt liknande Nederländerna (TNO, 2005) men med relevanta anpassningar. Sjölander efterlyser även en diskussion om vilken sannolikhet som krävs för att den inte ska behöva beaktas i en riskanalys. Här kan det dock förmodligen råda en konflikt mellan olika intressen där människoliv vägs mot ekonomi. Idag är det upp till riskanalytikern att göra denna bedömning men Sjölander anser att det är en värdering som istället borde göras av Länsstyrelsen.

En ytterligare anledning till behovet av ökad kunskap inom ämnesområdet är att explosionsrisken kan värderas väldigt olika i olika projekt även om de studerade objekten är placerade på ett kort avstånd från varandra längs samma vägsträcka.

Hur hanteras risken för explosioner?

Sjölander förklarar att det har skett en förändring i hur explosioner hanteras – för 20 år sedan utvärderades inte explosionsrisken på samma sätt som idag. Detta, resonerar hon, kan bero på det idag är betydligt vanligare att placera byggnader på platser där de är mer utsatta för olika typer av risker, exempelvis explosioner.

Ett sätt som explosioner hanteras idag är att byggnader som placeras nära transportleder för farligt gods utgörs av t.ex. parkeringshus och kontor. Dessa byggnader skapar därmed en skyddande barriär för bakomliggande bebyggelse, något som minskar risken för det skyddade området. Syftet med dessa närliggande byggnader är dock tvåfald – förutom att utgöra ett främre skydd så utgör det bebyggda området också ett viktigt bidrag till att optimera utnyttjandet av tillgängliga markytor i staden.

Sjölander anser att det finns ett glapp mellan riskanalytikern och detaljplanen. Enligt henne så uppstår det problem när alltför många tekniska detaljkrav införs i detaljplanen eftersom det kan gå lång tid från det att riskanalysen är klar tills dess att byggnaden uppförs. Om riskreducerande åtgärder då beskrivs med sådana detaljkrav så kan detta hämma den tekniska utvecklingen eftersom nya innovativa lösningar inte blir tillåtna för det aktuella fallet.

Vad behöver förbättras vid hanteringen av explosioner i ditt arbete?

Sjölander anser att det vore bättre om riskanalytikern, i sina riskreducerande åtgärder, ställer funktionskrav istället för tekniska detaljkrav. Sjölander misstänker dock att Länsstyrelsen föredrar den senare metodiken eftersom denna är enklare att följa upp. Enligt Sjölander så saknar detta dock praktisk betydelse i uppföljningen eftersom denna typ av information ändå inte berörs vid hantering av byggnadslov. Enligt henne skulle det vara bättre om denna typ av frågor hanterades i de tekniska samråd som hålls innan byggandet påbörjas.

Sjölander efterlyser även olika typer av seminarier där frågor kring explosioner och hantering av dess effekter kan diskuteras. I sådana forum skulle riskanalytiker kunna diskutera hur risker hanteras samt vilka riskreducerande åtgärder som kan göras. Liknande seminarier, med inriktning mot byggherrarna, skulle också vara välkommet eftersom deras kunskap om explosioner och andra risker generellt är ganska låg. Med en högre baskunskap hos olika aktörer inom byggindustrin tror dock Sjölander att det skulle finnas ökade möjligheter för att framtida projekt kan förbättras ytterligare.

Finns det behov av förbättrade underlag för riskanalyser?

Sjölander anser att de riskreducerande åtgärder som tas fram i regel är anpassade till det specifika projektet. Hon kan inte bedöma huruvida relevansen hos aktuella explosionslasten men konstaterar att hon inte har upplevt att byggherren anser att den framtagna explosionslasten är för stor. Sjölander påpekar även att byggherren litar på att den riskutvärdering som tagits fram av riskanalytikern är korrekt.

Sjölander ställer sig väldigt positiv till en uppdatering av den nuvarande statistiken för transporter av farligt gods – för att kunna göra korrekta riskbedömningar är det även nödvändigt med korrekta underlag. Hon nämner ett projekt i Göteborg där man inom projektet, på grund av bristfälligt statistiskt transportunderlag, diskuterade att själva ta fram en förbättrad statistik för den aktuella vägsträckan. Sjölander stöder även tanken på att uppdatera statistiken för sannolikheten att en explosion inträffar vid händelse av en olycka. Med ett förbättrat underlag för att beskriva detta så skulle även förståelsen till behovet av riskreducerande åtgärder, samt dess effekter, att öka.

Finns det behov av bättre kommunikation mellan företag och myndigheter avseende explosioner?

Sjölander anser att det finns behov av förbättrad kommunikation mellan byggherren, riskanalytikern samt räddningstjänsten. I ett sådant forum skulle riskreducerande åtgärder kunna diskuteras på ett tidigt stadium, vilket i sin tur borde kunna resultera i riskreducerande åtgärder som är både ekonomiskt hanterbara samt lämpliga för byggnaden ur ett funktionsperspektiv.

2.9 Herman Heijmans, Norconsult

Om den intervjuade

Herman Heijmans arbetar som senior riskanalytiker på Norconsult i Göteborg och har deltagit i ett stort antal byggprojekt där frågor om explosionsrisk förekommit.

Hur hanterar du explosioner i ditt arbete?

I egenskap av riskanalytiker beräknar och värderar Heijmans sannolikheten och konsekvensen för både explosioner och andra potentiella riskkällor. Detta görs med utgångspunkt från ett Nederländskt regelverk (TNO, 2005). Framtagna resultat presenteras i form av uppskattat antal döda som en funktion av sannolikheten att händelsen inträffar, se avsnitt A.2 för mer information.

Finns det ett behov av ökad kunskap om explosioner?

Heijmans anser att det finns behov av ökad kunskap om explosioner. Det nederländska regelverk som han delvis utgår ifrån i sitt arbete kan i vissa avseenden vara för konservativt samt att de resulterande konsekvenserna i många fall kan vara för omfattande.

Heijmans efterfrågar mer detaljerad kunskap om vad som händer vid händelse av en explosion. Idag används tämligen allmänna modeller för att ge en övergripande uppfattning av riskbilden för en eventuell explosion. För att kunna använda en mer detaljerad modell krävs dock att många speciella situationer studeras, något som ibland kan vara nödvändigt.

Hur hanteras risken för explosioner?

Enligt Heijmans saknas det i Sverige en allmänt accepterad metod för hur explosioner kan hanteras i en riskanalys. Därför finns också skillnader i hantering av detta mellan olika riskanalytiker. Värdering av risk samt uppskattning av hur många som avlider av en given händelse kan göras på flera olika sätt och därför fås också olika resultat. Heijmans poängterar även att det kan vara väldigt små skillnader i gjorda antaganden som i slutändan får stor inverkan på det slutliga resultatet – det kan också vara svårt att bedöma huruvida ett givet antagande är rimligt eller inte.

Heijmans har dock ingen erfarenhet av att han som riskanalytiker har kritiserats för att en annan riskanalytiker skulle ha bedömt saken annorlunda – vanligen utses enbart en riskanalytiker. Jämförelser kan visserligen göras med liknande projekt i närområdet men eftersom samtliga antaganden vanligtvis inte redovisas i riskanalysen är det i regel inte möjligt att göra en fullständig jämförelse.

Vad behöver förbättras vid hanteringen av explosioner i ditt arbete?

Heijmans anser att det finns behov av nationella metoder, liknande dem som finns i Nederländerna, som riskanalytiker kan använda. Ur ett svenskt perspektiv har denna metod dock också risker eftersom den saknar information om explosiva och oxiderande ämnen, något som normalt sett inte fraktas i stora kvantiteter i Nederländerna. I en sådan metod skulle det även vara önskvärt att hantera sannolikheten för att en given typ av olycka utvecklar sig till en explosion. Om en nationell metod existerade skulle arbetet underlättas och mer arbete skulle kunna spenderas på att hantera diverse detaljer som i sin tur skulle öka kvaliteten på utförda riskanalyser.

Heijmans efterlyser även anvisningar för riskreducerande åtgärder – både exempel på sådana som kan genomföras samt en mer detaljerad information om vilken effekt som de har på risknivån. Idag finns vissa hjälpmedel i form av förslag på vanliga riskreducerande åtgärder. Det saknas dock anvisningar om hur stor effekt (i siffror) som dessa åtgärder har. Ett dokument med den typen av uppgifter skulle dock medföra att riskanalytikern kan undvika att göra osäkra antaganden inom ett ämnesområde som hen inte behärskar och således utgöra ett betydande stöd i en riskanalys.

Finns det behov av förbättrat underlag för riskanalyser?

En förbättrad kvalitet på den befintliga statistiken för transport av farligt gods är önskvärt. Den statistik som till stor del används idag är från 2006, se avsnitt A.4, och ska egentligen inte ens användas på det sätt som den görs idag. Heijmans förklarar att en del av den transportstatistik som han använder sig av i sitt arbete är något som han får tillgång till via personliga kontakter på MSB och således inte nödvändigtvis är något som är tillgängligt för alla riskanalytiker. En möjlig orsak till detta, spekulerar han, är att det finns betydande brister i den befintliga transportstatistiken och att myndigheten därför är sparsam med att allmänt ge alltför detaljerad information om denna. En uppdatering av aktuell transportstatistik, samt ett allmänt tillgängliggörande av denna, skulle således också medföra en ökad möjlighet till högre kvalitet hos riskanalyser kopplade till explosion. En sådan uppdaterad transportstatistik skulle eventuellt vara möjligt genom att använda befintliga resurser i samhället, t.ex. via befintliga vägkameror. En sådan teknik har också använts på försök i t.ex. Göteborg (Strand, 2015) med lyckat resultat.

Den befintliga transportstatistiken är även bristfällig i den meningen att den enbart innehåller information om den totala mängden farligt gods som transporteras och ingenting om hur stora mängder som finns i respektive transport. För att hantera detta tvingas riskanalytikern göra diverse antaganden om antalet transporter samt mängden gods i varje transport. Det är möjligt att detta inte har så stort genomslag på själva riskanalysen men vid dimensionering av en närliggande byggnad som kan utsättas för explosionslasten kan det dock vara viktigt.

Finns det behov av bättre kommunikation mellan företag och myndigheter avseende explosioner?

Heijmans anser att det finns ett behov av ökad kontaktyta mellan olika delar i byggindustrin. Det nuvarande avståndet mellan riskanalytiker och konstruktörer skulle förmodligen delvis kunna avhjälpas via samarbete med brandingenjörer. Andra grupper som det vore värdefullt att ha ökad kontakt med är t.ex. arkitekter, entreprenörer och byggherrar. Särskilt kunskapen om kostnaden för olika riskreducerande åtgärder är av intresse att ha en ökad dialog om eftersom detta är ett område som riskanalytikern oftast saknar tillräcklig kunskap om.

Heijmans poängterar även att Länsstyrelsen granskar alla riskanalyser och att han anser att deras kompetens att göra detta i regel är tillräcklig. Dock kan det hända att Länsstyrelsen saknar tillräckliga resurser, vilket gör att granskningen inte alltid är så noggrann som den kanske borde vara.

2.10 Mathias Lööf, Projektstaben

Om den intervjuade

Mathias Lööf arbetar som brand- och riskingenjör på Projektstaben i Stockholm där han utför riskanalyser samt koordinerar brand- och riskfrågor i bygg- och infrastrukturprojekt.

Hur hanterar du explosioner i ditt arbete?

Lööf arbetar främst med att utföra riskanalyser i detaljplaneskedet men fungerar även som ett stöd för att tolka kraven som ställs i befintliga detaljplaner. Lööf har omfattande erfarenhet av riskhantering av explosioner och har bland annat haft en framträdande roll i överdäckningen i Hagastaden, Stockholm.

Finns det ett behov av ökad kunskap om explosioner?

Lööf anser att det finns ett behov av ökad kunskap om explosioner, där hans fokus är att bättre förstå sannolikheten för att en explosion ska uppstå utgående från en given händelse samt vilka konsekvenser sådana händelser kan tänkas ge upphov till. Enligt Lööf har sannolikhetsresonemanget lämnats något därhän. Även om riskanalytikern kan föra ett, för dem, rimligt resonemang om en given händelse är det inte ovanligt att de får kritiska kommentarer från en framtida granskare. Det är därför angeläget att mer forskning görs för att öka kunskapen om sannolikheten att givna händelser inträffar.

Hur hanteras risken för explosioner?

Lööf anser att explosioner hanteras bra i riskanalyser – även om sannolikheten att en sådan händelse inträffar är liten så beaktas den fortfarande. Dock, resonerar Lööf, är det möjligt att de explosionslaster som utgås ifrån i en riskanalys är högre än vad som egentligen är nödvändigt. Han poängterar att det i regel inte finns någon överensstämmelse mellan olika riskanalyser av vilken explosionskälla som borde beaktas vid bestämning av explosionslast mot en närliggande byggnad. Inte heller finns det någon

samsyn i vilken position en sådan explosionskälla antas vara placerad i förhållande till byggnaden. Enligt Lööf så är explosionskällan inne i tunnlar ofta högre än vad som beaktas på samma transportled utanför tunneln. Han anser att det finns ett för stort fokus på hur explosioner hanterades i överdäckningen i projekt Hagastaden, Stockholm, där det utgicks från stora laddningsmängder på 1-2 ton TNT – Hagastaden utgjorde enligt Lööf ett specialfall. Lööf anser att ett man i högre grad borde betrakta explosioner ur ett riskperspektiv, i vilket högre fokus läggs på sannolikheter och inte, som ofta är fallet idag, på vilka konsekvenser som kan uppstå.

I samband med projekt Hagastaden har det blivit ett stort fokus på de problem det medför att hantera en potentiell kraftfull explosion inne i en tunnel/överdäckning. Lööf pekar dock gärna på de positiva riskeffekter som en tunnel eller överdäckning får på den omgivande bebyggelsen med hänsyn till andra typer av olyckor. Vid valet att förbjuda transport av farligt gods genom en tunnel så menar Lööf att en utvärdering först måste göras av alternativa transportvägar för farligt gods. När detta gjordes för Hagastaden kunde det konstateras att konsekvensen för en explosion inne i eller utanför tunneln nästan var densamma. I de flesta fall kommer dock en alternativ transportväg utanför tunneln att vara både längre samt erbjuda en lägre trafiksäkerhet.

Lööf anser att användandet av explosivämnet TNT i riskanalyser är något underligt eftersom detta är ett militärt sprängmedel och således inte vad som fraktas i verkligheten. Att utgå från TNT i riskanalyser är således ett konservativt antagande som kan vara alltför mycket på säker sida.

Vad behöver förbättras vid hanteringen av explosioner i ditt arbete?

Enligt Lööf finns det behov att bättre kunna bedöma hur sannolikt det är att en explosion uppstår vid t.ex. en brand eller en kraftfull stöt. De sannolikhetsvärden som används för detta idag baseras på normala lastbilar. De fordon som används nu för tiden för denna typ av transporter är dock speciellt utformade för att skydda lasten vid händelse av en olycka och lasten är placerad i en särskild behållare som utgör en egen brandcell. Sammantaget borde detta resultera i en märkbart minskad sannolikhet att en explosion inträffar vid en olycka. Trots detta är detta effekter som inte beaktas alls i dagens riskanalyser – något som, enligt Lööf, kan leda till en omfattande överskattning av risken vid en explosion.

Lööf menar även att det är väldigt svårt att bedöma vilka konsekvenser som fås vid händelse av en explosion. Faktorer som evakuering eller det mänskliga beteendet vid en olycka (blir man t.ex. en nyfiken åskådare eller tar man sig snabbt därifrån?) är också saker som skulle kunna ha en stor effekt på utfallet. I dagens riskanalyser antas att en olycka momentant utvecklas till en explosion även om det i verkligheten först krävs en serie av kopplade händelser för att detta ska inträffa. Lööf tror att ett regelverk, som hanterar hur sådana konsekvensberäkningar ska utföras, vore mycket användbart. Å andra sidan, resonerar han, finns det även risker med att göra sådana anvisningar alltför detaljerade.

Lööf har även funderingar på de nuvarande riskkriterier som används i Sverige. När dessa togs fram så var syftet att fungera som ett stöd för att bestämma placeringen av nya vägar med hänsyn till olika risker. Idag används dock dessa kriterier vid uppförandet av nya byggnader i ett område där det redan finns befintliga byggnader. Det är möjligt att de befintliga byggnaderna redan bidrar till en oacceptabelt hög risknivå och uppförandet av nya byggnader, även om dessa utformas optimalt, kommer ovill-

korligen medföra ett ytterligare tillskott till områdets risknivå. Med hänsyn till detta så efterlyser Lööf en diskussion om hur riskkriterierna ska användas i området med befintlig bebyggelse – i dagsläget råder det ingen konsensus om hur detta ska hanteras.

Lööf påpekar även att sannolikheter värderas olika i olika situationer. I exempelvis kärnkraftsindustrin är det möjligt att helt bortse från en händelse om det kan påvisas att sannolikheten att den inträffar är tillräckligt låg. För explosioner i en förtätad stadsmiljö är en sådan metodik dock inte möjlig – här beaktas situationer som har en sannolikhet som är så låg att den på annat håll skulle bortsetts från helt.

För riskreducerande åtgärder tror Lööf att det skulle vara möjligt att komma fram till bättre uppskattningar av åtgärdens inverkan. Att ta fram en handbok för riskreducerande åtgärder, där åtgärdernas effekter även kvantifieras, skulle därför vara en önskvärd förbättring. Lööf framhåller även att det är bättre att sätta upp funktionskrav på riskreducerande åtgärder än att kräva en specifik teknisk egenskap, t.ex. ett fönster av en speciell typ.

Finns det behov av förbättrade underlag för riskanalyser?

Enligt Lööf finns det behov av att förbättra statistiken för hur explosionshändelser uppstår. Ett problem med att samla in sådan typ av statistik är dock att denna typ av händelser sällan eller aldrig har inträffat. Att uppdatera statistiken för antalet transporter, samt hur stora dessa är, på olika transportleder för farligt gods vore också värdefullt eftersom detta skulle medföra en direkt kvalitetsökning av utförda riskanalyser. I Stockholm, anser Lööf, finns det dock redan nu ett bra uppdaterat transportunderlag (WSP, 2017) som, i ett samarbete mellan Trafikverket och Trafikkontoret, togs fram med hjälp av särskilt utplacerade kameror vid huvudleder för farligt gods. I samband med att detta underlag togs fram framkom även att den transporterade mängden brännbara och explosiva gaser hade underskattats under en lång tid – antalet transporter var ungefär dubbelt så många jämfört med vad som kunde uppskattats utgående från det annars använda underlaget (Räddningsverket, 2006).

Finns det behov av bättre kommunikation mellan företag och myndigheter avseende explosioner?

Lööf anser att det är fruktbart att ha en kontinuerlig kommunikation med berörda aktörer genom hela riskhanteringsprocessen. Lööf förespråkar att det i varje projekt skapas en projektgrupp för hantering av explosionsrisker. Han efterlyser även en ökad kontakt med Länsstyrelsen samt kortare handläggningstider för detaljplaner.

2.11 Thomas Järphag, NCC

Om den intervjuade

Thomas Järphag är ansvarig för teknisk rådgivning och leder NCC:s tekniska råd för att minimera risker kopplade till bland annat brand och explosion. Järphag har en lång bakgrund som konstruktör med inriktning mot brand och är involverad i alla typer av NCC-projekt i Norden, framförallt Sverige, som inte berör Trafikverkets objekt (broar och tunnlar).

Hur hanterar du explosioner i ditt arbete?

Sedan mitten av 1990-talet är Järphag med i Boverkets referensgrupp Brand samt i en expertgrupp om bärande konstruktioner med inriktning brand. I detta arbete ingår alla typer av olyckslaster, t.ex. inverkan av explosioner. Järphag är också den på NCC som rådfrågas internt om frågor kring explosion dyker upp i ett projekt.

Finns det ett behov av ökad kunskap om explosioner?

Järphag anser att det finns behov av mer kunskap om explosioner i byggbranschen – han känner själv enbart till enstaka personer som är lämpliga att bistå med hjälp i sådana här frågor. Det största problemet för NCC avseende explosion är i regel att konstruktören som hanterar dessa frågor inte är tillräckligt insatt i hur dynamisk respons orsakad av explosionslast ska hanteras. Utan rätt insikt om explosionslaster, samt strukturens respons orsakat av detta, är det Järphags erfarenhet att det finns en betydande risk att konstruktörens hantering av frågan är så bristfällig att det kan få allvarliga konsekvenser för hela projektet. Det kan i ett sådant läge till och med gå så långt att projektet, på felaktiga grunder, inte bedöms vara genomförbart. Järphag menar att dagens beräkningsverktyg för dimensionering av belastade strukturer är dåligt anpassade att hantera olika typer av olyckslaster, t.ex. explosion, eftersom de utgår från att strukturen uppvisar en linjärelastisk respons. Detta har även bidragit till att konstruktörens förmåga att göra övergripande rimlighetsbedömningar är sämre idag än vad den var tidigare, innan denna typ av mer avancerade beräkningsverktyg började användas i stor omfattning. Detta, menar Järphag, är en form av kompetensbrist, men han medger dock även att den grundläggande kunskapen ofta finns att använda sig av t.ex. gränslastteori i beräkningen, om detta påtalas för konstruktören.

Järphag menar även att det på beställarsidan finns behov av ökad kompetens kring explosioner – han upplever inte att det idag finns någon som besitter detta i en sådan grad att de kan ifrågasätta de val och förutsättningar som görs vid bestämning av explosionslast. Järphag menar även att det saknas uppföljning av att ställda krav verkligen följs – beställaren är i princip nöjda med att aktuella kvalitetsdokument är korrekt ifyllda men någon egentlig kontroll av hur explosion har beaktats görs normalt sätt inte.

Hur hanteras risken för explosioner?

Tidigare var det mycket sällsynt med explosionsrelaterade frågor. I dagsläget, menar Järphag, är dock frekvensen betydligt högre – uppskattningsvis minst en gång/halvår. Tidigare fanns det rimliga skyddsavstånd mellan byggnad och potentiell lastkälla. Idag ser dock situationen ofta annorlunda ut och tomtytor som tidigare inte bedömdes vara byggbara tas nu också med i planeringen för att mer optimalt kunna nyttja befintliga markytor. Detta medför att byggnader idag ofta ligger betydligt närmare trafikleder som tillåter transport av farligt gods än vad som var fallet tidigare, något som ger upphov till ett behov att beakta inverkan av explosionslast. Antalet konstruktörer som kan hantera denna typ av frågor på ett tillfredsställande sätt är, enligt Järphag, dock tyvärr väldigt begränsat. Här finns därför ett betydande utbildningsbehov för att råda bot på den nationella kompetensbrist som för närvarande råder. Järphag efterlyser ett kunskapslyft bland normala uppdragsledare och konstruktörer så att de får en

sådan grundläggande konceptuell förståelse för explosionslast samt explosionsbelastade strukturer att de åtminstone kan delta i en diskussion. Detta behov, menar Järphag, finns inte bara på NCC utan i hela branschen.

Järphag upplever det inte som att det finns någon stark koppling mellan utförd riskanalys och de explosionslasterna som används vid dimensionering. Vidare är förutsättningarna för en explosionslast ofta otydliga – t.ex. vilken placering som lastcentrum ska antas ha. Järphags uppfattning är att explosionslasten ofta kan vara för hög. Han

finner det inte underligt att det kan uppstå höga explosionslasterna på väldigt korta avstånd men när detta är i storleksordningen 40 m förefaller det inte rimligt att den får så stora konsekvenser som han emellanåt har observerat.

Järphag funderar även på vad som krävs för att man ska kunna strunta i att beakta ett givet explosionsscenario beaktande. I vissa lägen, menar Järphag, utgår från scenarion som har en sådan låg sannolikhet att de rimligen borde kunna bortses från. Järphag jämför här med kärnkraftsindustrin, i vilken det utgår från koncept där en händelse kan bortses från helt om sannolikheten att den inträffar bedöms vara tillräckligt låg. I en riskanalys för en byggnad invid en trafikled så kan det dock inträffa att händelser beaktas trots att det bedömts att sannolikheten att de ska inträffa är mer än 10 gånger lägre än vad gränsen ligger på i kärnkraftsindustrin. Järphag ifrågasätter att detta är korrekt hanterat ur ett samhällsperspektiv.

Vad behöver förbättras vid hanteringen av explosioner i ditt arbete?

Järphag upplever att det kan finnas en stor orättvisa mellan olika likartade projekt – dels i de krav som ställs i detaljplan och dels hur explosionslastens förutsättningar hanteras. Tämmligen olika krav kan ställas på samma typ av byggnad även om de befinner sig i samma område.

Utmaningen med explosionslasterna, enligt Järphag, är dels att bestämma den dynamiska lastens storlek och dels att utforma den struktur som utsätts för denna last. Experthjälp behövs fortfarande för att bestämma den dimensionerande explosionslasten – detta, tror Järphag, kan vara för svårt för den vanliga konstruktören att hantera. Om lasten är definierad borde det dock vara möjligt för konstruktören att, med förenklade beräkningshjälpmedel, bestämma en principiell utformning av belastad struktur – Järphag anser att det finns tillräckliga riktlinjer i dagens regelverk vad gäller materialdata för att en explosionsbelastad struktur ska kunna utformas.

Järphag anser att det saknas riktlinjer för hur explosionslasterna ska bestämmas. Han menar att det därför vore önskvärt att ta fram definierade förutsättningar för explosionslasterna att använda för olika standardfall baserade på typ av verksamhet hos utsatt byggnad, t.ex. kontor, bostäder, samlingslokaler etc., Utgående från sådana verksamhetsklasser skulle sedan aktuell explosionslast kunna bestämmas som funktion av avstånd mellan byggnad och antaget explosionscentrum, där det senare också bestäms enligt givna riktlinjer. Med explosionslasten definierad blir det sedan möjligt att gå vidare att dimensionera utsatt byggnad. Järphag menar att branschen gemensamt behöver bestämma vilka förutsättningar som ska gälla för olika situationer. Detta skulle då också kunna utgöra en bra hjälp för riskanalytiker i deras arbete med att ange relevanta lastförutsättningar för att i omgivande byggnader hantera effekt av explosionslast.

Järphag önskar ha tillgång till enklare beräkningsmodeller av den belastade strukturens respons som kan användas vid dimensionering med hänsyn till explosionslast. Avsikten med sådana modeller bör vara att ge ett resultat som är ”bra nog” – de behöver således inte vara ”exakt rätt” på det sätt som han upplever att många av dagens konstruktörer tycks eftersträva när de använder mer avancerade beräkningsverktyg baserat på finita elementmetoden. Järphag menar att de osäkerheter som finns på indata gör att alltför komplicerade modeller i vilket fall som helst riskerar att ge en felaktig bild. Enkla, mer övergripande, uttryck för hantering av explosionslast i ett tidigt skede skulle dock vara tillräckligt för att uppfylla sitt syfte att skapa en robust struktur. Järphag menar även att det finns en ytterligare viktig poäng med att kunna använda sig av enkla modeller även för komplexa problem. Enkla modeller ger bättre möjlighet att göra övergripande känslighetsstudier, vilket i ett tidigt skede ger en bättre ekonomisk överblick. I ett senare skede, när man med enklare beräkningsverktyg kunnat orientera sig om huvudsaklig utformning, kan det dock fortfarande bli aktuellt att ytterligare optimera utformningen med hjälp av mer avancerade metoder.

Baserat på ovanstående anser Järphag att det för explosionsberäkningar finns behov av enkla elementarfall på samma sätt som det finns elementarfall för t.ex. balkar i statiken. Han anser det dock vara svårt att i litteraturen hitta bra tillämpande exempel som kan utgå ifrån vid sådan dimensionering. Undantaget, menar Järphag, är de anvisningar som getts ut av MSB, t.ex. Johansson och Leppänen (2014). Dessa skulle, tillsammans med lastanvisningar enligt ovan, lämpligen kunna samlas i en handbok med råd som branschen är överens om. Implementering i branschen skulle sedan kunna göras via digitala seminarier. Ett viktigt syfte skulle vara att ge branschens aktörer en övergripande överblick kring frågor om explosionslast och därmed öka möjligheten att i ett tidigt skede ge besked om projektet överhuvudtaget är genomförbart samt vilka konsekvenser som explosionslast ungefär innebär.

Finns det behov av förbättrade underlag för riskanalyser?

-

Finns det behov av bättre kommunikation mellan företag och myndigheter avseende explosioner?

Det saknas idag ett forum mellan NCC och beställare där frågor kring explosion kan diskuteras. Det finns stora kunskapsbrister som gör att en sådan diskussion inte blir meningsfull – kommunerna hänvisar vanligen till gällande detaljplan, vilka i sin tur kan innehålla inkonsekventa krav i jämförelse med den närmaste omgivningen som gör att projekt inte blir genomförbara. Avsteg från detaljplanen godkänns inte heller, om det inte handlar om mindre avvikelser. För att få rimliga förutsättningar krävs då istället att en ny detaljplan tas fram. Järphag är kritisk till att framtagning av nya detaljplaner inte tillräckligt ofta karakteriseras av ett tillräckligt nytänkande utan att dessa istället tenderar att utformas på sätt som liknar en tidigare detaljplan. Järphag förklarar att som byggare måste NCC komma igång med ett projekt inom en viss tid för att det projektet ska vara ekonomiskt genomförbart – nödvändigt kapital kan enligt Järphag inte bindas mer än fyra år. Denna period speglar tiden från det att marken är köpt till dess att projektet är genomfört och taget i bruk och genererar intäkter. Snabbare handläggningstider och mindre osäkerheter blir därför en viktig förutsättning för att ett projekt ska kunna genomföras.

2.12 Per-Ola Svahn, Skanska

Om den intervjuade

Per-Ola Svahn är Regionchef på Skanska Sverige i Region Stora projekt väst, och har en långvarig bakgrund på Skanska som konstruktör, projekteringsledare samt teknisk chef. Region Stora projekt involveras i projekt som har ett högt teknikinnehåll inom konstruktion, vilket främst innebär olika typer av anläggningsprojekt men till viss del även husbyggnadsprojekt.

Hur hanterar du explosioner i ditt arbete?

Svahn poängterar att frågor kring explosioner inte är jättevänligt förekommande men att han i sina tidigare roller på Skanska ofta varit en av dem som blivit involverad när sådana dykt upp. Aktualiteten hos denna typ av frågor har dock ökat med tiden, något som han bland annat kopplar till den långvariga högkonjunktur som rått i Sverige under det senaste decenniet. Svahn menar att en indikation på högkonjunktur är att marken är värdefull och att man är villig att bygga även i dyra lägen. Att bygga hus ovanpå trafikleder är dyrt och intresset att genomföra sådana typer av projekt är således ett tecken på högkonjunktur,

Dagens urbanisering gör att det finns en önskan i våra större städer att förtäta befintliga områden och därför uppstår även frågor kring explosionslaster. Svahn anser att detta resulterat i en ökad medvetenhet om risker kring explosionslaster, vilket gör att denna typ av frågor i dag också behandlas mer utförligt än tidigare. Han exemplifierar med överdäckningen av Hagastaden i Stockholm, i vilken flera omfattande studier kopplade till explosion genomfördes. Detta projekt har, resonerar han, sannolikt även påverkat andra liknande projekt när olika projektutvecklare ställer sig frågan om denna typ av frågeställning även gäller för deras projekt.

Finns det ett behov av ökad kunskap om explosioner?

Svahn säger sig sakna kunskap för att bedöma om huruvida det finns tillräckliga riktlinjer om hur själva explosionen ska hanteras. Han anser dock att det bland dagens konstruktörer finns en bristande grundkompetens om dynamik för att kunna hantera verkan av explosionslaster. I en strävan att förenkla finns det en fara i att man i alltför stor omfattning använder sig av så kallade ekvivalenta statiska laster istället för dynamiska laster. Svahn identifierar detta som en kunskapsbrist för vilken det finns ett behov av en allmän kunskapshöjning bland dagens konstruktörer. För att åtgärda detta finns det inom denna yrkesgrupp ett behov av vidareutbildning om dynamisk belastning och resulterande strukturrespons.

En myndighet som Trafikverket har ett särskilt ansvar att ställa rätt krav samt hjälpa branschen att implementera hanteringen av dessa. För detta krävs en injektion med ekonomiska medel för att höja kunskapsnivån i branschen och i detta arbete har även högskolor och universitet en viktig roll.

Hur hanteras risken för explosioner?

Svahn menar att det finns projekt där det finns eller har funnits en stor osäkerhet om hur man ska resonera i frågor kring explosionslast vid trafikleder. En brist på tydliga besked från vägghållaren gör att det händer att projektutvecklare, så som Skanska, backar tillbaka eftersom projekten inte är kalkylerbara. För att i ett tidigt skede kunna bedöma om ett projekt är genomförbart behöver aktuella förutsättningar vara kända. Om så är fallet kan det också vara acceptabelt att kostnaden för t.ex. explosionsrelaterade händelser i sig är hög men om man inte vet så kan denna typ av bedömning inte göras. Enligt Svahn utgör osäkerheten därför det största hindret för genomförandet av denna typ av projekt – osäkerheten om kostnaden är således viktigare än kostnaden i sig. Svahn håller med om att Hagastaden i Stockholm nog kan ha blivit en form av prejudikat i branschen för denna typ av frågor. Detta har i sin tur medfört att projektkostnaden blir för hög och att alternativa lösningar väljs – ett resultat av detta, menar Svahn, har blivit att man idag undviker att bygga ovanpå överdäckningar, utan istället placerar dessa vid sidan av.

Idag saknas det tydliga anvisningar för hantering av explosioner och enligt Svahn är det svårigheten att som exploatör få ett tydligt besked från vägghållaren om vilka villkor som gäller som är det största hindret vid genomförandet av den här typen av projekt. Avsaknad av besked beror dock inte på en otillräcklig dialog utan på kunskapsbrist – vägghållaren vill gärna svara men eftersom denne inte själv vet hur man borde resonera så lämnar de inte heller några besked.

Vad behöver förbättras vid hanteringen av explosioner i ditt arbete?

Svahn anser att en allmän kunskaphöjning om explosioner i branschen är en förutsättning för att kunna förbättra hur detta hanteras i dagens projekt. Förutom rena utbildningsinsatser så skulle skapandet av en handbok, där olika typer av kompetenser kring explosion kopplas samman, särskilt samverkan mellan riskanalytiker och konstruktör, vara ett konkret sätt att möta detta behov.

För att ge en sådan handbok erforderlig tyngd skulle den med fördel kunna ges ut eller rekommenderas av Trafikverket samt vara upplagd i en form motsvarande Trafikverkets projekteringshandböcker samt innehålla enkla exempel som illustrerar konkreta skillnader i resultat som sedan kan kostnadsberäknas. En sådan handbok skulle, enligt Svahn, förmodligen även vara ett effektivt sätt att styra in branschen i en viss riktning samt göra den mer likriktad. Om inte annat skulle den resultera i någon form av diskussion inom branschen som i sin tur skulle föra utvecklingen framåt.

Finns det behov av förbättrade underlag för riskanalyser?

Svahn har inte varit involverad i riskhanteringsprocessen och saknar därför insyn i denna fråga.

Finns det behov av bättre kommunikation mellan företag och myndigheter avseende explosioner?

Det är inte ovanligt att vägghållaren i tidiga skeden enbart kan ge svävande svar om hur explosioner ska hanteras i ett givet projekt. Det kan därför vara aktuellt för Skanska och andra exploatörer att bli bättre insatta i dessa frågor för att kunna föra en bättre

dialog med väghållaren. För detta behövs det då också en beställare som är mer insatt så att en konstruktiv dialog blir möjlig. Branschen önskar ordning och reda kring dessa frågor så att det skapas en tillräcklig förutsägbarhet.

Hantering av explosioner i ett infrastrukturprojekt i stadsmiljö är komplext och kräver samverkan mellan flera olika aktörer med sina respektive expertkunskaper. Problemet är så komplext att det inte finns någon som har kunskap om allting. Enligt Svahn är experter i sig inte nödvändigtvis en bristvara – däremot finns det en brist på personer som kan överbygga olika kompetensområden så att dessa effektivt kopplas samman. Svahn anser därför att det behövs en bättre samordning och återkoppling mellan olika delar av projektet så att kritiska delar kan inse vilka konsekvenser som tagna beslut får.

2.13 Costin Pacoste, ELU

Om den intervjuade

Costin Pacoste arbetar på ELU i Stockholm och fungerar där som teknisk specialist inom konstruktionstekniska frågor. Pacoste är sedan flera år tillbaka även adjungerad professor på KTH, Bro- och stålbyggnad, och har där bland annat fungerat som handledare för doktorander med inriktning mot dynamisk respons hos brokonstruktioner.

Hur hanterar du explosioner i ditt arbete?

Pacoste förklarar att man på ELU arbetar med analyser av effekterna från föreskrivna laster och lastfall. Beräkningsverktygen är baserade på 2D och 3D finita elementmodeller, även ofta med ickelinjära beteenden. Även förenklade beräkningsmodeller används. På ELU arbetar man dock ogärna med att utvärdera explosionslasters egenskaper, utan man utgår istället från laster definierade genom t.ex. föreskrivna maxtryck och impulstätheter och genomför sedan beräkningar som ger resulterande strukturrepons. Ofta utgår man från föreslagna designlösningar som sedan kontrollräknas med hänsyn till explosion. Vid behov kan sedan smärre modifieringar av utförandet föreslås, till exempel smärre öknningar av konstruktionsdelars dimensioner eller tillägg av extra böj- eller tvärrarmering.

Beräkningarna, som utgår från en given dimensioneringslast, baseras nästan uteslutande på finita elementberäkningar. Det är mycket ovanligt med rena ”handberäkningar” baserade på t.ex. FKR 2011 (Fortifikationsverket, 2011). Vid fall med komplicerade omgivningar – t.ex. vid luftstövåg i tätbebyggd stadsmiljö – tar ELU hjälp av experter utifrån för att identifiera de laster som förväntas angripa respektive byggnad eller strukturdelen.

På ELU finns idag tre specialister inom teknikområdet dynamisk strukturanalys (dock inte särskilt inom området explosionsbelastning) – två i Stockholm och en i Göteborg – och det finns ytterligare ca tre medarbetare som kan bistå i beräkningsarbetet, under handledning av en specialist. ELU har idag totalt ca 220 medarbetare och det bedöms som tillräckligt att tre av dessa är specialister inom området. Det är inte särskilt stor konkurrens mellan konsultföretagen inom denna sektor av byggkonstruktion och det förekommer inte heller att ELU har andra konstruktionskonsulter som uppdragsgivare.

Finns det ett behov av ökad kunskap om explosioner?

Pacoste menar att det finns ett sådant behov, dels på konsultsidan men särskilt hos beställarna. En explosionslast är ett reellt antagande om en möjlig händelse och ska inte varieras och anpassas från fall till fall. Mer kunskap om redundans och duktilitet borde finnas hos beställarna så att de förstår att strukturers utformning bör anpassas efter lasttypen. Enligt Pacoste glöms t.ex. rotationskapaciteten hos bärande element ofta bort när förenklade metoder används – en förståelse för samverkan mellan last och struktur är avgörande för att ge en effektiv byggnad med hög säkerhet.

Hur hanteras risken för explosioner?

Pacoste förklarar att ELU inte genomför några riskanalyser, varken före eller efter ett uppdrag. Till de explosionsberäkningar som genomförs görs heller inga sannolikhetsbedömningar avseende deras giltighet utan de förutsätts gälla till 100%.

Vad behöver förbättras vid hanteringen av explosioner i ditt arbete?

Allmänt, menar Pacoste, så behövs det ett förbättrat systemtänkande vid hantering av explosioner, med ökad insikt i samband mellan orsak och verkan. Han anser dock att det för vanligare konstruktionstyper, såsom standardtunnlar för trafik, är okej hur det hanteras idag. Vid mer unika projekt och objekt är hans erfarenhet att fördjupade riskanalyser med mera som görs också leder till en nivå som är okej. Detta gäller dock under förutsättning av att det handlar om olyckslaster, inte avsiktligt sabotage eller terrorattacker. Uppdrag som bygger på den senare typen av scenarion blir ofta sekretessbelagda, vilket leder till att det är mycket svårt eller omöjligt med erfarenhetsåterföring och kontroll. Troligen, menar han, kan detta dock leda till att hanteringen i vissa av dessa fall kan bli otillräcklig.

Finns det behov av förbättrade underlag för riskanalyser?

Pacoste kommer inte personligen i kontakt med denna del av processen och har därför ingen egentlig uppfattning i frågan. Enligt hans erfarenhet finns det i princip aldrig någon direkt kommunikation med riskanalytiker, utom någon enstaka gång i samband med mycket speciella fall.

Finns det behov av bättre kommunikation mellan företag och myndigheter avseende explosioner?

Pacoste anser att myndigheter oftast har en enkelriktad kommunikation – de föreskriver men lyssnar sällan eller aldrig. Ibland finns dock enskilda individer hos myndigheterna som är lyhörda och engagerade, vilket ger en viss möjlighet till erfarenhetsåterföring. I stort så anser Pacoste dock att det är trögjobbat i kontakten med myndigheter och att det i princip är omöjligt att få godkännande för alternativa, mer effektiva tekniska lösningar.

2.14 Mikael Hallgren, Tyréns

Om den intervjuade

Mikael Hallgren arbetar på Tyréns i Stockholm och fungerar där som teknisk specialist inom konstruktionstekniska frågor. Hallgren är sedan flera år tillbaka även adjungerad professor på KTH, Betongbyggnad, och har där bland annat fungerat som handledare för doktorander med inriktning mot explosionsbelastade konstruktioner.

Hur hanterar du explosioner i ditt arbete?

Hallgrens arbete är delad mellan områdena huskonstruktioner, anläggningskonstruktioner och bro/tunnelkonstruktioner. I regel hanteras explosioner olika inom dessa områden. Inom hus försöker man i första hand hitta ekvivalenta, statiska laster som man sedan dimensionerar ”som vanligt”. Inom bro/tunnel styrs dimensioneringen med hänsyn till explosion av de anvisningar som finns i Trafikverkets regelverk – dessa är dock också i regel förenklade. För anläggningar som kan vara mer komplexa, t.ex. kraftverk och stora överdäckningar, krävs oftast specialstudier och mer avancerade analyser.

I Hallgrens roll som teknisk specialist och expert på betongkonstruktioner stöter han ibland på större projekt och specialfall där man måste beakta lasten från explosioner. Eftersom Hallgren har en bakgrund som forskare med bl.a. forskningsprojekt om betongkonstruktioner utsatta för luftstöt våg, använder han sig av den kunskapen med dynamiska analyser som hanterar den dynamiska lasten (trycket), impulstätheten och den dynamiska responskapaciteten (impuls- och energiupptagningsförmåga) i konstruktionen.

Finns det ett behov av ökad kunskap om explosioner?

Hallgren anser att allmänkunskapen om explosioner hos byggkonstruktörer inom alla branschdelar måste förbättras. Tidigare har de få och enskilda fallen som uppkommit hanterats av några få experter inom området. Hallgren tror dock att risk- och hotbilden för explosioner, både olycksfall och antagonistiska attentat, tyvärr kommer att öka. Därför föreligger det allmänt också ett ganska stort FoU-behov avseende explosioner. Detta gäller inte bara strukturrespons och dimensionering utan även lastsidan, dvs. de dynamiska laster (tryck och impulstätheter) som kan förväntas i och intill anläggningar och byggnader.

Framöver, tror Hallgren, så måste konstruktörer i de flesta byggprojekt kunna beakta explosioner som ett lastfall i sitt dimensioneringsarbete. Dagens konstruktörer är dock i regel ”statiker” med begränsade kunskaper inom dynamik i allmänhet och explosionslast, med dynamisk strukturrespons, i synnerhet. Det föreligger således ett ganska stort utbildningsbehov. Det föreligger dock också ett ganska stort forsknings- och utvecklingsbehov för att utveckla de dimensioneringsmetoder och dimensioneringsverktyg som konstruktörerna kommer att behöva. Som antydde i svaret till den första frågan, ger dagens regelverk (normer) i bästa fall förenklade metoder för att dimensionera för explosionslast. Hallgren anser dock att dessa metoder oftast inte är tillräckliga för moderna konstruktioner, vilka tenderar att bli mer komplexa med tiden.

Hallgren framhåller att ett undantag bland dagens regelverk är Fortifikationsverkets konstruktionsregler, FKR 2011 (Fortifikationsverket, 2011), där mer detaljerade anvisningar ges för hur explosioner ska hanteras vid dimensionering. Reglerna i FKR är dock baserade på gammal forskning från 70-talet eller tidigare och är därför i stort behov av uppdateringar. Det pågår för närvarande också ett arbete med detta, dock med fokus på fortifikatoriska anläggningar. Det föreligger alltså även ett behov för regler för andra, civila anläggningar och byggnader. En god teoretisk bakgrund finns tillgängliga via MSB:s olika skrifter om impulsbelastade konstruktioner (Johansson och Leppänen, 2014). I dessa saknas dock fortfarande en hel del viktiga aspekter som måste behandlas, t.ex. dimensionering för dynamiska tvärkrafter.

Hur hanteras risken för explosioner?

Hallgren menar att konstruktörer idag i regel inte hanterat riskfrågor avseende explosioner. I bästa fall kommer information om sådana risker från riskanalytiker i tidiga skeden. Enligt Hallgren händer det dock även att dessa risker ibland försummas helt.

Vad behöver förbättras vid hanteringen av explosioner i ditt arbete?

Hallgren efterlyser tydliga regler och metoder för dimensionering med hänsyn till explosioner som kan användas av en bredare skara konstruktörer. Idag hanteras dessa frågor olika beroende på typen av projekt. I stora projekt med uppenbara risker för explosioner finns det i regel en hantering där man beaktar och även dimensionerar för detta men i mindre och mellanstora projekt upplever han att risken för samt hanteringen av explosioner ofta försummas.

Finns det behov av förbättrade underlag för riskanalyser?

-

Finns det behov av bättre kommunikation mellan företag och myndigheter avseende explosioner?

Hallgren anser att det i ett led där nya, bättre lastmodeller och dimensioneringsmetoder presenteras så kan kommunikationen förbättras. Det bör också finnas en aktiv dialog hur explosioner ska hanteras i byggprojekt av olika typer av anläggningar och byggnader, samt hur man ska hantera explosioner i och vid befintliga anläggningar och byggnader.

3 Kunskapsbehov om explosionslast och strukturrespons

3.1 Orientering

I detta avsnitt sammanfattas de erfarenheter och funderingar som rapportens författare har rörande explosionslast och strukturrespons – denna del kan även ses som en typ av intervju av författarna själva kring dessa frågor. Rapportens författare är konstruktörer och har därför ingen uttalad erfarenhet om riskhantering, därför ges här inte heller några inspel på detta delområde.

En gemensam nämnare för konstruktörens hantering av explosionslast och strukturrespons är behovet av lämpliga beräkningsverktyg. För en konstruktör finns det ett stort värde i att ha tillgång till relativt enkla beräkningsverktyg som kan användas för att beskriva olika typer av komplexa skeenden, t.ex. för att bestämma lasten från en explosion eller för att uppskatta strukturresponsen hos en explosionsbelastad konstruktion. Idag finns möjlighet att via avancerade beräkningsprogram simulera/beräkna vad som inträffar för sådana komplexa situationer. Att genomföra denna typ av analyser är dock tidskrävande samt erfordrar både djup specialistkunskap samt speciella program. Dessa program är i sin tur ofta dyra samt väldigt specifika och finns därför inte heller tillgängligt för den normala ingenjören. Därmed begränsas också möjligheten till ett fåtal att utföra denna typ av mycket avancerade beräkningar.

Förekomsten av förenklade beräkningsverktyg är dock även för dessa personer viktiga av flera skäl:

- Enkla beräkningsverktyg ger en grundläggande förståelse för den bakomliggande fysiken, vilket ökar möjligheten att det avancerade verktyget inte omvandlas till en svart låda.
- Enkla beräkningsverktyg ger möjlighet att uppskatta resultatet på ett snabbt sätt, vilket är bra både för att orientera sig om läget, få ett tidigt överslag samt som effektiv kontrollmetod till beräkningar utförda med mer avancerade verktyg.

Av dessa anledningar är det väsentligt att det finns enklare beräkningsverktyg av olika slag att tillgå. Framtagandet av dessa dock ofta ett omfattande förebyggande arbete bestående av utvärdering och kontroll av för att försäkra sig om att erhållna resultat är godtagbara. Ett bra sätt att kontrollera ett enkelt beräkningsverktyg är att jämföra det med resultat framtagna med hjälp av mer avancerade metoder, t.ex. olinjära FE-analyser, vilka på ett mer korrekt sätt beskriver inverkan av olika förenklingar som önskas göras. Därmed fås en möjlighet att på förhand hitta potentiella svagheter, möjligheter och/eller begränsningar i den förenklade beräkningsmodellen.

När detta är gjort fås en ökad tillförlitlighet i att använda det förenklade verktyget och detta kan då förhoppningsvis även till stor del ersätta beräkningar med mer avancerade metoder. Därmed ökas också möjlighet att göra omfattande insatser där det verkligen behövs. I många fall kan det också vara fullt tillräckligt att använda sig av sådana typer av enklare beräkningsverktyg. En annan fördel med förenklade verktyg av detta slag är att de kan leda till en ökad grundförståelse av det allmänna skeendet som verktyget avser att beskriva. Detta medför i sin tur en ökad grundkunskap som är mycket användbar för att kunna hantera situationer som skiljer sig mot det normala.

3.2 Explosionslast

3.2.1 Explosionslast vid gasolycka

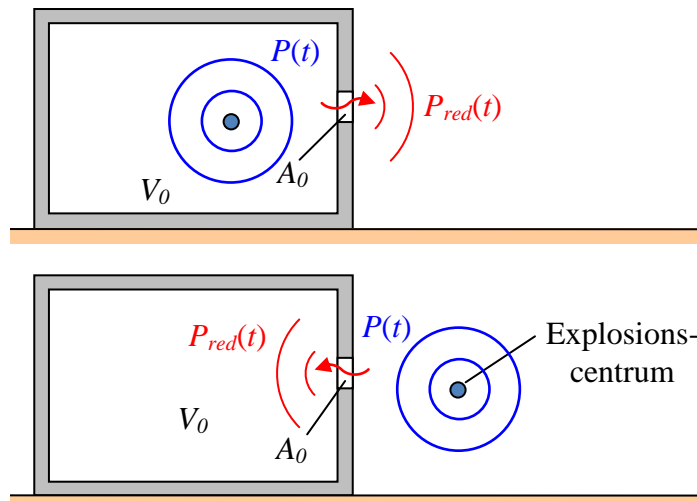
I en riskanalys kommer en gasexplosion ofta utgöra det mest sannolika fallet. Det är dock inte självklart hur den resulterande explosionslasten från en sådan händelse ska bestämmas. Ett sätt att uppskatta lasten från en gasexplosion är att använda sig av TNO Multienergimetod, se avsnitt B.7.3, i vilken lasten bestäms som en funktion av aktiverad gasmängd, styrkefaktor samt avstånd till lastkällans centrum. I Sverige saknas det dock riktlinjer för hur dessa parametrar ska mätas, vilket gör att den som ska uppskatta aktuellt lastvärden blir tämligen utelämnad. Detta är förmodligen också en starkt bidragande orsak till varför lasten som utgås ifrån i olika riskanalyser – i de fall där information om detta ens specificeras (Dahlén, 2019) – kan variera en hel del.

I Projektstaben (2018) och Norconsult (2017) har ett försök till en sådan kategorisering dock gjorts för en gasexplosion på en öppen yta (vägbana) med ett antal fordon utplacerade. Ett resonemang har presenterats om olika kombinationer av såväl ingående gasmängd, styrkefaktor samt placering av lastkälla vilka tillsammans ger förutsättningar för att beräkna potentiella lastvärden. I detta resonemang finns ett antal antaganden, framförallt kring valt värde på styrkefaktorn. Det skulle dock vara värdefullt att närmare undersöka vilka lastvärden som de antagna scenariona skulle resultera i med hjälp av numeriska simuleringar i mer avancerade beräkningsverktyg. Resultande laster skulle då kunna bestämmas för varierande konfigurationer av gasmängd, gastyp samt antal blockerande fordon både för en öppen yta och i en tunnel – dvs. två situationer som både skulle vara av betydande intresse. Denna typ av lastdata skulle sedan kunna utgöra ett stöd i både riskhanteringen och i bestämning av explosionslastens magnitud.

3.2.2 Läckage av last genom öppning

Vid händelse av en explosion mot en skyddande struktur med en befintlig öppning, alternativt att ett lokalt brott ger upphov till en sådan öppning, så kan det vara av vikt att bedöma storleken på det lastläckage som sker in/ut genom den öppningen, se schematisk illustration i Figur 3.1. Parametrar som påverkar vilken reducerad last $P_{red}(t)$ som läcker ut ur eller in i en byggnad beror bland annat på den verkande lasten $P(t)$, öppningsarean A_o samt den inneslutna volymen V_o .

Det är av intresse att ha tillgång till ett förenklat beräkningsverktyg för att uppskatta storleken på den ut-/inläckta lasten. En möjlig tillämpning för detta är att den uppkomna öppningen har uppstått genom att den skyddande strukturen lokalt gått sönder, t.ex. via ett genomslag i en vägg, ett krossat fönster eller en intryckt dörr. I Johansson (2016) ges anvisningar på en förenklad beräkningsmetod där tryckläckaget in i ett slutet utrymme kan uppskattas. Denna metod fungerar dock inte vid läckage ut ur en byggnad och är inte heller tillämplig för fall där öppningarna är förhållandevis stora i förhållande till den instängda volymen. Framtagandet av en mer nyanserad metod att bestämma in/utläckande explosionslast skulle därför vara önskvärt.

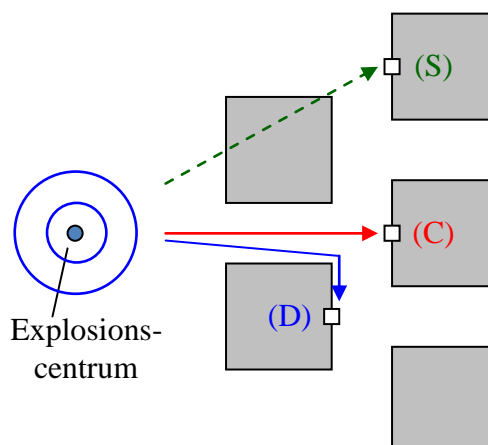


Figur 3.1 Schematisk illustration av lastläckage ut ur tunnel vid en invändig explosion eller in i byggnad vid en utvändig explosion.

3.2.3 Omgivningens inverkan på resulterande explosionslast

De empiriska samband som ges i avsnitt B.7 för lastbestämning från en explosion utgår från idealiserade samband vad gäller omgivningens påverkan – möjlighet till fri utbredning i en oändlig eller halvoändlig volym. Dessa samband är i många fall fullt tillräckliga men det finns också situationer där det är önskvärt att kunna uppskatta den aktuella lasten för ett geometriskt mer komplext fall. I Figur 3.2 illustreras hur typiska fall för en luftstötvåg som breder ut sig i en geometriskt komplex omgivning generellt sett påverkas:

- Kanalisering (*channeling*, C): Omgivningen ger upphov till en koncentration av lasten – lasten ökar.
- Avskärmning (*shielding*, S): Omgivningen ger upphov till ett skydd från lasten – lasten minskar.
- Diffraction runt hörn (D): Stötvågen rör sig runt ett hörn – lasten minskar.



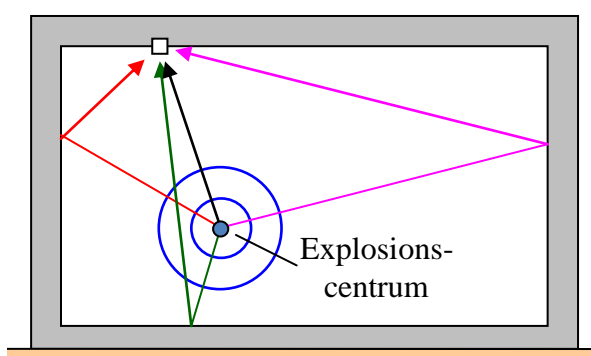
Figur 3.2 Schematisk illustration av inverkan på stötvågens utbredning in i en komplex geometrisk omgivning: (C) – kanalisering (*channeling*), (S) – avskärmning (*shielding*), (D) – diffraction.

Den principiella effekten av vad som händer med lasten i de fall som illustreras i Figur 3.2 är tämligen enkla att förstå. Det är dock svårt att göra en mer precis uppskattning av vilken inverkan dessa fenomen har på den last som når fram till den struktur som är av intresse. En vanlig approximation är att helt bortse från de hinder som befinner sig mellan explosionskälla och utsatt struktur. En sådan approximation kan i många lägen vara tillräckligt god men kan, beroende på situation, dock även vara både konservativ och icke konservativ. Det kan också vara önskvärt att göra en mer noggrann uppskattning av den resulterande lasten och för en sådan situation skulle det vara värdefullt att kunna uppskatta denna typ av effekter med enkla verktyg.

I litteraturen finns det flera studier kring detta varav en del finns sammanställt i Johansson och Laine (2012a) – ett möjligt tillvägagångssätt att hantera en sådan situation finns även föreslaget i samma referens. I exempelvis Johansson och Laine (2012b) presenteras ett koncept för uppskattning av hur den resulterande lasten påverkas när stötvågen rör sig genom en komplex geometrisk omgivning. Ett uppföljande arbete, som behandlar vad som händer när stötvågen rundar ett hörn har även presenterats i Dalenius och Johansson (2019). En sammanställning av resultaten från denna typ av studier, verifiering med hjälp av mer avancerade beräkningsverktyg samt kompletterat med utarbetning av konkreta riktlinjer skulle vara värdefullt.

3.2.4 Effekt av flerfaldiga reflexioner i slutna utrymmen

I en tunnel kan den geometriska komplexiteten vara tämligen begränsad men även för ett sådant förhållandevis enkelt fall kan det snabbt bli komplext att bedöma storleken på den resulterande explosionslasten i en given punkt. Orsaken till detta är att den resulterande lasten dels är en effekt av flera samverkande stötvågor, så som illustreras i Figur 3.3, och dels är en effekt av den partiella fördämningseffekt som uppstår inne i tunneln, se avsnitt B.3 och B.4.



Figur 3.3 Schematisk illustration av direktvåg samt reflekterande vågor inne i en tunnel vid en inverkan på stötvågens utbredning in i en komplex geometrisk omgivning.

Det är av intresse att närmare undersöka i vilken mån det är möjligt att använda sig av enkla överslag där inverkan av två eller flera vågor summeras. En effekt fås av sned reflexion men om detta approximativt kan bortses ifrån kan möjligen en acceptabel uppskattning fås via enkla medel som utgår från de reflekterade vågornas längd. En sådan metod skulle dock behöva kontrolleras med avancerade FE beräkningar av stötvågens utbredning inne i tunneln.

Förutom reflexionseffekter så kommer det även uppstå ett långvarigt fördämningstryck inne i tunneln som verkar ungefär lika över samtliga ytor. En metod för att uppskatta fördämningstrycket inne i en tunnel är av intresse. Här fås inte riktigt samma effekt som i ett mer slutet utrymme eftersom avlastningsarean (tunnelns öppna tvärsektion i sin längdriktning) är stor i förhållande till den inneslutna volymen.

3.3 Strukturrespons

3.3.1 Orientering

En strukturs förmåga att motstå en explosionslast utgår från dess förmåga att generera en energiupptagningsförmåga som är större än den energi som explosionslasten för in i strukturen, se avsnitt C.2. Med anledning av detta är det väsentligt att den belastade strukturen kan uppvisa en stor plastisk deformationsförmåga, något som erhålls genom att dimensionera den att nå brott i böjning samt att spröda brott av tvärkraft undviks. Av detta inses att strukturens deformationskapacitet samt tvärkraftsrespons är viktiga områden. Speciellt det senare kan ge upphov till fenomen som skiljer sig betänkligt från det koncept som används vid statisk belastning och i avsnitt 3.4 presenteras en kort överblick av dessa. Hur plastisk deformationsförmåga och tvärkraftsrespons kan hanteras i ett dimensioneringsperspektiv behandlas dock i en parallell studie, se förordet, och för en beskrivning av de behov som finns inom dessa båda områden hänvisas till Johansson *et al.* (2020).

3.3.2 Inverkan av tryckande normalkraft

De beräkningsanvisningar som ges i litteraturen för en explosionsbelastad struktur utgår i regel från ett förenklat fall där inverkan av statisk last från omgivningen, t.ex. tryckande vertikallast i en vägg som bär ett ovanpåliggande bjälklag, inte beaktas. En sådan normalkraft N medför dock en ökad momentkapacitet M_{Rd} hos den belastade betongstrukturen (andra ordningens effekter kan dock medföra att strukturens effektiva momentkapacitet minskar). Detta innebär att den ekvivalenta statiska last q_{ekv} som tillåts verka mot väggen ökar, vilket i sin tur medför att den dimensionerande tvärkraften V_{Ed} också ökar: Dvs. en ökande tryckkraft N ger en ökad momentkapacitet M_{Rd} , vilket i sin tur ger en ökande dimensionerande tvärkraft V_{Ed} .

En tryckande normalkraft medför även att betongens tvärkraftskapacitet $V_{Rd,c}$ ökar. Beroende på geometri och befintlig armeringsmängd så kan denna ökning dock vara mindre (förmodligen normalfallet) än det tillskott till den dimensionerande tvärkraften ΔV_{Ed} som fås av en tryckande normalkraft. Dvs. ofta gäller att $\Delta V_{Ed} > \Delta V_{Rd,c}$.

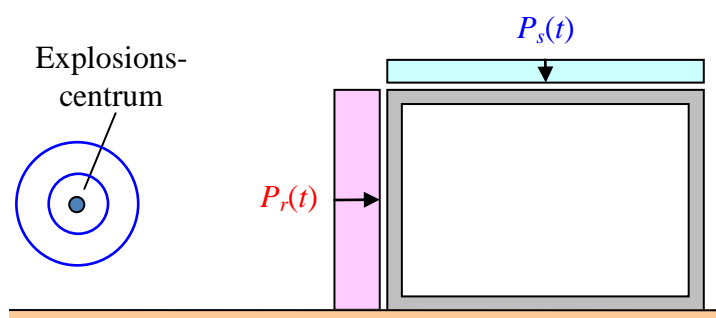
För ett fall där armeringsbyglar erfordras för att klara den resulterande dimensionerande tvärkraften så fås ingen ökning i strukturens tvärkraftskapacitet $V_{Rd,s}$ eftersom denna, enligt Eurokod 2 (SIS, 2008b), är helt fristående från betongens tvärkraftskapacitet samt oberoende av normalkraftens storlek. Som jämförelse kan noteras att det i det svenska och amerikanska regelverken, FKR 2011 (Fortifikationsverket, 2011) respektive UFC 3-340-02 (DoD, 2008), används äldre modeller i vilka tvärkraftskapacitet från både betong och armeringsbyglar kombineras på ett sätt som liknar det som användes i det tidigare svenska regelverket BBK.

Det är oklart hur inverkan på kvoten V_{Ed} / V_{Rd} bör hanteras för ett fall med tryckande normalkraft. Vid dimensionering förefaller det vara rimligt att utgå från den beräkningsmetodik som beskrivs i Eurokod 2 men detta kan samtidigt medföra att mängden tvärkraftsarmering i en impulsbelastad konstruktion, utsatt för tryckande normalkraft, kan behöva ökas betänkligt. En sådan situation skulle exempelvis kunna uppstå i betongväggar där en stor last från ovanliggande byggnad och/eller jordmassor kommer ner. För ett sådant fall skulle utnyttjandegraden med hänsyn till böjning kunna bli väldigt låg (på grund av gynnsamma effekter från den tryckande normalkraften) samtidigt som tvärkraftsdimensioneringen skulle kunna bli kritisk.

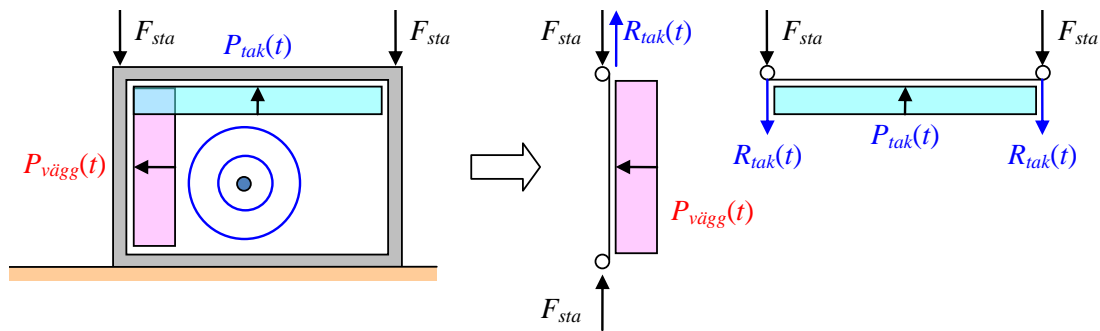
Alternativt bör det hittas ett resonemang som för en sådan här situation tillåter någon form av kombination av betongens och tvärarmeringens tvärkraftskapaciteter. Eventuellt skulle det kunna vara befogat att i en kapacitetskontroll, med hänsyn till explosion, ignorera inverkan av den tryckande normalkraften. Om så är fallet, är det dock oklart om denna inverkan borde ignoreras enbart för tvärkraften eller även för momentkapaciteten. Pelare som utsätts för en stor statisk last påverkas mycket av den tryckande normalkraften och ovan beskrivna fenomen skulle därför vara aktuella för dem. För en sådan pelare finns även risk att kvoten mellan tryckzonshöjd x och effektiv höjd d blir så hög att gränsen passeras för när strukturens plastiska deformationsförmåga får utnyttjas. Om så blir fallet kan inte längre strukturens plastiska omlagringsförmåga nyttjas. Detta medför att pelaren begränsas till en linjärelastisk respons, vilket skulle göra det problematiskt att teoretiskt påvisa tillräcklig bärförmåga i hårt belastade pelare som utsätts för en explosionslast.

3.3.3 Explosionslast mot flera konstruktionsdelar samtidigt

Vid explosionslast mot en struktur kan flera konstruktionsdelar påverkas samtidigt. För en utvändigt explosion kan en situation enligt Figur 3.4 uppkomma när genererade stötvågor, via diffraktion, även verkar mot ytor som inte är synliga från lastcentrum. Via tryck mot taket uppstår då även en tryckande normalkraft mot den primärt belastade väggen. Vid en invändig explosion, t.ex. i en tunnel, fås en motsvarande situation när explosionslasten som verkar mot taket även ger upphov till dragande normalkrafter i väggarna, se Figur 3.5. På motsvarande sätt ger även explosionslasten som verkar mot väggarna upphov till dragande normalkrafter i takplattan.



Figur 3.4 Utvändigt explosion mot byggnad. Vid belastning med ett reflekterat tryck P_r mot den närmaste fasadväggen så kommer det samtidigt verka ett oreflekterat tryck P_s mot taket. Lasten mot taket kommer i sin tur, via sin stödreaktion, ge upphov till en normalkraft mot väggen.



Figur 3.5 Schematisk illustration av tillkommande normalkrafter mot vägg i tunnel vid invändig explosion. En yttre statisk last ger upphov till en statisk kraft F_{sta} mot tunnelvägg medan explosionslast mot tunneltak gör att det även uppstår en dragande normalkraft $R_{tak}(t)$ i väggen.

En explosionslast kan, beroende på situation, via intilliggande konstruktionsdelar således ge upphov till både tryckande och dragande normalkraft mot den studerade konstruktionen. Dessa tillkommande krafter är tidsberoende och beror på den verkande explosionslasten men även på egenskaperna hos intilliggande konstruktionsdelar. Normalkraften kommer i sin tur påverka både styvhet och lastkapacitet hos den belastade konstruktionsdelen. I en avancerad analys där hela det belastade systemet betraktas i en och samma modell är det möjligt att automatiskt fånga dessa effekter. Det är dock oklart hur denna typ av effekter bör hanteras i en förenklad beräkningsmodell.

Det är förmodligen mycket ovanligt att, för ett fall enligt Figur 3.4, vid beräkning av väggen beakta inverkan av takets tillkommande stödreaktion, orsakad av explosionslast. Ett argument för att en sådan effekt skulle kunna bortses ifrån är att uppkomsten av normalkrafter i väggen orsakade av explosionslast uppstår först vid ett senare tillfälle när det kritiska skedet för väggen redan kan vara förbi. Detta synsätt gäller dock inte generellt utan beror på lastens egenskaper samt aktuell geometrisk situation. För en explosion inne i en tunnel, se Figur 3.5, kommer tidsskillnaderna i responsen hos tak och vägg sannolikt vara mindre än vad som gäller för ett fall enligt Figur 3.4 och här kan det därför förmodligen vara mer motiverat att beakta samverkan av normalkrafter från intilliggande konstruktionsdelar.

Om den, från en intilliggande konstruktionsdel, verkande normalkraften är känd är det möjligt att i en enkel enfrihetsgradsmodell (SDOF-modell) göra en dynamisk beräkning där lastkapaciteten justeras med hänsyn till den aktuella normalkraften. Approximativt skulle t.ex. normalkraften orsakad av taket (dvs. takets reaktionskraft i kopplingen till väggen) i Figur 3.4 eller Figur 3.5 först kunna bestämmas i en enskild SDOF-beräkning och därefter användas som indata till en annan SDOF-beräkning som simulerar responsen hos den belastade väggen.

Ett potentiellt problem här är dock att även taket påverkas av en yttre normalkraft, dvs. reaktionskraften som fås från väggens koppling till taket. Ett alternativt skulle därför vara att koppla samman dessa båda delar till en gemensam 2DOF-modell, varvid det blir möjligt att beskriva påverkan från normalkrafterna i både tak och vägg samtidigt. En sådan 2DOF-modell skulle även kunna ta i beaktande normalkraftens inverkan på väggens/taket styvhet. En möjlig risk med en sådan modell skulle dock vara att den blir alltför komplicerad att arbeta med.

I den typ av förenklad dynamisk beräkning som görs idag så är det förmodligen vanligt att inte alls beakta inverkan av en tidsberoende normalkraft. Eventuellt beaktas någon form av förenklad inverkan av max/min-värdena på en sådan normalkraft. Om normalkrafter från närliggande konstruktionsdelar inte beaktas i beräkningen finns dock en risk att den belastade strukturens kapacitet överskattas (dragande normalkraft medför en minskad lastkapacitet medan en tryckande normalkraft oftast medför en ökad kapacitet). Det vore därför önskvärt att få en bättre uppfattning av hur stora dessa eventuella effekter är samt hur de approximativt kan beaktas i en lämplig förenklad beräkningsmodell, företrädesvis en SDOF men möjligen även en 2DOF.

3.3.4 Tryckande normalkraft på grund av uppsprickning

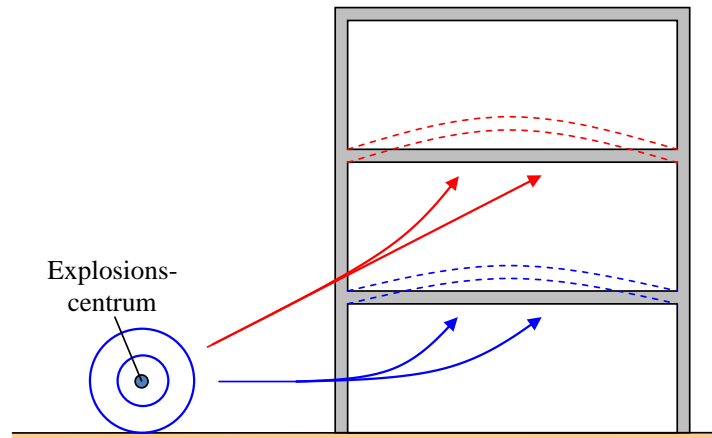
Förutom de normalkrafter som uppkommer från närliggande konstruktionsdelar i enlighet med beskrivning i avsnitt 3.3.3, så kan det även uppstå normalkrafter i t.ex. en vägg med vertikalt mothåll. Detta har observerats i FE-analyser i Johansson (2000) samt i försök och analyser på FOI (2017, 2019). Orsaken till denna uppkomst beror förmodligen på att det neutrala lagret inte är centriskt placerad och att önskade deformationsrörelser på den tryckta och den dragna sidan därför blir olika. Detta ger i sin tur upphov till en ökad tryckande normalkraft. Det finns dock behov av att studera detta närmare för att hitta en tydligare förklaringsmodell bakom detta fenomen.

Ovanstående fenomen skulle kunna ge upphov till betydande tillskott till en tryckande normalkraft som verkar i väggen. Med hänsyn till böjning medför ett sådant tillskott sannolikt att strukturens bärförmåga ökar (risken finns dock att normalkraften blir så stor att tillåten plastisk deformationsförmåga minskar så mycket att den totala energiupptagningsförmågan ändå minskar). I enlighet med vad som anges i avsnitt 3.3.2 kan det även vara ogynnsamt med en ökande normalkraft med hänsyn till risk för tvärkraftsbrott. Dvs. uppkomsten av sådana tryckande normalkrafter riskerar medföra att strukturen erhåller ett sprött tvärkraftsbrott istället för ett segt böjbrott.

3.3.5 Upplyft av konstruktionsdel med otillräcklig bärförmåga

Vid belastning av en byggnad som saknar en tät fasad kommer stötvågslasten tränga in i denna och ge upphov till laster som önskar trycka bjälklagen vertikalt uppåt så som schematiskt illustreras i Figur 3.6. För ett bjälklag som klarar av att bära den uppåtriktade lasten så uppstår inga problem. I dagens byggnader är det dock vanligt att använda så kallade HD/F-bjälklag, dvs. förspända betongelement som är fritt upplagda och som saknar armering i tvärsnittets överkant. När ett sådant bjälklag utsätts för en last underifrån, som deformerar det uppåt, så finns också (pga. avsaknaden av överkantsarmering) också en överhängande risk att det beräkningsmässigt går till brott.

I många fall kan det dock påvisas att det maximala upplyftet av bjälklaget begränsas till ett fåtal [mm] och i ett sådant läge synes det överdrivet att betrakta bjälklaget som kollapsat. När detta högst begränsade upplyft är avklarat faller bjälklaget ner igen (via sin återsvängning samt effekt av tyngdkraften) och kommer då återigen bli belastad på ett sådant sätt att dess befintliga armering i tvärsnittets underkant kan bära uppkomna laster.

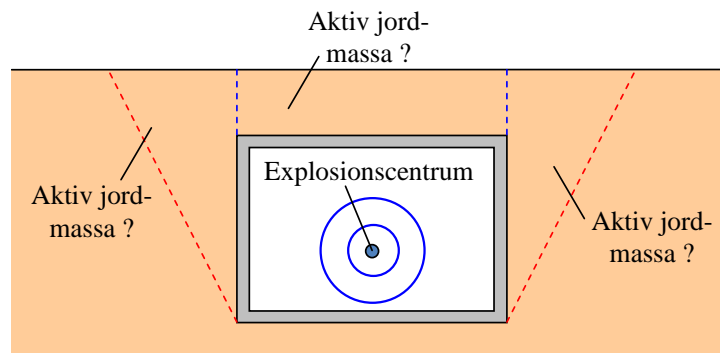


Figur 3.6 Schematisk illustration av inverkan av en utvändig explosion som tränger in i en intilliggande byggnad där den inträngande lasten trycker bjälklaget vertikalt uppåt.

Ett möjligt sätt att hantera detta är att gjuta på en övre betongplatta som armeras. En sådan lösning är dock både dyr och opraktisk. En mer praktiskt anpassad lösning skulle därför vara att föredra. Det vore önskvärt om det kan konstateras att ett dylikt upplyft kan betraktas som ofarligt så länge som den uppkomna deformationen inte överskrider ett givet värde. Kontroll görs därefter enbart för att beakta inverkan av bjälklagets återsvängning när det åter faller tillbaka mot sina upplag.

3.3.6 Invändig explosion i tunnel med omgivande jordmassor

Vid en invändig explosion i en betongtunnel som omges av jordmassor, se Figur 3.7, så ger dessa jordmassor en gynnsam effekt på tunnelns förmåga att motstå den aktuella lasten. Dels kommer jordmassorna bidra med en ökande massa i vägg/tak och dels kommer det uppstå gynnsamma mothållande tryck som motverkar explosionen.



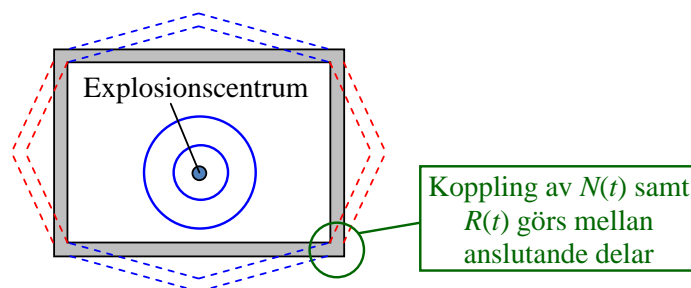
Figur 3.7 Schematisk illustration av en invändig explosion i en tunnel som omges av jordmassor på tak samt utanför vägg.

Tillskottet till mothållets massa beror på hur mycket som det omgivande markmaterialet trycks samman. I litteraturen saknas det dock tydliga anvisningar för hur denna tillskotts massa kan uppskattas. Det finns ett visst stöd för hur detta kan hanteras i form av beräkningshjälpmedel framtagna för Ringen och Yttre tvärleden i Stockholm (Vägverket, 1997) samt tankar presenterade i Johansson (2014). Det skulle dock vara värdefullt om dessa ingenjörsmässiga tillvägagångssätt kan bekräftas med hjälp av mer avancerade beräkningsverktyg.

3.3.7 Strukturrespons med linverkan och membranverkan

Dimensionering med hänsyn till explosioner görs normalt med antagande om att den belastade strukturen bär i böjning. Med rätt förutsättningar finns det dock möjlighet att utnyttja en mer effektiv metod att bära den pålagda explosionslasten – så kallad lin- eller membranverkan. En sådan kraftupptagning förutsätter att strukturen har en kontinuerlig (ej avsliten) armering samt att dess randvillkor klarar av att ta upp de laster som bärmotoden genererar. Förenklat sett innebär lin- och membranverkan att lastupptagningen sker via stora deformationer på så sätt att lasterna bärs i strukturens axialled (som en belastad lina eller membran), se avsnitt C.3.3.

För att kunna använda lin/membranverkan i en struktur behöver vissa villkor uppfyllas. En genomgång av vilka dessa är samt hur det ska säkerställas att de uppfylls behöver göras. Vid statisk last krävs ett fullständigt mothåll mot den kraft som verkar i linan – ett krav som i praktiken kan vara svårt att uppfylla. Vid en explosionslast kan detta krav dock sannolikt göras mindre strikt och det kan istället vara tillräckligt med att det finns en mothållande massa som bidrar till den erforderliga energiupptagningsförmågan. Förmodligen skulle det exempelvis vara möjligt att påvisa en effektiv lin-/membranverkan vid en innesluten explosion i t.ex. en tunnel. Den resulterande deformationsbilden skulle i ett sådant fall kunna liknas vid vad som illustreras i Figur 3.8. Här balanserar väggar, tak och golv den verkande lasten med hjälp av lin/membranverkan där det i stödpunkterna mellan de olika konstruktionsdelarna uppstår ett mothåll av den last som verkar mot intilliggande konstruktionsdel.



Figur 3.8 Schematisk illustration av lastupptagning med lin/membranverkan vid innesluten explosion i en tunnel. Resulterande normalkraft ($N(t)$) och mothållande kraft $R(t)$ ger förutsättningar för respons.

En viktig parameter vid lin/membranverkan är att kunna bedöm hur mycket armeringen kan töja sig innan den slits av. En sådan tillåten töjning kan uttryckas som en medeltöjning över hela strukturens längd och kommer vara märkbart lägre än det karakteristiska brottvärde för armering som exempelvis anges i Eurokod 2. Denna medeltöjning kommer dels vara en funktion av hållfasthetskvoten f_u/f_y , armeringens brotttöjning ε_u , vidhäftningen till betongen samt förmodligen även effektiv armeringsarea i förhållande till omgivande betong. Värden på denna medeltöjning saknas i litteraturen för den armering som används i Sverige idag. En uppskattning av ett sådant medelvärde, baserat på statistiska försök och fallviktsförsök utförda av Ansell och Svedbjörk (2000, 2003a, 2005), presenteras visserligen i Johansson och Laine (2012c) men mer systematiskt framtagna värden på denna medeltöjning är önskvärt.

3.3.8 Materialegenskaper vid tvärkraftskontroll

I avsnitt 3.3.2 har det konstaterats att en ökande momentkapacitet i strukturen även medför en ökande dimensionerande tvärkraft. I det fallet beror den ökande momentkapaciteten på inverkan av en tryckande normalkraft. Ett annat alternativ är dock att den armering som används är starkare än vad som antas, alternativt att det finns mer böjarmering i tvärsnittet än vad som har utgått ifrån i beräkningen. Om strukturens momentkapacitet av någon anledning blir större än den förväntade så kommer detta således även medföra att den dimensionerande tvärkraften, som strukturen ska klara av att bära, också ökar. Dvs. vid bestämning av den last som ger upphov till dimensionerande tvärkraft är det inte längre konservativt att utgå från låga materialvärden på ingående böjarmering. Vid normal dimensionering utgås från 5 %-fraktilen hos materialet eftersom detta bedöms utgöra ett antagande på säker sida. Enligt ovan så blir detta dock ett icke konservativt antagande vid bestämning av dimensionerande tvärkraft. Istället skulle det för en sådan situation vara konservativt att utgå från ett högt materialvärde hos böjarmeringen vid bestämning av dimensionerande tvärkraft.

Det är av intresse att undersöka vilket materialvärde som bör utgå ifrån vid beräkning av den dimensionerande tvärkraften. Det som får praktisk inverkan på momentkapaciteten kommer i de flesta fall vara begränsat till böjarmeringens hållfasthet och i det fortsatta resonemanget utgås här därför enbart från detta materialvärde. Eftersom den undre 5%-fraktilen normalt utgås ifrån vid dimensionering så kan det argumenteras för att den övre fraktilen (95%-fraktilen) bör användas för materialet i ett sådant här fall. En analogi kan göras med hur minimiarmering med hänsyn till spröda tvärsnitt bestäms i Eurokod 2. Även här är det icke konservativt att anta ett lågt hållfasthetsvärde och där används ett medelvärde för, i det fallet, betongens draghållfasthet.

Vid normal dimensionering med slakarmering utgås ofta enbart från armeringens flytgräns, något som också är kopplat till att det bedöms vara konservativt att bortse från kapacitetshöjande effekter kopplade till armeringens töjningshårdnande. För ett fall där ett högt hållfasthetsvärde är konservativt så skulle det dock även bli aktuellt att beakta inverkan av eventuella hårdnandeeffekter hos armeringen. För små mekaniska armeringsmängder skulle detta kunna innebära att det skulle vara aktuellt att utgå från den övre fraktilen på armeringens brottspänning, $f_{u,95}$, istället för det normalt använda värdet på undre flytspänningen, $f_{y,05}$. För armering K500C skulle detta innebära en betydande skillnad i materialvärde – omkring 690 MPa istället för det normala 500 MPa, en skillnad på 38 %.

Baserat på ovanstående resonemang vore det rimligt att använda sig av ett justerat synsätt vid bestämning av dimensionerande tvärkraft. En sådan justering skulle i så fall eventuellt kunna hanteras med en enkel förstöringsfaktor på den last som beskriver den dimensionerande tvärkraften. Genom att beakta den ingående spridningen i aktuella materialparametrar samt använda statistiska metoder (t.ex. Monte Carlo-metoden) så kan det möjligen påvisas att risken för överutnyttjande inte är så stort som kan fås intryck av i ovanstående resonemang. En sådan statistisk jämförelse skulle vara av intresse att utföra för att bättre bedöma i vilken mån nuvarande beräkningspraxis borde justeras.

Förutom de effekter och påverkans effekter som beskrivs ovan så finns även så kallade töjningshastighetseffekter som ökar både armeringens och betongens materialegenskaper. Att korrekt beakta detta skulle sannolikt medföra ytterligare komplikationer utöver de som anges ovan.

3.3.9 Trycksträvans vinkel vid tvärkraftsarmering

Beroende på situation kan tvärkraftskapacitet för tvärkraftsarmerade betongbalkar ut-sätta för impulslast beräknas i enlighet med Eurokod 2 (SIS, 2008b). Vid normal (sta-tisk) dimensionering enligt Eurokod 2 så kan trycksträvans vinkel antas till $\theta \approx 22-45^\circ$ ($\cot \theta = 1,0-2,5$) – ju flackare lutning desto fler armeringsbyglar kan antas vara verk-samma för upptagning av den aktiva tvärkraften. Detta synsätt baseras på ett plasti-citetsteoretiskt synsätt där det kan ske omlagringar i konstruktionen som möjliggör utvecklandet av en tillräckligt flack vinkel θ . Som jämförelse kan nämnas att det för ett fall utan tvärkraftsarmering antas att trycksträvans vinkel blir 45° . Den omlagring i strukturen som krävs för att nå en sådan flack vinkel som $\theta = 22^\circ$ kräver förmodligen en viss tid för att hinna utvecklas. I en impulsbelastad konstruktion sker dock belast-ningen och responsen mycket snabbt – den maximal tvärkraft som syftas på här kan ha hunnit utvecklas och verka inom några få ms.

Det bör utredas om det är rimligt att en sådan omlagring som möjliggörs i Eurokod 2 till fullo hinner utvecklas under den tid som står till förfogande, eller om det finns risk att skjuvsprickans lutning är större än vad som kan antas vid en statisk belastning. Om en tillräcklig omlagring inte hinns med finns det risk att ett färre antal byglar än avsett aktiveras att balansera den verkande tvärkraften. Detta skulle i så fall medföra en för-sämrad tvärkraftskapacitet som kan leda fram till ett tvärkraftsbrott. Eventuellt bör det införas en nedre begränsning på vilken vinkel θ som kan tillåtas i samband med en impulsbelastning. I Johansson (2016) har ett förslag på en sådan begränsning på $\theta = 30^\circ$ ($\cot \theta = 1,75$) framförts. Detta värde har dock ingen djupare teoretisk bak-grund utan baseras på ett ingenjörsmässigt resonemang. Det skulle därför vara önskvärt med en mer nyanserad studie av detta för att belysa huruvida skjuvsprickans vinkel utgör ett potentiellt problem eller inte.

3.4 Dynamiska skjuvbrott

3.4.1 Orientering

Vid dimensioneringen av betongkonstruktioner att motstå effekterna av explosions-laster, stötar eller andra svåra dynamiska belastningar, tillåts normalt konstruktionerna att deformeras plastiskt för att bättre ta tillvara dess energiabsorberande kapacitet. Bärverksdelar dimensioneras då i allmänhet för böjning för att uppnå en säker konstruktion. Verkliga händelser och forskningsförsök har dock visat att mycket intensiva belastningar från explosioner på nära håll kan orsaka lokala skjuvbrott i betongkonstruktioner.

3.4.2 Förekomst av skjuvbrott vid dynamisk belastning

En i luften detonerande laddning genererar en stötvåg som fortplantar sig i överljuds-hastighet i alla riktningar. När stötvågen från en explosion träffar på ett hinder såsom en vägg, platta eller pelare i ett bärverk, förstärks trycket på grund av de reflexioner som uppstår mot de olika ytorna. I fall där det reflekterade trycket är tillräckligt högt, kan lokala brott i bärverksdelar såsom bärande väggar eller pelare uppstå.

Vid dimensioneringen av betongkonstruktioner att motstå effekterna av explosions-laster, stötar eller andra svåra dynamiska belastningar, är det inte lämpligt att enbart beakta den elastiska strukturrensen. Den belastade bärverksdelen bör i en sådan

situation fall tillåtas att deformeras plastiskt, för att bättre ta tillvara dess energiabsorberande kapacitet. En viss grad av skador, dvs. sprickbildning och plasticering av armering på grund av utböjning, brukar därför accepteras vid dimensionering av betongkonstruktioner som ska motstå explosionslaster. Bärverksdelar dimensioneras då i allmänhet för böjning för att uppnå en säker konstruktion. Dock har verkliga händelser (FEMA, 1996) visat att mycket intensiva belastningar från explosioner på nära håll kan orsaka lokala skjuvbrott i betongkonstruktioner. Dessa skjuvbrott är av spröd karaktär och kan inträffa vid relativt små deformationer. Efter bombattentatet i Oklahoma City rapporterades exempelvis att två betongpelare på markplan gick till skjuvbrott på grund av den höga lastintensitet som de utsattes för. Förutom vid verkliga händelser, har skjuvbrott i betongkonstruktioner också observerats experimentellt i flera undersökningar avseende dynamiska belastningar från explosioner och stötar, se t.ex. Slawson (1984), Huges och Beeby (1982), Niklasson (1994), Magnusson *et al.* (2010b), Kishi *et al.* (2002) och Morales-Alonso *et al.* (2011).

Flera fall av dessa försök bekräftar att bärverksdelar som går till sega böjbrott vid statisk eller kvasi-statisk belastning, kan gå till skjuvbrott vid snabba dynamiska belastningar. Detta fenomen illustreras i Figur 3.9 som visar foton av en armerad betongbalk belastad till böjbrott vid kvasi-statisk belastning samt motsvarande balk med samma dimension, armering och materialegenskaper men belastad med luftstötstång från en explosion på ovansidan av balken. I det dynamiska fallet gick balken till sprött skjuvbrott. För att förstå mekanismerna vid dynamiska skjuvbrott har flera numeriska simuleringar utförts där experimentella försök på dynamiskt belastade betongkonstruktioner, se t.ex. Magnusson (2007, 2019), Magnusson *et al.* (2010a), Morales-Alonso *et al.* (2011), Kamali (2012) samt Andersson och Karlsson (2012). Resultat av dessa simuleringar ger underlag till förståelsen av dynamiska skjuvbrott och till utarbetandet av analytiska dimensioneringsmetoder och dimensioneringsanvisningar som kan användas i praktiken. I Figur 3.10 och Figur 3.11 visas några exempel på sådana simuleringresultat från Magnusson (2019).

Mekanismerna bakom dynamisk skjuvning är ännu inte helt klarlagda och dessa har därför undersökts vidare i Magnusson (2019). Huvudsyftet med detta arbete var att experimentellt och teoretiskt analysera skjuvbrott i armerade betongelement utsatta för jämnt utbredd dynamisk last. Den experimentella delen av projektet bestod av betongbalkar, med varierande betonghållfasthet och armeringsutformning, utsatta för explosionslaster. En försöksserie omfattades av stålfiberarmerade balkar och en annan av betongbalkar med böjarmeringsstänger (men utan tvärkraftsarmering). En tidigare undersökning (Magnusson, 2007) visade att de fiberarmerade balkarna kan bära en viss explosionslast. I den undersökningen observerades att de balkar som utsattes för explosionslast gick till böjskjuvbrott medan motsvarande balkar gick till böjbrott i de kvasi-statiska försöken. Skjuvbrotten uppstod i balkar med relativt höga böjarmeringsinnehåll. Dessa balkar användes senare som referensbalkar för numeriska simuleringar med Ansys Autodyn där simuleringarna visade på möjligheten att förutsäga böjskjuvbrott.

I en angränsande laborativ studie (Ansell och Svedbjörk, 2002) med fallviktsbelastade slakarmerade betongbalkar över två eller fler stöd, observerades också koncentrerade deformationer nära de inre mellanstöden. Det har dock inte undersökts om belastningshastigheten i detta fall haft inverkan på brottmoderna. Vikten av belastningshastighet i kombination med materialegenskaper, geometri och randvillkor diskuteras också i Ahmed (2015) där fokus är på unga betongkonstruktioner utsatta för stötstångsbelastningar. Studien innehåller jämförelser mellan observationer och mätningar från

fält och laboratorium samt finita elementberäkningar. I Magnusson *et al.* (2014) görs en genomgång av litteraturen om skjuvning i armerade betongkonstruktioner som utsätts för snabba dynamiska belastningar, exempelvis explosioner. Dessutom redovisas egna teoretiska studier som fokuserar på beteendemässiga aspekter av dynamisk skjuvning och på de parametrar som styr brottmoderna böjbrott, böjskjuvbrott och så kallad direkt skjuvning. Bland annat konstateras att brottmoden till stor del beror på lastens intensitet men också på styvheten i bärverksdelen.

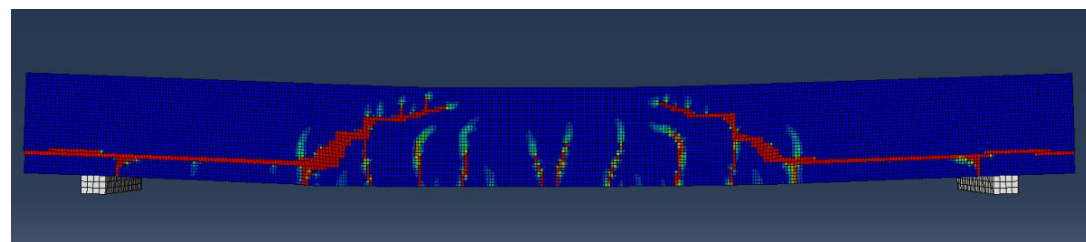


(a) Balk efter kvasi-statisk belastning till böjbrott

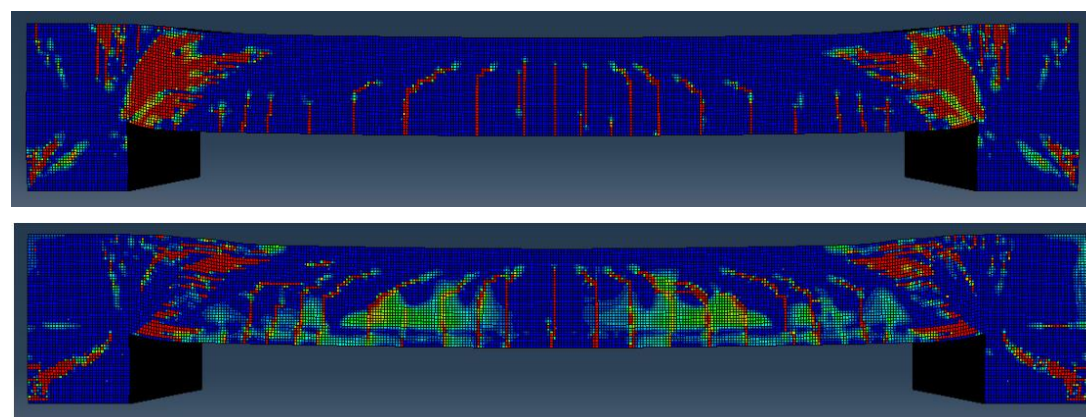


(b) Identisk balk efter belastning med luftstötstång till skjuvbrott

Figur 3.9 Fotografier på armerade betongbalkar efter a) kvasi-statisk belastning respektive b) dynamisk belastning. Från Hallgren och Balazs (1999).



Figur 3.10 Numerisk simulering av balken som visas i Figur 3.9b. Från Magnusson (2019).



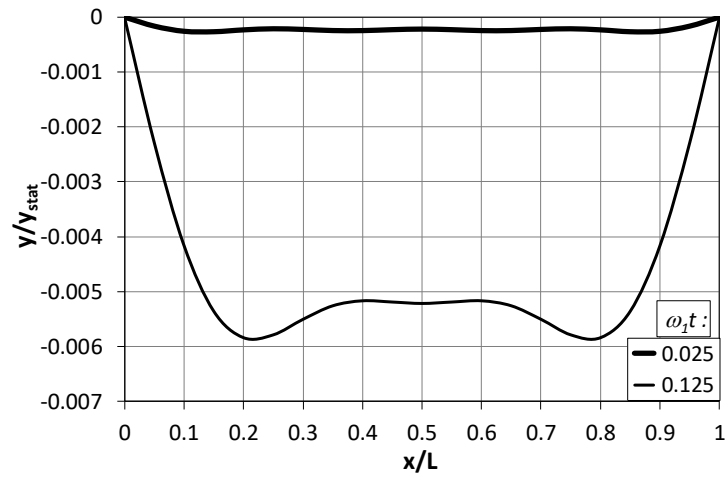
Figur 3.11 Numeriska simuleringar av explosionsförsök (Slawson, 1984) på plattkonstruktioner av armerad betong (genererande ett direkt skjuvbrott i försöken). Från Magnusson (2019).

3.4.3 Spänningsvågor och brottmoder

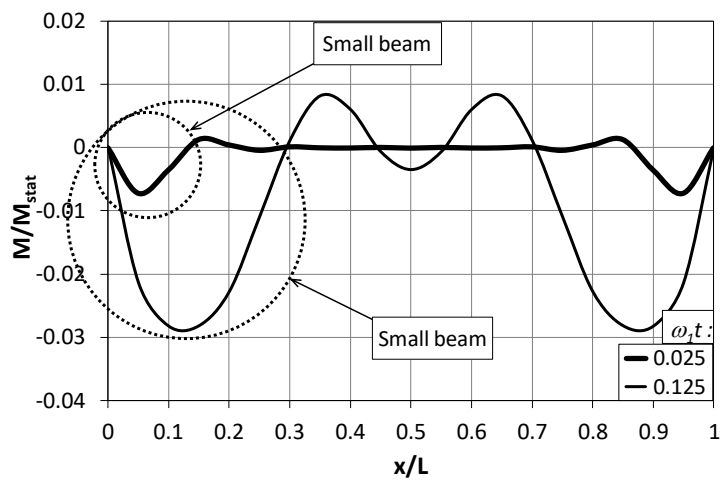
Vid dynamisk belastning av ett armerat betongelement, t.ex. en balk eller en platta, uppvisas först en eller flera punkter med mycket höga, lokala spänningskoncentrationer, t.ex. vid stöd, upplag och kring anslaget från en fallvikt. Dessa lokala spänningar, och töjningar samt deformationer, propagerar därefter ut genom elementet som spänningsvågor. För en yttre betraktare kan detta observeras som en tidsberoende deformationsrespons hos elementet, såsom t.ex. beskrivs av Magnusson (2019) och här återges i Figur 3.12. Som beskrivs kommer betongbalken initialt att uppvisa deformationer, skjuvkrafter och böjmoment med betydligt annorlunda fördelningar jämfört med de som uppstår under motsvarande statisk belastningskonfiguration. Figur 3.12 visar beräknade utböjningar, böjmoment och skjuvkrafter vid två tidpunkter, där värdena på de vertikala axlarna har normaliserats. Böjmoment och skjuvfördelningarna nära stöden i Figur 3.12b respektive Figur 3.12c visar likheter med fördelningarna hos lokalt placerade balkar med kortare spännvidd. Hela balken kan således initialt betraktas som uppdelad i två kortare balkar nära stöd, där var och en svarar med en uppenbarligen låg skjuvslankhet L/d , och en mellanliggande del som i detta initiala skede utsätts för i sammanhanget små påkänningar. Strukturella vågrörelser som härrör från varje stöd kommer med tiden att förändra moment och skjuvfördelningarna för att så småningom inta en fördelning som liknar den hos en statiskt belastad balk. Den uppenbara skjuvspänningen hos de kortare balkarna nära stöd kommer därmed att öka och så småningom omvandlas till en responsmod där hela balken böjs.

Teoretiska analyser (Magnusson, 2019) av den tidiga strukturresponsen för balkar utsatta för utbredda laster genomfördes med Euler-Bernoulli balkteori och numeriska simuleringar med Abaqus/Explicit. Dessa analyser visar att den initiala strukturresponsen består av skjuvspänningar och böjande moment som uppstår vid stöden. Områdena på balken från nära stöd mot balkmitt rör sig i form av en stelkropp. Vid ytterligare simuleringar med Abaqus förefaller ett dynamiskt direkt skjuvbrott vara resultatet av en respons likt en hög balk med krossning av de tryckta strävorna vid stöden, vilket därmed skiljer sig från statisk direkt skjuvning. Resultaten visar även att balkhöjd, armeringsinnehåll, lastnivå och lastens varaktighet är parametrar som påverkade utvecklingen av ett dynamiskt direkt skjuvbrott.

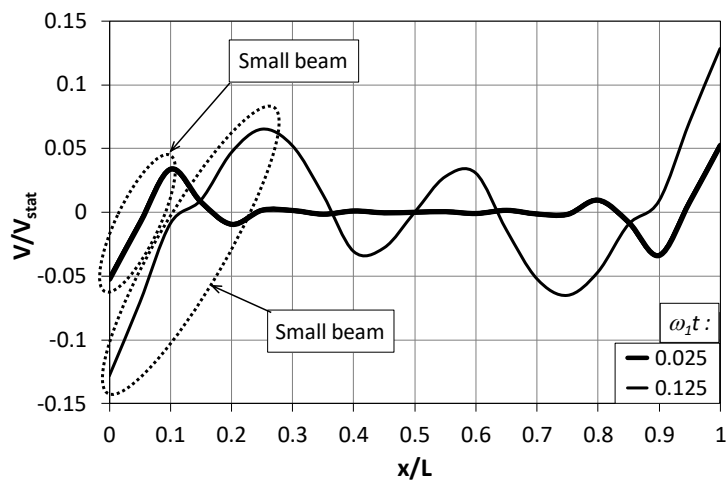
De spänningsvågor som propagerar i en betongbalk eller platta, och därigenom utvecklar elementets deformationsmod så som beskrivits ovan, styr också samtidigt deformationen i den stålarmering som finns inlagd i betongbalken. En typisk deformationsmod för ett betongelement uppvisar sprucken betong och relativt kraftigt töjd stålarmering med koncentrerade partier med plasticerat stål. Utbredningen av dessa partier, var de uppstår och hur detta är kopplat till läget hos betongsprickor och intakta betongpartier mellan sprickorna behöver undersökas vidare. Ett exempel på ett typiskt tidsförlopp för töjningstillväxten hos armeringsstänger i en dynamiskt belastad betongbalk visas av Magnusson (2019) och återges här i Figur 3.13.



(a)

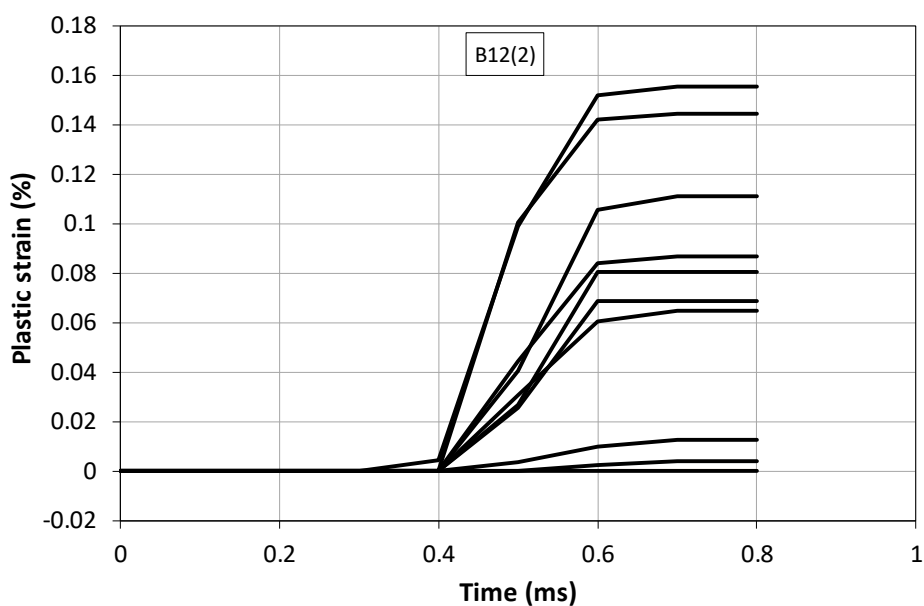


(b)

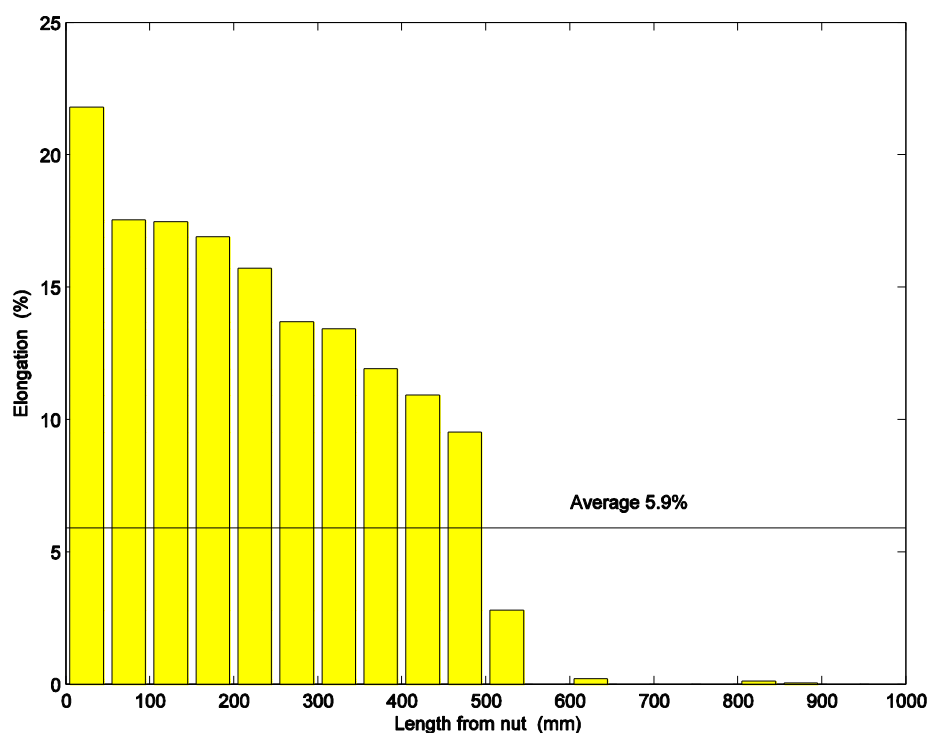


(c)

Figur 3.12 Normaliserade (a) deformationsformer, (b) böjande moment och (c), skjuvkrafter för en dubbelsidigt fritt upplagd betongbalk utsatt för en jämt fördelad last enligt Euler-Bernoulli teori. Från Magnusson (2019).



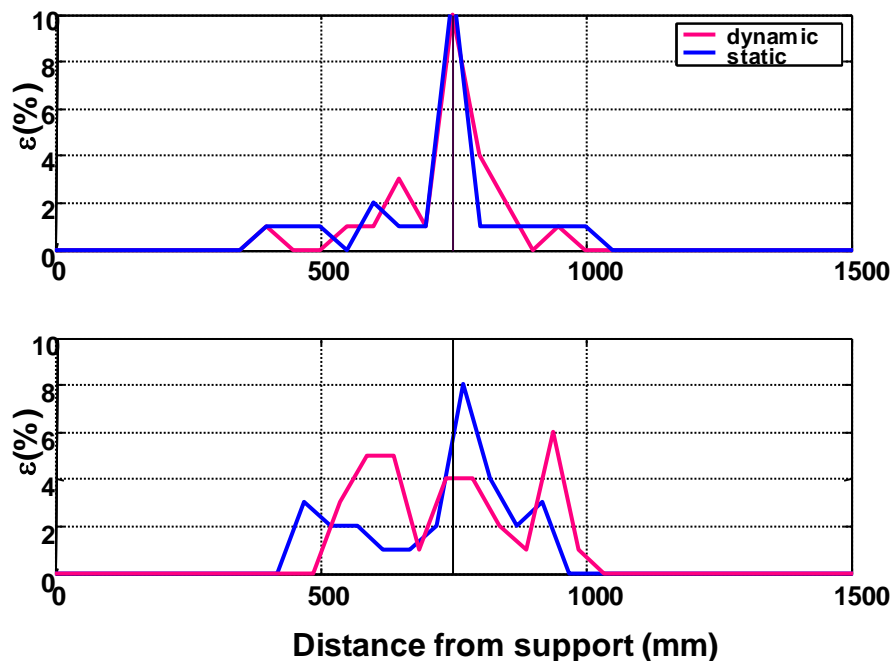
Figur 3.13 Utvecklingen av plastisk töjning med tiden i tio punkter längs en armeringsstång i en dynamiskt belastad betongbalk. Från Magnusson (2019).



Figur 3.14 Uppmätt töjningsfördelning i en slät ingjuten stålstång belastad av en 111 kg fallvikt med anslagshastigheten 10 m/s. Från Ansell (2005).

Motsvarande tillväxt av plastiska töjningar har uppmätts (Ansell, 2005) vid fallviktsförsök med ingjutna slätstänger av mjukt stål, avsedda att efterlikna beteendet hos bergbultar utsatta för dynamisk stötvågsbelastning eller utstötta bergmassor vid extremt höga bergspänningar. Ett exempel visas i Figur 3.14, som töjning längs stängen i förhållande till avstånd till den dynamiskt dragbelastade änden. Töjningsfördelningens utseende är en direkt följd av att propageringshastigheten hos varje, längs stängen propagerande, vågfront som motsvarar en specifik töjningsnivå beror av den aktuella

lutningen i stålets spännings-töjningsdiagram. De töjningar som kvarstår efter att all rörelseenergi har omvandlats till töjningsenergi, varvid deformationerna avstannar, blir således en direkt avbild av den plastiska delen av stålets töjningskurva ("arbetskurva"), så som den erhålls vid ett dynamiskt dragförsök (Ansell, 2005, 2006). Den plasticerade längden av stängen beror av hur länge den dynamiska belastningen verkar på stålstången och uppföljande undersökningar visar dessutom att den ensidiga plasticeringen beror av att inga spänningsvågor reflekteras från stångens borte ände. Vid ett annat ingjutnings-, eller inspännings-, förhållande skulle plasticering vid bägge ändar kunnat ske. För armeringsstänger, som oftast har kammar som greppar in i betongen längs hela sin längd, kommer påverkan av eventuella reflekterande spänningsvågor troligen att ha en relativt stor inverkan. Det är därför av intresse att vidare studera den dynamiska töjningen i ingjutna stålstänger, med och utan kammar eller andra förankringsanordningar, och för stål med varierande hårdhet. Vid de tidigare refererade försöken (Ansell och Svedbjörk, 2002, 2003b) med fallviktsbelastade armerade betongbalkar användes armeringsstål med olika hårdhet, vilket motsvarar olika utseenden på stålets spännings-töjningskurva. Effekten på utbredningen av de plasticerade avsnitten av armeringsstängerna var mycket tydlig, vilket här exemplifieras i Figur 5.16.



Figur 3.15 Uppmätta töjningsfördelningar i armeringsstänger ingjutna i fritt upplagda balkar utsatta för statisk last samt dynamisk fallviktsbelastning. Överst hård och underst mjuk stålqualität. Resultat från Ansell och Svedbjörk (2003b).

4 Diskussion

4.1 Hantering av explosioner i Sverige idag

4.1.1 Riskhantering

I Bilaga A till Bilaga C ges en överblick om riskhantering, explosionslast samt strukturrepons och nedan kommenteras delar av denna information. För mer detaljerad information hänvisas till respektive bilaga.

4.1.2 Riskhantering

Vid riskhantering i en förtätad stadsmiljö utgås i Sverige vanligtvis från Räddningsverket (1997) där bedömd risk jämförs med kurvor för accepterad risk, så kallade ALARP-områden. Det saknas dock entydiga anvisningar på samma sätt som det t.ex. gör för en konstruktör och riskanalytikern fås därför hitta en väg framåt efter eget huvud. Detta medför att olika aktörer använder sig av olika anvisningar – både svenska och utländska sådana, t.ex. TNO (2005).

Räddningsverkets statistik för transport av farligt gods (Räddningsverket, 2006) tycks vara allmänt använt i hela Sverige – detta trots att den aktuella rapporten uttryckligen påtalas att presenterad statistik inte är lämplig att omvandlas till trafik på årsbasis. Anledningen till denna avvikelse är att det ofta saknas mer tillförlitlig statistik. I de situationer där kompletterande transportstatistik finns tillgänglig används dock i regel även denna.

4.1.3 Explosionslast

Förutom Trafikverkets regelverk för tunnlar finns det i Sverige inga explicita anvisningar om hur explosionslasten ska bestämmas för ett givet olycksfallsscenario. Det blir därför ofta upp till inblandade parter att besluta om hur detta ska hanteras i det enskilda projektet. I händelse av gasexplosioner finns det dock betydande oklarheter om hur dessa bör hanteras – t.ex. storleken på det exploderande gasmolnet, läge för explosionscentrum samt hur explosionslastens egenskaper ska bestämmas.

I Nederländerna finns det via TNO (2005) utförliga anvisningar för hantering av olika olycksfallssituationer. Dessa är dock inte alltid direkt överförbara till svenska förhållanden eftersom det finns situationer i Sverige som inte täcks in av det nederländska regelverket. Enligt Heijmans, se avsnitt 2.9, finns även risk att användandet av denna referens rakt av i Sverige skulle kunna resultera i alltför konservativa val. Den aktuella referensen skulle dock förmodligen kunna fungera som en lämplig inspirationskälla vid framtagandet av en handbok för hantering explosionslast i en förtätad stadsmiljö.

4.1.4 Strukturrepons

I dagens regelverk för betongkonstruktioner, Eurokod 2 (SIS, 2008b), saknas explicita anvisningar för hur impulsbelastade betongkonstruktioner ska hanteras. De regler som finns är framtagna för statiska lastsituationer och otillräckligt anpassade för de behov som finns för en impulsbelastad struktur. I Sverige finns förenklade beräkningsanvis-

ningar utgivna av MSB (Johansson och Leppänen, 2014) samt Fortifikationsverkets Konstruktionsregler, FKR 2011 (Fortifikationsverket, 2011). MSB:s anvisningar utgår från Eurokod, med de potentiella brister som detta innebär, medan FKR 2011 baseras på svenska fortifikatoriska handböcker från framförallt 70-talet. Inom den svenska kärnkraftsindustrin har det också tagits fram särskilda beräkningsanvisningar med hänsyn till impulsbelastning (SSM, 2017), vilka till stor del baseras på ett amerikanskt regelverk UFC 3-340-02 (DOD, 2008). För branschen skulle det dock vara en fördel om befintliga svenska beräkningsanvisningar var bättre samordnade.

I Johansson och Rempling (2016) har en jämförelse gjorts mellan svenska, amerikanska och brittiska beräkningsanvisningar. En viktig slutsats av denna är att de två senare till stor del inte är lämpliga att rakt av överföras till ett svenskt regelverk. Även i de svenska anvisningarna identifierades brister och en djupare översyn rekommenderades inom ett antal områden.

4.2 Inventering av kunskapsbehov om explosioner

4.2.1 Intervjuer

Kunskapsbehov

Samtliga intervjuade personer anser att det finns ett behov av ökad kunskap om explosioner. Typ av efterfrågad kunskap kan dock variera tämligen mycket och beror till stor del på vilken funktion som respektive person har. Exempelvis uppvisar Egardt på MSB ett större fokus på räddningsinsatser än övriga intervjuade och efterlyser med anledning av detta också en annan typ av ökad detaljkunskap kring explosioner, t.ex. uppkomst samt effekt av splitter, samt menar även att säkerheten i tunnlar behöver ökas med hänsyn till utrymning och räddningsinsats. Flera andra intervjuade personer har dock också påpekat att det behövs en ökad kunskap om vilken konsekvens som en given explosion har på sin omgivning.

Explosion i tunnlar bedöms hårdare

Från Trafikverkets sida efterlyses ökad kunskap om sannolikheten för att en olycka ska inträffa samt hur olika delar i en sannolikhetsberäknings händelsetråd påverkas vid olika situationer. Det finns en uppfattning att det inte är ovanligt att riskanalytiker tvingas göra grova gissningar som är undermåligt underbyggda. Denna syn får också åtminstone delvis stöd av Heijmans som menar att det idag finns tecken på att riskanalytiker har en tendens att överskatta konsekvenserna från en explosion. Lundström menar dessutom att det finns en tendens att bedöma en explosion i en tunnel hårdare än om explosionen istället sker utanför tunneln. Ett exempel på detta är hanteringen av överdäckning i Hagastaden, Stockholm, där en stor laddning antas kunna detonera inne i tunneln – på Essingeleden utanför tunneln beaktas dock inte de potentiella effekterna av en sådan explosion på samma sätt. Kopplat till detta finns det på Trafikverket även en uppfattning att det i riskhantering av tunnlar och överdäckningar förekommer att alltför stora explosionslaster antas. Trafikverket menar därför att det förmodligen behövs ett ökat fokus på sannolikheten att den antagna händelsen verkligen inträffar. Hos Trafikverkets representanter finns en farhåga att vissa tunnelprojekt tvingas ta alltför stor hänsyn till explosionsscenario som har en försvinnande liten sannolikhet att de verkligen inträffar. Järphag och Lööf instämmer i detta och båda

jämför med det koncept som används inom kärnkraftsindustrin, i vilken händelser som bedöms vara tillräckligt osannolika kan bortses från helt. Det poängteras även att Trafikverket inte tillåter att riskanalysen påverkar vilken trafik som får gå genom en tunnel, något som därför kan medföra dyra riskreducerande åtgärder. Lööf ger uttryck för liknande tankegångar som Trafikverket och menar att ett alltför stort fokus emellanåt ligger på befarad konsekvens jämfört med sannolikheten att den identifierade händelsen verkligen inträffar. Med förbättrad kunskap om hur ett händelsetråd påverkas skulle det dock eventuellt vara möjligt att påvisa att sannolikheten för ett givet explosionsscenario är så liten att det helt kan försummas. Som kontrast lyfter MSB även tanken att det vid hantering av explosioner i riskanalyser även kan finnas behov att ta hänsyn till fler saker än antal omkomna, t.ex. vilken effekt på samhället som en given olycka kan medföra.

Effekt av brist på besked

Svahn poängterar att projektutvecklaren önskar tydliga besked men att brist på sådana gör att projekt inte blir kalkylerbara, vilket kan resultera i att projektutvecklaren drar sig ut. Svahn menar vidare att det är brist på besked som utgör det största hindret – osäkerhet om kostnaden blir viktigare än kostnaden i sig. Som exempel nämns överdäckningen i Hagastaden, Stockholm, vilken i branschen fungerat som någon form av prejudikat hur en överdäckning med ovanpåliggande bebyggelse ska utformas. Den valda lösningen har dock upplevts vara för hög och fortsättningsvis har det därför också undvikits att uppföra byggnader ovanpå överdäckningen.

Statistik för farligt gods

Flera intervjupersoner påpekar behovet att ha tillgång till förbättrad statistik för transporter av farligt gods. Den statistik som till övervägande del används i riskhanteringen i Sverige idag är från 2006 och upplevs som otillräcklig. Heijmans menar att ett otillräckligt statistiskt underlag normalt medför att konservativa bedömningar görs, vilket kan medföra betydande överskattningar av den resulterande risken. Situationen kan dock även vara den omvända – Lööf påpekar exempelvis att jämförelser med uppdaterad trafikinformation i Stockholm har visat att den tidigare använda statistiken underskattade mängden transporter med omkring en faktor två. Det finns därmed en påtaglig risk att fel ingångsdata för transportstatistik används i de riskanalyser som görs idag. Egardt och Modig påpekar att det dock finns en risk med förbättrad trafikstatistik eftersom en sådan information kan utgöra en säkerhetsrisk med hänsyn till antagonistiska handlingar. Lundström förtydligar dock att en sådan säkerhetsrisk enbart avser sprängmedel (klass 1.1) och att uppdaterad information om transport av exempelvis gaser (klass 2) därför skulle vara okej att låta ta fram.

Länsstyrelsen påpekar vidare att det är oklart hur stor mängd av det farliga godset som transporteras i ett enskilt fordon, något som gör det svårt att korrekt bedöma sannolikhet och konsekvens för ett givet fall – laddningsstorleken påverkar sannolikheten att en explosion inträffar eftersom antalet transporter = total laddningsmängd/laddningsstorlek. Andra saker som inverkar på konsekvensen är explosionens storlek och styrka samt dess placering i förhållande till närliggande byggnader. Som konstaterats i Dahlén (2019) är även detta dock information som helt/eller delvis ofta utelämnas i en riskanalys. Heijmans pekar ut ett problem kopplat till detta – att explosionslastens storlek ofta behandlas övergripande i riskhanteringen men att konstruktören sedan

behöver detaljerad lastinformation för att kunna projektera den utsatta byggnaden. Sådan detaljerad information har riskanalytikern själv dock i regel inte tillräcklig kunskap om.

Riskreducerande åtgärder

Bland flera av de intervjuade finns det en uppfattning att det finns behov av att riskreducerande åtgärder anpassas bättre till den aktuella projektsituationen. Kopplat till den typ av riskförebyggande åtgärder som måste göras så efterlyser Länsstyrelsen mer information om hur effekten av dessa, i siffror, kan uppskattas på ett bra sätt. Ur ett byggherre- samt entreprenörsperspektiv påpekas det även av Sjölander respektive Järphag att hanteringen av likartade situationer kan variera betänkligt mellan olika projekt och att det därför vore önskvärt med en större samstämmighet. Den situation som i nuläget kan uppstå upplevs, enligt Järphag, emellanåt som djupt orättvis.

Länsstyrelsen anser även att de riskreducerande åtgärder som förs fram i riskanalysen blir en del av detaljplanen medan Sjölander istället föredrar att sådana frågor hanteras i projektets tekniska samråd. Vidare, menar Sjölander, är det bättre att använda sig av funktionskrav istället för specifika tekniska krav – en tanke som stöds av Lööf. Sjölander lyfter även fram att inbyggda system i riskutsatta byggnader borde kunna utgöra en del av de riskreducerande åtgärderna. Med ett sådant koncept skulle det också vara möjligt att bättre anpassa åtgärden till aktuell olycksituation – t.ex. ett system som aktiverar utrymning ur byggnaden vid explosionsrisk eller förhindrar utrymning från densamma vid utsläpp av giftgas.

Strukturrespons

Hallgren, Järphag och Svahn menar samtliga att kunskapen hos landets konstruktörer om explosionsbelastade strukturer respons är otillräcklig – dagens konstruktörer är ”statiker” – och att det därför finns ett behov av ett allmänt nationellt kunskapslyft. Ett sätt att åstadkomma detta, menar de, är att skapa en handbok med tydliga regler och metoder för hantering av explosioner. Hallgren poängterar dock att en sådan handbok behöver vara tillgänglig för en bred skara konstruktörer och inte bara specialister. Hallgren förutser vidare att risk- och hotbilden för explosioner kommer att öka med tiden, vilket gör att konstruktörer i de flesta byggprojekt i framtiden förmodligen kommer behöva beakta explosioner vid dimensionering. Pacoste poängterar även att det behövs en ökad kunskap om redundans och duktilitet hos beställaren så att förståelse finns att anpassning av den belastade strukturen görs med hänsyn till lasttyp.

Samarbete

Flera intervjuade lyfter behovet av ett ökat samarbete och kommunikation mellan olika aktörer i frågor kring explosion. Nilsson efterlyser ett ökat samarbete mellan Trafikverket och MSB – enligt Nilsson saknar MSB i dagsläget de resurser som krävs för att delta i projekt i den grad som Trafikverket önskar. Järphag menar att det saknas ett bra forum för diskussioner om explosioner – på grund av stora kunskapsbrister blir sådana diskussioner i regel inte heller meningsfulla. Modig upplever det som att många myndigheter och företag saknar de resurser som krävs för att hantera explosioner, något som eventuellt kan tyda på att det inte finns tillräckligt med personer i

branschen som har rätt kompetens. Svahn menar dock att det inte nödvändigtvis är experter i sig som är en bristvara utan att det är en brist på personer som kan överbrygga olika kompetensområden på ett effektivt sätt.

Lundström anser att det vore önskvärt med en ökad dialog med företag som hanterar massexplosiva ämnen i riskhanteringen av tunnlar. Heijmans och Lööf betonar vikten av ett nära samarbete mellan riskanalytiker, arkitekter, brandingenjörer och konstruktörer – Heijmans menar t.ex. att brandingenjören eventuellt kan vara ett bra sätt att överbrygga glappet mellan riskanalytiker och konstruktör. Vidare, menar Heijmans, finns det för riskanalytikern ett behov av en ökad dialog med byggherrar och entreprenörer för att få ökad insikt om kostnaderna för olika riskreducerande åtgärder. Länsstyrelsen menar vidare att det vore bra att i högre grad än idag involvera konstruktör och explosionsexpert i ett tidigare skede samt låta riskanalytikern vara en del av projektet längre in i projektet – och inte, som nu, begränsa dennes insatser till ett tidigt skede.

Handbok

Intervjupersonerna är i stort sett eniga om att det vore önskvärt att ta fram en handbok i vilken vanligen accepterad kunskap, metoder samt vanliga lösningar för hantering av explosioner kan samlas. En sådan handbok skulle lämpligen ha en sammankopplande funktion av olika kompetenser kring explosion. Svahn anger att samverkan mellan riskanalytiker och konstruktör är särskilt viktigt i ett sådant sammanhang samt att det i ett tidigt skede är möjligt att övergripande kunna bedöma vilka konsekvenser som ett givet explosionsscenario ger upphov till. Järphag är inne på ett liknande resonemang och Lööf efterlyser en metodik för hur konsekvensberäkningar av den serie av koppelade händelser som leder fram till en explosion ska beräknas. Det senare nämns även av Modig, som efterlyser ökad kunskap om hur sannolikheten i olika delar av ett händelseträd ska bedömas, t.ex. när en explosion uppstår efter en krock och/eller vid brand. Flera av de intervjuade – Modig, Heijmans, Lööf samt Länsstyrelsen – efterfrågar en ökad kvantifiering av vilken effekt som kan förväntas av olika riskreducerande åtgärder. Järphag påtalar behovet av ett ökat stöd för lastbestämning och framför tanken att det skulle vara möjligt att dela in lasten i olika avståndsberoende verksamhetsklasser som kan utgå från av både riskanalytiker och konstruktörer. Baserat på sådant laststöd skulle det sedan vara möjligt för konstruktören att, via förenklade beräkningshjälpmedel, kunna bestämma principiell utformning som medger en kostnadsberäkning. Sådana beräkningshjälpmedel, både för explosionslast och strukturrespons, behöver vara utformade så att de kan användas av en stor skara personer och inte bara specialister. Detta skulle vara möjligt via enkla illustrativa exempel och Svahn menar att en sådan handbok borde ges ut, alternativt rekommenderas, av Trafikverket samt att den lämpligen skulle vara upplagd på ett sätt som motsvarar Trafikverkets projekteringshandböcker. En sådan handbok, menar Svahn, skulle göra branschen mer likriktad – om inte annat skulle den sätta igång en branschdiskussion om hur dessa frågor borde hanteras.

4.2.2 Explosionslast och strukturrespons

Av föregående avsnitt framgår att det bedöms finnas ett betydande behov av ökade kunskaper i branschen om hur explosionsbelastade strukturer ska hanteras i dimensioneringen. För att möjliggöra detta behöver konstruktörskåren få tillgång till enkla beräkningsverktyg som i tillräcklig grad kan hantera både explosionslast och strukturrespons för olika situationer som kan uppstå. Denna typ av verktyg möjliggör en grundläggande förståelse för de fenomen som kan kopplas till explosionslast samt medger snabba överslag som ger god vägledning till koncept för lämplig lösning.

Förenklade beräkningsverktyg för att hantera explosionslast eller strukturresponsen i grundläggande fall finns beskrivet i litteraturen, t.ex. anvisningar utgivna av MSB (Johansson och Leppänen, 2014) samt FKR 2011 (Fortifikationsverket, 2011). I dessa anvisningar finns dock flera situationer av mer komplex natur som inte behandlas alls men som också är angeläget att kunna hantera i praktiska dimensioneringssituationer.

I denna rapport har det identifierats ett antal situationer upp, i vilka det bedöms finnas ett behov att ytterligare utveckla befintliga beräkningsverktyg. Av dessa kan särskilt följande nämnas:

- Explosionslast
 - Lastvärden vid gasexplosion
 - Effekt av lastläckage genom öppning
 - Inverkan på last av flerfaldiga reflexioner
- Strukturrespons
 - Inverkan av tryckande- och dragande normalkraft
 - Gynnsam inverkan av omgivande jordmassor
 - Ökad bärförmåga via lin- och membranverkan

Energiupptagningsförmågan hos en struktur är central för dess förmåga att motstå en explosion. Detta medför att strukturens plastiska deformationsförmåga samt förmåga att undvika spröda brott, främst tvärkraftsbrott, är högst väsentliga. I denna rapport har dessa områden dock inte behandlats i detalj och för detta hänvisas istället till Johansson *et al.* (2020). Det kan dock inte nog poängteras att dessa båda delar utgör en central grund för att framgångsrikt kunna utforma en skyddande struktur gentemot explosionslast.

5 Slutsatser

5.1 Sammanställning

I denna rapport har det genomförts en inventering av byggbranschens kunskapsbehov med hänsyn till explosioner i en förtätad stadsmiljö. Det kan av detta konstateras att hantering av explosioner utgår från tre olika delområden – riskhantering, explosionslast samt strukturrepons. Dessa delområden interagerar med varandra och är alla lika viktiga – om det finns brister i hanteringen av ett delområde kan detta själv vara tillräckligt för att det ska bli stora konsekvenser på det slutliga utfallet. I utfört arbete har det funnits ett stort fokus att, via intervjuer, insamla synpunkter och erfarenheter från personer med olika roller inom branschen – totalt har 14 personer från 10 olika organisationer intervjuats. Vidare har rapportens författare själva identifierat frågeställningar kopplade till explosionslast och strukturrepons samt hantering av dessa via förenklade beräkningsverktyg. Som övergripande bakgrundsinformation ges det i rapportens bilagor även grundläggande information om hur delområdena riskhantering, explosionslast samt strukturrepons hanteras idag.

Det råder konsensus bland de intervjuade om att det finns ett stort behov av ökad kunskap om explosioner. Vilka behov som identifieras varierar dock eftersom de intervjuade har olika roller. Nedan sammanställs dessa synpunkter fördelat på vilken funktion de intervjuades organisationer huvudsakligen har:

- **Myndigheter, Länsstyrelsen, Riskanalytiker:** Ökad kunskap behövs om koppling mellan explosionslast och konsekvens, inverkan (i siffror) av olika riskreducerande åtgärder, statistik för transport av farligt gods samt sammanställning av en handbok med accepterad kunskap, metoder och lösningar. Vidare efterlyses, framförallt av Trafikverket, att riskhanteringen får ett ökat fokus på sannolikhet istället för konsekvens.
- **Entreprenörer:** En ökad förutsägbarhet i byggprocessen önskas – i ett tidigt skede behöver projektutvecklaren kunna bedöma om projektet är genomförbart. Det efterlyses därför en ökad enhetlighet i hantering av explosionsfrågor i likvärdiga projekt.
- **Konstruktörer:** Det behövs en ökad allmänkunskap om explosioner bland landets konstruktörer – det efterfrågas en bättre förståelse om relationen mellan last och struktur samt om deformationsförmåga och robusthet. Det behövs även mer kunskap om specifika strukturfenomen kopplade till explosionsbelastade strukturer. Vidare finns en efterfrågan av tydliga regler och metoder för hantering av explosioner som kan användas av andra än specialister.

Bland de intervjuade finns det ett samstämmigt önskemål om att en branschgemensam handbok tas fram som kan användas som stöd vid hantering av explosionsbelastning. En viktig uppgift för en sådan handbok blir då att främja samverkan mellan olika kompetenser kring explosion – särskilt den mellan riskanalytiker och konstruktör samt att den bidrar till en ökad koppling mellan explosionslast och konsekvens mot omgivningen.

Handboken skulle lämpligen innehålla olika kapitel som berör samtliga delområden:

- **Riskhantering:** Stöd för sannolikhetsberäkningar (t.ex. inverkan på sannolikhetsträd, när en explosion inträffar vid krock/brand), förslag på riskreducerande åtgärder med anvisningar om förväntad effekt.
- **Explosionslast:** Stöd för lastbestämning från sprängämnen och gasmoln, framtagning av standardlast (t.ex. indelning i verksamhetsklasser) att använda för båda riskanalytiker och konstruktör.
- **Strukturrespons:** Anvisningar för förenklade beräkningshjälpmedel som kan användas för både enkla och mer komplexa situationer av konstruktörer som inte är specialister för att ta fram ungefärliga lösningar.

En sådan handbok ges lämpligen ut av Trafikverket – alternativt att Trafikverket rekommenderar den i sina anvisningar – och skulle då kunna vara upplagd på samma sätt som Trafikverkets projekteringshandböcker.

5.2 Förslag på fortsatt arbete

Med utgångspunkt från de synpunkter som presenteras i föregående avsnitt så kan det konstateras att det finns ett behov av att det i Sverige sker en uppgradering av den befintliga kompetensnivån inom frågor kopplade till explosioner i en förtätad stadsmiljö. En betydande andel av den kompetens som idag finns inom delområdena explosionslast och strukturrespons har en koppling till högskolan, företrädesvis via Chalmers och KTH. För att öka den nationella kunskapsnivån inom dessa områden vore det därför rimligt att i ökad utsträckning söka nyttiggöra den kunskap och erfarenhet som redan finns inom dessa organisationer. Ett lämpligt sätt att göra detta är att stötta samt utveckla de forskarmiljöer som redan finns, exempelvis genom att starta upp nya doktorandprojekt inom dessa ämnesområden. Genom att understödja denna typ av forskarmiljö ges även förutsättningar för att närliggande områden, till de som explicit berörs i den här rapporten, kan kopplas samman och därmed ge ett ytterligare mervärde. Ett doktorandprojekt bestående av två doktorander, en vardera på Chalmers respektive KTH, skulle utgöra en god grund för en sådan forskarmiljö. Detta projekt skulle då lämpligen fokusera på de frågor som lyfts i denna rapport inom delområdena explosionslast samt strukturrespons. I ett sådant projekt skulle det även kunna ingå att ta fram delar av den ovan efterlysta handboken för hantering av explosioner.

Ett forskarprojekt om två doktorander kommer inte ensamt lösa de problem som belyses i den här rapporten – det skulle dock utgöra en bra start och något som sedan kan byggas vidare på. Som komplement till ovanstående vore det därför även värdefullt att starta motsvarande projekt som fokuserar på att koppla samman framförallt riskhantering och explosionslast men även riskhantering och strukturrespons. Detta skulle lämpligen kunna göras av ovan nämnde organisationer men med tillägg av ytterligare en eller flera parter med expertis inom delområdet riskhantering.

6 Referenser

- Ahmed L. (2015): Models for analysis of young cast and sprayed concrete subjected to impact type loads. Doktorsavhandling, KTH Betongbyggnad, Stockholm.
- Alingsås kommun (2017): Planprogram – Genomfart Alingsås och Lyckan. Alingsås kommun, 2017-06-17.
- Andersson S., Karlsson H. (2012): Structural Response of Reinforced Concrete Beams Subjected to Explosions: Time dependent transformation factors, support reactions and distribution of section forces. Konstruktionsteknik, Chalmers tekniska högskola, Examensarbete 2012:103, Göteborg.
- Ansell A. och Svedbjörk G. (2000): Statisk provning av fritt upplagda plattstrimlor av betong med armering av varierande seghet. KTH Byggkonstruktion, Teknisk rapport 2000:16, Stockholm.
- Ansell A. och Svedbjörk G. (2003a): Kompletterande dynamisk provning av kontinuerliga plattstrimlor av betong med armering av varierande seghet. KTH Byggkonstruktion, Teknisk rapport 2003:3, Stockholm.
- Ansell A. och Svedbjörk G. (2003b). Statisk och dynamisk provning av fritt upplagda plattstrimlor med varierande betongkvalitet och armeringskonfiguration, KTH Byggvetenskap, Teknisk rapport, 2003:8, Stockholm.
- Ansell A. och Svedbjörk G. (2002): Dynamisk provning av kontinuerliga plattstrimlor av betong med armering av varierande seghet, KTH Byggkonstruktion, Teknisk rapport 2002:9, Stockholm.
- Ansell A. och Svedbjörk G. (2005): Statisk provning av fritt upplagda plattstrimlor med varierande tvärsnittsareor. KTH Byggkonstruktion, Teknisk rapport 2005:6, Stockholm.
- Ansell A. (2005): Laboratory testing of a new type of energy absorbing rock bolt, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 20, No. 4, s. 291-300.
- Ansell A. (2006): Dynamic testing of steel for a new type of energy absorbing rock bolt, Journal of constructional steel research, Vol. 62, No. 5, s. 501-512.
- Baker W.E. (1973): Explosions in Air. University of Texas Press, Austin, USA.
- Bischoff P.H. and Perry S.H. (1991): Compressive behaviour of concrete at high strain rates. Materials and Structures, 1991, 24, s. 425-450.
- Boverket (1994): Boverkets handbok om betongkonstruktioner: BBK 94 – Band 1, Konstruktion, Boverket, Karlskrona.
- Boverket (2019): Boverkets konstruktionsregler EKS 11. Boverket, Diariennr. 2740/2017, Karlskrona.
- Boverket (2020) Detaljplaneprocessen. Boverket, Karlskrona (<https://www.boverket.se/sv/PBL-kunskapsbanken/planering/detaljplan/detaljplaneprocessen>)
- CEB (1988): Concrete Structures under Impact and Impulsive Loading. CEB Bulletin d'Information No 187, Lausanne, Switzerland.

- ConWep (1992): ConWep – Collection of conventional weapons effects calculations based on TM 5-855-1, Fundamentals of Protective Design for Conventional Weapons, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, USA.
- Dahlén E. (2019): Inventory of knowledge needs, with regard to explosion loading, in a densified urban environment. Konstruktionsteknik, Chalmers tekniska högskola, Examensarbete ACX30-19-58, Göteborg.
- Dalenius R., Johansson M. (2019): Diffraction effects of blast waves around corners. 18th International Symposium on the Interaction of the Effects of Munitions with Structures (ISIEMS), Panama City Beach, FL, Oct 21-25, 2019, USA.
- DOD (2008): Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions. UFC 3-340-02, Department of Defense, USA.
- Ekström J. (2017): Blast and Impact Loaded Concrete Structures: Numerical and Experimental Methodologies for Reinforced Plain- and Fibre Concrete Structures. Doktorsavhandling, Konstruktionsteknik, Chalmers tekniska högskola, Göteborg.
- FEMA (1996): The Oklahoma City Bombing: Improving Building Performance through Multi-Hazard Mitigation. Federal Emergency Management Agency, FEMA 277.
- FOI (2017): Experiments of Axially Loaded Walls for Urban Damage Assessment. FOI (Roger Berglund, Håkan Hansson), Rapport FOI-R--4494—SE.
- FOI (2019): Analyses and Simulations of Axially Loaded RC Walls Subjected to Airblast Load. FOI (Gengsheng Wang), Rapport FOI-R--4886—SE.
- Forsvarsbygg (2016): Sikringshåndboka – Håndbok i sikring av eiendom, bygg og anlegg mot terror, sabotasje, spionasje og annen kriminalitet. Forsvarsbygg, Oslo.
- Fortifikationsverket (2011): Fortifikationsverkets Konstruktionsregler, FKR 2011. Fortifikationsverket, Dnr 4535/2011, Eskilstuna.
- FortH 2 (1987): Fortifikationshandbok del 2, Kapitel 4-6. Försvarets Läromedelscentral, Stockholm.
- Fortifikationsverket (2016): Handbok Skydd av byggnader. Fortifikationsverket, Stockholm.
- Gråbergs L. (2019): Ansvarig för skyddsrum på Myndigheten för samhällsskydd och beredskap (MSB). Personlig kommunikation, Karlstad.
- Göteborgs stad (2017): Detaljplan för överdäckning av Götaleden, Normalt planförhållande. Göteborgs stad, Stadsbyggnadskontoret.
- Göteborgs stad (2018): Översiktsplan för Göteborg – Samrådshandling december 2018. Göteborgs stad, Stadsbyggnadskontoret.
- Hallgren M. och Balazs P. (1999): Armerade balkar av högpresterande betong belastade med luftstövåg. Provrappport FOA-R--9900983-311--SE, Försvarets Forskningsanstalt, Avdelningen för vapen och skydd, Tumba.
- Hughes G. och Beeby A.W. (1982): Investigation of the effect of impact loading on concrete beams. The Structural Engineer, Vol. 60B, No. 3, s. 45–52.
- Johansson M. (2000): Structural behaviour in concrete frame corners of civil defence shelters – Non-linear Finite Element analyses and experiments. Doktorsavhandling, Betongbyggnad, Chalmers tekniska högskola, Göteborg.

- Johansson M. (2012a): Luftstötvtåg. Myndigheten för samhällsskydd och beredskap. Publ.nr MSB448, Karlstad.
- Johansson M. (2012b): Beräkningsanvisning för last – TNT-explosion i det fria. Myndigheten för samhällsskydd och beredskap, B02-111, 2012-10-15, Karlstad.
- Johansson M. (2013): Beräkningsanvisning för last – Gasexplosion i det fria. Myndigheten för samhällsskydd och beredskap, B02-121, 2013-03-11, Karlstad.
- Johansson M. (2014): Samlingsdokument – Frågor och svar. Myndigheten för samhällsskydd och beredskap, B01-103, 2014-04-16, Karlstad.
- Johansson M. (2015): Beräkningsstöd – Moment och tvärkraft. Myndigheten för samhällsskydd och beredskap, B06-103, 2015-08-06, Karlstad.
- Johansson M. (2016): Beräkningsstöd – Tryckläckage in i byggnad vid utvändig explosion. Myndigheten för samhällsskydd och beredskap, B06-103, 2016-06-17, Karlstad.
- Johansson M. (2017): Beräkningsstöd – Gasexplosion i det fria. Myndigheten för samhällsskydd och beredskap, B06-105, 2017-12-18, Karlstad.
- Johansson M. (2019): Hagastaden ur ett konstruktionsperspektiv. CIR-dagen, 2019-01-29.
- Johansson M. och Laine L. (2012a): Bebyggelsens motståndsförmåga mot extrem dynamisk belastning, Del 1: Last av luftstötvtåg. Myndigheten för samhällsskydd och beredskap. Publ.nr MSB449, Karlstad.
- Johansson M. och Laine L. (2012b): Bebyggelsens motståndsförmåga mot extrem dynamisk belastning, Del 2: Explosion i gatukorsning. Myndigheten för samhällsskydd och beredskap, Publ.nr MSB450, Karlstad.
- Johansson M. och Laine L. (2012c): Bebyggelsens motståndsförmåga mot extrem dynamisk belastning, Del 3: Kapacitet hos byggnader. Myndigheten för samhällsskydd och beredskap, Publ.nr MSB142, Karlstad.
- Johansson M. och Leppänen J. (2014): MSB:s seminarier om beräkning av impulsbelastade konstruktioner, Myndigheten för samhällsskydd och beredskap, Karlstad.
- Johansson M. och Rempling R. (2016): Design of impulse loaded concrete structures: a comparison of FKR 2011 with various design regulations. Konstruktionsteknik, Chalmers tekniska högskola, Rapport 2016-16, Göteborg.
- Johansson M., Hallgren M., Ansell A., Magnusson J., Leppänen J. (2020): Plastisk deformationsförmåga och tvärkraftsrespons hos impulsbelastade betongkonstruktioner. Konstruktionsteknik, Chalmers tekniska högskola, Publiceras under 2020, Göteborg.
- Kamali A.Z. (2012): Shear Strength of Reinforced Concrete Beams Subjected to Blast Loading. Non-Linear Dynamic Analysis. KTH, Examensarbete 368, Stockholm.
- Kingery C.N. och Bulmash G. (1984): Airblast Parameters from TNT Spherical Air Burst and Hemispherical Surface Burst. Ballistic Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground, Technical Report ARBRL-TR-02555, Maryland, USA.

- Kishi N., Mikami H., Matsuoka K.G. och Ando T. (2002): Impact behaviour of shear-failure type RC beams without shear rebar. *Int. Journal of Impact Engineering*, Vol. 27, s. 955–968.
- Lööf M. (2019): Hagastaden ur ett riskperspektiv. CIR-dagen, 2019-01-29.
- Leppänen J. (2004): Concrete structures subjected to fragment impacts. Doktorsavhandling, Konstruktionsteknik, Chalmers tekniska högskola, Göteborg.
- Länsstyrelserna (2006): Riskhantering i detaljplaneprocessen: Riskpolicy för markanvändning intill transportleder för farligt gods. Länsstyrelserna Skåne län, Stockholms län, Västra Götalands län, September 2006.
- Länsstyrelsen Jämtland (2018): Kartläggning av transporter med farligt gods i Jämtlands län. Jämtlands län, Löpnr. 2018:260, Östersund.
- Länsstyrelsen Stockholm (2016): Riktlinjer för planläggning intill vägar och järnvägar där det transporteras farligt gods. Länsstyrelsen Stockholm, Fakta 2016:6, 2016-04-11.
- Magnusson J. (2007): Structural Concrete Elements Subjected to Air Blast Loading. KTH, Licentiatuppsats, Bulletin 92, Stockholm.
- Magnusson J. (2019): Shear in Concrete Structural Elements Subjected to Dynamic Loads, Doktorsavhandling, TRITA-ABE-DLT. KTH, Stockholm.
- Magnusson J., Ansell A. och Hansson H. (2010a): Air-blast-loaded, high-strength concrete beams. Part II: Numerical non-linear analysis. *Magazine of Concrete Research*, Vol. 62, No. 4, s. 235–242.
- Magnusson J., Hallgren M. och Ansell A. (2010b): Air-blast-loaded, high-strength concrete beams. Part I: Experimental investigation. *Magazine of Concrete Research*, Vol. 62, No. 2, s. 127–136.
- Magnusson J., Hallgren M. och Ansell A. (2014): Shear in concrete structures subjected to dynamic loads. *Structural Concrete*, Vol. 15, No. 1, s. 55-64.
- Malmö stad (2017): Översiktsplan för Malmö – Planstrategi. Malmö stad.
- Malvar L. J. (1998): Review of static and dynamic properties of steel reinforcing bars. *ACI Materials Journal*, Vol. 95, No. 5, sid 609-616.
- Malvar L. J. och Ross C. A. (1998): Review of strain rate effects for concrete in tension. *ACI Materials Journal*, Vol. 95, No. 6, sid 735-739.
- Morales-Alonso G., Cendón D.A., Gálvez F., Erice B. och Sánchez-Gálvez V. (2011): Blast Response Analysis of Reinforced Concrete Slabs. Experimental Procedure and Numerical Simulation. *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 78.
- MSB (2019): RID-S 2019 – Myndigheten för samhällsskydd och beredskaps föreskrifter om transport av farligt gods på järnväg. Myndigheten för samhällsskydd och beredskap, MSBFS 2018:6, Publikationsnr MBSB1269, Stockholm.
- MSB (2019): Skyddsrum SR 15, Handbok. Myndigheten för samhällsskydd och beredskap, 2019-10-28, Karlstad.
- Niklasson G. (1994): Skjuvbrott i armerade betongbalkar – utvärdering av försöks-serie. FOI, Rapport D 20241-2.6, Sundbyberg.

- Nilsson J. (2003): Introduktion till riskanalysmetoder. Lunds Universitet, LUTVDG/TVBB--3124—SE, Vol. 3124, Fire Safety Engineering and Systems Safety, Lund
- Norconsult (2017) – Detaljplan för Gårda 2:12 m.fl. – Göteborgs stad, Riskanalys för transport av farligt gods. Norconsult (Herman Heijmans), Uppdragsnr. 104 0498, 2017-05-12, Göteborg.
- Nyström U. (2013): Modelling of concrete structures subjected to blast and fragment loading. Doktorsavhandling, Chalmers tekniska högskola, Structural Engineering.
- Plos M., Johansson M., Zandi K., Shu J. (2021): Recommendations for Assessment of Reinforced Concrete Slabs, Enhanced structural analysis with the finite element method. Konstruktionsteknik, Chalmers tekniska högskola, Publiceras under 2021, Göteborg.
- Projektstaben (2019): Riskutredning avseende människors hälsa och säkerhet, Detaljplan Hornbergskvarteren. Projektstaben (Mathias Löf), Projekt-ID 0021, 2019-01-18, Stockholm.
- Räddningsverket (1997): Värdering av risk. Statens Räddningsverk, P21-182/97, Karlstad.
- Räddningsverket (2006): Kartläggning av farligt godstransporter, September 2006. Statens Räddningsverk.
- SFS (2007): Förordning med instruktion för Fortifikationsverket. Svensk författningssamling, SFS 2007:758, Stockholm.
- SIS (2008a): Eurokod 1 – Laster på bärverk – Del 1-7: Allmänna laster – Olyckslast. Svensk standard, SS-EN 1991-1-7:2006.
- SIS (2008b): Eurokod 2: Dimensionering av betongkonstruktioner – Del 1-1: Allmänna regler och regler för byggande. SIS Sweddisch Standards Institute, SS-EN 1992-1-1, Stockholm.
- Slawson T.R. (1984): Dynamic Shear Failure of Shallow-Buried Flat-Roofed Reinforced Concrete Structures Subjected to Blast Loading. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Technical Report SL-84-7, Vicksburg.
- SSM (2017): Dimensionering av nukleära byggnadskonstruktioner (DNB). Strålsäkerhetsmyndigheten, Rapport 2017:07, Stockholm.
- Stockholms stad (2017): Översiktsplan för Stockholms stad. Stockholms stad, stadsbyggnadskontoret.
- Stockholms stad (2018): Hagastaden – En vetenskapsstad för liv och hälsa. Stockholms stad, Artikelnr. 15778 Exploateringskontoret 2018-04, Ver. 3.0.
- Strand M. (2015): Detektering av farligt gods med hjälp av kamerateknik. Länsstyrelsen Västra Götalands län, 2015-04-17.
- TNO (2005): Methods for the calculation of physical effects – due to releases of hazardous materials (liquids and gases) – ”Yellow book”. TNO, CPR 14E (third edition), Haag, Nederländerna.
- Trafikverket (2016): Krav Tunnelbyggande. Trafikverket, TDOK 2016:0231, Version 1.0, 2016-10-03.

WSP (2017): Transporter av farligt gods - Fördjupade analyser av mätningar utförda i Stockholm under oktober 2015. WSP (Ebba Gröndahl, Emma Strömblad), 2017-05-29, Stockholm.

Vägverket (1997): Explosionslaster vid betongtunnlar. Vägverket, Region Stockholm, ANV 1997:0187, Ringen och Yttre tvärleden 1997-06-25, Stockholm.

Vägverket (2001): Utvärdering av explosionslaster i vägtunnlar. Vägverket (Bernt Freiholtz), 2001-03-03.

Bilaga A Riskhantering

A.1 Definition av risk

Begreppet risk används på olika sätt i en mängd olika sammanhang och kan därför också ha vitt skilda betydelser. Enligt Räddningsverket (1997) kan dock följande tre betydelser identifieras att risk ger uttryck för;

- Sannolikheten att en viss (oönskad) händelse skall inträffa.
- Den negativa konsekvensen av en viss händelse.
- En sammanvägd värdering av sannolikhet och konsekvens.

Den sistnämnda definitionen är vad som vanligen används när riskanalyser genomförs för civila byggnader och infrastrukturprojekt och det är också den tolkning som används i Räddningsverket (1997). Denna definition utgår från ett sannolikhetsperspektiv och annorlunda uttryckt kan risk då definieras som

$$\text{Risk} = \text{Sannolikhet} \cdot \text{Konsekvens} \quad (\text{A.1})$$

En alternativ definition av risk är att istället utgå från ett sårbarhetsperspektiv. I ett sådant fall fränkopplas hotet från sannolikheten och risk kan då istället definieras som

$$\text{Risk} = \text{Hot} \cdot \text{Sårbarhet} \cdot \text{Konsekvens} \quad (\text{A.2})$$

Detta synsätt kan vara lämpligt att använda i militära eller säkerhetspolitiska sammanhang men även för mer civila verksamheter vid skydd av t.ex. bankverksamhet eller företagshemligheter, se Fortifikationsverket (2016) och Forsvarsbygg (2016).

Denna rapport syftar till att beskriva de risker som bedöms kunna uppkomma i samband med en förtätad stadsbebyggelse och i denna rapport används därför också definition på risk i enlighet med ekvation (A.1).

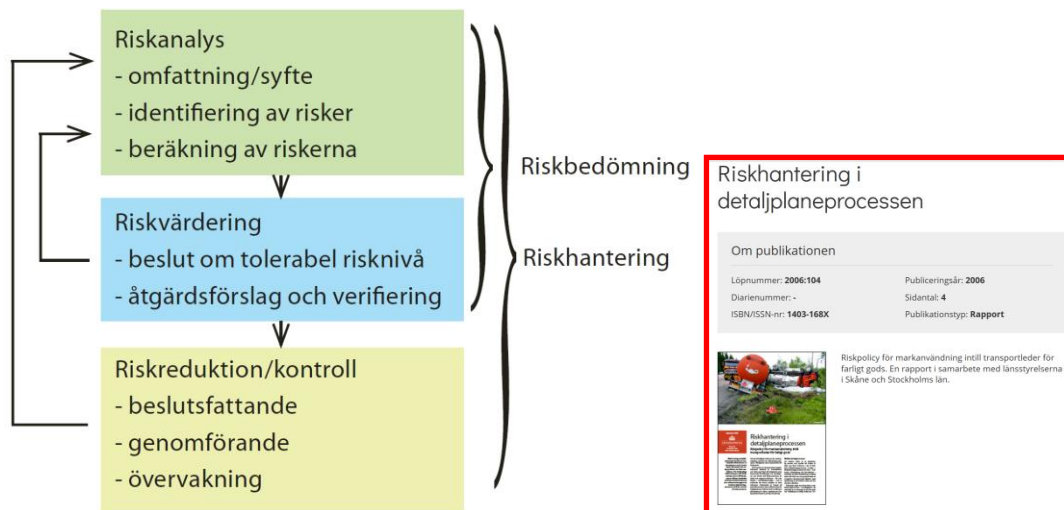
A.2 Riskhantering

A.2.1 Orientering

Enligt Länsstyrelserna (2006) har riskhanteringsprocessen fått en framträdande roll i dagens stadsplanering. Orsaken till detta är att behovet och önskemålet, i framförallt landets storstäder, har ökat att bättre utnyttja mark i utsatta lägen, exempelvis mark nära transportleder för farligt gods. En sammanfattning av hur riskhanteringsprocessen går till visas i Figur A.1. Enligt Nilsson (2003) kan denna process delas in i följande steg:

- Riskanalys
- Riskvärdering
- Riskreduktion

I de följande avsnitten behandlas dessa delar övergripande.



Figur A.1 Överblick av riskhanteringsprocessen. Från Länsstyrelserna (2006).

A.2.2 Riskanalys

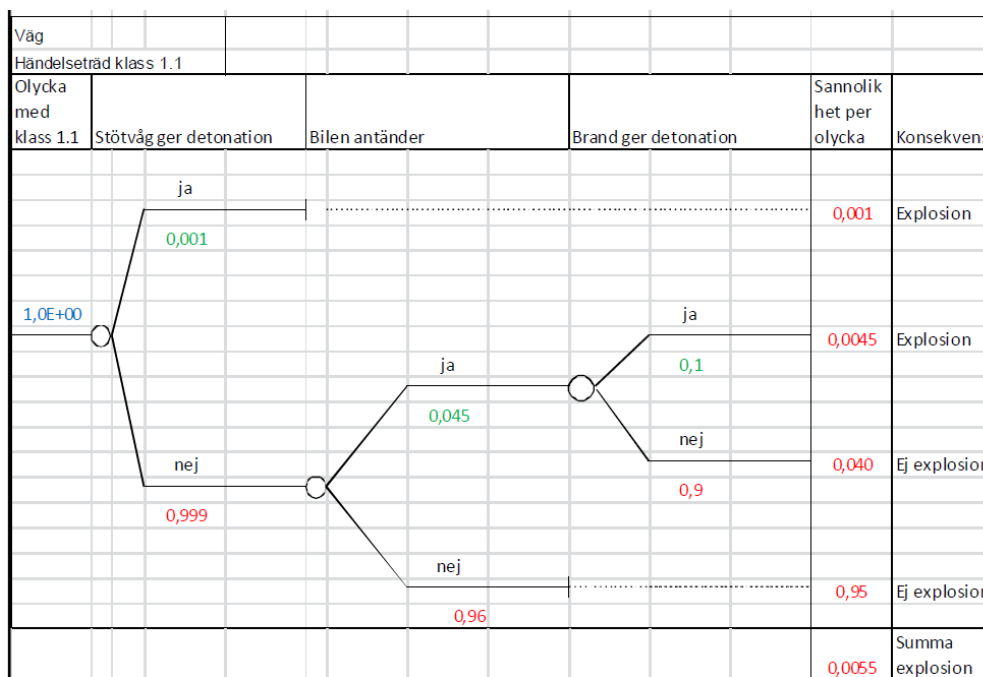
Syftet med att genomföra en riskanalys är att på ett systematiskt sätt få fram ett beslutsunderlag för olika frågor. I riskanalysen identifieras och värderas potentiella händelser och exempel på beslut som i slutändan kan behöva tas är:

- Vilken konsekvens får önskad förändring?
- Ska önskad verksamhet tillåtas?
- Erfordras riskreducerande åtgärder?

En riskanalys kan snabbt bli väldigt komplex och innan en sådan påbörjas är det därför viktigt att dess syfte och omfattning klargörs. Därefter identifieras de olyckshändelser som bedöms kunna inträffa i det studerade området och utgående från detta beräknas sannolikheten att respektive händelse ska inträffa. En sådan beräkning läggs ofta upp som ett mer eller mindre komplext händelsetråd där olika faktorer bedöms och värderas. Ett händelsetråd kan bestå av flera sammankopplade delar och för en olycka involverande transport av farligt gods är följande exempel på sådant som beaktas:

- Antalet fordon med farligt gods av den aktuella klassen som framförs i det aktuella området
- Sannolikhet att en olycka inträffar med den aktuella typen av fordon
- Sannolikhet att en olycka medför att en explosion utvecklas

Inom dessa punkter görs det ofta ytterligare en indelning med avsikt att bryta ner den aktuella delhändelsen i sina olika beståndsdelar, se Figur A.2 för exempel på del i ett händelsetråd för explosion vid en olycka med farligt gods av klass 1.

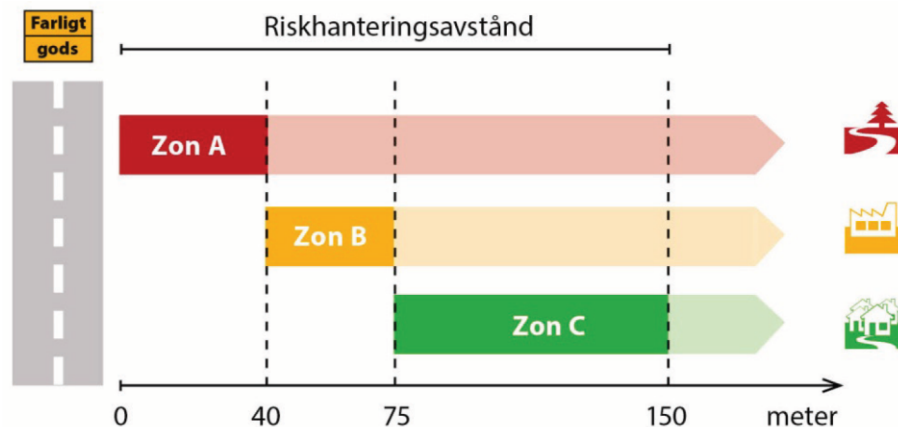


Figur A.2 Exempel på del av händelseträd för beräkning av sannolikhet att en explosion ska inträffa i händelse av en olycka involverad transport med farligt gods av Klass 1. Från Norconsult (2017).

I och med detta har den första faktorn – *Sannolikhet* – bestämts i ekvation (A.1) för beräkning av *Risk*. Nästa faktor att bestämma är *Konsekvens* och för bedömning av detta blir följande typ av parametrar aktuella att beakta:

- Antal personer i utsatt område.
- Konsekvensområde för identifierade olycksscenarioer inom vilka personer omkommer utomhus respektive inomhus.

Vid en explosion kan den potentiella konsekvensen vara starkt beroende av vilket avstånd som finns mellan den potentiella explosionskällan och den plats som de utsatta personerna befinner sig på, se avsnitt B.7 för information om hur explosionslastens magnitud påverkas av avståndet. Med anledning av detta är det i dagens stadsplanering vanligt att det finns generella riktlinjer om hur nära en transportled med farligt gods som olika typer av verksamheter får placeras. I t.ex. Länsstyrelserna (2006) har Länsstyrelserna i Skånes, Västra Götalands samt Stockholms län tagit fram gemensamma principer för riskhanteringsprocessen vid markanvändning invid transportleder för farligt gods. I se Figur A.3 visas riktlinjer från Länsstyrelsen Stockholm (2016) som bygger på dessa principer.



Rekommenderad markanvändning inom respektive zon

| Zon A | Zon B | Zon C |
|---------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------|
| G – drivmedelsförsörjning (obemannad) | E – tekniska anläggningar | B – bostäder |
| L – odling och djurhållning | G – drivmedelsförsörjning (bemannad) | C – centrum |
| P – parkering (ytparkering) | J – industri | D – vård |
| T – trafik | K – kontor | H – detaljhandel |
| | N – friluftsliv och camping | O – tillfällig vistelse |
| | P – parkering (övrig parkering) | R – besöksanläggningar |
| | Z – verksamheter | S – skola |

Figur A.3 Rekommenderade skyddsavstånd mellan transportled (väg) för farligt gods och närliggande verksamhet. Avstånd mäts från närmaste vägkant. Från Länsstyrelsen Stockholm (2016).

Andra faktorer som blir viktiga för den uppskattade konsekvensen vid en olycka är i vilken mån som närliggande byggnader är anpassade till att motstå den last som kan uppkomma vid en explosion. Här blir det väsentligt att en kollaps av den aktuella byggnaden kan förhindras eftersom detta sannolikt skulle medföra en mycket hög andel omkomna av de personer som vistades i den kollapsade delen av byggnaden.

Beroende på hur snabbt en explosion kan uppstå i samband med en olycka kommer också kunna påverka antalet personer som potentiellt sätt kan utsättas för den. Om det tar tillräckligt lång tid från det att en händelse, vilken kan utvecklas till en explosion, inträffar till dess att explosionen inträffar, så kan det eventuellt finnas möjligheter att helt eller delvis hinna utrymma närliggande byggnader. Därmed skulle också antalet personer som riskerar utsättas för en sådan händelse kunna minskas drastiskt. Konceptet kan jämföras med de säkerhetsavstånd som regelmässigt upprättas av räddningstjänsten vid dylika händelser. Möjligheten att i förväg kunna bedöma huruvida ett sådant utrymningsscenario är möjligt eller inte kan naturligtvis vara svårt att förutspå men för t.ex. BLEVE (*Boiling liquid expanding vapor explosion*) vet man att det kommer ta en viss tid innan en eventuell explosion inträffar, något som i så fall även skulle kunna vara möjligt att beakta i en riskanalys.

Värden på sannolikhet och konsekvens kan också vara kopplade till varandra, t.ex. om transporter med farligt gods företrädesvis utförs på natten kommer tillhörande konsekvens i en närliggande kontorsbyggnad, vid en olycka, förmodligen vara lägre än vad som skulle varit fallit om olyckan inträffat på dagtid.

A.2.3 Riskvärdering

Enligt Räddningsverket (1997) finns det ett antal grundprinciper som utgås ifrån vid riskvärdering:

- **Rimlighetsprincipen:** En verksamhet i vilken risken, med rimliga medel, kan reduceras ska alltid åtgärdas.
- **Proportionalitetsprincipen:** De risker som en verksamhet medför ska inte vara oproportionellt stora jämfört med de fördelar som den innebär.
- **Fördelningsprincipen:** Riskerna från en verksamhet ska vara skäligt fördelade i samhället i relation till de fördelar som den medför.
- **Principen om undvikande av katastrofer:** Eventuella olyckor kopplade till verksamheten bör medföra begränsade konsekvenser som kan hanteras inom tillgängliga beredskapsresurser.

Förutom dessa principer nämns det i Räddningsverket (1997) även att följande målsättningar bör beaktas:

- Stödja samhällets strävan efter en kontinuerlig förbättring av säkerhetsnivån
- Riskkriterier ska vara praktiskt tillämpbara med hänsyn till de riskanalysmetoder som används
- Riskkriterier ska bidra till ett kostnadseffektivt användande av resurser för riskreducerande åtgärder

Dessa principer och målsättningar kan probabilistiskt beaktas genom att ställa upp kriterier för individen samt för samhället:

- **Kriterier för individrisk:** Används för att begränsa risken för enskilda individer i samhället, t.ex. ”mest utsatta arbetaren” och kan utformas så att de svarar mot Fördelningsprincipen definierad ovan.
- **Kriterier för samhällsrisk:** Används för att begränsa den kollektiva risken för grupper av människor. Kriterierna kan utformas så att de svarar mot Proportionalitetsprincipen, Fördelningsprincipen samt Princip om undvikande av katastrofer.

Individrisk är ett teoretiskt mått som beskriver risken att omkomma under en given tidsperiod och uttrycks vanligen som risk/år. Det finns olika definitioner på individrisk men en sådan är risken för att en hypotetisk individ omkommer genom att kontinuerligt befinna sig inom ett givet område. Enligt Räddningsverket (1997) bedöms individrisker som understiger 10^{-7} vara små, dvs. att sannolikheten att förolyckas vid en konstant vistelse inom det aktuella området är en gång på 10 miljoner år. Som en acceptabel övre gräns föreslås 10^{-5} , dvs. en gång på 100 000 år, utgöra. Intervallet 10^{-7} till 10^{-5} utgör därmed en risknivå som bedöms vara acceptabel om alla rimliga åtgärder för att minska risken har vidtagits.

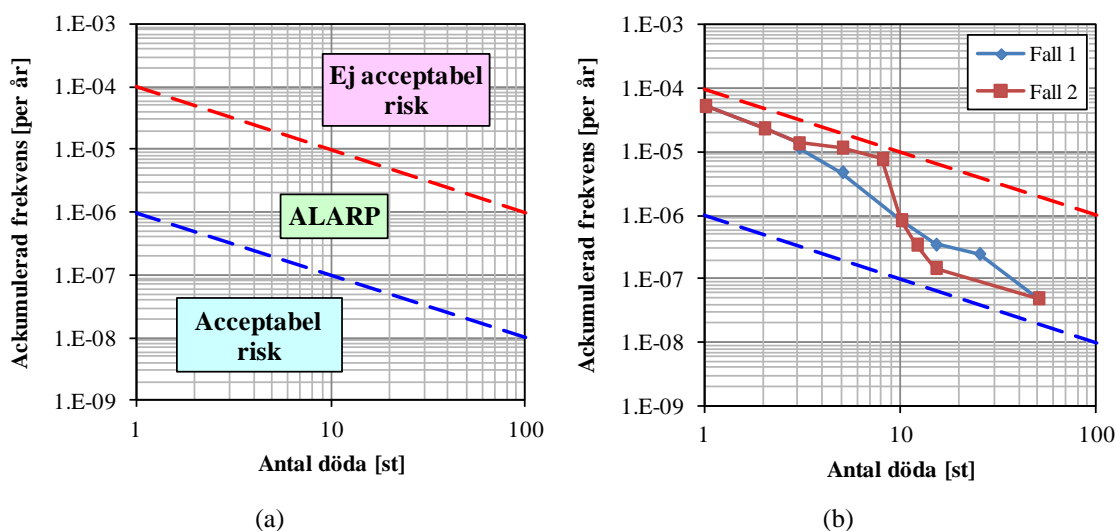
Individrisk beaktar inte antalet personer som befinner sig inom ett givet område eller hur frekvent deras vistelse där är. För att bedöma detta används istället måttet samhällsrisk i vilket det finns möjlighet att beakta dessa parametrar. Vid transportsituationer, t.ex. en byggnad placerad nära en transportled med farligt gods, är det enligt Räddningsverket (1997) ofta mer relevant att beakta samhällsrisk än individrisk. Därför läggs i den här rapporten också fokus på samhällsrisk. Denna presenteras ofta i

form av så kallade FN-kurvor där F (*frequency*) står för den ackumulerade frekvensen av antalet olyckor och N (*number*) för antal omkomna, se Figur A.4. För att bedöma om den beräknade risken är acceptabel jämförs framtagna FN-kurvor med tillåtna gränsvärden. Dessa gränsvärden varierar mellan olika länder men den bakomliggande principen är densamma. Frekvensskalan delas in i tre områden enligt Figur A.4a:

- Acceptabel risk
- ALARP (*As Low As Reasonably Possible*).
- Ej acceptabel risk

Användandet av ackumulerad frekvens för potentiella händelser medför att en FN-kurva alltid uppvisar en lutning neråt höger. Grafen ska därmed utläsas som den bedömda sannolikheten att det inträffar ett visst antal dödsfall på ett år. Risk som hamnar inom det övre gränsområdet betraktas som ej acceptabel – för att den aktuella verksamheten ska tillåtas måste risken först pressas ner till att ligga inom ALARP-området. Risk som hamnar inom det undre riskområdet bedöms vara så små att inga särskilda åtgärder erfordras. För risk som infaller inom ALARP-området (ofta ett normalt utfall) ska rimliga riskreducerande åtgärder fortfarande göras. Gränsdragningen mellan dessa olika områden definieras i Räddningsverket (1997) som 1 död vid en ackumulerad årsfrekvens på 10^{-4} och 10^{-6} för den övre respektive den undre gränsen. För båda dessa gränser gäller att lutningen på kurvan är -1, dvs. 10 döda vid en frekvens på 10^{-5} och 10^{-7} .

I Figur A.4b och Tabell A.1 ges ett hypotetiskt exempel med avsikt att illustrera hur FN-kurvorna räknas ut samt jämförs med uppsatta riskkriterier. Två fall visas där de ingående värdena enbart skiljer sig i två punkter, se Tabell A.1. Denna förhållandevis begränsade justering medför dock fortfarande en tämligen stor skillnad i de båda FN-kurvornas utseende. Av graferna i Figur A.4b kan exempelvis utläsas att frekvensen för en olycka som ger upphov till 3 eller fler döda uppgår till $1,39 \cdot 10^{-5}$ för både Fall 1 och Fall 2.



Figur A.4 (a) Kriterier för accepterad risk. Baserat på Räddningsverket (1997). (b) Exempel på jämförelse av FN-kurva med riskkriterier. FN-kurvor baseras på värden listade i Tabell A.1.

Tabell A.1 Ingångsdata för hypotetiska FN-grafer i Figur B.1. För att illustrera effekten på indata studeras två likartade fall där skillnaden mellan de båda fallen är markerade med understruken text.

| Olycks-scenario | Frekvens | Fall 1 | Fall 2 | Fall 1 | | Fall 2 | |
|-----------------|----------|------------|------------|------------|---------------|------------|---------------|
| | | Antal döda | Antal döda | Antal döda | Ack. frekvens | Antal döda | Ack. frekvens |
| 1 | 3,00E-05 | 1 | 1 | 50 | 5,00E-08 | 50 | 5,00E-08 |
| 2 | 1,00E-05 | 2 | 2 | 25 | 2,50E-07 | 15 | 1,50E-07 |
| 3 | 7,00E-06 | <u>3</u> | <u>8</u> | 15 | 3,50E-07 | <u>12</u> | 3,50E-07 |
| 4 | 4,00E-06 | 5 | 5 | 10 | 8,50E-07 | 10 | 8,50E-07 |
| 5 | 2,00E-06 | 3 | 3 | 5 | 4,85E-06 | <u>8</u> | 7,85E-06 |
| 6 | 5,00E-07 | 10 | 10 | 3 | 1,19E-05 | 5 | 1,19E-05 |
| 7 | 2,00E-07 | <u>25</u> | <u>12</u> | 3 | 1,39E-05 | 3 | 1,39E-05 |
| 8 | 1,00E-07 | 15 | 15 | 2 | 2,39E-05 | 2 | 2,39E-05 |
| 9 | 5,00E-08 | 50 | 50 | 1 | 5,39E-05 | 1 | 5,39E-05 |

En fördel med att använda FN-kurvor i riskvärderingen är att de ger en god överblick på förhållandet mellan frekvens och antalet omkomna. Detta medför då även att samhällets önskan att undvika katastrofer, många döda i en enskild olycka, enklare kan kontrolleras.

A.2.4 Riskreducerande åtgärder

Om risken hamnar i eller ovanför ALARP-området, definierat i Figur A.4a, måste riskreducerande åtgärder göras så att risken hamnar inom ALARP-området. Om risken redan befinner sig inom ALARP-området ska dock alla rimliga åtgärder göras. Exakt vari dessa åtgärder består i beror på situationen men ska, via en kostnads-nytta-analys med hänsyn till både risker och kostnader, göras med beaktande av Rimlighetsprincipen som anges i avsnitt A.2.3. Beaktat dessa riskreducerande åtgärder görs sedan en uppdaterad riskbedömning som jämförs med aktuella riskkriterier.

Några exempel på åtgärder som kan kopplas till olycksscenario med explosion är:

- Ökat skyddsavstånd mellan transportled och närliggande byggnad.
- Uppförandet av en skyddande mur mellan transportled och byggnad.
- Utforma byggnaden med en tät fasad (kan utgöras av explosionståliga fönster) för att förhindra att splitter och explosionstryck tar sig in i byggnaden.
- Använda brandfasta material på byggnadsfasad som vetter mot transportled.
- Säkerställa att närliggande skyddskonstruktioner klarar av att hantera de explosionslaster som bedöms kunna uppstå .
- Sprinklersystem i tunnel minskar risken att explosion uppstår i brinnande fordon.
- Omdirigering av fordon som transporterar farligt gods.
- Striktare hastighetsbegränsning minskar sannolikheten att en olycka inträffar.
- Utformning av byggnad så att dess utrymmen nära lastkälla inte uppmuntrar till stadigvarande vistelse (t.ex. teknikutrymmen och förråd).

Ett alternativt sätt att påverka bedömda risker är att utgå från ett förbättrat underlag till den genomförda riskanalysen. Denna kan ofta baseras på knapphändig statistik, t.ex. rörande mängden transporter med farligt gods och/eller mängden och typen av gods som transporteras. Vidare kan det finnas stora osäkerheter i de antaganden som görs om hur ofta en viss typ av olycka resulterar i exempelvis en explosion. På grund av den osäkerhet som råder för sådana antaganden görs dessa ofta på säker sida. Genom att kombinera flera konservativa antaganden är det dock möjligt att den slutliga risken överskattas onödigt mycket.

A.2.5 Tillförlitlighet hos riskanalys

En bra riskanalys förutsätter tillgång till bra indata till de bedömningar som görs, både vad gäller sannolikhet och konsekvens. Detta kan exempelvis vara tillgänglig statistik på mängden trafik med farligt gods för den aktuella vägsträckan, sannolikheten att en brand i ett fordon utvecklas till en explosion eller vilken skada som personer och byggnader i närheten drabbas av vid händelse av en sådan explosion. Det inses att det kan vara svårt att få fram ett definitivt värde för flera av de ingångsparametrar som efterfrågas i en riskanalys. Detta medför dels att det är vanligt med konservativa antaganden och dels att det kan vara en stor spridning mellan olika riskanalyser som utförts av olika personer.

Att det kan finnas en betydande spridning mellan olika riskanalyser har också observerats. I en jämförelse av riskanalyser i storstadsregionerna i Stockholms, Västra Götalands samt Skånes län, utförda av Alvarsson och Jansson (2016), konstateras det att de skillnader som bedöms leda till störst påverkan på resultatet är kopplade till explosion (samt giftigt gasmoln). För dessa fall noterades en stor variation i både uppskattad frekvens och konsekvens (antal döda). I Dahlén (2019) har en jämförelse gjorts av åtta riskanalyser utförda för lika många projekt inom en 2 km lång sträcka längs väg E6 i stadsdelen Gårda i Göteborg. Riskanalyserna utfördes mellan 2002 och 2017 av totalt tre olika konsultföretag. Även om förutsättningarna således är tämligen likvärdiga så uppvisar jämförda riskanalyser stundtals betydande skillnader med hänsyn till t.ex. antalet transporter med farligt gods. Alvarsson och Jansson (2016), påtalar dock att ett komplext händelseträd, vilket ofta kan vara fallet vid en explosion, också innebär en ökad spridning i resultat mellan olika riskanalyser. Dahlén (2016) påpekar i sin tur att osäkerheter i den tillgängliga statistiken för fordon som transporterar farligt gods genom Göteborg är bristfällig, se även avsnitt A.4, och att detta är en bidragande orsak till observerade skillnader.

För att hantera de avvikelser som kan fås på grund av ovan nämnda svårigheter med korrekta indata till riskanalyserna så är det vanligt att det även genomförs känslighetsanalyser genom att olika parametrar varieras.

A.3 Indata till riskanalys med hänsyn till explosion

A.4 Statistik för transport av farligt gods

Enligt MSB (2019) definieras farligt gods som ämnen eller föremål som vid transport, gå grund av sina kemiska eller fysikaliska egenskaper, betraktas som farliga och som kan orsaka skada på omgivningen. Farligt gods kan ha olika typer av egenskaper (t.ex. explosiva, brandfarliga eller giftiga) och delas in i olika klasser, totalt nio stycken, med olika undergrupper. I detta arbete ligger fokus på explosioner och därför behandlas här enbart de klasser som har koppling till denna typ av händelse. I Tabell A.2 listas dessa tillsammans med en övergripande beskrivning.

Tabell A.2 Farligt gods kopplade till explosion. Baserad på MSB (2019).

| Klass | Beskrivning | Beskrivning |
|-------|--|---|
| 1 | Explosiva ämnen och föremål | Syftar på detonation av t.ex. sprängämnen, ammunition och fyrverkerier. |
| 2 | Gaser | Syftar på brandfarliga gaser så som exempelvis gasol och vätgas. Dessa gaser kan bland annat ge upphov till en gasexplosion eller en BLEVE (<i>Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion</i>), som förutom trycklasten även kan ge upphov till ett omfattande eldklot. Gasexplosioner utvecklas oftast som en svagare typ av explosion (deflagration). |
| 5 | Oxiderande ämnen och organiska peroxider | Syftar på t.ex. ammoniumnitrat eller väteperoxid. Oxiderande ämnen utgör enskilt inte någon risk för omgivningen. Om de blandas med t.ex. brännbara vätskor så kan dock en kraftig explosion utvecklas ² . Många organiska peroxider brinner häftigt och vissa kan sönderfalla explosionsartat, särskilt om de är inneslutna. |

Som framgår av avsnitt A.2.2 utgör information om andelen transporter med farligt gods en viktig information för denna typ av riskanalyser. Det befintliga underlaget för sådan information är dock begränsat. Det statistiska underlag som ofta utgör en viktig grund för detta underlag är presenterat i Räddningsverket (2006). I detta dokument presenteras en kartläggning av godstransporter (väg, järnväg, till sjöss, i luften) i Sverige under september månad 2006. Insamlingen gjordes via brevenkäter samt från databaser hos företag och myndigheter, där medverkan i kartläggningen var frivillig. Resultaten redovisas som kartor och tabeller, se Figur A.5 för exempel, och syftar enbart till att visa tendenser på mängd fraktat farligt gods. Enbart den totala mängden gods redovisas, hur fördelningen av mängden gods på enskilda transporter fördelar sig redovisas dock inte.

² Exempelvis sprängämnet ANFO, vilket användes av Anders Behring Breivik för terrorattentatet i Oslo 2011, utgörs av en blandning av ammoniumnitrat och dieselolja.



Figur A.5 Kartläggning av antal ton gods av klass 1 som fraktades i Södra Sverige i september 2006. Från Räddningsverket (2006).

Det påtalas uttryckligen i Räddningsverket (2006) att de kartlagda godsmängderna enbart är framtagna för en specifik månad och att underlaget inte kan räknas upp till årsbasis. Trots detta synes det vara vanligt bland riskanalytiker att göra just detta, se Dahlén (2019). En trolig anledning till detta medvetna avsteg från den ursprungliga intentionen är förmodligen att det ofta saknas alternativ i form av tillförlitlig statistik. Information om transporter inom en och samma tätort, t.ex. Stockholm eller Göteborg, ges inte i redovisade kartor över landet utan finns enbart förenklat medtagna som en totalsumma av mängd farligt gods inom tätorten. Utgående från en genomgång av ett 20-tal riskanalyser i framförallt Göteborgs- och Stockholmsområdet har det i Dahlén (2019) konstaterats att det även är vanligt att räkna upp de i Räddningsverket (2006) angivna värdena med hänsyn till Trafikverkets prognos för ökning av godstransporter med tiden.

För en riskanalys kan informationen av den typ som visas i Figur A.5 vara alltför grov. Detta gäller särskilt de tätorter inom vilka transporter av farligt gods är vanligt förekommande. För att förbättra tillgänglig statistik har det på olika håll i landet därför utförts kompletterande mätningar, t.ex. i Stockholm (WSP, 2015) och Jämtlands län (Länsstyrelsen Jämtland, 2018). I Stockholm gjordes mätningar på 15 platser under en månads tid i maj samt oktober 2015 där antalet passager av farligt gods registrerades med hjälp av kameror. Resultaten av dessa mätningar visar bland annat att skillnaden mellan de båda mätperioderna var liten medan det inte görs någon jämförelse med statistiken som presenteras i Räddningsverket (2006). Kartläggningen i Jämtland genomfördes i maj 2018 men detaljerade resultat från denna är sekretessbelagda. I utredningen konstateras det dock att resultaten skiljer sig kraftigt mot vad som redovisas i Räddningsverket (2006) – andelen transporter med farligt gods har ökat mycket mellan 2006 och 2018.

Bilaga B Explosionslast

B.1 Definition av explosion

En explosion uppstår genom en fysikalisk eller kemisk tillståndsförändring hos ett material med omvandling av potentiell energi till mekaniskt arbete. Den plötsliga energifrigörelse som detta innebär medför en snabb expansion av materia till en mycket större volym än den ursprungliga, något som leder till en hastig tryckökning. Detta kan exempelvis utgöras av de gaser som bildas när ett sprängämne eller gas exploderar – en så kallad kemisk explosion – eller av en starkt komprimerad gas i ett tryckkärl som brister – så kallad fysisk explosion.

För kemiska explosioner skiljs det på två typer – deflagration och detonation. En deflagration är en i sammanhanget ”långsam” process och kan beskrivas som en låg-explosiv explosion, medan en detonation innebär en snabb energifrigörelse som medför en högexplosiv explosion. En deflagration är vad som vanligen fås vid en gas-explosion medan en detonation är vad som fås av sprängämnen.

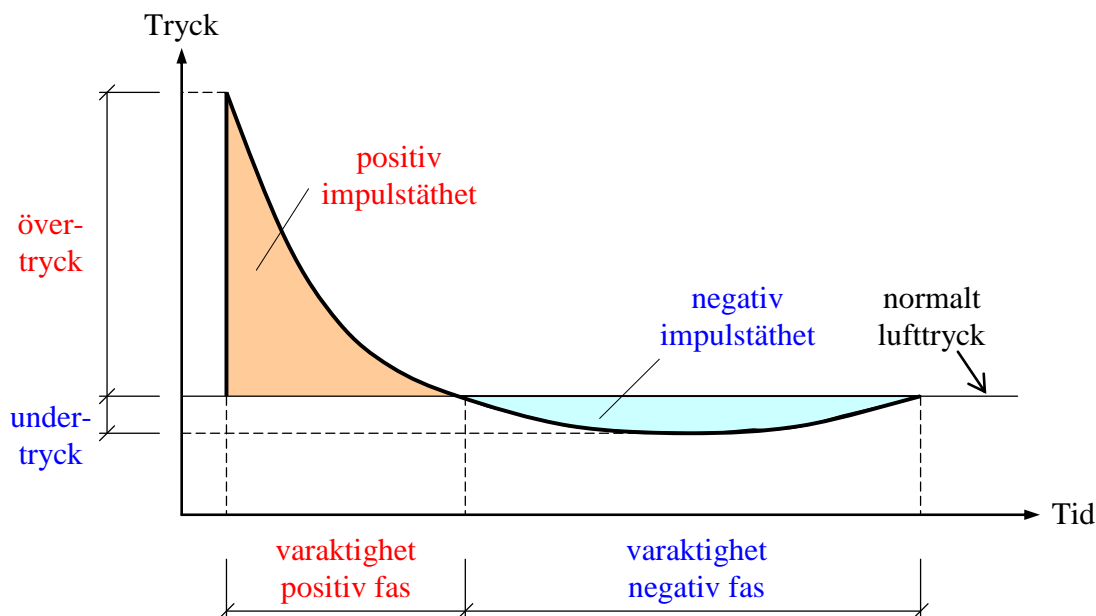
Magnituden hos en explosion anges i den energimängd som släpps fri men beror till stor del även på hur snabbt energin frigörs, där en snabb energifrigörelse resulterar i en kraftfullare explosion. Frigjord energimängd mäts i enheten Joule men av praktiska skäl kan det vara mer informativt att uttrycka explosionens styrka på ett mer tillämpbart sätt. För exempelvis sprängämnen är därför en allmänt accepterad måttreferens på laddningens storlek att ange den i en ekvivalent mängd av sprängämnet TNT (motsvarar cirka 4,6 MJ/kg TNT). För en gasexplosion anges dock energimängden i enheten Joule.

B.2 Luftstöt våg

En explosion i luft ger upphov till en kompakt gas med stort energiinnehåll som under högt tryck tvingar tillbaka den omgivande atmosfären. Denna plötsliga expansion ger upphov till en stöt våg som i överljudshastighet rör sig ut från explosionens centrum. 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. Allteftersom 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.

Vid dimensionering eller analys av en belastad struktur används storheter som tryck, varaktighet och impulstäthet. I Figur B.1 visar ett principiellt tryck-tidssamband hos en ideal luftstöt våg där dessa storheter presenteras. Sambandet mellan explosionens egenskaper och avstånd samt ovan nämnda stöt vågsstorheter är besvärligt att beskriva analytiskt. Därför används normalt empiriska samband och/eller numeriska metoder för att bestämma aktuella stöt vågsstorheter. I Johansson (2012a, b) ges grundläggande ekvationer för formen hos den ideala stöt vågen samt empiriska samband för att bestämma stöt vågsparametrar såsom tryck, impulstäthet och varaktighet från en detonation av ett sprängämne. För en gasexplosion ges motsvarande information i Johansson (2013, 2017).

Stötvågens påverkan på omgivningen beror framförallt på det frisläppta energiinnehållet samt av avståndet till explosionskällan. Allmänt kan sägas att en ökande energimängd i explosionen leder till högre tryck och större impulstäthet. Dessa båda parametrar minskar dock med ökande avstånd från explosionskällan medan varaktigheten ökar med ökande avstånd.



Figur B.1 Principiell bild av ett typiskt tryck-tidssamband för en luftstövåg vid fri avlastning.

En kortfattad förklaring av luftstövågens olika storheter ges nedan.

Tryck, P [Pa]: Anger det totala lufttrycket, inbegripande normalt lufttryck P_0 . För ostörd luft uppgår det normala lufttrycket, vid en lufttemperatur på $T = 15^\circ\text{C}$, till omkring $P_0 = 101,3 \text{ kPa}$.

Positiv fas: Definierar den del av stötvågen som uppvisar ett tryck som är större än det normala lufttrycket, dvs. $P > P_0$. Den positiva fasan utgör normalt den dimensionerande lastdelen i en stötvåg och är det som normalt beaktas vid kontroll av effekt av explosion. Indexet "+" används ofta för att beteckna en stötvågsstorhet som tillhör den positiva fasan.

Negativ fas: Definierar den del av stötvågen som uppvisar ett tryck som är lägre än det normala lufttrycket, dvs. $P < P_0$. Det är inte ovanligt att inverkan av den negativa fasan försummas vid kontroll av explosionens effekt. Indexet "-" används vanligen för att beteckna en stötvågsstorhet som tillhör den negativa fasan.

Övertryck, P^+ [Pa]: Övertrycket anger storleken på det tryck som överstiger det normala lufttrycket P_0 , dvs. $P^+ = P - P_0$, där $P > P_0$. I en stötvåg är övertrycket som störst i stötvågsfronten för att sedan snabbt sjunka ner till normalt tryck för ostörd luft. I en explosion finns ingen faktisk begränsning på hur stort övertryck som kan uppstå.

Undertryck, P^- [Pa]: Undertryck anger storleken på det tryck som understiger det normala lufttrycket P_0 , dvs. $P^- = P_0 - P$, där $P < P_0$. Detta är ett fenomen som uppstår efter det att stötvågen från en explosion har passerat studerad punkt.

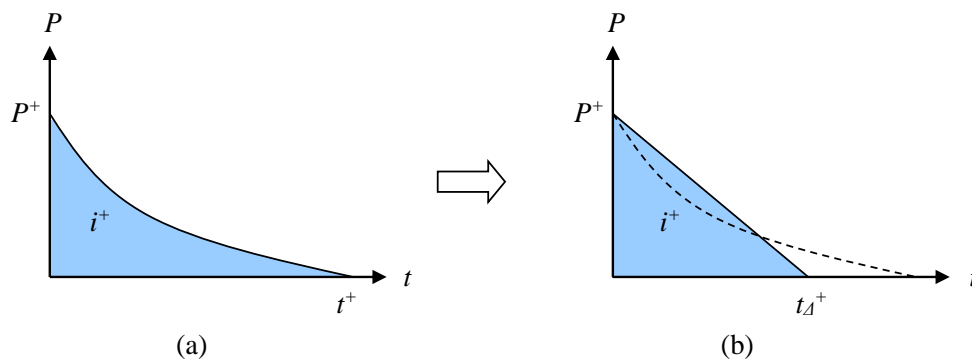
Den kraftfulla energifrigörelsen gör att luftpartiklarna i det passerade området slungats iväg så att trycket därmed understiger det normala lufttrycket. Ett undertryck kan sägas motsvara ett partiellt vakuum och dess storlek är därmed begränsat i sin storlek till frånvaron av det normala lufttrycket. För ostörd luft uppgår det normala lufttrycket till omkring $P_0 = 101,3$ kPa vilket innebär att maximalt undertryck i ett sådant fall begränsas till samma värde.

Varaktighet, t^+ , t^- [s]: För en explosion skiljs det på varaktighet för positiv och negativ fas, t^+ respektive t^- . Allmänt gäller att varaktigheten i den negativa fasan är betydligt längre än i den positiva.

Impulstäthet, i [Pa s]: Tidsintegralen av en explosionslasts tryck-tidssamband ger upphov till en impulstäthet och det skiljs på impulstäthet i positiv fas och negativ fas, i^+ respektive i^- . Vid kortvariga belastningsförlopp är det denna, snarare än trycket, som beskriver den verkande lastens egenskaper. Allmänt gäller att impulstätheten i den negativa fasan är något större än i den positiva.

I dimensionering är det vanligt att inverkan av undertrycket i den negativa fasan försummas. Detta är oftast på säker sida men kan vid vissa tillfällen, t.ex. om den belastade strukturens återsvängning är kritisk, behöva beaktas. Tryck-tidssambandet för en stötvåg från en explosion är olinjärt men approximeras ofta med en triangulär last-historia, dvs. ett linjärt avtagande tryck, utgående från aktuellt övertryck och impulstäthet så som schematiskt illustreras i Figur B.2. Stötvågens varaktighet t_{Δ}^+ beräknas då utgående från övertrycket P^+ och impulstätheten i^+ som

$$t_{\Delta}^+ = \frac{2 \cdot i^+}{P^+} \quad (\text{B.1})$$



Figur B.2 Schematisk jämförelse av (a) exponentiell och (b) förenklat, linjärt tryck-tidssamband för en stötvåg.

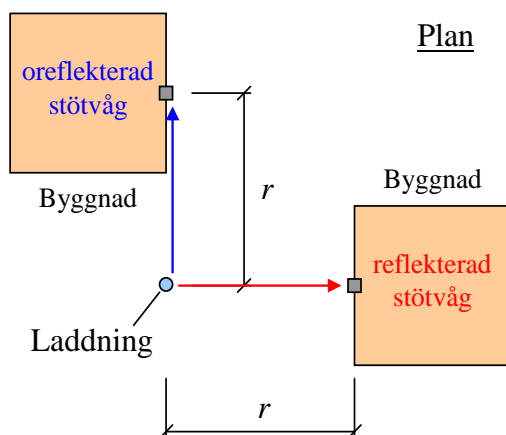
B.3 Reflexion

När en stötvåg träffar ett fastare medium kommer dess egenskaper förändras dramatiskt och det skiljs därför på egenskaperna hos en oreflekterad och en reflekterad stötvåg. Indexen s och r används ofta för att beteckna stötvågsstorhet tillhörande oreflekterad respektive reflekterad stötvåg. Reflexion av stötvågor är ett komplext fenomen och det skiljs på reguljär reflexion (normalreflexion och sned reflexion) samt Mach-reflexion. Här hanteras dock enbart normalreflexion och för övriga fall hänvisas till exempelvis FortH2 (1987) eller Johansson (2012).

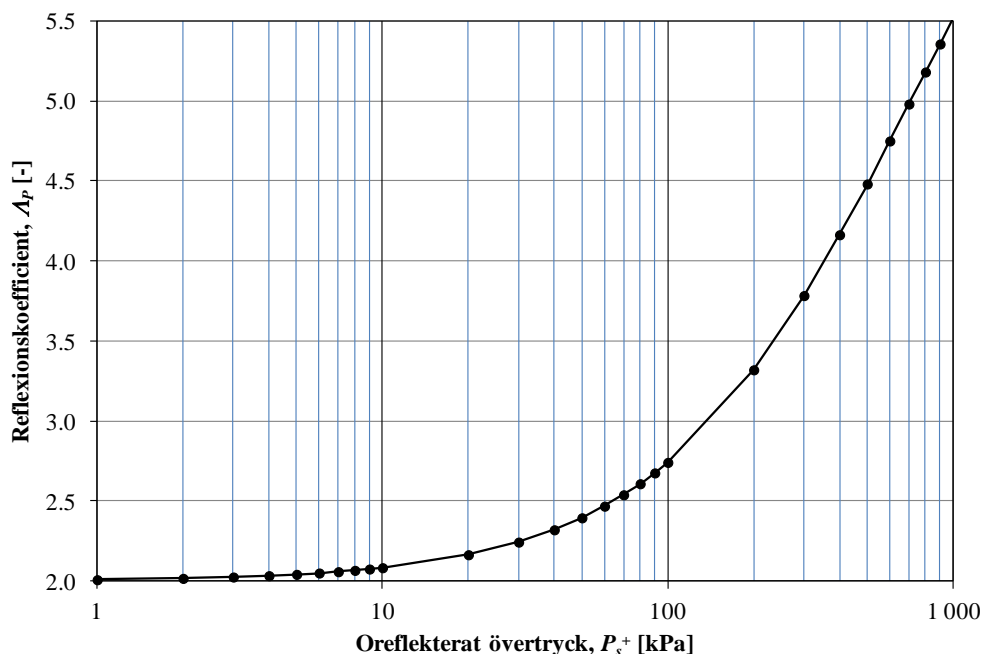
Den enklaste formen av reflexion är normalreflexion och innebär att stötvågen träffar en reflekterande yta i rät vinkel, se Figur B.3. En sådan reflexion medför att det oreflekterade övertrycket P_s^+ ökar med en faktor Λ till ett oreflekterat övertryck P_r^+ . För övertryck $P_s^+ \leq 1000$ kPa kan denna reflexionsfaktor beräknas som

$$\Lambda = \frac{P_r^+}{P_s^+} = \frac{8P_s^+ + 14P_0}{P_s^+ + 7P_0} \quad (\text{B.2})$$

I Figur B.4 visas förhållandet mellan Λ och P_s^+ enligt detta uttryck. För större övertryck än 1000 kPa blir Λ dock större än vad som anges i ekvation (B.2), se Johansson (2012a).



Figur B.3 Skillnad på lastsituation mellan oreflekterad och reflekterad stötvåg.



Figur B.4 Förhållande mellan reflexionskoefficient Λ och oreflekterat övertryck P_s^+ enligt ekvation (B.2).

B.4 Explosion i slutna utrymmen

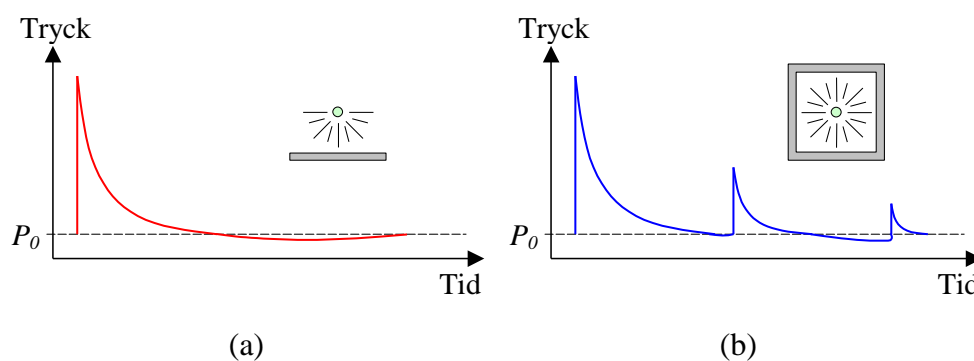
Resultatet från en explosion i ett slutet utrymme kan skilja sig påtagligt jämfört med motsvarande explosion i det fria. Den begränsade volymen på vilken explosionsgaserna kan breda ut sig gör att belastningen ökar jämfört med vad som fås i det idealiserade fallet. Denna lastökning benämns förenklat som fördämningseffekter. Förutom ökat övertryck, orsakat av flerfaldiga reflexioner inne i det slutna utrymmet, så fås även en betydande ökning av tryckets varaktighet. Hur stor denna ökade varaktighet blir är en funktion av hur snabbt övertrycket kan tränga ut från det inneslutna utrymmet via befintliga öppningar. En begränsning av den fria avlastningen resulterar således i att det av explosionen orsakade övertrycket bibehålls längre, vilket i sin tur leder till en ökad belastning.

I princip går det att skilja på tre olika fall, vilka samtliga kan ge betydande bidrag till den totala lastpåverkan på omgivningen:

- Utlöst energi koncentreras till förflyttning i en given riktning
- Ökat antal reflexioner
- Kvarhållna spränggaser

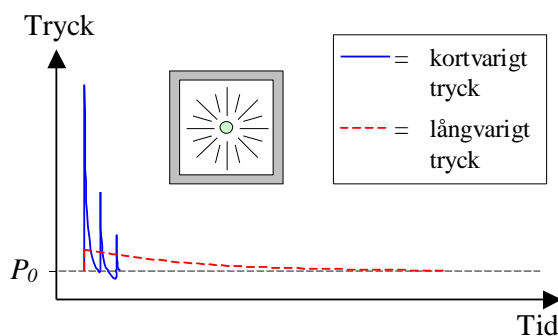
Den förstnämnda punkten syftar på den effekt som fås vid explosion i exempelvis en tunnel. Tunnelns utformning, med två öppna ändar, möjliggör avlastning men i princip enbart i en riktning. Därmed kommer aktuell energiintensitet på en given sträcka från explosionscentrum också bli betydligt högre än vad fallet skulle vara vid en fri avlastning, där möjlighet finns till en ostörd sfärisk utbredning. Detta leder i sin tur till ett ökat tryck men framförallt till en ökad varaktighet hos den resulterande explosionslasten. Vidare resulterar en dylik fördämning i att trycket bibehålls till en betydande storlek även på långa avstånd från explosionscentrum.

Den andra punkten syftar på att andelen reflexioner ofrånkomligt ökar vid explosion i ett slutet utrymme. Beroende på utrymmets beskaffenhet ger detta upphov till en komplicerad serie av sekundära reflexioner så som schematiskt illustreras i Figur B.5. Här kan noteras att 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. Tidsskillnaden mellan dessa reflexionstoppar beror på läget hos studerad punkt, utrymmets geometri samt explosionens styrka, varför det är fullt möjligt att överlappande trycktoppar kan uppstå.



Figur B.5. Schematiskt tryck-tidssamband vid vägg för (a) explosion i det fria med en reflekterande yta, och (b) explosion i slutet utrymme med flera reflekterande ytor. Från Johansson och Laine (2012a).

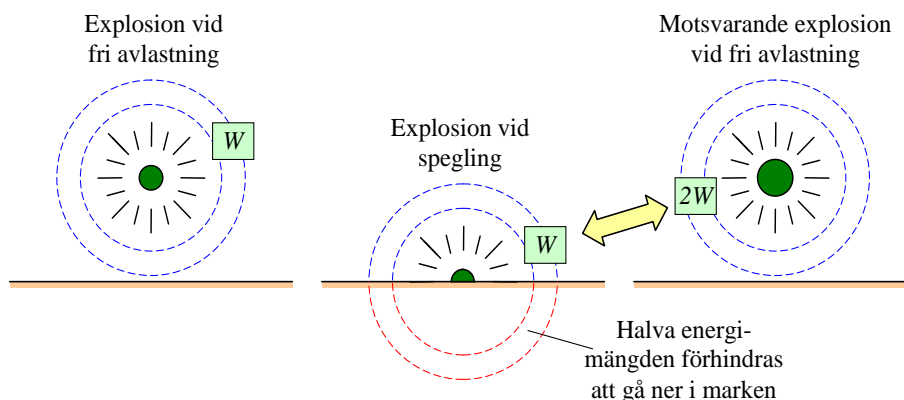
Den tredje punkten härrör från en begränsning av stötvågens möjlighet att utvidgas. Detta medför att de spränggaser som frigörs i samband med en explosion inte kan ventileras bort i tillräcklig omfattning och därför ger upphov till ett långvarigt tryck. Detta tryck är betydligt lägre än det maximala tryck som fås vid den första kortvariga reflexion som illustreras i Figur B.5 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 B.6.



Figur B.6 Schematisk jämförelse av kortvarigt och långvarigt tryck som erhålls vid explosion i slutet utrymme. Från Johansson och Laine (2012a).

B.5 Spegling

När en laddning detonerar nära en reflekterande yta påverkar detta stötvågens styrka och utbredning. Stötvågens egenskaper är en funktion av explosionens energiintensitet, vilket innebär att de även är beroende av storleken på den volym i vilken utbredningen sker. En jämförelse av en explosion långt från eventuella störande reflexioner där fri avlastning är möjligt görs här med vad som händer om explosionen istället sker i kontakt med en reflekterande yta. Den volym som stötvågen kan breda ut sig över blir för ett sådant fall hälften så stor jämfört med ett fall där explosion har möjlighet till helt fri utbredning. I ett idealiserat fall, med antagandet av att ingen energi försvinner ner i den reflekterande ytan, innebär detta att den stötvåg som genereras vid ett sådant fall för en given laddning W har samma egenskaper som den stötvåg som orsakas av en dubbelt så stor laddning ($2W$) som har fri tryckavlastning, se Figur B.7.



Figur B.7 Schematisk bild som illustrerar ideal spegling. En del av explosionens frigjorda energi går dock i realiteten alltid ner i marken varför speglingskvoten i verkligheten alltid blir < 2 . Från Johansson (2012a).

Detta är dock ett konservativt antagande på säker sida eftersom en del av energin kommer gå förlorad när marken deformeras av explosionen. Hur mycket energi som försvinner ner i marken beror på underlagets egenskaper och laddningens storlek – en kraftig stålplatta under laddningen skulle exempelvis ge en högre speglingsfaktor än om laddningen låg direkt på lös sand. Vidare resulterar en kraftigare explosion i att mer energi går ner i marken vilket också resulterar i en lägre speglingsfaktor. Ett ungefärligt värde på 1,8 istället för en dubbling av laddningsvikten är därför mer rimligt och används också frekvent i litteraturen, se Baker (1973).

B.6 Diffraction

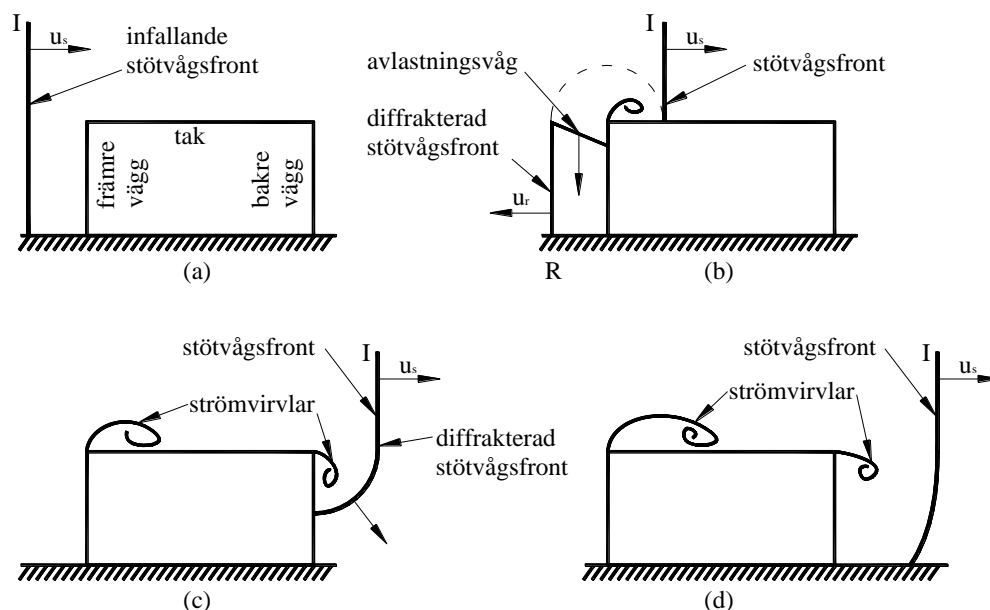
Lasten från en explosion begränsas inte till att enbart verka mot de ytor som är synliga från explosionscentrum. Det resulterande övertrycket som verkar i stötvågen kan även röra sig runt hörn och således ge upphov till last, om än reducerad sådan, mot en struktur som inte syns från explosionskällan.

När en stötvåg når fram till ett solitt objekt, såsom en byggnad, inträffar ett komplicerat förlopp som benämns diffraction. I detta begrepp innefattas vad som händer när stötvågen sprider sig bakom och förbi den utsatta byggnaden och är således en förutsättning för att söka förstå hur den totala lastbilden från en explosion som verkar i en komplex geometri kommer att se ut. Diffraction kan således ha stor betydelse för hur en utsatt byggnad påverkas av en stötvåg. Detta gäller framförallt stötvågor med lång varaktighet, även om principen är densamma för mer kortvariga laster.

I Figur B.8 ges en principiell bild av vad som händer i ett tvådimensionellt fall när en plan stötvåg passerar en byggnad:

- (a) En plan stötvåg I rusar med hög hastighet fram mot byggnaden. Vid byggnaden råder fortfarande helt ostörda förhållanden.
- (b) När den infallande vågen I når den främsta väggen uppstår en reflexionsvåg R i motsatt riktning. Detta ger upphov till ett reflekterat tryck vid den främre väggen där trycket ögonblickligen ökar från $P_0 + P_s^+$ till $P_0 + P_r^+$. Ovanför väggen fortsätter stötvågen sin färd framåt över taket och belastar detta med ett oreflekerat tryck $P_0 + P_s^+$. Eftersom trycket är lägre på taket än vid väggen ($P_s^+ < P_r^+$) uppstår en avlastningsvåg som sprider sig nedåt längs den främre väggen, i vilket ett oreflekerat tryck P_s^+ råder.
- (c) När stötvågen når byggnadens baksida diffrakterar den runt hörnet och ger upphov till ett oreflekerat tryck även uppstår på byggnadens baksida. När stötvågen rör sig runt ett hörn störningar i form av strömvirvlar, vilket gör att en tryckreduktion erhålls. Hela byggnaden har nu påverkats medan luften framför den framrusande stötvågen fortfarande är helt ostörd
- (d) Stötvågen I har nu helt passerat byggnaden och lämnat efter sig strömvirvlar vid mötena mellan vägg och tak.

Stötvågens beteende vid diffraction beror även på geometriska betingelser hos byggnaden. Om byggnadens djup är tillräckligt stort är det exempelvis möjligt att avlastningsvågen helt hinner negligera inverkan av reflexionen på byggnadens framsida innan stötvågen når byggnadens baksida osv. Här beskrivs endast ett tvådimensionellt fall men beteendet är detsamma för en tredimensionell struktur. I ett sådant fall diffrakterar dock stötvågen även runt byggnadens sidor.



Figur B.8 Diffraktion av stötvåg för en tvådimensionell byggnad. Baserad på Baker (1973).

B.7 Empiriska samband

B.7.1 Skalat 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. Utgående från experimentella observationer och teoretiska studier har så kallade skallagrar tagits fram vilka gör det möjligt att jämföra effekten av olika explosioner på olika avstånd. Den vanligast förekommande av dessa är Hopkinsons skallag, vilken säger att två explosioner kan förväntas ge upphov till likvärdiga stötvågor på avstånd proportionella mot kubikroten av den frigjorda energin hos respektive explosion.

För en sprängladdning illustreras detta grafiskt i Figur B.9. Det skalade avståndet Z kan uttryckas som

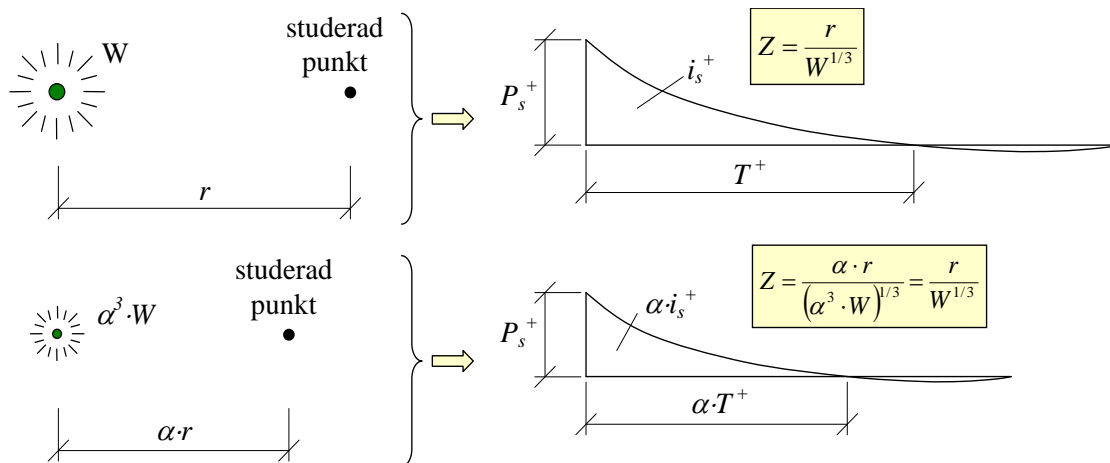
$$Z = \frac{r}{W^{1/3}} \quad (\text{B.3})$$

där r är det verkliga avståndet och W anger explosionens energimängd uttryckt i mängd sprängämne (vanligen uttryckt i kg TNT).

För en gasexplosion används ett liknande angreppssätt men detta betecknas då som

$$r' = r \cdot \left(\frac{P_0}{E_{gas}} \right)^{1/3} \quad (\text{B.4})$$

där r' är ett dimensionslöst energiskalat avstånd, r är verkligt avstånd, P_0 är normalt lufttryck och E_{gas} är energin i den gasvolym som ger upphov till den aktuella explosionen.



Figur B.9 Grafisk illustration av Hopkinsons skallag. Från Johansson (2012a).

Av Figur B.9 framgår att övertrycket P_s^+ förblir detsamma då det skalade avståndet Z är givet. Detta är dock inte fallet för impulstätheten i_s^+ eller varaktigheten T^+ , vilka även beror på faktorn α . Detta innebär att övertrycket kan tecknas som en funktion av det skalade avståndet men att impulstätheten och varaktigheten även måste modifieras med avseende på α . Detta sker genom att dessa även kopplas till den frigjorda energimängden, varvid nedanstående samband erhålls

$$P_s^+ = P_s^+(Z) \quad (\text{B.5})$$

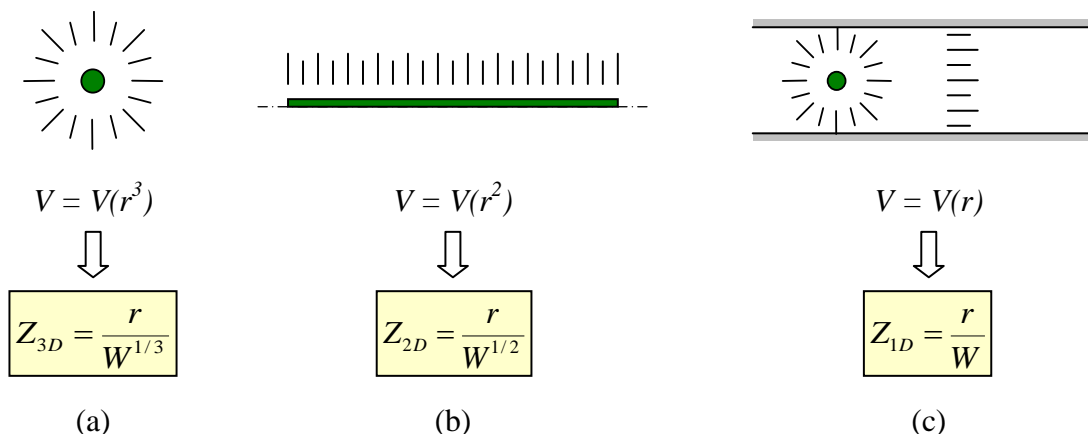
$$i_s^+ = i_s^{+'}(Z) \cdot W^{1/3} \quad (\text{B.6})$$

$$t^+ = t^{+'}(Z) \cdot W^{1/3} \quad (\text{B.7})$$

Här motsvarar $i_s^{+'}$ och $t^{+'}$ att värdena är skalade värden. För en gasexplosion fås motsvarande principiella beroende men med Z och W utbytt till r' respektive E_{gas} / P_0 , jämför ekvation (B.3) och ekvation (B.4). Det skalade avståndet Z eller r' används då lasten från av en given sprängladdning, respektive gasexplosion, ska bestämmas på ett godtyckligt avstånd från explosionscentrum. Översättningen till reella stötvågsstorheter görs med hjälp av empiriska uttryck såsom behandlas i avsnitt B.7.2 och B.7.3.

Styrkan hos en luftstötvåg beror på den energiintensitet som erhålls vid en explosion. Ovan givna uttryck förutsätter att explosionen sker i en omgivning där en fri utbredning är möjligt åt alla håll, dvs. en tredimensionell (3D) spridning av frisläppt energimängd inom en sfärisk volym. Om en sådan fri utbredning är förhindrad fås en annan energiintensitet vid stötvågsfronten och ett annat samband erhålls. I Figur B.10 visas den principiella utbredningen för en explosion med möjlighet till fri utbredning i en, två eller tre riktningar. Vid fri sfärisk utbredning är den volym som innesluts av stötvågsfronten således proportionell mot utbredningen r i kubik, dvs. volymen $V = V(r^3)$. Motsvarande volymförhållanden blir för en linjeladdning, med cylindrisk spridning, $V = V(r^2)$ medan den inneslutna volymen i ett endimensionellt fall, exempelvis en tunnel, ökar proportionellt mot enbart r , dvs. $V = V(r)$. På lite större avstånd r innebär detta en avsevärd skillnad i explosionens energiintensitet. Således kommer stötvågen orsakad av en explosion i en tunnel också klinga av mycket långsammare än vad motsvarande stötvåg i den fria luften gör. Den långsammare avklingningen resulterar följaktligen i att en explosion i en tunnel kan behålla en hög styrka även på långa avstånd från explosionscentrum. En sådan explosion kan därför sägas vara betydligt farligare för sin omgivning än en motsvarande explosion i det fria. Av detta inses att

det krävs olika skalningsregler beroende på hur explosionens utbredningsmöjligheter ser ut. Förenklat kan sägas att det skalade avståndet för en explosion i en tunnel kan skrivas som $Z = r / W$ istället för $Z = r / W^{1/3}$ som är fallet vid fri utbredning.

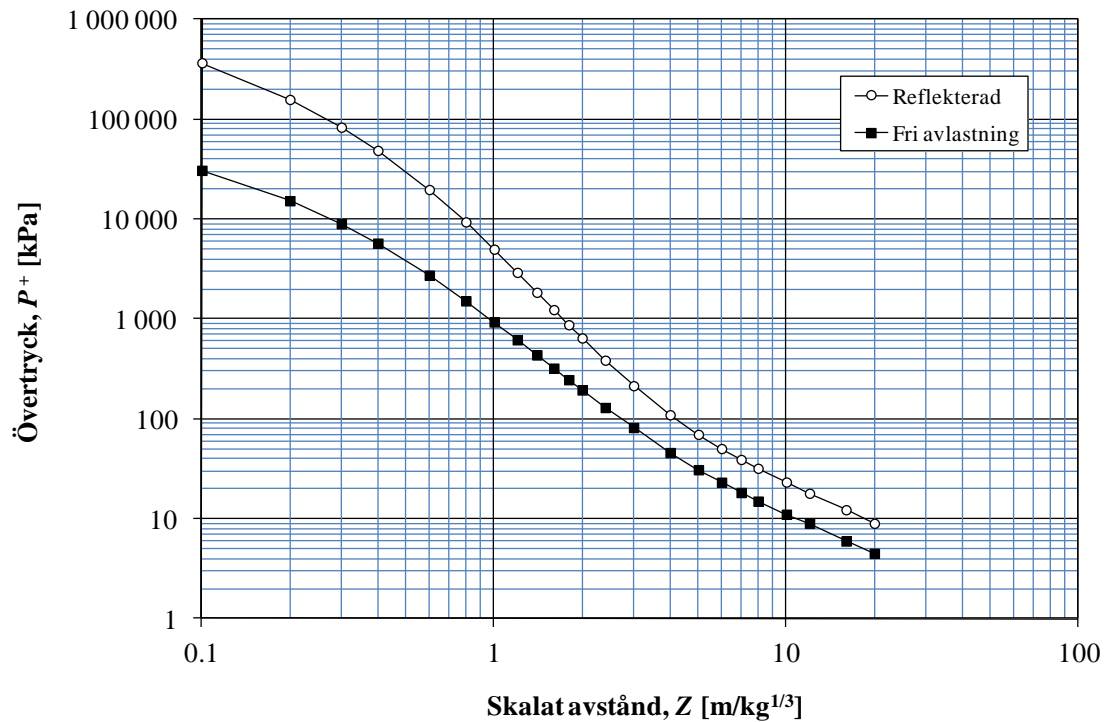


Figur B.10 Skalat avstånd vid olika utbredningsmöjligheter: (a) explosion i det fria från punktkälla med sfärisk utbredning, (b) explosion i det fria från linjekälla med cylindrisk utbredning, (c) explosion i tunnel med plan utbredning. Från Johansson (2012a).

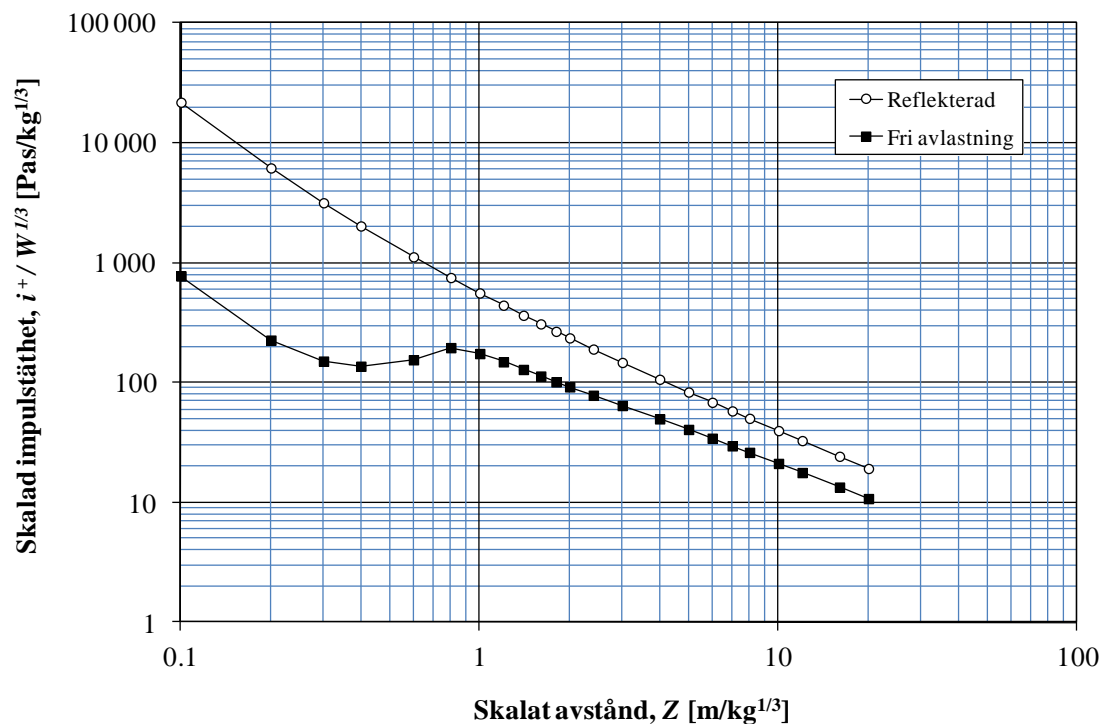
B.7.2 TNT

I Figur B.11 och Figur B.12 redovisas tryck respektive impulstäthet för en explosion med möjlighet till fri, sfärisk, avlastning. Samband ges för både oreflekterad och reflekterad (normalreflexion) stötvåg – samtliga är baserade på Kingery och Bulmash (1984) och används i bland annat ConWep (1992). För mer detaljerad information, se Johansson (2012a, b)³.

³ I Johansson (2012a), Bilaga G, ges ekvationer för empiriska samband för en fri sfärisk avlastning. I bilagan används dock en faktor $\alpha = \alpha(Z)$ som har definierats fel. Korrekt definition av α ska vara $\alpha = \alpha(Z')$, där $Z' = \log Z$. En något förenklad variant (färre antal värdesiffror) av dessa empiriska uttryck finns även angivna i FKR 2011 (Fortifikationsverket, 2011).



Figur B.11 Reflekerat och oreflekerat (fri avlastning) övertryck som funktion av det skalade avståndet Z . Från Johansson (2012b).



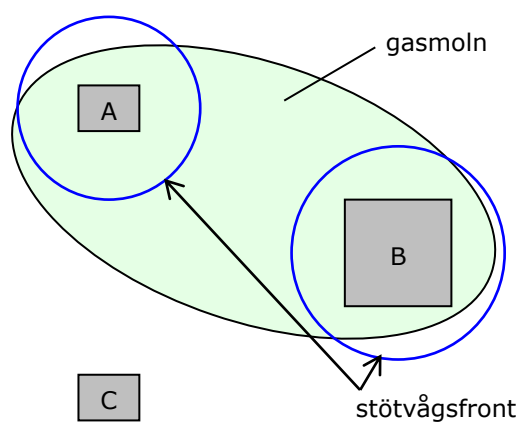
Figur B.12 Reflekerat och oreflekerat (fri avlastning) impulstäthet som funktion av det skalade avståndet Z . Notera att impulstätheten har skalats med hänsyn till laddningens storlek $W^{1/3}$. Från Johansson (2012b).

B.7.3 Gasexplosion

För en gasexplosion är det mer komplext att bestämma lastens egenskaper än vad som är fallet för ett sprängämne. Anledningen till detta är att ett sprängämne alltid detonerar medan det för en gasexplosion oftast uppstår en deflagration. Styrkan hos en deflagration kan dock variera betänkligt – från en mycket svag explosion i form av en gasmolnsbrand till en mycket kraftig explosion som motsvarar en detonation. I litteraturen finns olika anvisningar om hur last från en gasexplosion kan beräknas, se Johansson (2017) för en övergripande genomgång. I detta dokument väljs dock att exemplifiera lastberäkning av gasexplosion med den så kallade TNO Multienergimetoden, van den Berg (1985).

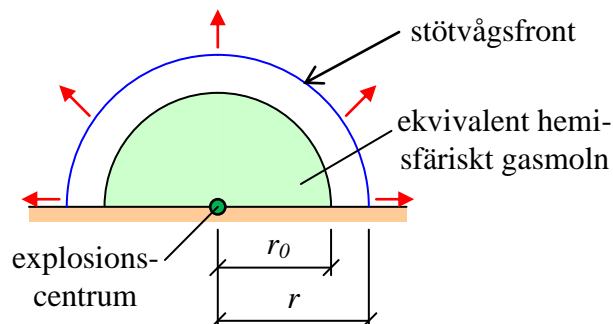
TNO Multienergimetoden bygger på att en gasexplosion består av ett antal delexplosioner där en kraftfull explosion enbart kan initieras i de delar av molnet där gasens expansionsmöjligheter begränsas på något sätt, dvs. i helt eller delvis inneslutna volymer och/eller i blockerade områden. Detta innebär att det i ett gasmoln potentiellt kan skapas flera av varandra oberoende explosioner, var och en med sitt eget energiinnehåll. Vidare är det enbart de delar av gasmolnet som inryms i områden som betraktas som explosionsbenägna som används för att bedöma styrkan hos en kraftfull explosion.

Detta illustreras schematiskt i Figur B.13 där ett gasmoln spritt ut sig inom markerat område. I figuren markerar A, B och C områden med någon form av inneslutning och/eller blockering i en sådan omfattning att de bedöms kunna initiera en kraftfull explosion. Område A och B innesluts av gasmolnet och kan därför båda generera en explosion medan område C är beläget utanför gasmolnet och därför inte bidrar till detta. Den explosionsalstrande energimängden baseras på volymen i område A respektive B och kan generera två av varandra oberoende explosioner med olika styrka och med explosionscentrum centriskt placerad inom respektive delvolym. Övriga delar av gasmolnet, utanför område A och B, bidrar dock inte till energimängden i någon av dessa båda explosioner. Därmed begränsas eventuella kraftfulla explosioners tillgängliga energimängd till det minsta av hur stor mängd av gasmolnet som ryms i en explosionsinitierande volym eller av gasmolnets aktuella storlek. Gasen utanför område A och B kan också ge upphov till en explosion men då med en lägre styrka. En sådan explosion baseras då på den totala gasvolym som befinner sig utanför område A och B.



Figur B.13 Schematisk illustration av TNO multienergimetod. Ett gasmoln täcker markerat område. Område A och B innesluts av gasmolnet och kan båda ge upphov till varsin explosion. Från Johansson (2017).

Beräkningsmodellen i TNO multienergimodell baseras på att framtagen gasvolym inom aktuellt område (exempelvis område A eller B i Figur B.13) omvandlas till en ekvivalent hemisfär (halvsfär) innehållande samma volym. Inverkan av så kallad spegling, se avsnitt B.5, är därför redan inkluderad i metoden. Gasen antas bestå av en homogen, stökiometrisk blandning av gas och luft med en förbränningsenergi som i van den Berg (1985) anges till $E'_{gas} = 3,5 \text{ MJ/m}^3$.



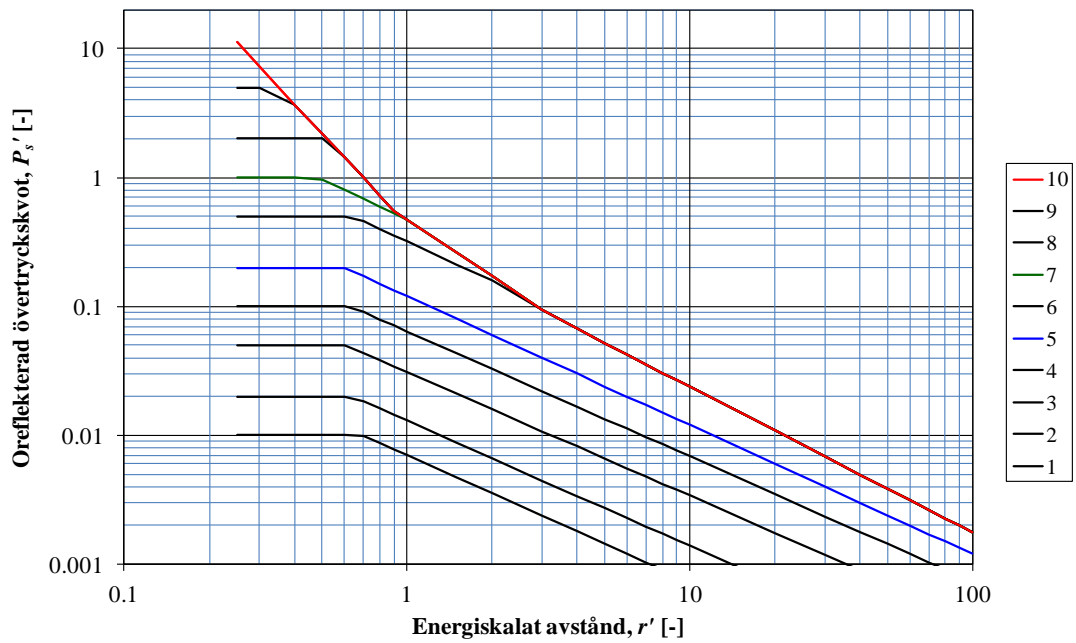
Figur B.14 Schematisk illustration av en ekvivalent hemisfärisk gasvolym som används i TNO multienergimetod, där r_0 betecknar radien hos den ekvivalenta volymen.

I TNO Multienergimetoden delas möjliga explosioner in i en 10-gradig skala, där styrkefaktorn 1 och 10 motsvarar en svag respektive en kraftig explosion. Givna samband är framtagna med utgångspunkt av ett ungefärligt maximalt övertryck i enlighet med Tabell B.1. En styrkefaktor på 1-9 motsvarar en deflagration av varierande styrka medan en styrkefaktor 10 motsvarar en detonation.

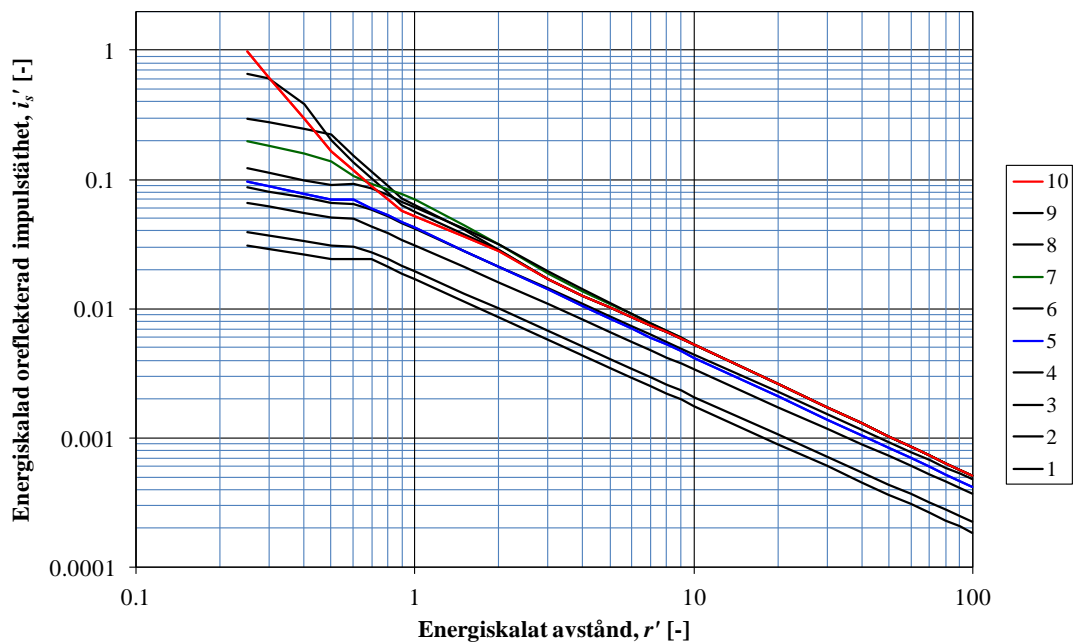
Tabell B.1 Samband mellan ungefärlig nivå på maximalt övertryck P_s^+ och styrkefaktor i TNO Multienergimetoden.

| Styrkefaktor | P_s^+ [kPa] | Styrkefaktor | P_s^+ [kPa] |
|--------------|------------------|--------------|------------------|
| 10 | >1 000 | 5 | 20 |
| 9 | 500 | 4 | 10 |
| 8 | 200 | 3 | 5 |
| 7 | 100 | 2 | 2 |
| 6 | 50 | 1 | 1 |

I Figur B.15 och Figur B.16 redovisas tryck respektive impulstäthet för en oreflekterad stötvåg från en gasexplosion med möjlighet till fri avlastning. Av dessa framgår att explosionens antagna styrka är en mycket viktig parameter som har stor inverkan på storleken hos den förväntade explosionslasten, Ekvationer för bakomliggande samband, detaljerad information om hur dessa kan användas för att beräkna lasten för en reflekterad stötvåg samt riktlinjer för val av styrkefaktor, ges i Johansson (2017).



Figur B.15 Samband mellan oreflekterad övertryckskvot P_s' och energiskalat avstånd r' för olika styrkefaktorer. Från Johansson (2017).



Figur B.16 Samband mellan energiskalad oreflekterad impulstäthet i_s' och energiskalat avstånd r' för olika styrkefaktorer. Från Johansson (2017).

B.8 Explosionslast i regelverk

B.8.1 Orientering

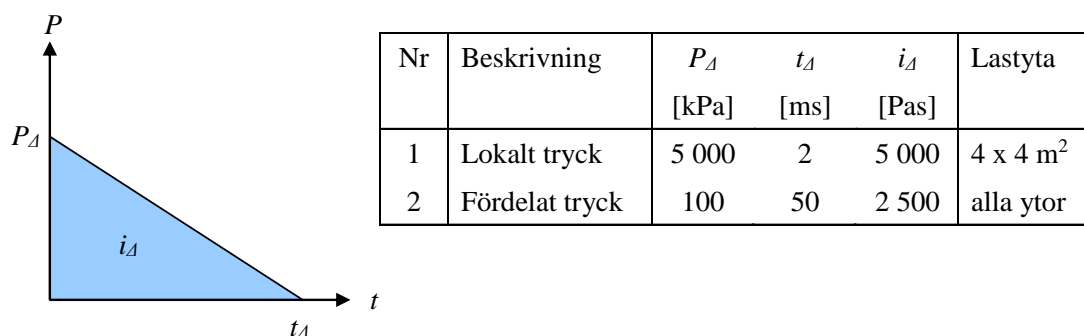
Att ta hänsyn till explosionslast vid dimensionering av byggnader är i Sverige idag ett avsteg från normalfallet. De situationer som kräver hänsynstagande till explosionslast är relativt få och begränsas då vanligen till speciella situationer, t.ex. inom kärnkrafts- eller processindustrin där framförallt hantering av brandfarliga gaser och vätskor medför ett sådant krav, eller vid dimensionering av skyddsrum eller fortifikatoriska anläggningar. Andra, mer all dagliga situationer, där inverkan av explosioner ska beaktas är för invändig gasexplosion mot trapphus i höga byggnader, EKS 11 (Boverket, 2019), samt vid dimensionering av tunnlar, Krav Tunnelbyggande (Trafikverket, 2016). Den förra refererar till anvisningar i Eurokod 1, Del 1-7 (SIS, 2008a) medan det i den senare finns explicit definierat vilken typ av explosionslast som ska beaktas. I Eurokod 1, Del 1-7, finns även anvisningar om gasexplosion i tunnlar. För att ge en övergripande bild av de lastförutsättningar som finns enligt ovan så ges i avsnitt B.8.2 och B.8.3 en kort beskrivning av dessa laster.

Det begränsade antalet tillfällen när inverkan av explosionslaster ska beaktas har medfört att kunskapen, i den svenska ingenjörs kåren, att hantera denna typ av laster är förhållandevis begränsad. Även för fall där explosionslaster beaktas används ibland förenklade anvisningar som gör att konstruktören aldrig kommer i kontakt med problemställningen som om det var en impulslast – istället används i sådana fall ofta ekvivalenta statiska laster, se avsnitt C.3.2 för en förklaring av detta begrepp. Detta är t.ex. fallet vid invändig explosion i trapphus (Boverket, 2019) samt vid dimensionering av skyddsrum (MSB, 2019).

B.8.2 Trafikverket – Krav Tunnelbyggande

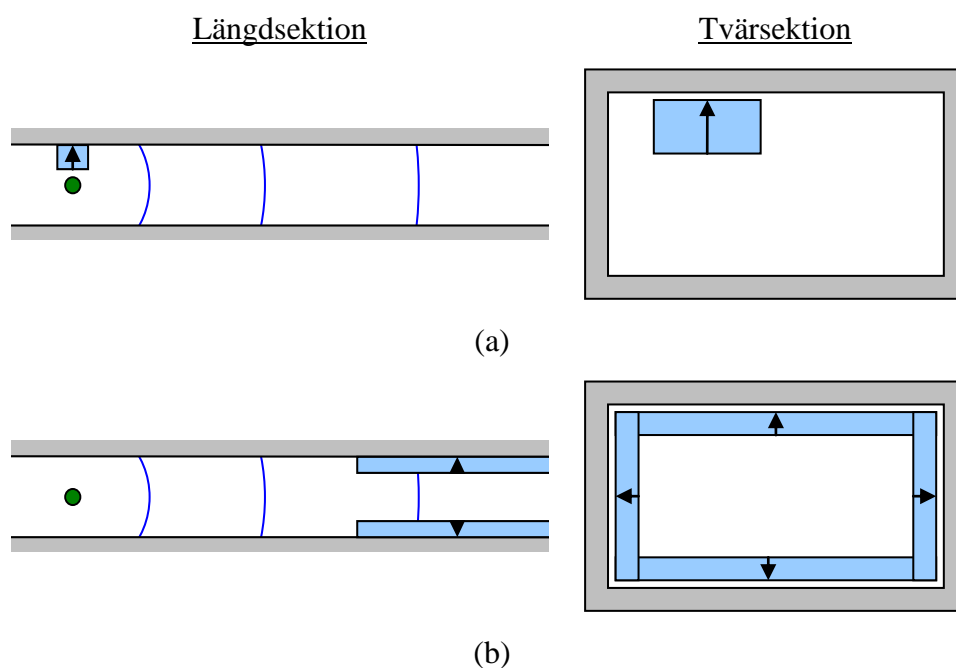
Enligt Trafikverkets regelverk för tunnlar, Krav Tunnelbyggande (Trafikverket, 2016), ska en tunnel dimensioneras gentemot en invändig explosion för laster enligt Figur B.17. Denna lastdefinition har använts sedan 1999 och det kan således utgå ifrån att samtliga tunnlar i Sverige, byggda sedan dess, är anpassade för att motstå dessa laster.

Bakgrunden till lastvärdena i Trafikverket (2016) är något oklar även om en vägledning ges i Vägverket (2001). I denna framgår att målnivån med valda laster var att täcka in den mest sannolika typen av explosion, vilket bedömdes vara en gasexplosion i anslutning till en brand. Vidare skulle lasterna täcka in en explosion från 30 kg dynamex med förutsättning att explosionen sker 3 m från vägg och 2 m över vägbana. Enligt Vägverket (2001) härrörde valet av 30 kg dynamex sannolikt från att det var den största mängden sprängmedel som, vid tillfället, fick transporteras i Stockholm utan några särskilda restriktioner.



Figur B.17 Definition av impulslaster för dimensionering av tunnlar med hänsyn till explosion. Baserat på Trafikverket (2016).

Lasterna i Figur B.17 är mycket olika till sin karaktär och benämns här som Last 1 och Last 2, se Figur B.18 för en schematisk illustration av en möjlig lastsituation. Baserat på informationen i Vägverket (2001) tolkas det här som att den kortvariga Last 1 simulerar en reflekterad stötvåg som uppstår nära explosionscentrum, vars lastvärden täcker in en situation motsvarande en sprängladdning på 30 kg TNT på avstånd 3 m. Den långvariga Last 2 täcker istället in de lastvärden som uppstår av den oreflekterade stötvåg som fås på långt avstånd från samma explosionskälla, alternativt av en gasexplosion, jämför med koncept i Figur B.10c.

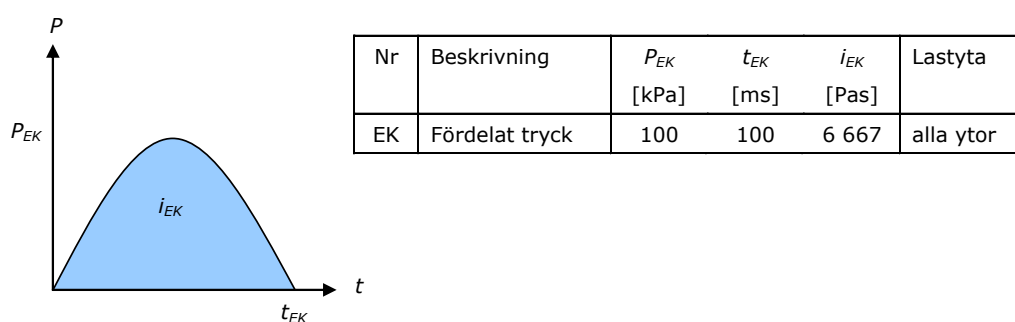


Figur B.18 Schematisk illustration av en möjlig lastsituation för impulslast enligt Figur B.17 för (a) last 1 och (b) last 2.

B.8.3 Eurokod 1, Del 1-7

I Eurokod 1, del 1-7, SIS (2008a), ges anvisningar för hur last från explosion i väg- och järnvägstunnlar kan beaktas. Dessa anvisningar berör last som fås både vid en detonation och en deflagration – här berörs dock enbart den senare.

Syftet med lastangivelserna i Eurokod 1 är inte att beskriva den last som verkar nära lastkällan utan snarare en last på ett visst avstånd från explosionscentrum, dvs. motsvarande Last 2 i Figur B.17. Den resulterande lasten från en gasdeflagration i en tunnel beskrivs i Eurokod 1 enligt illustration i Figur B.19. En jämförelse med Last 2 i Figur B.17 ger att det maximala trycket i Eurokod 1 visserligen är samma som i Trafikverkets regelverk men att lastens form och varaktighet skiljer sig. Sammantaget fås en impulstäthet som är omkring 2,7 gånger större i Eurokod 1 och även om lastkurvans form är mer gynnsam i Eurokod 1 blir denna last ändå farligare än den som ges i Trafikverkets regelverk⁴.



Figur B.19 Definition av impulslaster för dimensionering av tunnlar med hänsyn till en gasdeflagration. Baserat på Eurokod 1, Del 1-7, SIS (2008a).

⁴ Det framgår inte tydligt av Eurokod 1 men avsikten med det aktuella lastfallet tros vara att beskriva en explosionslast orsakad av en omfattande gasvolym som förmodligen enbart kan kopplas till en olycka med transport av farligt gods, t.ex. LNG eller gasol. Om så är fallet så är explosionslastens magnitud inte jämförbara med de fall som beskrivas med Last 2 i avsnitt B.8.2.

Bilaga C Strukturrespons

C.1 Hur skyddar man sig mot en explosionslast?

Det bästa skyddet mot en explosionslast är att inte vara där den inträffar – annorlunda uttryckt så är det fördelaktigt att vara på ett långt avstånd från explosionen. Anledningen till detta är att explosionens frisläppta energi, vid ett ökande avstånd, tunnas ut över en större volym. Detta medför att lasten minskar med ett ökande avstånd, något som också tydligt framgår av också de empiriska samband som ges i avsnitt B.7.

Det är dock inte alltid möjligt att säkerställa ett tillräckligt avstånd mellan lastkälla och det som önskas skyddas, t.ex. en byggnad invid en trafikled eller taket inne i en tunnel. För sådana fall blir det då väsentligt att kunna utforma skyddet på ett sådant sätt att en eventuell explosion kan hanteras utan kollaps av strukturen.

Det enklaste skyddet mot en explosion är att den skyddande strukturen har en stor massa. En ökad massa kräver en större energimängd för att sättas i rörelse och det kan visas att det yttre arbete W_y som en explosion utsätter en belastad struktur för är omvänt proportionellt mot strukturens massa m , dvs.

$$W_y \propto \frac{1}{m} \quad (\text{C.1})$$

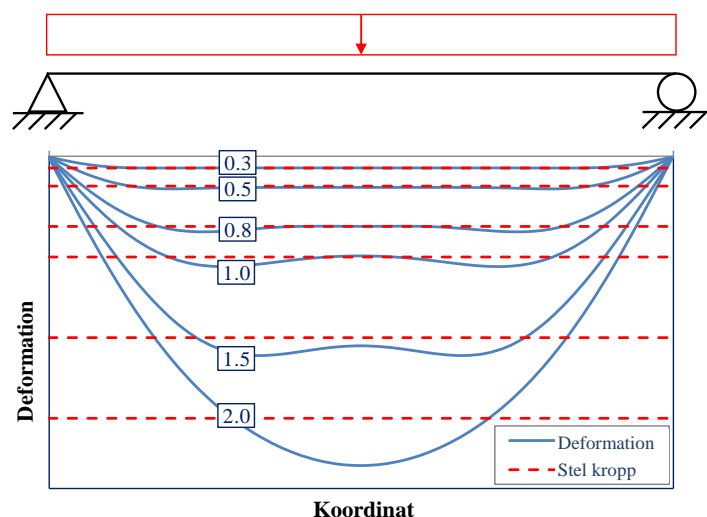
Om strukturen väl satts i rörelse blir övergången dock till strukturens lastupptagande förmåga att bromsa upp och förhindra att kritiska deformationer uppstår. Detta kan göras på olika sätt men strukturens förmåga att klara av detta kan förenklat beskrivas som dess energiupptagningsförmåga eller dess inre arbete $W_{i,Rd}$. Storleken på detta beror på en kombination av strukturens styvhet, lastkapacitet samt dess deformationsförmåga.

En annan viktig egenskap hos en skyddskonstruktion är att den har en god redundans. Med detta menas att det i strukturen finns möjlighet att bära last på ett alternativt sätt sådant att en total kollaps av strukturen kan undvikas, t.ex. att en kollapsad pelare eller ett lokalt hål i en vägg i en byggnad inte medför att hela byggnaden rasar.

C.2 Motståndsförmåga

C.2.1 Struktur- och materialrespons

En impulsbelastad konstruktion kan uppvisa en strukturell respons som i flera avseenden skiljer sig väsentligt mot vad som fås vid en motsvarande statisk belastning. Detta fenomen illustreras i Figur C.1 där en fritt upplagd balk utsätts för en impulslast från en explosion. I grafen indikerar en blå heldragen linje balkens deformation vid olika tidpunkter (mellan 0,3 och 2,0 ms) efter belastningens start medan röda streckade linjer illustrerar balkens läge vid motsvarande tidpunkter om den inte hade varit upplagd på några stöd utan istället förflyttats som en stel kropp. Av detta inses att balkens initiala deformationsbild skiljer sig markant mot vad som skulle fås vid en statisk belastning av samma balk. Inledningsvis fås en respons hos den mittersta delen av balken som motsvarar den för en stel kropp. Därefter fås gradvis en synlig inverkan av stöden men det är först efter omkring 2,0 ms som balken intar en deformerad form som påminner om den som den skulle få vid en motsvarande statisk belastning.

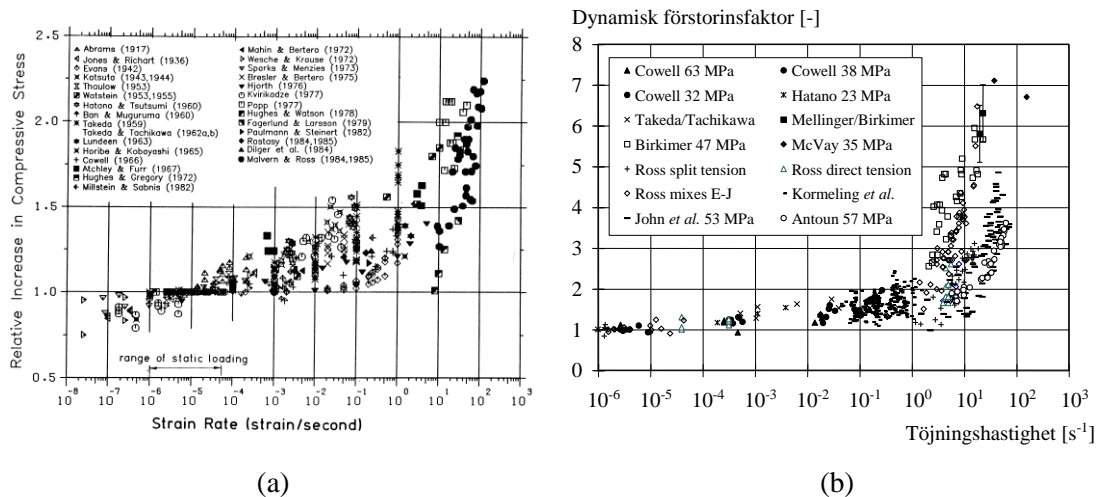


Figur C.1 Respons hos impulsbelastad fritt upplagd balk. Baserad på Andersson och Karlsson (2012).

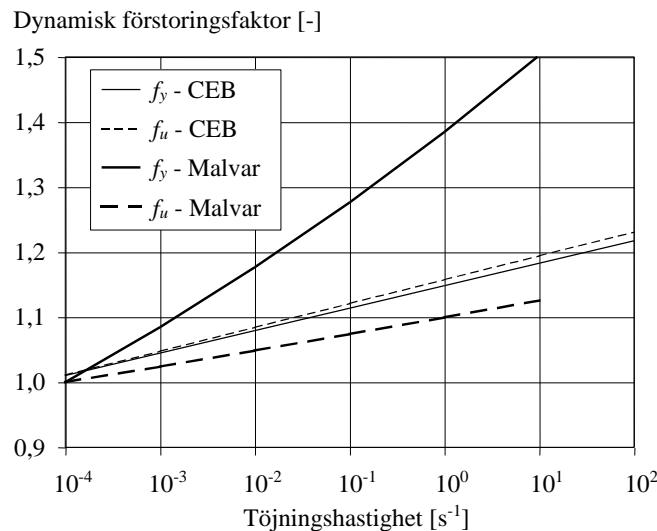
Det fenomen som illustreras i Figur C.1 beror på så kallade vågutbredningseffekter i balken. Detta innebär att det tar en viss tid för information att transporteras inom en struktur och att det därför kan uppstå effekter som inte är synliga vid en statisk belastning. Detta medför också att uppkomna påkänningar kan skilja sig betänkligt vid en impulsbelastning och en statisk belastning. Exempelvis skulle det för en betongbalk enligt Figur C.1 initialt kunna uppstå sprickor i underkant nära stöd där det uppstår en kraftig krökning. Vidare skulle det vara möjligt att lokalt brott skulle kunna nås i en viss del av en struktur innan andra delar av strukturen ens har blivit varse att den ens har blivit belastad, se Johansson och Laine (2012a).

En annan effekt som uppstår i en impulsbelastad struktur är att de ingående material-egenskaperna förändras. En snabb belastning ger upphov till höga töjningshastigheter, vilket i regel medför en ökad styvhet och lastkapacitet hos det belastade materialet. För betong kan denna kapacitetsökning, vid tillräckligt höga töjningshastigheter, vara tämligen drastisk, med en kapacitetsökning på drygt 2 i tryck och omkring 7 i drag, se Figur C.2. För armering fås också en kapacitetsökning vid höga töjningshastigheter, dock inte lika drastiska som för betong, se exempel från olika anvisningar i Figur C.3.

I dagens svenska regelverk bortses oftast från inverkan av töjningshastighetseffekter, se Johansson och Rempling (2016). Undantaget är SSM (2017) som är speciellt framtaget för den svenska kärnkraftsindustrin, där avsnitt om impulsbelastning utgår från amerikanska anvisningar.



Figur C.2 Inverkan av hög töjningshastighet på betongens (a) tryckhållfasthet och (b) draghållfasthet. Från Bischoff och Perry (1981) respektive baserad på Malvar och Ross (1998).



Figur C.3 Inverkan av hög töjningshastighet på armeringens flytspänning f_y samt brottspänning f_u . Baserad på CEB (1988) och Malvar (1998).

C.2.2 Princip kring energibalans

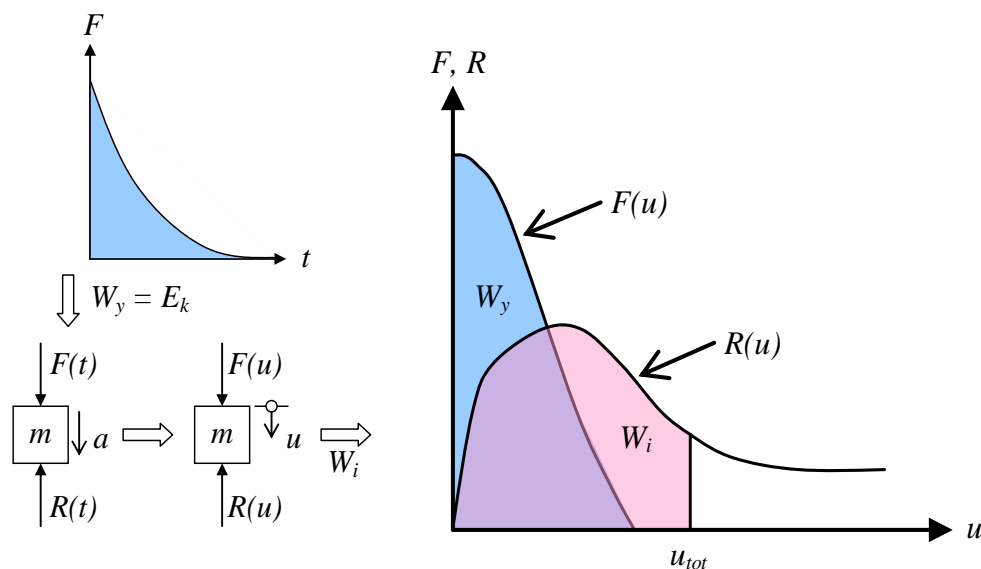
Den strukturella responsen hos en statiskt och dynamiskt belastad konstruktion kan skilja sig åt dramatiskt, särskilt om den dynamiska lasten utgörs av en intensiv men kortvarig impulsbelastning, vilket ofta kan vara fallet vid en explosionslast. En viktig skillnad mellan en statiskt belastad struktur och en impulsbelastad struktur är att kraftjämvikt bitvis inte råder för den senare.

För en statiskt belastad struktur förutsätts att kraftjämvikt uppfylls i varje given situation – om så inte är fallet erhålls en kollaps. För en impulsbelastad struktur kan den pådrivande lasten i ett givet ögonblick dock vara många gånger större än strukturens mothållande kraft och det är denna skillnad i kraft som ger upphov till en plötslig strukturell deformation. Vid en sådan belastning blir det inte heller längre relevant att prata om storleken på den verkande kraften utan snarare om den impuls, se avsnitt B.2, som verkar mot den belastade strukturen.

En impulslast har dock en kort varaktighet och snart har dess magnitud avtagit och försvunnit helt. Impulsen har dock tillfört energi till strukturen, vilket satt igång en deformationerande rörelse, och det är denna rörelse som strukturen nu behöver hantera. När deformationen nått sitt maximum är det inte ovanligt att den yttre pådrivande lasten har minskat betänkligt, alternativt försvunnit helt. Huruvida strukturen klarar av att motstå den aktuella belastningen beror på förhållandet mellan tillförd energi, det yttre arbetet, och strukturens energiupptagningsförmåga, det inre arbetet. För en impulsbelastad struktur är det därför inte kraftjämvikt utan energijämvikt som har betydelse. Dvs. det måste råda en balans mellan yttre och inre arbete, W_y respektive W_i för att en struktur ska kunna motstå applicerad impulslast.

Detta faktum illustreras schematiskt i Figur C.4 där en impulslast $F(t)$ antas verka mot en struktur med en massa m och ett inre mothåll $R(u)$. Den applicerade lasten ger upphov till en deformation u hos strukturen. Eftersom både last och förskjutning är en funktion av tiden, $F(t)$ samt $u(t)$, kan ett resulterande last-deformations samband $F(u)$ tecknas. Arealen under denna kurva representerar det yttre arbete W_y som verkar mot strukturen. Den uppkomna förskjutningen u ger även upphov till att ett mothåll $R(u)$ aktiveras. På samma sätt som för det yttre arbetet representerar arean under $R(u)$ strukturens inre arbete W_i som utförs för att motverka den uppkomna deformationen. I det ögonblick då $W_y = W_i$ uppnås den maximala deformationen u_{tot} och strukturens rörelse stannar tillfälligt innan den, på grund av strukturens styvhet, svänger tillbaka igen.

Hur sambandet för strukturens mothåll $R(u)$ ser ut beror på strukturens utformning samt ingående material och varierar således för olika konstruktioner. Generellt gäller dock 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.

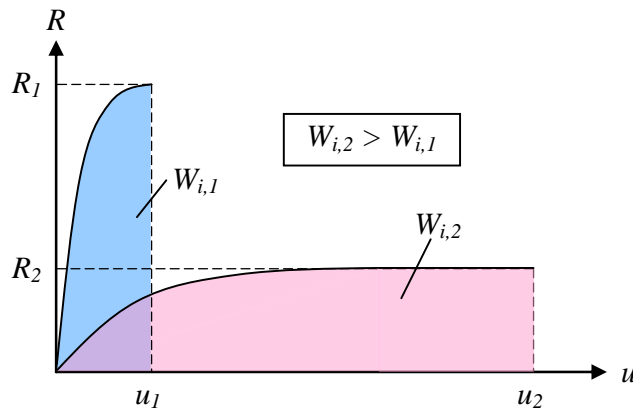


Figur C.4 Schematisk bild av yttre arbete W_y , orsakad av en yttre last $F(u)$, och inre energi W_i , alstrad av ett inre mothåll $R(u)$. Energibalans, $W_y = W_i$, avgör resulterande slutdeformation u_{tot} hos impulsbelastad struktur. Från Johansson och Laine (2012c).

C.2.3 Energiupptagningsförmåga

För en statiskt belastad konstruktion är det normalt av intresse att kunna bära en given last med begränsade deformationer och i ett sådant läge blir styvhet och lastkapacitet dimensionerande för att uppfylla ställda krav. För en konstruktion utsatt för en kraftig impulsbelastning kan det dock i många fall vara i princip omöjligt att påvisa att den aktuella lasten aldrig når en nivå som motsvarar strukturens maximala lastkapacitet. I ett sådant läge blir det därför både nödvändigt och önskvärt att utnyttja konstruktionens eftergivlighet istället.

En strukturs energiupptagningsförmåga skapas via ett samspel mellan kraft och resulterande deformation. Detta kan innebära att en låg lastkapacitet i kombination med en god deformationsförmåga kan resultera i en större energiupptagningsförmåga än kombinationen hög lastkapacitet men låg deformationsförmåga, se Figur C.5. För en impulsbelastad konstruktion är det ofta viktigare att uppvisa en god deformationsförmåga, med möjlighet till hög energiförbrukning, än hög styvhet och lastkapacitet. Den betydelse som dessa båda senare egenskaper har hos en statiskt belastad struktur minskar således hos en impulsbelastad struktur. En annan fördel med att i en struktur uppnå ett stort inre arbete via stora deformationer, istället för med en hög lastkapacitet, är att magnituden på de laster som förs vidare till strukturens infästningspunkter också minskar. Därmed underlättas även möjligheten för intelligande konstruktionsdelar att hantera de stödreaktioner som den belastade strukturen ger upphov till.



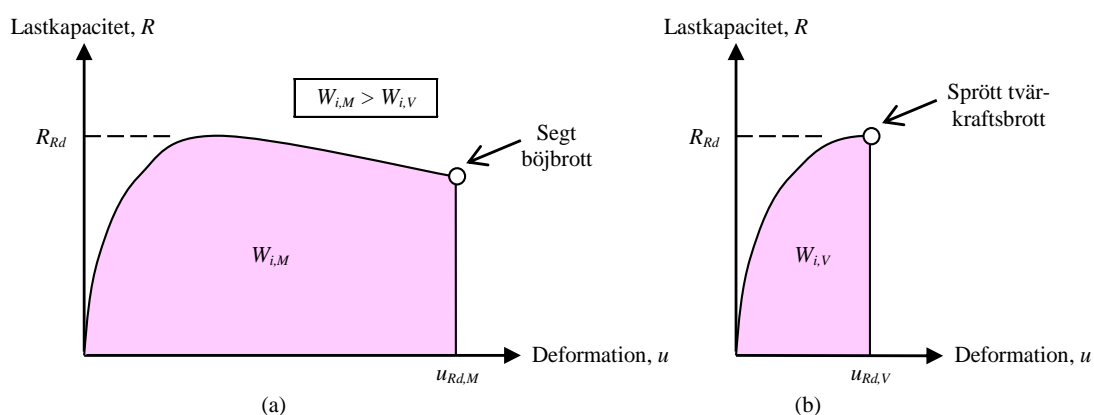
Figur C.5 Schematisk jämförelse av en struktur med en kombination av hög lastkapacitet samt låg deformationsförmåga och en struktur med låg lastkapacitet samt hög deformationsförmåga.

Avvikelser finns dock från principen att låg lastkapacitet och hög deformationsförmåga alltid är att föredra för impulsbelastade strukturer. För vissa strukturer, t.ex. en pelare, kan det fortfarande vara väsentligt att lastkapaciteten är så hög att erhållna deformationer begränsas på ett sådant sätt att samverkan mellan deformerad pelare och statisk verkande last, via andra ordningens effekter, inte ger upphov till kollaps av pelaren i explosionens efterspel.

C.2.4 Hur säkerställa en god deformationsförmåga

Av avsnitt C.2.3 framgår att det är väsentligt att en impulsbelastad struktur kan uppvisa en god deformationsförmåga så att den applicerade lasten kan absorberas via en stor deformation istället för en hög lastkapacitet. Förutsättningen för att uppnå en sådan respons är dock att ett segt böjbrott begränsar strukturens bärförmåga. Om

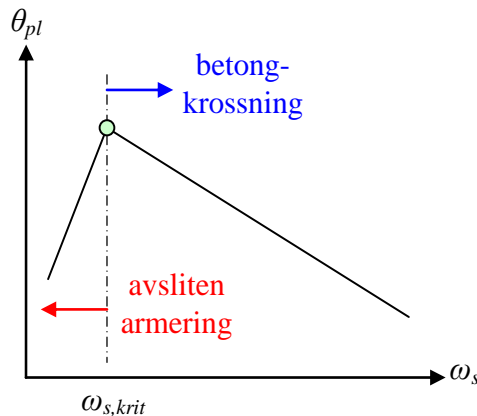
strukturen istället fallerar på grund av t.ex. ett sprött tvärkraftsbrott kommer det inte utvecklas några stora deformationer med bibehållen bärförmåga, se Figur C.6. För ett sådant fall tappar strukturen mycket av sin potentiella energiupptagande förmåga, och därmed också att effektivt motstå en impulslast.



Figur C.6 Schematisk illustration av energiupptagning i en belastad struktur. (a) Segt böjbrott med en hög energiupptagningsförmåga $W_{i,M}$, (b) Sprött tvärkraftsbrott med en låg energiupptagningsförmåga $W_{i,V}$. Från Johansson *et al.* (2020).

Med hänsyn till ovanstående blir det viktigt att hitta sätt för att dels säkerställa en så god deformationsförmåga som möjligt, dels att förhindra uppkomsten av ett sprött tvärkraftsbrott, se Johansson och Rempling (2016) samt Magnusson (2019). Plastisk deformationsförmåga och tvärkraftskapacitet hos impulsbelastade betongkonstruktioner behandlas även mer ingående i Johansson *et al.* (2020), se Förordet för koppling till denna rapport samt varför det inte berörs mer ingående här.

En armerad betongkonstruktion har goda förutsättningar för att uppvisa en god deformationsförmåga. En seg respons medför att så kallade flytleder kan utvecklas – dvs. områden där armeringen plasticerar och tvärsnitten kan bibehålla sin momentkapacitet med ökande deformation. Detta möjliggör kraftomlagringar i konstruktionen, vilket i sin tur resulterar i en ökad deformationsförmåga. Beroende på utformning samt egenskaper hos betong och armering kan storleken på denna dock variera mycket. Allmänt gäller att små armeringsmängder i en betongkonstruktion resulterar i bättre deformationsförmåga än stora armeringsmängder. Detta förutsätter dock att brott inte erhålls i armeringen – slits denna av begränsas deformationsförmågan av detta. Vilken typ av böjbrott som fås beror på en kombination av armeringsmängd samt hållfasthet hos betong och armering, se schematisk illustration i Figur C.7. Vid en kombination av små armeringsmängder, låg flytgräns hos armeringen och/eller hög tryckhållfasthet hos betongen fås låga värden på den mekaniska armeringskvoten ω_s , vilket kan medföra att armeringen slits av. En kombination av omvända värden på dessa parametrar medför istället att deformationsförmågan begränsas av krossad betong. Teoretiskt fås den största deformationsförmågan om armeringen slits av samtidigt som betongen krossas.



Figur C.7 Schematisk illustration av tillåten plastisk rotationsförmåga θ_{pl} som funktion av den mekaniska armeringskvoten ω_s samt effekt av olika brottkriterier. Från Johansson och Laine (2012c).

C.3 Beräkningskoncept

C.3.1 Orientering

Vid dimensionering av en struktur med hänsyn till statiska laster är det i regel möjligt att göra en dimensionering av den belastade strukturen eftersom de laster som verkar mot den endast i begränsad grad är beroende av strukturens egenskaper. Vid dimensionering av exempelvis en bro kommer dess utformning få en inverkan på brons egentyngd men lasterna från trafiken kommer fortfarande vara desamma oberoende av om t.ex. hur tjock brobanepattan är eller hur mycket armering som lagts in i plattan.

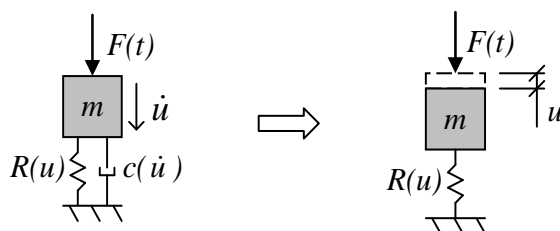
För en impulsbelastad struktur är detta samband dock mer komplext. För en sådan last kommer både brobaneplattans tjocklek och mängden armering ha inverkan på hur en given impulslast uppfattas av den belastade strukturen. Detta innebär att dimensioneringen av en impulsbelastad struktur görs genom att först göra ett rimligt antagande som därefter kontrolleras med en analys. Responser hos den impulsbelastade strukturen är dessutom även ofta olinjär, vilket gör att komplexiteten i denna kontroll ökar ytterligare.

Idag är det vanligt förekommande inom byggbranschen att använda sig av olika typer av avancerade finita elementanalyser (FE-analyser) för att lösa byggnadstekniska situationer av olika komplexitet. Denna typ av beräkningar baseras oftast på linjärelastisk respons, vilket gör att ett stort antal lastkombinationer enkelt kan kombineras och den resulterande lasteffekten bestämmas. Dimensionering kan därefter göras mot en sammanvägd kombination av ett stort antal lastfall. För en struktur i vilken olinjär respons beaktas är det dock inte möjligt att använda en sådan metodik. För sådana fall behöver istället de aktuella lastkombinationerna, i sin helhet, beräknas var och en för sig och en enskild analys görs för varje fall, se Plos *et al.* (2021).

Motsvarande situation gäller för en impulsbelastad struktur – även för en struktur med linjärelastiska egenskaper behöver beräkningar göras i form av en analys och inte en dimensionering eftersom egenskaper så som styvhet och massa kommer påverka hur en impulslast uppfattas av den belastade strukturen. Som framgår av resonemang ovan så är det dock även ofta önskvärt att beakta strukturens plastiska deformationsförmåga, vilket gör att hanteringen kompliceras ytterligare till en olinjär beräkning.

Det ska poängteras att det är fullt möjligt att utföra denna typ av olinjära beräkningar på impulsbelastade strukturer, se t.ex. Nyström (2013) och Magnusson (2019). Att utföra sådana beräkningar med avancerade FE-analyser är dock ofta både komplext och tidskrävande och kräver dessutom ofta särskilda specialistkunskaper hos utföraren. Förfarandet kompliceras ytterligare av att den aktuella beräkningen genomförs i form av en analys och inte en dimensionering. För att undvika en alltför omfattande iterationsprocess i val av lämplig strukturformning är det nödvändigt att, med enklare medel, först kunna göra en övergripande bedömning av erforderliga egenskaper hos strukturen. När detta väl är gjort blir kan det sedan vara realistiskt att genomföra ytterligare optimering via mer avancerade beräkningsverktyg.

Ett vanligt sätt att hantera detta vid impulsbelastade strukturer är att använda sig av ett förenklat enfrihetsgradssystem (*Single Degree of Freedom system, SDOF*), se t.ex. DoD (2008), Fortifikationsverket (2011) samt Johansson och Laine (2012c). Ett sådant system illustreras i Figur C.8 och består av en massa m som utsätts för en yttre tidsberoende last $F(t)$. Som motstånd till denna last finns ett inre statiskt motstånd $R(u)$ och en viskös dämpare c , vilka genererar en statisk kraft $R_{sta}(u)$ respektive en viskös kraft $R_{dyn}(\dot{u})$. Ofta försummas dock dämpningens inverkan varvid enbart den statiska kraften $R(u) = R_{sta}(u)$ kvarstår som inre motstånd.

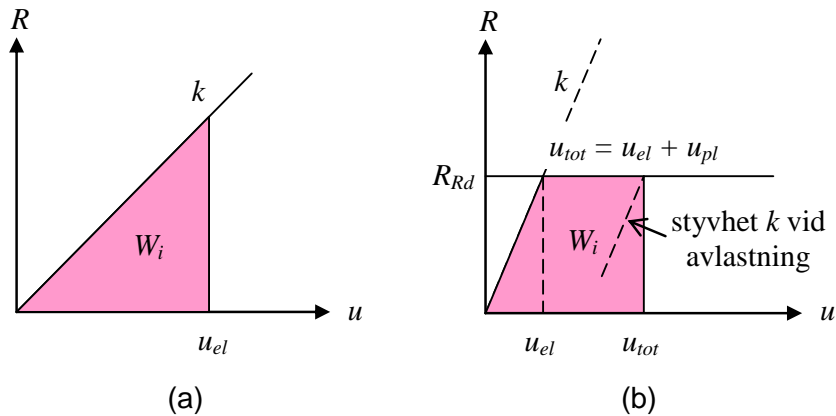


Figur C.8 Definition av ett enfrihetsgradssystem, SDOF.

Strukturrespons av en explosionslast baseras på energijämvikt, dvs. jämvikt mellan det yttre arbetet W_y , orsakad av explosionslasten, och det inre arbetet W_i , som fås som en funktion av strukturens inre motstånd (lastkapacitet) och deformationsförmåga. De bakomliggande energisamband som används baseras på förhållandevis enkla antaganden och bedöms ge en tillräckligt god approximation till verklig respons. För mer detaljerad information om hur ett enfrihetsgradssystem fungerar, se t.ex. Johansson och Laine (2012c).

C.3.2 Ekvivalent statisk last

Med ekvivalent statisk last menas här den statiska last som uträttar samma arbete som en impulsbelastning. Annorlunda uttryckt motsvarar den ekvivalenta statiska lasten den maximala last som den impulsbelastade strukturen hunnit uppleva fram till maximalt erhållen deformation, orsakad av impulslasten. För en struktur med linjär-elastisk respons, Figur C.9a, innebär detta att den maximala deformationen blir densamma för impulslasten och motsvarande ekvivalent statiska last. För en konstruktion med plastisk respons, Figur C.9b, är det dock kombinationen av statisk lastnivå och plastisk deformationsförmåga som får betydelse.



Figur C.9 Last-deformationssamband $R(u)$ vid (a) Linjärelastisk samt (b) elastoplastisk strukturrespons.

Vilken ekvivalent statisk last som fås av en dynamisk last beror på ingående massa, styvhet, lastkapacitet samt deformationsförmåga hos belastad struktur. Detta innebär att det inte är möjligt att utgående från enbart en given impulslast bestämma ett motsvarande värde på den ekvivalenta statiska lasten. Istället har den belastade strukturens egenskaper en väsentlig inverkan på vilket ekvivalent statiskt värde som den dynamiska lasten motsvarar.

För en struktur med en elastoplastisk respons enligt Figur C.9b, innebär detta att den ekvivalenta statiska lasten vanligen blir densamma som den aktuella lastkapaciteten, dvs. att $Q_{ekv} = R_{Rd}$. Eftersom böjbrott eftersträvas, se avsnitt C.2.4, innebär detta att strukturens lastkapacitet blir en funktion av dess momentkapacitet M_{Rd} , dvs. att

$$Q_{ekv} = Q_{ekv}(M_{Rd}) \quad (C.2)$$

För en fritt upplagd balk med längd l utsatt för en jämnt utbredd last q fås exempelvis

$$M_{Ed} = M_{Rd} = \frac{q_{Rd} \cdot l^2}{8} = M_{Rd} \rightarrow Q_{ekv} = R_{Rd} = q_{Rd} \cdot l = \frac{8 \cdot M_{Rd}}{l} \quad (C.3)$$

Av avsnitt C.2.4 framgår också att det är väsentligt att undvika ett sprött tvärkraftsbrott, dvs. att $V_{Ed} > V_{Rd}$. I litteraturen finns olika sätt att bedöma storleken på dimensionerande tvärkraft, se Johansson och Rempling (2016) för en sammanställning av hur detta görs i olika regelverk. Gemensamt för samtliga dessa metoder är dock att dimensionerande tvärkraft beror på den ekvivalenta lasten Q_{ekv} . Eftersom den ekvivalenta lasten, enligt ekvation (C.2) i sin tur är en funktion av momentkapaciteten M_{Rd} så innebär detta att den dimensionerande tvärkraften kan skrivas som

$$V_{Ed} = V_{Ed}(Q_{ekv}) = V_{Ed}(M_{Rd}) \quad (C.4)$$

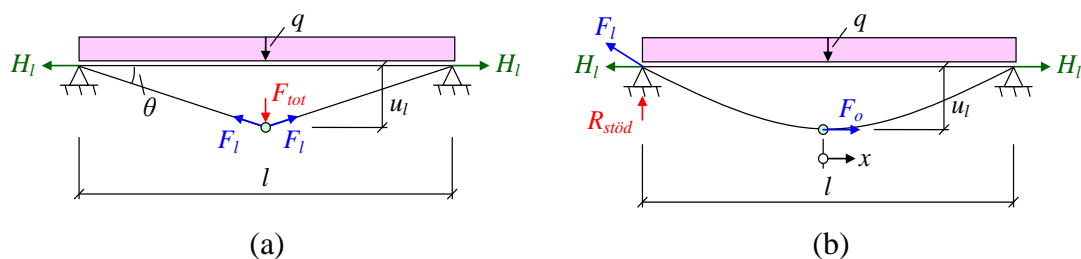
Detta förhållande mellan dimensionerande tvärkraft V_{Ed} och befintlig momentkapacitet M_{Rd} är unikt för impulsbelastade konstruktioner och är något som kan orsaka problem för en konstruktör som enbart är van att hantera statiskt belastade strukturer.

C.3.3 Linverkan

I avsnitt C.2.4 anges att dimensionering av impulsbelastade konstruktioner görs med hänsyn till böjbrott. Detta gör att den belastade strukturens energiupptagningsförmåga begränsas av dess deformationsförmåga i böjning. Det är dock även möjligt att vid energiupptagning utnyttja så kallad linverkan⁵ istället. Denna metod används bland annat i det konceptuella tänkandet vid dimensionering för att förhindra fortskridande ras i en byggnad och är ett alternativt sätt att bära en last. Kortfattat innebär linverkan att strukturen bär last via en kombination av dragpåkänningar i sitt plan och stora deformationer som medför att därvid uppkomna krafter kan motverka en last pålagd vinkelrätt mot strukturens plan. Detta koncept att bära last är detsamma som används i exempelvis en hängande kedja eller en hängmatta och skiljer sig således mot lastupptagning medels böjning, som är det normalt använda konceptet i byggnadssammanhang.

I Figur C.10 visas schematiskt hur konceptet med linverkan fungerar för ett styvt respektive ett vekt strukturelement. Förutsatt att det finns möjlighet att uppta dragkrafter (dvs. att armeringen inte har slitits av) i elementet så kommer det, vid tillräckligt stora deformationer, uppstå axiella krafter F_l i elementet som balanserar den yttre lasten q . Lastupptagning via linverkan är ett mycket effektivt sätt för att ge den belastade strukturen en stor energiupptagningsförmåga – denna kan också ofta vara många gånger större än vad som skulle kunna utnyttjas om enbart bäring via böjning skulle tillgodoräknas. Nackdelen med linverkan är att dock det dels kräver stora deformationer hos den belastade strukturen och dels ställer det stora krav på infästning och lastöverföring till den belastade strukturens infästningspunkter till andra byggnadsdelar. För en impulsbelastad struktur utgör det första kravet ofta inte någon begränsning medan det andra kravet fortfarande kan vara problematiskt att uppfylla.

I dagens svenska regelverk saknas det anvisningar för hur linverkan kan användas vid impulsbelastade strukturer – de regelverk som finns i Sverige idag utgår från bäring via böjning, se Johansson och Rempling (2016).



Figur C.10 Illustration av linverkan för balk belastad med jämnt utbredd last q för (a) styvt element, och (b) vekt element.

⁵ Begreppet linverkan syftar egentligen på lastbäring i en riktning på samma sätt som sker i en enskild lina – linverkans tvådimensionella motsvarighet benämns som membranverkan. I detta dokument används dock genomgående begreppet linverkan när det egentligen även skulle kunna syfta på membranverkan.