

Notat

Bakgrunn for terskelverdi for eksplosjon – rev.1

To DSB:

Copy:

From: Jan Pappas / Joar Dalheim

Date: 30 June 2021

Project reference: PRJ11100262033

1 Introduksjon

Notatet utdyper forhold rundt terskelverdier for eksplosjon beskrevet i DSB sitt høringsutkast til reviderte «Retningslinjer for kvantitative risikovurderinger for anlegg som håndterer farlig stoff». Den endelige versjonen av de reviderte retningslinjene er basert på dette notatet.

2 Økning av terskelverdi for eksplosjon

2.1 Generelt

I forrige utgave av retningslinjene (oktober 2017) ble terskelverdien for 50% død pga eksplosjons satt til 7.4 kPa (74 mbarg) basert på TNO's probit for 50% død ved helkroppsskade (whole body impact), ref /i/. Denne terskelverdien er nå vurdert som unødvendig konservativ og endret til 40 kPa (0.4 barg) hovedsakelig av to grunner:

- Helkroppsskaden som ble lagt til grunn i forrige retningslinjer refererte til en altfor lang og dermed ufysikalsk varighet på trykkbølgen. Dette er diskutert i kapittel 2.2 av dette notatet.
- De lange varighetene på helkroppsskade-impulsen i den forrige utgaven av retningslinjene resulterte i en så konservativ terskelverdi at det ikke var behov for å se på kollaps av bygninger. Dette blir i de reviderte retningslinjene et sentralt punkt og er beskrevet i kapittel 2.4 av dette notatet.

I tillegg til disse to punktene diskuterer dette notatet også lungeskader (kapittel 2.3), fragmentskader (kapittel 2.5) og skader på biler og andre transportmidler (kapittel 2.6).

2.2 Terskelverdi basert på helkroppsskade

For å forenkle bruken av terskelverdien ble utledningen i første utgave av retningslinjene basert på TNO-probiten for helkroppsskade utført på en svært konservativ måte. TNO-probiten gir dødelighet som en funksjon av både trykk og impuls. Dette betyr at det trykket P som gir en gitt dødelighet tilsvarende en probit (Pr) vil være avhengig av varigheten t av trykkpulsen (eller eventuelt impulsen $i = 0.5 P \times t$). For å bestemme en terskelverdi for trykk må man derfor velge en tilhørende varighet (eller impuls).

TNO-probiten for eksplosjon pga helkroppsskade har formen

$$Pr = 5.0 - 2.44 \cdot \ln S$$

hvor

$$S = \frac{7.38 * 10^3}{P} + \frac{1.3 * 10^9}{P * i}$$

50 % dødelighet tilsvarer $Pr = 5$ som gir $\ln S = 0$, dvs $S = 1$. Dermed blir

$$1 = \frac{7.38 * 10^3}{P} + \frac{1.3 * 10^9}{0.5 * P^2 * t}$$

Her ser man at P er en synkende funksjon av t . Tanken i første utgave av retningslinjene var så å forenkle bruken av terskelverdien ved å gjøre den uavhengig av t . Det skjer for lange varigheter ved at det siste leddet i likningen forsvinner, som gir løsningen $P = 7.38 * 10^3$ Pa eller ca 74 mbarg. Dette blir da det laveste trykk som kan medføre 50% dødelighet, uansett t , og derfor svært konservativt. I de reviderte retningslinjene har vi derfor tatt inn hele TNO-probiten for helkroppsskade og argumentert for at for varigheter opp til 200 ms, som er typiske for eksplosjoner ved industrianlegg, må man ha trykk over 50 kPa for å få 50% dødelighet. Dette leder til at det ikke vil være helkroppsskade som definerer terskelverdien fordi kollaps av bygninger vil inntreffe ved lavere trykk enn det som gir signifikant dødelighet ved helkroppsskade.

Merk at en varighet av størrelsesorden 200 ms er realistisk inne i skyen som eksploderer, men når trykkpulsen forplanter seg ut av skyen vil den sjokkes opp og få kortere varighet, som medfører en økning i terskelverdien for helkroppsskade (og hvilket gjør verdien 7.4 kPa ytterligere mer konservativ).

2.3 Terskelverdi basert på lungeskader

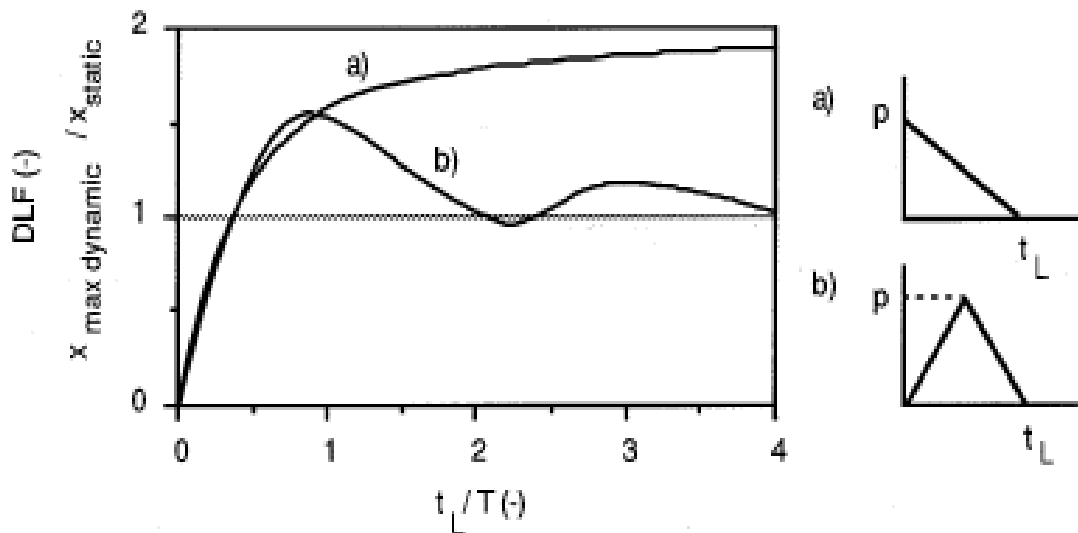
Det skal svært høye trykk til før mennesker blir drept ved at lungene eksponeres for overtrykk. TNO (ref/i/ Ch. 3 fig. 7) viser at nedre grense for død er ved ca. 1 barg, 50% død opptrer ved ca. 5 barg. Videre presiserer TNO at disse dataene gjelder for sjokkbelastning, og at en trykkpuls (dvs. ikke sjokk) medfører mindre skade uten at det har vært mulig å kvantifisere. Verdiene på 1 barg og 5 barg må derfor sees på som konservative terskelverdier for trykkpulser fra normale deflagrasjoner (forbrenning av forhåndsblandet gass og luft).

2.4 Terskelverdi basert på kollaps av bygninger.

Erfaring fra eksplosjonsulykker på landanlegg viser imidlertid at sannsynligheten for død ikke er dominert av helkroppsskade, men av at personer inne i bygninger blir drept når bygningene kolliderer pga. eksplosjonen. Å basere en terskelverdi på bygningskollaps anser vi derfor som mer realistisk og forventningsrett enn å benytte helkroppsskade.

Det er stor variasjon i type bygninger både mht konstruksjon, utforming og størrelser. Så selv om det finnes mye empiriske data basert på både tester, ulykker og resultater etter bombeangrep så vil både overtrykk som medfører kollaps av bygninger og forventet andel døde variere innenfor et stort område.

Bygninger responderer dynamisk på en trykkpuls med et gitt trykk og varighet. Hvorvidt det er trykket eller impulsen ($0.5 \times \text{trykk} \times \text{varighet}$ for en trekantpuls) som bestemmer bygningens respons er avhengig av pulsens varighet t_L i forhold til egenperioden T for typiske bygningselementer. Dette er illustrert i Figur 1 hvor $DLF > 1$ betyr større utslag enn ved statisk belastning, og $DLF < 1$ betyr mindre utslag. Legg merke til at pulsens form ikke betyr noe for pulsvarighet $<$ egenperiode. For pulsvarighet $>$ egenperiode gir sjokk større utslag enn en symmetrisk puls.



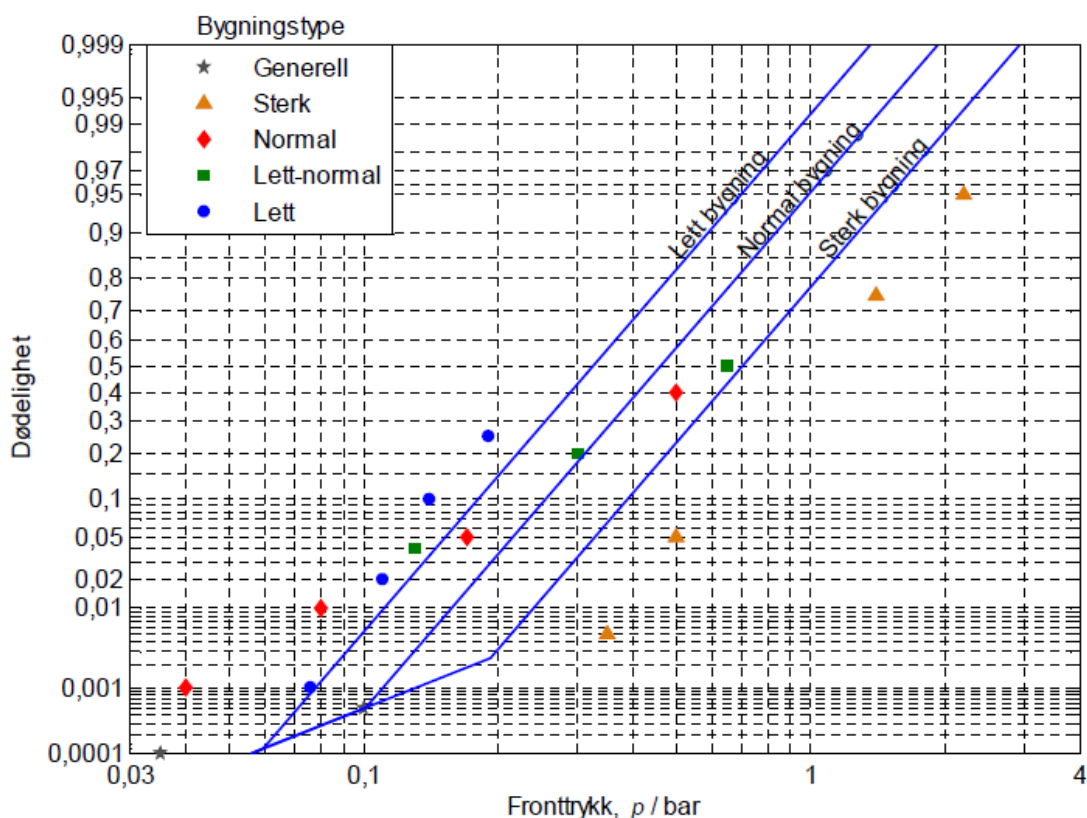
Figur 1. Dynamisk deformasjon (DLF) ift statisk deformasjon for et endimensjonalt elastisk svingesystem som funksjon av trykkpulsens varighet t_L i forhold til egenperioden T .

Figur 1 viser at for pulsvarigheter mindre enn egenperioden er responsen styrt av impulsen (dvs. $0.5 \cdot P \cdot t_L$) og ikke av trykket. For pulsvarigheter lenger enn egensvingetiden er responsen kun styrt av trykk, ikke av varighet.

Skade på bygninger og tilhørende forventet dødelighet er vurdert på bakgrunn av arbeid utført av FFI (ref./ii/). Dette er basert på resultater fra eksperimenter med TNT og vurderer responsen for tre ulike bygningstyper; lett, normal og sterk bygning:

- Lett bygning: Lette materialer med tynne stålplater eller vinduer som dekker store deler av bygget
- Normal bygning: Bygg av murstein, lett betong eller treverk
- Sterk bygning: Bygg av armert betong

FFI konkluderer med at egensvingeperioden for utsatte bygningselementer som regel er noen millisekunder, mens trykkpulsens varighet er en størrelsesorden større, noen titalls millisekunder. Fra Figur 1 sees da at bygningens respons kun er bestemt av trykket og pulsens form og ikke varigheten. FFI sine konklusjoner om dødelighet som følge av bygningskollaps er gjengitt i Figur 2 og viser nettopp dødelighet som funksjon kun av trykk og bygningstype.



Figur 2 Dødelighet som følge av kollaps av bygninger (ref. /ii/).

FFI konkluderer med at det interessante området som gir bygningskader er 0.1 til 0.8 barg. Trykket som gir 50% dødelighet pga. kollaps er i området 0.3 til 0.7 barg, og 0.45 barg for normale bygninger. Alternativt vil et trykk som gir 50% dødelighet for normale bygninger (0.45 barg) gi ca. 75% dødelighet for lette bygninger og ca 15% dødelighet for sterke bygninger.

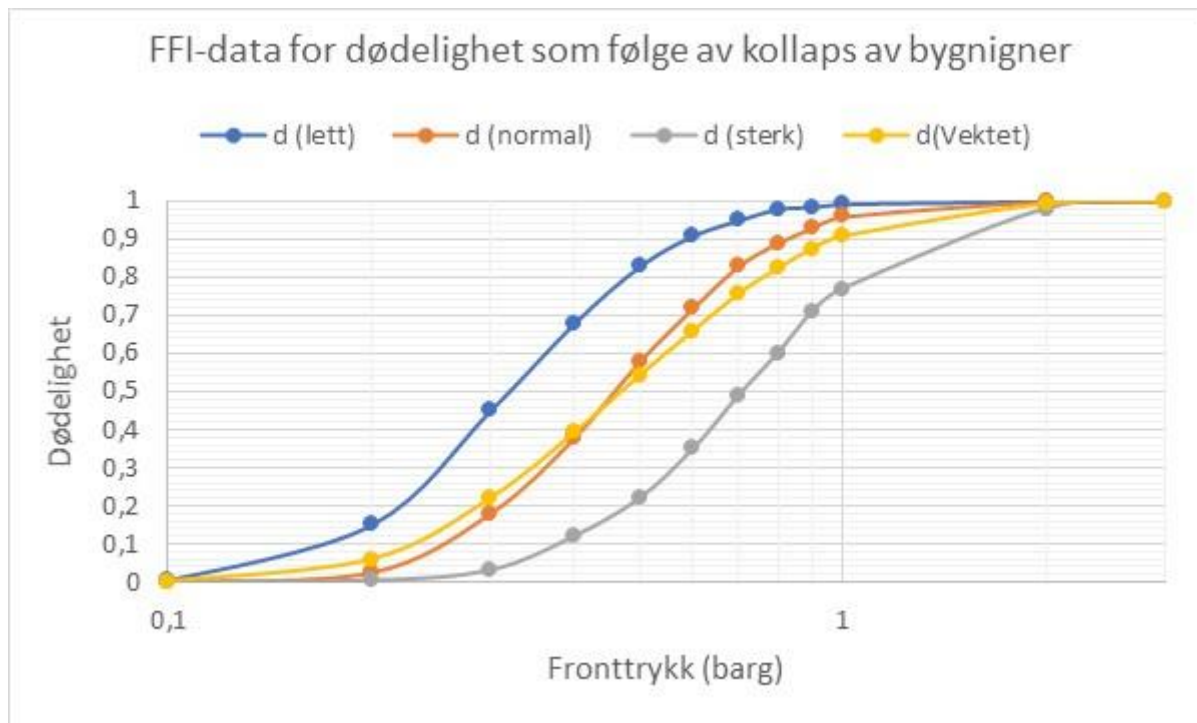
Modellen til FFI er basert på eksperimenter med TNT som genererer sjokkpulser. Normale deflagrasjoner i gasskyer genererer mer symmetriske trekantpulser som riktignok blir brattere jo lenger ut fra gasskyen trykket forplanter seg. Figur 1 viser at for et enkelt elastisk svingesystem vil et sjokk med varighet betydelig lenger enn egenperioden gi nesten dobbelt utslag eller deformasjon i forhold til en symmetrisk puls.

Kvantitativt kan ikke dette direkte overføres til en komplisert bygningsstruktur, men det indikerer likevel at terskelverdier basert på TNT kan være konservative.

En annen kompliserende faktor er at deformasjonene som fører til kollaps går langt ut over de elastiske, og hvis trykket i utgangspunktet er større enn den statiske kapasiteten vil strukturen gå til brudd hvis belastningen (dvs. trykket) varer lenge nok. Så i realiteten vil pulsens varighet kunne avgjøre om strukturen kolliderer eller ikke, gitt at trykket er høyere enn det som statisk gir brudd. Men også i en slik elasto-plastisk modell vil sjokk gi større deformasjon og dermed lettere medføre brudd enn en tilsvarende symmetrisk puls. Selv om trykkpulsens varighet kan være av betydning for kollaps selv for langvarige trykkpulser, så vil terskelverdier for kollaps basert på forsøk med TNT forventes å være konservative når de benyttes for scenarier med normale deflagrasjoner. Merk at konservativ i denne sammenheng betyr at bygningene når de eksponeres for trykk fra normale deflagrasjoner tåler mer enn det som framgår av Figur 1 og at dødeligheten dermed overestimeres, eller tilsvarende at terskelverdien for trykk underestimeres.

Utfordringen er da å velge en representativ terskelverdi for trykk for eksplosjoner som gir kollaps som medfører 50% dødelighet. Velger man å legge til grunn at områdene kun har lettere bygninger blir terskelverdien basert på Figur 2 0.3 barg, antar man at det kun er normale bygninger blir den 0.45 barg og ved kun sterke bygninger

blir den 0.7 barg. Hvis man legger til grunn en lik fordeling av alle bygningstypene blir terskelverdien det trykket hvor midlet av dødeligheten for lette, normale og sterke bygg blir 50%. I Figur 3 er tallene fra FFI vektet likt (1/3 på hver) mellom lett, normal og sterk bygning. Denne figuren viser at terskelverdien for 50% dødelig for normale bygg og terskelverdien for 50% dødelighet ved lik fordeling av lette, normale og sterke bygg i praksis er like. Dette er en indikasjon på at terskelverdien for 50% dødelighet vil ligge i intervallet 0.4 – 0.5 barg for alle områder, gitt at det ikke er en svært skjev fordeling av enten lette bygninger eller sterke bygninger.



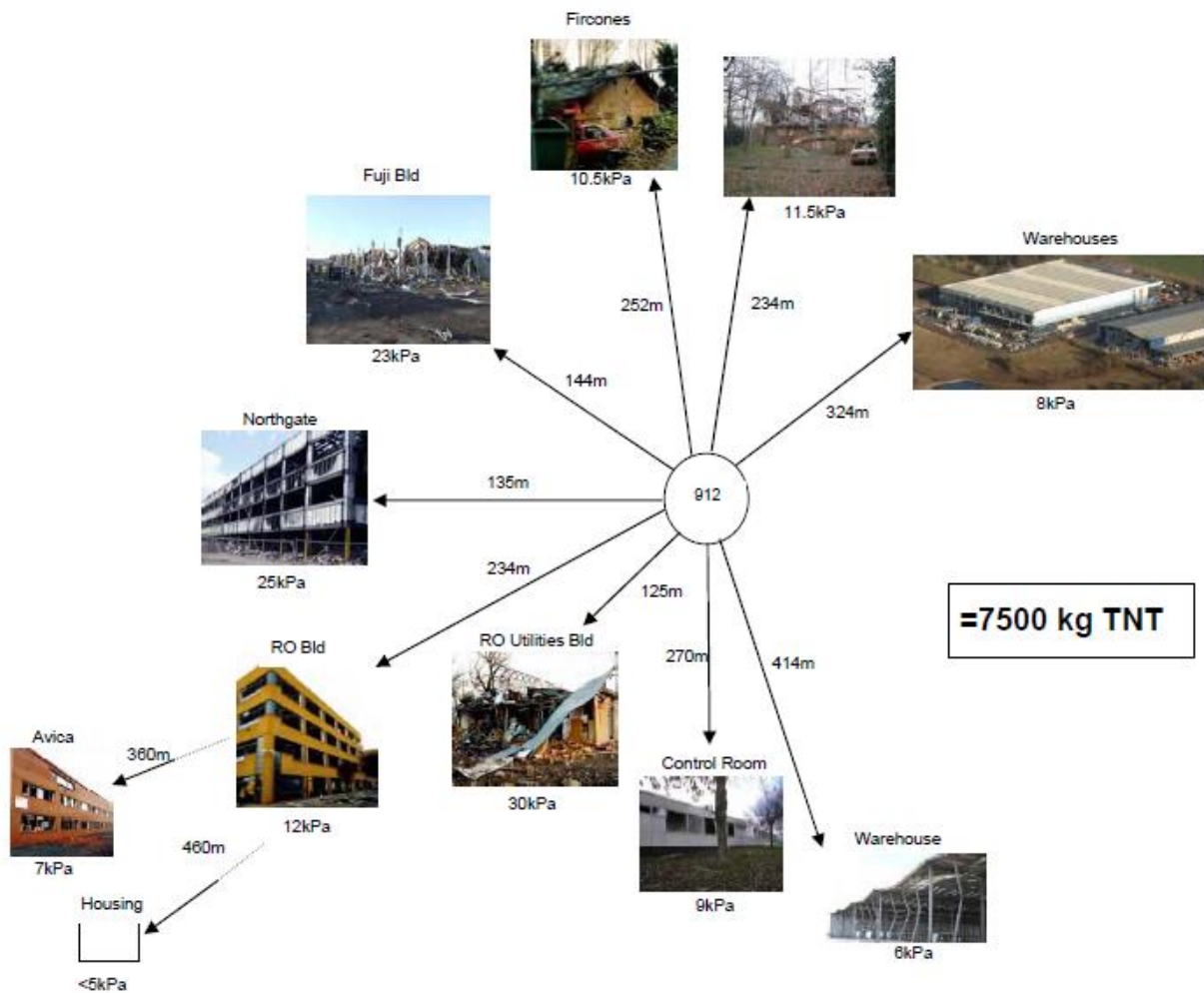
Figur 3 Vektet dødelighet ved antakelse av lik fordeling av lett, normal og sterk bygning

Oppsummert blir vurderingene for valg av terskelverdi for 50% dødelighet ved kollaps av bygninger som følger:

- Terskelverdier basert på Figur 2 vurderes som konservative fordi de gjelder for sjokk og ikke trykkpulser med en viss stighetid. Når en trykkpuls forplanter seg bort fra gasskyen vil den etter hvert sjokkes opp hvilket medfører at konservatismen vil avta noe etter hvert som trykket forplantes utover. Merk imidlertid at ved deflagrasjon i en fri gassky vil skyen ekspandere til omtrent dobbelt utstrekning før trykkpulsen forlater skyen, og avstanden før trykket sjokkes opp forflyttes tilsvarende.
- Det vil være ulike grad av konservatisme knyttet terskelverdier basert på de ulike bygningstypene i Figur 1. Det er naturlig å anta at bygningselementene for sterke hus er både tyngre og større enn for normale og lette bygninger og at egenperioden derfor blir lenger. Fra Figur 1 sees at forskjellen mellom deformasjon fra sjokk og trekantpuls reduseres når forholdet mellom pulsvarighet og egenperiode går fra høye verdier ned mot 1. Dette medfører at konservatismen ved å bruke TNT dataene reduseres tilsvarende. Med andre ord forventes konservatismen ved å benytte Figur 1 å være størst for de lette bygningene og minst for de sterke.
- Valg av terskelverdi basert på Figur 2 vil avhenge av hvilken fordeling av hustyper man legger til grunn. I et typisk byområde vil det sannsynligvis være overvekt av sterkere bygninger mens i et typisk boligområde vil det være overvekt av lettere hus. I retningslinjen tilstrebes det en forventningsrette risikokonturer uavhengig av hva som befinner seg utenfor anleggets område. Å legge til grunn rene boligområder dominert av lette hus vil derfor være konservativt, og å anta utelukkende sterke bygninger vil være tilsvarende optimistisk. Å legge til grunn et område dominert av normale bygninger vil gi en terskelverdi på 0.45 barg, (og samme terskelverdi oppnås ved å anta en lik fordeling av lett,

normal og sterk bygning). Som diskutert vurderes denne verdien i seg selv i varierende grad å være konservativ pga. forskjellen mellom trykkpulser fra TNT eksplosjoner og deflagrasjoner i gasskyer.

Når det gjelder erfaringer fra ulykker er det antagelig ingen ulykke som har vært analysert og gransket så grundig som Buncefield eksplosjonen. I Ref /iv/ har man bl.a. ved detaljerte analyser og tester fastslått overtrykket ved de ulike bygningene som ble skadet. Som figuren viste varierte overtrykket fra 6kPa (60 mbarg) til 30 kPa (0.3 barg). En lett bygning kan bedømmes som kollapset ved 23 kPa (se Figur 4 nedenfor), de andre bygningene fikk varierende grad av skader. Dette kan selvfølgelig ikke brukes direkte som underlag for terskelverdier for 50% dødelighet, men det sannsynliggjør at en terskelverdi for kollaps som diskutert i området 0.35 barg-0.5 barg kan være rimelig.



Figur 4. Oversikt over skadeomfang på bygninger og tilhørende overtrykk fra Buncefield (Ref./iv/)

2.5 Terskelverdier basert på fragmenter, primært fra knuste vinduer

Erfaring fra større eksplosjonsulykker og bombeangrep viser at opptil 80% av dødsfallene skyldes flygende fragmenter hvorav fragmenter fra vindusglass utgjør den dominerende dødsårsaken, se f.eks. Ref./iii/.

Bruddtrykket for vinduer varierer over et svært stort område, fra noen 10 talls mbarg til flere barg avhengig av vinduets størrelse (alt fra små vinduer i boliger til store panelvinduer i forretninger, hotell etc.), glasstykkelse, antall glass, glasstyper (normal, herdet, laminert etc). Likevel har TNO (i Ref./i/ kap. 2 likning 62 og 63) gitt probiter for brudd av gamle og nye glassvinduer til bruk i risikoanalyser. Disse gir 50% sannsynlighet for brudd ved ca. 2 kPa (20mbar) for gamle og ca. 5 kPa (50 mbarg) for nye vinduer. I og med at dette er betydelig

lavere enn andre terskelverdier medfører det at knuste vinduer er den effekten av eksplosjoner som vil merkes over et størst område.

Selv om fragmenter fra knuste vinduer synes å være den dominerende dødsårsaken fra eksplosjoner vurderes det som lite sannsynlig at knuste vinduer vil bestemme terskelen for 50% dødelighet. Selv om knust vindusglass er den dominerende dødsårsaken fra eksplosjoner vet man ikke hvor mange mennesker som i realiteten ble eksponert eller befant seg i området, men det er rimelig å anta at det er vesentlig flere enn de som ble drept. F.eks. ble ca. 220 personer drept ved ammoniumnitrateksplosjonen i Beirut, men når man ser omfanget av skadeområdet er det rimelig å anta at vesentlig flere enn 220 personer ble eksponert. Et annet eksempel er bombeattentatet mot regjeringsbygningen hvor omtrent samtlige vinduer i fasaden på både regjeringsbygningen og nærliggende bygninger mot eksplosjonen knuste. De 3 som ble drept inne i bygningen befant seg i resepsjonsområdet, ingen personer i kontorene ellers ble drept selv om de var over 200 skadede. Det tross alt begrensede antall drepte i forhold til skadebildets omfang kan skyldes flere forhold, men mest sannsynlig er at glassfragmentene kun har muligheten til å skade eller drepe personer i nærheten av vindusfasadene, mens personer dypere inn i bygningen vil være mer beskyttet. I tillegg vil ikke brudd på vindusglass ved trykk i nærheten av terskelverdien, som f.eks. gitt av TNO, nødvendigvis gi fragmentene tilstrekkelig energi til å drepe selv om de medfører skade.

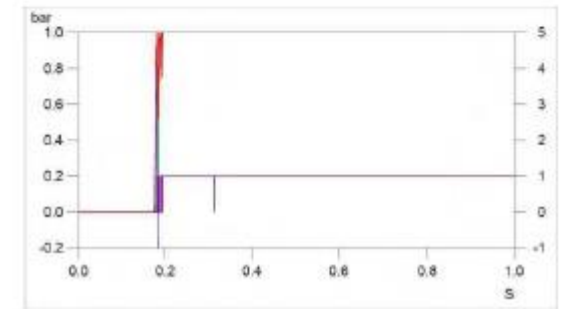
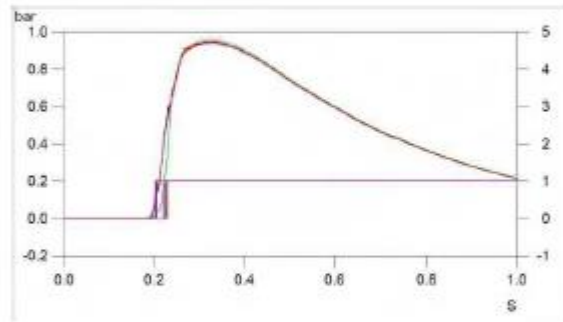
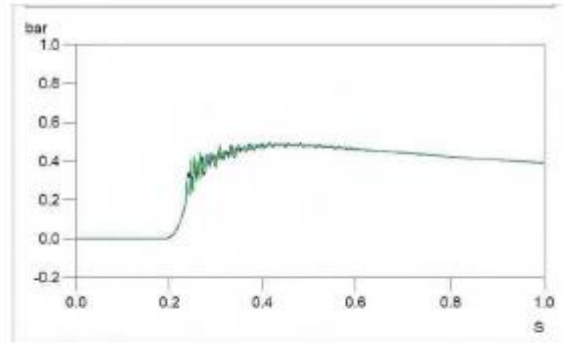
Så selv om utbredelsen av knuste vinduer og andre bygningsfragmenter kan dekke et omfattende område, og vil være det som setter inntrykket av omfanget av eksplosjonen, er det likevel rimelig å legge til grunn at dette ikke bidrar til terskelverdien for 50% døde selv om det vi bidra til de lavere sannsynlighetene i en probit for dødsfall.

BLEVE er det ulykkesscenarioet som kan gi både de største fragmentene som samtidig også flyr lengst. Der hvor et fragment, som f.eks. en større del av en tank, lander vil personer kunne bli drept. I og med at fragmentene kan fly langt, opp til over en km, blir imidlertid det potensielle nedslagsområdet tilsvarende stort, og sannsynligheten for at en tilfeldig person skal omkomme tilsvarende liten. Fragmenter fra BLEVE antas derfor ikke å bidra til terskelverdi for 50% dødelighet for en gitt lokasjon.

2.6 Terskelverdier for personer i biler og andre transportmidler.

Personer inne i biler eller andre transportmidler vil være bedre beskyttet enn personer i friluft. Testing av skadeomfang på biler utsatt for TNT eksplosjoner, Ref. /iv/ og illustrert i Figur 5 viser at karosseriet har stor motstandskraft mot eksplosjoner. Ved et trykk på 0.5 barg ble kun frontvinduet knust og det var få synlige skader på karosseriet. Skader på karosseriet begynte å opptre ved ca. 1 barg, og først ved flere barg ble det omfattende skader.

Brudd på vindusglass i biler vil bidra til en dødsrisiko for personer inne i bilene, glasset er konstruert for ikke å fragmentere, så på basis av Ref. /iv / er det rimelig å anta at trykket må være over 0.5 barg (50 kPa) for i vesentlig grad å bidra til dødsrisiko i bil.



Figur 5 Skader på biler ved ulike overtrykkbelastninger (vist ved siden av hver bil). Fra Ref. /iv/

3 Terskelverdier basert på spesifikke forhold i et område

Terskelverdiene er ment å være et representativt gjennomsnitt for eksplosjonstrykk som gir dødelighet i et område. I realiteten vil det være store variasjoner i fysisk skadeomfang mellom områdene, alle vil være spesifikke på sin måte. Dette kan skyldes tettheten av bygninger, type bygninger, aktiviteter i området, vei og jernbanetraffikk. Videre vil antall personer i området og hvor de befinner seg variere – hvor mange det er til enhver tid på døgnet, hvor de er til enhver tid som i friluft, inne i bygninger i mer eller mindre utsatte områder, om de befinner seg i biler, busser eller passerende jernbane etc. Alt dette vil medføre at hvert enkelt område vil ha sin spesifikke terskelverdi for trykk som gir 50% dødelighet. Denne terskelverdien vil imidlertid variere både med tid på døgnet og med hvordan området utvikles og etter hvert endrer karakter. Som det er slått fast i retningslinjene ønsker man av forvaltningsmessige hensyn å beregne risikokonturer som er uavhengige av spesifikke forhold i området utenfor anlegget for at rammene for eventuelle tiltak skal være forutsigbare også framover i tid. De foreslåtte terskelverdiene tar således ikke hensyn til noen spesifikke forhold i områdene eller bygningene utenfor selve anleggets område.

4 Konklusjon

Det er i prinsippet følgende mekanismer som kan bidra til terskelverdien for 50% dødsrisiko forbundet med eksplosjoner:

1. Lungeskader på personer i friluft (terskelverdi ca. 5 barg);
2. Helkroppsskader på personer i friluft (forventet terskelverdi > 0.5 barg);
3. Kollaps av bygninger (terskelverdi i området 0.4 - 5 barg);
4. Fragmenter, spesielt fra knuste vinduer (forventer ikke at dette kan gi 50% dødelighet i et 3. parts område, derfor ingen terskelverdi); og
5. Skade på biler og andre transportmidler (forventet terskelverdi > 0.5 barg).

Den laveste terskelverdien er i forbindelse med kollaps av bygninger. Som det er diskutert i kapittel 2.4 kan man forvente at bebygde områder vil forventet terskelverdi for 50% dødelighet ligge i intervallet 0.4 – 0.5 barg. Som en generell terskelverdi til bruk i arealplanlegging foreslås det å benytte en verdi som ligger i nedre del av dette intervallet.

Terskelverdi for eksplosjoner foreslås derfor satt til 0.4 barg.

Når det gjelder å kommunisere omfanget av en eksplosjonsulykke i sammenheng med terskelverdier for 50% dødelighet påpekes det at størrelsen av området med knuste vinduer vil gi inntrykk av ulykkens omfang, men sonen med 50% dødelighet vil være vesentlig mindre. Omvendt vil det området som omfangas av ulykken være vesentlig større enn området innenfor 50% terskelen for dødelighet.

5 Referanser

-
- /i/ TNO: "Methods for the Determination of Potential Damage (TNO "Green Book")", CPR 16E.
 - /ii/ "Beregning av dødelighet fra luftsjokk", FFI-rapport 2007/01896, 30. juni 2007
 - /iii/ "Blast Protection for Windows", UN Department of Safety and Security, PSU Information Bulletin
 - /iv/ "Buncefield Explosion Mechanism Phase 1 Vol 1" HSE Research Report RR718, 2009