

Beregning av dødelighet fra luftsjokk

Knut B. Holm

Forsvarets forskningsinstitutt (FFI)

30. juni 2007

FFI-rapport 2007/01896

343301

ISBN 978-82-464-1294-8

Emneord

Ammunisjon

Sjokkbølger

Godkjent av

Jan Ivar Botnan

Avdelingssjef

Sammendrag

Metoder for å anslå dødelige virkninger av luftsjokk, er undersøkt for å forbedre eller verifisere beregningsmodellene i risikoanalyseverktøyet AMRISK. Modellen i AMRISK for virkning mot personer i friluft er en forenklet versjon av Bowens modeller. For direkte effekter gir modellen i AMRISK betydelig større dødelighet enn Bowens modell ved små ladningsvekter. Selv om det kan stilles spørsmål ved noe av grunnlaget for modellen, er Bowens allment utbredte modell den beste som er tilgjengelig. For indirekte effekter i friluft anbefales en modell som bygger på Bowens modell for å beregne hastigheten til personer som forflyttes av sjokkbølgen, og som i tillegg tar hensyn til sjokkbølgens diffraksjonsbelastning. Direkte og indirekte skade fra luftsjokk bør betraktes som uavhengige hendelser. Det er ikke funnet grunnlag for å anbefale en ny modell for beregning av dødelighet for mennesker i kjøretøy. For mennesker i bygninger vil eksisterende modell trolig kunne forbedres, men så langt er det ikke utviklet noen ny modell.

English summary

Methods for estimating the lethal effects of air blast have been investigated to improve or verify the calculation models in the quantitative risk analysis tool AMRISK. The model in AMRISK for predicting lethality from air blast to people in free-field is a simplified version of models developed by Bowen et al. For direct effects the AMRISK model is very conservative for small ammunition quantities in contrast to Bowen's original model. Although some parts of the model basis may be questionable, Bowen's extensively used model is the best model available. For indirect effects in free-field the recommended model is based upon Bowen's model for predicting the velocity of persons translated by blast waves, with a diffraction load added. In free-field damage from direct and indirect effects should be considered as independent events. For the lethality to people in vehicles new and evidently better models are not available. The existing model for people in buildings can probably be improved, but so far a new model is not at hand.

Innhold

1	Innledning	7
2	Skademekanismer	7
2.1	Direkte virkning	7
2.2	Indirekte virkning	7
3	Modell i AMRISK 2.0	8
3.1	Omgivelser	8
3.2	Virkning i friluft	8
3.2.1	Direkte skader	8
3.2.2	Indirekte skader	12
3.2.3	Kombinasjon av kriterier for direkte og indirekte skade	18
3.3	Virkning i skog	20
3.4	Virkning i bygninger	22
3.5	Virkning mot kjøretøy	24
3.6	Virkning mot tog	25
4	Andre modeller	26
4.1	Virkning i friluft	26
4.1.1	Direkte skader	26
4.1.2	Indirekte skader	30
4.2	Virkning i skog	39
4.3	Virkning i bygninger	40
4.4	Virkning mot kjøretøy	40
4.4.1	Modell i SAFER	40
4.4.2	Bakers modell	42
5	Vurdering av modeller	44
5.1	Virkning i friluft	44
5.1.1	Direkte skader	45
5.1.2	Indirekte skader	48
5.2	Virkning i skog	48
5.3	Virkning i bygninger	49
5.4	Virkning mot kjøretøy	49
6	Ny modell for virkning i friluft	49
6.1	Direkte skader	49
6.2	Indirekte skader	50

6.3	Resultater	52
6.4	Tilpasning til virkningsmodeller i AMRISK	54
	Referanser	55
	Appendix A Anbefalte modeller	59
A.1	Direkte virkning i friluft	59
A.2	Indirekte virkning i friluft	60
A.3	Dynamisk impuls og varighet	60

1 Innledning

I Norge og Sverige blir dataverktøyet AMRISK brukt til kvantitativ risikoanalyse ved vurdering av risiko for mennesker som befinner seg i nærheten av et ammunisjonslager. Beregningene i AMRISK omfatter sannsynligheten for en eksplosjon, de fysiske effektene av eksplosjonen som luftsjokk, grunnsjokk og utkast av splinter og annet materiale og dødeligheten av disse effektene, samt estimering av antall personer som vil være utsatt for effektene. Sluttresultatet av analysen er forventet antall døde mennesker per år.

I 2005 ble et omfattende arbeid med oppdatering og utvikling av AMRISK avsluttet med lanseringen av versjon 2.0 [1]. Arbeidet inkluderte implementering av flere nye beregningsmodeller. Det ble i den forbindelse kartlagt hvilke av de gjenstående modellene som burde forbedres. Modellen som beregner sannsynligheten for dødelig skade fra luftsjokk, ble ansett å ha særlig behov for å bli oppdatert. På oppdrag fra FLO/S/SBL har FFI derfor studert ulike beregningsmetoder og grunnlaget for disse, for å kunne gi anbefaling om en bedre modell.

Modellen som i dag brukes i AMRISK for å beregne letalitet fra luftsjokk, er ikke utviklet med tanke på eksplosjoner av små mengder sprengstoff slik som ved feltlagring. Dette gir upålitelige resultater både for sjokkbølgens direkte virkning på livsviktige organer og for den indirekte virkningen når trykkbølgen ødelegger bygninger eller knuser vinduer. I tillegg til de nevnte skademekanismene kan en trykkbølge påføre skade ved at den river mennesker over ende og velter kjøretøy.

2 Skademekanismer

2.1 Direkte virkning

Direkte eller primære skader fra luftsjokk oppstår når sjokkbølgen treffer kroppen. Sjokkbølgen skyver kroppsveggen inn i hulrommene slik at organenes volum forandres hurtig, og det indre kroppsvevet forskyves [2]. Luftfylte organer vil lettest endre volum, og dermed vil vevet i disse være mest følsomt for forskyvninger og spenninger. Når spenningen overstiger vevets strekkstyrke, kan det føre til avrivninger og blødninger. De vanligste alvorlige virkningene er skade på åndedrettssystemet, spesielt lungene, dannelse av luftbobler i blodet og skader på mage- og tarmsystemet. Luftboblene antas å oppstå i lungene, men kan også føre til blodpropper i hjerne, hjerte og nyrer [2]. Ellers er øret det organet som lettest blir skadet av luftsjokk, men disse skadene vil ikke være livstruende. Sårbarheten av hodet overfor direkte virkning av luftsjokk er gjenstand for aktiv forskning, men foreløpig med motstridende resultater [3].

2.2 Indirekte virkning

Indirekte virkning deles ofte inn i sekundære og tertiære effekter. Sekundære skader kan oppstå når gjenstander som er drevet av trykkbølgen, treffer kroppen. Dette omfatter splinter fra vinduer

og bygninger som raser sammen. I AMRISK behandles utkast fra ammunisjonslagre separat og er ikke inkludert i beregningen av dødelighet fra luftsjokk. Tertiære skader skyldes at luftsjokket blåser kroppen av gårde slik at den blir skadet når den støter mot bakken eller andre harde objekter. Skadetyper er den samme som ved bilkollisjoner, fall og flyulykker. Trolig er hodet mest utsatt for skade, men også andre deler av kroppen kan bli alvorlig skadet. Luftsjokket kan i tillegg blåse kjøretøy over ende slik at passasjerene blir skadet.

3 Modell i AMRISK 2.0

Nåværende modell i AMRISK for å beregne luftsjokkskade, ble utviklet for bruk i risikoanalyse av ammunisjonslagre i Sveits [4]. Dette kapittelet beskriver utledningen av modellen.

3.1 Omgivelser

Ved en eksplosjon i et lager vil skaden på personer som utsettes for virkningene av eksplosjonen, være avhengig av omgivelsene. De definerte omgivelsene i AMRISK er frifelt, bygning, bil og tog [5].

Frifelt er i friluft. Et spesialtilfelle av frifelt er skog der det skal være minst ett tre som er høyere enn 10 m, per 25 m². På samme måte er det definert egne tilfeller for biler og tog i ugunstige omgivelser som når veien eller jernbanen går over broer, i bratt terreng eller i skog. Av bygninger finnes tre typer: Lette bygninger er laget av lette materialer som tynne stålplater eller har vinduer som dekker store flater. Normale bygninger er av mur, lett betong eller tre, mens sterke bygninger har vegger av armert betong.

3.2 Virkning i friluft

3.2.1 Direkte skader

Modellen i AMRISK for direkte skade på mennesker, bygger på modellen publisert av Bowen m.fl. i 1968 [6]. Modellen anslår sannsynligheten for dødelig skade fra en sjokkbølge med gitt maksimaltrykk og varighet mot et menneske med en gitt masse. Modellen ble utviklet på grunnlag av resultater fra forsøk i sjokkrør og med eksplosiver mot til sammen 2097 dyr av 13 ulike arter.

Sammenhengen mellom maksimaltrykk P og varighet T som gir en bestemt respons, ble forutsatt å være

$$P = P^* (1 + aT^{-b}) \quad (3.1)$$

der a og b er positive konstanter, og P^* er gitt av skadenivået. Det brukes en probitfunksjon for å bestemme forholdet mellom P^* og dødeligheten, det vil si at dødeligheten som funksjon av

logaritmen til P^* er gitt av en kumulativ normalfordeling. Det omvendte forholdet blir da

$$P^* = p_{50} e^{cz} \quad (3.2)$$

Her er p_{50} verdien for P^* som gir 50 % dødelighet (innen 24 timer) slik at $\ln(p_{50})$ er medianen og c standardavviket til fordelingen, mens z er kvantilen til dødeligheten i en standard normalfordeling, også betegnet som probitverdi.¹ Siden betingelsen for skade ved lange varigheter vil være $P = P^*$, blir p_{50} også betraktet som trykket som gir 50 % dødelighet ved lange varigheter.

For et gitt trykk og en gitt varighet er dermed dødeligheten

$$\lambda = \int_{-\infty}^z \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}x^2} dx \quad (3.3)$$

med

$$z = \frac{1}{c} \ln \left(\frac{P}{p_{50} (1 + aT^{-b})} \right) \quad (3.4)$$

Ved hjelp av dimensjonsanalyse og antakelse om likhet i kroppsbygning og i fordeling av vevsmasse og elastisitet hos pattedyr, er det funnet at når størrelsene p/p_0 og $tp_0^{1/2}/m^{1/3}$ er konstante, vil dødeligheten være tilnærmet konstant [7]. Her er p og t karakteristiske trykk og varigheter til sjokkbølger, p_0 er bakgrunnstrykk og m er kroppsmasse. Varigheten av det positive fronttrykket t_p^+ som gir en viss dødelighet for et dyr med masse m når bakgrunnstrykket er p_0 , kan da regnes om til varigheten som gir samme dødelighet for en 70 kg person når bakgrunnstrykket er 1 atm:

$$T = t_p^+ \frac{(p_0/1 \text{ atm})^{1/2}}{(m/70 \text{ kg})^{1/3}} \quad (3.5)$$

For trykket blir tilsvarende

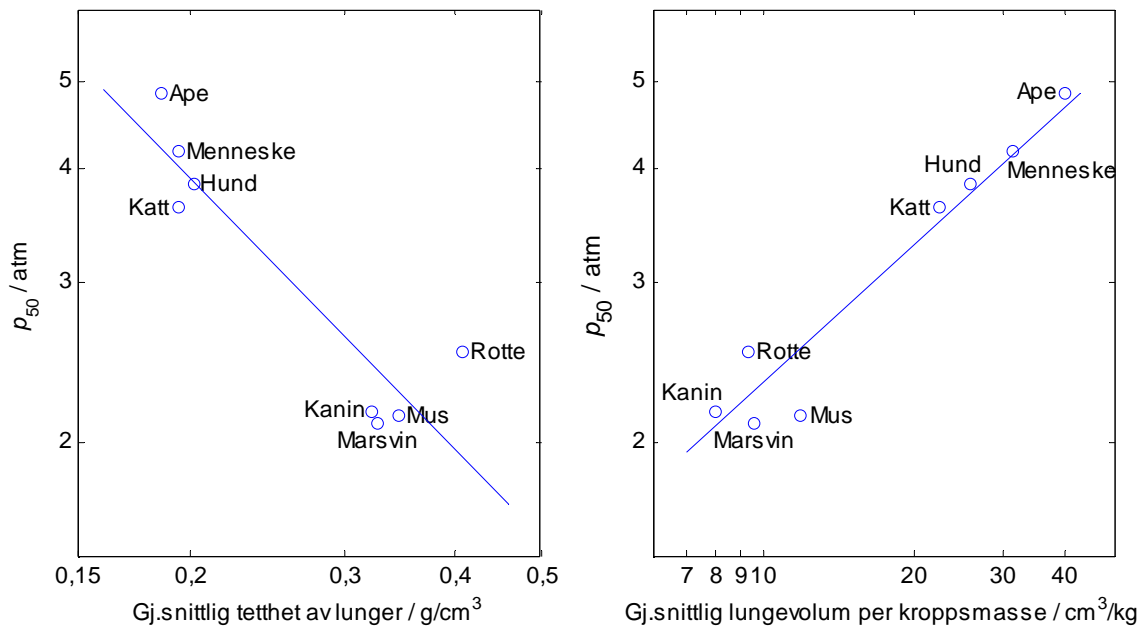
$$P = \frac{p_e}{p_0/1 \text{ atm}} \quad (3.6)$$

med p_e som maksimalt belastende trykk.

¹ Det er også utbredt å bruke en normalfordeling med forventningsverdi 5 (og standardavvik 1), men i AMRISK og i denne rapporten brukes en fordeling med forventningsverdi 0.

Ut fra forsøkene ble det tilpasset verdier for p_{50} for hver av de 13 artene og generelle verdier for a , b og c . Verdiene for p_{50} skilte seg i to grupper, én med de større artene og én med de mindre. Verdien for mennesket ble satt lik den geometriske middelverdien av de større dyrenes verdier, det vil si 4,18 atm.

Denne antakelsen ble sannsynliggjort ved å sette verdier for p_{50} for ulike dyrearter sammen med verdier for lungenes tetthet og lungevolum, se figur 3.1.



Figur 3.1 Trykk som gir 50 % dødelighet som funksjon av lungetetthet og lungevolum i forhold til kroppsmasse [6], lungedata fra [8]

Det ser ut til å være en klar sammenheng mellom toleranseverdien p_{50} og de valgte lungeegenskapene med økende toleranse med større relativt lungevolum og mindre toleranse med større lungetetthet. Forholdet mellom toleranse og lungevolum kan forklares med at større volum gir mindre trykk i lungene og dermed mindre skade. Det er mer tvilsomt om tettheten har noen direkte betydning for toleransen [6]. Den anslåtte toleransen for mennesket stemmer uansett godt overens med sammenhengene.

Med de tilpassede parametrene kan Bowens kriterium for lungeskade skrives som

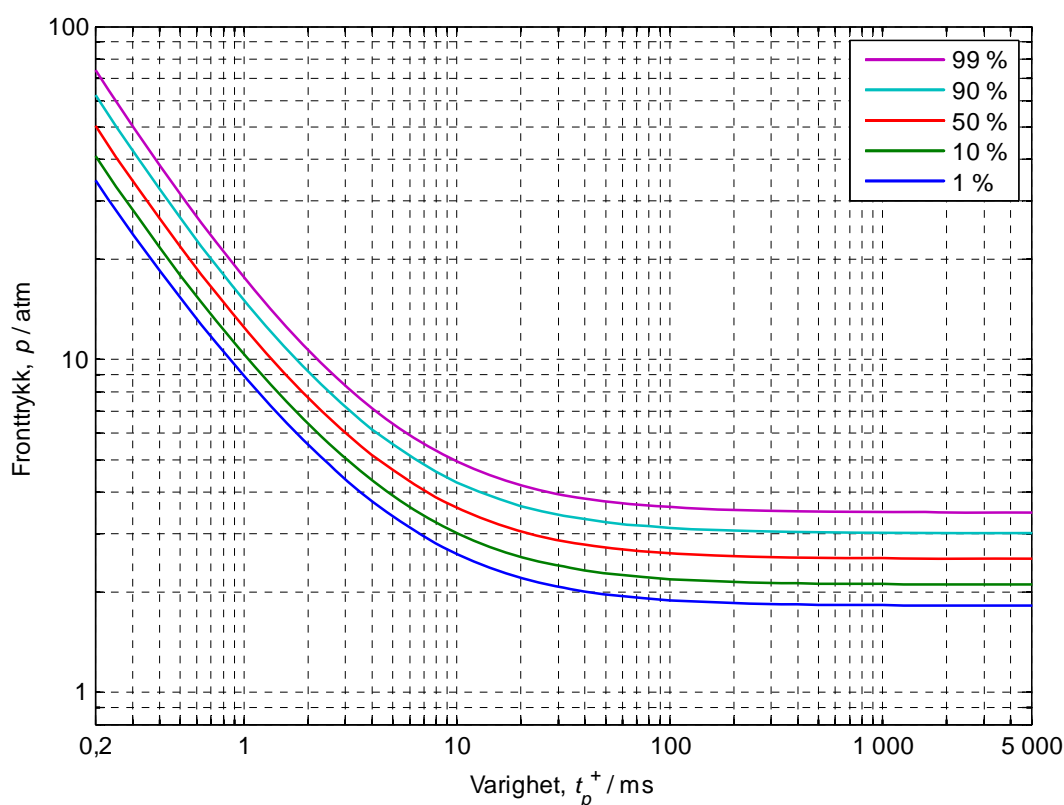
$$\frac{p_c}{p_0} = 4,18 e^{0,1788z} (1 + 6,76T^{-1,064}) \quad (3.7)$$

når T er gitt i ms.

Det effektive trykket som belaster en person, p_e , er avhengig av personens orientering i forhold til trykkbølgen [6]. En person som ligger, vil bli belastet av frontrykket, mens en person som befinner seg nær en reflekterende flate, belastes av refleksjonstrykket. Modellen i AMRISK er i utgangspunktet basert på at personene står oppreist, og da vil belastningen være stagnasjonsstrykket som er summen av frontrykket og det dynamiske trykket. Ved moderate trykk er det maksimale dynamiske trykket [9]:

$$q = \frac{5}{2} p_0 \frac{(p/p_0)^2}{7 + p/p_0} \quad (3.8)$$

der p er frontrykket. Kombinasjonene av trykk og varighet som gir bestemte verdier for dødeligheten, blir da som vist i figur 3.2.



Figur 3.2 Bowens kurver for 1, 10, 50, 90 og 99 % dødelighet fra direkte luftsjokk for en 70 kg person med lengdeaksen normalt på sjokkets retning ved 1 atm bakgrunnstrykk

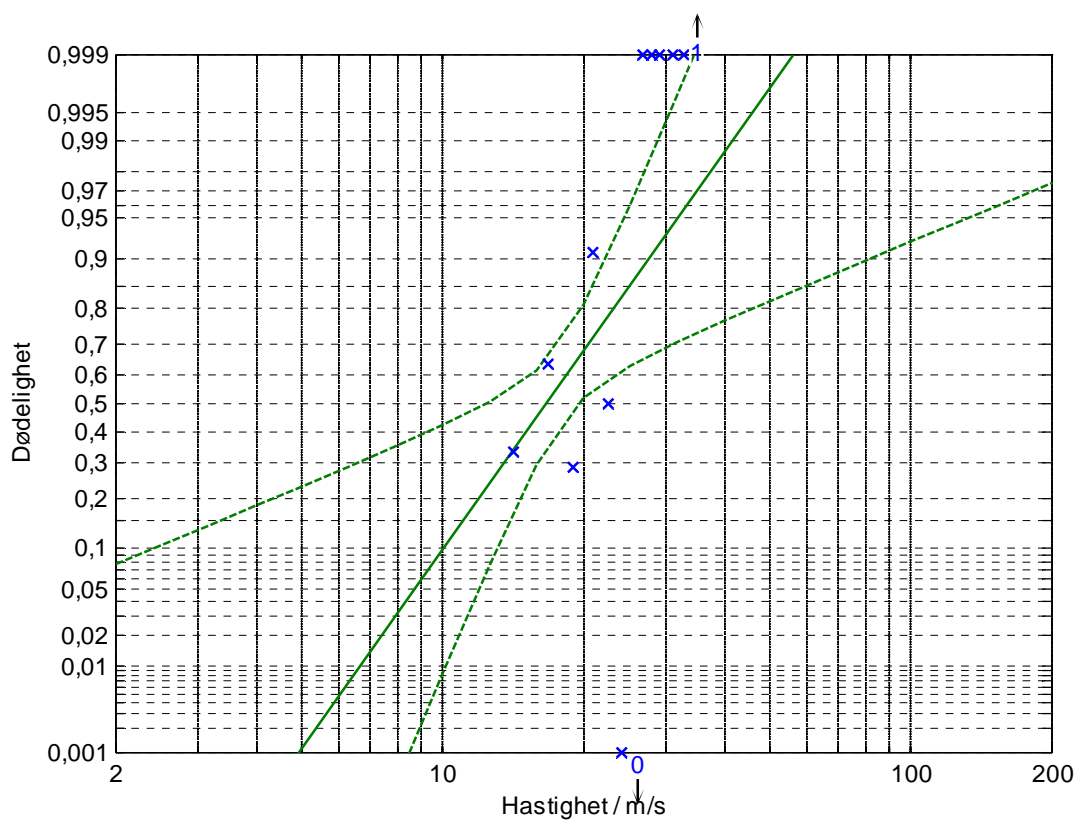
Dersom personen bare belastes av frontrykket, kreves det høyere trykk for å gi skade, og skadekurvene vil ligge høyere enn kurvene i figur 3.2. Derimot vil kurvene ligge lavere hvis det effektive trykket er refleksjonstrykket.

3.2.2 Indirekte skader

Skadekriteriet som brukes i AMRISK for mennesker som settes i bevegelse av trykkbølgen, er basert på beregninger av hastigheten personen vil få, og skaden som oppstår når mennesker med denne hastigheten treffer en hard flate. Når det gjelder hastighetskriteriet, gjorde Jones m.fl. [10] i 1969 en vurdering av tilgjengelige data, blant annet fra dyreforsøk. Konklusjonen var at de mest pålitelige verdiene bygger på data fra et sykehus i Harlem over hvor mange mennesker som i 1963 omkom eller overlevde etter fall fra forskjellige etasjer i bygninger [11]. Treffhastigheten ble beregnet ut fra etasjen, og så ble det gjort en probitanalyse av dataene der den standard normalfordelte størrelsen z ble estimert til

$$z = -7,136 + 2,541 \ln v \quad (3.9)$$

der v er hastigheten i m/s. Analysen viste at den statistiske usikkerheten i anslåtte verdier vil være stor, spesielt ved små og store dødelighetsverdier, se figur 3.3.



Figur 3.3 Data for dødelighet som funksjon av hastighet ved fallulykker sammen med tilpasset probitlinje med 95 % konfidensintervall for anslåtte verdier (stiplede linjer) [10]

Tabell 3.1 viser hastighetene som vil gi dødeligheter på 1 %, 10 %, 50 %, 90 % og 99 %.

Tabell 3.1 Dødelighet som funksjon av hastighet på mennesker som treffer en overflate

Dødelighet	Hastighet / m/s
1 %	6,6
10 %	10
50 %	17
90 %	27
99 %	41

Beregningen av hastigheten en trykkløse vil gi en person, er basert på en modell utviklet av Bowen m.fl. [12]. Den tar utgangspunkt i bevegelseslikningen for et legeme med effektivt areal S , masse m og dragkoeffisient C_d som utsettes for en vindkraft,

$$m \frac{dv}{dt} = \frac{1}{2} \rho (u-v)^2 SC_d \quad (3.10)$$

der ρ er tettheten i lufta, u er vindhastigheten og v er hastigheten til legemet.

Når legemet beveger seg i samme retning som sjokkbølgen, vil tida det tar før bølgen og den medfølgende vinden har passert legemet, bli lengre. Derfor blir dt erstattet av

$$dt' = dt \frac{\dot{x}}{\dot{x} - v} \quad (3.11)$$

der \dot{x} er bølgehastigheten.

Videre innføres en akselerasjonskoeffisient α ,

$$\alpha = \frac{SC_d}{m} \quad (3.12)$$

som oppgis å være $0,03 \text{ ft}^2/\text{lb} = 0,0061 \text{ m}^2/\text{kg}$ i gjennomsnitt for en roterende, stiv mann på 76 kg. Dessuten benyttes det dynamiske trykket q ,

$$q = \frac{1}{2} \rho u^2 \quad (3.13)$$

Dermed blir bevegelseslikningen

$$\frac{dv}{dt} = q \alpha \left(\frac{u-v}{u} \right)^2 \frac{\dot{x}}{\dot{x} - v} \quad (3.14)$$

Maksimalverdiene til det dynamiske trykket og vindhastigheten i sjokkfronten er avhengig av maksimaltrykket p , og Bowen bruker forholdene

$$q = \frac{5}{2} \frac{p^2}{7p_0 + p} \frac{1 + 2 \cdot 10^{-8} p/p_0}{1 + 10^{-8} p/p_0} \quad (3.15)$$

$$\frac{u}{c} = \frac{p/p_0}{1 + (p/p_0)^{1/2}} \quad (3.16)$$

der c er lydhastigheten. Tidsavhengigheten til disse størrelsene uttrykkes som

$$q(t) = q \left(1 - \frac{t}{t_u^+} \right) \left[J e^{-\gamma t/t_u^+} + K e^{-\delta t/t_u^+} \right] \quad (3.17)$$

med

$$J = \begin{cases} 1,186 p/p_0 & p/p_0 < 0,6 \\ 1 & 0,6 \leq p/p_0 \leq 1,0 \\ \frac{10^4 (p/p_0)^{-1/4}}{10^4 + (p/p_0)^2} & p/p_0 > 1 \end{cases} \quad (3.18)$$

$$K = 1 - J$$

$$\gamma = \frac{1}{4} + 3,6 (p/p_0)^{1/2}$$

$$\delta = 7 + 8 (p/p_0)^{1/2} + \frac{2 (p/p_0)^2}{240 + p/p_0}$$

og

$$u(t) = u \left(1 - \frac{t}{t_u^+} \right) e^{-\nu t/t_u^+} \quad (3.19)$$

der

$$\nu = (p/p_0)^{1/3} + 0,0032 (p/p_0)^{3/2} \quad (3.20)$$

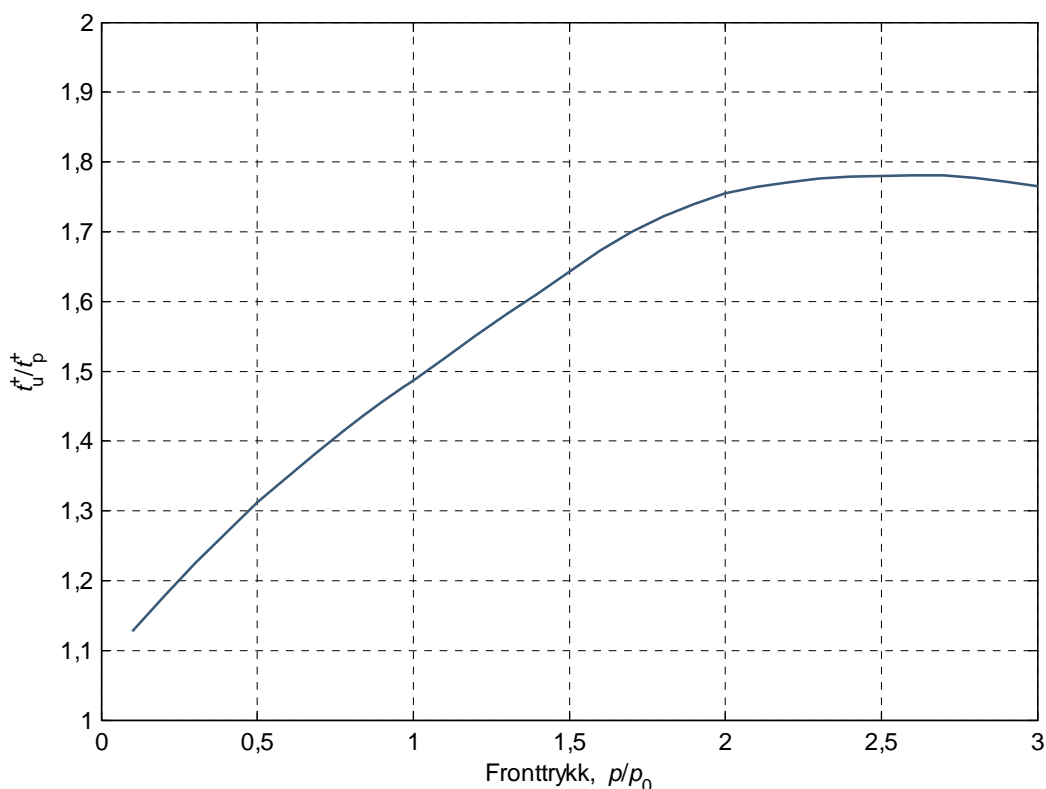
og t_u^+ er varigheten til trykkvinden eller dynamiske trykket.

For å bestemme sjokkhastigheten brukes uttrykket

$$\frac{\dot{x}}{c} = \frac{3u}{5c} + \sqrt{1 + \left(\frac{3u}{5c}\right)^2} \quad (3.21)$$

for alle tider.

Varigheten til trykkvinden er større enn varigheten til trykkbølgen, og Bowen benytter forholdene i figur 3.4.



Figur 3.4 Forhold mellom vindens og overtrykrets varighet som funksjon av overtrykket [12]

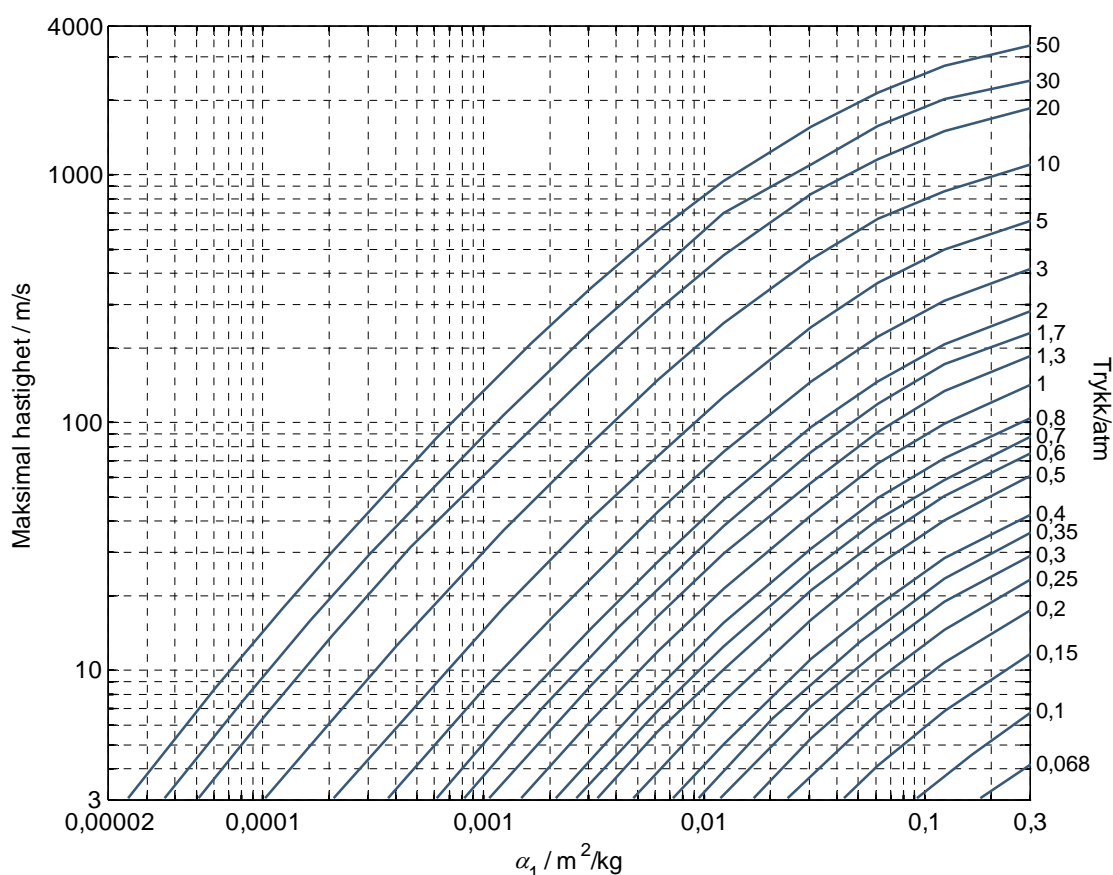
Dermed kan hastigheten til en person som funksjon av tid, bestemmes for et gitt trykk og en gitt varighet, og det kan finnes hvilke kombinasjoner av trykk og varighet som gir en bestemt maksimal hastighet med tilhørende dødelighet. Resultatene presentert i [12] er imidlertid hastigheten som funksjon av akselerasjonskoeffisienten α . Da er varigheten bestemt med uttrykket

$$\frac{t_p^+}{W^{1/3}} = \frac{79290}{p^{0,2957} p_0^{0,0376} c} \quad (3.22)$$

som gjelder for kjerneeksplosjoner med ladningsstørrelse W gitt i kilotonn TNT og med p og p_0 gitt i atm. Ifølge [12] er dette gyldig for overflateeksplosjoner med trykkverdier mellom 0,1 og

2,6 atm og for frittstående eksplosjoner når trykkverdiene er mellom 0,13 og 1,4 atm. I gyldighetsområdet for formelen stemmer den også godt for konvensjonelle våpen; da settes W til den dobbelte mengden av TNT [13]. For høyere trykk gir imidlertid formelen for høye varigheter.

Det er i [12] vist kurver for hastigheten som funksjon av akselerasjonskoeffisienten α for en rekke trykkverdier fra 0,068 til 1,7 atm og med W lik 1 kt. I [13] er det gjort en ekstrapolasjon av kurvene for trykk opp til 50 atm. Dette er gjort ved å måle avstanden mellom de opprinnelige kurvene og tilpasse en formel for trykk som funksjon av denne avstanden. Slik er det laget et sett nye kurver. Kurvene er også strukket ut fra $\alpha = 0,002 \text{ m}^2/\text{kg}$ til $\alpha = 0,00002 \text{ m}^2/\text{kg}$. Figur 3.5 viser resultatet.



Figur 3.5 Avleste og ekstrapolerte verdier for maksimal hastighet som funksjon av akselerasjonskoeffisient α_1 og sjokktrykk fra 1 kt ladning ved $p_0 = 1,034 \text{ atm}$ og $c = 340,5 \text{ m/s}$ [13]

Indeksen 1 på α referer til ladingmengden på 1 kt. Med vanlig kubikkrotskalering skaleres α som [12]

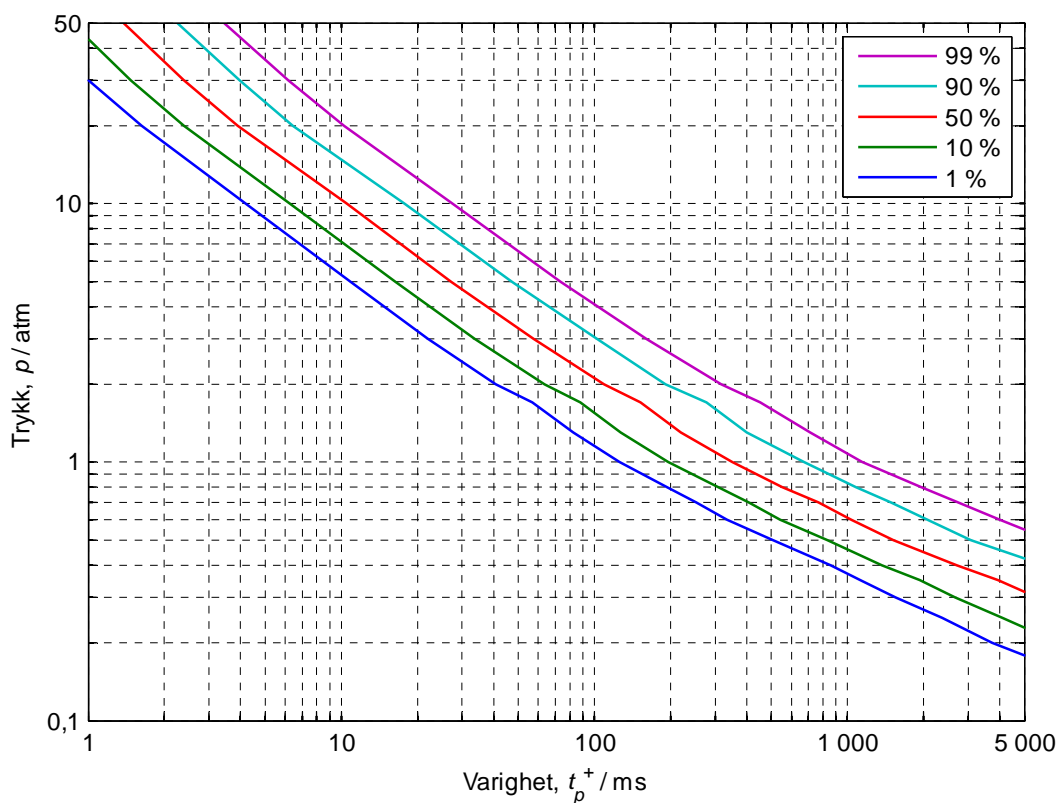
$$\frac{\alpha_1}{\alpha} = \left(\frac{c_1}{c}\right)^2 \left(\frac{p_0}{(p_0)_1}\right)^{2/3} \left(\frac{W}{W_1}\right)^{1/3} \quad (3.23)$$

slik at ved normale forhold og med $W_1 = 1$ kt blir

$$\alpha_1 = \alpha W^{1/3} \quad (3.24)$$

Med en gitt verdi for α kan dermed akselerasjonskoeffisienten som tilsvarer 1 kt bestemmes for alle ladningsstørrelser og brukes til å finne maksimalhastigheten fra figur 3.5.

Dette er brukt til å konstruere isoskadekurver som funksjon av trykk og varighet [13]. For hver av kurvene i figur 3.5 er det lest av hvilken verdi for α_1 som gir en kritisk hastighet. Med (3.24) og $\alpha = 0,0061 \text{ m}^2/\text{kg}$ er det så funnet en tilhørende ladningsvekt som er brukt til å bestemme varigheten i henhold til (3.22). Figur 3.6 viser de rekonstruerte skadekurvene.

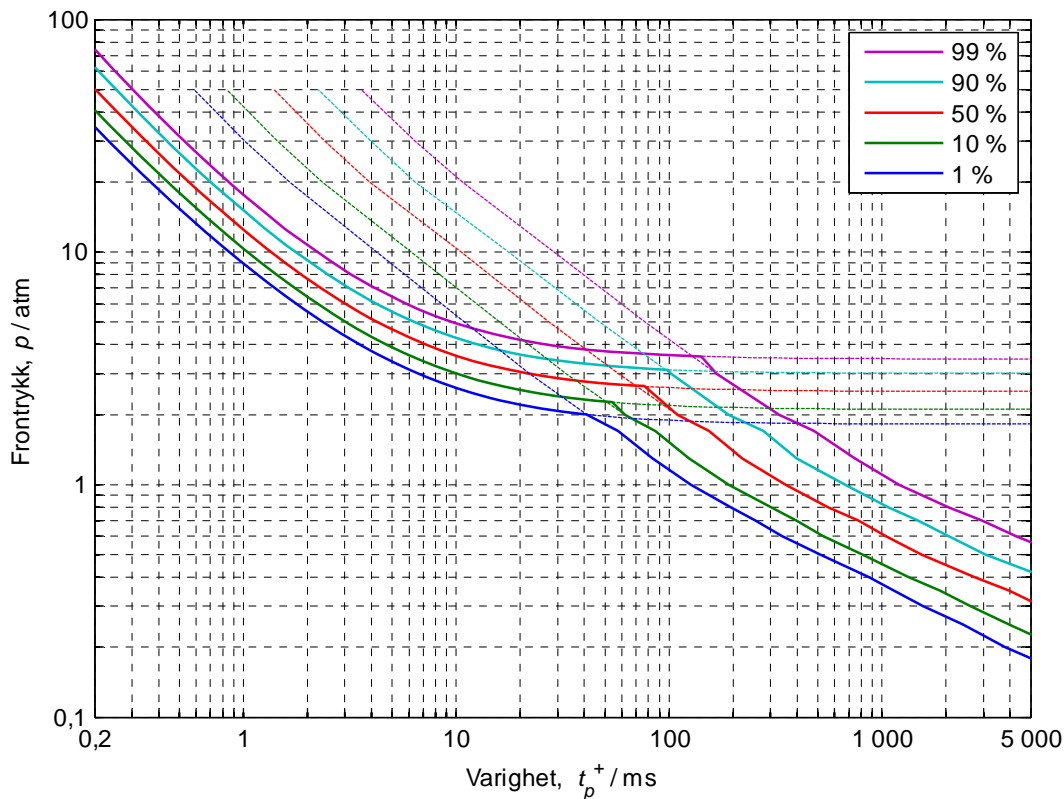


Figur 3.6 Kurver for 1, 10, 50, 90 og 99 % dødelighet fra sjokkbølgens nedblåsing av mennesker med $\alpha = 0,0061 \text{ m}^2/\text{kg}$, $c = 340,5 \text{ m/s}$, $p_0 = 1 \text{ atm}$

3.2.3 Kombinasjon av kriterier for direkte og indirekte skade

For mennesker i friluft kan dødeligheten både fra indirekte skade (figur 3.2) og fra direkte skade (figur 3.6) beregnes som funksjon av maksimaltrykket og varigheten til sjokkbølgen. I figur 3.7 er skadekurvene tegnet i samme diagram.

Dødeligheten fra en sjokkbølge med gitte egenskaper ble antatt å være den største av verdiene for direkte og indirekte skade [13]. Det betyr at skademekanismen som gir minst dødelighet, neglisjeres. Det kombinerte dødelighetskriteriet blir da kurvene som er uthevet i figur 3.7.



Figur 3.7 Kurver for 1, 10, 50, 90 og 99 % dødelighet for mennesker utendørs som utsettes for direkte og indirekte skader

Det vises i [4] til at ved en eksplosjon i et ammunisjonslager vil sjokkbølgens varighet være mellom 10 og 200 ms. Da kan skadekurvene for den direkte skaden tilnærmes med horisontale linjer slik at bare trykket bestemmer dødeligheten. Ved indirekte skade antas dødeligheten å være gitt av den dynamiske impulsen. Ifølge [4] kan den anslås med formelen

$$i_q = 0,12 p^{5/3} t_{ip} \quad (3.25)$$

der t_{ip} er varigheten til en trekantpuls som har samme trykkimpuls som den virkelige trykkbølgen. Det antas videre at

$$t_{ip} = \frac{2}{3} t_p^+ \quad (3.26)$$

Når dødeligheten er gitt av $p^{5/3} t_p^+$ blir skadekurvene linjer med stigningstall $-3/5$ i et dobbeltlogaritmisk diagram som figur 3.7.

Sammenhengen mellom dødelighet og trykk eller dynamisk impuls er definert ved en kumulativ lognormalfordeling der probitstørrelsen z (likn. (3.3)) er gitt som [5]

$$z = 3,4425 \ln p - 3,0205 \quad (3.27)$$

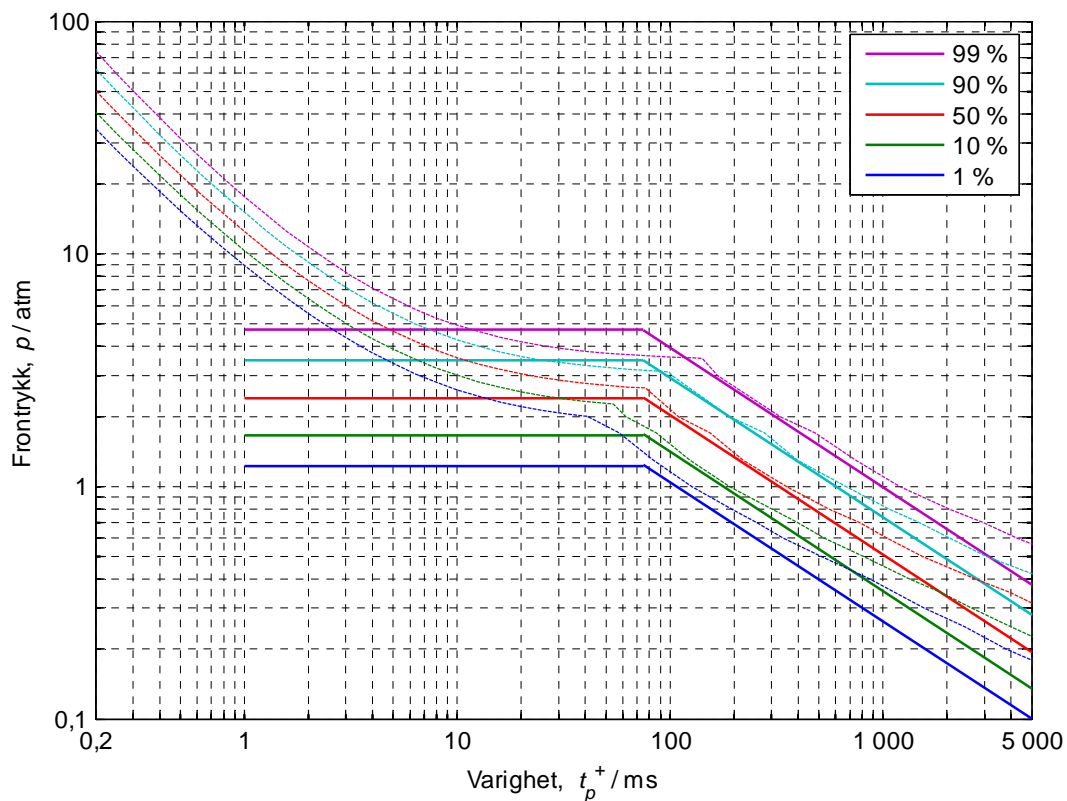
og

$$z = 2,095 \ln p^{5/3} t_{ip} - 11,2814 \quad (3.28)$$

Figur 3.8 viser dødelighetene dette gir som funksjon av trykk og varighet, sammen med det kombinerte skadekriteriet fra figur 3.7.

Det går ikke fram av [4] hvordan parametrene i (3.27) og (3.28) er bestemt, men siden skadekurvene gitt av (3.28) stemmer best overens med grunnlagskurvene, kan det se ut som parametrene i denne fordelingen er funnet først ved kurvetilpasning. Skillet mellom direkte og indirekte skade er satt ved $t_p^+ = 75$ ms for alle trykkverdier, og når de to fordelingene da skal gi samme dødelighet, vil parametrene i (3.27) være gitt.

Avstanden mellom skadekurvene for direkte virkning er større enn mellom Bowens kurver, se figur 3.8. Det blir forklart med at variasjon i utsatte personers orientering i forhold til sjokkbølgen vil gi forskjeller i den effektive trykkbelastningen og dødeligheten [4]. Resultatet blir større spredning av kurvene.



Figur 3.8 Kurver for 1, 10, 50, 90 og 99 % dødelighet for mennesker utendørs som utsettes for direkte og indirekte skader, heltrukne linjer viser verdiene AMRISK gir, stiplede linjer viser grunnlagskurvene

3.3 Virkning i skog

Mennesker som befinner seg i en skog, vil være utsatt for flere indirekte virkninger [4]: De kan bli kastet mot trærne, og det kan falle trær ned på dem. Probitfunksjonen er gitt som [5]

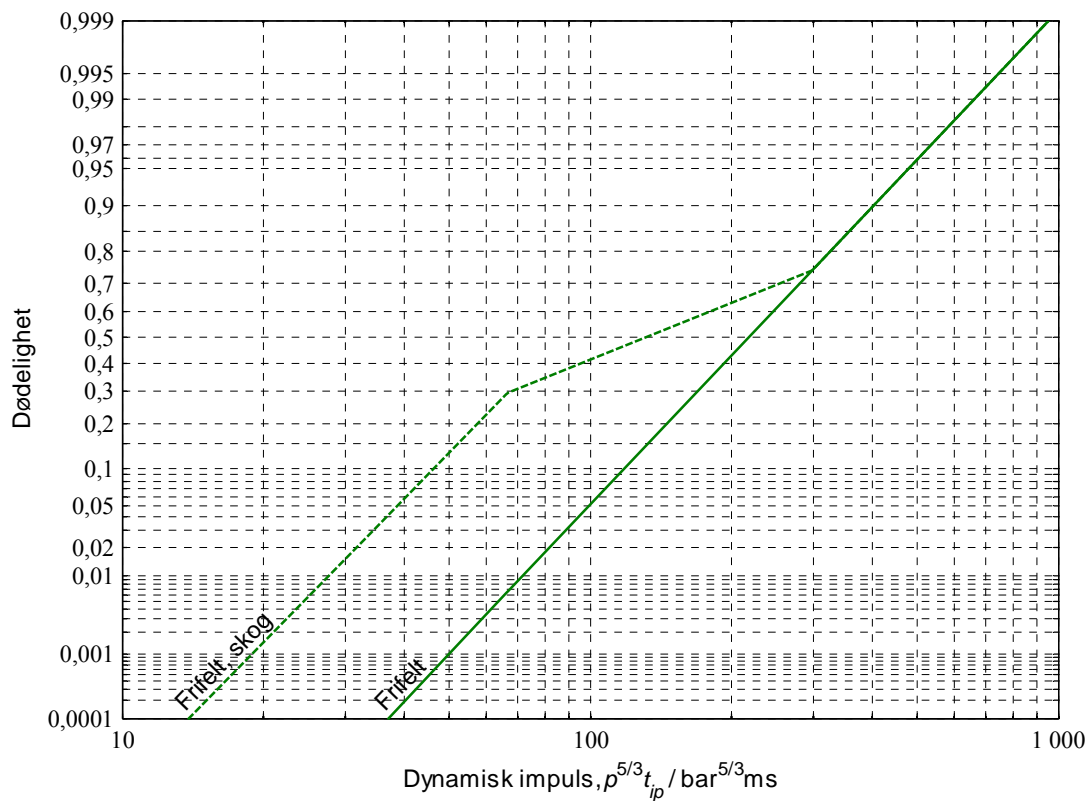
$$z = A \ln p^{5/3} t_{ip} + B \quad (3.29)$$

med verdier for A og B vist i tabell 3.2.

Tabell 3.2 Parametere for å bestemme dødelighet for personer i skog

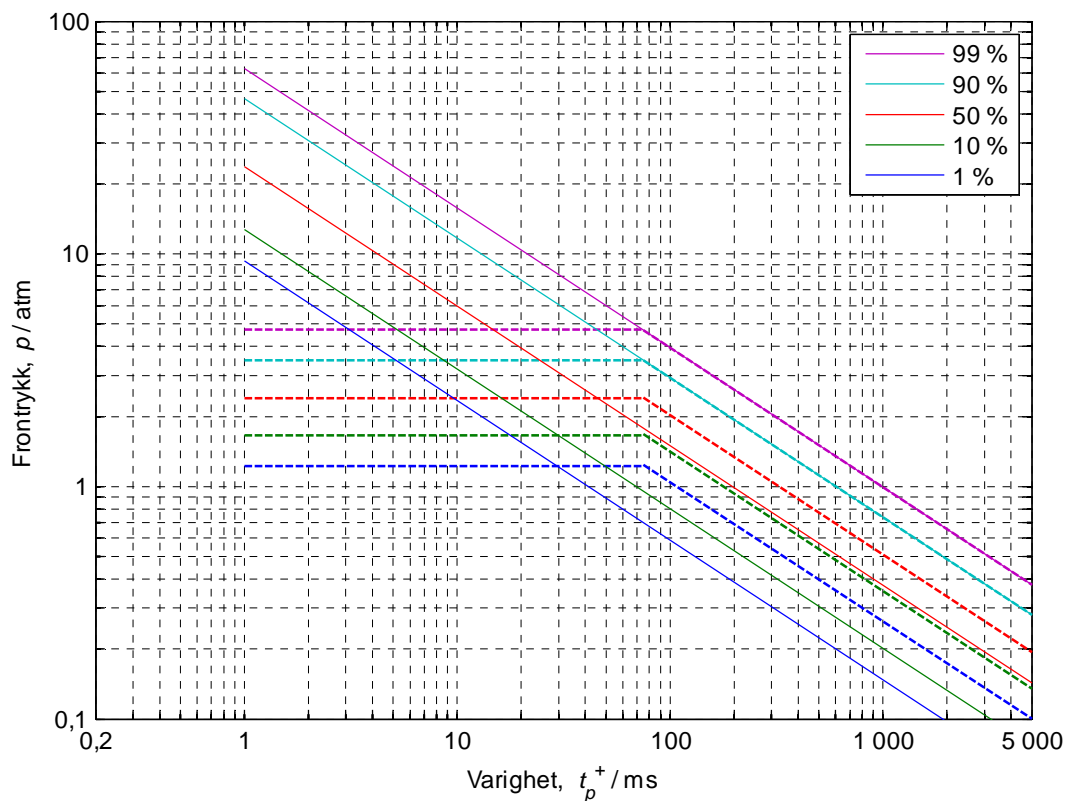
	A	B
$p^{5/3} t_{ip} < 67 \text{ bar}^{5/3} \text{ ms}$	2,0194	-9,0244
$67 \text{ bar}^{5/3} \text{ ms} \leq p^{5/3} t_{ip} < 298 \text{ bar}^{5/3} \text{ ms}$	0,7956	-3,8788
$p^{5/3} t_{ip} \geq 298 \text{ bar}^{5/3} \text{ ms}$	2,0950	-11,2814

I figur 3.9 er dødeligheten dette gir sammenliknet med verdiene for normale forhold uten skog.



Figur 3.9 Dødelighet fra dynamisk impuls for personer utendørs i skog og utenfor skog

Dødeligheten blir altså større i skog for dynamiske impulser opp til $300 \text{ bar}^{5/3} \text{ms}$. Det gis imidlertid ingen beskrivelse i [4] av hvordan dette forholdet er bestemt. I et Pt -diagram blir skadepkurvene som vist i figur 3.10. Det regnes ikke med noen direkte virkning.



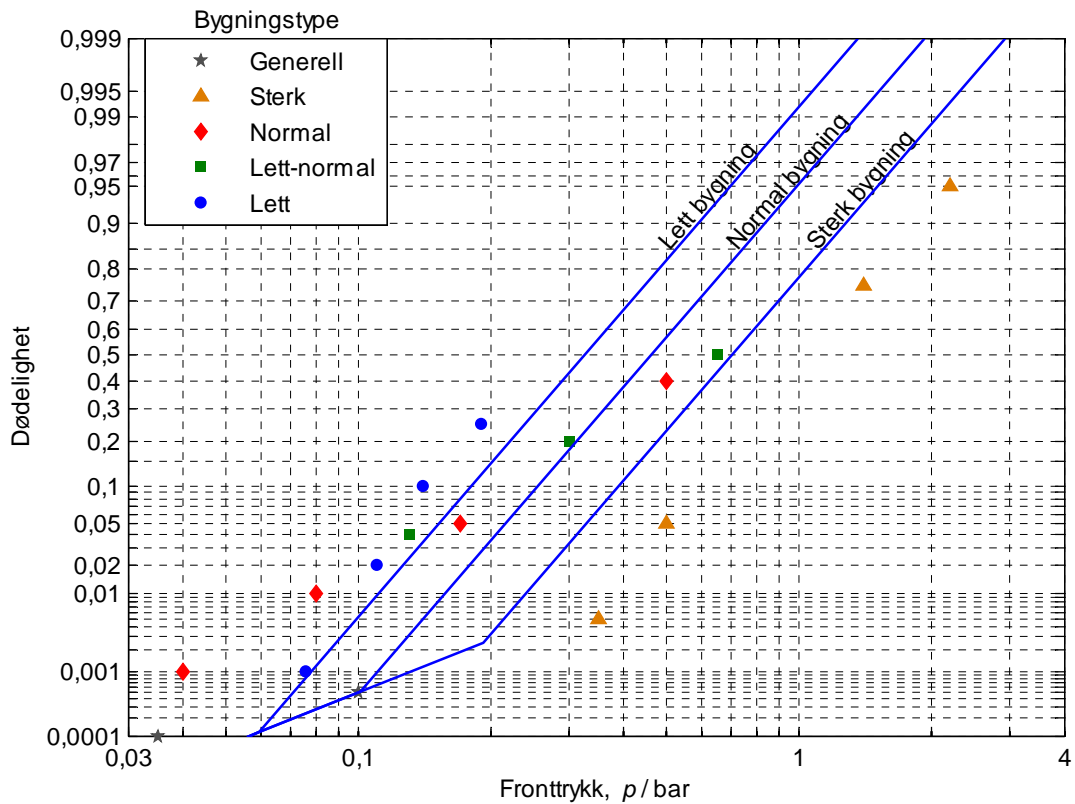
Figur 3.10 Kurver for 1, 10, 50, 90 og 99 % dødelighet for mennesker i skog ut fra modell i AMRISK, stiplede linjer viser kurver for mennesker i frifelt

Ifølge figur 3.9 blir dødeligheten i skog og ved indirekte virkning i frifelt den samme for verdier større enn vel 70 % slik det ses i kurvene for 90 % og 99 % dødelighet i figur 3.10.

3.4 Virkning i bygninger

I AMRISK er dødeligheten for mennesker i bygninger gitt av maksimaltrykket. Det vises i [4] til at det interessante trykkområdet vil være mellom 0,1 og 0,8 bar, og at den minste varigheten for en ladning på 1 t TNT vil være noen titalls millisekunder. Egensvingningsperioden for utsatte bygningsdeler er som regel noen millisekunder, og dermed har trykkbølgens varighet i praksis ingen betydning for ødeleggelse av bygninger.

Forholdet mellom trykk og dødelighet i AMRISK er utledet fra empiriske data i [14] og [15]. [15] er en oppsummering av en rekke forsøk der trykk og bygningsskade er angitt. Ut fra skadeomfanget er det så anslått en verdi for dødeligheten. Tilsvarende er det gjort for resultat av forsøk med kjernevåpen og av bombene i Hiroshima og Nagasaki [14]. Figur 3.11 viser dataene sammen med kurven som er utledet fra dem.



Figur 3.11 Dødelighet for personer i lette, normale og sterke bygninger gitt av AMRISK sammen med dataene som er grunnlaget for modellen [4]

Dødeligheten i bygninger bestemmes i AMRISK med formelen [5]

$$z = A \ln p + B \tag{3.30}$$

der parametrene A og B har verdiene vist i tabell 3.3.

Tabell 3.3 Parametere for å bestemme dødelighet for personer i bygninger

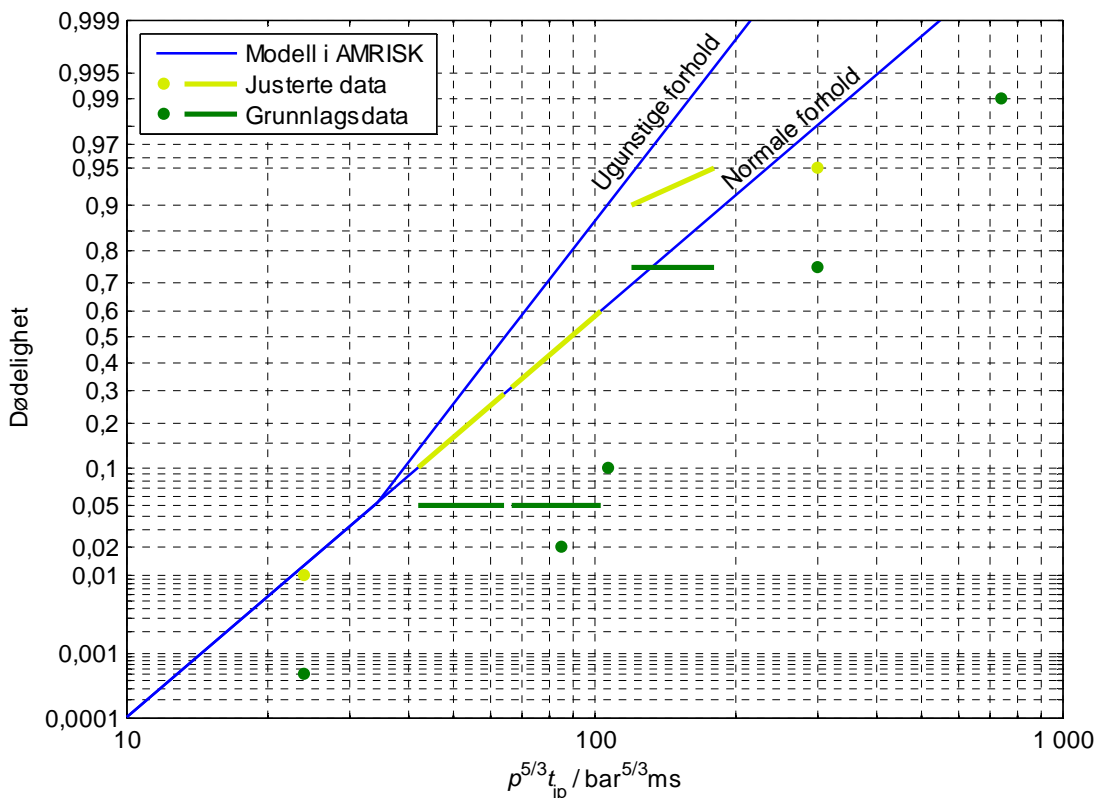
Bygningstype		A	B
Lett bygning	$p < 0,0594$ bar	0,7441	-1,5790
	$p \geq 0,0594$ bar	2,1622	2,4244
Normal bygning	$p < 0,101$ bar	0,7441	-1,5790
	$p \geq 0,101$ bar	2,1622	1,6721
Sterk bygning	$p < 0,192$ bar	0,7441	-1,5790
	$p \geq 0,192$ bar	2,1622	0,7612

3.5 Virkning mot kjøretøy

Skade på mennesker i kjøretøy er i AMRISK bestemt av den dynamiske impulsen gitt som $p^{5/3}t_{ip}$. Skaden skyldes da at bilen velter. Modellen for dette er basert på data fra [14] og [16].

[16] bygger på to kilder. Den ene oppgir at lastebiler velter når den dynamiske impulsen overstiger en kritisk verdi på mellom 0,48 og 0,76 kPas [17], mens grensen for jeoper og lastebiler ifølge [18] ligger mellom 0,76 og 1,17 kPas. Den tilhørende dødeligheten er satt til 5 %. Muligens er et impulsintervall mellom 1,7 og 2,4 kPas for jeoper med en antatt dødelighet på 75 % også hentet fra [18] selv om [14] er oppgitt som kilde [4]. $p^{5/3}t_{ip}$ finnes fra den dynamisk impulsen ved hjelp av (3.25). Fra [14] er det hentet verdi for trykket som ødelegger lastebiler så mye at dødeligheten anslås til 75 %. Sammenhengen mellom trykk og varighet finnes også fra [14]. I tillegg gir [14] fire verdier fra forsøk med personbil, lastebil og buss der dødeligheten er satt til 0,05 %, 2 %, 10 % og 99 %.

Alle dataene gjelder stående kjøretøy. Den tilsvarende dødeligheten for kjøretøy i bevegelse er anslått ut fra skaden på kjøretøyene. Figur 3.12 viser dataene sammen med den tilpassende dødelighetsfunksjonen. Figuren viser også funksjonen som gjelder for ugunstige forhold (avsnitt 3.1).



Figur 3.12 Modell i AMRISK for dødelighet for personer i kjøretøy som funksjon av $p^{5/3}t_{ip}$ sammen med originale grunnlagsdata og data justert for hastighet [4]

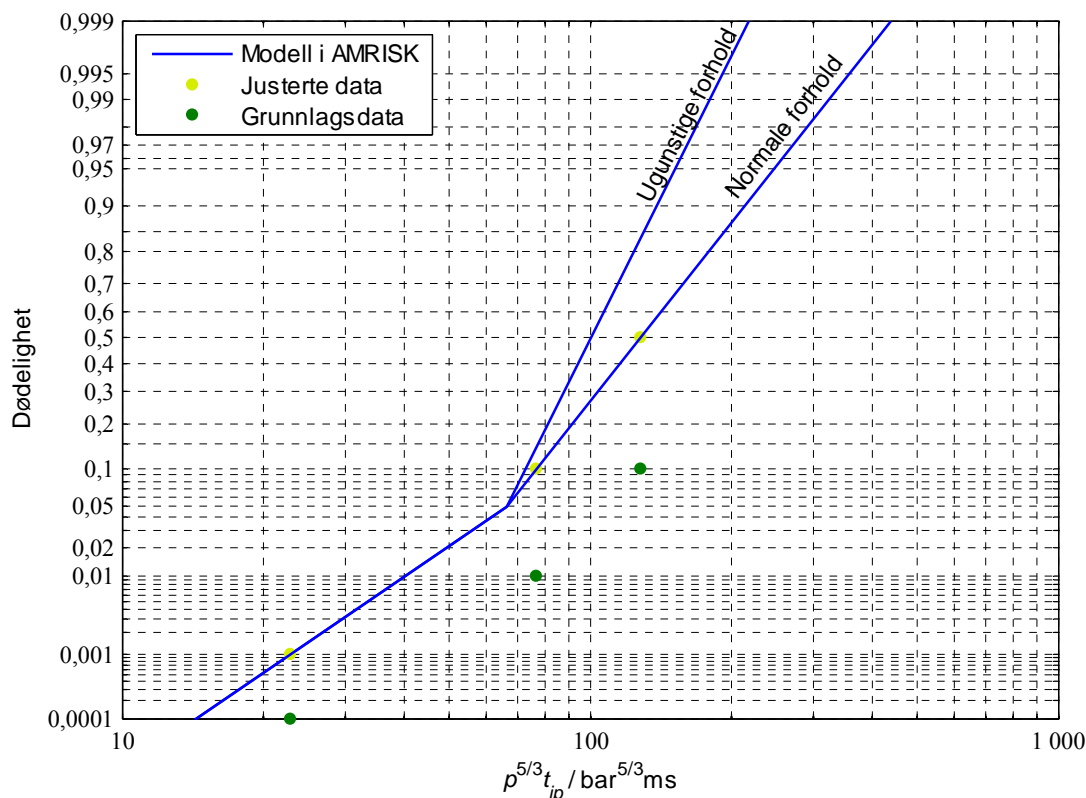
AMRISK beregner dødeligheten med probitfunksjonen i likning (3.29) og parameterverdiene vist i tabell 3.4.

Tabell 3.4 Parametere for å bestemme dødelighet for personer i kjøretøy [5]

		A	B
Normale forhold		1,6979	-7,6197
Ugunstige forhold	$p^{5/3} t_{ip} < 34,3 \text{ bar}^{5/3} \text{ ms}$	1,6979	-7,6197
	$p^{5/3} t_{ip} \geq 34,3 \text{ bar}^{5/3} \text{ ms}$	2,5643	-10,6826

3.6 Virkning mot tog

For å bestemme funksjonen som gir dødelighet for personer i tog, er det brukt resultater fra tre forsøk som er beskrevet i [14]. På samme måte som for kjøretøy er dødeligheten for kjørende tog satt høyere enn for stasjonære tog som ble brukt i forsøkene. Verdiene fra forsøkene er vist sammen med den tilpassede funksjonen i figur 3.13. Også for tog er det konstruert en funksjon for ugunstige forhold.



Figur 3.13 Modell i AMRISK for dødelighet for personer i tog som funksjon av $p^{5/3} t_{ip}$ sammen med originale grunnlagsdata og data justert for hastighet [4]

Tabell 3.5 viser parametrene til den tilpassede probitfunksjonen (likning (3.29)).

Tabell 3.5 Parametere for å bestemme dødelighet for personer i tog [5]

		<i>A</i>	<i>B</i>
$p^{5/3} t_{ip} < 66,2 \text{ bar}^{5/3} \text{ ms}$		1,3530	-7,3237
$p^{5/3} t_{ip} \geq 66,2 \text{ bar}^{5/3} \text{ ms}$	Normale forhold	2,5063	-12,1590
	Ugunstige forhold	3,9723	-18,3055

4 Andre modeller

Ved kartleggingen av letalitetsmodeller for luftsjokk har oversiktene i [19] og [20] vært nyttige.

4.1 Virkning i friluft

4.1.1 Direkte skader

Bowens modell har blitt standardkriteriet for direkte skade fra luftsjokk. [16;21;22;23] bruker modellen i sin originale form som beskrevet i kapittel 3.2.1, mens Glasstone og Dolan [24] forutsetter lange varigheter slik at bare trykket bestemmer skaden.

4.1.1.1 PI-diagram

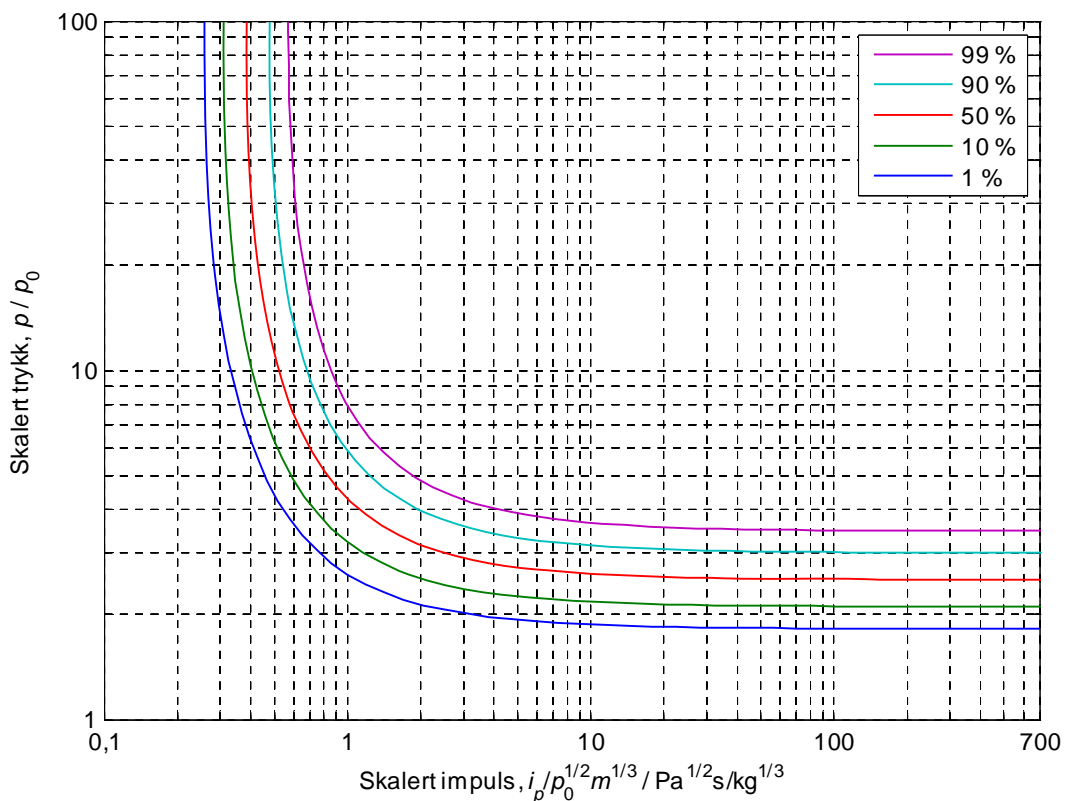
Baker m.fl. [25] gjorde Bowens kurver om til kurver der dødeligheten er en funksjon av trykk og impulstetthet. Det ble antatt en trekantpuls slik at impulsen blir

$$i_p = \frac{1}{2} p t_p^+ \quad (4.1)$$

Ved å bruke Bowens skalering for trykket og varigheten, blir den skalerte impulsen

$$\bar{i}_p = \frac{i_p}{p_0^{1/2} m^{1/3}} \quad (4.2)$$

PI-diagrammet blir da som vist i figur 4.1.



Figur 4.1 PI-diagram for lungeskade etter Baker [25]

Skadekurvene gjelder for en person som står oppreist, slik at trykkbelastningen blir stagnasjonstrykket. Dette diagrammet er gjengitt blant annet i TM 5-1300 [26].

I Green Book [27] er det konstruert et tilsvarende *PI*-diagram, men der skal trykkverdiene som belaster kroppen, settes inn. Det kan dermed brukes generelt for alle orienteringer i forhold til sjokkbølgen. Diagrammet er trolig laget ut fra Bakers *PI*-diagram. Det er tilpasset en probit-funksjon til skadekurvene [27]:

$$z = -5,74 \ln S \quad (4.3)$$

der

$$S = \frac{4,2}{p_c / p_0} + \frac{1,3}{i_{pc} / p_0^{1/2} m^{1/3}} \quad (4.4)$$

Denne funksjonen og *PI*-diagrammet i Green Book er benyttet i risikoanalyseprogrammer [28;29], andre beregningsverktøy [30] og manualer [9;31]. SAFER [28] bruker stagnasjonstrykk eller refleksjonstrykk som trykkverdi, men fronttrykkimpulsen som impulsverdi.

Ved siste revisjon av Green Book ble det pekt på [32] at Bakers antakelse om trekantpuls er problematisk. Forsøksverdiene som Bowens kurver bygger på, er for skalerte varigheter større enn 20 ms hentet fra forsøk i sjokkrør. Det gir ifølge [32] en trykkbølge som er tilnærmet lik en firkantpuls. Ved disse varighetene vil kurvene imidlertid være tilnærmet horisontale, og impulsen har liten betydning. Ved kortere varigheter ble det i forsøkene benyttet eksplosiver, og da synker trykket mye raskere enn en trekantpuls slik at impulsen er 1/4 eller 1/5 av impulsen til trekantpulsen [32]. Derfor gir kurvene for lave dødelighetsverdier ved korte varigheter.

På grunn av dette ble det konstruert nye kurver. Ut fra et punkt på Bowens kurve med gitt refleksjonstrykk og varighet ble det bestemt refleksjonsimpuls fra kurver i [33]. Disse impulsverdiene er lavere enn Bakers verdier, og det blir heller ingen vertikal impulsasymptote.

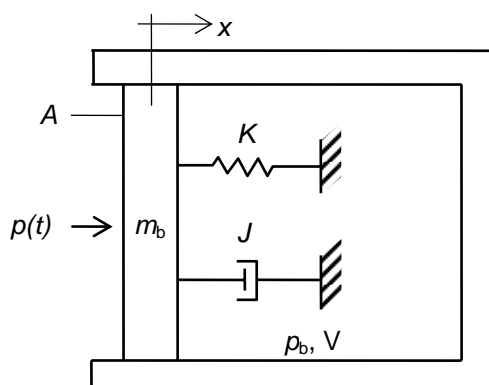
Undersøkelsene ga som resultat at den reviderte utgaven av Green Book, PGS 1 [23], ikke inneholder noe *PI*-diagram. For å bestemme direkte skade fra luftsjokk, anbefales det å bruke Bowens originale kurver. Det er tilpasset en probitfunksjon til kurvene, der

$$z = 5,7 \ln V \quad (4.5)$$

$$V = \frac{p/p_0}{4,17 - 1,64 \cdot 10^{-3} \frac{\ln T}{T} + \frac{0,0161}{T}} \quad (4.6)$$

4.1.1.2 Axelsson og Yelvertons modell

En metode for å anslå skade fra luftsjokk, er å bruke mekaniske modeller som ut fra en gitt belastning gir verdier for fysiske størrelser som er korrelert med et mål for skaden. Den mest anvendte er modellen til Axelsson og Yelverton [34]. Den beskriver bevegelsen av brystkassen eller brystveggen i en modell med én frihetsgrad. Modellen består av en masse m_b der bevegelsen dempes elastisk med fjærkonstant K og viskøst med dempingsfaktor J , se figur 4.2. Kraftene som virker på brystveggen, er det ytre trykket fra sjokkbølgen og det indre trykket i lungene, p_b .



Figur 4.2 Modell av brystkassen

Forholdet mellom indre trykk og tetthet eller volum av brystet antas å være som for en polytropisk gass slik at

$$p_b = \left(\frac{V}{V - Ax} \right)^{\gamma_b} p_0 \quad (4.7)$$

når V er det opprinnelige volumet av brystet, A er effektivt brystareal, x er forskyvning av brystveggen og γ_b er forholdet mellom varmekapasiteter for lungene.

Ved å gjøre beregninger med belastning fra en ideell sjokkbølge der varighet og maksimaltrykk hentes fra punkter på Bowens kurver, er det funnet at brystveggenes største hastighet innover varierer lite langs kurvene. For eksempel varierer hastigheten mellom 12 og 17 m/s for 50 % dødelighet. Denne hastigheten blir derfor brukt som skadeindikator. PGS 1 [23] oppgir hastighetene som oppnås med sjokkbølger med lange varigheter og fronttrykk gitt av Bowens kurver.

Det ble gjort en rekke forsøk der sauer ble utsatt for sjokkbølger fra eksplosiver. Etter forsøkene ble skadene vurdert med et poengsystem. Omfanget av skade på ulike deler av kroppen ble gitt en tallverdi, og verdiene ble summert til en skadeindeks, ASII. Det ble funnet følgende sammenheng mellom ASII og den maksimale hastigheten til brystveggen, v_b :

$$ASII = (0,124 + 0,117v_b)^{2,63} \quad (4.8)$$

Axelsson og Yelvertons modell er spesielt egnet til å anslå skade når formen på belastningen er mer komplisert enn ved ideelle sjokkbølger eller Friedlander-bølger.

4.1.1.3 Numeriske modeller

Det er også utviklet FE-modeller av bryst og lunger, og det er vist sammenheng mellom beregnet irreversibelt arbeid på kroppen og eksperimentell skade [22].

4.1.1.4 Andre data og modeller

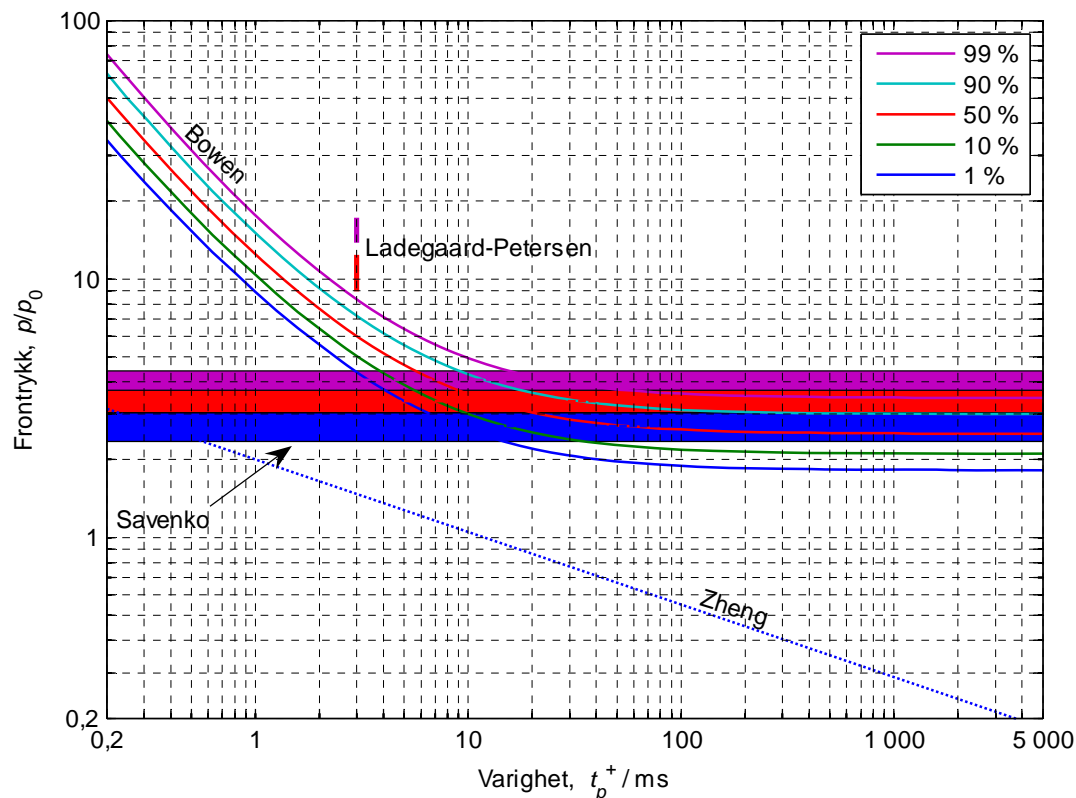
Zheng [35] gir en likning for trykk og varigheter som definerer grensen for dødelig skade, det vil si 1 % dødelighet:

$$p = 0,02(t_p^+)^{-0,28} \quad (4.9)$$

Formelen er basert på dyreforsøk.

Zheng refererer også resultater fra ulykker i USA (2300 tonn ammoniumnitrat) og Kina (1800 kg TNT). Ut fra disse er det funnet en grense for dødelig skade på henholdsvis 130 og 160 kPa, altså

litt under Bowens verdier for lange varigheter. Videre er det i [35] ført opp verdier publisert av Savenko [36] for trykkintervaller som gir 1 %, 50 % og 99 % dødelighet. Det er imidlertid ukjent hva varigheten er. Fra Ladegaard-Petersen [37] er det hentet trykkintervaller som fører til 50 % og 100 % dødelighet for en sjokkbølge av 3 ms varighet. Figur 3.1 viser disse intervallene og verdier fra Zhengs formel sammen med Bowens kurver.



Figur 4.3 Kurver for dødelighet fra direkte luftsjokk gitt av Bowen [6], Ladegaard-Petersen, Savenko og Zheng [35]

Verdiene fra Savenko stemmer godt overens med Bowens kurver, mens Ladegaard-Petersens intervaller ligger noe høyere. På den annen side gir Zhengs formel betydelig større dødelighet enn Bowens kurver. Den tilgjengelige dokumentasjonen gir imidlertid ikke noe grunnlag for å forklare avviket.

4.1.2 Indirekte skader

4.1.2.1 Hodeskade

I tillegg til kriterier for hastigheten som gir skade når en vilkårlig del av kroppen treffer en overflate (tabell 3.1), finnes det også et spesielt hastighetskriterium for treff av hodet. Tabell 4.1 viser dette.

Tabell 4.1 Hastighetskriterium for dødelighet når hodet treffer en hard flate [38]

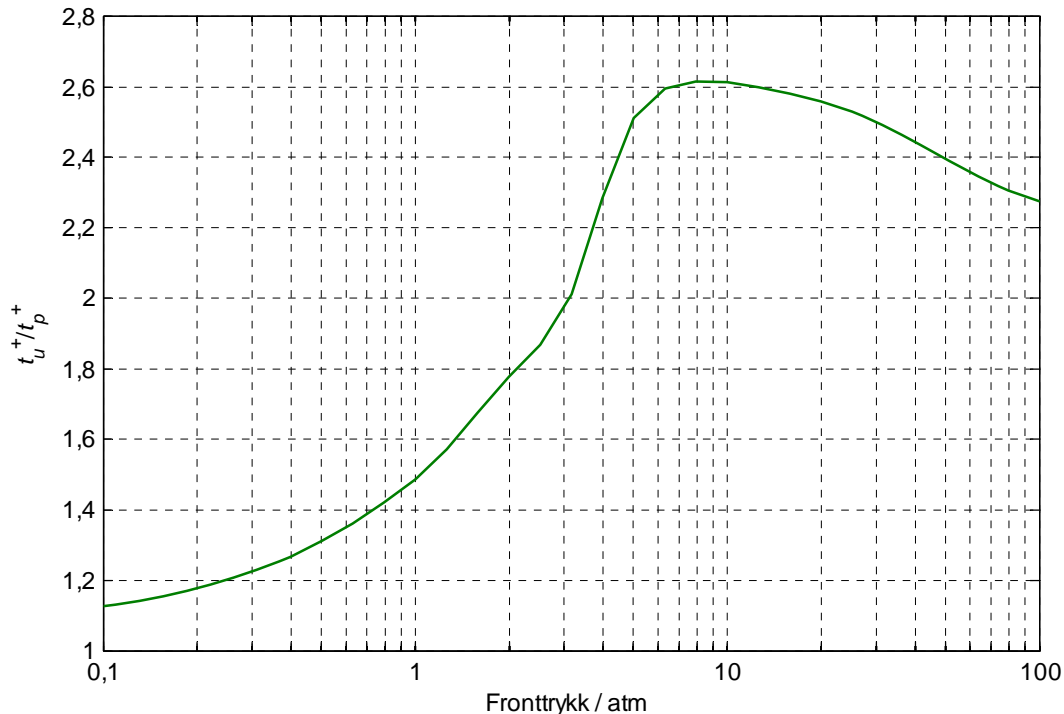
Dødelighet	Treffhastighet / m/s
Overveiende trygt	3,0
Terskel	4,0
50 %	5,5
Nær 100 %	7,0

Disse verdiene er benyttet til å lage *PI*-diagram og probitfunksjoner på samme måte som for treff med hele kroppen [23;25;28].

Dødelig skade på hodet og på hele kroppen når kroppen treffer en flate, behandles i SAFER som uavhengige hendelser på linje med andre effekter av en eksplosjon.

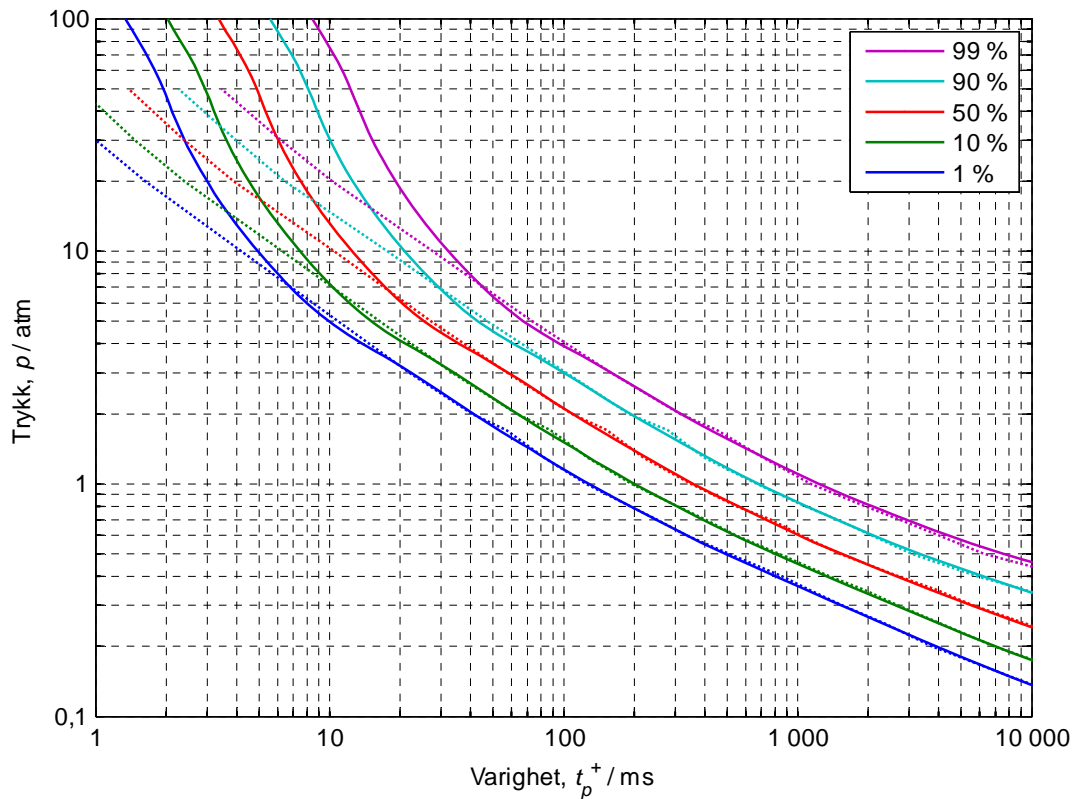
4.1.2.2 Modifisert Bowens modell

I stedet for framgangsmåten beskrevet i kapittel 3.2.2, kan Bowens modell brukes direkte til å beregne hastigheten som funksjon av trykk og varighet. Det er da hensiktsmessig å bruke Brodes verdier for forholdet mellom varigheten til dynamisk trykk og overtrykk også for høyere trykkverdier enn Bowen benytter, se figur 4.4.



Figur 4.4 Forhold mellom varighet til vind og overtrykk i trykkbølgen som funksjon av overtrykket [39]

I figur 4.5 er skadekurvene dette gir, sammenliknet med verdiene fra figur 3.6.



Figur 4.5 Kurver for 1, 10, 50, 90 og 99 % dødelighet fra sjokkbølgens nedblåsing av mennesker med hastigheter beregnet ut fra trykk og varighet (heltrukne linjer) og ut fra akselerasjonskoeffisient og beregnet varighet (stiplede linjer), $\alpha = 0,0061 \text{ m}^2/\text{kg}$, $c = 340,5 \text{ m/s}$, $p_0 = 1 \text{ atm}$

Ved store trykk gir metoden der varigheten beregnes ut fra akselerasjonskoeffisienten α og formel (3.22), høyere dødelighet enn når varigheten settes direkte inn. Det stemmer overens med at formelen da gir for høye varigheter.

4.1.2.3 Modell i PGS 1

I PGS 1 [23] er det beskrevet en modell der den maksimale hastigheten en sjokkbølge gir en person, er beregnet med likning (3.10), men det brukes ingen tidskorrekasjonsfaktor. Massen settes til 70 kg og arealet til $0,382 \text{ m}^2$. Det oppgis ikke noen verdier for dragkoeffisienten C_d , men det forutsettes at personen hele tida står oppreist. En verdi på 1,3 gir resultater i godt samsvar med *PI*-diagrammene som blir vist. Det tilsvarer en α -verdi på $0,0071 \text{ m}^2/\text{kg}$.

Vindhastigheten og tettheten bestemmes ved hjelp av forholdene som gjelder i en sjokkfront ved moderate trykk:

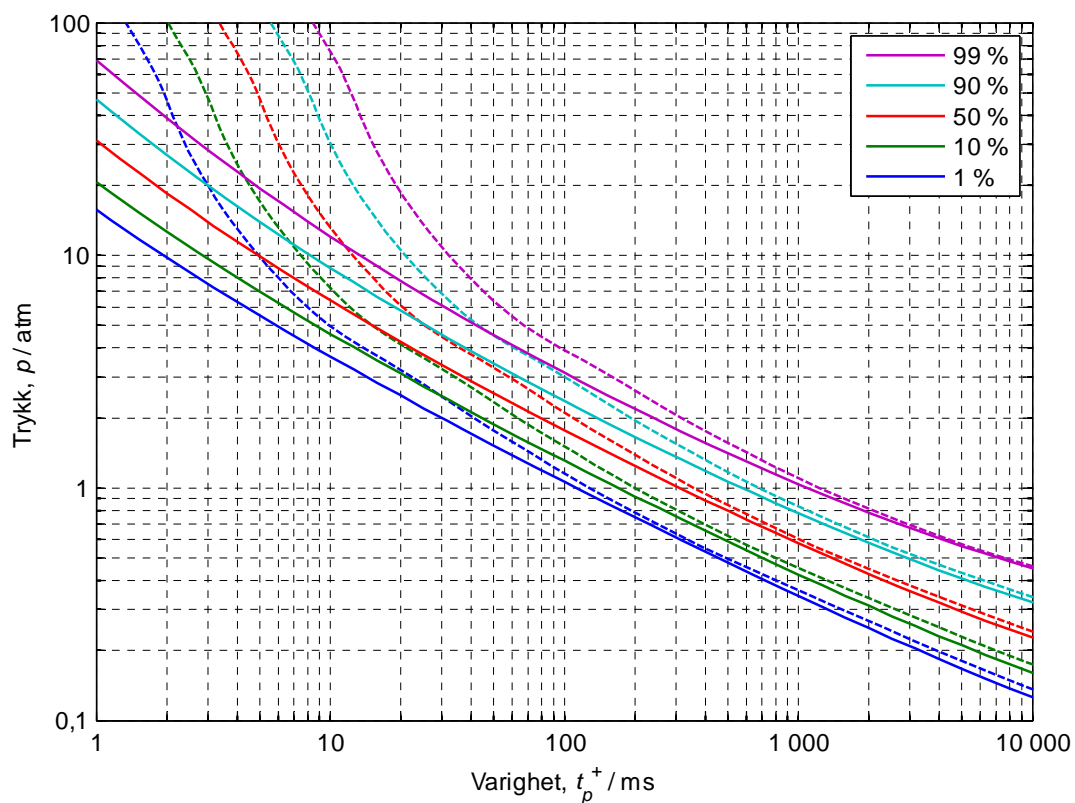
$$u = c \frac{5p/7p_0}{\sqrt{1+6p/7p_0}} \quad (4.10)$$

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \frac{7+6p/p_0}{7+p/p_0} \quad (4.11)$$

Uttrykkene ovenfor brukes for alle tider, og tidsavhengigheten til trykket settes lik en trekantpuls,

$$p(t) = p \left(1 - \frac{t}{t_p^+} \right) \quad (4.12)$$

Når det brukes en verdi for α på $0,0061 \text{ m}^2/\text{kg}$, blir skadekurvene som figur 4.6 viser.



Figur 4.6 Kurver for 1, 10, 50, 90 og 99 % dødelighet fra sjokkbølgens nedblåsing av mennesker fra PGS 1 [23] (heltrukne linjer) og beregnet med den justerte Bowens metode (stiplede linjer), $\alpha = 0,0061 \text{ m}^2/\text{kg}$, $c = 340 \text{ m/s}$, $p_0 = 1 \text{ atm}$

Beregningsmetoden som brukes i PGS 1, gir høyere hastigheter og dødelighet enn Bowens metode, spesielt ved høye trykk. Det skyldes at tettheten og vindhastigheten synker langsommere med den brukte tidsavhengigheten enn med de mer korrekte uttrykkene Bowen benytter.

PGS 1 [23] viser også en tilpasset probitfunksjon:

$$z = -2,44 \ln S \quad (4.13)$$

der

$$S = \frac{7280}{p} + \frac{1,3 \cdot 10^9}{p \cdot i_p} \quad (4.14)$$

med trykk i Pa og impuls i Pas. Denne funksjonen brukes også i SAFER [28], men her ser det merkelig nok ut til at trykket som brukes, er stagnasjonstrykket eller refleksjonstrykket på samme måte som ved direkte virkning. I Green book [27] brukes funksjonen ovenfor med faktoren 7380 i det første leddet i stedet for 7280.

4.1.2.4 Bakers modell

Baker har gjort beregninger med en modell der det er tatt hensyn til diffraksjonsbelastningen som skyldes trykkforskjell foran og bak personen [40].

Diffraksjonsimpulsen er tilnærmet med

$$i_r = \frac{p_r}{2} \Delta t \quad (4.15)$$

der p_r er refleksjonstrykket, og Δt er gitt som

$$\Delta t = \frac{d}{\dot{x}} \quad (4.16)$$

der d er effektiv diameter på mennesket.

Ved å uttrykke bølgehastigheten og refleksjonstrykket som funksjon av fronttrykket p ,

$$\dot{x} = c \sqrt{1 + \frac{6p}{7p_0}} \quad (4.17)$$

$$\frac{p_r}{p} = 2 \frac{p}{p_0} + \frac{3}{4} \left(\frac{p}{p_0} \right)^2 \quad (4.18)$$

kommer Baker fram til følgende formel for refleksjonsimpulsen:

$$i_r = \frac{pd}{c} \frac{\frac{p}{p_0} + \frac{3}{8} \left(\frac{p}{p_0} \right)^2}{\sqrt{1 + \frac{6}{7} \frac{p}{p_0}}} \quad (4.19)$$

Tidsavhengigheten til det dynamiske trykket settes lik

$$q(t) = q \left(1 - \frac{t}{t_p^+} \right)^2 e^{-bt/t_p^+} \quad (4.20)$$

slik at den dynamiske impulsen blir

$$i_q = \frac{qt_p^+}{b} \left(1 - \frac{2}{b} + \frac{2}{b^2} (1 - e^{-b}) \right) \quad (4.21)$$

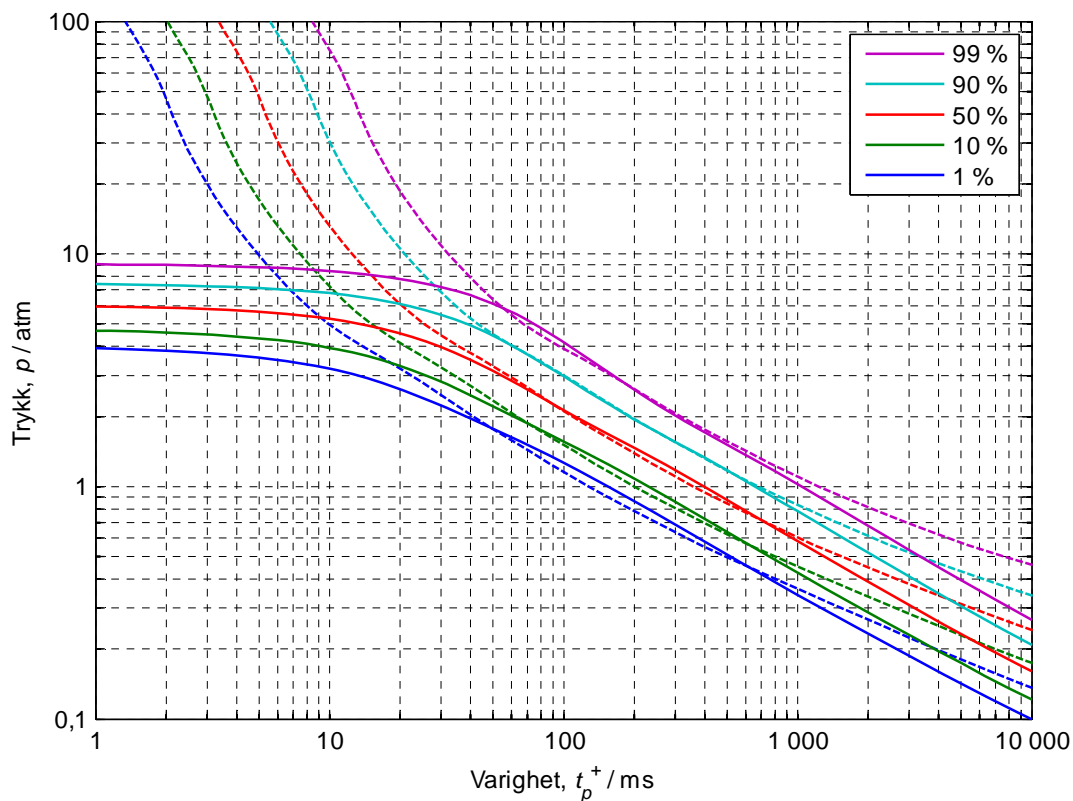
Baker forutsetter at belastningen er impulsiv, det vil si at hastigheten til personen er neglisjerbar så lenge trykkbølgen virker. Impulsen som overføres til mennesket, mv , vil da være

$$mv = (i_r + C_d i_q) S \quad (4.22)$$

Forholdet mellom lengde og diameter på kroppen antas å være 5,5 slik at det effektive arealet S blir $5,5d^2$. Når (3.8) brukes for å erstatte det dynamiske trykket i (4.21), vil hastigheten være gitt ved:

$$\frac{cmv}{5,5d^3 p_0} = \frac{\frac{p}{p_0} \left(\frac{p}{p_0} + \frac{3}{8} \left(\frac{p}{p_0} \right)^2 \right)}{\sqrt{1 + \frac{6}{7} \frac{p}{p_0}}} + \frac{cC_d t_p^+}{db} \frac{\frac{5}{2} \left(\frac{p}{p_0} \right)^2}{7 + \frac{p}{p_0}} \left(1 - \frac{2}{b} + \frac{2}{b^2} (1 - e^{-b}) \right) \quad (4.23)$$

Baker oppgir tilsvarende sammenheng, men med trykkimpulsen i stedet for varigheten, t_p^+ . Sammenliknet med den modifiserte Bowens modell blir Pt -diagrammet slik figur 4.7 viser.



Figur 4.7 Kurver for 1, 10, 50, 90 og 99 % dødelighet fra sjokkbølgens nedblåsing av mennesker fra Baker [40] (heltrukne linjer) og beregnet med den justerte Bowens metode (stiplede linjer), $\alpha = 0,0061 \text{ m}^2/\text{kg}$, $c = 340 \text{ m/s}$, $p_0 = 1 \text{ atm}$, $C_d = 1,3$, $d = 0,25 \text{ m}$

I forhold til resultatene fra Bowens modell gir Bakers modell kurver som er forskjellige både for de minste og største varighetene. Det er ved små varigheter at diffraksjonsbelastningen har betydning. Men i Bakers modell begrenses ikke diffraksjonsimpulsen av varigheten slik at impulsen blir for stor. Ved lange varigheter vil ikke forutsetningen om impulsiv belastning være riktig, og derfor blir impulsen også her for stor.

4.1.2.5 Tatom og Tatoms modell

Tatom og Tatom [41] har også gjort beregninger av hastigheten en sjokkbølge kan gi personer. Deres modell tar både hensyn til diffraksjonsbelastningen og at dragkraften er avhengig av hastigheten til personen. Den totale kraften som virker, vil være

$$\frac{f(t)}{S} = \begin{cases} p_r \left(1 - \frac{t}{t_s}\right) + p_s(t_s) \frac{t}{t_s} & t \leq t_s \\ p(t) + \frac{1}{2} \rho C_d (u-v)^2 & t_s < t \leq t_b \\ \frac{1}{2} \rho C_d (u-v)^2 & t > t_b \end{cases} \quad (4.24)$$

der p_r er refleksjonstrykk som for moderate trykk er gitt som

$$p_r = 2p \frac{7p_0 + 4p}{7p_0 + p} \quad (4.25)$$

Belastningen på forsiden antas å synke lineært fra refleksjonstrykket til stagnasjonstrykket p_s i løpet av tida det tar før refleksjonsbølgen er avlastet på hele framsiden. Når bredden på kroppen er w , vil denne tida, t_s , være

$$t_s = \frac{\frac{3}{2}w}{\dot{x}} \quad (4.26)$$

For et legeme i ro vil $p_s(t_s)$ være $p(t_s) + C_d q(t_s)$. Når legemet settes i bevegelse, vil imidlertid dragtrykket være $\frac{1}{2} \rho C_d (u-v)^2$ i stedet for $C_d q$. $p_s(t_s)$ vil dermed være avhengig av hastigheten $u(t_s)$ som igjen er gitt av $p_s(t_s)$ når kraften på legemet er slik (4.24) beskriver. Det er usikkert hvordan modellen til Tatom og Tatom løser dette. Vi har imidlertid gjort beregninger ved å regne ut stagnasjonstrykket for hvert tidssteg der u settes lik hastigheten ved dette tidspunktet slik at $p_s(t_s) = p(t_s) + \frac{1}{2} \rho(t_s) C_d (u(t) - v(t_s))^2$. Dermed vil ikke trykket synke lineært, men mer asymptotisk mot $p_s(t_s)$.

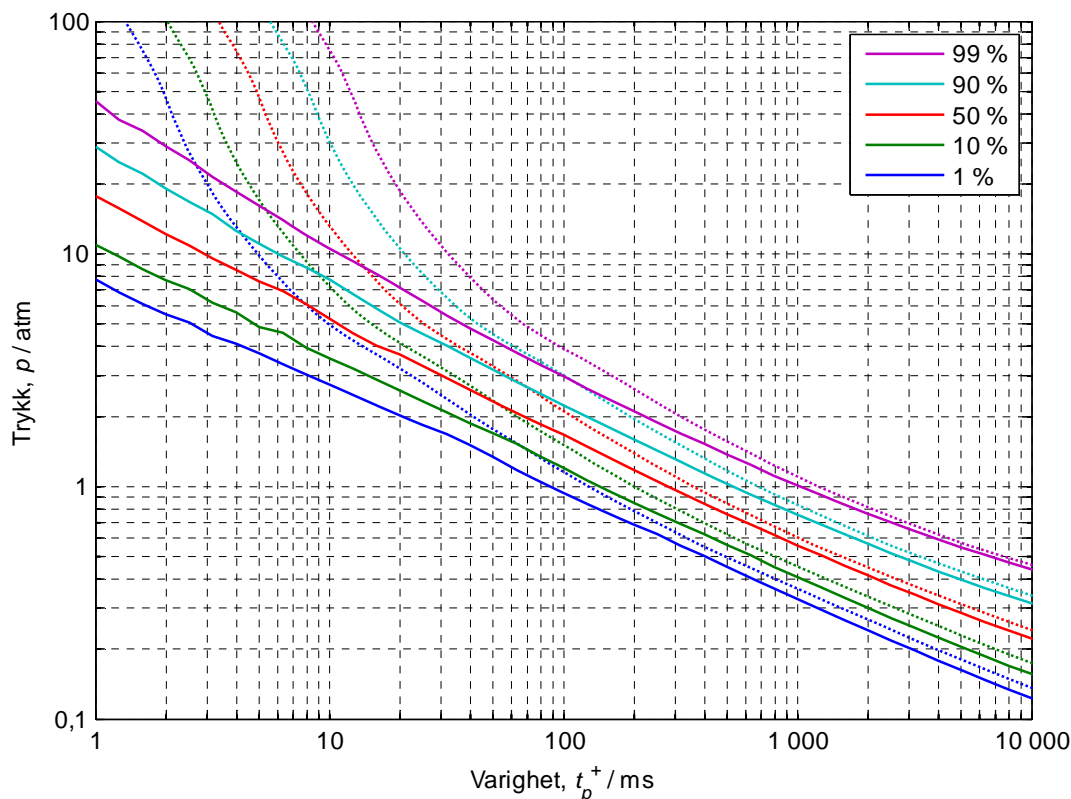
Videre vil trykkbølgen etter en tid t_b ha omsluttet hele legemet slik at det i hovedsak bare er dragtrykket som virker.

$$t_b = \frac{b + 2w}{\dot{x}} \quad (4.27)$$

I tida mellom t_s og t_b er den effektive kraften på personen stagnasjonstrykket $p_s(t)$.

I [41] er vindhastigheten oppført i disse formlene i stedet for bølgehastigheten \dot{x} , men vi antar at bølgehastigheten er brukt i beregningene. Maksimalverdien ved moderate trykk er gitt ved (4.17). u og ρ er gitt av (4.10) og (4.11), og disse forholdene brukes trolig for alle tider med tidsavhengigheten til trykket gitt av (4.12).

Resultatene fra beregningene med Tatom og Tatoms modell er vist i figur 4.5 sammen med resultatene fra Bowens modifiserte modell.



Figur 4.8 Kurver for 1, 10, 50, 90 og 99 % dødelighet fra sjokkbølgens nedblåsing av mennesker fra Tatom og Tatom [41] (heltrukne linjer) og beregnet med den justerte Bowens metode (stiplede linjer), $c = 340 \text{ m/s}$, $p_0 = 1 \text{ atm}$, $\alpha = 0,0061 \text{ m}^2/\text{kg}$, $w = 0,25 \text{ m}$, $b = 0,15 \text{ m}$, $C_d = 1,3$

Figuren viser hvordan dødeligheten blir større ved høyere trykk når det tas hensyn til diffraksjonsbelastningen. En sammenlikning med Bakers kurver (figur 4.7) viser for øvrig at forenklingene som er gjort i Bakers modell, tydelig påvirker resultatene.

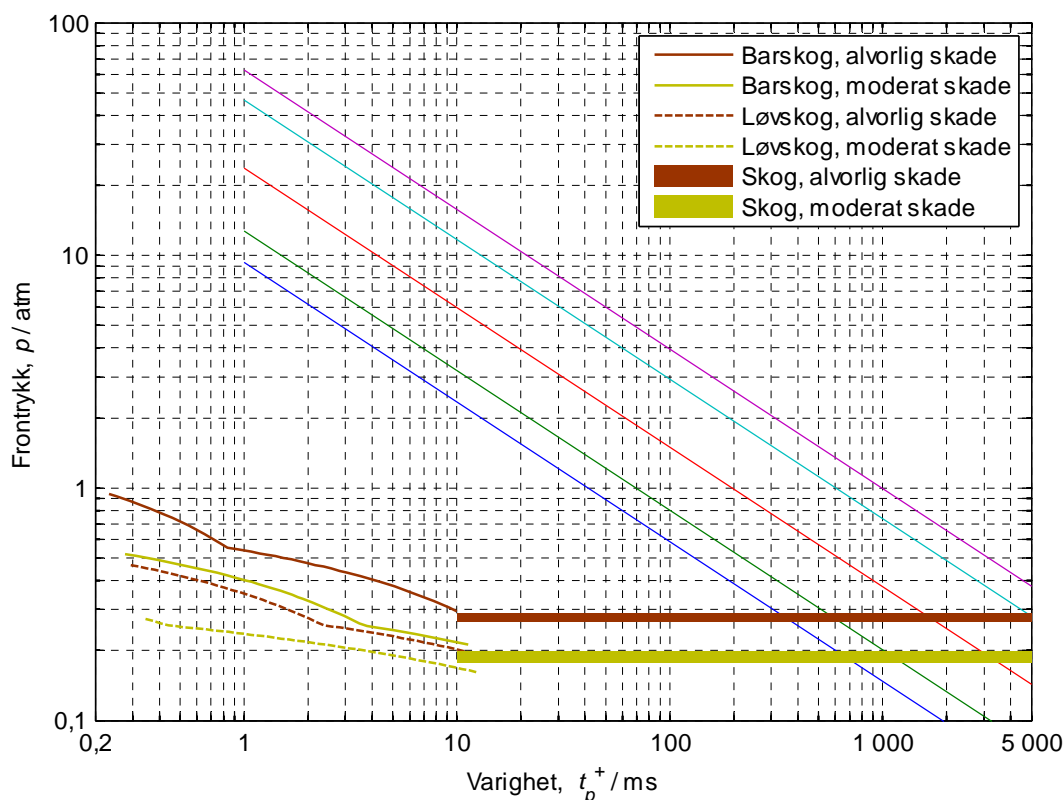
4.1.2.6 Geometri og friksjon

[21] beskriver modeller der personenes geometri er gitt mer detaljert slik at vekselvirkningen med sjokkbølgen blir mer komplisert. Andre modeller inkluderer friksjon mellom personen og underlaget. I et forsøk der en dukke ble utsatt for en sjokkbølge med 37 kPa trykk og 0,96 s varighet, ble imidlertid luftferden langvarig nok til at den beregnede maksimale hastigheten kunne oppnås [42]. I slike tilfeller spiller ikke friksjon noen rolle.

4.2 Virkning i skog

Det er vanskelig å finne modeller som anslår dødeligheten for mennesker i skog. Glasstone viser kombinasjoner av avstand og ladningsstørrelser for kjernevåpen som gir moderat og alvorlig skade på skog [14], eventuelt spesifisert som løvskog og barskog [24]. I tillegg er det oppgitt intervaller for vedholdende vindhastighet som gir tilsvarende skade. Alvorlig skade er definert som at opptil 90 % av trærne er blåst ned, mens greiner og løv er revet av de gjenstående. Ved moderat skade er omtrent 30 % av trærne blåst ned, og kjøretøy kan passere området etter omfattende rydding.

Ut fra ladning og avstand kan tilhørende verdier for trykk og varighet bestemmes ut fra kurver gitt av Glasstone. Ut fra vindhastigheten kan trykket bestemmes, for eksempel med (4.10). Verdier for trykk og varighet som gir skade, blir da som vist i figur 4.9. I figuren er også kurvene for dødelighet gitt av modellen i AMRISK, tegnet opp.



Figur 4.9 Skadepkurver for skog etter Glasstone [14;24] ved siden av kurver for dødelighet i skog (figur 3.10)

Ved å anslå dødeligheten som funksjon av skaden på skogen, kan det bestemmes verdier for dødeligheten fra trær som velter.

4.3 Virkning i bygninger

Det finnes en rekke metoder for å bestemme skade på bygninger fra luftsjokk, inkludert en del forsøksdata. Metoder for å anslå den resulterende skaden på mennesker i bygningene finnes også, men i mindre omfang. Arbeidet med dette er ikke avsluttet, så det vil ikke bli presentert noen resultater her.

Prinsippene for en eventuell forbedret metode kan tenkes å følge programmet SAFER [28]. Der antas for det første at luftsjokk inne i bygningen kan gi de samme skadene som i friluft, både direkte og indirekte skade. Videre kan et menneske blir skadet av vindusglass hvis vinduet går i stykker, og personen befinner seg et sted der fragmenter treffer. Endelig bestemmes omfanget av skade på bygningen og hvilke konsekvenser dette får for personene der.

4.4 Virkning mot kjøretøy

4.4.1 Modell i SAFER

SAFER [28] behandler kjøretøy på samme måte som bygninger, bortsett fra at det ikke regnes med glasskade og spesiell skade på tak.

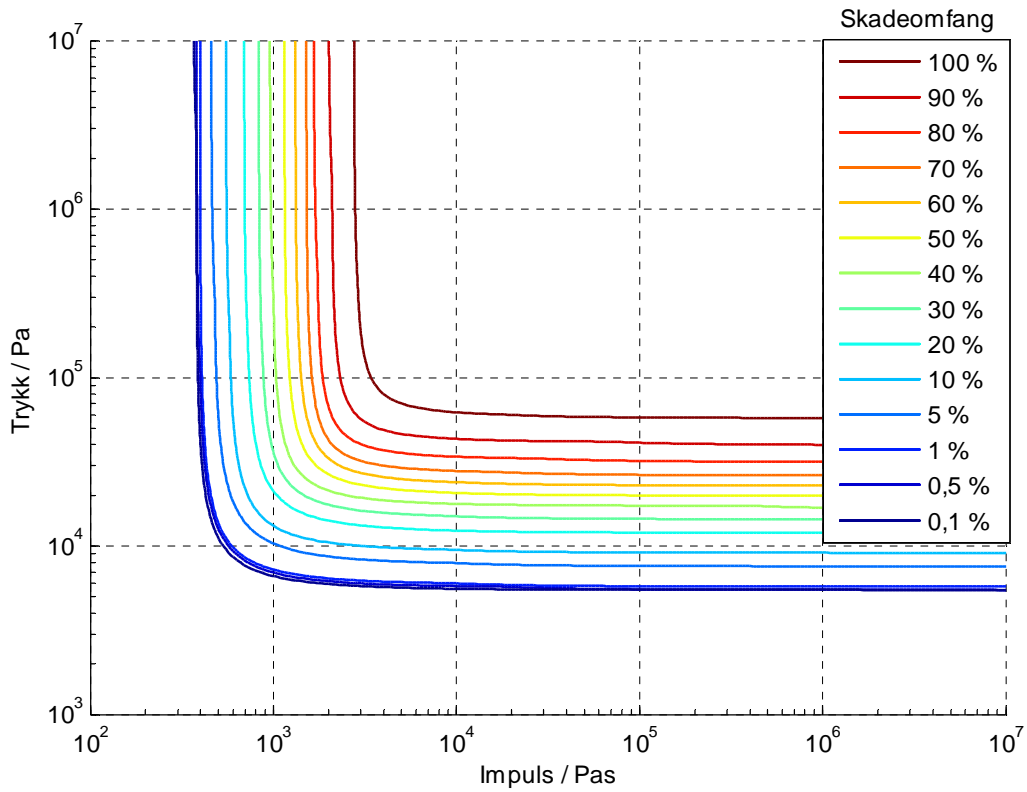
For skade på lunger og skade etter støt mot hode eller kropp brukes de samme probitfunksjoner som for mennesker i friluft. Trykket og impulsen inne i kjøretøyet antas å være 50 % av verdiene utenfor.

Skaden på kjøretøyet er gitt ved et PI-diagram med skadekurver på formen

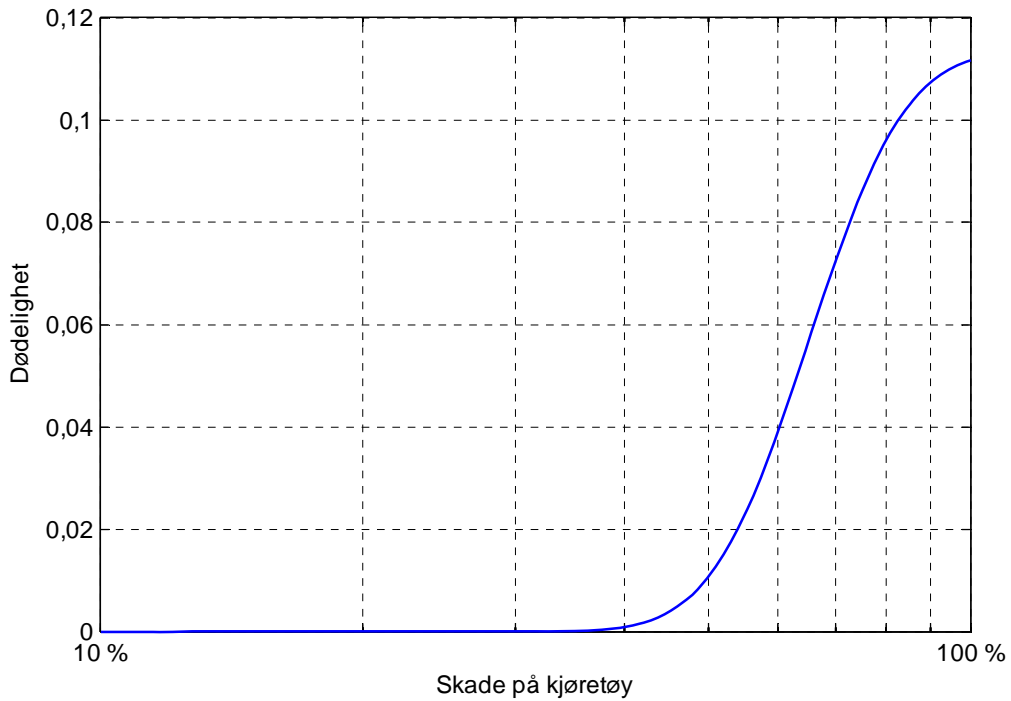
$$C = (A - p)(B - i_p) \quad (4.28)$$

der koeffisientene A , B og C er avhengig av skadeomfanget. Figur 4.10 viser diagrammet.

For gitte verdier for trykk og impuls finnes skadeomfanget ved interpolasjon mellom disse kurvene. Sammenhengen mellom skaden på kjøretøyet og dødeligheten er gitt av en normalfordeling, se figur 4.11.

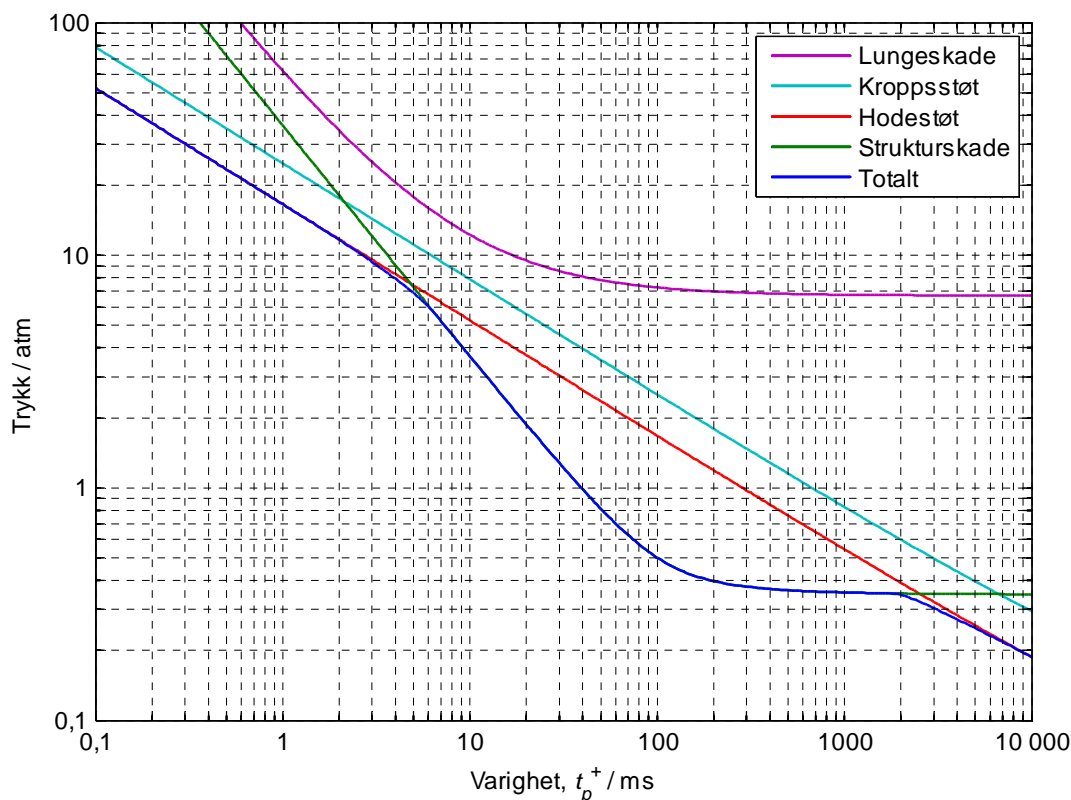


Figur 4.10 PI-diagram for skade på kjøretøy



Figur 4.11 Sammenheng mellom skade på kjøretøy og dødelighet for passasjerer

Den totale dødeligheten finnes ved å behandle skadetyperne som uavhengige hendelser. Figur 4.12 viser bidraget fra de ulike skademekanismene i form av kurver for 10 % dødelighet (bygningsskade gir maksimalt 11 % dødelighet) som funksjon av trykk og varighet. Det er da antatt at trykket som kan gi direkte skade, er frontrykket.



Figur 4.12 Kurver for 10 % dødelighet for personer i kjøretøy beregnet med modell i SAFER [28], $m = 75 \text{ kg}$, $p_0 = 1 \text{ atm}$

Den totale dødeligheten er i overveiende grad bestemt av dødeligheten fra hodestøt eller strukturskade. Flere kurver for den totale dødeligheten er vist i figur 4.13.

4.4.2 Bakers modell

Baker [40] har utviklet kriterier for når et kjøretøy velter på grunn av sjokkbølgen. Det forutsettes at belastningen er impulsiv.

Ved å se på energien som kreves for å løfte kjøretøyet til det står på vippet, og bruke dreiemomentet som gir tilsvarende kinetiske energi, vil impulsen som kreves for å få kjøretøyet til å velte, i_θ , være gitt ved uttrykket

$$\frac{i_\theta S h_{bl}}{m g^{1/2} b^{3/2}} = \sqrt{\left(\frac{2}{3} + \frac{h^2}{6b^2} + \frac{2h^2}{b^2} \left(\frac{h_{cg}^2}{h^2}\right)\right) \left(\sqrt{\frac{1}{4} + \frac{h^2}{b^2} \left(\frac{h_{cg}^2}{h^2}\right)} - \frac{h}{b} \left(\frac{h_{cg}}{h}\right)\right)} \quad (4.29)$$

der S er eksponert areal, h_{bl} er høyden der impulsen regnes å virke, m er masse, g er gravitasjonsakselerasjon, b er bredden, h er total høyde og h_{cg} er avstanden fra tyngdepunktet til bakken.

Tyngdepunktets vannrette posisjon er midt i kjøretøyet.

I beregningen av impulsen er både diffraksjonsbelastningen og vindbelastningen tatt med. Når tidsavhengigheten til det dynamisk trykket settes som

$$q(t) = q \left(1 - \frac{t}{t_p^+} \right)^2 e^{-2t/t_p^+} \quad (4.30)$$

der maksimalverdien q er gitt ved (3.8), blir den dynamiske impulsen

$$i_q = \frac{5}{8} (1 - e^{-2}) p t_p^+ \frac{p/p_0}{7 + p/p_0} \quad (4.31)$$

Alternativt kan varigheten erstattes av trykkimpulsen der forholdet mellom disse størrelsene er gitt av formen på trykkbølgen [40].

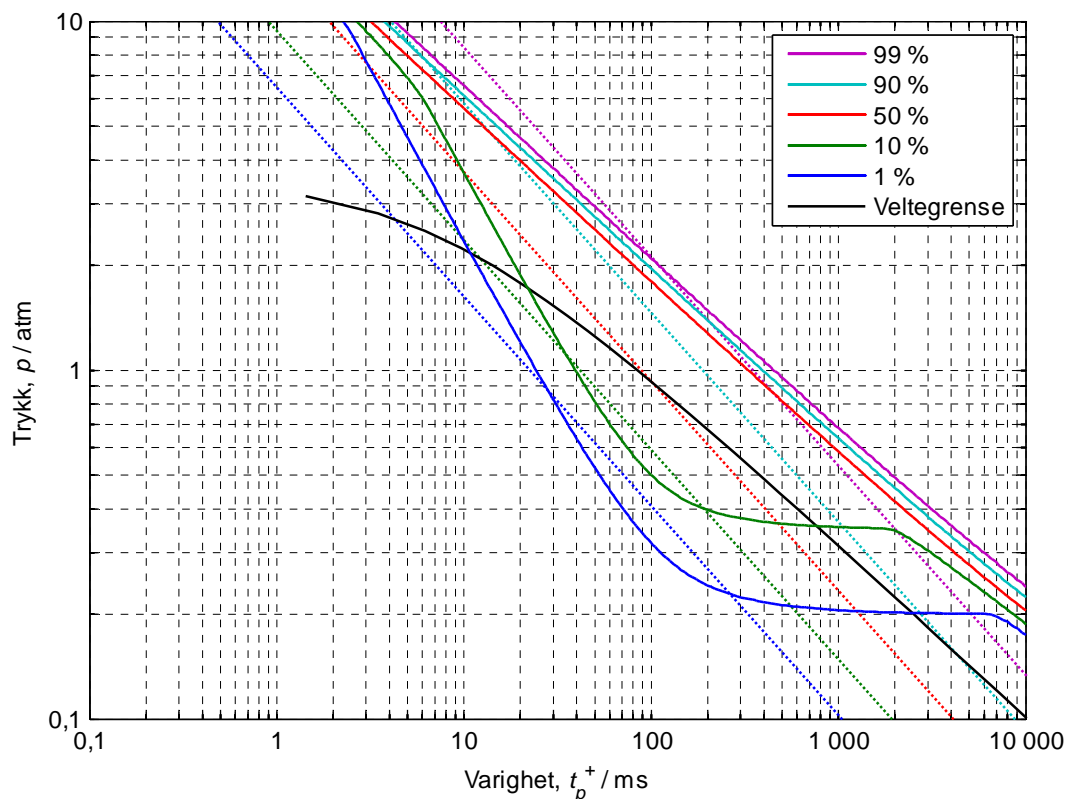
Diffraksjonsbelastningen antas å være refleksjonstrykket, og refleksjonsimpulsen settes til

$$i_r = \frac{p_r H}{2\dot{x}} \quad (4.32)$$

der H er den minste verdien av høyden h eller lengden L . Når bølgehastigheten \dot{x} og refleksjonstrykket p_r uttrykkes ved fronttrykket ((4.17) og (4.25)), blir refleksjonsimpulsen

$$i_r = \frac{\left(1 + \frac{3p/p_0}{7 + p/p_0} \right) p H}{\sqrt{1 + \frac{6}{7} p/p_0} c} \quad (4.33)$$

Grenseverdier for trykk og varighet som fører til at kjøretøyet vipper over, finnes ved å sette $i_\theta = C_d i_q + i_r$. Figur 4.13 viser verdiene når det brukes dimensjoner på en forholdsvis liten bil. I figuren er også skadepkurver fra AMRISK og fra SAFER tegnet inn.



Figur 4.13 Kurve som definerer grensen for velting av et kjøretøy med $m = 1200 \text{ kg}$, $h = 1,4 \text{ m}$, $b = 1,5 \text{ m}$, $h_{cg} = 0,5 \text{ m}$, $h_{bl} = 0,6 \text{ m}$, $S = 4,2 \text{ m}^2$, $C_d = 1,8$, $p_0 = 1 \text{ atm}$, sammen med kurver for dødelighet i kjøretøy fra AMRISK (stiplede linjer) og SAFER

I forsøksdataene som er grunnlaget for beregningene i AMRISK av dødeligheten for mennesker i kjøretøy, er dødeligheten satt til 5 % for kjøretøy som velter (kapittel 3.5). Når det tas hensyn til at dødeligheten er satt høyere for kjøretøy i bevegelse, er det ganske god overensstemmelse mellom AMRISK og den beregnede grensen for velting. Ved små varigheter blir imidlertid forskjellene større. Det skyldes særlig at i beregningen av veltegrensen tas det ikke hensyn til at diffraksjonsimpulsen (likning (4.33)) vil begrenses av varigheten til trykkbølgen når varighetene er små (jfr. Bakers modell for nedblåsing av mennesker). Formen på kurvene fra SAFER varierer betydelig avhengig av om bygningskade har betydning ($\lambda < 11 \%$) eller ikke, men de dekker omtrent samme område som kurvene fra AMRISK.

5 Vurdering av modeller

5.1 Virkning i friluft

I AMRISK blir dødeligheten fra luftsjokkets virkning mot personer i friluft satt til maksimalverdien av dødeligheten fra direkte og indirekte luftsjokkvirkning. Skade fra luftsjokk og skade fra andre virkninger som utkast blir imidlertid behandlet som uavhengige. I tråd med dette bør

indirekte og direkte virkning fra luftsjokk også behandles som uavhengige hendelser [20].
Dermed bør dødeligheten fra disse to virkningene bestemmes for alle aktuelle trykk og varigheter.

5.1.1 Direkte skader

Bowens kurver, som ved publisering ble betegnet som foreløpige, er blitt standarden for å anslå skade fra direkte luftsjokkvirkning. Det ser ikke ut som det i dag finnes bedre alternativer. Kurvene kan brukes slik de opprinnelig er definert, det vil si at de gir dødelighet som funksjon av trykk og varighet. Det er liten grunn til å gå veien om andre tilpassede probitfunksjoner eller antatte impulsverdier (jfr. 4.1.1.1).

Det er imidlertid nylig pekt på noen mulige svakheter ved Bowens kurver eller grunnlaget for kurvene.

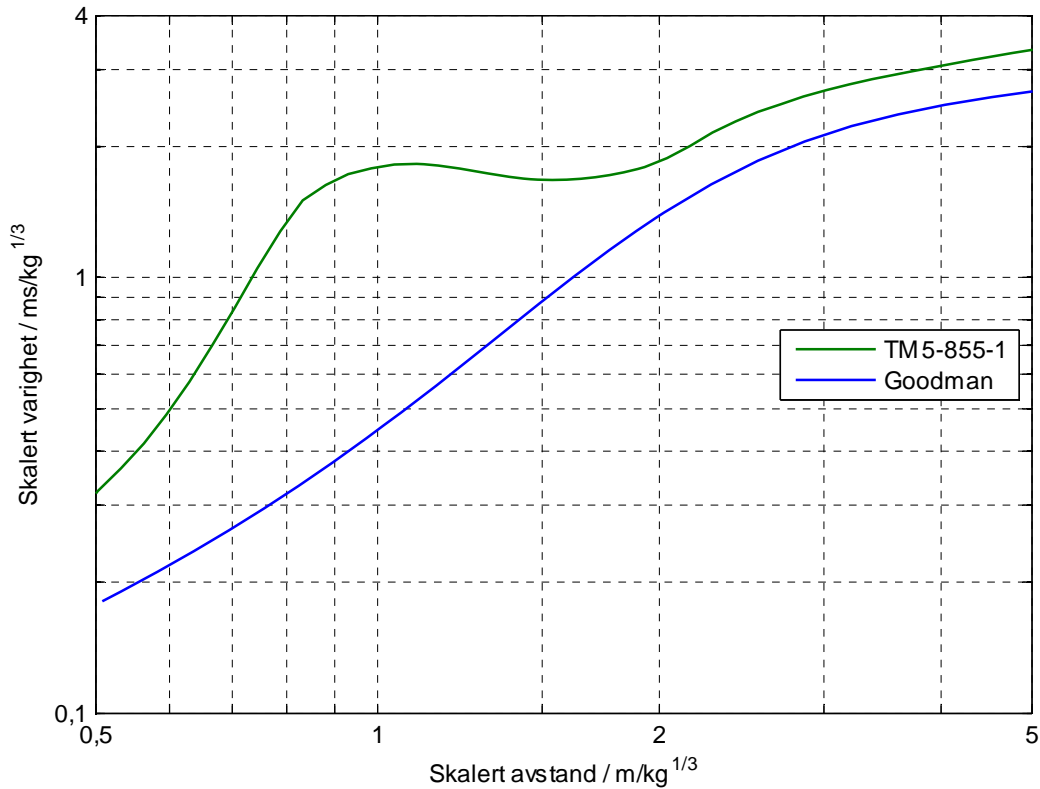
D.R. Richmond [43] har sammenliknet en rekke nyere forsøksresultater med Bowens kurver. De fleste resultatene stemmer godt overens med Bowens modell. En del av forsøkene med korte varigheter gir imidlertid betydelig større dødelighet enn modellen anslår, spesielt med skalerte varigheter mindre enn 2 ms. Richmond mener dette kan skyldes at trykket som belastet dyrene i enkelte av forsøkene som Bowens kurver bygger på, var mindre enn refleksjonstrykket Bowen regnet med. I et forsøk der en del av sauene var hengt opp, ble refleksjonstrykket beregnet som belastningen på en plate på motsatt side av dyret i forhold til ladningen [6]. Richmond synes imidlertid Bowens beskrivelse er uklar, og mener refleksjonstrykket som er brukt, er det som ville belastet en plate på siden av dyret nærmest ladningen. Dermed blir trykkverdiene for store, og kurvene havner for høyt.

Også Bowen har diskutert inngående hvilken belastning disse sauene var utsatt for. Han viser til at stagnasjonstrykket på siden nærmest ladningen er større enn refleksjonstrykket på baksiden. Dessuten vil det oppstå et refleksjonstrykk på framsiden fram til det blir avlastet, og dette trykket er enda større enn stagnasjonstrykket. Konklusjonen hans er at belastningen ved korte varigheter vil være større enn de målte eller beregnede refleksjonstrykkene, altså det motsatte av Richmonds antakelser. Ved varigheter mindre enn 2,8 ms, anslår Bowen at kurven for 50 % dødelighet ligger mellom 0 og 30 prosent for lavt. Det kan også nevnes at dyrene i de aktuelle forsøkene fikk størst skade i delen av lungene som var nærmest ladningen, i samsvar med Bowens beskrivelse av belastningen.

Ut fra forsøksdataene Bowen benyttet, er det vanskelig å se at Bowens kurver skulle ligget lavere ved korte varigheter. Det hadde imidlertid vært interessant å se hvordan kurvene blir dersom resultater fra forsøkene presentert i [43] tas med i kurvetilpasningen. I ett av forsøkene ble for øvrig dødeligheten betydelig lavere enn det Bowens modell gir.

I forsøkene med eksplosiver var det vanskelig å lese av varigheten til sjokkbølgen [6]. Denne ble derfor anslått ut fra verdier publisert av Goodman i 1960 for pentol [44] med antakelse om at pentol frigjør 10 % mer energi per ladningsvekt enn TNT, Comp B og RDX. Gruss [45] gjør oppmerksom på den betydelige forskjellen mellom Goodmans verdier og de nyligst publiserte

data for varighet av sjokkbølger fra detonasjoner av konvensjonelle sprengstoff, for eksempel i [46], se figur 5.1.



Figur 5.1 Sammenheng mellom skalert varighet og skalert avstand for en TNT-ladning gitt av TM 5-855-1 [46] og Goodman [44] (varighet av refleksjonstrykket, hentet fra [47]). Avstand i ladningsradier i Goodmans kurve er gjort om til skalert avstand ved å anta sfærisk ladning og benytte tetthet for pentol på 1650 kg/m³ [46] og en ekvivalensfaktor i forhold til TNT på 1,1

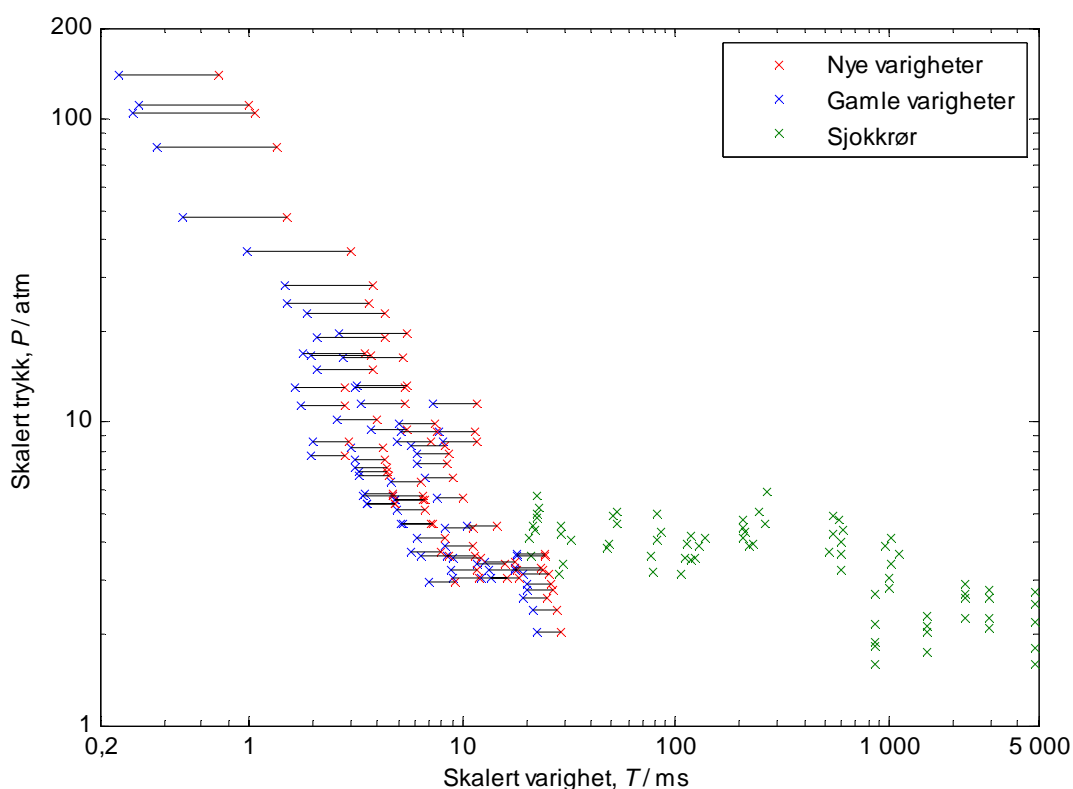
Det er ikke oppgitt nøyaktig hvordan Bowen har beregnet varighetene, men siden verdiene er ulike for like avstander og ladninger, er de sannsynligvis bestemt ut fra de målte verdiene for trykket (refleksjonstrykket). Vi har gjort dette ut fra Goodmans kurver for refleksjonstrykk og varighet av den reflekterte bølgen og kommer da fram til mindre verdier enn Bowen, i gjennomsnitt 12 %.

Gruss [45] har bestemt nye kurver ved å lese av trykk og varighet fra Bowens kurver, beregnet skalert avstand ut fra trykket, funnet forholdet mellom skalerte varigheter fra Goodman og fra moderne data for denne avstanden og dermed en ny verdi for varigheten. Resultatet er skadekurver som ved mindre varigheter er betydelig forskjøvet mot større verdier.

Bowens kurver er resultatet av en statistisk analyse med forutsetninger om en form på skadekurven. Derfor bør en tilsvarende analyse med mer troverdige varigheter være det første skrittet

for å korrigere Bowen. Det virker ikke tilfredsstillende bare å endre på kurvene slik Gruss har gjort.

Nye varigheter kan bestemmes ved Gruss' metode med korreksjonsfaktorer for varigheten som funksjon av skalert avstand. På den måten forplantes Bowens verdier for varigheten videre. Men korreksjonsfaktoren er gitt av våre avleste verdier, og det er ikke helt samsvar mellom disse og Bowens verdier. Alternativt kan moderne data brukes for å bestemme varighet ut fra refleksjonsstrykket. Figur 5.2 viser resultatet. I forsøkene der sprengstoffet var pentol eller Comp B, er det brukt trykkavhengige ekvivalente laddningsvekter i forhold til TNT for impuls, hentet fra [48]. For RDX brukes ekvivalensfaktoren 1,1 [46].



Figur 5.2 Varigheter brukt i Bowens analyse av forsøk med direkte luftsjokkskade sammen med nye anslåtte verdier og uendrede verdier fra forsøk med sjokkrør

Figuren viser hvordan de nye varighetene er klart større enn varighetene Bowen brukte.

I Bowens analyse ble verdier for koeffisientene a , b og foreløpige verdier for c og p_{50} (likning (3.4)) funnet ved å minimalisere størrelsen [49]

$$\chi^2 = \sum \frac{(r - n\lambda)^2}{n\lambda(1 - \lambda)} \quad (5.1)$$

der n er antall dyr som utsettes for en belastning i et forsøk, r er antall dyr som omkommer i forsøket, og λ er den beregnede sannsynligheten for at et dyr dør av belastningen gitt verdier for koeffisientene. Tilpasningen gir verdiene $a = 6,76$, $b = 1,064$ og $c = 0,198$ ved siden av verdiene for p_{50} for 12 dyreslag. Hvis λ er den virkelige sannsynligheten for at et dyr dør, vil χ^2 , når $n\lambda$ og $n(1-\lambda)$ ikke er for små, være χ^2 -fordelt med antall frihetsgrader lik antall forsøk minus antall parametere som er anslått, her 15. Sannsynligheten for at χ^2 er større enn den beregnede verdien, betegnes som sannsynligheten for at verdien kan bli så stor gitt den antatte fordelingen. Denne sannsynligheten blir 25 % i Bowens tilpasning ($\chi^2 = 136$) og tilfredsstillende godt det vanlige kravet om 5 % signifikans.

Det ble valgt å bestemme verdier for c og p_{50} på nytt med en probitanalyse der verdiene som var funnet for a og b , ble brukt til å beregne størrelsen P^* (likning (3.1)). Analysen består i å maksimere sannsynligheten for utfallet av alle forsøkene ved å variere c og p_{50} . Resultatet blir en c -verdi på 0,1788.

Med de justerte varighetene i figur 5.2² gir minimaliseringen av χ^2 parameterverdiene $a = 18,9$, $b = 1,40$ og $c = 0,321$, og χ^2 blir 263. Sannsynligheten for en slik verdi med den forutsatte fordelingen er bare $7 \cdot 10^{-12}$, og det er dermed ikke noe statistisk grunnlag for å etablere nye skadekurver. Probitanalysen gir for øvrig en c -verdi på 0,256, og det geometriske gjennomsnittet av p_{50} -verdiene for større dyr blir 4,61 atm.

5.1.2 Indirekte skader

Grunnlaget for å bestemme hvilke hastigheter som gir dødelig skade når et menneske treffer bakken, er begrenset. Det virker imidlertid fornuftig å ikke bruke et eget kriterium for hodeskader, for skadekriteriet for hele kroppen inkluderer hodeskader. De kritiske hastighetene er trolig mer enn høye nok siden de gjelder treff normalt på harde flater.

Hastigheten som en sjokkbølge vil gi et menneske, kan beregnes på ulike måter slik de foregående beskrivelsene har vist. I stedet for å anbefale én av dem, har vi imidlertid satt sammen en ny modell med elementer fra de eksisterende modellene, se kapittel 6.2. Enkelte av elementene er utviklet noe.

5.2 Virkning i skog

Når mennesker i skog kastes av gårde av sjokkbølgen, kan de i motsetning til i frifelt treffe trær. Det kan nok være farligere enn å lande skrått på bakken, men ikke farligere enn å treffe normalt på en hard flate som kriteriet for frifelt forutsetter. Dessuten vil sjokkbølgen dempes raskere i skog. Skadekriteriet for frifelt gir derfor trolig tilstrekkelig høy dødelighet for mennesker som risikerer å bli kastet mot trær. Trær som blåser ned og treffer mennesker, er derimot ikke omfattet av frifeltskriteriet. I en eventuell ny modell for skog bør derfor dødelighet fra fallende trær legges til dødeligheten i frifelt. En slik modell vil være i bedre samsvar med den nye frifeltsmodellen enn nåværende modell i AMRISK.

² Forsøkene med marsvin er ikke tatt med, slik heller ikke Bowen gjorde i den endelige analysen.

5.3 Virkning i bygninger

Modellen i AMRISK for luftsjokkets virkning mot mennesker i bygninger er basert på empiriske data, men det er ønskelig å kunne sammenlikne med flere data, kanskje spesielt for typisk norske hus. Videre bør resultatene fra modellen sammenliknes med resultater fra andre beregningsmodeller. Antakelsen om at det bare er maksimaltrykket som bestemmer dødeligheten, bør vurderes.

5.4 Virkning mot kjøretøy

En alternativ modell for dødeligheten til personer i kjøretøy er modellen i SAFER (kapittel 4.4.1). Vi har i dag ikke tilstrekkelig informasjon om grunnlaget for denne modellen til å kunne anbefale den. For modellen i AMRISK virker den anslåtte økningen i dødelighet for kjøretøy i bevegelse noe usikker, men det er mulig at modellen i SAFER ikke tar hensyn til dette i det hele tatt.

6 Ny modell for virkning i friluft

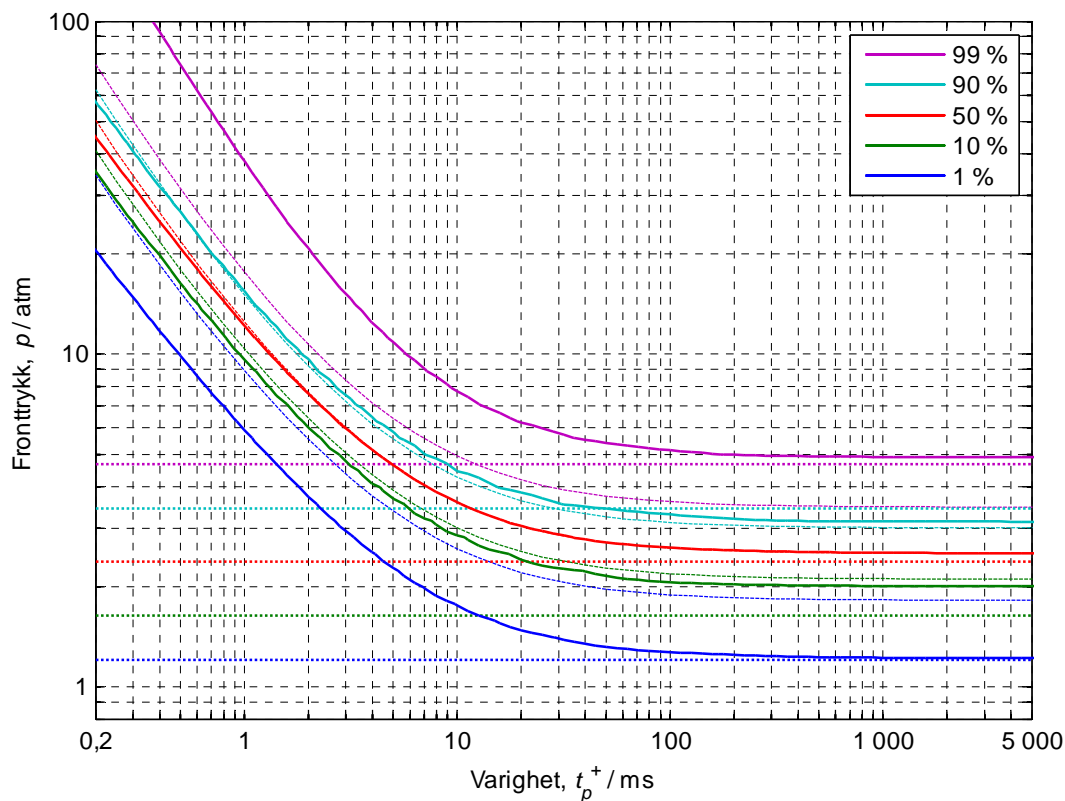
6.1 Direkte skader

I eksisterende modell i AMRISK er massen på personen forutsatt å være 70 kg. Det riktige vil være å benytte medianen i befolkningen, og den er trolig bortimot 75 kg. Massen bestemmer den skalerte varigheten (likning (3.5)), men differensen mellom 70 og 75 kg betyr lite for resultatet.

Ved utviklingen av skadekriteriet i AMRISK, ble variasjon i utsatte personers orientering i forhold til retningen på sjokkbølgen brukt som argument for å gi skadekurvene større spredning. Denne spredningen kan også beregnes ved å anslå sannsynligheten for de tre mulige orienteringene. Dødeligheten vil da bli

$$\lambda = \sum_{\text{orienteringer, } n} o_n \lambda_n(p_{en}) \quad (6.1)$$

o_n betegner her sannsynligheten for de ulike orienteringene som gir ulike effektive belastninger, p_{en} . Når sannsynligheten for at personen står oppreist, settes lik 90 %, og sannsynligheten for hver av de to andre orienteringene settes lik 5 %, vil kurvene for 1 % og 99 % dødelighet ved lange varigheter omtrent falle sammen med kurvene fra AMRISK, se figur 6.1. Dødeligheten stiger imidlertid fra 10 % til 90 % over et kortere trykkintervall.



Figur 6.1 Kurver for 1, 10, 50, 90 og 99 % dødelighet fra direkte luftsjokkskade med gitt fordeling av orienteringer sammen med kurver for stående personer (stiplede linjer) og kritiske trykkverdier fra AMRISK (horisontale stiplede linjer)

De anvendte verdiene for fordelingen av orienteringer virker realistiske. Det kan nevnes at i en tekst som ble foreslått [32] tatt med i revidert utgave av Green Book, står det at når avstanden fra en person til en reflekterende flate er mindre enn 1 m, kan refleksjonstrykket betraktes som det belastende trykket.

Funksjonene for å beregne dødelighet fra direkte skader i friluft, er gjengitt i appendiks A.1.

6.2 Indirekte skader

Den nye modellen for indirekte skader i friluft tar utgangspunkt i Bowens modell slik den er beskrevet i kapittel 3.2.2 med det modifiserte forholdet mellom varighetene til trykk og vindhastighet vist i figur 4.4. Videre tas det hensyn til diffraksjonsbelastningen, og tidsavhengigheten til frontrykket er [12]

$$p(t) = p \left(1 - \frac{t}{t_p^+} \right) \left[a e^{-it/t_p^+} + b e^{-jt/t_p^+} \right] \quad (6.2)$$

med

$$\begin{aligned}
a &= 0,23 + \frac{2,282(8 + p/p_0)}{27,658 + p/p_0 + 1,2(p/p_0)^2 + 0,007(p/p_0)^3} \\
b &= 1 - a \\
i &= \sqrt{\frac{p/p_0}{1 + 0,1 p/p_0}} + \frac{1,5(p/p_0)^2}{1500 + (p/p_0)^{3/2}} \\
j &= 9 + 1,4 p/p_0
\end{aligned}
\tag{6.3}$$

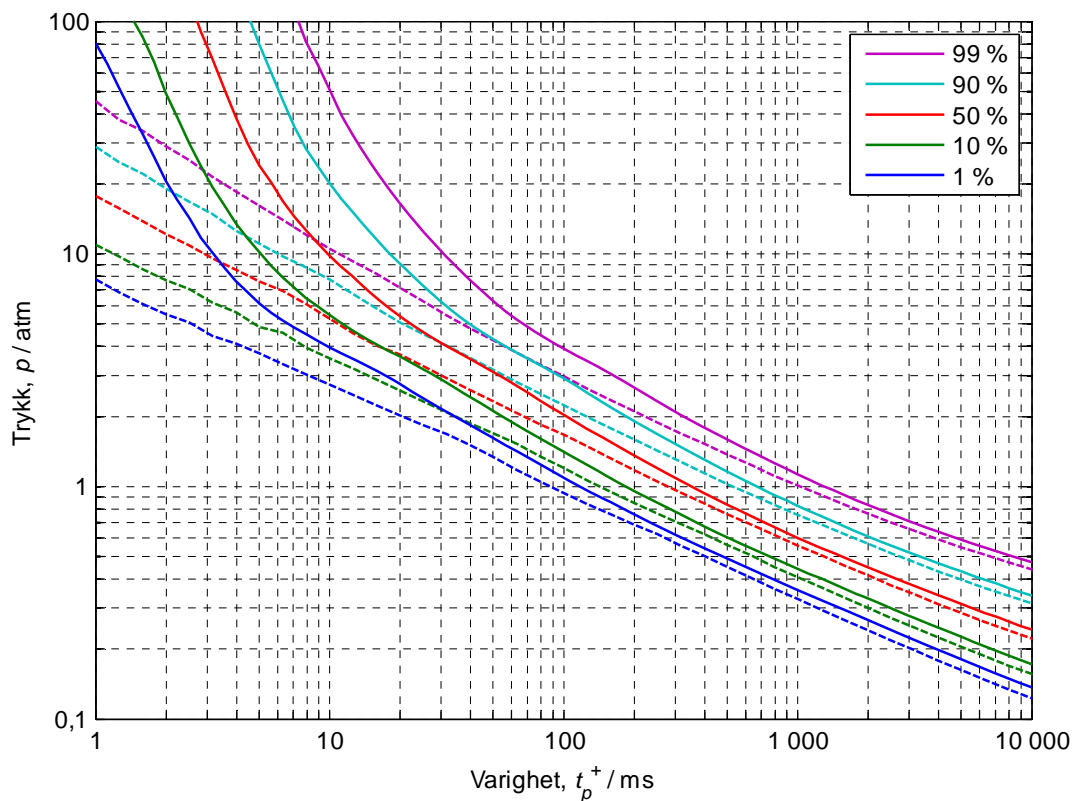
Belastningen på mennesket fram til $t = t_s$ bestemmes på samme måte som i modellen til Tatom og Tatom (kapittel 4.1.2.5), men det blir kontrollert at den ikke er større enn om det ikke hadde vært noen avlastning slik at belastningen maksimalt kan være lik refleksjonstrykket. Refleksjonstrykket som funksjon av tida anslås ved å bruke forholdet mellom fronttrykk og refleksjonstrykk som egentlig gjelder maksimalverdier. I vår modell bruker vi empiriske forhold som også gjelder store trykk.

I samsvar med Glasstones beskrivelse av belastning av objekter [24] vil sjokkbølgen nå baksiden etter en tid

$$t_{b0} = \frac{b}{\dot{x}} \tag{6.4}$$

og så stiger belastningen på baksiden lineært opp til fronttrykket i løpet av tida $t_b - t_{b0}$. Forsiden vil fra $t = t_s$ være belastet av stagnasjonstrykket. Beskrivelsen av diffraksjonsbelastningen er altså noe mer detaljert enn i Tatom og Tatoms modell.

Resultatet i form av skadepulser er vist i figur 6.2 sammen med resultatene fra Tatom og Tatoms modell. Forskjellen mellom kurvene skyldes i hovedsak bruk av ulike tidsavhengigheter på sjokkbølgeparameterne. Forskjellen er størst ved høye trykk der feilen ved å anta en trekantpuls, slik Tatom og Tatom gjør, blir størst.

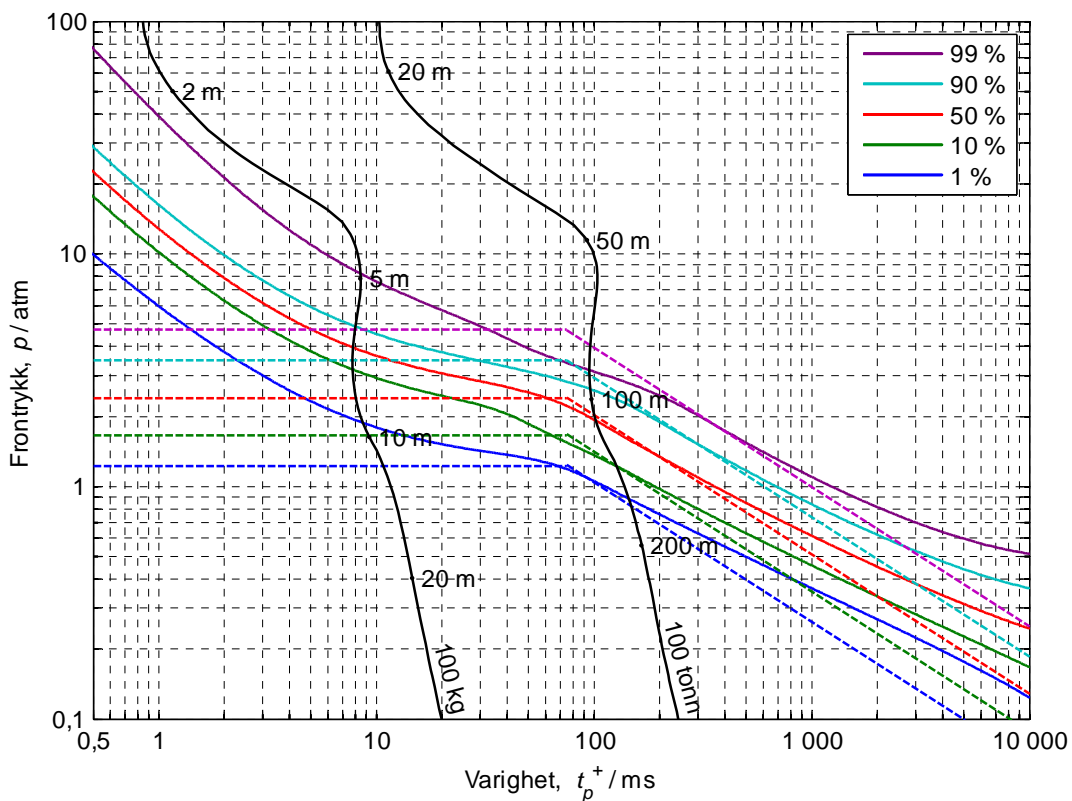


Figur 6.2 Kurver for 1, 10, 50, 90 og 99 % dødelighet fra sjokkbølgens nedblåsing av mennesker beregnet med egen modell og modellen til Tatom og Tatom [41] (stiplede linjer), $\alpha = 0,0061 \text{ m}^2/\text{kg}$, $w = 0,25 \text{ m}$, $b = 0,15 \text{ m}$, $C_d = 1,3$

Metoden beskrevet ovenfor gir maksimal hastighet på personer som funksjon av maksimaltrykk og varighet. En funksjon som er tilpasset resultatene for trykkverdier mellom 0,1 og 100 atm og varigheter mellom 0,1 og 10 000 ms, er vist i appendiks A.2.

6.3 Resultater

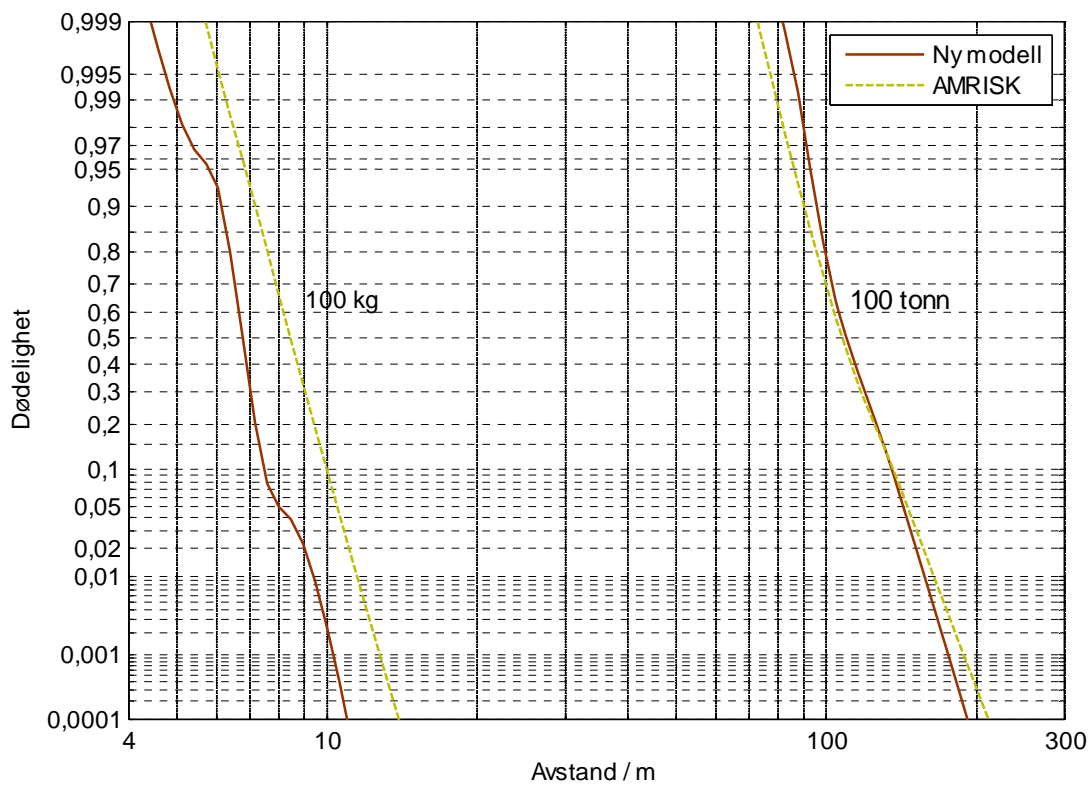
Når direkte og indirekte virkning regnes som uavhengige hendelser, blir isokonturene for den totale dødeligheten fra luftsjokkvirkning i friluft slik figur 6.3 viser. I figuren er disse sammenliknet med kurver fra AMRISK (figur 3.8). I figuren er det også tegnet inn varigheter og trykk i ulike avstander fra detonasjon av en 100 kg ladning i friluft og 100 tonn i et frittstående lager.



Figur 6.3 Kurver fra anbefalt ny modell og fra AMRISK (stiplede linjer) for 1, 10, 50, 90 og 99 % dødelighet fra luftsjokkskade i friluft, sammen med verdier for trykk og varighet fra ladninger på 100 kg og 100 t

Figur 6.3 viser at AMRISK gir konservative verdier for dødeligheten når ladningene er små. Det samme gjelder for meget lange varigheter. Forskjellene i dødelighet kommer tydeligere fram ved å tegne opp dødeligheten som funksjon av avstand fra ladningen, altså langs de svarte kurvene. Figur 6.4 viser dette.

I 10 m avstand fra en 100 kg ladning anslås dødeligheten til 0,24 % med den nye modellen og 9,8 % med modellen i AMRISK, det vil si en faktor 40 i forskjell. Denne faktoren øker med mindre dødelighetsverdier. Med 100 tonn ladning blir det også betydelige forskjeller i modellenes dødelighetsverdier for de minste dødelighetene, ellers er forskjellene små. For begge ladningsstørrelsene blir forskjellen mellom avstander som gir samme dødelighet, ganske liten, for kurvene synker bratt.



Figur 6.4 Dødelighet fra luftsjokkvirkning som funksjon av avstand fra 100 kg ladning i friluft og fra 100 tonn i frittstående lager, beregnet med foreslått ny modell og modell i AMRISK

6.4 Tilpasning til virkningsmodeller i AMRISK

De fleste modellene for luftsjokkvirkning i AMRISK gir størrelsene p og $p^{5/3}t_{ip}$. I den nye letalitetmodellen for mennesker i friluft er dødeligheten gitt av p og t_p^+ . Appendiks A.3 beskriver hvordan t_p^+ kan finnes fra p og $p^{5/3}t_{ip}$.

Referanser

- [1] K. B. Holm, C. Elfving, R. Berglund, A. Bryntse, og H. Øiom, "AMRISK version 2.0 - Documentation of verification tests", Forsvarets forskningsinstitutt, FFI/Rapport 2005/03126, 2006.
- [2] D. D. Sharpnack, A. J. Johnson, og Y. Y. Phillips, III, "The pathology of primary blast injury", i *Textbook of military medicine, Part I, Warfare, weaponry, and the casualty, Volume 5, Conventional warfare - ballistic, blast and burn injuries*. R. F. Bellamy og R. Zajtchuk, red. Office of the Surgeon General, Department of the Army, USA, 1991.
- [3] K. H. Taber, D. L. Warden, og R. A. Hurley, "Blast-related traumatic brain injury: what is known", *The Journal of neuropsychiatry and clinical neurosciences*, vol. 18, no. 2, ss. 141-145, 2006.
- [4] "Wissenschaftlich-technische Grundlagen für die Berechnung von Schadenwirkungen durch Explosionen", Ernst Basler et Partners, Zürich, TM 727-11, 1981.
- [5] K. B. Holm, C. Elfving, og H. Øiom, "AMRISK version 2.0 - Reference manual", Forsvarets forskningsinstitutt, FFI/Rapport 2006/01863, 2006.
- [6] I. G. Bowen, E. R. Fletcher, og D. R. Richmond, "Estimate of man's tolerance to the direct effects of air blast", Defense Atomic Support Agency, Department of Defense, Technical Progress Report DASA-2113, 1968.
- [7] I. G. Bowen, E. R. Fletcher, D. R. Richmond, F. G. Hirsch, og C. S. White, "Biophysical mechanisms and scaling procedures applicable to assessing responses of the thorax energized by air-blast overpressure or by nonpenetrating missiles", *Annals of the New York Academy of Sciences*, vol. 152, no. A1, ss. 122-146, 1968.
- [8] M. L. Crossfill og J. G. Widdicombe, "Physical characteristics of the chest and lungs and the work breathing in different mammalian species", *Journal of Physiology*, vol. 158, ss. 1-14, 1961.
- [9] J. O. Langseth, K. B. Holm, J. A. Teland, S. Christensen, S. Martinussen, og H. Sjøel, "Trykkløser i luft", i *Håndbok i våpenvirkninger*. L. Riis, K. B. Holm, og J. Ommedal, red. Forsvarsbygg, 2003.
- [10] R. K. Jones, D. R. Richmond, og E. R. Fletcher, "A reappraisal of man's tolerance to indirect (tertiary) blast injury", i *Minutes of the eleventh meeting of Panel N-2 (Blast, Shock and Thermal), Subgroup N, The Technical Cooperation Programme (TTCP)*, vol. Part II Technical Papers and Discussions Foulness, England: Atomic Weapons Research Establishment, 1969, ss. 41-56.
- [11] W. S. Lewis og A. B. Lee, Jr., "Jumper's syndrome – The trauma of high, free-fall as seen at Harlem Hospital", *Journal of Trauma*, vol. 5, no. 6, ss. 812-818, 1965.
- [12] I. G. Bowen, R. W. Albright, E. R. Fletcher, og C. S. White, "A model designed to predict the motion of objects translated by classical blast waves", Office of Technical Services, Department of Commerce, Washington D.C., USAEC Civil Effects Test Operations Report CEX-58.9, 1961.
- [13] H. A. Merz, "Letalitätskriterien für Explosionen mit konventionellem Sprengstoff", Forschungsinstitut für militärische Bautechnik, Zürich, FMB 76-10, 1976.

- [14] S. Glasstone, *The effects of nuclear weapons*. Washington D.C.: US Atomic Energy Commission, 1962.
- [15] C. Wilton og B. Gabrielsen, "House damage assessment", URS Research Co., San Mateo, California, URS 788-5, DNA 2906F, 1973.
- [16] L. E. Fugelso, L. M. Weiner, og T. H. Schiffmann, "A computation aid for estimating blast damage from accidental detonation of stored munitions", i *Minutes of the 14th Explosives Safety Seminar*, Washington D.C.: Department of Defense Explosives Safety Board, 1972.
- [17] G. H. Custard, "Evaluation of explosive storage safety criteria", Final Report 1970.
- [18] N. Ethridge, "Vehicle response study", Preliminary Report DASA-1249, 1961.
- [19] L. H. J. Absil, P. van Dongen, og H. H. Kodde, "Inventory of damage and lethality criteria for HE explosions", TNO Prins Maurits Laboratory, Rijswijk, Nederland, TNO report PML 1998-C21, 1998.
- [20] "Explosives safety risk analysis, Part II", AASTP-4, 2003.
- [21] S. Hadjipavlou og G. Carr-Hill, "A review of the blast casualty rules applicable to U.K. houses", Home Office Scientific Research and Development Branch, London, Publication 34/86, 1986.
- [22] J. H. Stuhmiller, Y. Y. Phillips, III, og D. R. Richmond, "The physics and mechanisms of primary blast injury", i *Textbook of military medicine, Part I, Warfare, weaponry, and the casualty, Volume 5, Conventional warfare - ballistic, blast and burn injuries*. R. F. Bellamy og R. Zajtchuk, red. Office of the Surgeon General, Department of the Army, USA, 1991.
- [23] "Effecten van explosie op personen", Ministerie van staat voor ruimte, wonen, milieu en rijksgebouwen (VROM), Nederland, Publicatiereeks Gevaarlijke Stoffen (PGS) 1, Deel 2A, 2003.
- [24] S. Glasstone og P. J. Dolan, *The effects of nuclear weapons*, 3. ed. Washington D.C.: United States Department of Defense og Energy Research and Development Administration, 1977.
- [25] W. E. Baker, P. A. Cox, P. S. Westine, J. J. Kulesz, og J. J. Strehlow, *Explosion hazards and evaluation*. Amsterdam, Nederland: Elsevier Scientific Publishing Company, 1983.
- [26] "Structures to resist the effects of accidental explosions", Joint Departments of the Army, the Navy and the Air Force, Manual TM 5-1300/NAVFAC P-397/AFR 88-22, 1990.
- [27] "Methods for the determination of possible damage to people and objects resulting from releases of hazardous materials (Green Book)", Committee for the prevention of disasters caused by dangerous substances, Voorburg, Nederland, CPR-16E, 1992.
- [28] M. J. Hardwick, J. Hall, J. W. Tatom, og R. G. Baker, "Approved methods and algorithms for DoD risk-based explosives siting", Department of Defense Explosives Safety Board, Alexandria, Virginia, Technical Paper TP 14, 2005.
- [29] P. van Dongen, G. H. Lodder, og L. H. J. Absil, "RISK-NL: The Netherlands quantitative risk analysis tool to quantify and analyse risks involved with storage of ammunition of

- explosives", i *Minutes of the 29th DoD Explosives Safety Seminar*, Alexandria, Virginia: Department of Defense Explosives Safety Board, 2000.
- [30] M. M. Swisdak og J. M. Ward, "The DDESB Blast Effects Computer - Version 3.0", 1999.
- [31] *Lees' Loss prevention in the process industries*, Third ed Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005.
- [32] R. M. M. van Wees, "Update of chapters 2 and 3 of the 'Green Book'", TNO Prins Maurits Laboratory, Rijswijk, Nederland, TNO report PML 1999-C102, 1999.
- [33] AC/258 - Group of experts on the safety aspects of transportation and storage of military ammunition and explosives, "Manual of NATO safety principles for the storage of military ammunition and explosives", NATO international staff - Defence support divisions, Brüssel, AASTP-1, 1991.
- [34] H. Axelsson og J. T. Yelverton, "Chest wall velocity as a predictor of non auditory blast injury in a complex wave environment", *Journal of Trauma: Injury, infection and critical care*, vol. 40, no. 3S, s. S31-S37, 1996.
- [35] L. Zheng, "Safety distance for a person under action of air shock wave", i *Minutes of the 24th Explosives Safety Seminar*, vol. I Alexandria, Virginia: Department of Defense Explosives Safety Board, 1990.
- [36] S. K. Savenko og A. A. Gurin, *Air shock wave under gallery (på russisk)*. Moskva: 1973.
- [37] A. Ladegaard-Petersen og J. W. Dally, *A review of the factors affecting damage in blasting*. College Park, Maryland: Mechanical Engineering Dept., University of Maryland, 1975.
- [38] C. S. White, "The scope of blast and shock biology and problem areas in relating physical and biological parameters", *Annals of the New York Academy of Sciences*, vol. 152, no. A1, ss. 89-102, 1968.
- [39] H. L. Brode, "Numerical solutions of spherical blast waves", *Journal of Applied Physics*, vol. 26, no. 6, s. 766, 1955.
- [40] W. E. Baker, J. J. Kulesz, R. E. Ricker, R. L. Bessey, P. S. Westine, V. B. Parr, og G. A. Oldham, *Workbook for predicting pressure wave and fragment effects of exploding propellant tanks and gas storage vessels*. Springfield, Virginia: National Aeronautics and Space Administration, 1977.
- [41] F. B. Tatom og J. W. Tatom, "Comparison of head injuries as predicted by three different displacement velocity models", i *Minutes of the 28th DoD Explosives Safety Seminar*, Alexandria, Virginia: Department of Defense Explosives Safety Board, 1998.
- [42] R. V. Taborelli, I. G. Bowen, og E. R. Fletcher, "Tertiary effects of blast-displacement", Operation Plumbbob Report WT-1469, 1959.
- [43] D. R. Richmond, "Evaluation of Bowen's curves", 2002.
- [44] H. J. Goodman, "Compiled free-air blast data on bare spherical pentolite", Ballistic Research Laboratories, Aberdeen Proving Ground, Maryland, Ballistic research report 1092, 1960.

- [45] E. Gruss, "A correction for primary blast injury criteria", *Journal of Trauma*, vol. 60, no. 6, ss. 1284-1289, 2006.
- [46] "Design and analysis of hardened structures to conventional weapons effects", Joint Departments of the Army, Air Force and Navy and the Defense Special Weapons Agency, Washington D.C., TM 5-855-1/AFPAM 32-1147(I)/NAVFAC P-1080/DAHSCWEMAN-97, 1998.
- [47] W. E. Baker, *Explosions in air*. Austin, Texas: University of Texas Press, 1973.
- [48] M. M. Swisdak, "Explosion effects and properties, Part I - Explosion effects in air", Naval Surface Weapons Center, White Oak, Silver Spring, Maryland, Technical report NSWC/WOL/TR-75-116, 1975.
- [49] D. J. Finney, *Probit analysis*, Third ed Cambridge University Press, 1971.
- [50] "Fundamentals of protective design for conventional weapons", Department of the Army, Washington D.C., TM 5-855-1, 1986.

Appendix A Anbefalte modeller

Inngangsparametere p (bar) og t_p^+ (ms)

A.1 Direkte virkning i friluft

$$p_0 = 1 \text{ bar}$$

$$m = 75 \text{ kg}$$

$$q = \frac{5}{2} \frac{p^2}{7p_0 + p} \frac{1 + 2 \cdot 10^{-8} p/p_0}{1 + 10^{-8} p/p_0} \quad (\text{likning (3.15)})$$

Et tilsvarende uttrykk for refleksjonstrykket som er tilpasset empiriske data opp til 400 bar:

$$p_r = 2p \frac{7p_0 + 4p}{7p_0 + p} \frac{1 + 0,0056 p/p_0}{1 + 0,0026 p/p_0} \quad (\text{A.1})$$

$$p_{e1} = p \quad \text{Liggende}$$

$$p_{e2} = p + q \quad \text{Stående}$$

$$p_{e3} = p_r \quad \text{Nær en reflekterende flate}$$

$$P_n = \frac{1 \text{ atm}}{p_0} p_{en} \approx p_{en} \quad (\text{likning (3.6)})$$

$$T = t_p^+ \left(\frac{70 \text{ kg}}{m} \right)^{1/3} \left(\frac{p_0}{1 \text{ atm}} \right)^{1/2} = 0,97 t_p^+ \approx t_p^+ \quad (\text{likning (3.5)})$$

$$a = 6,76$$

$$b = 1,064$$

$$c = 0,1788$$

$$p_{50} = 4,24 \text{ bar}$$

$$z_n = \frac{1}{c} \ln \left(\frac{P_n}{p_{50} (1 + aT^{-b})} \right) \quad (\text{likning (3.4)})$$

$$\lambda_n = \int_{-\infty}^{z_n} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}x^2} dx \quad (\text{likning (3.3)})$$

$$o_1 = 0,05 \quad \text{Liggende}$$

$$o_2 = 0,90 \quad \text{Stående}$$

$$o_3 = 0,05 \quad \text{Nær en reflekterende flate}$$

$$\lambda = \sum_{n=1}^3 o_n \lambda_n \quad (\text{likning (6.1)})$$

A.2 Indirekte virkning i friluft

Den maksimale hastigheten som trykkbølgen gir et menneske i friluft, finnes ved å løse differensiallikningen som er beskrevet i kapittel 6.2. Til dette har vi brukt rutinen ode45 i programmet MATLAB. Beregningene er gjort for en rekke trykkverdier og varigheter innenfor området som figur 6.2 dekker.

En formel tilpasset resultatene med minste kvadraters metode er

$$\ln v = \frac{2333 + 392,8x - 671,4y + 48,98y^2 - 75,05xy - 0,4483y^3 + 4,172xy^2}{1 - 63,77x - 0,1526x^2 + 6,778xy + 0,2976x^3 + 0,7450y^3 + 0,2451x^2y - 0,1027xy^2} \quad (\text{A.2})$$

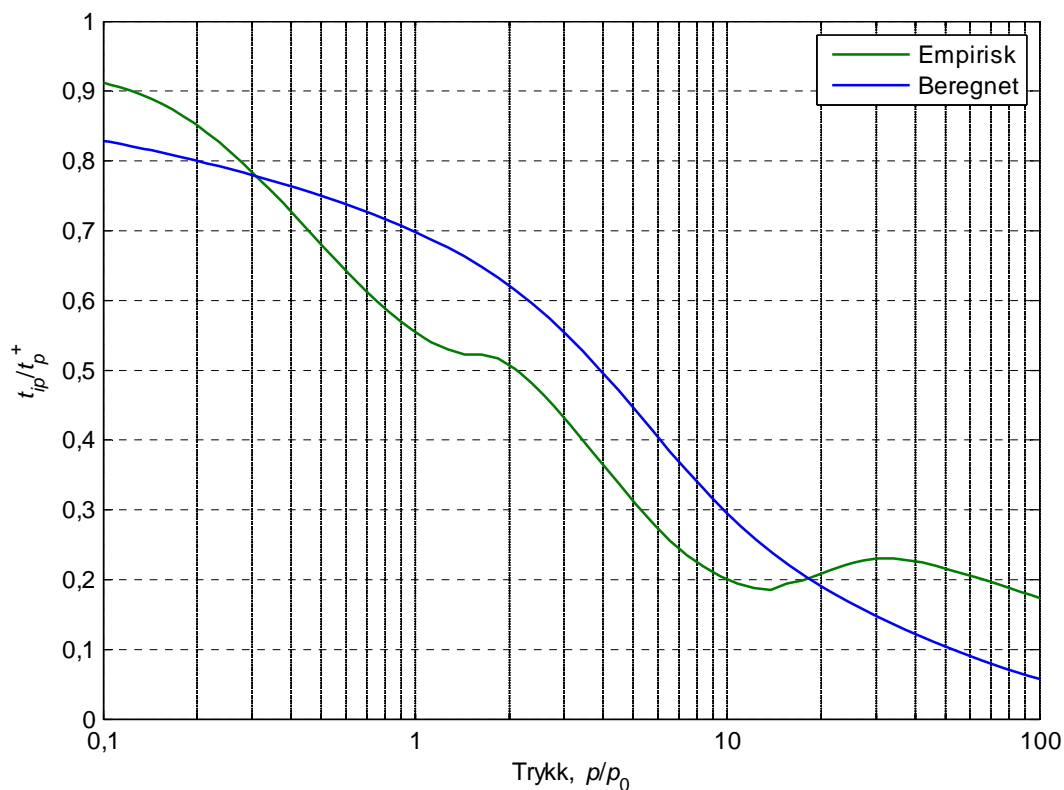
der $x = \ln(t_p^+/1000 \text{ ms})$ og $y = \ln(p/10^{-5} \text{ bar})$.

Dødeligheten finnes så fra likningene (3.9) og (3.3).

A.3 Dynamisk impuls og varighet

I letalitetsmodellene beskrevet ovenfor, beregnes dødeligheten som funksjon av luftsjokk-størrelsene p og t_p^+ . Virkningsmodellene i AMRISK for frittstående og jorddekte lagre gir disse størrelsene direkte, mens modellene for de andre lagertypene gir størrelsene p og $p^{5/3}t_{ip}$. Da må først t_{ip} og deretter t_p^+ beregnes ut fra dette. Og omvendt, når lagertypen er frittstående eller jorddekt lager og det eksponerte objektet er kjøretøy eller tog, må t_{ip} bestemmes ut fra t_p^+ .

Sammenhengen som er brukt mellom t_p^+ og t_{ip} ved utarbeidelsen av modeller i AMRISK, er formel (3.26). I virkeligheten er forholdet mellom disse størrelsene avhengig av trykket slik figur A.5 viser for TNT-ladninger og sfæriske sjokkbølger.



Figur A.5 Forhold mellom sjokkbølgens impulsmessige varighet, t_{ip} og varighet t_p^+ som funksjon av frontrykket for TNT-ladninger [50] (empiriske verdier) og sfæriske sjokkbølger i luft [12] (numeriske verdier)

Avviket mellom verdiene i figur A.5 og det antatte forholdet på $2/3$ vil ha betydning særlig ved høye trykk. Funksjonen for det beregnede forholdet er

$$\frac{t_{ip}}{t_p^+} = 2 \left[\frac{a}{i^2} (e^{-i} + i - 1) + \frac{b}{j^2} (e^{-j} + j - 1) \right] \quad (\text{A.3})$$

med parametere gitt i (6.3).

På tilsvarende måte kan det ses på hvor godt det antatte forholdet mellom dynamisk impuls og $p^{5/3} t_{ip}$ (formel (3.25)) er. Ved utledningen av de gamle virkningsmodellene ser imidlertid $p^{5/3} t_{ip}$ ikke ut til å være beregnet fra den dynamiske impulsen, men fra trykkimpulsen ($1/2 p t_{ip}$) og trykket. Når t_{ip} beregnes fra p og $p^{5/3} t_{ip}$, vil verdiene derfor være riktige hvis virkningsmodellene gir korrekte verdier.

For eksisterende skademodell for kjøretøy kan det stilles spørsmål om forsøksverdiene for $p^{5/3} t_{ip}$ som er funnet fra verdier for dynamisk impuls, virkelig er de samme størrelsene som verdiene bestemt ut fra trykk og varighet. Dersom modellen for dødelighet for mennesker i kjøretøy endres

slik at den også har maksimaltrykk og varighet som inngangsstørrelser, vil imidlertid dette problemet antakelig være løst.

Ved utledning av modellen for tog er verdier for t_{ip} trolig satt til $2/3 t_p^+$. Ved bruk av denne modellen bør derfor dette forholdet brukes i stedet for formel (A.3).