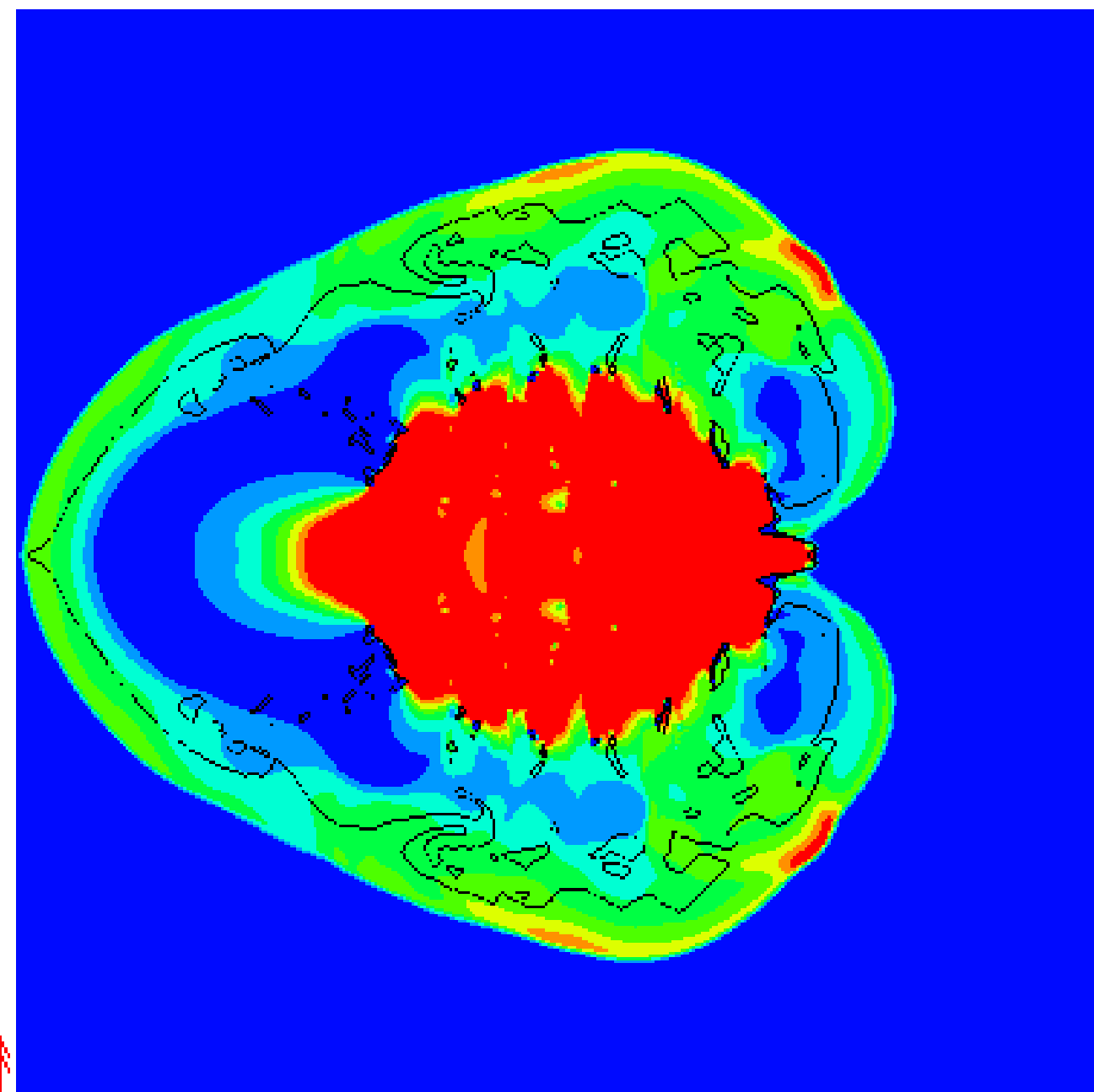


ANDERS BRYNTSE



FOI är en huvudsakligen uppdragsfinansierad myndighet under Försvarsdepartementet. Kärnverksamheten är forskning, metod- och teknikutveckling till nytta för försvar och säkerhet. Organisationen har cirka 1000 anställda varav ungefär 800 är forskare. Detta gör organisationen till Sveriges största forskningsinstitut. FOI ger kunderna tillgång till ledande expertis inom ett stort antal tillämpningsområden såsom säkerhetspolitiska studier och analyser inom försvar och säkerhet, bedömning av olika typer av hot, system för ledning och hantering av kriser, skydd mot och hantering av farliga ämnen, IT-säkerhet och nya sensorers möjligheter.

Anders Bryntse

Numerisk simulering av
tryckfält omkring 15,5 cm
spränggranat: Bofors m/77

Titel	Numerisk simulering av tryckfält omkring 15,5 cm spränggranat: Bofors m/77
Title	Numerical simulation of pressure field around 15.5 cm artillery shell: Bofors m/77
Rapportnr/Report no	FOI-R- -3392--SE
Rapporttyp/ Report Type	R
Sidor/Pages	26 p
Månad/Month	Oktober/October
Utgivningsår/Year	2012
ISSN	1650-1942
Kund/Customer	Försvarsmakten
Projektnr/Project no	E20534
Godkänd av/Approved by	Rickard Forsén

FOI, Totalförsvarets Forskningsinstitut

Avdelningen för Försvars- och säkerhetssystem

164 90 Stockholm

FOI, Swedish Defence Research Agency

Defence & Security, Systems and Technology

SE-164 90

Detta verk är skyddat enligt lagen (1960:729) om upphovsrätt till litterära och konstnärliga verk. All form av kopiering, översättning eller bearbetning utan medgivande är förbjuden

Sammanfattning

I ett delmoment av FM-projektet ”Anläggningsskydd med fokus på internationella insatser” har numerisk simulering av luftstöt våg som uppstår omkring en 15,5 cm spränggranat utförts. Vid beräkningarna användes programmet AUTODYN (Ansys Inc.). Beräknade värden och egenskaper hos tryckfältet har för några fall jämförts med empiriska värden från litteraturen (FortH2 [1], Proctor [2] samt LS2000 [3]).

Avsikten var inte att åstadkomma en exakt modell av granaten, snarare att ta fram en förenklad modell att tillämpa på beräkning av luftstöt vågsbelastning mot olika strukturer, t.ex. byggnadsfasader till en rimlig beräkningskostnad. Med modellen har simuleringar utförts som illustrerar hur tryckvågorna interagerar med markplan och byggnadsfasader i närfältet för några fall med olika höjd, avstånd och infallsvinkel för granaten. I något fall kunde resultaten jämföras med experiment med liknande geometri (Palm [4]).

Från jämförelserna med formler från litteraturen förefaller det troligt att den föreslagna modellen ger en tillräckligt god bild av tryckets amplitud och fördelning omkring den aktuella spränggranaten på avstånd större än ca 1 m för att kunna tillämpas för studier av tryckbelastningar mot intilliggande strukturer.

Det mest slående resultatet av de beräknade tryckbelastningarna mot byggnadsfasader är de återkommande höga belastningarna mot fasadens lägsta delar, vid markplanet. Dessa belastningar har dessutom större utbredning i sidled än belastningen högre upp på fasaden, mitt för den detonerande granaten.

Nyckelord: Explosion, luftstöt våg, granater, byggnader

Summary

As a part of the project “Protective structures with focus on international missions” supported by the Swedish Armed Forces, numerical simulations of air shock waves around the topical 15.5 cm artillery shell were performed. For the simulations, the hydrocode AUTODYN (Ansys Inc.) was used. Calculated results and properties for the pressure field were compared with empirical values from literature (Forth2 [1], Proctor [2] and LS2000 [3]). The intention was not to achieve an exact model of the artillery shell but rather to develop a simple model to apply on calculations of pressure loads on different structures e.g. building facades, at a reasonable computational cost. With the suggested model, some numerical simulations were made that illustrates the pressure load distribution on building facades and its interaction with the ground plane for detonations in the near field. Cases with different height, distance and angle for the incoming shell were simulated. Sample results were compared with reported experiments with similar geometry (Palm [4]).

Comparisons with formulas in the literature indicate that the suggested numerical model is likely to give enough good approximation of the pressure distribution and amplitude around the artillery shell for distances larger than 1 metre from its centre for pressure load studies on adjacent structures.

The most striking result from the calculated pressure loads on building façades is the commonly occurring high loads on the lower part of the façade, near the ground plane. These loads also have a longer horizontal extension than higher up on the façade, at the level where the shell detonates.

Keywords: explosions, air shock waves, artillery shells, buildings

Innehållsförteckning

1	Inledning	6
2	Numerisk modell	7
3	Luftstöt våg från modellerad granat	8
4	Luftstöt vågslast mot byggnadsfasader	12
4.1	90 graders infall.....	13
4.2	45 graders infall.....	14
4.3	30 graders infall.....	15
4.4	15 graders infall.....	16
4.5	Jämförelse 15 och 30 graders infall:.....	16
4.6	Tryckfördelning i sidled	17
5	Diskussion, slutsatser	19
6	Referenser	20
Appendix 1: Ritningar och data om 15,5 cm spränggranat m/77		21
Appendix 2: Tabeller med beräkningsresultat		24

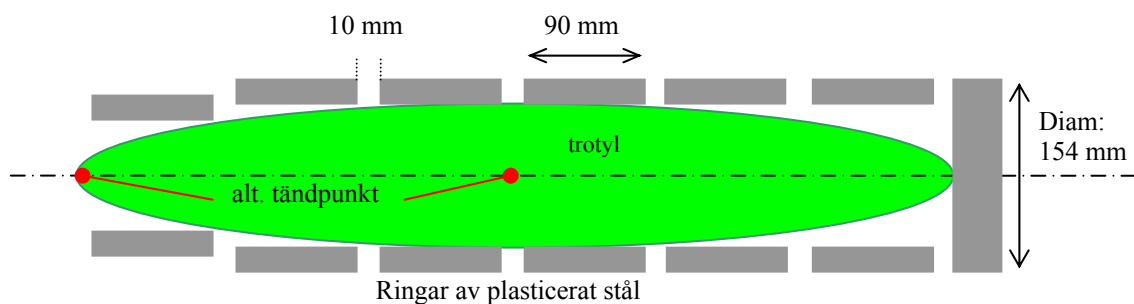
1 Inledning

I ett delmoment av projektet ”Anläggningsskydd med fokus på internationella insatser” har numerisk simulering av luftstöt våg som uppstår omkring rubricerad granat utförts. Vid beräkningarna användes programmet AUTODYN (Ansys Inc.). Beräknade värden och egenskaper hos tryckfältet har för några fall jämförts med empiriska värden från FortH2 [1], Proctor [2] samt LS2000 [3].

Avsikten har inte varit att åstadkomma en exakt modell av granaten, utan att ta fram en förenklad modell att tillämpa på beräkning av luftstöt vågsbelastning mot olika strukturer, t.ex. byggnadsfasader till en rimlig beräkningskostnad. Med modellen har simuleringar utförts som illustrerar hur tryckvågorna interagerar med markplan och byggnadsfasader i närheten för några fall med olika höjd, avstånd och infallsvinkel för granaten. I något fall kunde resultaten jämföras med experiment med liknande geometri (Palm [4]).

2 Numerisk modell

Som en enkel approximation modellerades granaten i 2D axi-symmetri som en ellipsoid av 7.9 kg trotyl, 600 x 124 mm, omgiven av stålringar samt ett massivt "bakstycke" av stål med en sammanlagd vikt av 29.5 kg, figur 1. För stålet användes en förenklad materialmodell utan hållfasthet: "Floatsteel". Antagandet är att stålet i initialskedet omedelbart plasticeras av det mycket höga trycket (GPa) men påverkar luftstöt vågen genom att absorbera rörelseenergi från den expanderande trotylgasen. Vid de extrema trycken och töjningshastigheterna är materialmodellens hållfasthetsparametrar närmast försumbara, endast densiteten är då betydelsefull. Masströgheten gör att ringarna ändå behåller sin form några tiotal mikrosekunder medan den expanderande trotylgasen läcker igenom springorna mellan ringarna. Detta gasflöde, tillsammans med den undanträngda komprimerade luften utanför ringarna bildar där en luftstöt vågsfront. Tändning av trotylen skedde alternativt i framkanten ("nosen") eller i ellipsoidens centrum.



Figur 1. Numerisk modell av 15.5 cm spränggranat: en ellipsoid av trotyl med ett hölje av 6 stålringar, längd 90 mm c/c 100 mm: 5 med $D_y/D_i=154/124$ mm, en $D_y/D_i=124/94$ mm (främre ring) samt ett massivt "bakstycke" $D=154$ mm, $t=20$ mm. Jfr ritning, Appendix 1.

Den bildade luftstöt vågen i 2D kunde därefter mappas* (kopieras) till en 3D-modell varefter beräkningarna fortsattes. I beräkningarna användes Euler-multimaterial-processorer för såväl 2D som 3D. Vid inmappningen i 3D kunde materialet för stål tas bort eftersom det utgör en försumbar del av volymen; ett par dm^3 i förhållande till 100-tals m^3 i en 3D-modell med strukturer liknande en byggnad med omgivande luftvolym.

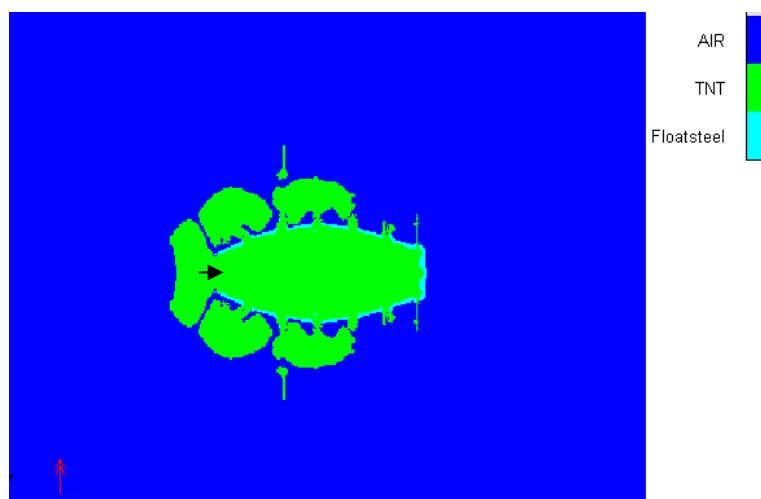
Vid utformningen av modellen testades även ett större avstånd mellan ringarna (20 mm) som visserligen medförde att luftstöt vågsfronten utanför ringarna utbildades snabbare, men gav lägre absorption av rörelseenergi hos höljesmaterialet medförande mindre realism hos modellen. I den volym där modellen placeras krävs en tillräckligt tät elementindelning för att rätt modellera gasflödet mellan ringarna. Den 2D axisymmetriska Euler-grid som användes initialt för granatmodellen med omgivande luft hade elementstorleken 5x5 mm.

Materialmodellen för "**Floatsteel**" enligt ovan, saknade hållfasthet; bulkmodulen sattes till 10 GPa (linjärt) och densiteten till 7800 kg/m^3 . Bulkmodulen visade sig kunna varieras inom vida gränser (1-10 GPa) utan nämnvärd inverkan på material- och tryckfördelningen i figur 2 och 3 nedan (jfr en modell för vatten i AUTODYN:s materialbibliotek med bulkmodul= 2.2 GPa). **Trotyl** hämtades från AUTODYN:s materialbibliotek. **Luft** (vid NTP, 100 kPa, 0°C) modellerades som idealgas med $C_p/C_v=1.4$, densitet 1.3 kg/m^3 samt med inre energin 0.1925 MJ/kg .

* Anm: med "mappning" (från engelskans mapping) menas att resultat (värden) från ett antal celler i en yta eller volym i en beräkningsgrid läses av och skrivs in i en liknande yta eller volym på annan plats eller i en annan grid där t.ex. ett större område med strukturer modellerats (byggnader etc.) för fortsatt beräkning. Metoden är välkänd inom numerisk simulering och ger förbättrad beräkningsekonomi och precision.

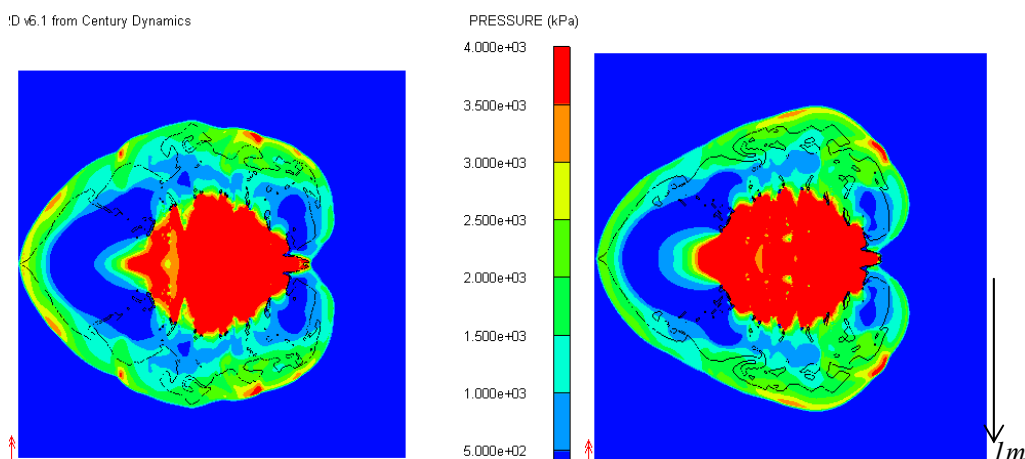
3 Luftstöt våg från modellerad granat

Som verifiering av modellen gjordes beräkningar i 2D axisymmetrisk geometri, med och utan hölje. I 2D-beräkningarna placerades en granatmodell enligt figur 1 i mitten av en cirkulär cylindrisk luftvolym med höjden 2 m och radien 1 m. Figur 2 visar i närbild situationen efter 0.1 ms där spränggaserna läcker ut mellan de deformerade stålringarna.



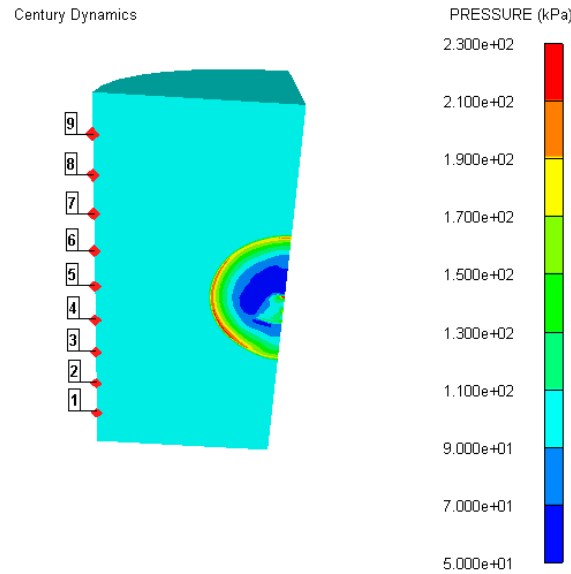
Figur 2. Materialfördelning efter 0.1 ms med tändpunkt i modellens nos (svart pil)

Figur 3 visar tryckfördelningen i hela luftvolymen efter 0.3 ms för de två olika tändpunkterna för granatmodellen: i nosen respektive i centrum. Som framgår bildas förhållandevis jämna stöt vågsfronter 0.8 - 1 m från laddningen, dock varierar frontens amplitud som funktion av vinkeln och är starkast snett bakåt i modellen med tändning i nosen.



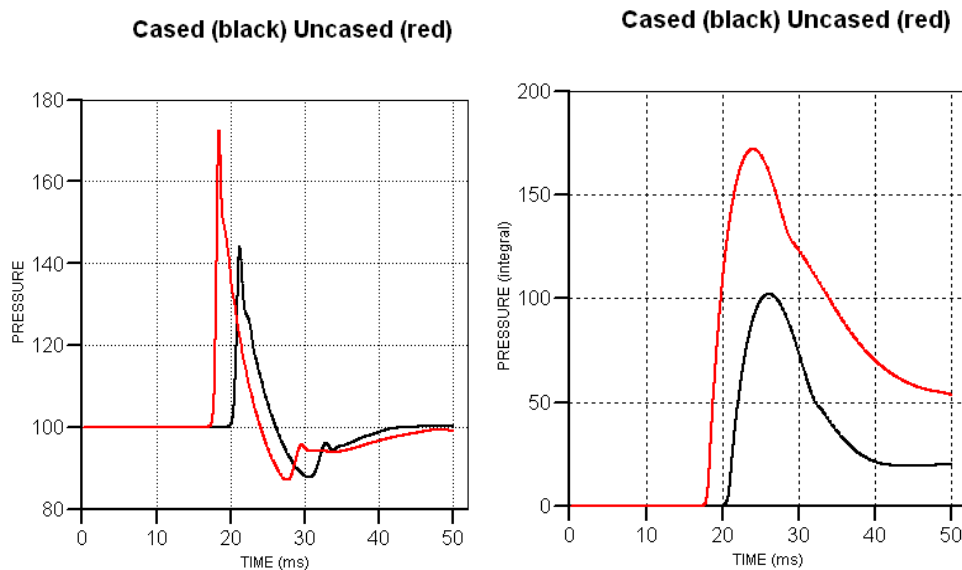
Figur 3. Tryckfördelning efter 0.3 ms, t.v. tändning i granatens centrum, t.h. tändning i nosen.

Resultatet efter 0.3 ms mappades in i centrum av en större luftfylld cylindrisk modell med höjden 20 m och radien 10 m. Figur 4 visar tryckfördelningen efter 5 ms för en $\frac{1}{4}$ sektor av cylindern. Sidorna utgjorde reflexionsyta och försågs med simulerade mätpunkter på höjderna 2-18 m, numrerade 1-9 i figuren. Cylinderns övre och undre yta försågs med flödesgränser motsvarande fri luft.



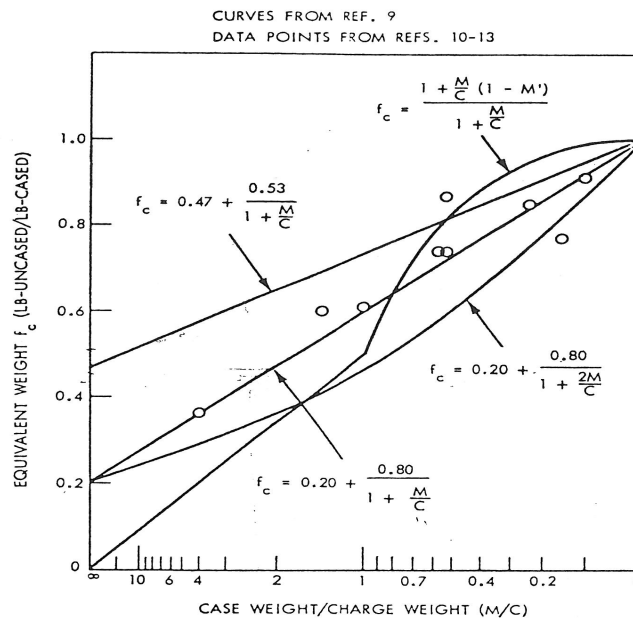
Figur 4. Stötvågsutbredning efter 5 ms. Granatmodellen var placerad med nosen nedåt och dess centrum i mitten, dvs. 10 m över nedre ytan. Tändpunkt i modellens nos.

I figur 5 jämförs reflekterade tryck- och impulstäthetskurvor i mät punkt 5 för fallen med/utan stålringar runt laddningen (tändning i centrum). Med reflekterad impuls kan en ganska god jämförelse av laddningarnas energiinnehåll erhållas. Jämförelsen i mät punkt 5 visade sig representativ för de övriga mätpunkterna som gav liknande resultat, se nedan.



Figur 5. Reflekterat tryck (kPa) och impulstäthet (Pas) i mät punkt 5 för geometrin i figur 4. Svart kurva: **med** stålringar, röd kurva **utan** stålringar.

Proctor [2] har sammanställt några föreslagna formler för ”ekvivalent laddningsvikt” för höljesladdningar utgående från kvoten mellan höljets och sprängämnets vikt M/C , figur 6.



Figur 6. Några föreslagna formler för höljesladdningars ekvivalensfaktor (Proctor [2]).

Formeln $f_c = 0.47 + 0.53/(1 + M/C)$ rekommenderas av Proctor om kvoten $M/C > 0.53$ och refereras ofta till i FOI:s rapporter.

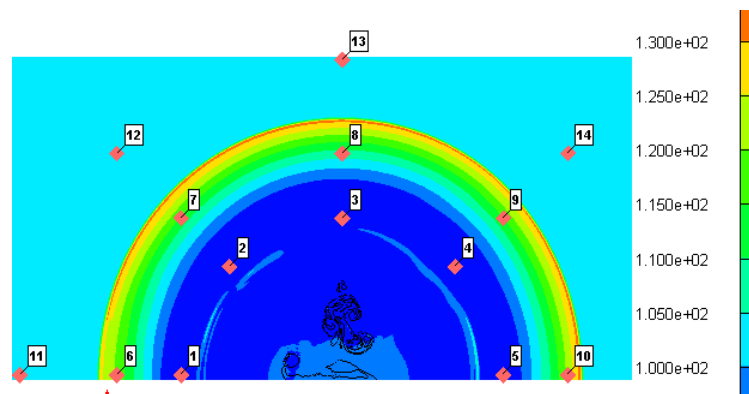
Granatens värden för massa och laddning 29.5 / 7.9 ger ekvivalent laddningsvikt = 0.58.

Impulstätheternas maxvärden för mätpunkt 5 i figur 5 avläses; kvoten är $102/172 = 0.59$.

För mätpunkt 1-9: 0.66, 0.65, 0.65, 0.62, 0.59, 0.57, 0.57, 0.57, 0.56. Medelvärde = 0.60.

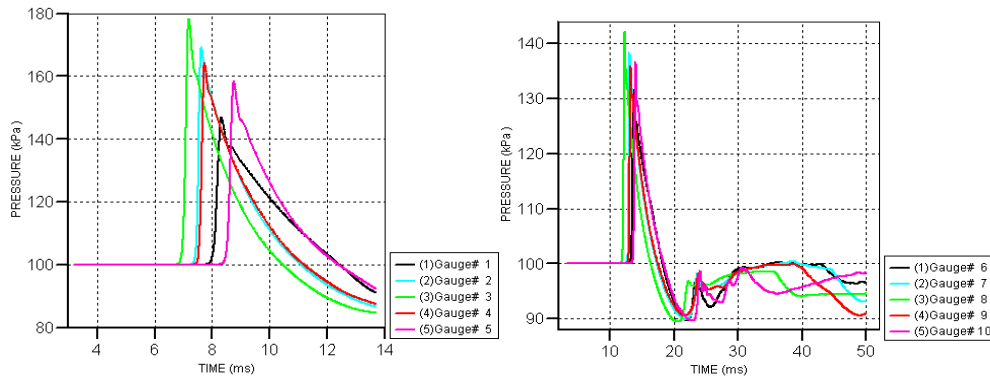
Slutsatsen av ovanstående jämförelse är att den föreslagna modellen med "ringar av flytande stål" runt en ellipsoidformad trotylladdning bör ge en någorlunda god bild av tryckets amplitud och fördelning för den aktuella spränggranaten för avstånd större än ca 1 m från dess centrum.

För att närmare studera vågfrontens utseende och förändring med avståndet utfördes en ny beräkning med ovanstående cylindriska luftvolym med 20 m höjd och 10 m radie, nu med flödesgränser föreställande fri luft på samtliga begränsningsytor och med mätpunkter placerade radiellt från granatens centrum på avstånden 5, 7 och 10 m, figur 7. Det framgår att stötvågen är nära sfärisk efter 15 ms och vid avståndet 8 m från detonationspunkten.



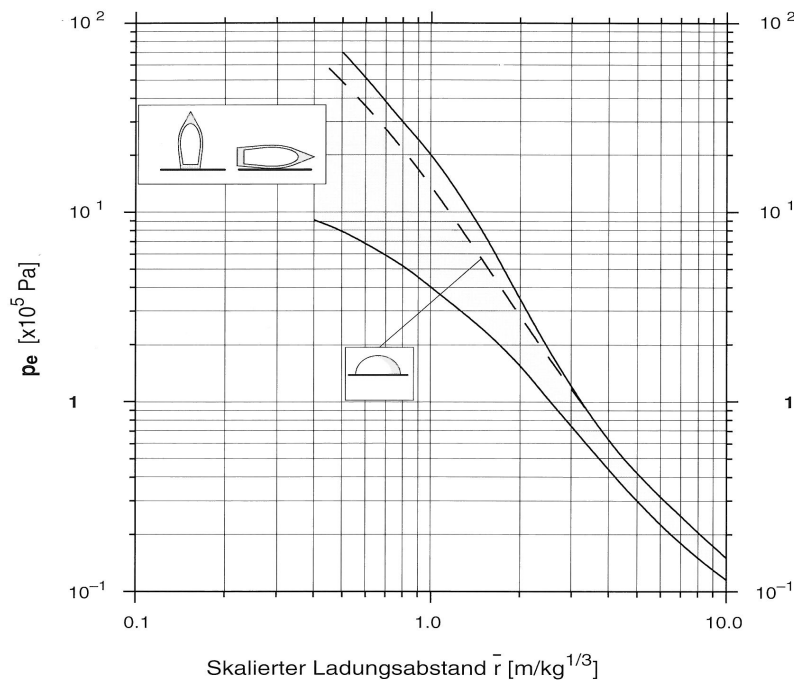
Figur 7. Tryckfördelning i luftvolym efter 15 ms med mätpunkter 5, 7 och 10 m från granatens centrum.

Av figur 8 framgår dessutom att för mätpunkterna på 7 m avstånd har kurvskaran ganska lika amplitud. Vid 7 m är "skalade avståndet" $R/Q^{1/3} = 3.5 \text{ m/kg}^{1/3}$ för 7.9 kg trotyl.



Figur 8. Tryck från mätpunkter 5 m (vå.) samt 7 m (hö.) från laddningens centrum.

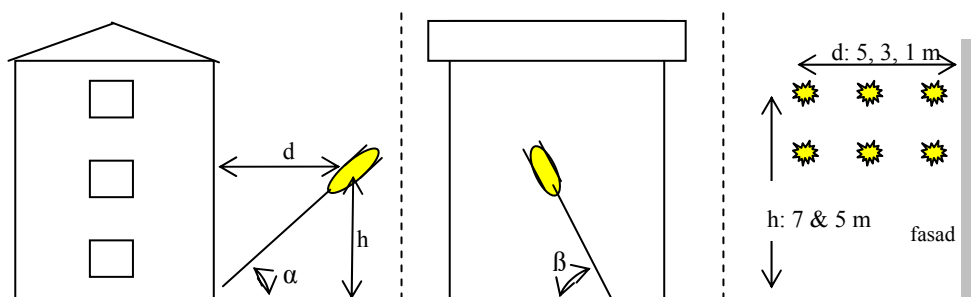
Från LS2000 [3] har figur 9 hämtats, som visar tryck som funktion av skalat avstånd för granatliknande laddningar som vid olika orientering (liggande/stående) jämförs med en halvsfärisk laddning. De framgår att för skalade avstånd över $3 \text{ m/kg}^{1/3}$ ansluter kurvorna för halvsfär och stående granat till varandra, medan kurvan för liggande granat visserligen har samma lutning efter ca $3.5 \text{ m/kg}^{1/3}$ men då har värden ca 25 % under de övriga.



Figur 9. Tryck som funktion av skalat avstånd för granatliknade laddning. Från [3].

Figur 9 är alltså inte i enlighet med beräkningarna ovan på så sätt att alla tre kurvorna borde gå samman för stora skalade avstånd. Förklaringen kan vara att kurvorna i figur 9 tagits fram empiriskt dvs. med experiment med på mark liggande och stående laddningar. Vid explosionen kan marken absorbera betydligt mer energi för den liggande laddningen än för den stående pga. den större kontaktytan samt den initialt intensiva stötvågsfrontens friktion mot en möjligen ojämn och mjuk markyta.

4 Luftstötvågslast mot byggnadsfasader



Figur 10. T.v. principskiss, t.h. placering av granater framför fasaden i beräkning 11-19.

Granatmodellen kan tänkas detonera vid olika höjd h , avstånd d och infallsvinklar (α , β) intill en husvägg (fasad) enligt principskiss i figur 10. Vid simuleringarna användes AUTODYN:s 3D Euler-Goudonov multimaterial-processor. Med ca 1.5 miljoner element modellerades luftvolymen upp till $H \times B \times L = 10 \times 10 \times 10$ m (symmetri i fasadens bredd). Elementen bestod huvudsakligen av kuber med 60 mm sida, något större i modellens ytterområden. Fasad och markplan modellerades (för infallsvinklar andra än 90 grader) som två solida plattor placerade i olika vinklar i luftvolymen, dock alltid vinkelrätt mot varandra eftersom inmappningen av granaten 2D->3D måste ske rakt i endera x- y- eller z-riktningen. Fasadens höjd var 4-8 m, bredden 6-10 m. För att efterlikna realistiska fall lades fokus på infallsvinklarna 15 - 30° och höjden 5 - 7 m. I de redovisade beräkningarna antogs granaten stillastående relativt omgivande luft vid detonationen, men beräkningar utfördes även med realistisk hastighet på 250 m/s för fallen med infallsvinkeln 15°. För nedre delen av fasaden och åt sidorna var förändringarna högst 10 %, men för de kortare avstånden 1 och 3 m ökade tryck- och impulsvärdena med ca 20 % i mätpunkterna rakt framför nosen.

Tabell 1. Beräkningsfall med små skalade avstånd

Beräkning nr	h [m]	d [m]	α [grader]	β [grader]	Skalat avstånd vägg [m/kg ^{1/3}]	Tändpunkt
7	1.0	1.5	90	90	0.75	nos
8	0.5	1.5	90	90	0.75	- " -
9	0.5	1.0	90	90	0.50	- " -
10	1.0	1.0	45	90	0.50	- " -

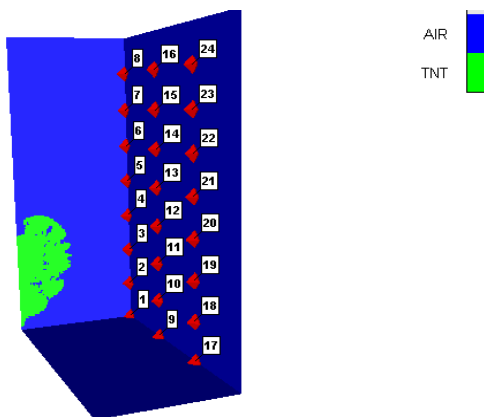
Tabell 2. Beräkningar för fall som bedömts realistiska: 15-30°, höjd 5-7m, avstånd 1-5 m.

Beräkning nr	h [m]	d [m]	α [grader]	β [grader]	Skalat avstånd vägg [m/kg ^{1/3}]	Tändpunkt
11	5	3	30	90	1.5	nos
12	5	5	30	90	2.5	- " -
13	7	3	30	90	1.5	- " -
14	5	3	15	90	1.5	- " -
15	7	3	15	90	1.5	- " -
16	7	1	15	90	0.5	- " -
17	5	5	15	90	2.5	- " -
18	7	5	15	90	2.5	- " -
19	5	1	15	90	0.5	- " -

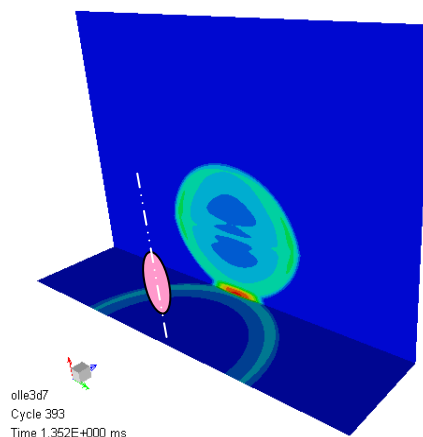
I Appendix 2 redovisas topptryck och impulstäthet i simulerade mätpunkter på modeller av husfasader för samtliga beräkningar. I avsnitt 4.1 - 4.6 nedan visas situationsbilder av tryckfördelning och trycktidkurvor för några belysande fall med kommentarer.

4.1 90 graders infall

Figur 11 visar en geometri med en 4 m hög vägg med 24 simulerade mätpunkter, c/c 0.5 m i höjddled och c/c 1.0 m i sidled. Laddningen är placerad med 90 graders vinkel med centrum på höjden 1 m och på 1.5 m avstånd till väggen; skadat avstånd $0.75 \text{ m/kg}^{1/3}$.

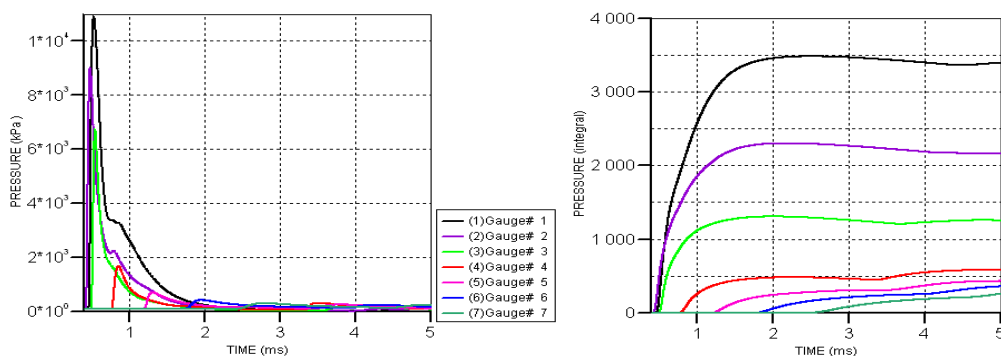


Figur 11. Beräkning 7: $1/2$ -geometri med mätpunkter på 4 m hög, 6 m bred vägg.



Figur 12. Tryckfördelning efter 1.35 ms för beräkning nr 7.

Beräkningarna med $\alpha = \beta = 90$ graders infallsvinklar kunde i någon mån jämföras med experiment beskrivna av Palm [4] med avlång 3.6 kg trotylcylindrar stående framför en $1.4 \times 2.0 \text{ m}$ betongplatta. Försöket var en $1/2$ -skalmodell av en skyddsrumsvägg ovan jord. De skalade avstånden var 0.5 och $2.0 \text{ m/kg}^{1/3}$, där $0.5 \text{ m/kg}^{1/3}$ uppvisade en mycket ojämn tryck- och impulsfördelning över betongplattan: 50 mm ovan marken mitt för laddningen var topptrycket 60 MPa men 400 mm högre upp endast ca 6 MPa. Detta kan förstås av tryckfördelningen i figur 12 ovan. Det framgår hur reflexionerna från markytan och väggytan i ett visst tidsmoment (1.3 – 1.4 ms efter detonation) interagerar och förstärks på väggytan strax ovanför markplanet. I figur 13 visas tryck och impulstäthet för beräkning nr 9 med granaten endast 1 m från väggen, höjd 0.5 m, vilket är i närheten av Palms experiment avseende skadat avstånd.

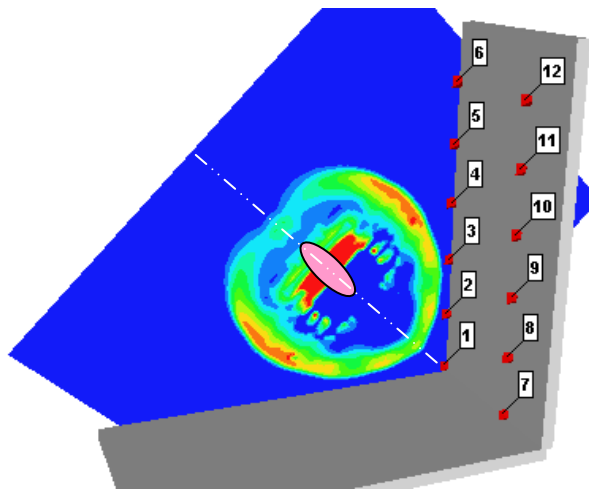


Figur 13. Beräkning 9. $R/Q^{1/3}=0.5$, tryck (kPa) och impulstäthet (Pas) för givare nr 1 - 7, $h=0.1-3.0 \text{ m}$.

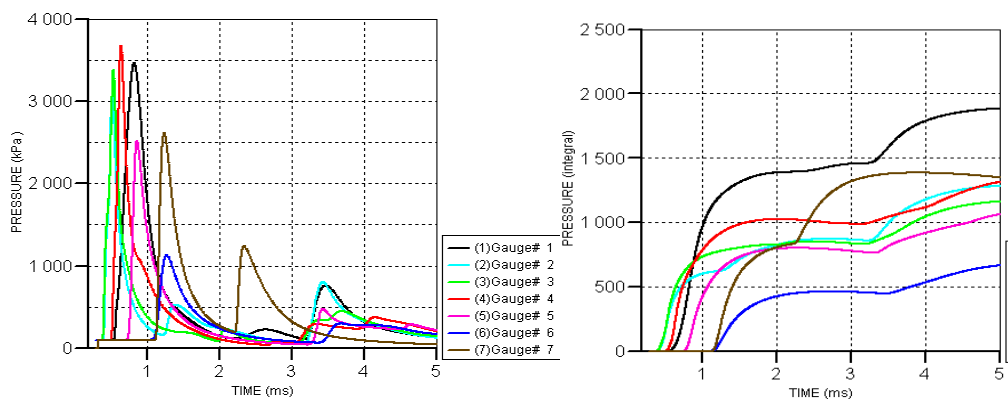
Palm analyserar även en betongväggs respons för denna typ av belastningsfall med FEM, och i [5] beskrivs motsvarande fullskaleförsök utfört med 31 kg trotylladdningar och flygbomber typ MK82 mot en byggnad (Räddningscentral-90). Vid ett försök med en stående 31 kg trotylcylinder 1.5 m från en av byggnadens sidoväggar observerades deformationer på flera cm nära markytan hos den 30 cm tjocka kraftigt armerade väggen.

4.2 45 graders infall

För beräkning 10 med 45° infallsvinkel framgår (figur 14-15) att tryckskillnaderna över väggytan nu är betydligt mindre än för beräkning 9 ovan med 90° infall och med samma $R/Q^{1/3}$

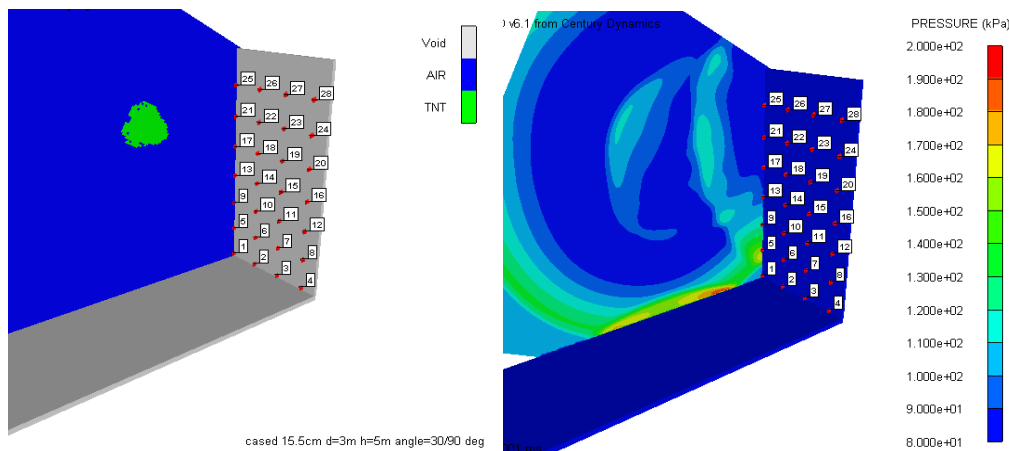


Figur 14. Beräkning 10 med 45° infall. Både höjd och avstånd till vägg: 1 m, $R/Q^{1/3} = 0.5$.



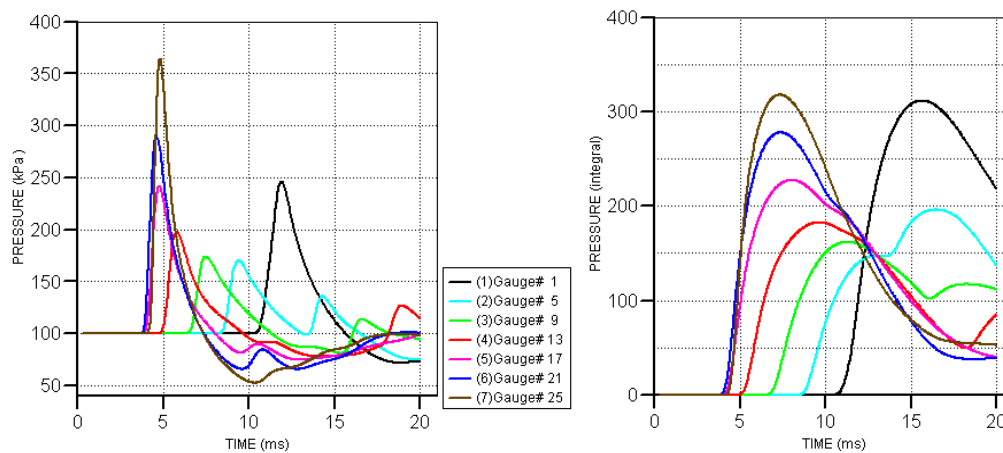
Figur 15. Beräkning 10 med 45° infall. Både höjd och avstånd till vägg: 1 m, $R/Q^{1/3} = 0.5$. Tryck (kPa) och impulstäthet (Pas) för givare nr 1 – 6 placerade mitt för laddningen på höjderna 0.1-2.5 m samt givare 7 placerad på $h = 0.1$ m och 1 m i sidled, enl. figur 14.

4.3 30 graders infall



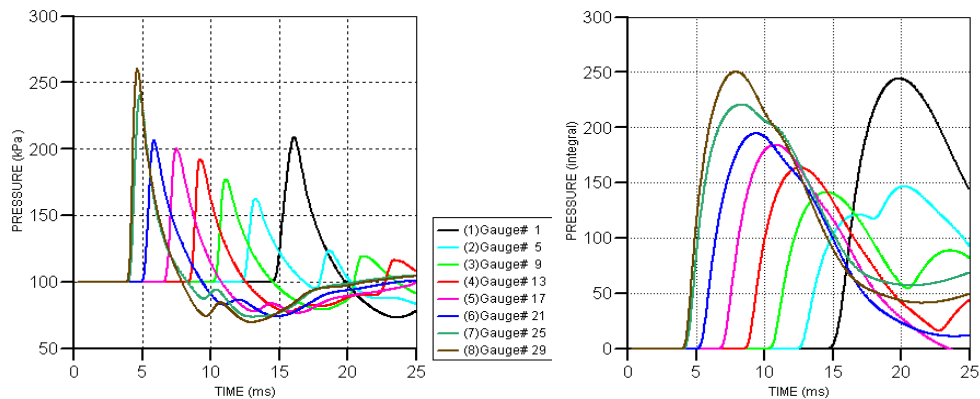
Figur 16. Beräkning 11 med 30° infallsvinkel vid 0.3 ms (vä) och 10 ms (hö). Granatens höjd 5 m, avstånd till vägg 3 m.

Av figur 16 framgår att vid reflexionerna mot mark- respektive fasadytan uppstår Machvågor (röd- och gulfärgade pga. höga tryck) vilka rör sig mot hörnet mark-fasad och adderas. Detta höjer tryck och varaktighet i mät punkt 1 där, vars impulstäthet t.o.m. når värden som liknar de i mät punkt 21 och 25 mitt för laddningen, se figur 17, höger bild.



Figur 17. Beräkning 11: tryck och impulstäthet (Pas) för givare nr 1, 5, 9, 13, 17, 21, 25 placerade i fasadens mittlinje på höjderna 0.1, 1, 2, 3, 4, 5, 6 m.

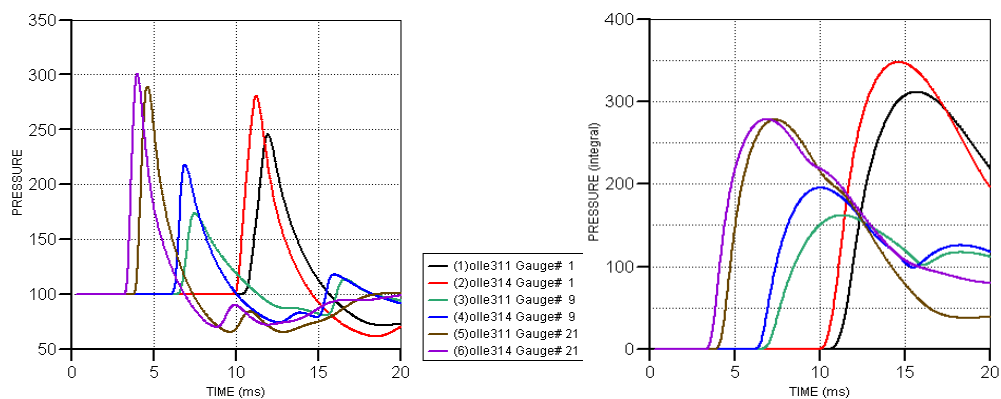
4.4 15 graders infall



Figur 18. Beräkning nr 15: Granatens höjd 7 m, avstånd 3 m. Tryck (kPa) och impulstäthet (Pas) för givare nr 1, 5, 9, 13, 17, 21, 25, 29 i fasadens mittlinje på höjderna 0.1, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 m.

Av figur 18 framgår att trots den höga detonationshöjden på 7 m uppstår fortfarande tryck och impulstätheter i mätpunkten nära markplanet som är i nivå med värdena mitt för granaten på 7 m höjd. Skillnaden mot beräkning 11 i figur 16 är, förutom granatens höjd, infallsvinkeln på 15 grader istället för 30 grader. Med vinkeln 15 grader blir den kraftigare delen av stötvågsfronten (se figur 3 sid.8) mer riktad mot marken och en svagare del mot fasaden. Detta förklarar att skillnaden mellan värdena vid markplanet och mitt för granaten är så liten trots att höjden för granatens detonation ökats från 5 till 7 m. Observera även att maxvärdena är lägre för 7 m: toppvärden på impulstäthet är ca 250 Pas mot 320 för 5 m.

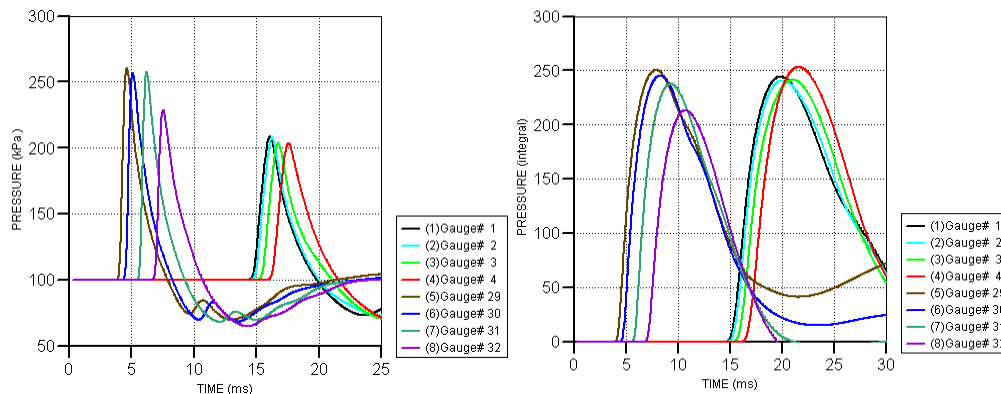
4.5 Jämförelse 15 och 30 graders infall:



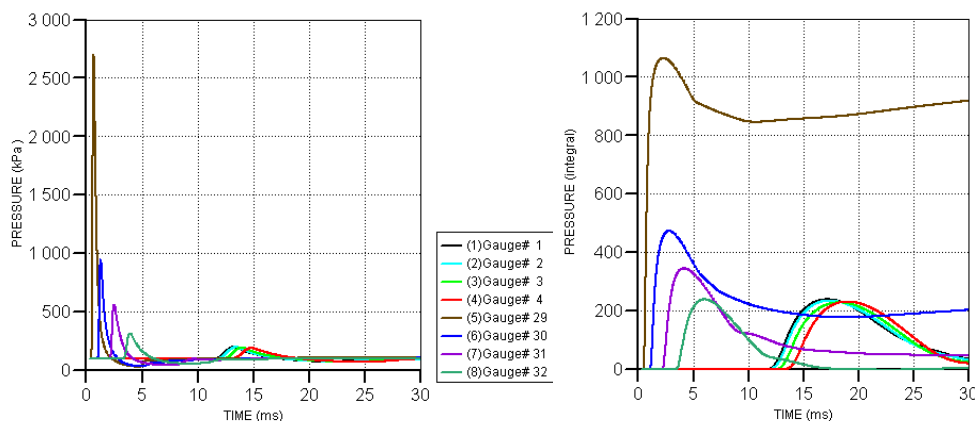
Figur 19. Beräkning nr 11(30°) och 14 (15°): Granatens höjd 5 m, avstånd 3 m. Tryck (kPa) och impulstäthet (Pas) för givare nr 1, 9, och 21 i fasadens mittlinje på höjderna 0.1, 2 och 5 m.

Figur 19 illustrerar skillnaden mellan 30 och 15 graders infall med beräkning nr 11 och 14 som i övrigt har samma geometri. I enlighet med resonemanget ovan ger vinkeln 15° något högre tryck och impulstäthet på fasaden nedanför granaten. Motsatsen gäller för mätpunkterna 1 m ovanför granaten, på 6 m höjd, där 30° ger något högre värden (visas ej i figur 19 men framgår av tabell för resp. beräkning i Appendix 2).

4.6 Tryckfördelning i sidled



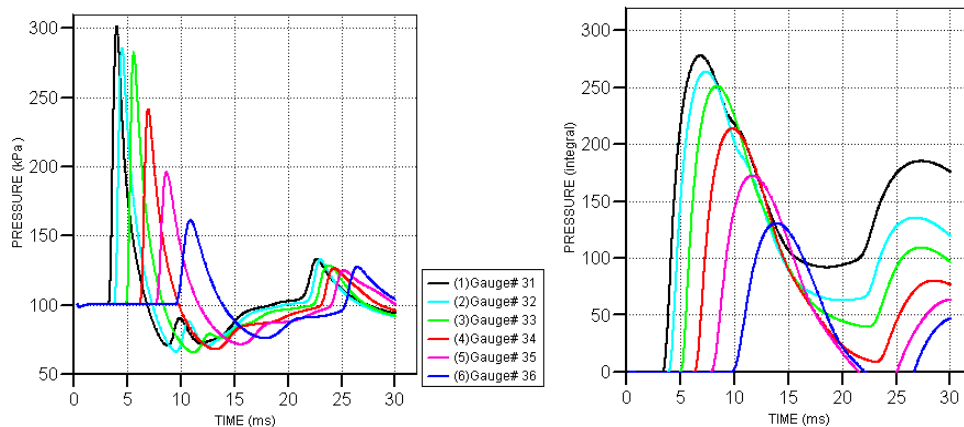
Figur 20. Beräkning 15: Granatens höjd 7 m, avstånd 3 m. Tryck (kPa) och impulstäthet (Pas) 0, 1, 2, 3 m i sidled, på höjderna 0.1 och 7 m (givare nr 1, 2, 3, 4 och 29, 30, 31, 32)



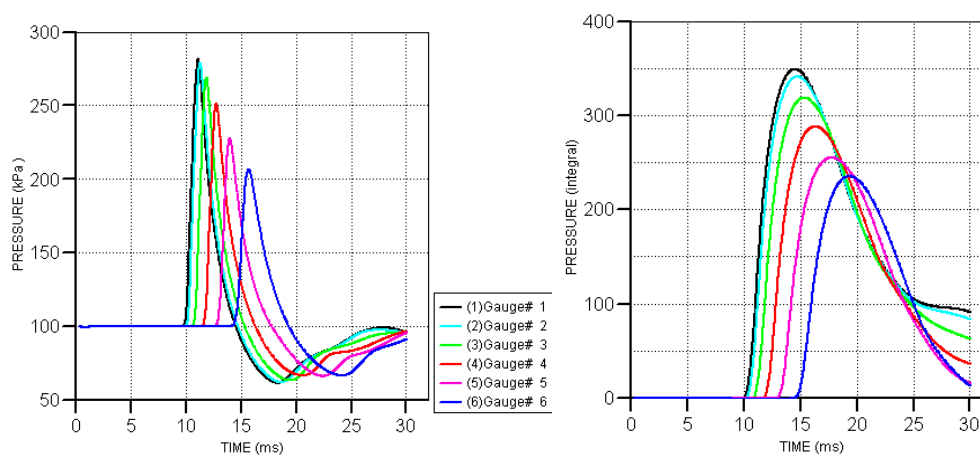
Figur 21. Beräkning 16: Granatens höjd 7 m, avstånd 1 m. Tryck (kPa) och impulstäthet (Pas) 0, 1, 2, 3 m i sidled, på höjderna 0.1 och 7 m (givare nr 1, 2, 3, 4 och 29, 30, 31, 32)

Med figur 20 och 21 från beräkning 15 resp. 16 illustreras fördelningen av tryck- och impulstäthet längs fasaden i sidled 0.1 - 3 m på två höjder: nära marken ($h = 0.1$ m) samt mitt för granaten ($h = 7$ m). Stora skillnader uppstår i sidled i granatens höjdnivå när den detonerar på kort avstånd till väggen (1m); betydligt mindre skillnader uppstår vid 3 m avstånd. Nära marknivå är skillnaderna små, både i sidled och mellan de båda granat-placeringarna: i båda fallen och för samtliga mätpunkter där är impulstätheten ca 250 Pas.

Detta illustreras ytterligare i figur 22-23 nedan från beräkning 14 där givare i sidled upp till 5 m från mittlinjen på höjden 5 m (mitt för granaten) och vid markplanet (0.1m) visas. Av figur 23 framgår att vid den något lägre granathöjden (5 m mot 7 m i figur 20, i övrigt samma geometri) avtar impulsen vid markplanet ändå märkbart för de större avstånden åt sidan (3, 4, 5 m, röd-lila-blå kurva). På granatens höjdnivå (5 m) är avtagandet av tryck och impulstäthet åt sidan mycket tydligt, figur 22.



Figur 22. Beräkning 14: Granatens höjd 5 m, avstånd 3 m. Tryck(kPa) och impulstäthet (Pas) vid 0, 1, 2, 3, 4, 5 m i sidled, på höjden 5 m (givare nr 31, 32, 33, 34, 35, 36).
Anm: topparna på tryckkurvorna omkring 25 ms orsakas av reflexion från markplanet.



Figur 23. Beräkning 14: Granatens höjd 5 m, avstånd 3 m. Tryck (kPa) och impulstäthet (Pas) vid 0, 1, 2, 3, 4, 5 m i sidled vid markplanet, höjd 0.1 m (givare nr 1, 2, 3, 4, 5, 6).

Slutligen bör påpekas att den begränsade antalet celler (ca 1.5 miljoner) som användes i 3D-beräkningarna för att få rimliga beräkningstider troligen orsakat en allmän sänkning av max- värdena, speciellt för topptrycken men även impulstätheterna med upp till 20-30 %. Detta framgår vid granskning av uppgångarna på trycktidkurvorna i figurerna 13-15 och 17-23, som enligt teori för luftstöt vågor bör vara mycket branta och nå sina max-värden inom mikrosekunder [6]. Beräkningarna bör ändå kunna tillämpas för de jämförelser som redovisas ovan och i Appendix 2, samt för att tydliggöra slutsatserna i kapitel 5 nedan.

5 Diskussion, slutsatser

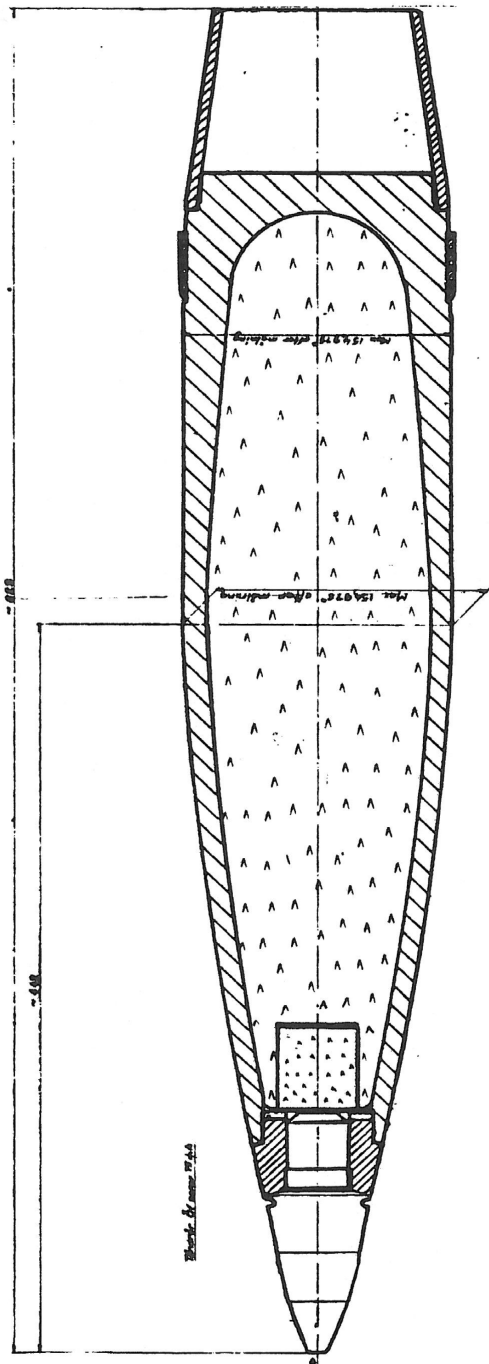
Från jämförelserna i kapitel 3 av luftstöt vågorna från den simulerade granaten med formler från litteraturen förefaller det troligt att den föreslagna modellen med ”ringar av flytande stål” runt en ellipsoidformad trotylladdning ger en tillräckligt god bild av tryckets amplitud och fördelning omkring den aktuella spränggranaten för att kunna tillämpas vid beräkningar av tryckbelastningar på strukturer i närområdet på avstånd större än ca 1 m från granatens centrum

Det mest slående resultatet av de beräknade tryckbelastningarna mot fasader i kapitel 4 är de återkommande höga belastningarna mot fasadens lägsta delar, vid markplanet. Orsaken är den Machvåg som uppstår då luftstöt vågen reflekteras mot markytan och som rör sig mot fasadens nedre del och där samverkar med motsvarande Machvåg som rör sig uppifrån och nedåt utefter fasaden (illustreras i figur 16). Dessa belastningar har dessutom större utbredning i sidled än belastningen högre upp på fasaden, mitt för den detonerande granaten. I verkligheten kan dock fenomenet bli mindre markant eftersom reflexionen mot markytan och vågutbredningen där kan dämpas av mjuka och ojämna underlag, t.ex. jord, stenar, växtlighet mm.

6 Referenser

- [1] "FortH2" Fortifikationshandbok del 2, Överbefälhavaren, Stockholm 1991. Speciellt kap. 4 "Verkan av luftstöt våg".
- [2] Proctor, J.F. "Internal Blast Damage Mechanisms Computer Program", Naval Ordnance Lab 72-231, Maryland 1972.
- [3] Anet B., Binggeli E. "LS2000- Luftstossphänomene Infolge Nuklearer und Konventioneller Explosionen", Kapitel 3.6 "Konventionelle Munition" AC-Laboratorium Spiez, Schweiz 1998.
- [4] Palm J. "Finite Element Analysis of Civil Defence Shelter Subjected to Blast Load" FortF Report A2:89, 1989.
- [5] Wirén, T. "Vapenverkan mot RC 90", Publikation T49-296/92, Räddningsverket, 1992.
- [6] Kinney G. J., Graham K. F. "Explosive Shocks in Air" Second edition, Springer-Verlag N.Y. 1985

Appendix 1: Ritningar och data om 15,5 cm spränggranat m/77



15.5 cm sgr m/77 smst AB Bofors ritn 3047800 1976-03-30

Granathylsa	29.585 kg
Gördel	0.890 kg
Pipebricka	0.080 kg
Kjol	2.560 kg
Toppskruv	0.800 kg
Sprängladdning trotyl	7.870 kg
Sprängladdning hexotol	8.410 kg
Initialladdning (endast m/77T)	0.140 kg
Totalt	m/77T 41.925 ± 1.125 kg
	m/77H 42.325 kg
Tändrör öf zonar 75 mk	0.775 kg
Komplett granat m/77T	42.700 kg
	m/77H 43.100 kg

34
Fig 1

Appendix 2: Tabeller med beräkningsresultat

Tabellerna innehåller topptryck (övertryck) och impulstäthet på de simulerade fasaderna. Mer information om de olika beräkningsfallen finns i tabell 1 och 2 i kapitel 4, sidan 12.

Beräkning nr 7. $h/d = 1.0/1.5 \text{ m}$, $\alpha = 90^\circ$

Höjd [m]	Topptryck /impulstäthet [kPa / Pas]		
	Sidled: 0 m	1 m	2 m
3.0	262 / 218	257 / 215	218 / 202
2.5	500 / 287	446 / 276	306 / 240
2.0	1175 / 464	915 / 400	415 / 303
1.5	2325 / 855	1615 / 615	535 / 386
1.0	3005 / 1205	1945 / 835	590 / 460
0.5	2335 / 1040	1585 / 825	570 / 565
0.05	4830 / 1860	3445 / 1435	1130 / 755

Beräkning nr 8. $h/d = 0.5/1.5 \text{ m}$, $\alpha = 90^\circ$

Höjd [m]	Topptryck /impulstäthet [kPa / Pas]		
	Sidled: 0 m	1 m	2 m
3.0	198 / 208	195 / 196	184 / 142
2.5	315 / 260	303 / 258	258 / 235
2.0	594 / 328	515 / 323	360 / 304
1.5	1425 / 523	1065 / 472	510 / 383
1.0	2815 / 995	1785 / 764	820 / 507
0.5	3585 / 1590	2950 / 1170	1075 / 655
0.05	5525 / 2155	3625 / 1450	1245 / 730

Beräkning nr 9. $h/d = 0.5/1.0 \text{ m}$, $\alpha = 90^\circ$

Höjd [m]	Topptryck /impulstäthet [kPa / Pas]		
	Sidled: 0 m	1 m	2 m
3.0	200 / 184	194 / 165	175 / 83
2.5	320 / 252	311 / 247	258 / 201
2.0	595 / 370	545 / 377	350 / 300
1.5	1560 / 547	1010 / 522	460 / 415
1.0	6630 / 1305	2735 / 764	645 / 515
0.5	8930 / 2300	3590 / 1190	995 / 620
0.05	10820 / 3480	5135 / 1615	1110 / 695

Beräkning nr 10. $h/d = 1.0/1.0 \text{ m}$, $\alpha = 45^\circ$

Höjd [m]	Topptryck / impulstäthet [kPa/Pas]	
	Sidled: 0 m	1.0 m
2.5	1025 / 750	885 / 605
2.0	2420 / 1115	1585 / 760
1.5	3565 / 1350	2395 / 900
1.0	3275 / 1190	2075 / 970
0.5	2960 / 1285	1450 / 1075
0.05	3350 / 1885	2510 / 1385

Beräkning nr 11. $h/d = 5/3 \text{ m}$, $\alpha = 30^\circ$

Höjd [m]	Topptryck /impulstäthet [kPa / Pas]			
	Sidled: 0 m	1 m	2 m	3 m
6	263 / 318	256 / 302	209 / 257	145 / 208
5	189 / 278	199 / 272	183 / 247	139 / 210
4	141 / 227	131 / 221	139 / 217	120 / 197
3	97 / 183	94 / 185	106 / 187	100 / 179
2	74 / 162	78 / 163	87 / 163	83 / 161
1	70 / 196	72 / 193	75 / 195	72 / 200
0.1	145 / 311	145 / 308	144 / 298	138 / 305

Beräkning nr 12. $h/d = 5/5 \text{ m}$, $\alpha = 30^\circ$

Höjd [m]	Topptryck /impulstäthet [kPa / Pas]			
	Sidled: 0 m	1 m	2 m	3 m
6	90 / 169	89 / 165	83 / 156	73 / 154
5	79 / 161	79 / 160	76 / 154	70 / 155
4	60 / 147	62 / 146	64 / 144	62 / 150
3	45 / 134	47 / 134	53 / 135	54 / 142
2	37 / 134	39 / 137	44 / 138	48 / 136
1	36 / 189	36 / 190	40 / 196	43 / 205
0.1	78 / 235	79 / 234	84 / 244	92 / 260

Beräkning nr 13. $h/d = 7/3 \text{ m}$, $\alpha = 30^\circ$

Höjd [m]	Topptryck /impulstäthet [kPa / Pas]			
	Sidled: 0 m	1 m	2 m	3 m
6	144 / 228	136 / 222	141 / 216	120 / 194
5	99 / 185	96 / 186	106 / 188	101 / 180
4	73 / 161	77 / 163	87 / 163	84 / 161
3	67 / 148	69 / 147	73 / 144	70 / 146
2	61 / 132	62 / 131	62 / 128	59 / 132
1	54 / 155	54 / 156	53 / 163	52 / 171
0.1	108 / 250	107 / 248	105 / 252	105 / 265

Beräkning nr 14. $h/d = 5/3 \text{ m}$, $\alpha = 15^\circ$

Höjd [m]	Topptryck /impulstäthet [kPa / Pas]					
	Sidled: 0 m	1 m	2 m	3 m	4 m	5 m
7	227 / 279	217 / 265	181 / 230	130 / 190	87 / 156	57 / 125
6	232 / 296	233 / 287	202 / 254	144 / 208	94 / 167	60 / 127
5	201 / 278	186 / 264	183 / 251	141 / 214	96 / 172	61 / 131
4	172 / 248	149 / 232	153 / 231	130 / 204	92 / 169	61 / 131
3	127 / 211	134 / 213	141 / 209	117 / 186	85 / 158	58 / 127
2	116 / 190	119 / 188	116 / 179	98 / 162	76 / 141	55 / 120
1	100 / 207	99 / 205	94 / 202	82 / 196	67 / 189	52 / 180
0.1	181 / 349	178 / 341	168 / 319	151 / 288	127 / 255	106 / 235

Beräkning nr 15. $h/d = 7/3 \text{ m}$, $\alpha = 15^\circ$

Höjd [m]	Topptryck /impulstäthet [kPa / Pas]					
	Sidled: 0 m	1 m	2 m	3 m	4 m	5 m
7	161 / 251	155 / 246	158 / 241	128 / 214	91 / 180	63 / 145
6	148 / 226	132 / 218	138 / 218	120 / 197	88 / 167	60 / 137
5	106 / 193	111 / 196	119 / 195	105 / 178	81 / 153	58 / 128
4	101 / 184	104 / 182	104 / 175	91 / 160	73 / 141	55 / 122
3	93 / 163	93 / 160	88 / 153	78 / 141	64 / 127	51 / 115
2	76 / 138	75 / 135	72 / 130	65 / 122	55 / 112	48 / 106
1	62 / 153	61 / 153	59 / 152	54 / 150	48 / 152	44 / 154
0.1	108 / 244	107 / 241	103 / 232	97 / 218	87 / 209	86 / 210

Beräkning nr 16. $h/d = 7/1 \text{ m}$, $\alpha = 15^\circ$

Höjd [m]	Topptryck /impulstäthet [kPa / Pas]					
	Sidled: 0 m	1 m	2 m	3 m	4 m	5 m
7	2393/1070	821 / 465	448 / 346	208 / 241	110 / 183	58 / 125
6	871 / 482	544 / 366	367 / 310	196 / 228	106 / 173	56 / 117
5	319 / 288	339 / 287	267 / 249	163 / 199	97 / 158	54 / 113
4	217 / 235	212 / 226	178 / 202	126 / 172	82 / 144	51 / 109
3	138 / 181	133 / 175	117 / 161	92 / 144	67 / 125	46 / 102
2	90 / 142	87 / 139	79 / 131	68 / 120	54 / 109	42 / 96
1	64 / 140	62 / 140	58 / 140	52 / 139	44 / 139	37 / 136
0.1	100 / 239	98 / 235	93 / 223	85 / 208	75 / 195	70 / 186

Beräkning nr 17. $h/d = 5/5 \text{ m}$, $\alpha = 15^\circ$

Höjd [m]	Topptryck /impulstäthet [kPa / Pas]					
	Sidled: 0 m	1 m	2 m	3 m	4 m	5 m
7	84 / 161	83 / 158	78 / 151	69 / 140	57 / 128	49 / 122
6	80 / 160	80 / 159	78 / 153	71 / 142	59 / 129	50 / 120
5	64 / 151	67 / 152	71 / 150	68 / 143	59 / 131	50 / 122
4	52 / 144	54 / 143	62 / 143	63 / 138	56 / 129	50 / 122
3	47 / 138	50 / 137	57 / 136	58 / 132	53 / 124	48 / 119
2	48 / 137	50 / 137	53 / 134	53 / 132	49 / 126	45 / 126
1	49 / 196	50 / 194	50 / 190	49 / 184	44 / 183	43 / 185
0.1	109 / 253	109 / 250	107 / 243	102 / 231	194 / 222	193 / 224

Beräkning nr 18. $h/d = 7/5 \text{ m}$, $\alpha = 15^\circ$

Höjd [m]	Topptryck /impulstäthet [kPa / Pas]					
	Sidled: 0 m	1 m	2 m	3 m	4 m	5 m
7	61 / 158	64 / 158	67 / 157	65 / 151	57 / 142	51 / 136
6	51 / 143	54 / 142	60 / 142	61 / 139	55 / 132	49 / 128
5	45 / 133	48 / 133	54 / 132	56 / 128	51 / 121	47 / 118
4	46 / 128	48 / 127	51 / 125	51 / 121	48 / 116	45 / 114
3	47 / 120	48 / 120	49 / 117	48 / 113	44 / 109	42 / 109
2	45 / 110	45 / 109	45 / 107	44 / 103	43 / 102	40 / 103
1	41 / 153	41 / 152	40 / 150	39 / 149	36 / 154	37 / 159
0.1	81 / 207	81 / 205	80 / 200	77 / 193	71 / 195	77 / 203

Beräkning nr 19. $h/d = 5/1 \text{ m}$, $\alpha = 15^\circ$

Höjd [m]	Topptryck /impulstäthet [kPa / Pas]					
	Sidled: 0 m	1 m	2 m	3 m	4 m	5 m
7	678 / 399	582 / 349	316 / 252	162 / 189	91 / 151	50 / 108
6	1350 / 624	1165 / 539	477 / 334	198 / 219	102 / 164	53 / 109
5	2165 / 1136	933 / 496	467 / 348	209 / 236	108 / 173	54 / 111
4	868 / 490	576 / 377	377 / 312	198 / 229	107 / 172	55 / 113
3	342 / 297	358 / 293	273 / 251	164 / 199	96 / 159	54 / 111
2	218 / 227	212 / 219	177 / 196	125 / 168	82 / 141	51 / 107
1	138 / 182	133 / 177	117 / 180	92 / 179	67 / 172	46 / 124
0.1	198 / 376	191 / 363	173 / 329	145 / 287	116 / 246	90 / 183