

Trykkforplantning fra bilbombe bak barriere

Jan Arild Teland

Forsvarets forskningsinstitutt (FFI)

27. september 2011

FFI-rapport 2011/01738
1065

P: ISBN 978-82-464-1979-4
E: ISBN 978-82-464-1980-0

Emneord

Bilbombe

Barriere

Sjokkbølge

Numerisk simulering

Detonasjon

Godkjent av

Svein Rollvik

Forskningssjef

Jan Ivar Botnan

Avdelingssjef

Sammendrag

Forplantningen av en sjokkbølge bak en barriere ble studert ved hjelp av numeriske simuleringer med hydrokoden AUTODYN. De numeriske resultatene fra AUTODYN ble først sammenlignet med eksperimenter. Etter å ha funnet godt samsvar mellom beregning og måling, ble den numeriske metoden ansett som validert. Deretter ble det gjennomført en numerisk studie av betydningen av barrierehøyde for trykkforplantningen bak barrieren. Ved hjelp av en matematisk modell for skade på mennesker, implementert som en subrutine i AUTODYN, ble beskyttelsespotensialet til barrieren undersøkt som funksjon av barrierehøyde og posisjon bak barrieren.

English summary

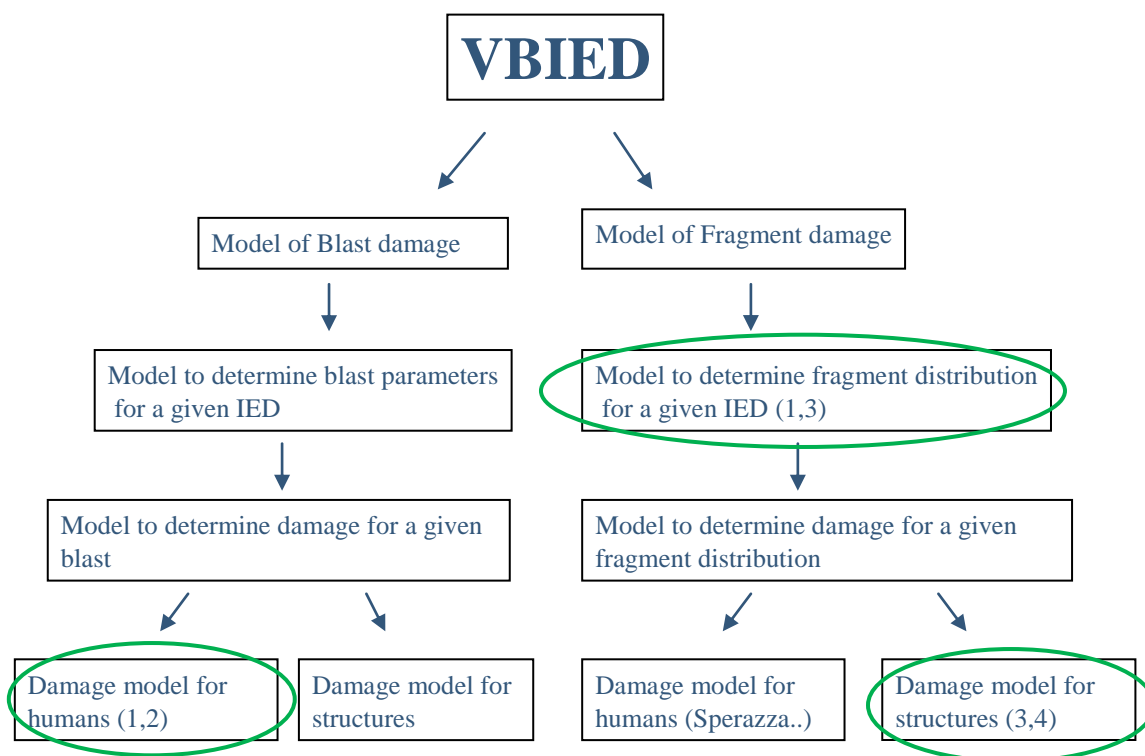
Propagation of shock waves behind a barrier was studied using numerical simulations with the hydrocode AUTODYN. First the numerical results from AUTODYN were compared with experimental measurements. Finding good agreement between computation and measurement, the numerical method was assumed validated. Then a numerical study of the effect of barrier height for the shock propagation behind the barrier was performed. Using a mathematical model for human injury, implemented as a subroutine in AUTODYN, the degree of protection provided by the barrier was investigated as a function of barrier height and position behind the barrier.

Innhold

1	Innledning	7
2	Scenario	7
3	AUTODYN	9
4	Modelleringsmetodikk	9
4.1	Lagrange	9
4.2	Euler	10
5	Materialmodeller	10
6	Numerisk modell	11
6.1	1D-modell	11
7	3D-simuleringer	12
7.1	Simuleringsoppsett	12
7.2	Resultater	13
8	Sammenligning med eksperimenter	15
9	Parameterstudier	21
9.1	Barriere med forskjellig høyde	21
9.2	Trykk som funksjon av sensorens posisjon	22
10	Zhou, Hao	25
11	Skade på mennesker	25
12	Trykkfordeling bak veggen	29
13	Konklusjon	35
	Referanser	36
	Appendix A Materialmodeller	37

1 Innledning

Det er velkjent at detonasjon av bilbomber (VBIED) kan gjøre stor skade på omgivelsene. Virkningene fra bomben kan først og fremst deles inn i fragment- og trykkbølgevirkning. For å ha full kontroll på virkningen er det en rekke delproblemer som må løses, slik som illustrert i Figur 1.1. FFI har tidligere spesielt jobbet med de avmerkede delproblemene.



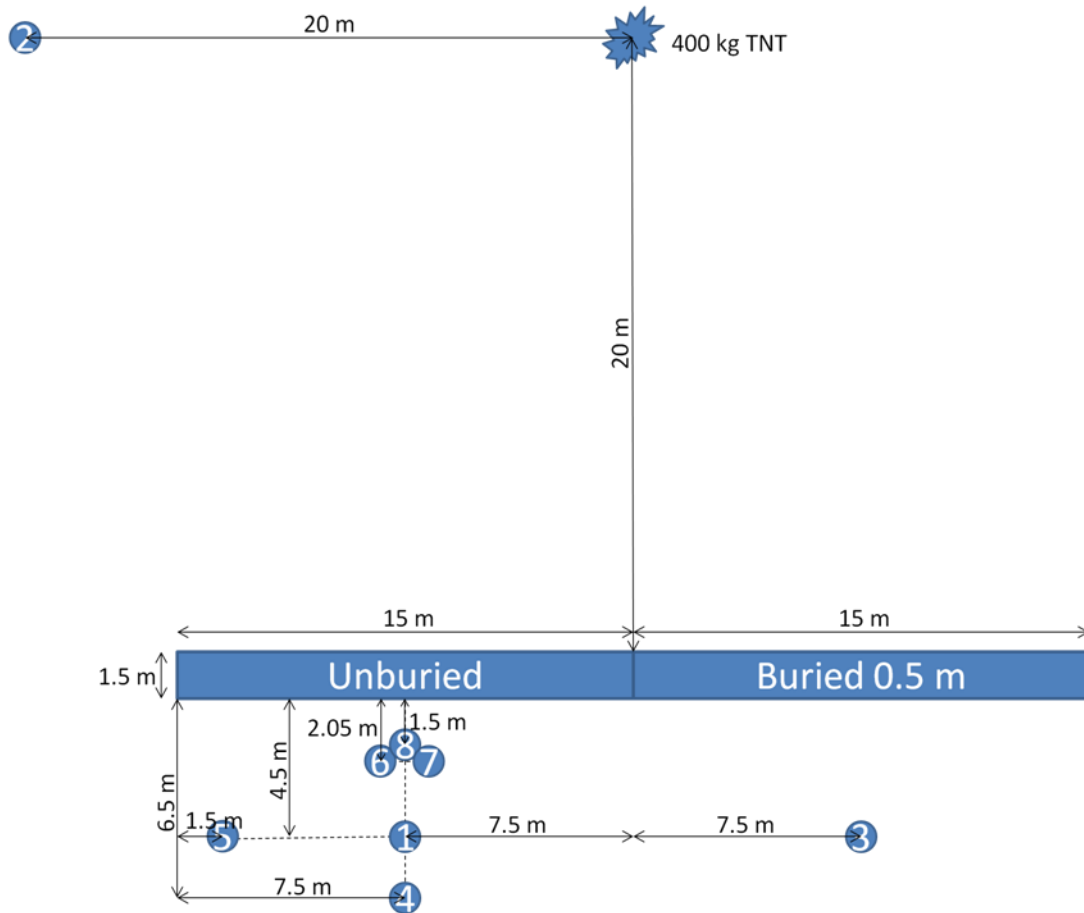
Figur 1.1 Skisse av VBIED-problemet

I dette arbeidet skal vi utelukkende se på trykkvirkningen fra en VBIED. Formålet er å undersøke hvordan trykket fra en bilbombe vil forplante seg bak en barriere, for eksempel en Hesco-vegg og hvordan en slik barriere eventuelt kan utnyttes som beskyttelse. Arbeidet vil hovedsakelig basere seg på numeriske simuleringer. Fordelen med simuleringer er at disse gir større mulighet til å få fysisk innsikt i hvordan sjokkbølgen forplanter seg. For å forsikre oss om at simuleringsresultatene er til å stole på, vil disse først bli validert mot eksperimenter.

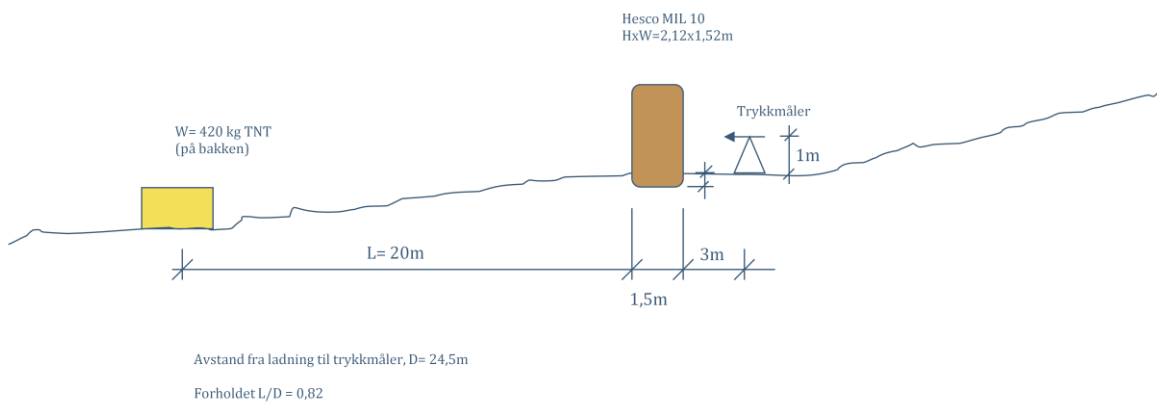
2 Scenario

Det aktuelle scenarioet som skal brukes til å validere de numeriske simuleringene er skissert i Figur 2.1-2.2. En bilbombe simuleres ved detonasjon av 420 kg TNT på bakkenivå og trykksensorer befinner seg bak en vegg på 20 meters avstand fra bomben. Eksperimentene ble utført på to forskjellige steder, Rena og Setermoen. På Rena var terrenget helt flatt, mens på

Setermoen var bakken svakt stigende opp mot Hesco-barrieren. I begge eksperimenter ble trykkmålerere plassert i forskjellige posisjoner bak barrieren. Barrieren hadde to forskjellige høyder: 2.12 meter og 1.62 meter. De andre geometriske målene er oppgitt på figuren.



Figur 2.1 Trykksensorenes plassering i det simulerte bilbombescenariet



Figur 2.2 Bilbombescenario på Setermoen

3 AUTODYN

AUTODYN (5) er en såkalt hydrokode som hovedsakelig kan brukes til å simulere dynamiske kortvarige lineære eller ikke-lineære problemer. FFI har en lang tradisjon i bruk av hydrokoder. Først ved regnekoden HEMP (1977-1984). Deretter DYNA (1983-1997). Siden 1997 har AUTODYN vært brukt. Alle kodene har blant annet vært anvendt til simuleringer av våpendynamikk, penetrasjon, detonasjon og propagasjon av sjokkbølger. AUTODYN ble for et par år siden en del av den større programpakken til ANSYS.

Hydrokoder fungerer ved at en modell bygges opp geometrisk av mange små elementer. De forskjellige elementene gis deretter forskjellige fysiske egenskaper avhengig av hvilket materiale de representerer. Under en simulering anvendes Newtons lover sammen med konstitutive likninger på hvert element i korte tidsperioder av gangen og tilstanden deres oppdateres, for eksempel ved at de endrer form (deformeres) eller hastighet. Den nye tilstanden er så grunnlag for beregningene i neste tidsperiode osv.

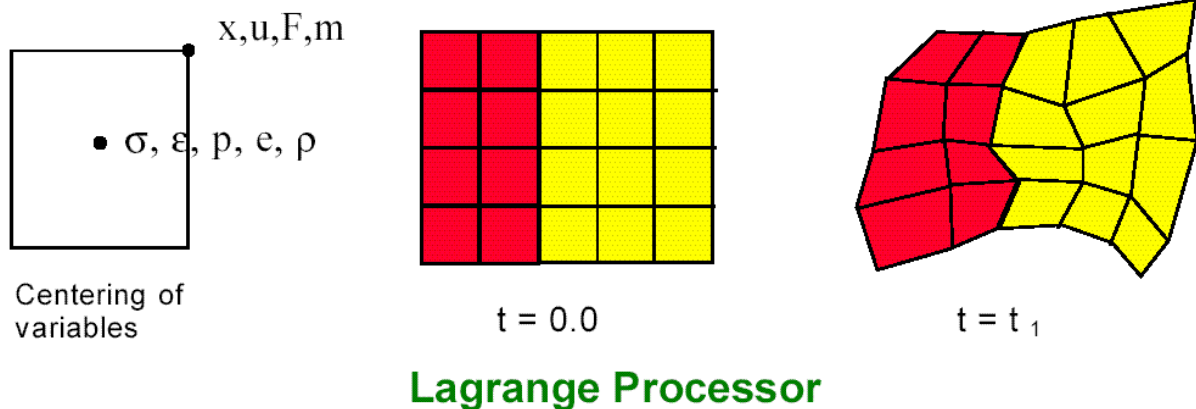
For å oppnå realistiske resultater er det nødvendig med gode konstitutive modeller (materialmodeller), dvs. matematiske modeller som beskriver oppførselen til materialene som er involvert. I tillegg er det viktig at den geometriske oppdelingen av modellen er detaljert nok. Desto flere elementer man bruker i oppbyggingen av modellen, desto lenger tid tar simuleringen. Det må alltid gjøres et kompromiss mellom regnetid og nøyaktighet.

4 Modelleringsmetodikk

I AUTODYN (og de fleste andre hydrokoder) kan problemene modelleres på forskjellige måter. For å forstå eventuelle problemer som kan oppstå er det nødvendig å ha litt kjennskap til de forskjellige metodene.

4.1 Lagrange

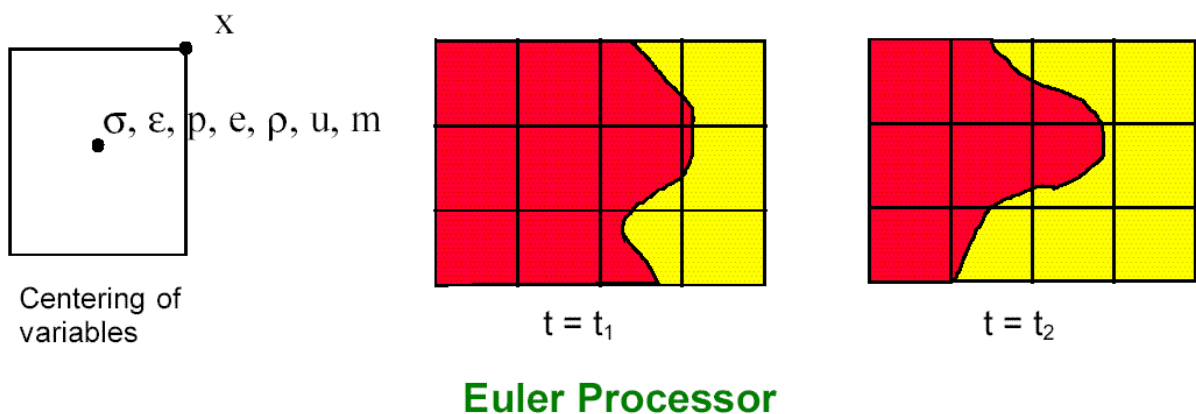
Det kanskje mest vanlige er å modellere et objekt ved hjelp av Lagrangeprosessen, hvilket betyr at man definerer en rekke såkalte nodepunkter som definerer et grid. Lagrangeprosessen brukes typisk for objekter som i utgangspunktet har en fast form og som ikke forventes å deformeres veldig mye under prosessen som skal studeres. Dersom objektet deformeres, endres posisjonen på nodepunktene og gridet endrer form til objektets nye geometri. Denne prosessen er illustrert i Figur 4.1



Figur 4.1 Illustrasjon av Lagrangeprosessen

4.2 Euler

En annen mulighet er å bruke den såkalte Euler-prosessen. Her defineres et fast grid i rommet og dette fylles så med materiale. Under den fysiske prosessen blir gridet liggende fast, mens materiale kan flyte mellom elementene i gridet. Prosessen er illustrert i Figur 3.2. Denne metoden er typisk for væsker, gasser o.l. som i utgangspunktet ikke har noen fast form.



Figur 4.2 Illustrasjon av Eulerprosessen

AUTODYN har to forskjellige Euler-prosessorer: Godunov og FCT. Euler-Godunov er mest fleksibel da gridet kan inneholde så mange materialer man ønsker. Med Euler-FCT kan hvert grid kun inneholde ett material, men til gjengjeld er prosessoren betydelig raskere enn Euler-Godunov.

5 Materialmodeller

Den vanskeligste utfordringen i forbindelse med numeriske simuleringer relatert til våpen og beskyttelsesmaterialer er som regel å finne materialmodeller som gir en tilfredsstillende matematisk beskrivelse av de involverte materialene.

I vårt tilfelle skal vi først modellere TNT og luft, noe som er relativt enkelt da disse materialmodellene er velkjente og allerede ligger inne i AUTODYNs materialbibliotek. Luft modelleres som en ideell gass mens TNT modelleres med JWL-ligningen. Fullstendige materialmodeller er gjengitt i Appendix A.

Bakken og Hesco-barrieren består imidlertid av både materialer med ukjente egenskaper. Det er for eksempel ikke foretatt noen materialprøver av Hesco-sanden og sand kan oppføre seg svært forskjellig avhengig av fuktighetsinnholdet. For å gjøre det enkelt antar vi at både bakken og barrieren er uendelig hard. Dette betyr at ingen energi forsvinner ned i bakken. Det er trolig at dette er en rimelig approksimasjon.

6 Numerisk modell

Etter å ha definert materialmodellene, gjenstår det bare å definere geometrien. Som det fremgår av Figur 2.1 er terrenget ujevnt og svakt stigende. Å modellere alle uregelmessigheter i terrenget er en krevende jobb og sannsynligvis ikke nødvendig. Vi vil derfor anta at bakken er helt jevn (og altså uendelig hard). Foreløpig ignorerer vi også helningen i terrenget i oppsettet på Setermoen. Videre gjør vi simuleringen med de to barrierehøydene i to forskjellige simuleringer. På grunn av symmetrien halveres dermed antallet elementer i hver simulering. Endelig antar vi en sfærisk TNT-ladning, mens den i virkeligheten er rektangulær. På så store avstander skal ikke dette ha noen betydning.

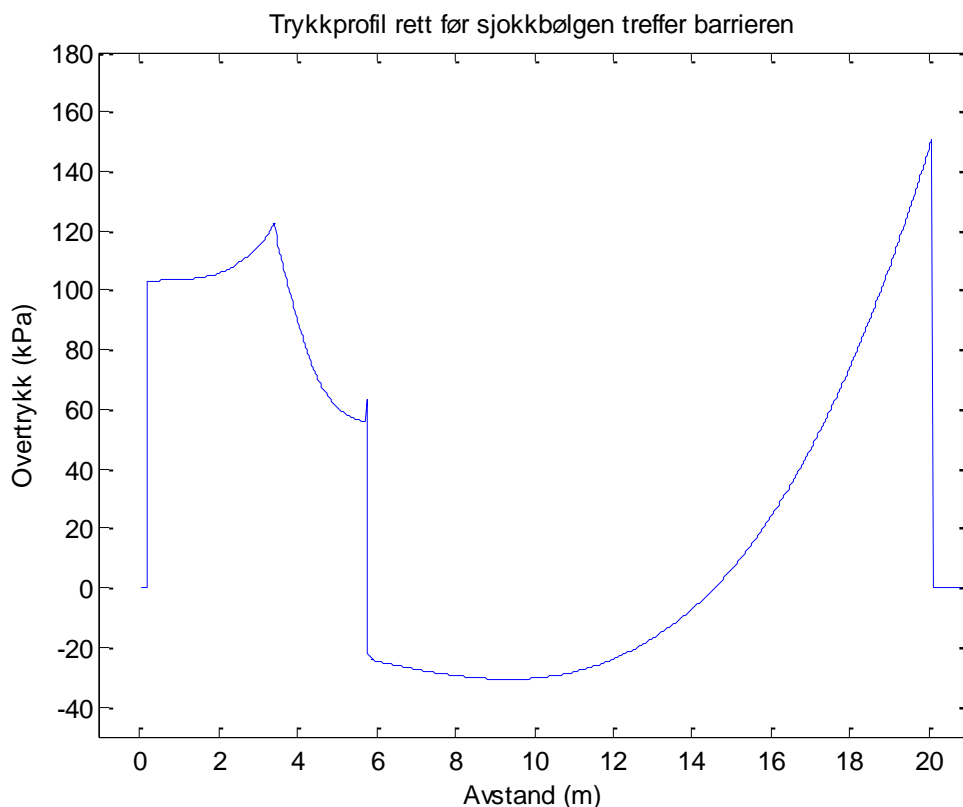
Videre er detonasjon av 420 kg TNT over en uendelig hard bakke ekvivalent med detonasjon av 840 kg TNT i fri felt. Med disse antagelsene reduserer problemet seg til et 1-dimensjonalt problem fra detonasjonen og frem til sjokkbølgen treffer barrieren. Dette delproblemet kan derfor modelleres med sfærisk symmetri i AUTODYN. Fordelen med dette er at slike simuleringer går meget hurtig og høy gridopløsning kan derfor benyttes.

Etter at sjokkbølgen når frem til veggen kan resultatene fra 1D-kjøringene remappes over i et 2D eller 3D-grid.

6.1 1D-modell

I sfærisk symmetriske simuleringer er det nok å modellere en såkalt "wedge" i AUTODYN, dvs. et lite utsnitt av kulen. AUTODYN tar selv hensyn til symmetrien i problemet.

Siden problemet vil medføre relativt store deformasjoner er det naturlig å modellere det med Euler-prosessoren. Siden det inneholder to materialer er Euler-Godunov eneste mulige valg. Gridopløsningen ble valgt til 1 mm.



Figur 6.1 Trykkprofilen rett før sjokkbølgen når barrieren.

Simuleringen ble stoppet rett før simuleringen nådde frem til barrieren. Trykkprofilen ved det tidspunktet er gjengitt i Figur 6.1. Vi ser den karakteristiske profilen med en skarp sjokkfront fulgt av et undertrykk og deretter et sekundærsjokk. Dette resultatet ble deretter mapnet over i en 3D-modell.

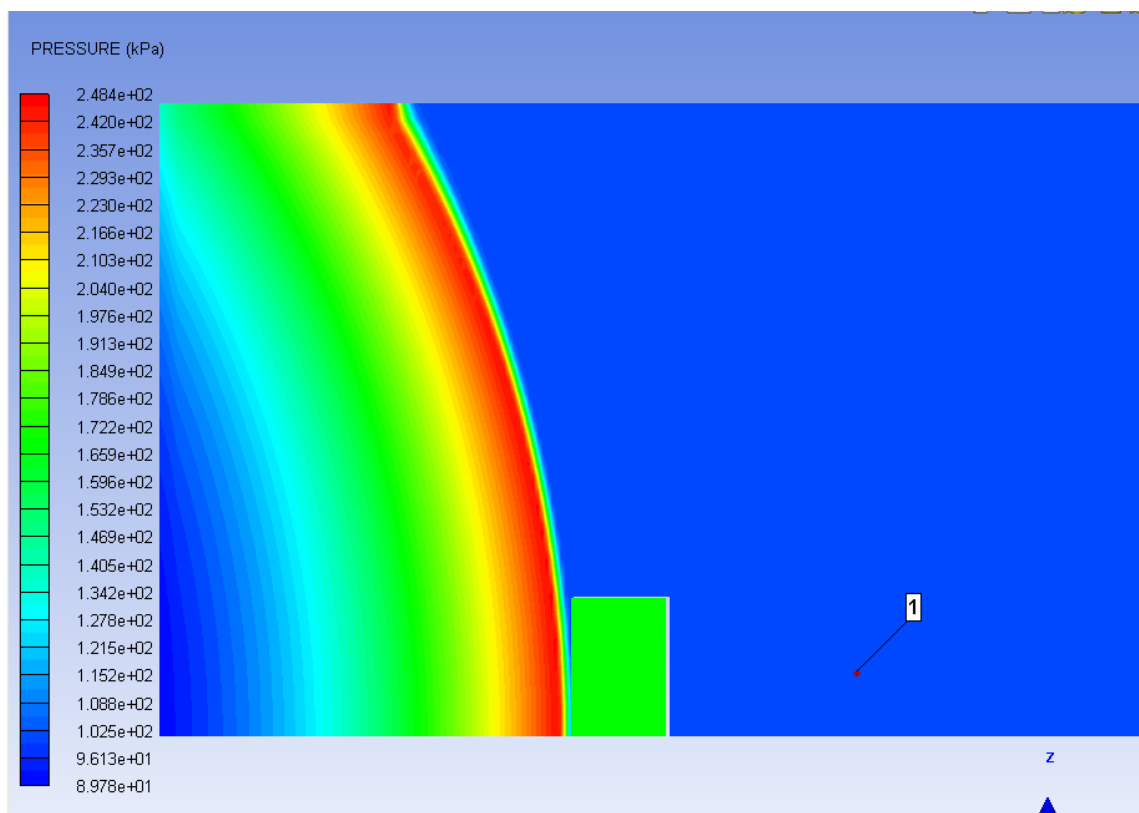
7 3D-simuleringer

På grunn av det store antall elementer som er nødvendig, er simuleringer i 3D betydelig mer beregningsmessig krevende enn 1D-simuleringer. Det er derfor nødvendig å øke gridstørrelsen og bare modellere den relevante delen av problemet.

7.1 Simuleringsoppsett

I vår simulering ble det benyttet et gradert grid med 1.2 millioner elementer. Cellestørrelsen var 50 mm i den mest relevante delen og gradvis større i områder av mindre betydning. Bare den første delen av den innkommende sjokkbølgen ble modellert da sekundærsjokket kommer altfor sent til å ha noen innvirkning på resultatet. Det ble brukt "flow out" randbetingelser på kanten av gridet for å hindre refleksjoner, men disse fungerer ikke helt perfekt. Derfor var det nødvendig å gjøre utstrekningen av gridet relativt stor. Et gaugepunkt ble plassert i punktet hvor trykksensoren befant seg i eksperimentet. Veggen ble modellert ved "unused" celler og er dermed uendelig hard.

I Figur 7.1 har vi plottet 3D-modellen med det remappede trykket fra 1D-modellen.

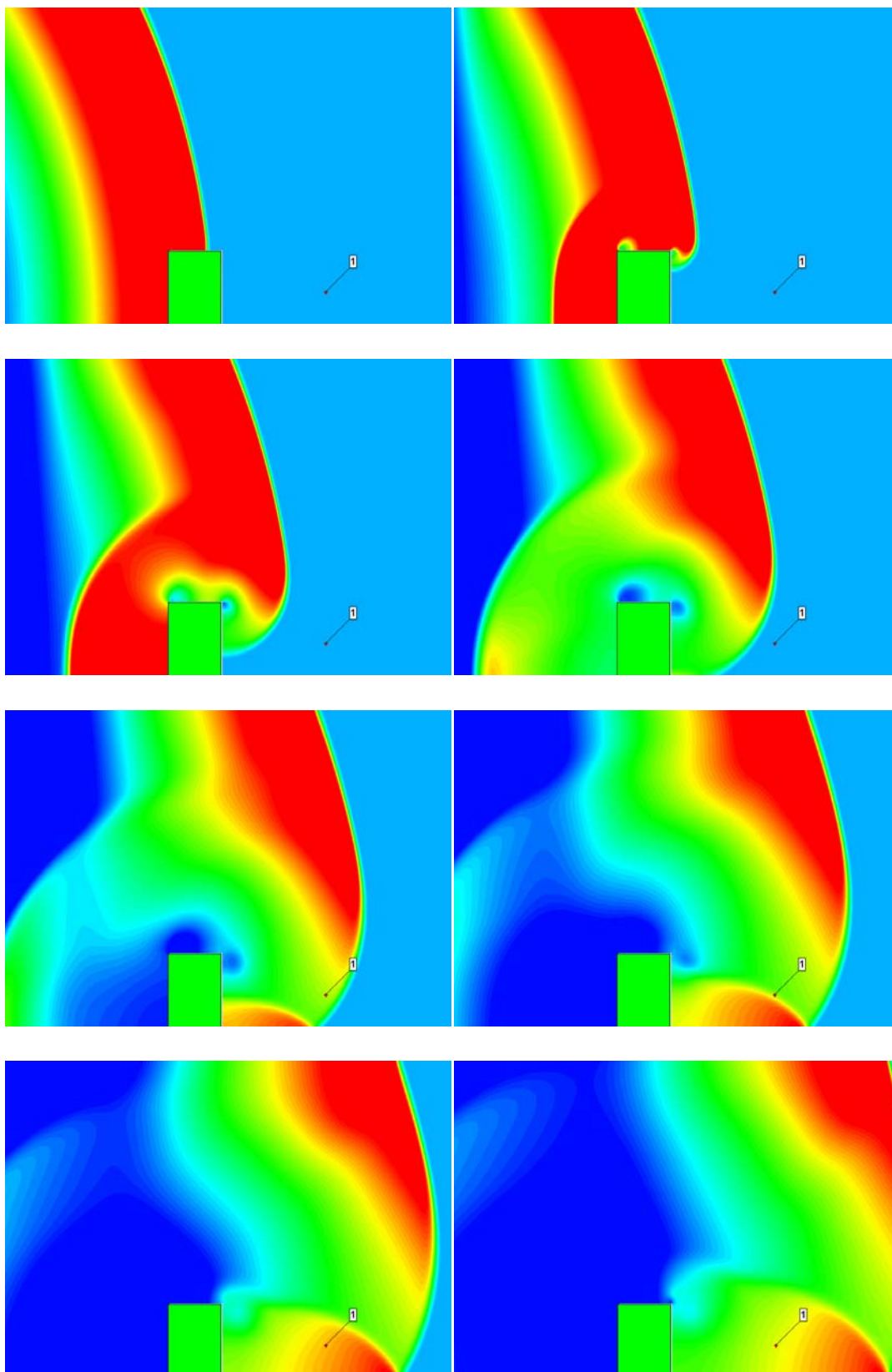


Figur 7.1 Initialtilstanden til 3D-simuleringen. Sjøkkbølgen skal nettopp begynne å vekselvirke med barrieren.

7.2 Resultater

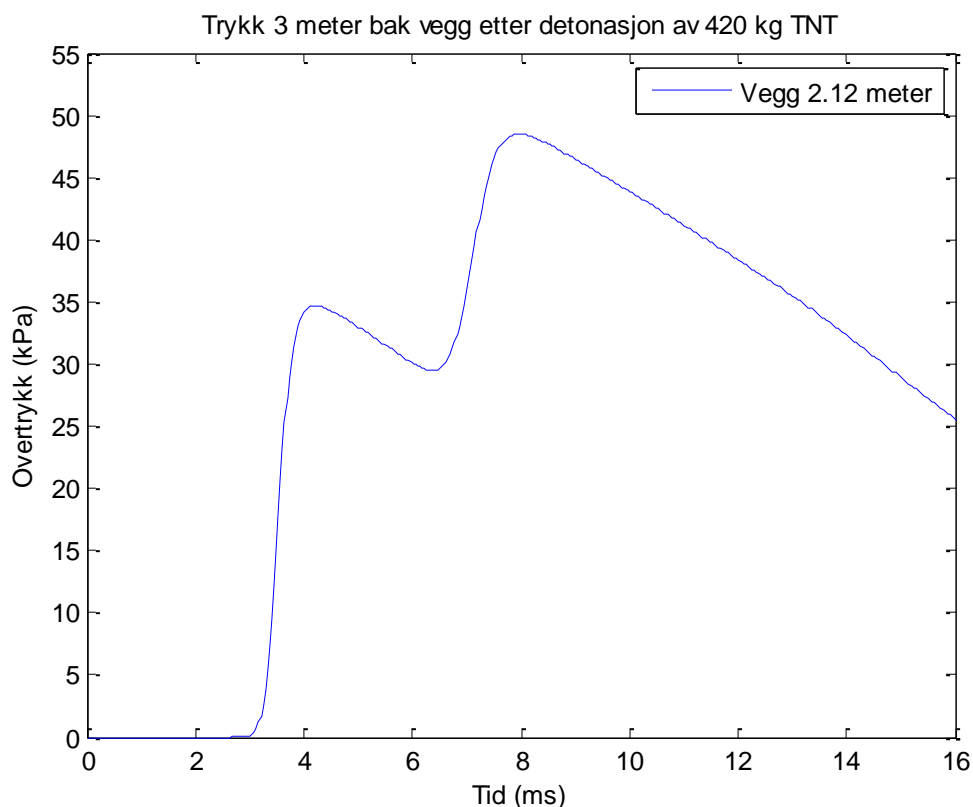
Ved hjelp av konturplott ved forskjellige tidspunkter kan man se hvordan sjøkkbølgen forplanter seg over barrieren på 212 cm. Dette kan være til stor nytte for å forstå fysikken i problemet. I Figur 7.2 har vi laget slike konturplott. Tidsdifferansen er 2.5 ms mellom hvert plott. Trykkskalaen er konstant (90-160 kPa – Trekk fra 101.225 kPa for å få overtrykk). Det betyr at detaljene ved høyt trykk ikke kommer frem. For eksempel er trykket mye høyere foran muren rett etter at sjøkkbølgen treffer. Fordelen er imidlertid at detaljene bak muren kommer godt frem.

Fra Figur 7.2 ser vi at trykkmønsteret er ganske komplisert. Hovedsaken er imidlertid at bølgen brytes over muren og fronten forplanter seg nedover mot bakken. Vi ser videre at bølgen reflekteres fra bakken, noe som fører til ekstra høyt trykk i en sone.



Figur 7.2 Bildeserie som viser hvordan trykkbølgen forplanter seg over og bak muren. (Det er 2.5 ms mellom hvert plott.)

Trykkhistorien i gaugepunktet er vist i Figur 7.3.



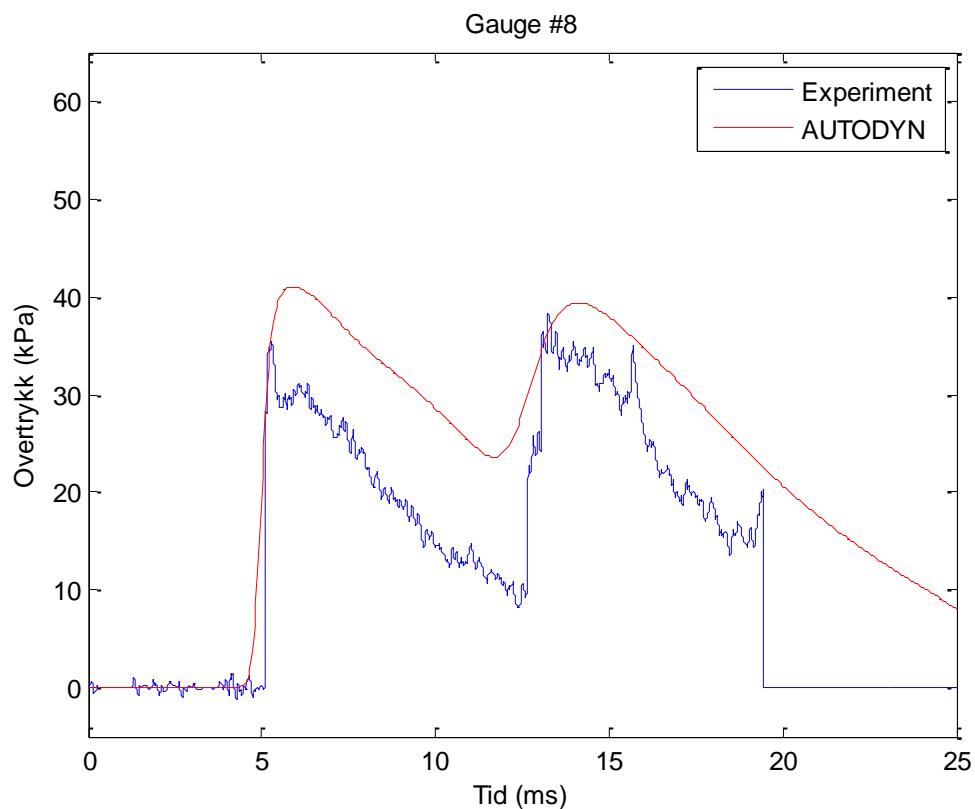
Figur 7.3 Trykk i gaugepunkt 1 meter over bakken, 3 meter bak muren

Som konturplottene også viste ser vi at den andre pulsen, som skyldes bakkerefleksjon, har større amplitude enn den første fronten som ankommer.

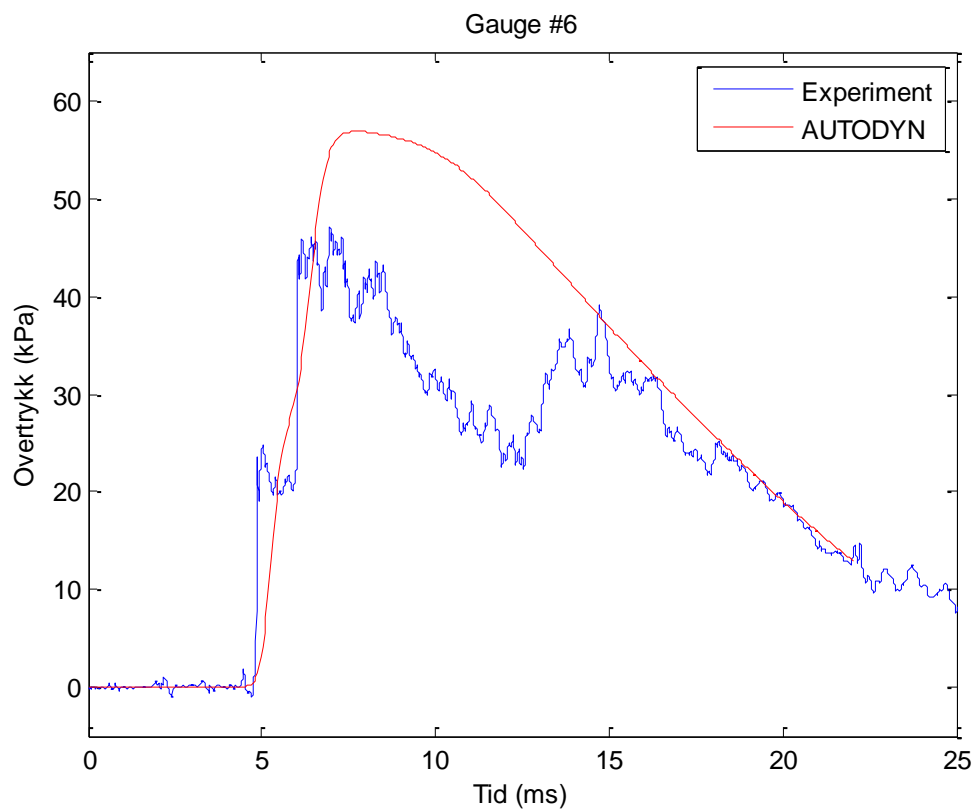
8 Sammenligning med eksperimenter

Gaugepunkter ble plassert i aktuelle posisjoner for sammenligning med eksperimentene og dermed validering av den numeriske metoden. Sammenligningen ble bare foretatt for gaugene #1, #3, #6, #7 og #8 fra målingene på Rena, samt de to gaugene fra eksperimentet på Setermoen (se Figurene 2.1 og 2.2). Gauge #4 og #5 var såpass langt borte at et enda større grid hadde vært nødvendig, noe som ville gitt svært lang regnetid.

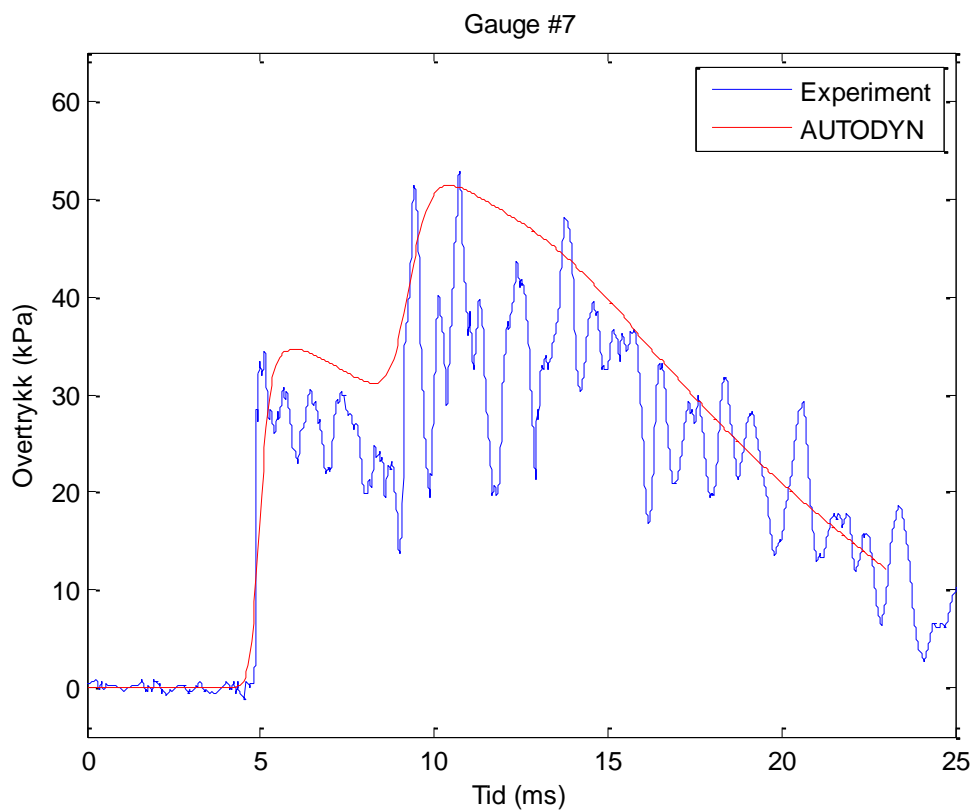
I Figur 8.1-8.8 har vi sammenlignet de eksperimentelle og numeriske resultatene i de aktuelle posisjonene.



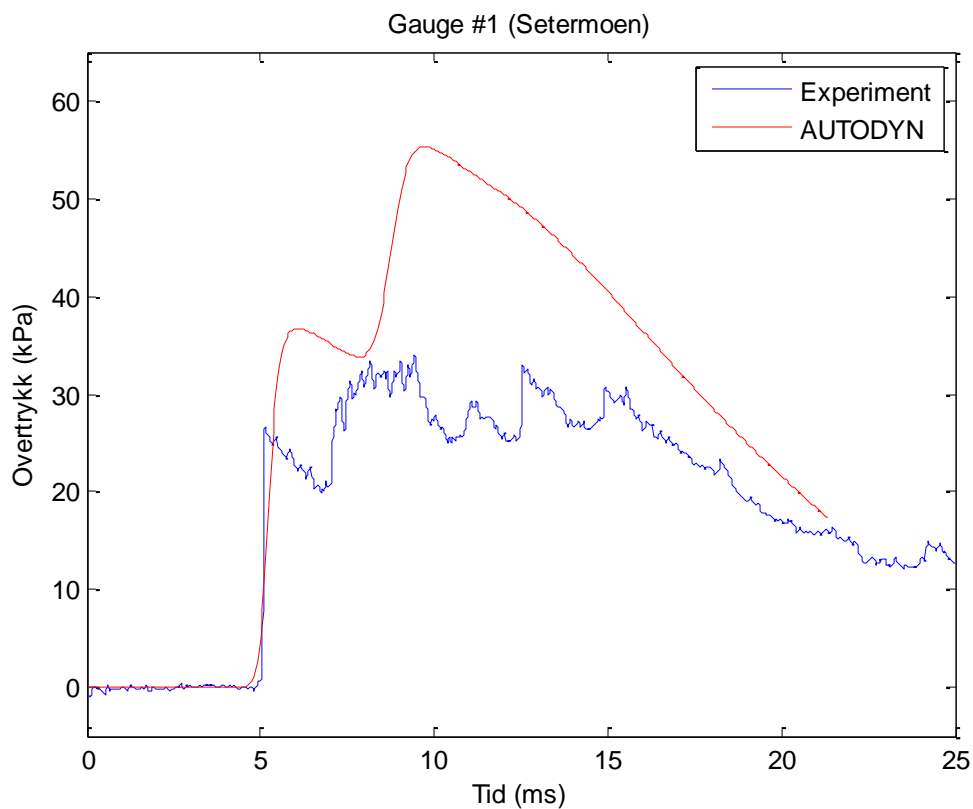
Figur 8.1 Sensor 1.50 meter bak barrieren, høyde 1.61 meter



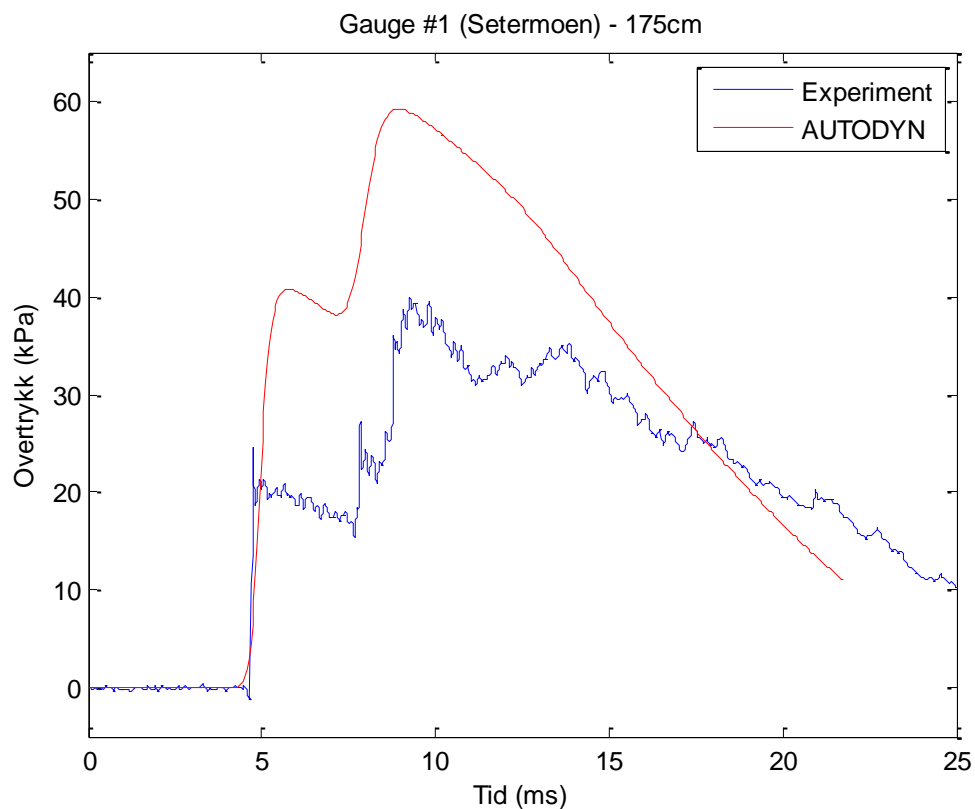
Figur 8.2 Sensor 2.04 meter bak barrieren, høyde 0.25 meter



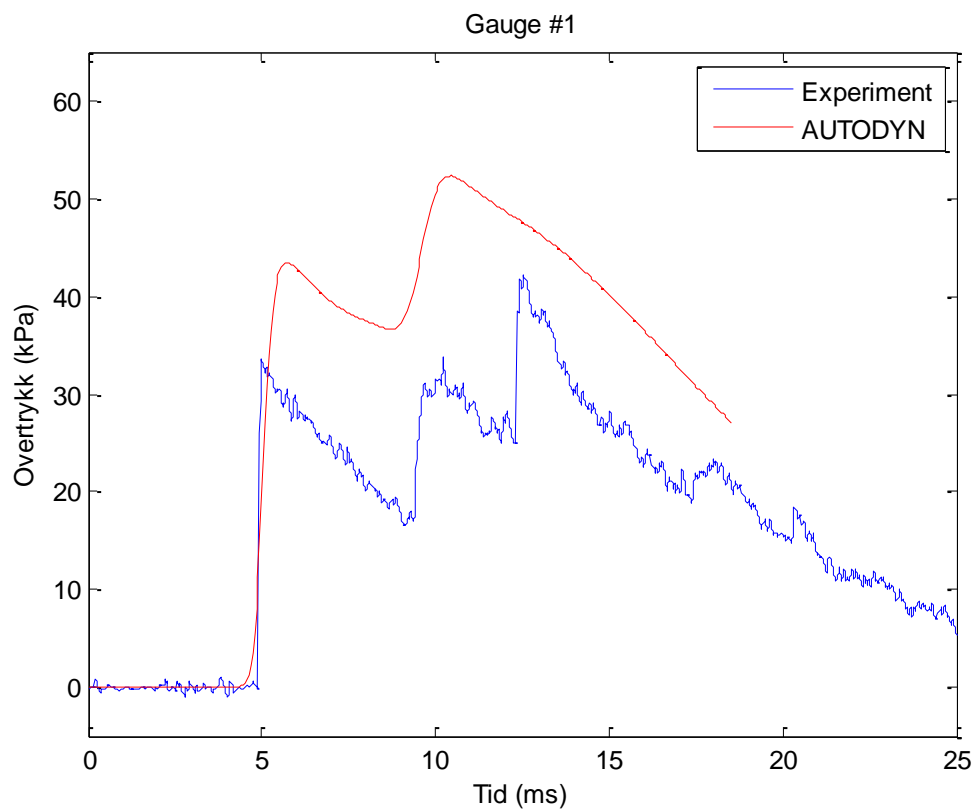
Figur 8.3 Sensor 2.05 meter bak barrieren, høyde 0.99 meter



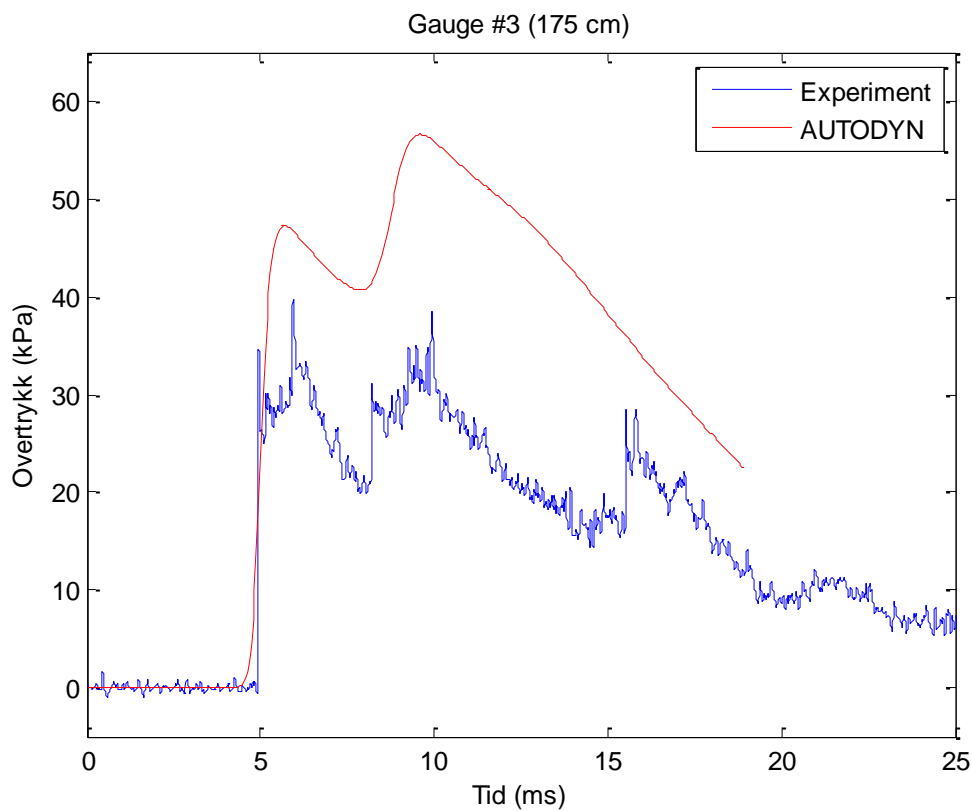
Figur 8.4 Sensor 3.00 meter bak barrieren, høyde 1.00 meter



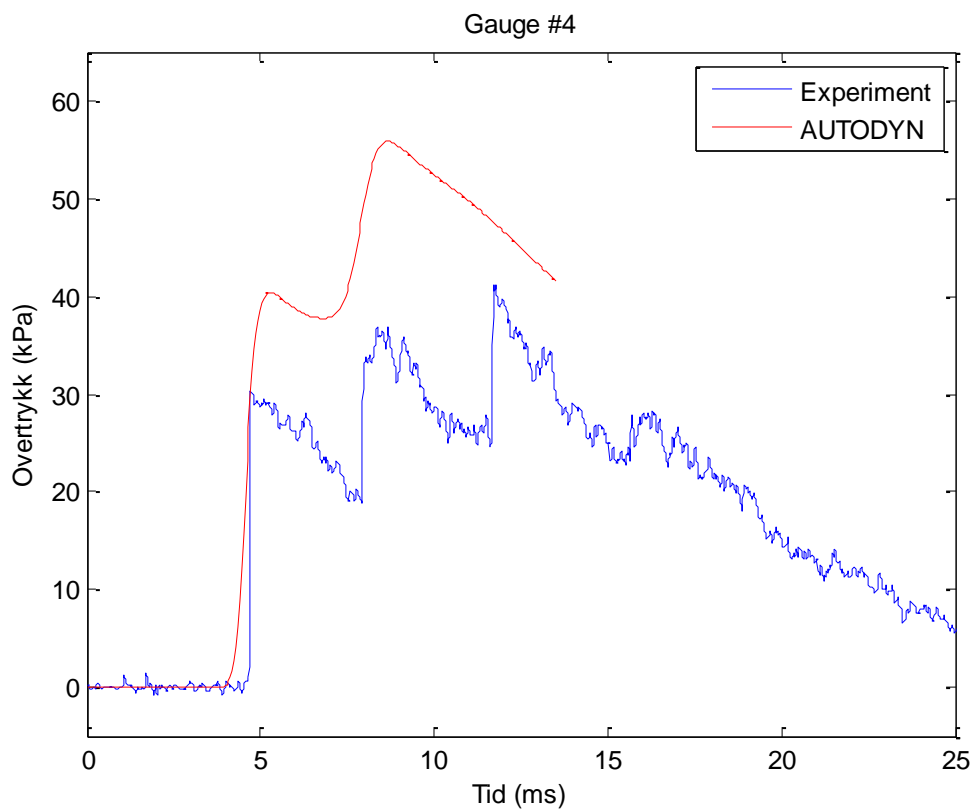
Figur 8.5 Sensor 3.00 meter bak barrieren, høyde 1.00 meter



Figur 8.6 Sensor 4.05 meter bak barrieren, høyde 1.67 meter



Figur 8.7 Sensor 4.50 meter bak barrieren, høyde 1.58 meter



Figur 8.8 Sensor 6.50 meter bak barrieren, høyde 1.63 meter

Vi ser av Figur 8.1-8.3 at overensstemmelsen er veldig god for sensorene #7 og #8. Her er både amplitude og tidspunkt for toppene blitt riktig. Disse sensorene ligger nærmest barrieren. Resultatet er også bra for sensor #6 som har samme avstand fra barrieren, men ligger nærmere bakken (25 cm høyde). Grunnen til at simuleringen ikke fanger opp det første kortvarige plataet er antagelig at gridoppløsningen er for grov (5 cm).

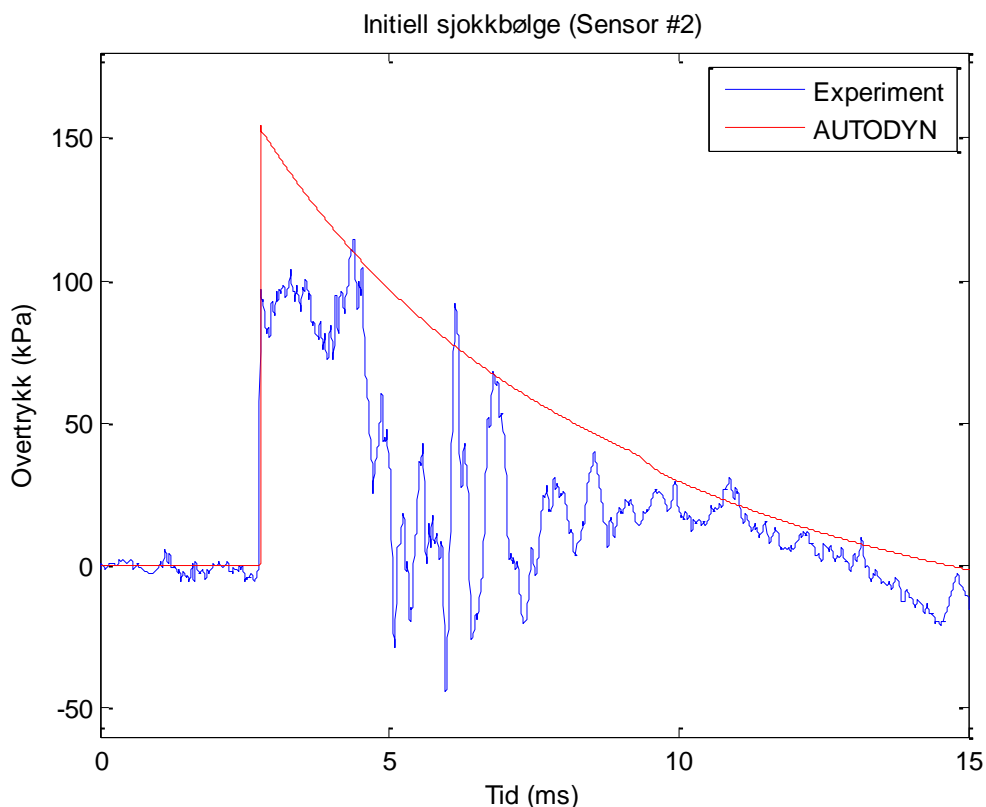
For sensorene i 3 meters avstand fra barrieren (Figur 8.4-8.5) fra målingene på Setermoen ligger det numeriske resultatet noe over det eksperimentelle. Gitt at disse eksperimentene i større grad avviker fra det ideelle scenariet som er simulert, er imidlertid ikke uoverensstemmelsen urovekkende.

For sensorene 4.50 meter bak barrieren (Figur 8.6-8.7) er det igjen god overensstemmelse, selv om igjen det numeriske resultatet ligger litt for høyt. Det er interessant å merke seg at målingene gir en struktur med tre topper, mens det bare blir to topper i simuleringene. Målingen på 6.50 meter, lengst bak barrieren (Figur 8.8) har også en struktur med tre topper. Igjen ligger de numeriske resultatene litt for høyt, selv om det generelt er god overensstemmelse.

At simuleringene generelt ligger litt høyere enn målingene kan sannsynligvis tilskrives de ”ideelle” tilstandene (hard bakke, vegg etc) som vi har antatt. Det er imidlertid litt urovekkende at enkelte av målingene gir tre topper, mens simuleringene bare gir to topper. I verste fall kan dette indikere fundamentale mangler i simuleringene, så la oss se litt nærmere på dette.

I eksperimentene var det plassert en sensor i fritt felt, i omtrent samme avstand fra ladningen som veggen (Sensor #2 i Figur 2.1). Under ideelle symmetriske forhold skal trykkmålingen i dette punktet være identisk med sjokkbølgen i det den ankommer veggen. Det kan derfor være interessant å sammenligne målingen fra sensoren med resultater fra AUTODYN for en tilsvarende bølge. I det aktuelle eksperimentet fungerte imidlertid ikke Sensor #2, så en sammenligning er ikke mulig. Derimot fungerte sensoren under et lignende eksperiment (uten trykksensorer i fri luft bak veggen) fem dager senere. Under forutsetningen av at eksperimentene er repeterbare, skulle det imidlertid være mulig å utføre en sammenligning mellom trykkmåling og simulering. Dette er gjort i Figur 8.9.

Vi ser at den faktiske trykkbølgen ikke har den ”teoretisk riktige” formen. Dette kan ha flere årsaker, for eksempel at detonasjonen i praksis ikke har vært ideell eller symmetrisk. Siden den initielle sjokkbølgen inneholder flere ”ekstra” topper, bør det imidlertid ikke være noen overraskelse at målinger bak veggen også gir ”ekstra” topper. Nå vet vi riktignok ikke om den initielle sjokkbølgen hadde samme form i det faktiske eksperimentet vi har simulert. Men mye tyder på dersom sjokkbølgen ikke var ideell i det eksperimentet vi har målinger for, så var den sannsynligvis ikke ”ideell” i det scenarioet vi har simulert heller. Det virker derfor sannsynlig at den ”ekstra” toppen som er målt bak veggen kan forklares som en effekt av en ikke-ideell detonasjon.



Figur 8.9 Initiell sjokkbølge i eksperimentet og de numeriske simuleringene

Alt sammen tatt i betraktning, må det sies å være god overensstemmelse mellom målinger og simuleringer, slik at den numeriske metoden kan antas å være validert.

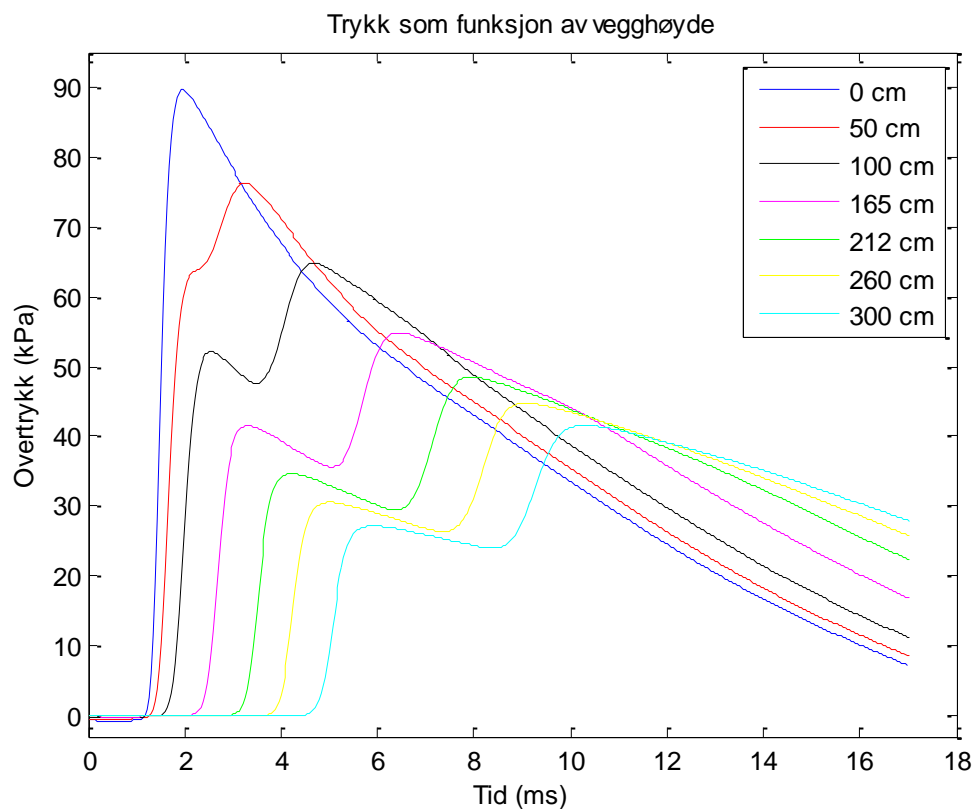
9 Parameterstudier

Etter å ha validert den numeriske metoden, kan vi nå utnytte den til å få større innsikt i fysikken i det aktuelle problemet. La oss først gjøre noen parameterstudier for å se innvirkningen av forskjellige parametere.

9.1 Barriere med forskjellig høyde

Det kan være interessant å studere hvordan trykket i målepunktet avhenger av høyden på muren. For å gjøre dette ble det kjørt simuleringer med vegger av forskjellig høyde. Trykkhistorien for de forskjellige tilfellene er vist i Figur 9.1.

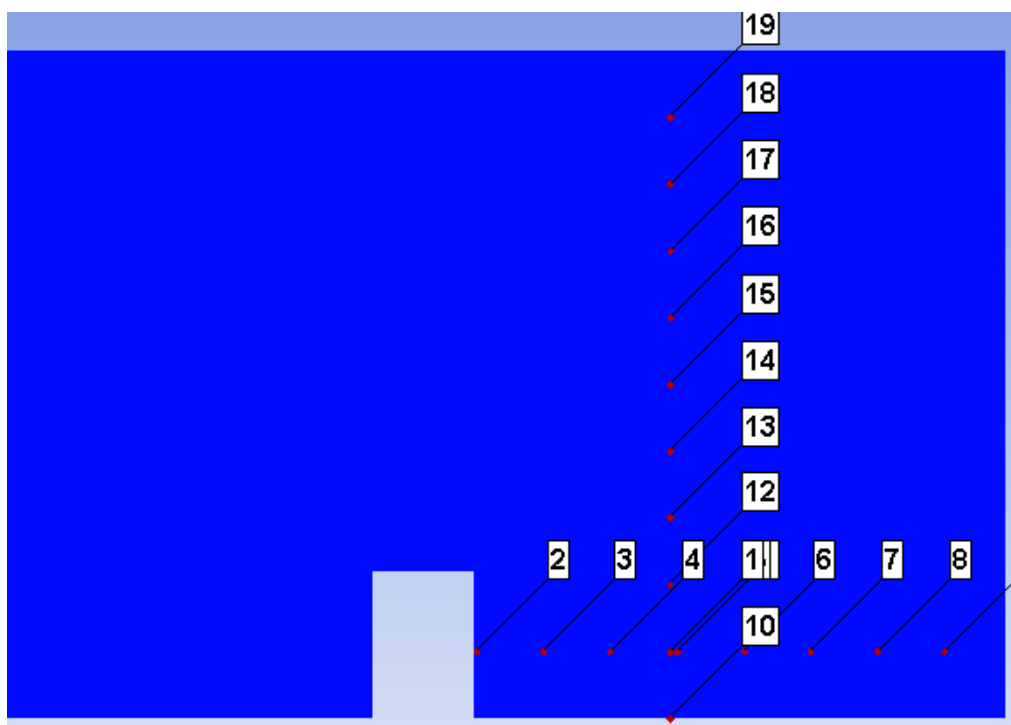
Det er to tydelige trekk verd å merke seg. Desto høyere barrieren er, desto lavere blir den maksimale trykkamplituden. Videre ser vi at høyere barriere fører til større tidsforsinkelse mellom den første sjokkfronten og den andre sjokkfronten som skyldes refleksjon fra bakken.



Figur 9.1 Trykkihistorie i gaugepunktet (1 meter høyde, 3 meter bak veggen) for forskjellige vegghøyder.

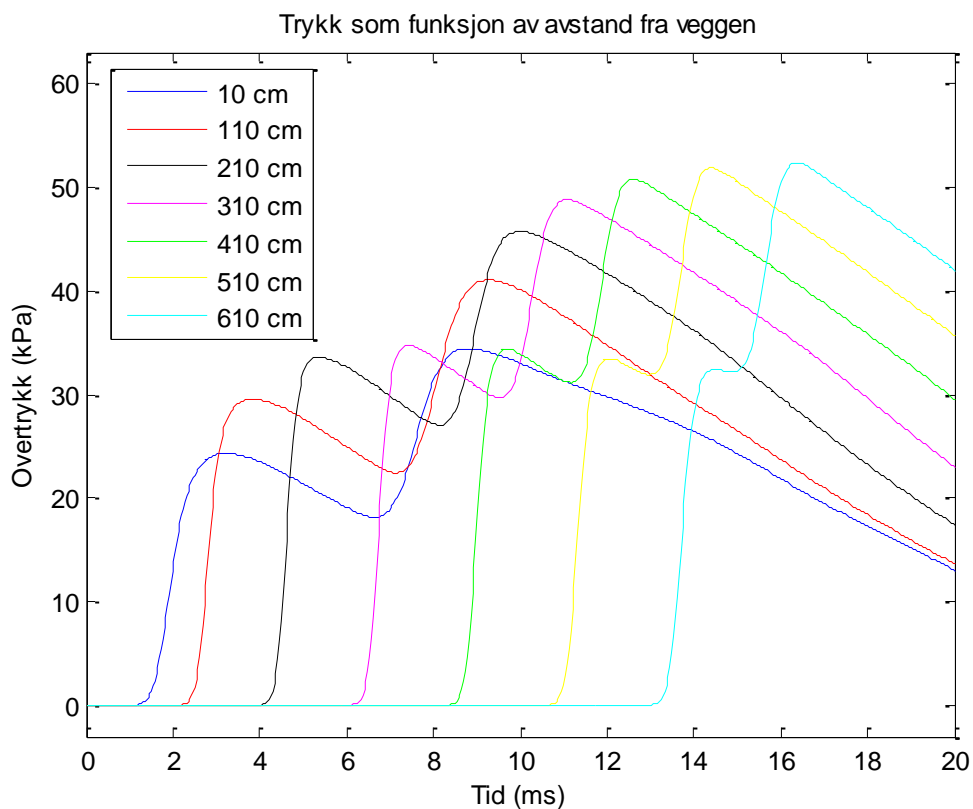
9.2 Trykk som funksjon av sensorens posisjon

Det kan også være interessant å se hvordan det nøyaktige trykk-tid forløpet avhenger av sensorens plassering. For å undersøke dette har vi lagt inn flere gaugepunkter, som illustrert i Figur 9.2. Vi bruker vegghøyden 212 cm, samme som i eksperimentet.

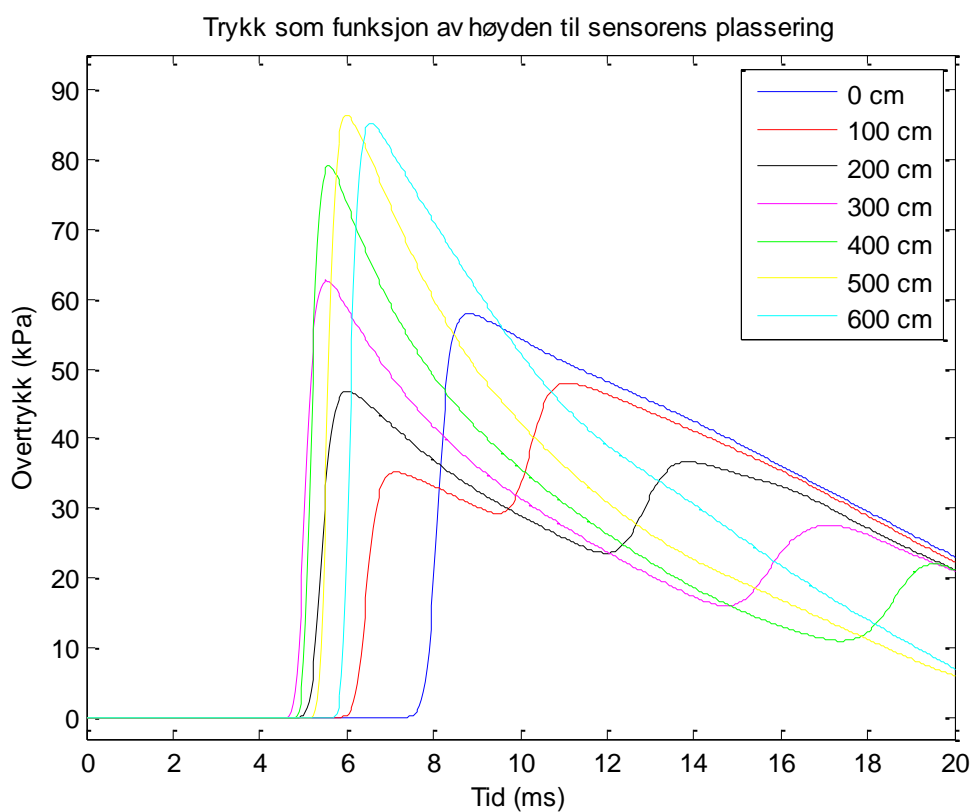


Figur 9.2 Plassering av ekstra gaugepunkter

Resultatene er vist i Figurene 9.3 og 9.4. Vi ser som forventet at det er mindre farlig å befinne seg nær veggen, men også der blir man utsatt for en betydelig trykkpåvirkning. Når det gjelder som funksjon av høyden er bildet mer komplisert. For sensorer plassert langt fra bakken unnslipper man den reflekterte trykkbølgen fra bakken, noe som gjør situasjonen bedre. På den annen side er man da "ubeskyttet" mot den opprinnelige sjokkbølgen.



Figur 9.3 Trykk for sensor med høyde 1 meter og variabel avstand bak veggen (Vegghøyde 212 cm).



Figur 9.4 Trykk for sensor tre meter bak veggen og i variabel høyde. (Vegghøyde 212 cm).

10 Zhou, Hao

Zhou og Hao (6) gjennomførte en rekke AUTODYN-simuleringer av lignende situasjoner for å kunne lage en empirisk/numerisk formel. Deres hovedinteresse var imidlertid det reflekterte trykket som funksjon av høyde på en bygning bak veggen.

Resultatene våre for trykk som funksjon av høyde i Figur 9.4 kan til dels sammenlignes med resultatene til Zhou og Hao. De gjorde simuleringer med mange forskjellige geometriske konfigurasjoner (avstand ladning-vegg, avstand vegg-bygning etc) og utviklet basert på dette en approksimativ empirisk-numerisk formel for å bestemme i hvilken høyde trykket var lavest etc. Hvis man benytter formelen deres for tilfellet studert i forrige kapitlet, får vi at trykket skal synke mellom 0 og 301 cm høyde, for deretter å øke frem til 736 cm og så begynne å synke igjen. Som vi ser av Figur 9.4 så synker makstrykket fra 0 cm til 200 cm høyde, for deretter å øke til 500 cm og deretter begynne å synke igjen. Dette er rimelig bra overensstemmelse gitt at tilfellene våre er noe forskjellige (vi har ingen bygning, men bare en sensor plassert i fri felt). Den generelle trenden passer meget bra.

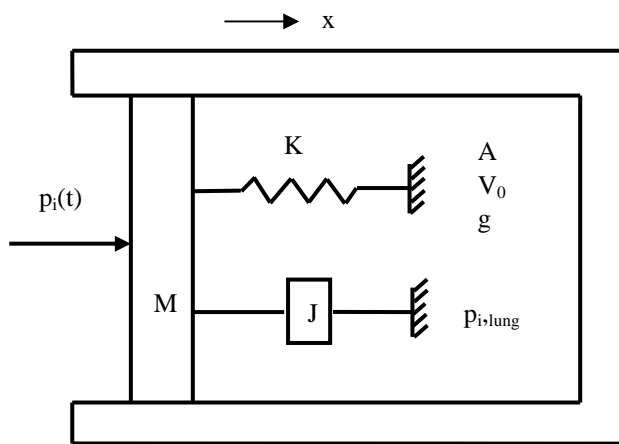
11 Skade på mennesker

Vi er primært interessert i trykkprofilen som funksjon av avstand bak barrieren og avstanden mellom bomben og barrieren. Altså en litt annerledes problemstilling enn Zhou og Hao som har sett på refleksjonstrykket mot en bygning som funksjon av høyde.

Egentlig er vi først og fremst interessert i hvor farlig det vil være for mennesker å oppholde seg i en gitt plassering og hvordan dette påvirkes av høyden på barrieren. Det finnes flere måter å beregne forventet skade på et menneske fra en trykkbølge. Ingen vet hvilken metode som er riktig for dette er et område hvor det generelt er vanskelig å finne frivillige til å gjøre kontrollerte eksperimentelle forsøk.

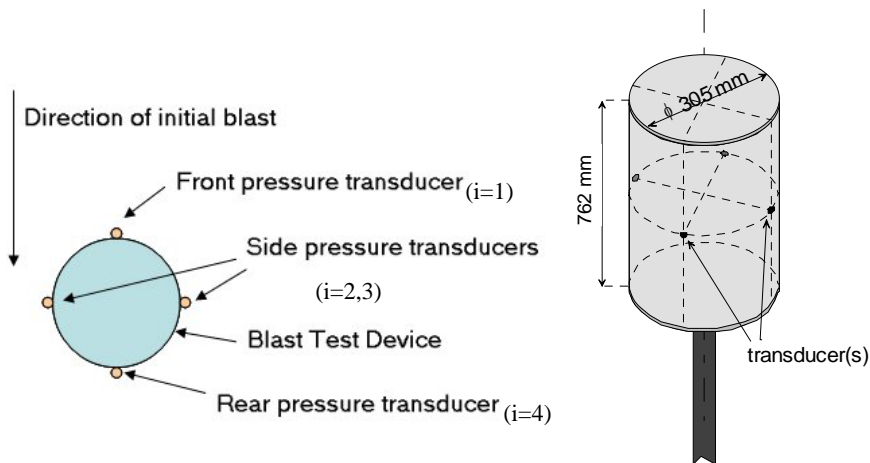
På 1960-tallet ble det imidlertid gjort en rekke dyreforsøk for å undersøke skader fra en sjokkbølge. Basert på skalering av disse forsøkene ble de såkalte "Bowen-kurvene" utviklet (7). Disse gir sannsynligheten for å dø som funksjon av den maksimale amplituden P og varigheten T til trykkbølgen. Disse kurvene ble senere revidert av Bass et.al. basert på nye data. Disse kurvene gjelder imidlertid kun i "fri felt" dvs. når kurvene har en klart definert maksimal amplitude og varighet. Vi så tidligere at barrieren medfører at trykkbølgen får to topper og da er det ikke klart om Bowen/Bass kurvene kan brukes.

For å løse dette problemet lagde Axelsson et. al. i 1996 en ny skademodell for mennesker (8). Modellen er en enkel SDOF-modell for bevegelsen til lungeveggen til et menneske. Som input til modellen trengs det trykkdata fra fire sensorer som er plassert med 90 graders mellomrom rundt en 305 mm Blast Test Device (BTD). Se figurene under.



Name	Explanation
A	Effective area
M	Effective mass
V_0	Lung gas volume at $x=0$
J	Damping factor
K	Spring constant
p_0	Ambient pressure
$p_i(t)$	External (blast) loading pressure
$p_{i,lung}(t)$	Lung pressure
g	Polytropic exponent for gas in lungs
x	Chest wall displacement

Figur 11.1 Axelssons matematiske modell av brystveggen



Figur 11.2 Blast Test Device (BTD).

Matematisk kan Axelsson BTD-modellen beskrives vha. fire uavhengige differensialligninger:

$$M \cdot \frac{d^2 x_i}{dt^2} + J \cdot \frac{dx_i}{dt} + K \cdot x_i = A \cdot [p_i(t) - p_{i,lung}(t)] \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (11.1)$$

$$p_{i,lung}(t) = p_0 \left(\frac{V_0}{V_0 - A \cdot x_i} \right)^g$$

Verdiene på de relevante konstantene er angitt i tabellen under. Bakgrunnen for konstantene fremgår imidlertid ikke av Axelssons originale artikkel.

Parameter	Units	70 kg body	Scaling Factor
M	kg	2.03	(M/70)
J	Ns/m	696	(M/70) ^{2/3}
K	N/m	989	(M/70) ^{1/3}
A	m ²	0.082	(M/70) ^{2/3}
V ₀	m ³	0.00182	(M/70)
g		1.2	

Tabell 11.1 Modellparametere for Axelsson BTD modellen.

Input til Axelsson BTD-modellen er altså de fire trykk-tid forløpene $p_i(t)$ målt på BTD'en. Fra dette kan ligningene løses for lungeveggposisjonen $x_i(t)$, lungeveggshastigheten $v_i(t) = \frac{dx_i}{dt}(t)$ og trykket internt i lungene $p_{i,lung}(t)$.

Siden det ikke er noen restriksjoner på $p_i(t)$, ser vi at modellen ikke er begrenset til "fri felt" situasjoner.

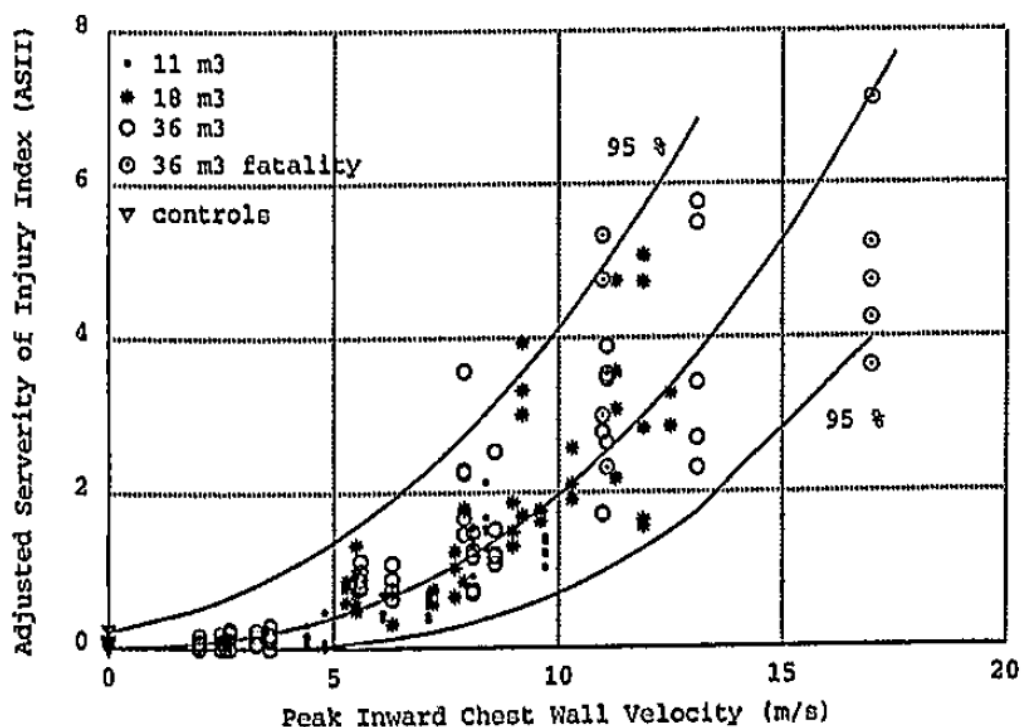
Basert på sprengningsforsøk med sauer i lukkede rom, klarte Axelsson å finne en sammenheng mellom output fra modellen sin og faktisk skade på dyrene (som antas å være den samme som skaden på et menneske). Mer presist så definerte han følgende "skadeparameter" V (altså gjennomsnittet av maksimal beregnet vegghastighet basert på p(t) input til hver sensor på BTD'en):

$$V = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 \max(v_i(t)) \quad (11.2)$$

Basert på kurvetilpasning (se figur), så fant han følgende sammenheng mellom V og ASII (som er en indikator på skade):

$$ASII = (0.124 + 0.117V)^{2.63} \quad (11.3)$$

Korrelasjonen mellom skadenivå, ASII og V er vist i tabellen. Vi ser at det er store usikkerheter og delvis overlappende intervaller.



Figur 11.3 Korrelasjon mellom målt ASII og lungeveggshastighet (hentet fra (8)).

Injury Level	ASII	V (m/s)
No injury	0.0-0.2	0.0-3.6
Trace to slight	0.2-1.0	3.6-7.5
Slight to moderate	0.3-1.9	4.3-9.8
Moderate to extensive	1.0-7.1	7.5-16.9
>50% Lethality	>3.6	>12.8

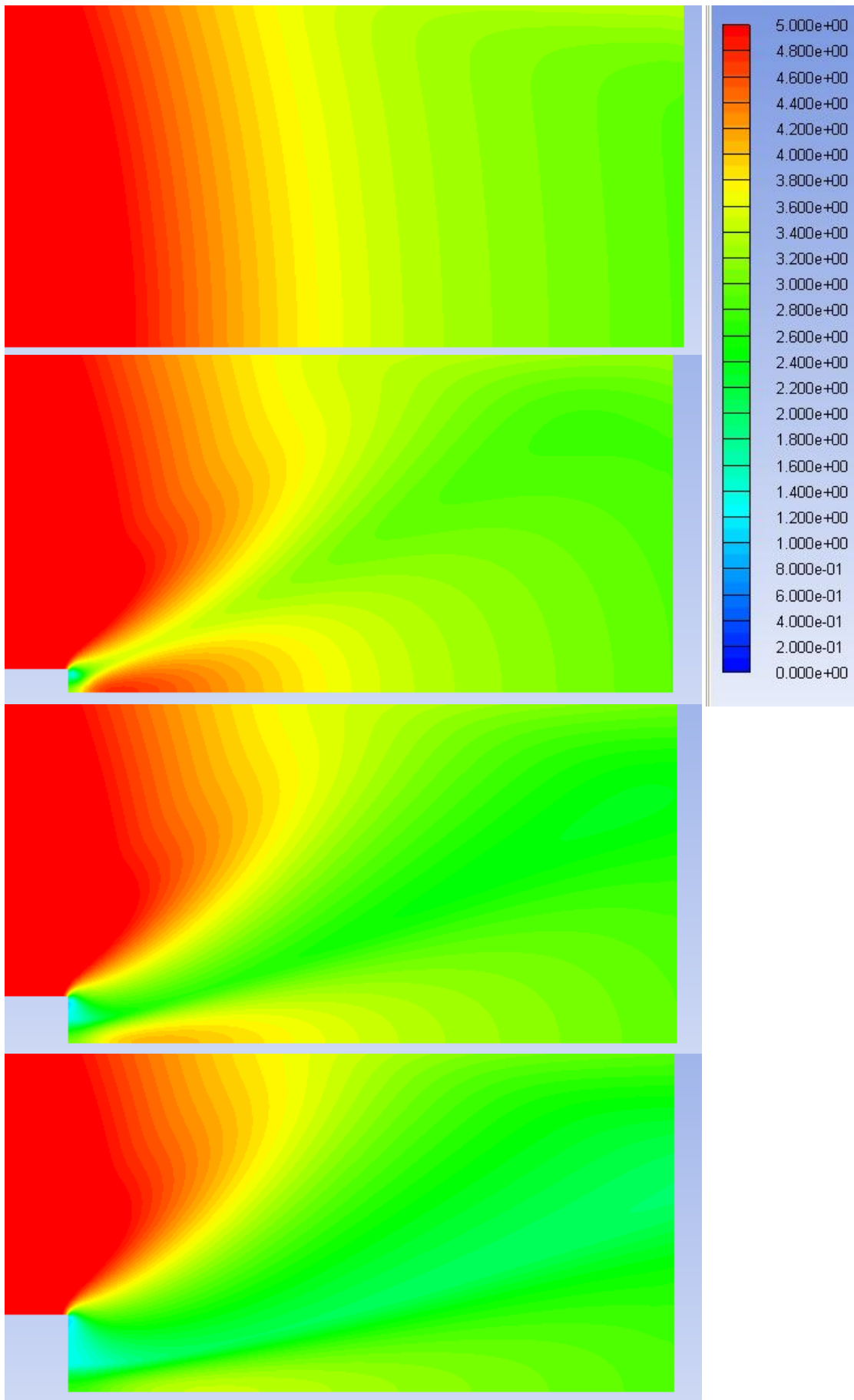
Tabell 11.2 Korrelasjon mellom skadenivå, ASII og V.

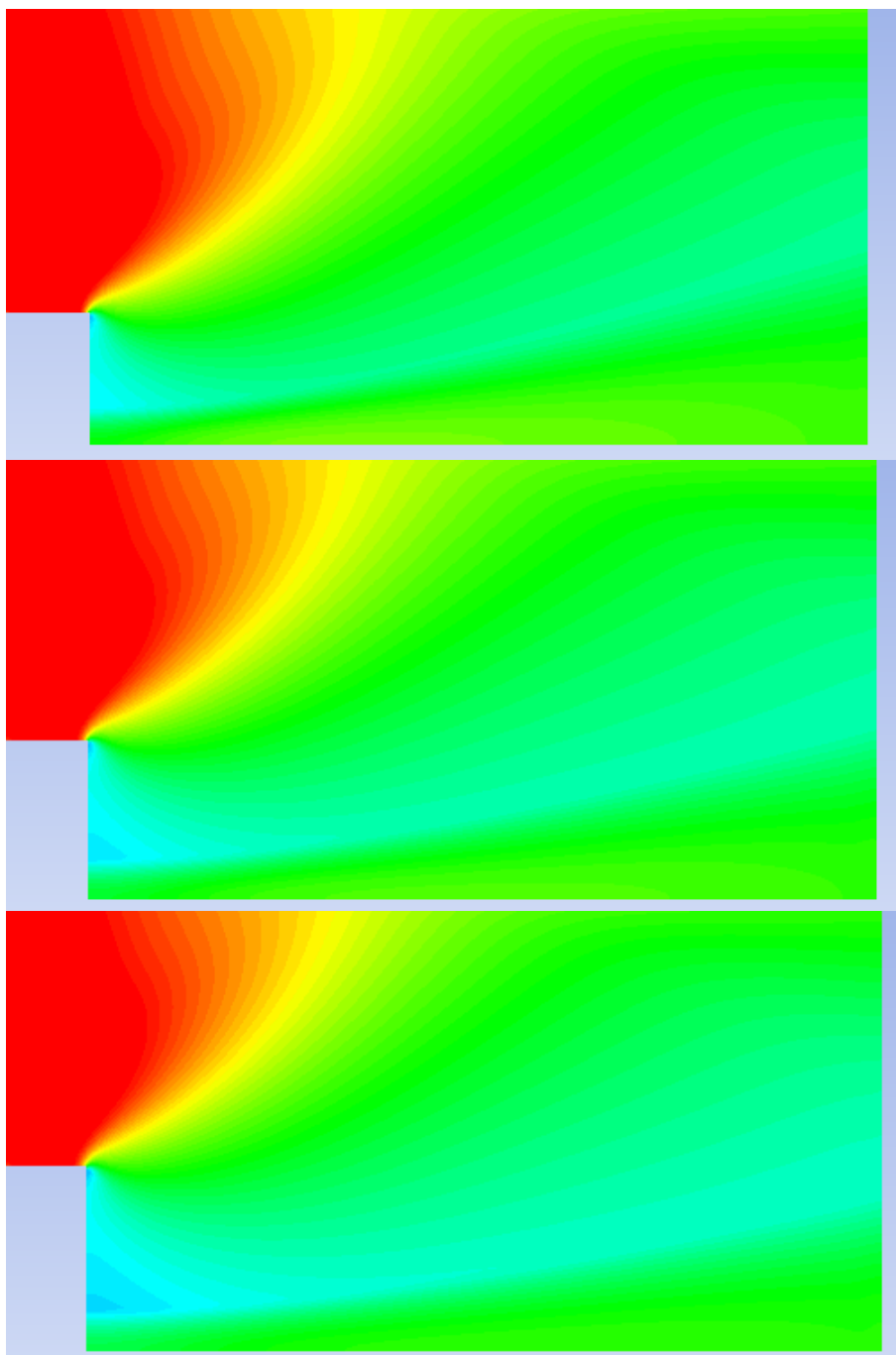
Axelsson BTD modellen løste altså problemet med Bowen/Bass metoden, men ulempen er at man trenger en BTD med fire sensorer i hvert punkt man ønsker å estimere skade. I (1,2) ble det imidlertid vist at tre "Single Point (SP)" metoder gav resultater i meget god overensstemmelse med Axelsson BTD. Gitt at Axelsson BTD gir riktige resultater, så kan man altså like godt benytte en av SP-metodene. Siden SP-metodene kun trenger "side-on" trykket som funksjon av tid som input er det betydelig enklere å benytte disse. To av disse metodene (Axelsson SP og Modifisert Weathervane SP) er implementert som egne subrutiner i AUTODYN og er derfor enkle å ta i bruk for å estimere skade på mennesker fra en sjokkbølge.

Axelsson SP er egentlig bare Axelssons modell men med "side-on" trykket som input. Weathervane SP bruker også side-on trykket, men for å estimere hva trykket på de forskjellige sensorene på en BTD ville ha vært, dersom denne hadde eksistert. I praksis blir det ikke veldig stor forskjell på resultatene fra disse metodene. For en fullstendig diskusjon, se (1,2).

12 Trykkfordeling bak veggen

I dette kapitlet vil vi studere trykkfordelingen og skade-estimer som funksjon av avstand bak barrieren for forskjellige barrierehøyde. Vi ser på det samme tilfellet med 420 kg ladning, 20 meter avstand til barrieren. Dette er kjørt med forskjellige vegghøyder (0 cm, 50 cm, 100 cm, 165 cm, 212 cm, 260 cm og 300 cm) og et estimat for skadeparameteren V i Axelssons BTM-modell (basert på Modifisert Weathervane) er beregnet. I konturplottene i Figur 12.1 under kan vi se hvordan V blir i de forskjellige tilfellene. (Se Tabell 11.2 for å se hvordan V relaterer seg til skade). Vi ser på avstanden 0-13 meter bak veggen (altså 21.5-34.5 meter fra bomben).



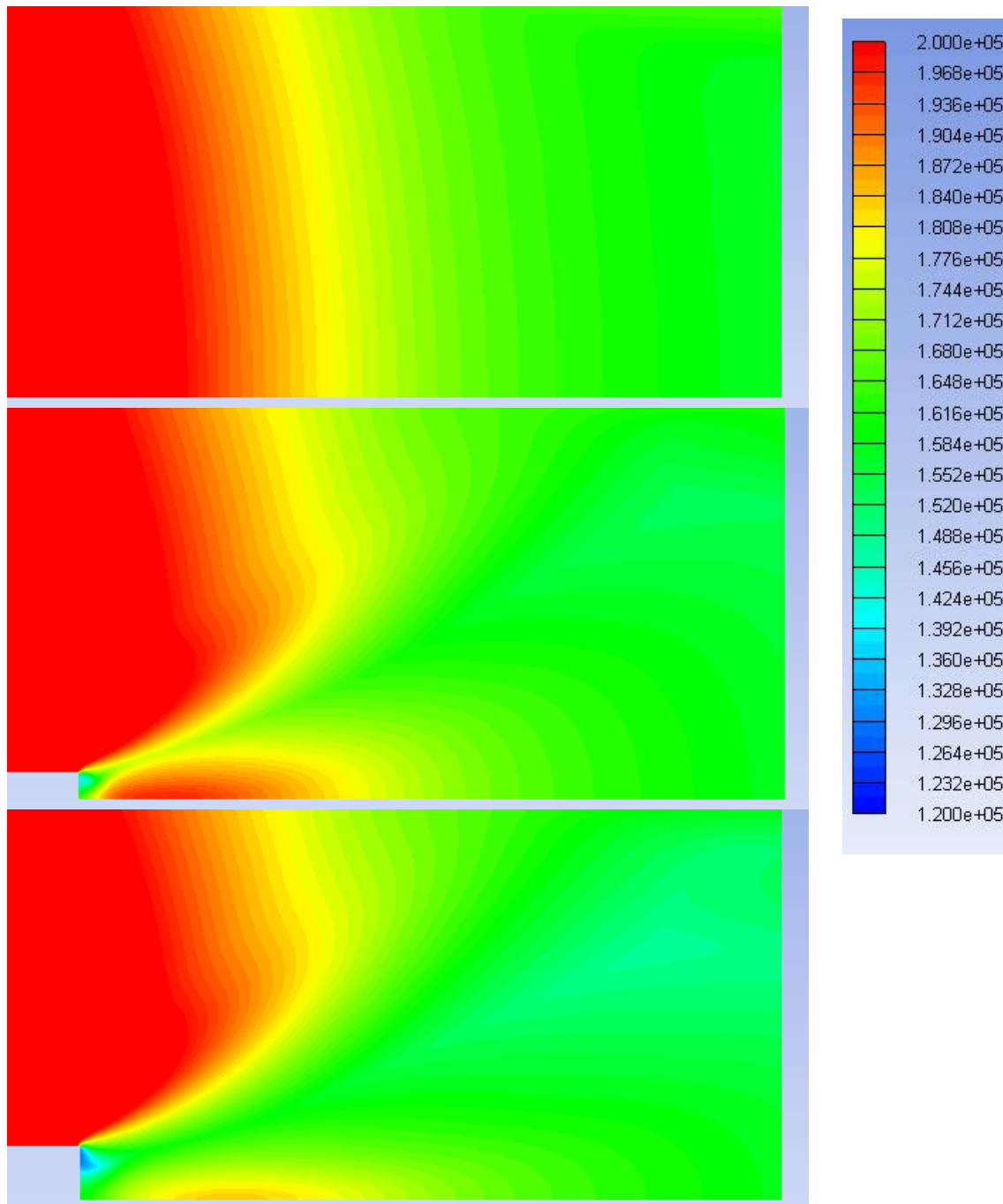


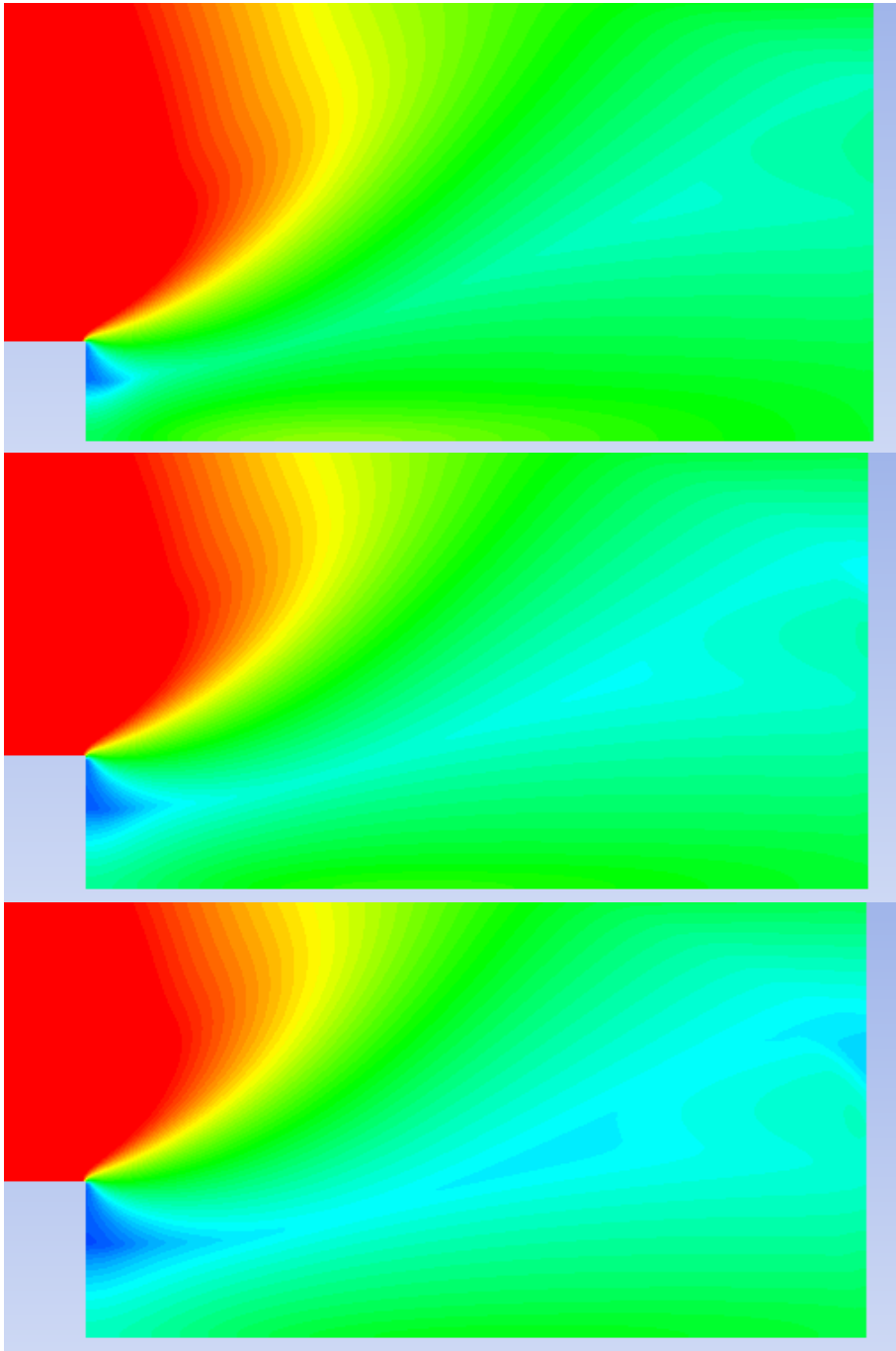
Figur 12.1 Konturplott av Axelssons skadeparameter V bak barrieren for forskjellige høyde av barrieren (0 cm, 50 cm, 100 cm, 165 cm, 212 cm, 260 cm, 300 cm)

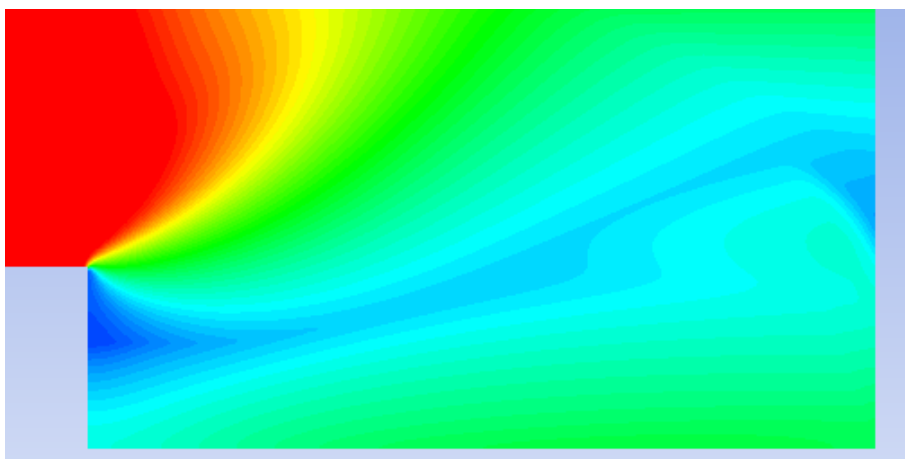
Det er interessant å merke seg at i følge disse beregningene så er det først og fremst i nærheten av barrieren at man får redusert skade. På avstandene ca. 8-13 meter bak barrieren har det faktisk relativt liten betydning om barrieren er 300 cm høy eller ikke eksisterer i det hele tatt.

Videre kan det være naturlig å studere hvordan dette i så fall avhenger av ladningsvekten og avstanden mellom ladning og barriere. Det kan tenkes at det vil være mulig å finne en numerisk-empirisk skadefunksjon ved å kjøre mange simuleringer, men dette vil være et arbeid som tar en del tid.

Det kan være interessant å lage tilsvarende konturplott for maksimalt trykk P_{max} , som er en mer intuitiv parameter. Dette er gjort i Figur 12.2. Merk at det ikke er noen direkte sammenheng mellom denne størrelsen og forventet skade (Bowen/Bass-kurvene bruker en kombinasjon av P_{max} og varigheten T av bølgen). Vi ser uansett at bildet er nokså likt for makstrykket som for Axelssons skadeparameter.

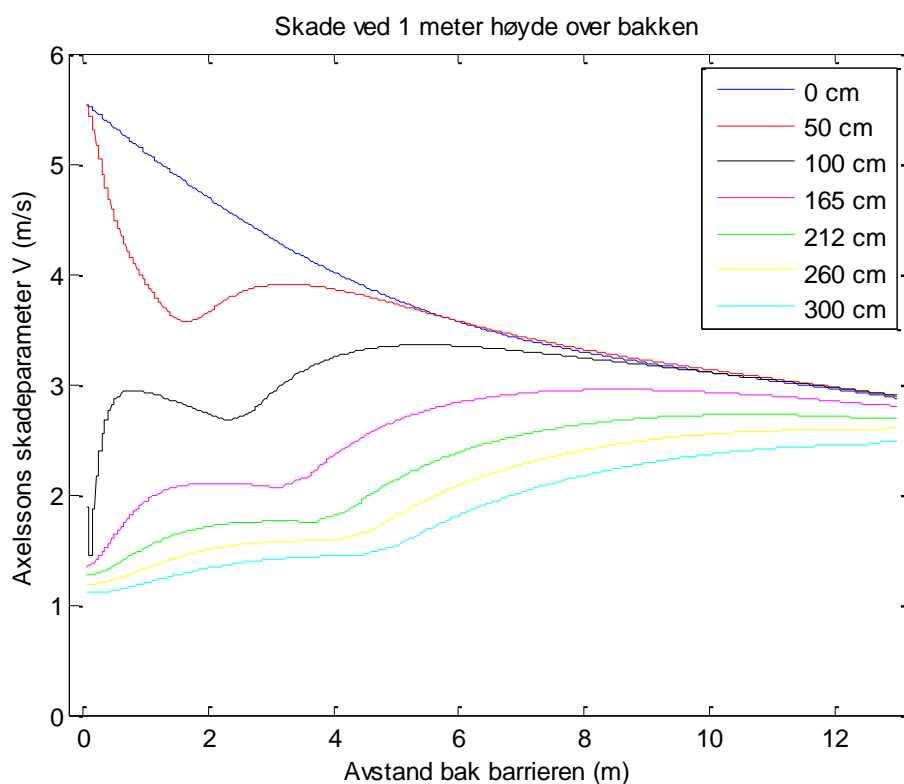




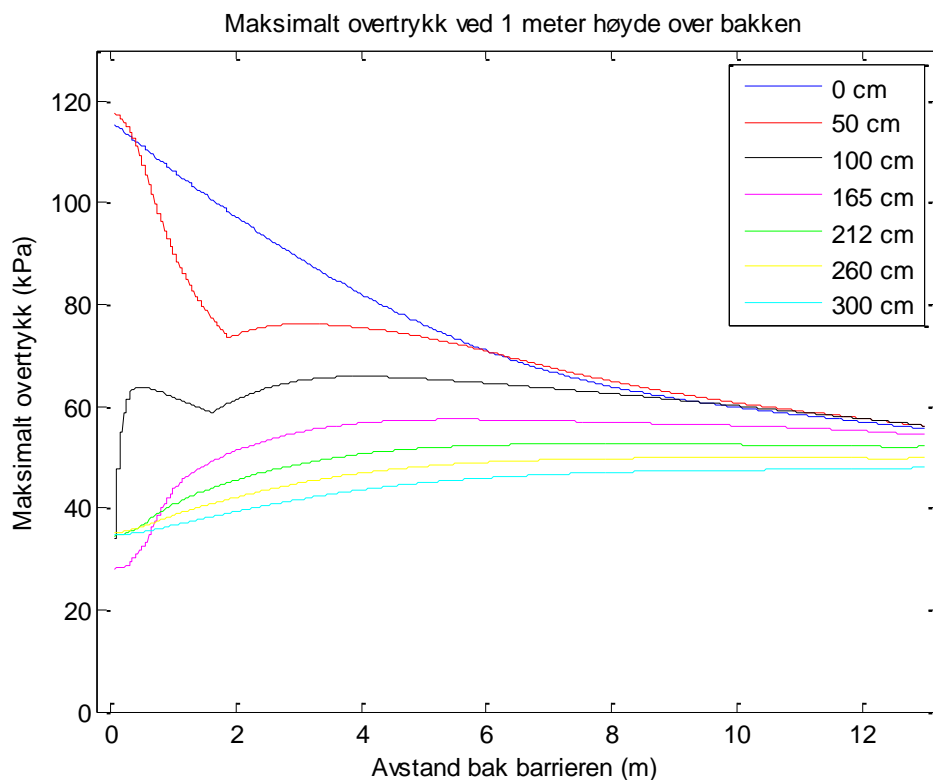


Figur 12.2 Konturplott av maksimalt overtrykk bak barrieren for de forskjellige barrierehøydene.

For ytterligere sammenligning har vi plottet skadeparameteren V og maksimalamplituden P_{\max} som funksjon av avstand bak barrieren i høyden 1 meter over bakken. Dette er vist i Figur 12.3 og 12.4. All denne informasjonen ligger for såvidt inne i konturplottene i Figur 12.1 og 12.2, men det er på denne måten kanskje enklere å visualisere betydningen av barrierehøyde.



Figur 12.3 Axelssons skadeparameter 1 meter over bakken som funksjon av avstand bak barrieren for forskjellige barrierehøyder.



Figur 12.4 Maksimalt overtrykk 1 meter over bakken som funksjon av avstand bak barrieren for forskjellige barrierehøyder.

Vi ser at for både Axelssons skadeparameter og P_{\max} så er bildet det samme. Desto høyere barrieren er, desto tryggere er det å befinne seg rett bak den. Men på større avstander har den minimal betydning. Kurvene for forskjellig barrierehøyde ser faktisk ut til å konvergere for større avstander.

13 Konklusjon

Vi har studert forplantningen av en sjokkbølge bak en barriere ved hjelp av numeriske simuleringer med hydrokoden AUTODYN. Sammenligning med målinger viste stort sett meget godt samsvar. De avvikene som fantes kan trolig forklares som følge av at detonasjonen ikke førte til en helt ideell trykkbølge samt uregelmessigheter i den faktiske bakkegeometrien.

Ved hjelp av en matematisk modell for skade på mennesker, implementert som en subrutine i AUTODYN, ble beskyttelsespotensialet til barrieren undersøkt som funksjon av barrierehøyde og avstand bak barrieren. Det synes ganske klart at en fysisk barriere først og fremst gir beskyttelse mot sjokkbølgen aller nærmest barrieren. På lengre avstander har barrieren liten betydning. Imidlertid kan den fremdeles gi beskyttelse mot fragmenter på større avstander.

Referanser

- (1) Teland J A, van Doormaal JCAM, van der Horst MJ, Svinsås E, Single point methods for determining blast wave injury, FFI/RAPPORT-2011/00130
- (2) Teland J A, van Doormaal JCAM, van der Horst MJ, Svinsås E, A single point pressure approach as input for injury models with respect to complex blast loading conditions, Proceedings of 21st International Symposium on Military Aspects of Blast and Shock, Jerusalem, Israel, 3-8 oktober 2010
- (3) Kiran J H, Teland J A, Estimating the fragmentation characteristics and penetration effects of an IED, FFI/RAPPORT-2009/00845
- (4) Teland J A, Kiran J H, Penetration of highly irregular fragments, Proceedings of the 13th Int. Symposium on the Interaction of the Effects of Munitions with Structures, Brühl, Tyskland, 11-15 mai 2009
- (5) www.ansys.com
- (6) Zhou X Q, Hao H, Prediction of air blast loads on structures behind a protective barrier, Int. Journal of Impact Engineering, Vol 35 (5), pp. 363-375, 2008
- (7) Bowen I G, Fletcher E R, Richmond D R, Estimate of man's tolerance to the direct effects of air blast, Technical progress report, Defense Atomic Support Agency, 1968
- (8) Axelsson H, Yelverton J, Chest wall velocity as a predictor of nonauditory blast injury in a complex wave environment, Journal of Trauma, Vol 40, No. 3, pp. 31-37, 1996

Appendix A Materialmodeller

Material Name - AIR

Equation of State	Ideal Gas
Reference density	1.22500E-03 (g/cm ³)
Gamma	1.40000E+00 (none)
Adiabatic constant	0.00000E+00 (none)
Pressure shift	0.00000E+00 (kPa)
Reference Temperature	2.88200E+02 (K)
Specific Heat	7.17600E+02 (J/kgK)
Thermal Conductivity	0.00000E+00 (J/mKs)
Strength	None
Failure	None
Erosion	None
Material Cutoffs	-
Maximum Expansion	1.00000E-01 (none)
Minimum Density Factor	1.00000E-04 (none)
Minimum Density Factor (SPH)	2.00000E-01 (none)
Maximum Density Factor (SPH)	3.00000E+00 (none)
Minimum Soundspeed	1.00000E-02 (m/s)
Maximum Soundspeed (SPH)	1.01000E+20 (m/s)
Maximum Temperature	1.01000E+20 (K)
Reference:	"Thermodynamic and Transport Properties of Fluids, SI Units", GFC Rogers, YR Mayhew

Material Name - TNT

Equation of State	JWL
Reference density	1.63000E+00 (g/cm ³)
Parameter A	3.73770E+08 (kPa)
Parameter B	3.74710E+06 (kPa)
Parameter R1	4.15000E+00 (none)
Parameter R2	9.00000E-01 (none)
Parameter W	3.50000E-01 (none)
C-J Detonation velocity	6.93000E+03 (m/s)
C-J Energy / unit volume	6.00000E+06 (kJ/m ³)
C-J Pressure	2.10000E+07 (kPa)
Burn on compression fraction	0.00000E+00 (none)
Pre-burn bulk modulus	0.00000E+00 (kPa)
Adiabatic constant	0.00000E+00 (none)
Auto-convert to Ideal Gas	Yes
Additional Options (Beta)	None
Strength	None
Failure	None
Erosion	None
Material Cutoffs	-
Maximum Expansion	1.00000E-01 (none)
Minimum Density Factor	1.00000E-06 (none)
Minimum Density Factor (SPH)	2.00000E-01 (none)
Maximum Density Factor (SPH)	3.00000E+00 (none)
Minimum Soundspeed	1.00000E-06 (m/s)
Maximum Soundspeed (SPH)	1.01000E+20 (m/s)
Maximum Temperature	1.01000E+20 (K)
Reference:	JWL Equations of State Coeffs. for High Explosives Lee Finger & Collins. UCID-16189. January 1973