



HØGSKOLEN STORD/HAUGESUND

Gasseksplosjoner



Hovedprosjekt utført ved Høgskolen Stord/Haugesund - Avd. for ingeniørfag

Studieretning : Brannsikkerhet

Av : Finholth, Magne
Kristjansson, Gudmundur
Simonsen, Roy Atle

Haugesund

2003



HØGSKOLEN STORD/HAUGESUND

Høgskolen Stord/Haugesund
Avdeling for ingeniørfag
Bjørnsonsgt. 45
5528 HAUGESUND
Tlf. nr. 52 70 26 00
Faks nr. 52 70 26 01

Oppgavens tittel Gassekspløsjoner		Rapportnummer
Utført av Finholth, Magne Gudmundur, Kristjansson Simonsen, Roy Atle		
Linje Sikkerhet		Studieretning Brannsikkerhet
Gradering Åpen	Innlevert Dato 02.05.03	Veileder ved HSH Leiv Anfin Drange Geri Wagner
Oppdragsgiver ResQ		Kontaktperson hos oppdragsgiver Svein Arne Aksland

Ekstrakt

Denne oppgaven inneholder en beskrivelse av hvordan simuleringsprogrammet FLACS er benyttet sammen med praktiske forsøk for å kartlegge ResQ's demonstrasjonsekspløsjon. Hensikten er å fremskaffe informasjon som skal kunne brukes i den teoretiske undervisningen. FLACS er også benyttet for å belyse faktorer som har betydning for utfallet av gassekspløsjoner i containeren.

Forord

Rapporten "Gassekspløsjoner" omfatter underskrevnes skriftlige del av hovedprosjekt, levert ved Høgskolen Stord Haugesund våren 2003. Hovedprosjektet inngår som en obligatorisk del av ingeniørutdanningen ved linjen Sikkerhet. Hensikten med prosjektarbeidet var å få anvendt kunnskaper, opparbeidet gjennom studiet, til praktisk problemløsning, samt å tilegne oss ny kunnskap og erfaring.

Valg av prosjektoppgave ble gjort på følgende bakgrunn:

- Som en del av undervisningen, tredje studieår, fikk vi anledning til å beskue en demonstrasjon av gassekspløsjon på ResQ`s øvingsfelt. Demonstrasjonen ga grobunn for fascinasjon av, og interesse for eksplosjonsfenomenet
- Fag som strømningslære, brannodynamikk, og eksplosjonssikring har økt vår kunnskap men også gitt oss innblikk i hvor komplekst fagområdet er
- I forbindelse med Leif Anfin Dranges doktorgradsarbeid, fikk vi tilgang på simuleringsprogrammet FLACS samt tilhørende opplæringskurs. Programvaren ga oss en unik mulighet til å studere gassekspløsjoner.

Vi ønsker å takke siv. ing Leif Anfin Drange (HSH), dr. Geri Wagner (HSH) og ing. Svein Arne Aksland (ResQ) for all hjelp og veiledning. Samtidig vil vi takke ResQ for lånet av forsøksrigg og forsyning av propan.

Haugesund 02.05.03

Magne Finholth

Gudmundur Kristjansson

Roy Atle Simonsen

Sammendrag

I forbindelse med økt omfang av gassbruk er sikkerhet i forhold til gassekspløsjoner et viktig tema. Gassekspløsjoner kan forebygges med økt kunnskap om fenomenet. For å opprettholde sikkerheten er det viktig at personell som oppholder seg og arbeider i utsatte områder er kjent med den faren gass kan utgjøre. ResQ er et selskap som underviser personell innen offshore, landbasert og maritim virksomhet. Et av undervisningsoppleggene på ResQ innbefatter demonstrasjon av en gassekspløsjon.

Denne oppgaven inneholder en beskrivelse av hvordan simuleringsprogrammet FLACS er benyttet sammen med praktiske forsøk for å kartlegge ResQ`s demonstrasjonsekspløsjon. Hensikten er å fremskaffe informasjon som skal kunne brukes i den teoretiske undervisningen. FLACS er benyttet for å belyse faktorer som har betydning for utfallet av gassekspløsjoner i containeren.

Arbeidet har resultert i:

- Verdier for gassutslipp, antennelsestidspunkt og trykkoppbygning i ResQ`s demonstrasjonsekspløsjon er gjort kjent
- Følgende faktorer innvirkning på eksplosjonsforløpet er blitt belyst:
 - gass-skyens størrelse
 - gasskonsentrasjon
 - plassering av tennkilde
 - obstruksjoner
 - åpningsareal
- Animasjoner av utvalgte eksplosjoner er blitt laget

Innholdsfortegnelse

FORORD	I
SAMMENDRAG	II
INNHOLDSFORTEGNELSE	III
1 INNLEDNING	1
1.1 Tema	1
1.2 Bakgrunn	1
1.3 Formål	2
1.4 Utfall av gaseksplosjoner; påvirkende faktorer	2
1.5 Problemstilling	7
1.6 Avgrensninger	7
2 DEFINISJONER OG ORDFORKLARINGER	8
3 PROGRAMVARE OG FORSØKSFELT	11
3.1 FLACS – Flame acceleration simulator	11
3.2 Forsøksfelt	13
4 METODE	14
4.1 Forsøksoppsett ved ResQ's øvingsfelt	14
4.2 Simulering av demonstrasjonseksplosjon	16
4.3 Simulering av andre scenarier	18
5 RESULTATER	21
5.1 Resultater fra forsøk	21
5.2 Resultater fra simuleringer	22
6 DISKUSJON	37
6.1 Sammenligning av resultat fra simulering av demonstrasjonseksplosjon, og forsøk	37
6.2 Simuleringer av andre scenarier	40
7 KONKLUSJON	43
8 LITTERATURLISTE	44
VEDLEGG	45

1 Innledning

1.1 Tema

Anvendelse av gass har hatt en betydelig økning de siste 25 år. Naturgass utgjør i dag 20 % av verdens energi forsyning [1]. Det er ingen grunn til å tro at denne utviklingen vil avta. Tvert i mot. Ettersom fornybare energikilder som vind og vannkraft ikke lenger dekker den økende energietterspørselen, vil gass være et alternativ.

Økt bruk av gass medfører også at flere mennesker, og materielle verdier, daglig utsettes for den eksplosjonsfaren gass kan utgjøre. Siden konsekvensen av utilsiktede gasseksplosjoner ofte er katastrofale er det særdeles viktig å sette fokus på sikkerheten.

1.2 Bakgrunn

For å kunne forebygge ulykker med gass, og begrense skadene av eksplosjoner, er det en forutsetning å ha kunnskap om fenomenet. Gasseksplosjoner er et meget omfattende og komplekst fagområde som har vært gjenstand for mange års forskning. Hensikten har vært, og er fortsatt, å utvikle verktøy og løsninger for næringslivet.

CMR AS ble etablert i 1992. Selskapet eies av Chr. Michelsen Institutt (CMI) og Universitetet i Bergen (UiB). Selskapet fører videre den oppdragsbaserte naturvitenskapelige forskning og utviklingsvirksomheten som tidligere ble drevet i egen regi av CMI. GexCon ble skilt ut som datterselskap til CMR i 1998 og tok i år 2000 over all konsulentvirksomhet relatert til gasseksplosjoner.

Gas explosion handbook [2] ble skrevet som en del av Christian Michelsen Research's forskningsprogram 1990-1992. Håndboken gir en innføring i emnene gasseksplosjoner og sikkerhet, basert på kunnskap om emnene, og erfaringer fra problemløsning i industrien. CMR har i samarbeid med oljeselskap og myndigheter utviklet CFD simuleringsverktøyet FLACS. FLACS blir brukt i prosjektering i offshorevirksomhet og i landbasert kjemisk industri for å kunne redusere faren for, og konsekvensene av eksplosjoner. Programvaren ble sammen med håndboken nyttet i denne oppgaven. Nærmere beskrivelse av FLACS gis under kapittel 3.1.

En av de viktigste faktorene i alt sikkerhetsarbeid er å etablere kunnskap og forståelsen hos de som daglig oppholder seg og arbeider i utsatte områder, i denne sammenheng der gass utvinnes, foredles eller anvendes.

ResQ er et selskap som underviser personell innen offshore, landbasert og maritim virksomhet. ResQ's mål er, sitat fra ResQ's hjemmeside (<http://www.resq.no/indexno.htm>): "For våre kunder skal vi; sørge for at sikkerhet og beredskap ivaretas i prosjektering, bygging og drift.". Som en del av undervisningen får kursdeltakerne se og oppleve hvordan en eksplosjon, som følge av gassutslipp, arter seg. Demonstrasjonen tar sted på ResQ's øvingsfelt i en 20 fots container.

1.3 Formål

Ekspløsjonsforløpet ved ResQ's demonstrasjon har ikke tidligere blitt studert. Instruktørene kan derfor ikke supplere demonstrasjonen med informasjon om det som har foregått. Dvs. at mengden gass som er antent og trykkoppbygning i og utenfor containeren er ukjent.

Ved å simulere eksplosjonen med anerkjent dataverktøy kan forløpet gjøres kjent og deretter brukes i undervisningen. Denne simuleringen vil og kunne danne grunnlaget for simuleringer av andre eksplosjoner i samme geometri. Resultatene fra, og animasjoner av, disse kan deretter anvendes i den teoretiske undervisningen slik at kursdeltakerne får større forståelse av fenomenet.

Formålet med denne oppgaven er derfor å:

- Bidra til å forbedre deler av innholdet i et eksisterende undervisningsopplegg ved ResQ.
- Belyse hvordan forandring av enkelte parametere har innvirkning på utfallet av eksplosjoner i en gitt geometri.

1.4 Utfall av gassekspløsjoner; påvirkende faktorer

I dette kapitlet gis det korte teoretiske forklaringer på noen av de faktorene som påvirker utfallet av en gassekspløsjon. I tillegg gis det eksempler på deler av den forskningen som er gjort ved CMI som støtter opp under disse forklaringene. Figurer og tabeller er hentet fra [2].

Konsekvensene av en gassekspløsjon er hovedsakelig avhengig av

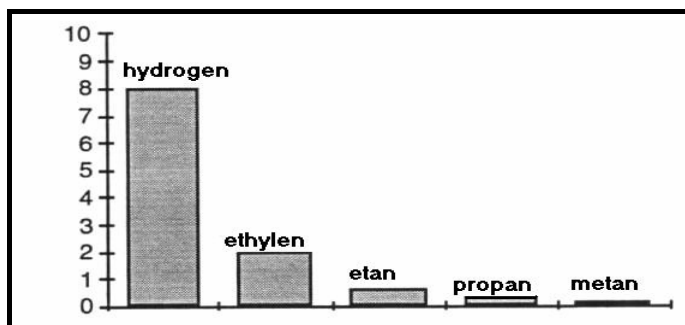
- type brensel og oksidant
- blandingsforholdet brensel/luft
- størrelse og plasseringen av skyen
- tennkildens plassering og styrke
- antall, størrelse og utforming av obstruksjoner/inventar
- avlastningsflaters type, geometri, plassering og størrelse
- volumets størrelse, geometri

(hentet fra Gas explosion handbook [2])

1.4.1 Type brensel

Både sannsynligheten for og konsekvensene av gassekspløsjoner avhenger i stor grad av typen brensel. Under like forhold vil forskjellige brensel/luftblandinger generere forskjellig trykk. I dag finnes ingen standard prosedyre for å klassifisere eksplosjonsfaren til forskjellige gasser ut i fra trykket de generer. Men forsøk har vist at det er mulig å få til en kvalitativ rangering.

Bjørkhaug gjorde i 1988 en rekke eksperimenter med turbulent deflagrasjon av hydrogen/luft blanding og andre hydrokarbon/luft blandinger. Noen av resultatene er presentert i figur 1. Resultatene i figuren er basert på resultater fra et gitt forsøksoppsett. Andre oppsett vil gi andre verdier for trykk, men rangeringen vil gjelde i de fleste tilfeller.

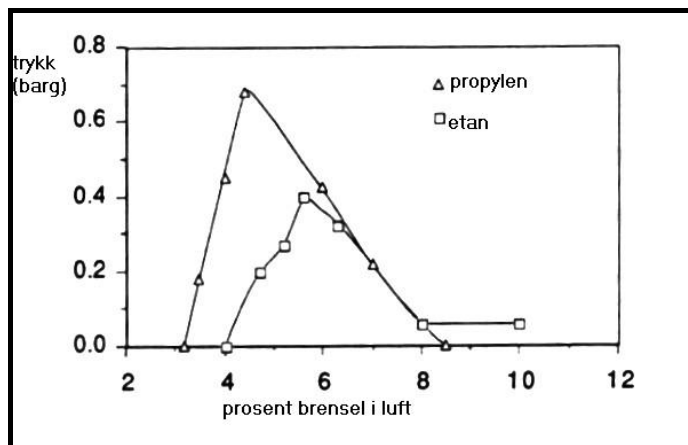


Figur 1 - Deflagrasjonstrykk (i barg).

1.4.2 Brenselkonsentrasjon

Dersom forblandet brensel/luftblanding skal kunne brenne må brenselkonsentrasjonen ligge innenfor brennbarhetsgrensene (øvre og nedre brennbarhetsgrense). Ved konsentrasjoner nær brennbarhetsgrensene vil forbrenningen skje sakte. Forsøk har vist at høyest eksplosjonstrykk oppstår når brensel/luft blandinger er støkiometriske eller like over.

Figur 2 viser resultater fra forsøk gjort av Bjørkhaug (1998). Tabell 1 inneholder verdier for øvre og nedre brennbarhetsgrense samt støkiometrisk blanding for etan og propylen i luft.



Figur 2 – Maksimalt trykk som funksjon av brenselkonsentrasjonen i luft.

Tabell 1 - Brennbarhetsgrenser og støkiometrisk konsentrasjon for etan og propylen

Gass	Øvre br.grense (vol%)	Nedre br.grense (vol%)	Støkiometri (vol%)
Etan	3,0	12,5	5,6
Propylen	2,4	10,3	4,4

1.4.3 Gass-skyens størrelse

En gass sky som øker i størrelse vil og øke sitt totale energiinnhold når konsentrasjonen er konstant. De resulterende eksplosjoner av henholdsvis liten og stor gass sky vil derfor være forskjellige. Men når trykkoppbygningen inne i en gitt konstruksjon er gjenstand for studie er forholdene annerledes.

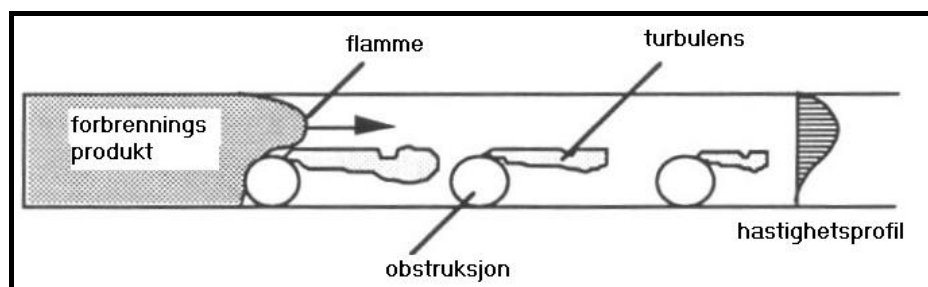
Beregninger gjort av Pappas (1983) tilsier, at i noen situasjoner kan 30-50% fylling av volumet være tilstrekkelig for å oppnå det samme eksplosjonstrykket inne i konstruksjonen som ved fylling av hele volumet. Forklaringen på dette er at under

eksplosjonen vil de gassene som brenner ekspandere og skyve de uforbrente gassene foran seg. Mye av brenselet vil derfor brenne utenfor konstruksjonen, og bidrar ikke til trykkoppbygningen innenfor. Dette forholdet er svært avhengig av tennkildens plassering og er kun gjeldende for de tilfeller der gassen antennes i motsatt ende av åpningsflaten.

1.4.4 Obstruksjoner

Alle hindringer forbrent og uforbrent gass må forsure vil generere turbulens i strømmingen. Turbulensen kommer av at det dannes virvler når gassen passerer et objekt. Flammefront som møter uforbrent gass under turbulente forhold vil øke sitt areal ved å bli revet og stykket opp av virvlene. Dette fører til at mer uforbrent gass blir eksponert for varme, hvilket medfører at mer gass forbrenner per tidsenhet, som i neste rekke fører til at mer gass må ekspandere per tidsenhet (gass som varmes opp uten å kunne ekspandere vil øke trykket). Flammefrontens hastighet vil da øke. Økt hastighet øker graden av turbulens i strømmingen. En selvforsterkende økning av turbulens er derfor resultatet i slike geometrier.

Forsøk og simuleringer har vist at denne effekten øker dersom obstruksjonene gjentas, se figur 3.

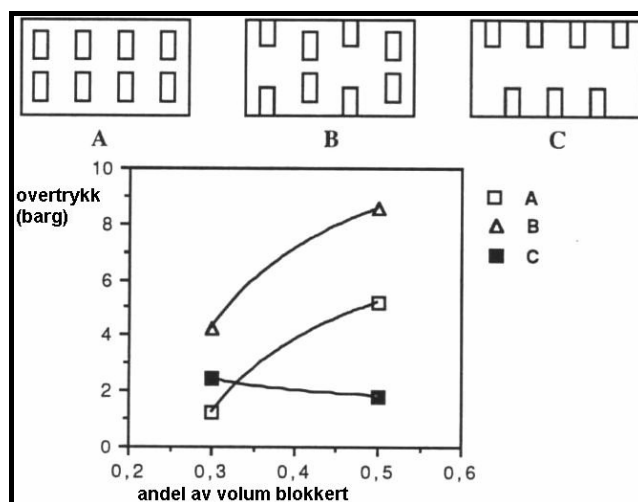


Figur 3 – Turbulens i strømming grunnet obstruksjoner.

Fra forsøk, gjort av Hjertager (1986) og Van Wingerden (1991), kunne det konkluderes med at trykkoppbygning som følge av obstruksjoner var avhengig av følgende:

- Hvor stor del av volumet var blokkert; større andel blokkering medfører, i fleste tilfeller, økt turbulens.
- Antall obstruksjoner; den selvforsterkende turbulensøkningen beskrevet over blir størst dersom flammen får passere gjentatte obstruksjoner.
- Formen på obstruksjonene; obstruksjoner med skarpe kanter gir mer turbulens en de med avrundede kanter.

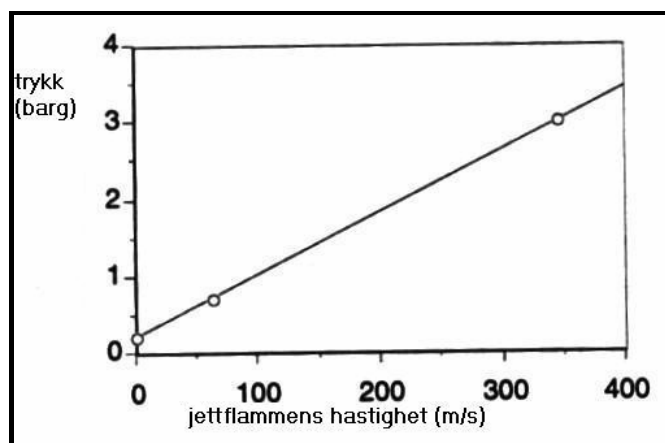
Også plasseringen av obstruksjonene er avgjørende. Resultater fra Van Wingarden (1991) er presentert i figur 4 for å gi et bilde på kompleksiteten av denne faktoren. A, B og C viser hvordan obstruksjonene plassering i forsøksriggen mens grafen gir resulterende trykkoppbygning.



Figur 4 – Trykkoppbygningen i tre forskjellige geometrier.

1.4.5 Tennkilden

R. K. Eckhoff har undersøkt eksplosjoner der gass-skyen antennes av en jettflamme. Forsøkene ble utført i en 50m³ tubeformet rigg med diameter 2,5m og åpen i ene enden. Tennkilden ble plassert i den lukkede enden. Hovedkonklusjonen fra disse forsøkene var at jettflammens hastighet var en meget sterkt påvirkende faktor for det resulterende eksplosjonstrykket. Figur 5 illustrerer sammenhengen mellom jettflammens hastighet og produsert overtrykk i dette forsøkssettet.



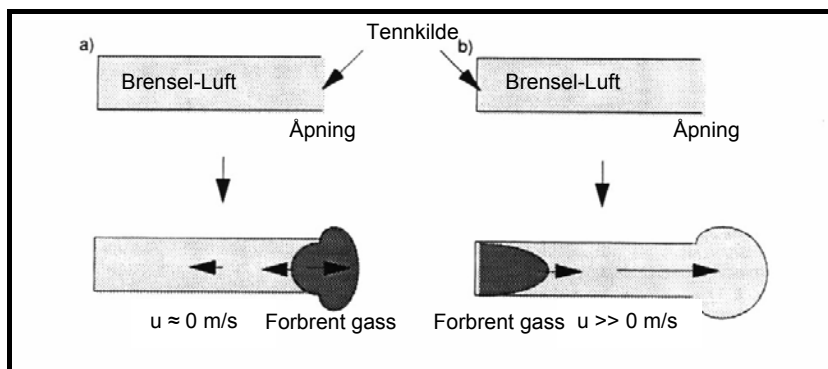
Figur 5 - Eksplosjonstrykk som funksjon av jettflammens hastighet.

I forsøk gjort av Wilkins og Alfert (1991) viste det seg at antennelse med jettflamme hadde større innvirkning dersom forsøksvolumet inneholdt obstruksjoner, en om det var tomt.

Ekspirer og simuleringer gjort i FLACS har vist at plasseringen av tennkilden kan være meget avgjørende for eksplosjonstrykket. Generelt vil en få minst trykkoppbygning ved å plassere tennkilden nært

ventilasjonsåpningen og i ytterkant av gass-

skyen. Figur 6 viser hvor forskjellig strømningsbildet blir ved å forandre tennkildens plassering (figuren er en kraftig forenkling). Lys farge indikerer gass/luft blanding, mens mørk indikerer forbrenningsprodukter. Ved antennelse i åpningen vil strømningshastigheten foran flammen være lav. Antennelse lengst vekk fra åpningen medfører at forbrenningsproduktene ekspansjon, øker flammehastigheten (bidrar med skyvekraft). Økende strømningshastighet, øker turbulensen og da forbrenningshastigheten (graden av turbulens i strømming er avhengig av blant annet strømningshastigheten, økende hastighet gir økt grad av turbulens). Det skal bemerkes at dette er en generell betraktning og unntak finnes.



Figur 6 – Innvirkning av tennkildens plassering på flammehastighet.

1.4.6 Avlastningsflater

En konstruksjons avlastningsflate har som funksjon å ventilere vekk branngasser slik at trykkoppbygning inne i konstruksjonen unngås. En enkel forklaring på betydningen av denne faktoren er at desto større avlastningsflate konstruksjonen har desto mer branngasser kan ventileres vekk slik at trykket ikke skal øke. Når avlastningsflaten er liten i forhold til mengden gass som skal ventileres ut øker trykket inne i konstruksjonen.

1.4.7 Volumet

Den geometriske utformingen til konstruksjonen gasseksplosjonen skjer i kan ha en akselererende effekt på forbrenningshastigheten. Dersom konstruksjonen er lang og har avlastningsflater på kortsidene, vil de fleste antennesepunkt medføre at flammen får propagere over lengre avstander før den når åpningen. I en mer kubisk konstruksjon får flammen propagere mer fritt, dvs. i mindre kontakt med konstruksjonsoverflaten. Den gjennomsnittlige avstand fra en tilfeldig plassert tennkilde til nærmeste åpning vil være kortere som gjør at propageringsavstanden reduseres.

1.5 Problemstilling

Problemstillingen var som følger:

- I oppgavens første del skulle demonstrasjonsekspløsjonen i containeren ved ResQ kartlegges ved hjelp av forsøk og simuleringer i FLACS.
- Når dette forløpet var kartlagt skulle FLACS benyttes for å belyse hvordan endring av noen faktorer, omtalt under kapittel 1.4, ville påvirke ekspløsjonsforløpet i containeren.
- Til slutt skulle det lages animasjoner av noen utvalgte ekspløsjoner

1.6 Avgrensninger

Det er ikke gjort avgrensninger i simuleringer av demonstrasjonsekspløsjonen. Evaluering av andre faktorer ble derimot begrenset til å omhandle de som anses som relevante for demonstrasjonsoppsettet på ResQ. Følgende avgrensninger ble derfor gjort:

- Under alle forsøk og simuleringer var brensel/oksidant: Propan i luft
- Forandring av type tennkilde ble i liten grad studert; begrenset til størrelse
- Avlastningsflater i alle forsøk og simuleringer var åpninger i den ene av containerens kortsider
- Ettersom demonstrasjoner av gassekspløsjoner foretas kun i containeren ble andre konstruksjonsformer ikke studert
- Evaluering av andre faktorer er begrenset til å omhandle evaluering av statisk trykk i og utenfor containeren

2 Definisjoner og ordforklaringer

Denne oppgaven bygger hovedsakelig på bakgrunnsstoff hentet fra Gas explosion handbook [2]. Definisjoner og ordforklaringer fra denne legges derfor også til grunn her.

Forbrenning

Forbrenning av gass fører til frigjøring av energi i form av varme og som regel lysstråling. Eksempel: fullstendig forbrenning av propan/luft ved støkiometri:



Produktene fra fullstendig forbrenning av hydrokarbongasser i luft er hovedsakelig CO₂ og H₂O. Forbrenningsprosessen vil resultere i temperaturøkning ettersom kjemisk bundet energi går over til varme.

Forbrenningen kan skje på to måter: diffusjonsforbrenning og forbrenning i forblandet gass/oksygen (luft). Diffusjonsforbrenning vil si at brensel og oksygen (luft) blandes under forbenningen. For eksempel ved at gass slippes ut av en beholder og antennes idet den kommer i kontakt med oksygen. Forbrenningen foregår da bare i en avgrenset sone der gassen er i kontakt med oksygen. En mer "voldsom"/raskere forbrenning kan oppnås dersom en tillater gassen å blande seg med oksygen (luft) i et blandingsforhold, som ligger innenfor blandingens brennbarhetsgrenser.

Deflagrasjon

Defineres som en forbrenningsbølge, som propagerer med hastighet lavere en lyd hastighet inn i det uforbrente mediet. Hastigheten til de uforbrente gassene foran flammen er et resultat av utvidelsen til forbrenningsproduktene. Ved utilsiktede gasseksplosjoner er dette er den mest vanlige måten flammen propagerer. Under gunstige forhold kan en deflagrasjon akselerere til detonasjon. Typiske verdier for flammehastighet er fra 1m/s opp til 500-1000m/s korresponderende til eksplosjonstrykk fra noen få mbar til flere bar.

Detonasjon

Defineres som en forbrenningsbølge, som propagerer med hastighet større en lyd hastigheten i den uforbrente gassen. For brensel/luft blandinger kan detonasjonshastigheten komme opp i 2000 m/s og maksimalt overtrykk rundt 20 bar. Denne oppgaven vil ikke inkludere detonasjoner.

Øvre brennbarhetsgrense

Laveste konsentrasjon av brensel i luft som gir brannbar blanding.

Nedre brennbarhetsgrense

Høyeste konsentrasjon av brensel i luft som gir brennbar blanding.

Laminær forbrenningshastighet

Laveste hastigheten en flamme kan bevege seg gjennom en gitt gassblanding ved gitt trykk og temperatur

Propagering ("spise seg inn i")

Forbrenning med klart definerte soner; reaksjonssone, område med uforbrent brennstoff og sone med reaksjonsprodukter.

Forbrenningsprodukter

Gasser og partikler som oppstår som resultat av forbrenningen. I denne sammenheng, hovedsakelig CO₂ og H₂O.

Flammehastighet

Flammens hastighet i forhold til en stasjonær observatør eller tenkt referansepunkt.

Forbrenningshastighet

Flammens hastighet i forhold til den uforbrente gassen like foran flammen.

Gasseksplosjon

"En prosess der forbrenning av en forblandet gass-sky, slik som brensel/luft eller brensel/oksidant, forårsaker en hurtig økning av trykk". [oversatt fra Gass Explosion Handbook]

Trykk

Krefter påført per arealenhet. Pa = N/m². Oppgis her som bar = 10⁻⁵ Pa, barg = overtrykk (bar gage).

I fluiddynamikken deles trykk inn i:

- Statisk trykk
- Dynamisk trykk
- Stagnasjonstrykk

Statisk trykk er trykket i fluidet. Dersom fluidet er i bevegelse vil det være trykket målt av et instrument som beveger seg med fluidet. Dynamisk trykk er trykkøkningen som fluidet ville få dersom det ble brakt til ro isentropisk. Dynamisk trykk kan uttrykkes ved strømningshastigheten, v , og tettheten, ρ : $P_{dyn} = (\rho \cdot v^2)/2$ [2]. Stagnasjonstrykket er totaltrykket fluidet ville hatt dersom det ble brakt til ro isentropisk. Stagnasjonstrykket er summen av statisk og dynamisk trykk.

Ekspløsjonstrykk

Økning av statisk trykk som følge av en eksplosjon. (barg)

Delvis avgrenset volum

Konstruksjon der en eventuell hurtig forbrenning vil kunne medføre trykkøkninger pga. forbrenningsproduktene begrensede mulighet til å ekspandere.

Avlastningsflater

Deler av en konstruksjons omhyllingsflate som åpnes eller fjernes tidlig i eksplosjonsforløpet, i den hensikt å minimere eksplosjonstrykket inne i konstruksjonen.

Statisk friksjonskraft

Den kraften som må overvinnes for å sette et legeme i bevegelse.

Støkiometrisk blanding

Blandingsforholdet mellom brensel og oksygen(luft) er balansert slik at der ikke vil eksisterer brensel eller oksygen etter forbrenning.

ER (Equivalence Ratio)

Et mål på brenselkonsentrasjonen sammenlignet med støkiometrisk blanding. $ER=1$ ved støkiometrisk blanding. Dersom (B/O) er forholdet mellom brensel og oksygen er definisjonen på ER som følger: $ER=(B/O)/(B/O)_{støkiometrisk}$. Dersom konsentrasjonen av brensel er lik null blir ER null og for ren brenselblanding går ER mot uendelig.

Obstruksjoner

Hindringer som flammen må passere, typisk prosessutstyr rør, innventa og lignende.

Turbulens

Strømning deles inn i laminær og turbulent strømning. Ved laminær strømning strømmer fluidet i lag, mens turbulent strømning karakteriseres ved uregelmessig bevegelse(virvler).

Massestrøm

Mengde fluid (kg) per tidsenhet (s)

Drag "Dragsug"

Undertrykk som genereres bak et legeme på grunn av strømningsendringer skapt av legemet.

Monitorpoints

(Fra FLACS). Forhåndsdefinerte punkt i simuleringsvolumet hvor data hentes fra.

3 Programvare og forsøksfelt

Ved utarbeidelsen av denne rapporten ble det gjort både forsøk og datasimuleringer. Forsøkene ble gjort i en container som står på ResQ's øvingsfelt mens simuleringene ble gjort vha. programvaren FLACS. I kapitlene som nå følger gis det beskrivelse av disse to verktøyene, dvs. FLACS og forsøksfeltet.

3.1 FLACS – Flame acceleration simulator

Informasjon om FLACS er hentet fra Gas Explosion Handbook [2].

3.1.1 FLACS simuleringer

FLACS er en fluid dynamisk kode brukt i databasert programvare bygget på CFD teknologi (Computational Fluid dynamics). Dette er teknologi som gjør bruk av partielle differensialligninger som beregner fluiders bevegelse i tre dimensjoner, hvor strømningsparameterne er en funksjon av tid og rom.

3.1.2 FLACS koden

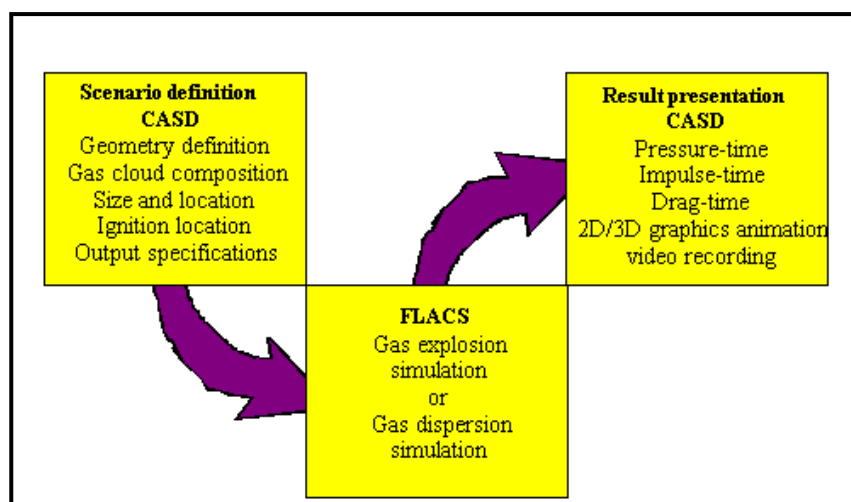
FLACS kalkulerer eksplosjonstrykk og andre strømningsparametere som en funksjon av tid og rom for forskjellige geometrier og eksplosjonsscenarioer. Selve FLACS koden løser gass-dynamiske partielle differensialligninger med utgangspunkt i et sett med kontrollvolumer. Slik kan reaksjonen mellom gasstrømning og komplekse geometrier som strukturer, flater og rør beregnes.

3.1.3 Brukergrensesnitt for FLACS

FLACS må ha et UNIX/Linux basert operativsystem for å fungere.

Det første steget av en simulering er å lage geometrien. Programmet CASD, utviklet på basis av CAD og datagrafikk teknologi, er et designprogram som lager geometri og scenarier for beregning i FLACS koden.

Figur 7 viser stegene i en simulering, og forholdet mellom CASD og FLACS.



Figur 7 – CASD og FLACS.

Ved bruk av vektorbasert programmering lager CASD den ønskede geometrien for simuleringen. Et tredimensjonalt rom får implementert alle objekter og gjenstander brukt i simuleringen.

Gass-skyens sammensetning, størrelse og lokalisering, plassering av tennkilde og spesifikke ønskede utgående parametere, bestemmes før simuleringen av gasssekspløsjonen i en gitt geometri laget i CASD. Hvis et utslipp og kun strømning av gasser ønskes simulert, utelates tennkilden ved definisjon av utslippsscenario.

FLACS koden gjør krevende numeriske beregninger, der tredimensjonale Navier-Stokes ligninger løses, og stiller derfor store krav til datamaskinen.

Resultatene fra FLACS koden er presentert i CASD sitt presentasjonsprogram, Flowvis. Programmet viser resultatene i form av kurver, 2D og 3D bilder med kontur. Resultatene kan i tillegg vises som animasjoner av ekspløsjoner og strømning, i små videoer laget av enkeltbilder fra Flowvis.

3.1.4 Geometrisk utforming

Den geometriske utformingen av utstyr, rør, vegger etc. er representert som sylindrer og bokser. Vegger defineres som plater uten tykkelse. Porøsiteten definerer hvor stor del av veggens/gulvflatens areal beregnes for gjennomstrømning. Porøsiteten vil ha en verdi mellom 0,0 og 1,0, en tett vegg har ingen (0,0) porøsitet.

Vegger og gulvdekk kan modelleres på 4 måter:

- Tette. Vegger og gulvdekk er stengte for gjennomstrømning.
- Porøse. Vegger og gulvdekk eksponeres for gjennomstrømning.
- Avlastningspaneler: I utgangspunktet stengte vegger som åpner seg når simulert ekspløsjonstrykk får en gitt verdi.
- Åpne: Vegger og gulvdekk som ikke yter noen motstand mot strømning eller trykk.

3.1.5 Kontrollvolum

Det simulerte volum deles i kontrollvolumer, der FLACS koden gjør beregninger for et punkt midt i hvert kontrollvolum.

3.1.6 Resultatene fra FLACS simuleringene

En stor mengde av data blir produsert hver gang FLACS utfører beregner. Alle disse dataene kan ikke lagres under simuleringen. Derfor må de parametere som ønskes avlest registreres før simuleringen.

I forbindelse med ekspløsjoner er trykk, forbrenningsprodukter, vektorhastigheter og temperatur noen av mange mulige parametere som kan avleses.

3.1.7 Hvorfor FLACS?

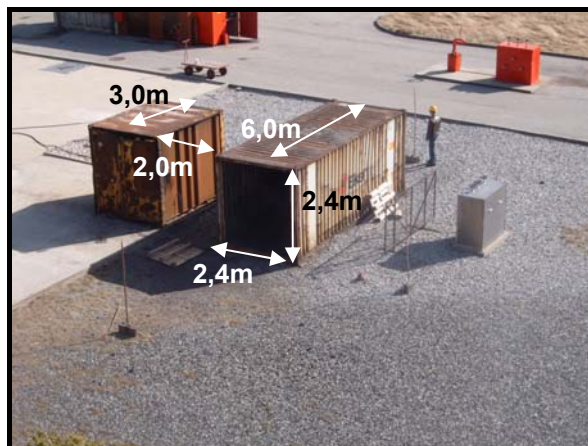
FLACS koden evalueres av British Gas for the Department of Energy, 1990, som den koden som gir et mest riktig resultat for antatte gasssekspløsjoner på offshoremoduler. I tillegg viser den sin validitet på landbaserte moduler tenkt eksponert for mulige gasssekspløsjoner. Koden er basert på det siste av kunnskap og forskning innen gasssekspløsjoner og gir trolig de best kvalifiserte resultatene.

3.2 Forsøksfelt

På bilder 1 til 4 kan feltet og containerens plassering og utforming beskues. De mål som er vesentlige for simuleringsarbeidet er markert inn på bildene (containerens ytre mål og containerveggenes utforming).



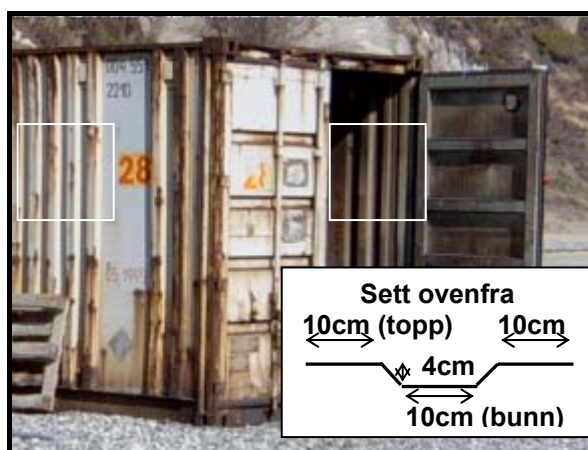
Bilde 1 – Oversikt over feltet.



Bilde 2 – Containerens fremside og mål.



Bilde 3 – Containerens bakside.



Bilde 4- Containerveggenes utseende. Bølgete form (se innenfor hvite firkanter) med avstand mellom topp og bunn på 4cm. Topper og bunner er flate med bredde 10cm. Vegg mellom topp og bunn er skrå, dvs. ikke 90°.

4 Metode

Metoden som ble anvendt ved utarbeidelsen av rapporten besto av å simulere gassutslipp og ulike typer eksplosjoner i en bestemt geometri ved hjelp av datamodellering, der resultat fra en av simuleringene skulle kunne sammenlignes med målte resultat fra forsøk. Utfallet av gassseksplosjoner er, som tidligere nevnt, i meget stor grad avhengig av den omkringliggende konstruksjon. Derfor er det viktig at utgangspunktet for alle simuleringer ikke var forbundet med feil i det grunnleggende oppsettet, dvs. den geometriske utformingen av den omkringliggende konstruksjon. Dette skulle forsøkene sørge for at ikke ble tilfellet.

Ønsket var å måle trykkeoppbygningen i utvalgte punkt i forsøkene ved hjelp av spesielt tiltenkte trykkmålere for deretter å sammenligne målte resultat med simuleringsresultat. Slik skulle resultat fra en bestemt simulering bekreftes og dokumenteres som i neste rekke skulle gi grunn til å tro at de andre simuleringene stemte overens med virkeligheten. Det lykkes dessverre ikke å få lånt slike trykkmålere. Når de i tillegg er dyre i innkjøp måtte kreativiteten settes på prøve for å konstruere en trykkmåler som kunne brukes i forsøkene. Dette medførte at ambisjonene om nøyaktige målinger måtte justeres til målinger som ga en god pekepinn for simuleringsarbeidet.

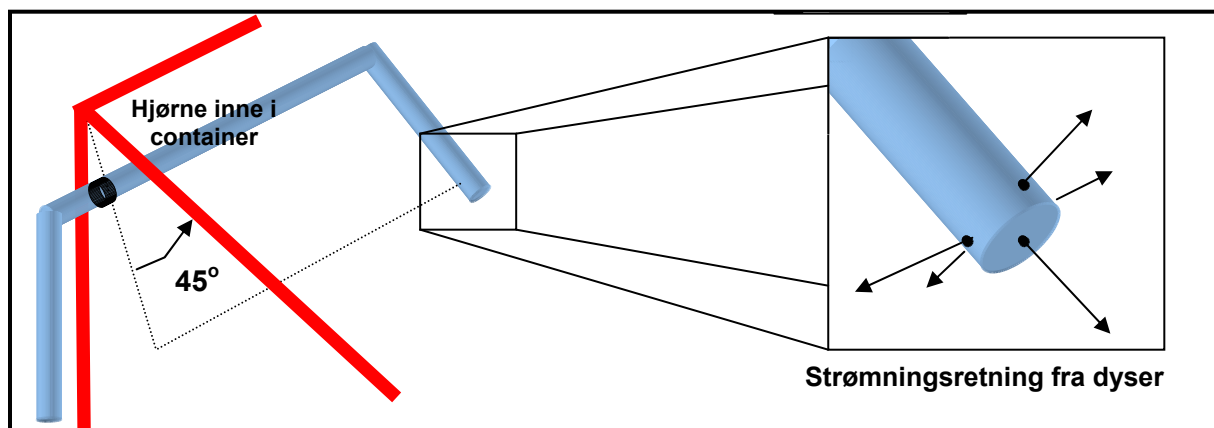
I de kapitlene som nå følger vil det gis en beskrivelse av simulerings- og forsøksoppsett, og fremgangsmåte ved animasjoner. Vedlegg 8 inneholder scenariofiler for alle simuleringer som er gjort. Vurderinger av feilkilder ved hvert oppsett behandles og her.

4.1 Forsøksoppsett ved ResQ's øvingsfelt

Det ble bestemt at den gassseksplosjonen som demonstreres av instruktører ved ResQ skulle måles og sammenlignes med simuleringer.

Fremgangsmåten for gjennomføringen av disse demonstrasjonene og da forsøkene er som følger:

- Containerdørene lukkes, eller lukkes og låses.
- En liten beholder med brennbart material plasseres inne i containeren, 1,3m innenfor åpningen, 1m over gulvnivå, og antennes.
- Propan fra en større lagringstank slippes inn i containeren via en rørledning. Propanen tappes fra tankens underside som gjør at propanen strømmer ut av røret i væskeform. Utslippspunktet er oppe under taket ved den ene av containerens kortsider. Propanvæsken strømmer ut av ledningen via fem dyser som er jevnt fordelt over rørenden (se figur 8). Propanen fordamper idet den forlater dysene.



Figur 8 – Propantilførsel.

- Gassen antennes i det øyeblikk brennbar propan/luft blanding har dannet seg ved flammen fra beholderen.
- Mellom hvert forsøk ventileres containeren slik at starttemperatur inne i containeren ved hvert forsøk er konstant, og røykgasser fra forrige eksplosjon ikke er til stede.

Trykkoppbygningen i bestemte avstander fra containeråpningen var parameter for sammenligning av forsøk og simuleringer. Det skulle forsøkes å bestemme verdien maksimalt trykk hadde i et bestemt punkt, for deretter å sammenligne resultat med simuleringresultat. Vedlegg 1 inneholder en beskrivelse av metode og innretning som ble brukt for å få en indikasjon på trykkoppbygningen i forsøkene. Trykkmålerne som beskrives der angir hvor høy total trykkoppbygning er (statisk og dynamisk trykk i tillegg til dragsug).

Feilkildene ved dette forsøksoppsettet er så absolutt tilstede. Trykkmåleren er en primitiv innretning som ikke gir konkrete målinger men, et grunnlag for sammenligning av maksimalt trykk foran måleren og målerens motstand mot bevegelse.

Måleren har klare begrensninger for hvor nøyaktige målinger den klarer å fremskaffe. Målinger av sledenes motstand mot bevegelse har en feilmargen på ca 10N (1kg på vekten). I prosent av sledenes motstand vil feilmarginen variere fra 20 % for letteste slede til 5 % for den tyngste.

Vær og vind kan ha innvirkning på antennestidspunktet og trykkmålinger. Vindens styrke og retning kan både øke og redusere tiden til antennelse. Med konstant massestrøm betyr det at mengden propan involvert i hver eksplosjon vil variere hvis tid til antennelse varierer. Hvis vindretningen ikke er parallelt med trykkmålerens plater (dvs. at platene "fanger" vind) vil vinden kunne øke eller redusere den målte motstanden målerne har. Dette er dog forhold som ikke lar seg kontrollere men det ble forsøkt å unngå at de ble utslagsgivende ved å gjennomføre alle forsøkene på en og samme dagen under tilnærmet konstante værforhold.

Temperaturen i containerveggene steg i takt med økende antall forsøk men lufttemperaturen i containeren ble, som beskrevet over, forsøkt holdt konstant ved utlufting mellom forsøk. Veggens økende temperatur medfører selvfølgelig at lufttemperaturen øker, og derfor fordampningsraten til propan. Økende fordampningsrate kan i neste rekke føre til at brennbar blanding dannes noe raskere ved pilotflammen. Denne faktoren vurderes til å være av mindre betydning da veggens bidrag til økende lufttemperatur skjer innenfor et relativt kort tidsintervall (30 sekunder), dvs. fra lukking av dører til eksplosjonen har funnet sted.

4.2 Simulering av demonstrasjonseksplisjon

For å simulere dette scenarioet i FLACS, måtte mengden propan som strømmer ut per tidsenhet fra dysen i containeren, dvs. massestrømmen, bestemmes. Vedlegg 2 inneholder en redegjørelse for hvordan dette ble gjort, og resultater fra målinger. Containerens fysiske utforming og avstand til andre objekt ble målt (se bilder i kapittel 3.2). Resultatene av disse målingene ble lagt inn som inngangsparametere i simulering av demonstrasjonseksplisjonen.

Containeren fikk riktige utvendige mål (2,4m*2,4m*6,0m) men da programvaren kun gir muligheter for tegning av kubiske eller sylindriske objekt måtte bølgene i containerveggene tegnes som kubiske (dvs. med rette vinkler). For at de ikke skulle få uforholdsmessig stor betydning for turbulensen (se kapittel 1.4.4) under eksplosjonene ble avstanden mellom topp og bunn satt til 2cm, istedenfor 4cm slik som vist på bilde 4. Bredde på topp og bunn måtte da økes med 1cm, fra 10 til 11cm, for at antallet bølger ble riktig.

Trykkmålerens tilstedeværelse ble simulert som en 0,6m høy og 1,8m bred vegg (uten tykkelse), 3m fra containeråpningen. Veggens høyde er lik høyden til hver trykkmåler. Veggens bredde er lik trykkmålerens samlede bredde (3*0,6m). Alle objekt ble tegnet inn i et simuleringsvolum (et såkalt grid) som ble delt i kontrollvolum som vist i vedlegg 3.

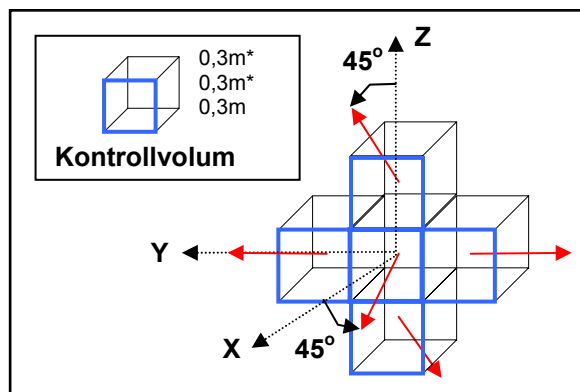
Simuleringen måtte gjøres i to faser:

Først måtte gassutslippet simuleres og sammenlignes med forsøk. Tiden det tok fra start av utslipp til det hadde dannet seg brennbar blanding ved tennkilde ble målt og sammenlignet med målinger fra forsøk. Deretter ble blandingen antatt i det tidspunktet brennbar blanding var dannet ved pilotflammen og trykket fra den resulterende eksplosjon sammenlignet med resultat fra forsøk.

4.2.1 Gassutslipp

Rørenden i containeren har fem dyser som alle vender i forskjellige retninger (se figur 8 over). Gassutslippet ble simulert som punktutslipp fra de fem kontrollvolumene som omringer rørendens virkelige plassering da gasstrøm ut av et kontrollvolum kun kan strømme i en retning. Figur 9 viser plassering og retning til dysene i simuleringen.

Utslipet består i virkeligheten av propanvæske som strømmer inn og fordampes. FLACS gir ikke muligheter for å simulere væskestrøm som fordampes slik det er tilfellet her, men begrenser seg til rene gassutslipp. Det reelle utslippet måtte derfor oversettes til en form som var mulig å simulere, dvs. propanen måtte fra væske til gass. Justeringen ble gjort på dysens diameter, dvs. at diameteren ble økt slik at massestrømmen og strømningshastigheten ut av reell og simulert dyse var den samme (diameteren må økes grunnet tetthetsforskjeller mellom propan i væskeform og gassform, se vedlegg 4). Vedlegg 2 redegjør for beregninger gjort for justering av dysediameteren. Simuleringene tok hensyn til vindforholdene den dagen forsøkene ble gjort (se vedlegg 5). Vindens retning og styrke ble satt til den verdien målinger under forsøk ga.



Figur 9 – Dysers plassering (startpunkt for røde piler) og strømningsretning til propan-gassen. Midterste kontrollvolum er 0,45m fra tak og containerdører, og 1,35m fra den ene langsiden.

Inngangsparametrene for denne simuleringen er fremkommet av konkrete målinger av massestrøm, tid til antennelse og dysenes plassering i containeren. De feilene som kan forekomme vil derfor mest sannsynlig kunne begrunnes med feil ved målinger av massestrøm, justering av dysediameter, eller dysenes plassering i simulering.

To av simuleringens inngangsparametere er verdier som angir hvor turbulent strømmingen i og ut fra dysen er, henholdsvis "relative turbulence intensity" og "turbulence length scale". Manualene til programvaren [3] er noe mangelfulle når det kommer til forklaringer på hva disse parametrene baseres på og hvilken innvirkning de har. I simuleringene av gassutslippet ble disse verdiene valgt slik at strømningsbildet ut av dysen ble middels turbulent. Det ble gjort en sensitivitetsanalyse av disse parametrene for å avdekke betydningen de har for strømningsbildet i containeren og da tiden til antennelse. Analysen ble gjort ved å kjøre ny simulering der verdiene for disse parametrene ble justert til sitt maksimale.

4.2.2 Resulterende eksplosjon

Når nedre brennbarhetsgrense for propan/luft blanding (se vedlegg 4) ble nådd i det punkt pilotflammen sto ble blandingen antent. Mengden gass og fordelingen av denne i containerens volum på det tidspunktet dannet inngangsparameteren for den resulterende eksplosjon. Tennkilden ble simulert som punktkilde (dvs. uten dimensjon), 1,35m innenfor containeråpning, 1,05m over gulvnivå.

Feil ved denne simuleringen kan ha to kilder;

Den ene kilden vil kunne være simuleringen av gassutslippet. Hvis tiden til antennelse i simulering av utslipp ikke stemmer overens med forsøk vil det påvirke eksplosjonen da mengden gass i containeren ikke er riktig. Den simulerte tennkilde (punktkilde) kan være forbundet med feil da den i forsøkene var en liten flamme med volum.

En annen kilde til feil kan være den geometriske utformingen containeren fikk i simuleringene. Containeren har riktige mål for lengde, bredde og høyde. Veggens utforming er derimot ikke riktig tegnet inn. Den utformingen de fikk kan gi mer, eller mindre turbulens en hva tilfellet er i virkeligheten.

4.3 Simulering av andre scenarier

Disse simuleringene er ment å belyse hvilken betydning, endring av noen faktorer har for utfallet av en eksplosjon. Hvert scenario retter fokus mot en av disse faktorene slik at betydningen av den fremkommer klart og tydelig.

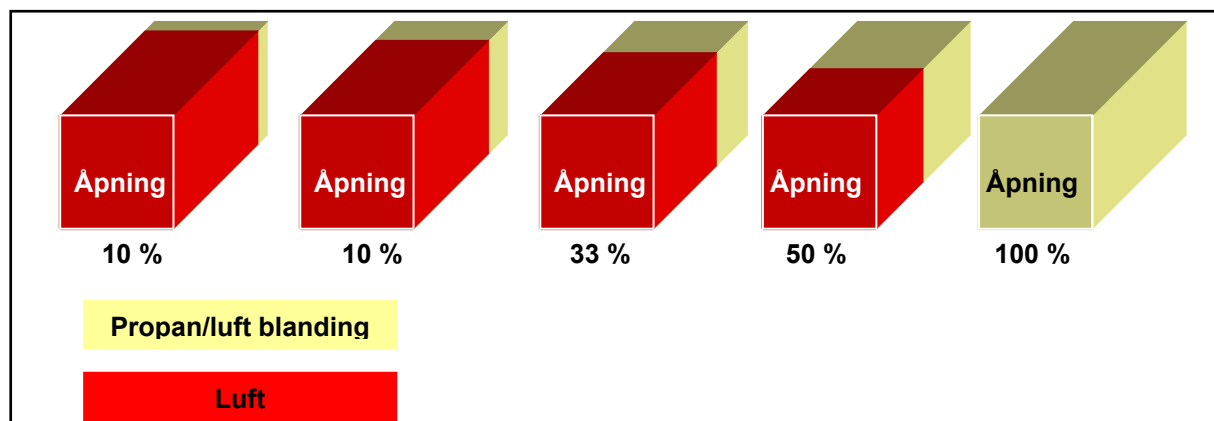
Feilkildene i disse simuleringene må få en todelt vurdering:

Hvis simuleringene betraktes som rent hypotetiske situasjoner i en gitt geometri vil resultatene mest sannsynlig være nært opp mot riktig. Programvaren er under stadig utvikling og blir derfor testet med jevne mellomrom for å verifisere resultatene den gir opp mot resultat fra forsøk. Det viser seg at resultater fra FLACS er i overensstemmelse med forsøksresultat [henvisning gasshåndboken].

Om simuleringene er i overensstemmelse med det som kan forventes i containeren ved ResQ vil avhenge av hvor riktige inngangsparametrene i simuleringene er. Feilkildene blir derfor de samme som for simulering av demonstrasjonseksplisjonen

4.3.1 Simulering av eksplosjoner der gass-skyene varierer i størrelse

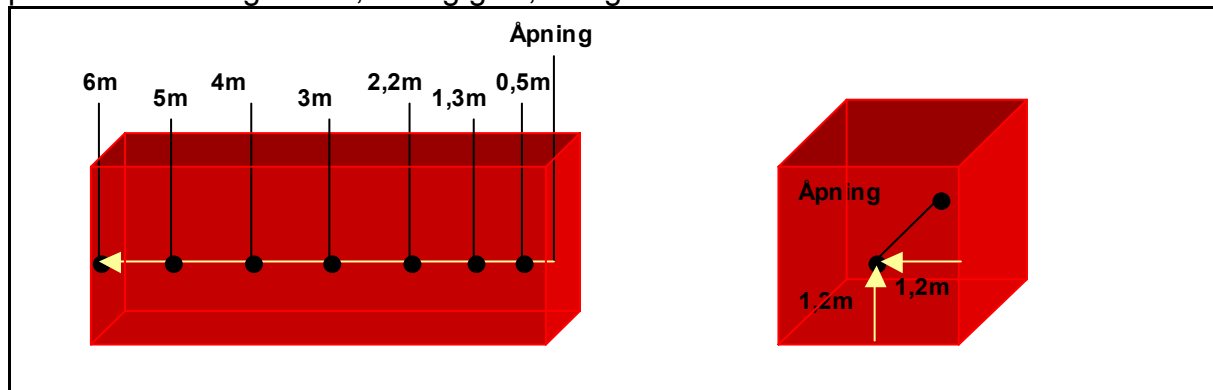
Dette forholdet ble forsøkt belyst ved å simulere eksplosjon i gass-skyer som utgjorde 10 %, 20 %, 33 %, 50 % og 100 % av containerens totalvolum. Skyene og tennkilden ble plassert lengst vekk fra containeråpningen, se figur 10. Propan/luft blandingen var støkiometrisk, lufttemperaturen var 20°C.



Figur 10 – Plassering og størrelse på gass-skyer i simuleringer.

4.3.2 Simulering av eksplosjoner der tennkildens plassering varierer

Det ble gjort simuleringer av eksplosjoner der tennkilden ble flyttet langs en akse parallelt med langsiden, tak og gulv, se figur 11.

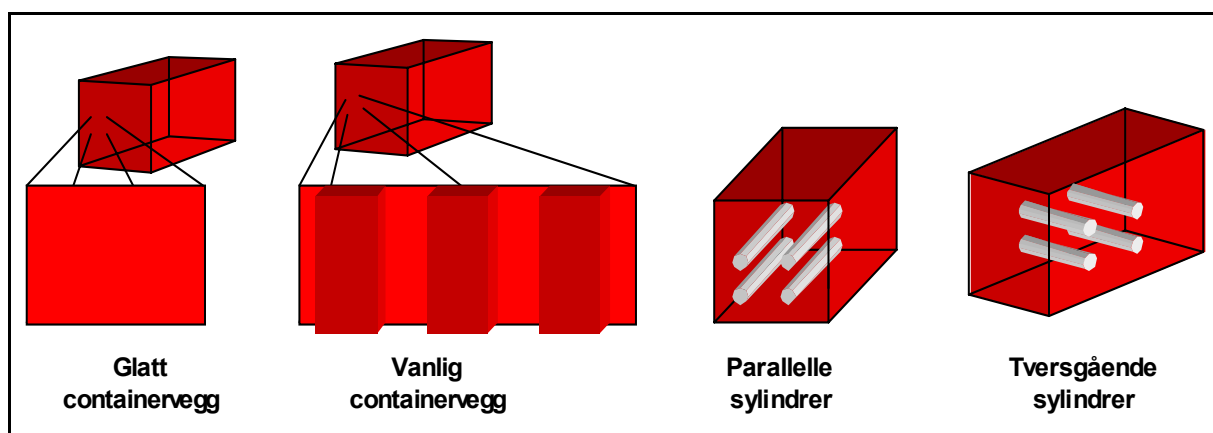


Figur 11 – Plassering av tennkilde i simuleringer.

Støkiometrisk blanding av propan og luft fylte hele containeren, lufttemperaturen var 20°C.

4.3.3 Simulering av eksplosjoner der omkringliggende konstruksjon varierer

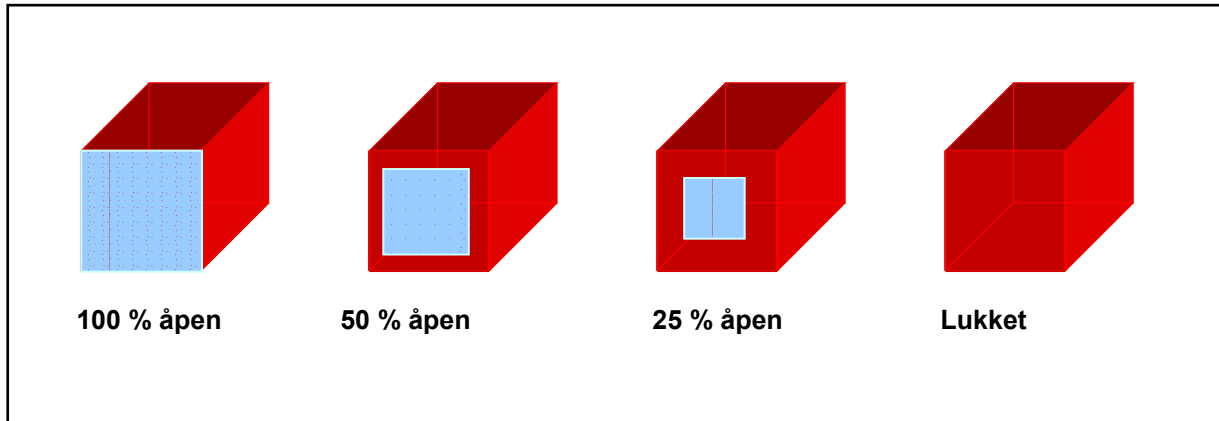
For å belyse dette forholdet ble det gjort fire simuleringer der propan/luft blandingens størrelse og konsentrasjon (full container, støkiometrisk blanding), og tennkildens plassering ble holdt konstant, mens omkringliggende geometri ble endret. Lufttemperaturen var 20°C. Figur 12 viser simuleringenes geometriske oppsett.



Figur 12 - Omkringliggende konstruksjon i simuleringer. Parallele og tversgående refererer sylindrenes lengde i forhold til forbrenningsretningen.

4.3.4 Simulering av eksplosjoner der åpningsareal varierer

Det ble gjort fire simuleringer der åpningsarealet ble endret for hver simulering. Propan/luftblandingens størrelse og konsentrasjon (full container, støkiometrisk blanding), og tennkildens plassering var konstant. Temperaturen i luften var 20°C. Figur 13 viser hvordan åpningsarealet varierte i simuleringene.



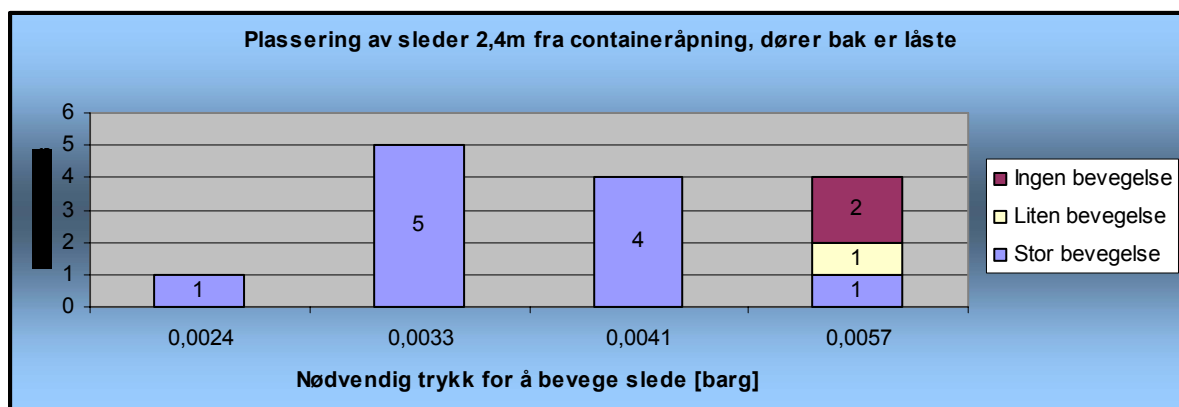
Figur 13 – Avlastningsflatens åpning i simuleringer; prosentandel av helt åpen.

5 Resultater

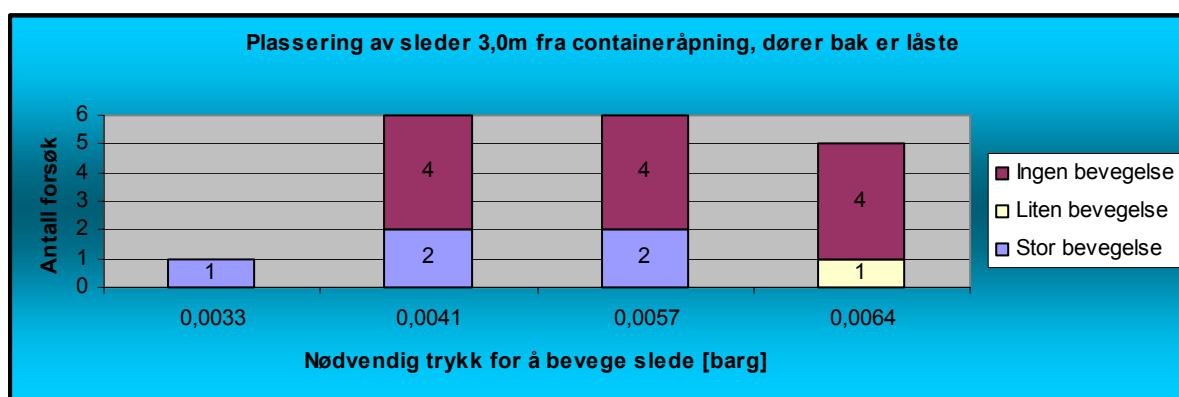
5.1 Resultater fra forsøk

Det ble gjennomført i alt 19 eksplosjoner i containeren hvor 2 ble umiddelbart vurdert som mislykket grunnet vindforhold, og derfor ikke registrert. Dette ga totalt 51 målinger av trykkoppbygningen foran sledene.

I de 6 første eksplosjonene ble dørene i containerenden kun lukket men ikke låste slik at de ble åpnet av trykket fra eksplosjonen. I de resterende forsøkene, dvs. de 11 siste, var dørene låste og kunne derfor ikke ventilere ut branngasser. Resultatene fra de eksplosjonene der dørene bak var låste ble vurdert til å være mer pålitelige da dørenes åpningstrykk og treghet kan variere. Disse forsøkene brukes derfor til å estimere det trykket som bygger seg opp foran sledene. Derimot brukes målingene av tid til antennelse i sin helhet da målinger av disse er uavhengige av eksplosjonen som etter kommer. Samtlige resultat fra forsøkene er å finne i vedlegg 5. I figurer 14 og 15 presenteres resultat fra målinger av trykkoppbygning fra de 11 siste forsøkene.



Figur 14 – Plassering av sleder 2,4m fra åpning. Liten bevegelse betegner forflytning mindre enn 1cm, stor bevegelse betegner forflytning større en 1cm.



Figur 15 – Plassering av sleder 2,4m fra åpning. Liten bevegelse betegner forflytning mindre enn 1cm, stor bevegelse betegner forflytning større en 1cm.

Gjennomsnittstid til antennelse: 21,9s

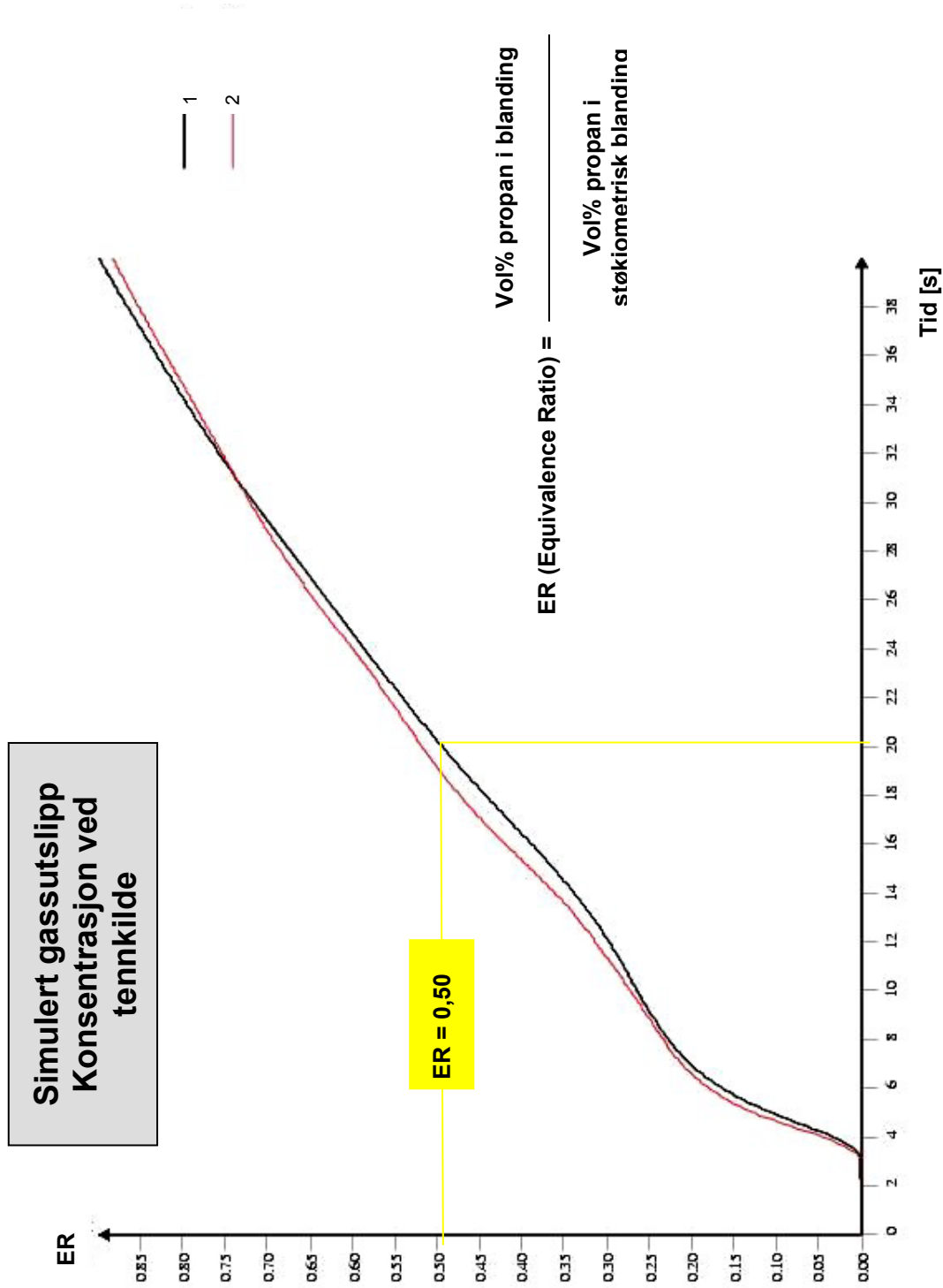
5.2 Resultater fra simuleringer

Figurer 16 – 21 er et utvalg av resultat som fremkom ved simuleringer av gassutslipp og resulterende eksplosjon.

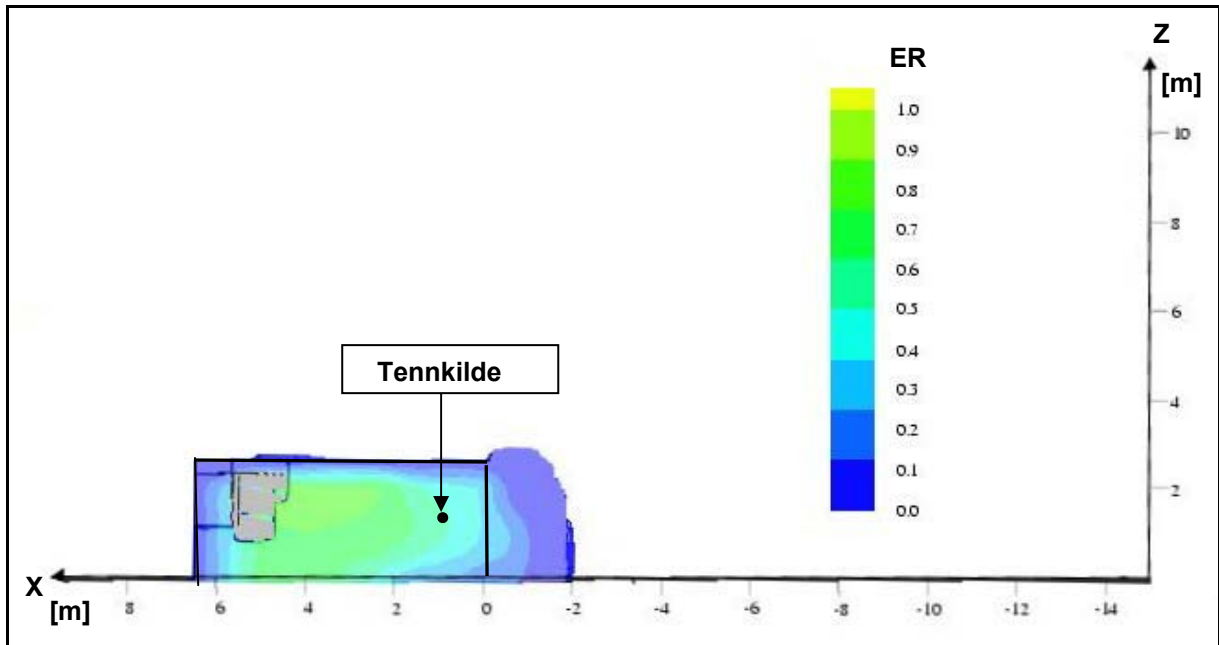
Figurer 22 – 29 er et utvalg av resultat som fremkom ved simuleringer av andre scenarier.

Punktene er som vist på figurer 3 og 4 i vedlegg 7.

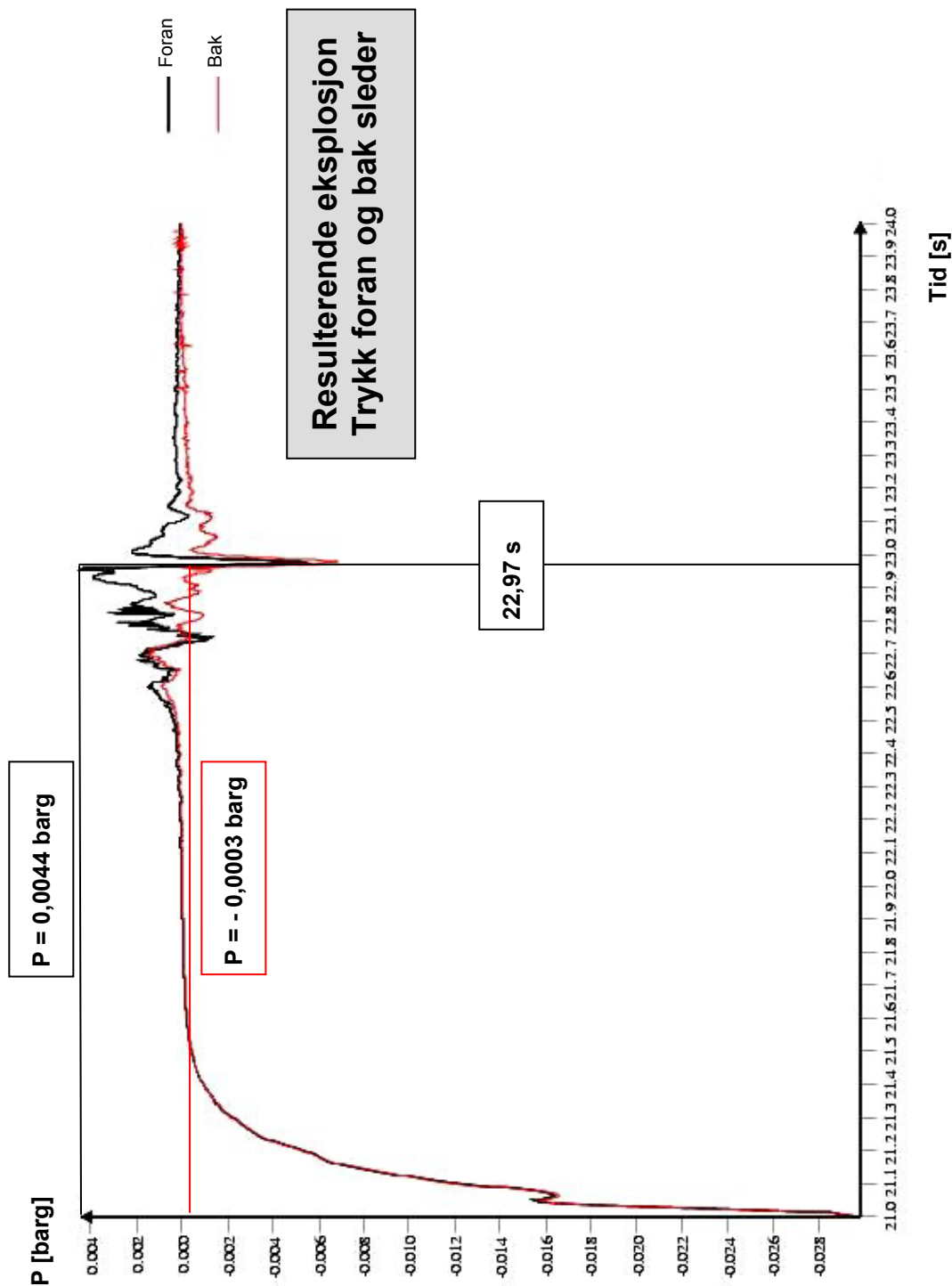
På medfølgende cd-rom (vedlegg 8) kan animasjoner som ble gjort beskues og studeres.



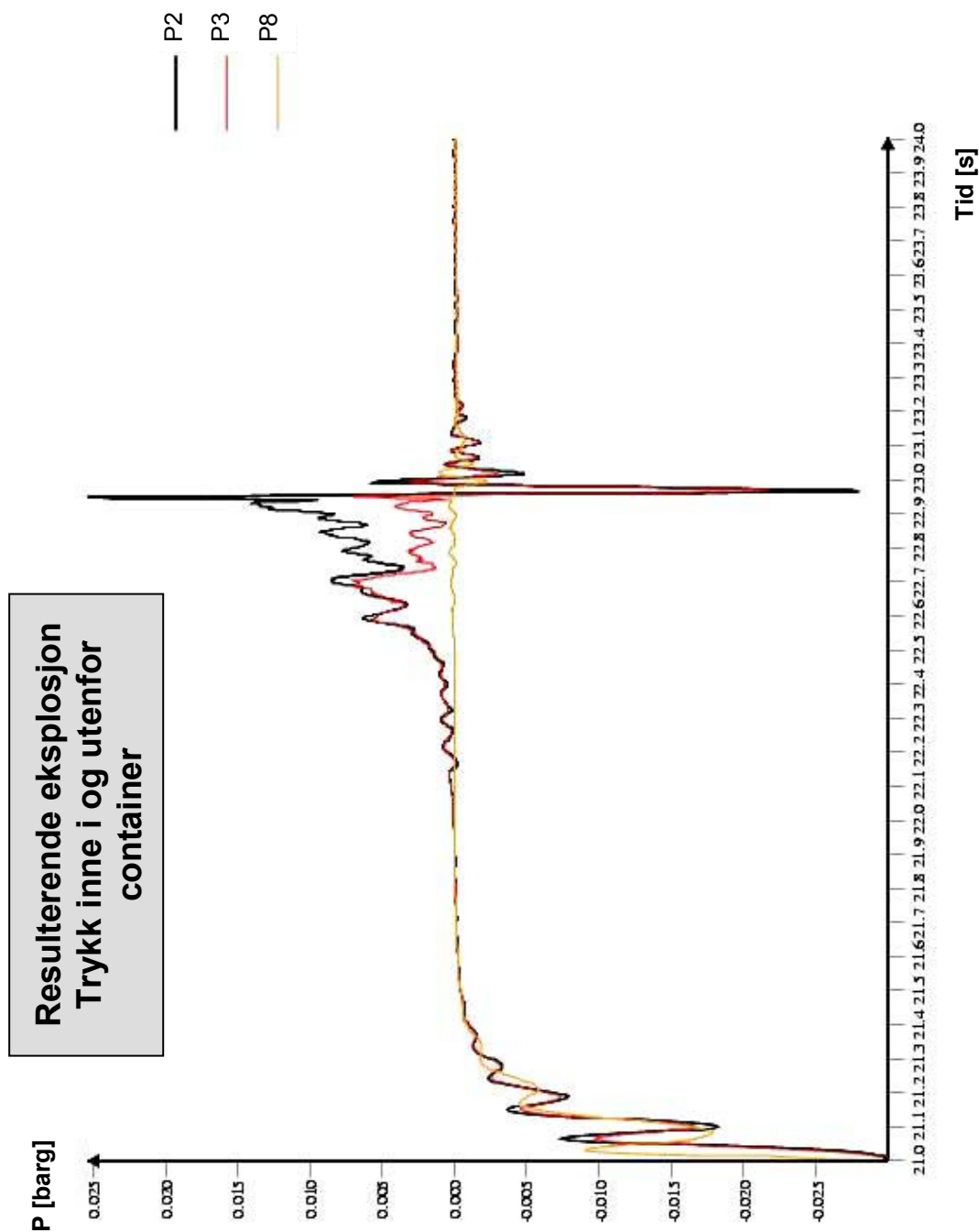
Figur 16 – Propankonsentrasjonen ved tennkilden. I simulering 1 (svart graf) er turbulensen ved dysene satt som middels. I simulering 2 er den satt til maksimal verdi for sammenligning. Når ER = 0,5 har blandingen nådd nedre brennbarhetsgrense (2 vol%, vedlegg 4) da støkiometrisk propan/luft blanding har 4 vol% propan. Dvs. at blandingen er brennbar etter ca. 20,5 s.



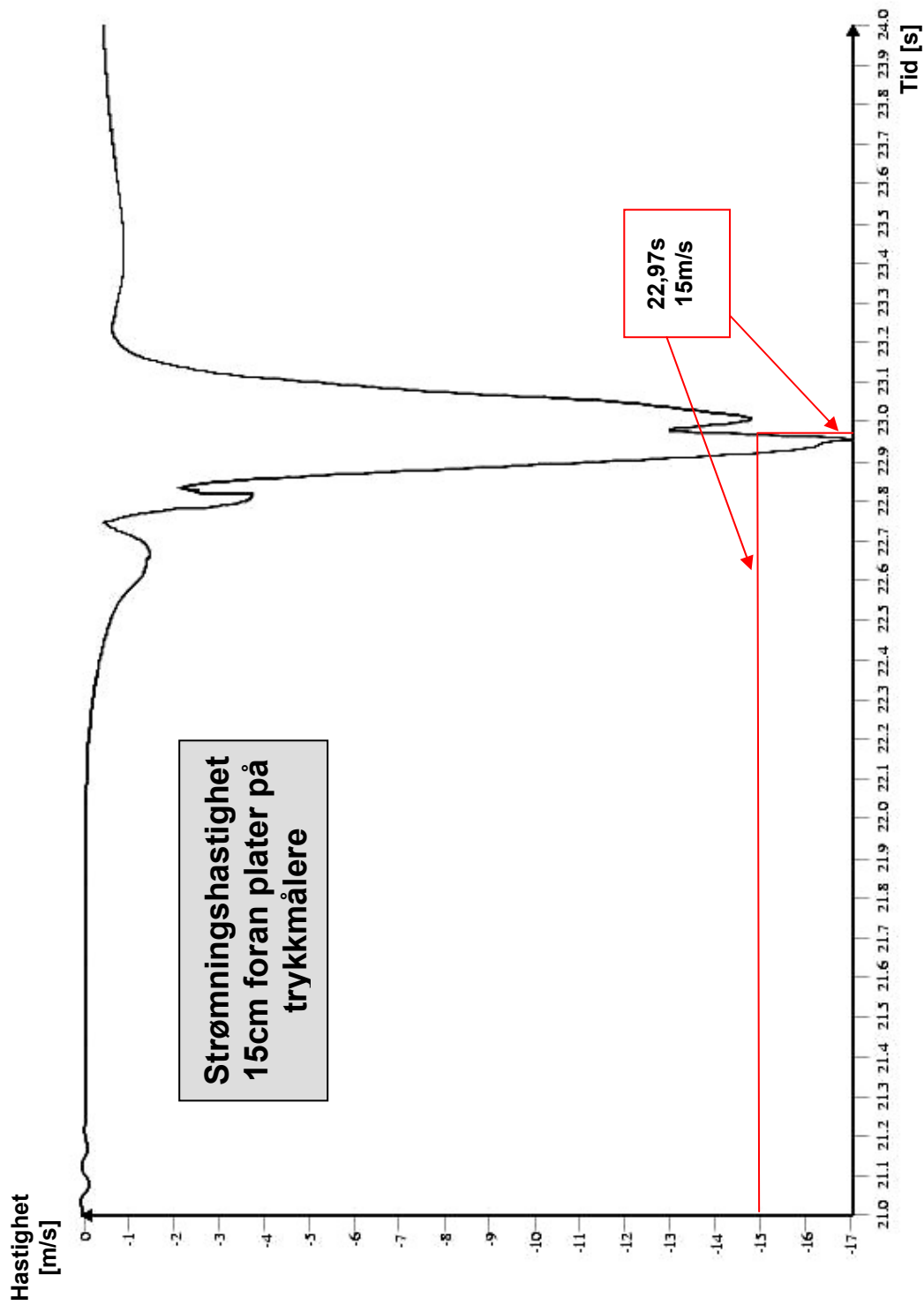
Figur 17 – Propankonsentrasjonen i containeren på det tidspunkt blandingen antennes (ved 20,1s). Konsentrasjonen ved tennkilden har nådd 2 vol% og danner derfor sammen med luft brennbar blanding.



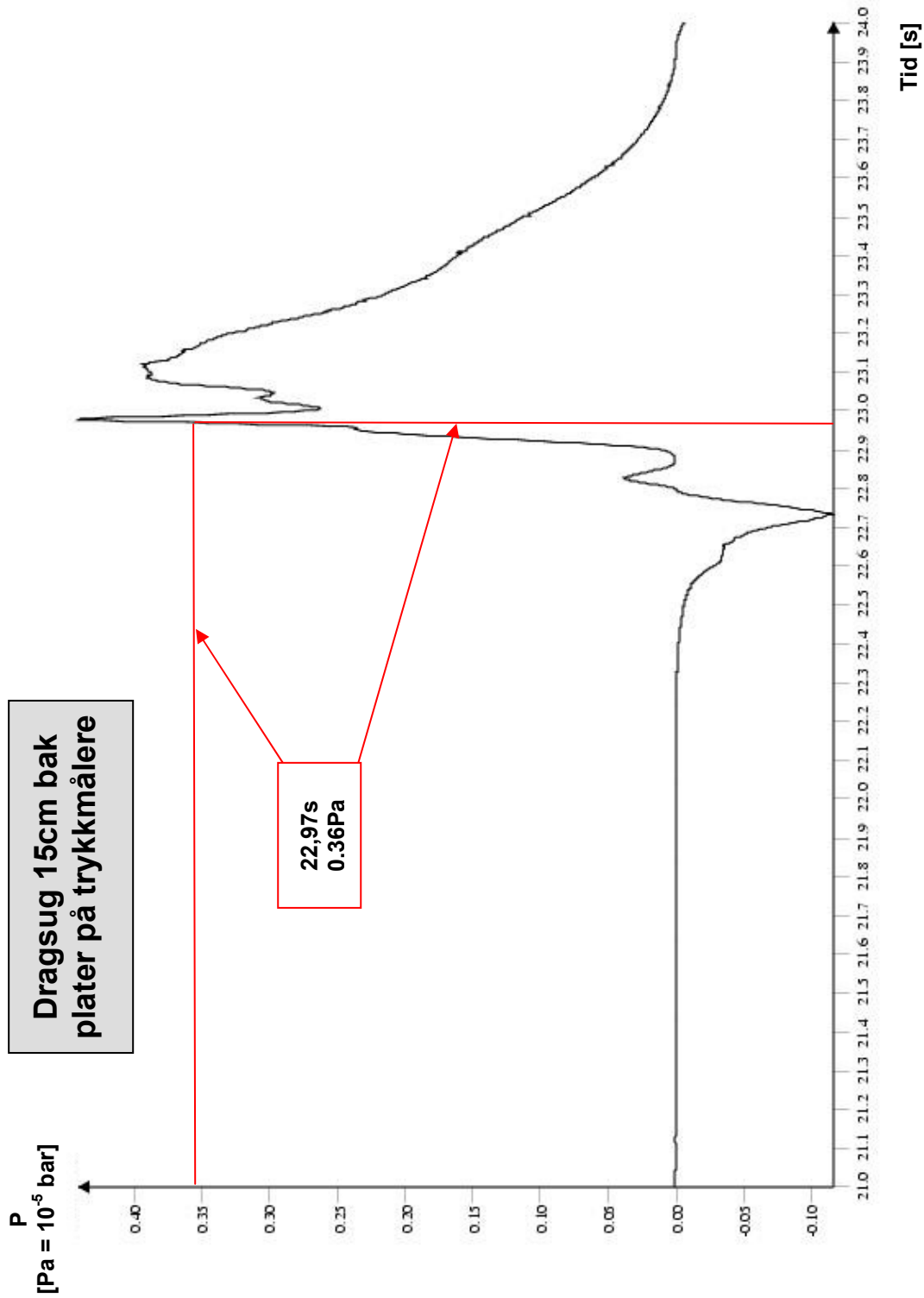
Figur 18 – Overtrykket i avstand 2,85m og 3,15m utenfor containeren, dvs. i punkt rett foran og bak sledene. Svart graf gir trykket foran mens rød graf viser trykket bak.



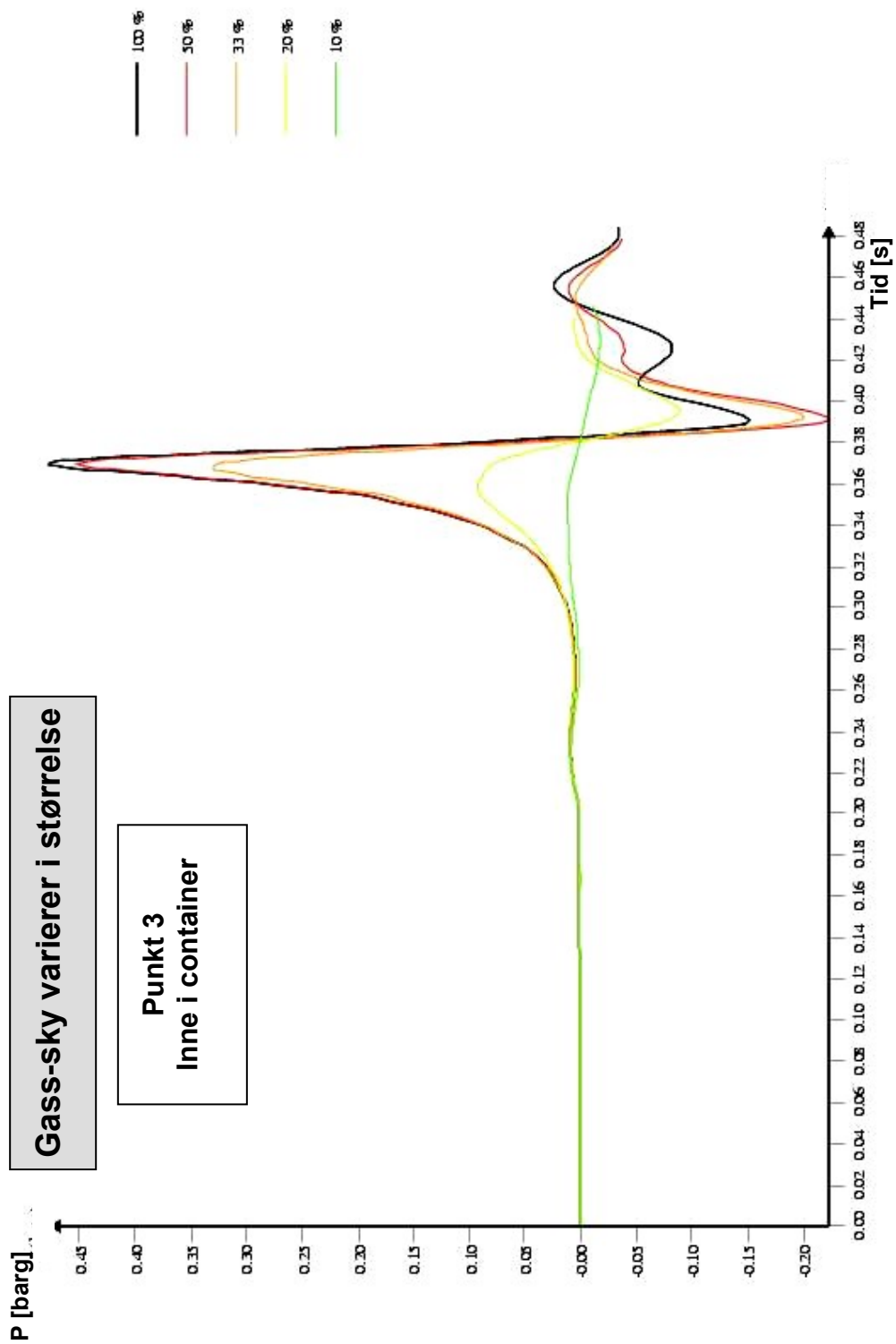
Figur 19 – Overtrykket i tre punkt. P2 og P3 er punkt inne i containeren, henholdsvis helt inne oppe ved tak og midt på den ene langsiden. Tredje punkt, P8 er utenfor containeren, 9,5m fra containeråpningen.



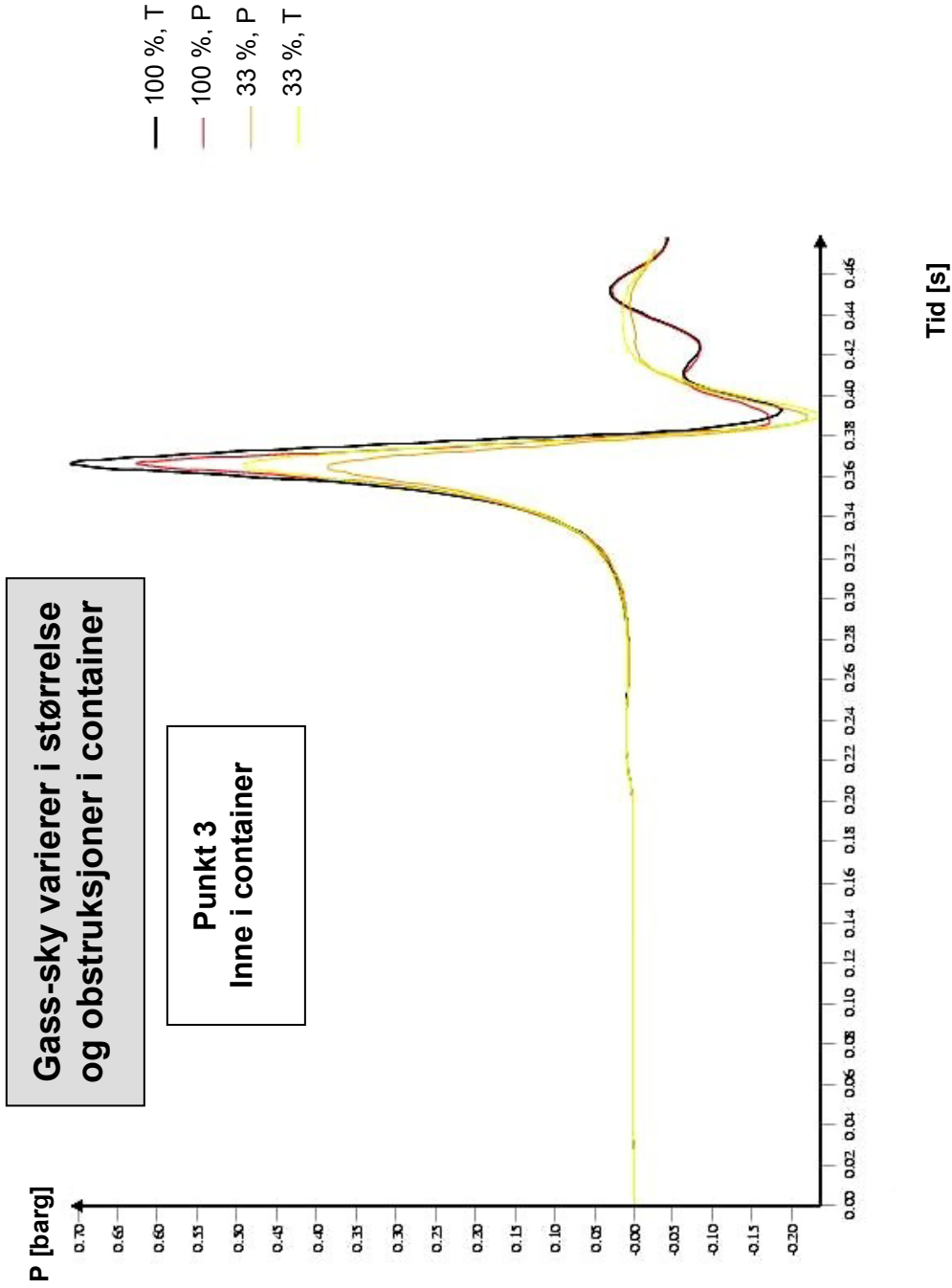
Figur 20 – Forbrenningsproduktenes strømningshastighet i avstand 2,85 m fra containeråpningen, dvs. rett foran sleder. Verdiene fortegn angir retningen. Negative verdier representerer strømming vekk fra åpning, dvs. ut av container. Røde linjer markerer verdien dragsuget har idet maksimalt eksplosjonsovertrykk nås.



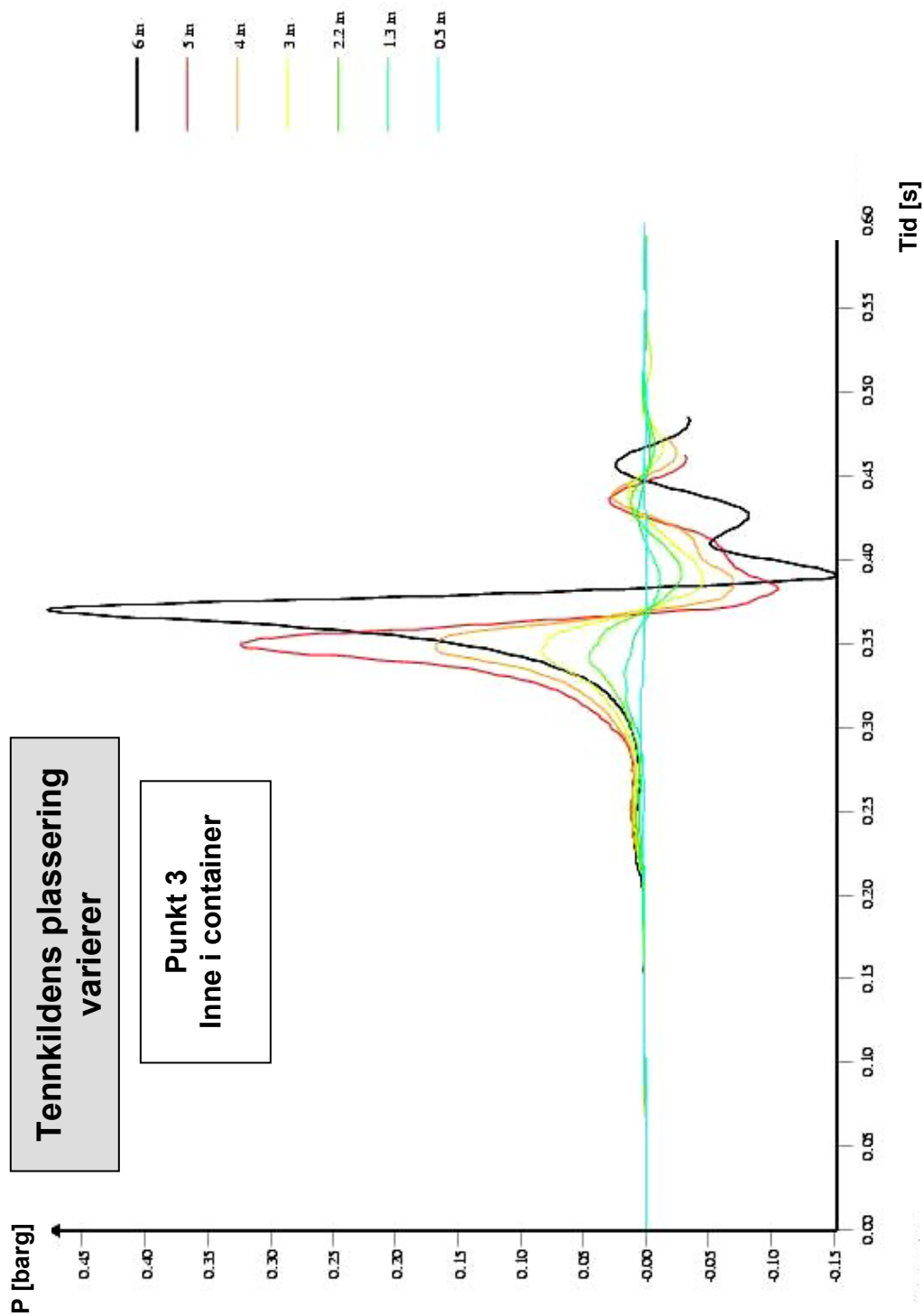
Figur 21 – Dragsuget i en avstand på 3,15m utenfor container, dvs. rett bak plater på trykkmålere. Røde linjer markerer verdien dragsuget har idet maksimalt eksplosjonsovertrykk nås.



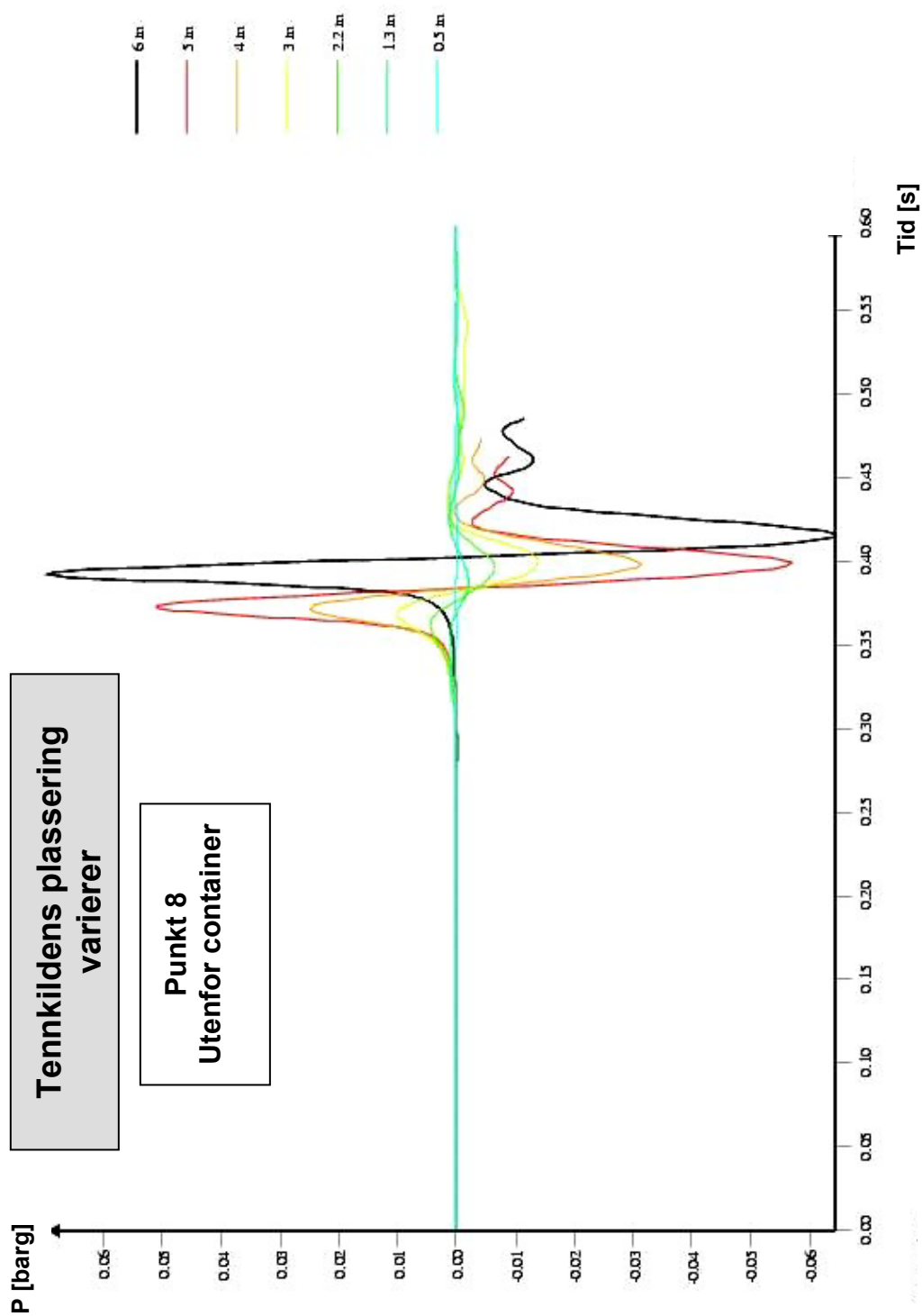
Figur 22 – Støkiometrisk blanding av propan og luft i 10 %, 20 %, 33 %, 50 % og 100 % av containerens totalvolum. Blandingene er innerst i containeren, dvs. lengst vekk fra åpningen. Tennkilden er innerst i containeren, midt på kortsiden.



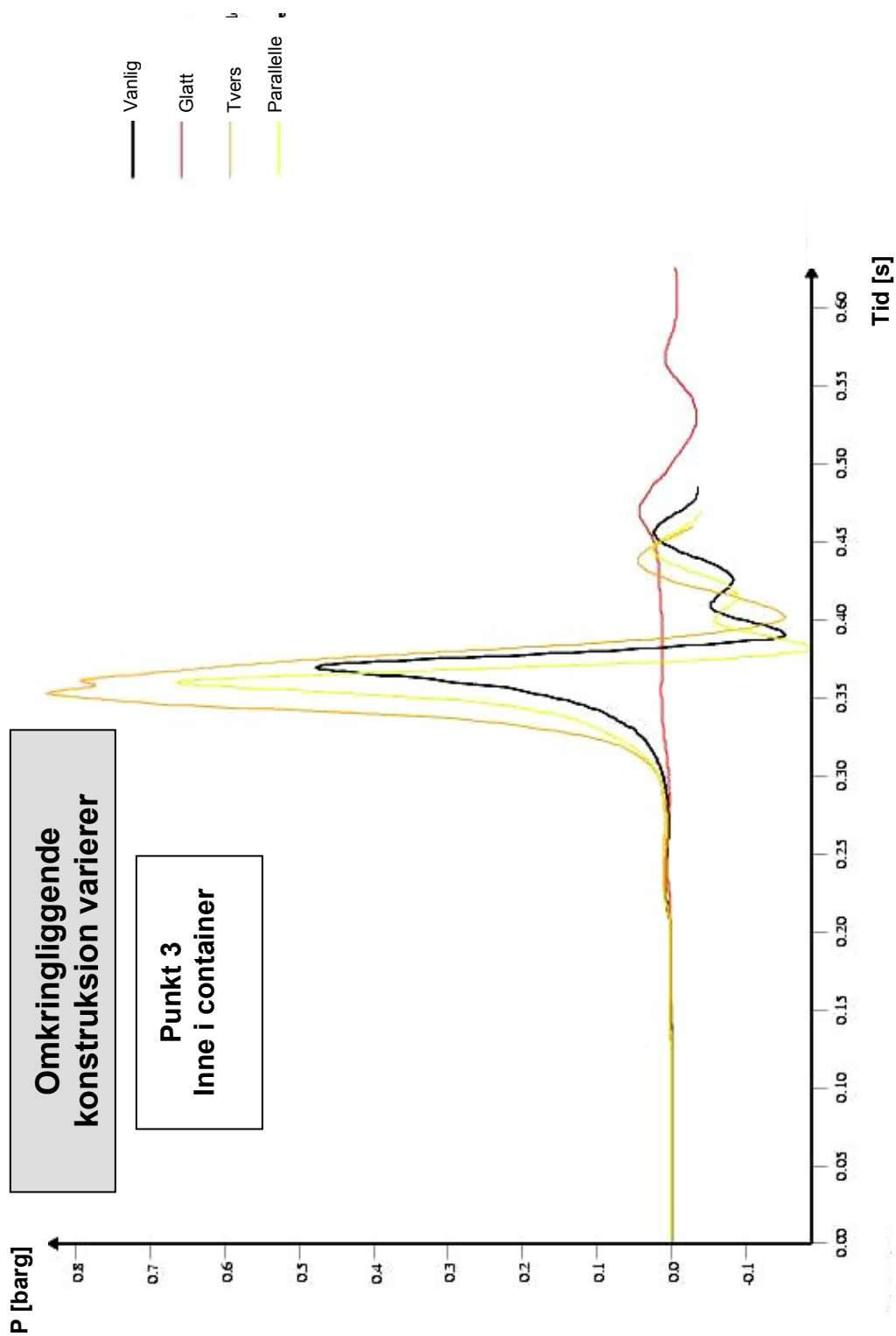
Figur 23 – Støkiometrisk blanding av propan og luft i 33 % (grafer 2 og 4) og 100 % (grafer 1 og 3) av containerens totalvolum. Blandingene er innerst i containeren, dvs. lengst vekk fra åpningen. Tennkilden er innerst i containeren, midt på kortsiden. Obstruksjoner inne i containeren er 4 parallele (P) sylindrer (grafer 3 og 4) og 4 tversgående (P) sylindrer (1 og 2). Parallele og tversgående refererer til sylindrenes lengde i forhold til forbrenningsretningen.



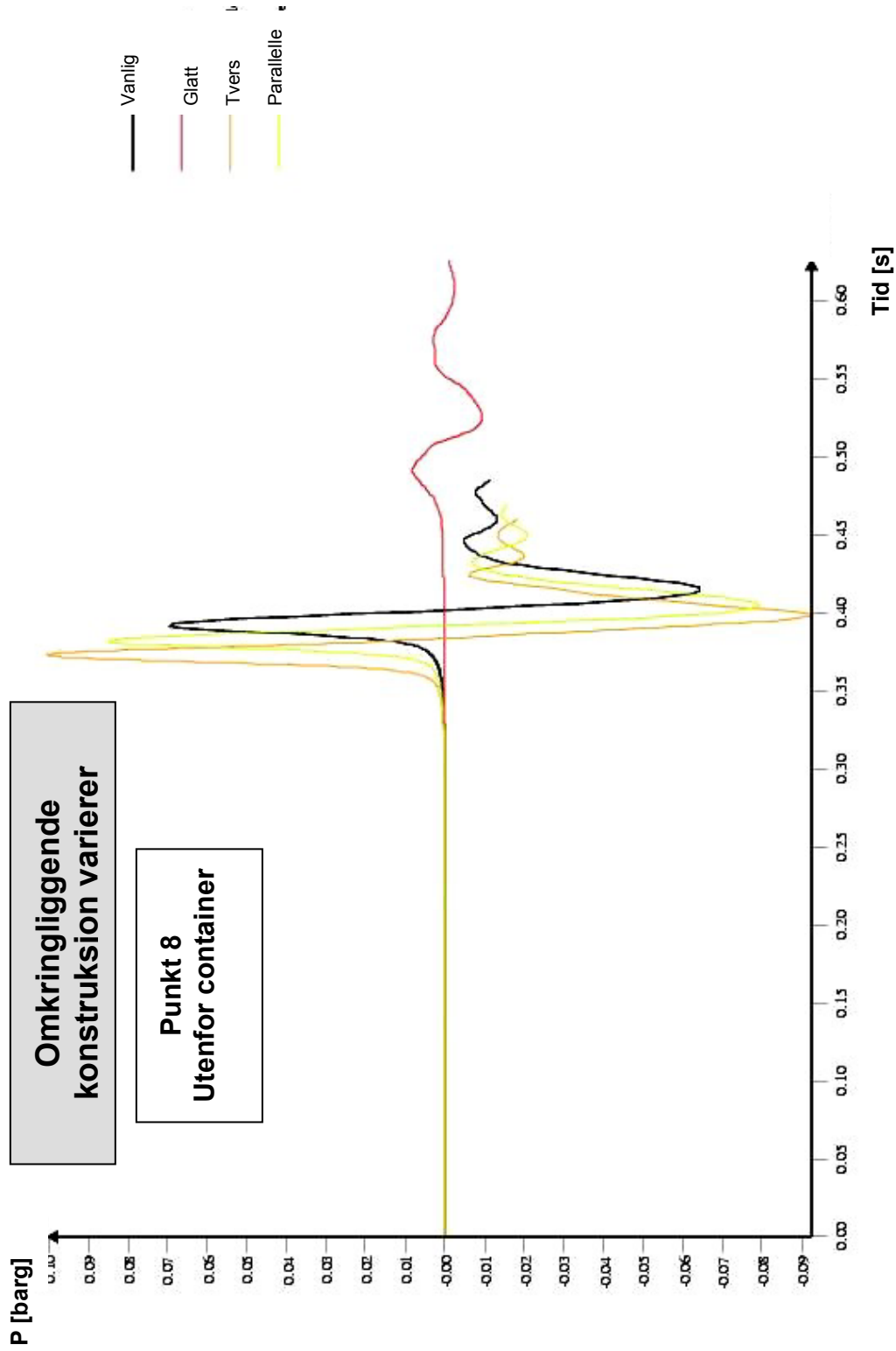
Figur 24 - Støkiometrisk blanding av propan og luft i 100 % av containerens totalvolum. Tennkilden er plassert midt mellom containerens tak, gulv og langsider i avstandene 0,5m, 1,3m, 2,2cm, 3cm, 4m, 5m og 6m fra containeråpningen.



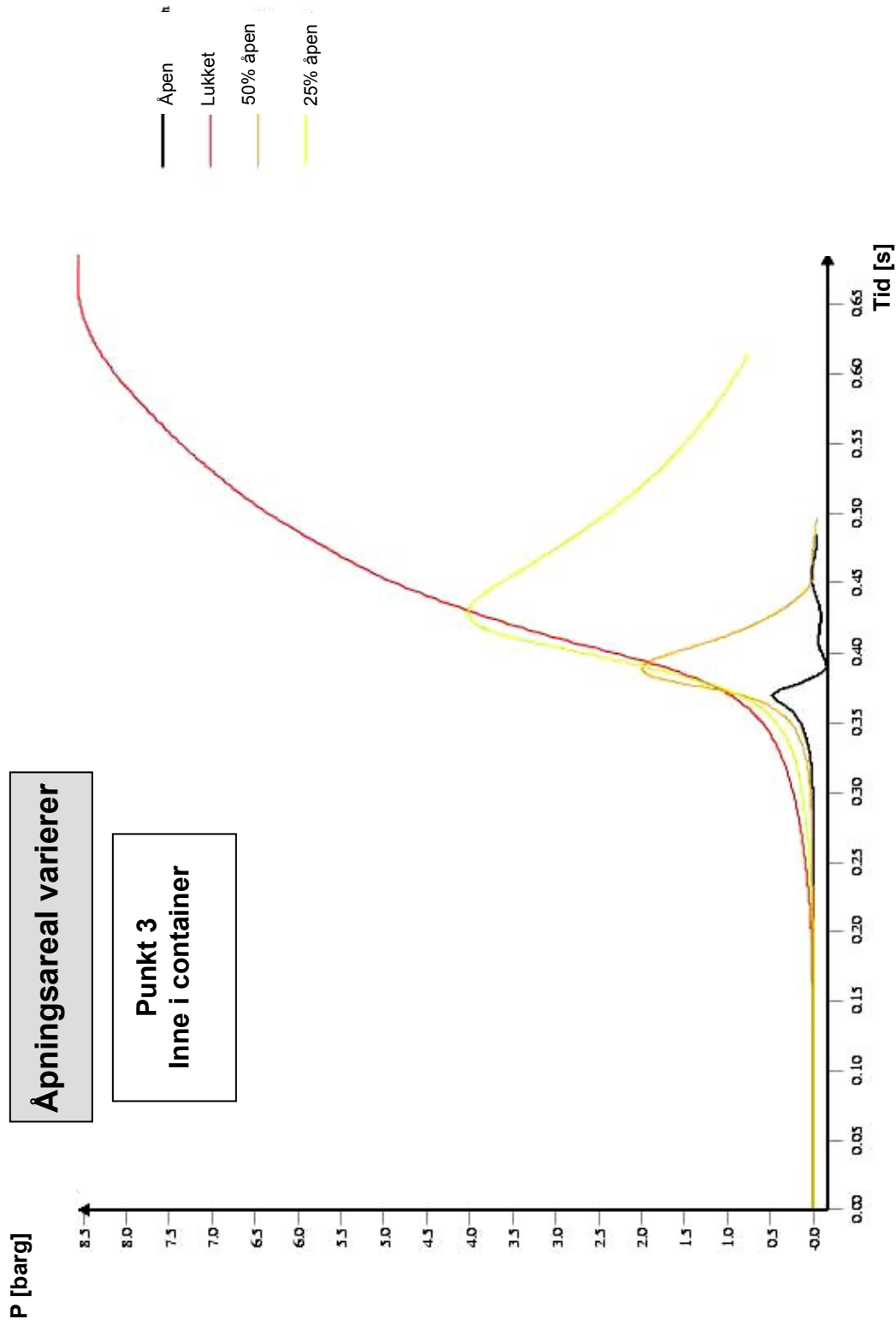
Figur 25 - Støkiometrisk blanding av propan og luft i 100 % av containerens totalvolum. Blandingen er innerst i containeren. Tennkilden er plassert midt mellom containerens tak, gulv og langsider i avstandene 0,5m, 1,3m, 2,2m, 3m, 4m, 5m og 6m fra containeråpningen.



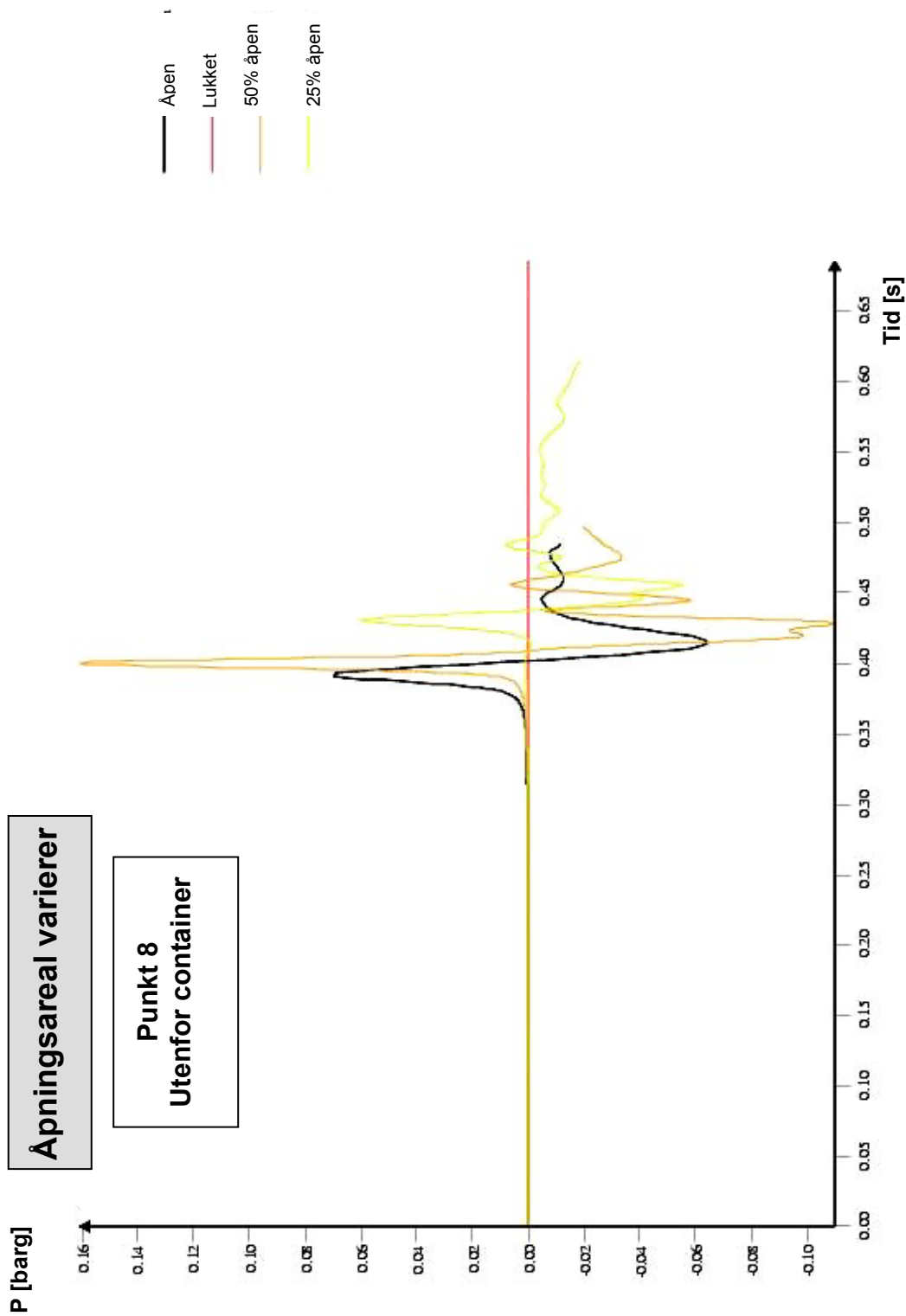
Figur 26 – Støkiometrisk blanding i hele containeren. Tennkilden er innerst i containeren midt på kortsiden. Rød graf representerer simulering av eksplosjon i container med glatte vegger. I de andre eksplosjonene er containerveggene modellert slik de er i virkeligheten. I grafen parallele er det lagt inn sylindrer som ligger parallelt med forbrenningsretningen. I grafen tversgående er sylindrene tvers på forbrenningsretningen.



Figur 27 – Støkiometrisk blanding i hele containeren. Tennkilden er innerst i containeren midt på kortsiden. Rød graf representerer simulering av eksplosjon i container med glatte vegger. I de andre eksplosjonene er containerveggene modellert slik de er i virkeligheten. I grafen parallele er det lagt inn sylindrer som ligger parallelt med forbrenningsretningen. I grafen tversgående er sylindrene tvers på forbrenningsretningen.



Figur 28 – Støkiometrisk blanding i hele containeren. Tennkilden er innerst i containeren midt på kortsiden. Opprinnelig åpningsareal, dvs. helt åpen (100 %), sammenlignes med delvis åpen (50 % og 25 %), og helt lukket (0 %)



Figur 29 – Støkiometrisk blanding i hele containeren. Tennkilden er innerst i containeren midt på kortsiden. Opprinnelig åpningsareal, dvs. helt åpen (100 %), sammenlignes med delvis åpen (50 % og 25 %), og helt lukket (0 %)

6 Diskusjon

Vi vil etter beste evne forsøke å diskutere resultatene i den rekkefølgen de ble presentert i kapittel 5.

6.1 Sammenligning av resultat fra simulering av demonstrasjonsekspløsjon, og forsøk

Vi vil her diskutere resultat fra simuleringer av demonstrasjonsekspløsjonen opp mot forsøksresultat, med hensyn på resultatenes overensstemmelse og validitet, og muligheter for feilkilders innvirkning. Målet med denne simuleringen var å gjøre ekspløsjonsforløpet kjent. Om forløpet skal kunne vurderes som kjent og kartlagt med denne rapporten vil avhenge av hvor riktig simuleringen, og dens resultat, er.

6.1.1 Propanutslipp

Kriteriet for riktig simulert utslipp er tiden til antennelse. Gjennomsnittstid til antennelse ved forsøk, og tid til antennelse i simulering (se figur 16) avviker med ca. 1,5s, eller ca. 6 – 7 %. Etter vår vurdering er avviket relativt lite, og en klar antydning til, at simulert gassutslipp er riktig.

6.1.2 Vurdering av feilkilder

Måling av massestrøm

Utslippsraten i simuleringene ble basert på målinger av propanutslippet i containeren (nærmere forklart i vedlegg 2). Om målingene er forbundet med store feil, så er det overveiende sannsynlig at alle målingene er feil, da resultatene varierer i liten grad. Mulige feilkilder vi klarte å identifisere har, etter vår vurdering, ikke så utslagsgivende kraft. Vi valgte derfor å bruke resultatene som fremkom.

Justering av dysediameter

I justeringen som ble gjort (se kapittel 4.2.1) valgte vi å la målt massestrøm og strømningshastighet, beregnet ut fra massestrøm, være bestemmende for ny dysediameter. Vi mente at dette var de viktigste parametrene for strømningsbildet til propanen i containervolumet. Begrunnelsen for vår mening er som følger:

Massestrømmen er bestemmende for mengden propan i containeren på et gitt tidspunkt. Hvor mye propan det er i containeren ved antennelse vil kunne påvirke ekspløsjonsforløpet i stor grad (se figur 2 kapittel 1.4.2). Parameteren bør derfor etter vår mening, holdes konstant i overgangen fra væske til gass.

I vedlegg 6 kan to utslippsforløp sammenlignes. Et, der strømningshastighet ut av dyser er 1,1m/s, mens det andre er det forløpet som fremkom av våre antagelser, der strømningshastigheten er 25m/s. Massestrømmen fra dysene er lik for begge utslipp. Tiden til antennelse øker fra 20,5s til nesten 33s, når strømningshastigheten går fra 25 til 1,1m/s. En forskjell på nesten 13s. Hastigheten ut av dyser anser vi derfor som en styrende parameter for utslippsforløpet og må derfor sammen med målt massestrøm danne utgangspunktet for justeringen.

Resultatene har ikke avdekket grunnleggende feil ved justeringen. Tvert i mot så bidrar overensstemmelse mellom forsøks- og simuleringsresultat, til vår overbevisning om at måten justeringen ble gjort tar hensyn til riktige parametere.

Plassering av dyser

Fire av fem dyser måtte flyttes 30cm fra sin reelle (målte) plassering i containeren når utslippet ble simulert (se figur 9).

I containeren er det propanvæske som strømmer ut fra dyser med hastighet 25m/s, og grunnet den høye hastigheten så består strømmen av små dråper. Propanvæske fordampes relativt raskt ved atmosfæretrykk og er derfor relativt raskt i gassform slik som i simuleringen. Vi tror derfor at ny plassering av dyser ikke trenger å være kilde til feil. Vi føler oss til og med trygge på å si at forflytningen er en bedre etterligning enn om strømmen var fra ett punkt.

Sensitivitetsanalyse av parametrene; "relative turbulence intensity", og "turbulence length scale."

Parametrene bestemmende for graden av turbulens i strømming, i og ved dyser. De to grafene i figur 16 er ganske sammenfallende og gir kun 1s forskjell i tid til antennelse. Resultatene avviker med kun 1/20 eller 5 %. Analysen har, etter vår mening, avdekket at parametrene har liten innvirkning på utslippsforløpet og trenger ikke nærmere hensyn.

6.1.3 Resulterende eksplosjon

Trykkmålinger i forsøk skulle, som beskrevet i kapittel 4, gi oss en indikasjon om hvor høyt trykket var 3m fra containeråpningen. Hvis simulering av eksplosjonen er riktig, og trykkmålinger i forsøk gyldige, må det forventes at resultat fra simuleringer ikke avviker i for stor grad fra indikert verdi fra forsøk.

Figurer 14 og 15 viser at når sledene var plassert 2,4m fra containeråpningen var det kun slede med størst motstand som klarte å stå imot eksplosjonstrykket. Vi ønsket derimot en litt klarere tendens til motstand og flyttet derfor sledene 0,6m lenger vekk, til 3m. I denne avstanden begynner samtlige sleder som trenger 0,0041 barg overtrykk, å motstå bevegelse, og tyngste sleden forflyttes av eksplosjonen, i kun et av 5 tilfeller. Vår tolkning av resultatene er at overtrykket fra eksplosjonen i denne avstanden, dvs. 3m fra containeråpningen, kan være innenfor et intervall, med nedre og øvre grense 0,0041 barg og 0,0064 barg.

Resultat fra simulering (figur 18) viser at trykkgradienten (trykkgradient; trykkfall, eller – økning, mellom to punkt) over platen, dvs. statisk overtrykk foran plate til statisk undertrykk bak, er 0,0047 barg. Verdien er innenfor det intervall forsøksresultatene ga til svar. Men intervallets størrelse (en tredjedel av verdi for øvre grense), gir ingen god bekreftelse på at simuleringsresultat er riktig.

I alle grafer som viser trykkoppbygning i eksplosjonen i utvalgt punkt inne i, og utenfor containeren (figurer 18 og 19.), kan vi se plutselig trykkøkning i begynnelsen. Simulering av utslipp tok hensyn til vind i området mens simulering av selve eksplosjonen ikke kunne ta det hensynet. Forklaringen på denne økningen er at energien i fluidet (luften) har endret form. Når fluidstrøm bringes til ro avtar

hastigheten, og da kinetisk energi. Energi kan som kjent ikke forsvinne, så energien som før var bundet som strømningshastighet, har gått til å øke lufttrykket.

Figur 17 viser hvordan propanen er fordelt over containervolumet ved antennelse. Vi ser at blandingen er inhomogen og avtar med økende avstand fra dyser. Støkiometrisk konsentrasjon (markert med gult på skalaen) fremkommer ikke på figuren men må nødvendigvis finnes i små lommer eller sjikt i nærheten av dyser. Blandingene har ellers lavere konsentrasjoner unntatt inne ved utslippspunkt. Figur 19 viser at eksplosjonstrykket i punkt 2 (innerst og øverst i container) og 3 (midt på containerens langside) er henholdsvis, 0,025 barg og 0,007barg. I vedlegg 7, simulering nr. 100135, ser vi at overtrykket i samme to punkt (2 og 3), med samme plassering av tennekilde, men støkiometrisk blanding, er 0,022 barg og 0,017 barg. Med andre ord så er trykkøkningen innover i containeren betydelig større i demonstrasjonsekspløsjonen en hva tilfellet er med støkiometrisk blanding.

Vår forklaring på hvorfor det er slik, krever at demonstrasjonsforløpet betraktes to i steg, fra tennekilde til punkt 3, og fra punkt 3 og innover i containeren til punkt 2.

Fra tennekilden til punkt 3, er propan/luft blandingen mager (lavere konsentrasjon en støkiometrisk), og relativt stillestående. Konsentrasjonsnivået er derfor styrende for trykkoppbygningen, som forklarer hvorfor høyere trykk fås i simulering med støkiometrisk blanding.

Fra punkt 3 og innover mot punkt 2 i containerenden, møter forbrenningsfronten propan/luft blanding med stadig høyere konsentrasjon som strømmer mot fronten med stadig høyere hastighet, og da grad av turbulens (økt hastighet fører til økt turbulens).

Kort sagt så tror vi at forholdet skyldes økt konsentrasjon og grad av turbulens når forbrenningsfronten propagerer innover i containeren.

6.1.4 Vurdering av feilkilder

Trykkmåler

Når trykkmålerne, som ble brukt i forsøk, ble forflyttet av eksplosjonen, var det tre samvirkende element som bidro, dvs. statisk og dynamisk trykk, i tillegg til dragsug bak. I tillegg til eksplosjonen kan vind foran eller bak bidra eller motvirke bevegelse. Vindens bidrag anser vi som neglisjerbart da vindretningen den dagen forsøk ble gjort, var parallell med plater på trykkmålere.

Maksimalt statisk trykk foran sleder var 0,0044 barg. I det tidspunkt, statisk trykk er høyest, har dragsuget en verdi på om lag $0,35 \cdot 10^{-5}$ som er under en promille av det statiske trykket. Dragsug kan derfor, etter vår oppfatning, neglisjeres som en komponent ved forflytning av sleder.

Antakelser for beregninger:

- Temperatur til forbrenningsprodukt er 1800°C (2073K)
- Tettheten til luft ved 20°C (293K) er 1,24 kg/m³

- Bruker tetthet til luft for forbrenningsprodukter men justerer for temperatur
Dynamisk trykk (Pa) beregnes ved hjelp av ligningen (ligning 5.26 [4]):

$$P_{\text{dynamisk}} = \rho \cdot V^2 / 2, \text{ der } V \text{ er hastigheten til fluidet og } \rho \text{ er tettheten.}$$

I figur 2 kan strømningshastigheten til forbrenningsproduktene avleses. Når statisk trykk er høyest, er strømningshastigheten ca. 15m/s.

Forbrenningsproduktenes tetthet kan bestemmes ut fra ideell gasslov:

$$\rho_1 / \rho_2 = T_2 / T_1. \text{ Ny tetthet blir da: } \rho_2 = 1,24 \text{ kg/m}^3 \cdot 293 \text{ K} / 2073 \text{ K} = 0,18 \text{ kg/m}^3.$$

$$P_{\text{dynamisk}} = 0,18 \text{ kg/m}^3 \cdot (15 \text{ m/s})^2 / 2 = 20,25 \text{ Pa} = 0,0002 \text{ bar}$$

Vi ser at komponenten kan, hvis strømmingen bringes fullstendig til ro uten tap av energi til omgivelsene, gi et bidrag som utgjør 4 – 5 %. Bidraget er sannsynligvis noe mindre, da slik strømningsendring medfører som regel energitap til omgivelser. Bidraget fra dragsug, og dynamisk trykk, til den totale bevegelsen anses derfor som forsvinnende lite. Sammenligning av statisk trykk, beregnet i simuleringer, og sledenes nødvendige trykk for bevegelse, vurderer vi derfor som god tilnærming.

Målinger av sledenes statiske friksjon hadde feilmargin på om lag 10N. Den målte motstanden til de to sledene som danner nedre og øvre grense for det antatte eksplosjonsovertrykket var henholdsvis 147N og 231N. Feilmarginen for disse to sledene er derfor henholdsvis 6,8 % og 4,3 %.

Containerveggenes utforming

Dette er kanskje den feilkilden som har gitt størst utslag. Vi ser, ved å betrakte figur 26, at modellerte bølgers dybde og bredde, påvirker eksplosjonstrykket i særs stor grad (se diskusjon av andre scenarier). Utformingen vi har valgt å gi containerveggene, kan kun anses som gjetning av riktig modellering. Det kan hende at bølgenes dybde og bredde skal økes eller reduseres for å stemme med virkeligheten. Vi har ingen kvalifisert mening om temaet, men er klar over hvor utslagsgivende veggens form kan være, og registrerer at problemet krever nærmere analyse.

6.2 Simuleringer av andre scenarier

Simuleringer av andre scenarier ble gjort i håp om at resultatene herfra ville gi oss et grunnlag for å beskrive hvordan enkelte av faktorene, beskrevet under kapittel 1.4, kan være avgjørende for eksplosjoner i containeren. Resultatene vil her bli kommentert og diskutert opp mot bakgrunnsteorien (kapittel 1.4). Eventuelle fravik fra teori samt andre observasjoner vil bli kommentert og, etter beste evne, forsøkt forklart.

6.2.1 Gass-sky varierer i størrelse

Resultatene vist i figur 22 stemmer til en viss grad overens med Pappas beregninger [5] (se kapittel 1.4.3). Gass-skyen som fylte halve containeren resulterte i litt lavere eksplosjonstrykk en tilfellet var for full container. De mindre skyene, 33 %, 20 % og

10 %, ga mye lavere eksplosjonstrykk. Selv med obstruksjoner (og da økt turbulens) i containeren lyktes det ikke å få skyen på 33 % til å resultere i like store trykk som ved full container (figur 23).

Vi har prøvd å skaffe tilveie grunnlaget for Pappas beregninger, nevnt i Gass Explosion Handbook. I samtaler med Pappas fremkom, at det også er gjort forsøk som bekrefter beregningene. Det lyktes oss ikke å anskaffe bakgrunn for beregningene eller resultater fra forsøk. Uten et grunnlag for sammenligning er det vanskelig for oss å gjøre kvalifiserte betraktninger om hvorfor den minste skyen som gir like høyt trykk som full container, i vårt forsøksoppsett, begrenses til å utgjøre halve containervolumet. Vi tror at begrensningen, vårt oppsett setter, kan være:

- Type brensel
En annen og mer reaktiv gass kan muligens føre til at gass-skyen kan minskes
- Containerens utforming kan ha satt begrensningen
Containerlengden eller lengde/bredde forholdet, åpningens størrelse

6.2.2 Tennkildens plassering varierer

Figurer 24 og 25 bekrefter at tennkildens plassering er av stor betydning. Antennelse innerst i containeren (lengst bort fra åpningen) ga et betydelig høyere trykk en når tennkilden ble flyttet nærmere containeråpningen.

Ved å studere grafene ser vi at trykktoppen forsinkes noe (noen ms), etter hvert som tennkilden flyttes innover i containeren. Vi tror at dette skyldes følgende:

Ved antennelse starter forbrenningen å bre seg i tre dimensjoner, som et ekspanderende kuleskall. Desto nærmere containerveggen antennelse skjer, desto raskere stanses forbrenningen av veggen, dvs. forbrenningsfrontens areal reduseres.

6.2.3 Omkringliggende konstruksjon varierer

Grafene i figurer 26 og 27 viser at veggens utforming (se bilde 4) har stor betydning for trykkoppbygningen i containeren. Containervegger med bølger gir ca. 8 – 10 ganger høyere trykk en glatt vegg gir. Økningen kan forklares med at mellom bølgene i veggene vil det dannes virvler når luften strømmer forbi. Virvlene øker turbulensen og derfor eksplosjonstrykket (se kapittel 1.4.4).

Ved å øke antall obstruksjoner (mer turbulens) økte eksplosjonstrykket ytterligere. Scenariene som skaper mest turbulens ser også ut til å nå en trykktopp raskest. Dette virker rimelig siden turbulensøkningen vil generere en raskere forbrenning (se kapittel 1.4.4).

6.2.4 Åpningsareal varierer

Figurer 28 og 29 viser med klare tegn hvilken betydning åpningsarealets størrelse har. Simuleringer der åpningsflatens areal varierte viser at reduksjon av åpningen øker trykket betraktelig.

Figur 4 vedlegg 4, viser at deflagrasjons-overtrykket for støkiometrisk blanding av propan og luft i lukket volum er 9,3 barg, dersom varmetap neglisjeres. Vår simulering av lukket volum og støkiometrisk blanding ga overtrykk på 8,5 barg. Resultatet anses som rimelig siden FLACS tar hensyn til varmetap.

Også i disse simuleringene får vi en forskyvning av tidspunkt for trykktopp. Inne i containeren (punkt 3) forlenges tiden til maksimalt trykk når åpningsareal reduseres.

Dette kan vi se aller tydeligst når det ikke er åpning på containervolumet. Trykkøkningen er rask i begynnelsen men avtar i stor grad lenger ut i forbrenningen. Vi tror at forklaringen på dette ligger i den endringen forbrenningen får når forbrenningsproduktene ikke lenger kan ekspandere. Ekspansjonen i tidlig fase av forbrenning, fører til omrøring og virveldannelser i containeren, og da turbulent og hurtig forbrenning. Når ekspansjonen avtar vil forbrenningen bli mindre turbulent og derfor tregere. Tregere forbrenning forsinker trykkoppbygningen.

Utenfor containeren i punkt 8 (9,5m fra åpningen) er situasjonen annerledes. Vi ser at scenariet med 50 % reduksjon av åpningsarealet gir høyest trykk her. Større og mindre åpning, henholdsvis 100 % og 25 %, gir begge lavere trykk. Det tyder på at i intervallet mellom helt åpen container og 25 % åpning, finnes en åpning som gir maksimalt trykk akkurat i dette punktet.

6.2.5 Andre observasjoner:

Vi registrerer, ved å betrakte samtlige grafer for trykkoppbygning i punkt 8, utenfor containeren, at når eksplosjonen passerer dette punktet får høyest og lavest trykk tilnærmet samme verdi men med motsatt fortegn. Inne i containeren så er dette ikke tilfellet da verdi for maksimalt trykk, i alle tilfeller overgår verdien for undertrykket. Dvs. at grafene virker å være ganske symmetriske om akse for atmosfæretrykk utenfor container, men ikke innenfor. Vi har ingen god forklaring på hvorfor det er slik. Det synes å være en sammenheng mellom hvor stort areal, luft kan strømme fra for trykkutjevning, og symmetri. For et punkt inne i containeren må luften gjennom containeråpningen (begrenset areal) for å nå punktet, men utenfor containeren kan luft strømme til punktet fra alle retninger.

7 Konklusjon

På følgende grunnlag mener vi å ha presentert en løsning på oppgavens problemstilling;

- Verdier for gassutslipp, antennelsestidspunkt og trykkoppbygning i ResQ`s demonstrasjonseksplisjon er gjort kjent ved hjelp av målinger, forsøk og simuleringer. Sammenligning av forsøk og simuleringer har blitt utført og simuleringsresultatene er funnet tilfredsstillende til det formål de er tiltenkt.
- Følgende faktorerers innvirkning på eksplosjonsforløpet er blitt belyst:
 - gass-skyens størrelse
 - gasskonsentrasjon
 - plassering av tennkilde
 - obstruksjoner
 - åpningsareal
- Animasjoner av utvalgte eksplosjoner er blitt laget

8 Litteraturliste

1. Mikael Näslund, *Energigasteknikk* (Varme og Kraftteknikk Lunds Universitet, desember 2002)
2. Dag Bjerketvedt, Jan Roar Bakke, Kees van Wingerden, *Gas Explosion Handbook, version 1.2* (Bergen, september 1993)
3. *FLACS-99r 2 Users Guide* (1999)
4. Joseph B Franzini, E. John Finnemore, *Fluid Mechanics with engineering applications* (The McGraw-Hill Companies, Inc., 1997)
5. Gas Processors Suppliers Association, *Engineering Data Book, volume II*
6. Rolf K. Eckhoff, *Elektrisk utstyr for eksplosjonsfarlige områder* (Tapir forlag, Trondheim 1996)

Vedlegg

Vedlegg 1 – Trykkmåler

Vedlegg 2 – Måling av massestrøm og justering av dysediameter

Vedlegg 3 – Simuleringsvolum

Vedlegg 4 – Propans egenskaper

Vedlegg 5 – Forsøk i container

Vedlegg 6 – Sammenligning av gassutslipp

Vedlegg 7 – Simulering av andre scenarier

Vedlegg 8 – CD-rom med animasjoner og scenariofiler

Vedlegg 1 – Trykkmåler

Beskrivelse av trykkmåler

Det ble konstruert tre tilnærmet identiske "sleder." Sledene besto av to skinner i bunn med en vertikal plate i front og en pall bak denne (se bilder).



Den vertikale platen i fronten av hver slede hadde lengde og bredde på 0,6m som ga et areal på 0,36m².

Pallen bak denne platen fungerte som et lasteplan der sleden ble tynget ned med vekter for å øke sledens motstand mot bevegelse.

Sledene gled på en bølgeblikkplate som ble plassert foran containerens åpning. Avstanden mellom de to skinnene hver slede sto på ble tilpasset slik at skinnene havnet nede i en bølgedal. Dette ble gjort for at luftstrøm under hver slede skulle bli minimal når forbrenningsfronten møtte sledene.

Fremgangsmåte ved målinger

Det trykket som virket i en bestemt avstand fra containeråpningen skulle bestemmes ved å finne den største statiske friksjonskraften som kunne overvinnes.

Denne motstandskraften som hver slede ytte ble målt med vekt ved hvert forsøk.

Hvis eksplosjonen førte til at sledene beveget seg ble enten vekten økt eller sledene flyttet lengre vekk. Omvendt ble det for de gangene sledene ikke beveget seg. Ved å gjenta forsøkene mange nok ganger og justere sledenes motstandskraft for hver gang kunne denne friksjonskraftens tilnærmede verdi bestemmes.

Når denne verdien var bestemt kunne trykket fra eksplosjonen beregnes ved å fordele friksjonskraftens verdi på platens areal.

Vedlegg 2 – Måling av massestrøm og justering av dysediameter

Oppsett for, og resultat av målinger

En sylindrisk ballong av plast med stive ender i papp (se bilde under) ble konstruert med radius; 0,6m, og høyde; 2m som gir et volum på $2,25\text{m}^3$.

I den ene pappenden ble det lagt hull med plasthylse som ble ført over den

gassførende ledningen. Pga. at propanen tappes på lagringstankens underside tilføres propanen containeren i væskeform. Vedlegg 4 inneholder

damptrykkdiagrammer som viser at propan i væskeform ved atmosfæretrykk har en temperatur på $-42,1^\circ\text{C}$. Ved så lave temperaturer blir både plasten og teipen ganske sprø og revner derfor

lettere. For å beskytte sylindere ble det derfor laget en mindre sylinder (blå på bilde) som ble plassert inne i den store. Propanen ville da treffe først den mindre sylindere og falle til bunns og fordampe der. Bunnen måtte derfor bli forsterket med tykkere plast.

Deretter ble sylindere presset sammen, dvs. tømt for luft og gasstilførselen åpnet.

Tiden det tok for fylling og temperaturen inne i ballongen ble målt ved hjelp av vanlig stoppeklokke. Når disse parametrene var kjente kunne massestrømmen bestemmes ut fra kontinuitetsligningen (ligning 4.16a [4]). Det ble foretatt tre målinger, se tabell 1 under.



Tabell 1 - Resultat fra målinger av massestrøm

Måling nummer:	Tid for fylling [s]	Temperatur, etter fylling [$^\circ\text{C}$]
1	38	7,2
2	43	6,9
3	40	7
Gjennomsnitt	40,3	7,03

Beregnet gjennomsnitt på 40,3s og $7,03^\circ\text{C}$ ble i beregninger av tetthet justert til 40s og 7°C da målingene ikke gir grunnlag for å oppgi mer nøyaktige verdier.

Beregning av massestrøm

Fra tabell 2, vedlegg 4, er propangassens tetthet ($\rho = m/V$, ρ = tetthet, m = masse, V = volum) (ligning 2.1 [4]) ved atmosfæretrykk og 15 °C oppgitt å være:

$$1,865\text{kg/m}^3.$$

Ideell gasslov gir en ny tetthet for propangass ved 7 °C (ligning 2.8 [4]):

$$\rho_{\text{gass, atmosfæretrykk, 7°C}} = \rho_{\text{gass, atmosfæretrykk, 15°C}} * (T_2/T_1) = 1,865\text{kg/m}^3 * (280\text{K}/288\text{K}) = 1,813\text{kg/m}^3.$$

Den totale massen som slippes inn i tidsintervallet er da:

$$\rho_{\text{gass, atmosfæretrykk, 7°C}} * V_{\text{sylinder}} = 1,813\text{kg/m}^3 * 2\text{m}^3 = 3,626\text{kg}.$$

Massestrømmen, masse/tidsenhet, blir da:

$$\begin{aligned} \text{m/tidsenhet} &= (\text{masse innsluppet})/(\text{tiden fra start til slutt}) \\ 3,626\text{kg}/40\text{s} &= \underline{0,091\text{kg/s}} \end{aligned}$$

Per dyse: $0,091\text{kg/s}/5\text{dyser} = \underline{0,0182\text{kg/s}}$

Justering av dysediameter for simuleringer i FLACS

Det er ikke mulig å simulere væskeutslipp i FLACS. Programvaren tolker en oppgitt massestrøm som om det skulle vært gass som strømmer ut av dysen. Dette fører til at den målte massestrømmen gir strømningshastighet på ca. 3000m/s. Så høy hastighet på gassen ut av dysen vil påvirke strømmingen i containeren i mye større grad en hva virkeligheten tilsier.

For å løse dette problemet ble dysediameteren i simuleringene justert.

Justering 1): massestrøm og strømningshastigheten til gassen og væske er lik.

Justering 2): massestrøm er lik, justering gjort med hensyn til propanens utvidelse i faseovergangen

1)

Målt dysediameter (like innenfor åpning): $d = 1,4\text{mm} = \underline{0,0014\text{m}}$

Antall dyser i rørende: 5

Areal per dyse: $A_{\text{dyse}} = \pi * (d/2)^2 = \pi * (0,0016\text{m}/2)^2 = \underline{1,44*10^{-6}\text{m}^2}$

$\rho_{\text{væske, atmosfæretrykk, } 15^{\circ}\text{C}} = 507,3\text{kg}/\text{m}^3$ (tabell 2, vedlegg 4)

Strømningshastighet til propan i væskeform fra dyse med diameter, d , på 3mm og massestrøm 0,0182kg/s (tetthetsendringer i væsker ved forskjellige temperaturer er neglisjerbar; bruker derfor tetthet ved 15°C):

$$\begin{aligned} \text{Volumstrøm}_{\text{væske}} &= \text{massestrøm}/\text{tetthet}_{\text{væske}} = 0,0182\text{kg}/\text{s}/507,3\text{kg}/\text{m}^3 \\ &= 3,58*10^{-5}\text{m}^3/\text{s} \end{aligned}$$

$$\text{Hastighet} = \text{Volumstrøm}/\text{Areal} = 3,58*10^{-5}\text{m}^3/\text{s}/1,44*10^{-6}\text{m}^2 = \underline{25\text{m}/\text{s}}$$

Volumstrøm til gass med hastighet 25m/s og massestrøm 0,0182kg/s:

$$\text{Volumstrøm} = \text{massestrøm}/\text{tetthet} = 0,0182\text{kg}/\text{s}/1,813\text{kg}/\text{m}^3 = 0,01\text{m}^3/\text{s}$$

Nytt dyseareal:

$$\text{Areal} = \text{Volumstrøm}/\text{hastighet} = 0,01\text{m}^3/\text{s}/25\text{m}/\text{s} = \underline{3,95*10^{-4}\text{m}^2}$$

Ny dysediameter:

$$A_{\text{dyse}} = \pi * (d/2)^2 \Rightarrow d = 2 * (A_{\text{dyse}}/\pi)^{1/2} = 2 * (3,95*10^{-4}\text{m}^2/\pi)^{1/2} = \underline{0,022\text{m}}$$

Vurdering av målingenes nøyaktighet

Mulige feilkilder i målingene kan være ballongens ikke helt sylindriske form (små deformasjoner) og synkroniseringen av tidsmålinger og gasstilførsel.

Dette ble forsøkt unngått ved å konstruere ballongen så stor at dens reelle totalvolum ble mindre sårbart overfor små deformasjoner i strukturen. Ved å lage ballongen så stor økte tiden det tok for fylling av ballongen, slik at unøyaktige start og stopp operasjoner ved tidtaking og gassutslipp fikk mindre betydning.

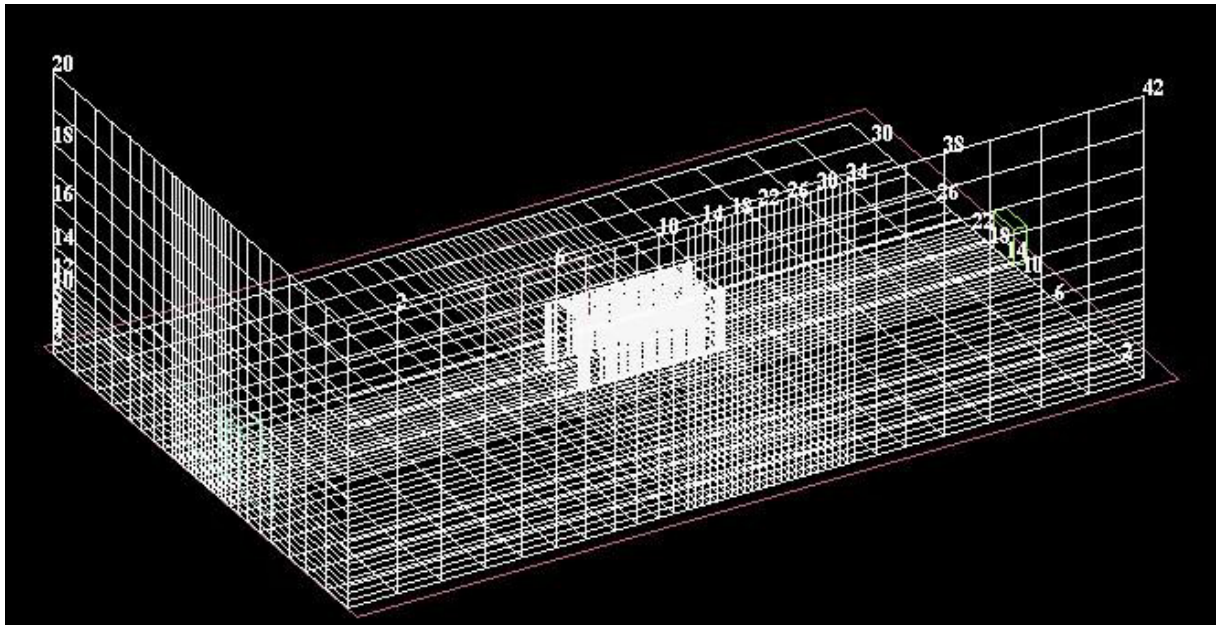
Tidspunktet for når sylindren var full ble bestemt ut fra de ansvarliges vurdering av situasjonen og kan derfor diskuteres. Denne vurderingen er derfor en mulig feilkilde på lik linje med de andre som er nevnt.

En anslått feilmargin for målingene er ca. 10 % som gjør at massestrømmen vil sannsynligvis ligge i området 0,082 – 0,100kg/s.

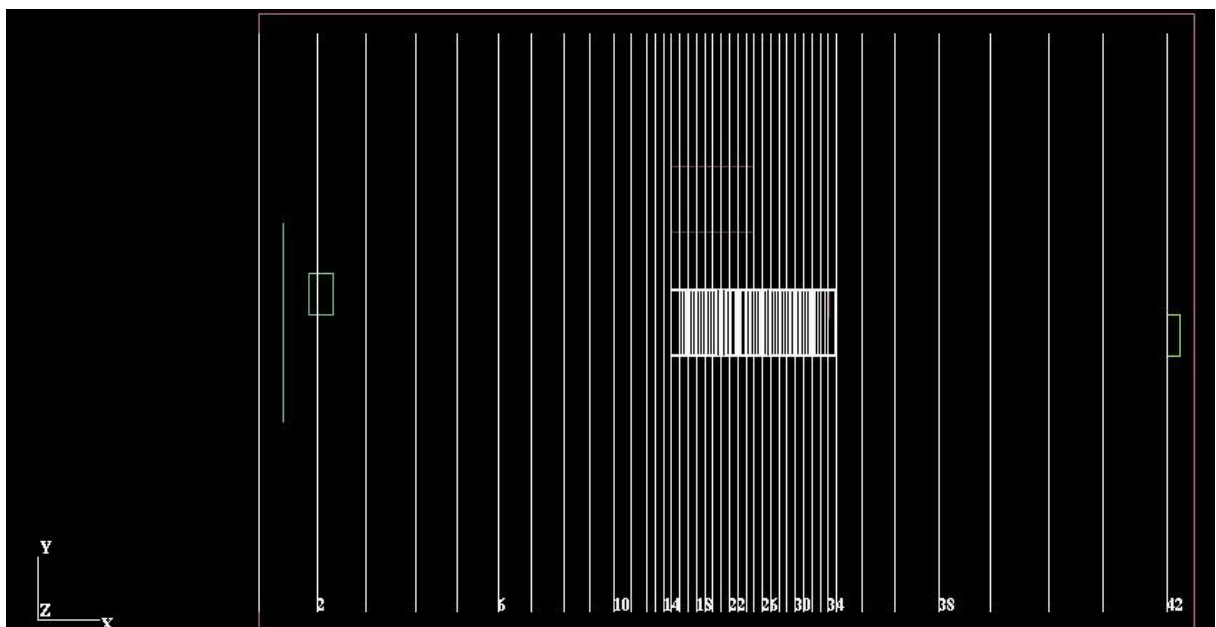
Den justerte diameteren for dysene kan og inneholde feil. Hvor utslagsgivende disse feilen kan være vil simuleringene gi svar på, dvs. at det forventes at simuleringer av gassutslipp vil gi feil verdier for antennelsestidspunktet hvis justeringen som her er gjort er forbundet med feil.

Vedlegg 3 – Simuleringsvolum

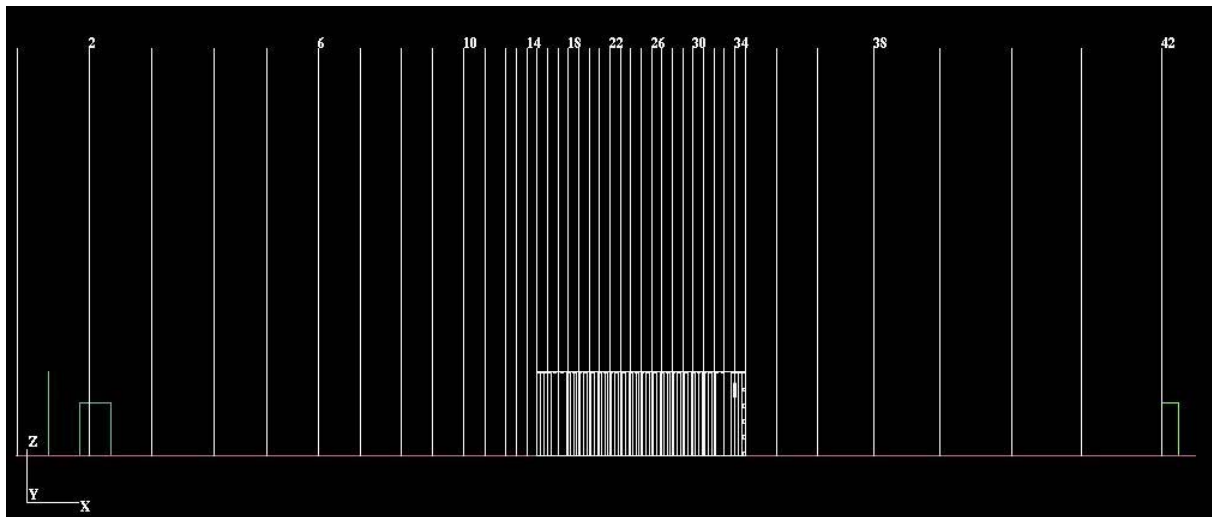
Figurene 1 til 4 viser simuleringsvolumet og oppdelingen av det i FLACS. Inne i containeren er gridet delt inn i $0,3\text{m} \times 0,3\text{m} \times 0,3\text{m}$ store kontrollvolum. Utenfor containeren øker volumene i størrelse, opptil $2,3\text{m} \times 1,5\text{m} \times 1,5\text{m}$ lengst vekk fra containeren.



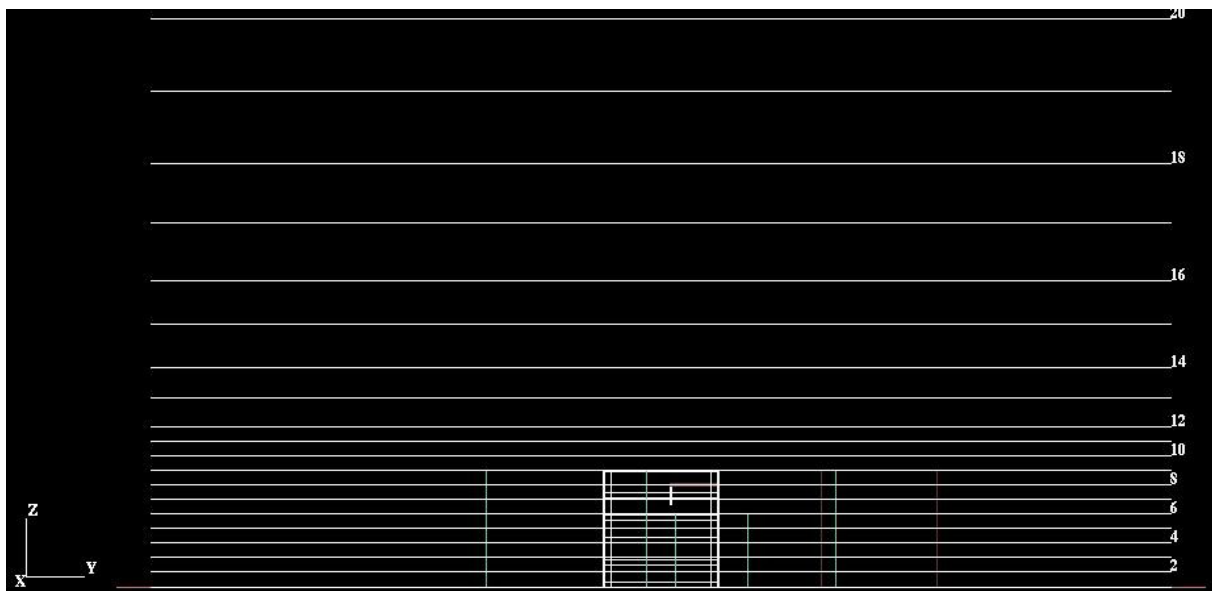
Figur 1 - Gridet slik det ser ut i 3D



Figur 2 - Gridet slik det ser ut i X-Y planet



Figur 3 - Gridet slik det ser ut i X-Z planet



Figur 4 - Gridet slik det ser ut i Y-Z planet

Vedlegg 4 – Propans egenskaper

Tabell 2 - Propans fysiske egenskaper

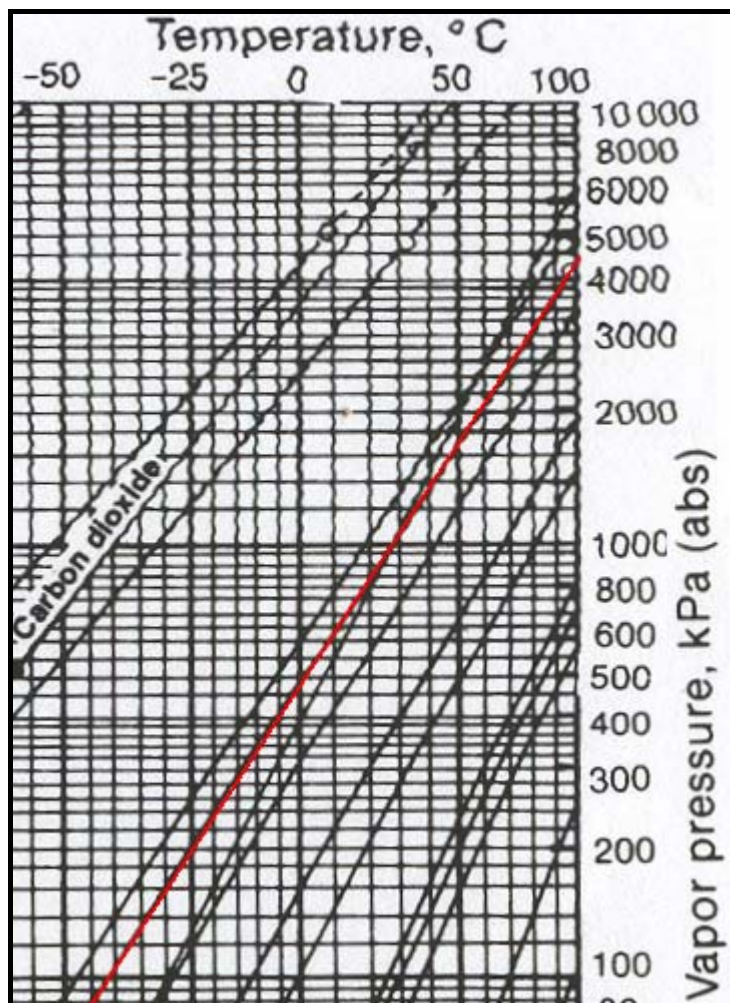
Formel	C_3H_8	•	
Molmasse	44,097 kg/kmol	•	
Kokepunkt ved atmosfæretrykk	-42,07 °C	•	
Relativ tetthet, luft = 1	1,5226	•	
Tetthet til væske ved atmosfæretrykk og 15°C	507,3kg/m ³	•	
Tetthet gass ved atmosfæretrykk og 15°C	1,865 kg/m ³	•	
Laminær forbrenningshastighet	45 cm/s	••	
Varmeverdi, væskeform ved 15°C	45,955 MJ/kg	•	
Brennbarhetsgrenser	Nedre	2 vol% i luft	•
	Øvre	9,5 vol% i luft	•

• Verdier hentet fra fig. 23-2 [5]

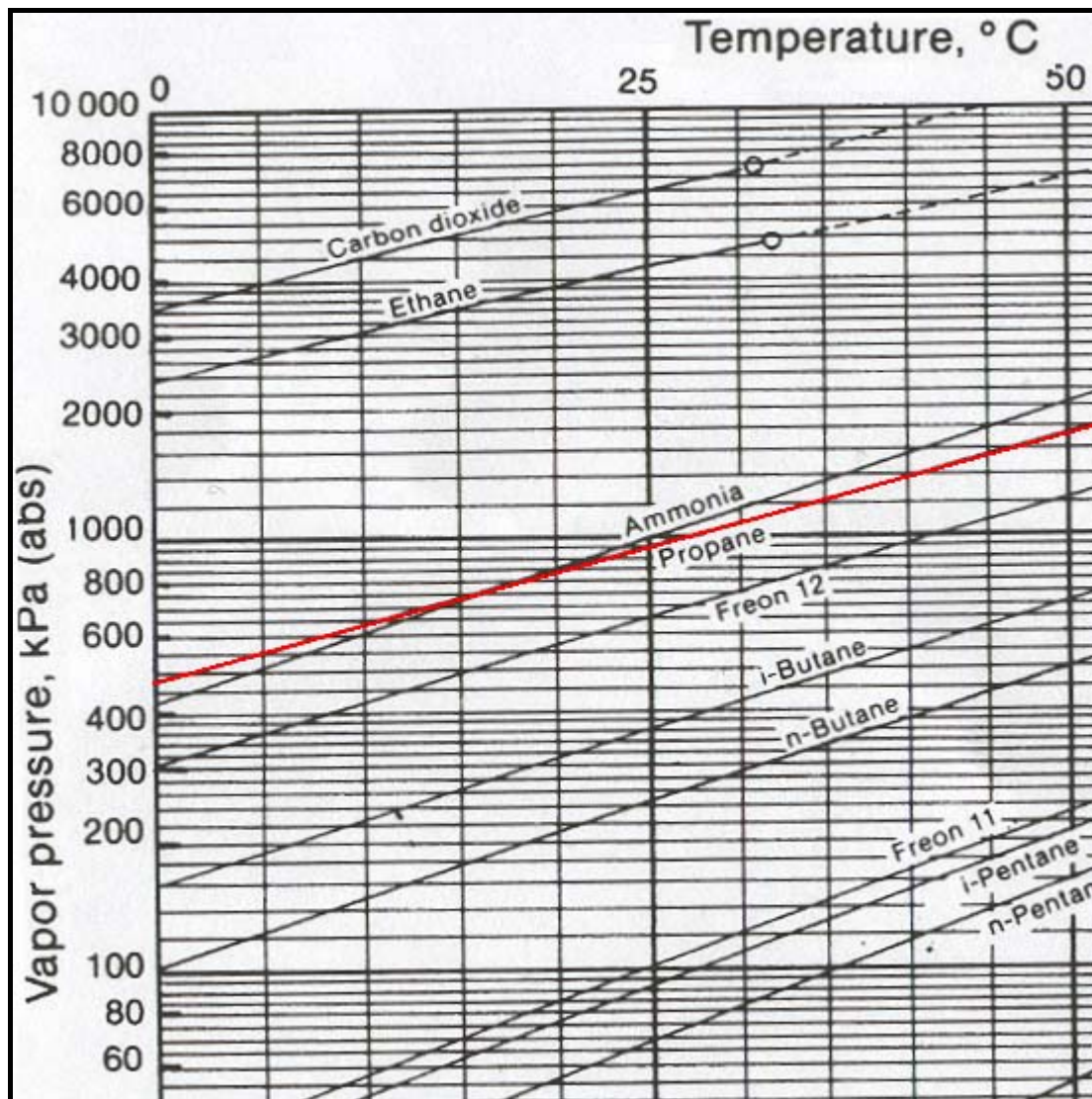
•• Laminær forbrenningshastighet er den laveste hastigheten en flamme kan bevege seg gjennom en gitt gassblanding ved gitt trykk og temperatur. All overføring av masse og varme skjer ved molekylær diffusjon [6].

Tabellverdien er oppgitt for en støkiometrisk propan/luft blanding ved 25°C og atmosfæretrykk, hentet fra fig. 3 i [6]

Figurene på de to neste sidene er utklipp fra damptrykk-diagrammer hentet fra Engineering Data Book, volume II, utgitt av Gas Processors Suppliers Association[5]. Diagrammene viser hvilke trykk som kan forventes å være i lagringstanken. Dette trykket vil være avhengig av temperaturen til propanen i tanken. Denne temperaturen er i neste rekke avhengig av omgivelsestemperaturen og stråling fra solen. Propantanken ved ResQ's øvingsfelt står ute i fri luft. Det kan derfor antas at propanens temperatur i tanken vil kunne variere fra ca. -5 °C i lengre kuldeperioder om vinteren til om lag 18 °C om sommeren. Trykket i lagringstanken vil av dette estimatet kunne variere fra ca. 4 – 8 bar absolutt trykk, jfr. figurer 1 og 2.



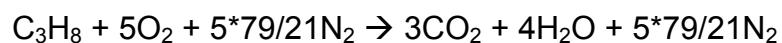
Figur 1 - Damptrykkdiagram; Lave temperaturer. Kurve for propan er markert med rødt.



Figur 2 - Damptrykkdiagram; Høye temperaturer. Kurve for propan er markert med rødt.

Forbrenning av propan i luft

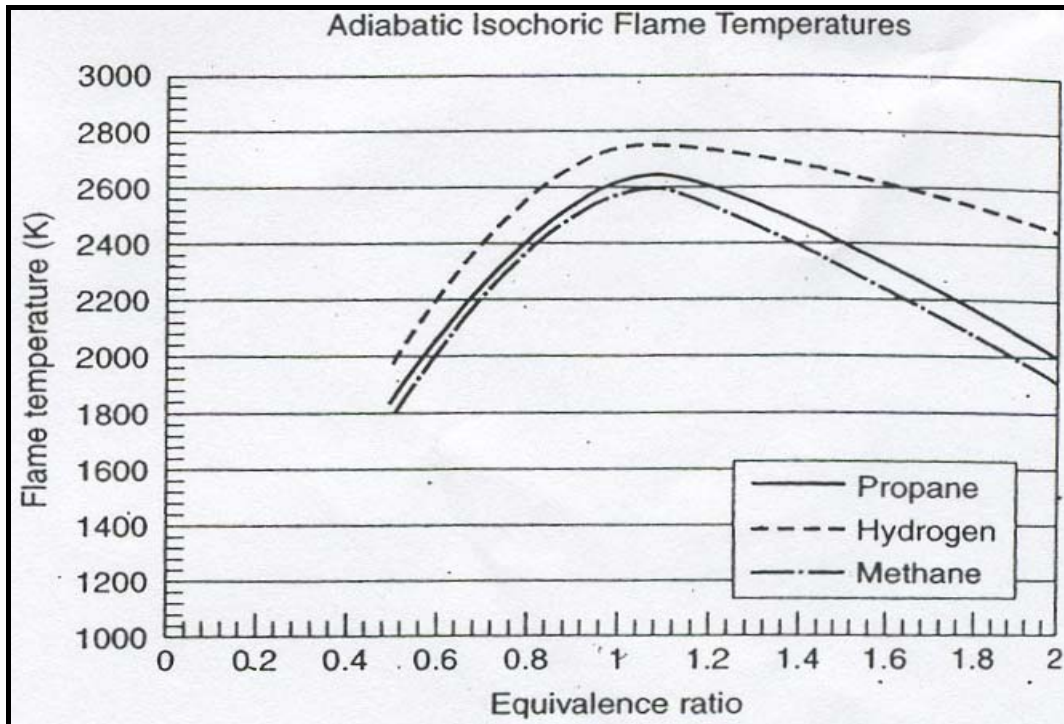
Reaksjonsligning for forbrenning av propan/luft ved støkiometri:



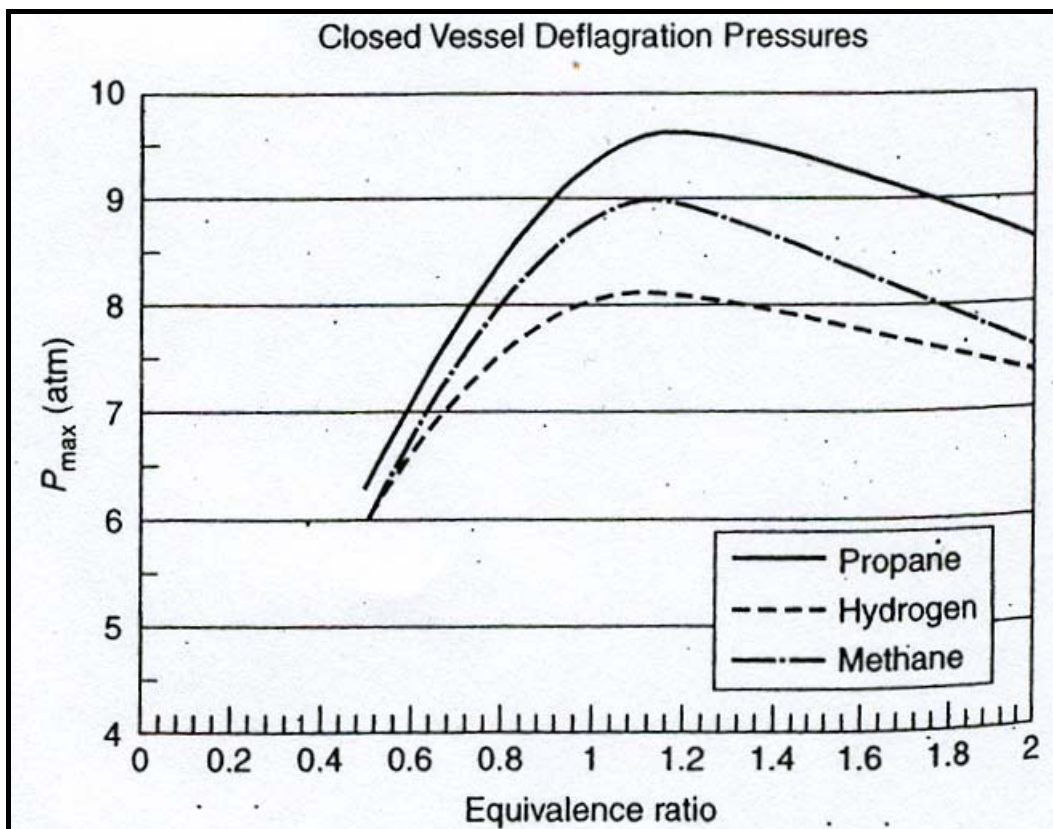
Vol% propan i støkiometrisk propan/luft blanding:

$$\begin{aligned} \text{Vol}\%_{\text{C}_3\text{H}_8} \approx \text{Mol}\% &= \frac{\text{Antall mol propan}}{\text{Totalt antall mol reaktanter}} \cdot 100\% \\ &= \frac{1}{1+5+5 \cdot \frac{79}{21}} \cdot 100\% = \underline{4,03\%} \approx 4\% \end{aligned}$$

I simuleringer som er gjort for støkiometrisk propan/luft blanding er verdien for Vol% propan satt til 4%




Figur 3 - Flammtemperatur, ved isokor og adiabatisk forbrenning, som funksjon av lufttall

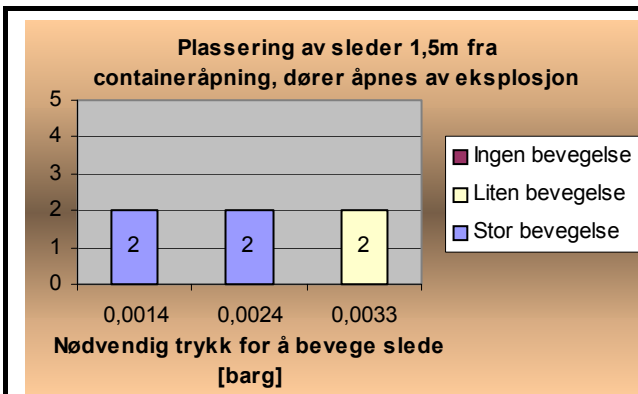


Figur 4 - Deflagrasjonstrykk i lukket beholder som funksjon av lufttall. Diagrammet baserer beregningene på adiabatisk flammtemperatur, en teoretisk temperatur som fremkommer ved beregninger der varmetap til omgivelser er neglisjert.

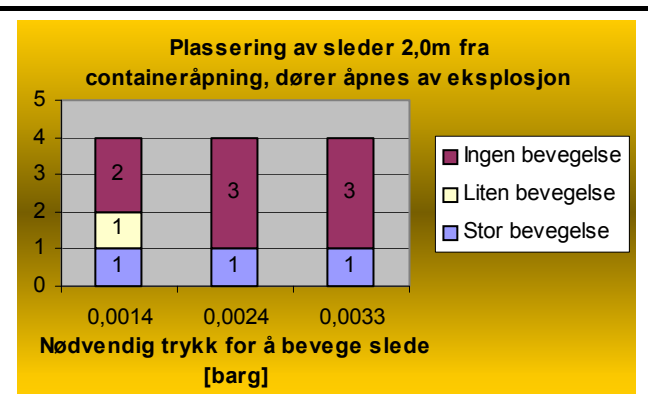
Vedlegg 5 – Forsøk i container

Tabell 3 - Forflytning av sleder ved eksplosjon

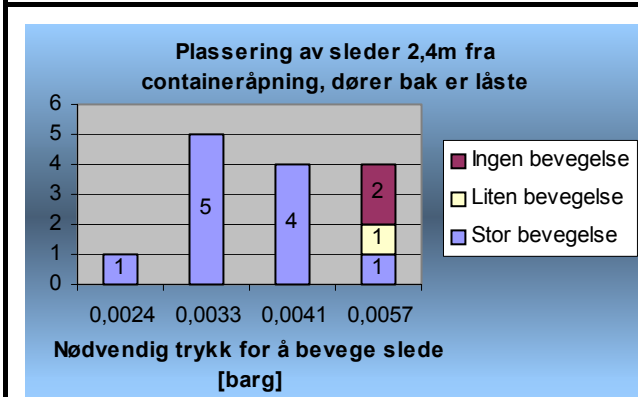
	Avstand fra container [m]	Nødvendig trykk for å bevege slede [barg]	Ant. ganger stor bevegelse	Ant. ganger liten bevegelse	Ant. ganger ingen bevegelse	Ant. forsøk
Dører bak åpnes av eksplosjon	1,5	0,0014	2	0	0	2
		0,0024	2	0	0	2
		0,0033	0	2	0	2
	2	0,0014	1	1	2	4
		0,0024	1	0	3	4
		0,0033	1	0	3	4
Dører bak låste under hele forløpe	2,4	0,0024	1	0	0	1
		0,0033	5	0	0	5
		0,0041	4	0	0	4
		0,0057	1	1	2	4
	3	0,0033	1	0	0	1
		0,0041	2	0	4	6
		0,0057	2	0	4	6
		0,0064	0	1	4	5



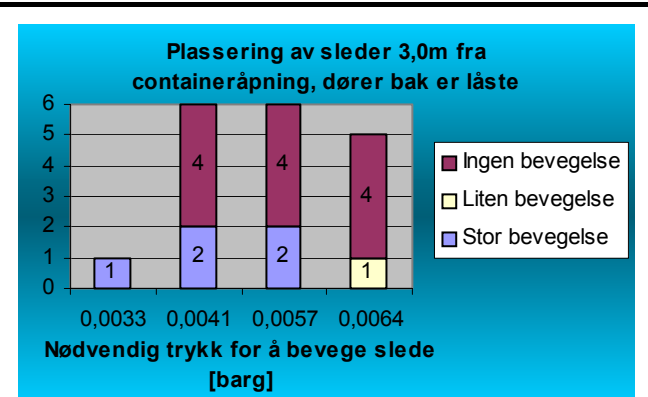
Figur 1 – Sleder beveger seg i hvert av tilfellene som medfører at de flyttes lenger vekk fra åpning



Figur 2 – Grensen for hvilken motstand trykket kan overvinne synes å nærme seg ved 0,0033barg



Figur 3 – Kun slede med størst motstand tenderer til å motstå bevegelse men tendensen vurderes som ikke klar nok. Sleder flyttes derfor til en ny avstand på 3,0m



Figur 4 – Indikerer at det maksimale trykket 3m fra åpningen kan ligge i et område rundt 0,0064barg

Tabell 4 – Resultat fra forsøk i container

	Forsøk nr.	Slede nr.	Statisk friksjonskraft [N]	Nødvendig trykk [barg]	Avstand til cont. [m]	Bevegelse: 0 < x ≤ 1cm X > 1cm	Antennelse etter [s]
Dører bak åpnes ved eksplosjon	1	Slede 1	117	0,0033	1,5	x	33
		Slede 2	88	0,0024		X	
		Slede 3	49	0,0014		X	
	2	Slede 1	117	0,0033	1,5	x	17
		Slede 2	88	0,0024		X	
		Slede 3	49	0,0014		X	
	3	Slede 1	117	0,0033	2,0	Ingen	20
		Slede 2	88	0,0024		Ingen	
		Slede 3	49	0,0014		x	
	4	Slede 1	117	0,0033	2,0	Ingen	17
		Slede 2	88	0,0024		Ingen	
		Slede 3	49	0,0014		Ingen	
	5	Slede 1	117	0,0033	2,0	Ingen	26
		Slede 2	88	0,0024		Ingen	
		Slede 3	49	0,0014		Ingen	
	6	Slede 1	117	0,0033	2,0	X	20
		Slede 2	88	0,0024		X	
		Slede 3	49	0,0014		X	
Dører bak låst	7	Slede 1	117	0,0033	2,4	X	20
		Slede 2	88	0,0024		X	
		Slede 3	147	0,0041		X	
	8	Slede 1	117	0,0033	2,4	X	28
		Slede 2	206	0,0057		x	
		Slede 3	147	0,0041		X	
	9	Slede 1	117	0,0033	2,4	X	22
		Slede 2	206	0,0057		Ingen	
		Slede 3	147	0,0041		X	
	10	Slede 1	117	0,0033	2,4	X	24
		Slede 2	206	0,0057		Ingen	
		Slede 3	147	0,0041		Ingen	
	11	Slede 1	117	0,0033	2,4	X	18
		Slede 2	206	0,0057		X	
		Slede 3	147	0,0041		X	
	12	Slede 1	117	0,0033	3,0	X	20
		Slede 2	206	0,0057		X	
		Slede 3	147	0,0041		X	
	13	Slede 1	231	0,0064	3,0	Ingen	23
		Slede 2	206	0,0057		Ingen	
		Slede 3	147	0,0041		Ingen	
14	Slede 1	231	0,0064	3,0	x	25	
	Slede 2	206	0,0057		X		
	Slede 3	147	0,0041		X		
15	Slede 1	231	0,0064	3,0	Ingen	20	
	Slede 2	206	0,0057		Ingen		
	Slede 3	147	0,0041		Ingen		
16	Slede 1	231	0,0064	3,0	Ingen	20	
	Slede 2	206	0,0057		Ingen		
	Slede 3	147	0,0041		Ingen		
17	Slede 1	231	0,0064	3,0	Ingen	20	
	Slede 2	206	0,0057		Ingen		
	Slede 3	147	0,0041		Ingen		

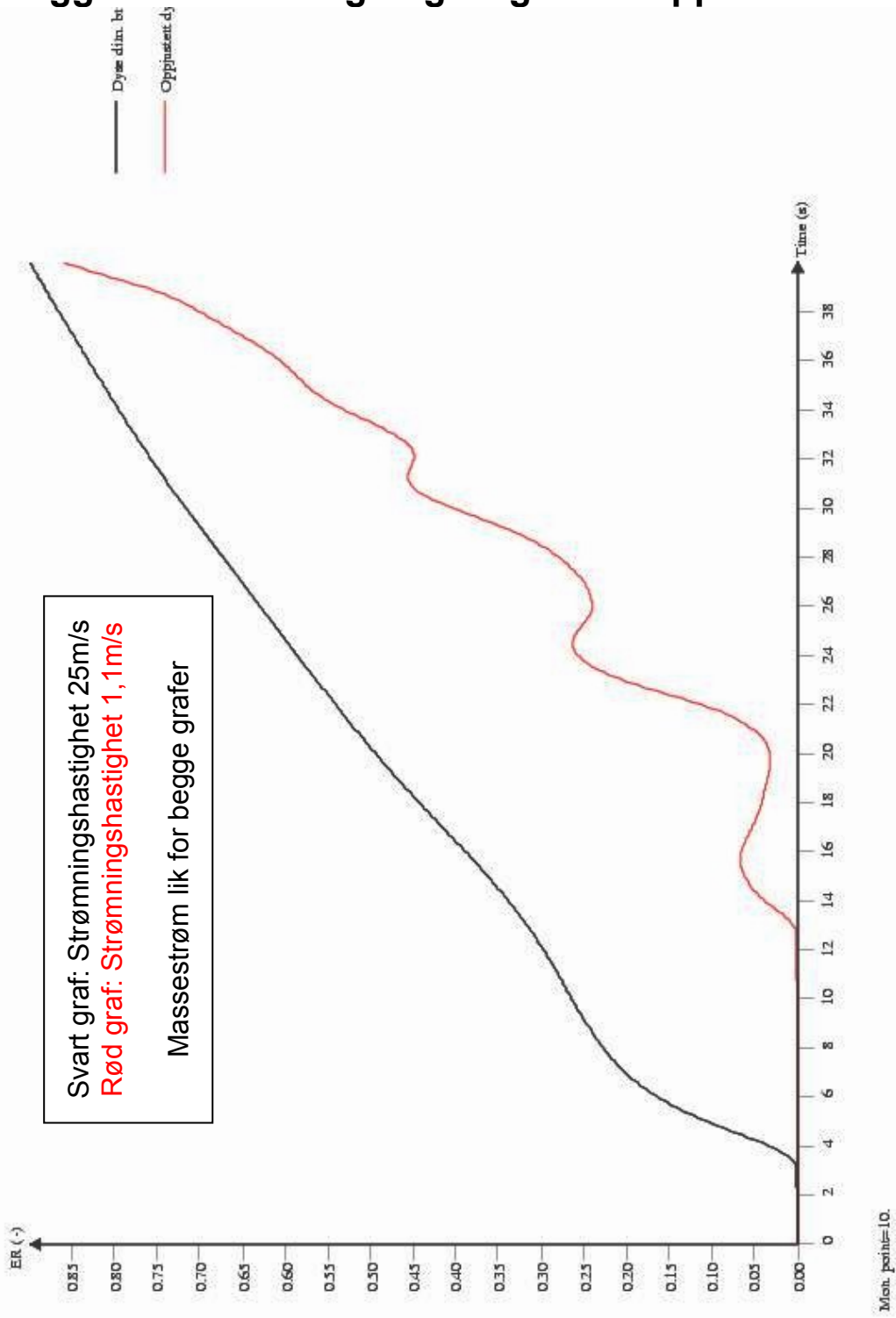
Tabell 5 - Median og gjennomsnitt for tid til antennelse

Tid til antennelse		
Median for tid til antennelse, [s]	20	Forsøk 1-6, dører åpnes
Gjennomsnittstid til antennelse, [s]	22,2	
Median for tid til antennelse, [s]	20	Forsøk 7-17, dører låst
Gjennomsnittstid til antennelse, [s]	21,8	
Median for tid til antennelse, alle forsøk [s]	20	Alle forsøk
Gjennomsnittstid til antennelse, alle forsøk [s]	21,9	

Vær under forsøk

Den dagen forsøkene ble gjennomført var vindhastigheten på om lag 6m/s med retning normalt på en av containerens langsider.

Vedlegg 6 – Sammenligning av gassutslipp

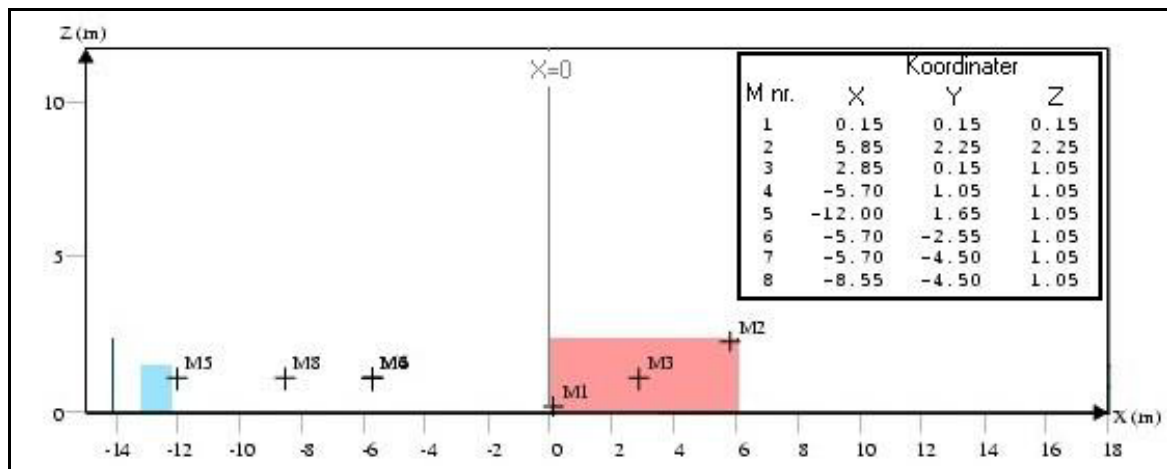


Vedlegg 7 – Simuleringer av andre scenarier

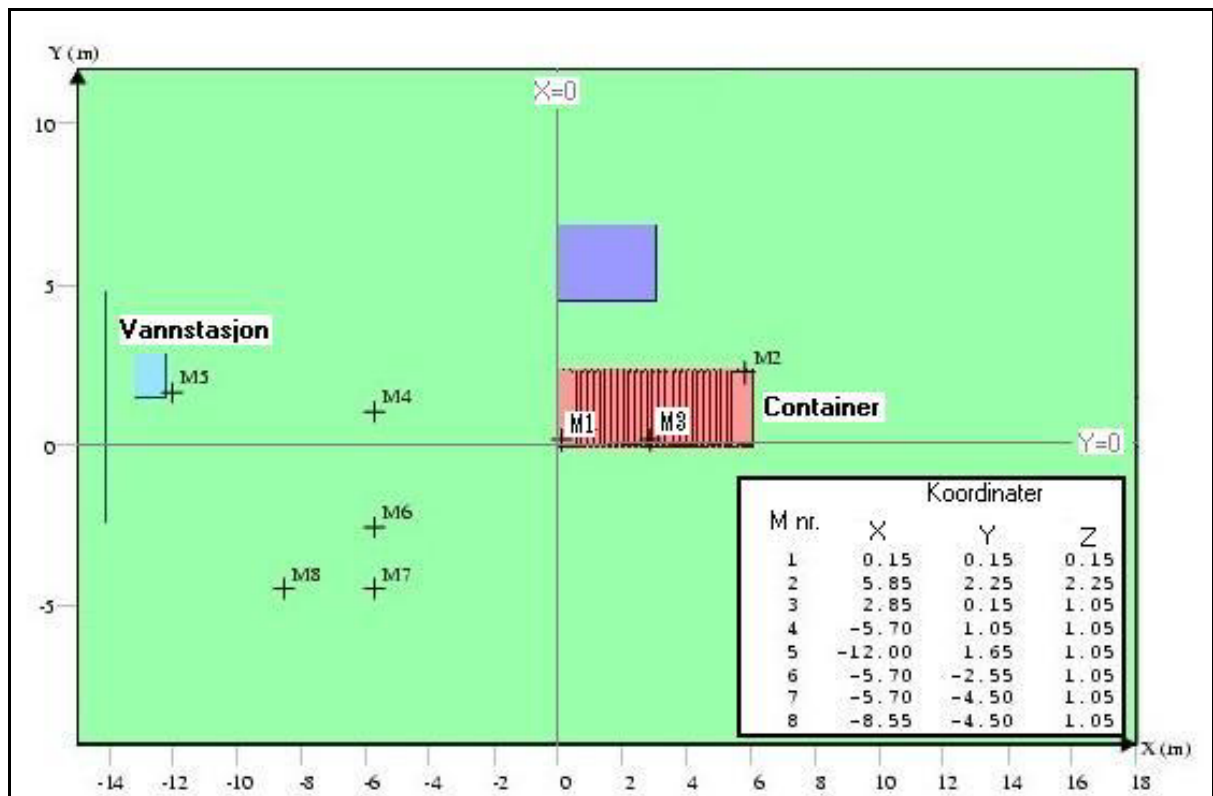
Tabell 6 – Forklaring av tabelltekst ved grafene

Simulering nr.	Nummeret simuleringen har i FLACS
Propan/luft blanding; % av containers totalvolum	Den prosentandel propan/luft blandingen utgjør av containerens totalvolum
Plassering til tennkilde	Koordinatene til tennkilden; X, Y, og Z retning i meter
Åpningsarea	Den prosentandelen av containerens kortsida som er åpen
Størrelse til tennkilde	Hvis tennkilde ikke er et punkt så vil den ha den dimensjonen som her er oppgitt i meter, ellers punkt
Obstruksjoner	Gjenstander som er plassert inne i containeren (sylindrer eller bokser) (*)
Innvendige flater	Veggenes utseende; Vanlig = Bølgete form som i virkeligheten Glatt = Helt glatte vegger

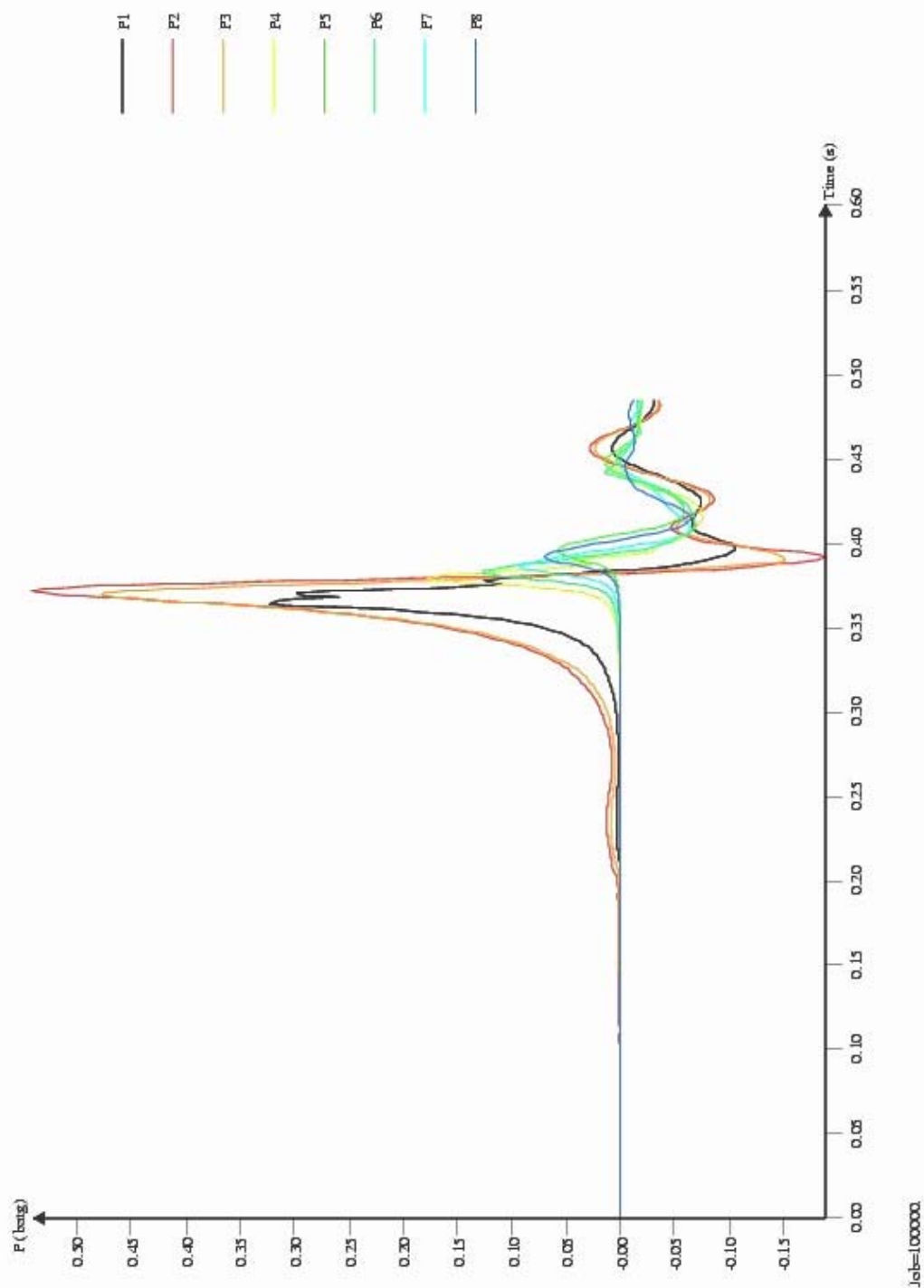
(*) Obstruksjonene består av 3 sylindrer, 2 plater og 2 bokser. Alle er plassert inne i containeren



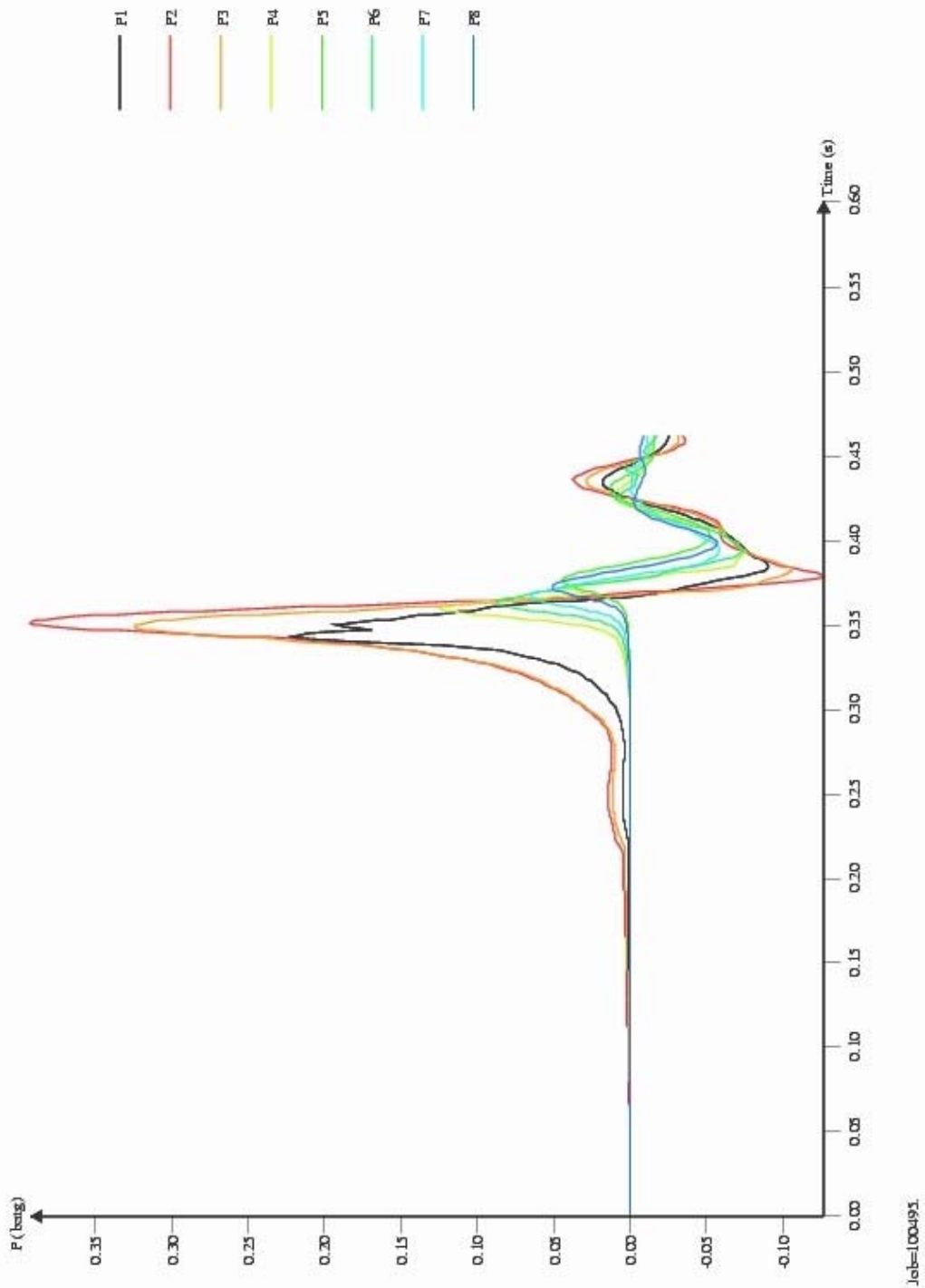
Figur 3 - Punktene plassering i simuleringer av andre scenarier, X-Z retning.



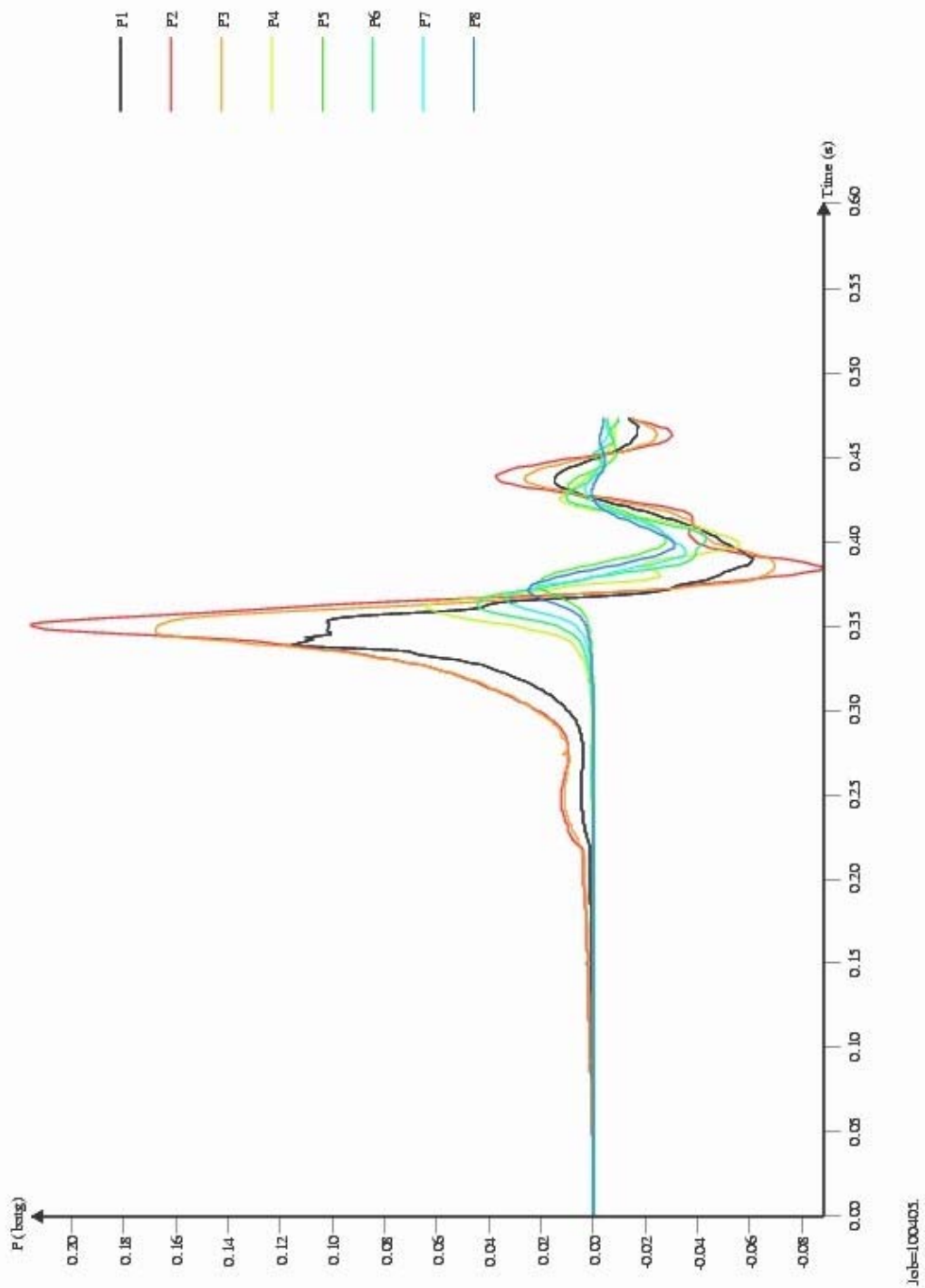
Figur 4 - Punktene plassering i simuleringer av andre scenarier, X-Y retning. M = Monitorpoint = P i grafer



Simulering nr.	Propan/luft blanding; % av containers totalvolum	Plassering til tennkilde	Apningsareal	Størrelse til tennkilde	Obstruksjoner	Innvendige flater
100000	100%	5.85,1.05, 1.05	100%	Punkt	Ingen	Vanlig

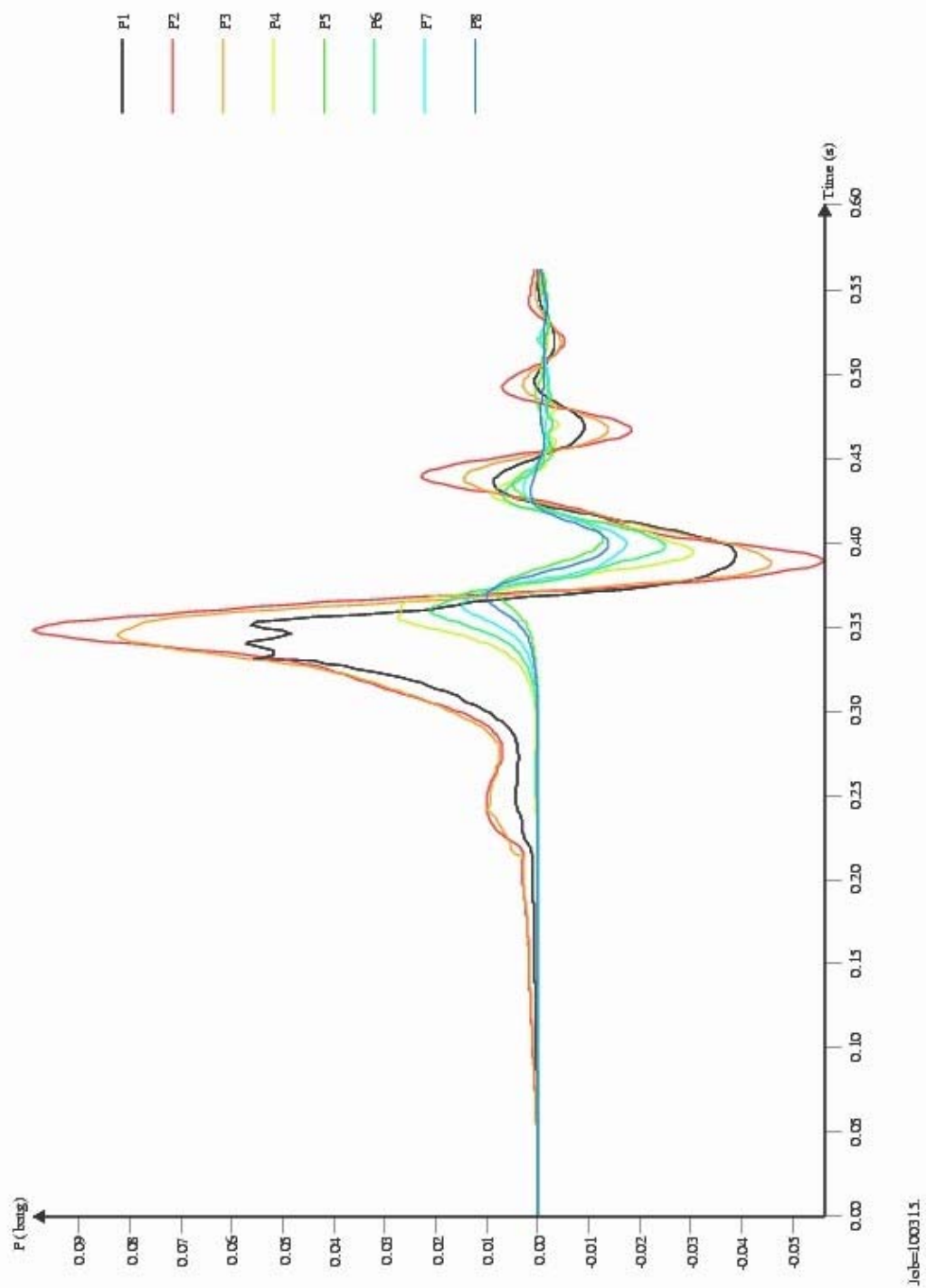


Simulering nr.	Propan/luft blanding; % av containers totalvolum	Plassering til tennkilde	Apningsareal	Størrelse til tennkilde	Obstruksjoner	Innvendige flater
100495	100%	4.95,1.05, 1.05	100%	Punkt	Ingen	Vanlig

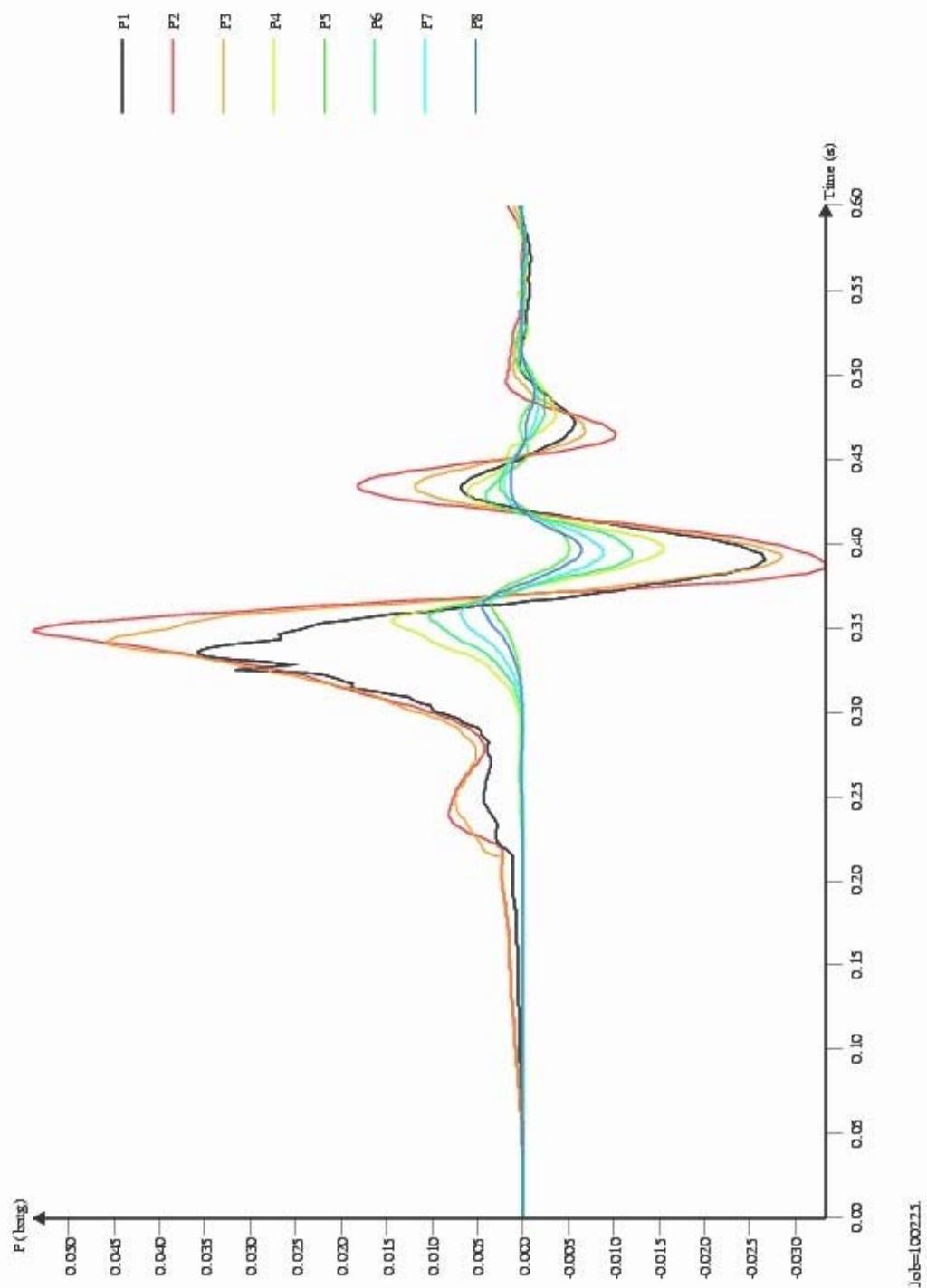


Jobb=100405

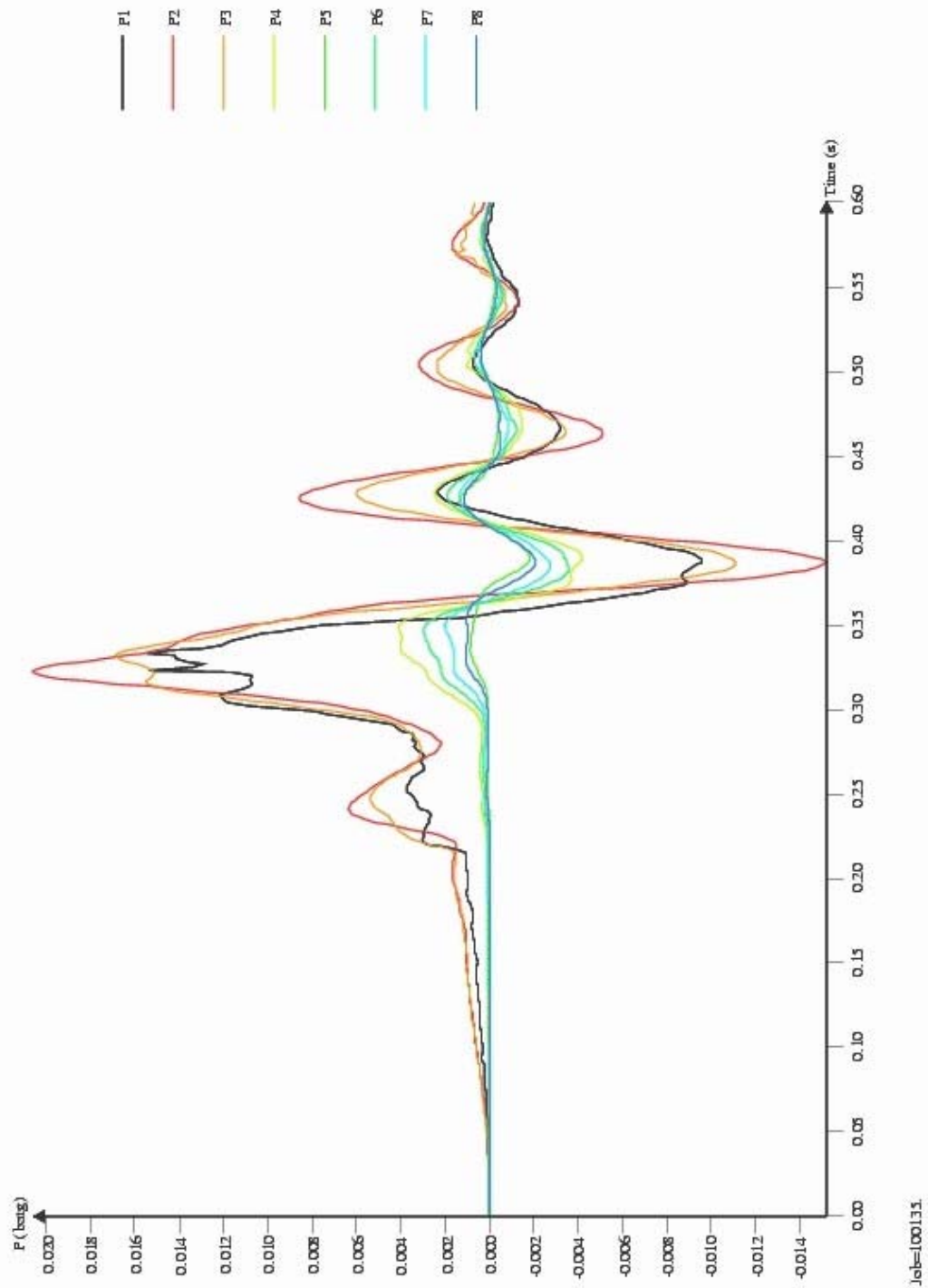
Simulering nr.	Propan/luft blanding; % av containers totalvolum	Plassering til tennkilde	Apningsareal	Størrelse til tennkilde	Obstruksjoner	Innvendige flater
100405	100%	4.05,1.05, 1.05	100%	Punkt	Ingen	Vanlig



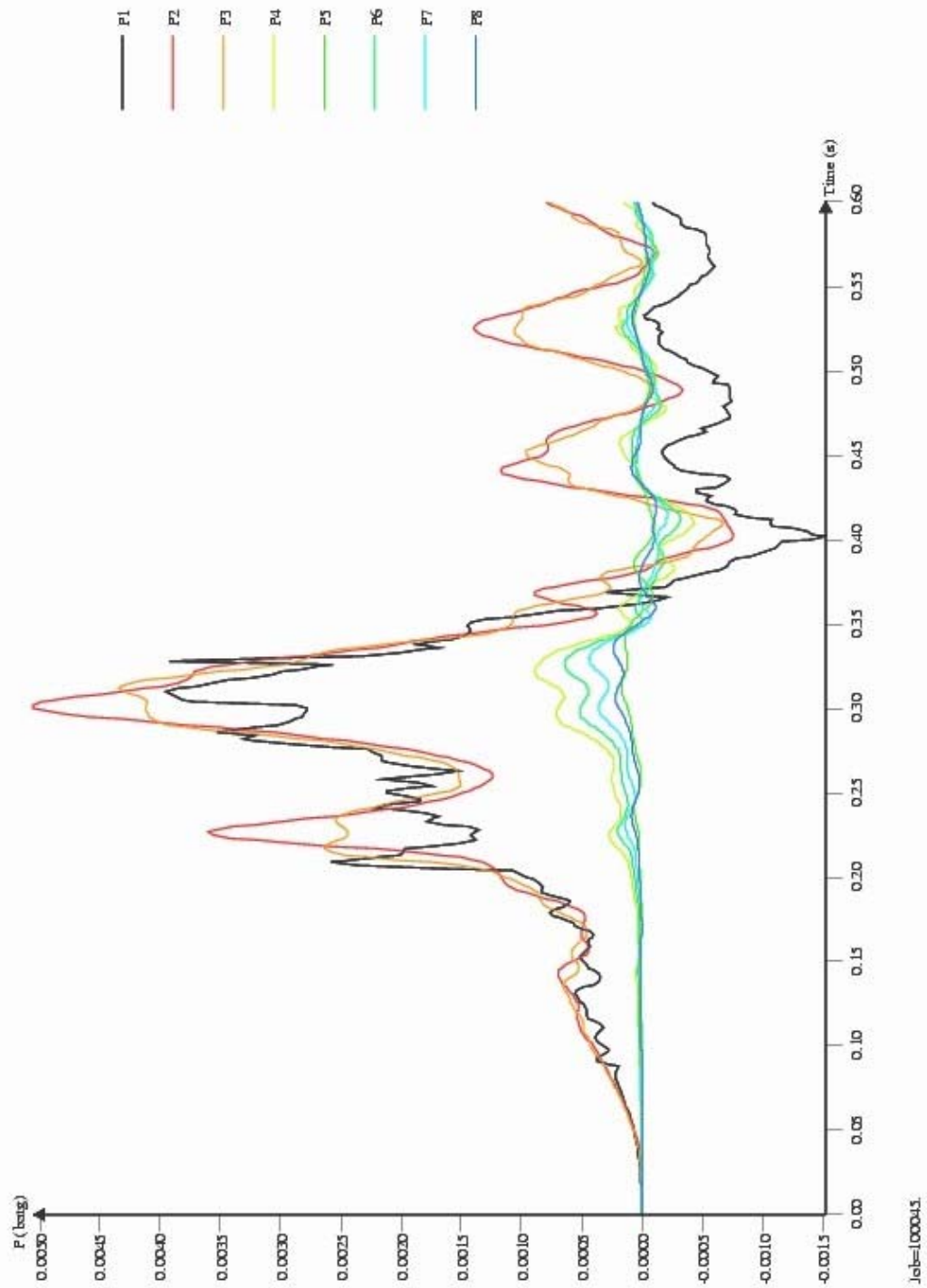
Simulering nr.	Propan/luft blanding; % av containers totalvolum	Plassering til tennkilde	Apningsareal	Størrelse til tennkilde	Obstruksjoner	Innvendige flater
100315	100%	3.15,1.05, 1.05	100%	Punkt	Ingen	Vanlig



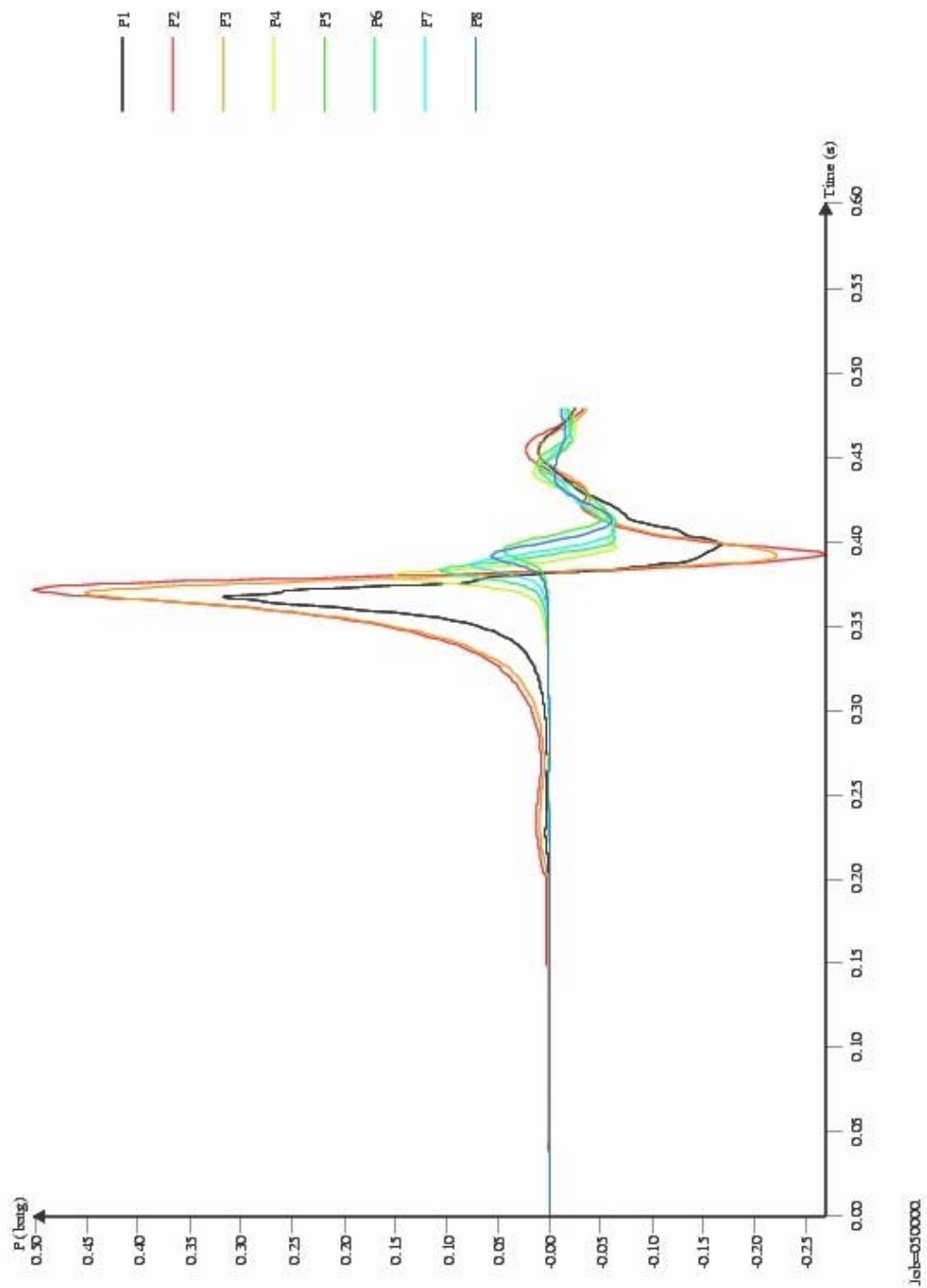
Simulering nr.	Propan/luft blanding; % av containers totalvolum	Plassering til tennkilde	Apningsareal	Størrelse til tennkilde	Obstruksjoner	Innvendige flater
100225	100%	2.25,1.05, 1.05	100%	Punkt	Ingen	Vanlig



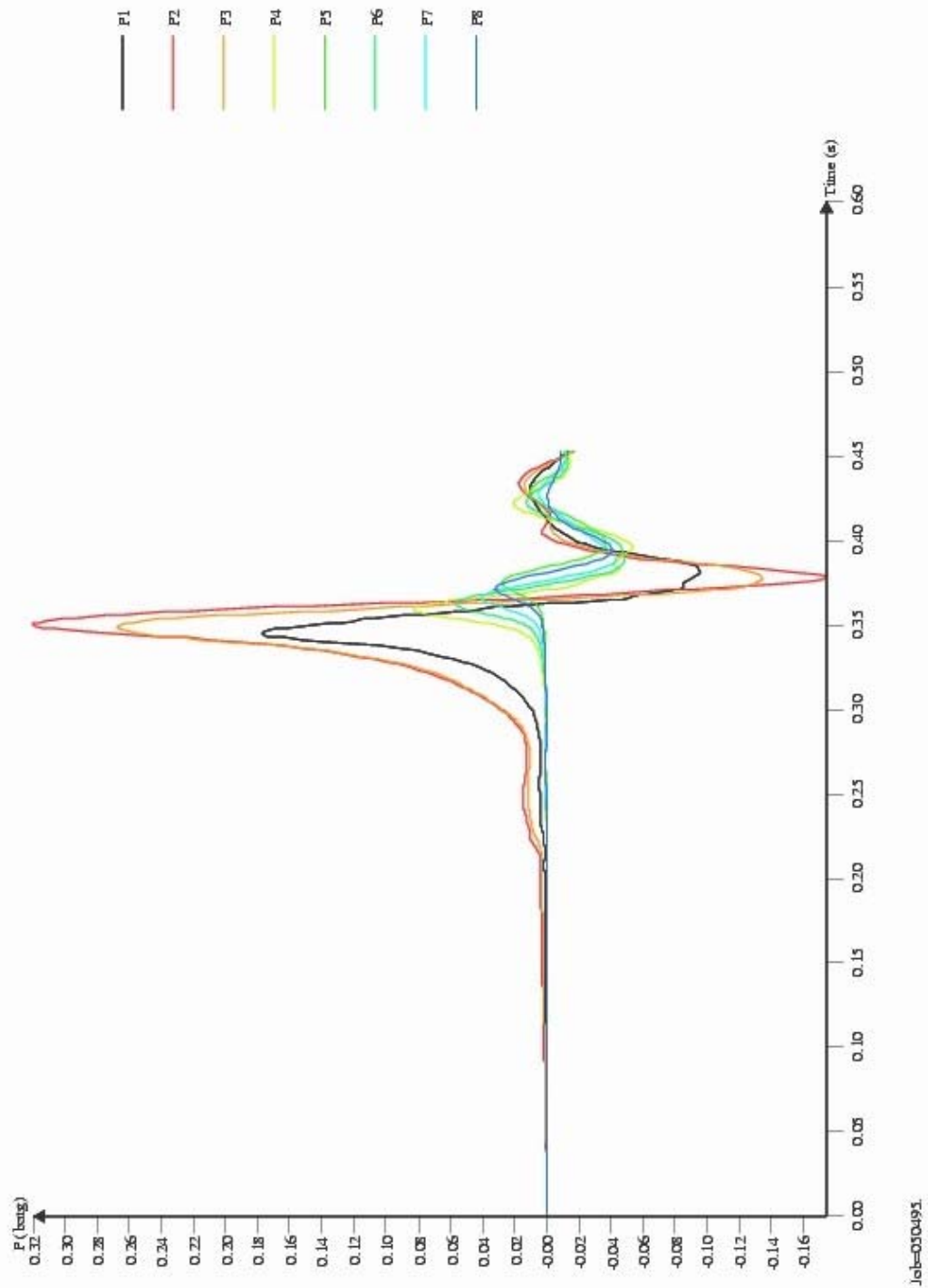
Simulering nr.	Propan/luft blanding; % av containers totalvolum	Plassering til tennkilde	Apningsareal	Størrelse til tennkilde	Obstruksjoner	Innvendige flater
100135	100%	1.35,1.05, 1.05	100%	Punkt	Ingen	Vanlig



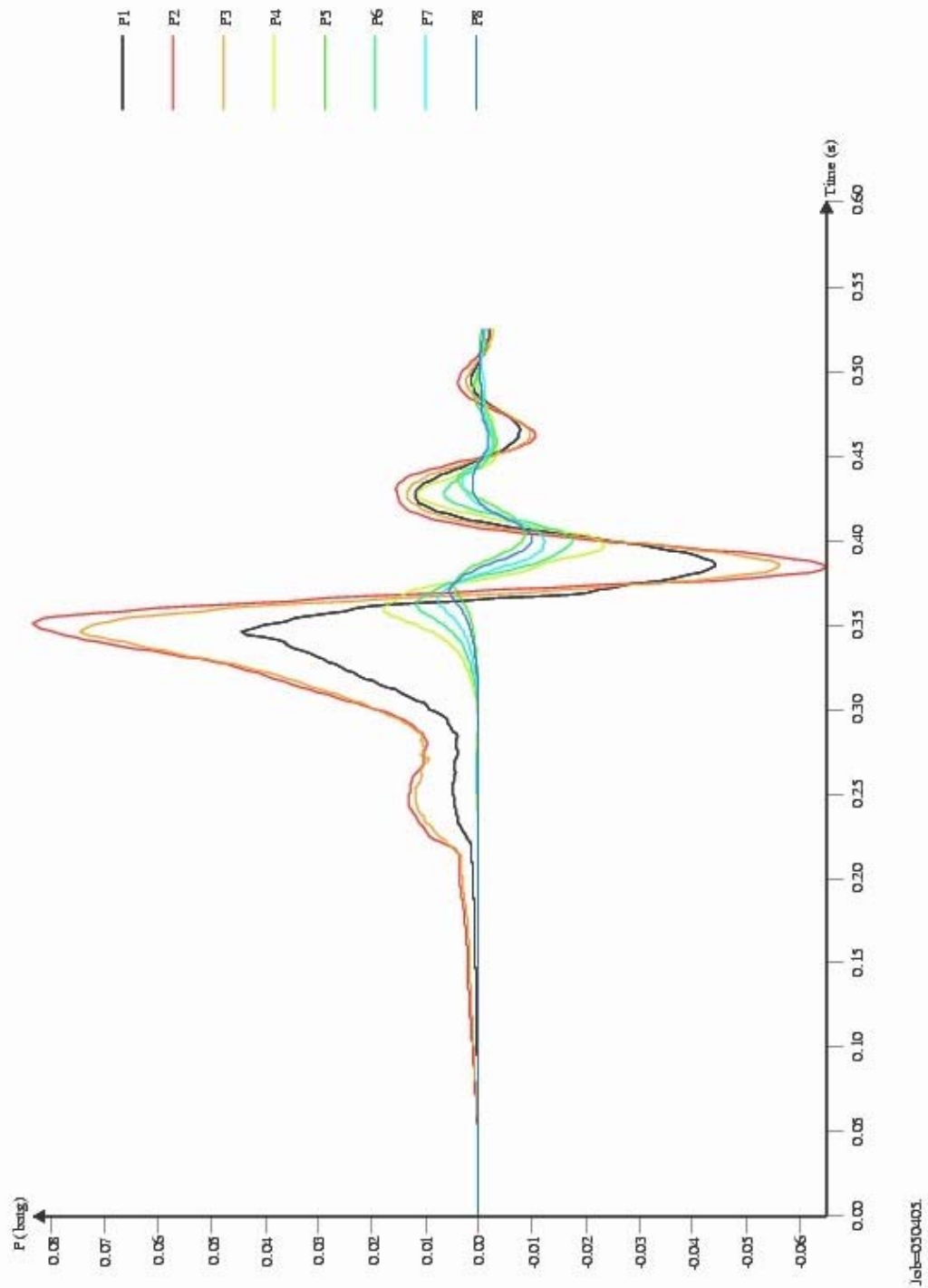
Simulering nr.	Propan/luft blanding; % av containers totalvolum	Plassering til tennkilde	Apningsareal	Størrelse til tennkilde	Obstruksjoner	Innvendige flater
100045	100%	0.45, 1.05, 1.05	100%	Punkt	Ingen	Vanlig



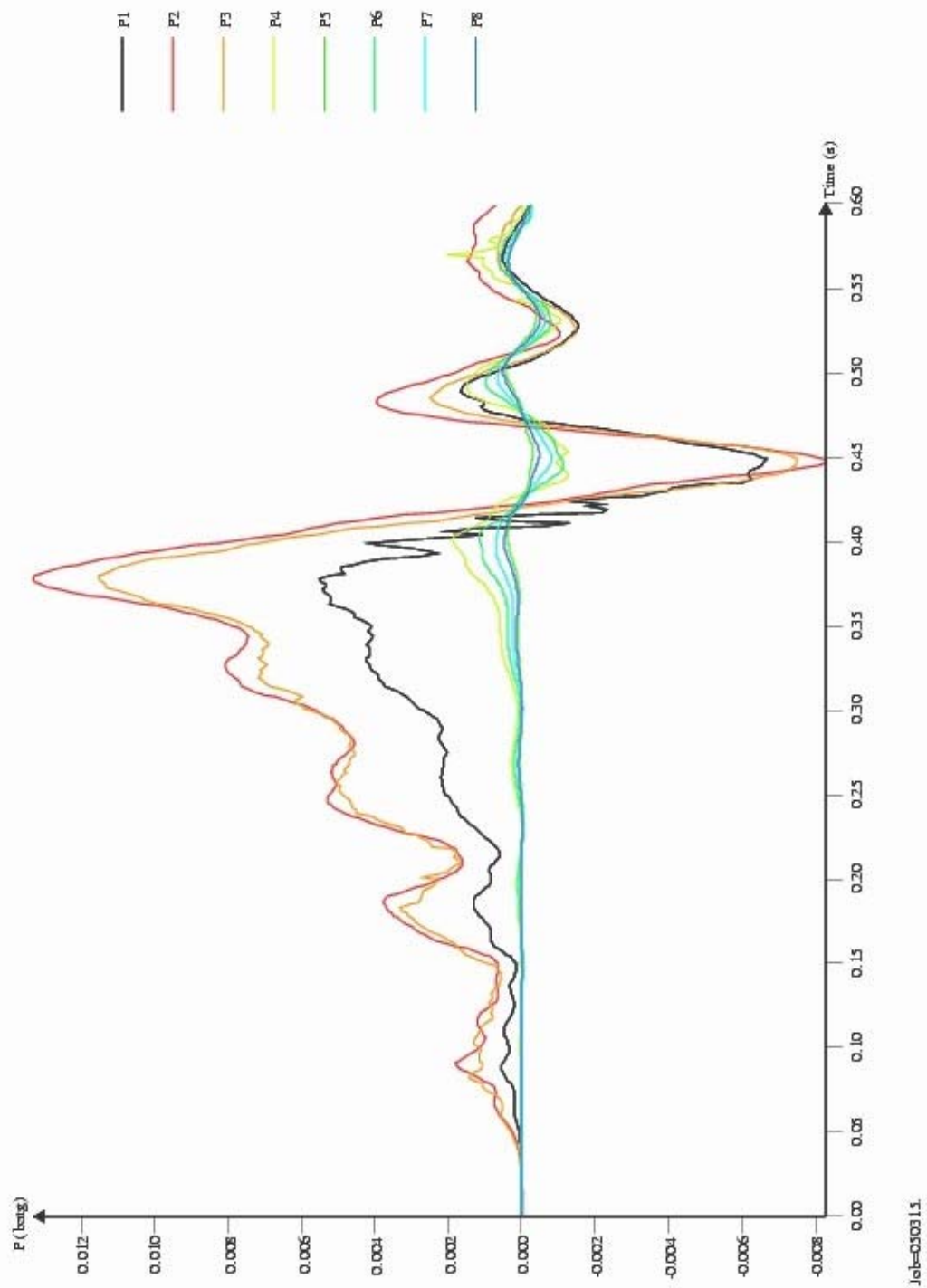
Simulering nr.	Propan/luft blanding; % av containers totalvolum	Plassering til tennkilde	Apningsareal	Størrelse til tennkilde	Obstruksjoner	Innvendige flater
050000	50%	5.85,1.05, 1.05	100%	Punkt	Ingen	Vanlig



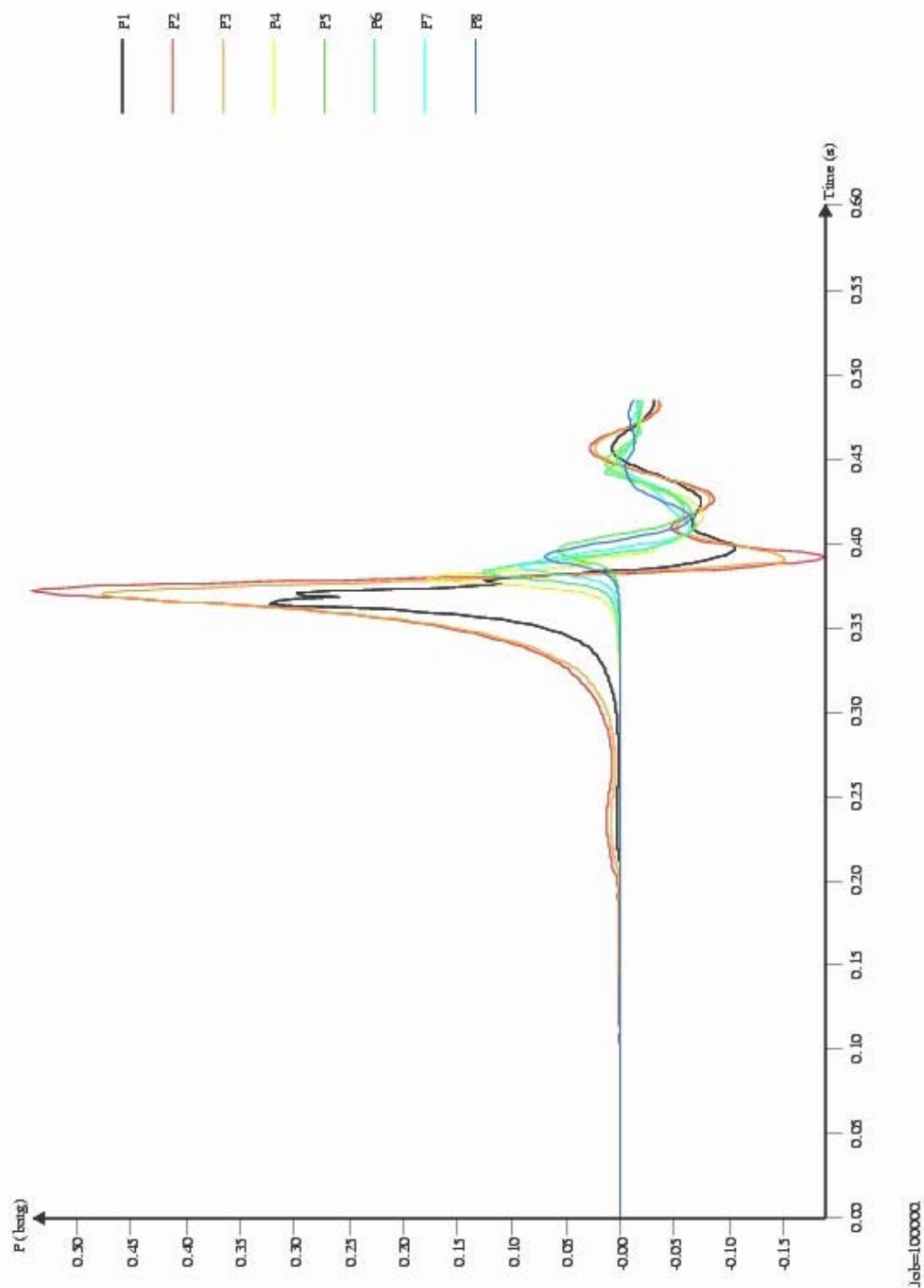
Simulering nr.	Propan/luft blanding; % av containers totalvolum	Plassering til tennkilde	Apningsareal	Størrelse til tennkilde	Obstruksjoner	Innvendige flater
050495	50%	4.95,1.05, 1.05	100%	Punkt	Ingen	Vanlig



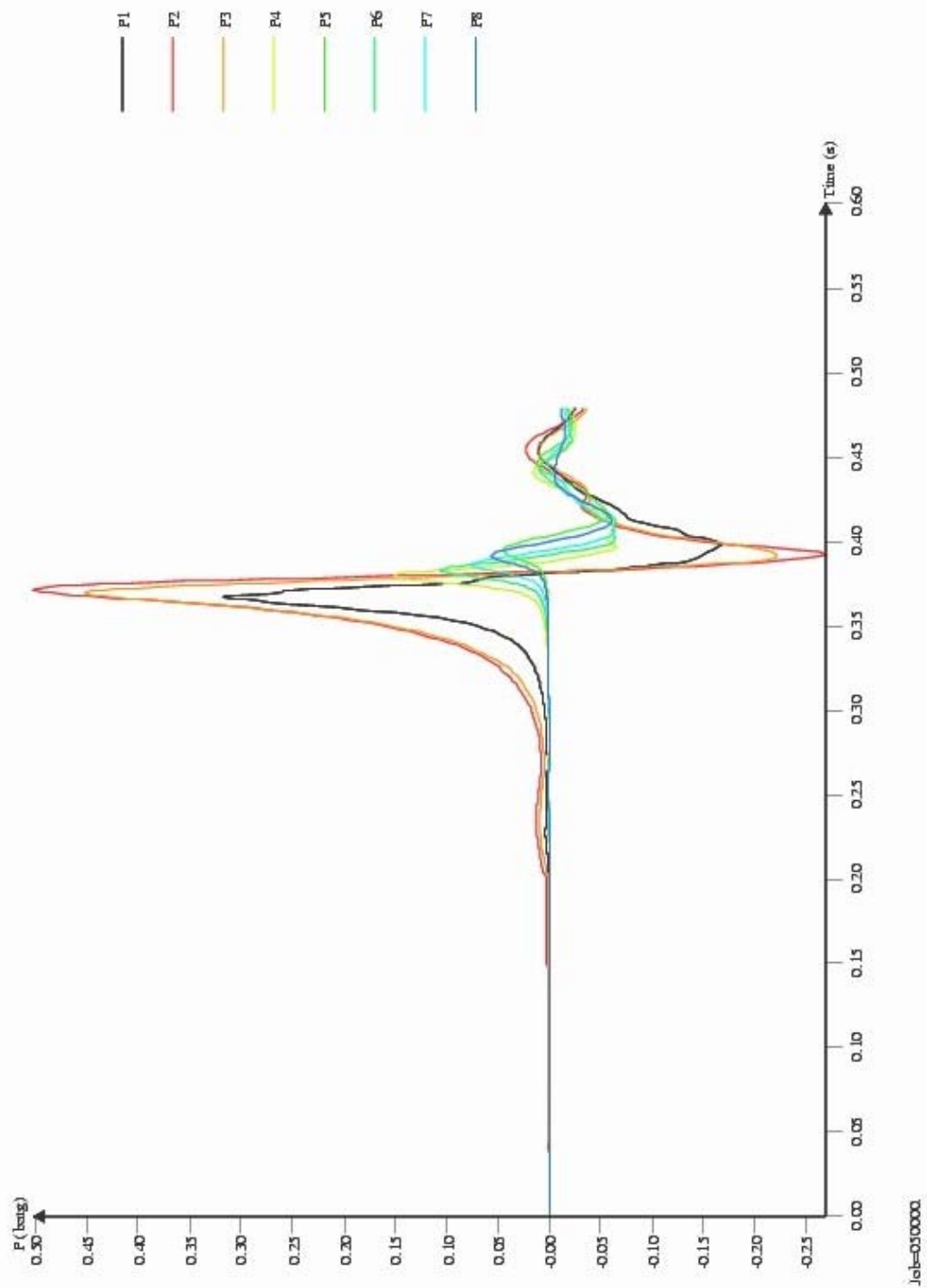
Simulering nr.	Propan/luft blanding; % av containers totalvolum	Plassering til tennkilde	Apningsareal	Størrelse til tennkilde	Obstruksjoner	Innvendige flater
050405	50%	4.05,1.05, 1.05	100%	Punkt	Ingen	Vanlig



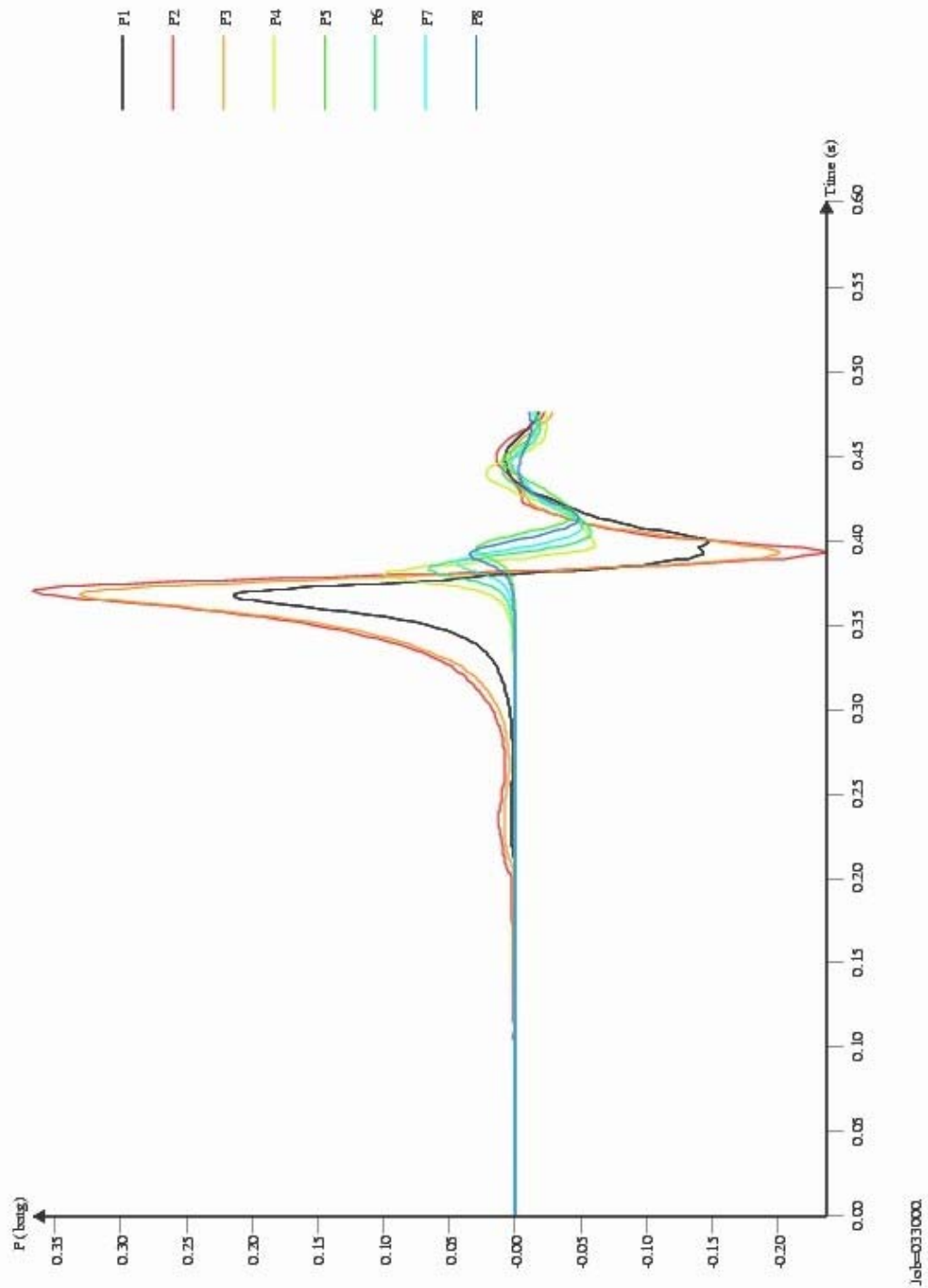
Simulering nr.	Propan/luft blanding; % av containers totalvolum	Plassering til tennkilde	Apningsareal	Størrelse til tennkilde	Obstruksjoner	Innvendige flater
050315	50%	3.15,1.05, 1.05	100%	Punkt	Ingen	Vanlig



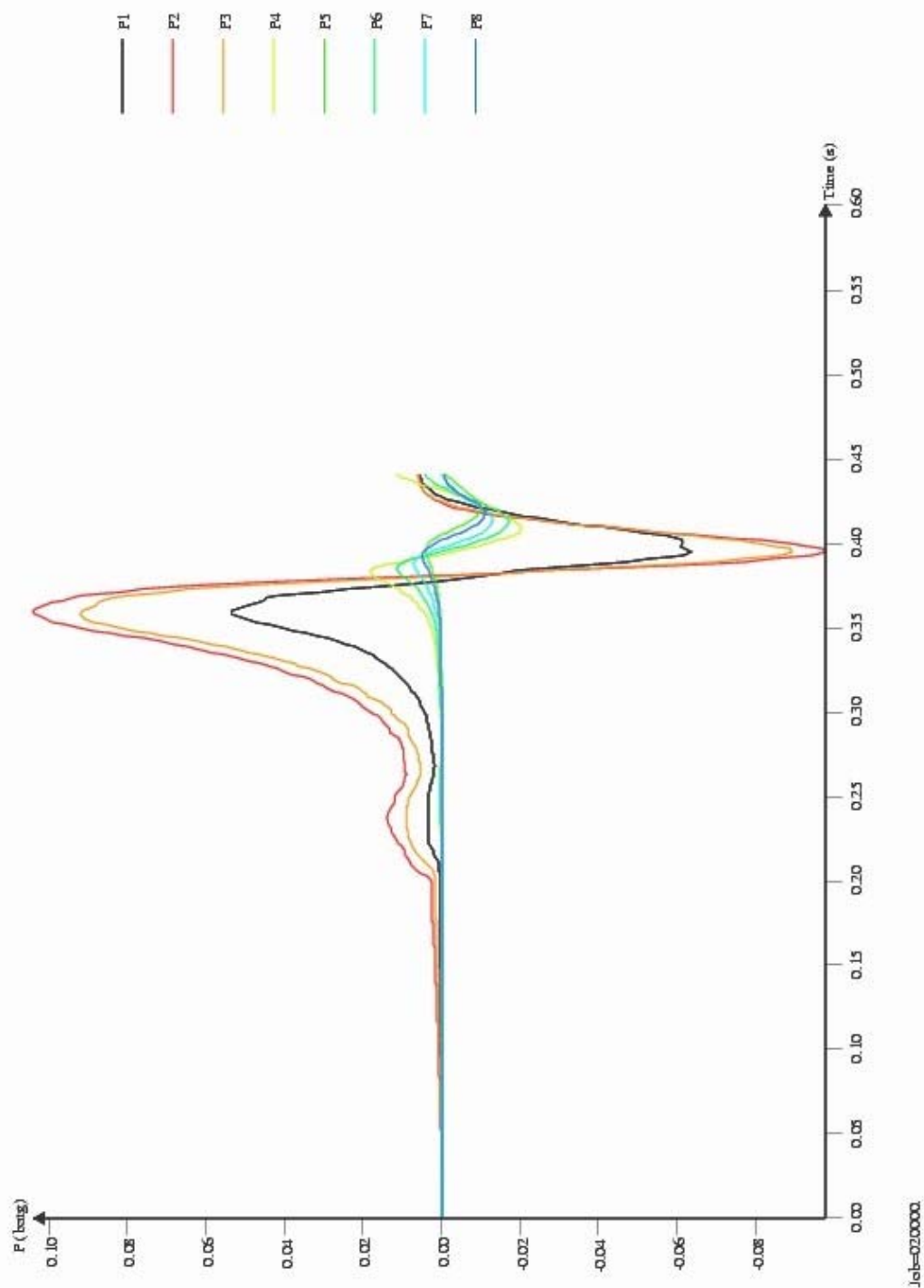
Simulering nr.	Propan/luft blanding; % av containers totalvolum	Plassering til tennkilde	Apningsareal	Størrelse til tennkilde	Obstruksjoner	Innvendige flater
100000	100%	5.85,1.05, 1.05	100%	Punkt	Ingen	Vanlig



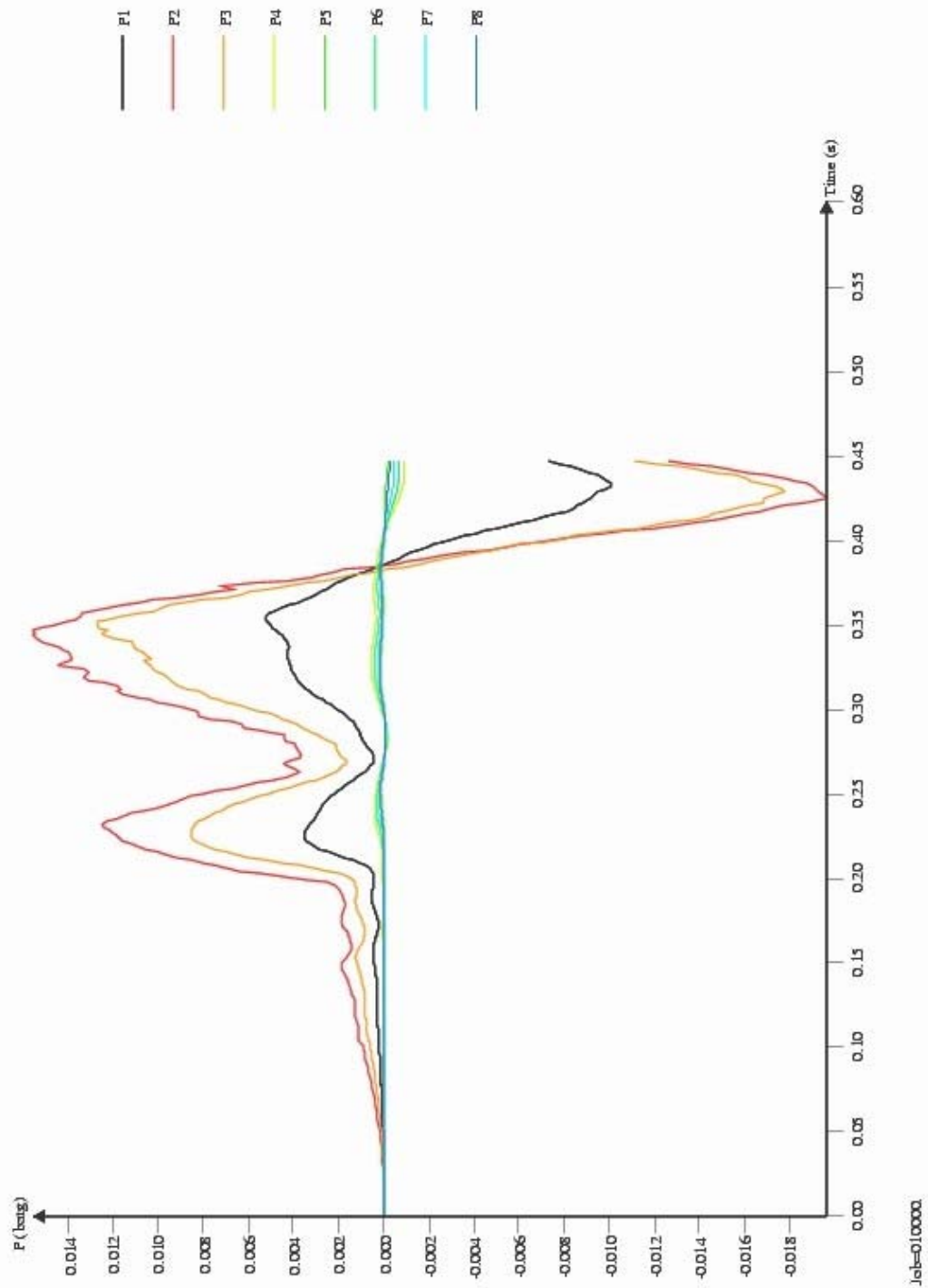
Simulering nr.	Propan/luft blanding; % av containers totalvolum	Plassering til tennkilde	Apningsareal	Størrelse til tennkilde	Obstruksjoner	Innvendige flater
050000	50%	5.85,1.05, 1.05	100%	Punkt	Ingen	Vanlig



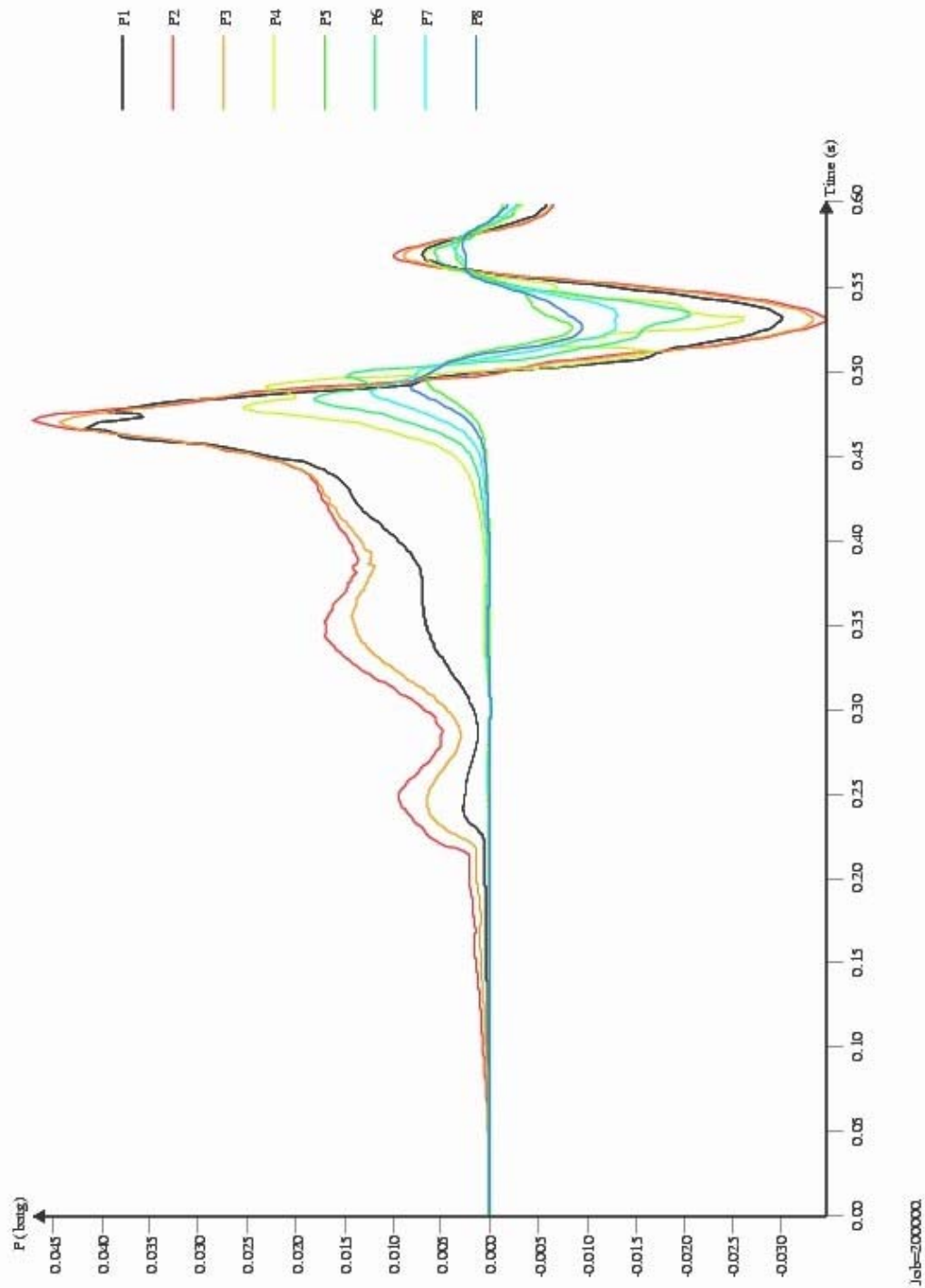
Simulering nr.	Propan/luft blanding; % av containers totalvolum	Plassering til tennkilde	Apningsareal	Størrelse til tennkilde	Obstruksjoner	Innvendige flater
033000	33%	5.85,1.05, 1.05	100%	Punkt	Ingen	Vanlig



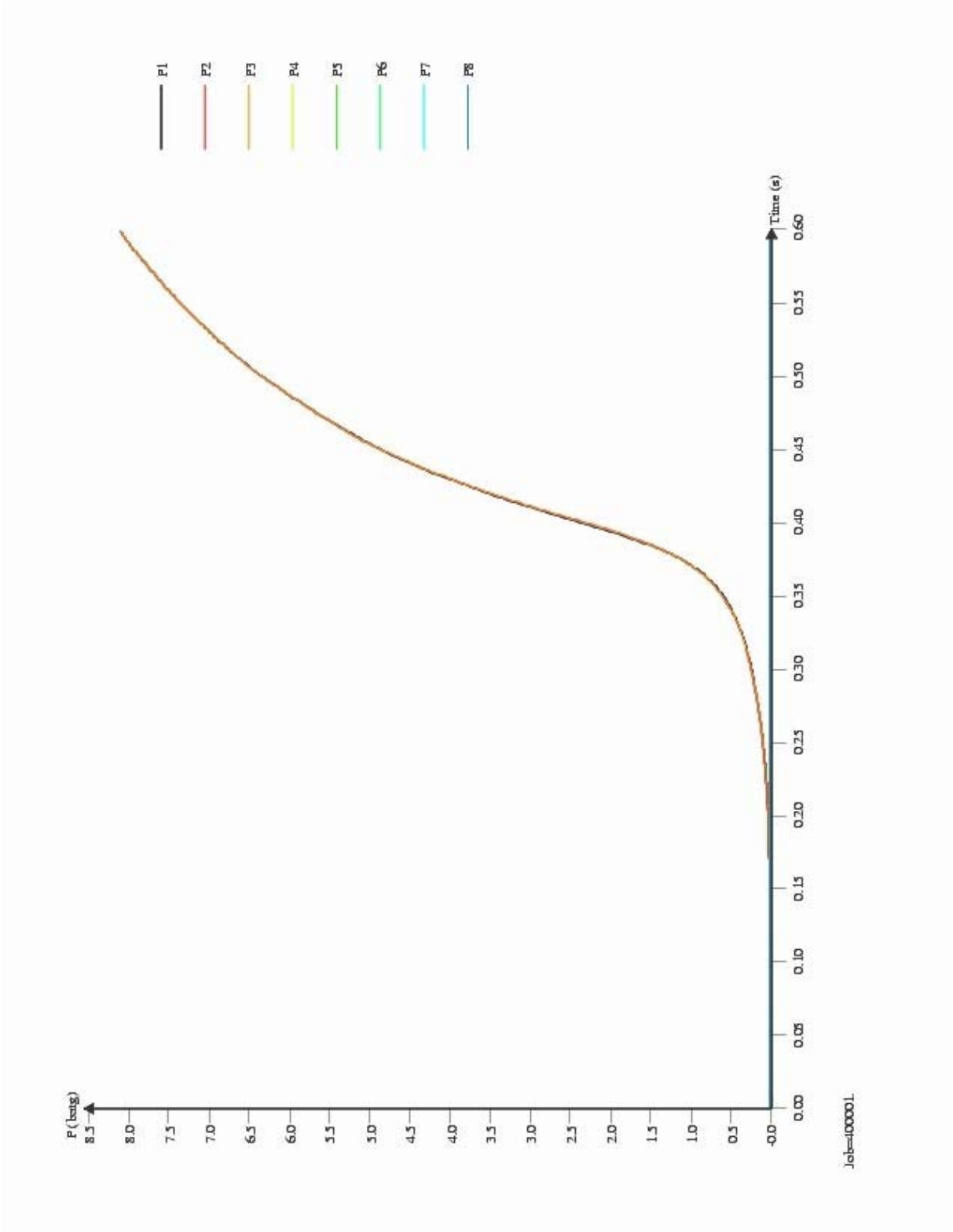
Simulering nr.	Propan/luft blanding; % av containers totalvolum	Plassering til tennkilde	Apningsareal	Størrelse til tennkilde	Obstruksjoner	Innvendige flater
020000	20%	5.85,1.05, 1.05	100%	Punkt	Ingen	Vanlig



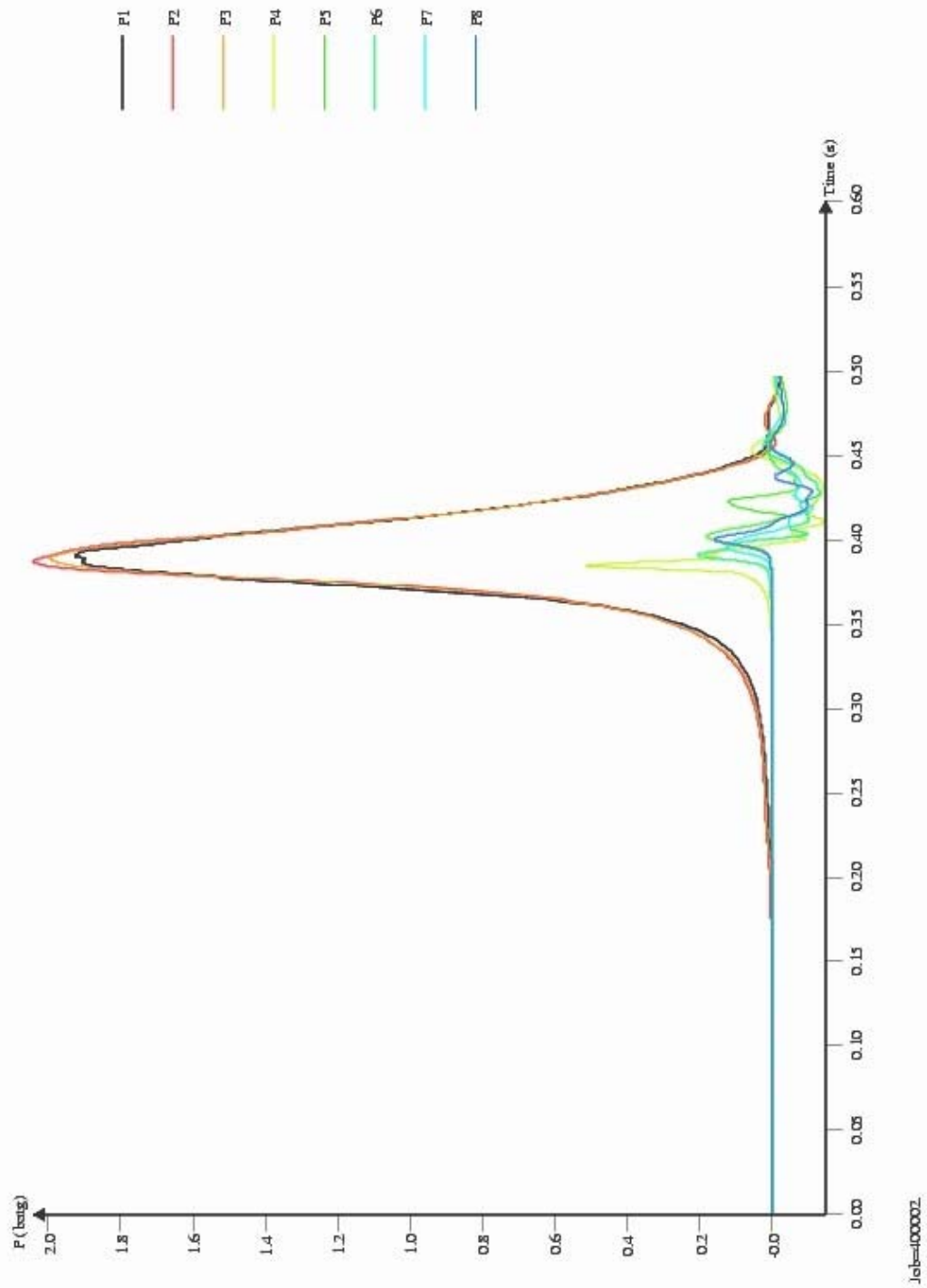
Simulering nr.	Propan/luft blanding; % av containers totalvolum	Plassering til tennkilde	Apningsareal	Størrelse til tennkilde	Obstruksjoner	Innvendige flater
010000	10%	5.85,1.05, 1.05	100%	Punkt	Ingen	Vanlig



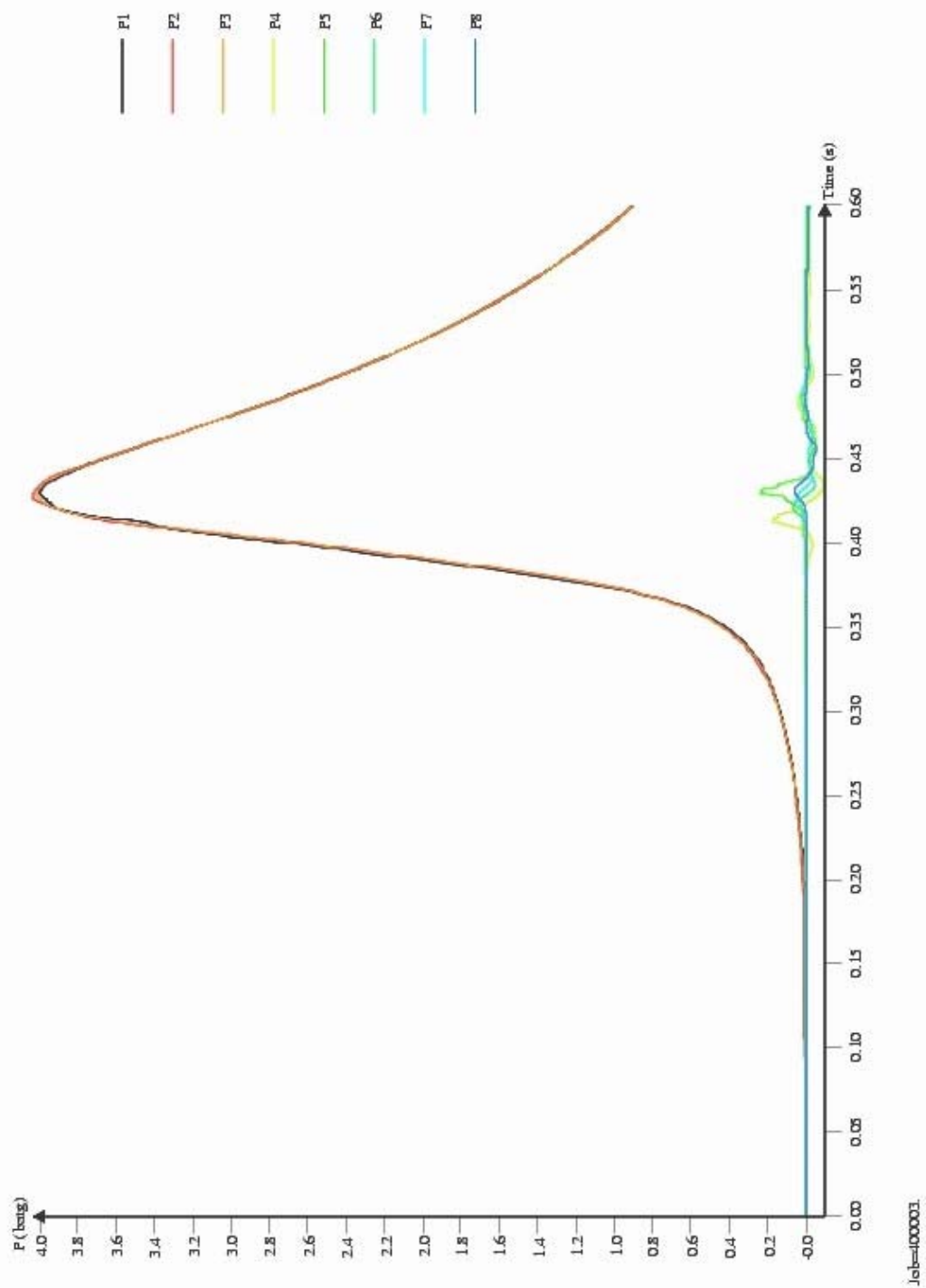
Simulering nr.	Propan/luft blanding; % av containers totalvolum	Plassering til tennkilde	Apningsareal	Størrelse til tennkilde	Obstruksjoner	Innvendige flater
200000	100%	5.85,1.05, 1.05	100%	Punkt	Ingen	Glatt



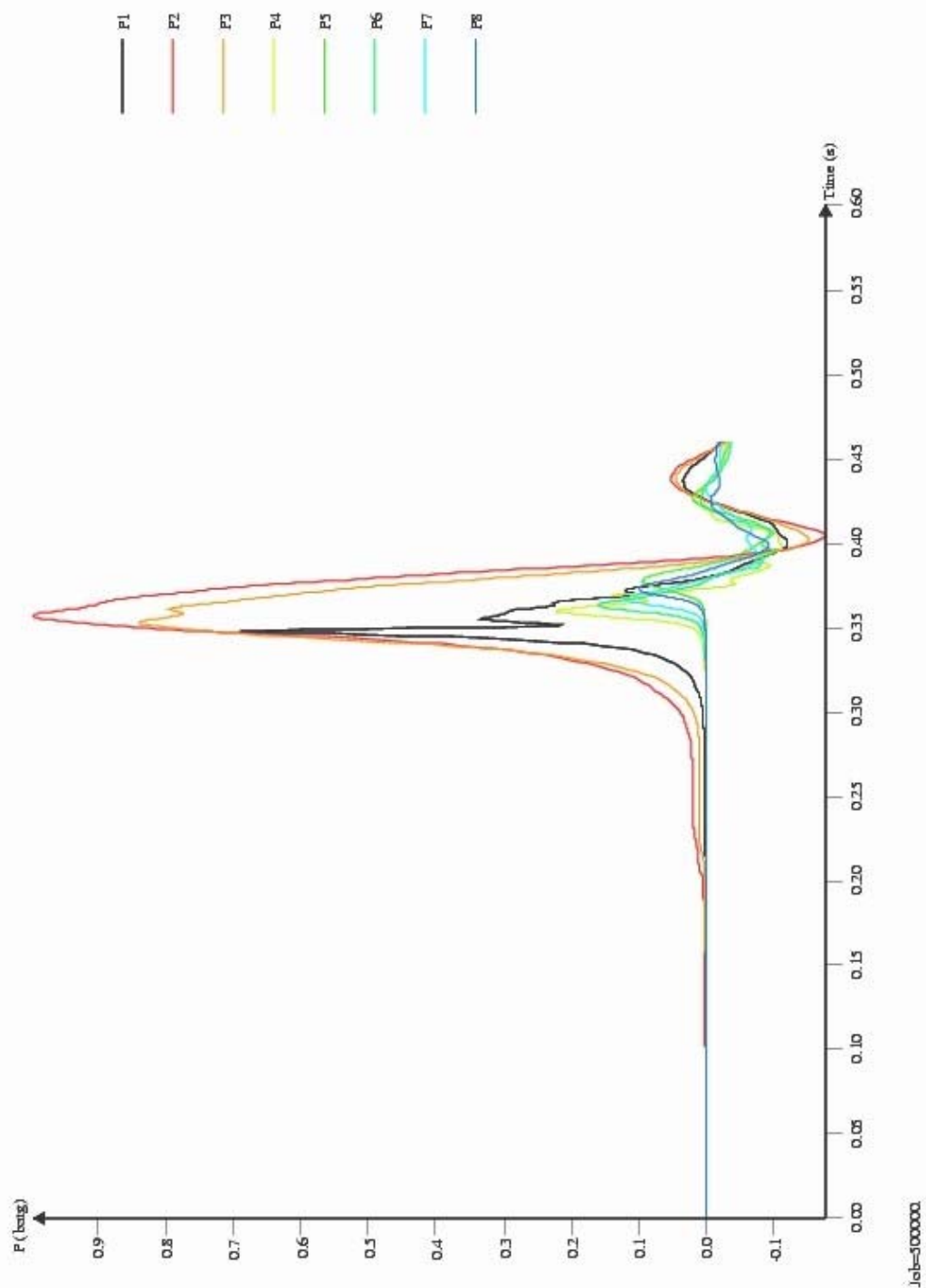
Simulering nr.	Propan/luft blanding; % av containers totalvolum	Plassering til tennkilde	Apningsareal	Størrelse til tennkilde	Obstruksjoner	Innvendige flater
400001	100%	5.85,1.05, 1.05	0 (lukket)	Punkt	Ingen	Vanlig



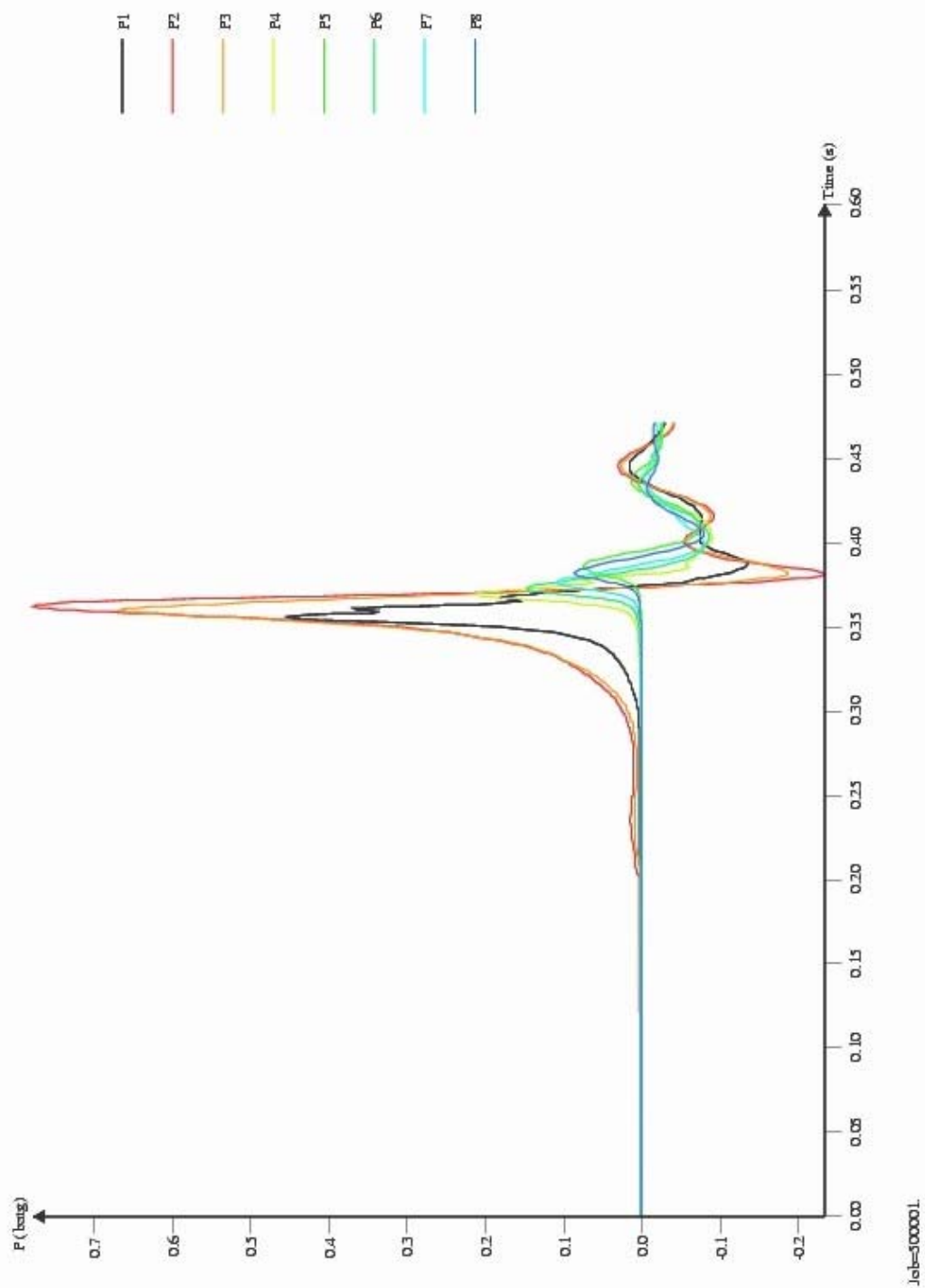
Simulering nr.	Propan/luft blanding; % av containers totalvolum	Plassering til tennkilde	Apningsareal	Størrelse til tennkilde	Obstruksjoner	Innvendige flater
400002	100%	5.85,1.05, 1.05	50%	Punkt	Ingen	Vanlig



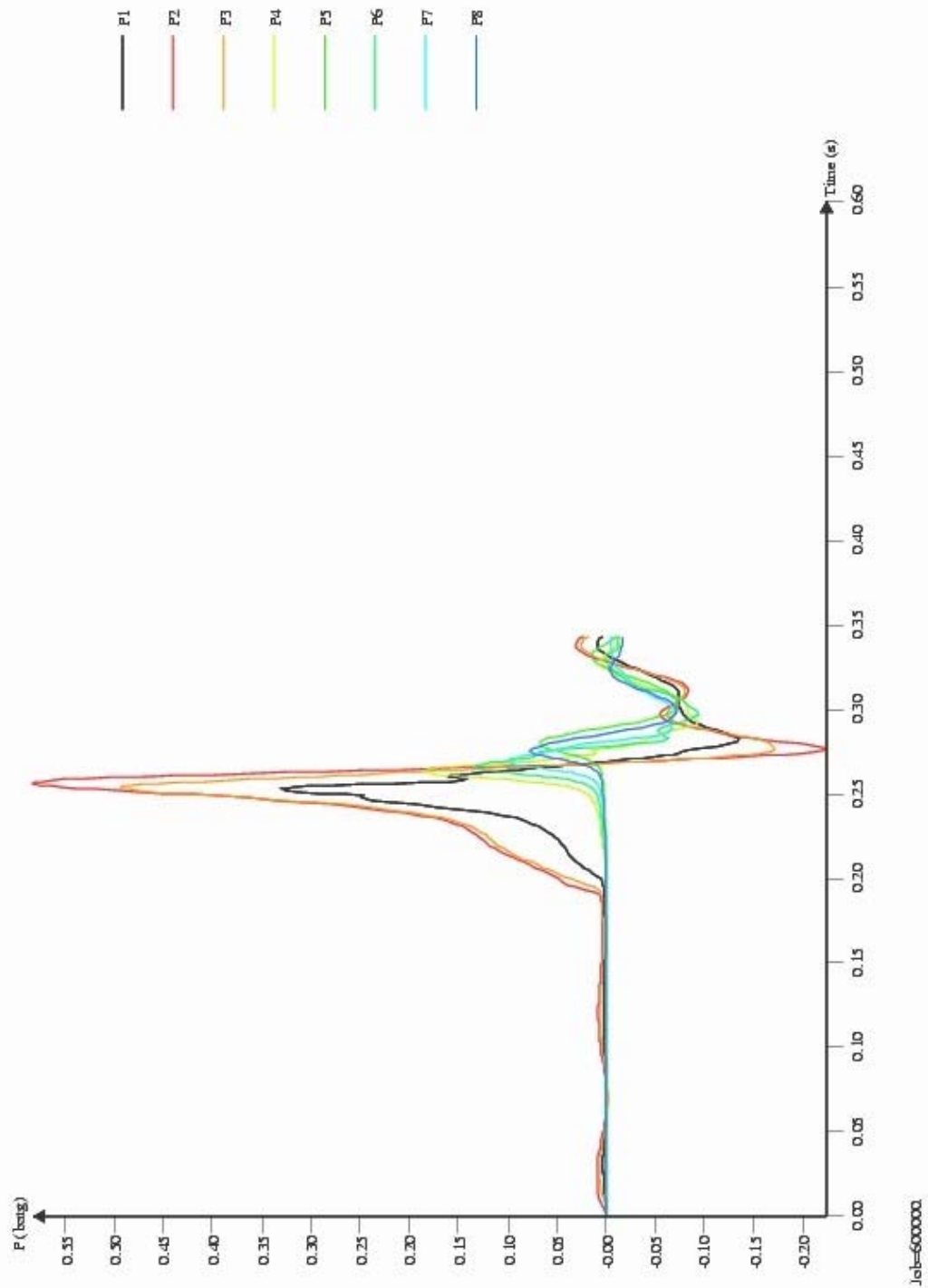
Simulering nr.	Propan/luft blanding; % av containers totalvolum	Plassering til tennkilde	Apningsareal	Størrelse til tennkilde	Obstruksjoner	Innvendige flater
400003	100%	5.85,1.05, 1.05	25%	Punkt	Ingen	Vanlig



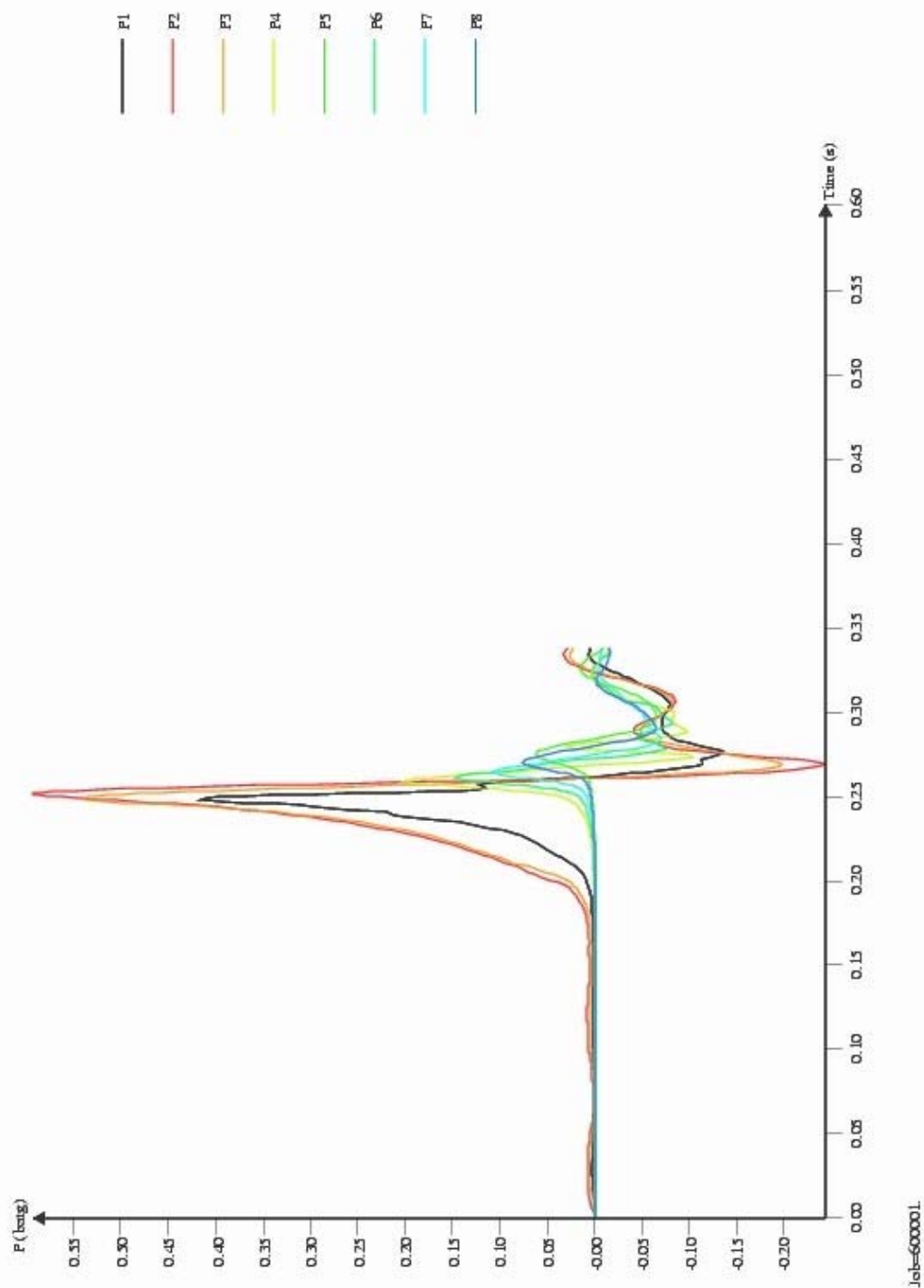
Simulering nr.	Propan/luft blanding; % av containers totalvolum	Plassering til tennkilde	Åpningsareal	Størrelse til tennkilde	Obstruksjoner	Innvendige flater
500000	100%	5.85, 1.05, 1.05	100%	Punkt	Tversgående sylindrer og bokser	Vanlig



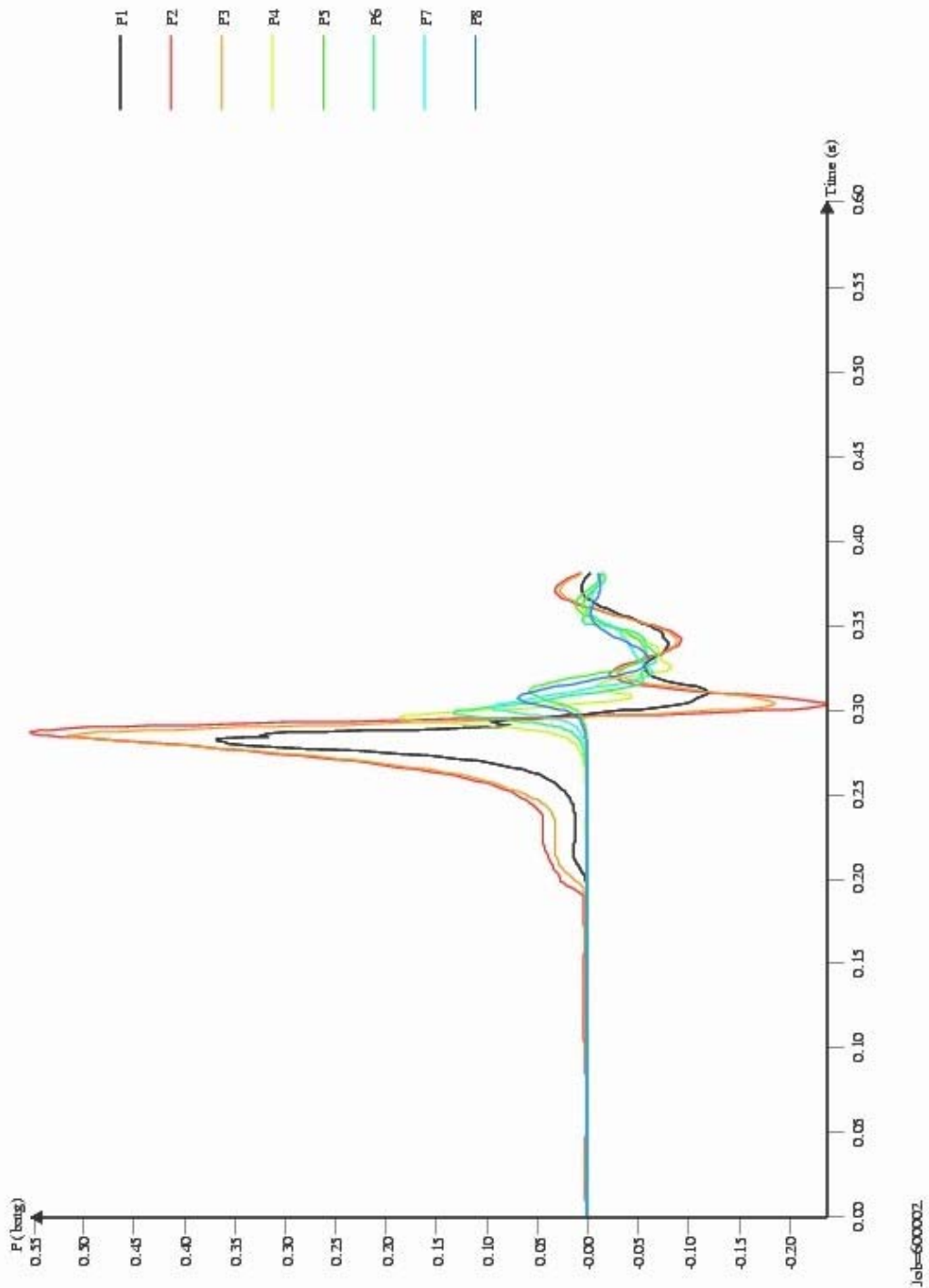
Simulering nr.	Propan/luft blanding; % av containers totalvolum	Plassering til tennkilde	Åpningsareal	Størrelse til tennkilde	Obstruksjoner	Innvendige flater
500001	100%	5.85, 1.05, 1.05	100%	Punkt	Parallele sylindrer og bokser	Vanlig



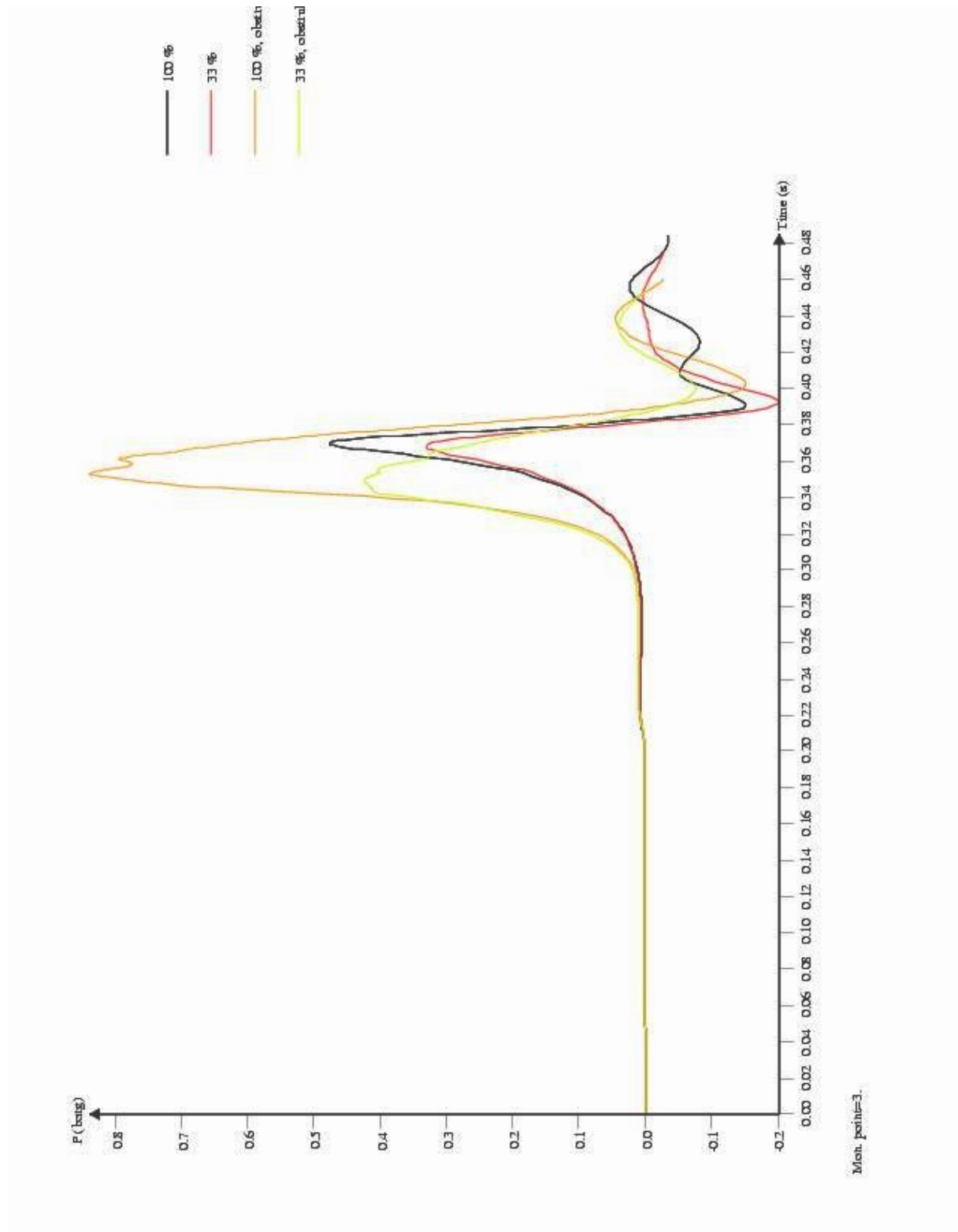
Simulering nr.	Propan/luft blanding; % av containers totalvolum	Plassering til tennkilde	Apningsareal	Størrelse til tennkilde	Obstruksjoner	Innvendige flater
600000	100%	5.10,0.60, 0.60	100%	0.90,0.90, 0.90	Ingen	Vanlig



Simulering nr.	Propan/luft blanding; % av containers totalvolum	Plassering til tennkilde	Apningsareal	Størrelse til tennkilde	Obstruksjoner	Innvendige flater
600001	100%	5.40,0.60, 0.60	100%	0.60,0.60, 0.60	Ingen	Vanlig



Simulering nr.	Propan/luft blanding; % av containers totalvolum	Plassering til tennkilde	Apningsareal	Størrelse til tennkilde	Obstruksjoner	Innvendige flater
600002	100%	5.70,0.90, 0.90	100%	0.60,0.60, 0.60	Ingen	Vanlig



Simulering nr.	Propan/luft blanding; % av containers totalvolum	Plassering til tennkilde	Apningsareal	Størrelse til tennkilde	Obstruksjoner	Innvendige flater
1) 500000	100%					
2) 100000	100%	5.85, 1.05,	100%	Punkt	Tversgående sylindrer og bokser i 1)+3)	Vanlig
3) 500002	33%	1.05				
4) 033000	33%				Ingen i 2)+4)	

