

Sammenligning av spredningsmodellering med kodene PHAST og FLACS, for "tyngre en luft" gassjeter med horisontalt sammenstøt, og valideringssimuleringer av MUST forsøkene.

Aksel Lindtner

Mastergradsoppgave i prosess teknologi med
spesialisering i sikkerhetsteknologi



**Institutt for fysikk og teknologi
Universitetet i Bergen
Norge**

Aksel Lindtner



Institutt for fysikk og teknologi

Universitetet i Bergen

Norge

Preferanser

Oppgaven er gjort som et ledd i en femårig ingeniør utdannelse, innenfor feltet prosess og sikkerhetsteknologi, og ender i graden Mester av Vitenskap, ved Universitetet i Bergen, 2011. Målet med oppgave har vært å sammenligne to simuleringsverktøy, for underlyds momentums jeter med horisontalt sammenstøt med objekter, for gasser tyngre en luft.

Oppnevnte veiledere har vært

- Bjørn J. Arntzen
- Kees Van Wingerden

Ønsker og takke Mathoue Ichard og Kjetil Larsen ved Gexcon for den assistanse de har ytt i forbindelse med opplæringen i bruk av simuleringsverktøyet FLACS. Dernest vil jeg takke DNV for å ha lånt meg deres sikkerhetsstyringsverktøy, PHAST.

Sammendrag

Denne rapporten er et arbeid som sammenligner to dataverktøy, PHAST og FLACS vedrørende ulike spredningsscenarier for fluider, først og fremst tung-gassutslipp.

Det er utført en rekke simuleringer som ligger til grunn for denne sammenligningen. Noen av disse er gjort med utgangspunkt i et fullskalaeksperiment i USA, kjent under navnet MUST- forsøkene. I dette forsøket ble det gjort gassutslipp under noe varierende forhold både med hensyn til vær, geometri og type gassutslipp.

En del av forsøkene i denne rapporten er en simulering av disse eksperimentene. Disse er som simuleringer kjørt mot FLACS for å undersøke at programmet kunne håndtere geometri. Simuleringene bekreftet dette.

Det er også utført simuleringer av begge dataverktøyene mot hverandre i identisk konstruerte situasjoner. Disse viser at PHAST ikke håndterer situasjoner med objekter og gir vesentlig avvikende resultater sammenlignet med FLACS. Svakheten med denne typen simuleringer er mangelen på data fra virkeligheten (som MUST forsøkene er eksempel på).

Kjenner man verktøyenes anvendelsesområde og begrensinger er det få overraskelser i disse simuleringene. Hovedkonklusjonen er at de bekrefter det en visste om verktøyene fra før. PHAST er lett å anvende og egnet til en stor bredde scenarier uten objekter. FLACS er spesialisert mot situasjoner med objekter (byer, plattformer, installasjoner etc.) Begge ser ut til å fungere i forhold til sine anvendelsesområder.

Forkortelser og akronymer

Forkortelse	Engelsk	Norsk
MUST	The M ock U rban S etting T est -	Fullskalaforsøk i urbant miljø
PHAST	P rocess H azard A nalysis S oftware T ool-	Analyseverktøy for prosessfarer
UDM	U nified D ispersion M odel -	Samlede spredningsmodeller
FLACS	F lame A cceleration S imulation -	Flammeakselerasjons simulering
CASD	C omputer A ided S cenario D esign -	Hjulpet av PC ved design av et scenario
CFD	C omputational F luid D ynamics -	Databeregninger av Fluid dynamikk
GPM	G aussian P lum M ode -	Gaussian gass spredningsmodell
HSD/HSM	H ealth - S afety- E nvironment -	H else M iljø og S ikkerhet
LFL/NBG	L ower F lammability L imit -	N edre B rennbarhetsgrense
UFL/ØBG	U pper F lammability L imit -	Ø vre B rennbarhets G rense
LNG	L iquefied N atural G as -	Flytende naturgass
RTI	R elative T urbulent I ntensity -	Relativ turbulent intensitet
TLS	T urbulent L ength S cale -	T urbulent L engde S kala
PPM	P arts P er M illion -	Deler av en Million
PPB	P arts P er B illion -	Deler av en milliard
VOC	V olatile O rganic C omponents -	Flyktige organiske komponenter
PID	P hotoionizing d etector -	Foton ioniseringsdetektor
UVIC	U ltraviolet I on C ollector -	Ultrafiolett ion detektor
DPG	D ugway p roving g round -	Grøft vogn vei prøvefelt

RSL	Roughness Sub Layers
SODAR	Sound Direction And Ranging
SAMS	Surface Atmospheric Measurement System
PWIDS	Portable Weather Information and Display System

Norsk versjon

SAMS	Bakkeutstyr for målinger av atmosfæreforhold
Shear stress	Skjærkreftene og omtales som vindskjær, med benevnningen, τ
Roughness length	Ruhets lengden, z_0 , (eller bare lengde ruhet)
Plum	gassky som kommer fra en kontinuerlig utslippskilde, men ikke nødvendigvis med konstant masserate
Steady state	stabil tilstand
Shear stress	Skjærkrefter
Surface roughness	Overflateruhet
Ground roughness	Ruhetslengden
R.M.S=R.G.K	Kvadratrot til gjennomsnittsavvik Kvadrert
RFO	Rask Faseovergang
Plum	Gassky. Er en gassky med en kontinuerlig utslippskilde, men ikke nødvendigvis med en stabil masserate.
Puff	Gasspute. Gass uten en kontinuerlig utslipps kilde
Eddy viscosity	Virvel viskositet

Innhold

Preferanser	IV
Sammendrag	V
Forkortelser og akronymer	VI
1 Innledning	1
2 Definisjoner og basiskonsepter	2
2.1 Tetthet(ρ)	2
2.2 Konsentrasjon(C_0):	2
2.3 Definisjon av gassky	3
3 Turbulens, turbulensrelaterte forhold eller fenomener som beskriver dens påvirkning på spredningen	4
3.1 Jet	4
3.1.1 Farten til en jet	4
3.1.2 Horisontalt sammenstøt for en jet	4
3.1.3 TLS for rørstrømmer	5
3.1.4 Relativ turbulent intensitet (RTI)	5
3.1.5 Vind	5
3.1.6 Friksjonsfart(u^*)	6
3.1.7 Ruhetslengden, (Z_0)	7
3.2 Atmosfærisk forhold og parametre som uttrykker disse	8
3.2.1 Stabilitet	8
3.2.2 Pasquill klasser:	9
3.2.3 Monin-Obukhov lengden	10
3.3 Måleverktøy/beregningsverktøy	10
3.3.1 Hetetråds fartsmålere	10
3.3.2 De digitale fotoioniseringsdetektorene	11
3.3.3 Selvlikhetsmodeller	12
4 Målmerkeforsøk	13
4.1 Burro- testene	13
4.2 Coyote serien	14
4.3 FALCON forsøkene	14
5 Modeller	15
5.1 En beskrivelse av utviklingen av modeller	15
5.2 Gaussian modellene	16

5.3	CFD modellene og Navier-Stokes ligningene.....	17
5.4	$k - \epsilon$ modellene.....	18
5.5	CFD modellenes generelle oppbygning.....	19
5.6	Antatt basis som PHAST bygger på	19
5.6.1	Te Riele sin modell.....	19
5.6.2	Boussinesq virvelviskositets-antagelse.	20
6	PHAST og FLACS	21
6.1	PHAST	21
6.2	FLACS sin oppbygning.....	26
6.2.1	CASD.....	26
6.2.2	Flowvis.....	27
7	Tunggassspredning	28
7.1	Faktorer som skaper turbulens	28
7.2	Utslipp uten kinetisk energi.....	28
7.3	Utslipp av gasser med relativt høy kinetisk energi.....	29
7.4	Spredningen ved horisontalt sammenstøt med objekt etter utslipp.....	30
8	MUST.....	31
8.1	Formålet med MUST	31
8.2	Geologisk beliggenhet og gjennomføringstidspunktet.	31
8.3	Design (konteineroppsett).	31
8.4	Antall forsøk, deres tider og typer samt gassmengden	32
8.5	Valg av gass	32
8.6	Konsentrasjonsmålinger	33
8.7	Volumstrøm- målingene og utslippshastigheten	33
8.8	Metrologiske målinger og termal kartlegging som ble utført under MUST.	33
8.9	Beskrivelse av simuleringene.	34
8.9.1	Beregninger i forbindelse med MUST-serien	34
8.10	Oppbygningen av MUST sitt område i CASD	35
8.10.1	Trappetårnet	35
8.10.2	De fire 6 meters mastene	36
8.10.3	Sagebrush og greenwood:	36
8.10.4	Konteineroppsettet.....	37
8.10.5	Valg av gridstørrelser for MUST simuleringene.....	38
9	Statistiske modeller og begrensninger i bruk av feltforsøks- målinger	40

9.1	Statistiske modeller	40
9.1.1	Statistisk tolkning	41
9.2	Feltforsøkernes begrensninger	42
10	Resultater	43
10.1	Resultatdel for sammenligningene mellom PHAST og FLACS	43
11	Andre resultater	47
11.1	MUST resultater	47
11.2	Resultatdel for sammenligningene mellom PHAST og FLACS uten geometri.....	55
11.3	Resultater for horisontalt sammenstøt.....	59
11.4	Resultat for horisontalt sammenstøt ved 7,767 kg/s og utslippsfart på 160 m/s fra 1 meters høyde.....	65
78	65
74	65
11.5	Resultater for utslipp med varierende Pasquill klasse, vind, avstand til og form på objektene	66
11.6	Resultatdel PHAST og FLACS for simuleringer med geometri.....	71
12	Diskusjon	78
13	Konklusjon.....	80

1 Innledning

Etter hvert som industriproduksjonen øker i kompleksitet får det konsekvenser for menneskene. Den enkeltes arbeidsoppgaver spesialiseres innenfor stadig snevrere fagfelt. Mange ser ofte ikke lenger helheten i den produksjonen de inngår som en del av. Særlig på større arbeidsplasser, er det vanskelig å ha oversikten til alle del - oppgaver, for eksempel på en oljeplattform.

På slike innretninger er sikkerheten særlig viktig av flere grunner. For det første er de svært dyre å bygge og drive. For det andre produserer de fluider som er svært brennbare og eksplosive. Det er umulig i praksis å undersøke alle sider ved sikkerheten på slike komplekse konstruksjoner, men det er laget simuleringsverktøy som brukes i sikkerhetsvurderinger. Disse programmene er så gode som de formlene de er bygget på.

For å få så fin oppløsning som mulig i slike programmer, er gridcellenes (arealet kalkulasjonene gjøres på) størrelse avgjørende. Sterkere datamaskiner øker oppløsningsevnen til grid og dette vil øke presisjonen i programmene. Men dette er ikke nødvendigvis sikkert. Formlene som ligger til grunn for simuleringsprogrammene er også av betydning.

I denne oppgaven vil jeg sammenligne verktøyene PHAST og FLAKS med tanke på ulike spredningsscenarioer for gasser og hvor parametre for geometri, topografi og værforhold forandres. De samme parametre kjøres på begge programmene. Jeg vil sammenligne resultatene med eksperimenter i virkeligheten, først og fremst MUST som blir presentert seinere i oppgaven.

2 Definisjoner og basiskonsepter

I dette kapittel presenteres noen av de viktigste definisjonene og begrepene som ligger til grunn for det videre arbeidet i denne oppgaven.

2.1 Tetthet(ρ)

Den formelle definisjonen for tetthet er masse per volumenhet:

$$\rho = \frac{M_w * n}{V} = \frac{PM_w}{RT} \quad (\text{lig.1})$$

Der:

ρ = tettheten

M_w = molarvekten(gram/mol)

P = trykket(Pascal= $\frac{N}{\text{meter}^2}$)

V = volumet(m³)

n = mol(et tall= $6,022 * 10^{23}$)

R = den universelle gasskonstant ($\frac{8,314Kj}{\text{mol}*K}$)

T = Kelvin

Normalt vil gasser tyngre enn luft ha en høyere molekylvekt enn luft. Det finnes imidlertid noen gasser med en molekylvekt under luftens (for eksempel LNG) som p.g.a. sin lave temperatur oppviser tunggasseegenskaper. Antallet gasser som oppviser slike egenskaper er stort, men kun de som er brennbare eller giftige er generelt av interesse ved sikkerhets- og risikostyring. I oppgaven fokuseres det på brennbare gasser, og spesielt på propan og propylen som under visse betingelse fremviser tunggasseegenskaper.

2.2 Konsentrasjon(C_0):

Konsentrasjonen er et mål på mengden av en gitt komponent, i en blanding av komponenter. Konsentrasjonen kan oppgis som masse- eller volumprosent, eventuelt molarprosent. For gassutslipp er konsentrasjonen et avgjørende parameter ved sikkerhets- og risikovurderinger.

Konsentrasjonen synker med avstanden fra senterlinjen, samt fra utslippspunktet. Ettersom gassen spres, synker konsentrasjonen i hele gass skyen. Gassen når sin øvre og deretter sin nedre brennbarhetsgrense. Når tid denne avstanden inntreffer avhenger av flere faktorer, som er relatert til turbulensen den utsettes for under spredningen.

Det blir i oppgaven fokusert på hva som skjer med den nedre brennbarhetsgrensen, når et utslipp av en tung gass treffer en hindring få meter fra utslippspunktet.

Det blir brukt to konsentrasjonsangivelser. For MUST simuleringene er konsentrasjonene oppgitt som antall deler av en million (PPM).

Propan, som er en av to gasser som er brukt under simuleringene, har øvre og nedre brennbarhetsgrenser ved 2,1 og 9,6 volumprosent, men siden dette ikke er viktig for gjennomføringen av oppgaven vil andelen det måles på variere.

2.3 Definisjon av gassky.

Betegnelsen skyutslipp viser til alle typer utslipp. En "plume" er et kontinuerlig, men ikke nødvendigvis stabilt utslipp. En "puff" er et momentant utslipp av kort varighet.

For å avgjøre om en gassky skal betraktes som et vedvarende eller et momentant utslipp er det nødvendig å sammenligne varigheten av utslippet, T_d , med tiden den beveger seg fra utslippkilden til registreringsposisjonen, x/u . Det forutsettes at vindhastighet og -retning er rimelig stabil i denne perioden. Når $T_d > x/u$ regnes skyen som kontinuerlig og når $T_d < x/u$ regnes skyen som momentan siden den ser ut som et puff (Almhjell 2006).

3 Turbulens, turbulensrelaterte forhold eller fenomener som beskriver dens påvirkning på spredningen

Ved alle spredningsscenarioer er det turbulensnivået som avgjør hvor langt gassen vil nå før brennbarhetsgrensene inntreffer. Noen av årsakene til hvorfor og hvordan turbulens oppstår blir gjennomgått i dette underkapittelet.

3.1 Jet

3.1.1 Farten til en jet

En jets lengde er definert som punktet hvor jetens hastighet er lik vindhastigheten.

$$\frac{x}{d_o} = \frac{u_o^{jet}}{k_1 u^{jet}} \left(\frac{\rho_x}{\rho_o} \right)^{-1/2} \quad (\text{lig.2})$$

Nedfelt o og x angir utslippspunktet (orifice) og den gjennomsnittlige verdien av den aksiale distansen x , og ρ er tettheten til gassen. Enden til jeten blir da definert av (lees loss) punktet hvor jetens fart, u^{jet} , er lik vindhastigheten u og bli da

$$\frac{x_{tr}}{d_o} = \frac{u_o^{jet}}{k_1 u} \left(\frac{\rho_x}{\rho_o} \right)^{-1/2} \quad (\text{lig.3})$$

hvor x_{tr} er lengden til jeten ved overgangspunktet og u er vindhastigheten, u_o^{jet} er farten til jeten ved utslippspunktet. For å kunne anslå dette er vindhastigheten vanligvis antatt å være 2 m/s

3.1.2 Horisontalt sammenstøt for en jet

For at et horisontalt sammenstøt for en jet skal bli ansett for å være dette må hastigheten til jeten være $u_j > 3 * u$ hvor u_j er jetens fart og u er vindfarten.

3.1.3 TLS for rørstrømmer

For fullt utviklet rørstrøm kan TLS-verdien beregnes ut fra den hydrauliske diameteren. I denne oppgaven er det brukt en annen verdi. TLS-verdien, brukt under FLACS-simuleringene, blir funnet ut fra formellen

$$l = 0,1 * d_h \sim \sqrt{Jetens_{Areal}} * 0,1 \quad (\text{Lig.4})$$

hvor d_h er den hydrauliske diameter.

3.1.4 Relativ turbulent intensitet (RTI)

Relativ turbulent intensitet(RTI) er definert som farten til fluidet i en jet delt på fluktuasjonen til denne farten. Dette gir formellen:

$$RTI = \frac{u'}{u} = (0,01-0,3) \quad (\text{Lig.5})$$

Det var vanlig å anta at dette parameteret lå i området 0,1-0,01, men senere målinger har gitt verdier mye høyere enn dette, som vist ved ligningen over, der u er fluktuasjonen til farten på jeten, og u_j er jetens fart. Vanlige verdier brukt i denne sammenheng er på 0,2.

3.1.5 Vind

Vind er den faktoren som har størst innvirkning på spredningslengdene. Dette skyldes at høy vindhastighet så å si umuliggjør dannelse av brennbare konsentrasjoner ved et utslipp av noe varighet.

Siden atmosfæren er et dynamisk system vil den hele tiden jobbe for å komme i likevekt (Le Chatliers lov), og vinden oppstår som en konsekvens av dette.

Jordens mange små og store ujevnheter skaper friksjon mellom overflaten og atmosfæren. Samtidig skaper objekter på overflaten turbulens. Dette gjør at en del av den kinetiske energien vinden består av, omgjøres til mekanisk energi, og er hovedgrunnen til at vindhastigheten ved overflaten er mye lavere enn høyere oppe i atmosfæren.

Turbulens skapes altså hovedsaklig ved overflaten, og forplanter seg deretter oppover i luftlagene. Den mekaniske turbulensen og friksjonskreftene avtar gradvis ettersom man beveger seg oppover. Ved høye vindhastigheter vil det i hovedsak være overflaten som er den styrende faktor for hvordan vindprofilen vil se ut. Dette er illustrert **Figur 1**, der gjennomsnittlig vindhastighet, u , har en grensesjiktprofil, hvor den nederste delen av vindprofilen kan plottes mot høyden, z , i en rett linje i en logaritmisk skala. Definisjon på vindens fartsprofil kan gis som

$$u = \frac{u^*}{k} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (\text{lig.6})$$

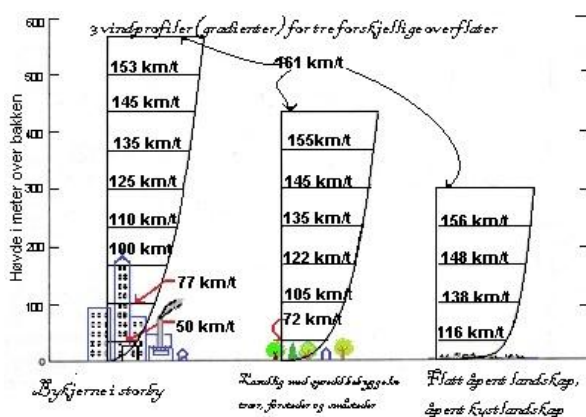
der

k = von Karman's konstanten(0,4)

u^* = friksjonskoeffisienten

z_0 = ruhetslengden

Disse parametrene(u^* og z_0) blir beskrevet senere i kapitelet.



Figur 1. Vindprofiler for en storbykjerne, forsteder eller delvis skogkledd kulturlandskap, åpne flate kystområder eller flatt landskap uten noen særlig vegetasjon, som trær og lignende

Siden vindhastigheten har så stor betydning vil man kunne si som en tommelfingerregel at med en nøytral gass (ingen oppdrift) og ved en gitt utslippsrate, forutsatt at gasskyen ikke stiger, vil senterkonsentrasjonen være motsatt proporsjonal med vindfarten. (Mannan 2005)

3.1.6 Friksjonsfart(u^*)

Det vil alltid være en kraft som virker mellom flaten og en strømning som beveger seg over den. Friksjonsfarten er et mål på den friksjonskraft en flate utøver på et fluid som beveger seg over flaten. Denne kraften blir brukt til å kvantifisere inntrengningsraten i de fleste spredningsmodeller, med det matematiske uttrykket

$$u^* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}} \quad (\text{lig 7})$$

der τ er Reynoldskraften (skjærkreftene) og ρ er tettheten.

Friksjonsfarten kan også bli beregnet ved vindobservasjoner, og har da det matematiske uttrykket:

$$\frac{u}{u^*} = \left(\frac{1}{\kappa}\right) \ln\left[\frac{(z-d)}{z_0}\right] \quad (\text{lig 8})$$

Dette er gyldig i området der $\frac{(z-d)}{z_0} > 10$ der d =fortrengningsgraden.

I de fleste tilfeller der vegetasjonen er dominerende i det topografiske bildet, er u^* liten og regnes generelt sett som null.(Almhjell 2006)

Forholdet $\frac{u}{u^*}$ ligger normalt i området 0,05-0,1, der u er vindfarten ved 10m høyde.

Friksjonsfarten, u^* , har verdier som ligger i området fra 0,05 m/s til 1,0 m/s i tilfeller med sterk vind. $\frac{u^*}{u}$ er vanligvis benyttet for bevegelser nær overflaten, hvor kreftene fra vindskjær ofte er antatt å være uavhengig av høyden, og tilnærmet proporsjonal med kvadratet av



Figur 2 Friksjonskraften som virker mellom en overflate og en strømning, får rektangelet til å endre form til et parallellogram

gjennomsnittsfarten. Den mest generelle definisjonen er at skjærkrefter endrer vinkelen i et objekt.

3.1.7 Ruhetslengden, (Z_0)

Ruhetslengden, z_0 , refererer til overflatens ruhet, sett i forhold til arealet (lengen). En tommelfingerregel som brukes er å relatere z_0 til gjennomsnittshøyden (ε_g), som objektene som okkuperer en overflate har ved $z_0 = \frac{\varepsilon_g}{30}$.

3.2 Atmosfærisk forhold og parametre som uttrykker disse

3.2.1 Stabilitet

Atmosfærisk stabilitet er graden av vertikal bevegelse som atmosfæren enten vil undertrykke, tolerere eller styrke. Stabilitet er i spredningsøyemed brukt til å beskrive den relative betydningen varmeflukt og friksjonsfart har på turbulensdannelsen. Atmosfærisk stabilitet er oppdelt i tre klasser; ustabil, nøytral og stabil. Disse klassene finner man ved gitte værforhold.

Det er vanlig at simuleringsmodeller for transport og spredning bruker minst en av formene for den atmosfæriske stabiliteten. I denne oppgaven brukes Pasquill klasser fra D-F, siden det er tung gassdispergering rundt bakkenivå med horisontal sammenstøt man ønsker å undersøke. M-O lengden ble brukt til å finne Pasquill klassene for MUST forsøkene.

Passiv spredning er definert som:

- Den diffusjonen som skjer når en gasspute eller -sky er styrt utelukkende av den atmosfæriske turbulensen. (Mannan 2005) Oppdrift

Oppdrift har sitt opphav i temperaturforskjeller. Dette kommer til uttrykk ved forskjeller i tettheten til luften og den omliggende atmosfæren. Dermed vil det virke en kraft som er større under enn over, og denne kraften vil få den oppvarmede luften til å stige.

Archimedes var den først som beskrev dette. Det er mulig å bestemme størrelsen til oppdriften ved å bruke Archimedes' prinsippet, som er

$$F = g \left(\frac{\rho_0}{\rho} - 1 \right) \quad (\text{fig.9})$$

der g er gravitasjonskraftene, ρ_0 er objektet med oppdriften sin tetthet, ρ er det omsluttende fluidets tetthet, og F er kraften som virker. For luft kan ρ byttes ut med temperaturen. For andre gasser enn luft er tettheten en kombinasjon av molarvekten til gassen og den temperaturen den har, som vist tidligere i dette kapitlet, under tema for tetthet.

Oppdrift er egenskapen til en fluid, (i denne sammenheng blir det en gass) eller et objekt, som gjør det mulig for den å flyte på et annet fluid, eller en blanding av fluider. Oppdrift oppstår når to eller flere fluid har forskjellige tettheter, og kommer til uttrykk ved at et av fluidene virker som det svever, eller flyter oppå det/de andre fluidene.

For luft er oppdrift forårsaket av temperaturforskjeller. Siden trykket synker jo høyere opp man kommer, må det bety at temperaturen nederst må være forholdsproporsjonal med temperatur og trykk lengre oppe. Dette betyr igjen at hvis en gass (luft) skal ha (positiv) oppdrift må den ha en høyere temperatur enn luft over den. For gasser vil oppdriften være avhengig av molarvekten til gassen det dreier seg om og temperaturen. Dette betyr at en gass ved samme temperatur og lavere molarvekt enn luft vil ha positiv oppdrift. Til forskjell fra en molarvekt-nøytral gass, vil en tung gass, på grunn av gravitasjonskreftene, ha effekter som en vektnøytral gass ikke har. Disse er:

- Gravitasjonen vil generere strømningsinternt i gassen og disse lager et skille med en skarpt propagerende front.
- Stratifisering mellom den tunge gassen og den lettere luften omkring
- Den vil fremvise egenskaper som væsker, ved at den legger seg ved bakkenivå, og følger topografien

En gassky med negativ oppdrift vil oppføre seg annerledes enn en gassky med nøytral oppdrift, og komme til uttrykk ved at tyngre gasser er mer flattrykt, samt at de har høyere konsentrasjon enn nøytrale gasser ville hatt.

3.2.2 Pasquill klasser:

I 1961 kom Pasquill med en ny tilnæringsmetode for klassifisering av forskjellige værforhold (Mannan2005). Dette var en relativt enkel metode. Den inndelte værforhold i forskjellige stabilitetsklasser, inndelt i kategorier som går fra A til F, der A er svært ustabil, D er nøytral og F er svært stabil. Pasquill hadde kommet frem til dette ved hjelp meteorologiske data og visuelle observasjoner. Pasquill fant ut at de aller fleste værforhold falt innfor disse klassene. Han anså dette som et røft mål på den atmosfæriske stabiliteten. Det er denne klassifiseringsmetoden som er mest bruk i dag, innen de fleste modelleringsverktøy for spredningsscenarioer.

3.2.3 Monin-Obukhov lengden

Monin-Obukhov er et lengdemål som gir høyden over bakken hvor den turbulente dissipasjonen p.g.a. oppdrift er sammenlignbar med skjærproduksjonen av turbulens (Pontiggia M, med flere 2009)

Det defineres som lengden representert ved dybden til luftlaget tilstøtende bakken, som domineres av mekanisk turbulens. Måleformen uttrykker påvirkningen som varmekraft og friksjonsfarten (u^*) har på turbulens- dannelsen. Den defineres ved lengden, L , som er høyden over bakken der den vertikale vindskjærproduksjon av turbulens er i likevekt med stabile luftforhold som motvirker turbulensen. Under ustabile forhold er det ingen slik likevekt og L har en negativ verdi. Spredningsmodeller bruker L for å anslå gasskyhastigheter og inntrengningsraten av luft.

Verdien av L er positiv under stabile forhold, negativ under ustabile forhold, og går mot svært høye verdier ved nøytrale forhold. Monin-Obukhov lengde L er definert av Hanna, (Mannan2005), som

$$L = \frac{u^{*3}}{[\kappa * g \left(\frac{H_s}{T} \right)]} \quad (\text{fig.10})$$

der g er gravitasjonskraften, T er temperaturen (K), H_s er følbare varmekraft fra bakken, u^* er friksjonsfarten og κ von Karman konstanten (0,4).

Denne ligningen sier at gjennomsnittlig vind, temperaturprofil, og hastigheten til turbulensen i grensesjiktet, er bestemt utelukkende ved de tre skaleringslengdene ruhetslengde, z_0 , fortrenningsgraden d og Monin-Obukhov lengden, samt friksjonsfarten (u^*).

3.3 Måleverktøy/beregningsverktøy

3.3.1 Hetetråds fartsmålere

Et anemometer er basert på varme, og fungerer ved at man bruker to tynne metalltråder i en størrelsesorden på noen mikrometer. Disse kobles til en strømkilde, som varmer dem opp til en temperatur over den omliggende atmosfæretemperaturen. Når en fluid strømmer over dem vil de bli nedkjølt. Hvor stort varmetapet er, avhenger av fluidets strømningshastighet. Nedkjølingen som finner sted kan korreleres til fluidets hastighet.

Når metall endrer temperatur (gjelder de fleste metaller), endres også dets evne til og lede strøm. Forholdet mellom et metalls ledeevne og temperaturen er at jo kaldere et metall er, desto bedre leder det elektrisitet. Ved å finne varmetapet ved kjent temperatur og hastighet, er det mulig å beregne hvor fort vinden beveger seg. Dette gjøres ved å registrere endringen i den motstand som tråden har til lede elektrisitet. Ved å vekte motstandsendingene i flere ledninger som står normalt på hverandre, kan man finne retningen.

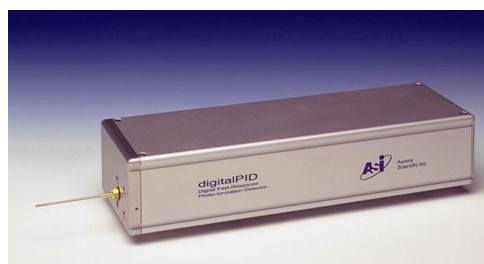
Målingsmetoden er regnet som meget nøyaktig og er vanlig å bruke ved turbulensmålinger p.g.a. den ekstremt raske responstiden.

3.3.2 De digitale fotoioniseringsdetektorene

Apparatene brukt til konsentrasjonsmålingene under MUST var **Digitale fotoioniseringsdetektorer (digiPID)**, og Ultrafiolett ionesamler (UVIC). Disse fungerer ved at

Luften trekkes foran en ultrafiolett lampe. Denne bestråler luften med UV lys. Bestrålingen kan være opp til en gitt bølgelengde, eller kun ved en gitt bølgelengde. Under MUST ble det brukt lamper som genererte UV- stråling med foton energi på 10,6 elektronvolt (eV).

DigiPID er et hurtigresponderende måleutstyr med høy sensitivitet. Sensorene har, foruten i MUST, blitt brukt til konsentrasjonsmålinger for tunggasspredning ved Nevada testområde. Sensorene har vist seg å være robuste og pålitelige.



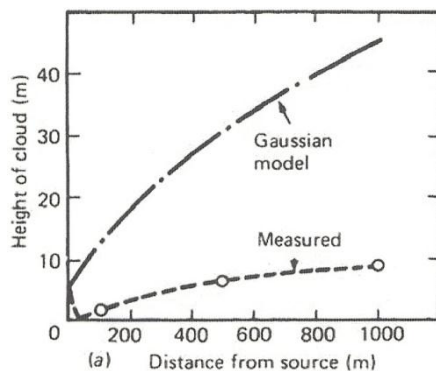
Figur 3 DigiPID lik den brukt under MUST fra Aurora scientific Inc.

3.3.3 Selvlikhetsmodeller

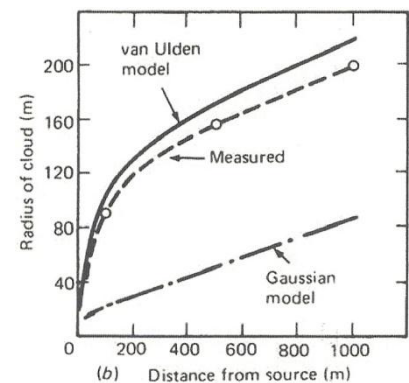
En selvlikhetsmodell er en modell som bruker dimensjonsløs analyse for å utlede en speiling om aksene, til graden av vekst som er typisk for en gassky, som for eksempel høyden til gasskyen. Den gir ingen verdier for dette som vanligvis blir utledet på empirisk basis. Disse modellene brukes ofte for gasskyer som har oppdrift og/ eller energirike jeter. Selvlikhetsmodellene er typisk brukt for å skaffe spredningskoeffisienter for Gaussian modeller. (Mannan 2005)

4 Målmerkeforsøk

Det har vært aktive forsøk av "tyngre en luft gassprednings scenarier" siden rundt 1970 tallet. Dette feltet ble viet mye oppmerksomhet etter at Van Ulden(1970) fremla resultater som viste at slike gasser ikke oppførte seg som molarnøytrale inert gasser. Dette hadde en antatt frem til 1970 tallet, da nevnte Van Ulden fremla resultater som viste at spredningsparametrene σ_y (horisontal) og σ_z (vertikal) hadde verdier på henholdsvis 4 ganger over og under konsentrasjonene til molarnøytrale inertgasser. Dette holdt til å overbevise fagmiljøet om at videre forskning og feltforsøk var veien å gå. Etter Van Ulden hadde fremlagt sine funn fulgte det flere feltforsøk med storskala utslipp av gasser tyngre en luft, slik som LNG p.g.a. sin brennbarhet, samt eksplosive egenskaper.



Figur 5 viser Van Ulden sine resultat for spredningsparameteren σ_z , (fig. Mannan 2005)



Figur 4 viser Van Ulden sine resultat for spredningsparameteren σ_y , eller normalt på vindretningen (fig. Mannan 2005)

4.1 Burro- testene

Noen av disse var Burro- forsøkene, som ble gjennomført i 1980. Dette var åtte storskalaforøk av LNG-utslipp på vann i California. Disse ble gjennomført under forskjellige atmosfæriske forhold. Utslippraten varierte mellom 11,3- 18,4 m³min.⁻¹ og totalt utslippsvolum lå mellom 24- 39 m³. Vindhastigheten varierte mellom 1,8-9,1 ms⁻¹. Under testene ble det gjort målinger av vindhastighet, vindretning, gasskonsentrasjon, temperatur, luftfuktighet og varmefluks.

Av varmekraften ble det gjort målinger ved varierende vertikale og horisontale avstander fra utslippspunktet. En spesielt interessant observasjon ble gjort ved ett av forsøkene, nemlig hvordan den atmosfæriske strømmingen ble fortrenget/forskjøvet av den tette dampskyen som utviklet seg når LNG skiftet fase fra væske til gass. Luften strømmet rundt skyen som om den tilnærmet var et fast legeme. Vindhastigheten var i dette tilfellet 1,8 m/s og de atmosfæriske forhold var stabile. Det ble ikke observert lignende hendelser ved høyere vindhastigheter, og heller ikke rapportert om isdannelse av betydning på vannet under forsøkene.

4.2 Coyote serien

Burro- utslippene ble i 1981 etterfulgt av ti nye forsøk. Disse var som Burro- serien navngitt etter stedet de ble utført ved, og derfor kalt Coyoteserien. Målet for disse var å undersøke spredningstilfeller av LNG, med påfølgende rask faseovergang. Fra denne serien ble forsøk nummer 3,5 og 6 så gode at de ble valgt som målmerker. Dette er forsøk som regnes som så gode at de kan brukes som valideringsdata for simuleringsverktøy. Slik fikk og får utviklere av simuleringsverktøy en viktig pekepinn på hvor godt deres verktøy gjør det, målt opp mot reelle atmosfæriske spredningsobservasjoner av tung gass. Forsøkene ble og blir, fortsatt brukt som valideringsdata.

4.3 FALCON forsøkene

I 1987 ble det utført flere tester. Disse ble kaldt FALCON forsøkene. Fra denne serien av forsøk, ble det også oppnådd data av en slik kvalitet at de kan brukes som målmerker. Forsøkene regnet som mest vellykket var 1,3 og 4, og er av den grunn valgt som målmerker.

5 Modeller

Det vil i dette kapitlet bli gitt en generell beskrivelse av noen av hovedtypene av modellene som ble utviklet. Dette gjelder normalfordelingsmodeller, CFD- modellene og modellen PHAST ligger under (selvlikehetsmodeller/integralmodeller). Siden Te Riele sin modell har visse normalfordelingstrekk iboende i sin fordeling av konsentrasjonsspredningen, blir det gitt en rask gjennomgang av denne modelltypen

5.1 En beskrivelse av utviklingen av modeller

Skulle et utslipp av en relativt liten størrelsesorden finne sted, i et område med høy befolkningstetthet, vil den utgjøre en stor trussel mot befolkningen. Forsøkene ble gjennomført for å skaffe seg sikre data som kunne brukes til og gjøre valideringer og forbedringer av datidens simuleringsverktøy. Foruten dette var de også nyttige for utvikling av fremtidige modeller.

Forsøkene ga verdifulle data om hvordan gasser som LNG oppfører seg ved en plutselig temperaturstigning rundt dem, samtidig som gassen har en begrenset tilgang på energi. I løpet av 80-tallet ble det utviklet et utall forskjellige modeller for å beskrive hvordan spredning av fluider oppførte seg i atmosfæren. Modellene som ble utviklet kunne man i hovedsak dele opp i tre forskjellige kategorier:

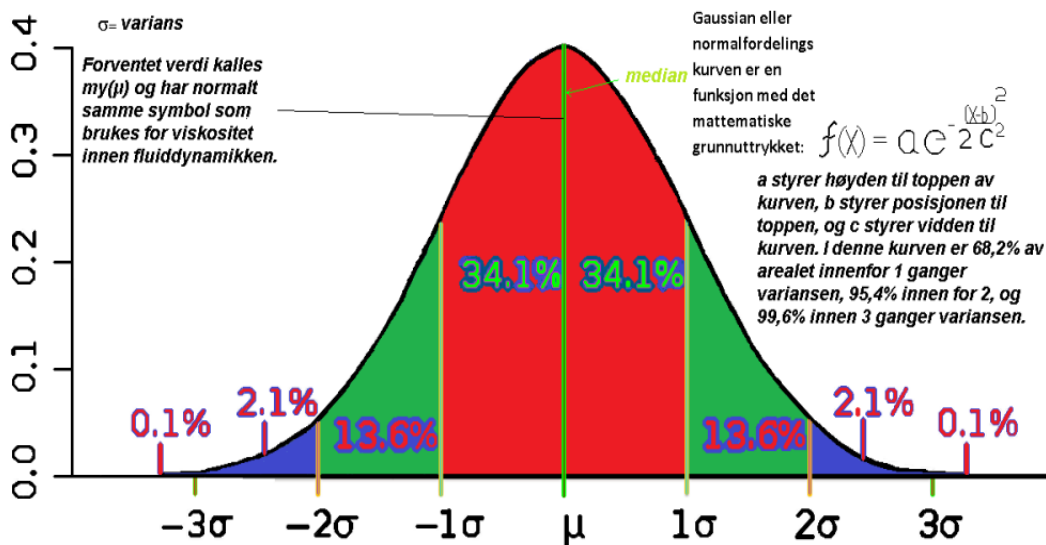
- **Halvempiriske modeller**
- **Normalfordelingsmodeller, ofte omtalt som Gaussian- modeller**
- **Navier-Stokes modellene**

Disse hadde varierende utviklingsgrad med tanke på hvilke fysiske parametere de kunne beregne, samt mht. numerisk kompleksitet. Den modellen som ga den mest komplette fysiske beskrivelsen av hvordan gasser tyngre enn luft ble spredd, var modellene bygget på Navier-Stokes ligninger for viskøse fluiders bevegelse, og Euler for ikke viskøse fluider.

Noen av de første modellene ble utviklet med sin basis i Te Riele (1977) sin modell for kontinuerlige utslipp. Mange av de store og mest kjent modellene for tunggassutslipp har utgangspunkt i denne. En av disse er HEGADAS, som var forløperen til modellsystemet HFSYSTEM, og har sitt utspring i Colenbrander(1980) sin modell. Colenbrander videreutviklet Te Riele sin modell, og deretter ble en videre utvikling beskrevet av Wilcox, som er en av frontfigurene bak PHAST. En finner også en del likhetstrekk i HFSYSTEM og HEGADAS igjen i PHAST sin modell, uten og si at disse ER koblet. Andre store modell basert på HEGADAS er DEGADIS, som også har sitt utgangspunkt i Te Riele sin modell.

5.2 Gaussian modellene

Gaussian modellene bygger på en statistisk fordeling av konsentrasjon i forhold til senterlinjekonsentrasjonen. Disse modelltypene antar at en konsentrasjonsfordeling normalt på vindretningen har en bjelleform, slik figuren under viser.



Figur 6 viser Gaussian kurve, også kalt en normalfordelingskurve.

Forutsetning for modellen er at konsentrasjonen synker etter hvert som man beveger seg bort fra senterlinjen.

Disse modellene er relativt enkle å bruke. Konsentrasjonen normalt på vinden er beskrevet som en funksjon av lengden den har beveget seg medvinds, atmosfærisk stabilitet, vindhastigheten, u , ruhetslengden, z_0 , o.s.v.

Gaussian distribusjonsligning krever bare to parametre, σ_y og σ_z , for å kunne gi konsentrasjonen ved bakkenivå ut fra fordelingskurven man får fra de to parametrene. Ut fra spredningskurven finner en hvordan konsentrasjonene synker med avstanden fra senterlinjen. Spredningskoeffisientene er en funksjon av flere variabler. Disse varierer med kompleksiteten til modellen. Forhold som vindhastighet, overflateforhold, utslippsrate og oppvarming av bakken som følge av solinnstråling og videre konvektiv oppvarming av luften over, er eksempler på slike variabler. Modellen kan brukes til beregninger av kontinuerlige utslipp. Støtvis utslippsmodeller (gassputeutslipp) er svært lik Gaussian spredningsmodeller for gassky. Gaussian-modeller som beregner støtvis utslipp skiller seg fra spredningsmodellene ved at de beregner hvert støt separat, og er fordelaktig å bruke hvis det er tidsavhengige utslippsrater, eller hvis vinden hyppig forandrer retning eller styrke. I tillegg er det noen forutsetninger som må være til stede ved bruk av en normalfordelingsdistribusjon. Disse er:

- ❖ Gasskyen må ha normalfordelingskurve
- ❖ Utslippsraten må være konstant og kontinuerlig
- ❖ Vindhastighet og -retning må være uniform.
- ❖ Den totale refleksjonen av gasskyen må finne sted ved overflaten

Siden modellene generelt sett predikerer konsentrasjonen ved et gitt punkt medvinds, og konsentrasjonen varierer omvendt proporsjonalt med vindhastigheten, vil den ved lave vindhastigheter ha en tendens til å overestimere konsentrasjonene. Av denne grunn er det lavere grenser for hvilke vindhastigheter de kan brukes ved, i forhold til for eksempel CFD modellene. De er også dårlig egnet til å beregne konsentrasjoner som ligger langt fra utslippspunktet.

5.3 CFD modellene og Navier-Stokes ligningene

CFD modellene er oppbygd ved å ta i bruk ligningene ofte omtalt som Navier-Stokes ligningene, og er to-ligningssett for behandling av turbulens.

Navier-Stokes ligninger er en av fluidodynamikkens grunnleggende ligninger. De beskriver de tre fartsvektorene til et fluid i bevegelse. De er basert på Newtons 1.lov og angir fluidets

akslerasjon som følger av trykkpåvirkning, tyngdekraften og indre friksjon. Navier-Stokes modellene bygger på konservering av masse, energi og impuls(momentum). For fluider vil dette innebære Navier-Stokes ligninger for impuls, kontinuitetsligningene for masse, samt energiligningen for energi. Vanligvis er begrepet Navier-Stokes(ligningene) brukt for å referere til disse tre ligningene

Det eksisterer fortsatt ikke en entydig klassisk løsning av de tredimensjonale Navier-Stokes ligningene, og de regnes derfor fortsatt som et åpent matematisk problem.

Navier-Stokes ligningene beskriver hvordan hastighet, trykk, temperatur, og tettheten til et bevegelig fluid er relatert. Ligningene ble utledet uavhengig av hverandre, av GG Stokes i England, og M. Navier i Frankrike.

Det er seks avhengige variabler. Alle de avhengige variablene er funksjoner av de fire uavhengige variablene. De er derfor partielle differensialligninger og ikke ordinære differensiallikninger.

5.4 $k - \varepsilon$ modellene

To-ligningsmodellene eller $k - \varepsilon$ modellen er grunnleggende for å kunne ta i bruk Navier-Stokes modellen. $k - \varepsilon$ modellene er vel utprøvd, og en mye brukt metode for å klare dette. Dette innebærer at man løser to sett med ligninger, en for turbulensen som blir produsert (k), og en for oppløsning av turbulensen (ε). Navier-Stokes (CFD) modellene blir ofte forbundet med nettopp $k - \varepsilon$ modellen. Det betyr at den inkluderer to ekstra transportligninger for å representere de turbulente egenskapene for en strømning, og forklare effekter som konveksjon og diffusjon av turbulent energi.

Det er to hovedkategorier av $k - \varepsilon$ modellen, en utviklet av "Launder og Sharma". Denne blir til vanlig kalt for standardmodellen. Hensikten med utviklingen av $k - \varepsilon$ modellen var for å forbedre TLS modellen, og å finne et alternativ til den algebraiske løsningen av TLS, i moderate til svært komplekse strømninger. $k - \varepsilon$ modell har vist seg å være nyttig for strømninger som er vegg- bundet som rør strømninger, samt for frittgående (shear)lag strømninger med relativt små trykkgradienter. For disse tilfellene gir modellen gode resultater.

Tolignings turbulensmodeller er en av de vanligste typene turbulens- modeller. Blant annet $k - \varepsilon$ modellen har blitt industristandardmodell og er mye brukt for de fleste typer tekniske

problemer. Tolignings turbulensmodeller er et område som det aktivt forskes på for å utvikle nye og bedre modeller.

5.5 CFD modellenes generelle oppbygning

CFD modellene baseres på differensialligninger for konservering av masse, energi og impuls, og er bundet sammen ved hjelp av k - ϵ metoden.

CFD- modellene er avhengig av en mest mulig presis gjengivelse av geometrien som fluidet skal bevege seg i og over. Selve simuleringsvolumet er oppdelt i kuber. Disse fremkommer når man lager grid i de forskjellige akse- retningene, vanligvis med et kartesisk koordinatsystem. Gridet kan enten være regulært eller irregulært. Området er da inndelt i et stort antall mindre volumer som det gjøres beregninger av, separat fra de andre volumene. For hver utregning er parametrene konstanter, og utregningene skjer en gang for vært tidssteg. Tidsstegenes lengde avgjøres av hvor mye bevegelse det er i området som er definert.

Det brukes et spekter av forskjellige fremgangsmåter. Den vanligst metoden er ved endelig volum. Dette gir et sett av algebraiske likninger for alle de avhengige variablene i hvert volum. For eksempel brukes Eulers ligninger for fluider som ikke er viskøs, og Navier-Stokes likningene for viskøse fluider.

5.6 Antatt basis som PHAST bygger på

5.6.1 Te Riele sin modell

Det er grunn til å anta at PHAST har sitt opphav i modellen beskrevet av Te Riele(1977). Grunnen til dette er likheter i programmenes oppbygning og funksjon, og at utviklerne bak PHAST kan knyttes til arbeid med videreutviklingen av Te Riele sin modell. Det gis av denne grunn en liten gjennomgang av grunnligningene Te Riele-modellen bygger på.

Te Riele er basert på to simultane, partielle differensialligninger for konservering av masse og impuls. Den bygger på antagelsen om at selve opptaket av gass fra en utslippskilde inn i det omkringliggende strømningsfeltet, og spredningen som finner sted i selve strømningsfeltet, er to uavhengige prosesser. Andre antagelser er Reynolds analogien og Boussinesq approksimasjon. Grunnligningene er som følger:

$$\frac{\partial \rho u}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial \rho}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \text{ eller } x? \frac{\partial \rho}{\partial z} \right) \quad (\text{lig.11})$$

$$\frac{\partial \rho u^2}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial \rho u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \text{ eller } x? \frac{\partial \rho}{\partial z} \right) \quad (\text{lig.12})$$

Her er K en virvel-diffusivitets-koeffisient, u er vindhastigheten, ρ er tettheten til skyen, og nedfelt x og y er respektivt medvinds retning og retningen normalt på vind.

For sammenhengen mellom tettheten og konsentrasjonen blir det antatt at den omliggende luften (atmosfæren) og den tunge gassen er ideelle gasser, at de har samme molekylærspezifikk varme, og at utjevning av temperatur og tetthet bare skjer ved konveksjon som har sitt opphav i atmosfærisk turbulens.

5.6.2 Boussinesq virvelviskositets-antagelse.

Overføringen av bevegelse forårsaket av turbulente virvler er ofte modellert med en effektiv virvelviskositet (eddy viscosity) på en lignende måte som bevegelsesoverføringen forårsaket ved molekylær diffusjon (dvs. friksjon). Hypotesen om turbulente virvler blir ofte referert til som Boussinesq virvelviskositets-antakelse (Boussinesq i 1877).

Boussinesq virvel viskositetsantagelse er grunnlaget for alle to ligningsmodeller, og postulerer at Reynolds stress tensor, τ_{ij} , er proporsjonal med den gjennomsnittlige strekk(strain)tensorraten, S_{ij} , og kan skrives på følgende måte:

$$\tau_{ij} = 2\mu_t S_{ij} - \frac{2}{3}\rho k \delta_{ij} \quad (\text{lig.13})$$

hvor μ_t er en skalar størrelse, kalt virvelviskositeten, som normalt blir beregnet fra de to transportvariablene.

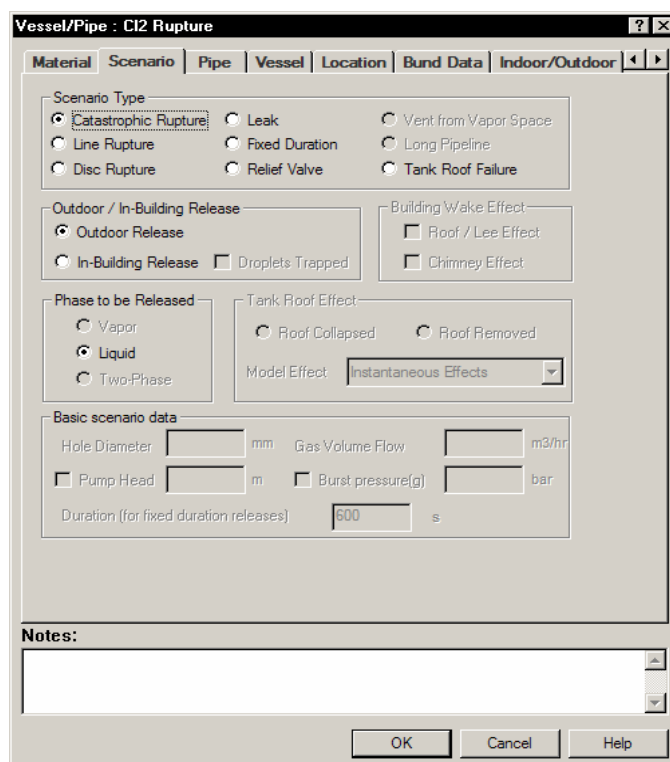
Boussinesq- forutsetningen er både styrken og svakheten til to ligningsmodeller. Denne antakelsen er en stor forenkling, som tillater en å tenke på effekten av turbulens som en gjennomsnittlig strømning, på samme måte som molekylær viskositet påvirker en laminær strømning.

Boussinesq-forutsetningens svakhet er at den ikke er generelt gyldig. Det er ingenting som sier at Reynolds stress-tensor må være proporsjonal med strekk-tensoren. Dette stemmer i enkle strømninger som for eksempel et rett grensesjikt eller i dragsuget til et objekt, men for komplekse strømninger, som strømninger med en sterk kurvatur, eller sterkt akselererte eller retarderte strømninger er Boussinesq antakelsen rett og slett ikke gyldig.

6 PHAST og FLACS

Under dette kapitelet blir de to programmene beskrevet mer spesifikk.

6.1 PHAST



Det er en stor forskjell mellom en integralmodell og en CFD modell, men forskjellen mellom differensialformen og integralformen for modeller er relativ subtil. Ligningssettet som styrer integralformens beregninger tillater at en diskontinuitet finner sted inne i kontrollvolumet. Det finnes ingen iboende matematisk grunn til å skulle anta noe annet. I motsetning til de styrende differensialligningene som antar at det er mulig og differensier mellom de endelige

Figur 7 viser scenarioboksen i PHAST. I denne delen kan en velge mellom ulike hendelser som lekkasje, rørledningbrudd og utslippets varighet, og velge forskjellig masserater, inntil 20 forskjellige utslippsrater og tidsvarigheten på hver av dem. Bruker må sette raten og tiden selv. I tillegg kan en velge katastrofal hendelse, ventiler som ryker, den fase fluidet har og mange andre scenarier

volumene, altså at det er kontinuitet til stede. Dette blir spesielt tydelig når en bruker divergensteorien til å utlede de forskjellige differensialene fra integralformene, da divergensteorien antar at det er en matematisk kontinuitet. Dette er det beste argumentet for at ligningene på integralform er å anta som mer grunnleggende enn differensialformen av ligningene. Disse blir spesielt viktig ved beregninger av strømming med reell diskontinuitet, for eksempel trykkbølgen skapt av en eksplosjon.

(Computational Fluid Dynamics av John D. Anderson, 1995)

PHAST er en integralmodell av type speilingsmodeller.

Det kan virke som at PHAST i det minste for noen av modulene som den er bygget opp av, har deler av Te Riele sin modell som basis. Videre utvikling av Te Riele-modellen ble gjort av Colenbrander (1980). Ytterligere forbedringer av modellen er beskrevet av Witlox (1991). Witlox har også beskrevet HEGADAS-3 modell for et kontinuerlig utslipp (Mannan 2005), som er en videreutvikling av Te Riele sin modell.

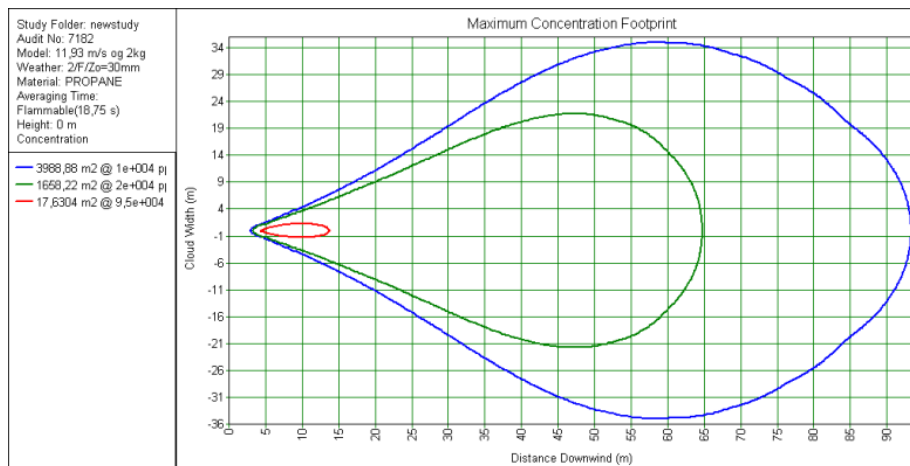
Wilcox, Woodward og Cook er noen av de mest fremtredene i utviklingen av PHAST sine samlede spredningsmodeller (Unified desperation model, UDM), og det er på bakgrunn av deres (Witlox og Woodward) arbeid med modeller, med utgangspunkt i Te Riele sin modell, rimelig å anta at i alle fall deler av UDM har sin kjerne fra denne. Begge modellene er integralmodeller. Det finnes også noen historiske forbindelser til tidligere modeller fra Technica, mer spesifikt til jetmodellen TECJET, samt til en modell for tunggassspredning i WHAZAN

Det begynnende arbeidet med UDM startet i 1990. Opprinnelig ble UDM utviklet som ny teknologi av Woodward og Cook i de første årene av 1990-tallet. Senere er det gjort revisjoner og betydelige forbedringer i alle dens deler. PHAST er et program som eies av DNV. Det brukes av over 300 selskaper på verdensbasis, selges som tidslisenser og er en del av en pakke for risikostyring for bedrifter i off- og onshore industrien, og for eksempel kjemisk industri.

PHAST er egentlig en gruppe med moduler, bundet sammen og samlet til en modell (Unified Dispersion Model). UDM er fem forskjellige integralmodeller for spredningskalkulasjoner. Disse er

- ☉ Nærfelts jet spredning

- ☉ Faseforskjøvet fordampning og dråpeutfellingsmodell
- ☉ Lekkasje, bassengdannelse og fordamping
- ☉ Tunggassdispergering (tyngre en luft)
- ☉ Fjernfelts passiv spredning



Figur 8 er hentet fra PHAST sin resultatdel, og er et eksempel på hvordan konsentrasjonslengder og bredder blir visualisert. Figuren viser maksimum fotavtrykk for et utslipp for konsentrasjonene ØBG, NBG og halv NBG, som er grafene en ser som henholdsvis rød, grønn og blå streker. Dette er standard i PHAST for alle brennbare gasser, hvis ikke annet er spesifiseres.

Det kan gjøres beregninger for tofaseutslipp, og utslipp fra beholder med eller uten trykk. I tillegg til tofaseberegninger kan UDM gjøre beregninger for kontinuerlige, umiddelbare og konstante utslipp, samt generelle beregninger for tidsvarierende utslipp.

Programmet kan beregne når en tunggass vil få løft p.g.a. oppdrift som er skapt som følge av oppvarming fra bakken ved konveksjon.

Den kan også gjøre beregninger for banen til væskefasen for tofaseutslipp, samt for utfelling av væsken etter at den har forlatt beholderen.

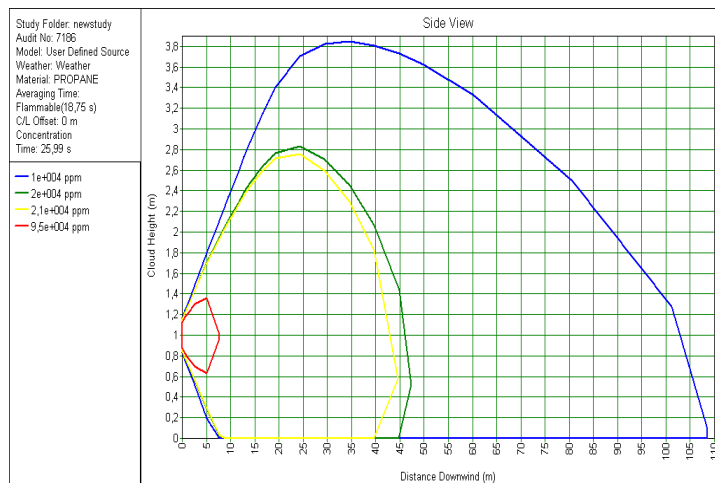
PHAST kan ikke modellere spredning med vind som kommer inn fra siden på utslippsretningen, heller ikke ved vindstille.

Den kan heller ikke gjøre beregninger for påtrufne objekter som finnes i topografien, eller for skrå topografi.

For utslippsretninger er valgmulighetene:

- Horisontalt

- Vinkel fra horisontalt
- Horisontalt sammenstøt
- Vinkel fra horisontalt sammenstøt
- Vertikalt
- Ned (sammenstøt med bakke)

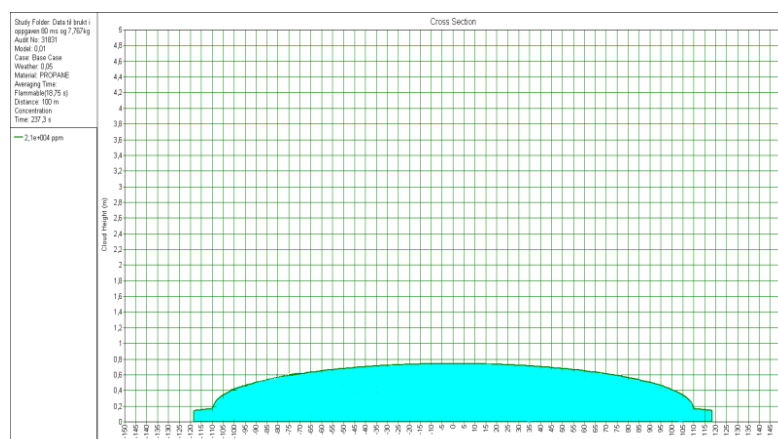


Figur 9 viser gass sky sett fra siden, slik PHAST viser dem

Figur 9 viser hvordan PHAST visuelle del er, i form av grafer som viser hvor langt gassen spres før den når konsentrasjonen satt av bruker, samt standard konsentrasjonene for ØBG, NBG og Halve NBG. Her er den gule linjen konsentrasjon satt av bruker.

Ved horisontalt sammenstøt, eller vinkel fra horisontalt sammenstøt, kan det settes en verdi mellom 0-1, ellers vil PHAST bruke standardverdien 0,25, som ganges med utslippsfarten. Dette er gjort for å kompensere at PHAST ikke håndterer geometri.

Til sammen har programmet 11 forskjellige modeller som kan gjøre forskjellige beregninger. Konsentrasjonen som oppgis flere steder i rapporten, og blir produsert automatisk idet en ber



Figur 10 er hentet fra PHAST. Figuren viser tverrsnittet av gasskyen ved en gitt konsentrasjon og distanse, og distansen kan endres av bruker hvis en ønsker det

om resultatene for en gitt simulering. Rapporten består i hovedsak av disse delene:

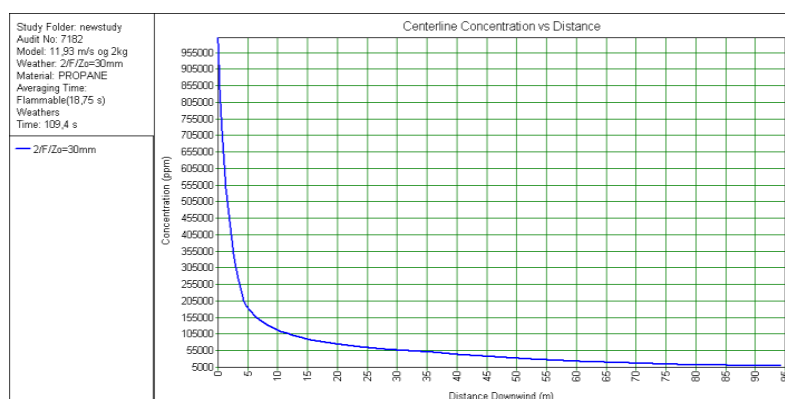
- Inndata
- Oppsummering
- Spredning
- Kommentar
- Spredning ved gjennomsnittstid

I midtre del oppgis den som senterlinjekonsentrasjon, fra utslippet starter til konsentrasjonen er under den verdien som er satt av bruker. I tillegg oppgis

- ☉ Høyde
- ☉ Høyde over senterkonsentrasjon
- ☉ Dybde
- ☉ Dybde under senterkonsentrasjon
- ☉ Halve gasskyens bredde
- ☉ Gasstemperatur
- ☉ Tetthet
- ☉ Senterfart

PHAST opererer med fire forskjellige gjennomsnittstider for ulike scenarier.

Utdataene er i form av grafer og/eller datatabeller. Noen av grafene kan vises som dynamiske grafer (hvis bare en simulering velges) og som viser hvordan konsentrasjonen utvikler seg med tiden. Selve dataene blir oppgitt for gasskyen sin senterkonsentrasjon, hvis ikke annet er



Figur 11 viser en konsentrasjonsprofil hentet fra PHAST. satt av bruker.

Programmet er lite ressurskrevende, bruker kun sekunder på generering av svar på spredningssimuleringer, lik de utført i oppgaven.

6.2 FLACS sin oppbygning

Det vil i dette underkapitlet bli gitt en kort innføring i FLACS programmet. FLACS ble utviklet i begynnelsen av 1980 tallet for å simulere spredningsscenarier offshore, på olje- og gassplattformer, med en påfølgende eksplosjon.

6.2.1 CASD

FLACS har en preprosessor del som heter CASD (computer aided scenario). I CASD setter man de forskjellige parametrene som er nødvendig for å kunne gjennomføre en simulering. Her bygger en opp selve geometrien i den virtuelle verdenen som simuleringene skjer i. Dette kan være for eksempel vegger, underlag og gjenstander. Det er i tillegg mulig å importere geometri som er laget tidligere. Det kan være ordinære gjenstander som ofte blir brukt ved beregninger eller det kan være hele plattformer eller prosessanlegg.

Det brukes et kartesisk koordinatsystem for å bygge opp grid i dets tre romlige dimensjoner. Avstanden mellom hver linje gir størrelsen på gridet, og når disse avstandene er satt for de tre aksene blir et tredimensjonalt grid dannet. Det deles opp i tidsintervaller, som er den fjerde dimensjonen. Som ved det romlige grid strekkes også tidsgridet, men dette gjøres av selve simuleringsprogrammet, og settes før selve simuleringen begynner. Tidslinjene blir satt ved hjelp av CFLV- og CFLC- tallene.

For sprengningssimuleringer holdes tidsstegene korte selv etter at eksplosjonen er utenfor kjerneområde.

6.2.2 Flowvis

I Flowvis blir geometrien behandlet. FLACS egenart er behandlingen av sub-grid geometri. For å klare å få med seg effekten av alle små rør og gjenstander, blir alle volumene delt opp i porøsitet. Store gjenstander som dekker et helt volum har 0 i porøsitet. Sub-grid gjenstander får en del andel av volumet de utgjør og uttrykkes ved en porøsitet som blir gitt en verdi mellom 0-1. Porøsiteten skaper turbulens. Turbulens er en nøkkelparameter ved gasspredning og eksplosjoner, da det er dette som bestemmer uttynningen ved gasspredning, og trykkøkningen ved antennelse av en gass, og dermed skaden forårsaket ved en eksplosjon.

7 Tungassspredning

I dette kapitlet vil det bli gitt en kort oppsummering av de forskjellige faktorene som skaper turbulens, og hvordan tunggass oppfører seg under utslipp i forskjellige former.

7.1 Faktorer som skaper turbulens

De forskjellige forhold som skaper turbulens kan deles inn i tre kategorier. Disse er

- mekanisk turbulens (overflateforhold, z_0)
- turbulens mellom fluider med forskjellig fart eller retning (skjærkrefter, τ)
- turbulens skap av oppdrift (termalkonveksjonsturbulens)

Spredningsforløpet for tunggasser kan i hovedsak deles inn i tre grupper. Disse er for utslipp uten fart:

- startfase (dominert av gravitasjonskreftene)
- overgangsfase (overgang mellom stillestående og bevegelig gassky, dominert av atmosfæreturbulens som penetrerer gasskyen og får den til og øke i masse og utbredelse, gravitasjonen skaper indre turbulens i gasskyen)
- fase dominert av oppdrift i atmosfæren (passiv spredning, konveksjonsvarme/ Pasquill klasse)

I urbane områder vil stabilitetsklassen være nærmest nøytral og spredningen vil være større enn i ubebodde eller tynt befolkede områder. Årsaken til dette er høydeforskjellene skapt av blant annet bygninger (z_0) og varme (termalturbulens), da disse faktorene er med på å skape turbulens. Dette kommer av øy effekten. Disse forholdene er rimelig konstante uavhengig av forholdene i de omkringliggende områder.

7.2 Utslipp uten kinetisk energi

Utslipp som skjer ved lave hastigheter, eller fra kilde uten trykkgradient, vil være dominert av gravitasjonskreftene i startfasen av spredningen. Dette gjør at gassen blir lavere og mer flattrykt og brer seg utover terrenget, og følger topografien hvis den har helning, selv om dette

er mot vindretningen (Kopman Ermark 2007), eller fordypninger. Deretter vil skjær skapt av forskjeller i fart mellom vinden og gassen være det som dominerer, frem til gasskyen har kommet opp i hastigheten til det ytre vindfeltet. Såfremt det ikke er for mye vind, kan det oppleves at vinden slutter å bevege seg over selve gassteppet. Dette er med på å minke blandingsraten betydelig, siden det ikke oppstår turbulensrotasjoner i grensesjiktet mellom gassen og luften, slik det normalt gjør, når det er en "høy" fartsgradient til stede mellom to fluid. Det er denne turbulensrotasjonen som er den dominerende faktoren for hvor fort innblandingen skjer. Når denne ikke lengre er til stede stopper fortynningen nærmest opp. Dette gjør at det nesten dannes et ugjennomtrengelig skjold som beskytter gassen mot uttynning. Nesten all miksing vil skje ved diffusjon. Dette kan igjen relateres til graden av orden, som vil synke i takt med diffusjonsraten. Samtidig

vil det danne seg forhøyninger i endene av gassteppet, som ytterligere er med på å senke blandingsraten. Hvis forholdene ligger til rette for det kan en oppleve at gassen varmes opp ved konveksjon nok til at den vil få løft og lette. Dette skjer gjerne etter at gassen er kommet opp i vindens hastighet, som er da det passive spredningsforløpet starter. Dette er dominert av atmosfæreforholdene og de da rådene stabilitetsforhold lokalt. Størst spredning skjer ved ustabile forhold, og minst ved stabile forhold (Pasquill kl. F).

7.3 Utslipp av gasser med relativt høy kinetisk energi

For utslipp av tunggasser ved en hastighet som er mye høyere enn det omliggende ytre vindfeltet, vil ikke gravitasjonen ha en slik dominerende innvirkning i starfasen.

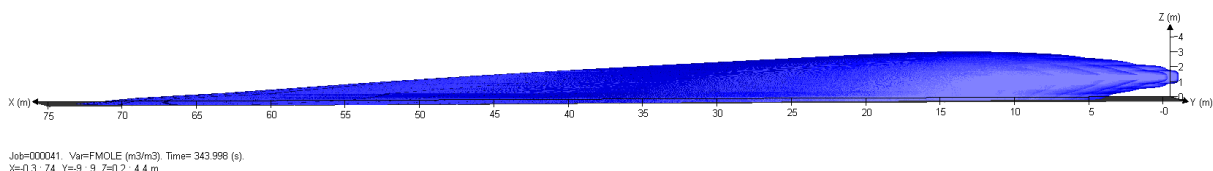
Skjærkreftene som oppstår mellom atmosfæren og gassutslippet er i all hovedsak den dominerende effekten med henblikk på innblandingsraten av luft. Jeten som blir laget har en sentral kjerne med en høy konsentrasjon, som synker jo lengre fra sentrum man befinner seg. Skjærkreftene skaper så stor turbulens at

spredningslengden ikke blir særlig lang, sett i forhold til masseraten og avstandene et tilsvarende utslipp uten bevegelsesenergi vil ha hatt. Gassen når sin nedre brennbarhetsgrense nesten umiddelbart etter utslippet har startet. Selv ved lav vindhastighet (1,5 m/s ved 10 m høyde) som under Pasquill kl. F (svært stabilt), vil det ikke skje en opphopning av gass, da denne føres vekk med den vinden som er. Gravitasjonskraftens innvirkning på spredningsforløpet er liten, fordi spredningen i all hovedsak bestemmes av

utslippshastigheten, og synker med stigende hastighet. Den kinetiske energien som tunggassen har ved utslippspunktet synker fort, og etter relativt kort distanse har jeten mistet den helt. I de aller første sekundene etter utslippstart vil gassen ha et utslippshode. Med dette menes at den første gassen som kommer vil ha en litt høyere tetthet en resten av gassen. Dette kommer av at gassen bak presser på og skaper en forhøyning fremst som propagerer, nærmest ruller fremover med sin egen indre turbulens. Det er vanlig at den maksimale lengden som gassen kan spres, og fortsatt antennes, finner sted ved starten av utslippet. Lengden synker litt, når gassen har nådd stabil tilstand. Lengden innenfor nedre brennbarhetsgrense bestemmes i hovedsak av hastigheten til jeten, samt høyden utslippet skjer fra, og synker med stigende verdier for begge

7.4 Spredningen ved horisontalt sammenstøt med objekt etter utslipp

Ved trykksatt utslipp, vil gassen oppføre seg likt som forklart i del 6.3 frem til sammenstøt med objektet. Objektet vil frata gassen det meste av bevegelsesenergien og dermed synker gassen raskt ned (p.g.a. gravitasjonskreftene). Deretter vil spredningen skje likt som forklart under 6.2.



Figur 12 fra simulering utført under oppgaven som viser spredningslengden for propanutslipp med utslippsrate på 7,767 kg/s og utslippshastighet på 160 m/s. Utslippet skjer fra 1,0 meters høyde, ved Pasquill kl. F og vindhastighet på 1,5 m/s ved 10 m. Lengden før den når NBG er ved simulering med FLACS funnet å være ca. 63 meter, og med PHAST 45 m.

8 MUST

8.1 Formålet med MUST

Must ble utformet for å svare på skalerings- og målingsproblemer som oppstår ved urbane overflateforhold. Slike forhold lager sitt eget ruhets induserte grensesjikt. Dette påvirker dispergeringen av giftige og brennbare gasser og det var dårlig forståelse av de mekanismer som lå til grunn for dette. De som var i gang med å teste og utvikle slike dispergeringsmodeller, hadde få eller ingen data tilgjengelig da MUST ble gjennomført. Data som var innen dette området var i all hovedsak fra laboratorieforsøk gjort i vindtuneller, eller vannkanaler.

MUST skulle gi "reelle data". Dette skulle gi en hurtigere utvikling og forståelse av de fenomener som ligger til grunn for dispergeringsprosessen i slike områder, under og i etterkant av forsøkene.

8.2 Geologisk beliggenhet og gjennomføringstidspunktet.

DPG er et anlegg som USAs hær disponerer og ligger i "The great Basin Dessert". Stedet ligger omtrent 140 km sørvest for Salt Lake City.

DPG brukes som testområde for biologiske og kjemiske våpen.

8.3 Design (konteineroppsett).

MUST ble designet for å gjenskape karakteristiske problemer forbundet med urbane områder. Konteineroppsett var satt med fokus på området i bakkant av vindretningen (i all hovedsak langsiden), der det oppstår en nedadgående strømning i området mellom konteinerne, som påvirker strømmingen ved at det oppstår en interferens mellom konteinerne og vinden. Konteinerne ble plassert med avstander som skulle skape et flytregime i grenselandet mellom et dragsug- interferensregime og en isolert strømning.

DPG ved Horisontal grid består av en serie av veier lagt i et 805m kvadrat. Det er totalt 28 parallelle veier med 30 meters intervall, samt et sentralt trappetårn på 32m. Det ble i alt utplassert 120 konteinere. 10 konteinere ble satt opp med kortsidene mot hverandre (rad A fra 0 til 9), med rundt 5 meters avstand mellom disse. Det ble plassert 11 konteinere bak denne første raden (Radene B til L). Avstanden mellom disse varierte fra ca.10 til 15 meter. Det ble prøvd å holde dem på en så rett linje som mulig. Dette var ikke alltid mulig p.g.a. kabler eller annet utstyr. Konteineroppsettet ble satt opp rundt det 32 meter høye trappetårnet, som tjente som plattform for gassmålinger, infrarødt utstyr og metrologiske instrumenter.

Hver konteiner fikk sin egen bokstav samt påfølgende tall. Området var tilstrekkelig stort til å produsere sitt eget RTL. Bakken heller +0,5 % i den sørlige retning, og er dominert av *Greeswood og **sagebrush på 0,5-1 meter. Ruhetslengden, z_0 , er mellom 2 og 4 cm utenfor konteinerområdet.

Konteinerens størrelse er på henholdsvis:

- Lengde=12,2 meter
- Bredde=2,42 meter
- Høyde= 2,54 meter

8.4 Antall forsøk, deres tider og typer samt gassmengden

Gassen ble sluppet ut enten inne i selve konteinerområdet eller like utenfor Utslippspunktene varierte i plassering og høyde, og er markert som oransje firkant etterfulgt av et nummer (**Error! Reference source not found.**). Gassen ble frigitt enten som kontinuerlige utslipp fra en punktkilde eller støtvis (puff). Det ble til sammen gjort 16 timer med kontinuerlig utslipp og 4 timer og 45 min med støtvis. Forsøkene regnes som svært vellykkede og er målmerker for evaluering av spredningsmodeller.

8.5 Valg av gass

Gassen propylen ble valgt, for sine egenskaper til å bli ionisert. Sveisegass er lett å transportere i gassylindre og kan holdes ved en rimelig konstant temperatur, ved bruk av et vannbad, noe som ble gjort under gjennomføringen av forsøkene.

8.6 Konsentrasjonsmålinger

Det ble brukt hurtig responderende digitale fotonioniseringsdetektorer (digiPID) til måling av konsentrasjonene, samt ultrafiolette ionesamlere (UVIC).

Konsentrasjonsområdet som det ble forventet målt på, lå i området 500 til 0,1 ppm. DigiPID ble montert på trappetårnet midt i konteinerområdet (se **Error! Reference source not found.**), ved 1 og 2 meters høyde, deretter ved annen hver meter til 16 meters høyde, utenom ved 14 m. Trappetårnet ble også brukt som plattform for å skaffe værprofiler og til å kartlegge propylenkonsentrasjonene ved bruk av infrarødt kamera. I tillegg ble det reist fire seks meter høye master hvor det ble montert 6 UVIC. (se **Error! Reference source not found.**). En UVIC ble i tillegg montert sammen med en DigiPID i dragsug-interferensområdet for å sjekke at de ga lik konsentrasjon. Foruten disse ble det satt opp 4 rekker med DigiPID. Totalt ble det montert 40 DigiPID på de fire linjene, 8 i den 32 meter høye masten og 26 UVIC- er.

8.7 Volumstrøm- målingene og utslippshastigheten

Gassen ble forbundet med en manifoil til en kontrollenhet for massestrøm. Den målte mengden med gass ble så sluppet ut fra et rør med en diameter på 5 cm. De tre propylensylindrene ble lagt i vannbad for å minimere trykkforandringene under utslippene. Måleutstyret for volumstrømmålingene har et avvik på inntil ± 2 %.

Utslippshastigheten for gassen lå på ca. 0,1 m/s, men varierte noe alt ettersom hvilken volumstrøm en brukte.

8.8 Metrologiske målinger og termal kartlegging som ble utført under MUST.

Følgende er en rask oppsummering av alle målingstypene som ble gjennomført under MUST serien. Foruten konsentrasjonsmålingene ble det utført en rekke andre målingstyper. Disse er:

- Tethersonde
- Lydanemometer
- Fiberoptisk kvartstermometer

- Varmetrådanemometer
- Lydbasert avstands- og retningsmåling
- Bærbart værinformasjons- og fremvisningssystem
- Bakkeutstyr for atmosfæriske målinger
- Thermocouples (varmeelementer)
- Actionmeters
- Måling av varmestråling
- Vindprofilering ved bruk av radar
- FM-CW Radar
- Mikrobølgeradiometer

8.9 Beskrivelse av simuleringene.

Simuleringene av MUST med FLACS er gjort for å vise at dette verktøyet kan håndtere geometri som medfører komplekse strømningsmønstre. Simuleringene som er utført i denne oppgaven er altså blant annet deler av MUST-serien. Disse ble utført for å vise at FLACS håndterer geometri i spredningssimuleringene, også målt opp mot reelle dispergeringsmålinger. Det ble gjort 38 simuleringer fordelt på to sett med 19 i hver. 18 av disse regnes blant de mest vellykkede forsøkene som ble gjort under forsøkene.

8.9.1 Beregninger i forbindelse med MUST-serien

Forsøk nr.(sim.2692223 eller 692223 i tabell/vedlegg I) brukes til å vise hvordan man er kommet frem til de forskjellige inn- data brukt.

De fleste utslippene skjer fra forskjellige posisjoner, avhengig av vindretningen. Det varieres fra hvilken høyde utslippene skjer. Opplysningene om dette finnes Vedlegg I, som inneholder alle relevante data for MUST-simuleringene.

For simuleringer utført med fint grid ble det brukt strekk på ca.1,2 mellom normal gridstørrelse og det grid som omga utslippspunktet. Dette strekket ble også brukt for simuleringsarealets yttergrenser.

For simuleringene som ble gjort med grovt grid ble det brukt en funksjon som heter "smooth", mellom utslippspunkt og den vanlige gridstørrelsen. Et strekk på 1,2 ble benyttet mot grensene.

Valg av simuleringstid ble tatt på bakgrunn av vindhastigheten, ettersom stabil tilstand inntreffer raskere ved høy vind enn ved lite vind. Stabil tilstand ble regnet for inntruffet når det ikke ble registrert konsentrasjonsendringer av vesentlig betydning.

Utslippsratene varierte mellom 175- 225 dm³min⁻¹. Det ble gjort korreksjon for høydeforskjellen, da MUST ligger ved 1310 meters høyde over det gjennomsnittlige havnivået.

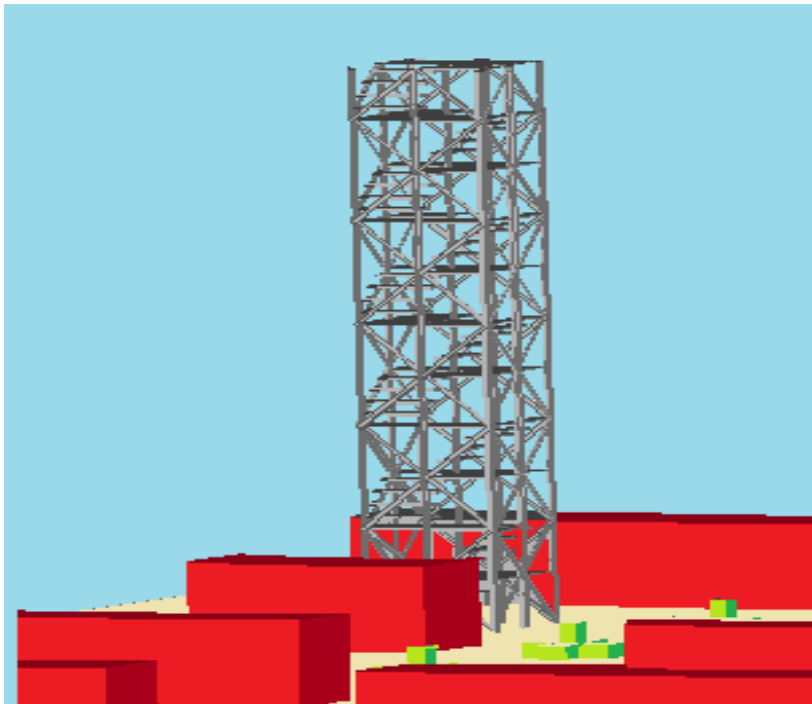
Det ble også gjort korreksjon for temperatursvingninger mellom de forskjellige utlippene.

8.10 Oppbygningen av MUST sitt område i CASD

Hele MUST området ble bygd opp i CASD fra bunnen av. Hver konteiner ble stilt på sine respektive plasser. Plasseringen fremgikk av dokumenter utlevert i forbindelse med simuleringene.

8.10.1 Trappetårnet

Dette ble bygd slik det fremstår på Figur 13



Figur 13 viser trappetårnet

Trappetårnet ble 30 m i MUST, men ettersom målingene av de vertikale konsentrasjonene stoppet ved 16 meter, anså man det unødvendig å bygge det nøyaktig så høyt i CASD

8.10.2 De fire 6 meters mastene

Disse ble bygget, men av samme grunn som med trappetårnet, ble



Figur 14 viser 1 av de
fire 6 meter mastene

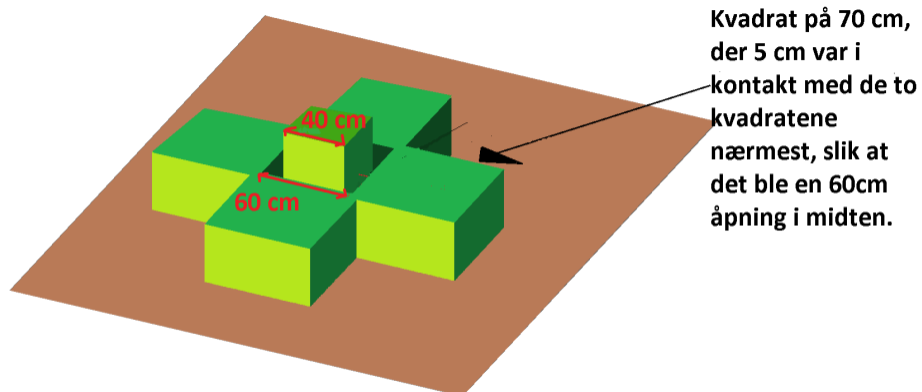
det improvisert med utseende, men forsøkt gjort så naturtro som mulig. (se Figur 14)

8.10.3 Sagebrush og greenwood:

Disse ble plassert med 10 meters mellomrom langs begge aksene. Siden dette blir et betydelig antall, ble det kun konstruert én av disse, resten er kopier av denne.

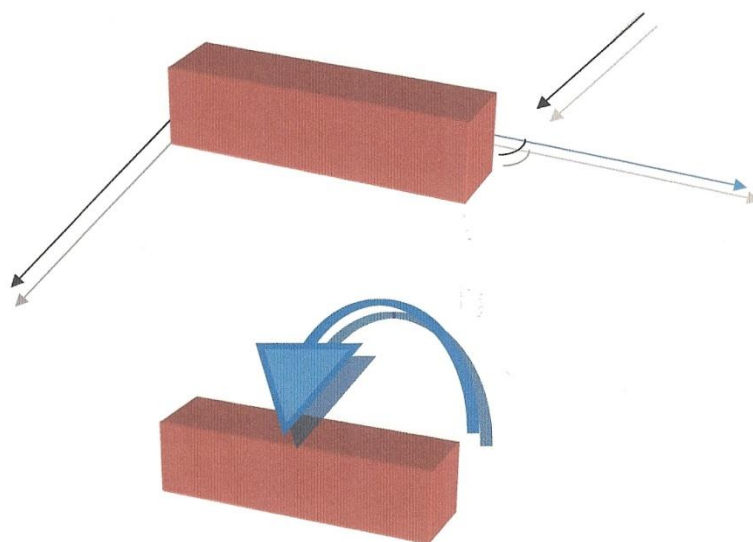
Alle boksene har en volumporøsitet på 0,95.

8.10.4 Konteineroppsettet



Figur 15 viser hvordan boksene som representerte greewood og sagebrush ble plassert i konteineren. Hver konteiner har et avvik fra referanselinjen som ble satt med utgangspunkt i konteiner A8 sitt nord-vestre hjørne.

Konteineroppsettet ble korrigert etter referanselinjen. Korreksjoner ble gjort for avvik de



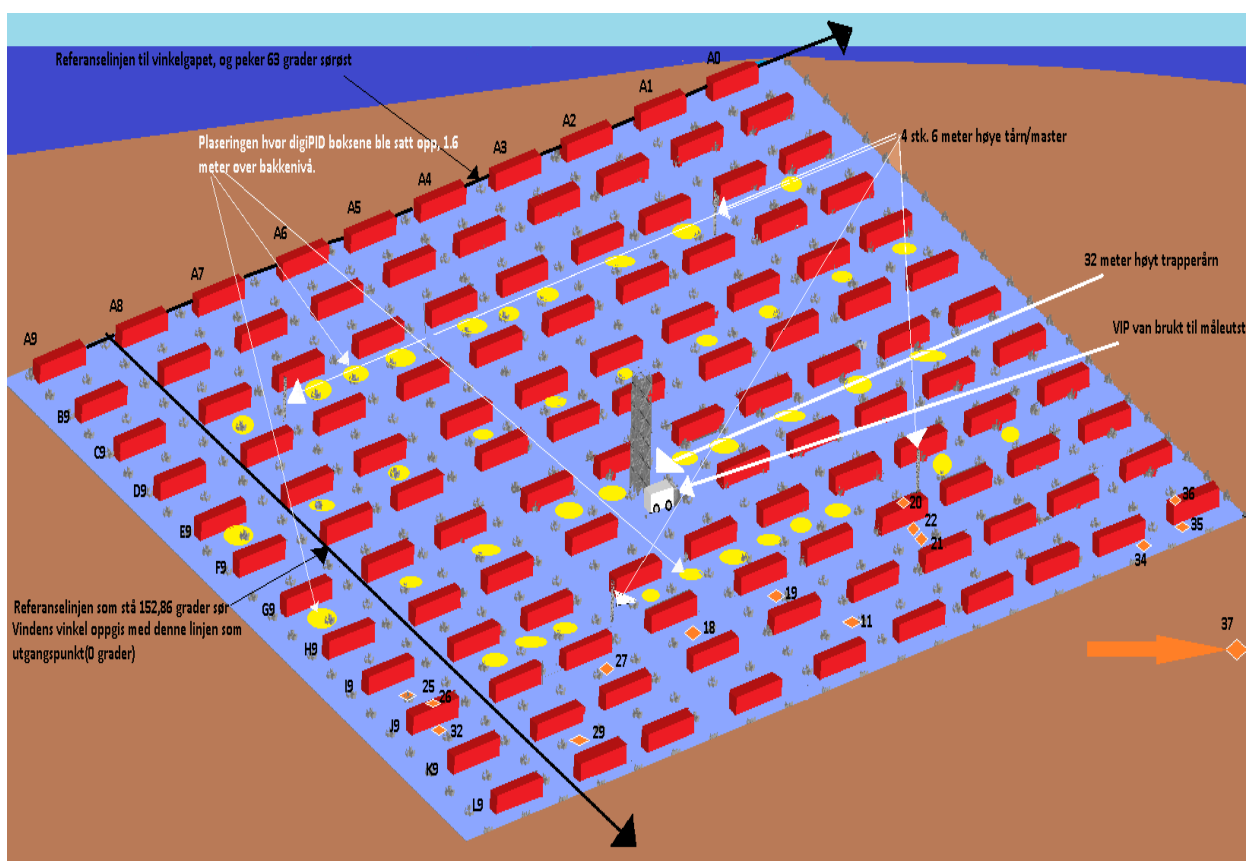
Figur 16 Kontrollinjen er den blå linjen. Vinkelgapet dannes når langsiden til konteineren ikke peker 62,75° øst. Når en beveger seg mot høyre dannes en avstand mellom linjen og konteinerens side. Vinkelgapet blir avstanden som har oppstått når en er kommet til enden av konteinerens langside (Pilen som peker mot enden av konteinerens langside slutt). Helningen til konteineren er hvor mye den bikker forover eller bakover i forhold til horisontal posisjon og er vist ved en blå tykke pil.

hadde fra denne linjen, kalt vinkelgapet, fra gapet som oppstår mellom konteinerens bakre del og fremre del i forhold til kontrollinjens 62,75° østlige retning. Foruten å legge inn gapet mellom kontrollinjene og containere ble helningsgraden lagt inn, dvs. hvor mye den avviker fra å stå i vater. Dette ble gjort for alle MUST sine 120 containere.

8.10.5 Valg av gridstørrelser for MUST simuleringene

Grid ble valgt å ligge tett oppunder maksimum gridstørrelse, for det grid som omgir utslippspunktet.

Denne størrelsen påvirker lengden til tidsstegene i simuleringen, og har dermed stor innflytelse på tiden en simulering tar. Tiden som settes ved den enkelte simulering avgjøres i stor grad av vindhastigheten, og synker med høyere vindhastigheter.



Figur 17 viser oversiktsbilde av MUST sitt område nøyaktig slik det ble laget, men proporsjonene er litt misvisende da det er strekt litt i vertikal retning, slik at containerhøydene virker å være for store i forhold til virkeligheten.

Ingen av simuleringene som ble gjort ble kjørt lengre enn til stabil tilstand var nådd.

De fleste simuleringene ligger i området 200–250 sekunder. I disse tallene er stabiliseringstiden medregnet.

Stabiliseringstiden som ble brukt ligger på 30 sekunder. Dette gjelder alle de 19 simuleringene som ble kjørt.

Stabiliseringstiden øker grovt sett ettersom kompleksiteten til geometriene øker. Når ekstern strømhastighet (vindfeltet) øker, vil også mulighetene for at simuleringen blir ustabil øke. Dette skjer også når Pasquill klassen som settes blir mindre stabil.

P.g.a. dette er simulering 681829 blitt simulert med Pasquill klasse F, og ikke D. Når det gjøres simuleringer i FLACS er det enkelte kriterier en er nødt til og følge.

Foruten kravet om at $A_{\text{grid}} < 2 * A_{\text{jet/dif}}$, er det vanlig praksis å strekke gridet, for å få ned antallet gridceller. Det er også viktig for å få en større stabilitet i selve simuleringen, da små grid har lett for å skape ustabilitet. Grensebetingelsenes påvirkning synker jo lengre vekk de er fra det sentrale simuleringsarealet. Maksimum (god praksis) for strekk av grid ligger på 1,2 ganger størrelsen til den foregående cellen. Gridet blir også strekt ved de ytre grensene, for å oppnå større stabilitet og få ned antallet gridceller.

Etter alle simuleringene var gjennomført med fint grid ble de gjentatt med grovt grid. Det ble ikke gjort endringer i parametrene, utenom endring av gridstørrelsen og strekket mellom utslippspunkt og vanlig gridstørrelse. Dette ble gjort for å se om det ga utslag i konsentrasjonene som ble funnet. Det ble brukt en ny versjon av FLACS

9 Statistiske modeller og begrensninger i bruk av feltforsøks- målinger

9.1 Statistiske modeller

Følgende ligninger definerer de statistiske modellene brukt til å evaluere resultatene oppnådd for MUST simuleringene:

- Fraksjon av bias(FB), gjennomsnittelig
- Normalisert kvadrert gjennomsnittlig avvik(NMSE)
- Geometrisk avvik(MG)
- Geometrisk varians(VG)
- Fraksjon på 2(FAC2)

Ligningene for disse er følgende:

$$FB = \left(\frac{\bar{C}_o - \bar{C}_p}{0,5(\bar{C}_o + \bar{C}_p)} \right) \quad (\text{lig.13})$$

$$NMSE = \frac{\overline{(C_o - C_p)^2}}{\bar{C}_o \bar{C}_p} \quad (\text{lig.14})$$

$$MG = e^{(\overline{\ln C_o} - \overline{\ln C_p})} \quad (\text{lig.15})$$

$$VG = e^{\left[\overline{(\ln C_o - \ln C_p)^2} \right]} \quad (\text{lig.16})$$

FAC2=fraksjonen av målinger innenfor avviket: $0,5 \leq C_p/C_o \leq 2$

(lig.17)

Her er C_p konsentrasjon prediket av FLACS, og C_o er den korresponderende observerte konsentrasjonen. Gjennomsnittet for datasettet er \bar{C} , og $\frac{C_p}{C_o}$ er forholdet mellom predikert og observert konsentrasjon.

I tillegg kommer forholdet mellom den største verdi observert og predikert i en stor serie med forsøk. Verdien trenger **ikke** være fra samme forsøk, men tas for hver monitorrad. Denne

metoden har imidlertid en stor svakhet, siden det er få forsøk det opereres med. Av den grunn vil verdiene ikke vil bli lagt særlig vekt på.

En perfekt modell ville ha hatt verdiene 0 for NMSE og FB og verdien 1 for VG, MG og FAC2. Siden atmosfærens natur består av tilfeldige prosesser, og disse ikke kan predikeres spesifikt vil det ikke være mulig å lage en perfekt atmosfærisk spredningsmodell.

Alle 5 måleformene bør alltid brukes sammen og må sees i sammenheng, siden alle har sine styrker og svakheter. Et akseptabelt resultat for en modell har verdier som ligger i områdene:

✚ Gjennomsnittet av bias er innenfor $\pm 30\%$ av gjennomsnitt, ($-0,3 < FB < 0,3$ eller $0,7 < MG < 1,3$)

✚ Den tilfeldige spredningen ligger rundt en faktor på 2 av observert gjennomsnitt og gir verdier for $NMSE < 4$ eller $VG < 1,6$

✚ Predikerte verdi ligger innenfor 50 %, eller det dobbelte av de målte verdiene, altså en faktor på 2. ($0,5 < FAC2 < 2$). Andelen av målinger som skal ligge innenfor denne fraksjonen er minst 50 %.

Dette er retningslinjer som er vanlig å bruke ved modellsammenligninger. Alle verdiene må sees i sammenheng for å kunne trekke en konklusjon.

9.1.1 Statistisk tolkning

For å tolke det normaliserte gjennomsnittlige kvadrerte avvik, NMSE, antar en at gjennomsnittet for observerte konsentrasjoner er det samme som gjennomsnittet av predikerte konsentrasjoner, blir $NMSE=1$, hvis typiske avviket er lik gjennomsnittet. Når $NMSE=4$, er det typiske avviket lik to ganger gjennomsnittet. Ettersom NMSE blir mye større en 1, kan det utledes at distribusjonen ikke lengre er normal, men mere log- normal (for eksempel mange lave verdier og noen få og høye verdier).

Den logaritmiske form til MG og VG kommer av behovet for å kunne jobbe med store spredninger i verdiene eller variansen som det måles på og når forskjellen i målte og predikerte verdier er store.

Gjennomsnittlig geometrisk biasmålinger(MG) kan sees på som forholdet mellom det geometriske gjennomsnittet av C_o over det geometriske gjennomsnittet av C_p . Verdier mindre enn 1 indikerer overprediksjon, og verdier over 1 indikerer underprediksjon.

Geometrisk varians(VG) uttrykker spredningen av en log-normal distribusjon. En VG verdi på rundt 1,6 indikerer en typisk spredningsfaktor på to, mens en spredning på 4 gir VG verdier på 6,8 mellom hvert par av observerte og predikerte verdier. Ved at verdiene blir omgjort til log-verdier, vil ekstremverdiene få et lavere forholdstall enn det de ellers ville fått. Dermed vil vektingen for ekstremverdiene få mindre betydning. En modell som ikke har noen tilfeldig spredning, men lider av en gjennomsnitts under- eller overprediksjon, vil plassere seg et sted i nærheten av parabelkurven. Av den grunn må alle punktene ligge innenfor parabelen.

FB passer til modellsammenligninger fordi den er bundet, symmetrisk og dimensjonsløs. Prediksjoner som ligger innen for det dobbelte eller det halve vil ha verdier for $FB = \mp 0,67$.

De lineære målene FB og NMSE kan få overdrevet betydning ved at verdier som er veldig høye eller lave i forhold til predikerte verdier, får en overdrevet betydning i forhold til den andelen av målinger de utgjør. De logaritmiske målene MG og VG kan gi en mer balansert behandling av ekstremverdier. FAC2 er kanskje den mest robuste måleformen, fordi den ikke legger overdrevet vekt på ekstremverdier, men gir alle målingene samme vekting.

Av overnevnte grunner bør alle disse statistiske målemetodene brukes sammen, for å danne et helhetlig bilde av modellens prestasjoner, og for en balansert beskrivelse av hvor godt en modell gjør det.

9.2 Feltforsøkens begrensninger

Med tanke på datakvaliteten, må valideringsdata møte et høyere krav til kvalitetsstandard enn det et vanlig feltforsøk eller laboratorieforsøk må oppfylle. Dette fordi bruk av enhver data, som en referanse, krever at den er minst så presis som den maksimalt tillatte usikkerheten knyttet til denne modellen. Dette igjen fordi et stort antall testdata kommer fra kombinasjoner av målinger som har usikkerhet knyttet til seg. Når disse blir kombinert vil usikkerheten øke eksponentielt med usikkerhetene til de enkelte målingene, og man risikerer å få introdusert en usikkerhet større enn nøyaktigheten til den gitte målingen, kalt

forsterkning av usikkerhet. Som et eksempel kan man ta MUST- forsøkene som ble gjennomført.

Til målingen av konsentrasjonen er det knyttet flere usikkerheter. Noen av disse er knyttet til volumstrømmen, vindretningen og måleutstyret osv. Når alt dette legges sammen vil det være knyttet en betydelig usikkerhet til selve forsøkets målte konsentrasjon. Dette blir, for vanlige laboratorieforsøk, lett over 20 %. Med tanke på at man da har rimelig god kontroll over miljøet rundt selve forsøket, sier det seg selv at forsøk gjennomført i naturen, eller gjennomført i en by, vil ha en større usikkerhet bundet til konsentrasjonsmålingene. Siden hyppig kalibrering av utstyr er praktisk vanskelig gjennomførbart og tidkrevende, må det altså påregnes at slike forsøk har en høyere usikkerhet bundet til seg. Hvis det i tillegg er gjort antagelser på grunnlag av for eksempel målinger gjort lokalt, blir usikkerheten desto større. Hvis det for eksempel måles på forurensning fra biltrafikk, og det er gjort antagelser på bakgrunn fra statistiske opplysninger (om antall biler som vil passere, samt på hvor stort utslipp hver bil har), øker usikkerheten enda mer. I mange eksisterende tilfeller er viktige grensesjiktforhold som bakgrunnskonsentrasjoner eller til og med vindretning ikke målt lokalt engang. De er utledet fra globale forhold, og kan dermed vise seg ikke engang å være riktige.

10 Resultater

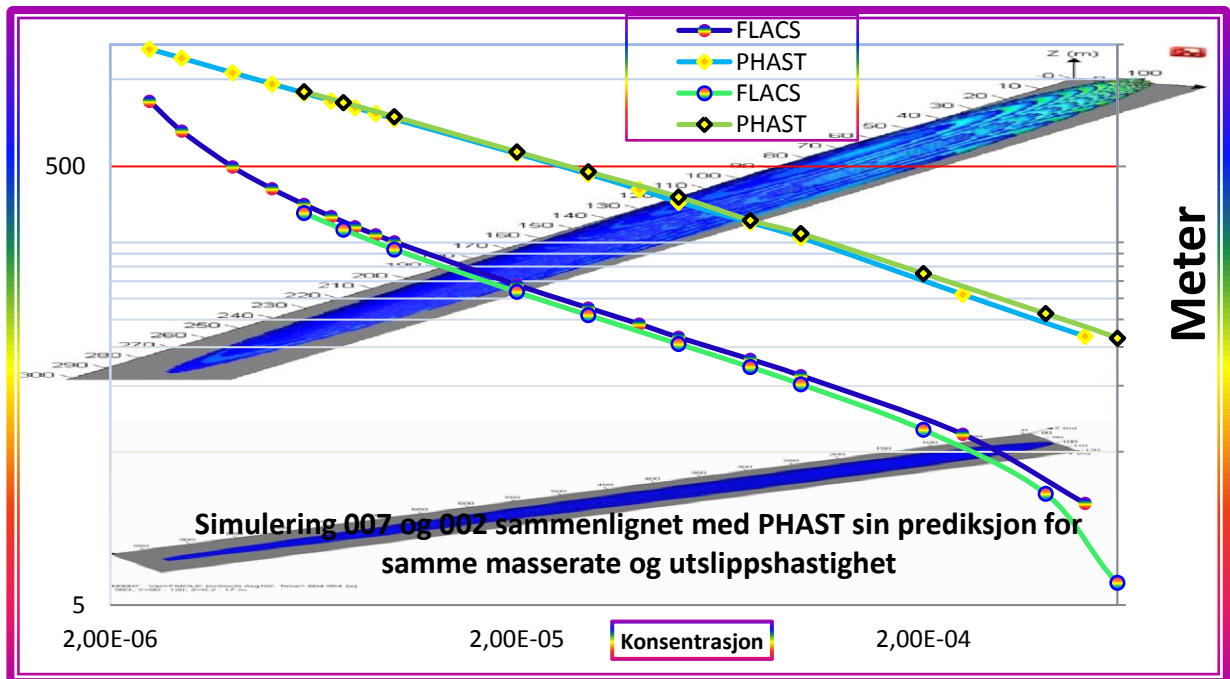
Dette kapitlet vil ta for seg simuleringer i PHAST og FLACS uten geometri, for å se hvordan de predikerer lengdene for konsentrasjonsgrenser, og derav turbulensnivået.

Deretter etter vil resultatene fra MUST simuleringene bli presentert for å vise at FLACS kan håndtere geometri. Tilslutt vil resultatene fra PHAST og FLACS for horisontalt sammenstøt bli presentert.

10.1 Resultatdel for sammenligningene mellom PHAST og FLACS

I denne delen blir resultatene for sammenligningen mellom PHAST og FLACS presentert. Fra kan en se at PHAST og FLACS har ganske vesentlige forskjeller i de lengdene som predikeres for utslipp med lav masserate og liten utslippsfart. Ellers er temperatur på gassen den samme

for begge modellene, etter utslipp til atm. trykk, samt temperaturen til atm. Foruten dette har alle utførte simuleringene lik ruhetslengde, z_0 , og vindfart. Simuleringene til PHAST har i tillegg en relativ fuktighet på 0,7. Dette har ingen signifikant innvirkning på sperningslengdene.



Figur 18 viser plott av konsentrasjonsprofilen for utslipp på 11 g/s med en hastighet på 0,076 m/s. Begge aksene er logaritmiske, og en ser at PHAST sin graf blir tilnærmet en bein strek, mens FLACS sin bøyer seg når en nærmer seg utslippspunktet, og ved den helt siste delen av spredningen. Simulering 007 har lavere vind en 002, henholdsvis 2,5 m/s og 3 m/s . diagramområdet(FLACS).

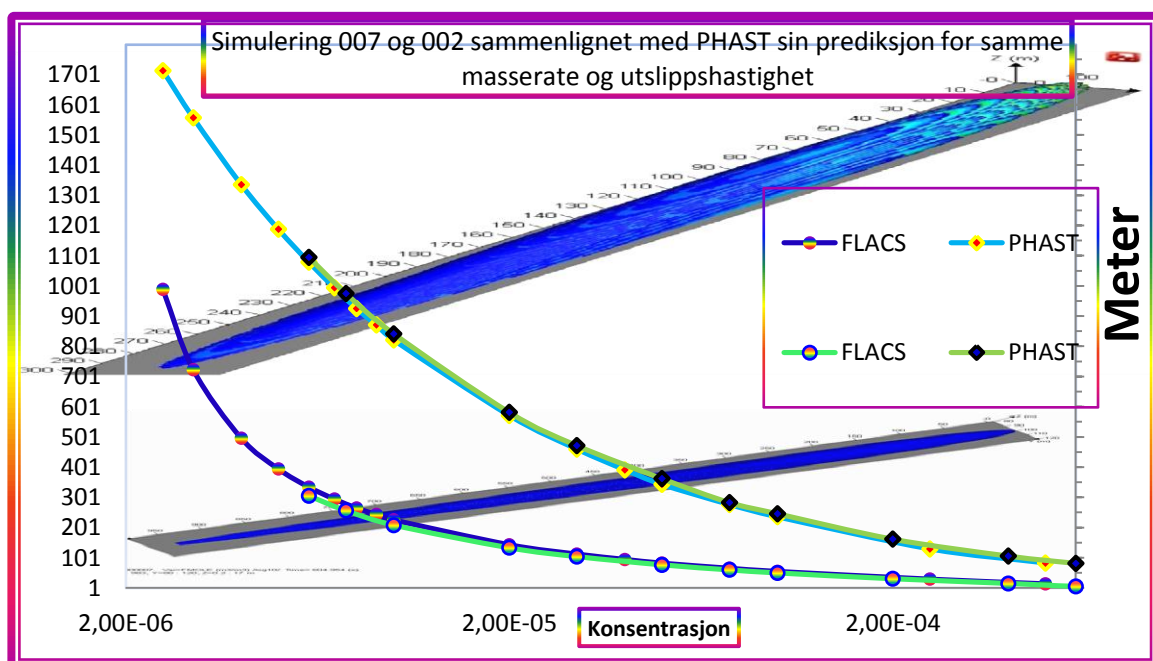
Som man kan se fra er det vesentlige forskjeller i turbulensnivået for disse to modellene. FLACS sitt turbulensnivå varierer ved utslipps start, og endrer seg frem til rundt 70 meter. Så begynner det å endre seg ved ca. 400 meter igjen. Mellom ca. 70 meter og ca.400 meter holdes det noenlunde konstant. Dette influerer på hvor fort gassen uttynnes, og da på spredningslengdene som blir målt ved en gitt konsentrasjon.

For PHAST er grafen en ben linje fra utslippsstart til konsentrasjonsmålingene slutter. Hvis en ser på Figur 19 kan en lettere se at FLACS sin lengde øker mer en PHAST for den siste delen av spredningens forløp. Dette betyr at PHAST har mer turbulens i denne delen en det FLACS opererer med. Ved startpunktet til grafene kan en merke seg at PHAST angir en lengde som er ca. 19 ganger større en det FLACS sin angitte lengde for den første konsentrasjonsmålingen ved 1 ‰. Dette betyr at FLACS må ha et betydelig høyere turbulensnivå i starten av simuleringen, siden utslipper er så mye mer uttynnet en PHAST sitt ved den samme lengden (3m). Phast har ca. samme konsentrasjon ved 56 meter som FLACS har ved ca.3 meter. Under disse to simuleringene var utslippet RTI satt til 0,05 i FLACS. Pasquill kl. F ble brukt og ruhets lengden, z_0 , var satt til 3 millimeter. Dette betyr at det er lite som skaper turbulens under simuleringen/spredningsforløpet, annet enn overgang (transition) til passiv spredning, som starter umiddelbart etter utslippspunktet, da vindhastigheten lå på 2,5 og 3 m/s for disse to simuleringene.

Utslipet er i FLACS satt med en funksjon som heter diffusjon.

Ved en anledning ble det brukt fordampning fra dam i PHAST, uten at dette endret på resultatet for spredningslengden til PHAST.

Siden utslippet skjer ved en hastighet som ligger langt under den omliggende vindhastigheten,



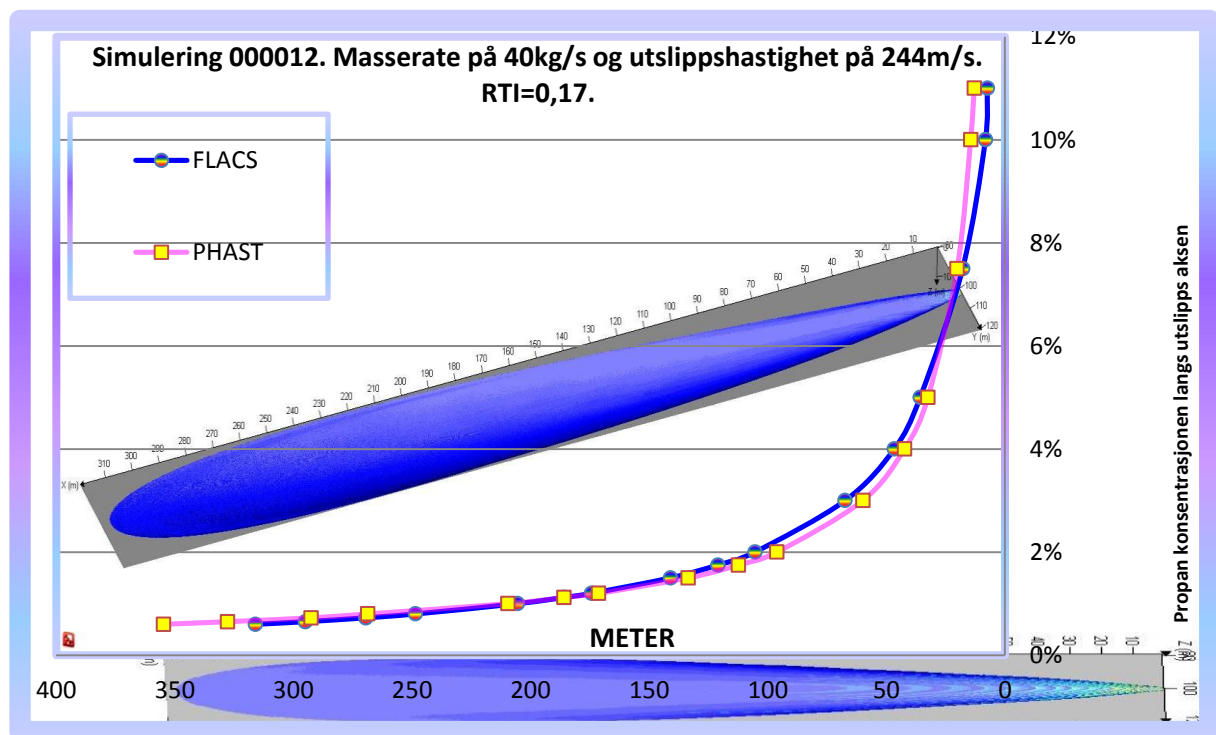
Figur 19 viser plott av konsentrasjonsprofilen for utslipp på 11g/s med en hastighet på 0,076 m/s.. Simulering 007 har lavere vind en 002, henholdsvis 2,5 m/s og 3 m/s og det er disse to vi ser visualisert i diagramområdet (FLACS), og i forklaringsruten (PHAST). En kan se at det er til dels store forskjeller i lengdene som er prediker av PHAST og FLACS

vil overgangsfasen starte ved utslippspunktet. Den vil ikke opptre som en tunggass selv om det er propan og propylen som er brukt under simuleringene, da det er for høy vindhastigheter til at den vil legge seg ved bakkenivå. Dette er undersøkt av Bildtoft i 1995(Biltoft2001) for propylengass, ved utslippshastigheter lik den under disse to simuleringene.

Ved de to siste målingene begynner FLACS å lukke litt av det store gapet i lengdene, og her har PHAST, for første gang under spredningsforløpet, et høyere turbulensnivå enn FLACS har.

Ser en på Figur 20 kan en tydelig se hvordan disse predikasjonene stemmer mye bedre overens med lengdene som de to modellene predikerer. Her er det i all hovedsak tensorspenninger mellom atmosfæren og utslippet som skaper turbulensen. En kan gjerne merke seg at grafene krysser 2 ganger. Ved starten er (lengdene) predikasjonene til FLACS kortere ved samme konsentrasjon. Rundt en lengde på 30 meter og en konsentrasjon på 6,5 % blir FLACS-lengdene lenger, før PHAST tar igjen FLACS ved ca.220 m og ved en konsentrasjon på ca.1 %. Fra dette punktet og ut øker PHAST predikasjonene på lengden vs. konsentrasjon i forhold til FLACS. Dermed har PHAST det høyeste turbulensnivået ved mellomdistansen, mens FLACS har høyest turbulensnivå ved begynnelsen og slutten.

Tilslutt kan en se på Figur 32 som viser 2 simuleringer av FLACS og to av PHAST. Hvis en kun



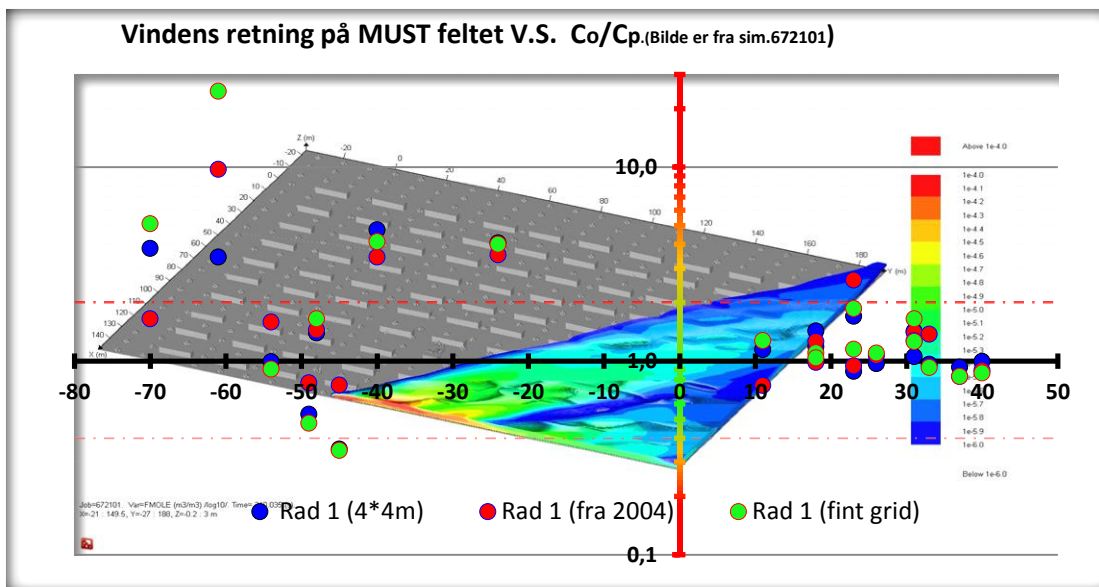
Figur 20 viser grafene til PHAST og FLACS for er utslipp på 40kg/s og med fart på 244 m/s, ved 2m/s ved 10 m høyde og Pasquill klasse F. Ruhets lengden, z_0 , er på 3 millimeter

ser på den svarte og oransje grafen, kan en se at grafene så å si sammenfaller for lengder opp til 300 meter og konsentrasjonsverdier ned til 0,55 %. Det er ingenting som tyder på at denne trenden er i ferd med å stoppe opp. Dette er for masserate på 7,767 kg/s og utslippsfart på 80 m/s fra 1,5 meters høyde. Pasquill kl. F og ruhets lengde, z_0 , er på 30 millimeter. En hovedtyngde av simuleringer er gjort ved dette utslippsregime, og man kan se at for denne utslippsraten er det et likt turbulensnivå for disse to simuleringene, da lengdene holder seg mer eller mindre konstant, over hele spredningslengden.

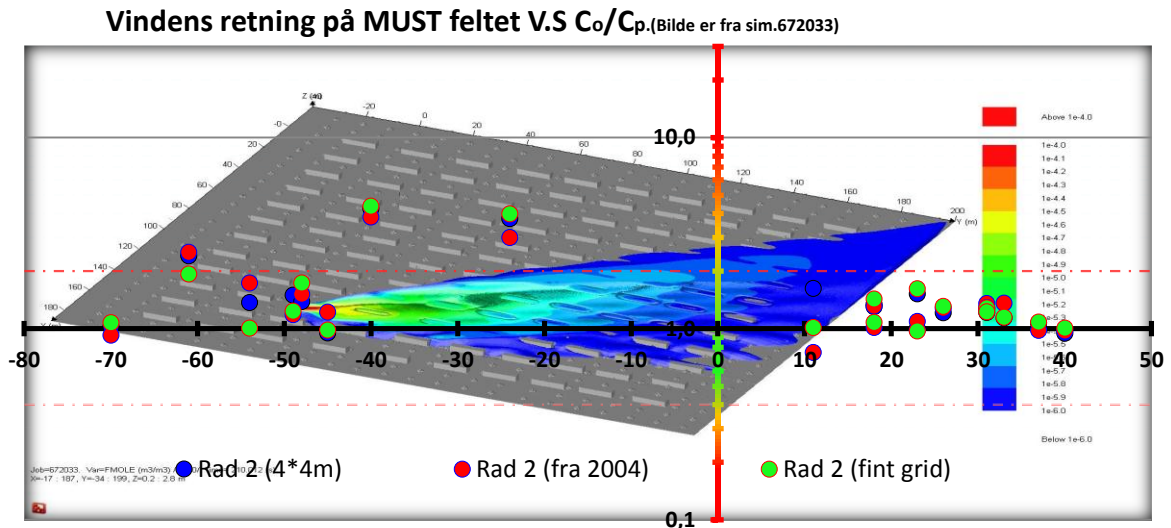
11 Andre resultater

Resultatene en er kommet frem til vil bli presentert i følgende rekkefølge. Først MUST simuleringene, for og vise at FLACS kan håndtere geometri. Deretter sammenlignes lengder predikert av FLACS og PHAST uten geometri for og se på lengdene dette gir. Tilslutt blir resultatene for utslipp med horisontalt sammenstøt presentert.

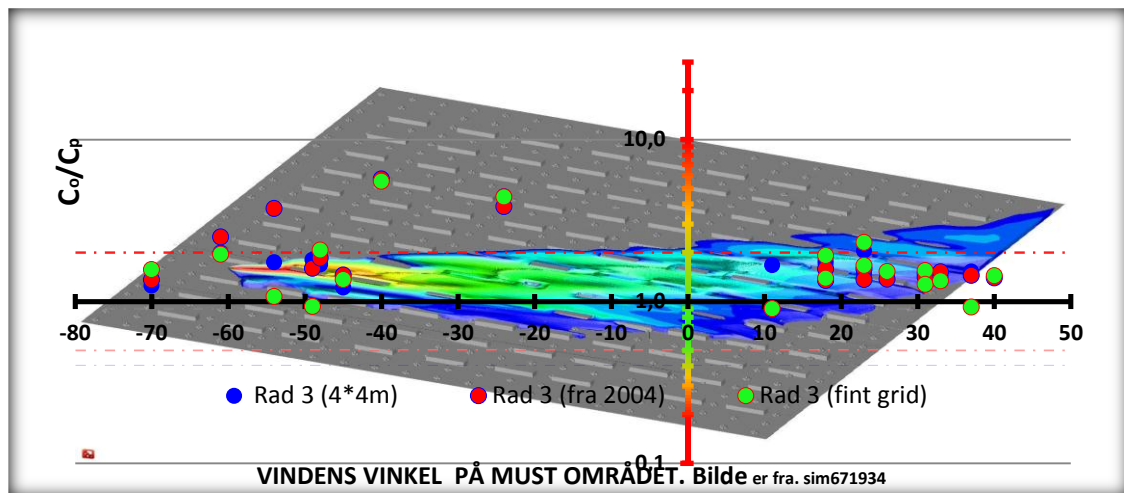
11.1 MUST resultater



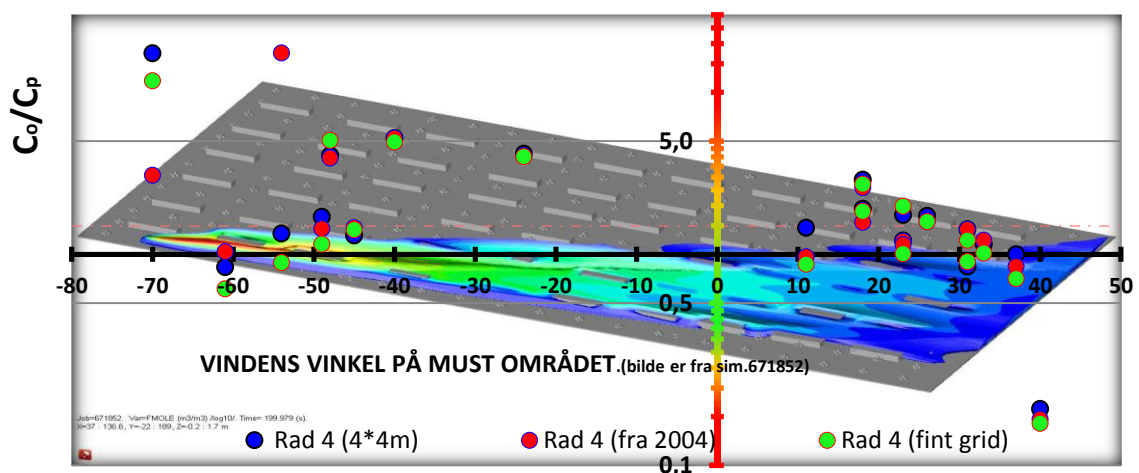
Figur 21 Vindens vinkel inn på mustfeltet V.S. observerte og predikerte verdier for monitorrad 4



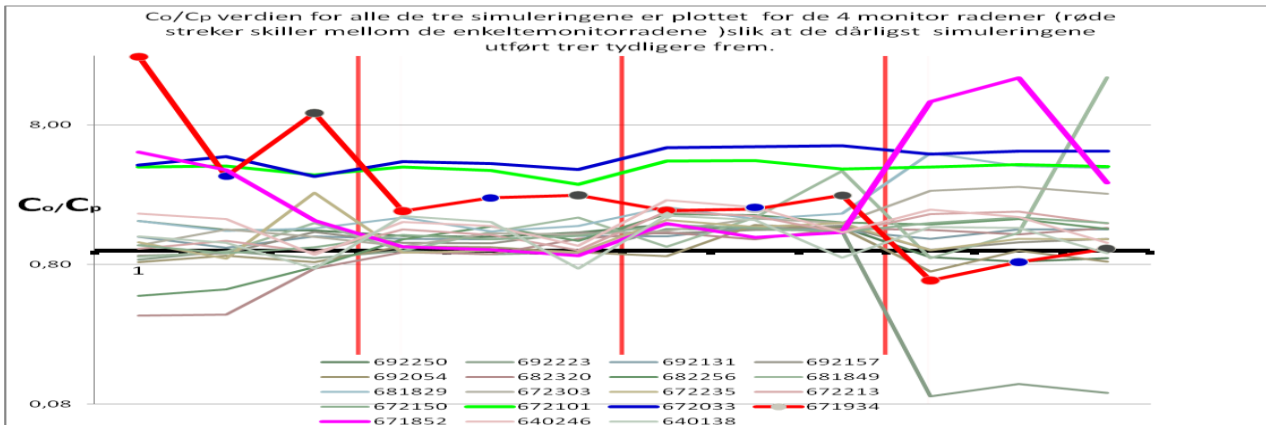
Figur 22 viser vindens vinkel inn på MUST V.S. Co/Cp for Monitorrad 2



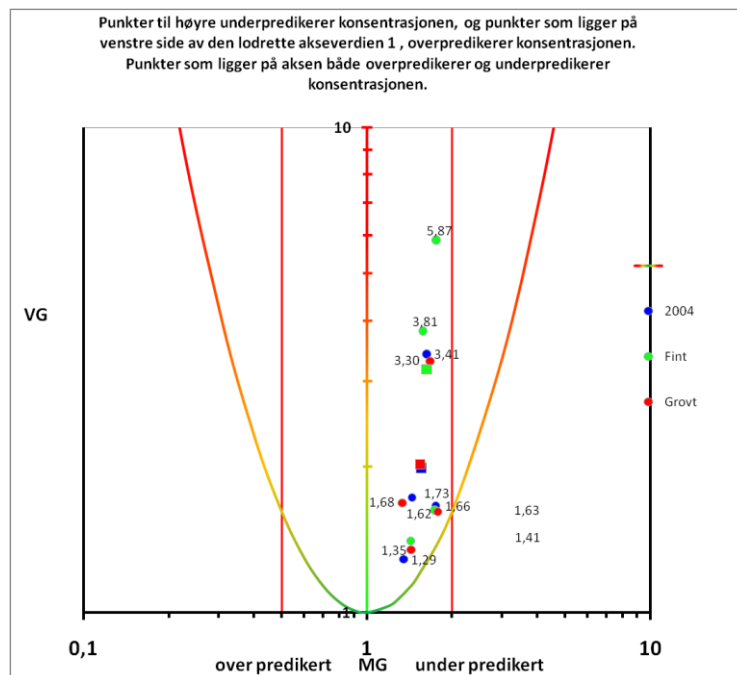
Figur 23 viser vindens vinkel inn på MUST V.S. Co/Cp for Monitorrad 3



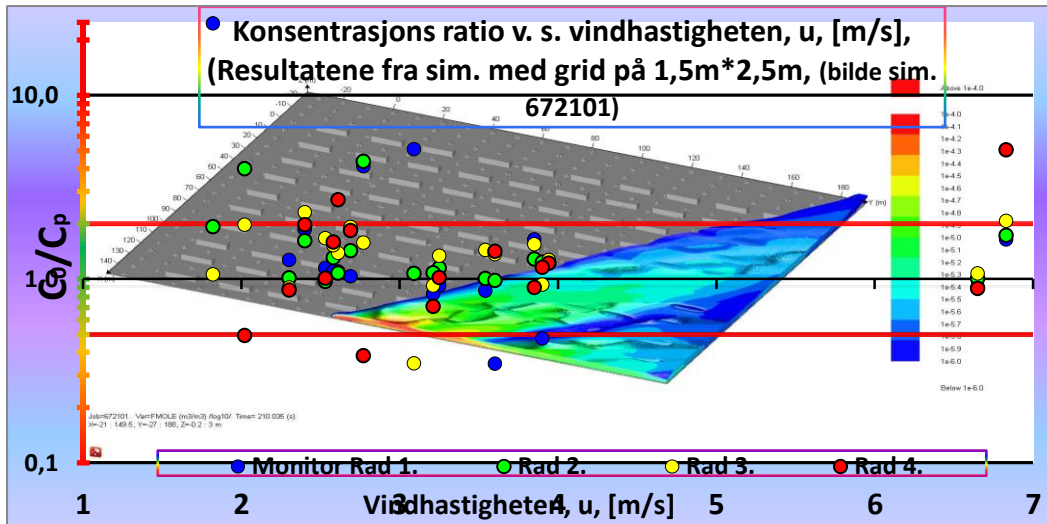
Figur 24 viser vindens vinkel inn på MUST V.S. Co/Cp for Monitorrad 3



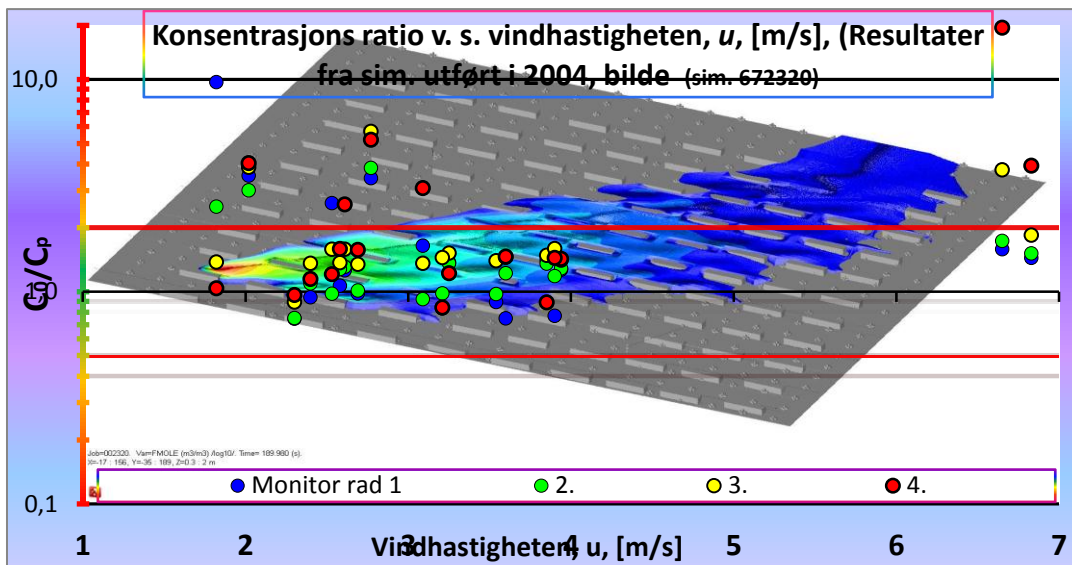
Figur 25 viser Co/Cp verdiene for de 3 simuleringene, 3 for hver monitorrad, der de tre røde, vertikale strekene marker slutten for monitorradene 1, 2 og 3. De røde(fint grid), blå (grovt grid) og grå(2004) runde punktene på den røde grafen viser, hvis en trekker en normal gjennom x-aksen og det enkelte punkt, den vertikale aksens hvor denne simuleringsserie har sitt sett av verdier for resten av de 18 simuleringene, langs den monitorrad punktet ligger innenfor.



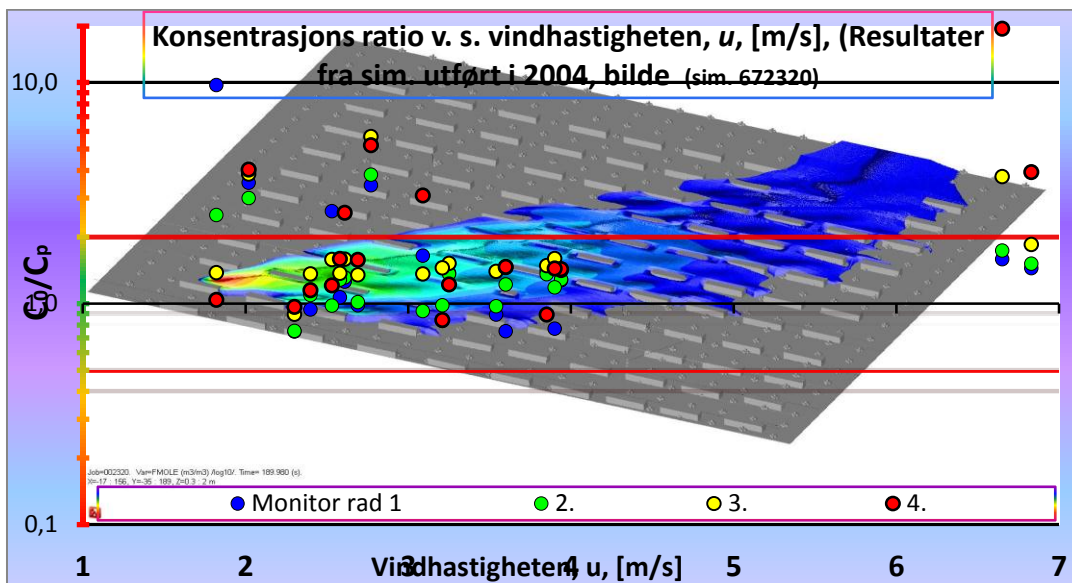
Figur 26 viser verdiene for hver monitorrad(runde punkter) og gjennomsnittet over alle de fire radene(firkantet punkt). Firkant med samme farge som de runde punktene hører sammen. De to røde strekene angir hvor grensen for et avvik med en faktor på to går. Verdier som står alene eller over punkter tilhører resultatene for fint grid. Verdier som står på venstre side av punktet er grovt grids resultater. Verdier til høyre for punkt er for 2004



Figur 27 viser vindhastighet V.S. C_o/C_p for simuleringer med fint grid



Figur 28 viser vindhastigheten V.S. C_o/C_p for simuleringer med grovt grid



Figur 29 viser vindhastighet V.S. C_o/C_p for simuleringer fra 2004

De to røde stiplede punktene og strekene annen om en ann i Figur 21 til Figur 24 er linjene som markerer når predikasjonen er utenfor med en faktor på 2. Dette gjelder også for de heltrukne røde linjene på hver sin side av x-aksen for, Figur 27 og Figur 29.

For Must simuleringene fikk man gode resultater, målt opp mot kriteriene for modeller som ble skissert i foregående kapitel. For simuleringer med fint grid var ca.74 % av verdiene innenfor en faktor av to. For simuleringer utført med grovere grid, var FAC2 verdiene på ca.79 %, noe som er bedre enn de verdier predikert i 2004, som er ca.76 %, d.v.s. en forbedring på ca.4 % for den mest robuste måleformen.

Tendensen for FLACS er å underpredikere konsentrasjonen. Dette gjelder for alle de 4 monitorradene, noe som må sies å være uheldig. Det er bedre og overpredikere.

Underpredikasjon skaper sikkerhetsmessig usikkerhet hvis det dreier seg om brennbart eller giftig materiale.

Det ser ikke ut til å være noen klar sammenheng mellom høy vindhastighet og predikasjonsavvik (Figur 27-Figur 29). Siden det bare er to simuleringer med vindhastigheter over 4 m/s er det for lite data til å kunne trekke noen konklusjoner. For disse to simuleringene er avviket C_o/C_p en anelse høyere enn for datasettet som helhet. Dette forholdet er på ca.2,25 mens det for hele datasettet er det på ca. 2. Siden det er så få simuleringer er det ikke mulig å si om dette er en generell trend, eller om det er en tilfeldighet.

For vind som kommer inn med en vinkel mellom ca.-45° til -55° fra venstre(sør sørvest) på MUST feltet, er det stort sett meget bra resultater. Det er en måling i første monitor rad som overpredikerer (fint grid), og en i 3de rad (2004) som underpredikerer. Resten av verdiene er innenfor en faktor av 2, for de 3 første radene. For siste rad er alle verdiene utført med fint grid innenfor faktor av to, mens 2/3 av simuleringene fra 2004 er utenfor med mer enn en faktor av 2. Grovt grid ligger imellom disse to ytterpunktene med 1 utenfor med mer enn en faktor av to (se Figur 21-Figur 24).

For de to simuleringene som ligger på -0° og -45° er alle verdiene fra alle simuleringene utenfor, og underpredikerer med en faktor rundt 3-5 for alle simuleringene og for alle radene med monitorer.

For de to siste simuleringene som på MUST-feltet har vindvinkel -60° til -70° , er det varierende resultater. Grovt sett kan en si at om lag halvparten av verdiene er innenfor en faktor av 2.

Hvis en ser på parabelkurven (se Figur 26) får man et mer helhetlig bilde av hvordan en modell har gjort det. Alle verdiene i et slikt diagram er like viktige.

Verdiene som står til høyre uten punktering er de beste verdiene oppnådd med fint grid. Ellers står verdier for simuleringer som ble utført i 2004 med verdi på høyre side av de blå punktene sine, og grovt grid sine verdier på venstre side av de røde punktene. Firkantene er gjennomsnittsverdiene over hele datasettet, og er bunnet til de forskjellige simuleringene med samme farge som de runde punktene representerer.

Totalt sett gjør simulering med grovt grid det like bra som simuleringene utført av en ekspert på FLACS simuleringer og programmet som sådan (simuleringer fra 2004). Simuleringene utført med grovt grid har en liten bedring i FAC2 verdien, og en kan på det grunnlag si at disse (simuleringene utført med grovt grid) er de med best resultat.

Hvis en antar at simuleringsprogrammet er forbedret de siste årene har presisjon på predikeringene økt.

En kan merke seg at simuleringer utført med fint grid med strekk på 1,2 mellom utslippspunktet og vanlig gridstørrelse, har prediksjoner som er svakere for de nærmeste monitorradene, enn det med grovt grid. Det er også svakere sml. med der det er brukt smooth funksjon mellom utslippspunkt og vanlig grid størrelse. Fint grid gir bedre resultater for de to siste monitorradene. Dette kommer av at strekket på 1,2 er for stort og gjør at utslippet blir for fort uttynnet i begynnelsen av simuleringen.

Det ideelle hadde vært å bruke grid med smooth funksjonen og fin gridoppløsning. En hadde da etter all sannsynlighet fått resultater som hadde vært noe bedre enn de som ble oppnådd i 2004, og ikke en marginal forbedring.

De fire simuleringene som kommer fra 0° til -45° og fra -60° til -70° , er de som trekker ned verdiene for datasettet som helhet. (se Figur 25). Alle disse har store feil i de predikerte verdiene, spesielt for monitor rad 1. Simuleringene 672101 og 672033 har de absolutt dårligste verdiene, der beste predikasjon bommer med en faktor på 3,77. Dette gjelder for begge simuleringene utført under oppgaven.

Disse fire simuleringene trekker ned resultatet som helhet mye. De har et gjennomsnitt i avviket på 5,96 (monitorradene1-4). Da er ikke simuleringene utført i 2004 tatt med i beregningene. Avviket for 2004 simuleringene er noe lavere med et gjennomsnitt på 3,46. De eneste fellestrekkene for alle disse fire simuleringene er, bortsett fra vindretningen (sørøst), at utslippet skjer mellom langsidene av to containere. Farten ligger for de fire overnevnte mellom 1,82 m/s og 3,09 m/s og utslippshøyden er for to 0,15 meter (672101 og 671852) og for de to resterende 1,8 meter. Det er vanskelig å se noen sammenheng mellom disse faktorene. Hvis de fire hadde vært fjernet fra datasettet ville forholdet mellom predikerte og observerte verdier for FAC2, NMSN, FB, NMSE, MG og VG vært vesentlig bedre, som en kan se

Tabell 1 Verdier en ville fått uten simuleringene 672101, 672033, 671934 og 671852 som var de dårligste predikeringene.

1,31	1,67	0,15	0,14	Gjennomsnittsverdiene for MG, VG, FB, NMSE over 4 rader, uten simuleringene 672101, 672033, 671934 og 6711852
1,28	1,35	0,27	0,29	
1,20	1,40	0,21	0,28	
MG	VG	FB	NMSE	
FAC2	FAC2	FAC2	FAC2	Gjennomsnittsverdi for FAC2:
93 %	100 %	93 %	73 %	90 %
100 %	100 %	93 %	80 %	93 %
87 %	100 %	87 %	80 %	88 %

En ser at alle verdier har sunket mye. Predikeringene er tilnærmet optimale. Avviket er sannsynligvis ikke langt unna den usikkerhet som ligger i målingene.

Det store avviket i den første konsentrasjonsmålingen for disse simuleringene har en sannsynlig årsak i at vind kommer i en konstant retning i simulering, noe den ikke gjør i virkeligheten. Vindretningen brukt under simuleringene er et gjennomsnitt av vindretningen for de fire tårnene. Siden det er ca.100 meter mellom disse, er det sannsynlig at vinden er litt forskjellig p.g.a. fluktuasjoner. Dermed vil monitoren som står nærmeste utslippet lett få registrert litt andre verdier enn det de øvrige monitorene har. Foruten dette er det ikke mulig å legge inn de reelle målingene som ble gjort. Dermed blir det en midling av verdiene. Dette gjør at vindkast og andre små avvik midles vekk, til fordel for en jevn vindretning som er konstant. Dette kan gi store utslag i konsentrasjonene, da små avvik i vindretningen vil kunne forårsake at propylenet kommer i kontakt med den første sensoren som måler den observerte verdien,

fordi denne ligger svært nært utslippskilden. Propylenet er her ikke blitt uttynnet i særlig grad. Som beskrevet i kapitel om tunggasspredning er konsentrasjonsgradienten høy mellom utslippets sentrale kjerne og den omliggende atmosfæren rett ved utslippspunktet, for deretter å flate ut.

Hvis en studerer simuleringene som dette gjelder, vil en se at den monitoren som måler den første konsentrasjonsmålingen, *ligger akkurat i grensen for hvor konsentrasjonsmålinger registreres*. Hadde denne sensoren blitt *flyttet 1-2 meter hadde målingene blitt betraktelig høyere*. Dette kunne kanskje lukke det meste av gapet som skiller predikert og observert verdi. Vindretningen i disse simuleringene tyder på at de ligger akkurat slik til at monitoren ikke fanger opp de høyeste verdiene, da de neste radene predikeres betraktelig bedre enn den første raden.

Feiltolkning av data er også en mulig feilkilde. Når mennesker er involvert vil det alltid skje vurderinger eller tolkninger som pr. definisjon er subjektive.

Siden simuleringene utført med grovt grid er de simuleringene som har gjort det best, samt at dette er simuleringene som følger de krav som er satt for god bruk, tas disse som utgangspunkt når resten av kriteriene for modellprestasjon skal vurderes.

For å repetere kriteriene:

- ✚ Gjennomsnittet av bias er innenfor $\pm 30\%$ av gjennomsnitt, ($-0,3 < FB < 0,3$ eller $0,7 < MG < 1,3$)

- ✚ Den tilfeldige spredningen ligger rundt en faktor på 2 av observert gjennomsnitt og gir verdier for $NMSE < 4$ eller $VG < 1,6$

- ✚ Predikerte verdi ligger innenfor 50 %, eller det dobbelte av de målte verdiene, altså en faktor på 2. ($0,5 < FAC2 < 2$). Andelen av målinger som skal ligge innenfor denne fraksjonen er minst 50 %.

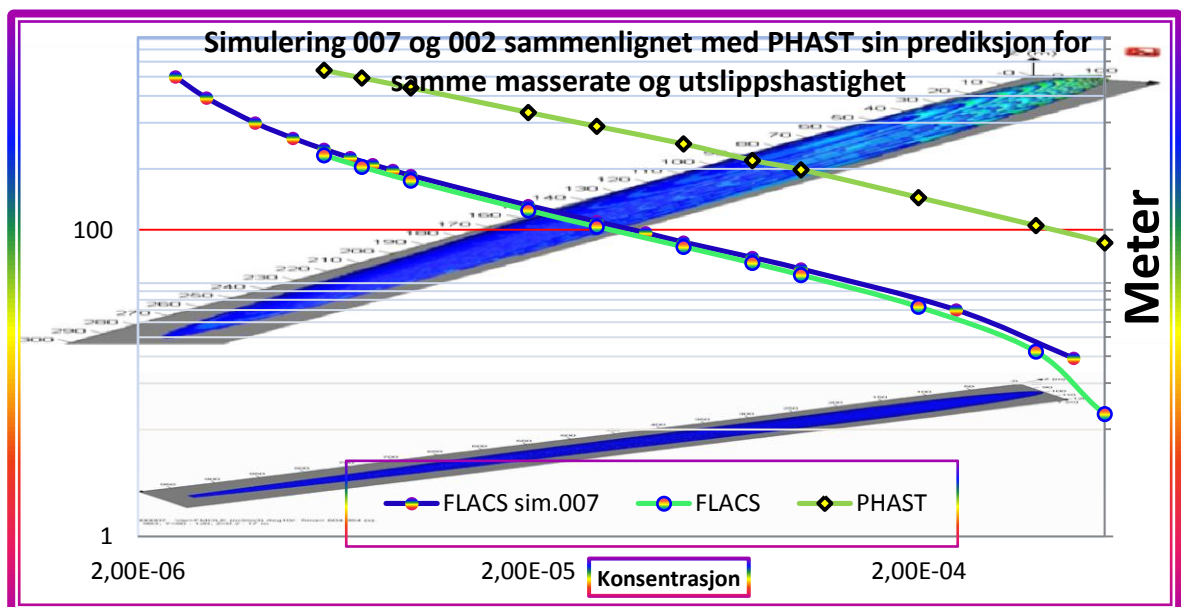
For NMSE-verdi satt som grense for hvor stor spredning som er tillatt og for en akseptabel modell er grensen satt til 1,5. Det oppnådd resultat for grovt grid er på 1,37, den er dermed innenfor denne verdien, og VG trenger dermed ikke være innenfor 1,6

Siden FAC2 verdien er så pass høy, er dette tilstrekkelig til å si at modellen har gjort det bra, uansett hva de andre verdiene måtte vise, fordi 4 av 5 er innenfor en faktor av 2 i avvik av de observerte verdiene.

En kan dermed konkludere med at FLACS klarer å håndtere geometri på et akseptabelt nivå, målt opp mot kriterier satt av Chang og Hanna (2004) for gode modellprestasjoner.

11.2 Resultatdel for sammenligningene mellom PHAST og FLACS uten geometri

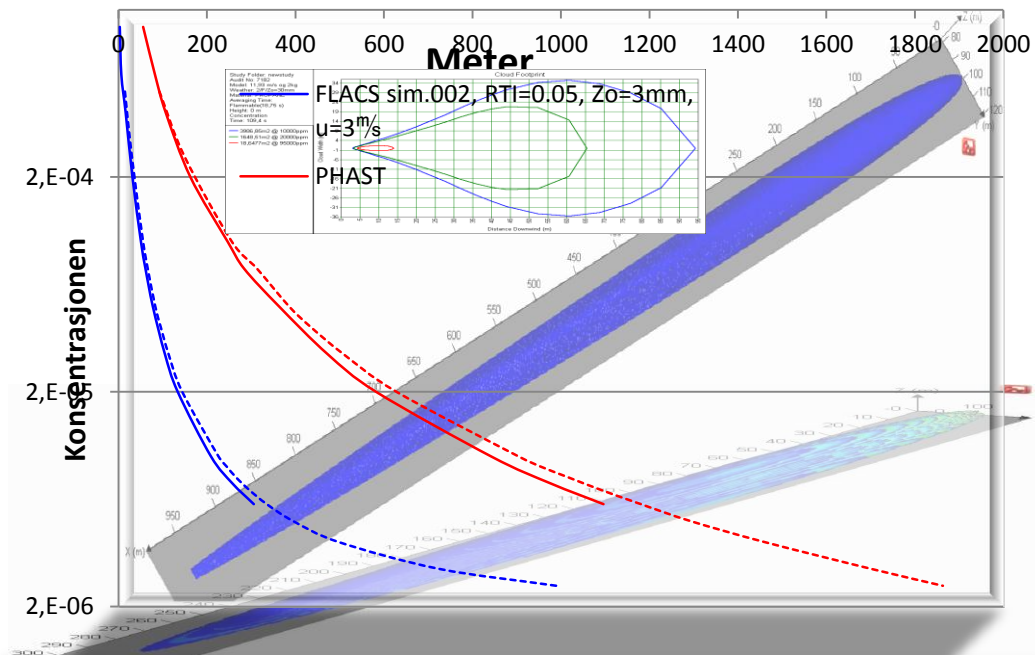
I denne delen blir resultatene for sammenligningene mellom PHAST og FLACS presentert. Fra Figur 19 kan en se at PHAST og FLACS har ganske vesentlige forskjeller i de lengdene som predikeres for utslipp med lav masserate og liten utslippshastighet. Ellers er temperatur på gassen den samme for begge modellene, etter ekspansjon til atm. trykk. Foruten dette har alle



Figur 30 Sammenligning av lengder predikert med FLACS og PHAST for utslipp med en masserate på 0,011 kg/s og utslippshastighet på 0,076 m/s, fra 1 meters høyde. Vindhastigheten er 1,5 m/s (ved 10 m høyde) bakfra, og aerodynamisk ruhetslengde, z_0 , er 3 mm. Figur er produsert ved hjelp av Flowvis (en del av FLACS). Figurene i forklaringsruten er en del av den visuelle rapporten produsert av PHAST.

simuleringene som er utført lik ruhetslengde, z_0 , og vindfart. Simuleringene til PHAST har i tillegg en relativ fuktighet på 0,7, som er standardverdien programmet kommer med. Dette har ingen signifikant innvirkning på spredningslengdene.

Som man kan se fra **Error! Reference source not found.** er det vesentlige forskjeller i turbulensnivået for disse to modellene. FLACS sitt turbulensnivå varierer ved utslippsstart, og endrer seg frem til rundt 70 meter. Så begynner det og endre seg ved ca. 400 meter igjen. Mellom ca. 70 meter og ca. 400 meter holdes det noenlunde konstant. Dette influerer på hvor fort gassen uttynnes, og da på spredningslengdene som blir målt ved en gitt konsentrasjon.



Figur 31 viser konsentrasjonsprofilen for FLACS og PHAST for to simuleringer med masserate på 11 g/s

For PHAST er graten en ben linje fra utslippsstart til konsentrasjonsmålingene slutter, hvis en bruker en log profil langs begge aksene. Hvis en ser på Figur 19 kan en lettere se at FLACS sin lengde øker mer en PHAST for den siste delen av spredningens forløp. Dette betyr at PHAST har mer turbulens i denne delen en det FLACS opererer med. Ved startpunktet til grafene kan en merke seg at PHAST starter på en lengde som er ca. 19 ganger større en det FLACS' startlengde er for den første konsentrasjonsmålingen som er ved 1 ‰. Dette betyr at FLACS må ha et betydelig høyere turbulensnivå i starten av simuleringen, siden utslippet er så mye mer uttynnet enn PHAST sitt ved den samme lengden (3m). Phast har ca. samme konsentrasjon ved 56 meter som FLACS har ved ca.3 meter.

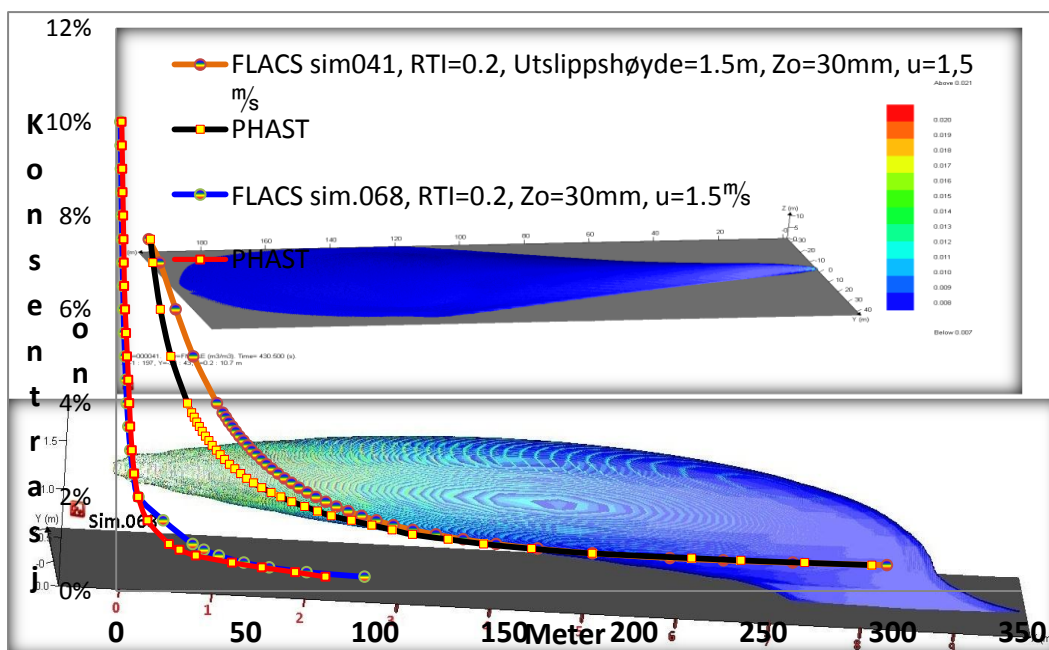
Under disse to simuleringene var utslippets RTI satt til 0,05 i FLACS. Pasquill kl. F ble brukt og ruhetslengden, z_0 , var satt til 3 millimeter. Dette betyr at det er lite som skaper turbulens under simuleringen/spredningsforløpet, annet enn til passiv spredning som starter umiddelbart etter utslippspunktet. I tillegg er ruhetslengden, z_0 , med på å skape turbulens, kvantifisert ved friksjonsparametere, u^* , som er på henholdsvis 0,08 m/s og 0,1 m/s i FLACS. Dette tilsvarer forskjellen i vindhastigheten for disse to simuleringene. Simuleringen 007 har utslippsretning som er vertikal, mens 002 er horisontal. Siden utslippsfarten er så liten får dette minimalt å si på spredningsforløpet, da all kinetisk energi er forsvunnet få titalls cm etter utslippspunktet.

For PHAST, som har en standardverdi for minimums utslippshastighet på 0,1 m/s, som er litt raskere en den egentlige utslippshastigheten, ble det brukt fordampning fra dam (for simuleringen 007), uten at dette endret på resultatet for spredningslengden, som ble den samme som ved valg av brukerdefinert kilde. Da dette ikke endret lengden ble det ikke gjort for det andre utslippet.

Da utslippet skjer ved en hastighet som ligger langt under den omliggende strømningshastigheten (vindfeltet), vil overgangsfasen starte ved utslippspunktet. Utslippsraten er så liten at utslippet ikke vil opptre som en tunggass, selv om det er propan og propylen som er brukt under simuleringene, da det er for høye vindhastigheter til at den vil legge seg ved bakkenivå. Dette er undersøkt av Bildtoft for propylengass, ved utslippshastigheter lik den under disse to simuleringene og rundt samme masserate (Bildtoft 1995). Dermed er det en svakhet at PHAST behandler dette som en tunggass. Dette kan en se fra spredningsdelen av rapporten, hvor senterhøyden er null etter ca. 7 m, noe som må sies og være feil, da Bildtoft fastslo at dette ikke ville skje ved vindhastigheter over 1m/s.

For sim.007 blir det ikke oppgitt konsentrasjoner og lengder m.m. etter ca.1 km og konsentrasjoner på 9 ppm. Spredningsresultatene ble avsluttet når gasskyen var kommet opp i 1,8 m/s (PHAST). Dette betyr at spredningsforløpet først kom opp i det ytre vindfeltet etter 1 km (vindprofilen($u = \frac{0,08}{,4} \ln \left(\frac{10}{0,003} \right) = ca, 1,8m/s$)). En kan se av spredningsresultatene til PHAST at det kan virke som det behandles som tunggass, men finner det lite sannsynlig at et utslipp på 11 g/s er stort nok til å kunne fremvise tunggassegenskaper ved et slikt ytre vindfelt. Det naturlige ville være at gassen blander seg så mye med luften i overgangsfasen at den blir en del av denne. Tensorspenningene som oppstår på grunn av fartsforskjellene vil lage såpass mye turbulensvirvler at den vil blande seg relativt godt med luften, utligne forskjeller i tetthet og bli en integrert del av luften.

En antar at dette må ligge i hvordan programmene vurderer turbulensen i overgangsfasen fra utslippet forlater utslippåpningen til en regner det passive spredningsforløpet for inntruffet. Den passive spredningen er, for den simuleringen som gir den laveste lengden, ikke inntruffet når siste måling starter. Denne delen av spredningsforløpet må i PHAST være gitt en lavere turbulens, og da også innblandingsrate av luft, enn det FLACS har. Utover i spredningsforløpet bare øker lengdeforskjellen mellom disse to simuleringene, men den forholds vise forskjellen minsker. D.v.s. at turbulensforskjellen synker, selv om det blir lengre avstand mellom dem.



Figur 32 viser plott av konsentrasjon vs. lengde for simulering 041. Masserte på 7,767kg/s og fart 80/s. Resten av verdiene står i diagramforklaringen. Bildene er fra simulering 041 og 068 visualisert med flowvis i FLACS og den visuelle delen av PHAST sin rapport.

Ved de to siste punktene (og i alle fall ved det siste punkt) er dette forholdet snudd og PHAST har for første gang en lavere innblandingsrate. Nå er uttynningen som har skjedd så stor at det kun er snakk om mellom 10-2,5 ppm. På slutten av målingene (punktene på grafene) begynner FLACS å lukke litt av det enorme gapet i lengdene, og her har PHAST for første gang under spredningsforløpet et høyere turbulensnivå enn FLACS.

Ser en på Figur 32 kan en tydelig se hvordan disse resultatene stemmer mye bedre overens med lengdene som de to modellene predikerer. Her er det i all hovedsak tensorspenninger mellom atmosfæren og utslippet som skaper turbulensen. En kan merke seg at grafene krysser 2 ganger. Ved starten er predikasjonene til FLACS kortere ved samme konsentrasjon. Rundt en lengde på 30 meter og en konsentrasjon på 6,5 % blir FLACS lengdene lenger, før PHAST tar igjen FLACS ved ca. 220 m og ved en konsentrasjon på ca. 1 %. Fra dette punktet og ut øker PHAST predikasjonene på lengden vs. konsentrasjon i forhold til FLACS. Dermed har PHAST det høyeste turbulensnivået ved mellomdistansen, mens FLACS har høyest turbulensnivå ved begynnelsen og slutten, men dette er da ikke for jeter.

Tilslutt, for simuleringer uten geometri, kan en se på Figur 32 som viser 2 simuleringer av FLACS og to av PHAST. Hvis en kun ser på den svarte og oransje grafen, kan en se at grafene så og si sammenfaller for lengder opp til 300 meter og konsentrasjonsverdier ned til 0,55 %. Det

er ingenting som tyder på at denne trenden er i ferd med å stoppe opp. Dette er for masserate på 7,767 kg/s og utslippsfart på 80 m/s fra 1,5 meters høyde, Pasquill kl. F og ruhets lengde, z_0 , 30 millimeter. En hovedtyngde av simuleringer er gjort ved dette utslippsregime, og man kan se at for denne utslippsraten er det et likt turbulensnivå for disse to programmene, da lengdene holder seg mer eller mindre konstant, over hele spredningssceneriet.

Til å begynne med er resultatene like. Så er det en periode hvor PHAST har litt høyere innblandingsrate enn FLACS, før de møtes rundt 1-1,5 %, og det er det som går igjen for simuleringer utført med en RTI på 0,2 i FLACS.

11.3 Resultater for horisontalt sammenstøt

Tabell 2 viser lengdene oppnådd for simuleringer ved horisontalt sammenstøt, for konsentrasjoner ved 2,1 % (hvite rader), 2,6 % (røde felt) og 3,1 % (blå felt). Den røde verdien i simuleringer for FLACS som er ved konsentrasjon 2,1 % er utført med ruhetslengde 3mm, og ikke 30mm som de andre er utført med.

PHAST og FLACS resultater for masserate på 7,767kg/s, fart på 80m/s, atm. temperatur 20°C, bakketemperatur 9,85°C, z_0 verdi på 30mm og gassen har temperatur på 0 °C etter ekspansjon til atm. trykk.						
PHAST sine predikasjoner				FLACS sine predikasjoner		
konstant	3,1 %	2,6 %	2,1 %	2,1 %	2,60 %	3,1 %
0,001	115	128	141	95	73	61
0,005	157	199	225	104	74	53
0,01	139	203	171	74	92	121
0,05	179	209	232	78	118	103
0,1	172	187	206	64	120	79
0,17	145	172	192	88	133	82
0,25	97	130	186	134	160	90
0,33	75	95	136	81	160	
0,4	66	82	107	77	2,1 %	2,1 %
0,5	58	71	90	109	100	154
0,6	52	64	81	88	88	88
0,7	47	58	75	78	90	72
0,8	42	53	70	252	198	174,0
0,9	39	49	64	131	244	

Det ble for simuleringene utført ved 7,767 kg/s (80 m/s) og ruhetslengde (Z_0) på 30 mm funnet en rekke lengder som varierer mye for FLACS simuleringene, alt etter geometrien den treffer etter utslippspunktet, og avstanden til denne.

For PHAST er det gjort simuleringer med endringer for sammenstøtskonstanten, som varierer fra 0,001 til 0,9. Det blir i hovedsak fokusert på standard verdien, ved sammenligningene som skal gjøres.

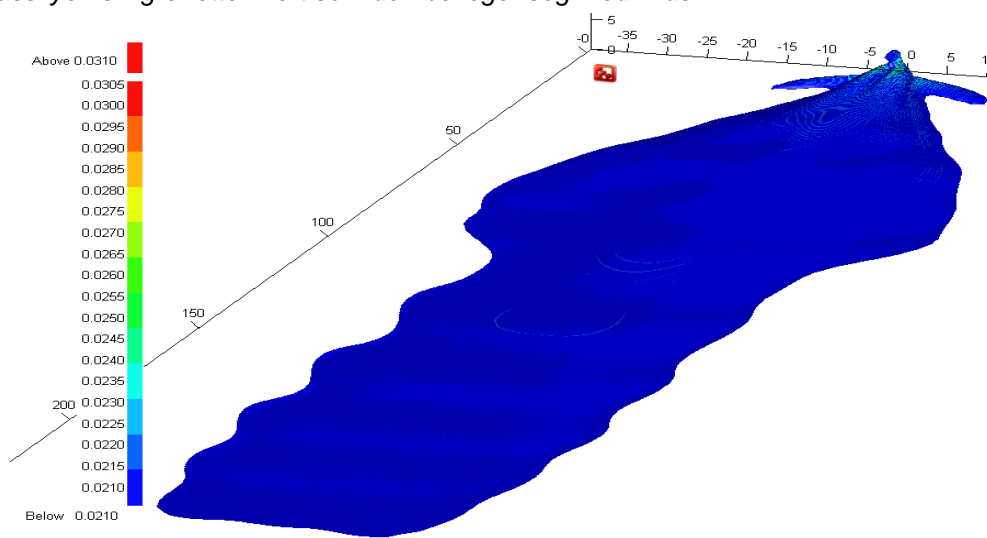
Hvis en tar utgangspunkt i at FLACS har predikert de mest riktige lengdene siden FLACS har vist gode resultater for situasjoner med geometri ved en rekke anledninger, også under simuleringene utført til denne rapporten, er det god grunn til å anta at prediksjonene er rimelig gode.

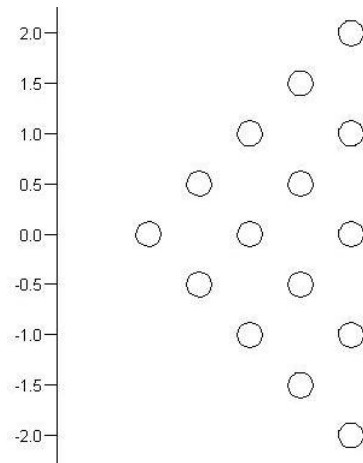
PHAST har, for tilsvarende simuleringen som FLACS nr.130, kommet opp i denne lengden ved bruk av standardverdien på 0,25. Ser en på er lengdene den har predikert 186 meter ved bruk av standardverdien, og største lengden den har predikert uavhengig av konstant som er brukt, er på 232 meter, som er 12 meter kortere enn det FLACS predikerte ved samme konsentrasjon (2,1 %).

For simuleringen som hadde denne lengden (se Figur 33) ble det brukt en plate som var plassert 1,875 meter fra jeten. Platen har en lengde på 0,4 meter, tykkelse på 0,1 m og en høyde på 4 meter.

FLACS – simuleringen ga en lengde på 160 meter før en nådde konsentrasjonen 2,6 %. Denne

Figur 33 viser simuleringen som ga den absolutt lengste lengde med FLACS. Man kan her se hvordan gasskyen slingrer ette hvert som den beveger seg medvinds.



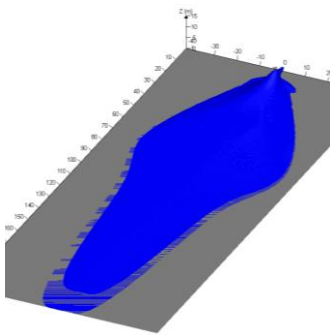


Figur 34 viser geometrien som jetten treffer etter 6 meter for smultring 106 for FLACS, og ga lengden 160 for konsentrasjonen 2,6 %

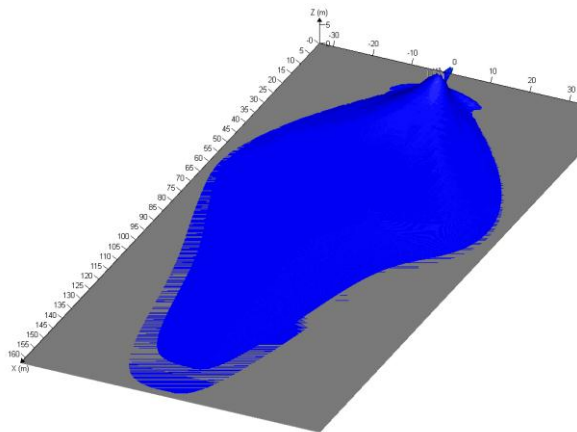
simuleringen (sim.nr106) hadde en geometri bestående av sylindre. Jetten traff 1ste sylinder midt på. Sylindrene hadde en diameter på 0,25 meter og det var totalt 15 stk. av dem (se Figur 34). Dette oppsettet var identisk for alle simuleringer med sylindre, men antallet sylindre varierer.

PHAST har for tilsvarende simuleringer en lengde på 130 meter når standardverdi brukes. Ved en innstilt sammenstøtsverdi på 0,005 har PHAST en verdi på 209 meter. Verdien 0,005 gir den største lengden, etter dette synker de på begge sider av denne verdien. Det er mulig at en kunne fått enda større lengder ved bruk av verdi som gir utslippsfart på akkurat det samme som vindfeltet ved denne høyden (1,5 m). Vindfeltet har en hastighet på 0,6 m/s og utslippsfarten er på 0,4 m/s ved den satte sammenstøtsverdien som ga lengden 209 m. Ut fra denne sammenhengen kunne en fått enda litt lengre lengder ved bruk av en sammenstøtskonstant på 0,0075. Da hadde "PHAST" sluppet unna overgangsfasen mellom det ytre vindfeltet og utslippets fart. (ca. 0,6 m/s ved 1,5 meter, hvis en bruker en friksjonsfart på 0,06 m/s, som er verdien brukt i FLACS) Dermed hadde PHAST sluppet turbulensen som oppstår mellom fluider med forskjellig fart eller retning. Dette hadde gitt noe lengre verdier. PHAST opererer med en verdi på 0,1 som maksimum forskjell i fart mellom gasskyen og det ytre vindfeltet. Når verdien faller under denne hastigheten er turbulensen fra den kinetiske farten til jetten ansett som neglisjerbar. PHAST opererer også med en maksimumsforskjell i tettheten, 0,015, på samme måte som nevnt over. Når verdien faller under denne blir turbulens fra dam dannelse (slumping) ansett som neglisjerbar. Begge disse verdier er kalibrert mot forsøk.

Simuleringen 106 ga den største lengden (160 m) ved en konsentrasjon på 3,1 % med FLACS (se Figur 36).



Figur 35 viser simulering 114 i FLACS og ga lengde på 210 meter



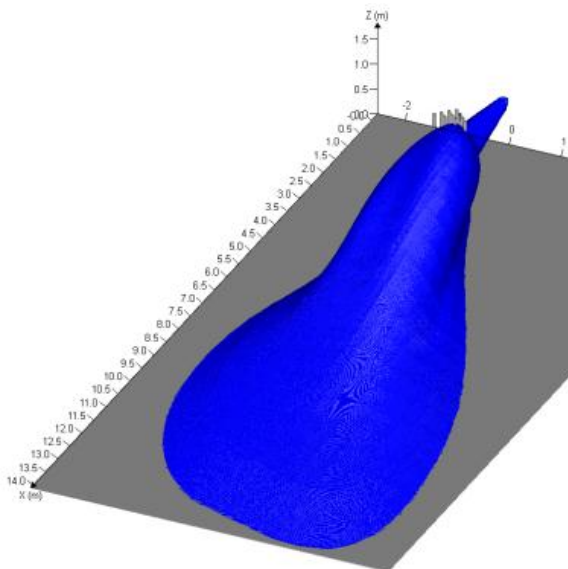
file=000106; View=FMOLE (m3/m3); Time= 190.004 (s)
X=0.3; Y=1; Z=0.2; S2 m



Figur 36 viser bilde fra simulering som ga lengde på 160 meter ved 2,6 %

Det samme oppsett var for simulering 108 ved 2,6 %. Dette ga lengden 121 m.

Det ble i tillegg funnet lengder på 210 meter for 2,1 % ved og bruk av 9 kjepler i et kvadrat som var stilt på høykant (se Figur 32 fra sim.114 som vises i Figur 35), samt lengder på 133



Figur 37 viser simulering 067 som ga ca. den samme lengden som simulering 044

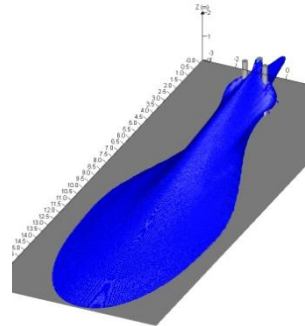
meter for konsentrasjon på 2,6 % for samme kjepleformasjon på 9 stk.

Tabell 3 viser lengde oppnådd ved horisontalt sammenstøt med sylindre. Antall varierer mellom 10-1 stk og avstanden er for alle 1,875 m til den første sylindringen. Radius varierer fra 0,25–0,025 meter, der antallet sylindre stiger når radiusen synker (for eksempel 1 sylinder når radius er 0,25 m)

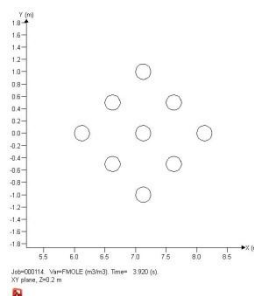
Predikerte lengder for utslippsrate på **0,311kg/s**, samt fart på **80 m/s** fra **1 meters** høyde, og z_0 verdi på **30mm**

konstant	PHAST	FLACS
0,005	24,0	17,75
0,01	25,7	17,75
0,05	29,2	17,5
0,1	29,6	17,0
0,175	27,2	16,5
0,25	22,8	16,1
0,33	16,7	15,5
0,4	13,9	15,5
0,5	12,0	15,2
0,6	10,7	15,0
0,7	9,7	14,5
0,8	9,1	14,5
0,9	8,6	14
1	8,1	9,6

Figur 38 er simuleringen som ga den lengste lengden i FLACS på 17,75 meter



Figur 39 viser oppsettet av sylindre brukt til simulering 114



Som man ser fra tabellen var det lite variasjon i lengdene de forskjellige simuleringene ga, for denne masserate og utslippsfart. Fra

Tabell 3 ble alle lengder predikert av FLACS til under 18 meter. PHAST har for standard sammenstøtskonstant en lengde på ca.23 meter, som er 128,5 % lengre en største lengde predikert av FLACS. For en sammenstøtskonstant på 1/5 av standardverdien predikerte PHAST lengder opp mot 30 meter. Dette er en økning på 3,6 ganger lengre enn de predikerte verdiene uten geometri, som er ca. det samme forholdstallet som FLACS predikerte for utslippsraten 7,767kg/s med og uten geometri som har et forholdstall på 3,3 (244m/74m). Dette kan sannsynligvis stemme om en hadde kjørt flere, og med de rette kombinasjonene av geometri kunne man kanskje fått slike lengder. PHAST overpredikerer lengden ved bruk av standardverdi, sml. med FLACS, hvis FLACS antas å ha rett lengde.

11.4 Resultat for horisontalt sammenstøt ved 7,767 kg/s og utslippsfart på 160 m/s fra 1 meters høyde.

Tabell 4 viser lengdene for disse utslippsratene og hastighetene, siste kolonne er lengdene predikert uten geometri.

Predikerte lengder for 7,767kg/s og 160m/s fra 1 meters høyde, med atmosfære og overflate temperatur på 20°C, samt en z_0 verdi på 30mm, og målt på volumkonsentrasjon lik 2,1 %		
Konstantens tilhørende lengde predikert av PHAST		FLACS
Konst	meter	meter
0,1	154,5	88
0,175	139	78
0,25	100	74
0,33	85	77,5
0,4	77	63,5
0,5	68,5	72
0,6	61	
0,7	55,5	
0,8	51,5	
0,9	48	
1	45	63

Fra tabellen kan en se at ingen av FLACS lengder kommer opp mot lengden predikert av PHAST ved bruk av standardverdien. Også her er PHAST sin maksimum lengde ca. 3,5 ganger lengden den predikerer uten sammenstøtskonstant.

Simuleringene som er utført med FLACS varierer med antall sylindrene (3-15 stk.) og radien på disse. Største lengde ble oppnådd med 15 sylindre med radius 0,125 m.

Alle lengdene predikert av PHAST med standardverdien er lengre enn de FLACS predikerer.

11.5 Resultater for utslipp med varierende Pasquill klasse, vind, avstand til og form på objektene

Tabell 5 viser de viktigste parametrene for simuleringene, forklart i lysebrun del av tabellen, utført med **FLACS**

<p>Avstanden mellom jeten(utslippspunkt) og 1ste sylinder er 6m. Det vil bli opplyst når dette endres.</p> <p>Konsentrasjonen det måles på er 2,1 % for ALLE simuleringene i denne serien(rød og blå tabell, med utslippsfart på 120 m/s og masserate på 4,72kg/s(rød tabell), og 7,41 kg/s(blå tabell, som har en plate med forskjellig høyde, ikke sylindere). Temperaturen er 20 °C for <i>atmosfæren</i> samt for <i>bakken</i>, og 0 °C for gassen <i>etter</i> ekspansjon til atmosfærisk trykk.</p>							<p>Eksempel på oppsett av sylindre: D= diameter til sylindere i simuleringen det er snakk om. I dette eksempelet er den 3 meter. Hvis det står 2*D bak og 1,66*D til siden menes: 1ste sylinder står da sentrert på 7,5 meter x(som er langs utslippstetningen, og siden den skal stå 6 meter fra må vi trekke fra 1,5 meter fordi radius er 1,5) og 0 meter y(som er normalt på utslippsretningen) 2dre og 3de står på hver sin side sentrert på 13,5 meter x(7,5+2*3=13,5) og ±5 meter y(3*5/3=5m).</p>
Sim. Nr.	Pasquill Kl. D - F	z ₀ m.	Vind fart m/s	sylindre Stk.	Radius Meter	Lengde Meter	2dre og 3de sylinder Posisjon i forhold til 1ste sylinder
167	F	0,5	1,5	3	1,5	37	2,5*D bak og 1,666*D til sidene
170	F	5,0	1,5	3	1,5	37,5	2,5*D bak og 1,666*D til sidene
171	F	0,5	1,5	3	1,5	37,5	2,5*D bak og 1,66*D til siden
165	F	5,0	1,5	3	1,5	40,5	2,5*D bak og 1,66*D til siden
172	E	0,5	1,5	3	1,5	35,5	2,5*D bak og 1,66*D til siden
169	D	0,5	2,0	3	1,5	38	2,5*D bak og 1,66*D til siden
168	E	0,5	3,0	3	1,5	38	2,5*D bak og 1,66*D til siden
173	E	0,5	3,0	3	1,5	39	2,5*D bak og 1,66*D til siden

Tabell 6 viser **PHAST** sine lengder predikert for de forskjellige Pasquill klassene og vindhastighetene, som ble predikert av FLACS i tabellene 4, 6 og i 11(rød tabellen kommer sist). De røde tallene er for en ruhetslengde på 5 mm og tilsvarer simulering 167 og 165 i tabell 4, ellers er den 0,5mm. Tall i **BOLD** er (PHAST' tabeller) standard sammenstøtskonstantens lengde for de forskjellige Pasquill klassene.

Sammenstøtskonstanter	0,001	0,01	0,025	0,05	0,075	0,1	0,17	0,25	0,33	0,4	0,50	0,6	0,7	0,8	0,9
1,0 m/s, klasse F, z ₀ = 0,5 mm	246	262	231	157	123	109	85	73	75	59	51	46	41	36	33
1,5 m/s klasse F, z ₀ = 5mm	131	150	151	153	149	143	97	79	78	63	57	51	46	43	40
1,5 m/s, klasse F, z ₀ = 0,5 mm	277	288	198	182	148	115	84	74	75	61	55	50	46	42	39
1,5 m/s, klasse E, z ₀ = 0,5 mm	180	200	195	177	140	112	85	73	76	61	55	50	46	42	39
1,5 m/s, klasse D, z ₀ =0,5 mm	198	213	207	183	143	122	97	79	78	63	55	50	45	41	38
2,0 m/s, klasse F, z ₀ = 0,5 mm	142	163	165	162	153	136	91	76	77	62	56	50	46	42	39
2,0 m/s, klasse E, z ₀ = 0,5 mm	141	158	164	160	150	132	92	78	78	62	56	50	46	42	38
2,0 m/s, klasse D, z ₀ =0,5 mm	158	173	174	169	156	139	100	85	80	64	55	50	45	41	37
3,0 m/s, klasse E, z ₀ =0,5 mm	79	89	95	99	101	103	98	89	85	66	56	50	45	41	37

Tabell 7 viser lengder predikert for simuleringer utført ved Pasquill kasser fra D-F og vindhastigheten ved 10 m høyde og varier mellom 1-2 m/s, utført med **FLACS**

Avstand til første sylinder 1,875 m								
Sim.	Pasquill klasse	Vind hastigheten	Sylindre	Radius sylindre	Gassen går motvinds	Gassen går med vinden	Lengde totalt	2dre og 3de sylinder sin posisjon i forhold til 1ste sylinder
Nr.	D-F	m/s	stk.	meter	meter	meter	meter	meter
176	D	1,5	3	1,5	19,5	36	56	2 stk. som står $2,0833 \cdot D$ bak og $\pm \left(1 \frac{2}{3}\right) \cdot D$ til siden. Gjelder for simuleringene fra og med 176 til og med 182
181	F	1,0	3	1,5	22	37	57	
178	F	1,5	3	1,5	20,5	32	53	
177	D	1,5	3	1,5	19,8	33	52	
179	E	2,0	3	1,5	18	32	50	
182	F	2,0	3	1,5	18	31	49	

Tabell 8 viser **PHAST** sine prediksjoner for lengdene predikert av FLACS i tabellene 8, 9 og 10.

Konstanter	0,001	0,010	0,025	0,05	0,075	0,1	0,2	0,25	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
1,0m/s F	384	356	287	234	135	118	98	86	80	75	69	64	59	55	52
1,5 m/s F	341	259	313	233	234	143	107	92	98	87	71	65	60	56	53
1,5 m/s E	231	260	251	226	177	142	107	92	94	78	72	65	61	56	52
1,5 m/s og D	257	275	263	229	177	149	114	100	93	86	72	65	60	56	52
2,0 m/s og F	183	206	212	206	194	173	116	96	108	92	71	66	60	56	53
2,0 m/s og E	182	207	210	204	190	167	115	97	100	89	73	66	61	56	52
2,0 m/s og D	198	221	223	218	198	173	124	104	100	89	74	66	61	56	52
2,25 m/s og F	166	192	194	193	187	174	121	97	110	97	72	66	60	56	53
2,25m/s og E	163	186	192	191	183	169	122	101	103	91	74	67	61	56	52
2,5 m/s og F	153	175	183	182	179	170	124	100	108	98	73	67	61	56	53
2,5 m/s og E	149	170	178	179	176	168	126	104	103	93	74	66	61	56	52
2,5 m/s og D	168	188	190	195	190	177	135	109	102	91	74	66	61	56	52
3,0 m/s og F	133	153	157	162	162	159	134	106	101	97	74	67	61	57	52
3,0 m/s og E	127	150	155	160	161	157	134	97	99	94	74	67	61	56	52
3,0 m/s og D	148	161	171	173	173	167	144	116	100	93	76	67	61	56	53

Tabell 9 viser lengdene predikert av **FLACS** for sammenstøt med plate på 2 m* 4 m (høyden) og avstand til jet på 1,875 meter.

Plater på 2m*4m(høyde) og avstand 1,875 meter Masserate: 7,41 kg/s og fart 120 m/s									
	Pasquill kl	ruhets lengde, z ₀	Vind hastighet	Antall objekter	Treffer platen:	Negativ distance	Medvinds lengde	½ bredde	Totalt
Sim. Nr.	D-F	mm.	m/s	stk.	Et punkt	meter	meter	meter	meter
194	F	0,5	1,5	1	I senter	26	21	21	41
193	D	0,5	1,5	1	I senter	24	20	21	41
195	D	0,5	1,5	1	I senter	24	20	21	41
192	E	0,5	2,0	1	I senter	23	20	20	39
191	D	0,5	3,0	1	I senter	17	18	17	34

Tabell 10 **FLACS** sine prediksjoner for jet som treffer plate på 2*2 meter 1,875 meter etter utslippspunkt

Plater på 2*2 meter, avstand 1,875 meter, fart: 120 m/s og masserate på 7,41 kg/s									
	Pasquill kl	Ruhets lengde, z ₀ (m.m)	Vind hastigheten (m/s)	Antall objekter (stk.)	Treffer platen hvor:	Negativ distance	Medvinds lengde	½ bredde	Totalt Brekke
198	F	0,5	1,5	1	midten 1m	26	13	17	34
197	E	0,5	1,5	1	midten 1m	26	13	21	42
199	F	0,5	2,0	1	midten 1m	25	13	21	41
190	F	0,5	2,25	1	midten 1m	25	13	21	41
196	E	0,5	3,0	1	midten 1m	20	14	20	39

Tabell 11 viser predikerte lengder i **FLACS** ved horisontalt sammenstøt 6 meter etter startpunkt til jeten

Plate på 2m*4m(høyden), avstand 6 meter masserate 7,41 kg/s og fart 120 m/s								
Sim. Nr.	Pasquill kl.	Aerodynamisk lengde ruhet (m.m)	Vind hastigheten (m/s)	Antall objekter(stk.)	Treffer platen hvor:	Negativ distanse	Medvinds lengde	Bredde
184	F	0,5	1,0	1	senter	10	15	47
183	E	0,5	1,5	1	senter	11	12	39
188	F	0,5	1,5	1	senter	6	17	39
187	D	0,5	1,5	1	senter	5	18	38
185	D	0,5	2,0	1	senter	4	15	36
186	E	0,5	2,25	1	senter	5	17	34
189	F	0,5	3,0	1	senter	4	16	34

Tabell 12 viser resultatene for **FLACS** simuleringene

Vindhastigheten er 1,5 m/s for resten av simuleringene Masserate 7,41 kg/s og utslippsfarten til jeten er 120 m/s.						
Avstand til 1ste sylinder	Antall sylindere	Diameter	Symmetri om aksene ved 3 objekter	Predikert lengde	Halv bredde	
206	6	3	2	1*D bak og til siden	54	16
207	6	3	2	0.75*D bak og til siden	26	17,5
209	6	3	2	1*D bak og til siden	48	17
208	6	3	1,5	0.75*D bak og til siden	50	20,5
210	6	3	1,5	1*D bak og til siden	48	18,5
211	6	3	1,5	0.75*D bak og til siden	30	17,2
212	6	3	1,5	1,1m bak og 1,25m til siden	24	20,5
213	6	3	1,25	1*D bak og til siden	43,5	20
214	6	3	1,25	0.8*D bak og til siden	30	17,5
215	6	3	1,0	0.9*D bak og til siden	40,5	22
216	6	3	1,0	0.85*D bak og til siden	25	17,5
217	6	3	0,8	0.75*D bak og 0.875*D til siden	26	19,5
218	6	3	0,8	0.875*D bak og til siden)	27	21
219	5	3	0,8	1*D bak og til siden	27	24
220	5	3	0,8	1*D bak og til siden	50	23
221	5	3	0,8	2*D bak og 1.5*D til siden	73	22
222	5	3	0,7	2*D bak og 1.5*D til siden	70	16
223	5	3	0,68	1.2 m bak og 0.9m til siden	67	16,5
224	4	3	0,68	1.2 m bak og 0.9m til siden	70	15,5
225	3	3	0,68	1.2 m bak og 0.9m til siden	71	15
226	1,875	3	0,6	1.2 m bak og 0.9m til siden	79	17
227	1,875	3	0,6	2*D m bak og D til siden	91	28,5

Tabell 13 viser simuleringer utført i FLACS med lengdene en fant ved konsentrasjonen 2,1 %, alle er utført i Pasquill klasse F, og med ruhetslengde, z_0 , på 0,5 millimeter

Sim. Nr.	Avstand til 1ste sylinder	Antall sylindere	Vind fart m/s	Diameter	2dre og 3de sylinders posisjon	Predikert lengde	Halv bredde
200	6	3	2	3	2*D bak og $\pm 0,5*D$ til	33,5	12
201	6	3	2	2	2 *D bak og til siden	40,5	13,9
202	6	3	2	2	1,5 *D bak og til siden	47,5	13,5
203	6	3	2	2	1,5 *D bak og til siden	51,5	12,0
204	6	3	2	2	1,25 *D bak og til siden	48	14,5
205	6	3	2	2	1*D bak og til siden	48	14,2

Resultatdel PHAST og FLACS for simuleringer med geometri

Det ble i begynnelsen av oppgaven utført en del simuleringer der det ble variert på vindfarten og Pasquill klassen. Det ble brukt en mye større diameter for sylindrene enn i de foregående resultatene og alltid 3 stykker av dem. Det ble i tillegg simulert med horisontalt sammenstøt med en plate, se Tabell 9, Tabell 10 og

Tabell 11, hvor jeten treffer platen 1 meter oppe (z-aksen) og midt på platens bredde (y retning eller normalt på vindretningen).

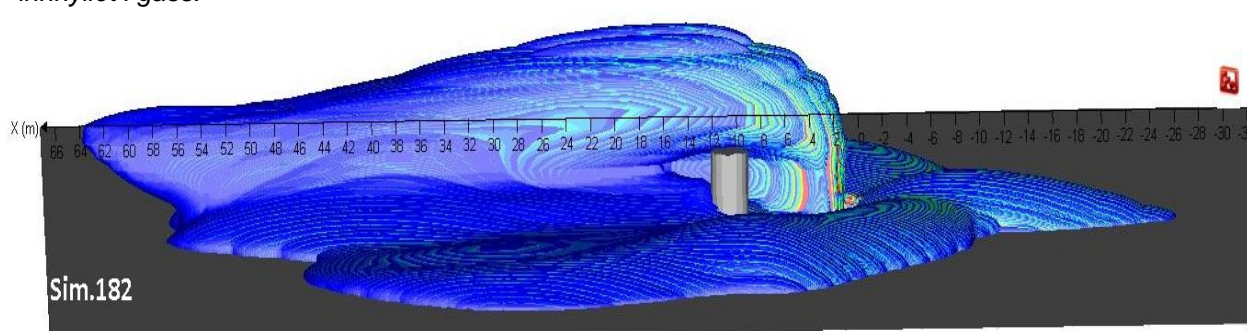
For simuleringene med sylindre treffer jeten alltid rett på fremste sylinder, og alltid midt på denne. De to bakre sylindrene varier i avstanden de er plassert bak den første sylindren, for de forskjellige simuleringene. De står alltid symmetrisk om aksene fra til den første sylindren (på hver sin side av 1ste sylinder og bakenfor). Andre og trede sylinders lengde oppgis i forhold til 1ste sylinder. Diameteren som sylindrene har i den enkelte simulering brukes til å angi plasseringen for 2. og 3. sylinder.

En tar her også utgangspunkt i at FLACS har predikert de lengdene som er riktige, slik som en har gjort for de foregående simuleringene. En sammenligner disse så med Phast' prediksjoner.

Tabell 14 viser kun lengdene predikert av **PHAST** med standard sammenstøtskonstant brukt(0,25). Alle har ruhelengde, z_0 på 0,5millimeter, utenom den tabellcellen det står 5mm skrevet i. Blå rad tilsvarer FLACS predikasjoner for sammenstøt med plate, og rød for FLACS sammenstøt med 3 sylindre

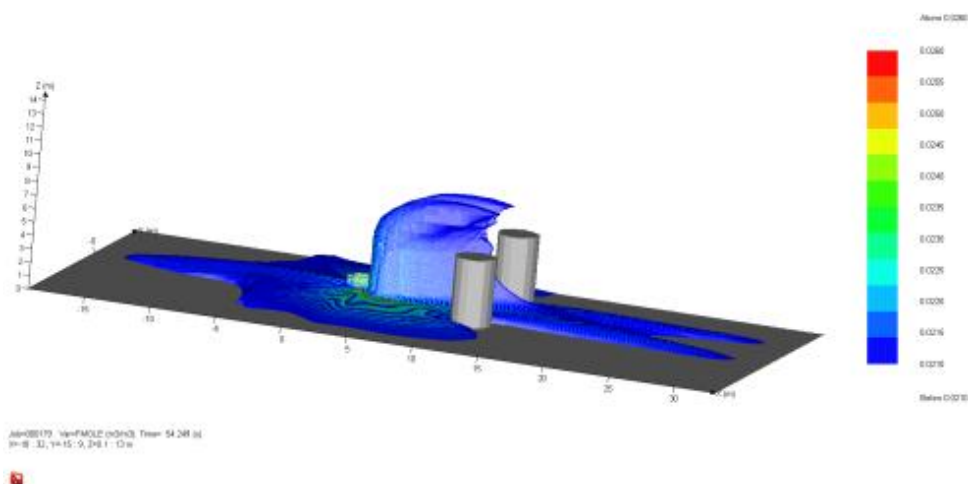
Standard sammenstøtskonstant brukt og lengdene det gir i PHAST			
Pasquill klasse, vindfart	7,41 kg/s	Pasquill kl.	4,72 kg/s
1,0 m/s og klasse F	86	1,0 m/s og klasse F	73
1,5 m/s og klasse F	92	1,5 m/s og klasse F 5mm	79
1,5 m/s og klasse E	92	1,5 m/s og klasse F	74
1,5 m/s og klasse D	100	1,5 m/s og klasse E	73
2,0 m/s og klasse F	96	1,5 m/s og klasse D	79
2,0 m/s og klasse E	97	2,0 m/s og klasse F	76
2,0 m/s og klasse D	104	2,0 m/s og klasse E	78
2,25 m/s og klasse F	97	2,00 m/s og klasse D	85
2,25 m/s og klasse E	101	3,0 m/s og klasse E	89
2,5, m/s og klasse F	100		
2,5 m/s og klasse E	104		
2,5 m/s og klasse D	109		
3,0, m/s og klasse F	106		
3,0 m/s og klasse E	97		
3,0 m/s og klasse D	116		

Figur 40 viser simulering 182 utført i FLACS, og visualisert med flowvis, første stolpe kan ikke sees da den er innhyllet i gass.

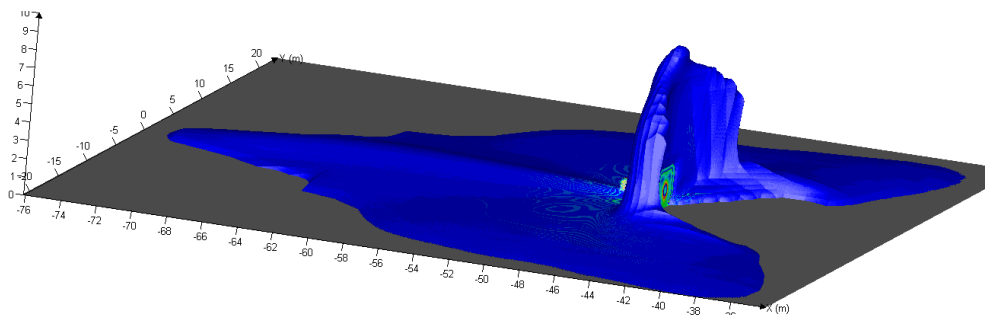


For alle simuleringene utført i FLACS der sammenstøtet skjer med 3 sylindre (

Tabell 5) der avstanden er 6 m, er lengdene predikert av FLACS mellom 37,5 og 40 meter, uavhengig av ruhetslengde, z_0 , Pasquill klasse og vindfart. PHAST lengder er for de samme predikasjoner mellom 73 og 89 meter, ca. en faktor på 2 større en FLACS. For predikasjoner gjort i FLACS for simuleringer med sammenstøt med tre sylindre der avstanden er 1,875 meter til første sylinder (se Tabell 7), er avstandene predikert mellom 31 og 36 meter medvinds, og 18 m til 22 m motvinds. Som en kan se fra **Error! Reference source not found.** beveger vinden seg nesten like mye bakover som den beveger seg fremover. Her overpredikerer PHAST kraftig, uavhengig om FLACS' lengde er riktig eller ikke. Sannsynligheten for at den vil gå så langt som PHAST predikerer (ca.74 m-79 m) når jeten står så nært er meget liten. Fordi jeten er samlet når den treffer fremste sylinder, vil gasskyen bli reflektert til alle sidene, og ikke følge sylindrens form. Dette da diameteren er så stor at krumningen er for liten og energien for stor til at den vil kunne klare dette. Her er PHAST-konstanten til liten nytte, da den kinetiske energien som PHAST reduserer ved å senke hastigheten på utslippet, bare kan øke lengden som blir predikert. I FLACS blir denne



Figur 41 viser simulering 194 utført i FLACS der utslippet beveger seg 26 meter bakover etter sammenstøt med platen på 2 m* 4 m. en kan her se jetens startposisjon som en liten rød prikk i midten av bilde.

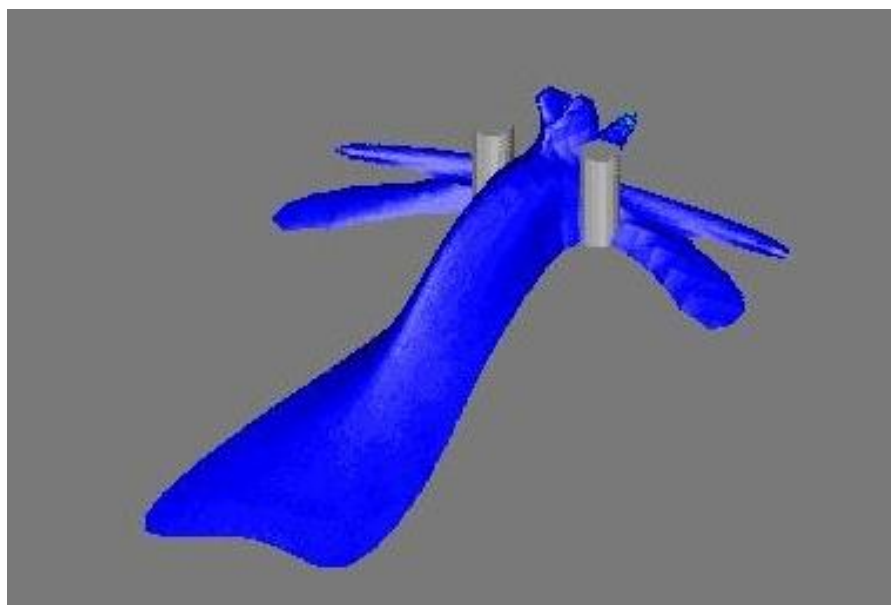


omdirigert ved at det skapes en nedadgående strømming og deretter en bakoverrettet strøm for deler av utslippsraten. Disse egenskapene kan ikke PHAST gjenskape. For simuleringene

Figur 43 viser simulering 198 sett forfra, uten geometri (platen er ikke tatt med ved fremstilling av bilde i Flowvis, som er en av funksjonene en kan velge mellom). En ser innslags punkte, som er den røde rundingen i midten av den vertikale "veggen" av gass som skapes når jetten treffer platen. En kan også se startpunktet der jetten begynner på baksiden av "gassveggen".

som er utført ved sammenstøt med plate på 2 m (bredden)*4 m (høyde, se Tabell 9) har FLACS predikert lengder fra 18 m (Pasquill klasse D med vind på 3 m/s) til 21 m (Pasquill klasse F med vind på 1,5 m/s) i utslippsretningen, som er medvinds. FLACS har dessuten predikert lengder motvinds på mellom 17 m (Pasquill klasse D med vind på 3 m/s) og 26 m (Pasquill klasse F med vind på 1,5 m/s). Dermed er den distansen utslippet beveger seg lengre i negativ retning under stabile forhold en medvinds. PHAST predikerer for like forhold lengder mellom 92 m og 115 m som er ca. en faktor av 4 mer en FLACS predikasjoner.

For simuleringene i Tabell 10 viser dette lengder predikert i FLACS som er **2 ganger lengre**



motvinds en medvinds, på henholdsvis 20 m (3 m/s kl. E), 26 m (1,5 m/s kl. F) og 25 m (2,25

Figur 42 viser simulering 202, som treffer en sylinder med diameter på 3 meter fra seks meters avstand. En kan her se at gassen er bredest ca. ved første sylinder, som følge av gassen som blir reflekter fra sylindere og ut til sidene.

m/s kl. F) motvinds. For samme lengdene medvinds er disse på henholdsvis 14 m og 2*13 m for de to sistnevnte.

PHAST predikerer for de samme forholdene (med standard verdien 0,25 brukt) mellom 116 meter og 92 meter, noe som sannsynligvis er en stor overprediksjon i forhold til FLACS lengder.

I

Tabell 11 har FLACS predikert lengder som varierer mellom 12 m (2 m/s og Pasquill kl. E) og 18 m (1,5 m/s Pasquill kl. E) medvinds, og betydelig kortere lengder motvinds, som varierer mellom 4 m (3 m/s, F) og 11m (1,5 m/s, E).

For Tabell 12 og

Tabell 13 har flaks kun predikert lengder som er medvinds. Disse stemmer bedre over ens med de lengdene PHAST har predikert for vindhastigheter på 2 m/s og 1,5 m/s ved stabile forhold(F). For vindhastighet på 2m/s varierer lengdene mellom 33,5 m og 51,5 m (FLAKS), mens PHAST predikerer for samme forhold ca. 74 m, som er en faktor på 1,5 til 2 ganger FLACS sine predikasjoner, alt etter som hvilke en sammenligner med. For vindhastighet på 1,5 m/s (F) ligger FLACS sine predikasjoner mellom ca. 24 m og 91 meter som stemmer bra med det PHAST predikerer for samme forhold (ca.74 meter).

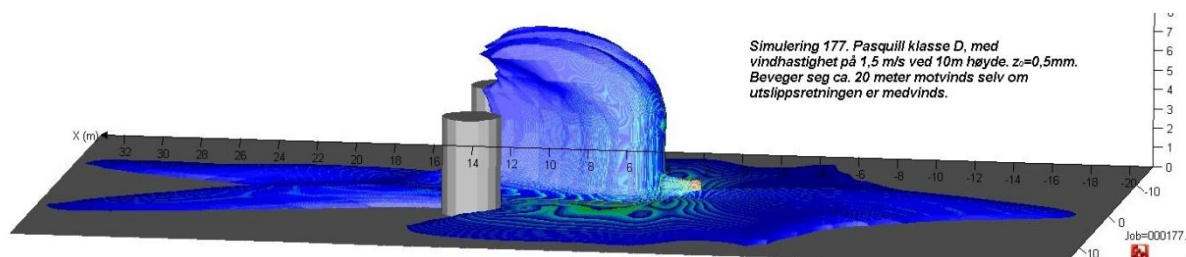
Siden PHAST ikke kan håndtere geometri vil den for jetter, som står nært en flate eller søyle med stor diameter, der hoveddelen av jetten treffer objektet, måtte gi feil svar. Dette siden sammenstøtskonstanten brukt for å kompensere for sin manglende evne til og behandle geometri, virker mot sin hensikt for disse tilfellene. For slike scenarier egner ikke PHAST seg da sammenstøtskonstanten virker mot sin hensikt ved å senke farten og dermed skjæret (drage) som virker mellom to fluider med forskjellig hastighet. Dette minker innblandingsraten av luft i gasskyen og øker dermed konsentrasjonen til denne.

Dette er helt tydelig for simuleringer med avstand til 1. sylinder på 1,875 meter og der diameteren er stor (3 meter), slik at krumningen blir for liten til at en høyenergi- jet vil klare å strømme rundt denne(se Figur 44). Dette gjelder også for plater som treffes av jet med stor

Figur 44 viser Simulering 177 i FLACS. En kan på dette bilde se hvordan gasskyen er lavere og går ikke så langt frem, over toppen av søylen, som det i fig. 182 gjør.

kinetisk energi der jetten treffer platen rimelig samlet.

Bilde er mer tvetydig for simuleringer med varierende størrelse på sylindrene som varierer mellom 0,5-0,05 meter, samt for en simulering med plate med bredde på 0,4 m(platen ga den lengste lengden i FLACS). Her ga PHAST generelt rimelig gode resultater, selv om de kanskje ikke er like presise som det en kan forvente av en CFD modell som FLACS.



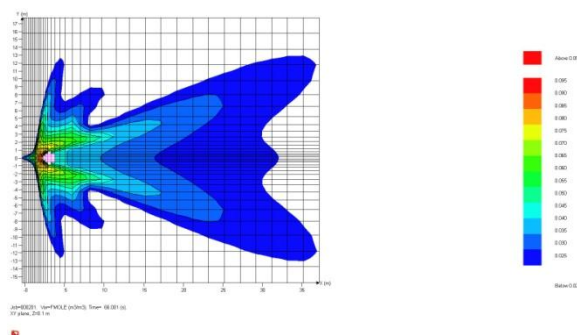
Diskusjon

CFD modeller generelt har sin styrke i komplekse strømningsfelt siden de bygger på Navier-Stokes sine ligninger for et fluids bevegelser. Dette blir da også helt tydelig i den delen av simuleringer der diameteren er stor, og jeten står nært objektet sammenstøtet skjer mot. Denne typen simuleringer har PHAST vanskelig for å håndtere. På den andre siden måtte dette forventes, fordi programmet ikke er designet for slike oppgaver. PHAST sin styrke ligger i allsidigheten. Programmet kan brukes til et utall beregninger som spenner over et vidt spekter av scenarier fra rørbrudd, varehusbranner, giftige utslipp, brannballer, varehusbranner, jet branner med varmestrålingsberegninger, storskalaulykker med planlagt responstid, ulykker uten beredskapsplan, fordampnings – utfelling - og banen til væsker ved et tofaseutslipp, for og nevne noen.

Allsidigheten er ikke FLACS sterkeste side. Det er et mer spesialisert verktøy rettet mot et snevrere område, først og fremst innfor sprednings- og eksplosjonsberegninger innen olje- og gassindustrien. FLACS gjør til gjengjeld simuleringene meget bra innenfor sitt spesialiserte område.

FLACS sin styrke ligger altså i nettopp det den er laget for, spredningsberegninger og eksplosjonsberegninger. Den er rimelig særegen i sin måte å behandle sub-grid geometri på, ved sin porøsitetstilnærming, og har fått meget gode resultater under simuleringer i denne oppgaven for forsøk som innebærer komplekse strømninger, som for eksempel MUST forsøket. Siden det er et CFD program, trenger den kraftige datamaskiner for å kunne levere resultater på en rimelig tid.

Hurtigheten er PHAST sin andre styrke. Programmet kan levere svar for et hundretall



Figur 45 viser en av 2D formene for fremvisning en har mulighet til i FLACS. Her sees en simulering rett ovenfra, ved bakkenivå.

simuleringer, slik som i denne oppgaven, over det samme tema der det må gjøres små variasjoner i sprednings - scenarioer, på noen få minutter. Variasjonene kan for eksempel være konsentrasjonen det måles på, utslippshastighet eller høyden det skjer fra, m.m. PHAST er lite resurskrevende i motsetning til FLACS som altså krever mye datakapasitet og raske prosessorer, som genererer mye data og av den grunn trenger mye lagringsplass.

Fordi programmene er så ulike, både i oppbygging, design og anvendelsesområder er de vanskelig å sammenligne direkte. Simuleringsforsøkene i denne oppgaven bekrefter dette. FLACS er overlegent resultatmessig i simuleringer av utslippssituasjoner med objekter, noe PHAST ikke håndterer.

Et grunnleggende problem ved en rekke av simuleringene som er gjort er mangelen på data fra virkeligheten å sammenligne med. Dette fører til at en hver sammenligning av programmene blir usikker.

Riktignok gir simuleringer gjennom FLACS av deler av MUST- programmet rimelig gode treff som bekrefter at FLACS håndterer nettopp denne typen scenarioer. Men mangelen på valide data som bakgrunn gjør at sammenligninger av simuleringer av PHAST opp mot FLACS vanskelig kan tillegges alt for stor vekt.

Det er dessuten vanskelig å kjøre komparative studier av disse programmene fordi de er designet for ulike anvendelsesområder. Det blir nesten som å sammenligne eple og pære.

I den grad det kan sies noe sikkert, er det en bekreftelse på det en kunne anta på forhånd. FLACS simulerer godt det programmet er laget til og det samme gjør PHAST. Simuleringene som er utført i denne oppgaven bekrefter dette.

12 Konklusjon

PHAST ser ikke ut til å egne seg som simuleringsverktøy hvor jet fra utslipp treffer større objekter som fører til komplekse strømminger (eks. byer eller MUST-forsøkene) Dette i motsetning til FLACS som har design for slike situasjoner. PHAST er derimot egnet for utslipp i åpne områder hvor verktøyet gir rimelige resultater, noe som FLACS også gir.

Sammenligninger av verktøyene er vanskelig både fordi de er konstruert for bruk i ulike situasjoner og fordi det mangler eksperimentelle valideringsdata å sammenligne mot.

Med disse forbeholdene ser verktøyene å fungere godt innen sine bruksområder, slik simuleringene i denne oppgaven tyder på.

Hanna, S. R., Hansen, O.R., Dharmavaram, S. (2004). "FLACS CFD air quality model performance evaluation with Kit Fox, MUST, Prairie Grass, and EMU observations." Atmospheric Environment **38**: 4675-4687.

Donnelly, R.P., Lyons T.J., T.Flassak (2009). "Evaluation of results of a numerical simulation of dispersion in an idealised urban area for emergency response modeling" Atmospheric Environment **43**: 4416-4423

BILTOFT C.A. (2001) "Customer report for mock urban setting test" Meteorology & Obscurants Division (mottatt_som kopi i løssark)

J.D Anderson, JR(1995) "Computational Fluid Dynamics" Mac Grov Hill, Singapor

S. Sklavounos og F. Rigas (2006) "Simulation of Coyote series trials—Part I: CFD estimation of non-isothermal LNG releases and comparison with box-model predictions"

FLACS(UM) FLACS, CASD, CASDINT & Flowvis, User's Guide, GexCon.

GexCon(internet). from www.gexcon.no.

Koopman R.P., Ermak D.L (2007) "Lessons learned from LNG safety research" Journal of Hazardous Materials **140**: 412-428

Pontiggia M., Derudi M., Busini V. og R. Rota (2009) "Hazardous gas dispersion: A CFD model accounting for atmospheric stability classes" Journal of Hazardous Materials **171**: 739-747

Hanna, S. R, Chang, J.C. og Strimaitis D.G (1993) "Hazardous gas model evaluation whit filed observations" Atmospheric Environment Vol.27A No. **15**: 2265-2285

Hanlin A. L, Koopman R.P, Ermak D.L "On the application of computational fluid dynamics codes for liquefied natural gas dispersion(2007)" Journal of Hazardous Materials **140**: 504-517

Hanna S. R. Chang J. C. "Use of the Kit Fox field data to analyze dense gas dispersion modeling issues"

Witlox H.M "The HEGADAS model for ground level heavy-gas dispersion-I. Steady state model" Atmospheric Environment(1994)Vol. No.**18**. pp 2917-2932

Manju A. , Abhinav T. "Modeling of the urban heat island in the form of mesoscale wind and of its effect on air pollution dispersal"

Gallo K.P., Tarpley J.D., McNab A.L., T.R. Karl (1995) "Assessment of urban heat islands: a satellite perspective" Atmospheric Research **37**: 37-43

Almhjell T. L. MSc (2006) Institute of Physics and Technology, University of Bergen

Mannan S.(2005) "Lees loss prevention in the process industries" Burlington, MA 01830, USA

Biltoft, C.A.,(2001) "Customer Report for Mock Urban Setting Test (MUST). DPG Doc. No. WDTC-FR-01-121, West Desert Test Center, U.S. Army Dugway Proving Ground, Dugway, UT 84022-5000.

PHAST sin bruker manual

PHAST sin elektroniske MANUAL

13 Vedlegg I

Beregninger for simulering nr.692223 i "Mock urban serial trial" forsøkene.

Bruker dette forsøket(2692223 eller 692223 i tabellen her) til og vise hvordan man er kommet frem til de forskjellige in dataene som er brukt i simuleringene som er gjort for MUST simuleringene.

Alle utslippene skjer fra forskjellige posisjoner, avhengig av vindretningen. Det blir også variert fra hvilken høyde utslippet skjer. Opplysningene om dette finnes i tabell i vedlegg II, som for øvrig inneholder alle dataene av interesse.

Varigheten på utslippene varierer, men ligger stort sett enten på 15 eller 17 min.

Utslippsratene er fra 175- 225 l/min, for de simuleringer som er gjort i forbindelse med denne oppgaven.

For simulering nr.2692223 er utslippsraten på 225 dm³/min, og tiden 15 minutter, som gir et totalt utslipp på:

$$15\text{min} \times 225 \frac{\text{Liter}}{\text{min}} = 3375 \text{ liter}$$

Som gir en volumstrøm oppgitt i $\frac{\text{meter}^3}{\text{sekundet}}$ på:

$$13.1.1.1 \frac{3375 \text{ liter}}{15\text{min} \times 60 \frac{\text{sek}}{\text{min}}} = 3,75 \frac{\text{liter}}{\text{sek}} \rightarrow 3,75 \frac{\text{dm}^3}{\text{sek}} =$$

$$\dot{V} = 3,75 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{sek}}$$

Ønsker så og finne masseraten, og er da nødt til og vite molarvekten til Propylen. Denne finner man ut fra navnet til stoffet, som er propylen. Endingen "en" i propylen betyr at det er en dobbeltbinding til stede, og siden pro betyr 3, som viser til antall karbonatomer i kjeden som utgjør molekylet, vet man alt som er nødvendig for og finne molarvekten. Siden det bare er 3 karbonatomer med i molekylet er dobbeltbindingen nødt til å sitte i begynnelsen(slutten, men

det er ikke vanlig og definere det som slutten), og har det kjemiske oppbygningen $H_2C=HC-CH_3$. (Kokepunkt på $-48\text{ }^\circ\text{C}$, samt smeltepunkt på $-182\text{ }^\circ\text{C}$, men dette er uten relevans her, siden det er langt utenfor temperaturregime vi opererer ved.)

Regner ut molarvekten, for å kunne beregne massestrømmen:

$$C \times 12 \frac{g}{mol} = 42 \frac{g}{mol}$$

$$6 H \times 1,008 \frac{g}{mol} = 6,048 g/mol$$

$$\approx 42,05 g/mol$$

Siden teststedet ligger 1310 meter over havet, gjøres trykkberegninger for å finne trykket ved denne høyden (er strengt tatt ikke nødvendig, siden raten oppgis i liter som er $\approx dm^3$ i minuttet). Har allikevel gjort dette da jeg ikke er 100 % sikker på at det er helt uten betydning:

Har da:

$$dP + \rho g dz = 0 \quad (\text{lig.1})$$

Antar ideell gasslov:

$$nRT = PV \quad (\text{lig.2})$$

Siden:

$$\rho = \frac{m(kg)}{m^3} = \frac{m}{V} \rightarrow V = \frac{m}{\rho}, \text{ og } n = \frac{m}{M_w} \quad (\text{lig.3})$$

Setter dette inn i den ideelle gass ligningen og får:

$$\frac{mRT}{M_w} = P \frac{m}{\rho}$$

Stryker m og ordner alt med hensyn på ρ . Sitter igjen med:

$$\rho = \frac{PM_w}{RT} \quad (\text{lig.4})$$

Setter ligning 3 inn i ligning 1 og får:

$$dP + \frac{gPM_w}{RT} dz = 0 \quad (\text{lig.5})$$

Deler ligningen på trykket(P), og integrerer over trykket(P) og høyden(Z):

$$\int_{P_1}^{P_2} \frac{dp}{P} + \frac{gPM_w}{RT} \int_{Z_1}^{Z_2} dZ = 0 \quad (\text{lig.6})$$

Dette gir:

$$\ln \frac{P_2}{P_1} = -\frac{gM_w}{RT} (Z_2 - Z_1) \quad (\text{lig.7})$$

Ganger med e og P2 og får:

$$P_2 = e^{-\frac{gM_w}{RT}(Z_2 - Z_1)} \times P_1 \quad (\text{lig.8})$$

Setter så inn tallene som skal brukes i ligningen:

$$P_2 = e^{-\frac{9,80665 \text{ m/s}^2 \times 0,02884 \frac{\text{kg}}{\text{mol}}}{8,3145 \text{ joule} \times \text{mol}^{-1} \times \text{K}^{-1} \times 290,15 \text{ K}} (1310 \text{ m} - 0 \text{ m})} \times 1,01 \times 10^5 \text{ Pa.} \quad (\text{lig.9})$$

$$P_2 = \underline{\underline{86899 \text{ pascal} \approx 86,9 \text{ kpa.}}}$$

Som er det samme som ≈ 0,86 atm.

Temperaturen på 290,15K er valgt ut fra at det er i området for jordens gjennomsnittstemperatur. Akkurat hva som er den rette gjennomsnittstemperaturen for jorden varierer litt, alt etter hvordan det beregnes, men de aller fleste oppgir verdier i området 287,15K-293,15K (14 C° -20C° celsius). Valget på 290,15K er fordi dette er midt i dette området. Søker deretter etter massestrømmen for utslippene. Er så nødt til å gjøre antagelsen om at gassen oppfører seg som en edelgass.

Antar ideell gasslov og får:

$$n = \frac{86 \times 10^3 \text{ Pa} \times 3,75 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}}{8,3145 \text{ Joule mol}^{-1} \text{K}^{-1} \times 295,15 \text{ K}} = 0,1313893 \frac{\text{mol}}{\text{s}} \times 42,05 \text{ g/mol} \quad ((\text{lig.10}))$$

$$\dot{m} = 5,526 \text{ g/s}$$

Dette gir et totalutslipp på:

$$5,5261 \text{ g/sek} \times 1020 \text{ sek.} = 5,6366 \text{ kg} \quad (\text{lig.11})$$

14 Vedlegg II

Resultater for MUST simuleringene:

Tabell nr. 1 oppgir konsentrasjoner predikert av FLACS, samt de observerte konsentrasjonene målt under selve gjennomføringen av MUST forsøkene.

Tabell 15 viser konsentrasjonen observerte(grønn) og predikerte konsentrasjoner.

MUST forsøk	De observerte verdien under selve MUST forsøkene.			Predikerte verdier for simuleringer som er utført i 2004, med FLACS.				Predikerte verdier for simuleringer med grid på 4*4meter				Predikerte verdier for simuleringer med grid på 4*4meter				Observerte verdier	med grid på 1,5x2,5	med grid på 2,5x4	predikerte verdier	2004
	Nr.	Monitor rad 1			Monitor rad 2				Monitor rad 3				Monitor rad 3							
692250	5,10	3,10	3,59	3,63	2,9	2,26	2,29	2,14	1,90	1,23	1,34	1,28	0,9	1,00	1,07	1,01				
692223	4,10	4,74	4,13	4,60	2,1	2,09	2,22	2,16	1,80	1,25	1,26	1,29	0,1	1,10	0,90	1,04				
692131	5,50	4,37	5,23	4,33	2,8	2,28	2,31	2,18	2,00	1,57	1,35	1,42	1,5	1,23	1,05	1,05				
692157	6,90	7,48	7,18	5,02	3,4	2,96	2,99	2,50	2,40	1,79	1,69	1,58	1,5	1,47	1,30	1,23				
692054	4,20	5,05	4,53	5,05	2,4	2,22	2,26	2,45	2,10	2,28	1,37	1,45	1	1,41	1,00	1,19				
682320	7,80	22,58	22,27	10,42	4,9	4,99	5,16	4,02	2,70	1,98	2,22	1,86	1,9	1,34	1,45	1,30				
682256	21,20	44,54	39,99	27,56	4,1	3,39	2,74	3,47	2,60	1,41	1,44	1,63	1,6	1,03	0,94	1,11				
681849	3,30	3,64	3,34	2,08	1,7	1,69	1,24	0,98	1,20	1,12	0,69	0,32	0,7	0,79	0,52	0,04				
681829	3,90	2,37	2,80	2,70	1,8	1,04	1,30	1,19	1,20	0,58	0,71	0,65	1,1	0,22	0,27	0,28				
672303	13,10	11,90	9,18	10,42	6,6	6,12	4,92	5,04	4,80	3,46	2,81	3,03	5,3	1,96	1,84	2,06				
672235	47,10	41,00	53,44	18,03	6,7	6,90	6,69	6,86	5,00	3,00	3,36	3,16	2,8	2,77	2,30	2,32				
672213	23,30	22,52	19,70	23,72	7,7	5,40	5,91	7,60	4,80	2,50	2,69	3,57	3,7	2,01	1,94	2,35				
672150	30,00	27,34	31,01	28,17	6,6	5,06	5,46	5,16	3,90	2,55	2,67	2,85	3,2	2,01	1,85	2,01				
672101	87,60	21,90	21,57	24,89	25,0	6,27	6,64	8,34	15,10	3,43	3,39	3,92	9,8	2,45	2,35	2,43				
672033	64,30	15,61	13,55	18,76	17,0	3,89	4,01	4,44	11,10	2,01	1,98	1,95	6,5	1,32	1,25	1,25				
671934	79,80	3,24	23,25	8,21	21,3	11,04	8,88	8,48	8,20	4,20	4,10	3,28	1,7	2,77	2,04	1,64				
671852	25,80	5,06	6,78	15,67	4,9	4,57	4,80	5,31	2,20	1,40	1,76	1,62	0,4	0,03	0,02	0,13				
640246	28,70	15,44	16,91	30,53	8,9	5,50	5,87	8,16	6,00	2,60	2,92	4,41	3,5	1,77	2,00	3,05				
640138	31,40	24,72	27,48	42,06	9,0	5,04	5,56	12,00	6,10	3,40	3,65	6,84	3,7	2,50	2,54	3,84				

Tabell 16 viser MG, VG, FB og NMSE verdiene predikert fra 2004 og verdier predikert under oppgaven (rød og blå)

M. rad	MG	VG	FB	NMSE	MG	VG	FB	NMSE	MG	VG	FB	NMS
1	1,76	5,87	0,59	2,30	1,33	1,68	0,44	1,38	1,45	1,73	0,53	1,65
2	1,43	1,41	0,52	1,18	1,44	1,35	0,53	1,16	1,35	1,29	0,41	0,91
3	1,74	1,63	0,68	1,47	1,78	1,62	0,69	1,45	1,75	1,66	0,54	1,05
4	1,58	3,81	0,57	1,55	1,67	3,30	0,63	1,49	1,63	3,41	0,53	1,22
Gjennsnt	1,626	3,177	0,591	1,626	1,556	1,988	0,571	1,369	1,544	2,024	0,503	1,208

Tabell 17 viser FAC 2 verdiene fra simuleringer utført i 2004 og verdiene funnet under gjennomføringen av oppgaven (rød og blå)

Monitor	1	2	3	4	Gjennomsnittet i %
FAC2	0,789	0,842	0,789	0,632	75,00 %
FAC2	0,684	0,89	0,737	0,684	73,68 %
FAC2	0,737	0,842	0,842	0,684	78,95 %
Maks C_o	87,6	25,0	15,1	9,80	Median C_o/C_p
Maks C_p	42,06	12,0	6,84	3,84	41,75 %
Maks C_o/C_p	0,48	0,48	0,32	0,39	
Maks C_p	44,54	6,84	4,34	2,77	38,25 %
Maks C_o/C_p	0,51	0,45	0,29	0,28	
Maks C_p	53,44	8,88	4,10	2,54	37,50 %
Maks C_o/C_p	0,61	0,36	0,27	0,26	