

**Risiko knyttet til gassutslipp
under vann.
Spredning over havet.**

Rapport	
Rapporttittel Risiko knyttet til gassutslipp under vann. Videreføring 2007. Spredning over havet	Rapportnummer

Gradering		
☒ Offentlig	☐ Begrenset	☐ Strengt fortrolig
☐ Unntatt offentlighet	☐ Fortrolig	

Involverte	
Organisasjonsenhet Oppdragsgiver: Odd Tjelta, Ptil	Forfatter/saksbehandler Odd J Tveit, QPC Asmund Huser, DNV
Deltakere i revisjonslaget	Dato 20.5.2008

Rapport og prosjektinformasjon	
Sammendrag Petroleumstilsynet gjennomførte i 2006 og 2007 et prosjekt rettet mot gassutslipp under vann og risiko knyttet til slike hendelser. En sentral del av prosjektet har vært en kartlegging av de metoder og modeller som er utviklet for å beskrive og beregne forløpet av et gassutslipp; - gassens bevegelse opp vannsøylen og videre spredning i luft. I 2007 ble det etablert tre prosjekter, - med visse viktige koblinger og interaksjoner. Ptil finansierte 2 av disse: • Et StatoilHydro og Gassco finansierte prosjekt som SINTEF gjennomfører. Dette retter seg mot de fysiske prosesser under vann. • Et Ptil finansierte prosjekt som ble utført av Fanneløp og Bettilini. Dette tar utgangspunkt i de eksisterende modellene for undervannsutslipp som Fanneløp og medarbeidere utviklet, og som har vært i utstrakt bruk hittil, blant annet med henblikk på gyldigheten av disse modellene ved anvendelse på utslipp med store utslippsrater. • Et Ptil støttet prosjekt som gjennomføres i samarbeid mellom, i første rekke: DNV, Scandpower, Safetec og Lilleaker. Dette prosjektet retter seg mot spredning av gass over vann, med sikte på å avdekke om årsakene til de sprikende resultatene fra fase 1 ligger i forståelsen og beregningen av spredning over vann, og i så fall, årsakene til disse. Det er dette prosjektet som beskrives videre i denne rapportens kapittel 5. Det er fortsatt betydelige forskjeller i resultatene av beregningene fra de fire deltagende selskapene. Det anbefales at industrien arbeider videre for å redusere usikkerhetene knyttet til gass spredningsberegningene ved en videreføring av det arbeidet som er gjennomført hittil. Det er i denne rapporten pekt på en rekke spesifikke faktorer som behandles forskjellig i de ulike koder og av de ulike selskapene.	
Norske emneord Gassutslipp, Risiko, Analyse, Spredning.	
Prosjektittel Risiko knyttet til gassutslipp under vann. Videreføring 2007. Spredning over havet.	Prosjektnr
Antall sider	Opplag

Innhold

1	Innledning.....	4
2	Bakgrunn. Motiv.....	4
3	Prosjekt Fase 1, gjennomført i 2006.....	5
	3.1 Beregning/simulering av definerte utslippsscenarier. "Testcase".....	5
	3.1.1 Beskrivelse av testcase: Gassutslipp fra rørledning på havbunnen....	6
	3.1.2 Presentasjon av resultater.....	7
	3.2 Resultat av beregningene fra de fire selskapene.....	7
4	Videreføring av prosjektet i 2007.....	9
	4.1 Sintef prosjekt: Preparatory Study of Subsea Gas Release.....	10
	4.2 Fanneløp og Bettilini: VERY LARGE DEEP-SET BUBBLE PLUMES FROM BROKEN GAS PIPELINES	10
5	Fase 2: Gasspredning over vann	11
	5.1 Oppgaven i første runde:.....	11
	5.2 Resultater etter første runde.....	11
	5.2.1 Mulige årsaker til ulikheter.....	13
	5.3 En ny "runde 2" for å avdekke de underliggende årsakene.	15
	5.3.1 Gridsensitivitet.....	16
	5.3.2 Drøfting av resultatene med referanse til eddyviskositeten.	16
	5.4 Drøfting av atmosfærisk turbulens over hav.....	20
6	Sammendrag og konklusjoner.....	22
7	Anbefalinger.....	22
8	Referanser.	24
9	Vedlegg.....	25

1 INNLEDNING.

Petroleumstilsynet gjennomførte i 2006 et prosjekt rettet mot gassutslipp under vann og risiko knyttet til slike hendelser. Det ble gjennomført som et internt prosjekt, men industrien ble engasjert på ulike måter. Arbeidet ble etter hvert konsentrert om selve utslippsscenarioet; fra lekkasje/brudd på trykksatt rørledning på havbunnen, gassens strømming/spredning i vannmassene opp gjennom vannsøylen og etterfølgende spredning i luft over havflaten. En faglig god innsikt i dette scenarioet er avgjørende for forståelsen av risikobildet og muligheten for å påvirke risikoen knyttet til gassutslipp under vann.

En sentral del av prosjektet har vært en kartlegging av de metoder og modeller som er utviklet for å beskrive og beregne forløpet av et gassutslipp; - gassens bevegelse opp vannsøylen og videre spredning i luft.

Med utgangspunkt i en nærmere definert oppgave, "testcase", gjennomførte fire selskaper; DNV, Scandpower, Safetec og Lilleaker beregninger av et antall ulike utslippsscenarioer med sine modeller, - uavhengig av hverandre. SINTEF bidro med vurderinger av status hva gjelder fenomenet under vann. Ved å sammenholde resultatene ville man kunne få et bilde av i hvilken grad industrien behersker dette fagområdet. Det ville også være et godt utgangspunkt for en forbedringsprosess om det ble vurdert nødvendig.

Prosjektet ble avsluttet med et seminar 15.november, med 75 deltakere. I seminaret ble resultatene presentert og drøftet. Konklusjonen etter seminaret er at avvikene innbyrdes var større enn ønskelig, og at det er et betydelig potensial til forbedringer. En videreføring av arbeidet med dette for øye ble satt i gang etter diskusjoner mellom de interesserte parter våren 2007. Resultatene av denne videreføringen presenteres og drøftes i denne rapporten. Arbeidet har vært støttet økonomisk av Petroleumstilsynet.

Fra oljeindustriens side var det et poeng at beregningene ble gjennomført av de selskapene som normalt vil levere denne type tjenester, som risikovurderinger hvor utslipp under vann er involvert. Det innebærer at testen inkluderer test av så vel verktøy/beregningsmodeller som selskapenes kompetanse og ferdigheter på dette området. Spesialkompetanse, for eksempel når det gjelder de anvendte beregningsmodellene, vil kunne trekkes på i senere fase for å løse/avklare problemer og usikkerheter som avdekkes.

2 BAKGRUNN. MOTIV.

Flere hendelser de senere årene med gassutslipp under vann aktualiserer behovet for bedre innsikt i hvordan et utslipp av hydrokarboner under vann oppfører seg, og risikoen som er knyttet til slike utslipp. Eksempler på slike hendelser er:

- o Brudd på gasseksportledning fra Jotun A i august 2004
- o Undervanns gasslekkasje fra brønn på Snorre A i november 2004
- o Brudd på produksjonsrør fra undervannsinstallasjon, Draugen i mai 2003
- o Sprekker/brudd på strømningsrør på Åsgard-feltet og Gullfaks i 2001 -2003
- o Utsiktet utslipp i forbindelse med igangsetting av Tampen Link

Et økende omfang av installasjoner under vann på norsk sokkel øker potensialet for denne type hendelser.

Karakteristiske trekk ved en slik hendelse er:

- o Mange berørte og involverte parter, flere aktører
- o Potensial for storulykke
- o 3. person kan være eksponert
- o Miljøtap
- o Langvarig tap av produksjon og transport med store økonomiske tap og tap av omdømme

I forbindelse med hendelser av denne kategori vil det være behov for:

- o Å detektere, identifisere lekkasjen
- o Å lokalisere lekkasjen
- o Å estimere lekkasjens størrelse, ev potensial for eskalering av lekkasjens størrelse
- o Å estimere/beregne område over havet som eksponeres for brennbar gass
- o Å fastsette "sikkerhetssone", sette grenser for aktiviteter i området
- o Å identifisere og gjennomføre tiltak for å redusere risiko for tap
- o Å etablere og vedlikeholde en beredskap mot slike hendelser.

Alle disse oppgavene vil måtte bygge på en grunnleggende forståelse av de prosesser og mekanismer som styrer dette scenariet, - fra start lekkasje til eventuell eksponering av innretninger, fartøy, mennesker, inkludert en mulig antennelse av gass/luft-blandingen.

I prosjekteringsfasene vil man ha behov for å kunne forutsi/beregne forløp og konsekvenser av undervanns utslipp; dette for å kunne styre risikoen knyttet til slike hendelser gjennom valg av teknisk og operasjonell løsning.

I aktuelle utslippssituasjoner vil kunnskap om selve utslippsscenarioet danne nødvendig grunnlag for de aksjoner man velger å gjennomføre i en beredskapssituasjon.

3 PROSJEKT FASE 1, GJENNOMFØRT I 2006.

3.1 Beregning/simulering av definerte utslippsscenarioer. "Testcase".

En viktig del av prosjektet i 2006 var en kartlegging av de metoder og modeller som benyttes for å beskrive og beregne forløpet av et gassutslipp, - selve lekkasjen/utslippet, gassens bevegelse opp vannsøylen og videre overgangen til luft og spredningen/fortynningen av gassen over havets overflate.

Med utgangspunkt i en nærmere definert oppgave, "testcase", gjennomførte fire selskaper; DNV, Scandpower, Safetec og Lilleaker beregninger av dette scenariet med sine modeller, - uavhengig av hverandre. Hensikten var blant annet å fremskaffe et bilde av i hvilken grad industrien behersker dette fagområdet.

Det finnes ingen "fasit" i form av godt dokumenterte reelle hendelser eller forsøk, i reell, stor skala, som beregningene kan måles mot. De fire selskapene benytter til dels ulike modeller, de har delvis utviklet sine egne metoder og foretatt sine tilpasninger til den aktuelle oppgaven. Dette beskrives i detalj i rapportene som inngår i Appendiks til rapporten fra fase 1 /1/. Ved å sammenholde resultatene fra de fire uavhengig gjennomførte analysene får vi en god indikasjon på om industrien behersker dette området.

Opgaven ble bevisst definert slik at den var utfordrende, i grenseland når det gjelder etablert kunnskap på området. Det gjelder for eksempel "skalaen"/størrelsen på utslipp og det sterkt transiente forløpet ved fullt brudd. Det var derfor forventet at de fire selskapene ville komme ut med noe forskjellige svar. Fullt brudd på en rørledning er for øvrig i høy grad en aktuell

hendelse som vi må kunne beskrive og analysere/beregne, selv om fullt brudd på en rørledning er en sjelden hendelse. Fullt brudd gir potensial for katastrofale konsekvenser..

Oppgaven gikk ut på å beregne og beskrive scenariet som følger et gassutslipp under vann, - til og med gasskyens form, konsentrasjon og utstrekning over havet. Noen av de viktigste parameterne som styrer scenariet er:

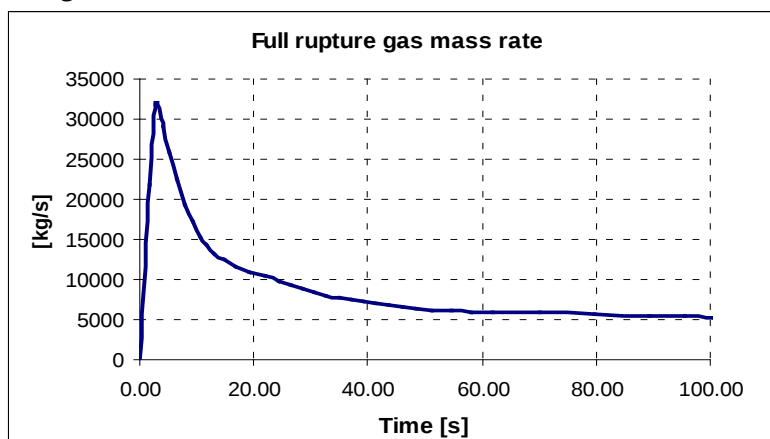
- Utslippets størrelse, - rate over tid
- Havdyp
- Vindstyrke

Disse ble i oppgaven definert som variable, men begrenset til noen få steg.

3.1.1 Beskrivelse av testcase: Gassutslipp fra rørledning på havbunnen.

Følgende er de størrelsene som ble beskrevet som felles for alle fire selskapene:

- Gassutslipp fra trykksatt rørledning på havbunnen
- Gass, tørrgass, - tetthet 0,8 kg/m³ ved havets overflate
- Scenario 1: fullt brudd. Karakteristisk for fullt brudd på en rørledning er det utpregede transiente forløp på utslippsraten, - her etter brudd på en 36" rørledning, beregnet med OLGA.



- Scenario 2: Lekkasje av størrelse 50 kg/s, konstant rate.
- Havdyp: To ulike havdyp: 300 meter og 70 meter
- "Topografi": flatt hav, Ingen installasjoner, ingen obstruksjoner, ingen havstrømmer
- Vindhastigheter: 2 m/s, 7 m/s, og 15 m/s
- Stabilitet: Nøytral

Dette gir til sammen 12 ulike scenarier:

Utslipp	Havdyp m	Vind m/s
Fullt brudd	70	2
Fullt brudd	70	7
Fullt brudd	70	15
Fullt brudd	300	2
Fullt brudd	300	7
Fullt brudd	300	15
50 kg/s	70	2
50 kg/s	70	7
50 kg/s	70	15
50 kg/s	300	2
50 kg/s	300	7
50 kg/s	300	15

3.1.2 Presentasjon av resultater

For å kunne foreta en mest mulig entydig sammenligning av resultatene fra de fire selskapene ble det spesifisert noen krav til hvordan resultatene skulle presenteres:

- Fremstilling av gasskyens form og utstrekning, med "iso-konsentrasjons"- konturer (spesifikt for LEL og ½ LEL)
- Som funksjon av tid, - når relevant
- Spesifikt for fullt brudd: gasskyens form og utstrekning 150 og 300 sekunder etter brudd på rørledning.
- Angi spesifikt maksimal utstrekning horisontalt og vertikalt
- Beskriv hvordan gassen modelleres som kilde i spredningsmodellen i luft.
- Beskriv gass/væske strømming opp vannsøylen, og gass"flux" i havflaten

3.2 Resultat av beregningene fra de fire selskapene

Resultatene er presentert i rapporter fra de fire selskapene. Disse er gjengitt i sin helhet i vedlegg til rapporten /1/. Her gjengis et kortfattet utdrag.

Det er klare forskjeller mellom de fire selskapene, - i angrepsmåte, beregningsprogram og i fremstilling og visualisering av beregningsresultatene.

For gasspredningen i luft har alle benyttet såkalte CFD-programmer som Kameleon (Scandpower), CFX (DNV og Safetec) og Fluent (Lilleaker). Senere, i fase 2, ble også FLACS benyttet.

For gass/væske strømmingen under vann har alle tatt utgangspunkt i arbeid som Professor Torstein Fanneløp og hans medarbeidere har gjennomført og publisert, med visse (ulike) tolkninger og tilpasninger, spesielt gjelder dette scenariet fullt brudd.

I tabellene nedenfor angis den beregnede maksimale **horisontale og vertikale** utstrekning av gasskyen gitt ved LEL og ½ LEL.

Lengste distanse er angitt for de fire kombinasjoner av utslippsstørrelse og havdyp. I tillegg til lengste distanse angis den vindhastigheten som ga den angitte største distanse, horisontalt resp vertikalt.

Maksimal horisontal distance til LEL og ½LEL			
Case	Dyp	LEL	½LEL
Full brudd	70 m	Scandp: 1800m (15m/s) Lilleaker: ca 500m DNV: 354m (15m/s) Safetec: >1000m (15 m/s)	Scandp: 2600m (15 m/s) Lilleaker: ca 750m DNV: 469m (15m/s) Safetec: >1000m (15 m/s)
Full brudd	300 m	Scandp: 2000m (15 m/s) Lilleaker: --- DNV: 542m (15m/s) Safetec: >1000m (15 m/s)	Scandp: 2800m (15 m/s) Lilleaker: --- DNV: 735m (15m/s) Safetec: >1000m (15 m/s)
50 kg/s	70 m	Scandp: 120m (2 m/s) Lilleaker: 76m (2m/s) DNV: 135m (15m/s) Safetec: 100m (7m/s)	Scandp: 170m (2 m/s) Lilleaker: ca 120 m DNV: 195m Safetec: 170m (7m/s)
50 kg/s	300 m	Scandp: 0 Lilleaker: --- DNV: 362m (15 m/s) Safetec: 150m (2m/s)	Scandp: 0 Lilleaker: --- DNV: 503m (15 m/s) Safetec: 220m (2m/s)

Maksimal vertikal distance til LEL og ½LEL.			
Case	Dyp	LEL	½LEL
Fullt brudd	70 m	Scandp: 900m (2m/s) Lilleaker: ca 500m DNV: 1477m (2m/s) Safetec: >200m (2m/s)	Scandp: 1200m (2m/s) Lilleaker: ca 750m DNV: 1748m (2m/s) Safetec: >200m (2m/s)
Fullt brudd	300 m	Scandp: 750m (2m/s) Lilleaker: --- DNV: 1078m (2m/s) Safetec: >200m (2m/s)	Scandp: 1100m (2 m/s) Lilleaker: --- DNV: 1287m (2m/s) Safetec: >200m (2m/s)
50 kg/s	70 m	Scandp: 50m (2m/s) Lilleaker: ca 20m (2m/s) DNV: 65m (2m/s) Safetec: 40m (2m/s)	Scandp: 60m (2 m/s) Lilleaker: ca 30m (2m/s) DNV: 71m (2m/s) Safetec: 50m (2m/s)
50 kg/s	300 m	Scandp: 0 m Lilleaker: --- DNV: 36m (2m/s) Safetec: 10m (2m/s)	Scandp: 0 m Lilleaker: --- DNV: 37m (2m/s) Safetec: 35m (2m/s)

I seminaret 15.november 2006 ble resultatene presentert og drøftet. Avvikene selskapene imellom var, som man ser av tabellene, til dels betydelige. Så store at det ga grunn til å arbeide videre for å redusere usikkerheten i dagens modeller og metoder. Arbeidet i fase 1 ga et godt utgangspunkt for å identifisere de områdene som krever avklaring og videreutvikling.

Fremstillingen i tabellene gir ikke et utfyllende bilde av resultatene (angir bare maksimal distanse horisontalt og vertikalt), men benyttes likevel her for å gi en enkel fremstilling av ulikhetene i beregningsresultatene.

Generelt må vi konstatere at resultatene viser betydelige forskjeller:

- En faktor ca 4 mellom høyeste og laveste verdi for maksimal utstrekning horisontalt til LEL ved fullt brudd, både ved 70m og 300m havdyp
- Ved utslipp 50 kg/s og 70m dyp er det bedre samsvar når det gjelder maksimal horisontal utstrekning; Scandpower:120m (2 m/s), Lilleaker: 76m (2m/s), DNV:135m (15m/s), Safetec:100m (7m/s). Imidlertid er det interessant å merke seg at to selskaper har lengst distanse ved 2m/s, mens de to andre har lengste distanse ved 15m/s, resp 7m/s.
- For utslippsscenariet 50 kg/s og 300m dyp er ulikhetene store; - fra 0 m (Scandpower) til 362 m (DNV).
 - Forklaringen her er delvis at man fremstiller ulike egenskaper, - dette illustrerer betydningen av selve presentasjonsmåten. Scandpower (Kameleon) fremstiller gjennomsnitt gasskonsentrasjon i elementene i grid'et, - verdien blir derved avhengig av størrelsen (høyden) på det laveste elementet. Safetec derimot definerer gasskonsentrasjonen på havoverflaten (innenfor "pool") lik 100 %. Det er i ettertid sjekket (Scandpower) hvordan gasskonsentrasjonen blir hvis gridet gjøres finere. Da viser beregningene gass over LEL også i Scandpowers beregninger.
- Testen/beregningene er gjort med "flatt hav", og man fremstiller gjerne "projeksjonen" av gasskyen med konsentrasjonskonturer. Dette gir ikke nødvendigvis et entydig bilde av risikoen for et fartøy eller annen bemannet installasjon. Et risikobidrag betinger tenning av gasskyen, og et objekt på overflaten, som et skip, endrer strømningsforholdene og derved gasskyens form og utstrekning. Disse forholdene er ikke behandlet i forbindelse med denne "testcasen". For et fartøy som passerer over/gjennom en gassky, vil gasskonsentrasjonen, som beregnet med "flatt hav", måtte være godt over LEL nær havflaten for å bli antatt om bord på skipet.

4 VIDEREFØRING AV PROSJEKTET I 2007

I perioden fram til april 2007 foregikk en løpende diskusjon mellom de involverte selskaper. Utgangspunktet var en erkjennelse av at avvikene selskapene imellom var stor, og at det var et forbedringspotensial i å redusere dette spriket ved en begrenset innsats i et fortsatt samarbeid mellom selskapene.

Problemstillingen var hvordan dette kunne realiseres, også finansieringen.

Konklusjonen på disse drøftingene ble etablering av **tre prosjekter**, - med visse viktige koblinger og interaksjoner. Et poeng er at man kan skille, av faglige og praktiske årsaker, mellom de prosessene/fenomenene som foregår **under vann** og de **over vann**.

De tre prosjektene er:

1. Et StatoilHydro og Gassco finansierte prosjekt som SINTEF gjennomfører. Dette retter seg mot de fysiske prosesser **under vann**.
2. Et Ptil finansierte prosjekt som utføres av Fanneløp og Bettilini. Dette tar utgangspunkt i de eksisterende modellene for undervannsutslipp som Fanneløp og medarbeidere utviklet, og som har vært i utstrakt bruk hittil, blant annet med henblikk på gyldigheten av disse modellene ved anvendelse på utslipp med store utslippsrater.
3. Et Ptil støttet prosjekt som gjennomføres i samarbeid mellom, i første rekke: DNV, Scandpower, Safetec og Lilleaker. Også Gexcon (som har utviklet FLACS) og Computit (Kameleon) har vært noe involvert i senere fase. Dette prosjektet retter seg mot spredning av gass **over vann**, med sikte på å avdekke om årsakene til de sprikende resultatene fra fase 1 ligger i forståelsen og beregningen av spredning over vann, og i så fall, årsakene til disse. Det er dette prosjektet som beskrives videre i denne rapportens kapittel 5.

4.1 Sintef prosjekt: Preparatory Study of Subsea Gas Release

Dette er en studie finansiert av StatoilHydro og Gassco.

I 2007 er prosjektet primært en kartlegging av grunnleggende kunnskap om gassutslipp under vann, fra utslippspunkt til havets overflate, inkludert overgang/interaksjon med luft i overgangen vann/luft.

Det skal etableres en kunnskapsbase for:

- Tilgjengelige observasjoner fra reelle utslipp og eksperimentelle data
- Tilgjengelige modeller av undervanns utslipp
- En gap-analyse som identifiserer ønskede forbedringer i metoder/modeller
- Foreslå aksjoner for å lukke gapene.

Rapport foreligger nå i Drafts form (mars 2008).

4.2 Fanneløp og Bettilini: VERY LARGE DEEP-SET BUBBLE PLUMES FROM BROKEN GAS PIPELINES

Alle beregningene som ble gjennomført i fase 1 av prosjektet var basert på det arbeid Professor Torstein Fanneløp tidligere har gjennomført sammen med sine medarbeidere. Fanneløp og Bettilini ble engasjert for å videreføre dette arbeidet med sikte på å etablere en felles plattform, og, så langt mulig, å utvikle modellene for anvendelse på utslipp med høye utslippsrater.

Sintef-prosjektet, som også retter seg mot fenomenene under vann, er en mer grunnleggende studie for kartlegging av "State of the Art", og forventes ikke å levere praktisk anvendelige resultater raskt.

Et undervannsutslipp av gass produserer en strømningsform kjent som en bobleplume hvor en sverm av små bobler drives mot overflaten av egen oppdrift mens de drar med seg en betydelig strøm av vann. Vannets volum og volumstrøm er mye større enn gassvolumet unntatt svært nært utslippsstedet. Dette gjelder i en etablert plume, ikke i startfasen. Boblene fordeler seg over plumetverrsnittet tilnærmet lik en gausskurve og det gjør også oppstigningshastigheten for vannet. Boblene stiger noe hurtigere, ca 30-40 cm/s mer enn midlere vannhastighet.. Dette representerer den såkalte slipphastigheten. Men dette er gjennomsnittsverdier og måleresultatene må midles over mange minutter for å gi konsistente resultater. Bobleplumen er konisk av form med spissen ned. I startfasen kan den ha en "halvkule" av vann med bobler på topp. Av utseende er startplumen sammenlignbar med sommerens iskrem bestående av en kjekskjegle med en halvkule iskrem på topp.

Det eksisterer ingen målinger for store gassutslipp på dypt vann, beregninger og modeller baseres på laboratorie-eksperimenter samt et fåtall overflateobservasjoner på åpent hav. Det er utført noen få felteksperimenter, men bare med relativt små gassmengder, av størrelsesorden kg/s. En ulykkeshendelse på sokkelen kan føre til utslipp av størrelse tonn per sekund.

Det foreliggende arbeid inkluderer først en oversikt over den informasjon som i dag er tilgjengelig vedrørende bobleplumer, både teori og eksperiment, i den hensikt å forbedre beregningsgrunnlaget for små til middels store utslipp. Prosjektet ønsket derved også å forstå bedre de problemer som knytter seg til meget store utslipp der datagrunnlaget enda mangler. Det hydrodynamiske grunnlaget for bobleplumer er kjent i prinsipp, men løsningen av de relevante ligninger avhenger av en rekke parametere som bare kan bestemmes empirisk. Flere av disse parametrene avhenger av skala og resultater fra småskalaforsøk er av usikker verdi for anvendelse på meget store utslipp på dypt vann.

Den foreliggende rapport /2/ representerer den mest omfattende parameterstudie som hittil er utført. Resultater fra alle kjente eksperimenter er inkludert i den utstrekning de oppfyller våre kvalitetetskriterier. De aktuelle parametere er variert innenfor de mulige verdier og effekten på plumens karakteristiske parametere blir gransket. Det vil være av spesiell interesse om "ikke-fysikalske" effekter oppstår. Det gir da en tilsvarende begrensning på parameteren som

studerer. Eksempler på slike ikke-fysikalske verdier kan være gassandel større en 100 % inne i plumen, eller større enn null utenfor.

Studien inkluderer også analyser og betraktninger for visse fenomener nær overflaten ("plume-surface interactions"). Det er i området hvor plumen bryter overflaten at mange av de alvorligste faremomenter opptrer både for skip og faste installasjoner. Det er oppnådd interessante resultater selv om observasjoner eller målinger, nyttig for verifikasjon, enda ikke er tilgjengelige.

5 FASE 2: GASSPREDNING OVER VANN

En gjennomgående oppfatning blant deltakerne var, etter Fase 1, at kilden til usikkerheten i beregningene, - og årsaken til de sprikende resultatene, i første rekke lå i forståelsen av utslipps- og spredningsprosessen **under vann**.

Likevel besluttet man å forfølge denne antagelsen ved å gjennomføre en serie nye beregninger av gasspredning over vann, med de samme deltakerne som tidligere, hvor utslipps-"profilen" på havoverflaten var entydig (og enkelt) spesifisert.

5.1 Oppgaven i første runde:

Følgende "Basis Case" ble valgt:

- Uniformt utslipp fra en sirkelflate med 90 m diameter.
- Gass med molekylvekt 22
- Temperatur på gass 278 K
- Lufttemperatur 278 K
- Ingen bølger
- Ingen øvrig geometri
- Nøytralt vindprofil (Pasquill klasse D over hav)

Gassen slippes ut med konsentrasjon 1. og med hastighet som gitt av kontinuitetsligningen.

4 ulike kombinasjoner av utslippsrate og vind (case):

1. Massestrøm gass 450 kg/s, vind 3 m/s
2. Massestrøm gass 450 kg/s, vind 7 m/s
3. Massestrøm gass 40 kg/s, vind 3 m/s
4. Massestrøm gass 40 kg/s, vind 7 m/s

Etter en periode med drøfting om mer spesifikke valg og forutsetninger, som felles/"standard" grid-oppløsning, turbulensmodellering, vindprofil o.a., valgte man å stille selskapene relativt fritt når det gjelder slike valg.

- Alle bruker/velger (i hvert fall i første runde) de parameterverdier og forutsetninger de normalt ville anvende (følger "oppskriften" som koden angir). De valgene som er foretatt beskrives (og drøftes) som del av oppgaven.
- Noen "følsomheter" er det rimelig at man beregner som egen sjekk, - for eksempel når det gjelder gridsensitivitet.
- Resultatene bør presenteres detaljert, som:
 - Konturene for 10 % LEL, 1/2 LEL, LEL (bruk 4,4 vol %), og 9 vol % (Støkiometrisk).
- Ta vare på eddyviskositets-profiler.

5.2 Resultater etter første runde.

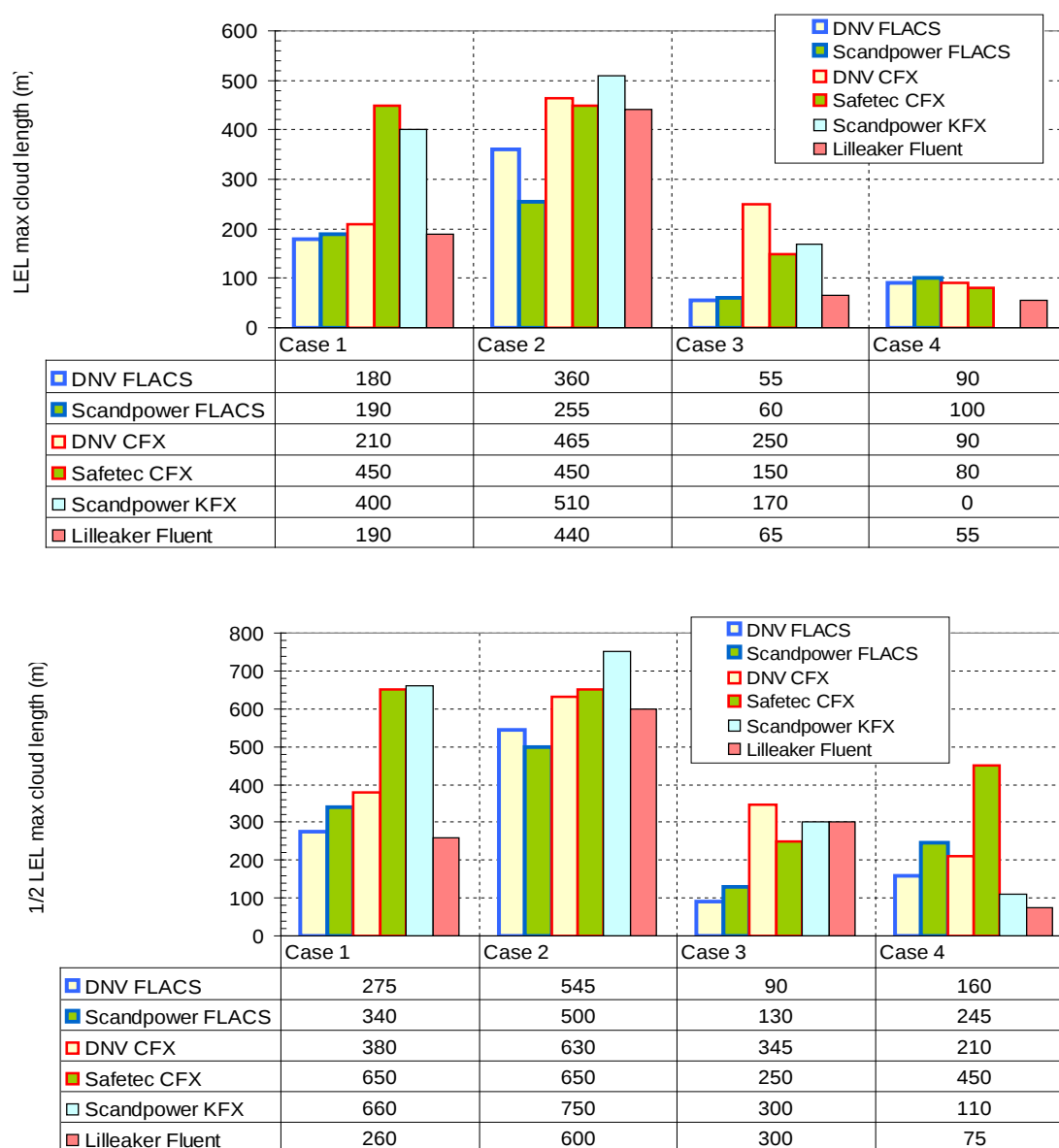
To av selskapene valgte å benytte to forskjellige programmer:

- DNV benyttet både FLACS og CFX

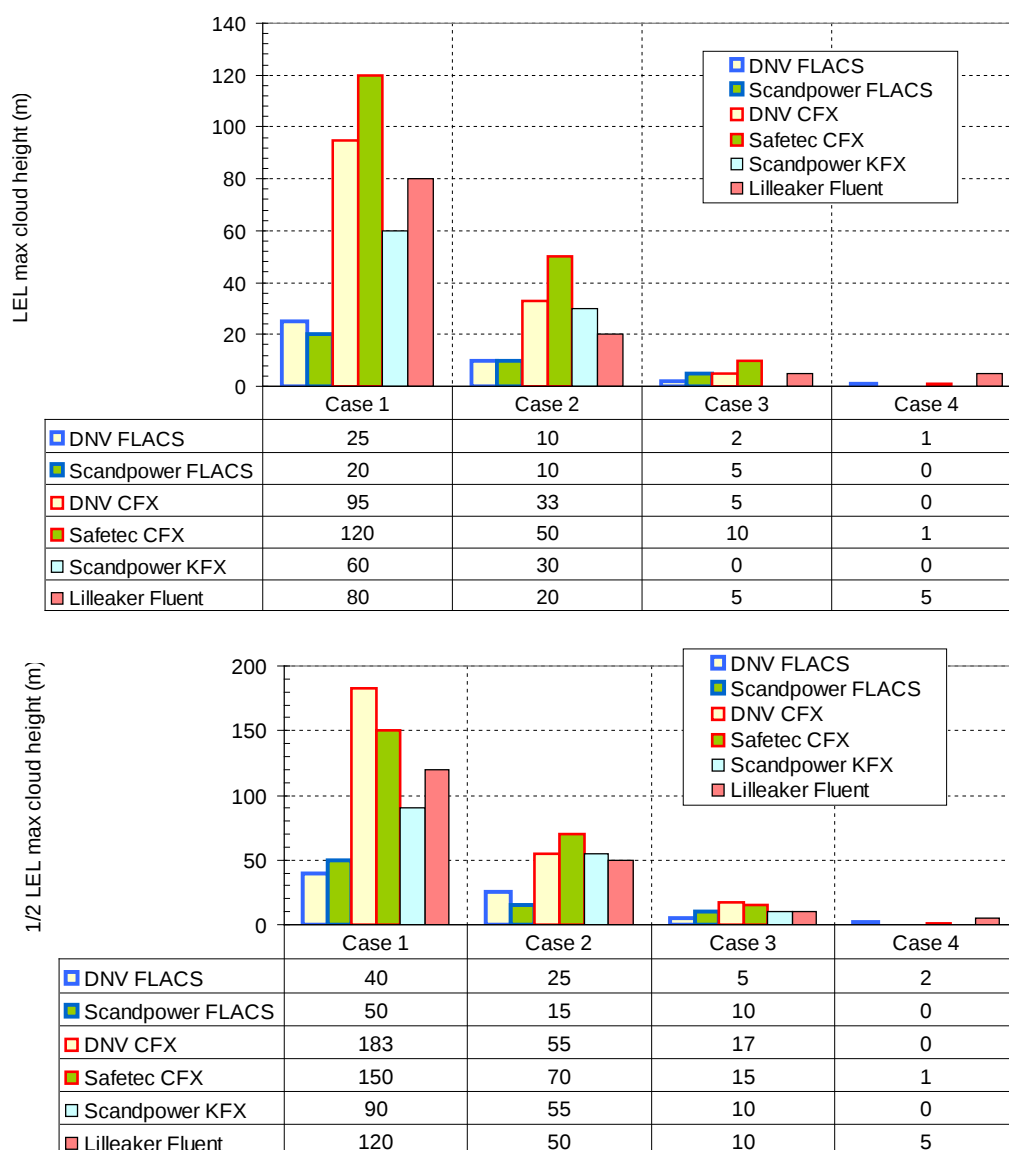
- Scandpower benyttet FLACS og KFX
- Safetec benyttet CFX
- Lilleaker benyttet Fluent

Dette gir anledning til en viss grad av ”kryss-sjekk”, ved at både FLACS og CFX benyttes av to selskaper. CFX benyttes av Safetec og DNV, og FLACS benyttes av Scandpower og DNV. Resultatene fra de 4 selskapene er sammenliknet i figur 1 og 2 under. De største forskjellene er observert for case 1 og 3 (lav vindhastighet 3m/s) hvor resultater fra FLACS, CFX fra DNV og Fluent gir en utstrekning av gasskyen, til LEL, som er mindre enn halvparten sammenliknet med KFX og CFX fra Safetec.

Noe tilsvarende for utstrekning til ½ LEL. For case 1 og 3 er det lav vindhastighet (3 m/s), og vi får en plume som i større grad løfter seg. For Case 2 (7 m/s vind) er det også relativt store forskjeller, også her gir FLACS kortere utstrekning enn de andre.



Figur 1 Resultater av beregningene. Fremstilling av maksimal horisontal distanse til LEL, øverst, og ½ LEL, nederst.



Figur 2 Resultater av beregningene. Fremstilling av maksimal vertikal distanse til LEL, øverst, og 1/2 LEL, nederst.

Når det gjelder maksimum høyde til LEL og 1/2 LEL ser vi enda større avvik mellom de seks resultatene. Mønsteret er i grove trekk det samme; de med størst horisontal utstrekning har også stor vertikal utstrekning.

Resultatene viser stor spredning mellom de enkelte selskapene, og mellom de CFD-kodene som er benyttet, - selv om man her benytter (nær) identiske startbetingelser ved overgangen hav/luft. Altså kan vi konstatere at usikkerhetene også er knyttet til spredningsberegningene, ikke bare til fenomenene under vann.

Selv om det i dette prosjektet var begrensede ressurser, valgte man å gå videre for å forsøke å avdekke årsakene til de relativt store forskjellene.

5.2.1 Mulige årsaker til ulikheter

Nedenfor drøftes kortfattet mulige årsaker til de observerte forskjellene. Vi har ingen "sann" referanse i form av for eksempel målinger av utslipp i stor skala. Drøftingen av mulige årsaker tar utgangspunkt i innbyrdes ulikheter.

5.2.1.1 Gridavhengighet.

Det er kjent at ved å bruke for grove grid vil numerisk diffusjon føre til at løsningen ”smøres ut” og man kan få kortere plumer. Noen tester ble foretatt som viser at gridavhengigheten ikke er stor, men de testene som er gjennomført er få, og ikke tilstrekkelig systematisk gjennomført til å trekke klare konklusjoner.

5.2.1.2 Utslippsgrensebetingelse for hastighet på gassen som kommer opp fra havet.

Her er det forskjell på hvordan FLACS og de andre kodene modellerer utslippet. I FLACS er det en begrensning på antall celler man kan definere som utslippsceller, og det medførte at DNV og Scandpower benyttet forskjellige måter å modellere utslippene på enn de andre. DNV og Scandpower benyttet også innbyrdes forskjellige måter å modellere utslippet i FLACS..

DNV valgte å benytte et relativt grovt grid, og symmetribetingelser. Med symmetribetingelsen ble kun halve domenet beregnet, og dermed også et halvt utslippsareal. Alle cellene i utslippsarealet ble definert som utslippsceller og det maksimale antallet celler i FLACS ble benyttet (50 celler) sammen med et grid på ca 4x4 m. Scandpower benyttet et begrenset antall utslippsceller innenfor utslippsarealet og et noe finere grid enn DNV. Utslippscellene ble jevnt fordelt utover utslippet. Utslippshastigheten ble dermed lavere hos DNV enn hos Scandpower. Resultatene fra Scandpower viser også tegn på at gassen kommer fra mindre enkeltstående kilder i utslippet.

FLACS resultatene fra DNV og Scandpower er ikke så forskjellige. Dermed er det to muligheter, enten spiller måten man modellerer gassutslippet på liten rolle; eller så har den betydning, og da er det er i tillegg andre forhold som påvirker resultatene.

I de andre programmene ble utslippet modellert som et kontinuerlig flatt profil over hele utslippsarealet. Måten DNV modellerte FLACS utslippet likner mest på de andre kodenenes måte å modellere det på.

5.2.1.3 Turbulensparameter på utslippsgassen opp fra havet.

Det ble spekulert på om verdien på k og ϵ som settes på grensebetingelsen for gassen som kommer opp fra havet kunne påvirke resultatene. Gassen bobler opp med lav hastighet i forhold til vindhastigheten og det er grunn til å tro at turbulens/variasjon i gasshastigheten er liten i forhold til turbulensen som skapes av det turbulente grensesjiktet over havet.

5.2.1.4 Grensebetingelser for vind og turbulens i det atmosfæriske grensesjikt.

Det er funnet at de forskjellige kodene benytter meget forskjellige verdier på k og ϵ på grensebetingelsen for innstømmende luft. Det er grunn til å tro at dette påvirker spredningslengdene, spesielt siden det ikke er geometrielementer i modellen og all turbulens skapes pga vind og gassutslipp. I DNVs presentasjon i Vedlegg 1 er det beskrevet hvordan eddyviskositeten kan sammenliknes med diffusjonskoeffisienten i varmetransportlikningen. Økt eddyviskositet er analogt med høyere diffusjon og dermed mer innblanding med luft og kortere plumer.

5.2.1.5 Turbulensmodeller og parametere som er brukt.

Det er antatt at standard k - ϵ modeller er benyttet i alle kodene. Men det er visse parametere som ikke er standardisert. Dette gjelder blant annet det turbulente Schmidt tallet,

og her benyttes $Sc = 0,7$ i FLACS og $Sc = 0,9$ i KFX. I transportlikningen for massefraksjon til gass er diffusjonskoeffisienten omvendt proporsjonal med Schmidt tallet. etter formelen,

$$D = \rho v_T / Sc$$

Hvor v_T er den turbulente eddyviskositeten, og ρ er tettheten.

Dermed blir diffusjonen større i FLACS enn i KFX. Det er også spekulert i om modellering av oppdrift er gjort på forskjellige måter. Dette kan ha betydning spesielt for scenariene med lav vindhastighet.

5.2.1.6 Numerisk diskretisering av RANS likningene.

De forskjellige kodene gir meget forskjellige verdier på k og epsilon (og dermed eddyviskositeten) nedstrøms utslippet (se sammenlikning av eddyviskositeter i DNVs presentasjon i vedlegg 1). Beregninger med CFX gir reduksjon i eddyviskositet over plumen i case 1, mens FLACS beregningene gir økning av eddyviskositeten i den samme casen (sammenlikne slide 26 og 27). Grunnen til dette kan enten være forskjellig definering av oppdriftsledet i epsilon likningen, eller forskjeller i numerisk diskretisering av transportlikningene. For beregning av k og epsilon benyttes dobbeltderiverte og kryssderiverte av hastigheten i kildeleddene. Måten disse leddene diskretiseres på (bl.a. orden på diskretiseringen og gridoppløsning) kan påvirke resultatene.

5.3 En ny ”runde 2” for å avdekke de underliggende årsakene.

Selskapene var ikke fornøyd med resultatene av beregningene som var gjennomført, og presentert på en felles samling i Trondheim. Spørsmålet var hvordan vi best kunne komme videre på en ikke altfor arbeidskrevende måte.

Gruppen kom fram til en ”strategi” som bygget på følgende antakelse:
Forskjellene i gassspredningsresultatene ligger:

- enten forskjell i spesifikasjon og beregning av selve fysikken (spesielt turbulensen),
- eller i selve numerikken (numerisk diffusjon).

Det å teste ut numerikken i de ulike programmene vil kreve en god del arbeide, og tett inngrep med modellutviklerne av CFD-kodene ville være påkrevd. Det ble derfor valgt å prøve å identifisere forskjeller når det gjelder vind og turbulensprofil i de forskjellige beregningene.

Iso-kurver eller flater i to eller tre dimensjoner blir som regel vanskelige å sammenligne rent kvantitativt. Derfor ble det besluttet at alle tar ut resultatene langs en vertikal linje, ett umiddelbart oppvinds gassutslippet i havoverflaten og ett umiddelbart nedvinds. Det som skulle presenteres var:

- hastighetsprofil
- turbulent kinetisk energi
- dissipasjon av turbulent kinetisk energi
- eddyviskositet

Hvis vi konstaterer at eddyviskositeten er forskjellig i de forskjellige programmene, så kommer straks spørsmålet om hvorfor. Neste skritt vil da bli å sammenligne k og epsilon. Derfor bør dataene for k og epsilon også tas ut samtidig.

Det var antatt at det ville være enkelt å ta ut disse profilene fra resultatene som alt forelå. I praksis viste det seg at dette ikke var tilfelle, - for noen CFD-koder ligger dette bedre til rette enn for andre.

Dersom disse profilene viser store forskjeller seg imellom, er det en indikasjon på at noe av årsaken til sprik ligger her, og vi får en indikasjon på hva det må jobbes videre med. Hvis ikke så bør vi gå videre og granske andre forhold, som ulikheter når det gjelder "numerikken", - som numerisk diffusjon.

De effekter som undersøkes videre i runde to er gridsensitivitet, grensebetingelser for utslippsgassen og grensebetingelser for luft. Turbulensmodeller og numerikk ble ikke videre undersøkt. Grunnen til dette er ikke at turbulensmodellene og numerisk diskretisering ikke er viktig, men at deltagerne ikke har nødvendig tilgang til kodene og dermed vanskelig kan undersøke dette.

5.3.1 Gridsensitivitet

Grid og diskretiseringsskjema er forskjellige i de forskjellige kodene. Men grid sensitivitets studier viser at løsningene ikke er mye påvirket av oppløsningen. Scandpower (se Vedlegg 2) og Gexcon, ref. 3, har sjekket grid følsomheten for KFX og FLACS og det viser seg at man kan bruke et forholdsvis grovt grid ($dx=4m$) uten at plume lengdene forandres signifikant. En mulig forklaring på at gridet kan være forholdsvis grovt ($dx=4m$) er at den turbulente diffusjonen er så høy at den numeriske diffusjonen ikke bidrar.

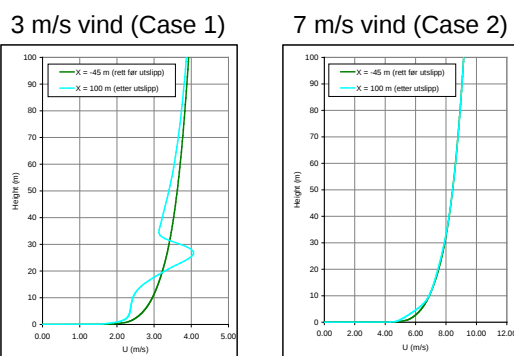
Dersom den turbulente diffusjonen reduseres, kan løsningen være mer avhengig av finere grid. Dette er ikke undersøkt videre i dette prosjektet.

Det burde være mulig å komme fram til en "smertegrense" for hvor grovt grid man kan tillate i denne type beregninger.

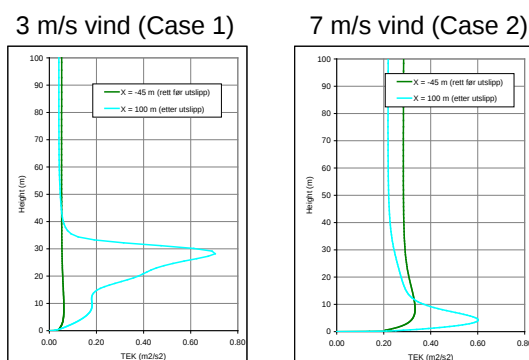
5.3.2 Drøfting av resultatene med referanse til eddyviskositeten.

Eksempler på hastighets og turbulensprofiler er gitt i figur 3 under (tatt fra Scandpowers KFX beregninger). I DNVs presentasjon i Vedlegg 1 er likningene for massefraksjon til gass og eddyviskositet gitt. Eddyviskositeten inngår i transportlikningen for massefraksjon gass og den er en funksjon av k og ϵ , Derfor er det naturlig å drøfte eddyviskositeten. Ved høyere eddyviskositet blir det mer diffusjon og det kan gi mer innblanding av luft.

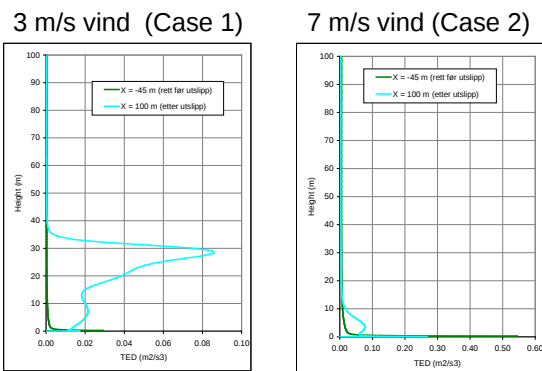
Vindprofiler for case 1 og case 2 (utslipp 450 kg/s)



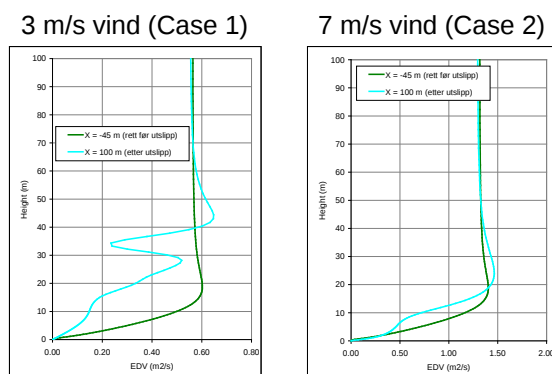
Turbulent kinetisk energi for case 1 og case 2 (utslipp 450 kg/s)



Dissipasjon av turbulent kinetisk energi for case 1 og case 2 (utslipp 450 kg/s)



Eddyviskositet for case 1 og case 2 (utslipp 450 kg/s)



Figur 3 Vind og turbulens profiler fra Scandpowers KFX beregninger. Kun profiler fra Case 1 og 2 er vist. Oppvinds profilene ($x=-45$) er identiske med case 3 og 4. Nedvindsprofilene ($x = 100$) er påvirket av utslippet og utvikling langs overflaten.

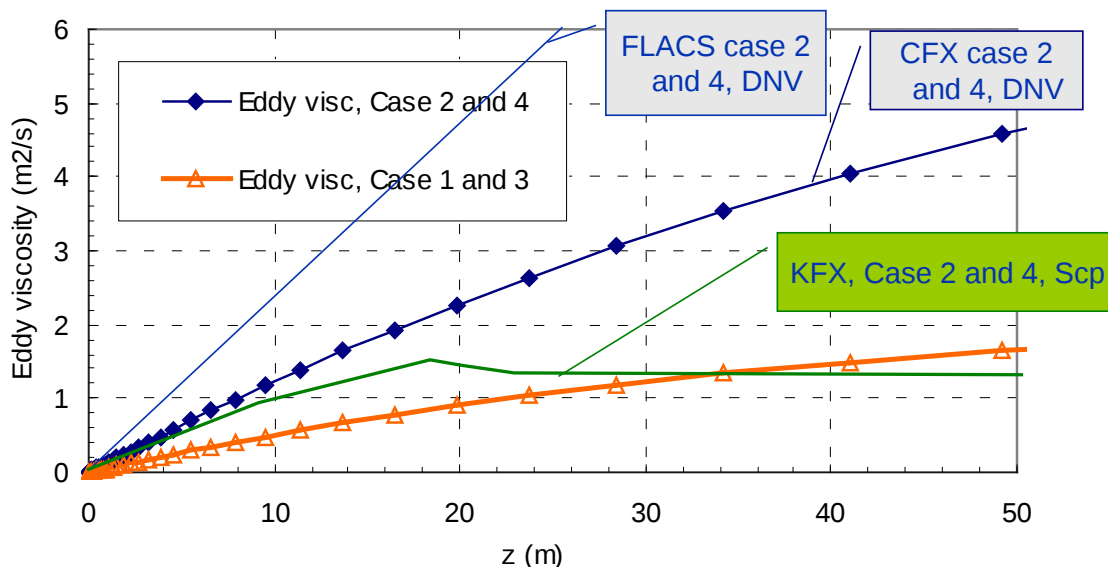
5.3.2.1 Grensebetingelse for vind og turbulens i det atmosfæriske grensesjikt

For Case 1 (Massestrøm gass 450 kg/s, vind 3 m/s) er det foretatt sammenlikninger av eddyviskositetsprofilene rett oppvind utslippet mellom FLACS /DNV, CFX /DNV og KFX / Scandpower. Det viser seg at FLACS/DNV og CFX/DNV har de høyeste eddyviskositetene over ca 10 m (see fig. 4). FLACS eddyviskositet er betydelig høyere enn de andre. Det er antatt at dette kan være noe av årsaken til at FLACS og CFX får en mye bedre mixing, og dermed kortere og lavere plume i Case 1.

En mulighet ville være å etablere felles, ”standard” profiler for k og epsilon på grensebetingelsen for vind. Dette bør det være mulig å legge inn eller velge i de forskjellige CFD kodene. Siden profilet ikke er entydig bestemt fra utendørs målinger, spesielt ikke over havet, bør det benyttes et profil som er ”på den sikre siden”. Dvs, et profil med lavere eddyviskositet framfor et med høyere.

Scandpower har foretatt en test med Case 2 og KFX med forskjellige turbulente lengdeskalaer på grensebetingelsen for luft og i modellen (se vedlegg 2). I Case 2 er det 7 m/s vind og oppdriften har mindre betydning. De har variert turbulent lengdeskala og får liten forskjell i lengden til LFL med forskjellige lengdeskalaer. Det oppnås forskjellig form på gassplumen; med liten lengdeskala deler plumen seg i to tunger, mens med lengre lengdeskala er det kun en tunge. I denne beregningen blir lengden til LFL overraskende lengre med økt lengdeskala.

Det er antatt at økt lengdeskala også øker mengden turbulens og verdien på eddyviskositeten, men det er ikke foretatt en kvantitativ sammenlikning av eddyviskositetene. Forskjellen kan skyldes at plumen deler seg og at den dermed blir bredere og kortere med kortere lengdeskala. Årsakene til dette spesielle forløpet kan være at andre forhold enn turbulensnivået også er forandret, som hastighetsprofilet, eller at bidrag fra numerisk diffusjon er forskjellig. Det anbefales å undersøke dette videre i samarbeid med kode utviklerne.



Figur 4 Eddyviskositetsprofiler sammenliknet for 3 koder.

5.3.2.2 Sammenlikning av FLACS i beregningene fra DNV, Scandpower og Gexcon

Eddyviskositeten som er benyttet av Scandpower (FLACS) er betydelig lavere enn DNV (se tabell i DNVs presentasjon i vedlegg 1 som viser eddyviskositeten oppvind utslippet), noe som skulle tilsi en lengre plume for Scandpower. Men Scandpowers FLACS simuleringer viser omtrent de samme lengdene som DNVs lengder. Scandpower benytter også en annen modellering av utslippskilden. Denne er modellert som utslipp i noen av cellene i utslippsarealet hos Scandpower, mens DNV har et utslipp i alle cellene.

Dette gjør at hastigheten på gassen opp fra havet blir høyere hos Scandpower. Det kan være to effekter som virker mot hverandre som forårsaker dette. Fra FLACS/DNV er det høy eddyviskositet og lav utslippshastighet, mens fra FLACS/Scandpower er det motsatt. Disse effektene virker motsatt på spredningslengden og kan dermed forårsake at liknende plume lengder oppnås.

Simuleringene ble også foretatt av Gexcon, ref. 3, og de får også kortere lengder med FLACS enn de andre kodene (hhv. 200 og ca 325 m til LEL skyen i Case 1 og Case 2). Gexcon og Scandpower modellerer utslippet på samme måte med færre utslippsceller og høyere hastighet. Eddyviskositeten som ble benyttet i Gexcons beregninger er ikke kjent.

5.3.2.3 Forskjell i utslippshastigheten til gass i KFX

Scandpower har testet effekten av å variere utslippshastigheten til gassen ved å endre porøsiteten i utslippsområdet i KFX. Resultatene i vedlegg 2 viser at utslippshastigheten har en betydelig effekt på plume lengden i Case 2. Ved høyere utslippshastighet oppnås mer innblanding med luft i starten, og dermed kortere plumer.

5.3.2.4 Turbulent Schmidt tall

En annen kilde til forskjell mellom KFX og FLACS er at det er benyttet forskjellige turbulente Schmidt nummer, Sc . Schmidt tallet inngår i massetransportlikningen for gass, i diffusjonsleddet, som en konstant man deler eddyviskositeten på.

FLACS og KFX bruker hhv. $Sc=0,7$ og $0,9$. Dette gjør at FLACS kan få kortere spredningslengder enn KFX, selv om denne forskjellen ikke er antatt å forklare hele forskjellen.

K-epsilon modellen er et kompromiss mellom flere strømningsfenomener, noe som kan forklare hvorfor forskjellige verdier på Sc er benyttet. Det er ikke foretatt forsøk hvor kun Sc er forandret i dette prosjektet med spredning over havet.

DNV har foretatt beregninger av en H2 lav impuls jet som viser at konsentrasjonen reduseres noe (ca 2-5 % for denne casen) når Sc reduseres fra $0,9$ til $0,7$. En tilsvarende sammenlikning anbefales for å finne den isolerte effekten av Sc på spredning over havet.

5.3.2.5 Andre turbulensparametere

Det er antatt at alle kodene (FLACS, KFX, CFX og FLUENT) bruker standard k-epsilon modeller. I denne "standard" modellen kan oppdriftsleddet i transportlikningen for epsilon defineres noe forskjellig.

Derfor anbefales det å sammenlikne hvordan disse er definert og modellert i de forskjellige kodene. Det er antatt at de andre parametrene som inngår i k-epsilon modellen ikke er forskjellige.

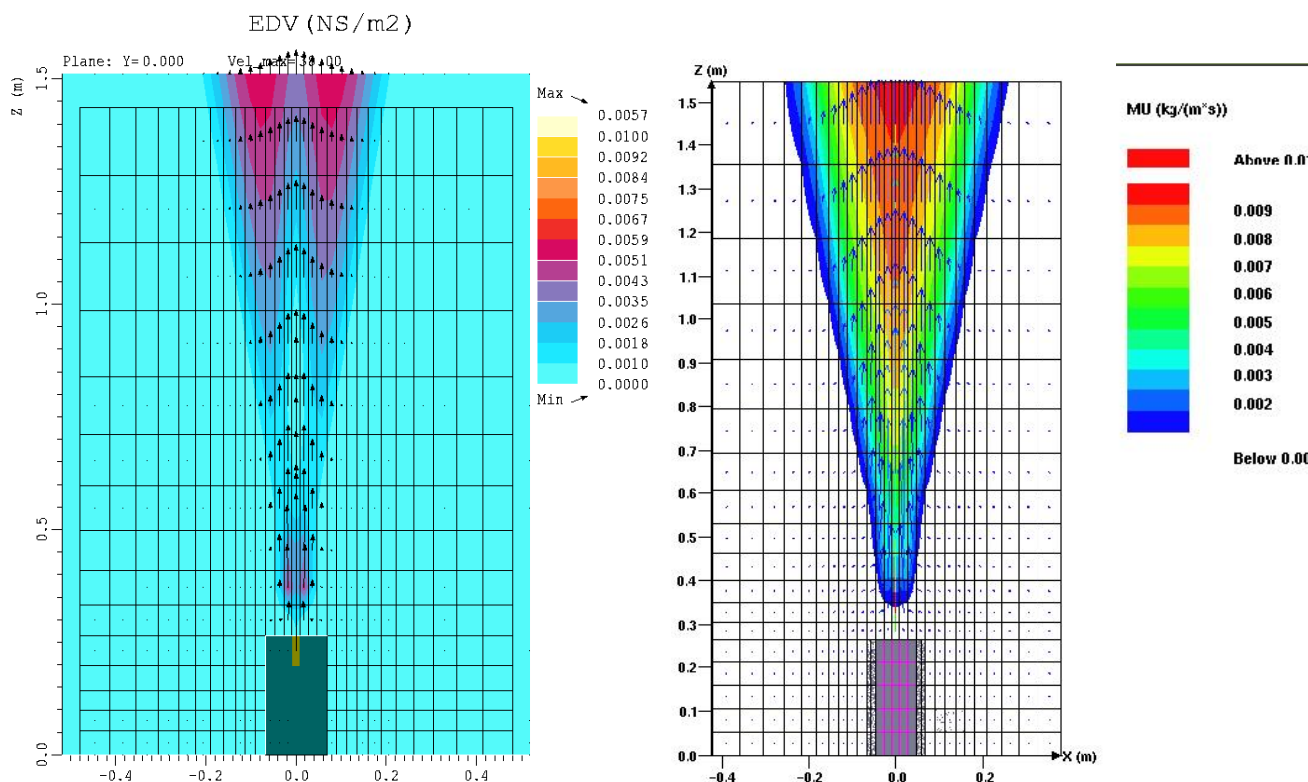
5.3.2.6 Numerikk og diskretisering

Ved å studere eddyviskositetsprofilene gjennom eller nedstrøms gassutslippet ser vi at det er store forskjeller mellom kodene. Disse profilene er vist i vedleggene og typisk gir FLACS en høy eddyviskositet gjennom plumens centerlinje, mens de andre kodene gir en *reduksjon* av eddyviskositeten (sammenlign for eksempel Slide 26 og 27 i vedlegg 1). Dette kan også være med på å forklare hvorfor FLACS gir raskere innblanding og kortere plumer enn de andre kodene. Dette er også undersøkt noe videre i neste kapittel.

5.3.2.7 Enkel test for sammenlikning KFX med FLACS

I en test med en lav hastighets jet har DNV sammenliknet k , epsilon og eddyviskositeten som blir beregnet med KFX og FLACS, og det viser seg at disse blir beregnet forskjellig. Det samme gridet er benyttet. KFX beregner en konisk ring rundt jetten med høy eddyviskositet, mens FLACS gir en høy eddyviskositet i jettens kjerne (se fig. 5). I FLACS er også den maksimale verdien til eddyviskositeten høyere enn i KFX. Den samme trenden og lignende bilder er observert i utslippet fra havet.

Grunnen til disse forskjellene kan være forskjellig modellering av oppdriftsleddet (som inngår i likningene for epsilon), eller forskjellige måter å diskretisere leddene i transportlikningene for k og epsilon. I likningen for epsilon inngår det dobbeltderiverte og kryssderivate av hastighetene. Det anbefales derfor å undersøke nærmere i kontakt med utviklerne av kodene hvordan oppdrift og diskretisering er foretatt.



Figur 5. Sammenlikning av KFX (venstre) og FLACS. Konturplot av eddyviskositet i symmetriplanet til en lav impuls vertikal jet. Dette forsøket er foretatt med H2. KFX ga betydelig lavere konsentrasjon enn FLACS.

5.4 Drøfting av atmosfærisk turbulens over hav.

Atmosfærisk turbulens arter seg forskjellig fra turbulens i vindtunnel pga. blant annet påvirkning fra storskala fenomener (Coriolis kraften, påvirkning fra forhold i høyere luftlag, etc.) Derfor er det for eksempel forskjeller i turbulensprofilene for innendørs og utendørs strømming. Gode målinger eksisterer for alle variable som inngår i turbulensprofilene for innendørs vindtunnel strømming over en flat plate. For utendørs, atmosfæriske strømminger over land er det ikke foretatt gode målinger (oss bekjent, ref 7) av spesielt dissipasjon av turbulent kinetisk energi, epsilon. For de andre variable som hastighetsprofil og turbulent kinetisk energi er det utført målinger over land.

For atmosfæriske grensesjikt over havet finnes det enda færre målinger, og de profiler som er brukt som input i CFD koder er utledet fra atmosfæriske grensesjikt over flatt land. Det benyttes forskjellige grensebetingelser i de forskjellige CFD kodene for turbulens og hastighetsprofilen for atmosfæriske grensesjikt. Dette er tydelig ved sammenlikning mellom de ulike beregningene.

Spesielt er k og epsilon profilene forskjellige. Dette er eksempelvis vist i figur 4, hvor eddyviskositetsprofiler fra tre koder er sammenliknet. Eddyviskositeten er den eneste parameteren som inngår i transportlikningen for naturgass, og denne parameteren er bestemt av k og epsilon etter formelen:

$$\nu_t = \frac{\mu_t}{\rho} = C_D \frac{k^2}{\varepsilon}$$

Hvor ν_t er eddyviskositeten, μ_t er dynamisk eddyviskositet, ρ er tettheten, C_D er en konstant = 0,09 (ofte også kaldt C_μ), k er turbulent kinetisk energi, og ε er dissipasjon av turbulent kinetisk energi.

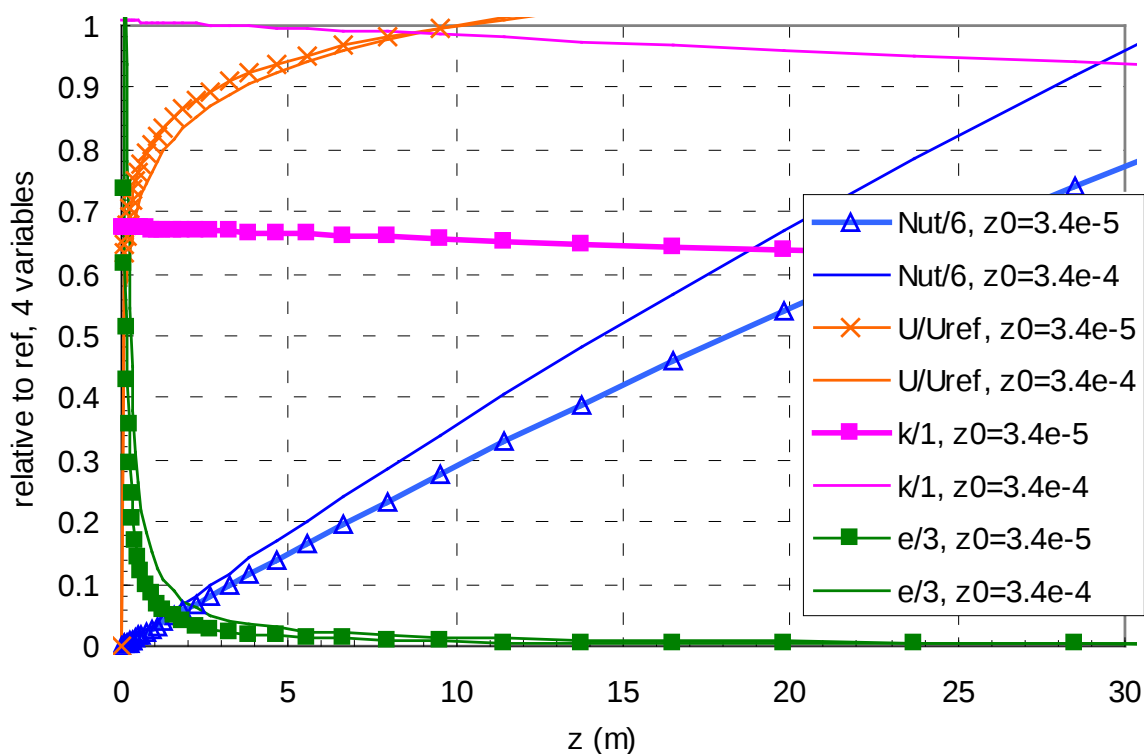
Turbulensprofiler (eddyviskositeter etc) er ikke entydige i de beregningene som er foretatt.

Profilene som benyttes i FLACS er fra ref 5. og profilene som DNV benyttet for CFX er hentet fra ref 6. I FLACS gir det høyere eddyviskositet enn det DNV bruker i CFX. I KFX er profilet flatt over en viss høyde over bakken (fra ca 10-15 m i fig. Xx), mens i FLACS og CFX DNV er det stigende opp til et høyt nivå (over 50 m).

For å kunne sammenlikne de forskjellige kodene, må man plote de samme parametrene, og plote de på en standard måte. Av feltvariable som anbefales plottet er det eddyviskositeten, ν_t ; turbulent kinetisk energi, k ; og dissipasjon av turbulent kinetisk energi, ε . I tillegg til hastigheten. Disse kan plottes både som konturplot i symmetriplanet, eller andre kritiske plan; som profiler (linjeplot som funksjon av z); og tabuleres i punkter. Under i Figur 6 er gitt eksempler på linjeplot for de anbefalte parametrene. Disse er benyttet av DNV i CFX (fra ref. 6)

Det er kjent fra vanlige turbulente grensesjikt over en flat plate at turbulensnivået er avhengig av ruheten på overflaten. Når dette grensesjiktet går over vann, vil dette også påvirke turbulensnivået. Det er antydnet at effekten av vann som følger med vinden, og bølger som oftest går med vinden, også vil påvirke turbulensprofilene over vannet. Ref. 4. og 7 antyder også at det er forskjeller mellom grensesjikt over land og over havet. Grunnen er både effekten av forskjellige forhold for veggfriksjonen (ruhet) og varmeovergang. Dette vil kunne påvirke spredningslengdene. Dersom vannet gjør at det skapes mindre turbulens, vil det kunne medføre lengre spredningslengder over vann enn over land.

Det anbefales å søke i litteraturen etter målinger som er foretatt for atmosfæriske grensesjikt over havet. Det er mulig at det finnes målinger av k , men ikke av epsilon (ref. 7). Dersom målinger av k finnes, kan man si noe om høyden på det turbulente sjiktet nære havoverflaten, samt turbulensnivået sammenliknet med grensesjikt over land. Man kan da kanskje si noe mer sikkert om spredningsforholdene over havet kontra over land.



Figur 6. Profiler av vindhastighet og turbulensparametre som er anbefalt å plottes. I dette plottet er også effekten av to forskjellige overflateruheter, z_0 , tatt med. Vindhastigheten, U_{ref} , er 6 m/s. Nut er den turbulente eddyviskositeten, U er vindhastigheten, k er turbulent kinetisk energi, og e er dissipasjon av turbulent kinetisk energi.

6 SAMMENDRAG OG KONKLUSJONER.

Etter den testen som ble foretatt i Fase 1 av prosjektet (resultatene referert i kapittel 3) var det en utstrakt oppfatning at de dominerende usikkerhetene lå i kunnskapen om de fysiske fenomenene **under vann**, - til og med selve overgangen hav/luft, og i evnen til å modellere og beregne dette scenariet.

De undersøkelser som nå er gjennomført, - beskrevet i kapittel 5, viser at usikkerheten er betydelig også når det gjelder fenomenet **over vann**.

For de få beregningseksemplene som er valgt (4 kombinasjoner av utslippsrate og vindstyrke) ser vi forskjeller når det gjelder en parameter som "lengste horisontale utstrekning av gassky" på en faktor større enn 2 (ved vind 7 m/s). Enda større forskjeller (mellom største og minste) opptrer ved lav vindhastighet og når det gjelder maksimal utstrekning vertikalt.

Dette prosjektet har ikke hatt ressurser til å gå tungt og systematisk til verks for å avdekke årsakene til disse ulikhetene.

Mulige årsaker er drøftet, og gjengitt i denne rapporten. Dette er basert på de gjennomførte beregningene, og en del enkeltforsøk, som å se sjekke effektene ("følsomheter") av å variere enkelte parametere.

Utover dette ble det kjørt en "runde to", som fokuserte på likheter og ulikheter i turbulens (hastighetsprofil; turbulent kinetisk energi, dissipasjon av turbulent kinetisk energi; eddyviskositet).

Til dels store ulikheter er avdekket selskapene imellom. Disse drøftes i kapittel 5.3 og 5.4, og det pekes på muligheter som foreligger for å redusere de sprikene vi har sett i beregningene. Flere av disse er slik at det, for å komme videre, vil være hensiktsmessig/nødvendig å bringe inn utviklingsmiljøene for de enkelte kodene som benyttes.

I varierende grad har de enkelte selskaper gjort sine egne undersøkelser, trigget av de resultater de ser i egne beregninger sammenholdt med de øvrige. Dette arbeidet er bare i liten grad benyttet og gjengitt i denne rapporten.

7 ANBEFALINGER.

Som nevnt er det avdekket betydelige forskjeller i resultatene av beregningene fra de fire deltakende selskapene. En nærliggende anbefaling ville være å gjennomføre fysiske forsøk i reell, tilstrekkelig stor skala. Dette vil kunne gi en "facit", referanseverdier som de ulike modellene vil kunne testes mot. Vi innser imidlertid at dette vil være krevende i form av ressurser og kompetanse.

I et kortere perspektiv vil det være mulig å redusere usikkerhetene i slike beregninger ved en videreføring av det arbeidet som er gjennomført hittil. Det er i denne rapporten pekt på en rekke spesifikke faktorer som behandles forskjellig i de ulike koder og av de ulike selskapene. Det er videre trukket visse spesifikke konklusjoner og anbefalinger med basis i de analysene som er gjennomført:

Eddyviskositeten bestemmer mye av lengdene på gasskyene, og forskjeller i eddyviskositet er for de fleste beregningene observert å sammenfalle med forskjeller i gassky lengdene (høyere eddyviskositet gir kortere gasskyer). Årsakene til forskjellene i eddyviskositeten kan forklares ut fra både forskjellige grensebetingelser for luft, og forskjellig diskretisering eller modellering av k og ϵ . I noen tilfeller kan også ulikheter i utslippshastigheten til gassen være årsaken til forskjellene.

For å komme fram til en mer konsistent modell anbefales følgende:

- Det bør arbeides videre for å komme fram til entydige profiler for det atmosfæriske grensesjikt for k og ϵ som alle kan bruke som grensebetingelser for luft i de forskjellige CFD kodene. Entydige profiler er ikke funnet fra målinger eller fra litteraturen, og det anbefales derfor å utlede profiler fra de teorier og målingene som finnes, samt sammenlikne resultater med de sprednings-målinger som finnes for å finne den beste tilnærming. Det anbefales også å foreta et videre litteratursøk. Dersom målinger av verken turbulens i grensesjiktet eller av store utslipp finnes for utslipp over hav, anbefales det å legge seg på den sikre siden med en lavere eddyviskositet enn for de tilfeller man har målinger.
- Det anbefales å foreta målinger av skylengder fra fullskala utslipp under vann. Dette vil være den sikreste måten å verifisere beregningene på. Det anbefales også å foreta målinger av turbulensparametre (hastighet, k og ϵ) i det atmosfæriske grensesjiktet over havet.
- Undersøk hvordan oppdriftsleddene i ϵ likningen er definert i de forskjellige kodene. Definisjoner kan fås fra utviklerne av CFD kodene.. Dersom det viser seg at oppdriftsleddene er forskjellige, bør det vises hvilken effekt disse leddene har. Det er grunn til å tro at de kan ha betydning. Hvis dette er tilfelle anbefales det å komme fram til den beste måten å modellere disse leddene på.
- Undersøk diskretiseringsmetoder for k og ϵ likningene og hvorfor KFX og FLACS får forskjellige profiler for k og ϵ i plumens senterlinje. Dette kan best gjøres i samarbeid med utviklerne av kodene
- Undersøk effekten av å endre det turbulente Schmidt tallet fra 0,9 til 0,7 for spredning over havet. Det anbefales at de aktuelle CFD kodene bruker det samme Sc tallet dersom dette har innvirkning på resultatene. For noen av kodene (f. eks FLACS) må dette gjøres i samarbeid med utviklerne av koden siden Sc tallet ikke kan settes av brukeren.
- Videre anbefales det å undersøke ”smertegrenser” for de forskjellige kodene og applikasjonene for hvilken gridoppløsning man minst må velge. Det bør vises og gjøres kjent hvordan numerisk diffusjon kan overta for turbulent diffusjon, og ved hvilke gridoppløsning dette skjer. Denne grensen er problemavhengig, og en slik undersøkelse bør foretas i samarbeid med kodeutviklerne for de konkrete problemene offshore næringen finner mest kritiske
- Det er også anbefalt å plote turbulensparametere på en ”standard” måte for sammenlikning med andre koder eller andre liknende scenarier. Av feltvariable som anbefales plottet er det eddyviskositeten, ν_t ; turbulent kinetisk energi, k ; og dissipasjon av turbulent kinetisk energi, ϵ , i tillegg til hastigheten. Disse kan plottes både som konturplot i symmetriplanet, eller andre kritiske plan; som profiler (linjeplot som funksjon av z); og tabuleres i punkter. Hastigheten anbefales plottet i vektorplot.

Den prosjektmodellen som er benyttet tidligere egner seg til en oppgave som dette (flere selskaper foretar beregninger på definerte felles ”case”). Man oppnår å utfordre etablerte systemer og holdninger, og oppmuntrer til faglig kreativ innsats.

Men modellen er krevende ved at arbeidsoppgaven i utgangspunktet er vagt ”dimensjonert” i form av timer og ressurser. Oppgaven ligger i teknologiens grenseland, og nye problemstillinger kommer opp underveis.

I dagens marked blir det også vanskelig å avsette de fremste ressursene i de deltakende selskapet til oppgaver som ikke gir kortsiktig økonomisk gevinst.

Prosjektmodellens suksess forutsetter faglig motivasjon hos deltakerne. Dessuten er det nok ofte nødvendig med en form for 3dje part som styrer prosessen, - som anerkjennes av de øvrige, - som jo også er forretningsmessig konkurrenter. Ptil har i dette aktuelle tilfelle spilt en slik rolle.

1. Risiko knyttet til gassutslipp under vann. Rapport Ptil 2006/2007
2. Fanneløp og Bettilini: VERY LARGE DEEP-SET BUBBLE PLUMES FROM BROKEN GAS PIPELINES. Rapport Ptil 2007
3. e-mail fra Olav Hansen, Gexcon. Med vedlegg, presentasjon av grid sensitivitets studie. 4. Oktober 2007.
4. A. Luketa-Hanlin, R.P. Koopman, and D.L. Ermak "On the application of computational fluid dynamics codes for liquefied natural gas dispersion" J. of Hazardous Materials 140 (2007) 504-517
5. A. Huser, P.J.Nilsen & H. Skåtun "Application of k-e; model to the stable ABL: Pollution in complex terrain" J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 67 & 68 (1997) 425-436.
6. e-mail fra Helge Andersson, NTNU 24.10.2007.
7. J. Gerstad, S.E. Aasen, H.I. Andersson, I Brevik and J. Løvseth "An Analysis of Low-Frequency Maritime Atmospheric turbulence" J. of Atmospheric Sciences, Vol. 52, No. 15, 1995.

9 VEDLEGG.

Vedleggene er utdrag/sammendrag av presentasjoner de fire selkapene har lagt fram, primært i to felles samlinger som er gjennomført i 2007.

- Vedlegg 1 DNV
 - Vedlegg 2 Scandpower
 - Vedlegg 3 Safetec
 - Vedlegg 4 Lilleaker
-

Vedlegg 1. Bidrag fra DNV


MANAGING RISK

Gas dispersion above sea from subsea releases



Ptil test cases comparison

Asmund Huser
Final presentation for report. Based on meetings in Trondheim 20. August and 12. November 2007

Content



- Equations
- Maplin Sands test
 - CFX
 - FLACS
- Ptil tests
- Profiles
- Comparisons
- Contour plots
- Maplin Sands test
 - FLACS
 - CFX
- Conclusions
- Recommendations/Further work

RANS Equation, Eddy viscosity is only parameter



Transport equation on mass fraction gas:

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{Y}_l}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_j \tilde{Y}_l}{\partial x_j} = - \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\bar{\rho} v_t}{\sigma_{\tilde{Y}_l}} \frac{\partial \tilde{Y}_l}{\partial x_j} \right) + \bar{\rho} \tilde{R}_l$$

Eddy viscosity:

$$v_t = \frac{\mu_t}{\rho} = C_D \frac{k^2}{\varepsilon}$$

Similarity to heat transfer:

Transport equation on mass fraction gas:

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{Y}_l}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_j \tilde{Y}_l}{\partial x_j} = - \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\bar{\rho} v_t}{\sigma_{\tilde{Y}_l}} \frac{\partial \tilde{Y}_l}{\partial x_j} \right) + \bar{\rho} \tilde{R}_l$$

Written in simpler form:

$$DY/Dt = v_T \Delta^2 Y$$

Similar to heat transfer equation:

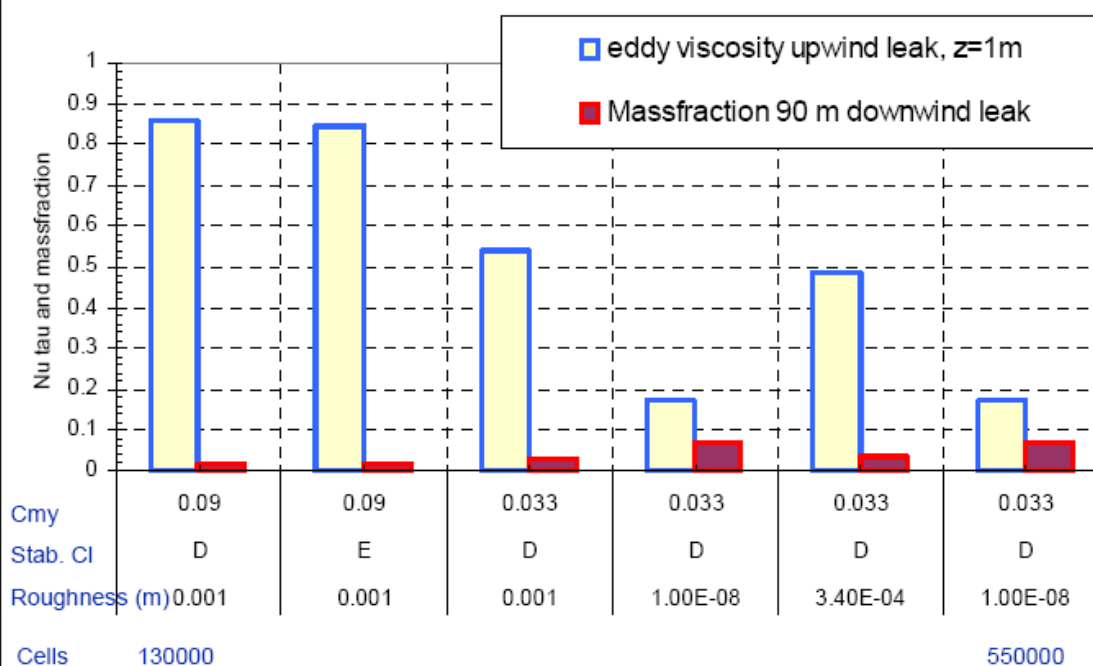
$$DT/Dt = \alpha \Delta^2 T$$

Larger Eddy viscosity =
 Higher diffusion ->
 more spread ->
 Lower concentrations ->
 Shorter plumes

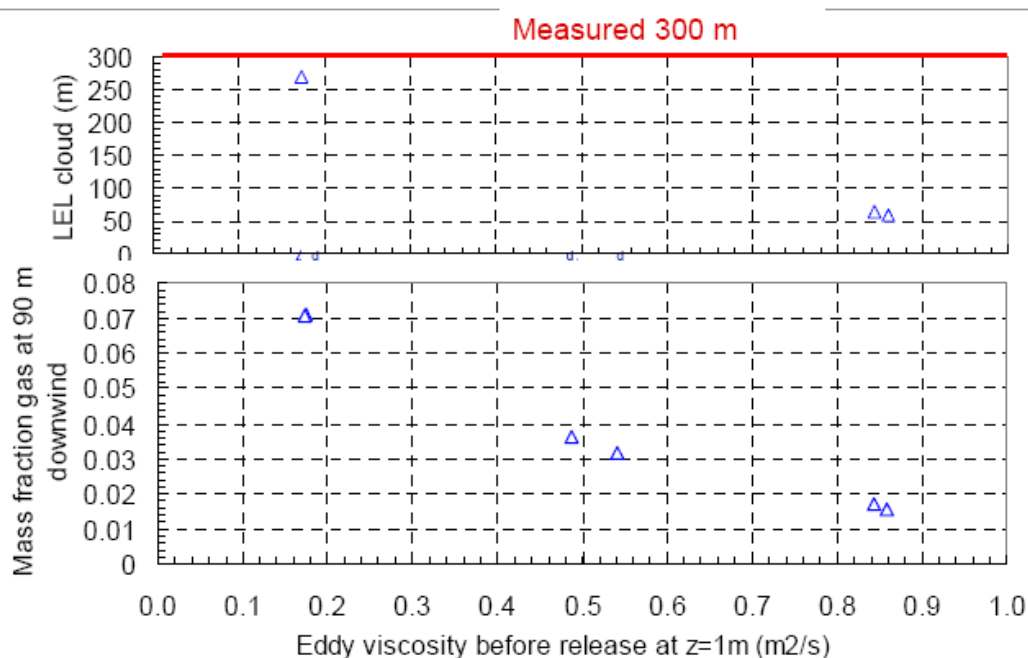
Maplin Sands test

- Release of LNG 1 m below surface
- Flat costal area, low surface roughness
- Release rate
- Wind speed
- Stability, D
- Distance LEL, 300 m

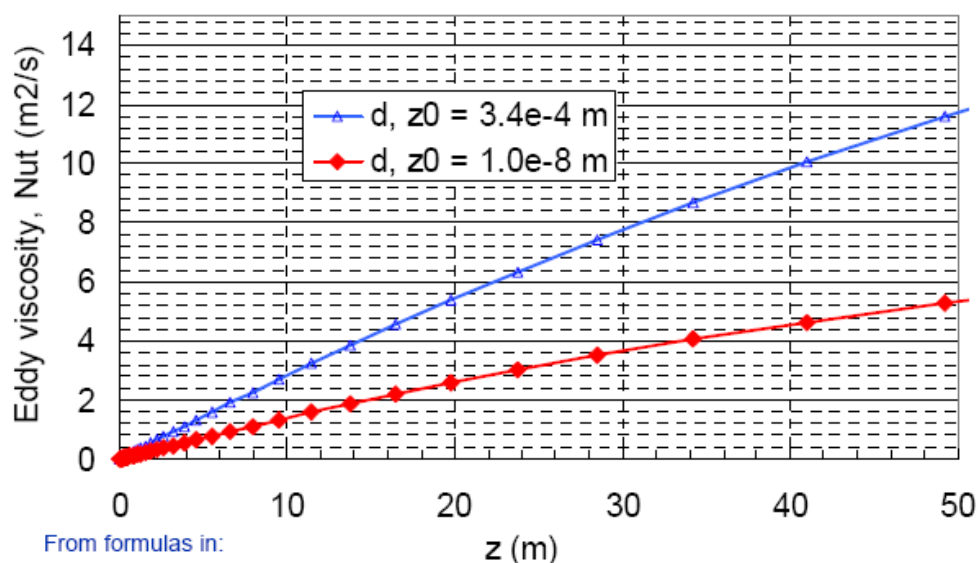
CFX cases Maplin Sands



CFX simulations Maplin Sands

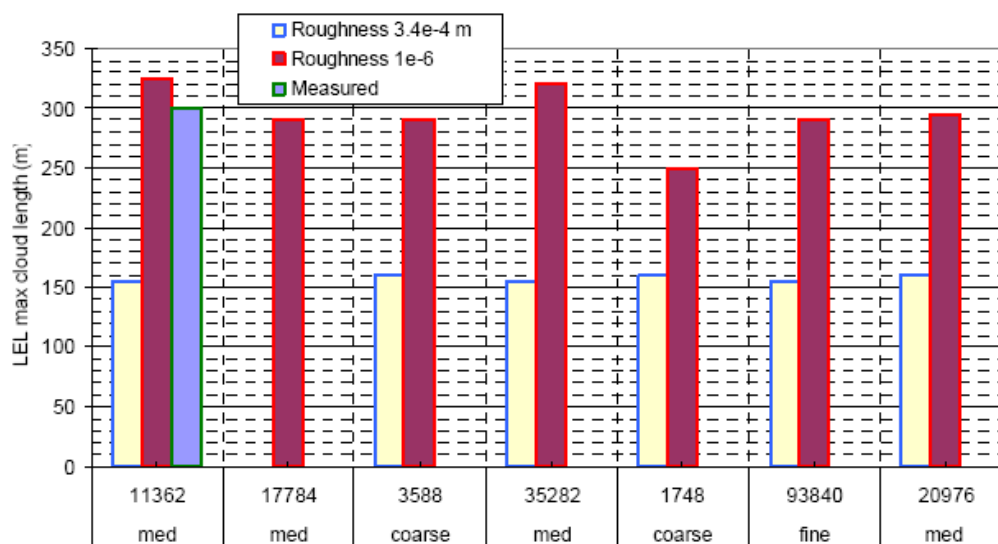


Eddy viscosity, Nut ; and roughness, z_0



A. Huser, et. al., "Application of k-ε model to the stable ABL: Pollution in complex terrain" J of Wind eng. and Ind. Aeodyn. 67 & 68 (1997) 425-436

Maplin Sands tests FLACS



Conclusions Maplin Sands



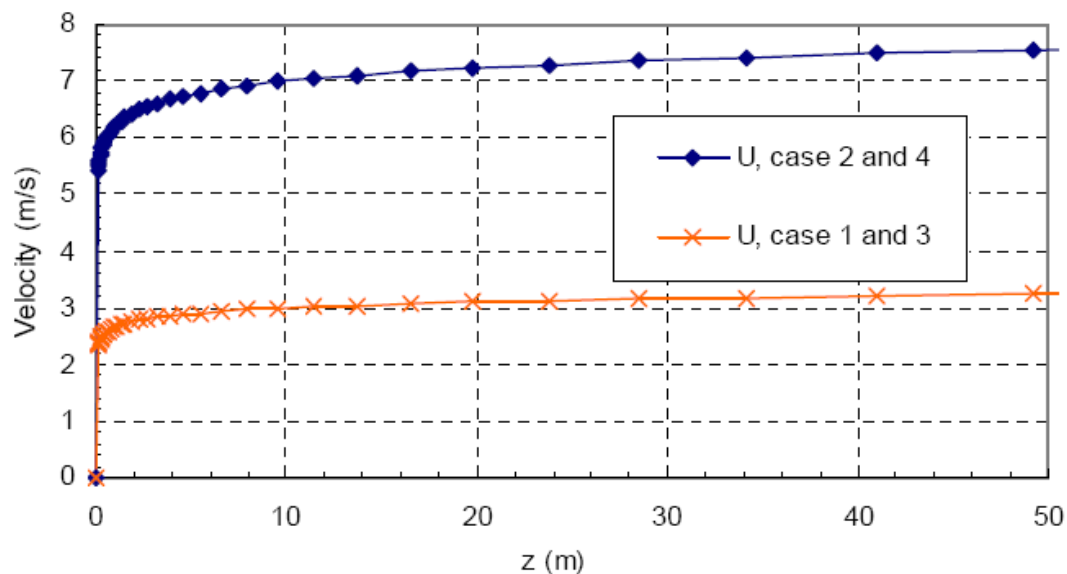
- Eddy viscosity on inlet decides plume length
- Grid refinement and numerical diffusion less important when eddy viscosity is high anyway
- Roughness is used to control eddy viscosity and adjusted to get measured results

Recap

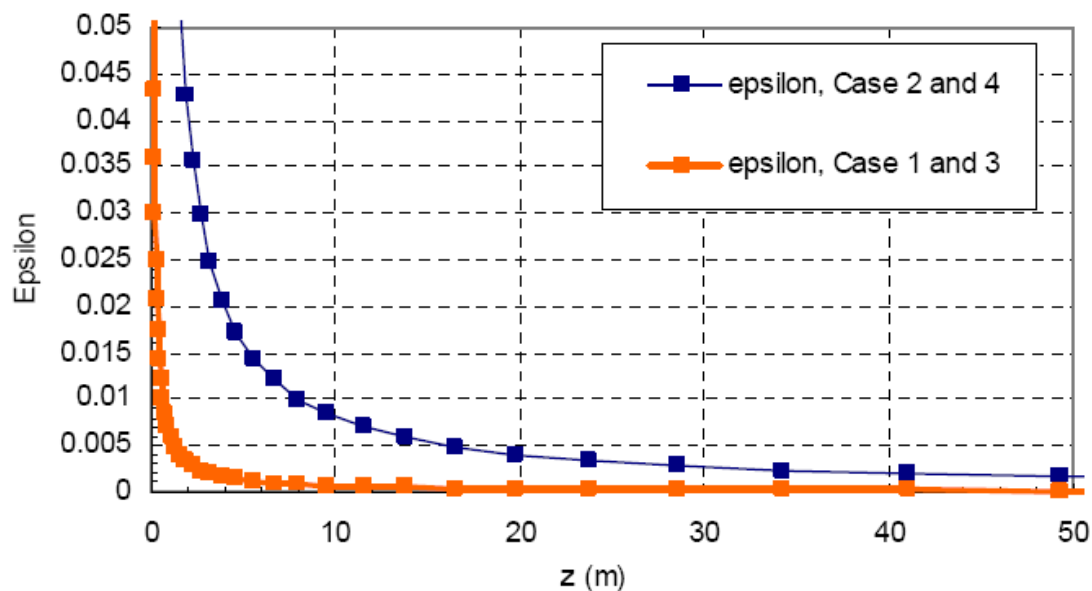


- DNV theory: The main reason for the different results is different eddy viscosity on the inlet.
- Eddy viscosity is controlled by the surface roughness
- Surface roughness has a significant effect on the results
- Two problems:
 - How to calculate the same results
 - How to calculate the correct results
- Is there a difference between ocean and land turbulence?

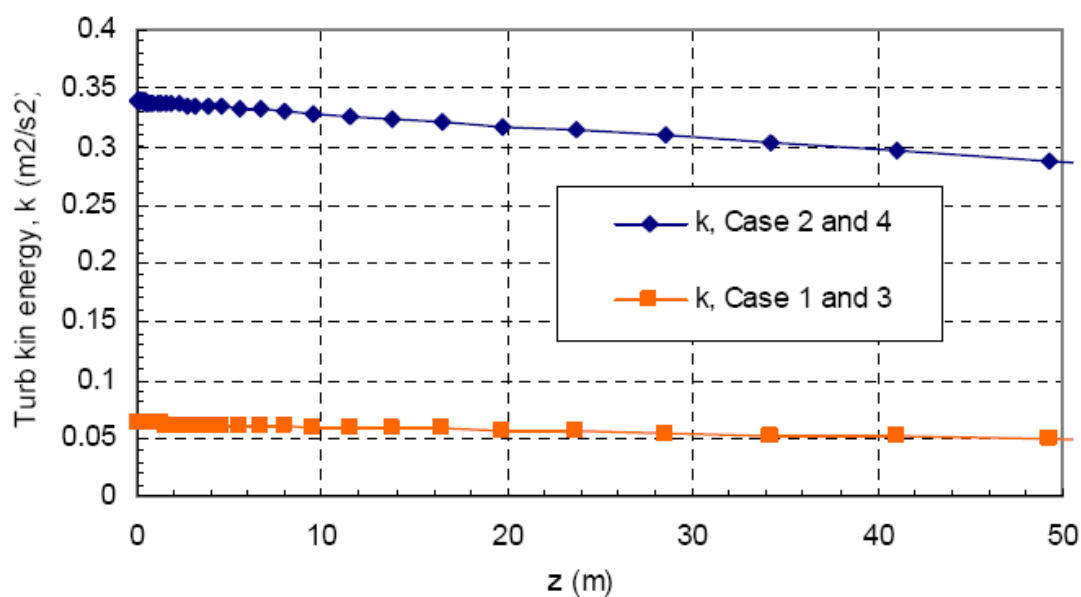
Velocity profiles upwind release, CFX



Epsilon upwind release, CFX

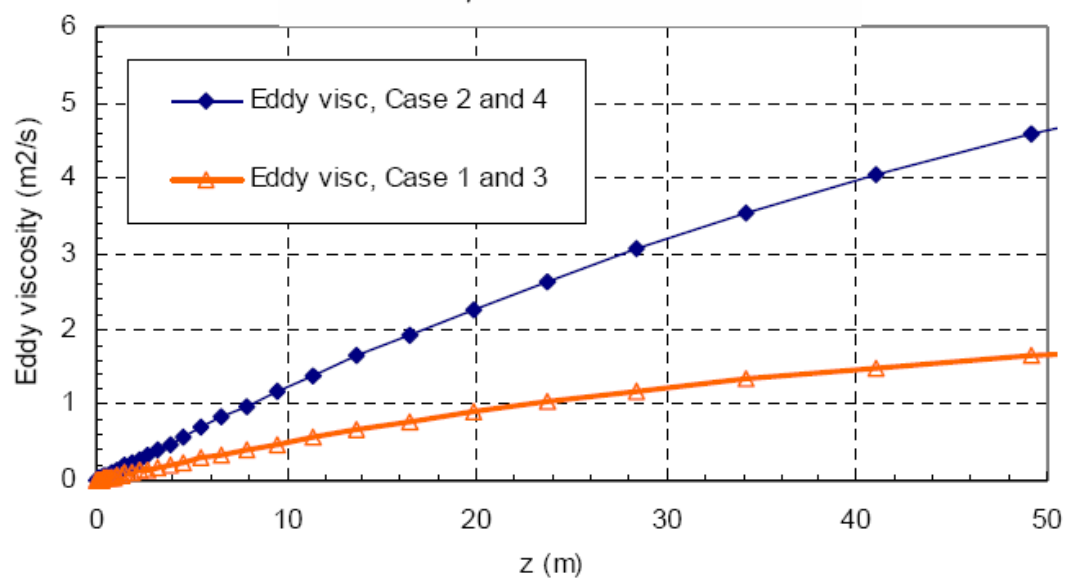


Turb kin energy upwind release, CFX

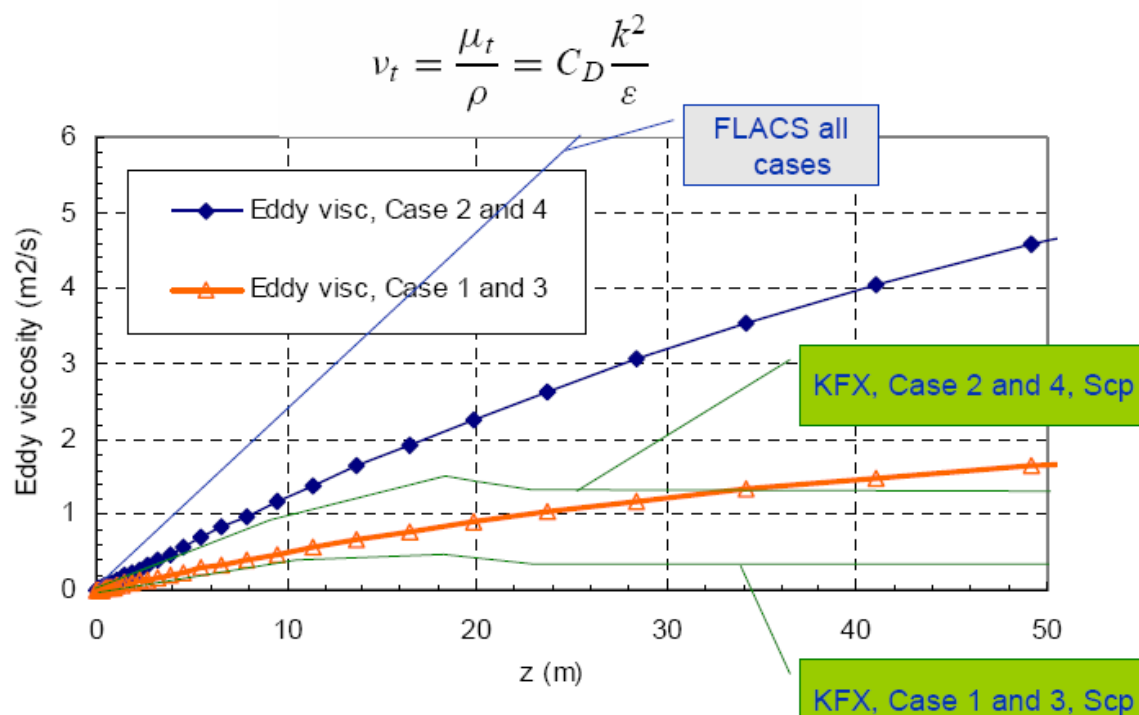


Eddy viscosity upwind release, CFX

$$\nu_t = \frac{\mu_t}{\rho} = C_D \frac{k^2}{\varepsilon}$$



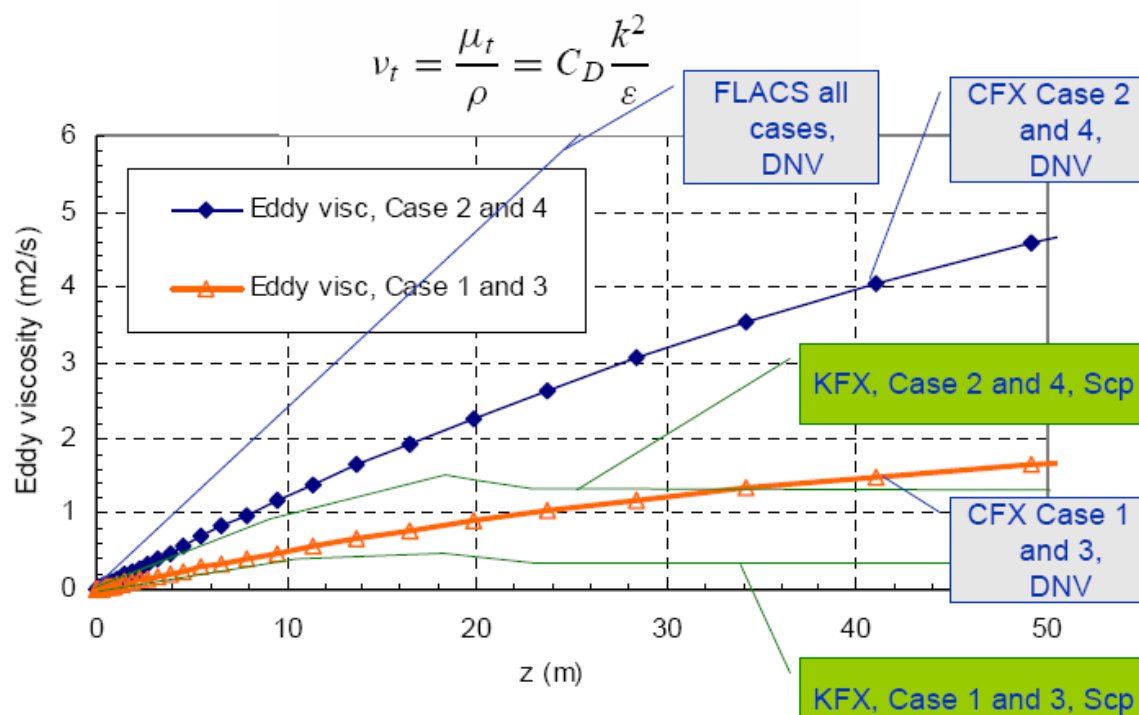
Eddy viscosity upwind release, CFX



© Det Norske Veritas AS. All rights reserved

03 March 2008

Eddy viscosity upwind release, CFX



© Det Norske Veritas AS. All rights reserved

03 March 2008

All results



MANAGING RISK

INPUT

Resultat

	Code	Case no	leak rate (kg/s)	wind speed (m/s)	Eddy viscosity (m ² /s) or (kg/ms)		Max length (m)		Max height (m)	
					z=1m upwind	z= 50 m upwind	LEL	1/2 LEL	LEL	1/2 LEL
DNV	FLACS	Case 1	450	3	0.17	9	180	275	25	40
	FLACS	Case 2	450	7	0.18	9	380	545	10	25
	FLACS	Case 3	40	3	0.17	9	55	90	2	5
	FLACS	Case 4	40	7	0.18	9	90	160	1	2
DNV	CFX	Case 1	450	3	0.040	2	210	380	95	183
	CFX	Case 2	450	7	0.098	4	465	630	33	55
	CFX	Case 3	40	3	0.041	2	250	345	5	17
	CFX	Case 4	40	7	0.101	4	90	210	0	0
Safetec	CFX	Case 1	450	3	0.027	0.04	450	650	120	150
	CFX	Case 2	450	7	0.091	1.04	450	650	50	70
	CFX	Case 3	40	3	0.027	0.04	150	250	10	15
	CFX	Case 4	40	7	0.089	1.04	80	450	1	1
Scandpower	FLACS	Case 1	450	3	0.00378		190	340	20	50
	FLACS	Case 2	450	7	0.00728		255	500	10	15
	FLACS	Case 3	40	3			60	130	5	10
	FLACS	Case 4	40	7			100	245	0	0
Scandpower	KFX	Case 1	450	3	0.05	0.8	400	680	60	90
	KFX	Case 2	450	7	0.1	1.7	510	750	30	55
	KFX	Case 3	40	3	0.05	0.8	170	300	0	10
	KFX	Case 4	40	7	0.1	1.7	na	110	0	0
Lilleaker	Fluent	Case 1	450	3	~0.4	1.4	230	390	80	120
	Fluent	Case 2	450	7			440	600	20	50
	Fluent	Case 3	40	3			140	300	5	10
	Fluent	Case 4	40	7			55	75	5	5

© Det Norske Veritas AS. All rights reserved

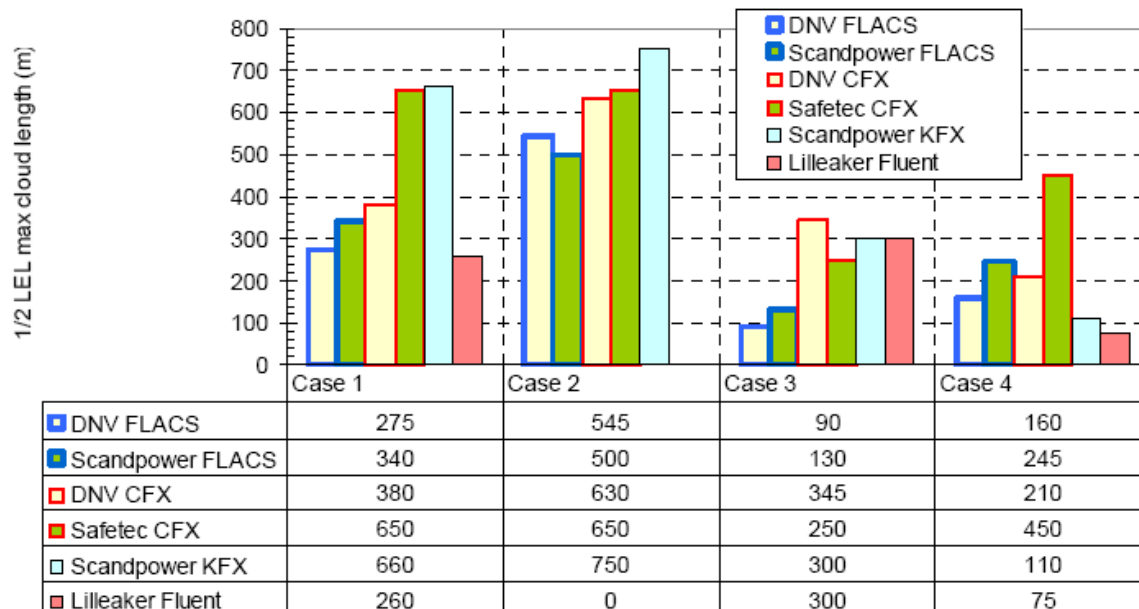
03 March 2008

Slide 18

All Ptil cases, 1/2 LEL length



MANAGING RISK

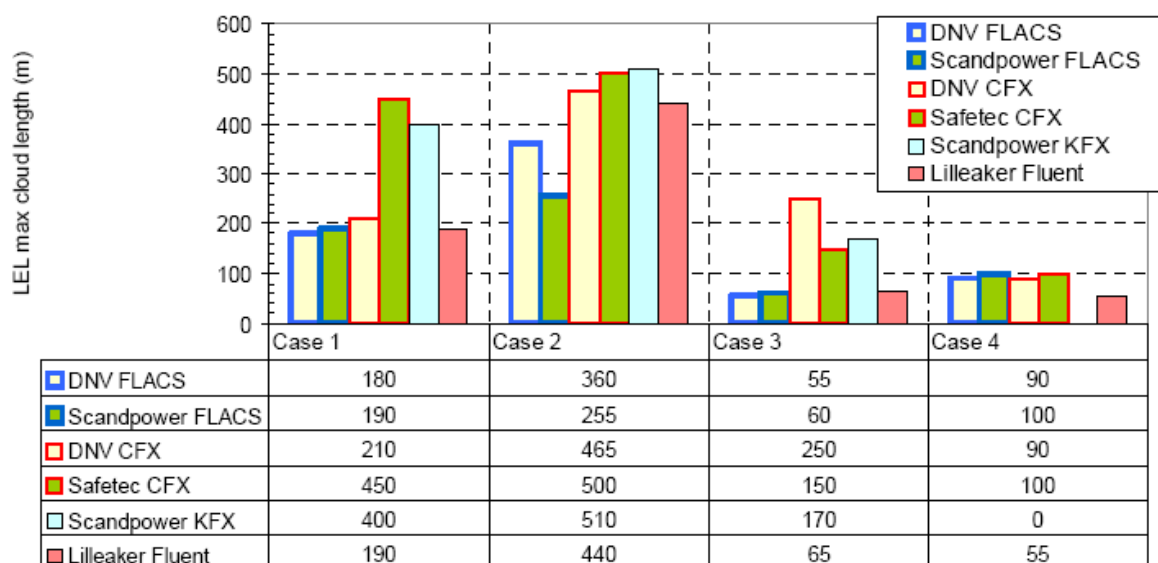


© Det Norske Veritas AS. All rights reserved

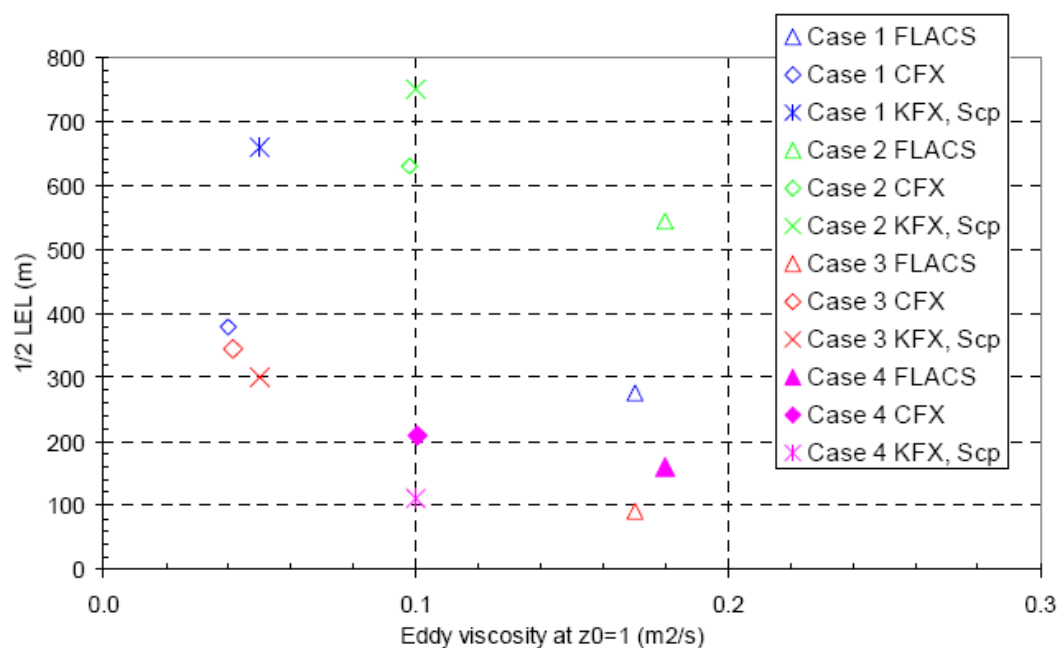
03 March 2008

Slide 19

Max LEL cloud lengths (m)



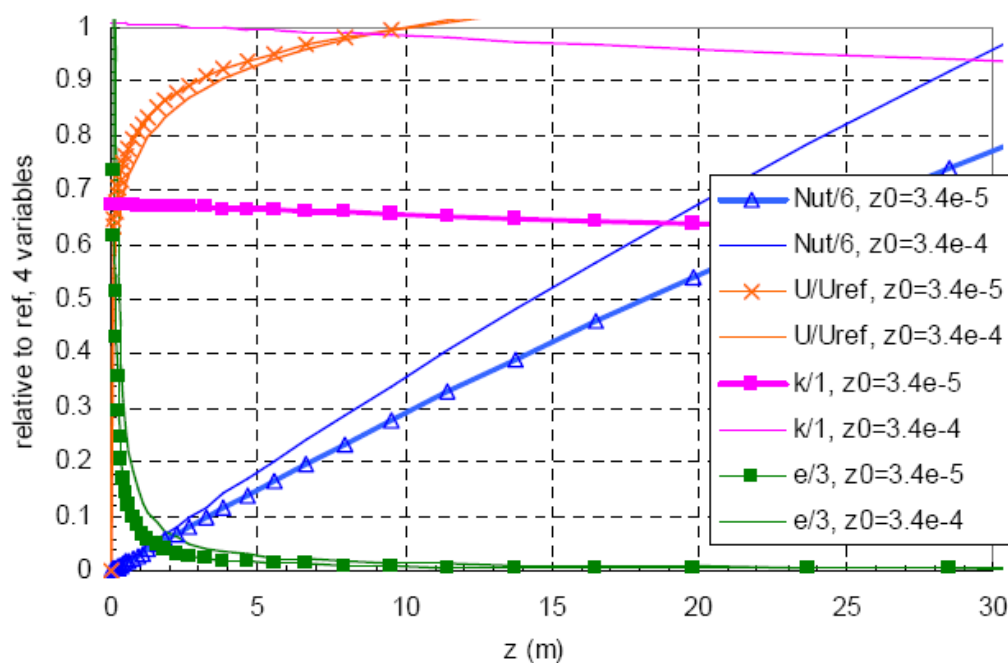
Effect of eddy viscosity at $z=1$ m



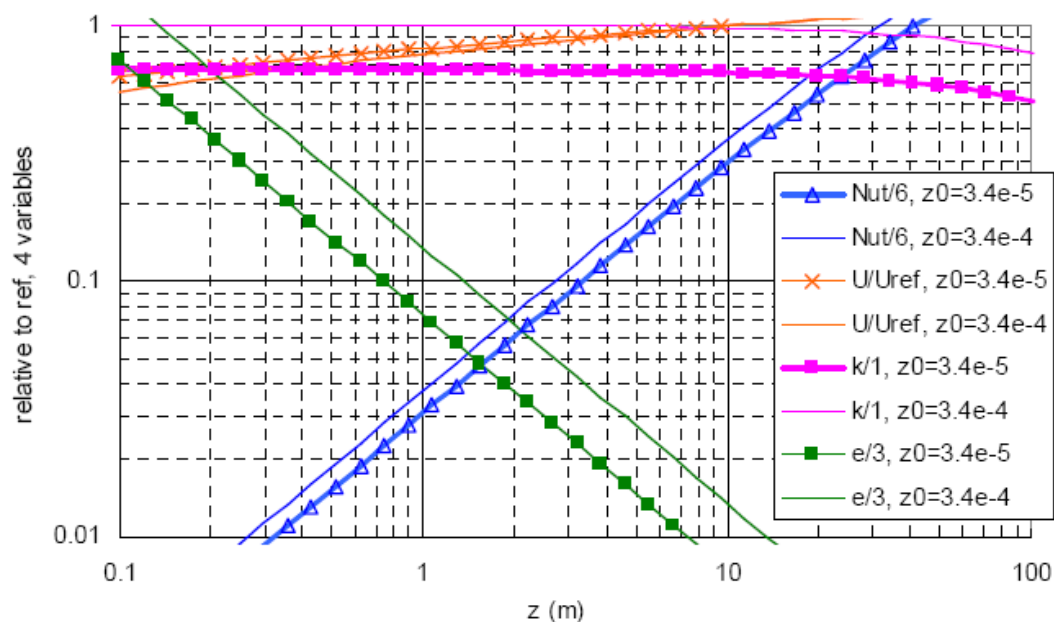
Observations

- FLACS has higher eddy viscosity for all 4 cases, all z
- FLACS has shorter cloud lengths for all 4 cases
- Case 1 and 3: FLACS is shortest because here the eddy viscosity difference is largest
- Case 1: CFX DNV is shorter than KFX Scp because DNV has higher eddy viscosity above $z=10\text{m}$.
- Case 3: CFX DNV compares well with KFX Scp: the eddy viscosity up to $z=10\text{ m}$ are the same.

Effect of roughness, $U_{\text{ref}}=6\text{ m/s}$



Log-log plot

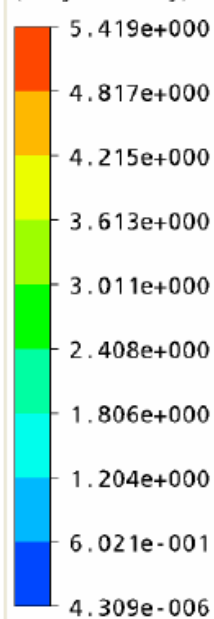


Effect of roughness

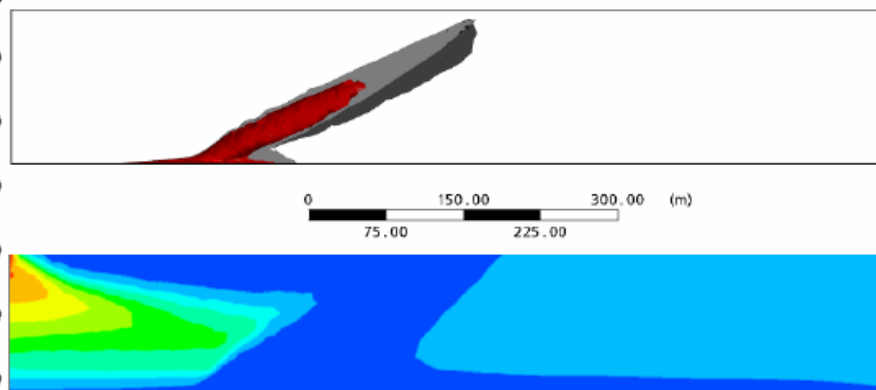
- Roughness is reduced from $3.4 \text{ e-}4$ to $3.4 \text{ e-}5$
- Implies at $z=1\text{m}$:
- Velocity increase 5%, Eddy viscosity reduced 18%
- Increased plume length is caused by reduced eddy viscosity

Case 1 CFX

Eddy Viscosity
(Eddy viscosity)



[Pa s]

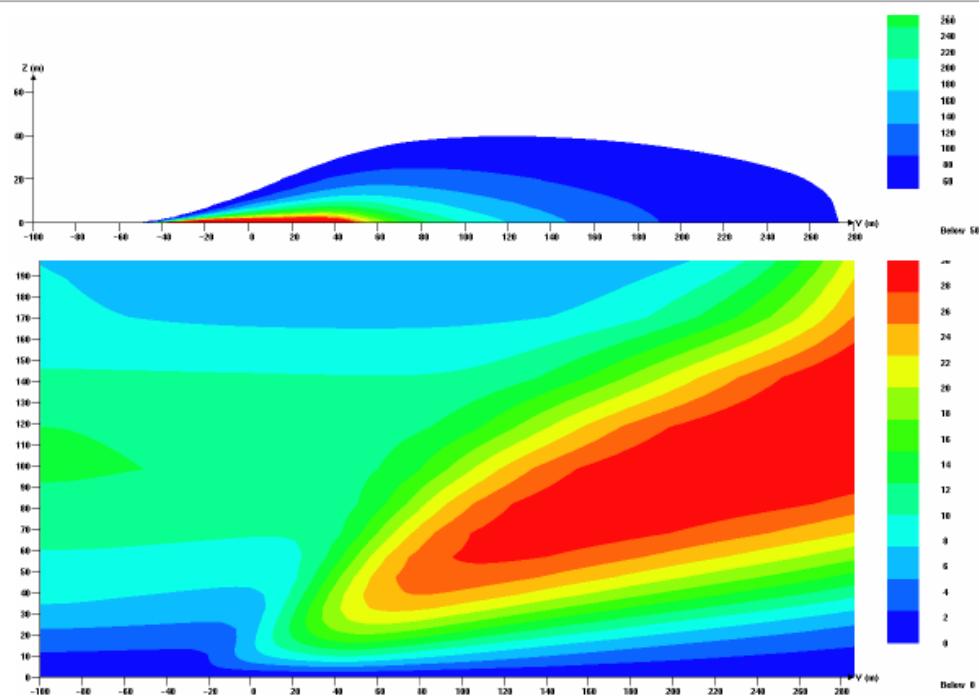


© 2008 DNV Veritas AS. All rights reserved.

03 March 2008

Slide 26

Case 1 FLACS



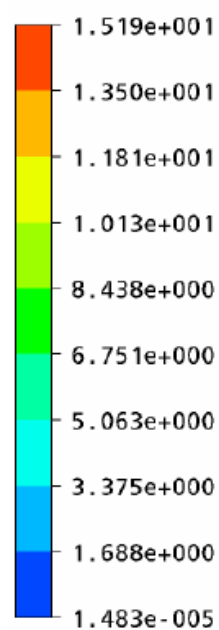
© Det Norske Veritas AS. All rights reserved.

03 March 2008

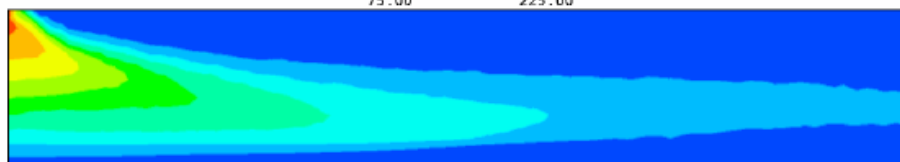
Slide 27

Case 2 CFX

Eddy Viscosity
(Eddy viscosity)

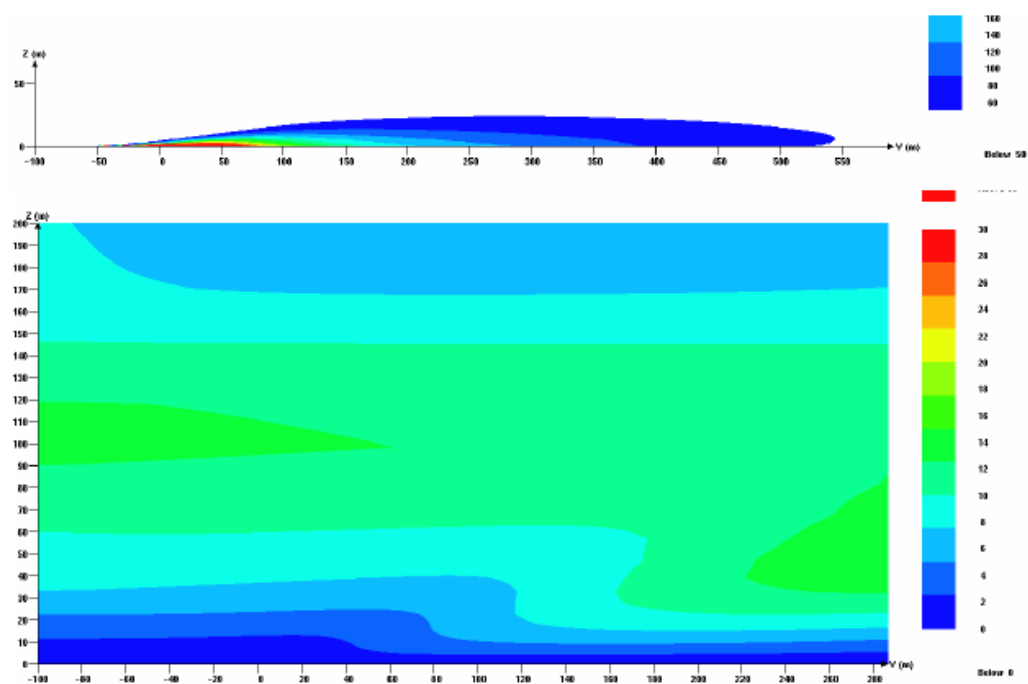


0 150.00 300.00 (m)
75.00 225.00



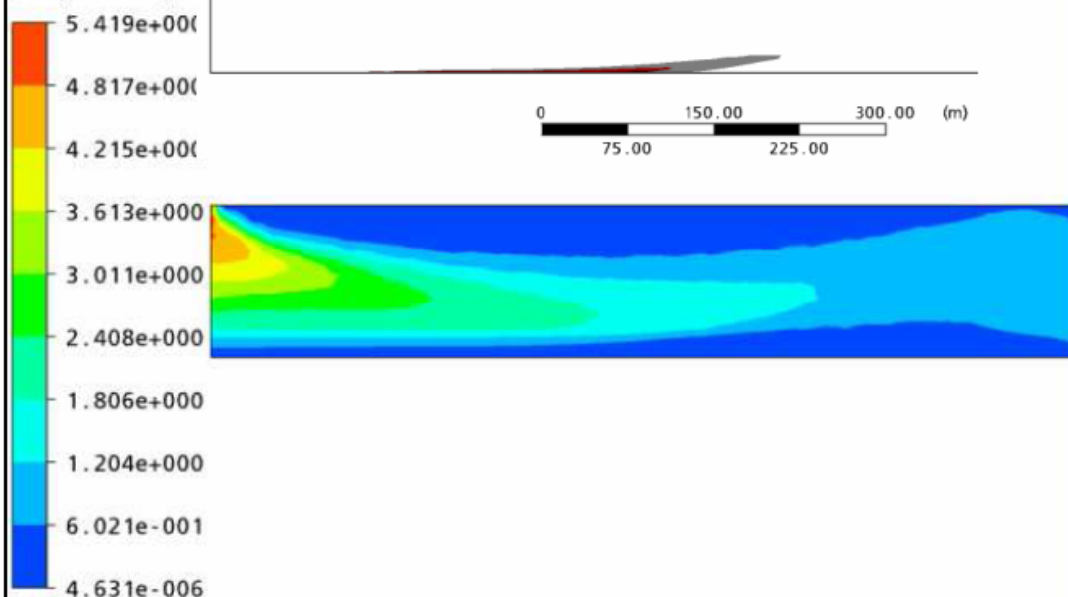
© [Pa·s]

Case 2 FLACS



Case 3 CFX

Eddy Viscosity
(Eddy viscosity)

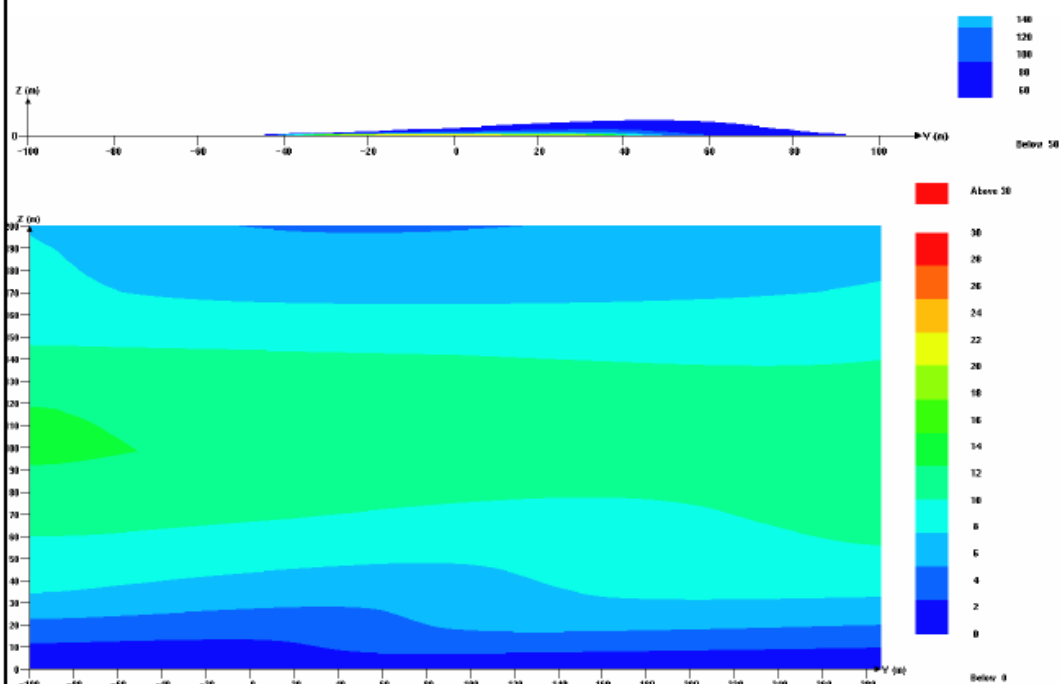


© Det Norske Veritas AS. All rights reserved

03 March 2008

Slide 30

Case 3 FLACS



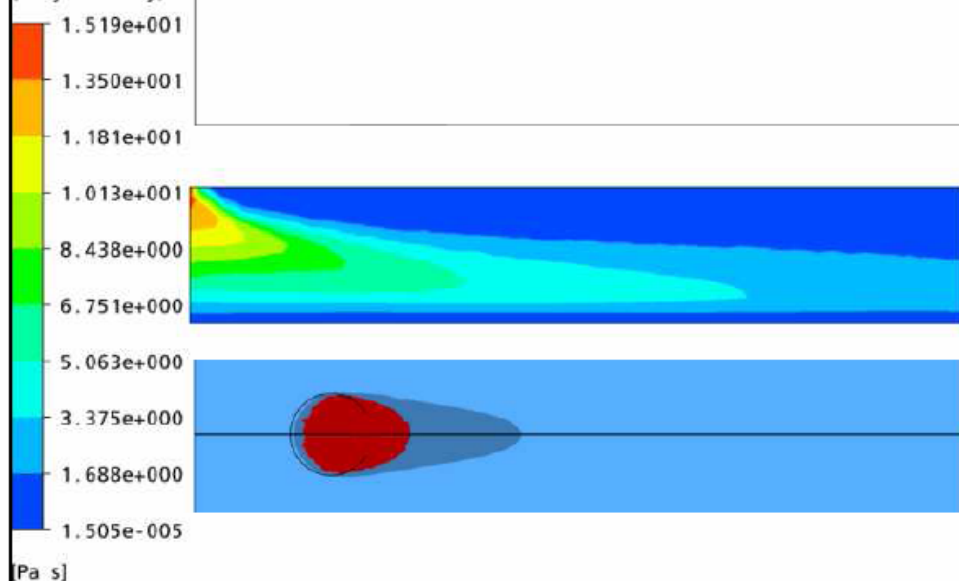
© Det Norske Veritas AS. All rights reserved

03 March 2008

Slide 31

Case 4 CFX

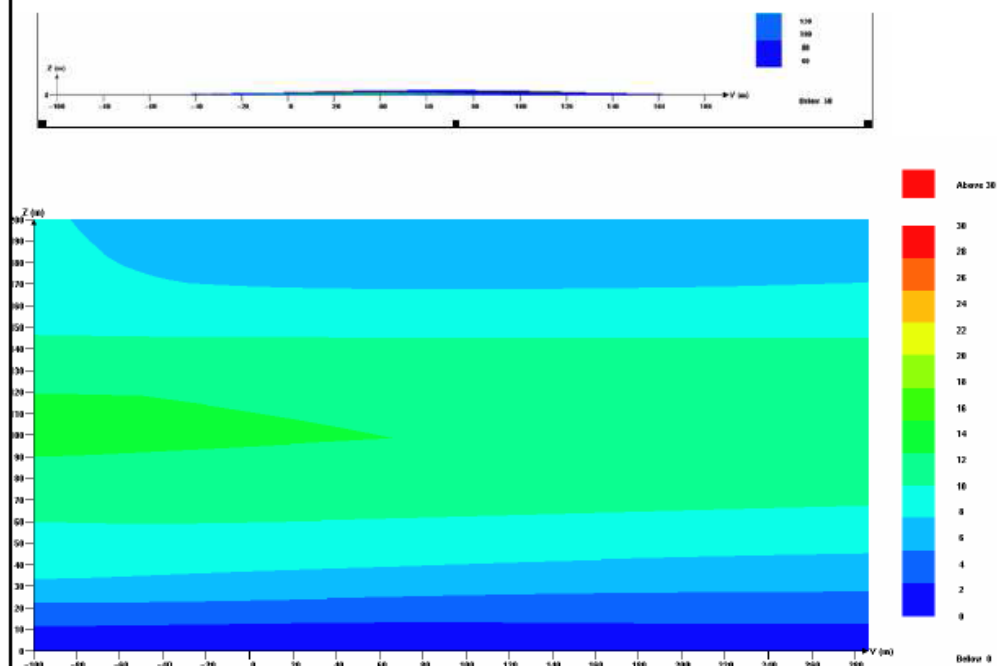
Eddy Viscosity
(Eddy viscosity)



0 150.00 300.00 (m)
75.00 225.00

Slide 32

Case 4 FLACS



Conclusions



- Inlet profile for k and epsilon (eddy viscosity) decides the plume length
 - Shown by comparing 4x3 Ptil cases
 - Can explain the differences in all runs where the eddy viscosity is known: DNV and Scp.
 - Shown by 7 FLACS cases on Maplin sands test
 - Shown by 5 CFX tests on Maplin Sands
- Surface roughness is found to have a significant impact on results when reduced more then 10 times
 - FLACS LNG validation report after it was found that surface roughness was modeled one order of magnitude too high "...there is generally a moderate underestimation of concentration for most tests"
 - Both with FLACS and CFX very small wall roughness (10-6 and 10-8) is used to get the measured plume length in Maplin Sands
- FLACS both over predicts and under predicts in Olavs presentation
- Measurements are likely not to hit the core centerline concentration, hence simulations should be on the high side in comparisons
- Grid refinement is less important than eddy viscosity
- Wall boundary conditions for rough wall and heat transfer from wall decides turbulence profile downwind, this is also important for long plumes

Recommendations



- Check eddy viscosity profiles on all runs.
 - Can all tabulate eddy viscosity at z=1 upwind release for comparison
 - Only Scp KFX results compared so far
- To get equal results:
 - Establish a common benchmark eddy viscosity profile for atmospheric flow above sea.
 - Suggest to be on the safe side until we know more.
- To get the right result:
 - Investigate turbulence profiles above sea. Lack of experiments to find turbulent dissipation rates.
 - Literature search
 - Significant differences between ocean and land: Sea current and slip conditions gives less turbulence, waves gives some turbulence, temperature profile different from land.

Recommendations contd.



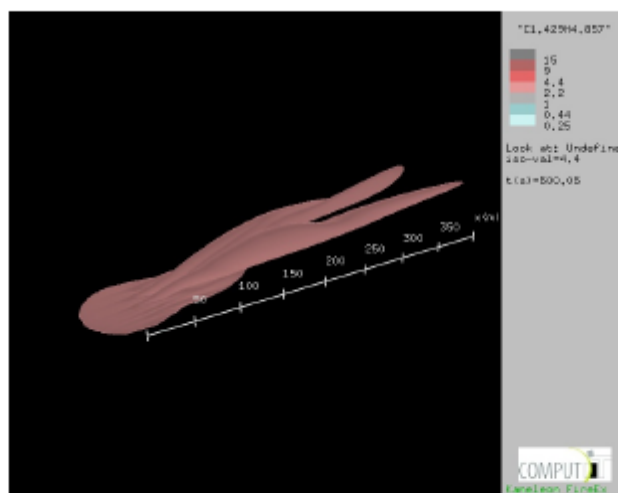
- Perform CFD code tests with no release to investigate how to keep the turbulence profiles in long domains
- Suggest for Gexcon to improve FLACS, FLUG meeting, etc.
 - Increase number of leak cells,
 - Revise turbulence profile on inlet to be valid for wind above sea
 - Input for roughness on walls,
 - Input for heat transfer on walls,
 - Quasi LES with meandering wind needs firm settings if to be used.
- Next problem: how to model the surface source and transient large leaks



www.dnv.com

Vedlegg 2. Bidrag fra Scandpower

Subsea utslipp; spredningssimulering i luft



Figur 1: 3D plot av utslipp over sjø simulert med KFX

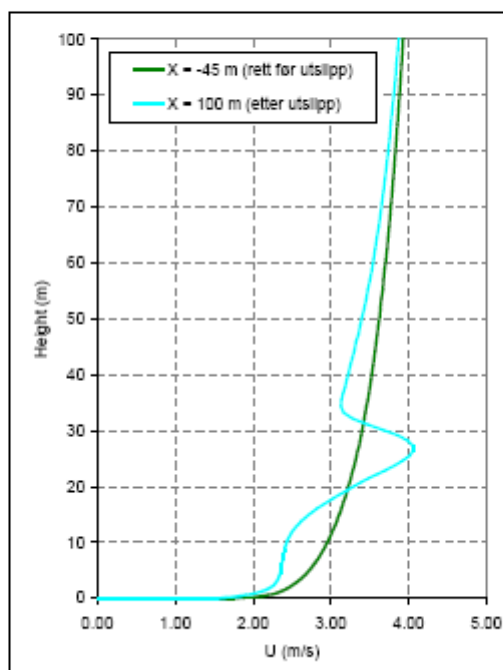
Scenario definisjon:

- Uniformt utslipp fra en sirkelflate med 90 m diameter.
- Molekylvekt gass: 22
- Temperatur gass: 278 K
- Lufttemperatur: 278 K
- Ingen bølger
- Nøytralt vindprofil: Pasquill klasse D

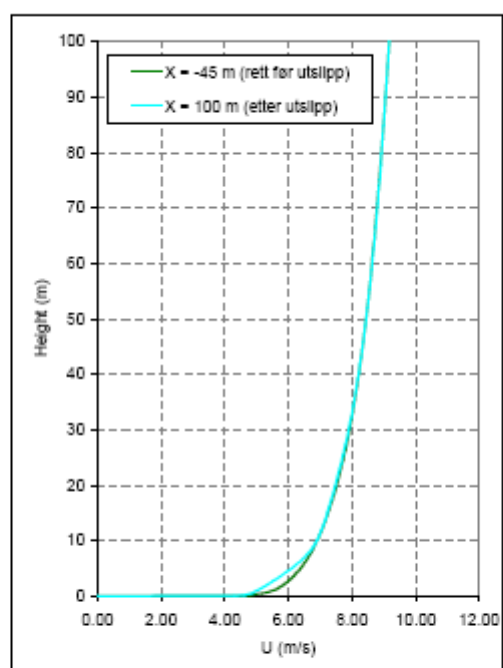
KFX grid 1 (case 1 og case 2): $288 \times 102 \times 132 = 3.9 \times 10^6$ kontroll volum

KFX grid 2 (case 3 og case 4): $246 \times 102 \times 110 = 2.8 \times 10^6$ kontroll volum

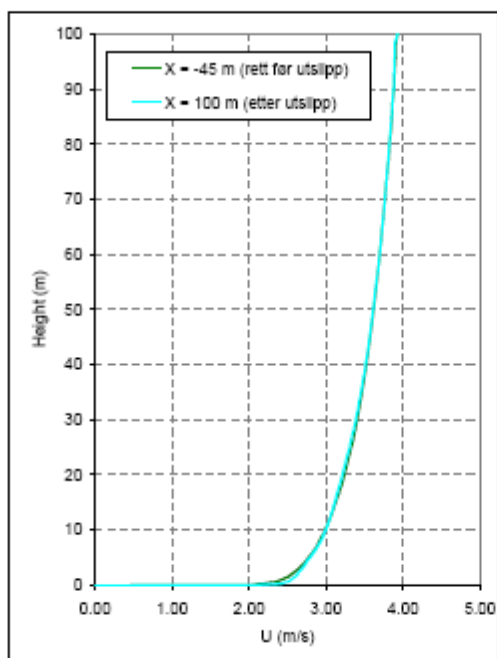
1. VINDPROFILER



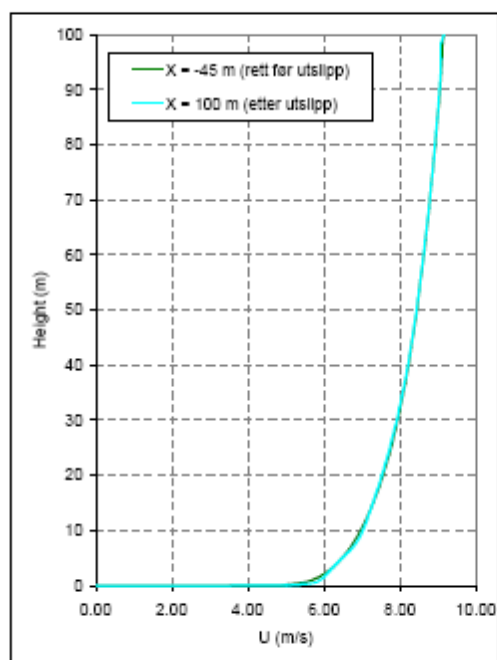
Figur 2: Vindprofil case 1 (450 kg/s) 3 m/s vind



Figur 3: Vindprofil case 1 (450 kg/s) 7 m/s vind

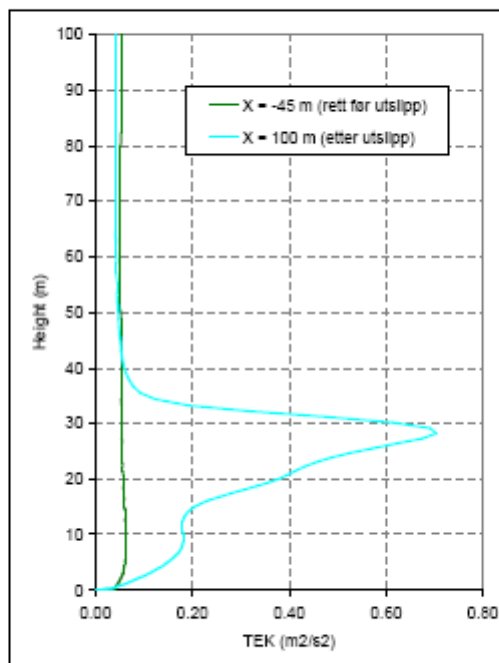


Figur 4: Vindprofil case 3 (40 kg/s) 3 m/s vind

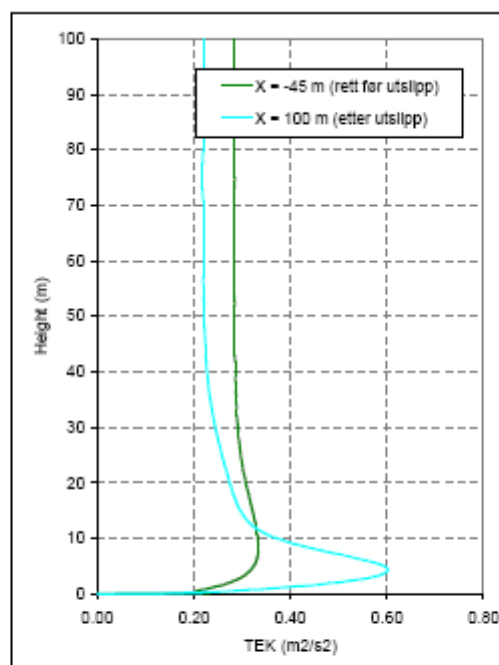


Figur 5: Vindprofil case 4 (40 kg/s) 7 m/s vind

2. TURBULENT KINETISK ENERGI



Figur 6: Turbulent kinetisk energi for case 1 (utslipp 450 kg/s, 3 m/s vind)



Figur 7: Turbulent kinetisk energi for case 2 (utslipp 450 kg/s, 7 m/s vind)

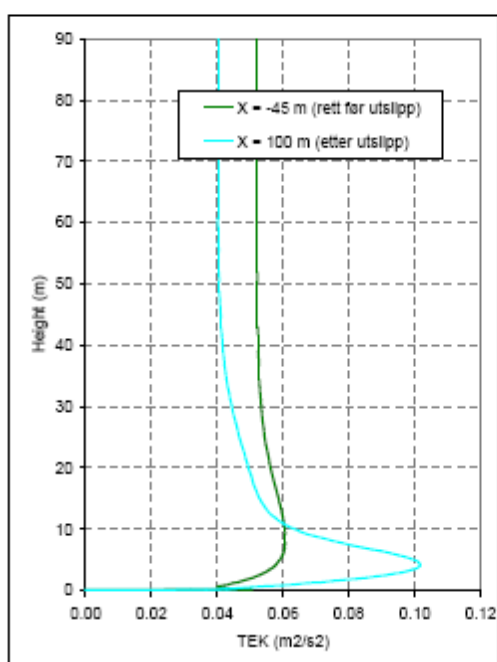


Figure 8: Turbulent kinetisk energi for case 3 (utslipp 40 kg/s, 3 m/s vind)

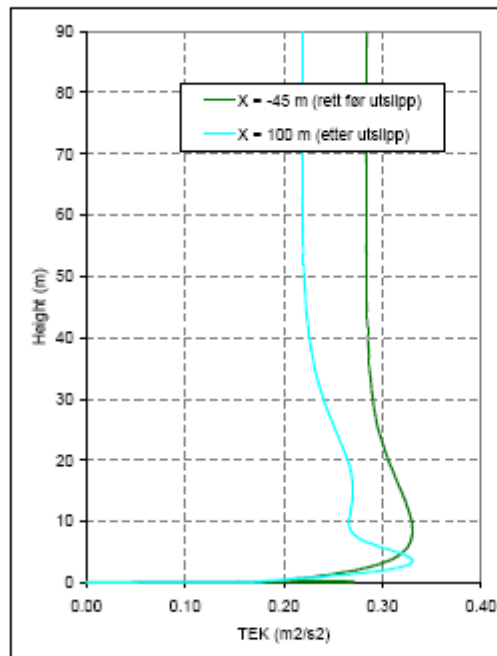
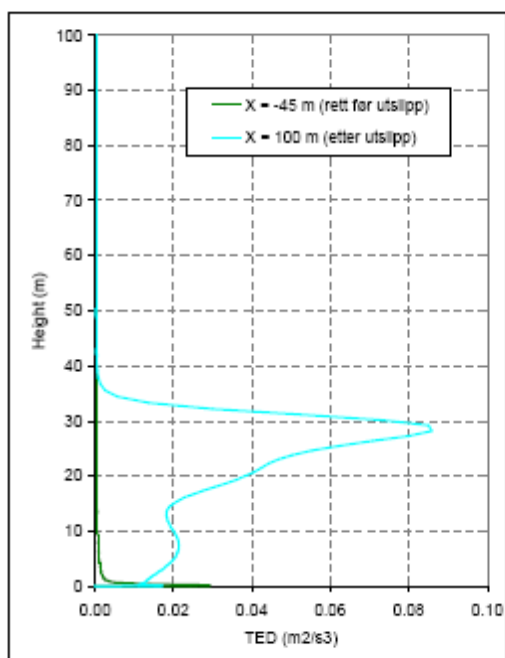
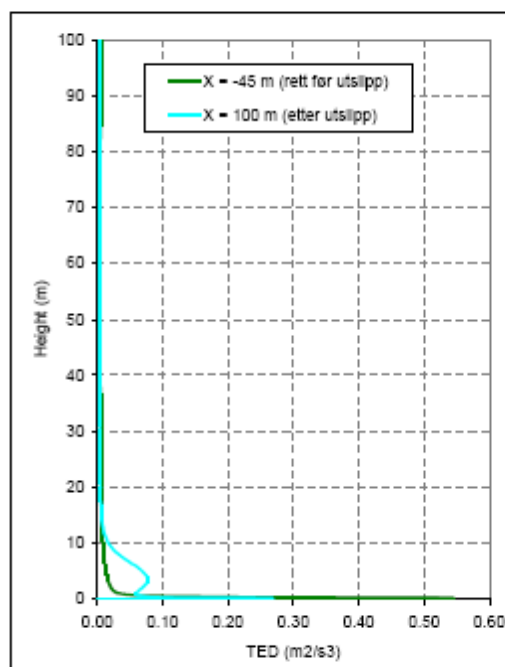


Figure 9: Turbulent kinetisk energi for case 4 (utslipp 40 kg/s, 7 m/s vind)

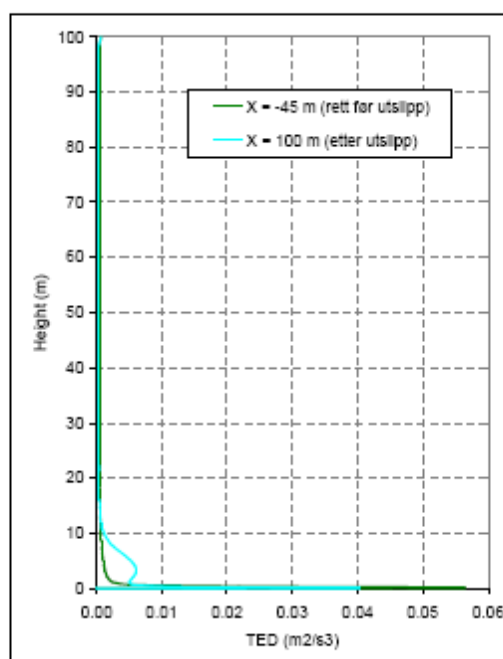
3. DISSIPASJON AV TURBULENT KINETISK ENERGI



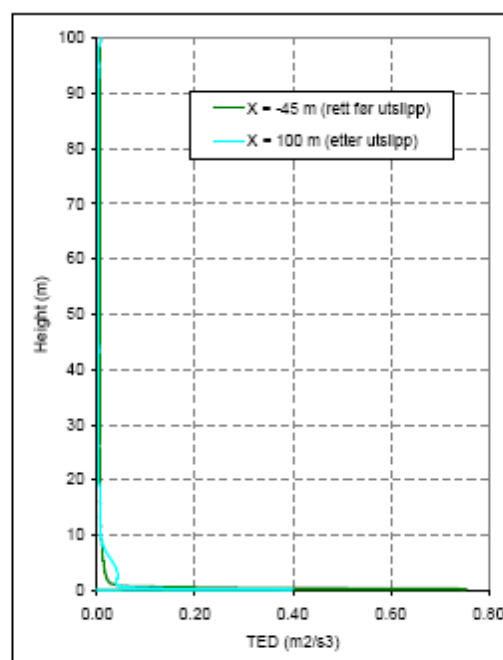
Figur 10: Dissipasjon av turbulent kinetisk energi for case 1 (utslipp 450 kg/s, 3 m/s vind)



Figur 11: Dissipasjon av turbulent kinetisk energi for case 2 (utslipp 450 kg/s, 7 m/s vind)

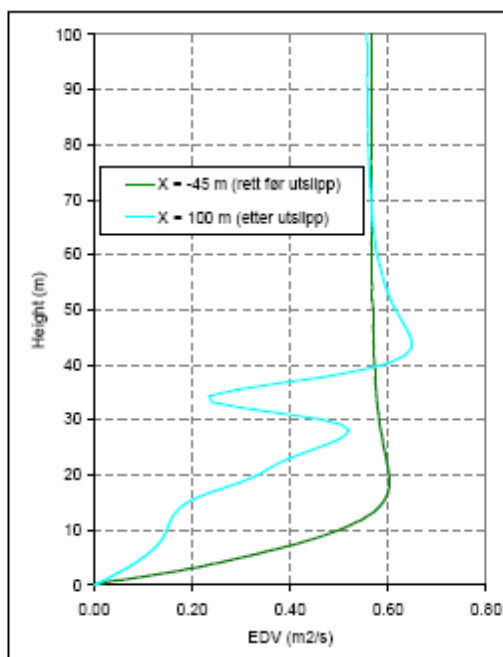


Figur 12: Dissipasjon av turbulent kinetisk energi for case 3 (utslipp 40 kg/s, 3 m/s vind)

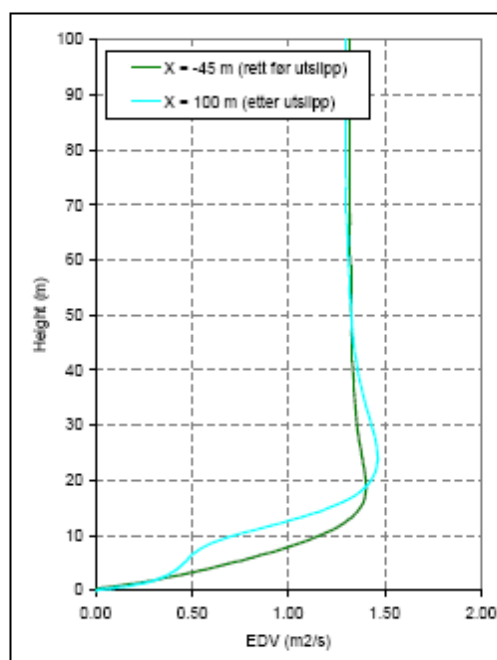


Figur 13: Dissipasjon av turbulent kinetisk energi for case 4 (utslipp 40 kg/s, 7 m/s vind)

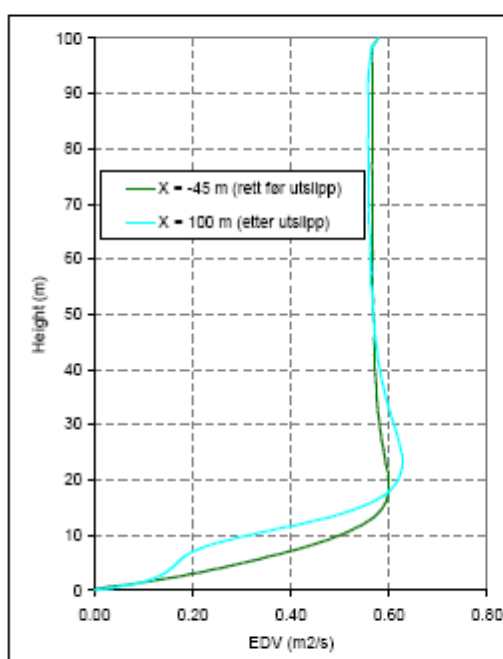
4. EDDY VISKOSITET



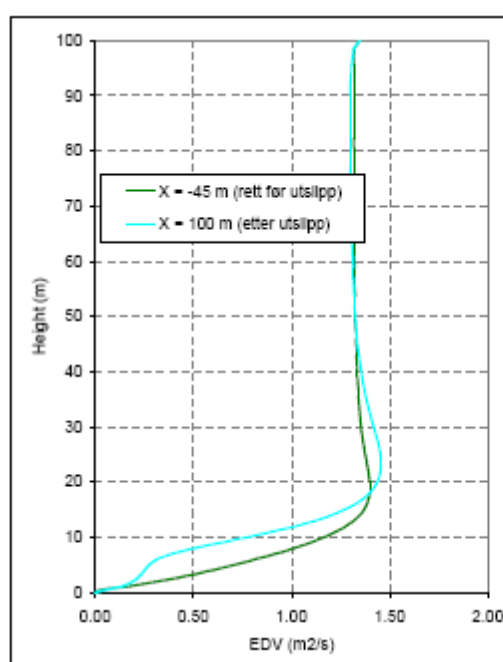
Figur 14: Eddy-viskositet for case 1 (utslipp 450 kg/s, 3 m/s vind)



Figur 15: Eddy-viskositet for case 2 (utslipp 450 kg/s, 7 m/s vind)



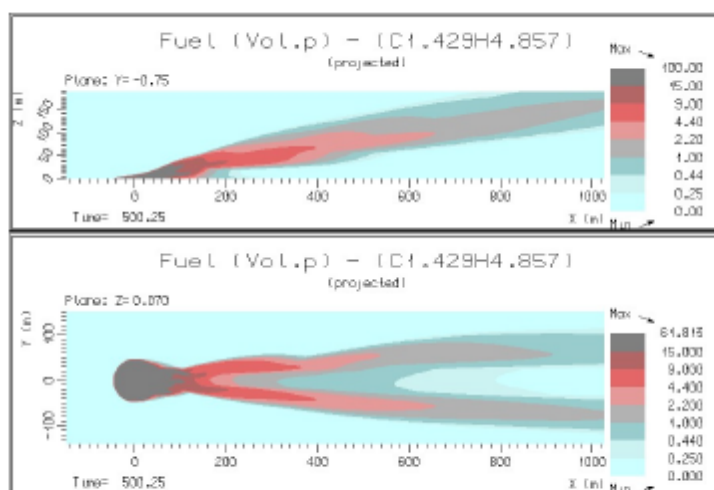
Figur 16: Eddy-viskositet for case 3 (utslipp 40 kg/s, 3 m/s vind)



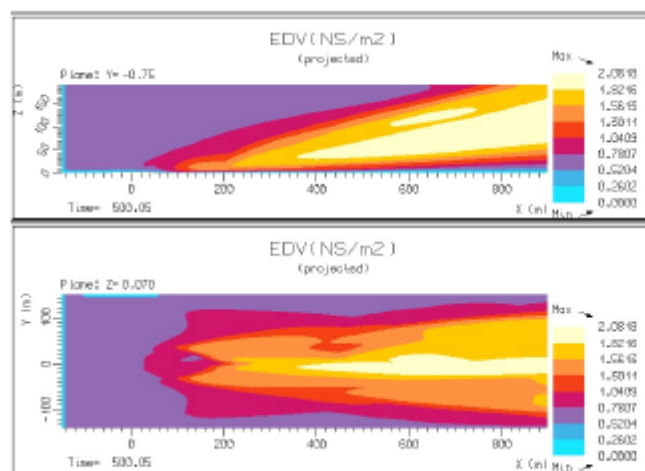
Figur 17: Eddy-viskositet for case 4 (utslipp 40 kg/s, 7 m/s vind)

5. FAREAVSTANDER

5.1 Case 1, gass: 450 kg/s, vind: 3 m/s



Figur 18: Case 1, gasskonsentrasjoner

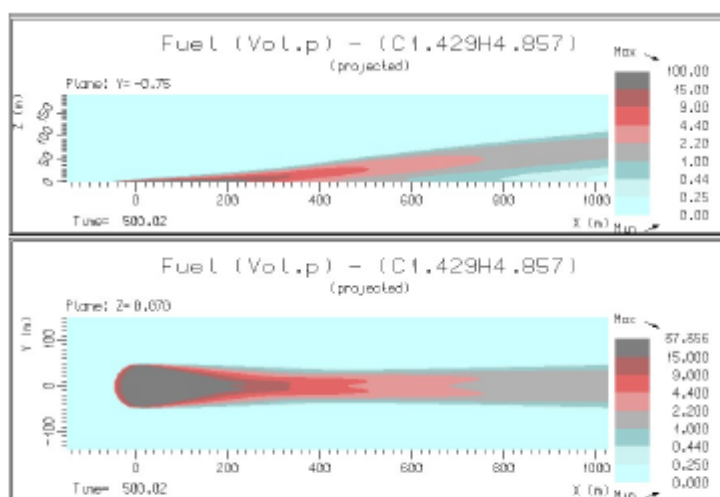


Figur 19: Case 1, eddy viskositet

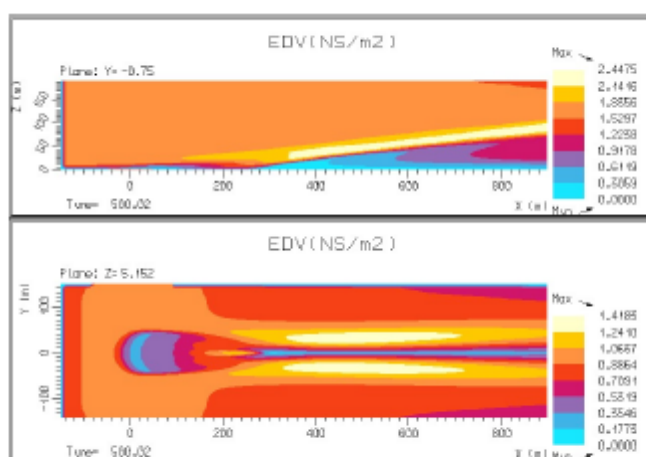
Tabell 1: Fareavstander Case 1

Grense	Avstand	Høyde
Stoik (9 %)	200 m	35 m
LEL (4.4 %)	400 m	70 m
½ LEL	660 m	100 m
10 % LEL	> 1200 m	> 120 m

5.2 Case 2, gass: 450 kg/s, vind: 7 m/s



Figur 20: Case 2, gasskonsentrasjoner

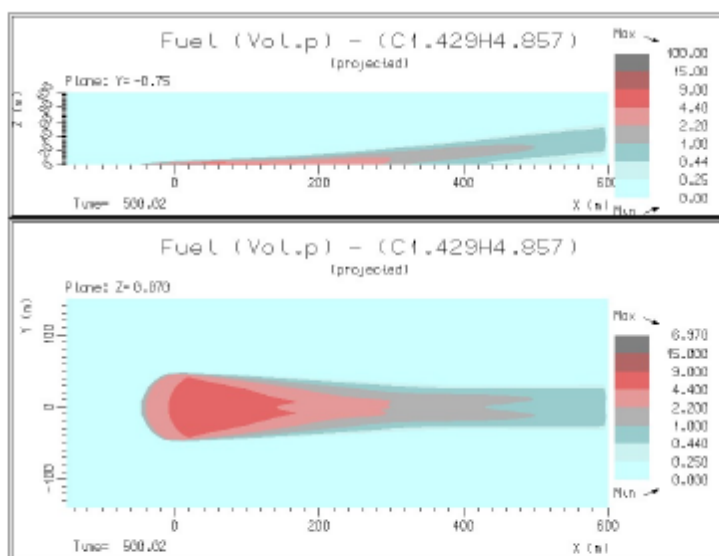


Figur 21: Case 2, eddy viskositet

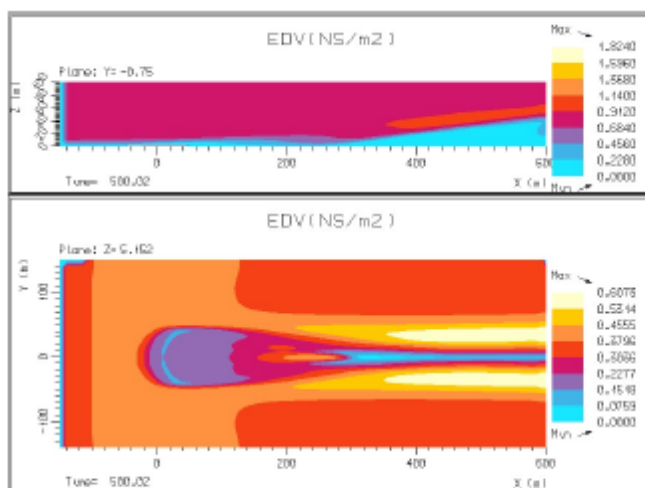
Tabell 2: Fareavstander Case 2

Grense	Avstand	Høyde
Stoik (9 %)	340 m	20 m
LEL (4.4 %)	510 m	30 m
½ LEL	750 m	55 m
10 % LEL	> 1200 m	> 30 m

5.3 Case 3, gass: 40 kg/s, vind: 3 m/s



Figur 22: Case 3, gasskonsentrasjoner

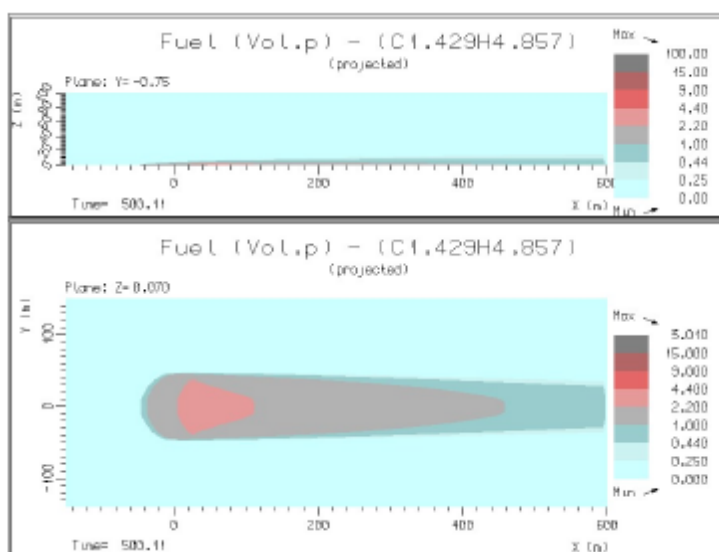


Figur 23: Case 3, eddy viskositet

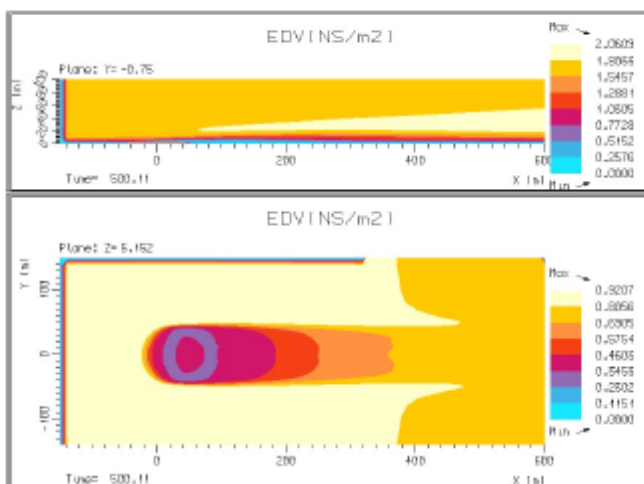
Tabell 3: Fareavstander Case 2

Grense	Avstand	Høyde
Stoik (9 %)	n/a	n/a
LEL (4.4 %)	170 m	0 m
½ LEL	300 m	10 m
10 % LEL	> 600 m	> 25 m

5.4 Case 4, gass: 40 kg/s, vind: 7 m/s



Figur 24: Case 4, gasskonsentrasjoner



Figur 25: Case 4; eddy viskositet

Tabell 4: Fareavstander Case 4

Grense	Avstand	Høyde
Stoik (9 %)	n/a	n/a
LEL (4.4 %)	n/a	n/a
½ LEL	110	0 m
10 % LEL	> 600 m	0 – 10 m

6. OPPSUMMERING RESULTATER

Tabell 5: oppsummering av resultater KFX

Grense	Case 1 Avstander		Case 2 Avstander		Case 3 Avstander		Case 4 Avstander	
	Horisontal avstand	Høyde	Horisontal avstand	Høyde	Horisontal avstand	Høyde	Horisontal avstand	Høyde
Stoik (9 %)	200 m	35 m	340 m	20 m	n/a	n/a	n/a	n/a
LEL (4.4 %)	400 m	70 m	510 m	30 m	170 m	0 m	n/a	n/a
½ LEL	660 m	100 m	750 m	55 m	300 m	10 m	110 m	0 m
10 % LEL	> 1200 m	120 m	> 1200 m	> 30 m	> 600 m	> 25 m	> 600 m	0 – 10 m

7. KOMMENTARER OM BEREKNINGER GJORT I FLACS

- Generelt mindre fare avstander
- Urealistisk lang beregningstid sammenlignet med KFX
- Konvergensproblemer, må benytte veldig lave CFL-tall ($CFLV = 1$), dette gir lang beregningstid
- Problemer med å benytte like stort grid som med KFX (ca 2×10^6 celler benyttet i FLACS)
- Pga konvergensproblemer, lang beregningstid og grovere grid enn det som ble benyttet i KFX, stoler vi mer på resultater oppnådd med KFX enn FLACS

Sensitiviteter på case 2: 450 kg/s konstant utslipp med 7 m/s vind

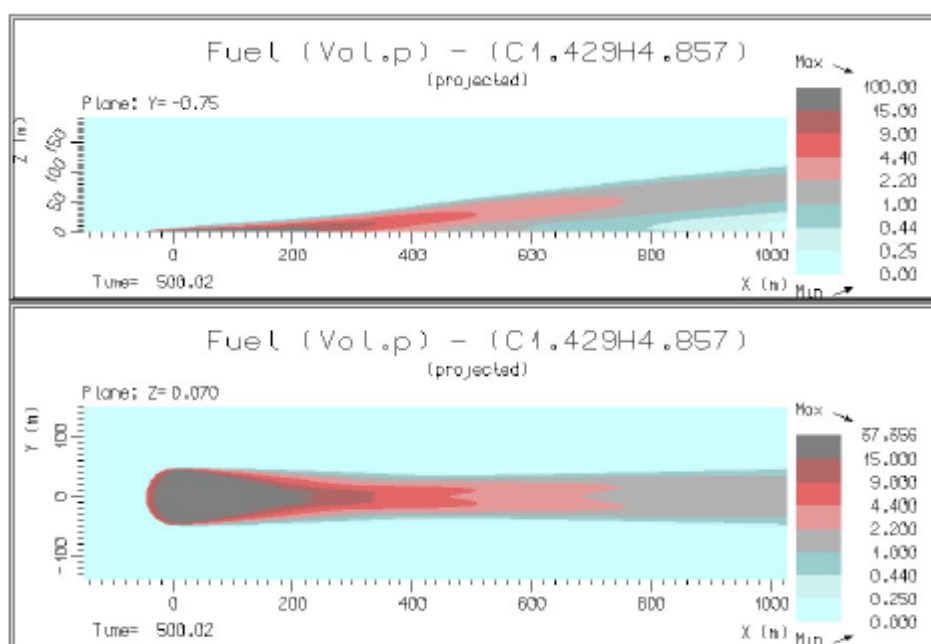
Følgende sensitiviteter er gjort:

- Meget høy gridoppløsning (3.9 millioner gridpunkt) og moderat gridoppløsning (200 000 gridpunkt)
- Lang oppstrøms avstand til utslippet
- Ikke porøs og porøs overflate for utslipp av gassen
- Høy og lav turbulens på gassen som kommer fra vannfasen.

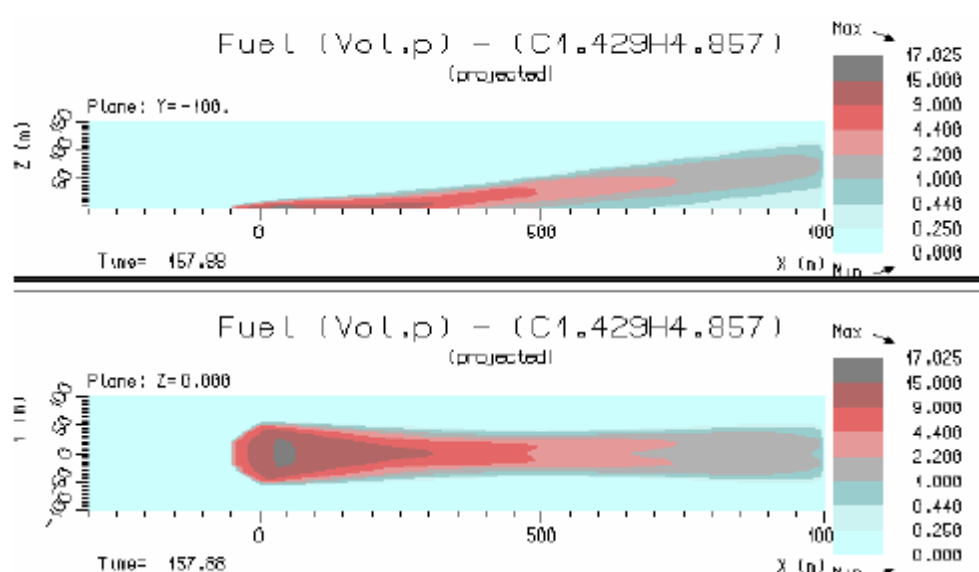
Konklusjon på denne overfladiske studien:

Resultatene viser:

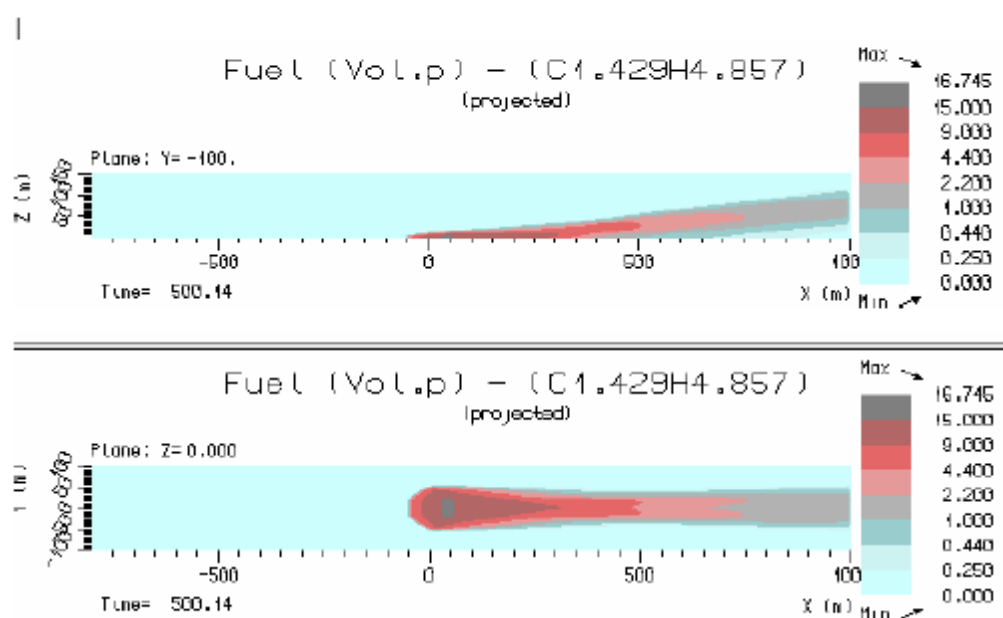
- griduavhengighet
- meget liten avhengighet av oppstrøms avstand til utslippet
- meget liten avhengighet på turbulensnivået til innløpsgassen.
- betydelig avhengighet på hastighet (porøsiteten på overflaten) gassen kommer opp med fra vannfasen. En porøsitet på 1% ga ca 70-80 m kortere avstand til LEL.



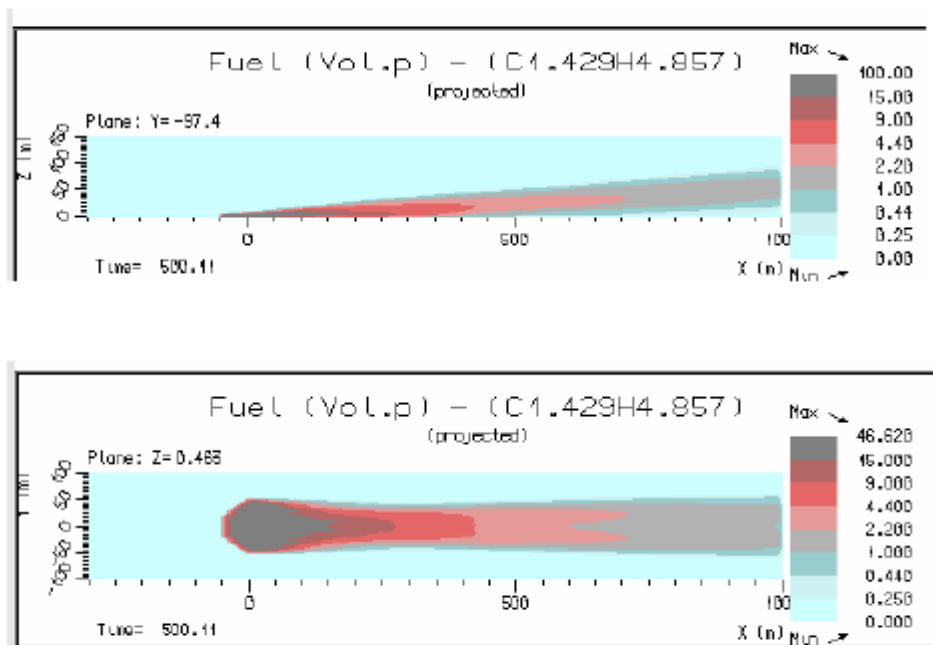
Figur 1: Horisontal og vertikal projeksjon av gassky med 3.2 millioner gridpunkt.



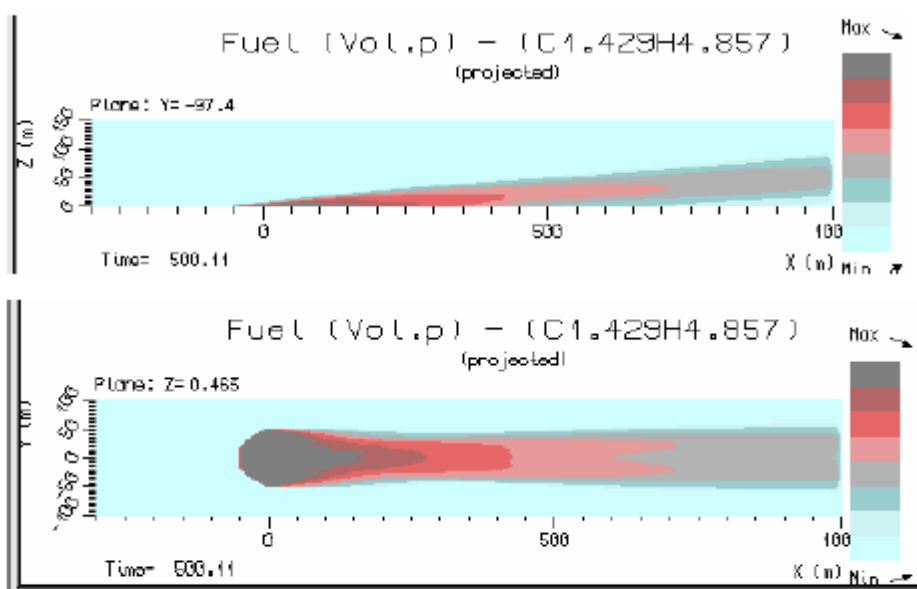
Figur 2: Horisontal og vertikal projeksjon av gassky med 200000 gridpunkt.



Figur 3: Horisontal og vertikal projeksjon av gassky med lang avstand oppstrøms utslippet (gridoppløsning tilsvarer det i figur 2, men noe flere gridpunkt i oppstrøms område).



Figur 4: Horizontal og vertikal projeksjon av gassky med 200000 gridpunkt med utslipp gjennom en overflate som tilsvarer en porøsitet på 1%.



Figur 5: Horizontal og vertikal projeksjon av gassky med 200000 gridpunkt med utslipp gjennom en overflate som tilsvarer en porøsitet på 1%. I tillegg er lagt til mye turbulens på gassen fra vannfasen.

Turbulensenergien, k , og dissipasjonen, ϵ , ble i første omgang økt proporsjonalt med hverandre. Da dette ikke påvirket resultatene ble ϵ redusert kraftig.

k ble spesifisert slik at intensiteten $\sqrt{2k}/U$ var 0.5. Dette er en meget turbulent jet. Den turbulente lengdeskalaen (som ϵ ble estimert ut fra) i jeten ble satt til 0.9 m og 15 m (ϵ lik $18 \text{ m}^2/\text{s}^3$ og $1 \text{ m}^2/\text{s}^3$).

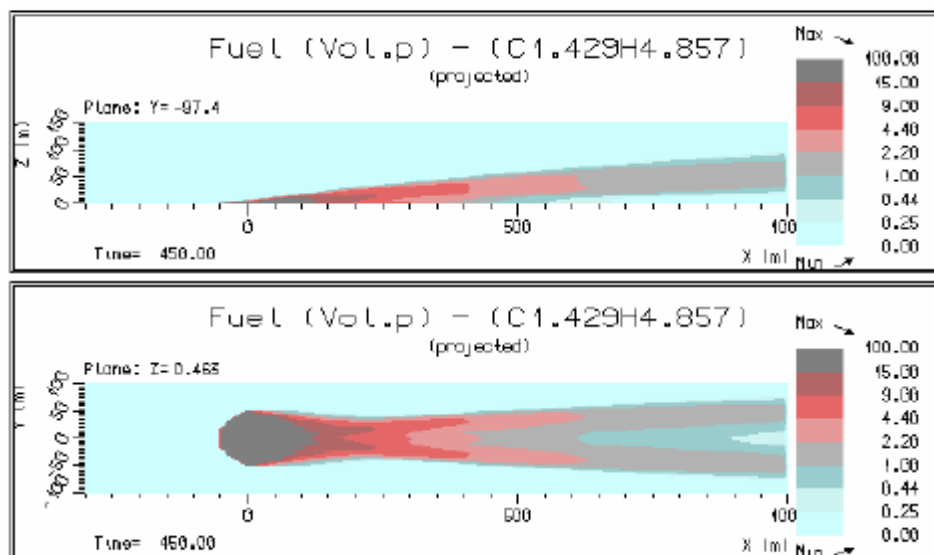
Men ingen av disse parametrene hadde noen innflytelse på case 2 resultatene.

Vi hadde også et bra møte med ComputIT sist fredag. De foreslo og endre på lengdeskalaen i vindprofilen og turbulensmodellen. Her er max turbulent lengdeskala (default) satt til henholdsvis 4 og 10m.

To simuleringer ble kjørt med max lengdeskala i turbulensmodellen lik 3 og 50 m. Samme forsøk ble gjort med vindprofilen hvor maksimal turbulentlengdeskala ble spesifisert til 1 m og 40 m. Ingen betydelig forskjell i fareavstand ble observert. Det ble riktignok noe forskjell i formen på gasskyen. Se vedlagte figurer av en simulering med 1 meter max lengdeskala i innløpsprofilen og 10 m max lengdeskala i turbulensmodellen og en 40 meter max lengde skala i vindprofilen pluss 50 meter max lengde skala i turbulensmodellen. Uventet nok så blir faktisk fareavstanden ca 70m lengre med store lengdeskalaer for case 2. (Det er brukt stor porøsitet (1%) i overflaten gassen slippes ut fra).

Nå føler jeg at vi som brukere har modifisert i Kfx det som kan modifiseres uten at det er funnet noe entydig svar på hvorfor Kfx predikerer lenger fareavstand enn andre CFD verktøy. Dessverre har ikke bruker tilgang (meg bekjent) til å modifisere på turbulensmodellkonstantene i Kfx. Jeg tror ComputIT må ta ballen videre nå dersom vi skal komme til noen dypere forståelse.

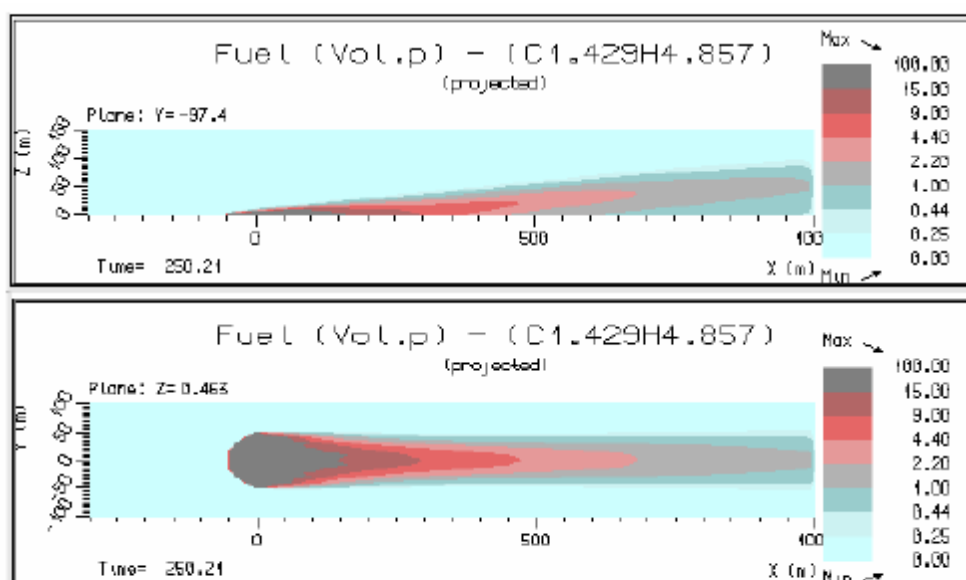
Mvh
Peter



Figur 1: Liten turbulent lengdeskala i vindprofilen.

Peter

Figur 1: Liten turbulent lengdeskala i vindprofilen.



Figur 2: Stor max lengdeskala i turbulens modell og vindprofil.

Vedlegg 3. Bidrag fra Safetec



Ptil
Teknisk Notat
Simulering av gassutslipp under vann – Testcase

Desember 2006
Dok. nr. ST-40029-TN-1-Rev01

RAPPORT SAFETEC



Rapporttittel:

Gassutslipp under vann - Testcase

Kunde: Ptil	Prosjekt nr.: P40029
Dok. nr.: ST-40029-TN-1-Rev00	Forfatter(e): J. Dahlsveen, M. Schell
Fil ref.: Teknisk Notat-Utslipp under vann-Rev01	

Oppsummering:

Safetec Nordic presenterer i dette notatet metoden selskapet benytter når man studerer spredning av gass på og over havoverflaten som følge av undersjøiske gassutslipp. I tillegg er ulike scenarier med stasjonære og transiente utslipp analysert, med bruk av den beskrevne metoden.

Metoden innebærer at man tar utgangspunkt i Fanneløps plumespredningsmodeller, gjør en antagelse om at konsentrasjonen av gass innenfor pool-diameteren er 1 og at man eventuelt korrigerer pool-diameteren ved store utslipp på grunt vann ved å anta maksimal slipphastighet på 2 m/s. Den videre gassspredningsberegningen gjøres ved hjelp av CFD-programmet CFX-10.0.

Simuleringene viser at ved store transiente utslipp på grunt vann, tilsvarende fullt brudd på en gasseksportledning, vil brennbar sky kunne bre seg over 1000 meter nedvinds på sjøoverflaten. Ved lave vindhastigheter vil den brennbare delen av gasskyen stige mer enn 200 meter. Størst horisontal spredning inntreffer ved høy vindhastighet (15 m/s).

Med gitte grensebetingelser på havoverflaten ble stasjonær gassspredning på havoverflaten simulert for ulike utslippsrater og med ulike vindhastigheter. Simuleringene viser at gass-skyens utstrekning øker med vindhastigheten inntil en maksimal utstrekning inntreffer, hvor videre økning i vindhastigheten medfører at gass-skyen tynnes ut og utstrekningen reduseres.

Gridavhengighet er undersøkt ved å gjennomføre simuleringer på to scenarier med grovere gridoppløsning enn utgangspunktet. Resultatene viser at ved for grov gridoppløsning vil man kunne 'miste' informasjon om hvordan gass-skyen utvikles og kan dermed feilestimere fareavstand.

Det understrekes videre at dersom det befinner seg større legemer på havoverflaten (plattformer/ båter) vil spredningsforløpet påvirkes betydelig.

Nøkkelord: Gass-spredning Rørledningslekkasje	☒ Begrenset ☐ Fri distribusjon	☐ Intern ☐ Referanse tillatt
--	--	---

Rev. nr.	Dato	Utarbeidet av	Kontrollert av	Godkjent av	Grunn for revisjon
00	2006-11-03	M. Schell, J. Dahlsveen	J. Dahlsveen	S. A. Skogset	Sendt for kommentar
01	2007-12-21	M. Schell	J. Dahlsveen	J. Dahlsveen	Sendt for kommentar

SAFETEC NORDIC AS
Hovedkontor: Trondheim
Sandvika
Stavanger
Bergen
www.safetec.no

+47 73 84 41 00
+47 07 57 27 00
+47 51 93 92 20
+47 55 55 10 90

SAFETEC UK LTD
Aberdeen
+44 78 0944 7495

www.safetec-group.com

AP SAFETEC SDN BHD
Kuala Lumpur
+60 3 2161 9987

www.safetec-group.com

INNHold

1	INNLEDNING	1
1.1	Bakgrunn	1
1.2	Formål	1
1.3	Basis	1
2	MODELLBESKRIVELSE	2
2.1	CFX simuleringsverktøy	2
2.2	Atmosfærisk grensesjikt	2
2.3	Modellering av pøldiameter	2
2.3.1	Store utslipp på grunt vann	4
2.4	Sentrale antagelser	4
3	SCENARIOER – FASE 1	5
3.1	Simulerte case	5
3.2	Gassammensetning	6
3.3	Pøldiameter	6
3.3.1	Stasjonært utslipp – 50 kg/s	6
3.3.2	Transient utslipp – Maksimal rate 31822 kg/s	6
4	SCENARIOER – FASE 2	8
5	RESULTATER – FASE 1	9
5.1	Stasjonært utslipp	9
5.1.1	Case 1 – 50 kg/s – 300 meters dyp – Vind 2 m/s	9
5.1.2	Case 2 – 50 kg/s – 300 meters dyp – Vind 7 m/s	10
5.1.3	Case 3 – 50 kg/s – 300 meters dyp – Vind 15 m/s	11
5.1.4	Case 4 – 50 kg/s – 70 meters dyp – Vind 2 m/s	12
5.1.5	Case 5 – 50 kg/s – 70 meters dyp – Vind 7 m/s	13
5.1.6	Case 6 – 50 kg/s – 70 meters dyp – Vind 15 m/s	14
5.2	Transient utslipp	15
5.2.1	Case 7 – Vind 2 m/s	15
5.2.2	Case 8 – Vind 7 m/s	16
5.2.3	Case 9 – Vind 15 m/s	17
5.3	Oppsummering av resultater – Fase 1	18
6	RESULTATER – FASE 2	19
6.1	Case 1 – 450 kg/s – Vind 3 m/s	19
6.2	Case 2 – 450 kg/s – Vind 7 m/s	22
6.3	Case 3 – 40 kg/s – Vind 3 m/s	25
6.4	Case 3 – 40 kg/s – Vind 7 m/s	28
6.5	Oppsummering av resultater	31
7	SENSITIVITETER	33
7.1	Turbulensintensitet	33
7.2	Gridoppløsning	35
8	KONKLUSJONER OG DISKUSJONER	36
9	REFERANSER	37

1 INNLEDNING

1.1 Bakgrunn

Petroleumstilsynet har satt i gang et prosjekt rettet mot gassutslipp under vann, og risiko knyttet til slike hendelser.

I den forbindelse har Ptil kontaktet flere forsknings- og konsultantselskaper som har kompetanse og som yter tjenester til oljeindustrien på dette området.

Safetec Nordic er en av selskapene som er kontaktet av Ptil.

1.2 Formål

Formålet med studiet er følgende:

1. Å beskrive Safetec Nordics måte å studere gassutslipp under vann, inkludert modellering av gassspredning på havoverflaten
2. Å benytte metoden på to innledende case spesifisert av Ptil som inkluderer transiente og stasjonære utslipp under vann og spredning over vann med gitt input om lekkasjeprofiler på havbunnen.
3. Å benytte metoden på fire case som inkluderer kun stasjonær gassspredning på havoverflaten med gitt input om pøldiameter, konsentrasjon og utslippsrate på havoverflaten.

Rapporten beskriver noe grunnleggende teori, metodikk samt resultater fra casestudiene.

1.3 Basis

Dette studiet er inndelt i to faser. I første fase ble lekkasjeprofiler på havbunnen gitt og basert på dette ble betingelsene på havoverflaten analytisk beregnet for så å gjennomføre simulering av gassspredningen på havoverflaten for ulike vindscenarier. I andre fase ble det fokusert på å simulere gassspredning over havoverflaten hvor grensebetingelsene på havoverflaten som pøldiameter, gasskonsentrasjon og masserate var gitt som input.

Følgende input er basis for simuleringene gjennomført i de to fasene av studien:

Fase 1:

- Gassutslipp på havbunnen med både stasjonær utslippsrate på 50 kg/s og transient utslippsrate tilsvarende fullstendig brudd på Statpipe Heimdal-Draupner (Ref. 1).
- Utslippene finner sted på havdybde på 70 meter og 300 meter.
- Det simuleres med vindhastigheter på 2, 7 og 15 m/s for de innledende scenarioene.

Fase 2

- Gassutslipp på havbunnen med stasjonær utslippsrate på 450 kg/s og 40 kg/s.
- Gassutslippet danner et uniformt utslipp på havoverflaten med en diameter på 90 m.
- Gassen slippes ut med konsentrasjon på 1 og med hastighet gitt av kontinuitetsligningen.
- Gasstemperatur og lufttemperatur på 5 °C.
- Molekylær gassvekt på 22 kg/kmol.
- Nøytralt vindprofil (Pasquill klasse D over havoverflaten).

2 MODELLBESKRIVELSE

2.1 CFX simuleringsverktøy

Simuleringsverktøyet CFX-10.0 beregner spredning av gass og røyk samt konsentrasjon ved blanding av røyk og luft etter et hydrokarbonutslipp. Komposisjonen i utslippspunktet er gitt som massefraksjon av hver komponent som inngår i blandingen. CFX løser de fluiddynamiske konserveringsligninger for masse, impuls og energi samt kjemiske reaksjoner.

CFX-10.0 blir brukt av ingeniører og forskere i industrien for beregning og vurdering av ulike dispersjon, varme og forbrenningsproblemer. CFX var det første CFD verktøy som mottok ISO 9001 godkjenning, og verktøyet er i dag kommersielt tilgjengelig (Ref.2)

2.2 Atmosfærisk grensesjikt

Vinden over sjøoverflaten er karakterisert ved hastigheten, turbulensen og den turbulente lengdeskalaen til strømmingen. Middelhastigheten er avhengig av avstanden fra sjøoverflaten, z , og er ofte uttrykt ved:

$$u = \frac{u_*}{\kappa} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right)$$

der z_0 er overflate-ruheten, κ er en konstant (0.41) og u_* er friksjonshastigheten. Overflate-ruheten for strømming over sjø er av orden centimeter. Turbulens modellen som benyttes er en $k-\varepsilon$ modell, der den turbulente energien og dissipasjonen er uttrykt som: $k = C_1 U^2$ and $\varepsilon = k^{3/2} / C_2 z$, der C_1 og C_2 er uttrykk som er avhengig av avstanden fra sjøoverflaten. Som gitt av likningen over vil vindhastigheten øke med avstand fra havoverflaten.

Referansehøyden, dvs. høyden der vindhastigheten er angitt i simuleringene, er 10 meter.

I simuleringene er det brukt en omgivelsestemperatur på 10°C.

2.3 Modellering av pøldiameter

Fannelløps modell for beregning av pøldiameter på havoverflaten som følge av et undervanns gassutslipp er benyttet i fase 1 av studiet. Dette er beskrevet nærmere nedenfor. I fase 2 er betingelsene på havoverflaten gitt som input.

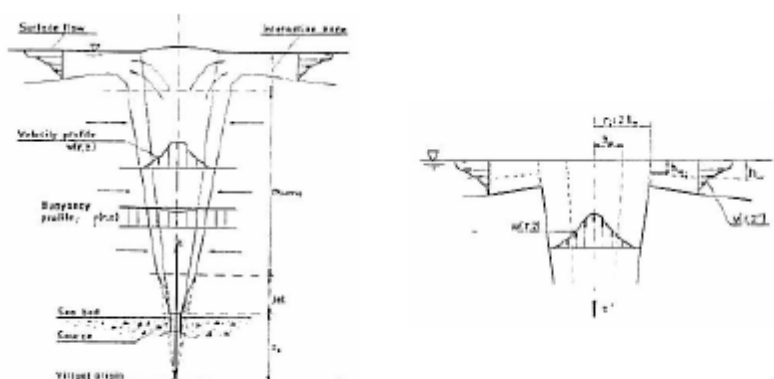
Ved undervanns gasslekkasje fra et rør eller krater på havbunnen vil det dannes en jet og gassen vil stige mot havoverflaten som følge av oppdriftskrefter på grunn av tetthetsforskjell mellom gass og vann. Gassbobler trekker med seg vann i en turbulent 'bubble plume' som danner en konisk form mot havoverflaten. Når 'plumen' nærmer seg havoverflaten vil stømningen, som følge av overflatespenninger mellom luft og vann/gass, presses i horisontal retning. Typisk strømningsmønster for en 'bubble plume' er illustrert i Figur 2.1.

Utviklingen av en undervanns jet klassifiseres i følgende fire regioner, avhengig av bidraget fra moment og oppdrift:

1. Etableringsfase. Nære lekkasjepunktet vil oppdriften være neglisjerbar og strømningsmønsteret bestemmes kun av momentet fra gass jeten.
2. Overgangsfase, hvor strømmingen er avhengig av både moment og oppdrift.

3. Etablert 'bubble plume', hvor strømmingen primært er avhengig av oppdriftskrefter og plumens hastighetsprofil kan representeres som en Gauss fordeling.
4. Nær overflate område. Når 'bubble plumen' når overflaten vil den vertikale strømmingen bøyes av og strømme i radiell retning fra plumens senter. Dette strømningsmønsteret oppstår som følge av at massefluks av gass rett underoverflaten er større enn massefluks av gass som slippes fra overflaten.

For store havdyp eller små masserater vil etableringsfasen og overgangsfasen være mindre viktig. Den stigende strømmingen av gassen vil være dominert av oppdriftskrefter, slik at initiale betingelser ikke vil være kritiske. 'Nær overflate området' er tynt men dominerende ved beregning av gass-spredning videre fra havoverflaten.



Figur 2.1 Prinsippskisse av strømningsforløpet til en ideell 'bubble plume'. Figurene er kopiert fra Fanneløp et. al. (ref 4).

Omkring 1980 gjennomførte Fanneløp m fl. de første teoretiske og praktiske studier av dannelse av gass-plumer og strømningsforhold som dannes når slike plumer kommer til havoverflaten. Disse studiene la grunnlaget for en plumemodell som baseres på følgende antagelser; Massestrømmen av gass ble antatt å bli bevart; og gassen ble antatt å ekspandere som en ideell gass som følge av trykkfallet under oppstigning til havoverflaten. Ytre forhold som strøm og lagdeling i vannmassene ble neglisjert. Disse antagelsene vil være gyldig for mindre havdyp (<300 meter).

I senere tid er det avdekket at for lekkasjer eller utblåsninger på større havdyp (>300-400 meter) vil utviklingen av gassplumen være påvirket av ytre forhold i slik grad at disse ikke kan neglisjeres. De viktigste forhold som ikke kan neglisjeres ved utblåsninger på dypt vann er strømming og lagdeling, samt at massestrømmen av gass ikke lenger nødvendigvis vil være bevart i plumen; gassbobler fra plumen vil kunne løses i omgivende sjøvann og gass kan danne hydrat i kontakt med sjøvann ved høye trykk og lave temperaturer (Ref.3).

I denne studien vil gasslekkasjen finne sted på maksimalt 300 meters dyp. Fanneløp modellen antas derfor å være gyldig for alle simuleringene. I følge Fanneløp modellen er størrelsen på gasspølen som dannes ved havoverflaten en funksjon av dybden hvor lekkasjen oppstår; økt vanddybde gir større pøldiameter. Diameteren til poolen på havoverflaten er beregnet fra følgende relasjon (Ref. 4):

$$D = 2 \cdot \beta \cdot Z$$

hvor:

D er pool-diameter.

$\beta = 0.115$ er medrivningskoeffisient.
 Z er vann dybden.

Gass-spredningen videre fra havoverflaten er, i tillegg til ytre faktorer som vindretning og vindhastighet, sterkt avhengig av diameteren til gass-poolen på overflaten. Hvordan denne estimeres er avhengig av hvilket scenario som studeres, dvs. størrelsen og dybden til lekkasjen er avgjørende. Dette beskrives nærmere under avsnitt 2.3

2.3.1 Store utslipp på grunt vann

For å ta høyde for ekstreme utslippsrater, spesielt på grunt vann, estimeres pøldiameteren på havoverflaten basert på antagelsen om en gitt vertikal gasshastighet fra havoverflaten. Gjennomsnittlig gasshastighet midlet over hele arealet antas å være lik den vertikale stighastigheten i senter av plumen rett under havoverflaten. En vertikal gjennomsnittlig gasshastighet på 2 m/s er antatt for hele det transiente utslippsforløpet. Denne antagelsen er delvis basert på studier av Milgram og Van Houten som viste at stighastigheten midt i gassplumen er mellom 2 og 5 m/s (Ref. 5).

Safetec har ikke funnet informasjon eller studier som gir total diameter til gass-plume, der man inkluderer også området like under overflaten 'zone of surface flow'. En grov antagelse er at nær havoverflaten vil gass-plumen spres utover som følge av radiell strømming vist i Figur 2.1, der diameteren til 'zone of surface flow' er begrenset ut i fra en vurdering av konservering av masse. Ved å anta maksimum midlere gass slipphastighet lik maksimal observert gasshastighet på 2 m/s (midlet over poolen) vil man finne den effektive gass-pool diameteren.

2.4 Sentrale antagelser

Følgende sentrale antagelser er benyttet:

1. Fannelløps modell for spredningsvinkel som gir pool-diameter på havoverflaten legges i utgangspunktet til grunn for beregningene i fase 1 av studiet. For spesielt store utslipp vil pøldiameter korrigeres ved å anta maksimum slipphastighet fra havoverflaten. Denne antagelsen er ikke inkludert i fase 2 av studiet hvor grensebetingelsene på havoverflaten allerede er gitt som input.
2. Konsentrasjon av gass på havoverflaten som blir brukt som inngangsdata til gassspredningsberegningene er antatt å være 1 over hele pool-overflaten. Dvs. at det antas at det er kun gass som trenger ut gjennom havoverflaten innenfor angitt pool.

3 SCENARIOER – FASE 1

3.1 Simulerte case

Det er valgt å simulere to hovedcase med tanke på lekkasjerate:

1. Stasjonært utslipp på 50 kg/s.
2. Transient utslipp med maksimal rate på 31822 kg/s. Utslppsforløpet tilsvarer fullstendig brudd på Statpipe Heimdal-Draupner, beregnet med OLGA, med utstrømning fra rørene oppstrøms og nedstrøms bruddet (Ref. 1).

For det transiente tilfellet er det valgt å simulere fra initiell lekkasjerate på 0 kg/s til og med en rate på 2500 kg/s som inntreffer etter omtrent 13 minutter og 45 sekunder. Maksimal lekkasjerate på 31822 inntreffer etter omtrent 3 sekunder. I figurene nedenfor er det transiente lekkasjeforløpet vist med inntegnede lekkasjerater som følger:

- Maksimal lekkasjerate på 31822 kg/s etter omtrent 3 sekunder.
- 15000 kg/s etter omtrent 11 sekunder.
- 5000 kg/s etter omtrent 1 minutt og 55 sekunder.
- 2500 kg/s etter omtrent 13 minutter og 45 sekunder.
- 1000 kg/s etter omtrent 1 time 25 minutter og 45 sekunder.

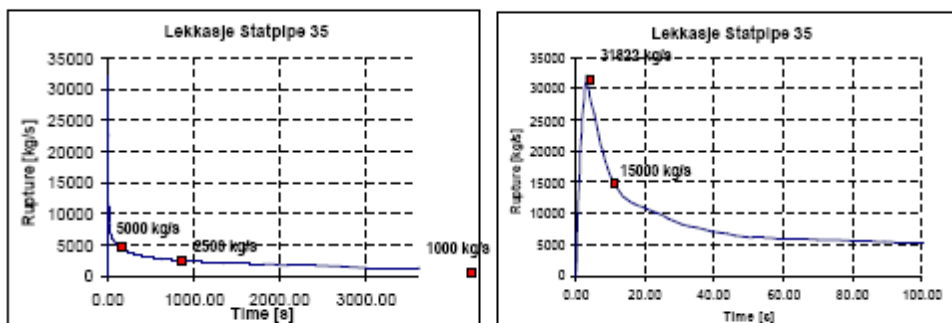


Figure 3.1 Transient lekkasjeforløp for et fullstendig brudd på Statpipe Heimdal-Draupner, beregnet i OLGA (Ref. 1).

For stasjonær lekkasjerate på 50 kg/s er det simulert både for en vanddybde på 70 meter og på 300 meter, som gir forskjellig pool-diameter på havoverflaten og dermed også ulik vertikal gasshastighet fra overflaten. For det transiente forløpet er det simulert med en gitt pool-diameter bestemt ut fra en antatt vertikal gasshastighet på 2 m/s mellom gass og vann, som vil være uavhengig av om lekkasjen skjer på 70 meter eller 300 meter (se diskusjon i seksjon 2.3). For hvert scenario er det simulert med tre ulike vindhastigheter på henholdsvis 2, 7 og 15 m/s. Dette gir totalt 9 scenarier. En fullstendig oversikt over scenariene er gitt i Tabell 3.1.

Tabell 3.1 Simulerte scenarier av gassutslipp under vann i fase 1 av studiet.

Scenario	Utslippstype	Masserate (kg/s)	Vanndybde (m)	Vindhastighet (m/s)
1	Stasjonært	50	300	2
2	Stasjonært	50	300	7
3	Stasjonært	50	300	15
4	Stasjonært	50	70	2
5	Stasjonært	50	70	7
6	Stasjonært	50	70	15
7	Transient	0 - 2500 kg/s (max. 31822 kg/s etter 3 sek.)	70/300	2
8	Transient	0 - 2500 kg/s (max. 31822 kg/s etter 3 sek.)	70/300	7
9	Transient	0 - 2500 kg/s (max. 31822 kg/s etter 3 sek.)	70/300	15

3.2 Gassammensetning

Utslippene antas å være en typisk naturgass med en tetthet på havoverflaten på 0.8 kg/m³. I modellen er gassammensetningen slik at denne tettheten oppnås ved havoverflaten med atmosfærisk tilstand, dvs. et trykk på 1 atm. og temperatur på 10°C.

Følgende gassammensetning er brukt for alle simuleringene:

Komponent	Volumfraksjon	Massefraksjon	Tetthet i kg/m ³ (1atm., 10°C)
CH ₄	0.85	0.734	0.691
C ₂ H ₆	0.12	0.195	1.295
C ₃ H ₈	0.03	0.071	1.899

3.3 Pøldiameter

Pøldiameter på havoverflaten er en dominerende parameter for videre gasspredningsberegninger. Under beskrives hvilke pøldiameterer som er valgt for hvert case.

3.3.1 Stasjonært utslipp – 50 kg/s

For en stasjonær lekkasjerate på 50 kg/s vil det i følge Fannelløp-modellen dannes en gass-pool på omtrent 16 meter og 70 meter i diameter for en lekkasje på henholdsvis 70 meter og 300 meter dyp. For en gitt pool-diameteren og lekkasjerate vil en gjennomsnittlig vertikal gasshastighet fra overflaten kunne beregnes. For utslippet på 70 meter og 300 meters dyp vil gjennomsnittlig gasshastighet være henholdsvis 0.3 m/s og 0.017 m/s.

3.3.2 Transient utslipp – Maksimal rate 31822 kg/s

For det transiente forløpet vil en maksimal lekkasjerate på 31822 kg/s inntreffe etter omtrent 3 sekunder, hvor det vil formes en stor gassboble som strømmer mot overflaten som følge av oppdriftskrefter. På overflaten nær senter av strømmingen, vil gassen presses opp og slippe overflaten. En typisk 'bubble plume' fase, som beskrevet

av Fanneløp, etableres etter dette initiale forløpet. Nær overflaten vil den vertikale strømmingen bøyes av og strømme i radiell retning fra plumens senter.

For å ta høyde for ekstreme utslippsrater, estimeres pool-diameteren på havoverflaten basert på antagelsen om en gitt maksimal vertikal gasshastighet fra havoverflaten, som vist i avsnitt 2.3.1. Pødiameteren estimeres dermed til 160 meter, uavhengig av havdybden.

4 SCENARIOER – FASE 2

I fase 2 av studiet er det simulert med to ulike stasjonære utslippsrater, 450 kg/s og 40 kg/s, og med to vindhastigheter, 3 m/s og 7 m/s. Grensebetingelsene på havoverflaten, som pøldiameter og gasskonsentrasjon, er gitt som input (se seksjon 1.3). I Tabell 5.1 er det gitt en oversikt over de simulerte scenarioene.

Figur 4.1 Simulerte scenarioer av gassutslipp under vann i fase 2 av studiet.

Scenario	Utslippstype	Masserate (kg/s)	Pøldiameter	Vindhastighet (m/s)
1	Stasjonært	450	90	3
2	Stasjonært	450	90	7
3	Stasjonært	40	90	3
4	Stasjonært	40	90	7

5 RESULTATER – FASE 1

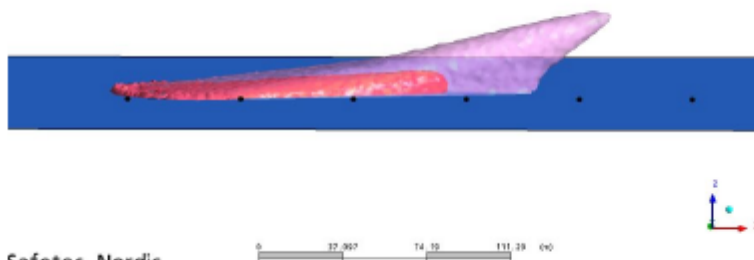
5.1 Stasjonært utslipp

5.1.1 Case 1 – 50 kg/s – 300 meters dyp – Vind 2 m/s

Figur 5.1 og Figur 5.2 viser plott av gass-sky som følge av et 50 kg/s utslipp på 300 meters dyp, med vindhastighet 2 m/s.

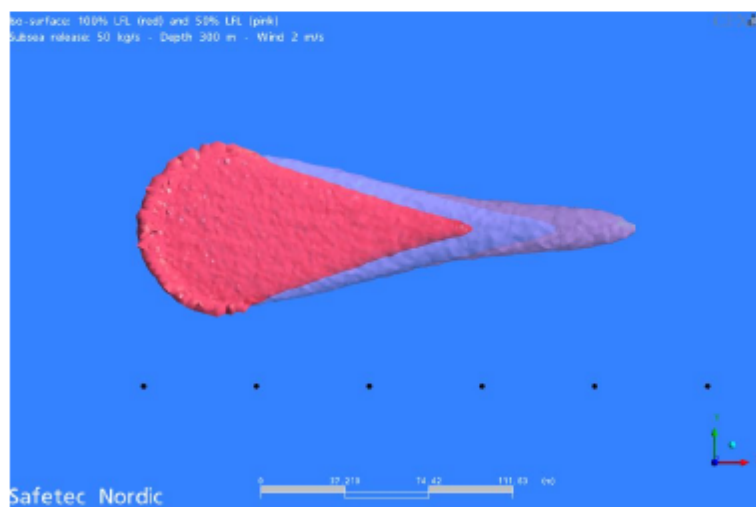
iso-surface: 100% LFL (red) and 50% LFL (pink)
Subsea release: 50 kg/s - Depth 300 m - Wind 2 m/s

CFX®



Safetec Nordic

Figur 5.1 50 kg/s stasjonær gasslekkasje på 300 meters dyp med vind på 2 m/s. Iso-overflate for 100% LFL (rød) og 50% LFL (rosa). Avstand mellom svarte punkt er 50 meter.



Safetec Nordic

Figur 5.2 50 kg/s stasjonær gasslekkasje på 300 meters dyp med vind på 2 m/s. Iso-overflate for 100% LFL (rød) og 50% LFL (rosa). Avstand mellom svarte punkt er 50 meter.

5.1.2 Case 2 – 50 kg/s – 300 meters dyp – Vind 7 m/s

Figur 5.3 og Figur 5.4 viser plott av gass-sky som følge av et 50 kg/s utslipp på 300 meters dyp, med vindhastighet 7 m/s.

iso-surface: 100% LFL (red) and 50% LFL (pink)
 Subsea release: 50 kg/s - Depth 300 m - Wind 7 m/s

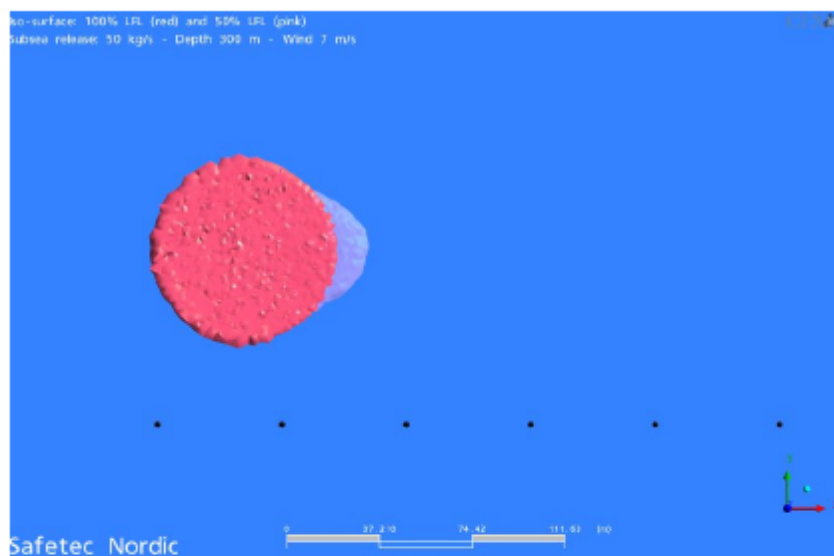
CFX



Safetec Nordic



Figur 5.3 50 kg/s stasjonær gasslekkasje på 300 meters dyp med vind på 7 m/s. Iso-overflate for 100% LFL (rød) og 50% LFL (rosa). Avstand mellom svarte punkt er 50 meter.



Safetec Nordic

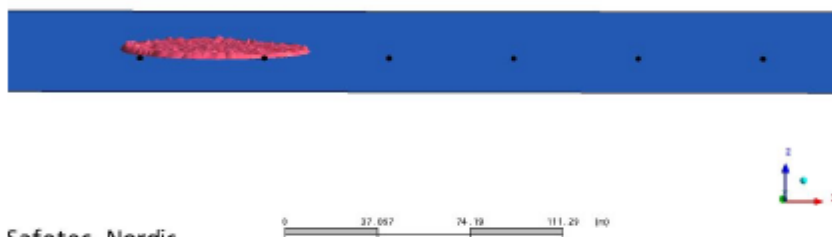
Figur 5.4 50 kg/s stasjonær gasslekkasje på 300 meters dyp med vind på 7 m/s. Iso-overflate for 100% LFL (rød) og 50% LFL (rosa). Avstand mellom svarte punkt er 50 meter.

5.1.3 Case 3 – 50 kg/s – 300 meters dyp – Vind 15 m/s

Figur 5.5 og Figur 5.6 viser plott av gass-sky som følge av et 50 kg/s utslipp på 300 meters dyp, med vindhastighet 15 m/s.

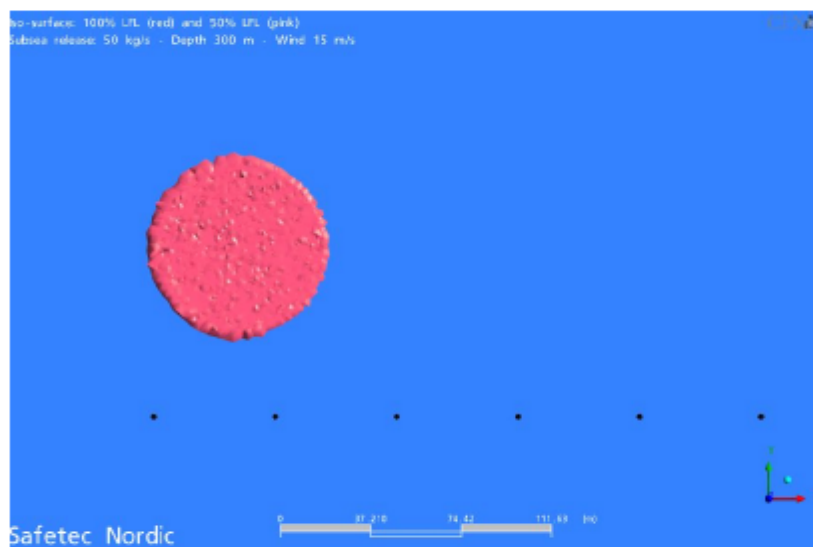
iso-surface: 100% LFL (red) and 50% LFL (pink)
Subsea release: 50 kg/s - Depth 300 m - Wind 15 m/s

CFX



Safetec Nordic

Figur 5.5 50 kg/s stasjonær gasslekkasje på 300 meters dyp med vind på 15 m/s. Iso-overflate for 100% LFL (rød) og 50% LFL (rosa). Avstand mellom svarte punkt er 50 meter.



Safetec Nordic

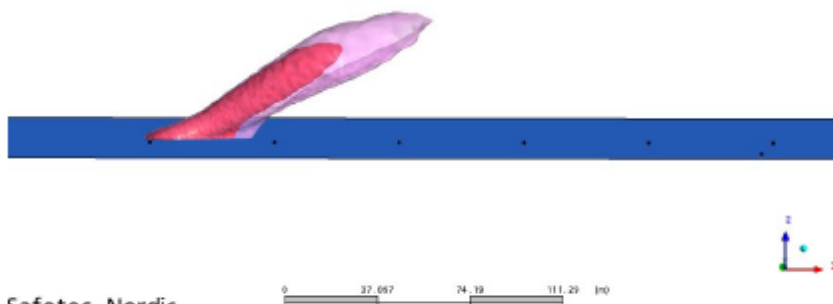
Figur 5.6 50 kg/s stasjonær gasslekkasje på 300 meters dyp med vind på 15 m/s. Iso-overflate for 100% LFL (rød) og 50% LFL (rosa). Avstand mellom svarte punkt er 50 meter.

5.1.4 Case 4 – 50 kg/s – 70 meters dyp – Vind 2 m/s

Figur 5.7 og Figur 5.8 viser plott av gass-sky som følge av et 50 kg/s utslipp på 70 meters dyp, med vindhastighet 2 m/s.

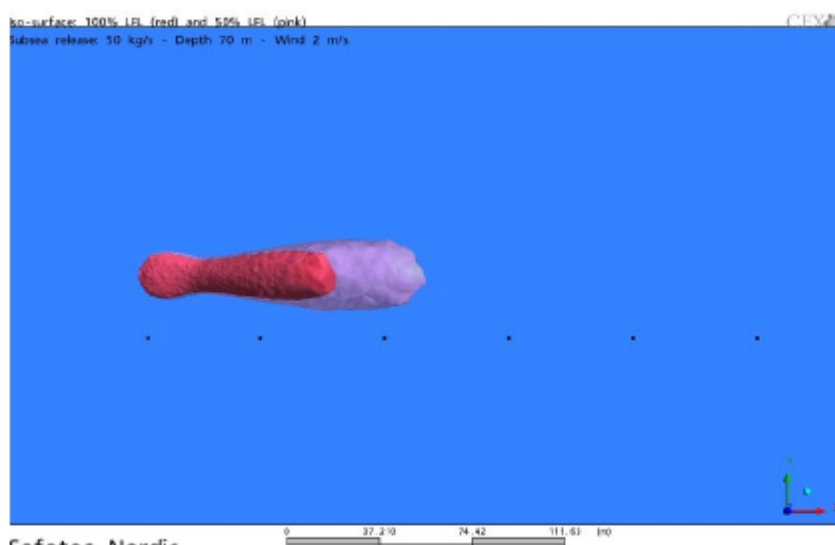
iso-surface: 100% LFL (red) and 50% LFL (pink)
Subsea release: 50 kg/s - Depth 70 m - Wind 2 m/s

CFX



Safetec Nordic

Figur 5.7 50 kg/s stasjonær gasslekkasje på 70 meters dyp med vind på 2 m/s. Iso-overflate for 100% LFL (rød) og 50% LFL (rosa). Avstand mellom svarte punkt er 50 meter.



Safetec Nordic

Figur 5.8 50 kg/s stasjonær gasslekkasje på 70 meters dyp med vind på 2 m/s. Iso-overflate for 100% LFL (rød) og 50% LFL (rosa). Avstand mellom svarte punkt er 50 meter.

5.1.5 Case 5 – 50 kg/s – 70 meters dyp – Vind 7 m/s

Figur 5.9 og Figur 5.10 viser plott av gass-sky som følge av et 50 kg/s utslipp på 70 meters dyp, med vindhastighet 7 m/s.

iso-surface: 100% LFL (red) and 50% LFL (pink)
 Subsea release: 50 kg/s - Depth 70 m - Wind 7 m/s

CFX



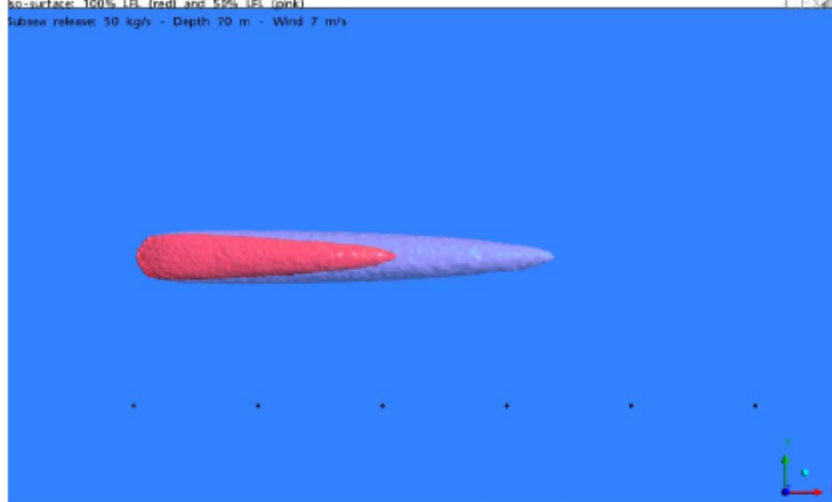
Safetec Nordic



Figur 5.9 50 kg/s stasjonær gasslekkasje på 70 meters dyp med vind på 7 m/s. Iso-overflate for 100% LFL (rød) og 50% LFL (rosa). Avstand mellom svarte punkt er 50 meter.

iso-surface: 100% LFL (red) and 50% LFL (pink)
 Subsea release: 50 kg/s - Depth 70 m - Wind 7 m/s

CFX



Safetec Nordic



Figur 5.10 50 kg/s stasjonær gasslekkasje på 70 meters dyp med vind på 7 m/s. Iso-overflate for 100% LFL (rød) og 50% LFL (rosa). Avstand mellom svarte punkt er 50 meter.

5.1.6 Case 6 – 50 kg/s – 70 meters dyp – Vind 15 m/s

Figur 5.11 og Figur 5.12 viser plott av gass-sky som følge av et 50 kg/s utslipp på 70 meters dyp, med vindhastighet 15 m/s.

iso-surface: 100% LFL (red) and 50% LFL (pink)
 Subsea release: 50 kg/s - Depth 70 m - Wind 15 m/s

CFX



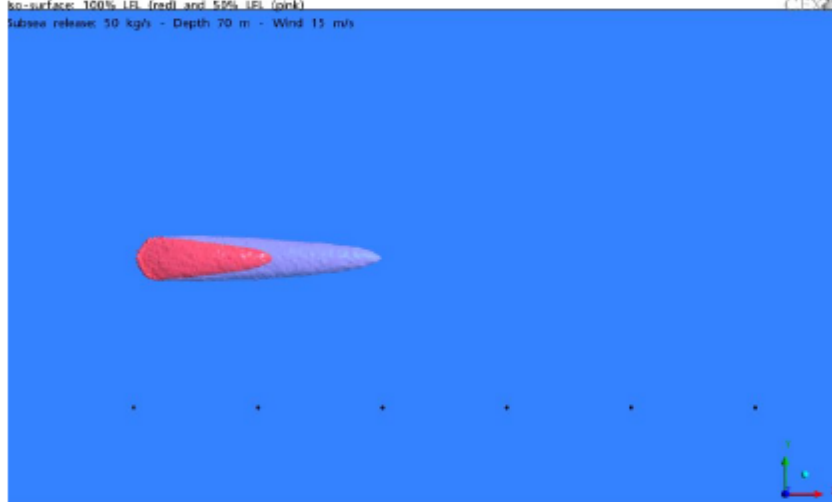
Safetec Nordic

0 37.657 74.31 111.29 140

Figur 5.11 50 kg/s stasjonær gasslekkasje på 70 meters dyp med vind på 15 m/s. Iso-overflate for 100% LFL (rød) og 50% LFL (rosa). Avstand mellom svarte punkt er 50 meter.

iso-surface: 100% LFL (red) and 50% LFL (pink)
 Subsea release: 50 kg/s - Depth 70 m - Wind 15 m/s

CFX



Safetec Nordic

0 37.210 74.42 111.63 140

Figur 5.12 50 kg/s stasjonær gasslekkasje på 70 meters dyp med vind på 15 m/s. Iso-overflate for 100% LFL (rød) og 50% LFL (rosa). Avstand mellom svarte punkt er 50 meter.

5.2 Transient utslipp

5.2.1 Case 7 – Vind 2 m/s

Figur 5.13 viser plott av gass-sky som følge av et stort (maks. 31822 kg/s) utslipp med vindhastighet 2 m/s.

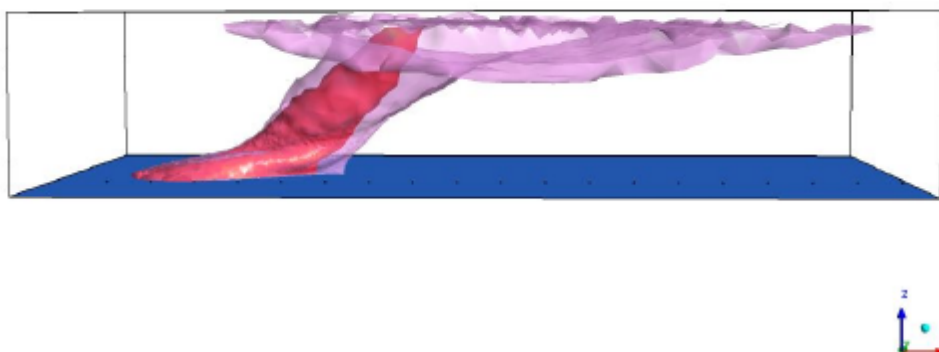
Det er viktig å merke seg at å grunn av begrensning i størrelse på domenet vil øvre del av gasskyen ikke vise virkelige forhold; på grunn av at gassen er lettere enn luft vil den stige opp (og ut av beregningsdomenet).

iso-surface: 100% LFL (red) and 50% LFL (pink)

Transient subsea release: Max rate 31822 kg/s - Wind 2 m/s

CFX

Time Value = 358 [s]



Safetec Nordic

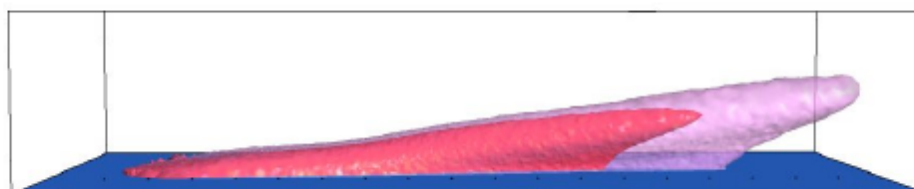
Figur 5.13 Transient undervanns gasslekkasje med maksimal rate på 31822 kg/s etter omtrent 3 sekunder. Figuren viser et øyeblikksbilde av gass-spredningen fra havoverflaten etter 358 sekunder (korresponderende lekkasjerate – 3350 kg/s) og med vindhastighet på 2 m/s. Iso-overflate for 100% LFL (rød) og 50% LFL (rosa). Avstand mellom svarte punkt er 50 meter.

5.2.2 Case 8 – Vind 7 m/s

Figur 5.14 viser plott av gass-sky som følge av et stort (maks. 31822 kg/s) utslipp med vindhastighet 7 m/s.

iso-surface: 100% LFL (red) and 50% LFL (pink)
 Transient subsea release: Max rate 31822 kg/s - Wind 7 m/s

CFX
 Time Value = 198 [s]



Safetec Nordic

Figur 5.14 Transient undervanns gasslekkasje med maksimal rate på 31822 kg/s etter omtrent 3 sekunder. Figuren viser et øyeblikksbilde av gass-spredningen fra havoverflaten etter 198 sekunder (korresponderende lekkasjerate – 4150 kg/s) og med vindhastighet på 7 m/s. Iso-overflate for 100% LFL (rød) og 50% LFL (rosa). Avstand mellom svarte punkt er 50 meter.

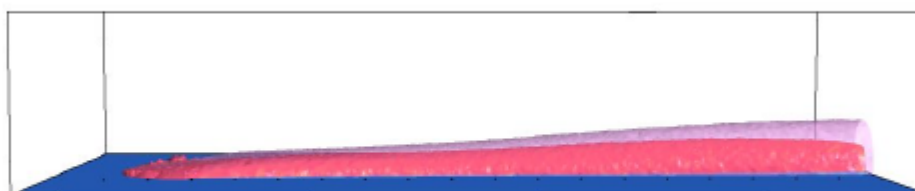
5.2.3 Case 9 – Vind 15 m/s

Figur 5.14 viser plott av gass-sky som følge av et stort (maks. 31822 kg/s) utslipp med vindhastighet 15 m/s.

Det er viktig å merke seg at på grunn av begrensning i størrelse på domenet vil gasskyen bre seg nedvinds ut av beregningsdomenet.

iso-surface: 100% LFL (red) and 50% LFL (pink)
Transient subsea release: Max rate 31822 kg/s - Wind 15 m/s

CFX
Time Value = 98 [s]



Safetec Nordic

Figur 5.15 Transient undervanns gasslekkasje med maksimal rate på 31822 kg/s etter omtrent 3 sekunder. Figuren viser et øyeblikksbilde av gass-spredningen fra havoverflaten etter 98 sekunder (korresponderende lekkasjerate - 5300 kg/s) og med vindhastighet på 15 m/s. Iso-overflate for 100% LFL (rød) og 50% LFL (rosa). Avstand mellom svarte punkt er 50 meter.

5.3 Oppsummering av resultater – Fase 1

I Tabell 5.1 og Tabell 5.2 vises maksimal utstrekning (lengde og høyde) til de simulerte case, for 100%, 50% og 20% av LFL.

Tabell 5.1 Maksimal utstrekning (lengde og høyde) på gass skyen fra havoverflaten ved en 50 kg/s stasjonær gasslekkasje på 70 meters og 300 meters dyp. Utstrekning er beregnet for gasskonsentrasjoner på 100%, 50% og 20% av LFL (0.04vol%)

Scenario nr.	Maksimal utstrekning på gass sky					
	Maksimal lengde [m]			Maksimal høyde [m]		
	LFL 100%	LFL 50%	LFL 20%	LFL 100%	LFL 50%	LFL 20%
1 – Dybde 300 meter, Vind 2m/s	150	220	330	10	35	65
2 – Dybde 300 meter, Vind 7m/s	75	85	205	2	2	10
3 – Dybde 300 meter, Vind 15m/s	10	70	90	2	2	4
4 – Dybde 70 meter, Vind 2m/s	80	120	190	40	50	70
5 – Dybde 70 meter, Vind 7m/s	100	170	300	7	10	15
6 – Dybde 70 meter, Vind 15m/s	55	100	180	4	6	10

Tabell 5.2 Maksimal utstrekning (lengde og høyde) på gass skyen fra havoverflaten ved en undervanns gasslekkasje med et forløp tilsvarende fullstendig brudd på Statpipe Heimdal-Draupner (Ref. 1). Utstrekning er beregnet for gasskonsentrasjoner på 100%, 50% og 20% av LFL (0.04 vol%)

Scenario nr.	Maksimal utstrekning på gass sky							
	Tid	Maksimal lengde [m]			Tid	Maksimal høyde [m]		
		LFL 100%	LFL 50%	LFL 20%		LFL 100%	LFL 50%	LFL 20%
7 – Vind 2m/s	350 sek.	350	>400	>450	40 sek.	>200	>200	>200
8 – Vind 7 m/s	200 sek.	720	950	>1000	100 sek.	120	150	190
9 – Vind 15 m/s	100 sek.	>1000	>1000	>1000	80 sek.	45	65	90

6 RESULTATER – FASE 2

I dette kapittelet er resultater fra simuleringene i fase 2 vist som vertikale og horisontale 3D-plott av gass-skyens utstrekning på havoverflaten for hver av de fire scenarioene. Gass-skyen er presentert som iso-overflater med konsentrasjon på 100 % LFL (Lower Flammability Limit) og 50 % LFL. Med en molvekt på 22 kg/kmol tilsvarer LFL en gasskonsentrasjon på omtrent 4.4 vol%.

For å enklere kunne sammenligne resultatene fra de ulike konsultentselskapene og for å kunne finne årsaken til eventuelle avvik er følgende profiler gitt for hver av de fire simulerte scenarioer:

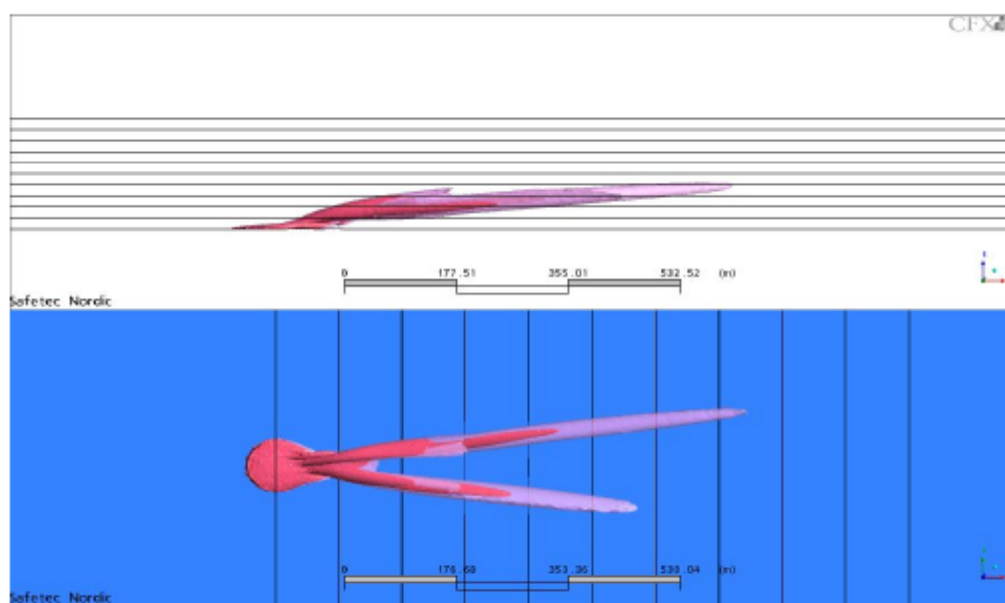
- Eddy viskositet (m^2/s)
- Turbulent kinetisk energi (m^2/s^2)
- Hastighet (m/s)

Profilene er grafisk fremstilt rett før og rett etter utslippsområdet som funksjon av høyde over havoverflaten. I Tabell 7.1 i avsnitt 7.1 er eddy viskositeten 1 meter og 50 meter over havoverflaten registrert for hver av de fire scenarioene.

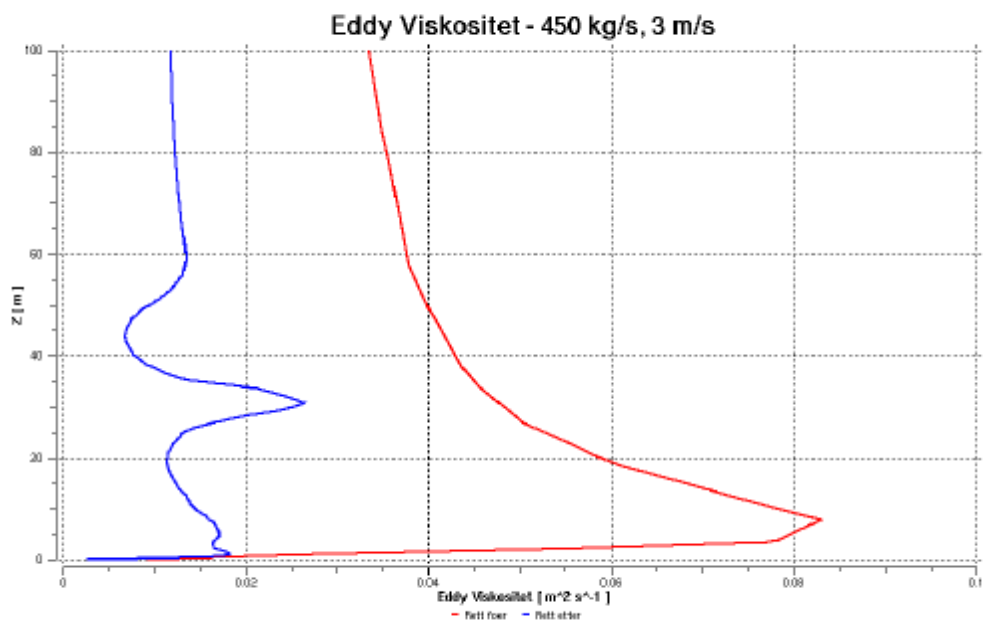
I slutten av kapittelet er utstrekningen til gass-skyen oppsummert i tabellform for konsentrasjoner på 100 % LFL, 50 % LFL og 10 % LFL.

6.1 Case 1 – 450 kg/s – Vind 3 m/s

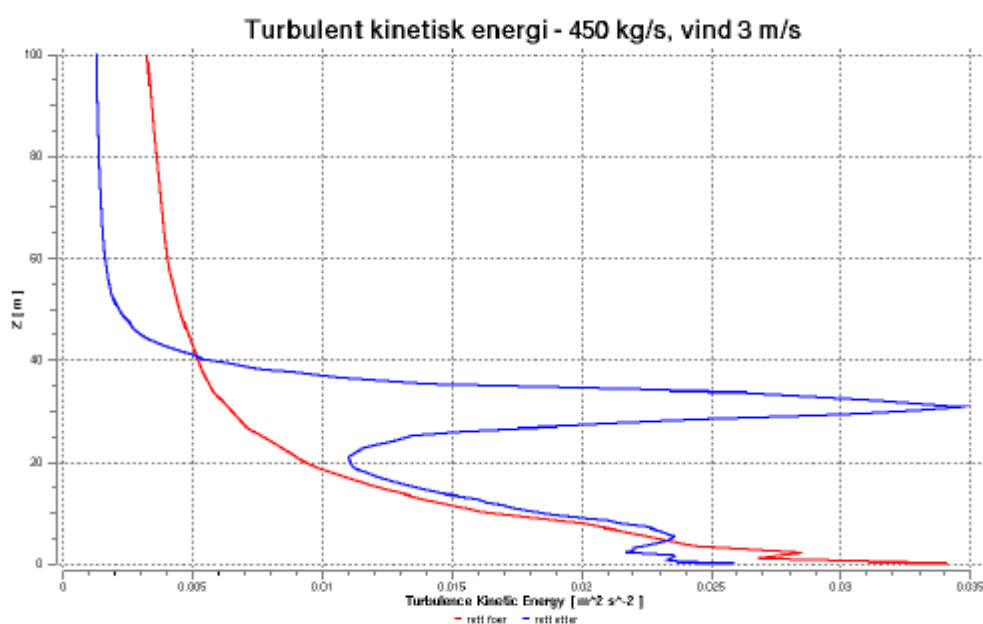
Figur 6.1 viser vertikalt og horisontalt plott av en gass-sky som følge av en 450 kg/s gassutslipp med vindhastighet på 3 m/s.



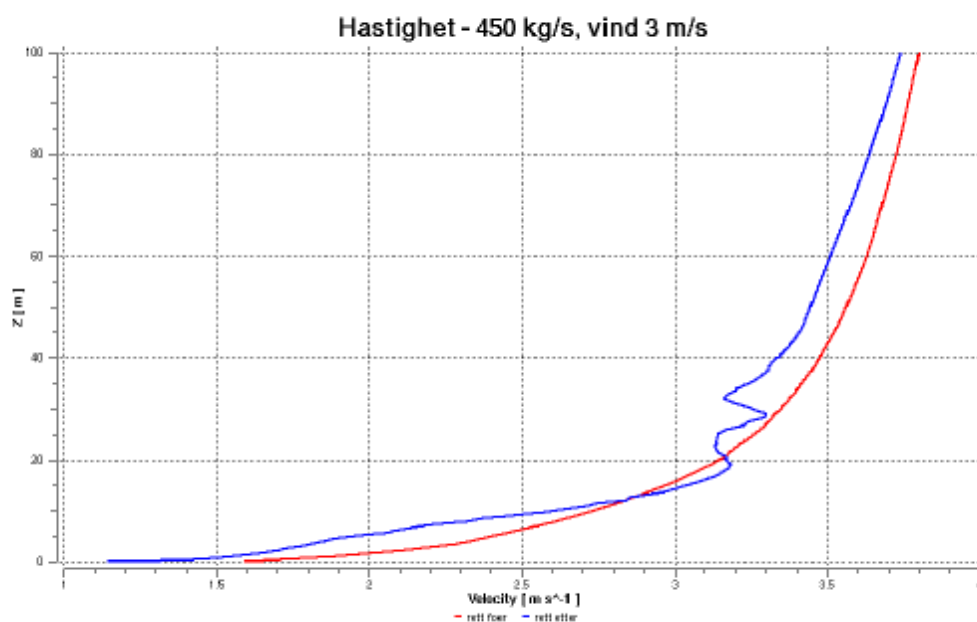
Figur 6.1 450 kg/s stasjonært gassutslipp med vind på 3 m/s. Iso-overflate for 100% LFL (rød) og 50% LFL (rosa). Avstand mellom svarte linjer er 20 meter i øverste figur (vertikalt) og 100 m i nederste figur (horisontalt).



Figur 6.2 Case 1 - Eddy viskositet over havoverflaten rett før (rød linje) og rett etter (blå linje) utslippsområdet.



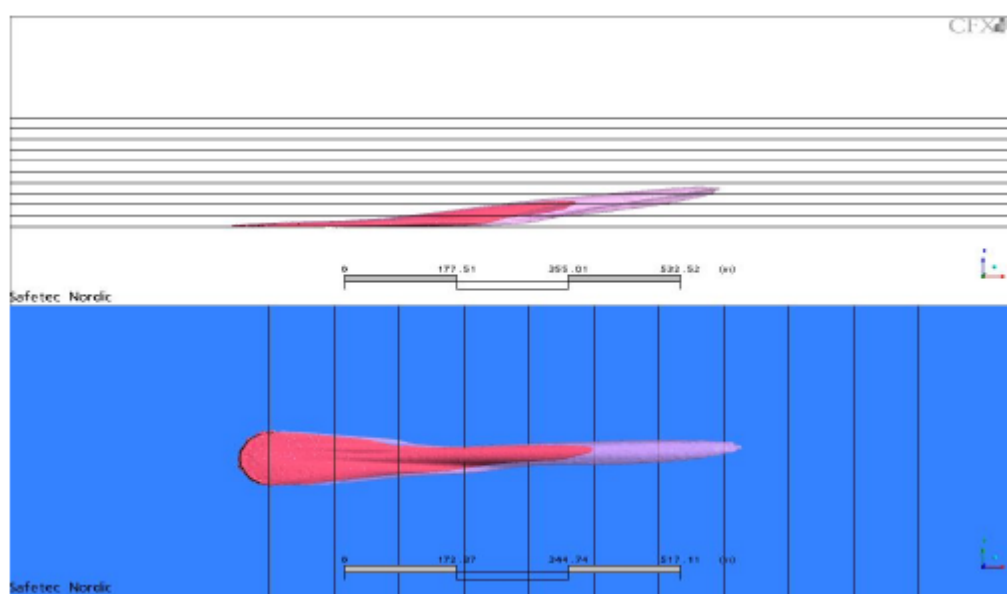
Figur 6.3 Case 1 – Turbulent kinetisk energi over havoverflaten rett før (rød linje) og rett etter (blå linje) utslippsområdet.



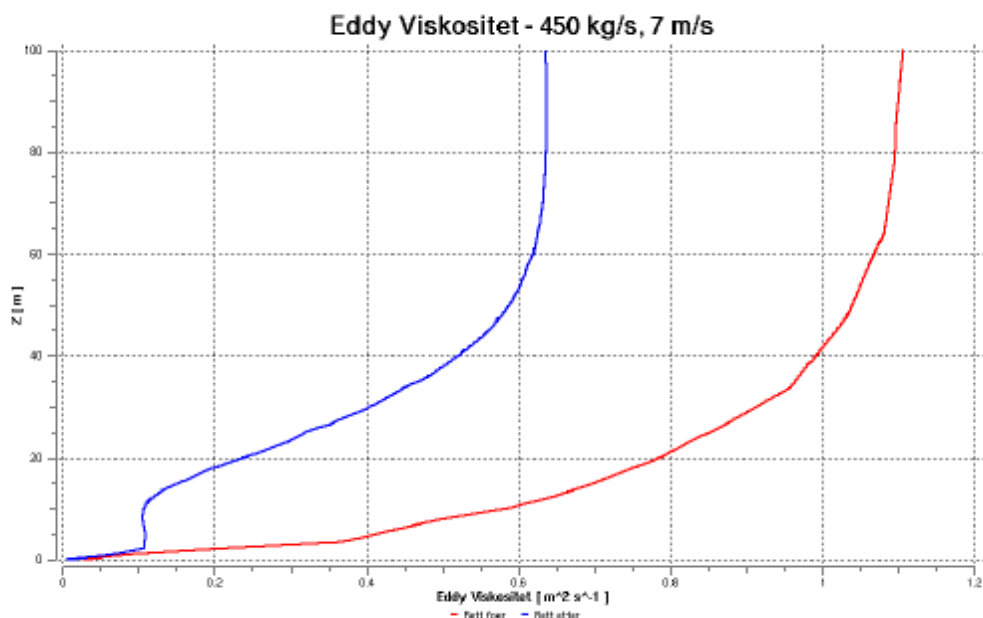
Figur 6.4 Case 1 – Hastighetsprofil over havoverflaten rett før (rød linje) og rett etter (blå linje) utslippsområdet.

6.2 Case 2 – 450 kg/s – Vind 7 m/s

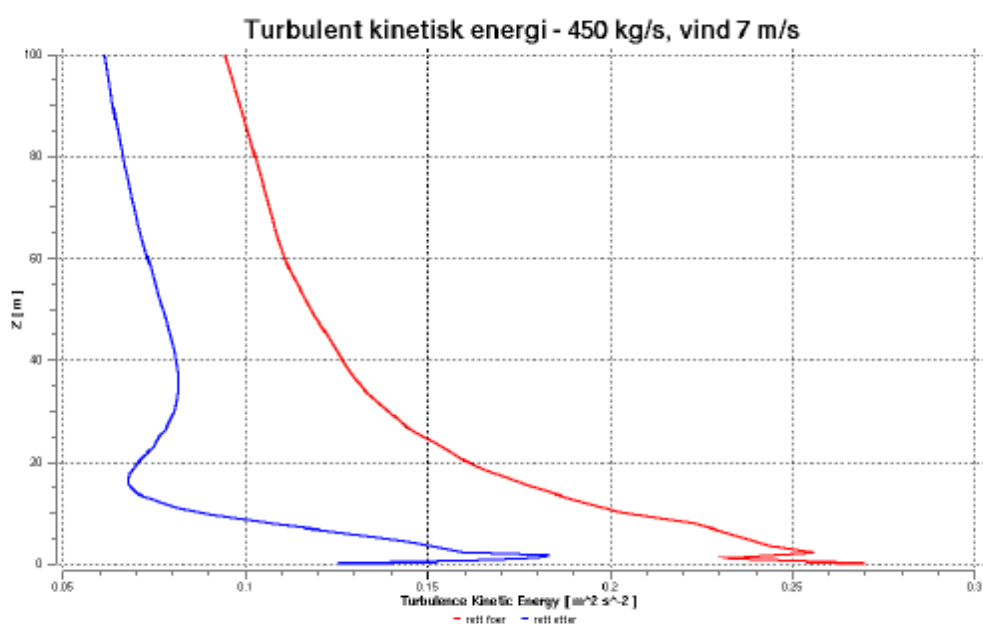
Figur 6.5 viser vertikalt og horisontalt 3D-plott av en gass-sky som følge av et 450 kg/s gassutslipp med vindhastighet på 7 m/s.



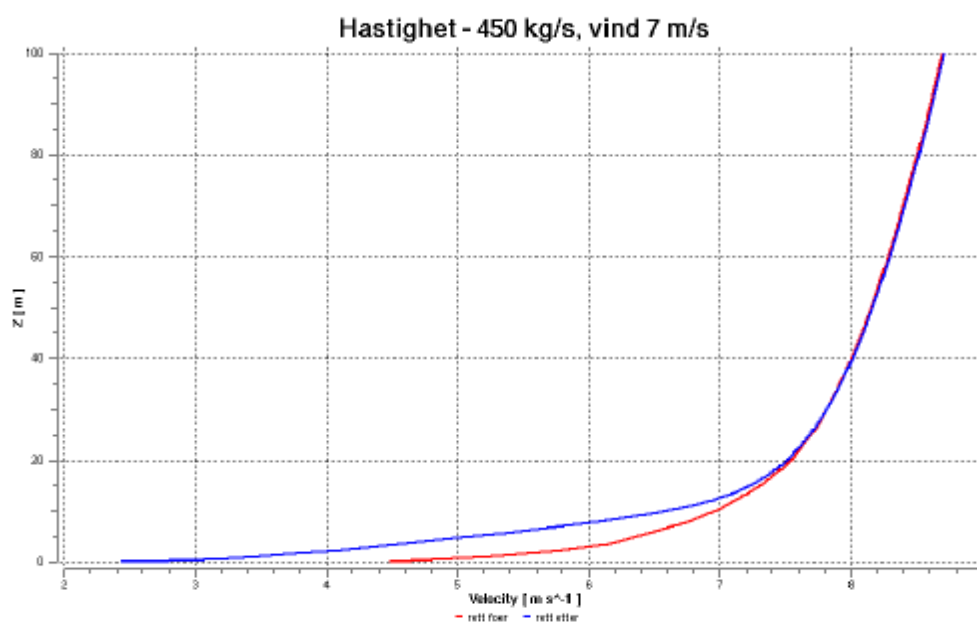
Figur 6.5 450 kg/s stasjonært gassutslipp med vind på 7 m/s. Iso-overflate for 100% LFL (rød) og 50% LFL (rosa). Avstand mellom svarte linjer er 20 meter i øverste figur (vertikalt) og 100 m i nederste figur (horisontalt).



Figur 6.6 Case 2 - Eddy viskositet over havoverflaten rett før (rød linje) og rett etter (blå linje) utslippsområdet.



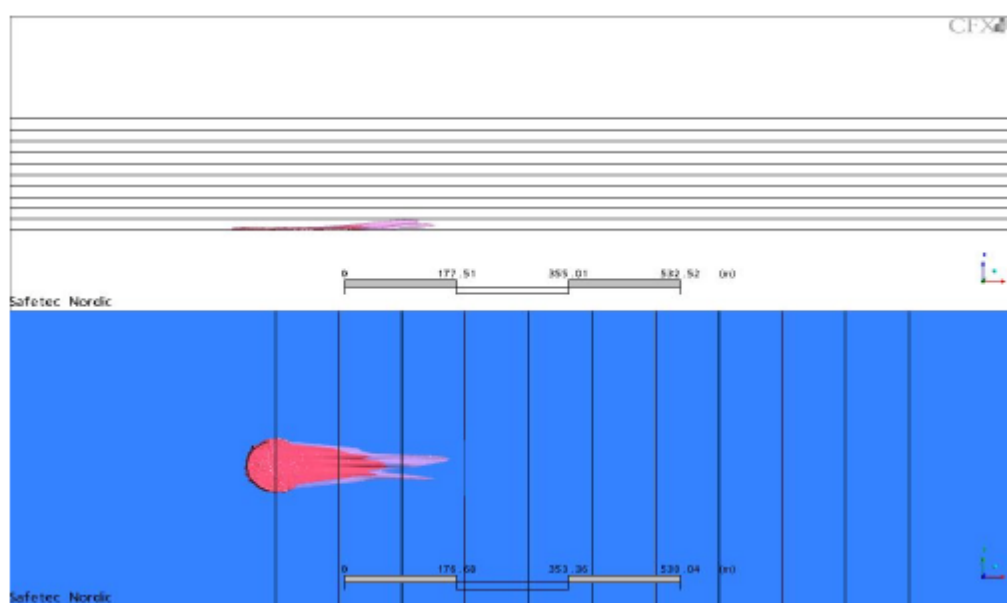
Figur 6.7 Case 2 – Turbulent kinetisk energi over havoverflaten rett før (rød linje) og rett etter (blå linje) utslippsområdet.



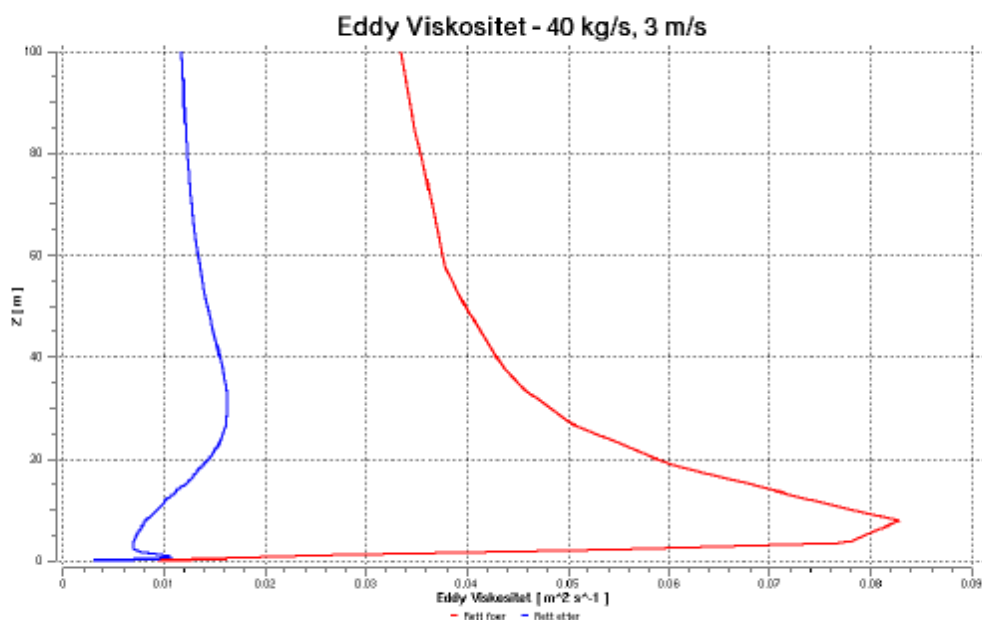
Figur 6.8 Case 2 – Hastighetsprofil over havoverflaten rett før (rød linje) og rett etter (blå linje) utslippsområdet.

6.3 Case 3 – 40 kg/s – Vind 3 m/s

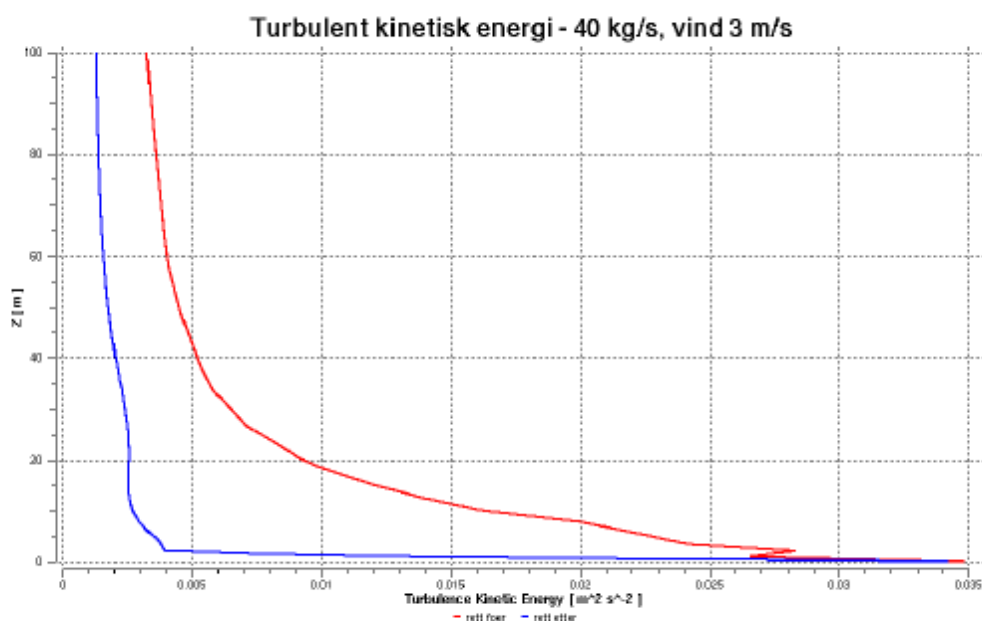
Figur 6.9 viser vertikalt og horisontalt 3D-plott av en gass-sky som følge av et 40 kg/s gassutslipp med vindhastighet på 3 m/s.



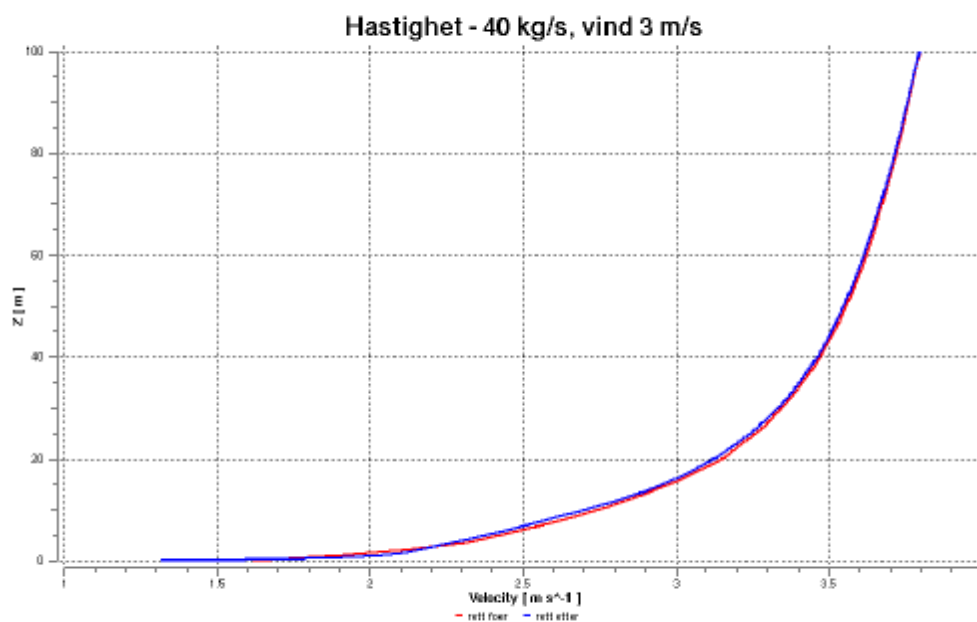
Figur 6.9 40 kg/s stasjonært gassutslipp med vind på 3 m/s. Iso-overflate for 100% LFL (rød) og 50% LFL (rosa). Avstand mellom svarte linjer er 20 meter i øverste figur (vertikalt) og 100 m i nederste figur (horisontalt).



Figur 6.10 Case 3 - Eddy viskositet over havoverflaten rett før (rød linje) og rett etter (blå linje) utslippsområdet.



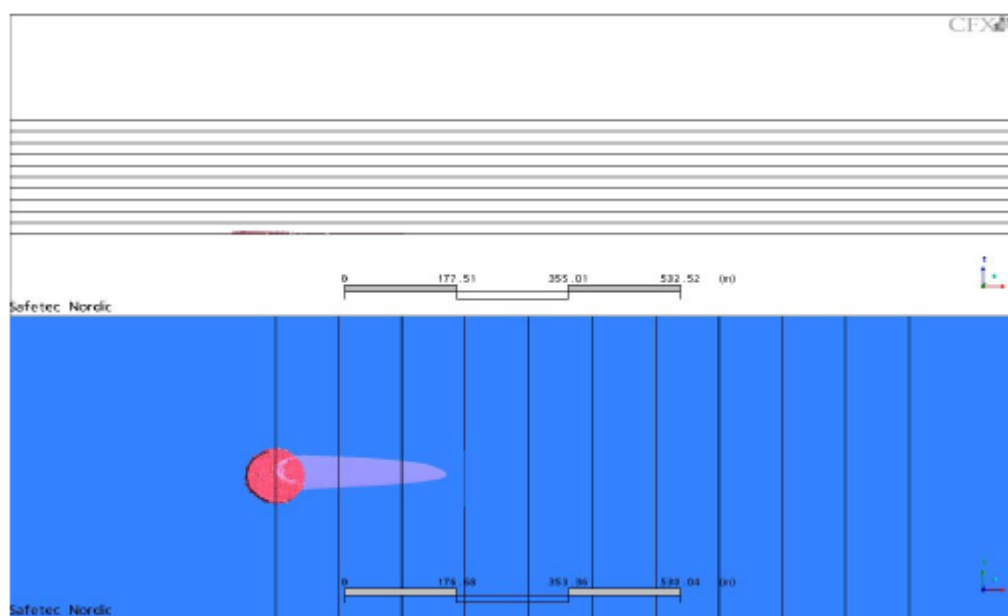
Figur 6.11 Case 3 - Turbulent kinetisk energi over havoverflaten rett før (rød linje) og rett etter (blå linje) utslippsområdet



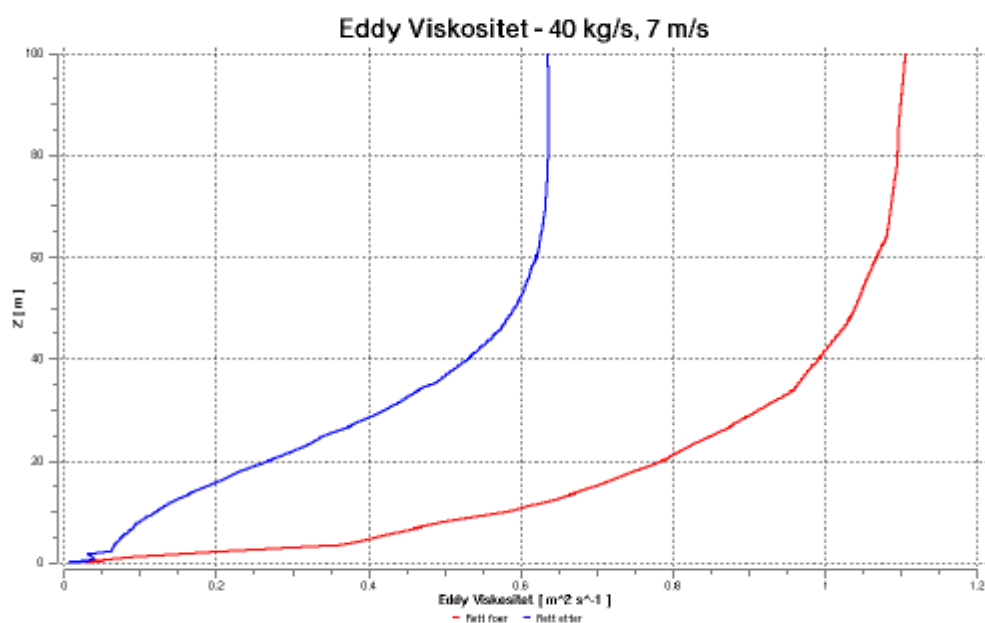
Figur 6.12 Case 3 – Hastighetsprofil over havoverflaten rett for (rød linje) og rett etter (blå linje) utslippsområdet.

6.4 Case 3 – 40 kg/s – Vind 7 m/s

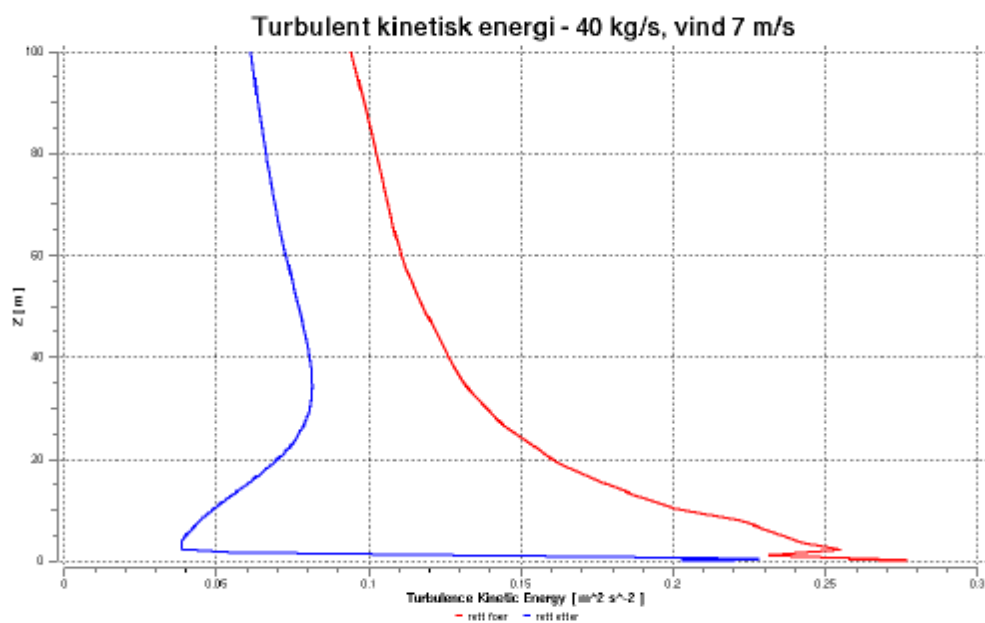
Figur 6.13 viser vertikalt og horisontalt 3D-plott av en gass-sky som følge av et 40 kg/s gassutslipp med vindhastighet på 7 m/s.



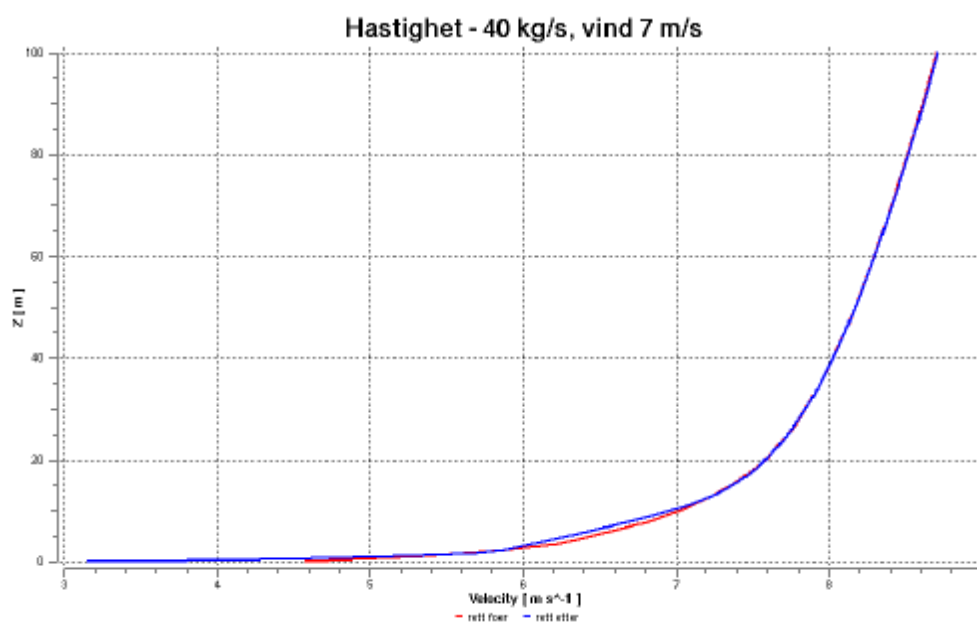
Figur 6.13 40 kg/s stasjonært gassutslipp med vind på 7 m/s. Iso-overflate for 100% LFL (rød) og 50% LFL (rosa). Avstand mellom svarte linjer er 20 meter i øverste figur (vertikalt) og 100 m i nederste figur (horisontalt).



Figur 6.14 Case 4 - Eddy viskositet over havoverflaten rett før (rød linje) og rett etter (blå linje) utslippsområdet.



Figur 6.15 Case 4 - Turbulent kinetisk energi over havoverflaten rett før (rød linje) og rett etter (blå linje) utslippsområdet



Figur 6.16 Case 4 – Hastighetsprofil over havoverflaten rett før (rød linje) og rett etter (blå linje) utslippsområdet.

6.5 Oppsummering av resultater

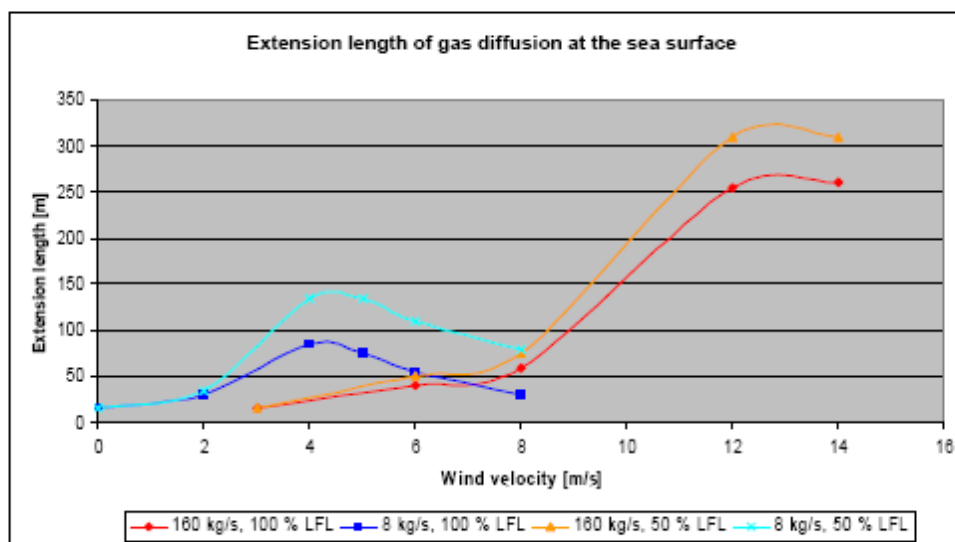
Ustrekning til gass-skyen for de 4 simulerte case er oppsummert i Tabell 6.1, for gasskonsentrasjon på 100%, 50% og 10% av LFL. Projisert avstand betyr maksimal ustrekning uavhengig av høyden på gass-skyen. Ustrekning på overflaten er lengden på gass-skyen langs overflaten.

Tabell 6.1 Ustrekning av gass over havoverflaten for 4 simulerte case i fase 2. Ustrekning er gitt for gass-konsentrasjon på 100 % LFL, 50 % LFL og 10 % LFL.

Casenr.	Ustrekning på gass sky (m)							
	LFL (4.4 vol%)		50% LFL		10% LFL		Stok. (9 vol%)	
	Projisert	Overflate	Projisert	Overflate	Projisert	Overflate	Projisert	Overflate
1	450 (høyde 60m)	100	700 (høyde 80m)	100	1100 (høyde 140m)	250	180 (høyde 50m)	80
2	500 (høyde 50m)	270	700 (høyde 70m)	340	1200 (høyde 120m)	600	320 (høyde 30m)	180
3	150 (høyde 10m)	160	250 (høyde 15m)	210	600 (høyde 50m)	290	110 (høyde <1m)	110
4	50 (høyde <1m)	50	250 (høyde <1m)	250	950 (høyde 10m)	950	50 (høyde <1m)	50

Som det fremkommer av tabellen vil gassens ustrekning øke med økt vindhastighet inntil vindhastigheten er tilstrekkelig stor til å tynne ut gassen ved videre økning i vindhastigheten. For utslippet på 40 kg/s er maksimal projisert ustrekning på tennbar gass mindre ved en vindhastighet på 3 m/s enn ved 7 m/s. Dette viser at for hver utslippsrate eksisterer det en maksimal ustrekning ved en gitt vindhastighet. Dette er grafisk fremstilt i Figur 6.17 hvor gassens utsterkning over havoverflaten er gitt som funksjon av vindhastigheten.

Figuren viser ustrekning til to ulike simulerte gassutslipp på havoverflaten, en med stasjonær utslippsrate på 8 kg/s og en med stasjonær utslippsrate på 160 kg/s. Forløpet vil være det samme for andre utslippsrater, men maksimal ustrekning vil inntreffe ved ulike vindhastigheter. Som vist fra figuren inntreffer maksimal ustrekning for et utslipp på 160 kg/s ved omtrent 13 m/s. Maksimal ustrekning for et utslipp på 450 kg/s vil derfor være betydelig lenger enn hva som er gitt i tabellen ovenfor ved vindhastighet på 7 m/s, og vil inntreffe ved en vindhastighet på over 13 m/s.



Figur 6.17 Utstrekning til et gassutslipp på havoverflaten presentert for gasskonsentrasjon på 100% LFL og 50% LFL som funksjon av vindhastighet.

7 SENSITIVITETER

7.1 Turbulensintensitet

Etter fase 2 av studiet ble det observert til dels store avvik på gassens utstrekning over havoverflaten mellom de ulike konsultentselskapene (Safetec, Scandpower, Lilleaker, DNV) som simulerte de spesifiserte utslipps scenarier. Det ble foreslått å undersøke om avvikene skyldes graden av turbulens i beregningsdomenet, og i denne forbindelse har Safetec gjennomført en simulering med økt turbulensintensitet.

Graden av turbulens kan uttrykkes som Eddy Viskositet som er en funksjon av blant annet avstanden fra havoverflaten og overflateruheten. Eddy viskositeten vil alltid være direkte proporsjonal med overflateruheten. I et upåvirket atmosfærisk grensesjikt vil eddy viskositeten også være proporsjonal med avstanden fra havoverflaten. Eddy viskositeten vil i tillegg påvirkes av utslippet på havoverflaten.

For alle simuleringer er følgende definert i modellen:

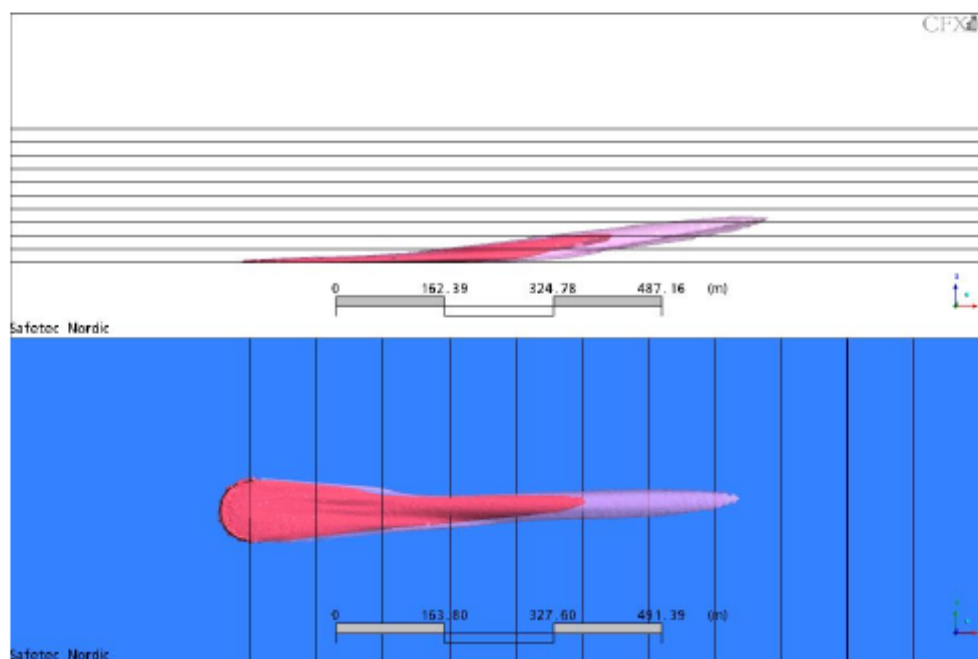
- Det er satt et vindprofil, pasquill klasse D, på innløpet av beregningsdomenet.
- Det er satt en turbulensintensitet på innløpet og på utslippsområdet ved å definere en overflateruhet på 0.001 m.

Som en sensitivitet er det gjennomført en simulering med økt grad av turbulens ved å øke overflateruheten til 0.003 m for utslippet med en utslippsrate på 450 kg/s og vindhastighet på 7 m/s. Resultatet fra simuleringen er vist i Figur 7.1 hvor gass-skyen er presentert med en iso-overflate på 100% LFL og 50% LFL.

En oversikt over utstrekning på gass-skyen er gitt i Tabell 7.1, hvor det også er lagt inn resultater fra simuleringene med opprinnelig overflateruhet på 0.001. En endring i overflateruheten fra 0.001 m til 0.003 m viser seg å medføre neglisjerbare endringer i utstrekning for scenario 2.

Eddy viskositeten rett før og rett etter utslippet, 1 meter og 50 meter over overflaten, er også gitt i tabellen. Dette viser en liten økning i eddy viskositeten som følge av en økning i overflateruheten.

I hvor stor grad endring i overflateruheten, det vil si endring i graden av turbulens, vil ha på resultatene vil være avhengig av hvilke utslipps og vindscenario man vurderer. For å kunne konkludere i hvor stor grad endring i overflateruheten har på resultatene vil det være behov for å simulere med flere ulike overflateruheter for hver av de enkelte scenarier. Dette er ikke gjennomført i denne omgang.



Figur 7.1 450 kg/s stasjonært gassutslipp med vind på 7 m/s. Iso-overflate for 100% LFL (rød) og 50% LFL (rosa). Avstand mellom svarte linjer er 20 meter i øverste figur (vertikalt) og 100 m i nederste figur (horisontalt). Overflateruhet på 0.003 m.

Tabell 7.1 Utstrekning av gass over havoverflaten for 4 simulerte case i fase 2 med informasjon om eddy viskositet oppvind og nedvind utslippet. For scenario 2 er resultater med to ulike overflateruheter gitt.

Casenr.	Overflate- ruhet	Utslekning på gass sky (m)							
		100% LFL Projisert	50% LFL Projisert	10% LFL Projisert	Stok. (9 vol%) Projisert	Eddy viskositet oppvind lekkasjen (m/s ²)		Eddy viskositet nedvind lekkasjen (m/s ²)	
						Z = 1m	Z = 50m	Z = 1m	Z = 50m
1	0.001 m	450 (høyde 60m)	700 (høyde 80m)	1100 (høyde 140m)	180 (høyde 50m)	0.027	0.040	0.018	0.009
2	0.001 m	500 (høyde 50m)	700 (høyde 70m)	1200 (høyde 120m)	320 (høyde 30m)	0.091	1.040	0.072	0.586
2	0.003 m	500 (høyde 50m)	700 (høyde 70m)	1200 (høyde 120m)	320 (høyde 30m)	0.099	1.380	0.086	0.808
3	0.001 m	150 (høyde 10m)	250 (høyde 15m)	600 (høyde 50m)	110 (høyde <1m)	0.027	0.040	0.009	0.014
4	0.001 m	50 (høyde <1m)	250 (høyde <1m)	950 (høyde 10m)	50 (høyde <1m)	0.090	1.040	0.036	0.591

7.2 Gridoppløsning

Alle simuleringene er i utgangspunktet gjennomført med en forholdsvis høy gridoppløsning på 2.7 millioner delvolumer. En simulering tok med dette typisk 20-24 timer. I CFX benyttes et variabelt grid bestående av tetrahedrer hvor gridet er finest i utslippspunktet og følger utslippets utstrekning. For å undersøke i hvor stor grad simuleringene er avhengig av gridoppløsningen er det valgt å simulere scenario nr. 1 (450 kg/s, vind 3 m/s) og scenario nr. 2 (450 kg/s, vind 7 m/s) for et grovere grid på omtrent 400 000 delvolumer.

En oversikt over utstrekningen til gass-skyen er gitt i Tabell 7.2, hvor også resultatene med opprinnelig gridoppløsning er lagt inn.

De største endringene i resultatene som følge av en reduksjon i gridoppløsningen observeres for scenario 1 med vindhastighet på 3 m/s. Gass-skyens utstrekning reduseres betydelig. Med fin gridoppløsning deles gassskyens form opp i to 'haler' nedvinds. I tilfellet med grovere grid deles ikke gass-skyen opp og gassens utstrekning reduseres.

Dette viser at med en for grov gridoppløsning kan man 'miste' informasjon om hvordan gass-skyen utvikler seg og gass-skyens utstrekning kan feilestimeres.

Tabell 7.2 Utstrekning av gass over havoverflaten for scenario 1 (450 kg/s, vind 3 m/s) og scenario 2 (450 kg/s, vind 7 m/s) ved en reduksjon i gridoppløsningen.

Casenr.	Grid-oppløsning	Utslekning på gass sky (m)							
		LFL (4.4 vol%)		50% LFL		10% LFL		Stok. (9 vol%)	
		Projisert	Overflate	Projisert	Overflate	Projisert	Overflate	Projisert	Overflate
1	2.7 mill.	450 (høyde 60m)	100	700 (høyde 80m)	100	1100 (høyde 140m)	250	180 (høyde 50m)	80
1	0.4 mill.	230 (høyde 80m)	100	320 (høyde 120m)	100	950 (høyde 240m)	100	120 (høyde 50m)	80
2	2.7 mill.	500 (høyde 50m)	270	700 (høyde 70m)	340	1200 (høyde 120m)	600	320 (høyde 30m)	180
2	0.4 mill.	400 (høyde 70m)	100	700 (høyde 110m)	100	1100 (høyde 190m)	200	200 (høyde 40m)	80

8 KONKLUSJONER OG DISKUSJONER

Safetec Nordic presenterer i dette notatet metoden selskapet benytter når man studerer spredning av gass på og over havoverflaten som følge av undersjøiske gassutslipp. Studiet er gjennomført i to faser. I første fase ble lekkasjeprofiler på havbunnen gitt og basert på dette ble betingelsene på havoverflaten analytisk beregnet for så å gjennomføre simulering av gassspredningen på havoverflaten for ulike vindscenarier. I andre fase ble det fokusert på å simulere gassspredning over havoverflaten hvor grensebetingelsene på havoverflaten som pøldiameter, konsentrasjon og masserate var gitt som input.

Fase 1

Metoden innebærer at man tar utgangspunkt i Fanneløps plumespredningsmodeller, gjør en antagelse om at konsentrasjonen av gass innenfor pøldiameteren er 1 og at man eventuelt korrigerer pool-diameteren ved store utslipp på grunt vann ved å anta maksimal slipphastighet på 2 m/s. Den videre gassspredningsberegningen gjøres ved hjelp av CFD-programmet CFX-10.

Simuleringene viser at ved store transiente utslipp på grunt vann, tilsvarende fullt brudd på en gassseksportledning, vil brennbar sky kunne bre seg over 1000 meter nedvinds på sjøoverflaten. Ved lave vindhastigheter vil den brennbare delen av gasskyen stige mer enn 200 meter. Størst horisontal spredning inntreffer ved høy vindhastighet (15 m/s).

Simuleringene viser at ved mindre stasjonære utslipp (50 kg/s) vil størst utstrekning inntreffe ved lav vindhastighet. I dette tilfellet vil den brennbare delen av skyen kunne bre seg 150 meter nedvinds utslippet. Tilsvarende vil maksimal høyde på brennbar sky være 40 meter for lav vindhastighet.

Fase 2

Med gitte grensebetingelser på havoverflaten ble stasjonær gassspredning på havoverflaten simulert for to ulike utslippsrater og med to ulike vindhastigheter. Simuleringene viser at gass-skyens utstrekning øker med vindhastigheten inntil en maksimal utstrekning inntreffer, hvor videre økning i vindhastigheten medfører at gass-skyen tynnes ut og utstrekningen reduseres. En økning i utslippsrate vil følgelig gi lengre utstrekning, men forlengelsen av gass-skyen er ikke lineær med økningen i utslippsrate.

I tillegg er det undersøkt effekten av å endre overflateruheten på havoverflaten, dvs. bølgehøyden, som igjen påvirker turbulensintensiteten over havoverflaten. Det er gjennomført en simulering med høyere overflateruhet for et av scenarioene. Det vil være behov for flere simuleringer for å konkludere i hvor stor grad overflateruheten påvirker resultatene.

Gridavhengighet er undersøkt ved å simulere et case med lavere gridoppløsning enn utgangspunktet. Gridoppløsningen er redusert fra 2.7 millioner til 0.4 millioner delvolumer for to av scenarioene. Resultatene viser at en for grov gridoppløsning vil kunne medføre at informasjon om hvordan gass-skyen faktisk utvikler seg 'mistes', og gass-skyens utstrekning vil kunne feilestimeres.

Alle simulerte scenarier viser at profilene for turbulensintensitet, turbulent kinetisk energi og middelhastighet samsvarer godt med typiske atmosfæriske grensesjiktprofiler over hav. Simuleringene viser også at et utslipp av gass fra overflaten i stor grad demper turbulensintensiteten og turbulent kinetisk energi nedvinds utslippet, spesielt i nærheten av havoverflaten. For store utslipp vil også middelhastigheten reduseres betydelig nær havoverflaten, mens for mindre utslipp og høye vindhastigheter vil hastighetsreduksjonen være mindre.

Det understrekes videre at dersom det befinner seg større legemer på havoverflaten (plattformer/ båter) vil spredningsforløpet påvirkes betydelig.

9 REFERANSER

- 1 Testcase utslippsrate – Brudd Statpipe.xls. Email fra Odd J. Tveit (Statoil) til Jan Dahlsveen (Safetec), 25.06.2006.
- 2 CFX-ANSYS website. www.ansys.com/cfx
- 3 SINTEF. Øistein Johansen. *Regional konsekvensutredning, Norskehavet underlagsrapport: Dypvannsutslipp – Oppdatering av kunnskapsstatus*. STF66 F02046. 2002-03-22.
- 4 Torstein K. Fanneløp, Karl Sjøen. *Hydrodynamics of underwater blowouts*. Norwegian Maritime Research, No.4, 1980.
- 5 J.Milgram and R. J. Van Houten. Plumes from subsea blowouts.

Vedlegg 4 Bidrag fra Lilleaker

Summary of simulations for eRoom – 15th June 2007

Simulated cases

Uniform utslipp fra en sirkelflate med 90 m diameter.

Gass med molekylvekt 22

Temperatur på gass 278 K

lufttemperatur 278 K

Ingen bølger

ingen øvrig geometri

Nøytralt vindprofil (Pasquill klasse D over hav)

Gassen slippes ut med konsentrasjon 1. og med hastighet som gitt av kontinuitetsligningen.

Case (i prioritert rekkefølge):

1: Massestrom gass 450 kg/s, vind 3 m/s

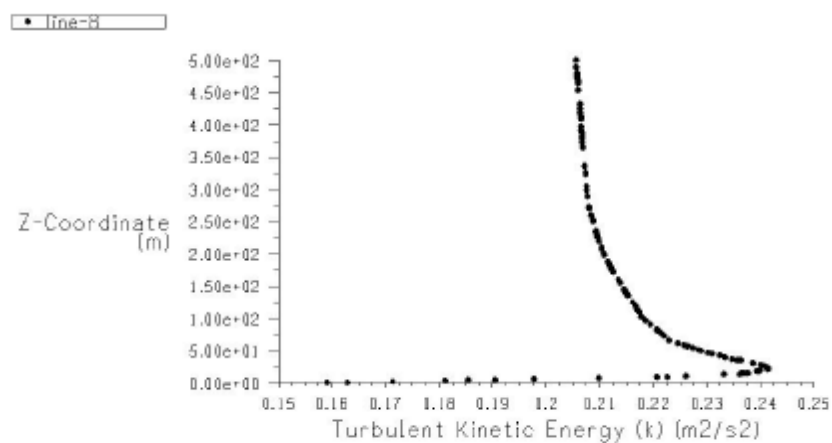
2: Massestrom gass 450 kg/s, vind 7 m/s

3: Massestrom gass 40 kg/s, vind 3 m/s

4: Massestrom gass 40 kg/s, vind 7 m/s

Tabulated results

Case no.:	Rate [kg/s]	Wind [m/s]	Horizontal distance to concentration [m]			
			10% LEL (0.44%)	50% LEL (2.2%)	LEL (4.4%)	Stoichiometric (9%)
Case 1	450	3	> 600 (height >235 m)	260 (height 100 m)	190 (height 70 m)	140 (height 50 m)
Case 2	450	7	>> 600	> 600	440	120
Case 3	40	3	> 600	300	65	Within release area
Case 4	40	7	> 600	75	55	Within release area

Turbulence profileProfile of turbulent energy – leak location – $U_{10} = 7$ m/s

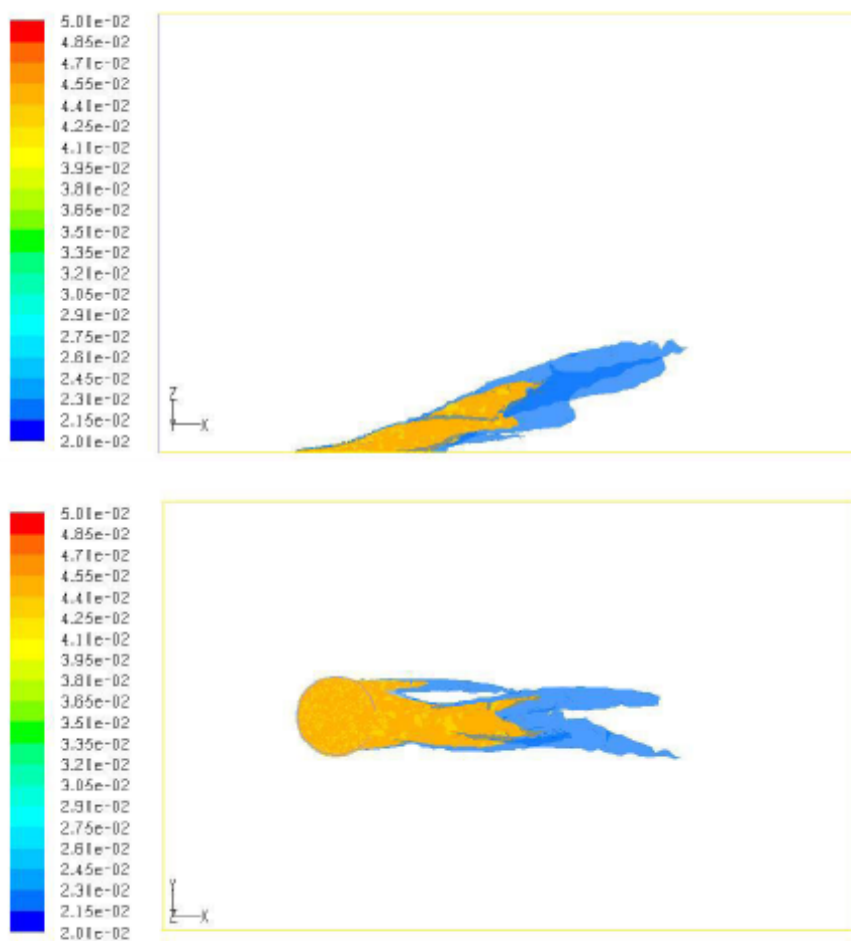
Z-Coordinate vs. Turbulent Kinetic Energy (k)

Jun 14, 2007
FLUENT 6.3 (3d, pbns, stel)

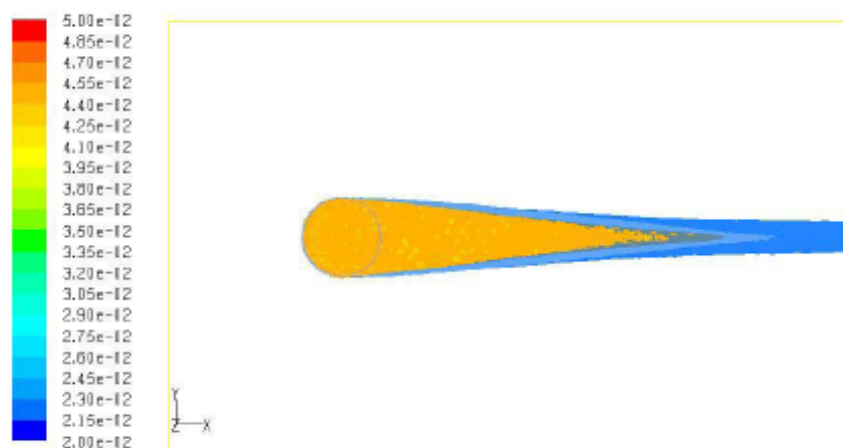
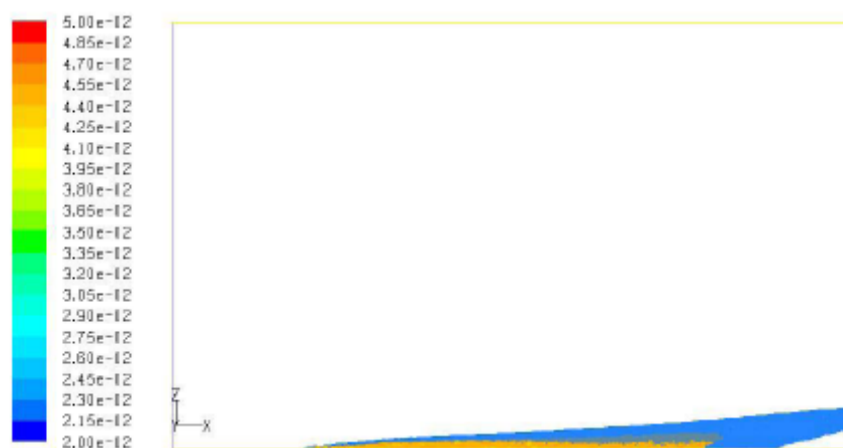
Plots

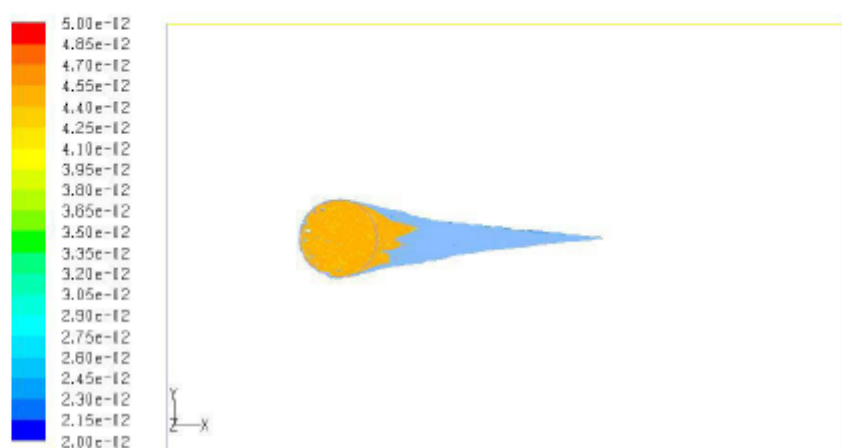
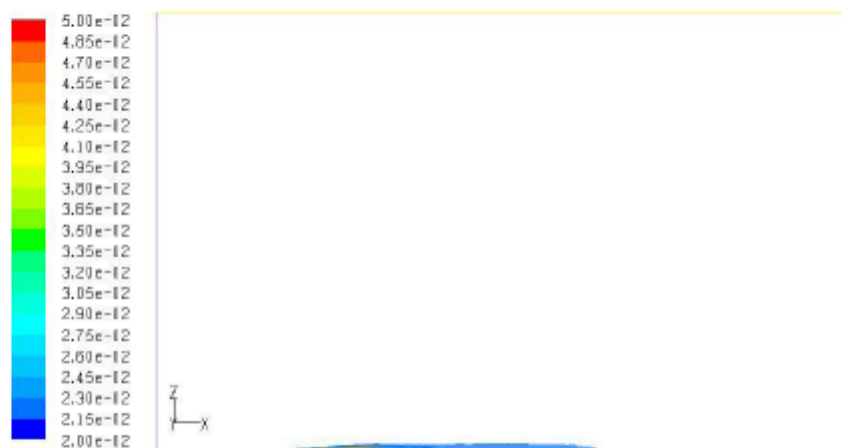
The area extends from $x=-200$ to $x=600$. The release is in location $x=0$

Case 1 – 50%LEL = blue cloud, LEL = yellow cloud



Case 2 – 50%LEL = blue cloud, LEL = yellow cloud



Case 3 – 50%LEL = blue cloud, LEL = yellow cloud

Case 4 – 50%LEL = blue cloud, LEL = yellow cloud