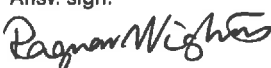


N - 7034 Trondheim

Telefon: (07) 59 30 00
Telex: 55 620 SINTF N
Telefax: (07) 59 24 80

Rapportens tittel BEREGNING AV RØYKSPREDNING VED BRANNEN I SCANDINAVIAN STAR	Dato 1991-06-20
	Antall sider og bilag 73
Saksbehandler/forfatter Ragnar Wighus, Jan Arne Fagertun	Ansv. sign. 
Avdeling Norges branntekniske laboratorium	Prosjektnummer 251568
ISBN nr.	Prisgruppe

Oppdragsgiver Det Skandinaviske Granskningsutvalg og Oslo Politikammer	Oppdr.givers ref. T.Schei N.Bjønness
--	--

Ekstrakt

Ved hjelp av beregningsprogrammet KAMELEON II er det gjennomført simulering av røykspredning i akterskipet på Scandinavian Star fra det tidpunkt startbrannen antente veggkledningen i korridor på bildekk.Tidsrommet som er simulert dekker den mest kritiske fasen i spredningen av røyk, og røykspredning er simulert med og uten lukking av branndører i denne fasen. Beregningen tar utgangspunkt i resultater fra fullskalaforsøket utført i laboratoriet ved NBL, og fra undersøkelsen av ventilasjonsanleggets funksjon i den tidlige fasen av brannen.Resultatene er presentert som tidsutvikling for temperatur, CO-konsentrasjon og HCN-konsentrasjon i de korridorer som ble berørt av røyk i tidlig brannfase. Kritisk oppholdstid for mennesker er beregnet ut ifra dose giftig gass og temperatur. En vurdering av røykspredning til lugarene er også foretatt.

	Stikkord på norsk	Indexing Terms: English
Gruppe 1	brann	fire
Gruppe 2	skip	ship
Egenvalgte stikkord	røykspredning	smoke dispersion
	ulykkesetterforskning	accident investigation


Kjell Schmidt Pedersen
Direktør

BEREGNING AV RØYKSPREDNING VED BRANNEN I SCANDINAVIAN STAR.

Innhold:

1.	FORUTSETNINGER	1
2.	BEREGNINGER	4
2.1	Beregningsmetode	4
2.2	Utførte beregninger	5
3.	RESULTATER	6
3.1	Sammenfatning av resultater fra beregninger	41
3.2	Røykinntrengning i lugarer	42
4.	DISKUSJON AV RESULTATER	44
4.1	Temperaturutvikling	44
4.2	Konsentrasjon av CO	44
4.3	Konsentrasjon av HCN	45
5.	KONKLUSJONER	46
5.1	Strømningsbildet	46
5.2	Temperaturforløp	46
5.3	Tid til kritisk tilstand	46
6.	REFERANSER	50
VEDLEGG A	FORUTSETNINGER FOR BRANNSPREDNING	51
A1	Forutsetninger for brannspredning til trappeløp	51
A2	Nødvendig luftmengde for å få overtenning i korridor og brannspredning til trappeløp	51
A3	Effektutvikling i trappeløp avhengig av lufttilførsel	52
VEDLEGG B	BEREGNING AV VARMEBALANSER	53
B1	Varmebalanse basert på forbrenningsdata for materialer	53
B2	Varmebalanse basert på oksygenforbruk i fullskala-forsøket	53
B3	Varmeutvikling basert på luft tilført modellen	54
B4	Varmetap til modellen og omgivelsene	54
VEDLEGG C	MÅL FOR SEKSJONENE SOM ER SIMULERT, DATA FOR VENTILASJONSANLEGGETS DRIFT, OG BEREGNING AV KRITISKE TILSTANDER	57
C1	Planskisse for beregning av røykspredning	58
C2	Snitt ved trappeløp ned fra Broadway Lounge	59
C3	Ventilasjon av brannområdet (akterdelen av skipet, aktenfor resepsjonen) før branndører stenges	60
C4	Ventilasjon av brannområdet (akterdelen av skipet, aktenfor resepsjonen) etter stenging av branndører	61
C5	Tidspunkter for endring av strømningsforhold	62
C6	Effektutvikling	62
C7	Lokalisering av brannen	63
C8	Konsentrasjon av giftige gasser og oksygen	63
C9	Fastlegging av kritisk dose for giftige gasser	65

C10	Spredningsveier for røyk og luftstrømmer uten lukking av branndører	67
C11	Spredningsveier for røyk og luftstrømmer når noen branndører blir lukket	69
VEDLEGG D RØYKINNTRENGNING I LUGARER		71
D1	Trykkdifferanser på grunn av ventilasjon	71
D2	Trykkdifferanser på grunn av varme gasser	71
D3	Røykinntrengning i lugarer når ventilasjonsanlegget er stanset	72

1. FORUTSETNINGER.

Beregning av røykspredning i akterseksjonen av skipet er gjennomført for å fastlegge hvor raskt det oppstod kritisk tilstand for opphold i korridorer og lugarer i de områder på skipet som var involvert i brannens kritiske fase. Kritisk tilstand er karakterisert ved den mengde giftig gass en person som oppholder seg i røykfylt rom vil få i seg, hvor langt vedkommende kan se gjennom røyken, og hvor varmt det er.

Røykspredning fra brannsonen er fastlagt på bakgrunn av granskningen av ventilasjonsanlegget /1/ og fullskalaforsøket med brann i korridor og trappeløp/2/.

En vurdering av forutsetninger for brannspredning fra korridor til trappeløp, nødvendig lufttilførsel for å oppnå overtenning i korridor og for effektutvikling i trappeløpet er foretatt på bakgrunn av fullskalaforsøkene, og er beskrevet i Vedlegg A. For å forenkle beregningen er det bare simulert røykspredning i korridorer og trappeløp, og opp i Broadway Lounge på Main dekk. Denne forenklingen innebærer at luftvolumet i lugarer ikke tas med i beregningen. I den tidlige fasen var ventilasjonsanlegget igang på lugarene, og derfor er det små røykmengder som kan trenge inn der. Denne forenklingen gir ikke vesentlige avvik i resultatene.

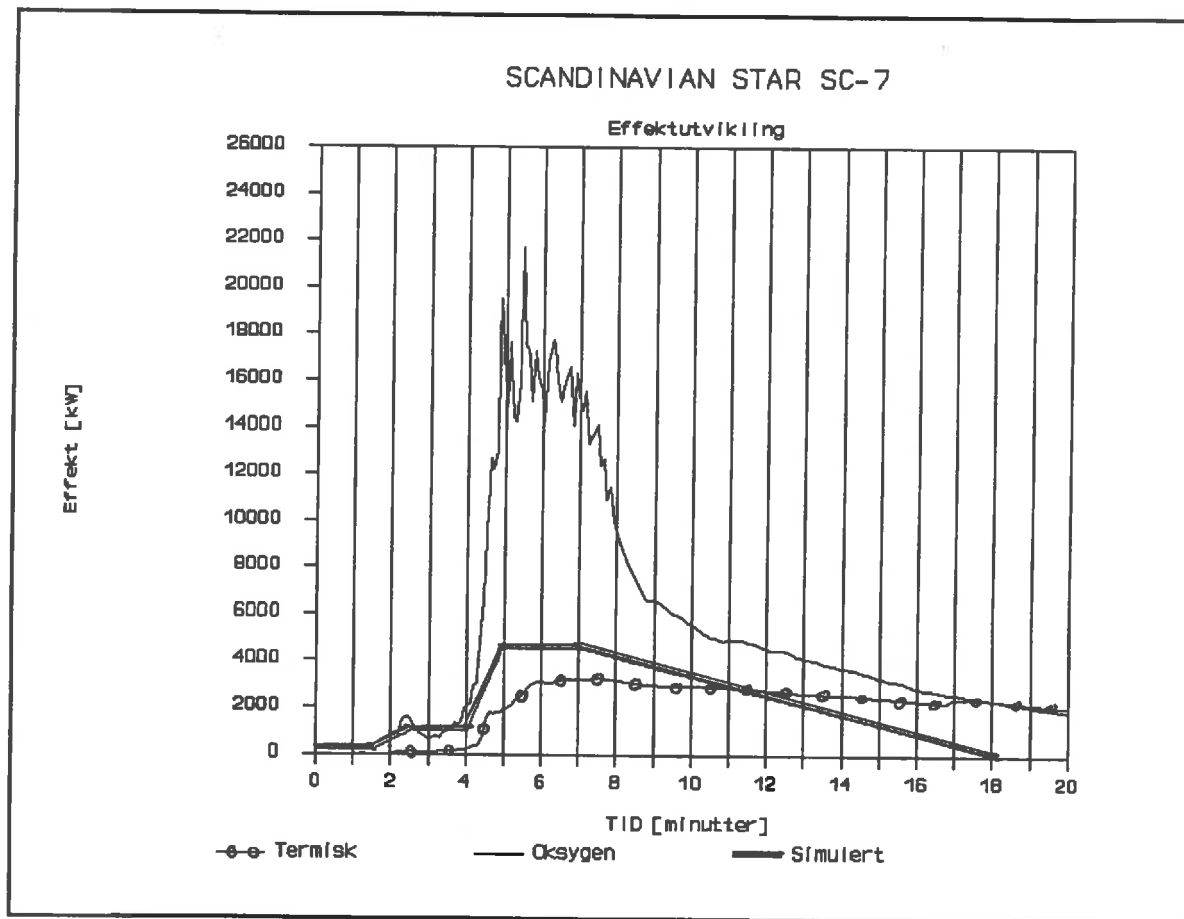
Ytterligere begrenses beregningen til akterenden av skipet. Røykspredning til områder midtskips og forut forutsettes ubetydelig i første del av brannen. Endel luft har blitt tilført akterskipet fra disse områdene på grunn av undertrykk skapt av avsuget til biloppstillingsplassen på bildekket. Dette er ivaretatt i beregningene ved ekstra luft tilført resepsjonsområdet og trappeløpene nedover på begge sider ved resepsjonen. Disse områdene forutsettes å stå i åpen forbindelse med hverandre via åpne dører, korridorer, trappeløp eller utettheter.

For å dekke opp den avsugsmengden som tilsvarende ventilasjonsanleggets kapasitet er det i beregningene også forutsatt luftlekkasjer inn til akterskipet via utette dører mot det fri. Lekkasje er i beregningen lagt inn via dører mot det fri på toppen av de akterste trappeløpene, via spalter og lekkasjer i glassdørene i Broadway Lounge, og via ventilasjonskanal som skulle tilført luft til Broadway Lounge. Denne kanalen forutsettes å ha vært åpen, idet viften som skulle stått der var ute av drift. I tillegg til de relativt store luftmengdene som er tilført utenfra og fra områder forut, er det forutsatt at lugarventilasjonen har tilført overskuddsluft til korridorene.

Det er i første rekke ventilasjonsanlegget som påvirker spredningsmønsteret i den første fasen av brannen før oppdriften i varm røyk overtar som drivkraft. Avsuget gjennom en åpen dør

til biloppstillingsplassen på bildekket har vært dominerende så lenge ventilasjonsanlegget der har vært i drift.

Brannforløpet som er simulert i beregningene har utgangspunkt i forsøk SC-7 i fullskalaforøkene. Tennkilden var 200 kW, plassert et stykke inne i styrbord korridor på bildekk, aktenfor trappeløpet opp til Broadway Lounge. Effektforløpet er vist i figur 1.



Figur 1 Effektutvikling basert på ulike forutsetninger.

Den øverste kurven viser effektutviklingen ved selve brannen, og er funnet ved å måle oksygenmengden som er gått med under fullskalaforøket. Denne effekten samsvarer med den mengden brennbart materiale som er forbrent.

Den laveste kurven viser effekten som går ut av trappeløpet som varm røyk, og er beregnet som en varmemulanse for luften som tilføres modellen. Denne effekten er vesentlig lavere i starten av brannen, noe som skyldes at en stor del av effekten går med til å varme opp selve modellen. Noe av denne varmen lagres i

vegger, tak og trapper, og noe ledes ut til forsøkshallen. Den lagrede varmen avgis til tilført luft seinere i forløpet.

Den midterste kurven viser det effektforløpet som er lagt inn ved beregning av brannforløpet. Dette er tilpasset slik at temperaturen på røyken som strømmer ut av brannsonen samsvarer med det som er målt. Endring i effekten er i beregningene gjennomført i løpet av 1 minutt, med jevn opp- eller nedtrapping av effekten. Dette er nødvendig for å få stabile beregninger.

En varmebalanse for hele brannforløpet viser hvor stort avvik de forskjellige betraktningsmåtene gir. Dette er vist i tabell I.

En detaljert oversikt over varmebalanser for modellen er vist i Vedlegg B.

Tabell I Varmeutvikling i løpet av hele forsøk SC-7, målt og beregnet på forskjellige måter.

VARMEUTVIKLING VED TOTAL UTBRENNING AV KORRIDOR OG TRAPPESJAKT [MJ]		
Teoretisk basert på brennverdi for overflatematerialet:	8 889	100%
Målt ved oksygenforbruk under forsøket:	8 185	92%
Ventilert ut av modellen i løpet av forsøket:	4 179	47%

2. BEREGNINGER

2.1 Beregningsmetode.

Beregning av røykspredning er foretatt med beregningsmodellen KAMELEON II, utviklet ved Institutt for teknisk varmelære, NTH/SINTEF Varmeteknikk /3/. Modellen er en tredimensjonal fluiddynamisk modell, som løser transportlikningene for masse, impuls og energi. Hele akterskipet er oppdelt i et nett av kontrollvolum, og KAMELEON II beregner endring i energi, masse, trykk og hastighet for hvert kontrollvolum for korte tidssteg. Her er det først foretatt en innledende beregning av brannforløpet slik det ble målt i fullskalaforsøket. Antall kontrollvolum for hovedberegningene var $30 \times 19 \times 10$, lengde x bredde x høyde, tilsammen 5700 kontrollvolum. For effektiv beregning brukes de aller største regnemaskinene, slik som CRAY.

Geometrien av korridorer og trappeløp er lagt inn med visse forenklinger. Himling over takplatene i korridorene er sløffet for å begrense beregningsvolumet. Lugarer og andre rom er ansett som lukkede rom uten luftutveksling med korridorene. Begge disse forenklingene har svært liten betydning for resultatene. I trappeløpene er det lagt inn hindringer som påvirker strømmingen omtrent slik som trappene gjør. Dette har en viss betydning for retning på strømmingen, og er derfor tatt med. Små lekkasjeåpninger og spalter er ikke tatt inn i beregningen. Strømmingen mellom korridordeler og trappeløp styres av trykkforhold og geometri.

I disse beregningene er brannen simulert ved å gi inn effekt i de korridorseksjoner og trappeløp brannen spredte seg i. Effekttutviklingen er tilpasset slik at det i løpet av 18 minutter avgis like mye varme fra brannsonen til resten av akterskipet som ble transportert med varme røykgasser i fullskalaforsøket SC-7. Brannsonen er i de første 4 minuttene lokalisert til korridoren på bildekk-nivå, styrbord side aktenfor trappeløp. Etter dette er brannen flyttet til trappeløpet på styrbord side, mens det i en overgangsperiode også brenner i korridoren. Ventilasjonsluften er tilført i nedre del av korridorene, og i områder i utkanten av beregningsområdet.

Detaljert oversikt over geometri og mål brukt i beregningene, lokalisering av brann, tilførsel og avtrekk av ventilasjonsluft er vist i Vedlegg C.

Varmetap til vegger er simulert ved en varmeovergangskoeffisient, som gir variasjon i varmeoverføring ved endret turbulens. I beregningene er turbulensen holdt konstant, og varmeoverføring til skipet blir en god del underestimert. Størrelsen på varmeovergangstallet i beregningene er på grunn av denne antakelsen blitt $0.4 \text{ [W/m}^2 \text{ K]}$, mens det i virkeligheten vil være langt større tall. Estimert i overslagsberegninger er ofte $15 - 25 \text{ [W/m}^2 \text{ K]}$. En annen antakelse som gir noe urealistiske temperaturer i beregningene er at veggtemperaturen er holdt konstant på omgivelsestemperatur. Dette gir høyere varmetap enn

i praksis. Dette oppveier ikke på langt nær det lave varmeovergangstallet, så temperaturene blir i alle fall overestimert. At temperaturene som beregnes blir for høye, er tatt i betraktning ved analyse av resultatene.

For å finne konsentrasjon av giftige gasser er det i beregningene lagt inn et "sporstoff" i form av en liten mengde luft som merkes spesielt. Massestrømmen av sporstoff er variert proporsjonalt med effektutviklingen, og følger dermed avbrenningsraten. Sporstoffet spres i samme forhold som massestrømmene av røyk, og en kan til enhver tid og i enhver posisjon finne konsentrasjonen av sporstoff. For å finne reelle konsentrasjoner av giftige gasser, eventuelt sot eller oksygen, blir sporstoffkonsentrasjonen multiplisert med en faktor. Denne faktoren er fastlagt ut ifra fullskalamålingene. Referansekonsentrasjon i et tidsrom i brannutviklingen hvor målingene regnes som mest pålitelige er lagt til grunn for multiplikasjonsfaktoren. Beregningsgrunnlaget er vist i detalj i Vedlegg C8.

Beregningsresultatene foreligger som datafiler med all informasjon om tidsutviklingen for temperatur og sporstoff i alle kontrollvolum. Dette er en enorm datamengde, men ved hjelp av grafisk dataverktøy kan en ved skjerm finne lokale temperaturer, konsentrasjoner og hastigheter meget raskt. I rapporten er de viktigste tidsforløpene gjengitt i kurveform.

2.2 Utførte beregninger.

Det er utført beregning av to ulike forløp av startfasen av brannen. I beregning 1 er det forutsatt at noen branndører lukkes 2 minutter etter at brannen ved arnestedsområdet har nådd 200 [kW]. Samtidig med at branndører lukkes er det lagt inn endring i lufttilførselen i enkelte områder, vurdert ut ifra ventilasjonsanleggets driftsforhold.

I beregning 2 er ingen dører lukket i beregningsperioden, og ventilasjonsanlegget går med konstante tilførsler og avtrekk.

3. RESULTATER

På de følgende sider er resultater fra beregningene vist i kurveform. Hver figur har et punkt-nummer. Dette nummeret representerer en posisjon i en korridor, som vist i figur 2.

Hastighetsfordeling vises med piler, hvor retningen gis direkte ved pilens retning. Punktet som pilen representerer ligger i bakre ende av pilen. Lengden på pilen gir størrelsen på hastigheten i forhold til maksimal hastighet på tegningen. Maksimalhastigheten er skrevet inn på tegningen.

Temperaturfordelingen og trykkfordelingen i skipet ved gitte tidspunkt er vist som iso-temperatur og isobar-kurver.

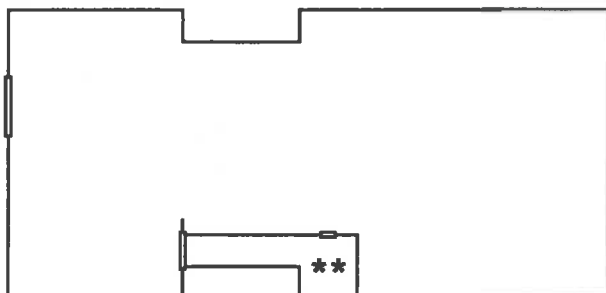
For hver korridor som er knyttet til trappeløp og tverrkorridor, og for Broadway Lounge på Main dekk presenteres henholdsvis temperatur, CO-konsentrasjon og HCN-konsentrasjon. Beregningene viser forløpet i tiden fra startbrannen har nådd et nivå på 200 [kW] og 10 minutter utover. Forløpet hvor endel spesifiserte branndører lukkes 2 minutter etter at startbrannen har nådd 200 [kW] presenteres ved siden av forløpet hvor ingen dører lukkes i beregningsperioden. På tegningene i vedlegg C9 og C10 er data gitt for hvilke dører som er åpne og hvilke ventilasjonsforhold som er simulert.

Tidsaksen er den samme i alle presentasjonene, mens aksene for temperatur og gasskonsentrasjon er automatisk tilpasset variasjonsområdet. Dette må en være oppmerksom på ved sammenlikning av kurver.

TALLENE GIR POSISJON HVOR KONSENTRASJON
AV GIFTIG GASS ELLER TEMPERATUR ER VIST
I FIGURER VIDERE I KAPITTEL 3.

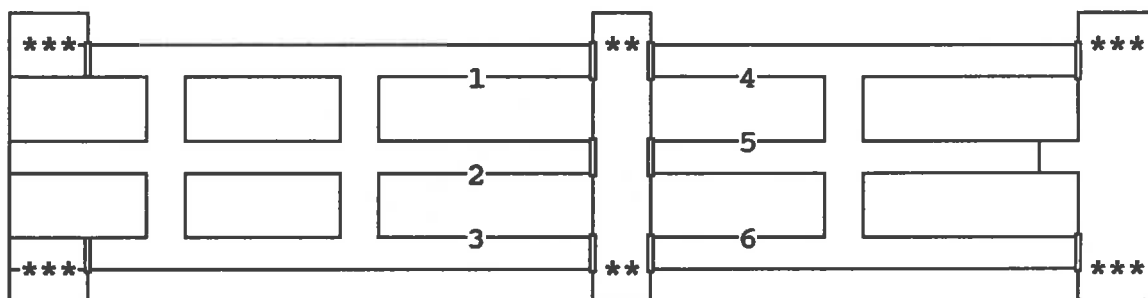
VERTIKAL SJAKT: **
DØR

MAIN DEKK

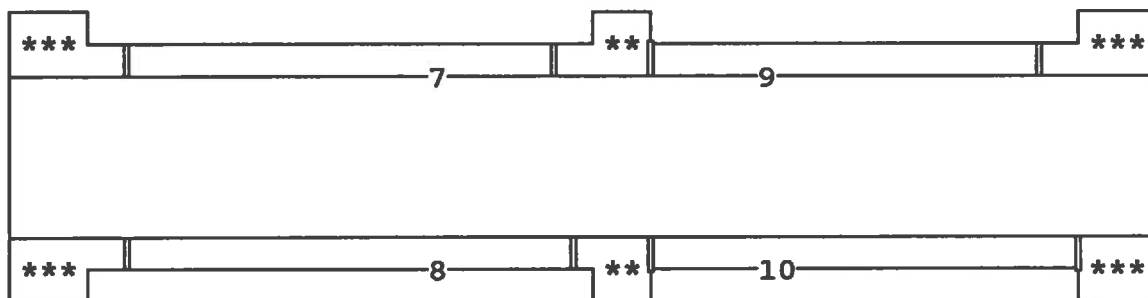


GULF DEKK

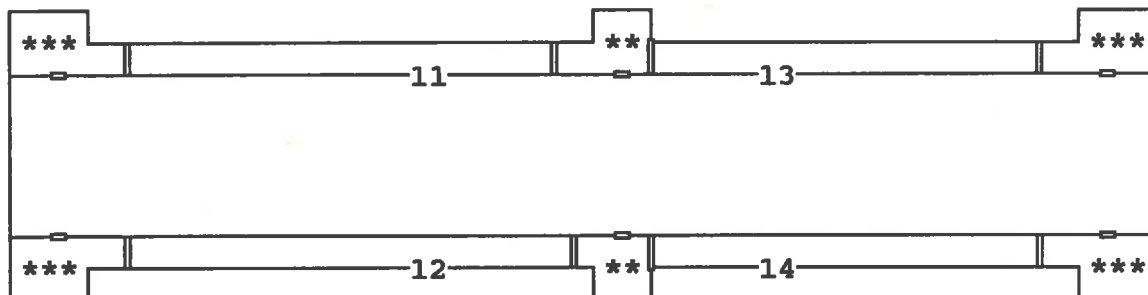
Tverrkorridor



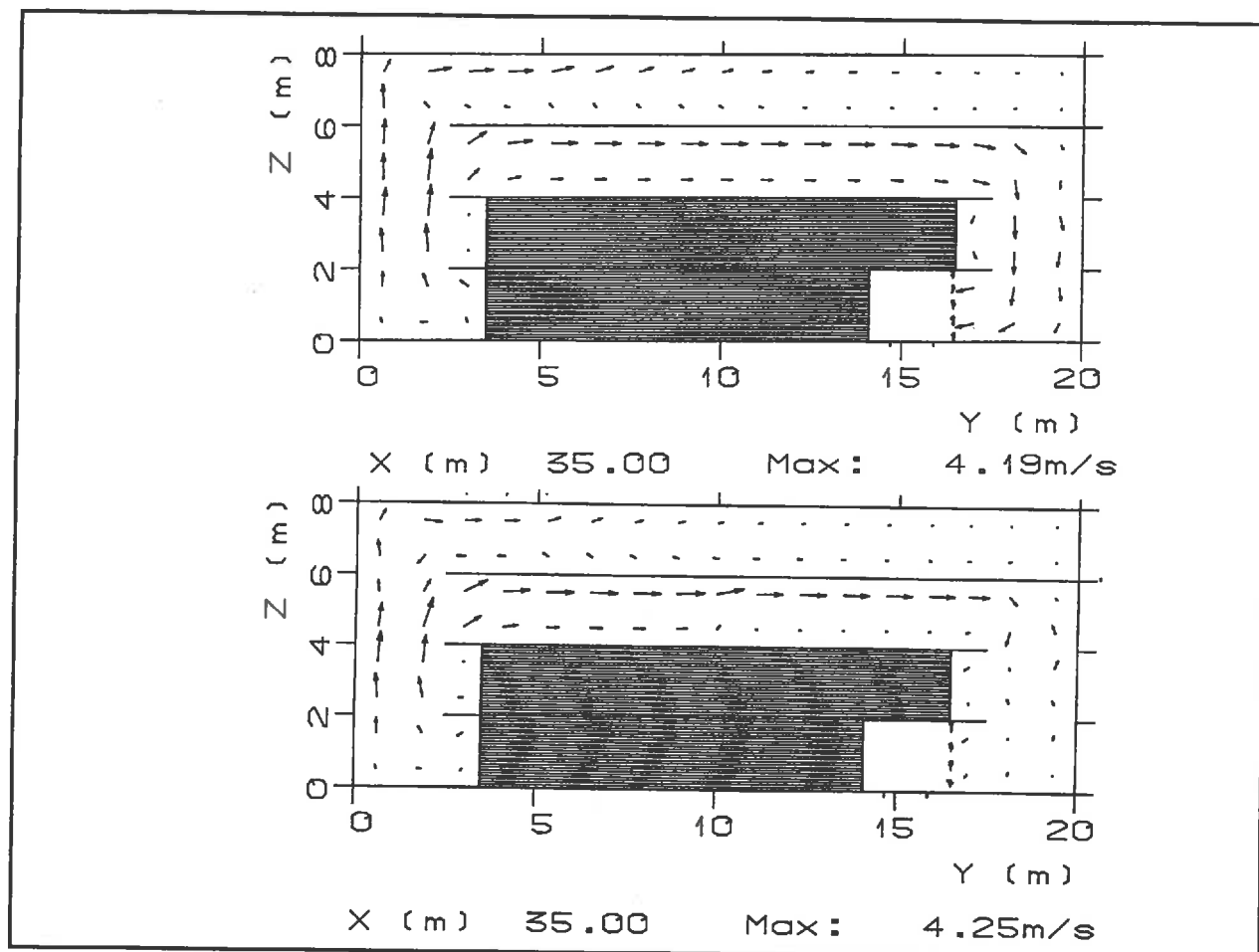
YBOR DEKK



BILDEKK

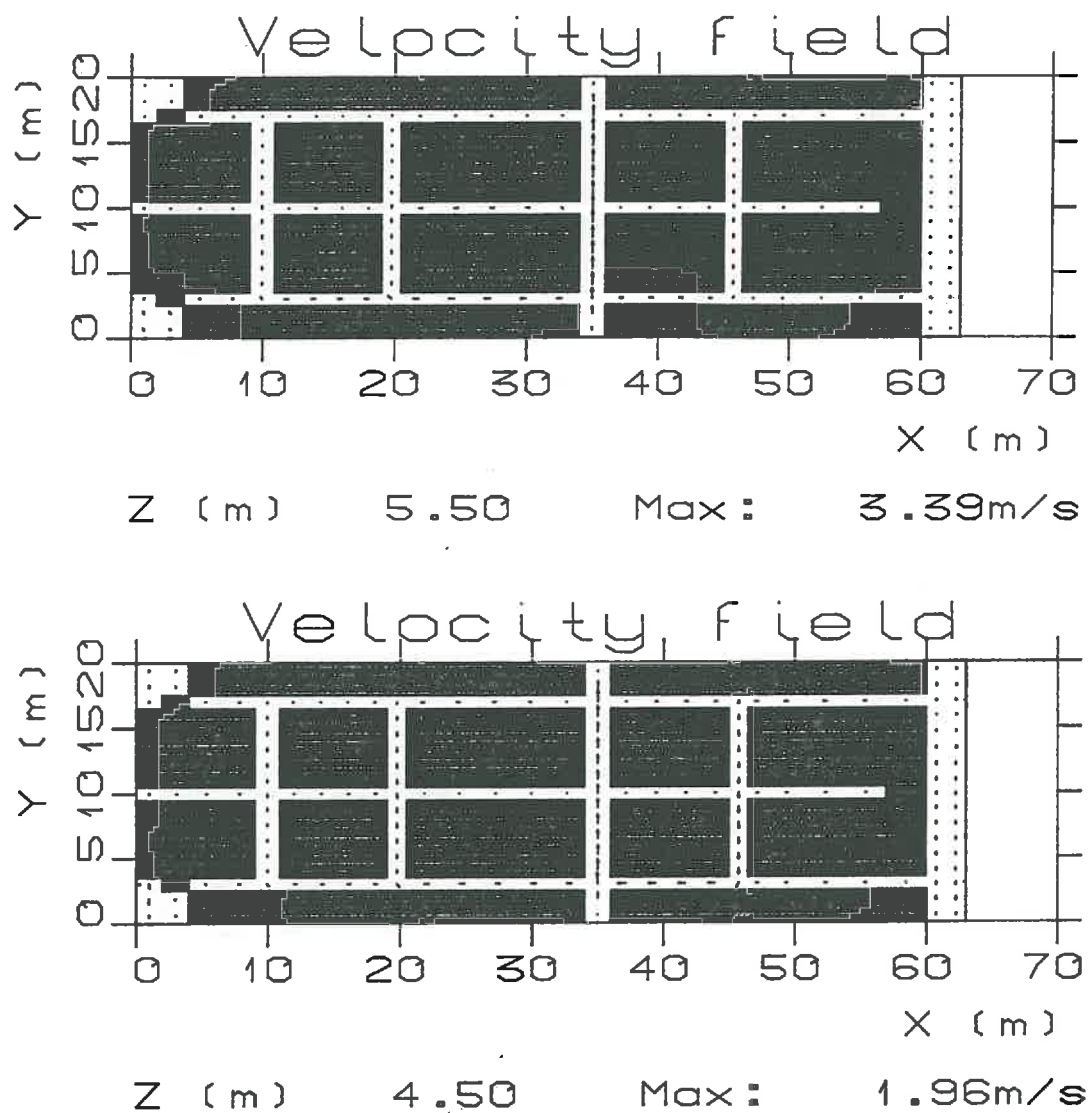


Figur 2. Planskisse for beregning av røykspredning.



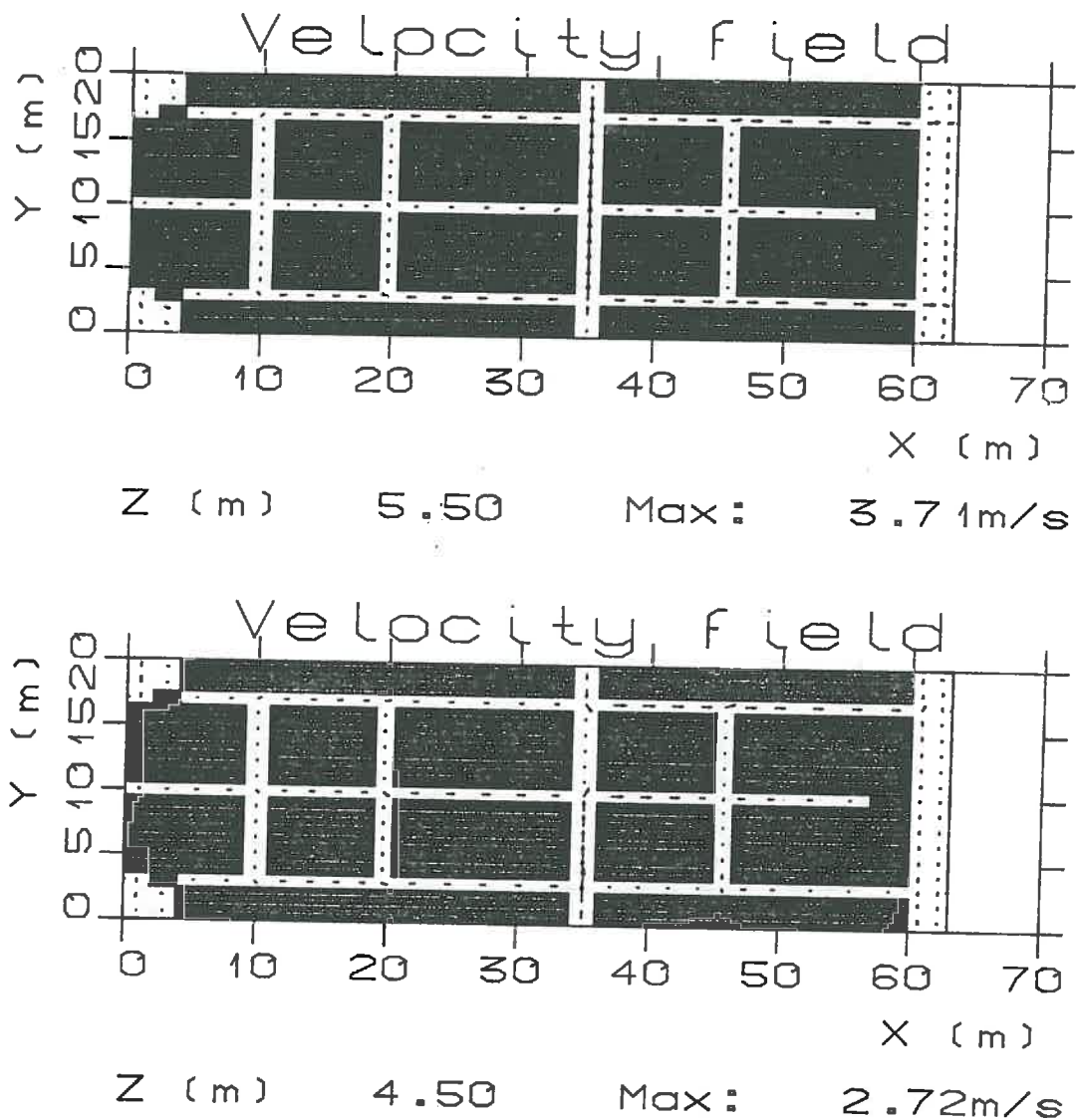
Figur 3 Hastigheter i tverrkorridor på Gulf dekk og i trappesjakter. Øverste tegning viser situasjonen med lukkede dører, den nederste gjelder for åpne dører. Tidspunktet er 6 min. etter at startbrannen har blitt 200 [kW].

Figur 3 viser hastighetsfordelingen i et snitt på tvers av skipet ved tidspunkt 6 minutter etter at startbrannen har nådd 200 [kW]. Maksimumshastigheten påvirkes ikke vesentlig av om dører åpnes eller lukkes, idet det er brannen i trappeløpet på styrbord side som medfører de største hastighetene. Den varme røyken fra trappeløpet på styrbord side fordeler seg på Main dekk og Gulfdekk, og strømmer ned trappeløpet på babord side og inn på bildekk gjennom den åpne døren der. Røykmengden som strømmer ned til bildeknivå påvirkes av om dører åpnes eller lukkes, idet hastigheten ned babord trappeløp er lavere når dører er åpne. Det strømmer i begge tilfeller varm røyk ned trappeløpet på babord side, på grunn av undertrykket på Bildekk som fører til et sug inn gjennom den åpne døren i bunnen av trappeløpet. På tegningene i figur 3 er kontrollvolumet nærmest den åpne døren på Bildekk ikke skravert slik som resten av Bildekk.



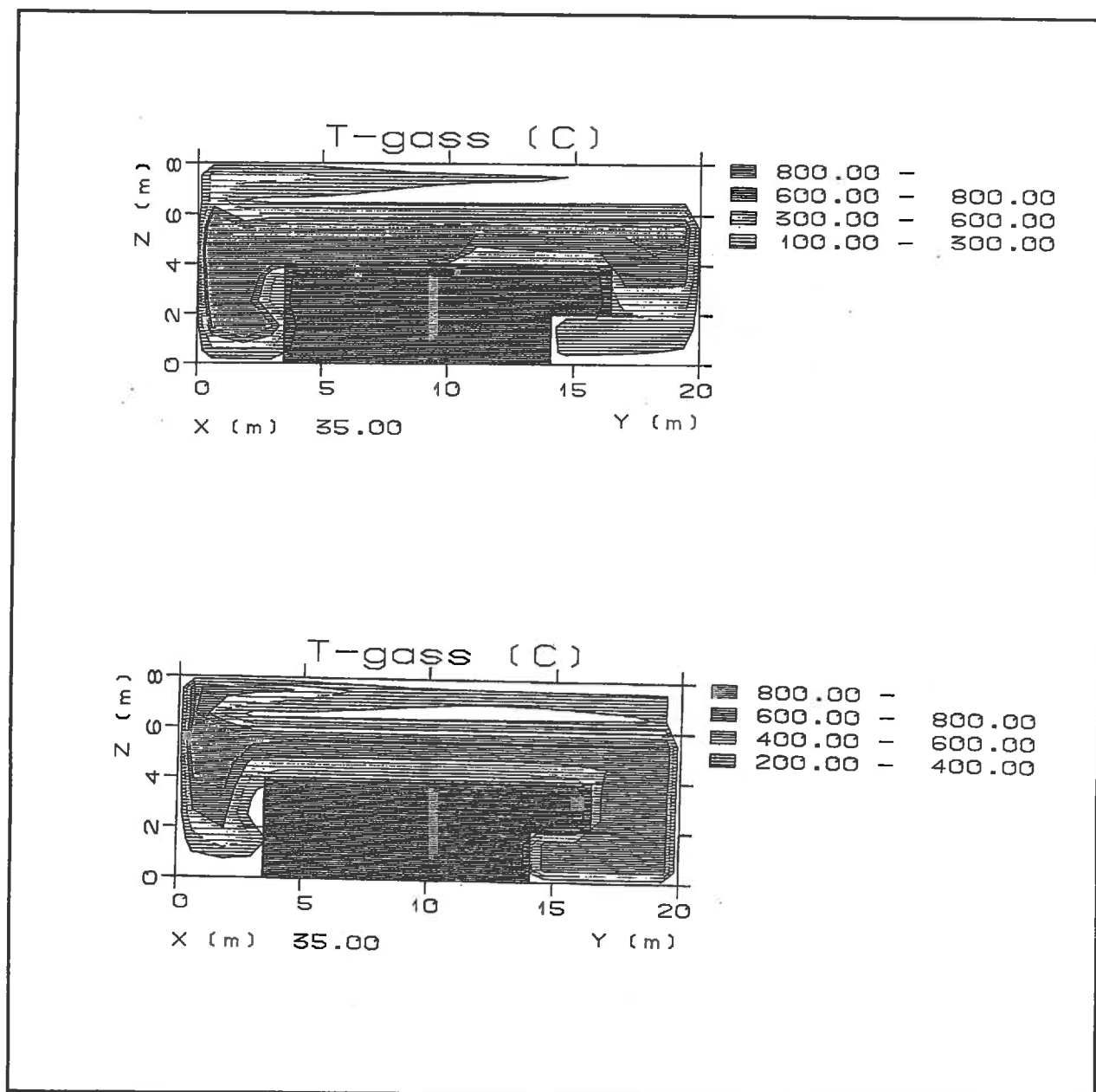
Figur 4 Hastighetsfordeling i korridorene på Gulf-dekk med noen stengte branndører. Tidspunktet er 6 min. etter at startbrannen er 200 [kW]. Øverste tegning gjelder øverste sone i korridoren; nederste tegning gjelder nedre sone.

Hovedstrømmen går tvers over tverrkorridoren. Endel røyk strømmer inn i korridoren aktenfor trappeløpet på styrbord side, der branndøren i beregningene er satt åpen. I tilsvarende korridor forut for trappeløpet er strømningsretningen i nedre sone mot tverrkorridoren.



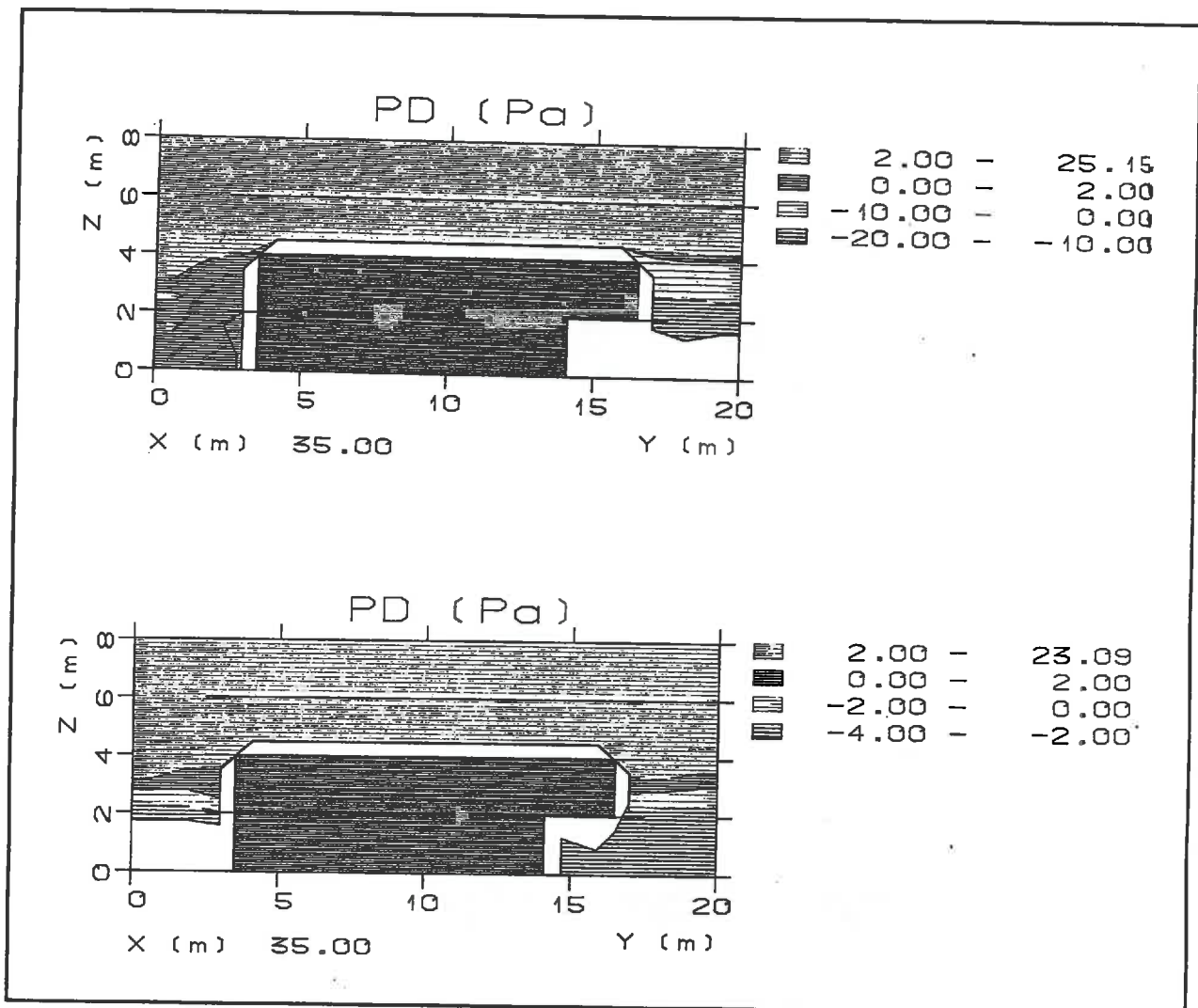
Figur 5 Hastighetsfordeling i korridorene på Gulf-dekk med åpne branndører. Tidspunktet er 6 min. etter at startbrannen er 200 [kW]. Øverste tegning gjelder øverste sone i korridoren; nederste tegning gjelder nedre sone.

Hovedstrømmen går tvers over tverrkorridoren i øvre sone, men møter en motsatt rettet strøm i nedre sone. I øvre sone fordeles røyken seg ut til sidekorridorene, mens det i nedre sone trekkes friskluft eller fortynnet røyk inn mot tverrkorridoren aktenfra. Her er altså situasjonen at det er sjiktet og motsatt strømning i samme korridor.



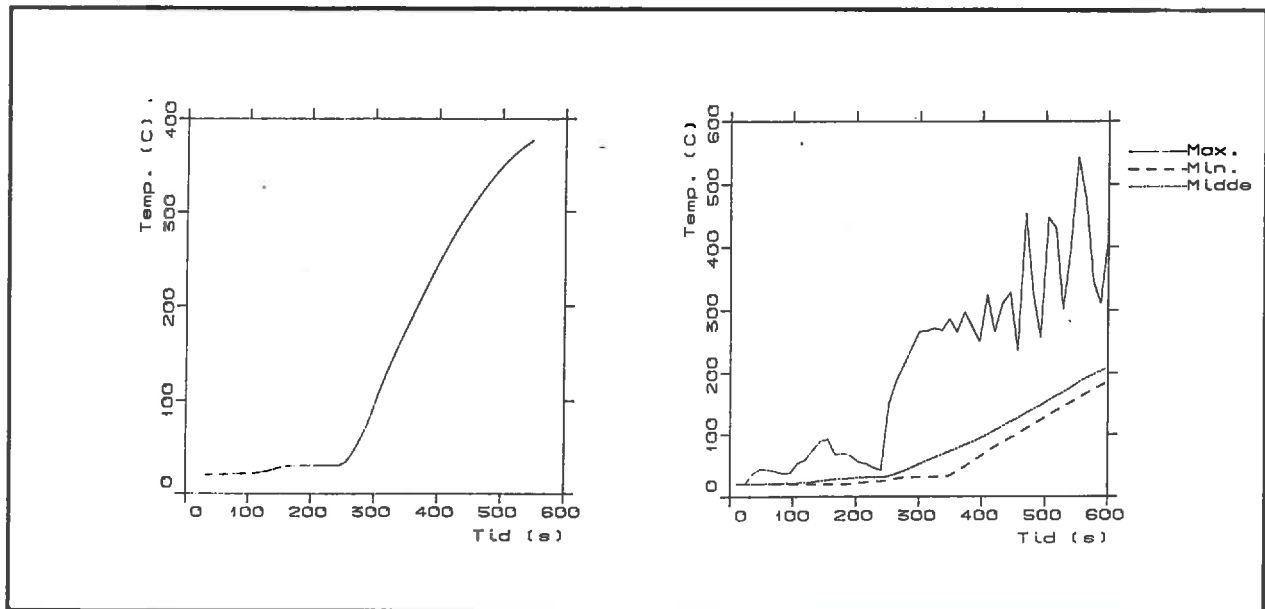
Figur 6 Temperaturer i tverrkorridor på Gulf dekk og i trappesjakter. Øverste tegning viser situasjonen med lukkede dører, den nederste gjelder for åpne dører. Tidspunktet er 6 min. etter at startbrannen har blitt 200 [kW].

Med lukkede dører er temperaturstigningen på Main dekk større enn ved åpne brann dører. Figur 7 viser også at varm røyk trekkes ned trappeløpet på babord side og inn på bildekk gjennom den åpne døren der. Med lukkede brann dører er temperaturen i røyken inn på bildekket ca. 600 °C, mens med åpne dører ca. 250 °C. Med korreksjon for overestimering av røyktemperatur vil det sannsynligvis være 3-400 °C ved lukkede brann dører, og ca. 1-200 °C med åpne dører.

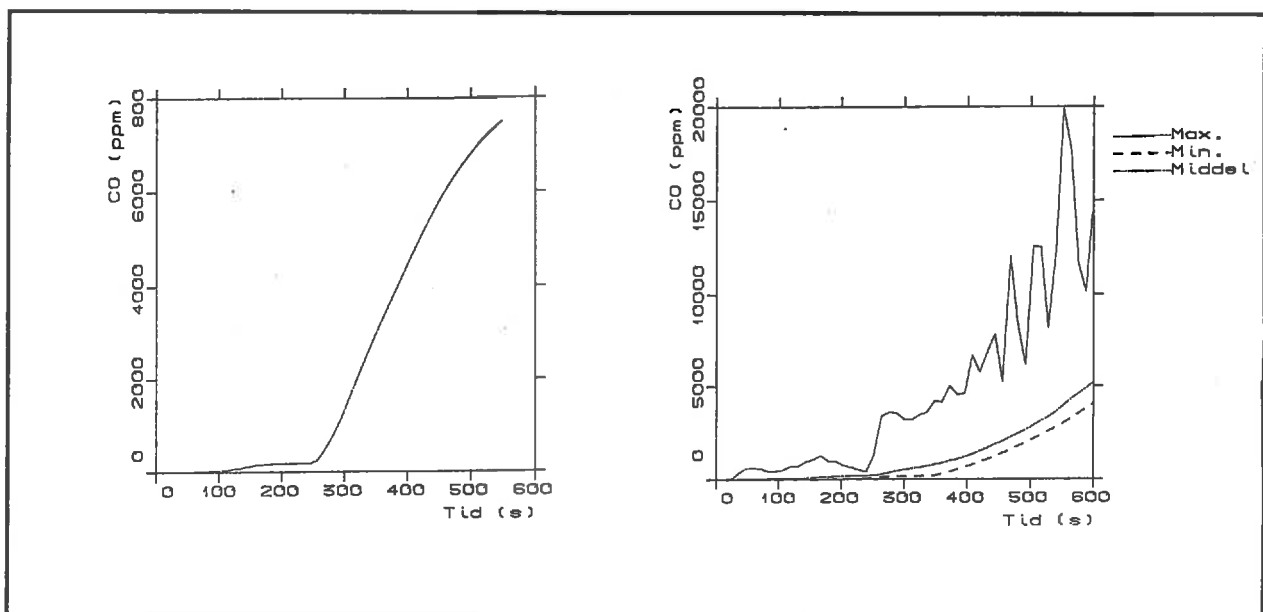


Figur 7 Trykkfordeling i tverrrkorridor på Gulf dekk og i trappesjakter. Øverste tegning viser situasjonen med lukkede dører, den nederste gjelder for åpne dører. Tidspunktet er 6 min. etter at startbrannen har blitt 200 [kW].

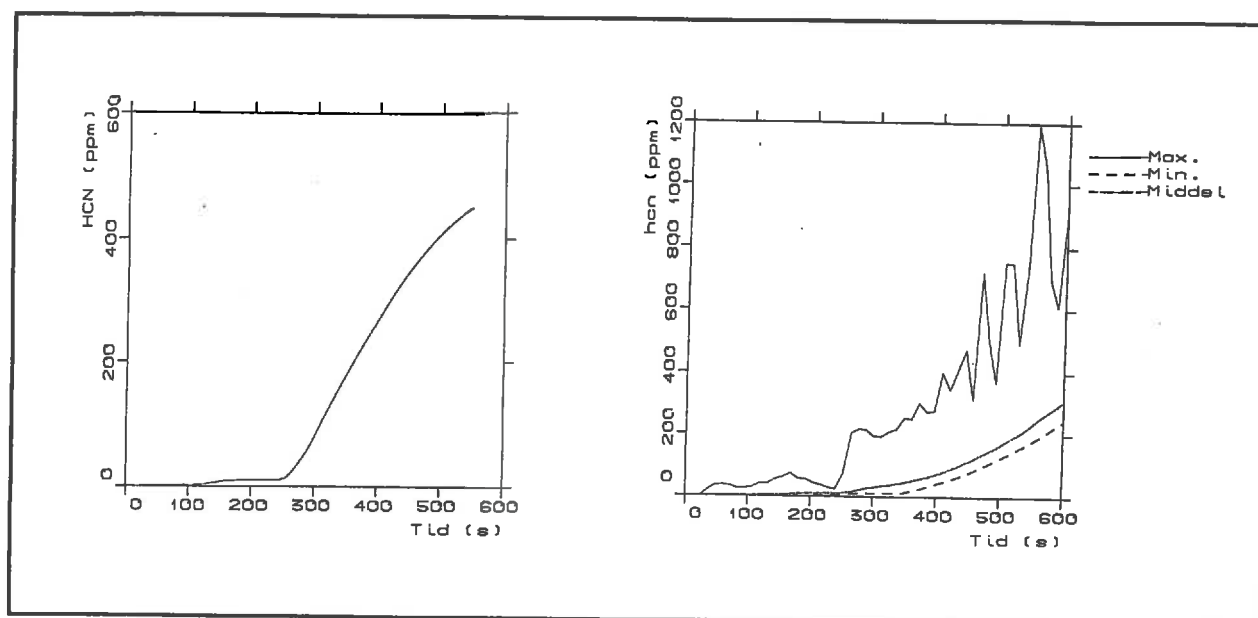
Trykkfordelingen viser at nøytralsjiktet, det vil si hvor trykket inne i skipet er det samme som i omgivelsene, ligger i nivå med Gulf-dekk. I sonen over Gulf-dekk vil det være et relativt overtrykk i korridorene, som vil presse røyk inn i lugarene når ventilasjonsanlegget er slått av. I sonen under nøytralsjiktet vil denne tendensen være motsatt, men siden skipssiden er helt tett vil ingen friskluft kunne komme til her. Beregning av trykket viser også at det på grunn av termiske krefter og strømming dannes maksimale overtrykk i størrelse 25 [Pa].



Figur 8 Tidsutvikling for temperatur i Broadway Lounge på Main dekk. Tegningen til venstre viser situasjonen med lukkede dører, mens den til høyre gjelder for åpne dører. Tiden er regnet fra da startbrannen er 200 [kW].



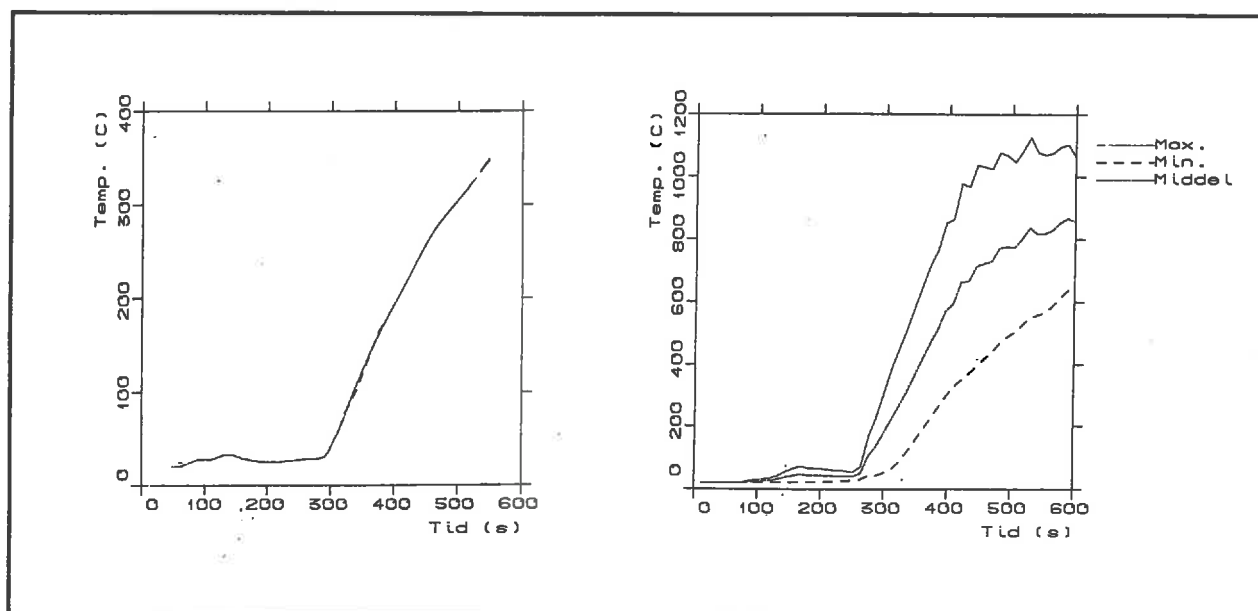
Figur 9 Tidsutvikling for konsentrasjon av CO i Broadway Lounge på Main dekk. Tegningen til venstre viser situasjonen med lukkede dører, mens den til høyre gjelder for åpne dører. Tiden er regnet fra da startbrannen er 200 [kW].



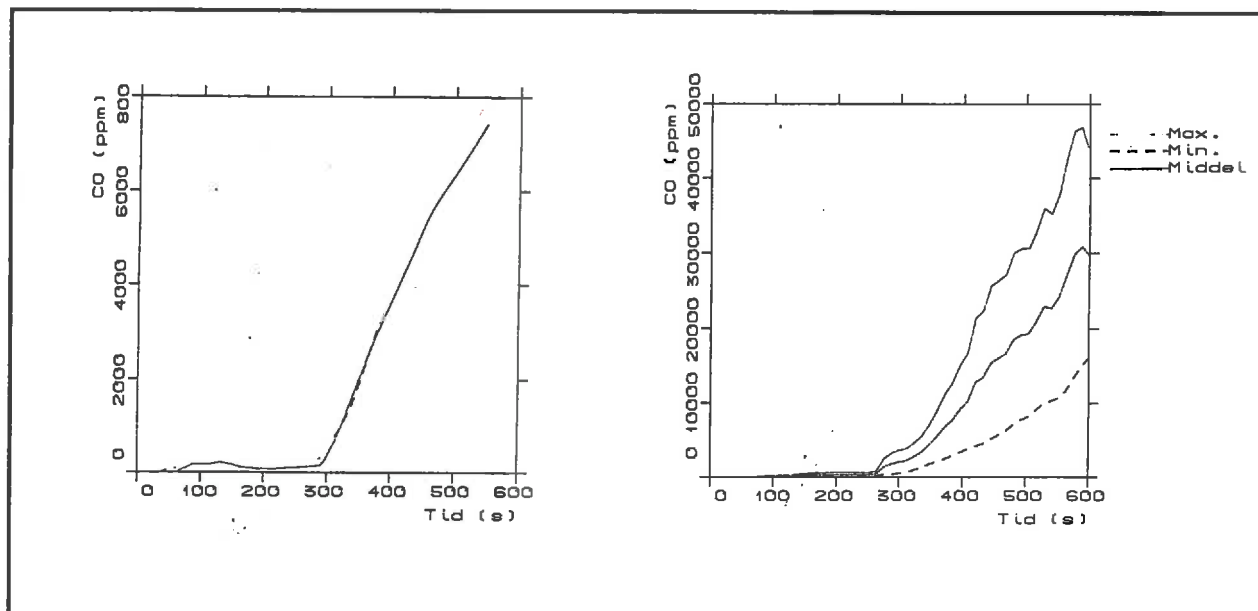
Figur 10 Tidsutvikling for konsentrasjon av HCN i Broadway Lounge på Main dekk. Tegningen til venstre viser situasjonen med lukkede dører, mens den til høyre gjelder for åpne dører. Tiden er regnet fra da startbrannen er 200 [kW].

Det er kun røykspredning til Main dekk som er beregnet. Brann i Broadway Lounge er ikke lagt inn i beregningene.

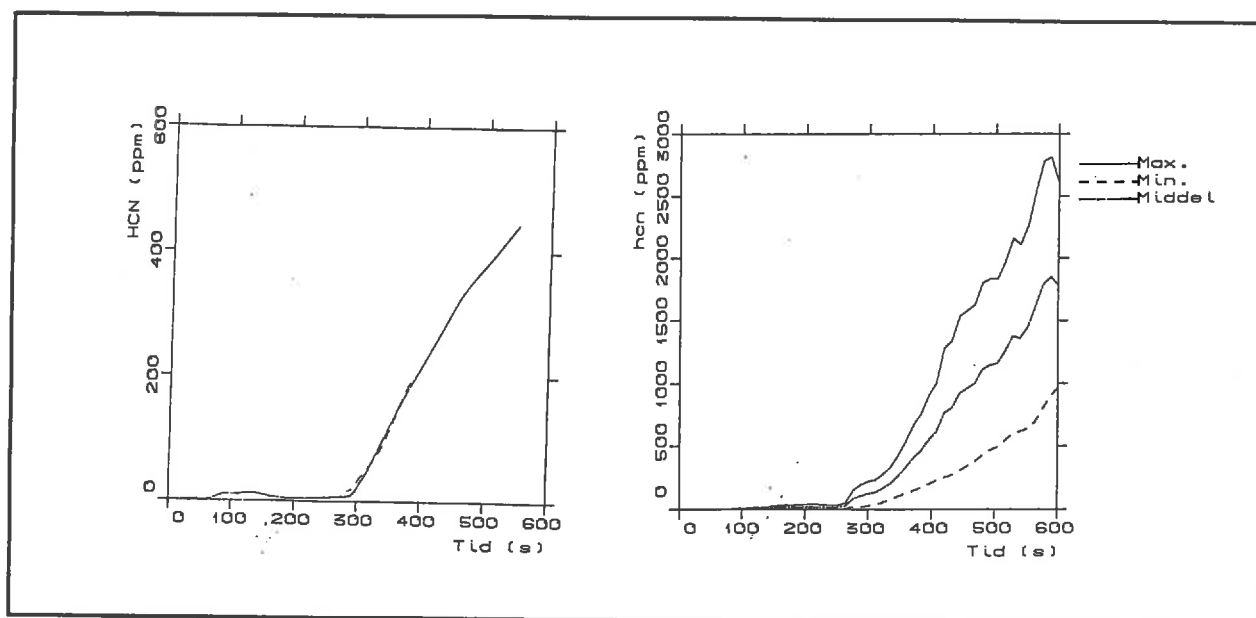
I Broadway Lounge øker temperaturen raskt, idet temperaturøkningen starter ca. 4 minutter etter at startbrannen har nådd 200 [kW]. Temperaturøkningen er mindre enn i korridorer direkte knyttet til trappeløpet på styrbord side, selv med lukkede dører. Dette skyldes dels at det er gjennomsnittstemperaturer som presenteres, dels det relativt store luftvolumet og luftutskiftningen som er lagt inn i beregningene. Dette gjør at det tar ca 10 - 12 minutter før mennesker som oppholder seg her har fått en dose av CO eller HCN enkeltvis som gjør dem ute av stand til å ta seg ut på egen hånd.



Figur 11 Tidsutvikling for konsentrasjon av HCN i korridor 1 på Gulf-dekk, på babord side, akter. Tegningen til venstre gjelder for lukkede dører, mens den til høyre gjelder for åpne dører. Tiden er regnet fra da startbrannen er 200 [kW].

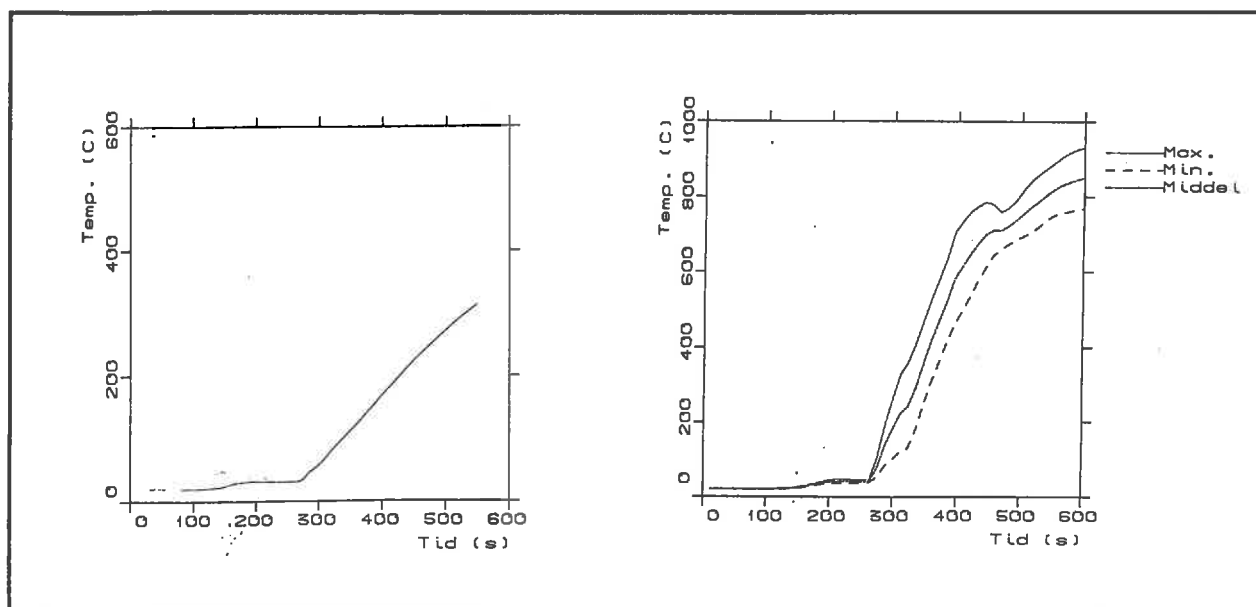


Figur 12 Tidsutvikling for temperatur i korridor 1 på Gulf-dekk, på babord side, akter. Tegningen til venstre viser situasjonen med lukkede dører, mens den til høyre gjelder for åpne dører. Tiden er regnet fra da startbrannen er 200 [kW].

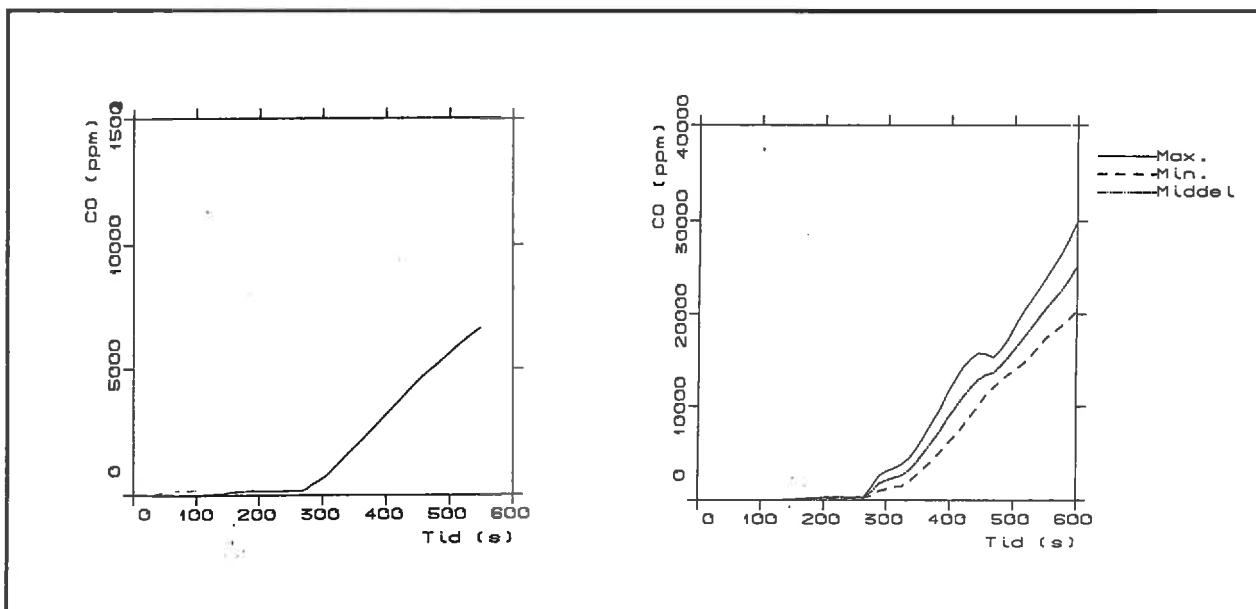


Figur 13 Tidsutvikling for konsentrasjon av CO i korridor 1 på Gulf-dekk, på babord side, akter. Tegningen til venstre gjelder for lukkede dører, mens den til høyre gjelder for åpne dører. Tiden er regnet fra da startbrannen er 200 [kW].

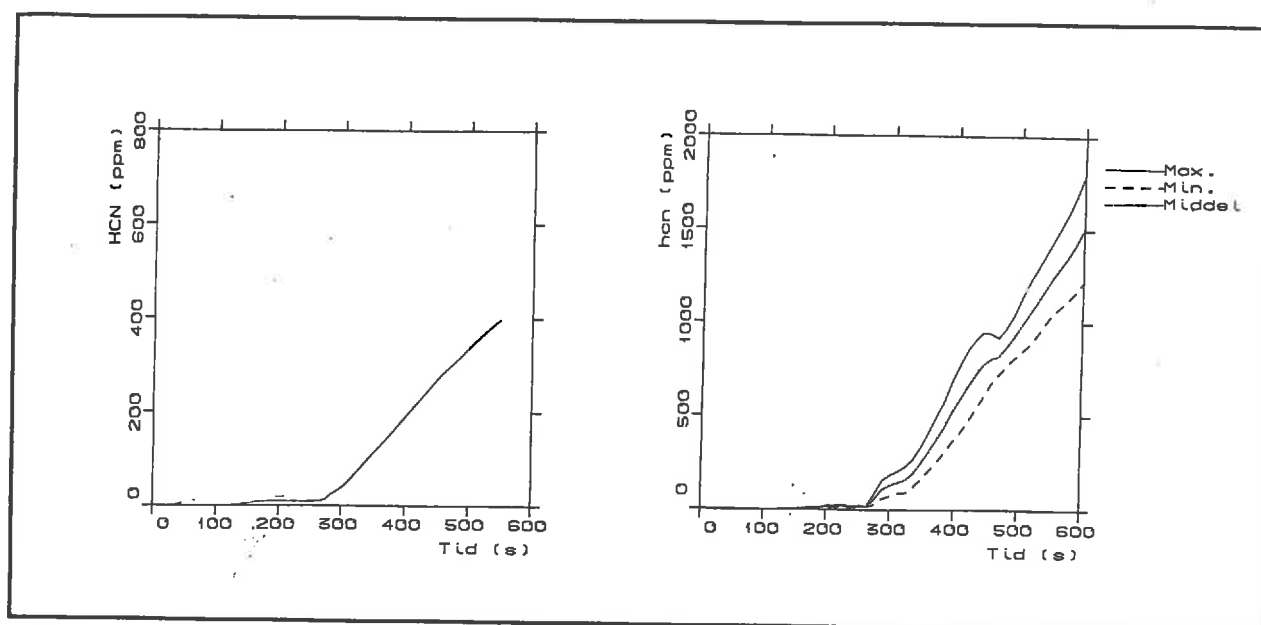
I denne korridoren blir det forskjell mellom de to beregningene, særlig med hensyn til tidsutvikling. Med lukkede dører etter 2 minutter fra startbrann på 200 [kW] begrenses tilførselen av varm røyk med høy konsentrasjon av CO og HCN. Etterhvert transporteres allikevel varm og giftig røyk til denne korridoren via de åpne forbindelsene på Gulf-dekk. Tidsforskjellen er i størrelse 2-3 minutter.



Figur 14 Tidsutvikling for temperatur i korridor 2 på Gulf-dekk, midt i skipet, akter. Tegningen til venstre viser situasjonen med lukkede dører, mens den til høyre gjelder for åpne dører. Tiden er regnet fra da startbrannen er 200 [kW].

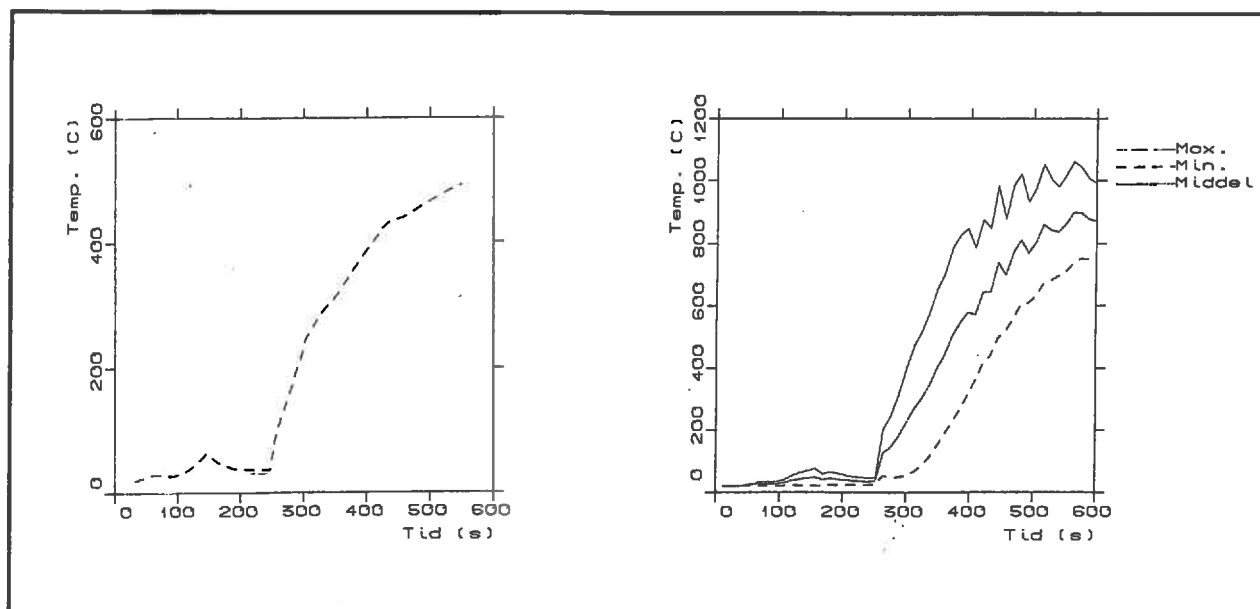


Figur 15 Tidsutvikling for konsentrasjon av CO i korridor 2 på Gulf-dekk, midt i skipet, akter. Tegningen til venstre gjelder for lukkede dører, mens den til høyre gjelder for åpne dører. Tiden er regnet fra da startbrannen er 200 [kW].

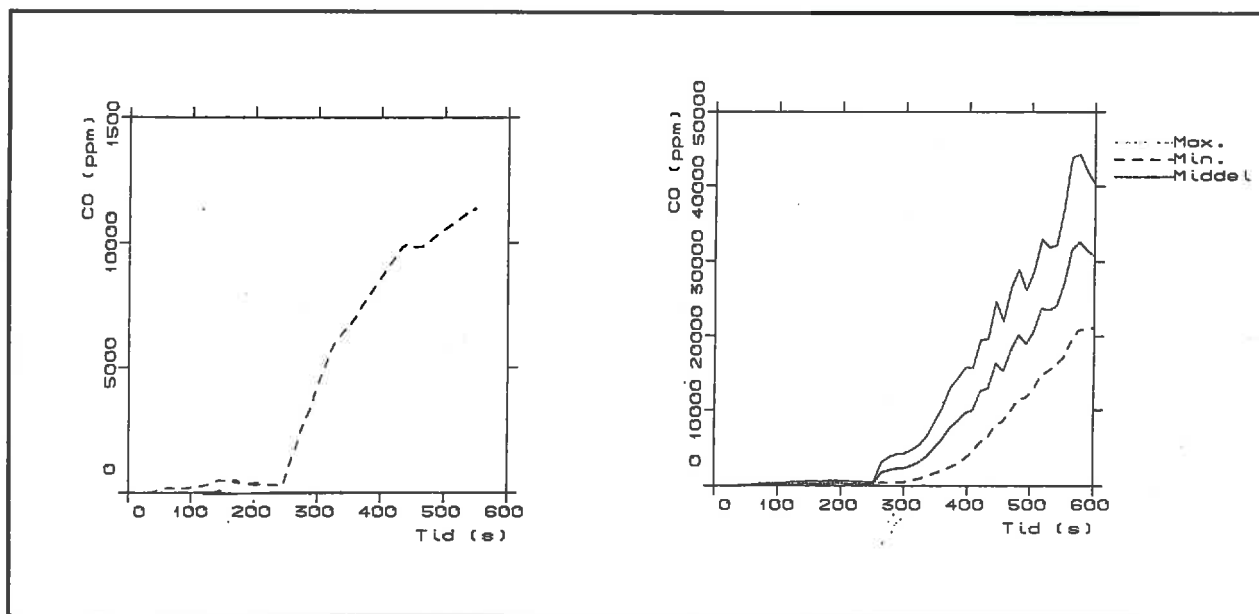


Figur 16 Tidsutvikling for konsentrasjon av HCN i korridor 2 på Gulf-dekk, midt i skipet, akter. Tegningen til venstre gjelder for lukkede dører, mens den til høyre gjelder for åpne dører. Tiden er regnet fra da startbrannen er 200 [kW].

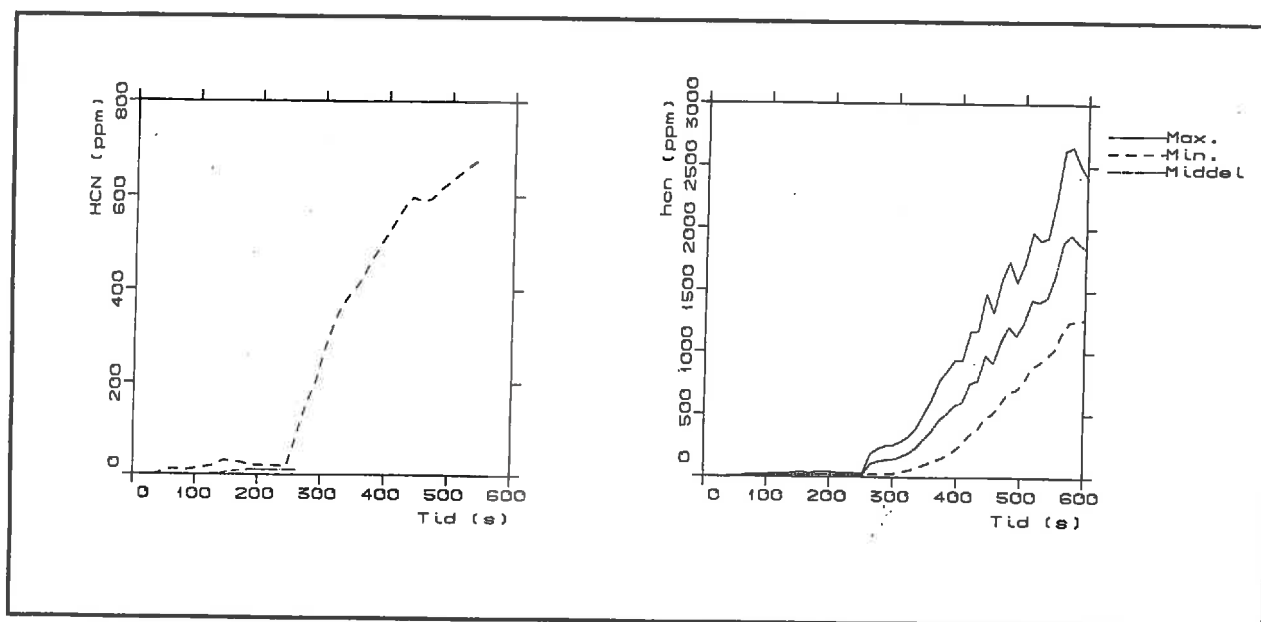
Også i denne korridoren gir lukking av dører en forsinkelse på temperaturutviklingen, og på hvor raskt kritisk dose av giftige gasser inntreffer. Tidsforskjellen er 2-3 minutter.



Figur 17 Tidsutvikling for temperatur i korridor 3 på Gulf-dekk, på styrbord side, akter. Tegningen til venstre viser situasjonen med lukkede dører, mens den til høyre gjelder for åpne dører. Tiden er regnet fra da startbrannen er 200 [kW].



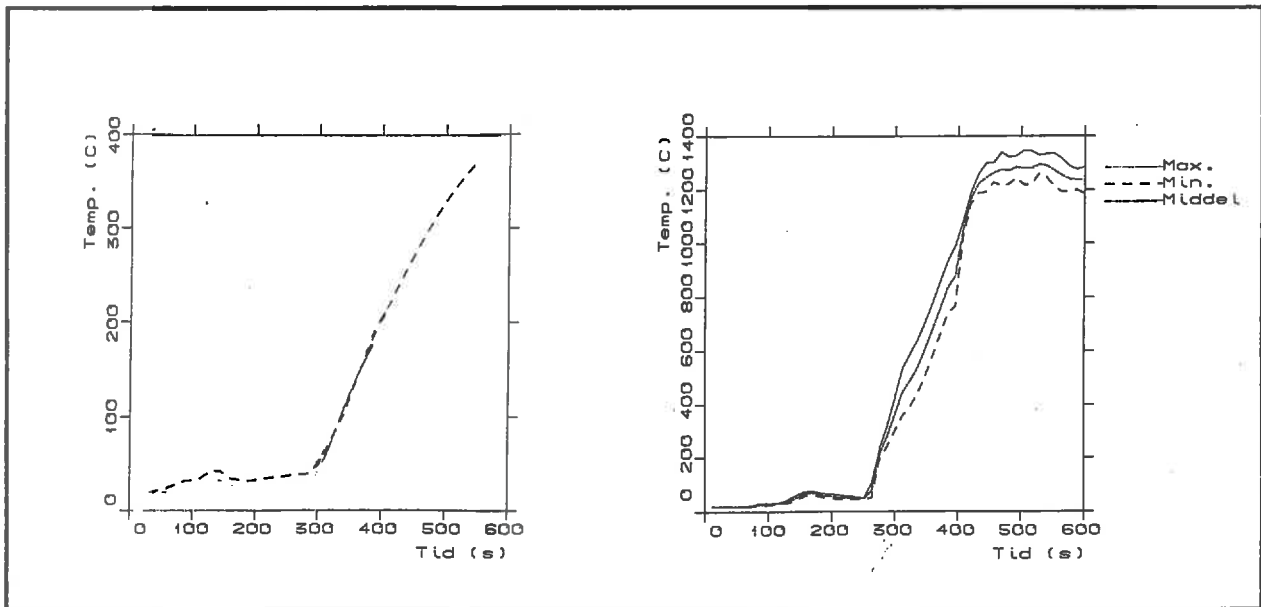
Figur 18 Tidsutvikling for konsentrasjon av CO i korridor 3 på Gulf-dekk, på styrbord side, akter. Tegningen til venstre gjelder for lukkede dører, mens den til høyre gjelder for åpne dører. Tiden er regnet fra da startbrannen er 200 [kW].



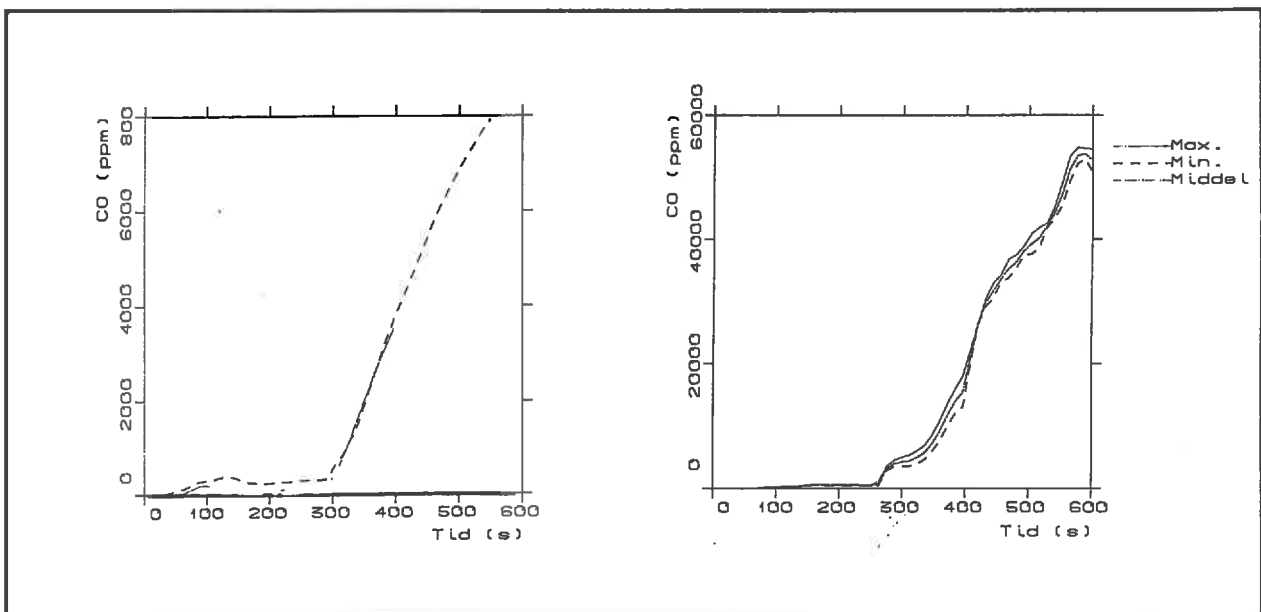
Figur 19 Tidsutvikling for konsentrasjon av HCN i korridor 3 på Gulf-dekk, på styrbord side, akter. Tegningen til venstre gjelder for lukkede dører, mens den til høyre gjelder for åpne dører. Tiden er regnet fra da startbrannen er 200 [kW].

Korridor 3, rett aktenfor trappesjekten hvor primærbrannen foregikk, har i beregningene hatt åpen dør i begge tilfeller. Det er rask økning i temperatur og konsentrasjon av giftige gasser, noe som raskt fører til kritisk tilstand. Det er omtrent ingen tidsforsinkelse mellom temperaturøkning i korridor 3 og i trappeløp på styrbord side, og kritisk dose før en person som oppholder seg i korridoren nås ca. 8 minutter etter at startbrannen har nådd 200 [kW]. Det er i dette tilfellet ikke regnet noe samvirke av virkning av flere gasser.

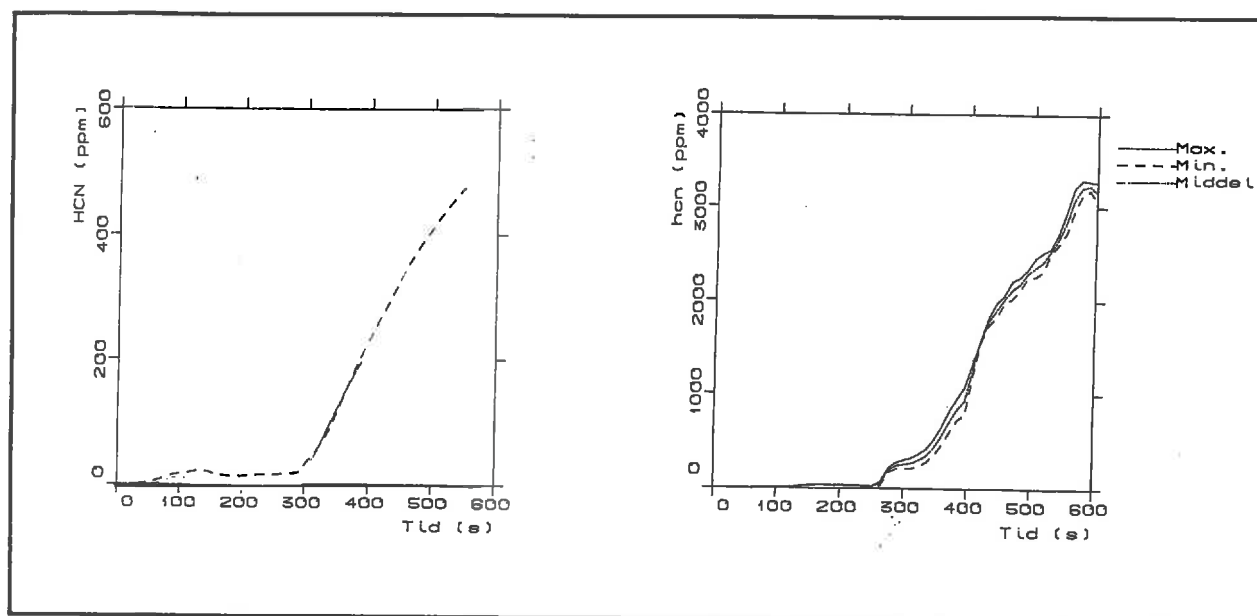
Av figurene 17, 18 og 19 framgår det at det er vesentlig forskjell på temperatur og gasskonsentrasjon i øvre og i nedre del av korridoren. Denne sjiktningen vil medføre at en person som oppholder seg ved gulvet i korridoren vil få 1.5 - 2 minutter lengere tid før kritisk tilstand inntreffer.



Figur 20 Tidsutvikling for temperatur i korridor 4 på Gulf-dekk, på babord side, forut for tverrkorridor. Tegningen til venstre gjelder for lukkede dører; den til høyre gjelder for åpne dører. Tiden er regnet fra da startbrannen er 200 [kW].

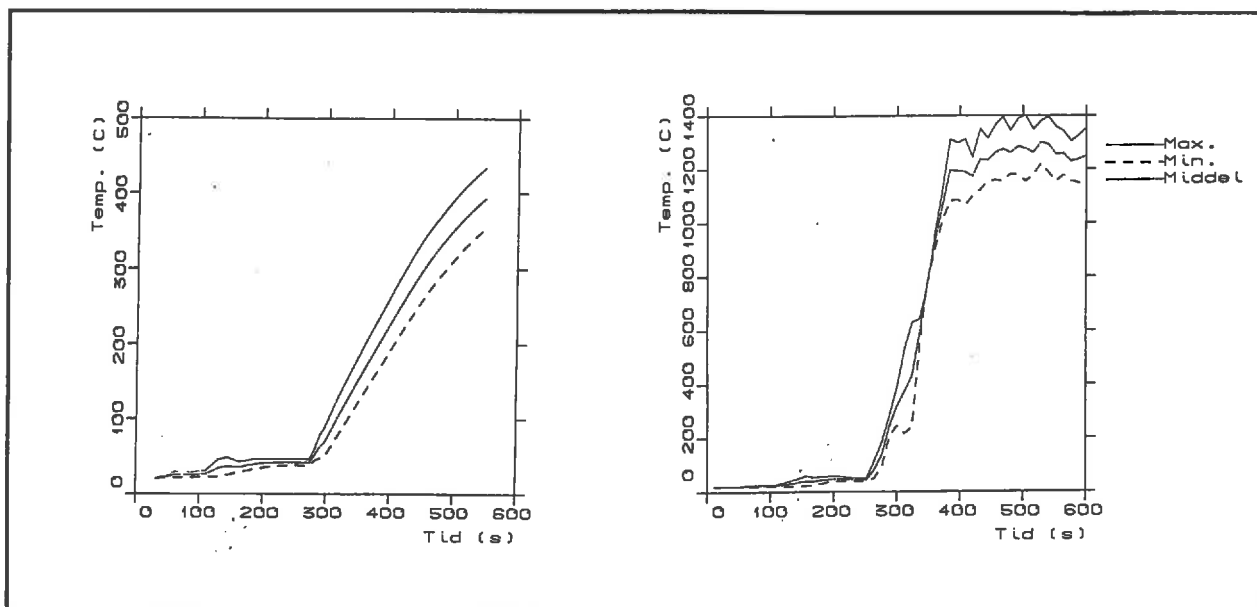


Figur 21 Tidsutvikling for konsentrasjon av CO i korridor 4 på Gulf-dekk, på babord side, forut for tverrkorridor. Tegningen til venstre gjelder for lukkede dører, den til høyre gjelder for åpne dører. Tid regnet fra startbrann 200 [kW].

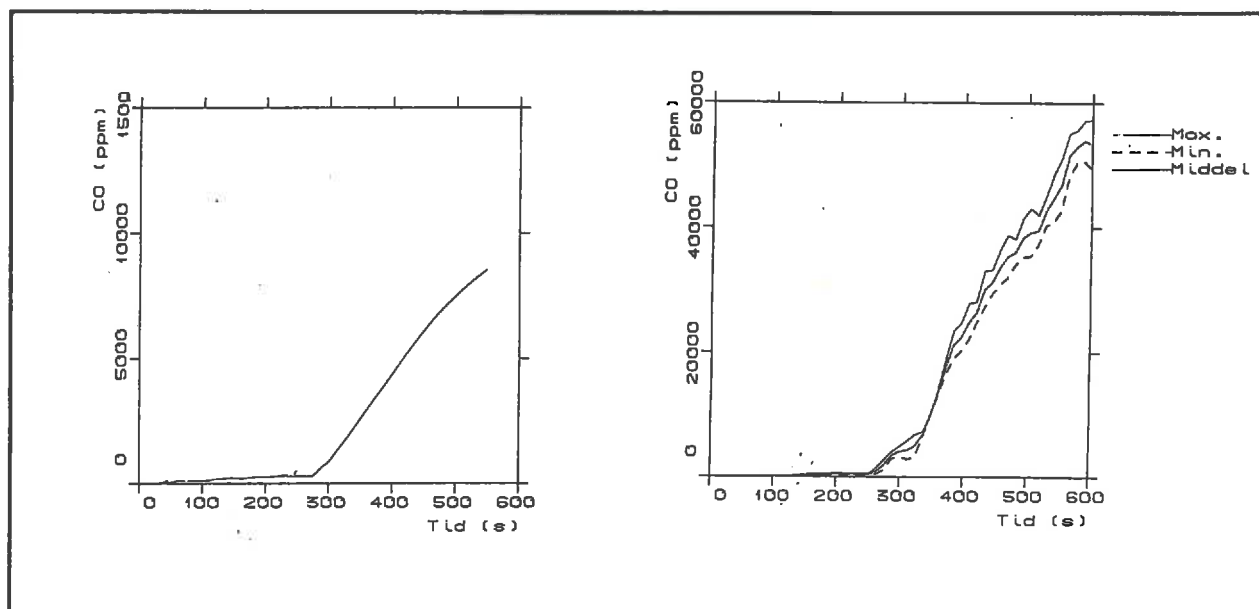


Figur 22 Tidsutvikling for konsentrasjon av HCN i korridor 4 på Gulf-dekk, på babord side, forut for tverrkorridor. Tegningen til venstre gjelder for lukkede dører, mens den til høyre gjelder for åpne dører. Tid fra startbrann 200 [kW].

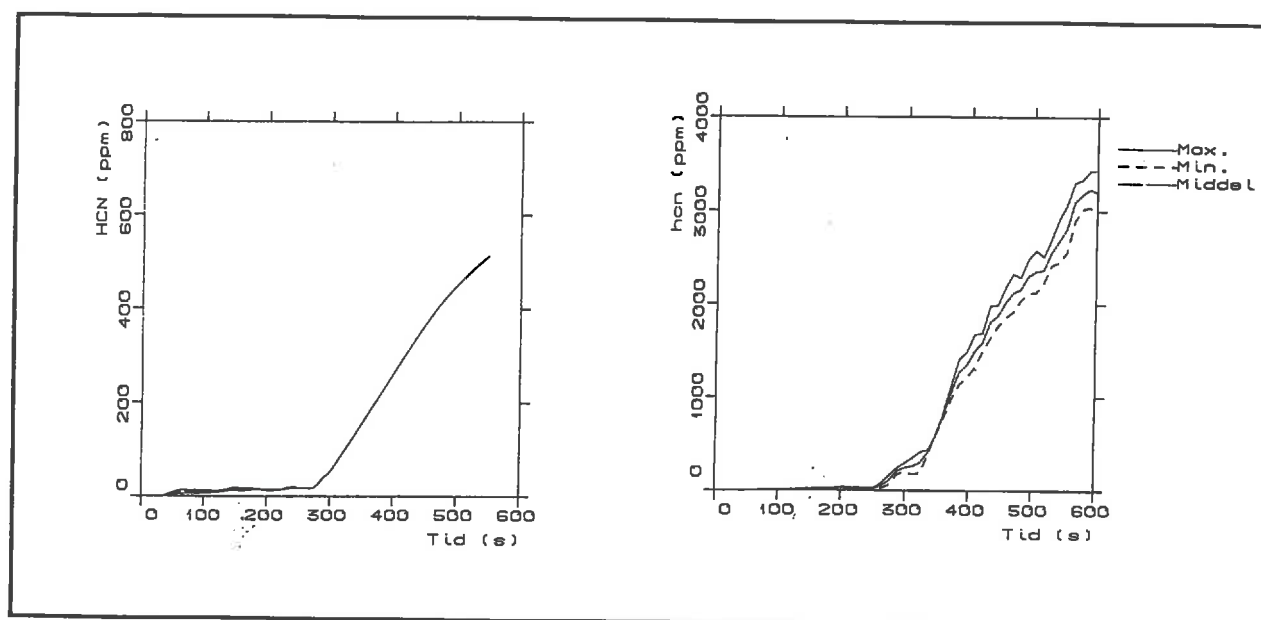
I korridor 4 forut for tverrkorridoren, på babord side, er det en tidsforskjell mellom temperaturøkning og konsentrasjon av giftige gasser avhengig av lukking av dører. Forskjellen er ca. 3 minutter.



Figur 23 Tidsutvikling for temperatur i korridor 5 på Gulf-dekk, midt i skipet, forut for tverrkorridor. Tegningen til venstre gjelder for lukkede dører; den til høyre gjelder for åpne dører. Tiden er regnet fra da startbrannen er 200 [kW].

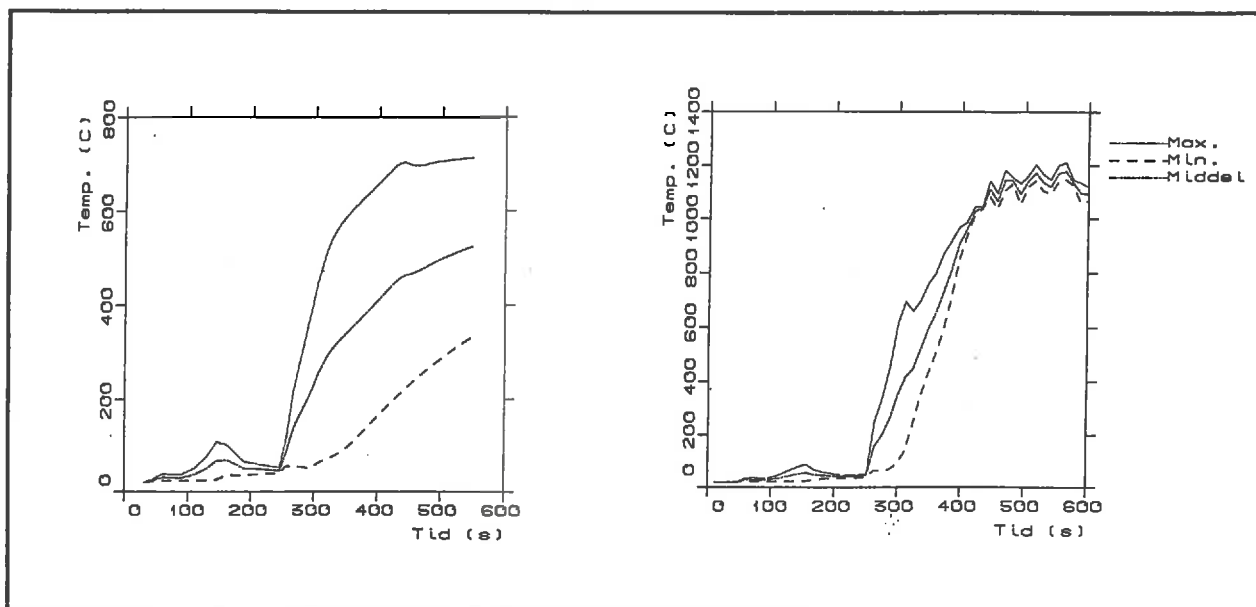


Figur 24 Tidsutvikling for konsentrasjon av CO i korridor 5 på Gulf-dekk, midt i skipet, forut for tverrkorridor. Tegningen til venstre gjelder for lukkede dører, den til høyre gjelder for åpne dører. Tid regnet fra startbrann 200 [kW].

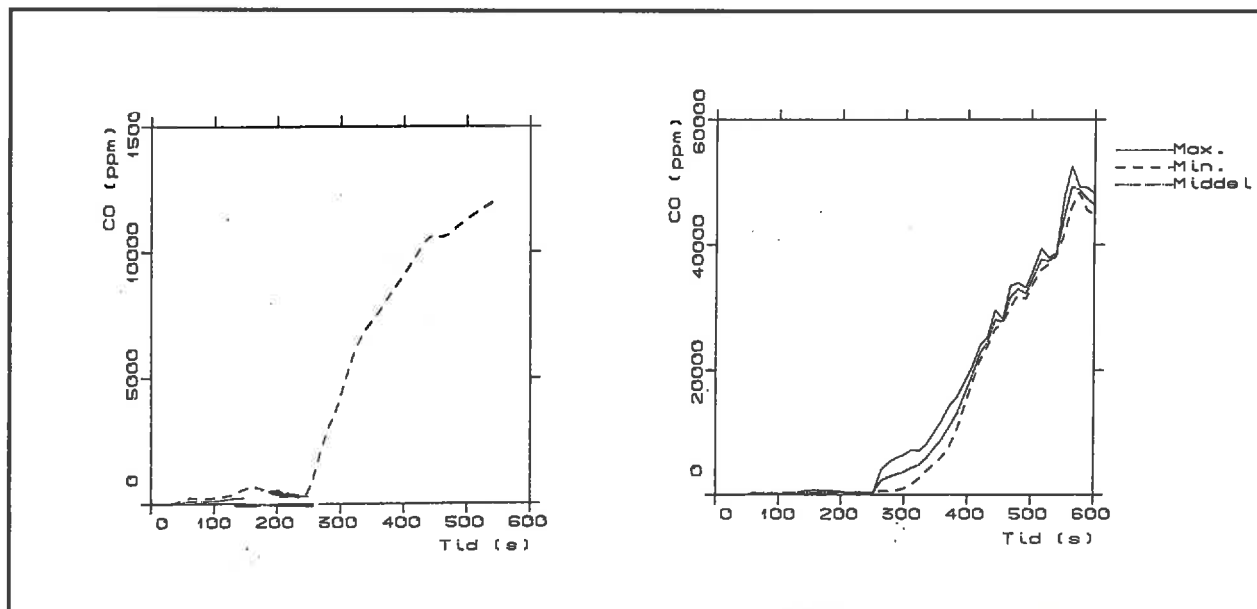


Figur 25 Tidsutvikling for konsentrasjon av HCN i korridor 5 på Gulf-dekk, midt i skipet, forut for tverrkorridor. Tegningen til venstre gjelder for lukkede dører, mens den til høyre gjelder for åpne dører. Tid fra startbrann 200 [kW].

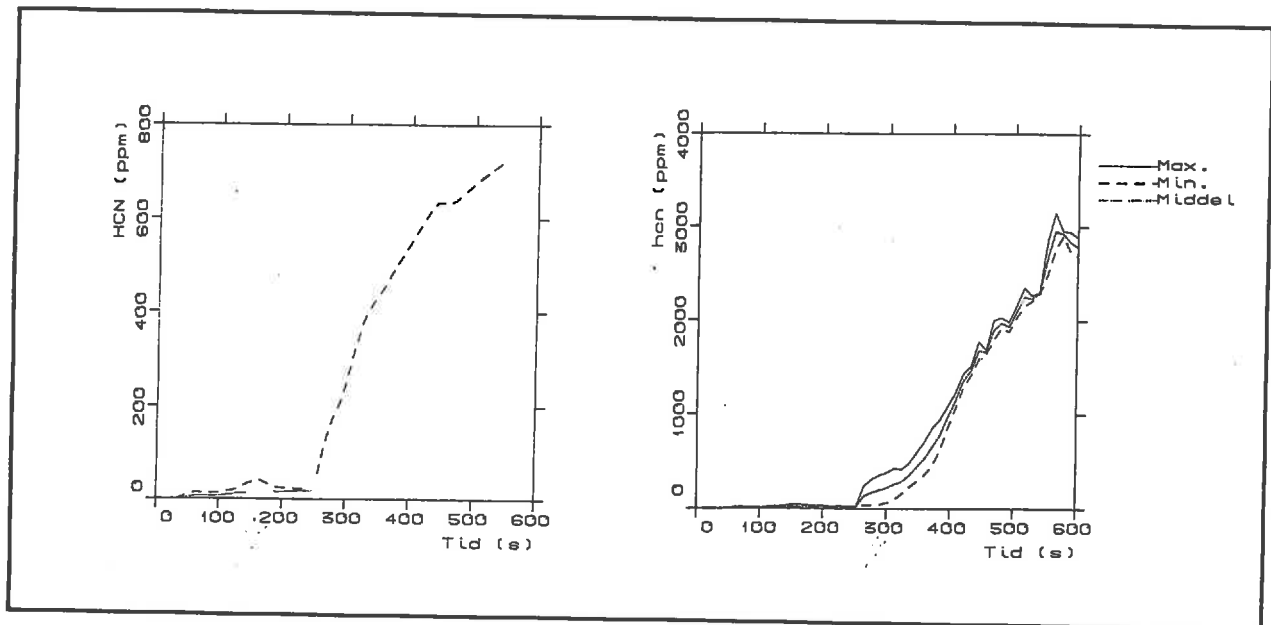
I denne korridoren, midt inne i en lugarseksjon forut for tverrkorridoren, er situasjonen også noe forskjellig med åpne og lukkede dører. Hvis branndører inn til tverrkorridoren lukkes i en tidlig fase av forløpet vil ventilasjonsluften forsinke kritisk dose av giftige gasser og temperatur. Endel av friskluften kommer forfra i skipet, gjennom resepsjonsområdet.



Figur 26 Tidsutvikling for temperatur i korridor 6 på Gulf-dekk, på styrbord side, forut for tverrkorridor. Tegningen til venstre gjelder for lukkede dører; den til høyre gjelder for åpne dører. Tid fra startbrann 200 [kW].

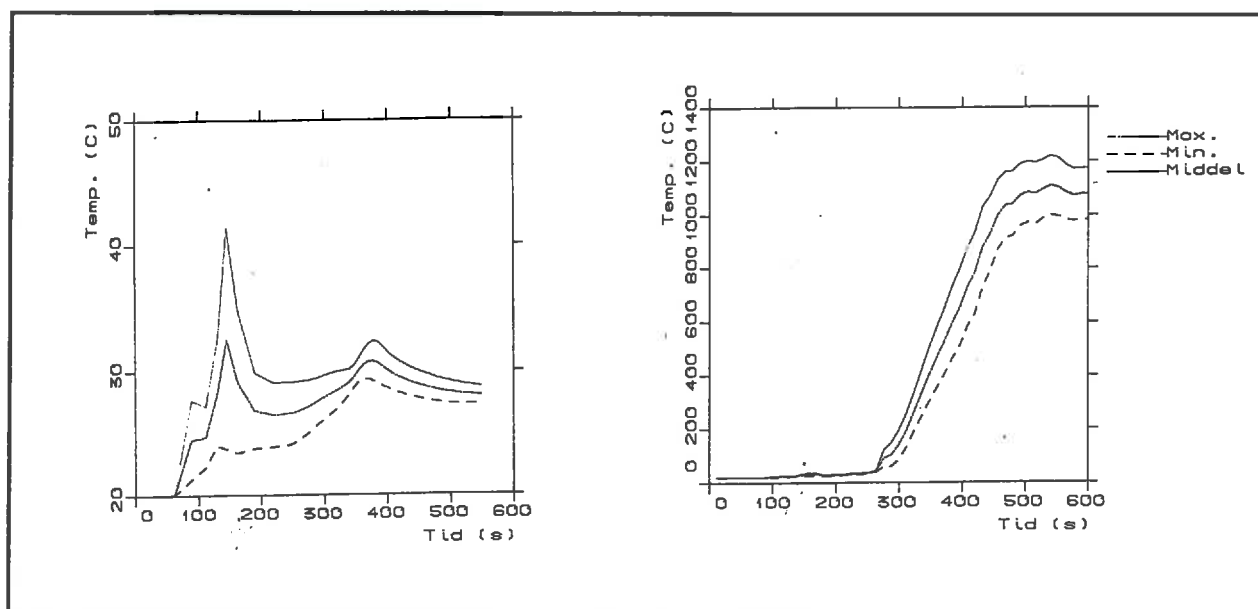


Figur 27 Tidsutvikling for konsentrasjon av CO i korridor 6 på Gulf-dekk, på styrbord side, forut for tverrkorridor. Tegningen til venstre gjelder for lukkede dører, den til høyre gjelder for åpne dører. Tid regnet fra startbrann 200 [kW].

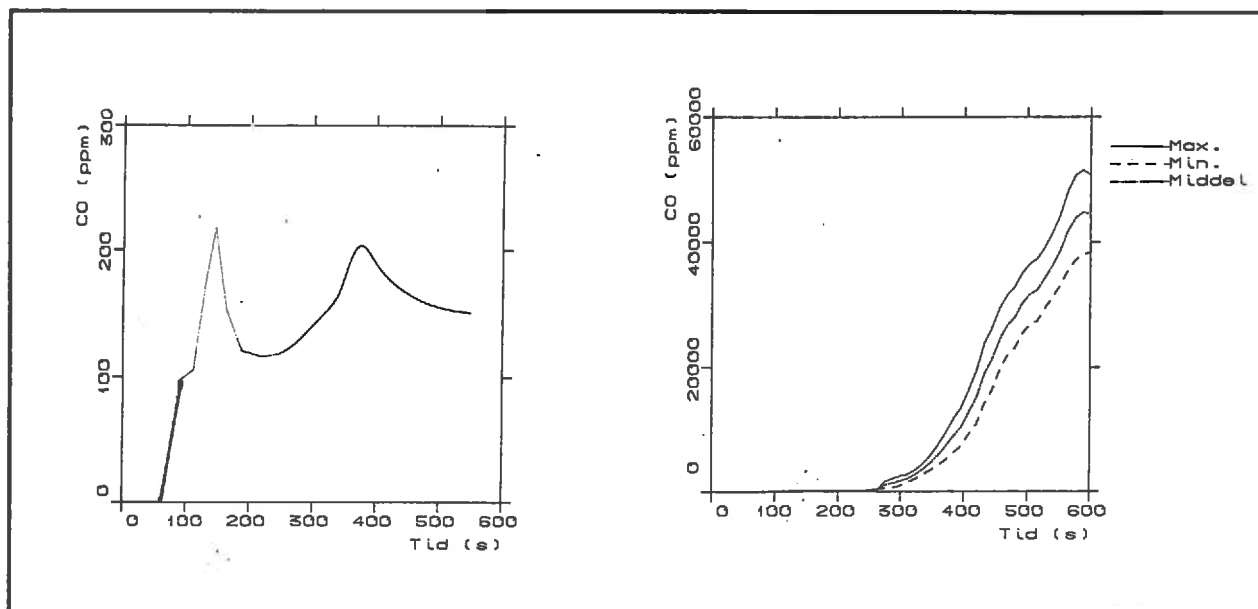


Figur 28 Tidsutvikling for konsentrasjon av HCN i korridor 6 på Gulf-dekk, på styrbord side, forut for tverrkorridor. Tegningen til venstre gjelder for lukkede dører, mens den til høyre gjelder for åpne dører. Tid fra startbrann 200 [kW].

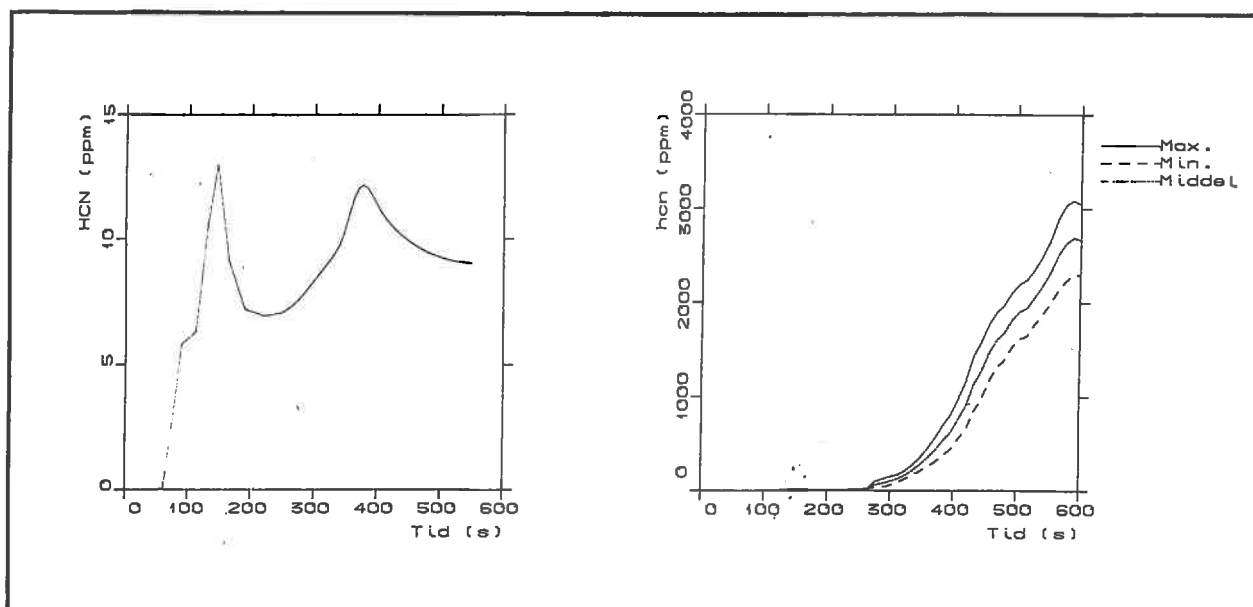
Korridor 6, forut for tverrkorridoren, på styrbord side, har direkte forbindelse med trappeløpet hvor primærbrannen spredte seg. Dette gjenspeiles i rask temperaturstigning, og rask stigning av konsentrasjon av CO og HCN. Forskjellen mellom åpne og lukkede dører kommer av ulik trykkfordeling i resten av tverrkorridoren. Den meget høye konsentrasjonen av CO etter ca. 8 minutter har sammenheng med måten dette er lagt inn i beregningene. Realismen i dette er kommentert i kapittel 4. DISKUSJON AV RESULTATER.



Figur 29 Tidsutvikling for temperatur i korridor 7 på Y-bor dekk, på babord side, akter. Tegningen til venstre gjelder for lukkede dører; den til høyre gjelder for åpne dører. Tid fra startbrann 200 [kW].

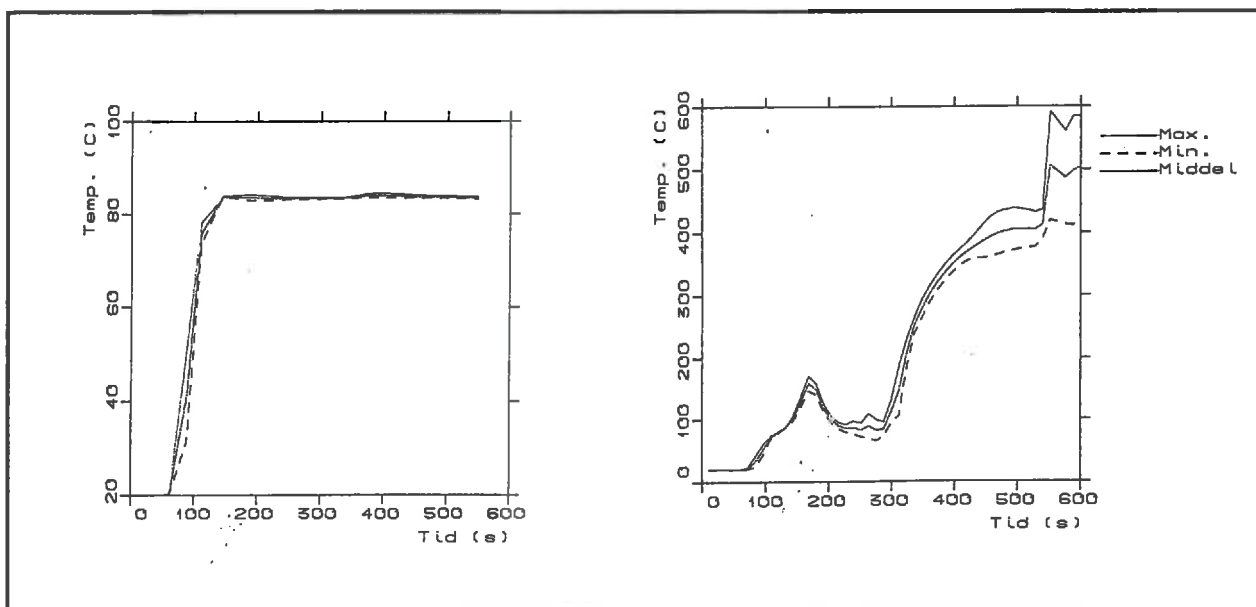


Figur 30 Tidsutvikling for konsentrasjon av CO i korridor 7 på Y-bor dekk, på babord side, akter. Tegningen til venstre gjelder for lukkede dører, den til høyre gjelder for åpne dører. Tid regnet fra startbrann 200 [kW].

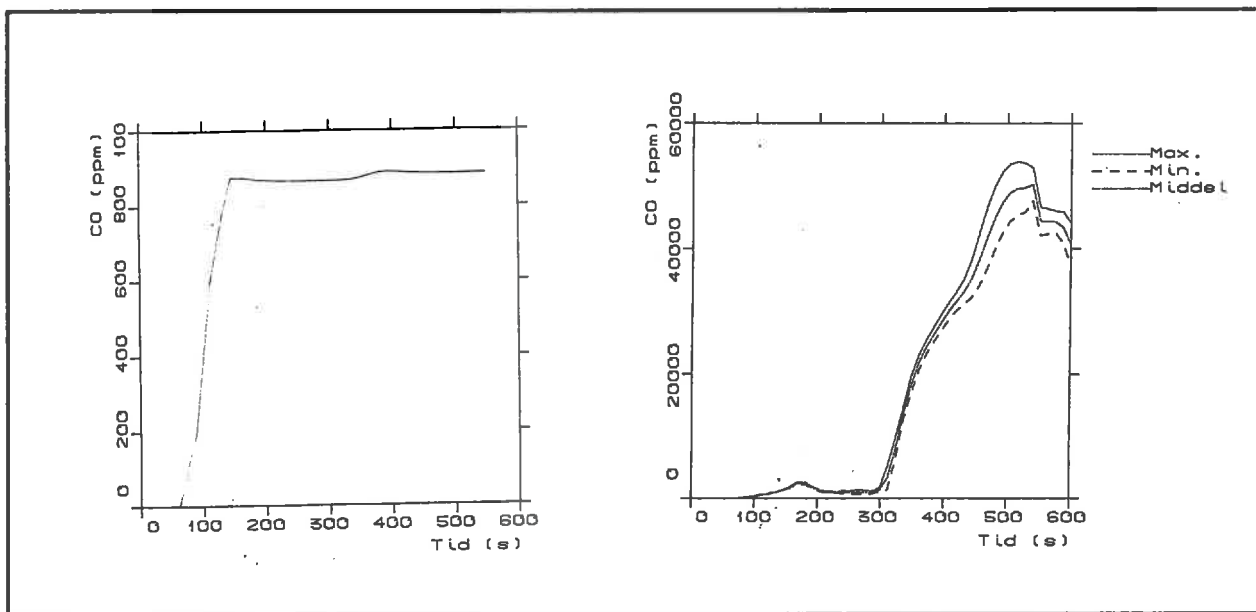


Figur 31 Tidsutvikling for konsentrasjon av HCN i korridor 7 på Y-bor dekk, på babord side, akter. Tegningen til venstre gjelder for lukkede dører, mens den til høyre gjelder for åpne dører. Tid fra startbrann 200 [kW].

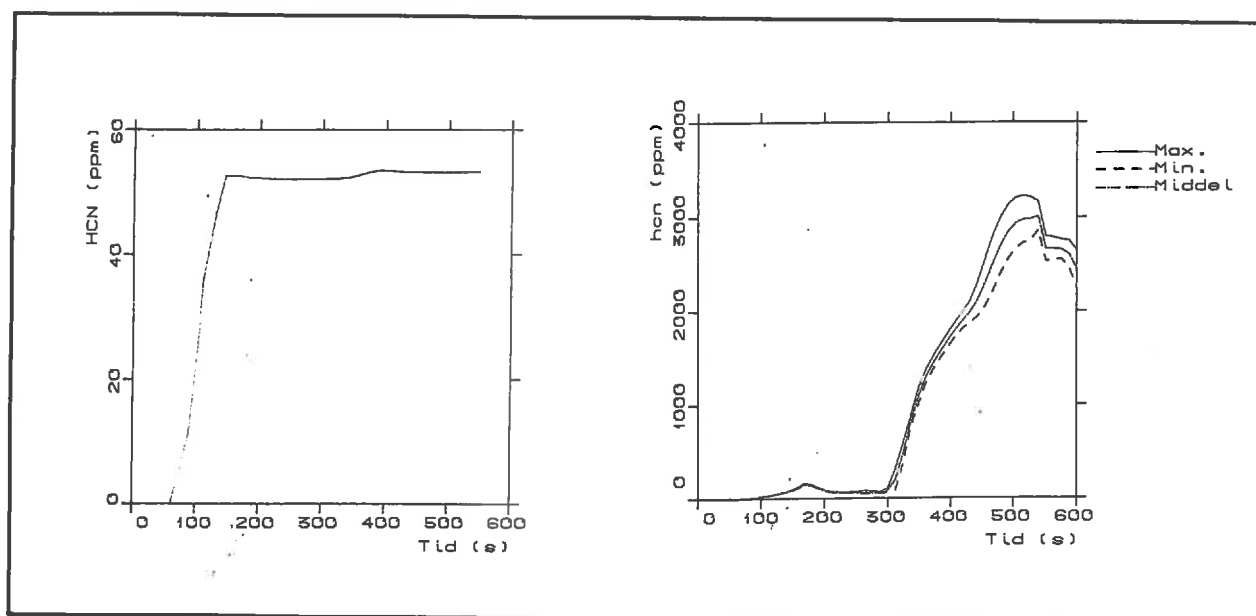
Denne korridoren ligger på Y-bor dekk, og det er forutsatt at branddører inn til korridor 7 lukkes i den ene beregningen. Siden denne korridoren ligger på et dekk under nøytralsjiktet, er det lite varm røyk som trenger inn her i den aller første fasen av brannen. Det er så lave konsentrasjoner av CO og HCN her ved lukkede dører at kritisk tilstand ikke oppnås i det hele tatt i beregningsperioden. Heller ikke i den umiddelbare tiden etter beregningsperioden på 10 minutter er det fare for kritiske doser av hver enkelt av de giftige gassene. Samvirke mellom gassene er ikke tatt i betraktning her.



Figur 32 Tidsutvikling for temperatur i korridor 8 på Y-bor dekk, på styrbord side, akter. Tegningen til venstre gjelder for lukkede dører; den til høyre gjelder for åpne dører. Tid fra startbrann 200 [kW].

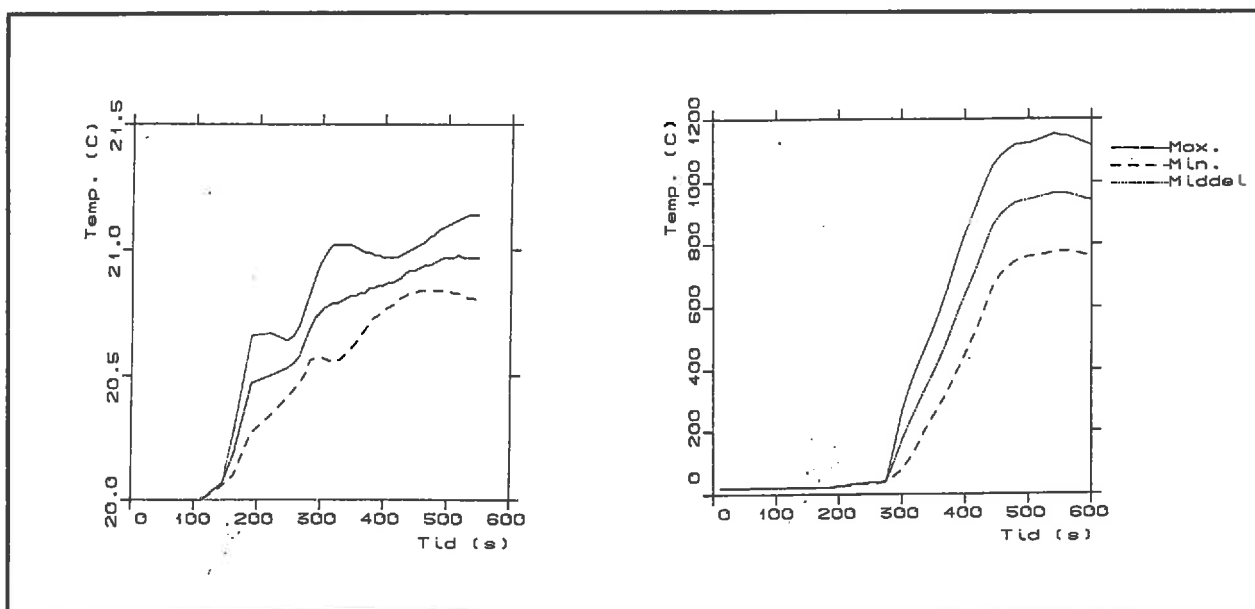


Figur 33 Tidsutvikling for konsentrasjon av CO i korridor 8 på Y-bor dekk, på styrbord side, akter. Tegningen til venstre gjelder for lukkede dører, den til høyre gjelder for åpne dører. Tid regnet fra startbrann 200 [kW].

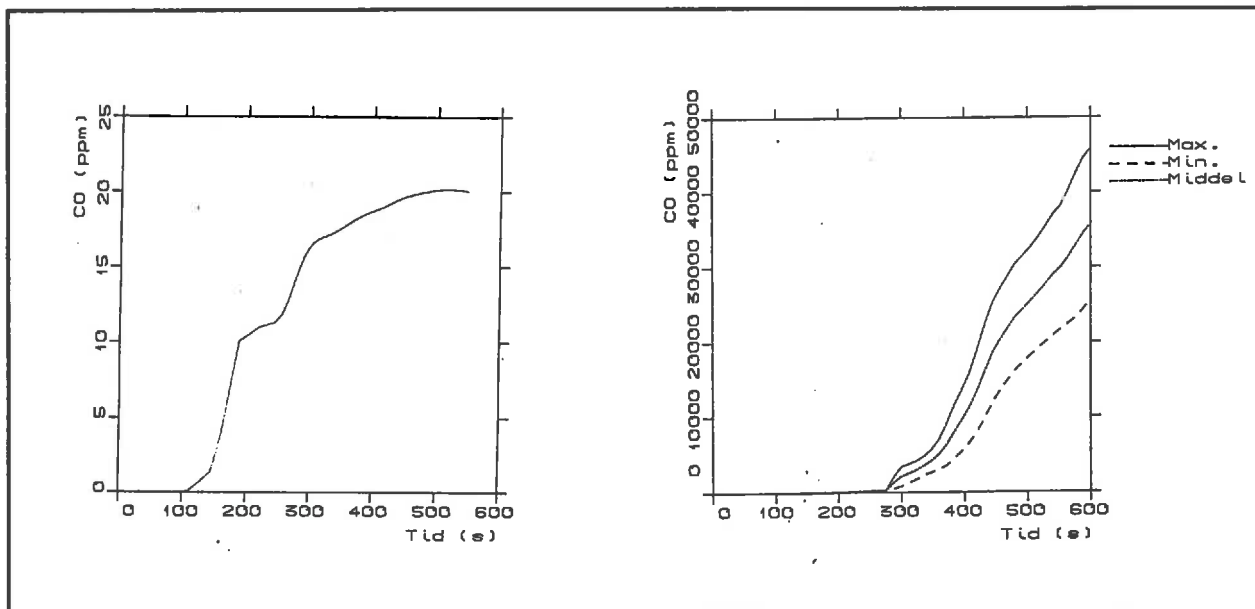


Figur 34 Tidsutvikling for konsentrasjon av HCN i korridor 8 på Y-bor dekk, på styrbord side, akter. Tegningen til venstre gjelder for lukkede dører, mens den til høyre gjelder for åpne dører. Tid fra startbrann 200 [kW].

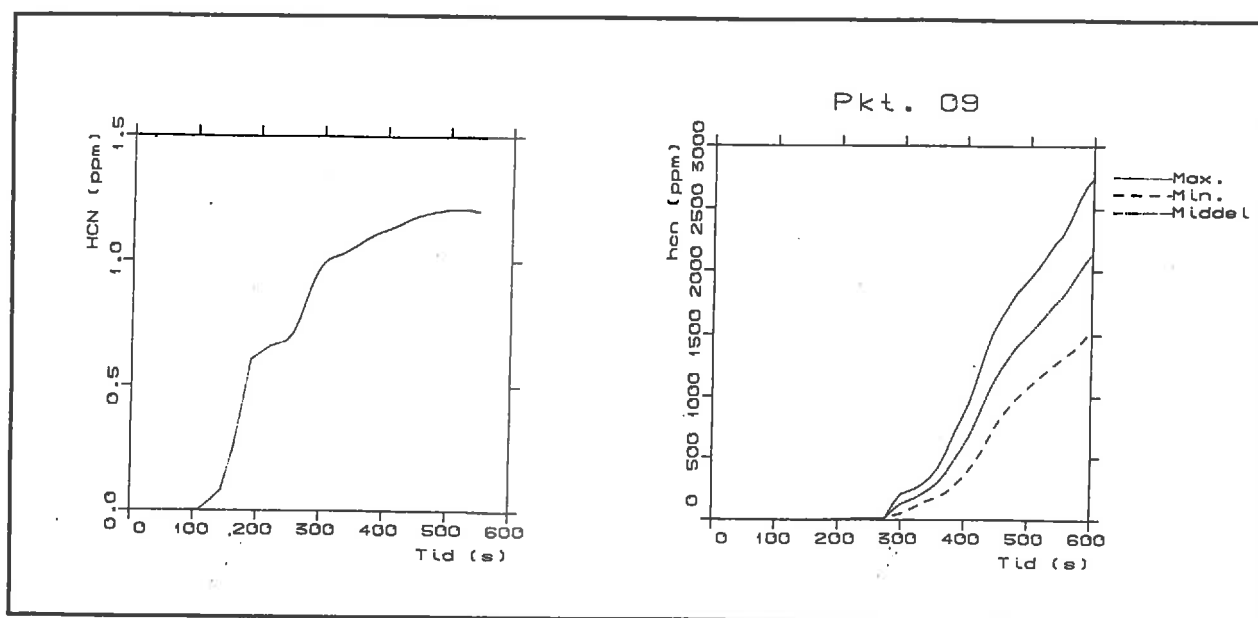
I korridor 8 på Y-bor dekk, aktenfor trappesjakt på styrbord side, er det også vesentlig forskjell på utviklingen i kritisk tilstand avhengig av om dører lukkes eller ikke. Ved lukking av branndører 2 minutter etter at startbrannen når 200 [kW] er det kommet endel varm røyk med giftige komponenter inn i korridoren, men siden den ligger lavt i båten er mengdene moderate i forhold til på Gulf-dekk. I beregningene er lufttilførselen til korridoren fra lugarene redusert til null etter at branndørene er lukket. En forutsetter at det ikke er tilstrekkelig overtrykk i ventilasjonsanlegget til å opprettholde særlig levering av luft når korridoren lukkes i begge ender. Den resulterende dose av giftige gasser er meget sterkt avhengig av når branndørene forutsettes lukket. I beregningene nås ikke kritisk tilstand i beregningsperioden, men dersom en forutsetter at konsentrasjonen av CO og HCN fortsatt ligger på nivået ved lukking av dører, inntreffer kritisk tilstand 20 - 40 minutter etter at startbrannen når 200 [kW]. Ved åpne dører nås kritisk tilstand raskt, etter bare 6-7 minutter.



Figur 35 Tidsutvikling for temperatur i korridor 9 på Y-bor dekk, på babord side, forut for trappesjakt. Tegningen til venstre gjelder for lukkede dører; den til høyre gjelder for åpne dører. Tid fra startbrann 200 [kW].



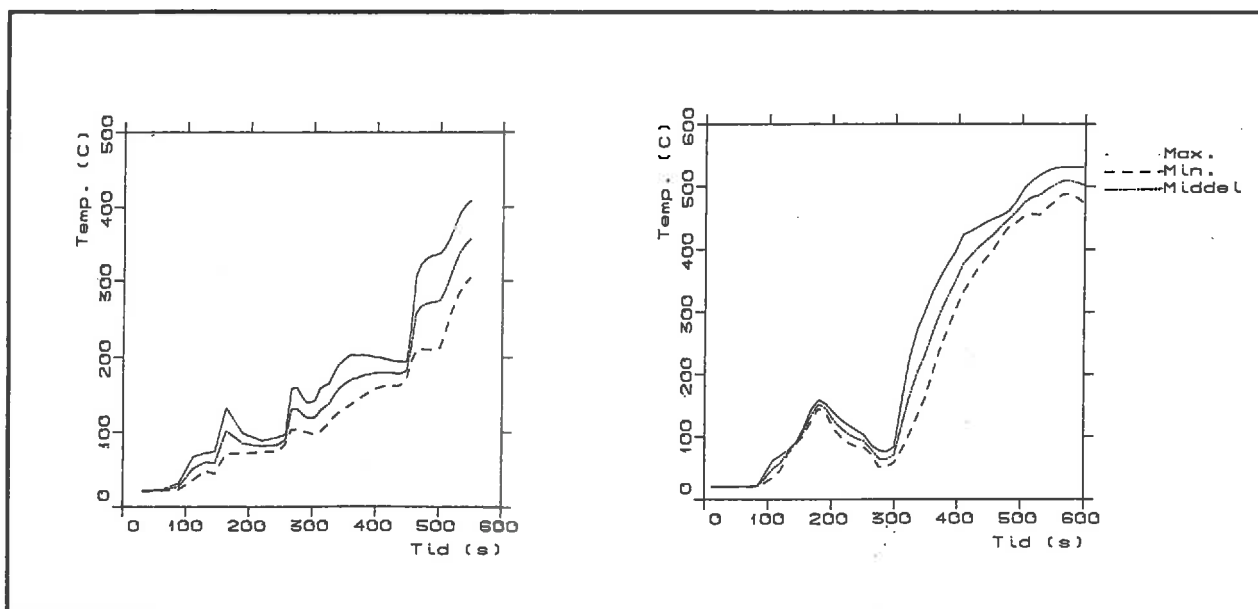
Figur 36 Tidsutvikling for konsentrasjon av CO i korridor 9 på Y-bor dekk, på babord side, forut for trappesjakt. Tegningen til venstre gjelder for lukkede dører, den til høyre gjelder for åpne dører. Tid regnet fra startbrann 200 [kW].



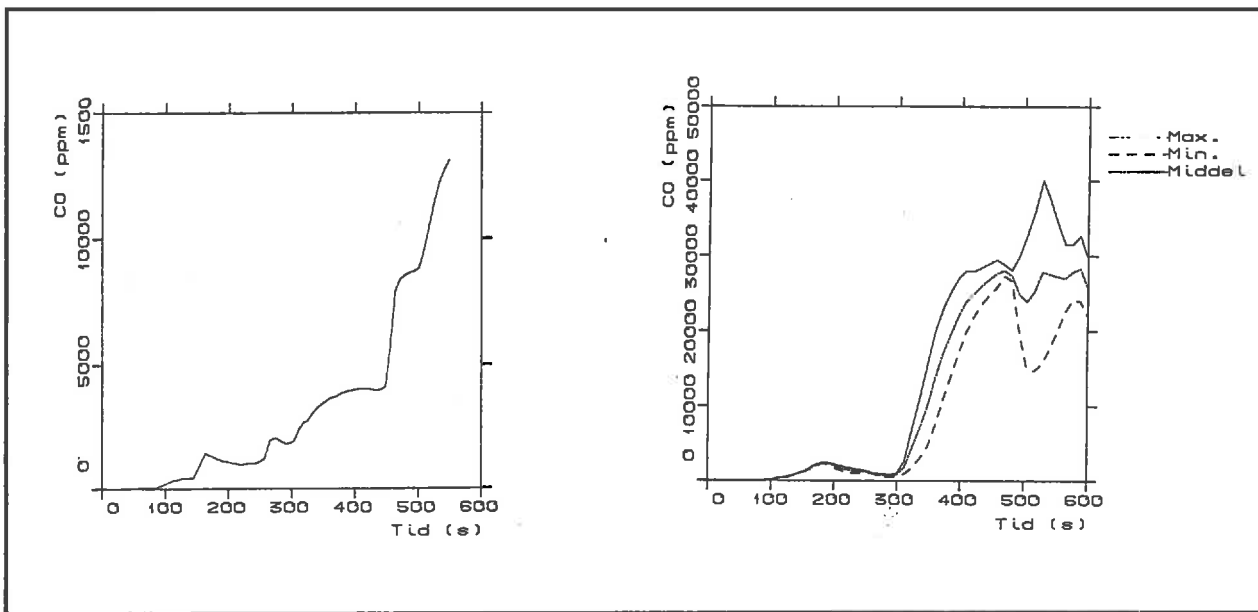
Figur 37 Tidsutvikling for konsentrasjon av HCN i korridor 9 på Y-bor dekk, på babord side, forut for trappesjakt. Tegningen til venstre gjelder for lukkede dører, mens den til høyre gjelder for åpne dører. Tid fra startbrann 200 [kW].

I korridor 9 på Y-bor dekk, forut for trappesjakt på babord side, er det også vesentlig forskjell på utviklingen i kritisk tilstand avhengig av om dører lukkes eller ikke. Ved lukking av branndører 2 minutter etter at startbrannen når 200 [kW] er det kommet endel varm røyk med giftige komponenter inn i korridoren, men siden den ligger lavt i båten er mengdene moderate i forhold til på Gulf-dekk. I beregningene er lufttilførselen til korridoren fra lugarene redusert til null etter at branndørene er lukket. En forutsetter at det ikke er tilstrekkelig overtrykk i ventilasjonsanlegget til å opprettholde særlig levering av luft når korridoren lukkes i begge ender. Den resulterende dose av giftige gasser er meget sterkt avhengig av når branndørene forutsettes lukket. I beregningene nås ikke kritisk tilstand i beregningsperioden, og heller ikke om en forutsetter at konsentrasjonen av CO og HCN fortsatt ligger på nivået ved lukking av dører, inntretr kritisk tilstand.

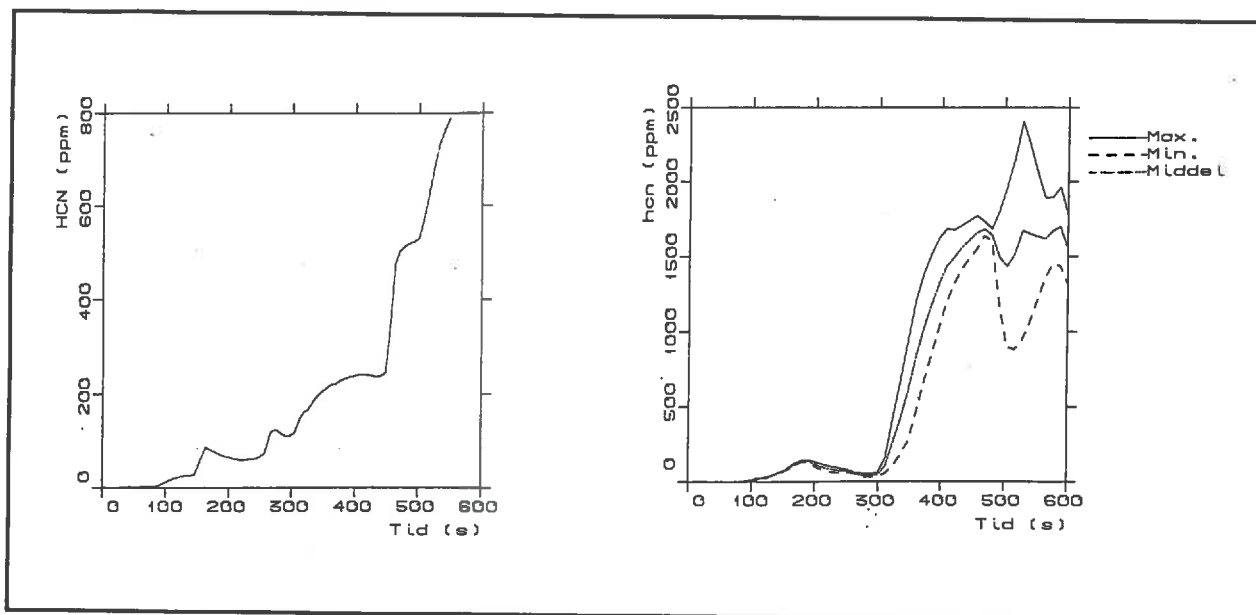
Ved åpne dører nås kritisk tilstand nokså raskt, etter 8 - 9 minutter.



Figur 38 Tidsutvikling for temperatur i korridor 10 på Y-bor dekk, på styrbord side, forut for trappesjakt. Tegningen til venstre gjelder for lukkede dører; den til høyre gjelder for åpne dører. Tid fra startbrann 200 [kW].

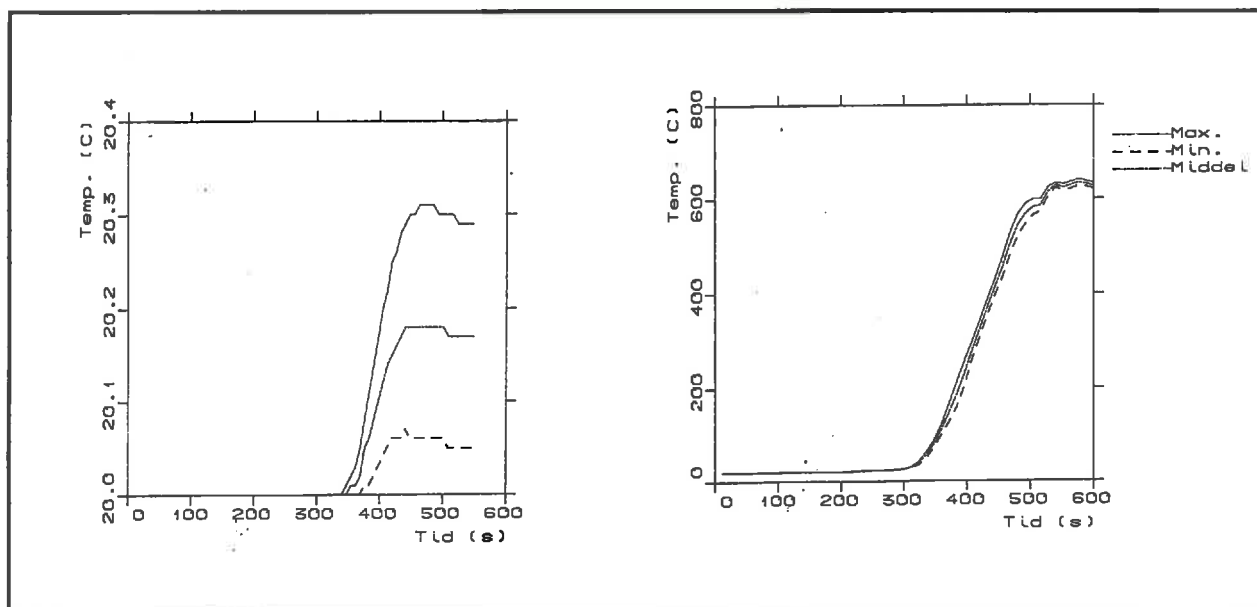


Figur 39 Tidsutvikling for konsentrasjon av CO i korridor 10 på Y-bor dekk, på styrbord side, forut for trappesjakt. Tegningen til venstre gjelder for lukkede dører, den til høyre gjelder for åpne dører. Tid regnet fra startbrann 200 [kW].

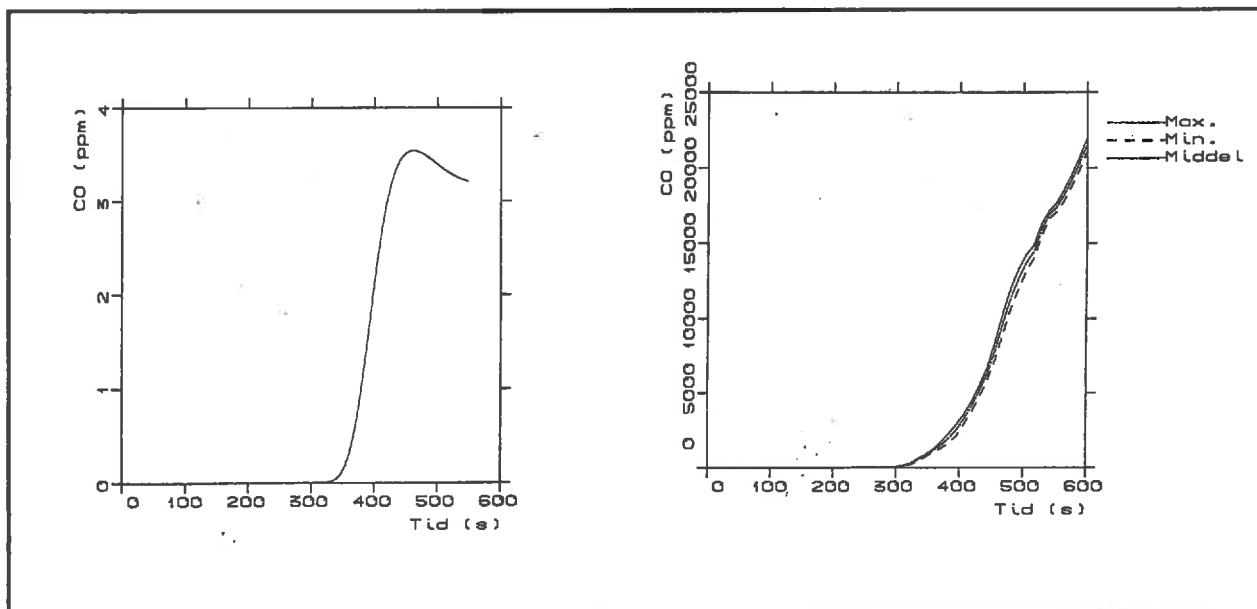


Figur 40 Tidsutvikling for konsentrasjon av HCN i korridor 10 på Y-bor dekk, på styrbord side, forut for trappesjakt. Tegningen til venstre gjelder for lukkede dører, mens den til høyre gjelder for åpne dører. Tid fra startbrann 200 [kW].

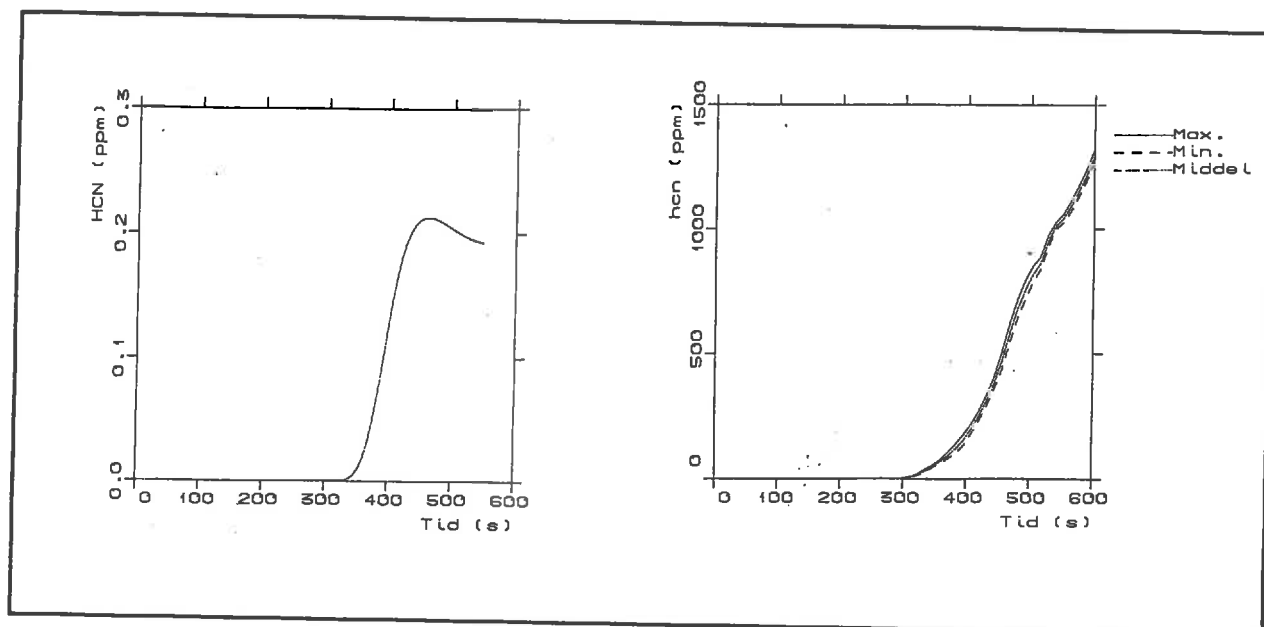
Korridor 10 på styrbord side, forut for trappesjakten hvor primærbrannen utviklet seg, er forutsatt å ha åpne dører til trappesjakten i begge beregningstilfellene. I enden i området under resepsjonen forutsettes åpen dør bare i beregning nr. 2. Tidsutviklingen i temperatur og konsentrasjon av giftige gasser er noe forskjellig i de to tilfellene, idet det i beregning med stengt dør i enden av korridoren blir noe langsommere utvikling mot kritisk tilstand. Tidsdifferansen er i størrelse 2 - 3 minutter.



Figur 41 Tidsutvikling for temperatur i korridor 11 på Bil-dekk, på babord side, akter. Tegningen til venstre gjelder for lukkede dører; den til høyre gjelder for åpne dører. Tid fra startbrann 200 [kW].



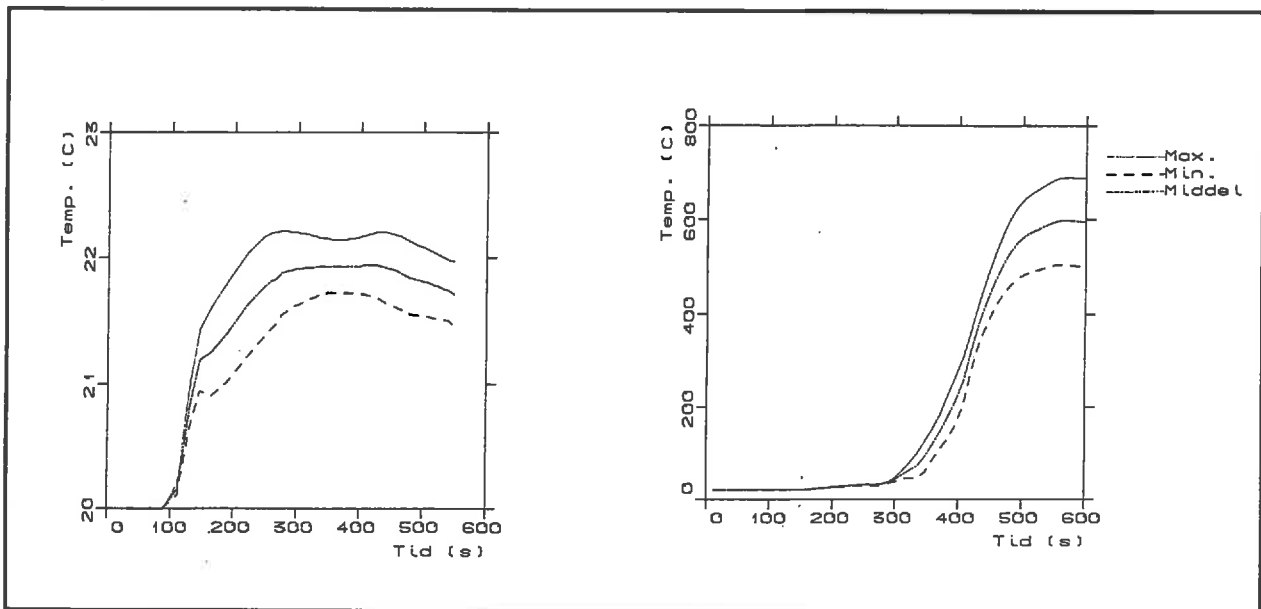
Figur 42 Tidsutvikling for konsentrasjon av CO i korridor 11 på Bil-dekk, på babord side, akter. Tegningen til venstre gjelder for lukkede dører, den til høyre gjelder for åpne dører. Tid regnet fra startbrann 200 [kW].



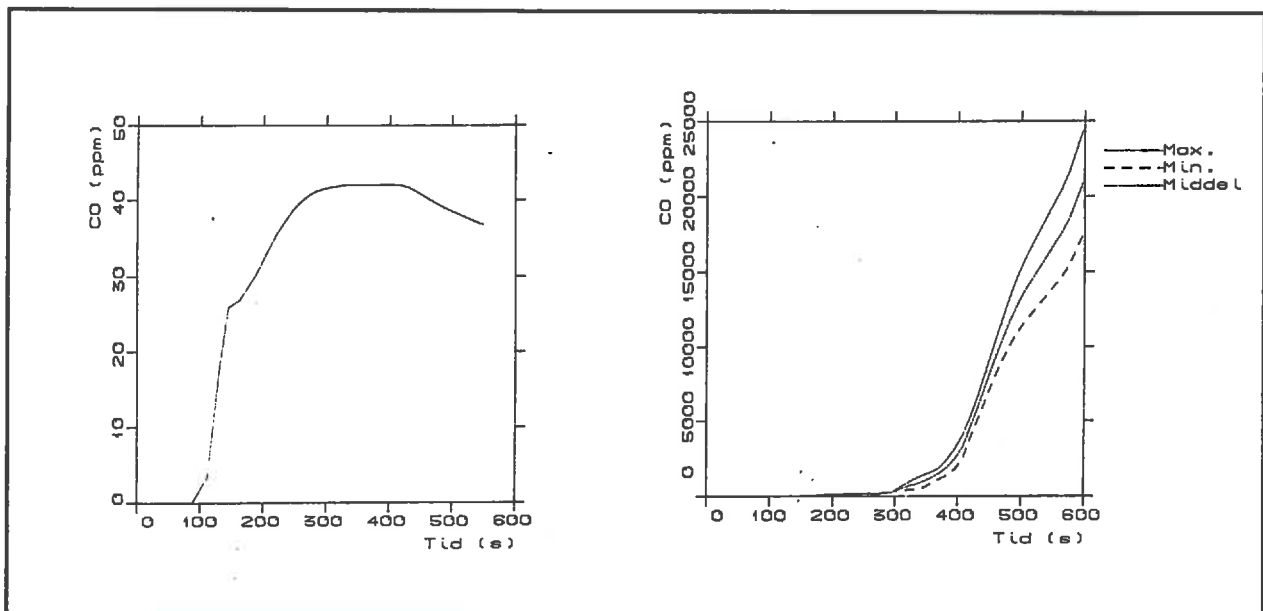
Figur 43 Tidsutvikling for konsentrasjon av HCN i korridor 11 på Bil-dekk, på babord side, akter. Tegningen til venstre gjelder for lukkede dører, mens den til høyre gjelder for åpne dører. Tid fra startbrann 200 [kW].

I korridor 11 på Bildekk, aktenfor trappeløp på babord side, er det også vesentlig forskjell på utviklingen i kritisk tilstand avhengig av om dører lukkes eller ikke. Ved lukking av branndører 2 minutter etter at startbrannen når 200 [kW] er det kommet endel varm røyk med giftige komponenter inn i korridoren, men siden den ligger lavt i båten er mengdene moderate i forhold til på Gulf-dekk. I beregningene er lufttilførselen til korridoren fra lugarene redusert til null etter at branndørene er lukket. En forutsetter at det ikke er tilstrekkelig overtrykk i ventilasjonsanlegget til å opprettholde særlig levering av luft når korridoren lukkes i begge ender. Den resulterende dose av giftige gasser er meget sterkt avhengig av når branndørene forutsettes lukket. I beregningene nås ikke kritisk tilstand i beregningsperioden, og heller ikke om en forutsetter at konsentrasjonen av CO og HCN fortsatt ligger på nivået ved lukking av dører, inntrer kritisk tilstand.

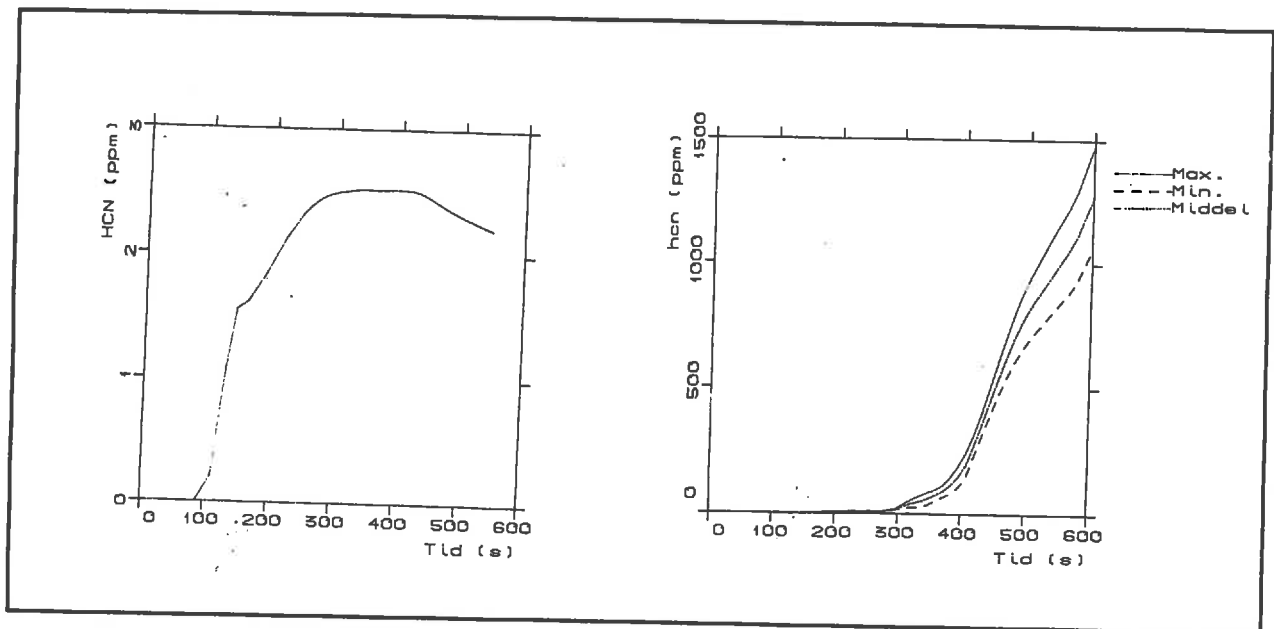
Med åpne dører inntrer kritisk tilstand 9 - 11 minutter etter at startbrannen er nådd 200 [kW].



Figur 44 Tidsutvikling for temperatur i korridor 13 på Bil-dekk, på babord side, forut for trappesjakt. Tegningen til venstre gjelder for lukkede dører; den til høyre gjelder for åpne dører. Tid fra startbrann 200 [kW].



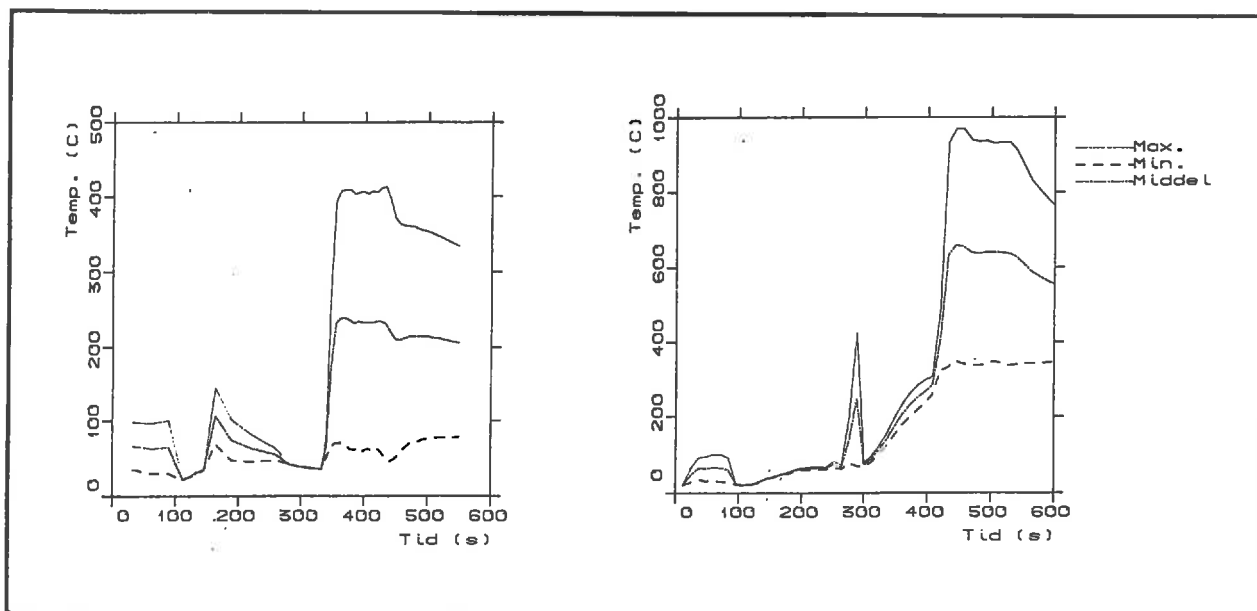
Figur 45 Tidsutvikling for konsentrasjon av CO i korridor 13 på Bil-dekk, på babord side, forut for trappesjakt. Tegningen til venstre gjelder for lukkede dører, den til høyre gjelder for åpne dører. Tid regnet fra startbrann 200 [kW].



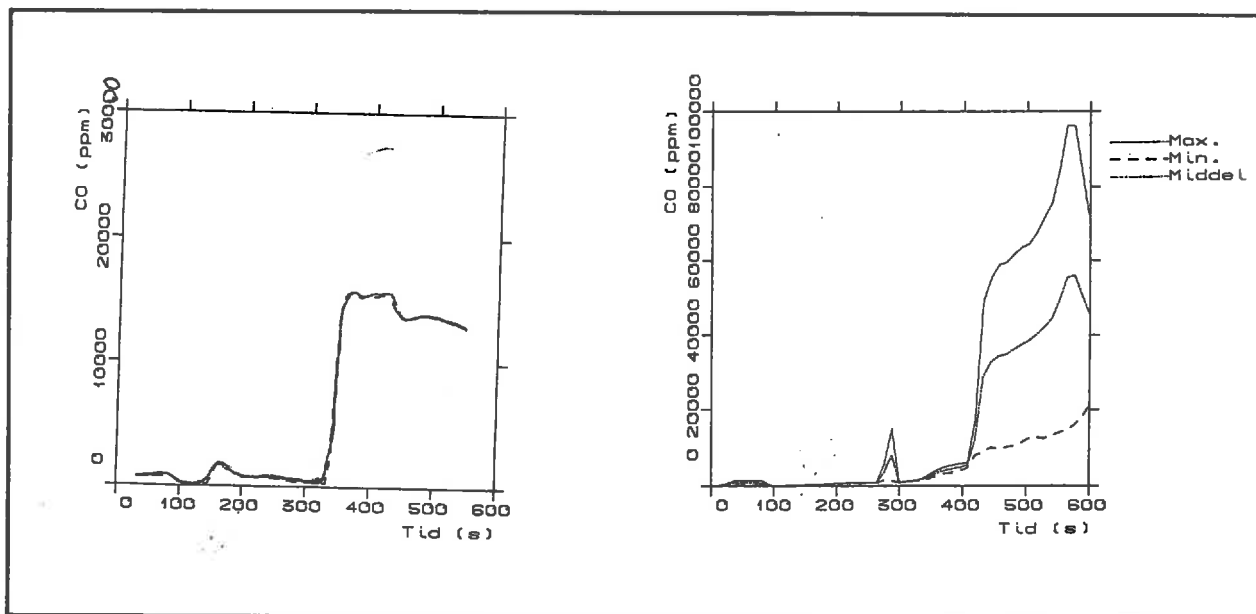
Figur 46 Tidsutvikling for konsentrasjon av HCN i korridor 13 på Bil-dekk, på babord side, forut for trappesjakt. Tegningen til venstre gjelder for lukkede dører, mens den til høyre gjelder for åpne dører. Tid fra startbrann 200 [kW].

I korridor 13 på Bil-dekk, forut for trappeløp på babord side, er det også vesentlig forskjell på utviklingen i kritisk tilstand avhengig av om dører lukkes eller ikke. Ved lukking av branndører 2 minutter etter at startbrannen når 200 [kW] er det kommet endel varm røyk med giftige komponenter inn i korridoren, men siden den ligger lavt i båten er mengdene moderate i forhold til på Gulf-dekk. I beregningene er lufttilførselen til korridoren fra lugarene redusert til null etter at branndørene er lukket. En forutsetter at det ikke er tilstrekkelig overtrykk i ventilasjonsanlegget til å opprettholde særlig levering av luft når korridoren lukkes i begge ender. Den resulterende dose av giftige gasser er meget sterkt avhengig av når branndørene forutsettes lukket. I beregningene nås ikke kritisk tilstand i beregningsperioden, og heller ikke om en forutsetter at konsentrasjonen av CO og HCN fortsatt ligger på nivået ved lukking av dører, inntrer kritisk tilstand.

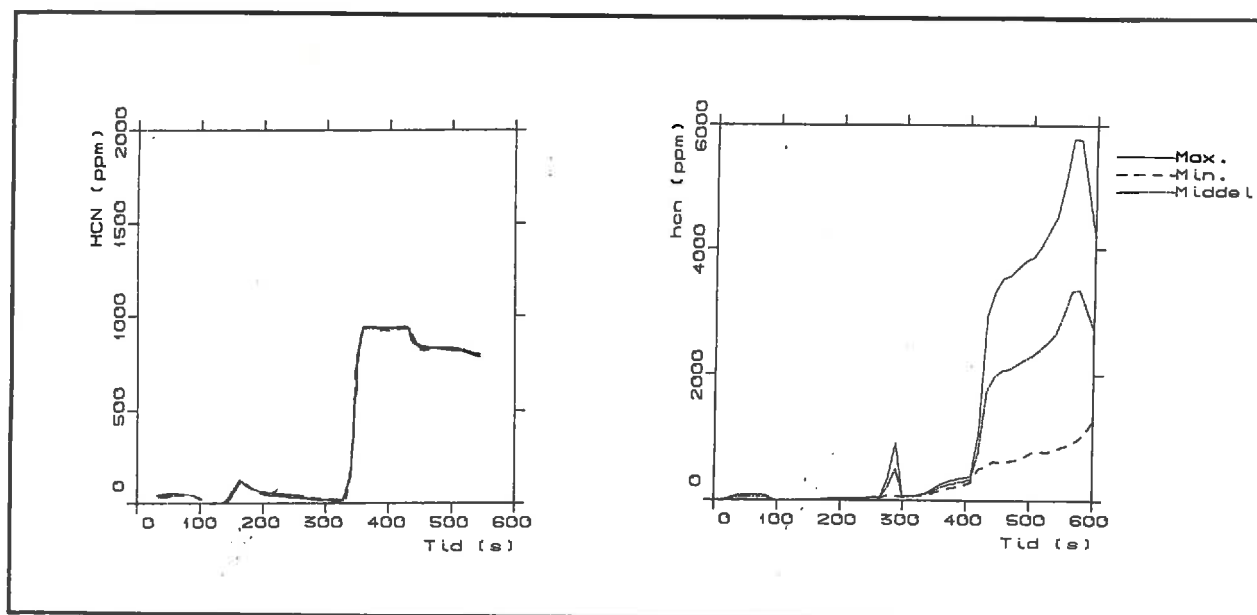
Med åpne dører inntrer kritisk tilstand 9 - 11 minutter etter at startbrannen er nådd 200 [kW].



Figur 47 Tidsutvikling for temperatur i korridor 14 på Bil-dekk, på styrbord side, forut for trappesjakt. Tegningen til venstre gjelder for lukkede dører; den til høyre gjelder for åpne dører. Tid fra startbrann 200 [kW].



Figur 48 Tidsutvikling for konsentrasjon av CO i korridor 14 på Bil-dekk, på styrbord side, forut for trappesjakt. Tegningen til venstre gjelder for lukkede dører, den til høyre gjelder for åpne dører. Tid regnet fra startbrann 200 [kW].



Figur 49 Tidsutvikling for konsentrasjon av HCN i korridor 14 på Bil-dekk, på styrbord side, forut for trappesjakt. Tegningen til venstre gjelder for lukkede dører, mens den til høyre gjelder for åpne dører. Tid fra startbrann 200 [kW].

Korridor 14 ligger i samme nivå som korridoren der primærbrannen forutsettes å starte, direkte knyttet til trappeløpet på styrbord side. Temperaturutviklingen viser at blir en endring av strømmingen idet noen av dørene lukkes, og det fører til at varm røyk som først strømmet inn i korridoren strømmet ut igjen. Ved brannspredning med overtenning i trappeløpet strømmet også endel røyk inn i korridoren igjen, for så å bli erstattet med frisk luft forfra i skipet. Utviklingen av gasskonsentrasjon i denne korridoren er følsom for forutsetningene med hensyn til ventilasjon og lukking av dører. I begge tilfeller, både med og uten lukking av dører, oppnås allikevel kritisk tilstand nokså raskt, 8 - 10 minutter etter at startbrannen har nådd 200 [kW]. Det er beregnet urealistisk høye nivå av CO og HCN i denne korridoren, noe som skyldes den måten konsentrasjonen er lagt inn i beregningene på. Se ellers kommentarer til dette i kapittel 4. DISKUSJON AV RESULTATER.

3.1 Sammenfatning av resultater fra beregninger.

Tabell II Beregning 1, med lukking av branndører. Tidspunkter for kritisk temperatur, dose av CO og HCN før mennesker blir overmannet av røyk. Tidspunktene gjelder hver gass individuelt, slik at eventuelt samvirke ikke er tatt med.

Kritisk tid i minutter fra startbrannen overstiger 200 [kW].

Posisjon	Temperatur 200 °C	CO dose 35000 ppm min	HCN dose 1000 ppm min
Main dekk	6.2	12	9
Gulf dekk: Korridor 1	6.7	11	9
Korridor 2	7	11.5	9.5
Korridor 3	5	8.7	6.6
Korridor 4	6	11	9.1
Korridor 5	6.7	10.6	7.9
Korridor 6	5	8.2	7.1
Y-bor dekk: Korridor 7	-	-	-
Korridor 8	-	39	18.2
Korridor 9	-	-	-
Korridor 10	7.5	10.7	9.2
Bildekk: Korridor 11	-	-	-
Korridor 12	*	*	*
Korridor 13	-	-	-
Korridor 14	5.7	8.3	6.6

Symboler: - Ikke oppnådd kritisk verdi i beregningene.
 * Irrelevante eller manglende data.

De verdier som angis i tabell II er rene beregningsresultater. Vurdering av usikkerhet ved beregninger og ved utgangspunktet for beregningene er gjennomført, og nye estimat for tid til kritisk tilstand er gitt i tabell IV.

Tabell III Beregning 2, uten lukking av branndører. Tidspunkter for kritisk temperatur, dose av CO og HCN før mennesker blir overmannet av røyk. Tidspunktene gjelder hver gass individuelt, slik at eventuelt samvirke ikke er tatt med.

Kritisk tid i minutter fra startbrannen overstiger 200 [kW].

Posisjon	Temperatur 200 °C	CO dose 35000 ppm min	HCN dose 1000 ppm min
Main dekk	10	13.4	10.8
Gulf dekk:			
Korridor 1	5	6.9	7.1
Korridor 2	5	8.5	7.2
Korridor 3	5	7.9	6.9
Korridor 4	4.5	7.8	6.8
Korridor 5	4.7	7.4	6.5
Korridor 6	4.7	7.4	6.5
Y-bor dekk:			
Korridor 7	5.2	7.8	7.0
Korridor 8	5.3	7	5.9
Korridor 9	5	8.2	7.2
Korridor 10	5.3	7.3	6.6
Bildekk:			
Korridor 11	6.5	9.6	8.4
Korridor 12	2*	5.6*	5.1*
Korridor 13	6.6	9.6	8.4
Korridor 14	6	8.5	7.5

Symboler: - Ikke oppnådd kritisk verdi i beregningene.
* Irrelevante eller manglende data.

De verdier som angis i tabell III er rene beregningsresultater. Vurdering av usikkerhet ved beregninger og ved utgangspunktet for beregningene er gjennomført, og nye estimat for tid til kritisk tilstand er gitt i tabell V.

3.2 Røykinntrengning i lugarer.

Lugarene er ventilert slik at det ved normal drift er overtrykk inne i rommet. Frisk luft tilføres i en ventil i taket, og en del av luften trekkes av på WC/dusj. Overskuddsluften presses ut gjennom spalter under og rundt dørene, og lekker ut til korridoren. Så lenge ventilasjonssystemet går, og frisklufttilførselen ikke forurenses med røyk, vil det derfor ikke trenge røyk inn på

lugarene. Selv om det bygges opp et overtrykk i korridoren på grunn av utvidelse av luft ved oppvarming, vil dette overtrykket ikke overstige differansetrykket på grunn av tilført luftoverskudd. Beregningseksempel for dette er vist i VEDLEGG D.

Et mulig forløp for konsentrasjon av giftig gass inne i en lugar basert på lekkasjeåpning under en dør og overtrykk skapt av varmeutviklingen i brannen er også vist i VEDLEGG D. Med en konsentrasjon av CO som beregnet i styrbord korridor, aktenfor tverrkorridoren på Gulf-dekk, og med de overtrykk som kan regnes der, er det beregnet en tid til kritisk dose for at et menneske overmannes av røyk. Denne tiden er ca. 14 minutter etter at ventilasjonsanlegget slås av, forutsatt at konsentrasjonen av CO er konstant 10000 [ppm] i denne perioden. Dersom konsentrasjonen av CO var 5000 [ppm] ville tilsvarende kritisk tid være 20 minutter.

4. DISKUSJON AV RESULTATER.

4.1 Temperaturutvikling.

Som vist i grunnlaget for beregninger, i kapittel 2, og i videre utdypning i Vedlegg C8, blir temperaturene i røyken overestimert i beregningene. Ved dekknivå for Main dekk er temperaturforløpet tilpasset resultatene fra fullskalaforsøk SC-7, så i en viss periode er temperaturforløpet her korrekt. Imidlertid er effektutviklingen som er lagt inn i beregningene et kompromiss som er gjort for å få med produksjonsrater for gasser og varmeutvikling i den første fasen av brannforløpet. Selve effektforløpet i fullskalaforsøk SC-7 er karakterisert ved en fase hvor brannen sprer seg i veggmaterialiet ved startbrannen på 200 [kW]. Dette foregår i ca 2 minutter. I forsøket ble da lufttilførselen økt, og brannen økte også i intensitet i korridoren. Effekten var ca 1000 [kW] i en periode på 2.5 minutter. Da spredte brannen seg inn i trappeløpet, og økte da meget raskt til all oksygen som ble tilført ble forbrukt. Det er fra dette tidspunkt de høye temperaturer og konsentrasjoner opptrer, og tiden før en når kritiske doser er meget kort. Ved analyse av temperaturforløp i forhold til effektutvikling, spesielt den som ble funnet ut ifra temperaturmålinger i fullskalaforsøket, er det rimelig å legge til ca 2 minutter på tid for kritisk temperatur i forhold til beregningsresultatene. I tillegg kan de høyeste temperaturene reduseres ved å forestille seg større varmetap til omgivelsene.

Begge disse betraktningene er foretatt, og resultatene er vist i tabell IV og V.

4.2 Konsentrasjon av CO.

Konsentrasjon av CO er i beregningene en følge av fortynning av røykgasser med luft som allerede er tilstede i korridorer og trappeløp, og som blir tilført ved ventilasjonsanlegg og lekkasjer. Dersom massestrømmen av røyk og konsentrasjon er rett, vil beregningsmodellen forutsi konsentrasjon med god presisjon i alle deler av skipet. Usikkerheten i beregningene ligger i første rekke i produksjonsleddet, idet målingene ikke er dokumentert for de høyeste verdiene. Dette skyldes at konsentrasjonen i den mest intense fasen av brannen i forsøk SC-7 oversteg det innstilte måleområdet i gassanalysatoren. Beregnede verdier av konsentrasjon av CO, hvor maksimalkonsentrasjonen blir ca 40000 [ppm] eller 4%, er imidlertid i overensstemmelse med erfaringer fra andre forsøk, og med publiserte data /5/. Resultatene for CO-konsentrasjon anses for å være de mest pålitelige estimat når det gjelder kritiske forhold i korridorer og på lugarer. Usikkerheten i angivelse av kritisk tid før en person blir overmannet av røyk ligger først og fremst i usikkerheten om åpning og lukking av dører, om antakelsene om luftmengder tilført og avsuget via ventilasjonsanlegget og menneskers ulike toleranse overfor CO-eksponering.

I Tabell IV og V er tidspunktene for kritisk tid for CO - eksponering kun avrundet oppover til nærmeste minutt i forhold til beregningsresultatene.

4.3 Konsentrasjon av HCN.

Maksimalkonsentrasjonen av HCN målt i forsøk SC-7 var ca. 1150 [ppm], men da ble måleområdet for gassanalysatoren overskredet. I beregningene er produksjonen av gasskomponenter knyttet til avbrenningsraten, som er satt proporsjonal med effektutviklingen. Som en følge av proporsjonalitetsbetraktningen mellom effektutvikling og produksjonsrate for HCN blir beregnet maksimumskonsentrasjon ca 8000 [ppm] i posisjoner nær opp til trappeløpet hvor brannen utviklet seg. Dette kan være korrekt, men det finnes ingen verifikasjon for dette.

Det er ganske lav konsentrasjon av HCN i alle deler av akterskipet fram til brannen sprer seg fra startkorridoren til trappesjakten. Ved beregning av tid til kritisk dose av HCN blir det derfor relativt små tidforskjeller om en forandrer konsentrasjonsforløpet i tidsrommet etter 5 minutters brann i korridor.

I tabell IV og V er en vurdering av usikkerheten omkring maksimumskonsentrasjon foretatt, og som følge av dette er tidspunktene for at en person blir overmannet av røyk på grunn av HCN alene strukket noe ut i tiden etter brannspredning til trappeløpet.

5. KONKLUSJONER

Beregninger foretatt med utgangspunkt i resultater fra fullskalaforsøk SC-7, fra materialundersøkelser, fra undersøkelsen av ventilasjonsanleggets driftsforhold og av branndørers posisjon i løpet av brannen i Scandinavian Star har belyst og utdypet flere av de mulig hendelsesforløp som er lansert i løpet av granskingen.

Beregningene er foretatt for å belyse effekter som er vanskelig å bedømme ut ifra overslag, og gir spesielt et bilde av tidsforløp som er vanskelig å finne ut av fra åstedsgransking.

5.1 Strømningsbildet.

I starten på brannen lokalisert i korridor på Bildekk-nivå, (C-dekk) på styrbord side aktenfor trappeløp, påvirkes brannutviklingen og røykspredningen i stor grad av ventilasjonsanleggets driftsforhold. Særlig preger et undertrykk på biloppstillingsdelen av Bildekk strømningsmønsteret for røyk, idet en stor luftstrøm går nedover trappeløpet på babord side. Etterhvert som brannen i korridoren øker til overtenning og sprer seg til trappeløpet på styrbord side, øker også temperaturen i de tilstøtende korridorer raskt, og konsentrasjonen av CO og HCN øker tilsvarende. Oppdriften i varme røykgasser preger etterhvert strømningsbildet, slik at det i beregningene tildels framkommer sjiktet strømning i korridorer, til og med motsatt strømningsretning.

Ved høy røyktemperatur vil oppdriften dominere røykspredningen mer og mer, men den nedadrettede strømmen i trappeløpet på babord side påvises i beregningen utover i hele det primære brannforløpet, i den perioden beregningen varer. Dette gjelder enten branndører blir lukket eller ikke.

5.2 Temperaturforløp.

Varme forbrenningsgasser spres i korridornettet og fortynnes med luft som finnes der fra før, og med ventilasjonsluft og luft fra andre deler av skipet. I beregningene underestimeres varmetapet til vegger, tak og gulv, noe som er forklart ved beskrivelsen av beregningsmetoden, i kapittel 2.1. Dette gir noe for høye temperaturer i de presenterte resultatene. Imidlertid er det relativt høy temperatur i røyken som forlater trappeløpet på styrbord side, høy nok til å kunne antenne overflater og innredning dersom eksponeringen er av lang nok varighet.

5.3 Tid til kritisk tilstand.

Ved estimat av tid til kritisk tilstand i de enkelte korridorer er det tatt utgangspunkt i et konsept med kritisk dose et menneske kan bli eksponert for før det mister evnen til å unnsnippe på egen hånd (på engelsk: incapacitation). Disse dosene har individuelle

variasjoner, og de er ikke uavhengig av hverandre. Samvirke mellom høy temperatur, lavt oksygeninnhold og høyt innhold av CO₂ i luften og konsentrasjon av giftige gasser som CO og HCN er ikke tatt med ved presentasjonen av kritiske tider. Dette kan vurderes ved analyse av resultatene.

Resultatene som vises i tabell IV og V viser at tidspunktet for lukking av branndører sterkt påvirker røykspredningsforløpet. Lukking av dører tidlig i brannforløpet og fortsatt tilførsel av frisk luft via ventilasjonsanlegget kan forlenge oppholdstid før kritisk tilstand både i korridorer og i lugarer vesentlig.

Røykinntrengning i lugarer er dels bestemt av hvilket dekknivå en befinner seg på, og av ventilasjonsanleggets drift. I tidlig fase gir ventilasjonsanlegget tilstrekkelig overtrykk til å hindre røykspredning til lugarene på alle dekk. Når ventilasjonsanlegget slås av, er det først kritisk på Gulf-dekk på grunn av overtrykk skapt av de termiske kreftene. Lekkasje over himling vil være av størst betydning, siden overtrykket er størst ved taknivå.

For ytterligere konklusjoner vises til tabell IV og V.

Tabell IV Estimert av tidspunkter for kritisk temperatur, dose av CO og HCN før mennesker blir overmannet av røyk. Gjelder uten lukking av branndører. Tidspunktene gjelder hver gass individuelt, slik at eventuelt samvirke ikke er tatt med.

Kritisk tid i minutter fra startbrannen overstiger 200 [kW].

Posisjon	Temperatur 200 °C	CO dose 35000 ppm min	HCN dose 1000 ppm min
Main dekk	12 - 14	14	12
Gulf dekk:			
Korridor 1	7 - 9	7	8
Korridor 2	7 - 9	9	8
Korridor 3	7 - 9	8	8
Korridor 4	7 - 9	8	8
Korridor 5	7 - 9	8	8
Korridor 6	7 - 9	8	8
Y-bor dekk:			
Korridor 7	7 - 9	8	8
Korridor 8	7 - 9	7	6
Korridor 9	7 - 9	9	8
Korridor 10	7 - 9	8	7
Bildekk:			
Korridor 11	9 - 11	10	9
Korridor 12	*	*	*
Korridor 13	9 - 11	10	9
Korridor 14	8 - 10	9	8

Symboler: - Ikke oppnådd kritisk verdi i beregningene.
* Irrelevante data.

Tabell V Estimert av tidspunkter for kritisk temperatur, dose av CO og HCN før mennesker blir overmannet av røyk. Gjelder når branndører lukkes. Tidspunktene gjelder for hver gass individuelt, slik at eventuelt samvirke ikke er tatt med.

Kritisk tid i minutter fra da startbrannen overstiger 200 [kW].

Posisjon	Temperatur 200 °C	CO dose 35000 ppm· min	HCN dose 1000 ppm min
Main dekk	8 - 10	12	11
Gulf dekk:			
Korridor 1	9 - 11	11	11
Korridor 2	9 - 11	12	11
Korridor 3	7 - 9	9	8
Korridor 4	9 - 11	11	11
Korridor 5	9 - 11	11	9
Korridor 6	7 - 9	9	8
Y-bor dekk:			
Korridor 7	-	-	-
Korridor 8	-	40	20
Korridor 9	-	-	-
Korridor 10	9 - 11	11	10
Bildekk:			
Korridor 11	-	-	-
Korridor 12	*	*	*
Korridor 13	-	-	-
Korridor 14	8 - 10	9	8
Symboler: - Ikke oppnådd kritisk verdi i beregningene. * Irrelevante data.			

6. REFERANSER

1. Meland, Øystein: Brannen ombord i Scandinavian Star. En vurdering av ventilasjonsanleggets betydning i det tidlige brannforløpet. SINTEF rapport STF25 F90010, Norges branntekniske laboratorium, Trondheim, juli 1990.
2. Meland, Øystein; Lønvik, Lars E.: Fullskalaforsøk korridor, trappeløp. Scandinavian Star. Målerapport. SINTEF rapport STF25 F90011, Norges branntekniske laboratorium, Trondheim, august 1990.
3. Laxå, Brynjar; Vembe, Bjørn Erling: KAMELEON II. PROGRAMDOKUMENTASJON. SINTEF rapport, under arbeid.
4. Prøvning iht ISO 1716 - 1973. Sag F 6846 a, Dantest, 1990-05-04.
5. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, National Fire protection Association and Society of Fire Protection Engineers, USA, 1988, ISBN nr. 0-87765-353-4.
6. Lees, F.P.: Loss Prevention in the Process Industries. Butterworth & Co (Publishers) Ltd, 1980, ISBN nr. 0 408 10604 2

VEDLEGG A FORUTSETNINGER FOR BRANNSPREDNING

A1 Forutsetninger for brannspredning til trappeløp.

For å oppnå brannspredning til trappeløp må brannen i korridoren ha en viss størrelse og varighet. I forsøk SC-2 var startbrannen 200 [kW], og den var plassert 3.5 [m] inne i korridoren. Figuren for effekten viser at den ved ca 4 minutter er oppe i 1000 [kW], så synker den, for å stige til ca 2000 [kW] i en kort periode.

I forsøk SC-6 kommer effekten opp i ca 1000 [kW], men varigheten er relativt kort. Først i forsøk SC-7, hvor tennkilden var plassert langt inne i korridoren og tilluftsmengden ble økt etter 2 minutter, ble effekten stor nok over lang nok tid til at brannen spredte seg til trappeløpet. Effekten var da oppe i ca 1000 [kW] i 1.5 - 2 minutter.

Det som kan slutes av dette, er at for å få til brannspredning opp trappeløpet, må effektutviklingen være ca 1000 [kW] i ca 1.5 - 2 minutter for at forvarmingen av materialene i korridoren og i trappeløpet blir stor nok til at brannen kan spres i laminatet. Ved lavere brannbelastning vil mesteparten av varmen akkumuleres i kledningsmaterialer i trapper og korridorer, slik at laminatet ikke når opp i kritisk temperatur for flammespredning.

A2 Nødvendig luftmengde for å få overtenning i korridor og spredning til trappeløp.

Propanbrenneren på 200 [kW] bruker ca. 4 [g/s] propan, og trenger ca 15 ganger så mye luft for fullstendig forbrenning. Nødvendig luftmengde er da 0.06 kg/s., dvs. ca 240 kg/h eller 280 m³/h.

I starten på forsøk SC-7 var lufttilførselen til modellen 600 m³/h, tilført ived nivå Y-bor dekk. Ved en branneffekt på 1000 kW medgår 5 ganger så mye luft som ved 200 kW, dvs. 1400 m³/h. Den lave ventilasjonen som ble tilført i starten gir altså for lite luft til fullstendig forbrenning ved effektutvikling på 1000 kW, og overtenning hindres på grunn av oksygenmangel.

Den mengden luft som er nødvendig for å få overtenning i korridoren er teoretisk 1400 m³/h. I praksis kan det variere noe. Lavere luftmengde kan også medføre overtenning, bare effektutviklingen i korridoren er stor nok til å utvikle pyrolyseprodukter i laminatet i større mengde enn det som brennes opp umiddelbart.

Ved overtenning er det lufttilførselen som begrenser effektutviklingen inne i korridoren, og uforbrente gasser strømmer ut av enden og inn i trappeløpet. Dersom disse gassene ikke blir avkjølt for mye, vil de brenne videre der det er ny tilgang på luft.

A3 Effektutvikling i trappeløp avhengig av lufttilførsel.

Fra effektutviklingsforløpet i forsøk SC-7 ser vi at det er en dramatisk økning ca 4 minutter etter start av brann med 200 kW. Dette intreffer når brannen sprer seg til trappeløpet. Effekten går da helt opp i 15 000 kW. Målinger viser at oksygenkonsentrasjonen øverst i trappeløpet er tilnærmet 0%, det vil si at all tilgjengelig luft er forbrukt. Brennverdien til laminat er 48.4 MJ/m^2 , og flatevekten 2.5 kg/m^2 , dvs 19.36 MJ/kg . Total masse som forbrenner er da 0.775 kg/s . Teoretisk luftbehov for fullstendig forbrenning er ca 15 ganger denne mengden, dvs. 11.6 kg/s , dvs. $13.9 \text{ m}^3/\text{s}$, dvs ca $50\,000 \text{ m}^3/\text{h}$. Tilført luft er i størrelse $12\,000 \text{ m}^3/\text{h}$. Det er altså et vesentlig luftunderskudd, noe som medfører store mengder uforbrente gasser opp av trappeløpet. De uforbrente gassene vil brenne ved tilførsel av frisk luft, forutsatt at de ikke er avkjølt for mye. Forbrenning av disse gassene vil mest sannsynlig foregå i tverrkorridoren på Gulf dekk, og ved døren inn til Broadway Lounge på Main dekk.

VEDLEGG B

BEREGNING AV VARMEBALANSER

B1. Varmebalanse basert på forbrenningsdata for materialer.

I fullskalamodellen var korridor og trappeløp satt opp med originale laminat på vegg- og himlingsplate. Gulvet og trappene var belagt med originale tepper. I materialtest etter ISO 1716-1973, utført av Dantest /4/, har laminatet og gulvteppet følgende brennverdi:

	Øvre brennverdi: [MJ/kg]	[MJ/m ²]
Laminat 2 mm	19.36	48.4
Gulvteppe 9.2 mm	17.18	46.39

Overslagsberegning gir at det er benyttet ca. 145 [m²] laminat, og ca 40 [m²] gulvteppe i brannforsøk SC-7.

Totalt avgitt varme ved forbrenning vil da bli:

Laminat:	(48.4 * 145) [MJ]	=	7 033 [MJ]
Gulvteppe:	(46.4 * 40) [MJ]	=	1 856 [MJ]
Tilsammen:			8 889 [MJ]

B2. Varmebalanse basert på oksygenforbruk i fullskalaforsoeket.

Ved kontinuerlig måling av hastighet, temperatur og konsentrasjon av oksygen og andre forbrenningsprodukter i røyken som ble produsert under brannen, kan en fastlegge energiutviklingen. Metoden er den samme som benyttes i "NT FIRE 025. Surface products. Room fire tests in full scale." Ved integrasjon er totalt utviklet varmemengde funnet til:

	[MJ]
0 - 10 minutter	4 233
0 - 15 minutter	5 502
0 - 42 minutter	8 185

Dette samsvarer meget godt med teori, idet 92% av teoretisk mulig varmeutvikling er målt.

En usikkerhetsfaktor er om og i hvor stor grad baksiden av vegg- og himlingsplater deltok i brannen. Etter det primære

brannforløpet, det vil si etter ca 15 minutter, foregår utglødning av materialrester, og endel plater er i tidrommet etter 15 minutter antakelig også brent på baksiden.

B3. Varmeutvikling basert på luft tilført modellen

I de første 2 minutter av brannforsøk SC-7 var ventilasjonen innstilt på 600 [m³/h], noe som tilsvarer 0.17 [m³/s]. I resten av forløpet ble tilførselen økt til 12 000 [m³/h], noe som tilsvarer 3.33 [m³/s]. Vi forutsetter at en kan bruke termiske data for luft for røykgassen, det vil si tetthet 1.2 [kg/m³] og spesifikk varmekapasitet ca 1.0 [kJ/kg K]. Ved integrasjon får vi:

	[MJ]
0 - 10 minutter	993
0 - 15 minutter	1 781
0 - 42 minutter	4 179

Omlag 50% av den totale varmemengden kommer altså ut via ventilasjon av røykgasser. Den andre halvparten går over til modellens vegger, tak og gulv, akkumuleres i modellen, og ledes videre ut til omgivelsene. I de første 10 minuttene går ca. 77% av varmemengden til modellen og omgivelsene. Mot slutten av forsøket avgir modellen noe av sin akkumulerte varme til ventilasjonsluften.

B4. Varmetap til modellen og omgivelsene

Som en kontroll på varmeoverføring til fullskalamodellen, beregnes en gjennomsnittlig temperaturstigning i materialene modellen er konstruert av. Korridor og trappeløp er konstruert av 5 [mm] tykke stålplater, og vegger med det brennbare laminatet består av asbestsement baserte plater med tykkelse 20 [mm]. Himlingsplatene er av samme materiale som veggplatene, men er 12 [mm] tykke.

I fullskalaforsøket var den øverste delen av trappeløpet utformet som en oppsamlingshette for røyk, og den var ikke kledd med vegg- eller takplater.

Total mengde stål er ca 260 [m²] stålplate, med en masse tilsammen 10200 [kg].

Total mengde veggplate utgjør ca 100 [m²], med en tetthet 700 [kg/m³]. Det blir en masse tilsammen 1400 [kg]. Himlingsplater utgjør ca 30 [m²], med en masse tilsammen 250 [kg]. Total mengde plate blir 1650 [kg].

I overslagsberegninger benyttes spesifikk varmekapasitet for stål 0.5 [kJ/kg K], og for panel- og himlingsplater 0.8 [kJ/kg K]. Det siste er verdier som gjelder for asbest og for tørr betong.

Akkumulert varme i modellen ville gi en temperaturstigning ΔT på:

$$\Delta T = Q / (m \cdot c_p)$$

For stål: $\Delta T_s = Q / (m_s \cdot c_{p_s}) = Q / 5100$

For plater: $\Delta T_p = Q / (m_p \cdot c_{p_p}) = Q / 1320$

Forutsettes samme middeltemperatur i stål og i plater, blir

$$\Delta T = Q / 6420.$$

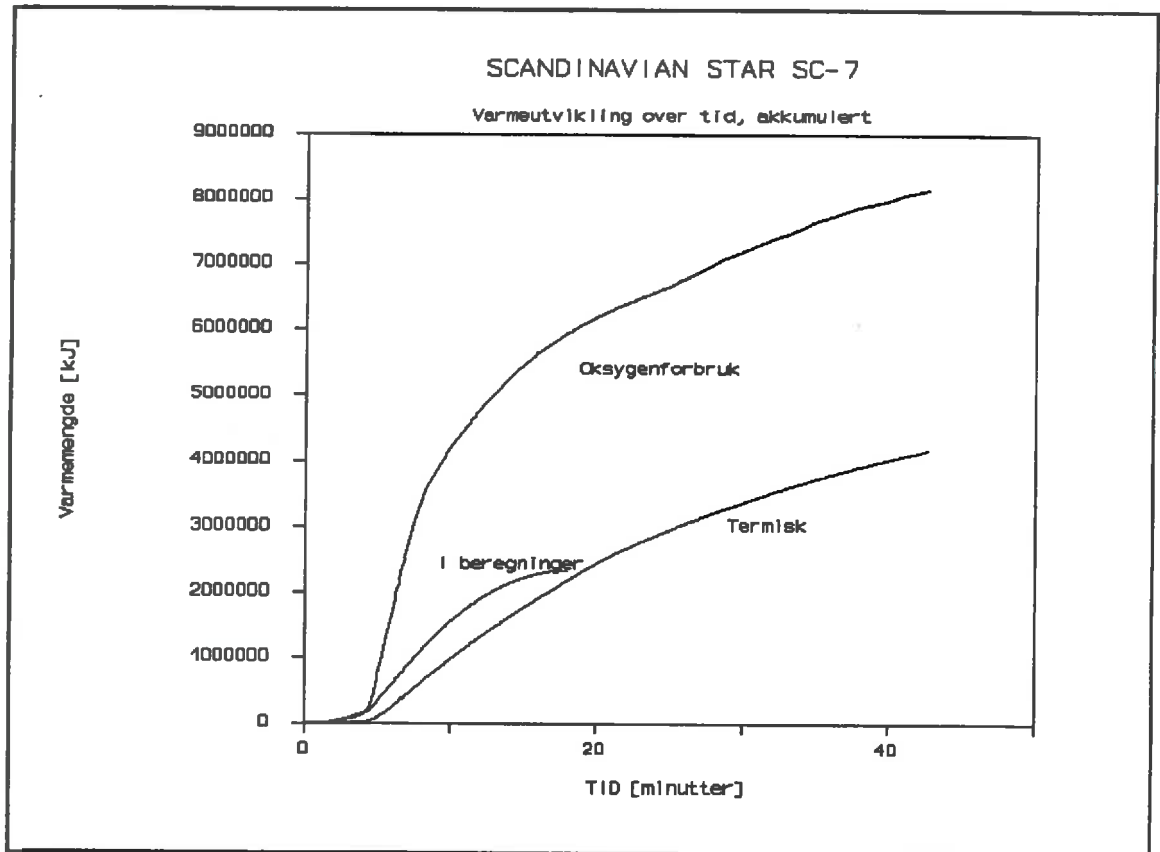
Forskjellen mellom utviklet varme og varme som forlater modellen via røykgassene i den kritiske tiden ca 5 - 8 minutter er beregnet til ca 12 [MW]. I 3 minutter blir dette en varmemengde 2 160 [MJ]. En midlere temperaturstigning for hele modellen i dette tidsrommet kunne blitt ca 335°C, forutsatt at ingen varme ble overført til omgivelsene. Ved slutten av måleperioden var fremdeles endel målepunkter langt over 300 °C. I modellforsøket ble etterhvert stålplatene meget varme, spesielt i øvre del av trappeløpet som ikke var utrustet med kledningsplater. Det er derfor mulig at en varmemengde på ca 2 000 [MJ] vil være akkumulert i modellen etter at alt materiale var utbrent.

Varmeoverføring til omgivelsene vil i alle tilfeller opptre når overflatene på modellen blir varme. Overslagsmessig kan en benytte et varmeovergangstall på 15 [W/m² K]. Total overflate av modellen er ca 180 [m²]. Pr grad temperaturforskjell mellom modellen og omgivelsene vil det kunne overføres ca 2.7 [kW].

Ved en midlere temperatur på 300 °C vil den totale effekten være 810 [kW]. I et tidsrom på 42 minutter, som er det tidsrommet som målingene har pågått, vil en varmemengde på 2 040 [MJ] kunne bli overført.

Disse varmemengdene tilsammen, ca 4 000 [MJ], utgjør differansen mellom utviklet varme og varme som blir tilført ventilasjonsluften i forsøk SC-7.

En framstilling av varmebalansene er vist i figur B1.



Figur B1. Varmebalanse funnet ved ulike metoder. Kurven øverst viser totalt utviklet varme (oksygenforbruk), den nederste er basert på varme tilført ventilasjonsluften. Kurven i midten viser forløpet som er benyttet ved beregningene.

VEDLEGG C

MÅL FOR SEKSJONENE SOM ER SIMULERT OG DATA FOR VENTILASJONSANLEGGETS
DRIFT

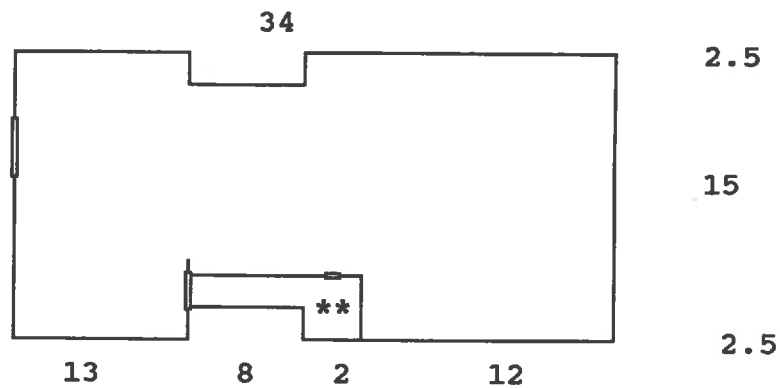
C1 Planskisse for beregning av røykspredning

DØR : =

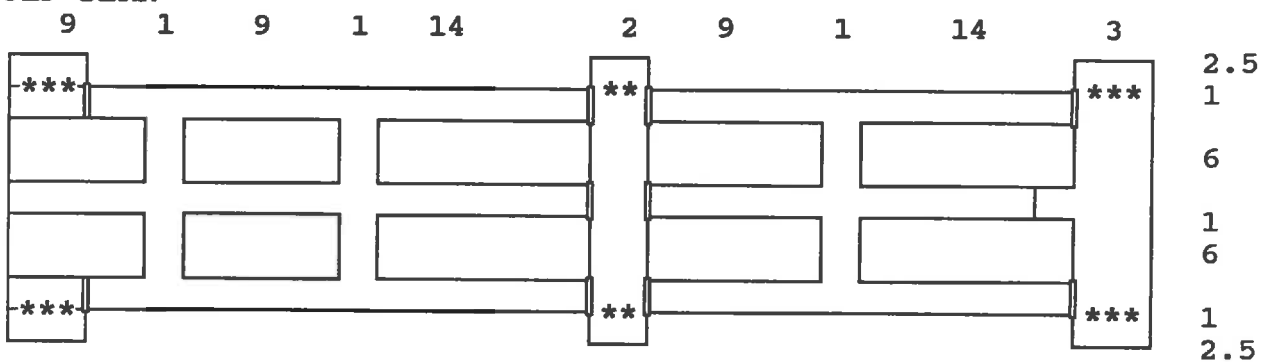
VERTIKAL SJAKT: **

Mål i meter

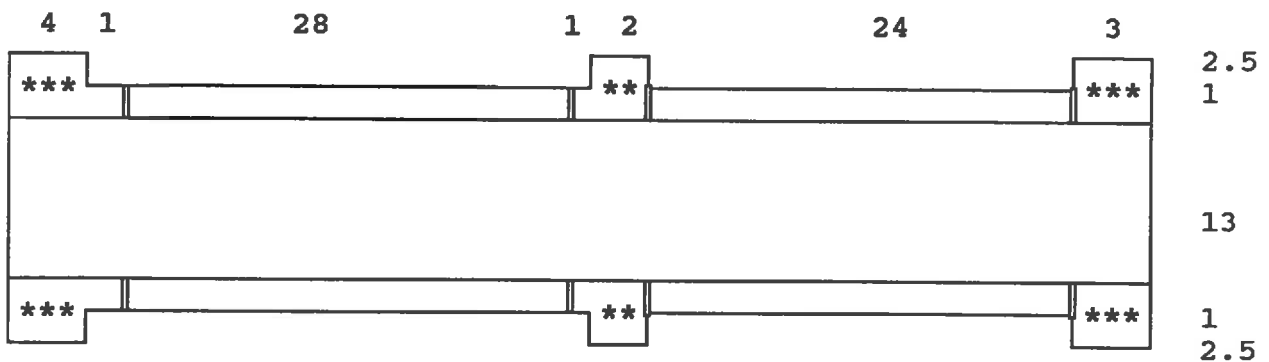
MAIN DEKK



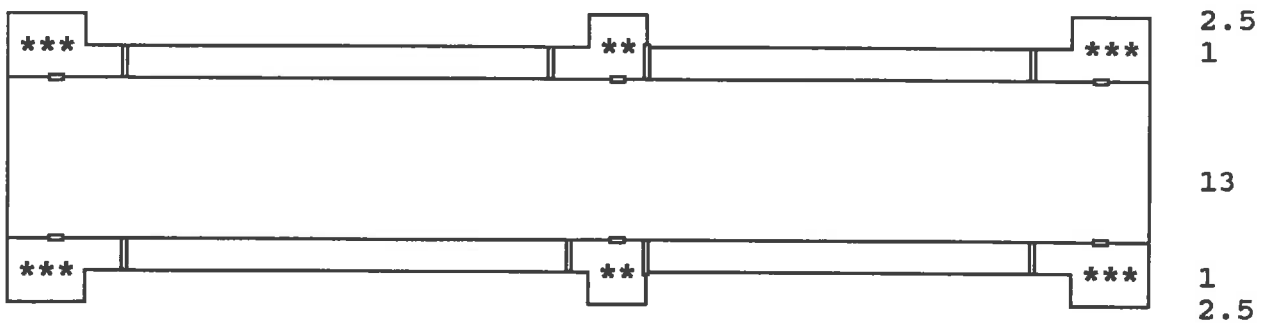
GULF DEKK



YBOR DEKK



BILDEKK



C2 Snitt ved trappeløp ned fra Broadway lounge

Mål i [m].

MAIN DEKK							2.5
GULF DEKK							2.5
YBOR DEKK							2.5
BILDEKK							2.5
	2.5	1	6	1	6	1	2.5

Etasjehøyden er 2.5 m. Himling i korridorer er 0.5 m, slik at tverrsnitt av langsgående korridorer er 1x2 m.

C3 Ventilasjon av brannområdet (akterdelen av skipet, aktenfor resepsjonen) før branndører stenges (0-2 minutter) :

Luftmengder i [m³/h]

Til hver lugar tilføres i størrelse 260 [m³/h], og trekkes av omlag halvparten. Tilførsel av luft via det konvensjonelle ventilasjonssystemet finnes ved summering av overskudd fra lugarer og andre rom i ulike seksjoner og på ulike dekk.

Bildekk:	Tilført	Avsug
Lugarer babord aktenfor trapp:	300	
Lugarer babord forut for trapp:	300	
Lugarer styrbord aktenfor trapp:	300	
Lugarer styrbord forut for trapp	300	
Fra områder forut, babord:	1000	
Fra områder forut, styrbord:	1000	
Gjennom åpen dør til biloppstillingsdekk, babord, ved trapp:		12000
YBOR dekk:		
Lugarer babord aktenfor trapp:	300	
Lugarer babord forut for trapp:	300	
Lugarer styrbord aktenfor trapp:	300	
Lugarer styrbord forut for trapp:	300	
Fra områder forut, babord:	1000	
Fra områder forut, styrbord:	1000	
GULF dekk:		
Lugarer babord aktenfor trapp:	1000	
Lugarer babord forut for trapp:	1000	
Lugarer styrbord aktenfor trapp:	1000	
Lugarer styrbord forut for trapp:	1000	
Fra områder forut, babord:	1000	
Fra områder forut, styrbord:	1000	
Fra lugarseksjon aktenfor tverrgang:		2500
Fra trappeløp akterut, styrbord(kun forbindelse ned til Y-BOR og bildekk:	2000	
Fra trappeløp akterut, babord(kun forbindelse ned til Y-BOR og bildekk: :	2000	
MAIN dekk:		
Lekkasje via spalter langs glassdører ut mot dekk, og via åpen ventilasjonskanal ute av drift:	5500	
Avsug sentralt i tak, Broadway lounge:		7400
SUM:	21900	21900

C4 Ventilasjon av brannområdet (akterdelen av skipet, aktenfor resepsjonen) etter stenging av brannører (2 minutter -) :

Luftmengder i [m³/h]

Til hver lugar tilføres i størrelse 260 [m³/h], og trekkes av omlag halvparten. Tilførsel av luft via det konvensjonelle ventilasjonssystemet finnes ved summering av overskudd fra lugarer og andre rom i ulike seksjoner og på ulike dekk.

Bildekk:	Tilført	Avsug
Lugarer babord aktenfor trapp:	0	
Lugarer babord forut for trapp:	0	
Lugarer styrbord aktenfor trapp:	300	
Lugarer styrbord forut for trapp	300	
Fra områder forut, babord:	1000	
Fra områder forut, styrbord:	1000	
Gjennom åpen dør til biloppstillingsdekk, babord, ved trapp:		10000
YBOR dekk:		
Lugarer babord aktenfor trapp:	0	
Lugarer babord forut for trapp:	0	
Lugarer styrbord aktenfor trapp:	0	
Lugarer styrbord forut for trapp:	300	
Fra områder forut, babord:	1000	
Fra områder forut, styrbord:	1000	
GULF dekk:		
Lugarer babord aktenfor trapp:	1000	
Lugarer babord forut for trapp:	1000	
Lugarer styrbord aktenfor trapp:	1000	
Lugarer styrbord forut for trapp:	1000	
Fra områder forut, babord:	1000	
Fra områder forut, styrbord:	1000	
Fra lugarseksjon aktenfor tverrgang:		2500
Fra trappeløp akterut, styrbord(kun forbindelse ned til Y-BOR og bildekk):	4000	
Fra trappeløp akterut, babord(kun forbindelse ned til Y-BOR og bildekk):	0	
MAIN dekk:		
Lekkasje via spalter langs glassdører ut mot dekk, og via åpen ventilasjonskanal ute av drift, avhengig av trykkforhold:	3600	
Avsug sentralt i tak, Broadway lounge:		6000
SUM:	18500	18500

C5 Tidspunkter for endring av strømningsforhold:

TID[sek]

BRANNSTART:

Definert som tidpunkt for antennelse av
laminat i korridor, med effektutvikling 200 kW.

0

BRANNDØRER LUKKET:

Strømningsmønster endret

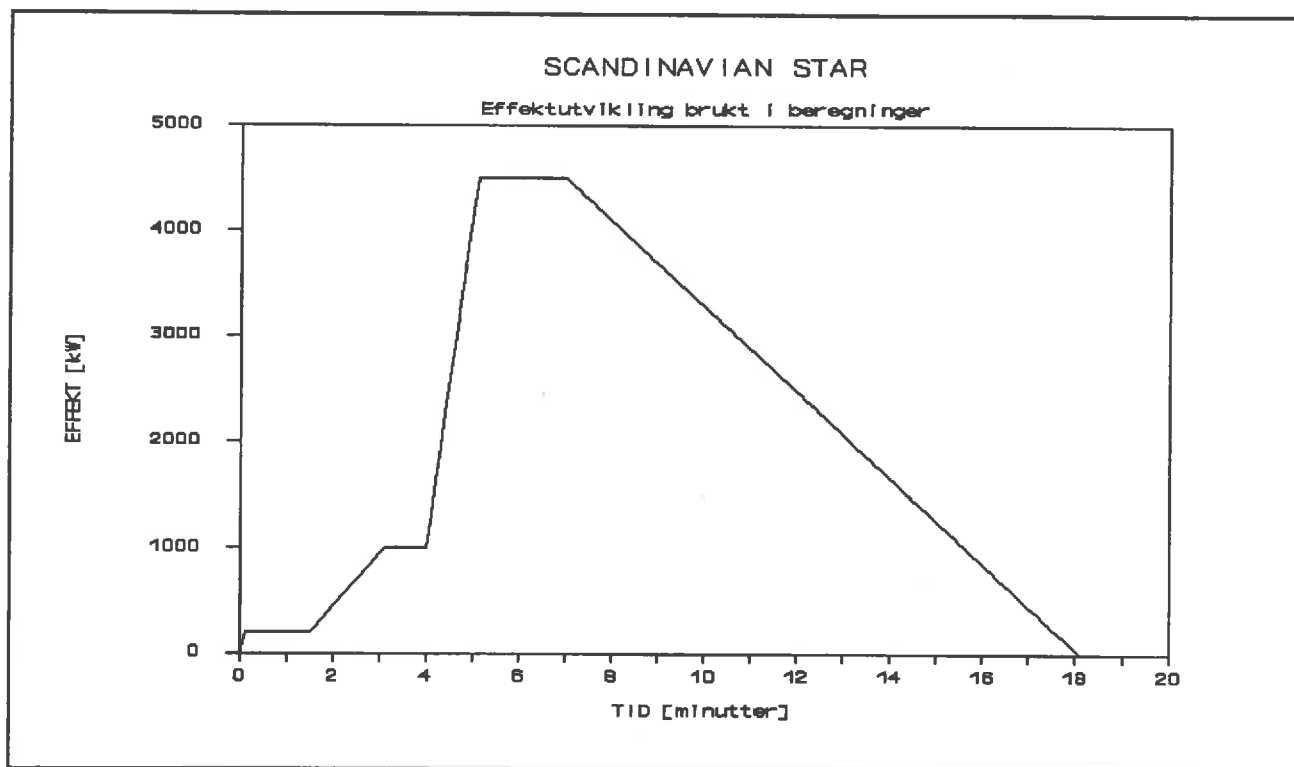
120

C6 Effektutvikling

I beregningene er følgende effektutvikling lagt inn:

0	-	1.5 min :	200 [kW]
1.5	-	2.5 min :	jevn økning fra 200 - 1000 [kW]
2.5	-	4.0 min :	1000 [kW]
4.0	-	5.0 min :	jevn økning til 4500 [kW]
5.0	-	7.0 min :	4500 [kW]
7.0	-	18.0 min :	jevn reduksjon til 0 [kW]

Dette forløpet er vist grafisk i figur C1.



Figur C1. Effektforløp slik det er lagt inn i beregningene.

Dette samsvarer nokså godt med effekten som ventileres gjennom trappeløpet i forsøk SC-7, bortsett fra i de første 4 minuttene. Det vil derfor gi et godt utgangspunkt for å beregne røyktemperaturer. Det er en lavere effekt enn det som er funnet ved analyse av oksygenforbruket. Det er denne effekten som er proporsjonal med avbrenningsraten, og dermed vil gi produksjonen av gasskomponenter. Effektforløpet er derfor lagt inn slik at det også samsvarer med avbrenningsraten de første 4 minuttene, siden denne tiden er viktig i brannforløpet.

C7 Lokalisering av brannen

Brannen er lokalisert i korridoren på bildekk, styrbord side, aktenfor trappeløp. Startbrannkilden er lokalisert inntil veggen i korridoren, 10 m fra døråpningen inn til trappeløpet. I de første 7 minuttene av det simulerte brannforløpet sprer brannen seg i hele korridorens lengde. Deretter sprer brannen seg opp trappeløpet, som brenner ut i løpet av de neste 11 minuttene. Videre brannforløp simuleres ikke.

C8 Konsentrasjon av giftige gasser og oksygen

Sporstoff for å angi konsentrasjon av giftige gasser tilsettes i brannsonen. For å simulere forgassing av brenselet tilføres en ekstra massestrøm her. Massestrømmen settes i størrelse omtrent lik gassmengden som materialet utvikler ved fordampning og forbrenning. Multiplikator for tilført masse er tilpasset effektutviklingen i forsøk SC-7 i tiden mellom 2 og 4 minutter. Middelverdien av effekten er i beregningene da 1000 [kW], og konsentrasjonen av CO i trappeløpet i nivå med Gulf-dekk er satt til 2000 [ppm]. Tilsvarende verdi for HCNe 120 [ppm].

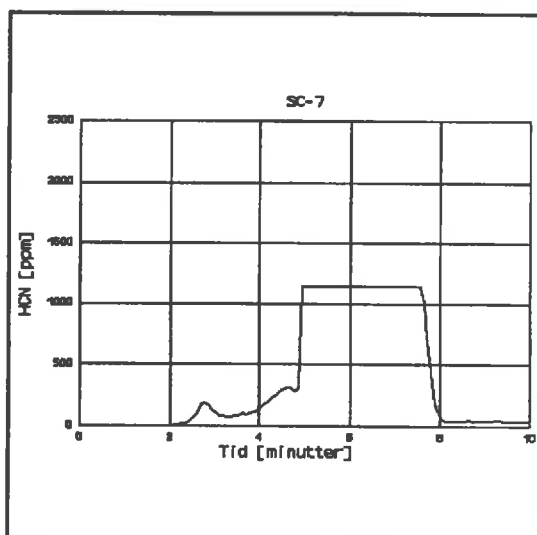
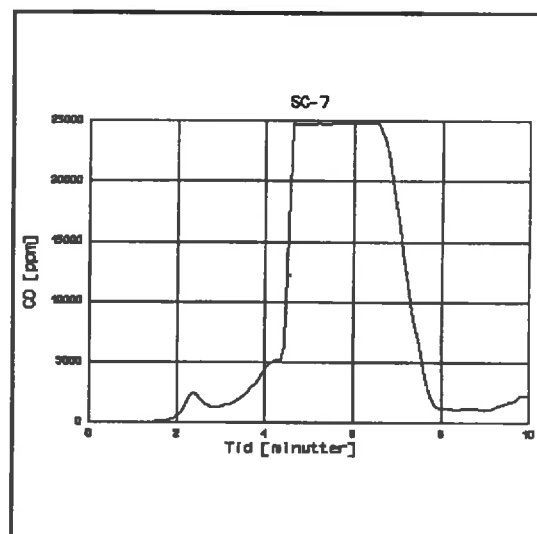
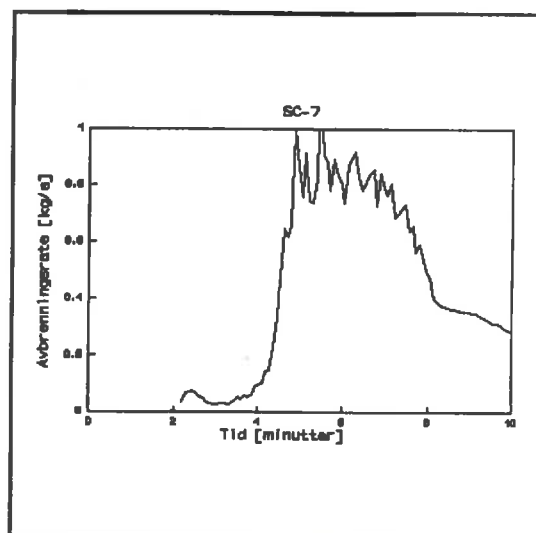
Utviklingen i fullskalaforsoeket er vist i figurene på neste side. Posisjonen for måling av gasskonsentrasjoner er i toppen av trappeløp i forsøksoppstillingen.

Den øverste figuren viser avbrenningsraten for brennbart materiale i korridor og trappeløp, beregnet ut ifra effektforløpet.

Produksjonsraten for CO og HCN er antatt å være proporsjonal med pyrolyseraten, og i beregningene er proporsjonalitetsfaktoren funnet i tidsperioden mellom 2 og 4 minutter, hvor effektutviklingen i korridoren var ca 1000 [kW]. Lufttilførselen i denne perioden var trappet opp til 12000 [m³/h], og ble holdt konstant i resten av forsøket.

Neste figur viser konsentrasjonen av CO i det samme fullskala-forsøket. Konsentrasjonen følger effektforløpet ganske godt, idet sprang i konsentrasjon kommer til samme tid. I perioden fra ca 5 - 8 minutter er imidlertid målingene ikke tilgjengelige, idet måleområdet til gassanalysatoren ble overskredet. Dette skjedde når brannen spredde seg oppover i trappeløpet, og flammer omhyllet målesondene. Ved å benytte proporsjonalitetsfaktoren funnet for tidsrommet før dette skjedde, vil en i beregningene i denne perioden få en CO-konsentrasjon på ca. 40-50000 [ppm]. Dette er over målte verdier, men er i overensstemmelse med forventede verdier når all oksygen er oppbrukt. I forsøk SC-7 var oksygenkonsentrasjonen i denne perioden tilnærmet null.

Når det gjelder konsentrasjonen av HCN er den vist i den nederste figuren. De samme forhold gjelder målingene her, idet konsentrasjonen oversteg måleområdet i forsøket. Maksimalkonsentrasjonen var her målt til 1150 [ppm]. Ved proporsjonalitetsbetraktning blir den maksimale konsentrasjonen i beregningene over 8000 [ppm]. Dette skyldes at det beregningsmessig blir mindre luft enn i forsøket.

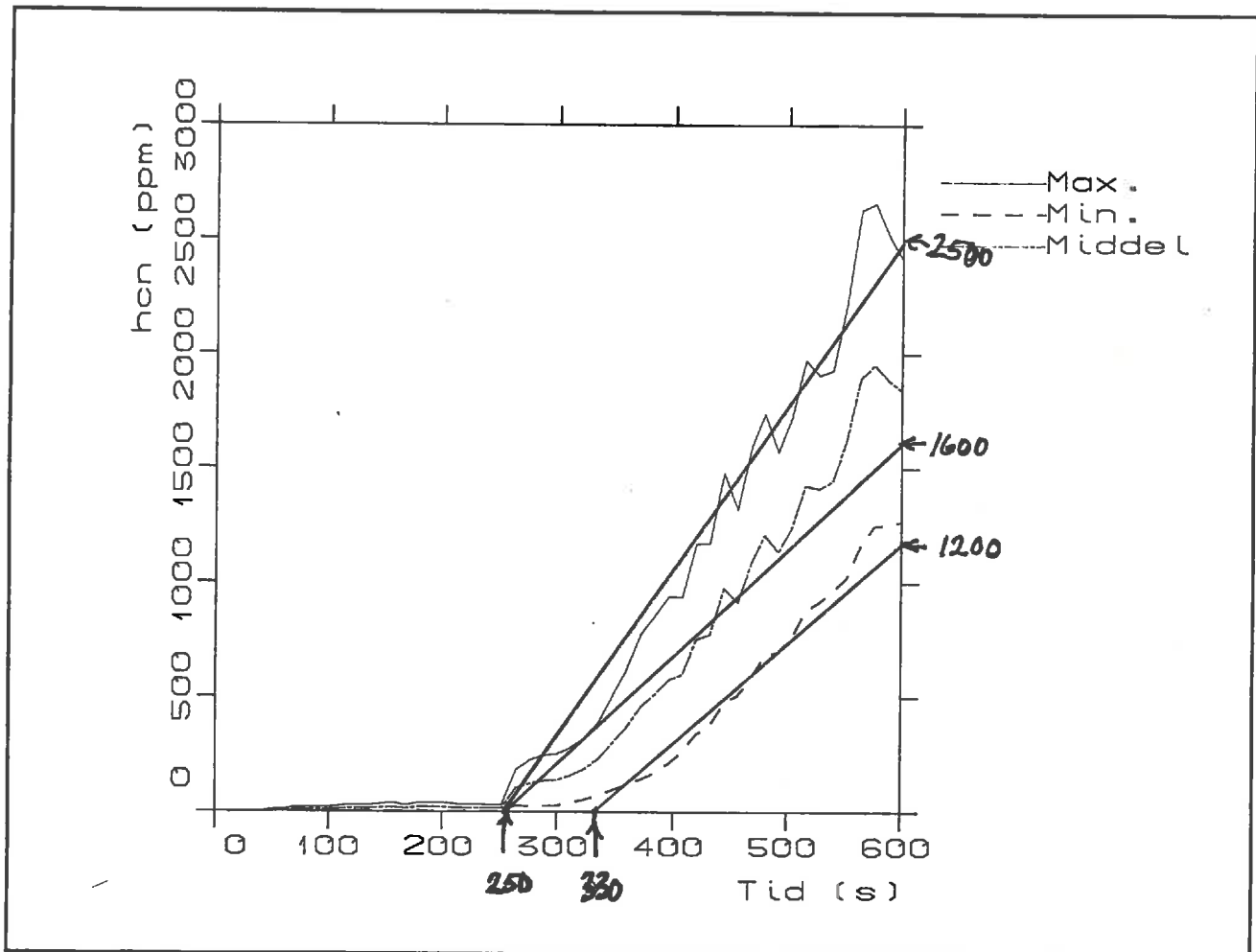


Figur C2. Grunnlag for fastlegging av proporsjonalitetsfaktor.

C9. Fastlegging av kritisk dose for giftige gasser.

I denne undersøkelsen er det benyttet en enkel metode for fastlegging av kritisk dose av giftige gasser. Det er mulig å gjennomføre integrasjon av akkumulert dose ved hjelp av databehandling, men siden økningen av konsentrasjon oftest er jevn etter brannspredning til trappløp, er en grafisk metode tilstrekkelig nøyaktig.

Et typisk forløp av konsentrasjon av HCN er valgt som eksempel. Figur C3 viser det samme som figur 19, og gjelder korridor 3, på Gulf-dekk, på styrbord side, akter. Konsentrasjonsforløpet gjelder ved åpne branndører i hele seksjonen.



Figur C3 Grafisk presentasjon av metode for å fastlegge tid til kritisk tilstand for eksponering av HCN.

Kritisk dose for HCN er satt til $D_{krit} = 1000$ [ppm · min]. Ved en enkel geometribetraktning ses av figuren at det ikke akkumuleres noen vesentlig dose før ca. 250 [s]. Fra dette tidspunktet stiger konsentrasjonen jevnt. Stigningskoeffisienten beregnes ved å finne sluttkonsentrasjonen ved 600 [s], og dividere på forløpt tid. For middelkonsentrasjonen blir dette:

Sluttkonsentrasjon : 1600 [ppm]

Forløpt tid : $(600 - 250) \text{ [s]} = 350 \text{ [s]}$,
dvs. $350 / 60 \text{ [min]} = 5.8 \text{ [min]}$

Stigningskoeffisient: $K_s = 1600/5.8 \text{ [ppm/min]}$

Akkumulert dose er da arealet under kurven, her representert ved en rettvinklet trekant.

Den akkumulerte dosen er:

$$D_{\text{akk}} = K_s \cdot \Delta T \cdot \Delta T/2$$

Kritisk tid ΔT_{krit} finnes ved å sette akkumulert dose lik kritisk dose, i dette tilfellet 1000 [ppm · min].

Likningen for kritisk tid blir da:

$$\Delta T_{\text{krit}} = (2 \cdot D_{\text{krit}} / K_s)^{1/2}$$

$$\Delta T_{\text{krit}} = (2 \cdot 1000 / ((1600/5.8)))^{1/2} = 2.7 \text{ [min]}$$

Denne tiden må legges til tiden beregningen startet, her 250 [s], dvs. 4.2 [min], slik at total tid til kritisk tilstand blir 6.9 [min].

For å få et inntrykk av hvor følsom denne tidsangivelsen er for variasjoner i konsentrasjon, kan en se hvor lang tid en ville fått dersom en benyttet minimumskonsentrasjonen i stedet for middelverdien.

Tid før konsentrasjonen begynner å stige er forlenget til ca 330 [s], mens stigningskoeffisienten er omtrent den samme.

Total tid til kritisk tilstand i dette tilfellet blir 8.5 [min], det vil si en forskjell på 1.6 [min]. Hovedårsaken til den forlengede tiden er at konsentrasjonen ved gulvnivå holder seg lav lenger enn ved taknivå. Dette er en illustrasjon på hva en kan vinne i tid ved å krype langs gulvet i stedet for å gå oppreist.

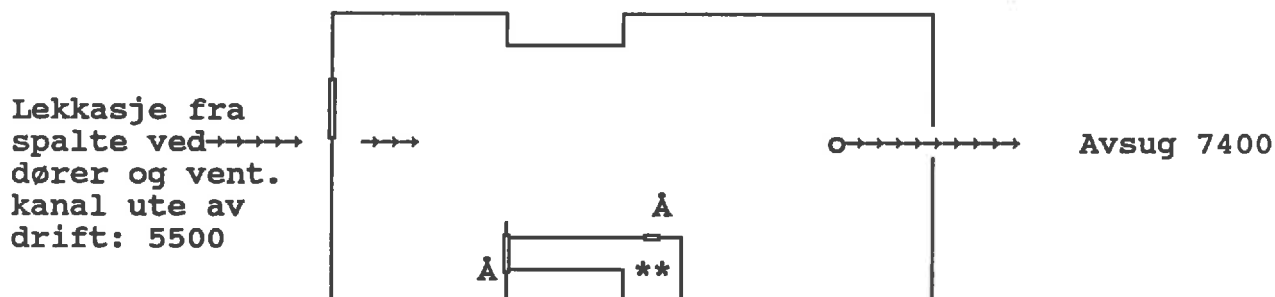
C10 Spredningsveier for røyk og luftstrømmer uten lukking av branndører

DØR : = Å: åpen, L: lukket
VERTIKAL SJAKT: **

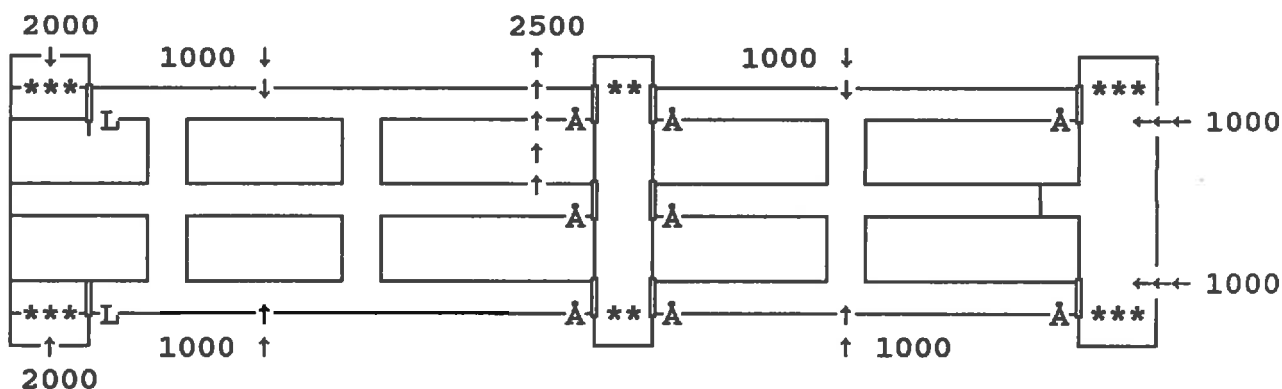
Første del av forløpet, 0-120 [sek]: Alle branndører åpne, bortsett fra skyveportene inn til bildekk. Kun en skyveport er åpen.

Luftstrøm i [m³/h]

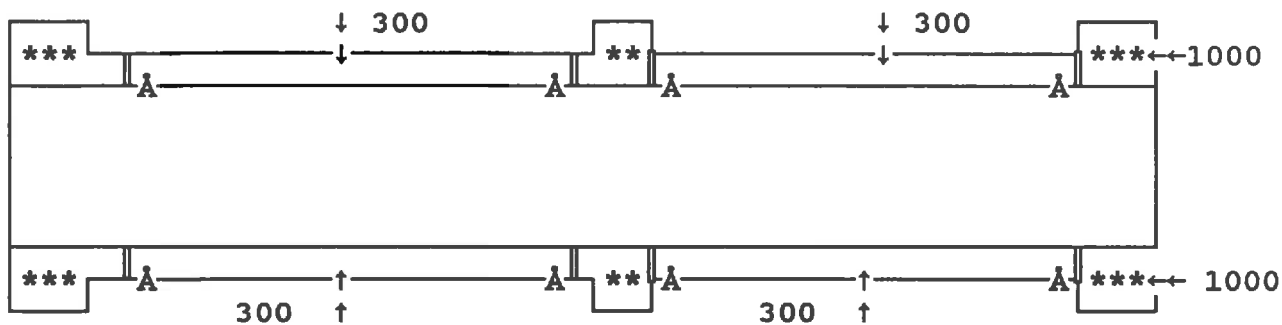
MAIN DEKK



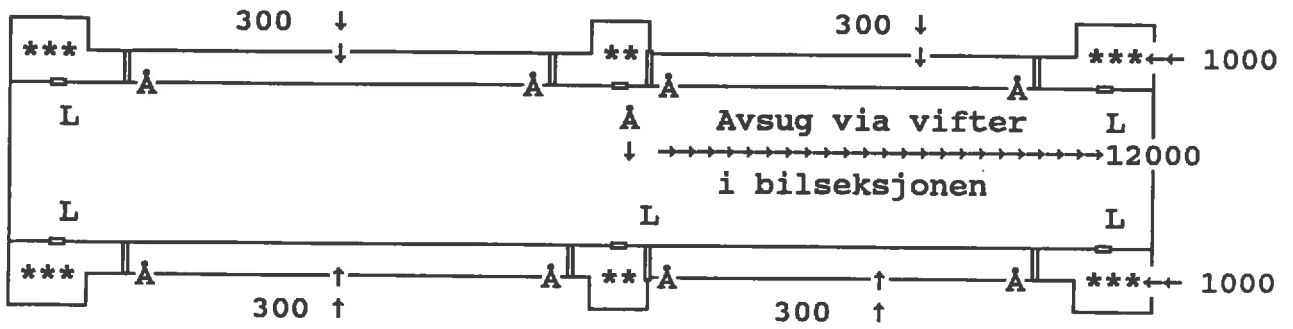
GULF DEKK



YBOR DEKK



BILDEKK

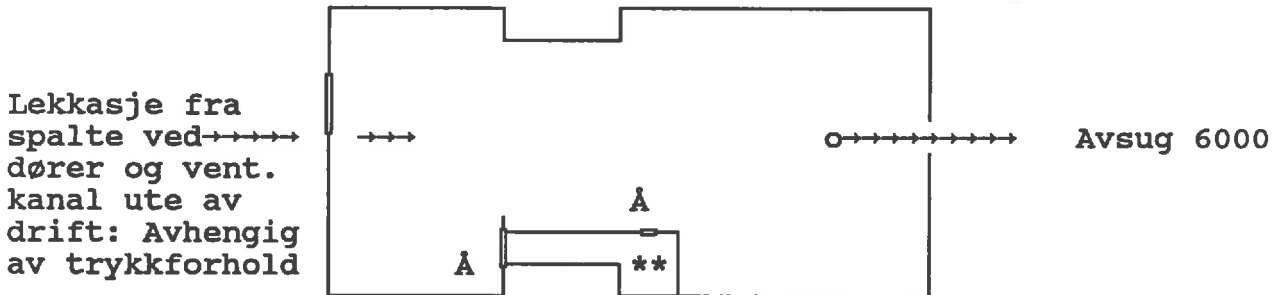


C11 Spredningsveier for røyk og luftstrømmer når noen branndører blir lukket

DØR : = Å: åpen, L: lukket
VERTIKAL SJAKT: **

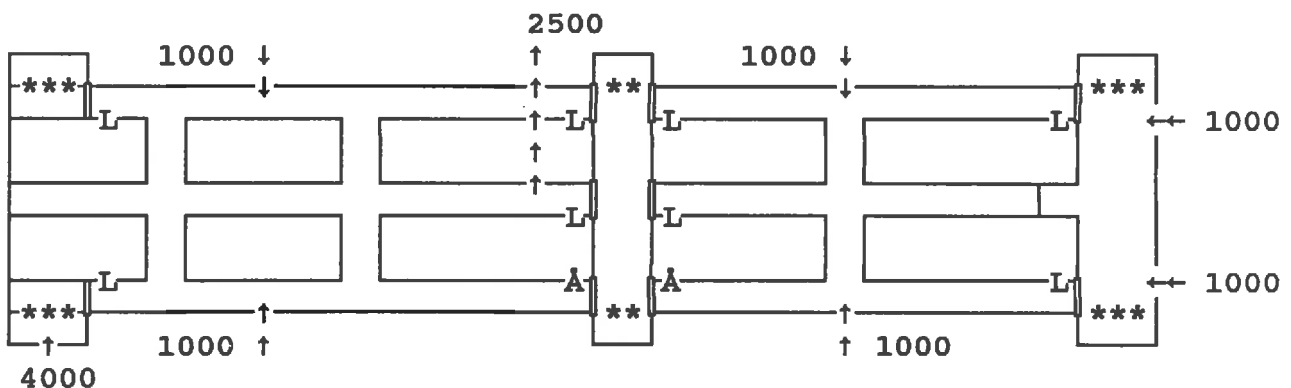
Siste del av forløpet, 120 - 1080 [sek]: Noen branndører lukket, mens andre forblir åpne. Tilførselen av luft forblir omtrent konstant, men luften strømmer andre veier.
Luftstrøm i [m³/h]

MAIN DEKK



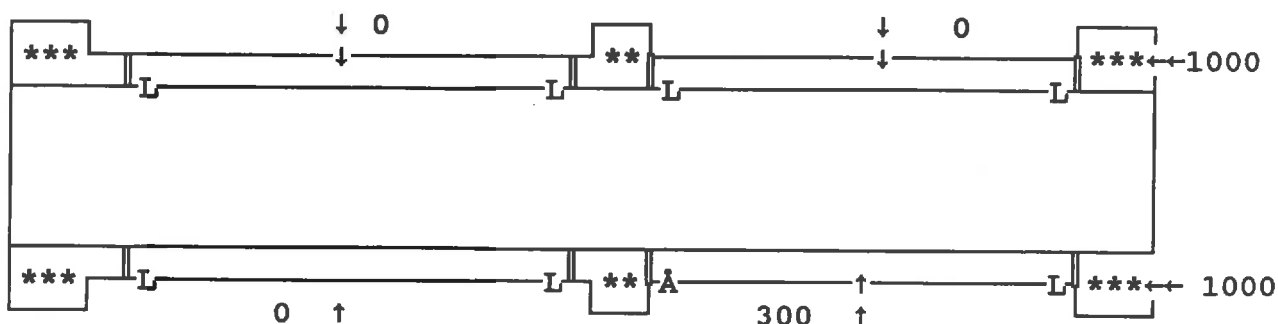
Ingen endring når det gjelder dører. Driftsforholdene til avtrekksviften i Broadway Lounge endres, og i beregningene forutsettes at kapasiteten reduseres til 6000 m³/h. Lekkasjen via spalter langs dører og via ventilasjonskanal som er ute av drift endres i takt med trykkforholdene i Broadway Lounge. I beregningene kan dette settes som en åpen grense mot et konstant atmosfæretrykk.

GULF DEKK



For å få røyk tilført lugarseksjonen aktenfor tverrkorridoren må det være lekkasje en eller flere steder. I beregningene forutsettes at en branndør har stått åpen i denne fasen av brannforløpet, og vi velger den på styrbord side.

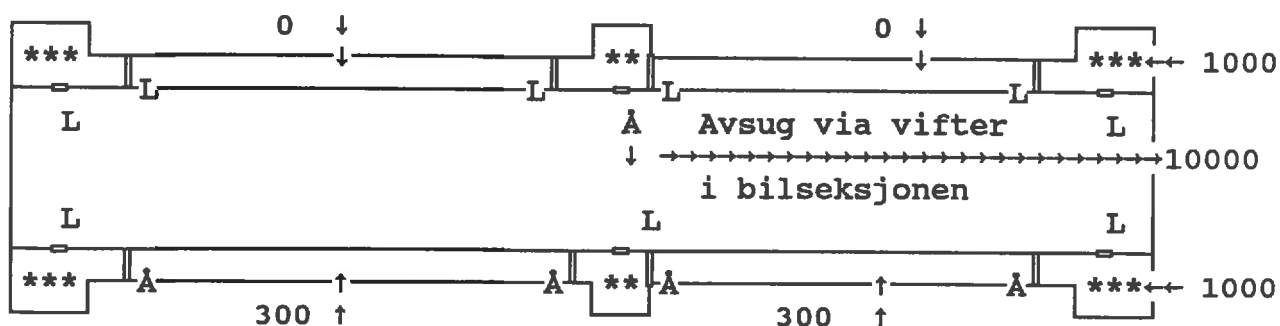
YBOR DEKK



Når branndører lukkes i begge ender av korridorer hvor det blir tilført overskudd av luft fra lugarer, må enten overskuddsluften strøkke ut via lekkasjer, eller reduseres ved at viftene som forsyner området istedet leverer til andre områder. For babord side av YBOR dekk forutsettes i beregningene at lufttilskuddet til korridorene blir borte. Dette gjelder også aktere korridor på YBOR dekk. Luft som tilføres til trappeløpet akterut på babord side via lekkasjer ut på toppen av sjakten, blir også borte. På grunn av større undertrykk på biloppstillingsplassen på bildekket økes lekkasjen fra topp av trappeløp akterut på styrbord side tilsvarende reduksjonen på babord side. Totalt blir denne lekkasjen da $4000 \text{ m}^3/\text{h}$.

Tilført luft til resepsjonsområdet og trappeløpene som forbinder etasjene der forblir uforandret.

BILDEKK



Når branndører lukkes blir det større strømningsmotstand i flere av de tilførselsveiene luften hadde ved åpne dører. Trykkdifferansen over viftene i bilseksjonen av bildekket øker, og totalt avsug reduseres. I beregningene settes dette til $10000 \text{ m}^3/\text{h}$.

VEDLEGG D

RØYKINN TRENGNING I LUGARER

D1 Trykkdifferanser på grunn av ventilasjon.

Overslagsberegninger av trykkforhold mellom lugarer og korridorer gir indikasjoner på når røyk trenger inn i lugarer. Trykk i lugarene er bestemt av ventilasjonsforholdene, og ved normal drift tilføres mer luft til lugarene enn det som trekkes av på WC/dusj inne i lugarene. Overskuddsluften presses ut gjennom spalter langs dørkarmen, og i eventuelle utettheter i vegg- og takkonstruksjonen. En normal lekkasjespalte mellom dørblad og karm kan settes til ca. 1-2 [mm]. Ved overslagseberegninger gjøres her en følsomhetsanalyse av betydningen av spalteåpning.

Sammenhengen mellom volumstrøm av luft og trykkdifferanse er gitt ved formelen /5/:

$$Q = K_f \cdot A \cdot \Delta p^{1/2}$$

hvor

Q = Volumstrøm [m^3/s]

K_f = Motstandskoeffisient, 0.84 for luft med tetthet 1.2 [kg/m^3]

A = Areal av spalte [m^2]

Δp = Trykkdifferanse [Pa]

Ved normale driftsforhold er overskuddsluften til korridor pr lugar anslått til ca. 65 [m^3/h] dvs. $1.8 \cdot 10^{-2}$ [m^3/s].

En spalte under en typisk dør kan være ca 5 [mm] høy, og ca 0.8 [m] bred. Lekkasjearealet vil være i størrelse 0.004 [m_2].

Trykkdifferansen blir i dette tilfellet

$$\Delta p = (Q/A \cdot K_f)^2 = (1.8 \cdot 10^{-2} / (4 \cdot 10^{-3} \cdot 0.84))^2 = 29 \text{ [Pa]}$$

Ved dobbelt så stort lekkasjeareal vil trykkdifferansen bli 7 [Pa], og ved halvparten så stort areal 115 [Pa].

D2 Trykkdifferanser på grunn av varme gasser.

De varme gassene som dannes i brannen gir trykkforskjeller i skipet. I et nivå vil trykket være likt med omgivelsene, mens det vil være overtrykk i de øvre og undertrykk i de nedre delene av skipet. Sjøktet med trykk likt med omgivelsene kalles nøytralsjøktet eller nøytralsonen. Nivået for nøytralsjøktet bestemmes av ventilasjonsforholdene og temperaturforholdene og i noen grad av vindforholdene. I et skip er veggene til omgivelsene tette, så vindforholdene påvirker i svært liten grad interne strømningsforhold. I den grad vinden har innflytelse, er det via trykkforhold utenfor lekkasjeåpninger og ved inntak og avkast for ventilasjonsluft. I denne betraktningen har vi sett bort ifra vindeffekter.

Nøytralsjiktet vil ved de gitte forhold ligge omtrent i nivå med Gulf-dekk. Dette medfører at det dannes overtrykk i de øvre deler av korridorene på Gulf-dekk, og på Main dekk. På Y-bor og bildekk vil det bli et relativt undertrykk på grunn av termiske krefter. Nøytralsjiktets beliggenhet kan forflytte seg i løpet av brannen.

Størrelsen av overtrykk eller undertrykk kan beregnes ved formelen /5/:

$$\Delta p = K_s \cdot ((1/T_0) - (1/T_f)) \cdot h$$

hvor

Δp = Trykkdifferanse [Pa]

K_s = Koeffisient, 3460

T_0 = Absolutt temperatur i omgivelsene [K]

T_f = Absolutt temperatur i brannrommet [K]

h = Høyden fra nøytralsjiktet [m]

Ved en overtemperatur i korridorer på Gulf-dekk på 400 °C, noe som kan ha vært situasjonen like etter at trappeløpet på styrbord side var utbrent, kan et overtrykk ved taknivå ha vært

$$\Delta p = 3460 \cdot ((1/293) - (1/673)) \cdot 2 = 13 \text{ [Pa]}$$

Dersom en antar overtemperatur på 600°C vil overtrykket bli 16 [Pa]. Hvis nøytralsjiktet skulle ligge et dekk lengere ned, vil et overtrykk ved 400 °C korridortemperatur kunne bli i størrelse 30 [Pa].

Som en ser vil det ved normal drift på ventilasjonsanlegget være lekkasjeåpningenes størrelse som avgjør om røyk kan trenge inn når temperaturen er på sitt høyeste i korridorene. Dørene ombord i skipet er oppgitt å være rimelig tette, og spalten under døren er den vesentligste lekkasjeåpningen. Det er derfor sannsynlig at røyk ikke har trengt inn i lugarer på Gulf-dekk i perioden hvor varmetviklingen i brannen var på sitt sterkeste, så lenge ventilasjonsanlegget var i gang. Ved større lekkasjeåpninger mellom korridor og lugarer under himling er det muligheter for røykinntrengning i fasen hvor det var stor varmetvikling i brannen.

D3 Røykinntrengning i lugarer når ventilasjonsanlegget er stanset.

Når ventilasjonsanlegget stanses er det de termiske krefter som bestemmer hvor raskt en lugar vil fylles med røyk. Luftveksling gjennom lekkasjer kan beregnes, og den tiden det tar før kritisk dose for mennesker som oppholder seg i en lugar oppnås kan beregnes.

Formelen for dose inne i et rom med en viss luftveksling med omgivelsene er /6/:

$$\Psi_i / \Psi_o = 1 - (1/(\eta \cdot \Delta t)) [1 - e^{(-\eta \cdot \Delta t)}]$$

hvor

Ψ_i = Dose inne i rommet [ppm·h]

Ψ_o = Dose i omgivelsene [ppm·h]

$$\eta = \text{Antall luftvekslinger pr time [h}^{-1}\text{]} \\ \Delta t = \text{Tidsrom i timer [h]}$$

Etter stopp i ventilasjonsanlegget vil et mulig luftvekslingstall for en lugar med en lekkasje bare under døren, med en middeltemperatur i korridoren på 400 °C vil være:

$$\eta = Q_1/V$$

hvor

$$\eta = \text{Luftvekslingstallet [h}^{-1}\text{]} \\ Q_1 = \text{Luftlekkasjen [m}^3\text{/h]} \\ V = \text{Volum av en lugar [m}^3\text{]}$$

$$Q_1 = K_f \cdot A \cdot (\Delta p)^{1/2} = 0,84 \cdot 0.004 \cdot (13)^{1/2} = 1.2 \cdot 10^{-2} \quad [\text{m}^3/\text{s}]$$

$$\text{dvs. } 44 \text{ [m}^3\text{/h]}.$$

Volumet av en lugar med WC/dusj er ca 15 [m³].

Luftvekslingstallet blir da:

$$\eta = 44/15 = 2.9 \text{ [h}^{-1}\text{]}$$

Kritisk dose for CO før mennesker overmannes av røyken er satt til 35000 ppm·min. Tiden før denne nås inne i en lugar med de beregnede lekkasjer vil være i størrelse 14 minutter etter at ventilasjonsanlegget er slått av, forutsatt en CO-konsentrasjon på 10000 ppm. Dersom CO-konsentrasjonene er 5000 ppm vil tid før overmanning bli 20 minutter.