

Tåleevne til brannvegger

Per Arne Hansen, Ragni Fjellgaard Mikalsen, Geir Drangsholt,
Ragnar Wighus, Anne Steen-Hansen

SP Fire Research AS

Brannvegg av klasse A



Brannvegg eksponeres for en
HC-brann < 100 kW/m²



Brannvegg av klasse A



Brannvegg eksponeres for en
HC-brann > 100 kW/m²



Illustrasjoner: Petroleumstilsynet

Tåleevne til brannvegger

VERSJON 1	DATO 2014-12-12	NØKKELOORD: Brann Sikkerhet Brannvegg Hydrokarbon- brann H-vegg A-vegg Ytelse
FORFATTERE Per Arne Hansen, Ragni Fjellgaard Mikalsen, Geir Drangsholt, Ragnar Wighus, Anne Steen-Hansen		
OPPDRAGSGIVER Petroleumstilsynet	OPPDRAGSGIVERS REF. Avrop nr. 06451-01-2014-992127 Saksnr. 2013/749.	
PROSJEKTNR. 20046	ANTALLSIDER: 44	

SAMMENDRAG

Denne rapporten er utarbeidet på oppdrag fra Petroleumstilsynet (Ptil). Bakgrunnen for rapporten er at Ptil har sett eksempler på tilfeller i bransjen der brannmotstanden til brannvegger reduseres, ved at det benyttes en risikobasert beslutningsmodell som er svært avhengig av hvilke frekvenser som tillegges forskjellige branner. Det finnes eksempler på at brannvegger med brannmotstand A-60 benyttes der disse grenser mot områder der det kan oppstå en hydrokarbonbrann.

Kunnskapen om relevante brannpåkjenninger må oppdateres. Det er behov for en vurdering utført av brannfaglig ekspertise som kan fastslå dagens beste kunnskap innenfor temaet tåleevne for forskjellige veggtyper.

Målet med prosjektet er å etablere et oppdatert bilde av hvilke brannpåkjenninger brannvegger i realiteten tåler. Det er foretatt en gjennomgang av dokumenter og litteratur, med målsetting om å fremskaffe svar på problemstillinger gitt av Ptil.

PROSJEKTLEDER Anne Steen-Hansen		SIGNATUR 	
KONTROLLERT AV Ragnar Wighus		SIGNATUR 	
GODKJENT AV Are W. Brandt		SIGNATUR 	
RAPPORTNR. SPFR A14116	ISBN 978-82-14-00131-0	GRADERING Åpen	GRADERING DENNE SIDE Åpen

Historikk

VERSJON	DATO	VERSJONSBESKRIVELSE
1	12.12.2014	Endelig versjon

Innholdsfortegnelse

Innholdsfortegnelse	2
Sammendrag	3
1. Innledning	6
1.1 Bakgrunn	6
1.2 Målsetting	6
1.3 Metoder	6
1.4 Begrensninger	6
1.5 Metodekritikk	7
1.6 Definisjoner	7
2 Relevant regelverk og standarder	10
2.1 Innretningsforskriften	10
2.2 Forskrift om sikringstiltak mot brann og eksplosjoner på flyttbare innretninger	10
2.3 ISO 834, Brannmotstand hos bygningsmaterialer og bygningsdeler	11
2.4 NS-EN 1363, Prøving av brannmotstand	12
2.5 IMO 2010 FTP Code, Part 3	13
2.6 NORSOK S-001, Technical safety	13
3 Dokument- og litteraturgjennomgang	14
3.1 Erfaring fra branntester	14
3.1.1 Isolerte stålskott uten skjøter og med samme type isolasjon	14
3.1.2 Isolerte stålpåner med skjøteprofiler og forskjellig isolasjon	18
3.2 Faglitteratur	22
3.2.1 Temperaturkriterier på ueksponert side	22
3.2.2 Varmelast fra åpne og innelukkede hydrokarbonbranner	23
3.2.3 Egenskaper til materialene som brukes i påner og skott	27
3.3 Andre relevante dokumenter	29
4 Introduksjon til og diskusjon av brannlast	31
5 Diskusjon av problemstillinger	33
5.1 Problemstilling 1	33
5.2 Problemstilling 2	36
5.3 Problemstilling 3 og 4	38
5.4 Problemstilling 5	39
6 Konklusjoner	41
7 Anbefalinger til videre arbeid	42
Referanser	43

Sammendrag

Denne rapporten er utarbeidet på oppdrag fra Petroleumsstilsynet (Ptil). Bakgrunnen for rapporten er at Ptil har sett eksempler på tilfeller i bransjen der brannmotstanden til brannvegger reduseres, ved at det benyttes en risikobasert beslutningsmodell som er svært avhengig av hvilke frekvenser som tillegges forskjellige branner. Det finnes eksempler på at brannvegger med brannmotstand A-60 benyttes der disse grenser mot områder der det kan oppstå en hydrokarbonbrann. I dagens NORSOK S-001 benyttes en grenseverdi på 100 kW/m^2 . Hvis varmekullstettheten til den dimensjonerende brannen overstiger 100 kW/m^2 , skal det anvendes skiller med minst klasse H-60. Opphavet til denne verdien er gammel. Kunnskapen om relevante brannpåkjenninger må oppdateres. Det er behov for en vurdering utført av brannfaglig ekspertise som kan fastslå dagens beste kunnskap innenfor temaet tåleevne for forskjellige veggtyper.

Målet med prosjektet er å etablere et oppdatert bilde av hvilke brannpåkjenninger brannvegger i realiteten tåler. Det er foretatt en gjennomgang av dokumenter og litteratur, med målsetting om å fremskaffe svar på følgende fem problemstillinger gitt av Ptil:

Problemstilling 1:

Hvordan vil en brannvegg av brannklasse A eksponeres for en hydrokarbonbrann oppføre seg gitt følgende brannscenarier med forskjellig varighet:

- Brannveggen eksponeres for en hydrokarbonbrann med brannlast mindre enn 100 kW/m^2
- Brannveggen eksponeres for en hydrokarbonbrann med brannlast større enn 100 kW/m^2

Problemstilling 2:

En brannvegg av brannklasse A eksponeres for en hydrokarbonbrann. Har det noen betydning hvilken side av brannveggen som er isolert? Følgende scenarier skal vurderes:

- Isolert side av brannvegg eksponeres for hydrokarbonbrann
- Uisolert side av brannvegg eksponeres for hydrokarbonbrann

Problemstilling 3

Hva er forskjellen på en brannvegg av brannklasse H-60 og en brannvegg av brannklasse A-60 som eksponeres for en hydrokarbonbrann?

Problemstilling 4:

Stilles det spesielle krav til materialer og materialegenskaper for de forskjellige utformingene av brannskiller, eksempelvis brannisolasjon på eksponert side kontra brannisolasjon på ikke eksponert side?

Problemstilling 5:

Er standardenes krav til brannmotstand og tester relevant med tanke på den aktuelle brannbelastning en brannvegg kan utsettes for?

Det er gitt en diskusjon og en oppsummert faglig vurdering av problemstillingene hver for seg. Ettersom mange av problemstillingene har tema som overlapper, kan de viktigste konklusjonene fra prosjektet oppsummeres som følger:

- Dokumentasjonsgrunnlaget for å kunne vurdere hvorvidt en brannvegg av A-klasse vil tåle å bli eksponert for en hydrokarbonbrann, er svært begrenset. Det må fremskaffes relevante forsøksdata og testdokumentasjon som grunnlag for vurderinger knyttet til aksept av eksisterende A-60 konstruksjoner i områder hvor det kan oppstå hydrokarbonbrann.

- Type isolasjonsmateriale som brukes, og tykkelsen på dette, er avgjørende for hvor godt en brannvegg tåler påkjenningene fra en hydrokarbonbrann, avhengig av om isolasjonen er plassert på eksponert eller ueksponert side. Den optimale plasseringen av isolasjon er avhengig av hensikten med brannskillet, for eksempel om strukturen trenger beskyttelse for at veggkonstruksjonen skal oppnå tilstrekkelig integritet, stabilitet eller isolasjonsevne.
- Observasjoner fra test med 1,5 mm isolert stålplate uten skjøter viser at denne er i stand til å motstå en hydrokarbonbranntest i 120 minutter uten gjennombrenning. Eksemplet er fra test med isolasjonen plassert på ueksponert side, noe som er konservativt i forhold til oppnådd ståltemperatur, på grunn av magasinering av varme i stålet.

Basert på punktene over, vil det være mulig å vurdere bruk av brannvegger med dokumentert brannmotstand A-0, A-60 eller A-120 der kravet er brannmotstand i henhold til hydrokarbonbranneksponering. En slik vurdering vil være lettere å akseptere dersom den aktuelle branneksponeeringen er definert til å være mindre eller lik en varmeflukstetthet på 100 kW/m^2 . Et annet moment som vil kunne forenkle en slik vurdering, er at det kun stilles krav til integritet for brannveggen.

I tilfeller hvor den aktuelle branneksponeeringen er definert til å være høyere enn en varmeflukstetthet på 100 kW/m^2 , vil det være vanskeligere å dokumentere at brannvegger med A-klasse kan benyttes uten at det foreligger relevant testdokumentasjon. Jo høyere varmeflukstettheten er over 100 kW/m^2 , desto mindre er sannsynligheten for at det vil være akseptabelt å benytte brannvegger med A-klasse.

På bakgrunn av dette anbefaler vi at det settes opp og gjennomføres et testprogram hvor ulike typer installerte A-klassifiserte brannvegger utsettes for hydrokarbonbranner med en gitt brannlast, for å avdekke hvorvidt det er behov for oppgraderinger av eksisterende brannvegger. Brannlast som kan brukes her er tid-temperaturkurve som tilsvarer en varmeflukstetthet på 100 kW/m^2 , eller andre relevante brannlast. På bakgrunn av et slikt testprogram er målsettingen å komme frem til om det er mulig å etablere grunnlagskriterier for å vurdere andre eksisterende løsninger som ikke er testet.

For fremtiden anbefaler vi at det etableres en testmetode der skillekonstruksjoner eksponeres for en brannlast med en tid-temperaturkurve som tilsvarer en varmeflukstetthet på 100 kW/m^2 som et alternativ til standard HC-kurve, for de tilfellene der det er tilstrekkelig å beskytte seg mot en redusert hydrokarbonbrann (100 kW/m^2).

I en rapport om risikoevaluering av tåleevne til brannvegger er viktig å ta hensyn til følgende fire punkter:

- Integritet
- Isolasjonsevne
- Stabilitet ved egenvekt
- Stabilitet ved ytre påført last

Dersom noen av disse skal utelates fra vurdering, bør det gjøres basert på en evaluering som fremkommer i rapporten. Hvis ikke, bør alle punkter vurderes på lik linje.

Videre er det avdekket behov for kunnskapsoppdatering og en eventuell endring i regelverk basert på kunnskapsoppdateringen når det gjelder hvilke brannlast som er aktuelle for hydrokarbonbranner. Det er i denne rapporten gjengitt eksperimentelle resultater som dokumenterer at varmemengden fra en hydrokarbonbrann kan gi en større brannlast enn hva dagens standarder og testmetoder omfatter. Dette gjelder både for åpne og innelukkede branner. En kunnskapsoppdatering på dette området vil være svært viktig

med tanke på aktuelle fremtidige problemstillinger i forbindelse med vinterisering av plattformer, hvor innelukking av branner kan føre til en høyere brannlast enn det som dagens regelverk er dimensjonert for.

1. Innledning

1.1 Bakgrunn

Denne rapporten er utarbeidet på oppdrag fra Petroleumstilsynet (Ptil), i henhold til avrop/oppdragsbestilling innenfor rammeavtalen mellom Ptil og Stiftelsen SINTEF, avrop nr. 06451-01-2014-992127.

Ptil har sett eksempler på tilfeller i bransjen der brannmotstanden til brannvegger reduseres ved at det benyttes en risikobasert beslutningsmodell som er svært avhengig av hvilke frekvenser som tillegges forskjellige branner. Det finnes eksempler på at brannvegger med brannmotstand A-60 benyttes der disse grenser mot områder der det kan oppstå en hydrokarbonbrann.

I eldre forskrifter (og i dagens NORSOK S-001) benyttes en grenseverdi på 100 kW/m². Opphavet til denne verdien er gammel. Kunnskapen om relevante brannpåkjenninger må derfor oppdateres. Det er behov for en vurdering utført av brannfaglig ekspertise som kan fastslå dagens beste kunnskap innenfor temaet tåleevne for forskjellige veggtyper. Resultatet fra studien vil være viktig beslutningsunderlag i Ptil sin pågående og fremtidige saksbehandling og tilsynsaktiviteter.

1.2 Målsetting

Målet med prosjektet er å etablere et oppdatert bilde av hvilke brannpåkjenninger brannvegger i realiteten tåler. Dette skal gjøres ved å fremskaffe svar på problemstillinger gitt av Ptil. Problemstillingene er gjengitt og diskutert i avsnitt 5.

1.3 Metoder

I tråd med Ptils bestilling er prosjektarbeidet basert på en gjennomgang av dokumenter og litteratur. Aktivitetene i prosjektet kan oppsummeres i de følgende punktene:

- Kartlegging og sammendrag av de deler av regelverk og standarder som er mest sentrale for problemstillingen i denne rapporten.
- Kartlegging og gjennomgang av testrapporter fra oppdrag i SP Fire Research sin database fra 1980-tallet frem til i dag.
- Gjennomgang av konfidensielle forskningsrapporter skrevet av SP Fire Research.
- Gjennomgang av rapport fra risikovurdering gjort tilgjengelig for SP Fire Research.
- Kartlegging av relevant, publisert faglitteratur på området.

Vurderinger av prosjektets problemstillinger er gjort av seniorpersonale ved SP Fire Research på grunnlag av kartlegging av regelverk, testrapporter og faglitteratur.

1.4 Begrensninger

Prosjektet er avgrenset til å omfatte tåleevne til brannvegger som benyttes i områder der det kan oppstå en hydrokarbonbrann. Brannveggene som omfattes av prosjektet er panel og skott, med og uten skjøter. Prosjektet omhandler ikke skiller med gjennomføringer, dører, vinduer etc. Hydrokarbonbranner som omfattes av prosjektet er oppdriftsdrevne branner uten stor impuls etter utløpet, ofte karakterisert som væskedamsbranner. Prosjektet omhandler ikke jetbrann eller spraybrann. Bærende konstruksjoner er utenfor prosjektets omfang, og stabilitet avgrenses her til å omfatte stabilitet ved egenvekt, og ikke ved ytre påført last.

Vi har i utgangspunktet tatt forbehold om at tilgjengelig litteratur og tilgjengelige dokumenter ikke inneholder tilstrekkelig informasjon og grunnlag for å svare på de fem problemstillingene Ptil ønsker svar på. Hvis dette skulle være tilfellet, har det vært en idé å skissere et forslag til hvordan nødvendig kunnskap kan fremskaffes.

Prosjektet omfatter ikke eksperimentelle forsøk eller CFD-simuleringer. Prosjektet omfatter ikke levetidsvurderinger, det vil si hvordan egenskapene til brannvegger kan påvirkes over tid.

1.5 Metodekritikk

Det ble gjort et utvalg av dokumenter og litteratur for gjennomgang i prosjektet. Kun de forskrifter og standarder som ble ansett som mest relevante for tåleevne til brannvegger ble gjennomgått. Faglitteraturen på området er omfattende og omhandler mye, og det er gjennomført et bredt litteratursøk. Den mest relevante litteraturen ble plukket ut for nærmere gjennomgang. I denne prosessen er det mulig at noe relevant litteratur har blitt oversett, eller at artikler har blitt utelatt fra gjennomgangen.

1.6 Definisjoner

I dette avsnittet er det gitt en liste over definisjoner av ord og uttrykk som er brukt i rapporten. Der det er gitt ulike definisjoner i ulike regelverk, er begge definisjoner tatt med.

Ord/ uttrykk	Definisjon
Anerkjent standard	Standard som er utgitt av NS/BS/API/DIN/NFPA/ISO/CEN/IEC eller andre standarder, eventuelt regelverk, som for et bestemt anvendelsesområde er nasjonalt og/eller internasjonalt anerkjent. (...) [1]
Brannlast	Dette begrepet er brukt med forskjellig betydning i ulike sammenhenger. Ptil benytter dette begrepet i definisjonen av oppgavene i dette prosjektet. Brannlast kan i noen sammenhenger være en akkumulert energimengde som et objekt utsettes for i løpet av en tidsperiode. Dette vil bli angitt i kJ (kilojoule). Dersom denne energimengden beregnes per flateenhet, kan en få en akkumulert brannlast angitt i kJ/m ² . I bygningsklassifisering, spesielt i landbaserte bygninger, ble begrepet <i>spesifikk brannbelastning</i> ¹ tidligere brukt om den totale energimengden som befinner seg inne i et område, dividert på overflaten av vegger, tak og gulv. Denne angis også kJ/m ² , men må ikke forveksles med akkumulert brannlast over en tidsperiode. Definisjoner av begrepene varme, varmfluks og varmeflukstetthet gitt lenger ned i denne tabellen vil bli benyttet av SP Fire Research.

¹ I dag benytter byggereglene begrepet *brannenergi* i stedet for brannbelastning.

Ord/ uttrykk	Definisjon
Brannskille klasse A (i henhold til innretningsforskriften)	Et skille utført i ubrennbare materialer som oppfyller følgende kriterier: a) det er tilstrekkelig avstivet, b) det hindrer spredning av flammer og røyk i minst én time av normert brannprøve, c) det er utformet slik at gjennomsnittstemperaturen og temperaturen ikke på noe enkeltpunkt på ueksponert side stiger mer enn henholdsvis 140 °C og 180 °C over den opprinnelige temperaturen innenfor følgende tider: - klasse A-60: 60 minutter, - klasse A-30: 30 minutter, - klasse A-15: 15 minutter, - klasse A-0: 0 minutter, d) eventuelle isolasjonsmaterialer er brannprøvd ved en institusjon som er internasjonalt eller nasjonalt anerkjent på fagområdet. [2]
Brannskiller av klasse «A» (i henhold til forskrift om flyttbare innretninger)	Skiller som dannes ved skott og dekk og som er: - bygget av stål eller likeverdig materiale, - passende avstivet, - slik bygget at de er i stand til å forhindre framtrengning av røyk og flammer inntil utgangen av en standard brannprøve av en times varighet, og - isolert med sertifiserte ubrennbare materialer, slik at gjennomsnittstemperaturen på den ikke-utsatte side ikke stiger mer enn 140 °C over den opprinnelige temperatur, og heller ikke skal temperaturen på noe enkelt punkt, innbefattet en eventuell skjøl, stige mer enn 180 °C over den opprinnelige temperatur, innenfor de nedenfor oppgitte tider: - Klasse A-60 - 60 minutter - Klasse A-30 - 30 minutter - Klasse A-15 - 15 minutter - Klasse A-0 - 0 minutter. [1]
Brannskille av klasse H (i henhold til innretningsforskriften)	Et skille utført i ubrennbare materialer som oppfyller følgende kriterier: a) det er tilstrekkelig avstivet, b) det hindrer spredning av flammer og røyk i minst to timer av normert brannprøve, c) det er utformet slik at gjennomsnittstemperaturen og temperaturen ikke på noe enkeltpunkt på ueksponert side stiger mer enn henholdsvis 140 °C og 180 °C over den opprinnelige temperaturen innenfor følgende tider: - klasse H-120: 120 minutter, - klasse H-60: 60 minutter, - klasse H-0: 0 minutter, d) eventuelle isolasjonsmaterialer er brannprøvd ved en institusjon som er internasjonalt eller nasjonalt anerkjent på fagområdet. [2]

Ord/ uttrykk	Definisjon
Brannskiller av klasse «H» (i henhold til forskrift om flyttbare innretninger)	Skiller som er: - bygget av stål eller annet likeverdig materiale - tilstrekkelig avstivet - slik bygget at de vil hindre framtrengning av røyk og flammer i 2 timer når de utsettes for varmpåkjennning fra en hydrokarbonbrann som er beskrevet i revidert utgave av ISO 834 (HC-kurven) - isolert på den brannbelastede side på en slik måte at gjennomsnittstemperaturen på den ikke-utsatte side ikke stiger mer enn 140 °C over den opprinnelige temperatur. Temperaturen stiger ikke på noe enkelt punkt mer enn 180 °C over den opprinnelige temperaturen innenfor de tider som er angitt nedenfor: Klasse H-120 - 120 minutter Klasse H-60 - 60 minutter Klasse H-0 - 0 minutter [1]
Defleksjon	Avbøying forbundet med strukturelle og/eller termiske hendelser. [3]
Dimensjonerende brann	Brann som i henhold til de definerte akseptkriteriene representerer en uakseptabel risiko, og som derfor legges til grunn for utforming og bruk av den flyttbare innretningen. [1]
Flyttbar innretning	Ei flyttbar innretning er ei flytande flyttbar offshoreining, uansett skrogtype, som vert nytta til aktivitetar innan undersjøisk petroleumsvirksemd. [4]
HC-kurve	I denne rapporten brukes dette begrepet om ovnstemperaturkurven for hydrokarbonbranner, slik den er definert i ISO 834. Begrepet HC-eksponering brukes også om det samme.
Innretning	Installasjoner, anlegg og annet utstyr for petroleumsvirkosomhet, likevel ikke forsynings- og hjelpefartøy eller skip som transporterer petroleum i bulk. Innretning omfatter også rørledning og kabel når ikke annet er bestemt. [2], [5]
Integritet	Bygningsdels evne til å motstå brannpåkjenning på én av sidene, uten at brannen smitter igjennom som følge av gjennomtrengning av flammer eller varme gasser. [6]
ISO-kurve	I denne rapporten brukes dette begrepet om standard ovnstemperaturkurven, slik den er definert i ISO 834. Begrepet ISO-eksponering brukes også om det samme.
Isolasjonsevne	Varveisolasjonsevne: En skillende bygningsdels evne til å begrense gjennomgangen av varme når bygningsdelen er eksponert for brann på en side.[6]
Stabilitet - brann	Den statiske bæreevnen av enkeltkomponenter eller system av komponenter som sikrer at bygget ikke mister sin opprinnelige form og i ytterste konsekvens raser sammen, til tross for den reduksjon i bæreevne som brannen forårsaker. [6]
Ubrennbart materiale	Materiale som verken brenner eller avgir brennbar gass i tilstrekkelig mengde for selvantennelse når det oppvarmes til ca. 750 °C og bestemt som ubrennbart i samsvar med FTP-koden. Alt annet materiale anses å være brennbart materiale. [1]
Varmefluks	Energi per tidsenhet, måles i kW (kilowatt)
Varmeflukstetthet	Energi per tidsenhet og arealenhet, måles i kW/m ² (kilowatt per kvadratmeter)
Varmemengde	Energi, måles i kJ (kilojoule)

2 Relevant regelverk og standarder

Dette kapitlet inneholder en generell beskrivelse av de deler av regelverk og standarder som er mest sentrale for problemstillingene i denne rapporten. Kapitlet vil gi en kort beskrivelse av de mest relevante elementene i regelverket, og er ikke ment som en gjengivelse av regelverket i sin helhet. Det er to forskrifter med veiledninger, samt tre standarder som er særlig aktuelle her.

2.1 Innretningsforskriften

Forskrift om utforming og utrustning av innretninger med mer i petroleumsvirksomheten (innretningsforskriften) [2] er hjemlet i petroleumsløven, forurensningsløven, arbeidsmiljøløven, helsepersonelloven, smittevernløven og matløven.

Innretningsforskriften er innenfor Petroleumstilsynets myndighetsområde. Forskriften er funksjonsbasert, og stiller overordnede krav til blant annet fysiske barrierer som brannskiller innenfor petroleumsvirksomhet på norsk sokkel.

I Innretningsforskriftens §3 defineres brannskille klasse A og brannskille klasse H, se definisjoner i avsnitt 1.6. Her angis blant annet krav til temperatur på ueksponert side av brannskillet.

Hovedområder på innretninger skal i følge §30 atskilles med brannskiller som minimum oppfyller brannklasse H-0 dersom de kan bli utsatt for hydrokarbonbranner. I følge §31 skal yttervegger i boligkvarter som vender mot prosess- eller boreområde og kan eksponeres for brann fra disse, minst oppfylle brannklasse H-60. Øvrige yttervegger skal minst oppfylle brannklasse A-60.

Veiledning til innretningsforskriften utarbeides av Petroleumstilsynet. Veiledningen er ikke juridisk bindende, men skal vise hvordan bestemmelsene i forskriften kan oppfylles [7]. I veiledningen til §3 fremkommer det at brannskiller av klasse A og H bør testes i henhold til ISO 834 for normert brannprøve.

2.2 Forskrift om sikringstiltak mot brann og eksplosjoner på flyttbare innretninger

Forskrift 31. januar 1984 nr. 227 om sikringstiltak mot brann og eksplosjoner på flyttbare innretninger (Forskrift om brannsikring, flyttb. innretn.) [1] er hjemlet i skipssikkerhetsløven. Forskriften er innenfor Sjøfartsdirektoratets myndighetsområde. Forskriften forvaltes også av Petroleumstilsynet, som kan fastsette tilleggskrav med hjemmel i §3 i *Forskrift om helse, miljø og sikkerhet i petroleumsvirksomheten og på enkelte landanlegg (Rammeforskriften)* [5].

I forskriftens §1 defineres brannskiller av klasse «A» og brannskiller av klasse «H», se definisjoner i avsnitt 1.6. I definisjonene angis blant annet krav til temperaturmålinger på ueksponert side av brannskillet. Det angis også at brannskille klasse H skal være testet med «*varmepåkjennning fra en hydrokarbonbrann som er beskrevet i revidert utgave av ISO 834 (HC-kurven)*». Videre angir §1 at standard brannprøve er en brannprøve som blir utført på brannskille klasse A og B i samsvar med FTP-koden. Begrepet *anerkjent standard* er også definert.

I forskriftens §20 angis hvilken brannintegritet skott skal ha i ulike områder på en flyttbar installasjon. For skott som grenser til eksplosjonsfarlige områder er det krav til A-skiller, med en merknad om at Sjøfartsdirektoratet kan stille strengere krav til brannintegritet

etter nærmere risikovurderinger. Videre er det en merknad om at ytterflater mot åpent dekk skal være av stål eller likeverdig materiale, men behøver ikke være A-skiller. Dersom overflatene kan være utsatt for hydrokarbonbrann skal de vurderes spesielt.

Forskriften angir mulig behov for brannskille av klasse H i §20, anmerkning 2:

«Ytterflater mot bore- eller produksjonsområdet skal minst være av brannklasse A-60. På grunnlag av resultatene fra utførte risikovurderinger/beregninger av dimensjonerende brann kan det bli krevd brannskiller av klasse «H».»

Sjøfartsdirektoratets forskrifter har som regel ingen veiledninger, ettersom funksjons- og ytelseskrav stilles direkte i forskriften. Dersom det oppstår uklarheter om en forskrift, kan Sjøfartsdirektoratet velge å utgi oppklarende rundskriv. Det foreligger per dags dato ingen veiledning til eller rundskriv om forskriften.

2.3 ISO 834, Brannmotstand hos bygningsmaterialer og bygningsdeler

Forskrift om brannsikring, flyttb. innr. refererer til revidert utgave av ISO 834 for definisjon av en hydrokarbonbrannkurve (HC-kurven). Veiledning til *innretningsforskriften* viser til at brannskiller av klasse A og H skal testes i henhold til ISO 834.

Standardens del 1, ISO 834-1, angir testmetode for prøving av brannmotstand for ulike bygningsdeler, når disse utsettes for standard branneksposering [8]. Avsnitt 10 (ISO 834-1:1999) beskriver ytelseskriteriene for bæreevne, integritet og isolasjonsevne som følger:

- *Bæreevne:* Defleksjon og sammentrekning i prøvestykket kan ikke overstige visse grenseverdier. Disse er angitt som funksjon av dimensjonsmål på prøvestykket.
- *Integritet:* Det regnes som integritetsbrudd dersom et bomullsstykke antennes på ueksponert side, eller det er spalter av en viss størrelse i prøvestykket, eller hvis det er vedvarende flammer på ueksponert side.
- *Isolasjonsevne:* Gjennomsnittlig temperaturøkning på ueksponert side av prøvestykket skal ikke overstige 140 °C, og maksimal temperaturøkning skal ikke overstige 180 °C.

Del 1 av ISO 834 definerer standard ovnstemperaturkurven (ISO-kurven) som gitt i ligning (2-1). I del 3 av standarden defineres hydrokarbonbrannkurven (HC-kurven) som gitt i ligning (2-2).

$$T = 345 \cdot \log_{10}(8t + 1) + 20 \quad (2-1)$$

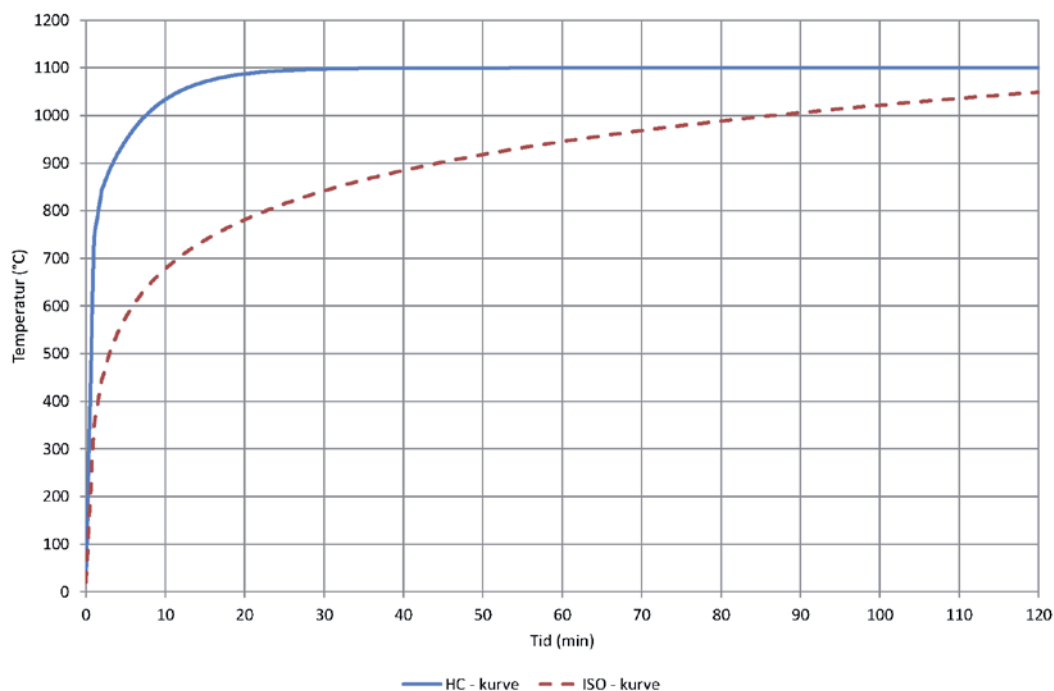
$$T = 1100 \cdot [1 - 0,325e^{-0,1667t} - 0,204e^{-1,417t} - 0,471e^{-15,833t}] \quad (2-2)$$

der

T = temperatur i °C

t = tid i minutter

HC-kurven kjennetegnes ved raskere temperaturstigning sammenlignet med ISO-kurven, se Figur 2-1.



Figur 2-1: Tid/temperaturkurver for HC-eksponering og ISO-eksponering.

Standardens del 2 og del 4 – 11 inneholder veiledning og spesifikke krav til testing av ulike bygningsdeler.

2.4 NS-EN 1363, Prøving av brannmotstand

Forskriftene som er gjennomgått i denne rapporten refererer ikke direkte til denne standarden. Det er likevel en relevant standard, ettersom den er en *anerkjent standard*, slik det er definert i *Forskrift om brannsikring, flyttb. innr.*, se definisjon gitt i avsnitt 1.6.

Standardens del 1 beskriver generelle krav til prøving av brannmotstand [3]. Den angir testoppsett og testgjennomføring for prøving av brannmotstand med standard brannkurve. Avsnitt 11 (NS-EN 1363-1:2012) beskriver ytelseskriteriene for bæreevne, integritet og isolasjonsevne. Disse tilsvarer kriteriene fra ISO 834-1, angitt i avsnitt 2.3. Videre definerer del 1 av standarden ISO-kurven. Denne er definert på samme måte som i ISO 834-1, se avsnitt 2.3.

I standardens del 2 beskrives alternative prosedyrer og tilleggsprosedyrer [9]. Avsnitt 4 (NS-EN 1363-2:1999) definerer hydrokarbonbrannkurven, som gitt i ligning (2-3). Merk at denne er noe annerledes enn HC-kurven slik den er definert i ISO 834. Forskjellen er likevel ikke så stor at den har noen praktisk betydning for anvendelse av kurven til testing. Standarden angir at HC-kurven er særlig relevant for petrokjemi og offshore oljeindustri, hvor intense branner kan oppstå.

$$T = 1080[1 - 0,325e^{-0,167t} - 0,675e^{-2,5t}] + 20 \quad (2-3)$$

der

T = temperatur i °C

t = tid i minutter

Del 3 av standarden beskriver verifikasjon av prøvingsovnens ytelser [10].

2.5 IMO 2010 FTP Code, Part 3

Forskrift om brannsikring, flyttb. innr. refererer til at brannprøving av klasse A og B brannskiller skal være i samsvar med FTP-koden [11]. I tredje del av FTP-koden, *2010 FTP Code, International Code for Application of Fire Test Procedures, Part 3 – test for «A», «B» and «F» class divisions*, angis blant annet testprosedyre for test av A-klasse brannskiller på skip.

FTP-koden viser til ISO 834 når det gjelder den generelle gjennomføringen av branntest, herunder kontroll og utførelse av selve branntesten. Det som først og fremst skiller FTP-koden Part 3 fra ISO 834, er at førstnevnte inneholder en detaljert beskrivelse av oppbygging og montering av konstruksjoner spesielt rettet mot forhold og krav på skip.

Ytelseskriteriene som stilles til brannskiller klasse A, omhandler isolasjonsevne og integritet. I likhet med ISO 834 og NS-EN 1363 er kriteriene med hensyn på isolasjonsevne at gjennomsnittlig temperaturøkning på ueksponert side av prøvestykket ikke skal overstige 140 °C, og maksimal temperaturøkning skal ikke overstige 180 °C. Integritetskriteriene er også tilsvarende som for ISO 834 og NS-EN 1363, se avsnitt 2.3, bortsett fra punktet vedrørende flammer. For ISO 834 og NS-EN 1363 regnes det som kriteriebrudd når det oppstår kontinuerlige flammer med varighet mer enn 10 sekunder, mens det for FTP-koden ikke er krav til varighet av flammer for at det skal regnes som kriteriebrudd.

2.6 NORSOK S-001, Technical safety

NORSOK-standardene utvikles av den norske petroleumsindustrien, og skal ivareta sikkerhet, verdiskaping og kostnadseffektivitet for utbygging og drift i petroleumsindustrien. Anerkjente internasjonale standarder ligger til grunn for utviklingen av NORSOK-standardene, med tillegg av bestemmelser dersom det ansees som nødvendig for norsk petroleumsindustri. NORSOK-standardene skal så langt som mulig erstatte spesifikasjoner fra selskaper, og kunne brukes som referanser til myndighetenes regelverk. Dersom det utgis dekkende internasjonale standarder, vil NORSOK-standardene trekkes tilbake. [12]

NORSOK S-001 Technical Safety angir sikkerhetsmessige prinsipper og krav til utforming av offshoreinstallasjoner for olje- og gassproduksjon. [13]. Kapittel 19 omhandler passiv brannbeskyttelse. Kapittel 19.4.1 angir at brannskiller som eksponeres for hydrokarbonbrann skal være klassifisert i henhold til H-klasse:

«Fire partitions exposed to hydrocarbon fires shall be rated according to H-class.»

Videre angis det i kapittel 19.4.6 at ytterflater i boligkvarter minst skal være klasse A-60. Dersom ytterflatene kan bli utsatt for varmestråling høyere enn 100 kW/m² ved dimensjonerende brann, skal minimum klasse H-60 brukes på disse brannskillene:

«Outer surfaces of living quarters shall minimum be A-60. If the surfaces can be subject to heat flux exceeding 100 kW/m² in a dimensioning fire, minimum class H-60 shall be used for these surfaces.»

3 Dokument- og litteraturgjennomgang

I dette kapitlet er erfaringsdata fra branntester utført ved SP Fire Research (tidligere SINTEF NBL) sammenstilt, se avsnitt 3.1. Videre er kartleggingen som er gjort av faglitteratur på området gjennomgått, se avsnitt 3.2. Til slutt er andre relevante dokumenter som kan belyse problemstillingene i dette prosjektet presentert, se avsnitt 0.

3.1 Erfaring fra branntester

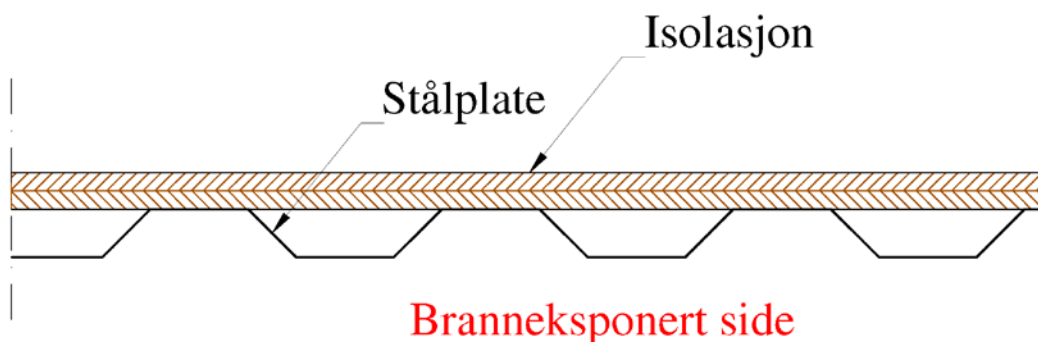
Med bakgrunn i testerfaringen ved SP Fire Research (tidligere SINTEF NBL) er det gjort forsøk på å finne eksempler på mest mulig like konstruksjoner som er testet med hensyn på både A-klasse og H-klasse. Dette for å kunne sammenligne responsen til en konstruksjon avhengig av om den eksponeres i henhold til ISO-kurve eller HC-kurve. Det er imidlertid vanskelig å finne slike tilfeller, men 2 eksempler er gjennomgått i henholdsvis kapittel 3.1.1 og 3.1.2.

Vi har også kontaktet SP Fire Research i Sverige, men de har ikke testerfaring som er relevant i denne sammenheng.

3.1.1 Isolerte stålskott uten skjøter og med samme type isolasjon

Dette eksemplet baserer seg på to isolerte stålskott hvor ett ble eksponert i henhold til ISO-kurve, og det andre i henhold til HC-kurve. Oppbyggingen av de to skottene var svært lik, men det var noen relativt små forskjeller i tykkelse på stålplate og isolasjon, samt isolasjonens densitet. Dette er illustrert i Figur 3-1 og nærmere beskrevet i Tabell 1.

I begge tilfellene dreide det seg om korrugerte stålplater med to lag isolasjon lagt med overlapp slik at det ikke ble gjennomgående skjøter.



Figur 3-1: Illustrasjon av horisontalsnitt gjennom isolerte stålskott uten skjøter.

Tabell 3-1: Oversikt over testparametre og oppbygging av prøvestykke for tester av isolerte stålskott uten skjøter.

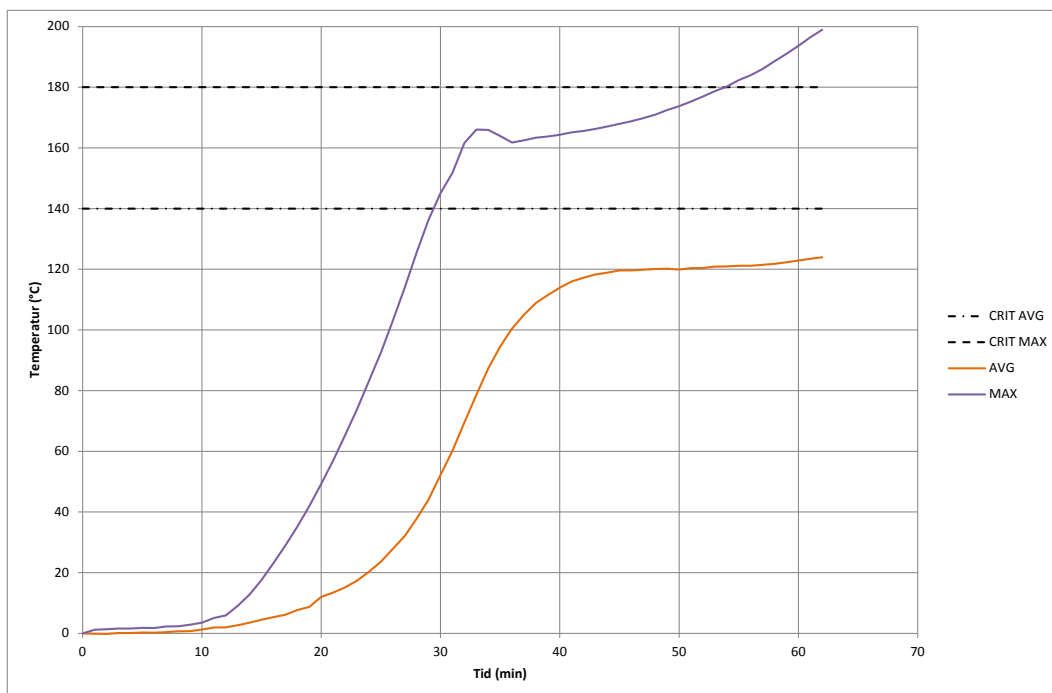
Hensikt med test	Oppnå A-60-klasse	Oppnå H-60-klasse
Testet i henhold til	IMO 2010 FTP Code Part 3	ISO 834
Type skott	2 mm korrugert stålplate	1,5 mm korrugert stålplate
Skjøter i stålskott	Nei	Nei
Stålkvalitet	235J2G3	St 52-3
Isolert side	Ueksponert side	Ueksponert side
Type isolasjon	Steinull	Steinull
Densitet isolasjon	120 kg/m ³	150 kg/m ³
Tykkelse isolasjon	80 mm	85 mm
Innfesting isolasjon	Stålpinner og låseplater	Stålpinner og låseplater

En samlet oversikt over testresultatene er gitt i Tabell 3-2. Resultatene fra temperaturmålinger på ueksponert side for de to konstruksjonene er gitt i Figur 2 og Figur 3-3. Som resultatene viser, var temperaturøkningen på ueksponert side ganske lik for de to testene de første 5 minuttene. Deretter steg temperaturene betraktelig raskere for H-klasetesten sammenlignet med A-klasetesten, noe som førte til kriteriebrudd på et tidligere tidspunkt.

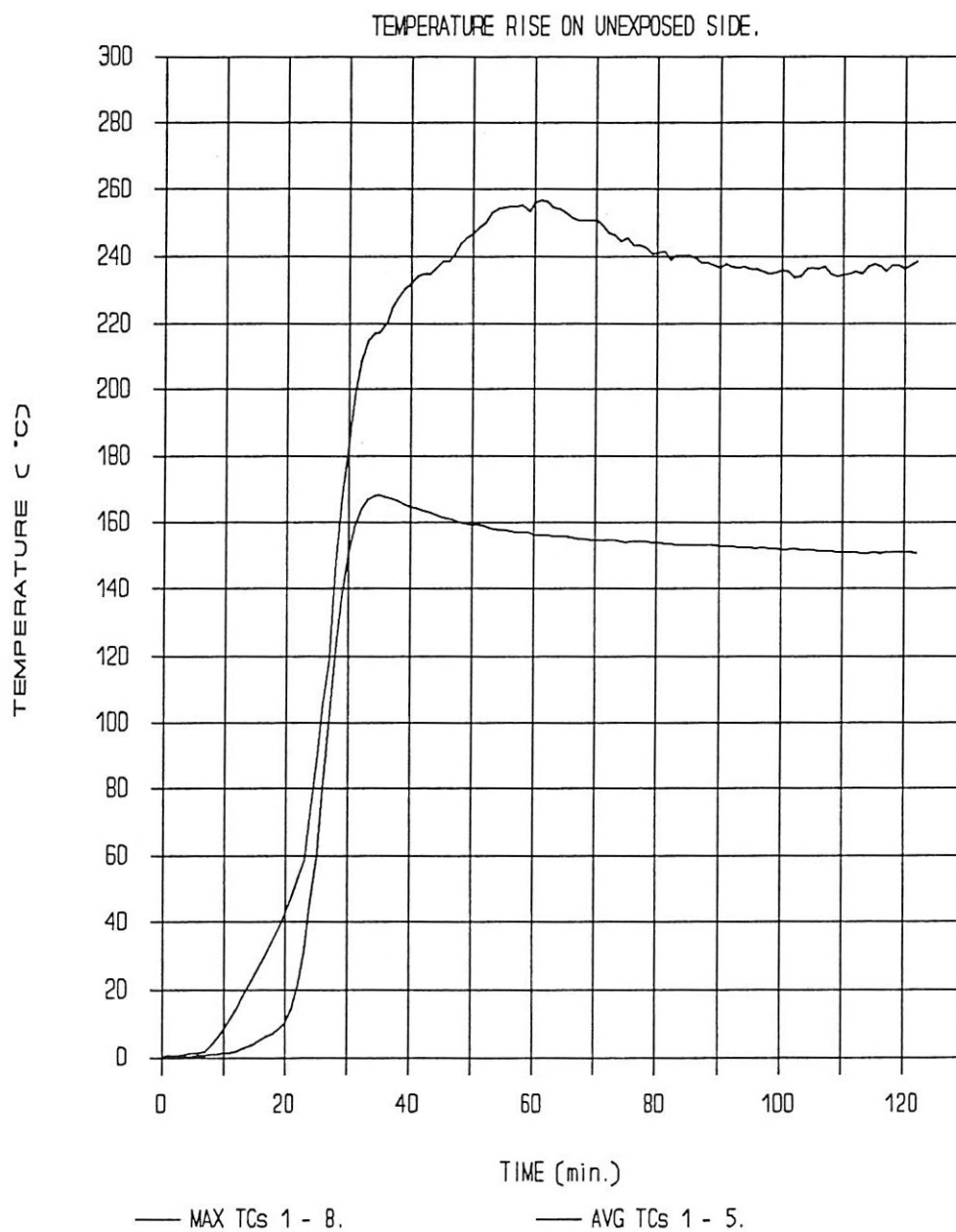
Det ble ikke observert flammer på ueksponert side av prøvestykkene. For konstruksjonen eksponert i henhold til HC-kurve, antente bomullsdotten etter 50 minutter. Det ble ikke observert hull eller gjennomgående sprekker i noen av stålplatene etter test.

Tabell 3-2: Oversikt over testresultater, isolerte stålskott uten skjøter.

	Klasse A-test		Klasse H-test	
Integritet:				
- Kontinuerlige flammer	62 min, ikke brudd		122 min, ikke brudd	
- Spaltemåling	62 min, ikke brudd		122 min, ikke brudd	
- Bomullstest	62 min, ikke brudd		50 min, antent bomull	
Isolasjon	30 min	60 min	30 min	60 min
- Gj.snitt temp. økning	52 °C	123 °C	151 °C	157 °C
- Max. temp. økning	145 °C	194 °C	183 °C	256 °C
Defleksjon				
- 30 min	Ca. 18 mm		Ca. 32 mm	
- 60 min	Ca. 28 mm		Ca. 32 mm	
- 120 min	Ikke aktuelt		Ca. 37 mm	



Figur 3-2: A-klasetest av isolert skott, maksimal og gjennomsnittlig målt temperaturøkning på ueksponert side. Temperaturkriteriene på 140 og 180 °C er også angitt i figuren.



Figur 3-3: H-klasetest av isolert skott, maksimal og gjennomsnittlig målt temperaturøkning på ueksponert side.

3.1.2 Isolerte stålpanel med skjøteprofiler og forskjellig isolasjon

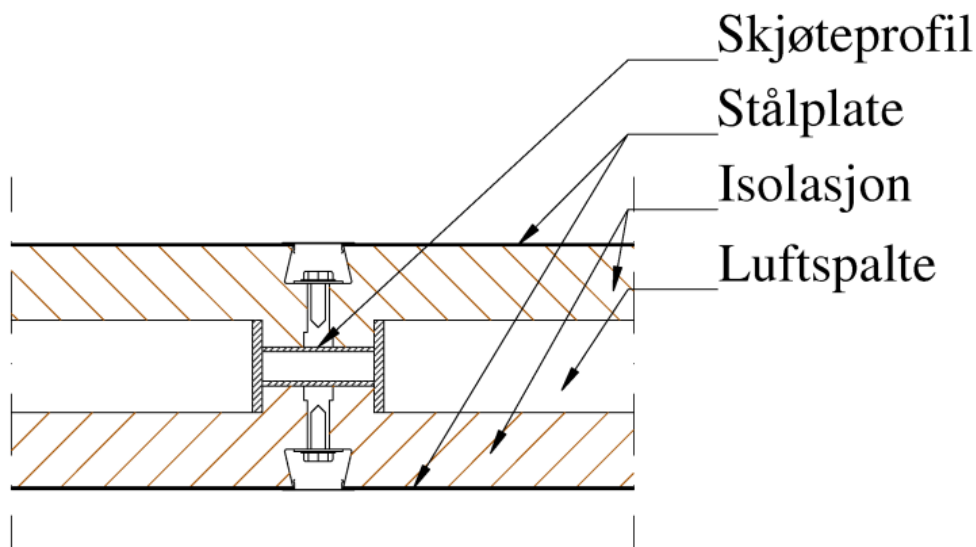
I dette tilfellet er det funnet to testrapporter hvor isolerte stålpaneler med skjøteprofiler har blitt testet for både A-klasse og H-klasse. Stålkonstruksjonen er den samme i begge testene, bortsett fra at det er benyttet stålplater med forskjellig tykkelse som overflatekledning, henholdsvis 1 mm og 1,5 mm. I testen for H-klasse er det benyttet isolasjon som er stabil ved høye temperaturer, mens det i testen for A-klasse er benyttet steinull.

Begge testene ble utført i 1985, i henhold til daværende teststandard NS 3904². A-klasse-testen var utført som en «internal wall class A», og H-klasse-testen var utført som en «internal wall class H». Sistnevnte ble eksponert for en varmelast «karakteristisk for en hydrokarbonbrann». En oversikt over testparametere og oppbygging av prøvestykkene er gitt i Tabell 3-3 og illustrert i Figur 3-4.

Tabell 3-3: Oversikt over testparametre og oppbygging av prøvestykke for tester av isolerte stålpanel med skjøteprofiler.

Hensikt med test	Klasse A-test	Klasse H-test
Tidspunkt for test	1985	1985
Testet i henhold til	NS 3904, class A	NS 3904, class H
Type konstruksjon	Isolert stålpanel	Isolert stålpanel
Oppbygging	To isolerte vanger med isolasjonssidene mot hverandre	To isolerte vanger med isolasjonssidene mot hverandre
Vertikale skjøter	2 stk	2 stk
Horisontale skjøter	Ingen	Ingen
Plassering av skjøteprofiler	c/c 900 mm mellom de to eksponerte skjøteprofilene	c/c 900 mm mellom de to eksponerte skjøteprofilene
Isolasjonsside	Inn mot hulrommet	Inn mot hulrommet
Type isolasjon	Steinull	Mineralull (aluminat-silikat)
Densitet isolasjon	60 kg/m ³	127 kg/m ³
Tykkelse isolasjon	30 mm + luftspalte + 30 mm.	50 mm + luftspalte + 50 mm.
Total tykkelse	100 mm	140 mm

² NS 3904 stemmer overens med International Standard ISO 834-1975.



Figur 3-4: Illustrasjon av horisontalsnitt gjennom isolerte stålpanel med skjøteprofiler.

En samlet oversikt over testresultatene er gitt i Tabell 3-4. Resultatene fra temperaturmålinger i ovn og på ueksponert side av prøvestykket for de to testene er gitt i Figur 3-5 og Figur 3-6. Bruk av spaltemåler var ikke en del av datidens testkriterier, og er derfor ikke benyttet i disse testene.

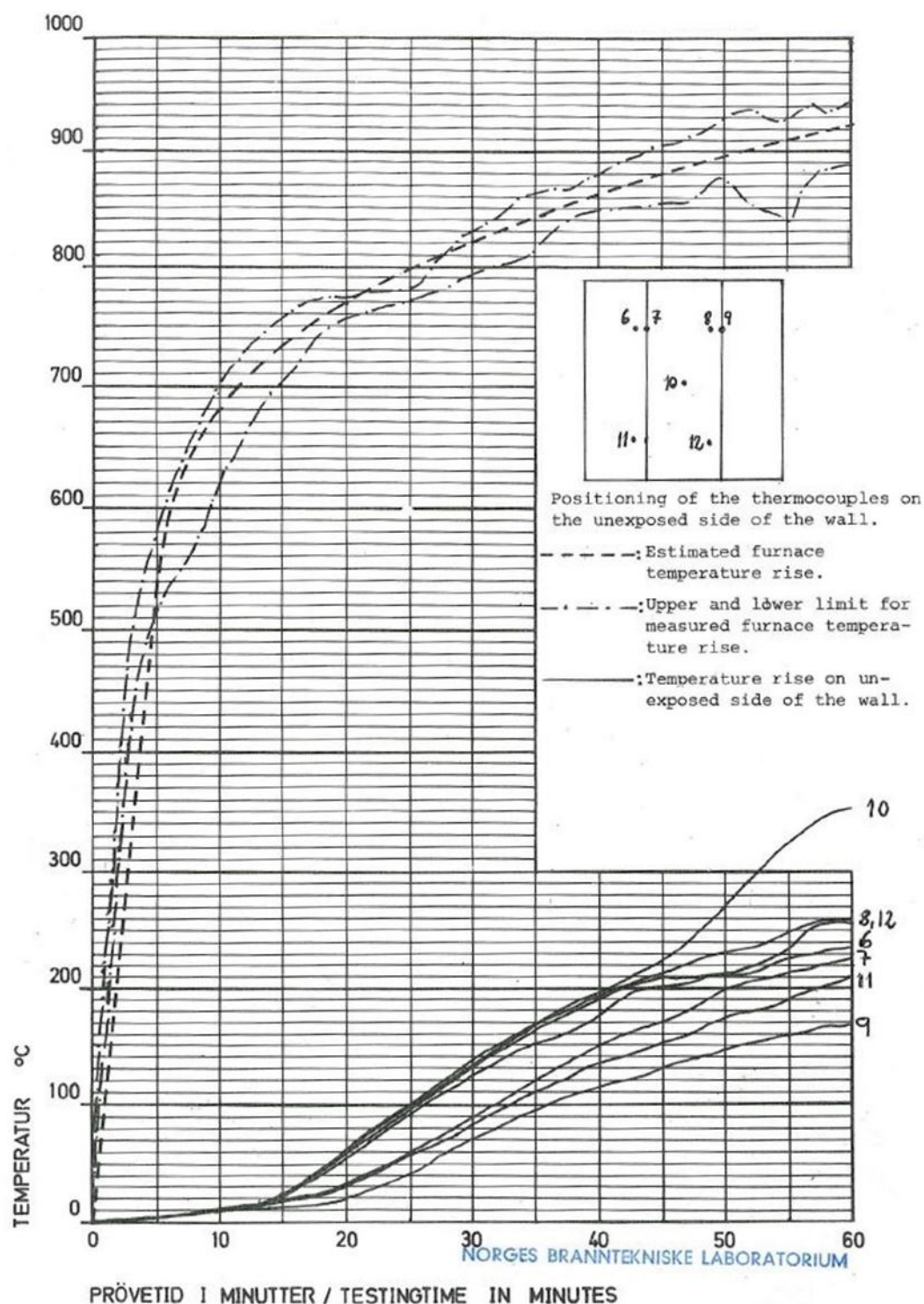
Det ble ikke registrert brudd på integritetskriteriene for noen av de to stålpanelene i løpet av den aktuelle testtiden. Bilder fra testen viser at det ikke var åpninger eller spalter som kunne ha ført til brudd på spaltemålerkriteriet dersom dette hadde blitt anvendt.

Når det gjelder isolasjonsevne, så viser testresultatene at prøvestykket som ble testet i A-klassetesten hadde en liten temperaturstigning på 12 °C de første 10 minuttene av testen, deretter steg temperaturen raskere. Prøvestykket som ble testet i H-klassetesten hadde bare 9 °C temperaturstigning de første 30 minuttene, deretter steg temperaturen raskere. Temperaturstigningen var raskere for A-klassetesten enn for H-klassetesten. Her må det tas med i betraktningen at konstruksjonen for H-klasse hadde et tykkere isolasjonslag bestående av materialer med gode egenskaper ved høy temperatur.

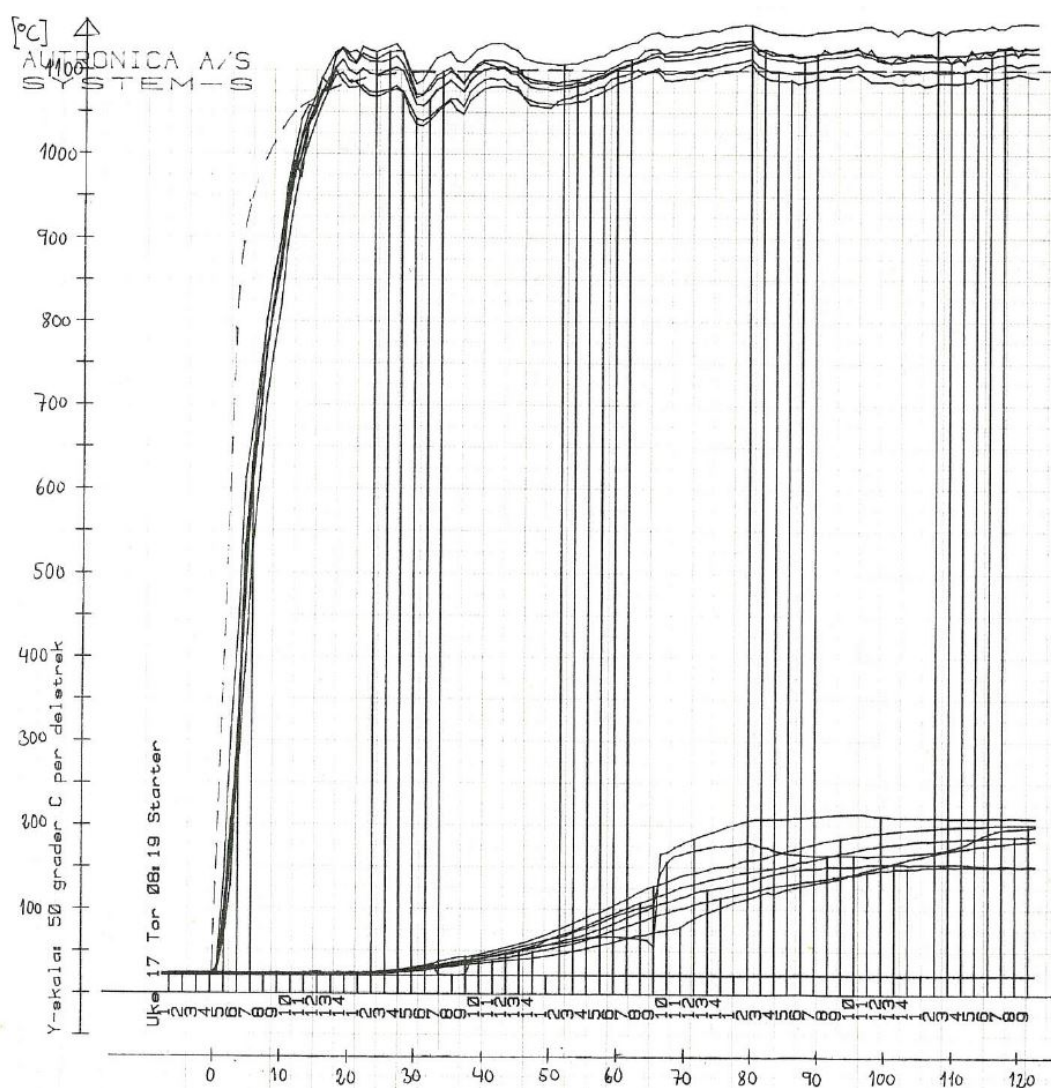
Defleksjonen som ble målt på prøvestykkene var størst for A-klassetesten.

Tabell 3-4: Oversikt over testresultater for isolerte stålpaneler med skjøteprofiler.

	Klasse A-test		Klasse H-test	
Integritet:				
- Kontinuerlige flammer	61 min, ikke brudd		122 min, ikke brudd	
- Spaltemåling	Ikke aktuelt		Ikke aktuelt	
- Bomullstest	61 min, ikke brudd		122 min, ikke brudd	
Isolasjon	30 min	60 min	30 min	60 min
- Gj.snitt temp. økning	121 °C	265 °C	6 °C	62 °C
- Max. temp. økning	138 °C	350 °C	9 °C	84 °C
Defleksjon				
- 30 min	40 mm		16 mm	
- 60 min	75 mm		28 mm	
- 120 min	Ikke aktuelt		30 mm	



Figur 3-5: A-klassetest av isolert panel med skjøteprofiler. Figuren viser ovnstemperatur, samt temperaturmålinger på uekspontert side av prøvestykket.



Figur 3-6: H-klassetest av isolert stålpanel med skjøteprofiler. Figuren viser ovnstemperatur, samt temperaturmålinger på ueksponert side av prøvestykket.

3.2 Faglitteratur

Det er gjort en kartlegging av relevant, publisert faglitteratur på området. Vitenskapelige artikler, konferansepublikasjoner og forskningsrapporter er gjennomgått. Fagbøker har også vært kilde til informasjon. Litteratursøket er gjort i nettbaserte søkemotorer for faglitteratur, og i SP Fire Research sitt fagbibliotek. Kun offentlig tilgjengelig litteratur er benyttet.

Det har ikke lyktes oss å finne faglitteratur hvor det er gjort eksperimentelle eller teoretiske vurderinger av A-klassifiserte brannvegger som utsettes for hydrokarbonbranner³. Det er likevel funnet en del faglitteratur som kan belyse deler av problemstillingen, gjennomgangen av denne er i de følgende avsnittene sortert etter tema.

3.2.1 Temperaturkriterier på ueksponert side

Dagens regelverkskriterier om en gjennomsnittlig og maksimal temperaturøkning på ueksponert side av brannvegger (henholdsvis 140 og 180 °C) har sin opprinnelse fra tidlig 1900-tall. Hensikten med temperaturkriteriene er å unngå antennelse av enheter i naborommet til en brann. I en litteraturstudie fra 2009 har Babrauskas vurdert disse kriteriene [14]. I følge rapporten er dagens kriterier overdrevet konservative, og burde kun gjelde der det er snakk om lagring av farlig gods. Rapporten foreslår 400 °C som et nytt temperaturkriterium for alle andre formål. Videre anbefales det at kun maksimal temperatur målt av alle termoelement burde gjelde, og at gjennomsnittlig temperaturmåling ikke burde anvendes. Det poengteres at kriteriene burde gjelde for den faktisk målte temperaturen under test, og ikke for temperaturøkning.

Ut fra Stefan-Boltzmanns lov om sammenhengen mellom varmekullstetthet ved stråling og temperatur, vil en flate med temperatur på 180 °C avgi en varmekullstetthet i størrelsesorden 2 kW/m², og en flate med temperatur på 400 °C avgi en varmekullstetthet i størrelsesorden 9-12 kW/m², avhengig av emissiviteten til flaten. En mørk overflate vil ha en høyere emissivitet, og dermed en høyere varmekullstetthet enn en blank overflate. Intensiteten avtar raskt med avstanden fra strålekilden. En vegg med bredde og høyde 2,5 meter vil avgi en varmekullstetthet på om lag 2,5 kW/m² i en avstand på to meter fra veggens og 4,5 kW/m² en meter fra veggens.

Hud kan utsettes for varmekullstetthet på 2,5 kW/m² eller lavere i 30 minutter eller mer uten at det oppstår vesentlige skader [15]. Over dette nivået kan tålegrensen estimeres ved uttrykket i ligning (3-1):

$$t_{\text{rad}} = 6,9 \cdot q^{-1,56} \quad (3-1)$$

der

t = tiden i minutter til det oppstår andregadsforbrenning
q = varmekullstettheten i kW/m²

I henhold til ligning (3-1) vil man kunne tåle en eksponering på 10 kW/m² i ca. 10 sekunder før det oppstår alvorlige forbrenninger. Til sammenligning kan man tåle en eksponering på 4,5 kW/m² i ca. 40 sekunder.

³ Her er det gjort et bredt søk, blant annet med søkeordene: «A-class, H-class, hydrocarbon, fire, fire load, bulkhead, ISO, HC, fire rated, analysis, fire safety, brannmotstandsevne, skott, brannvegg»

Brennbare materialer som ligger inntil en flate på 400 °C vil kunne antennes etter kort tid. Med litt avstand fra veggen, vil det for normalt antennelege materialer (tre, papir etc.) ta lenger tid før de antennes.

3.2.2 Varmelast fra åpne og innelukkede hydrokarbonbranner

Det er stor forskjell på varmelasten fra ulike typer branner, ut fra type og tilstand til brenselet, blandingsforholdene for gassformig brensel og luft, samt varmetapet fra reaksjonssonen. Variasjoner her gjør at enkelte branner har vesentlig høyere temperaturer og blir mer alvorlige enn andre. Utstrekningen på reaksjonssonen til brannen har mye å si for varmetapet, noe som gjør at temperaturene i fullskala branner kan bli mye høyere enn i småskala forsøk. [16], [17]

En hydrokarbonbrann består av hydrokarboner som brenner. Begrepet omfatter dermed et vidt spekter av branntyper, fra små propanflammer til store jetbranner, spraybranner og væskedamsbranner. Kun branner med liten utstrømningsimpuls, væskedamsbranner og diffuse gassbranner, sistnevnte vil være omhandlet i dette prosjektet. Generelt er varmestråling fra overflaten av gassbranner ulik for ulike typer hydrokarboner som brenner. For eksempel vil brennende metan gi en lavere varmestråling enn propan. I følge litteratur som er gjennomgått frem til 2002 i «SPFE Handbook of Fire Protection Engineering», er varmekvikstetthet for storskala væskedamsbranner målt i området 75-120 kW/m², med temperaturmålinger i området 770-1200 °C [17].

To forskningsprosjekter utført av SP Fire Research (tidligere SINTEF NBL) med partnere på midten av 1990-tallet, samt en eksperimentell studie gjort av en amerikansk gruppe i 1998, dokumenterer at varmeutviklingen i en hydrokarbonbrann kan resultere i større brannlast enn hva denne litteraturen tilsier. Dette dokumenterer dermed også en høyere brannlast enn hva HC-kurven representerer.

I forskningsprosjektet «Brann på sjø» ble det utført to serier med fullskala brannekspesimenter i felt [18]–[21]. Råolje⁴ på sjøen ble satt fyr på i en lagune på Svalbard, vinteren og sommeren 1994. Hensikten med prosjektet var å skaffe til veie informasjon omkring risiko ved brann på offshoreinstallasjoner som følge av lekkasje av olje på sjø. Varmelasten som en stålstruktur utsettes for som følge av en stor brannsoyle av brennende olje ble dokumentert. Bilder fra testene er vist i Figur 3-7.

De viktigste resultatene med tanke på varmelast, var at det ble målt maksimalverdier av varmekvikstetthet opp mot 400 kW/m². Det ble målt et 32 sekunders maksimalt gjennomsnitt på 220-230 kW/m², og 32 sekunders gjennomsnitt som varierte mellom 130 kW/m² og 190 kW/m² [21].

⁴ "Stabilised crude oils, i.e. crude oils after gas separation" [18]



Figur 3-7: Bilder fra "Brann på Sjø"-prosjektet i 1994. Bildet til venstre er fra vintertesten med oljeflak i et hull i isen. Bildet til høyre er fra sommertesten med oljeflak på sjø. Foto: SP Fire Research.

I forskningsprosjektet «Blast and Fire» ble det utført en stor serie med fullskala brann- og eksplosjonseksperimenter [22], [23]. Hensikten med prosjektet var å øke kunnskapsnivået i industrien omkring sikkerhetssystemer med tanke på hydrokarbonbranner og eksplosjoner. Det ble gjennomført både innelukkede og åpne branneksperimenter, deriblant 15 jetbranner og 7 væskedamsbranner (pool fires) inne i isolerte rom på 135 og 415 m³. Væskedamsbrannene hadde et overflateareal på henholdsvis 6 m² og 24 m². Resultatene fra forsøksserien viste at innelukking av branner kan føre til vesentlig høyere målinger av varmeflukt enn for branner i det fri. Bilder fra testene er vist i Figur 3-8.

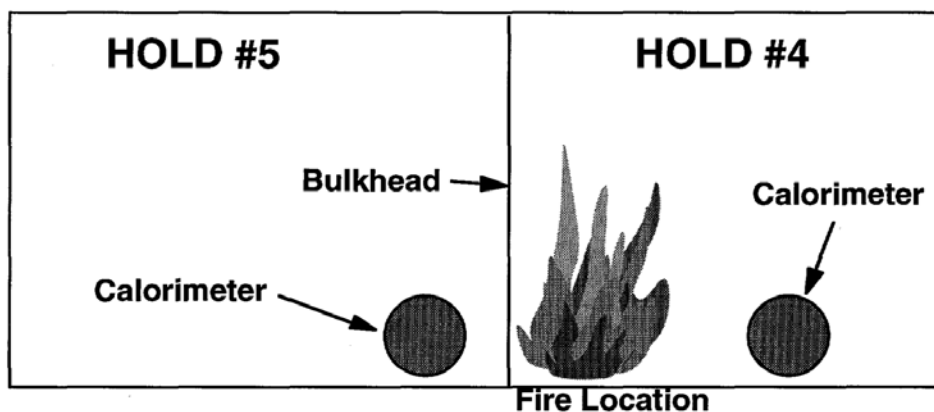
Både i «Brann på sjø»- og «Blast and Fire»-prosjektene var det snakk om store branner, med en stor utstrekning på reaksjonssonen. I følge en rapport av Stensaas og Mostue fra 2005 som oppsummerer forskningsresultater fram til denne tiden, er det to fenomener som er skalaavhengige: strålingsfangning og sotoksidering [16]. I «Blast and Fire»-rapporten ble det estimert at denne effekten opptrer i branner med en utstrekning (flammetykkelse) på 4-6 meter eller større der intensiteten er høy.

Stålingsfangning er et fenomen som oppstår når stråling fra sentrale deler av flammene blir fanget av omgivelsene og ført tilbake til reaksjonssonen. Dette gjør at temperaturene inni flammene kan bli over 1300 °C, med en gjennomsnittlig varmeflukstetthet mot omgivelsene på 200 – 300 kW/m². Sotoksidering oppstår når røykgasslaget kommer opp i temperaturer på 800 – 900 °C, da vil soten forbrennes og bidra til økt brannlast. Sotoksidering er observert i innelukkede branner, men det kan hende at det også kan forekomme i åpne væskedamsbranner. Temperaturer kan da komme opp i 1300 °C, med en typisk varmelast på vegger i området på 200 kW/m². [16]



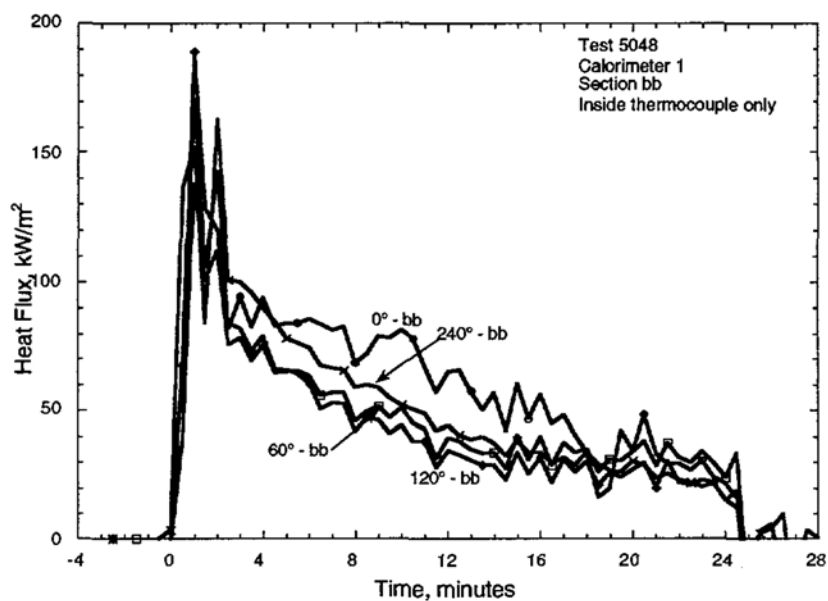
Figur 3-8: Bilder fra "Blast and Fire" prosjektet midt på 1990-tallet. Bildene viser innelukking av væskedamsbrann i et isolert rom. Foto: SP Fire Research.

I en testerie fra 1998 undersøkte Koski et. al. hvilken brannlast et kolli som fraktes om bord i et lasteskip kan utsettes for dersom det er i samme rom som en brann, og på andre siden av et stålskott [24]. Hensikten med forsøksserien var å belyse brannssikkerhet rundt frakt av radioaktivt materiale. Det ble brukt spraybrann med 0,03 kg/s heptan i noen tester, i andre ble det brukt væskedamsbrann av diesel med 9 m² overflateareal, se Figur 3-9. Varmefluksmålinger ble gjort i rommet hvor brannen var (kalt *Hold #4* i figuren) og i naborommet (kalt *Hold #5* i figuren). Rommene var henholdsvis 1400 m³ og 1000 m³ store. Det ble brukt kalorimetre for å måle varmekraft fra brannene⁵. For alle testene var kalorimeteret i naborommet (Hold #5) plassert med senter 0,4 m over dekk og 2 meter fra skottet. Det er ikke gitt opplysninger omkring skottet utover at det er et stålskott.

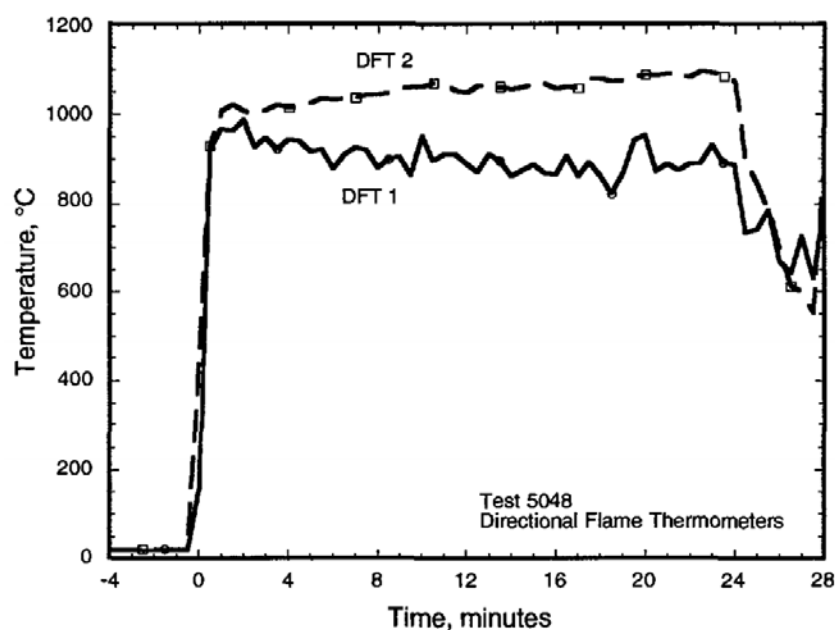


Figur 3-9: Eksperimentelt oppsett for test av brannlast fra hydrokarbonbranner mot et skott [24]. Varmeflukstetthetsmålinger ble gjort i rommet hvor brannen var (Hold #4) og i naborommet (Hold #5).

⁵ Gruppen brukte Sandia One-Dimensional Direct and Inverse Thermal (SODDIT) datakode for å bestemme adsorbert varmekraft mot kalorimeteret.



Figur 3-10: Beregnet netto varmeklukstetthet mot kalorimeter plassert i væskedamsbrannen i rommet hvor brannen var (Hold #4) [24].



Figur 3-11: Temperaturmålinger fra termoelement plassert i væskedamsbrannen [24].

Resultatene fra testserien viste at varmekluksnivåene målt med kalorimeter plassert i væskedamsbrannen var 150-200 kW/m² i starten. Det ble gjort temperaturmålinger gjennom testen på 900-1100 °C, noe som tilsvarer en varmeklukstetthet på 110-200 kW/m². Videre viste resultatene at varmekluksnivåene i naborommet til brannen var lavere. I løpet av 30 minutter test ga spraybrannene en temperaturøkning og maksimal varmeklukstetthet i målepunktet i naborommet på henholdsvis 25 °C og 0,8 kW/m². Væskedamsbrannene ga en maksimal varmeklukstetthet i målepunktet i naborommet på 1 kW/m².

3.2.3 Egenskaper til materialene som brukes i panel og skott

I dette kapitlet vil materialegenskaper som vi anser som viktige for problemstillingen i denne rapporten bli gjennomgått, med grunnlag i faglitteratur.

De vanligste typene isolasjonsmaterialer som brukes i brannvegger i dag⁶, er ulike typer mineralull som steinull, glassull og AES fibre, samt ulike typer volumøkende belegg⁷. Egenskapene til isolasjonsmaterialer er, som for de fleste materialer, avhengig av sammensetningen. Egenskapene er også avhengig av miljøet rundt materialet, for eksempel temperatur.

Ulik termisk respons for ulike isolasjonsmaterialer

Ulike isolasjonsmaterialer har ulik varmekapasitet og varmeledningsevne, og dermed ulik varmeisoleringssevne og reaksjon på varmebelastning. Det vil si at panel og skott som er isolert med ulike isolasjonsmaterialer av ulik tykkelse, vil ha forskjellig temperaturutvikling på ueksponert side av en brannvegg. Dette er et velkjent fenomen, og er blant annet dokumentert gjennom testrapporter i SP Fire Research sin database. I en studie av Lee og Liu fra 2006 verifiseres dette, ved en eksperimentell studie hvor 60 kg/m³ steinull og en 80 kg/m³ keramisk mineralull-fiber testes for å se hvilken minimumtykkelse som trengs for å kunne oppfylle A-klassifisering [25]. Studien viste at det krevdes ulike tykkelser av de to isolasjonsmaterialene for å kunne tilfredsstille IMO-krav til A-60 klassifisering av skott. Keramiske mineralullfiber (25 mm), steinull (50 mm) eller en kombinasjon av de to (25 mm + 25 mm) var tilstrekkelig til å oppnå A-60-klassifisering. Studien omhandlet ikke hydrokarbonbrann, eller H-klassifisering.

Den samme gruppa gjorde senere en studie hvor de sammenlignet datasimuleringer med de eksperimentelle funnene beskrevet ovenfor. Her viste det seg at det var en forskjell mellom resultater fra simulering og eksperimentelle forsøk, ettersom simuleringene ga A-30-klassifisering der eksperimentene ga A-60-klassifisering [26]. Dette er det eneste studiet av denne typen som er funnet, og det er ikke grunnlag for å si hvorvidt dette er representativt for andre sammenligninger mellom datasimuleringer og eksperimentelle funn basert på dette.

Materialegenskaper som avhenger av oppvarmingshastighet

Når materialer utsettes for endringer i temperatur, vil materialets mikrostruktur kunne endre seg. For isolasjonsmaterialer som består av flere bestanddeler, vil fibrene inni materialene utvide seg ulikt for ulike bestanddeler. Dette skjer som følge av deres ulike termiske utvidelseskoeffisienter. Ved rask oppvarming vil dette kunne føre til brudd, sprekker, eller andre endringer i materialet. Disse endringene i egenskaper til materialene er avhengig av temperaturintervallet og temperaturgradienten. [27], [28]

Et eksempel på dette er stål, som ved sakte temperaturendringer kan omdannes fra ferritt til austenitt, som begge er seige (duktile) faser. Ved raske temperaturendringer derimot, vil stålet kunne bli omdannet til den sprø fasen martensitt [29], [30]. Sprøtt stål vil kunne knekke lettere enn duktilt stål. Den brå temperaturstigningen som en HC-eksponering innebærer, vil kunne gjøre at slike faseendringer skjer i isolasjonsmaterialene. I tillegg vil den høyere maksimaltemperaturen som oppnås ved eksponering i henhold til en HC-kurve kunne gi andre faseendringer sammenlignet med en ISO-kurve. Generelt er det

⁶ Basert på mange års testing av denne typen produkter, samt generell kunnskap om bransjen hos SP Fire Research.

⁷ "Intumescent coatings"

verd å merke seg at materialers oppførsel ved termisk belastning kan være svært ulik for ulike typer materialer.

Andre materialer hvor egenskapene er avhengige av oppvarmingshastigheten er vannholdige materialer, herunder fuktige materialer og materialer som inneholder krystallvann. For disse materialene vil det under test kunne observeres en utflating av de målte temperaturene i materialet ved ca. 100 °C, ettersom det da vil kunne forekomme endoterme reaksjoner i materialet som tar opp varme. Et eksempel på dette er gips som varmes opp, og der bundet krystallvann krever energi for å fordampe.

Materialens egenskaper for volumøkende belegg

Volumøkende belegg vil, i de fleste tilfeller, ekspandere når de utsettes for høye temperaturer, og materialet svulmer opp og danner et tykt, porøst og forkullet sjikt. Dette sjiktet virker isolerende på underlaget.. Overflatestrukturen på det forkullede sjiktet kan forhindre at flammer spres langs overflaten av materialet. [31], [32]

Egenskapene til volumøkende belegg er temperaturavhengige, både med tanke på temperaturstigning og maksimaltemperatur. Noen typer volumøkende belegg blir plastiske før de ekspanderer når de varmes opp. Disse typene volumøkende belegg kan med andre ord miste sin sigefasthet dersom de varmes opp, uten at de varmes nok opp til at de begynner å ekspandere. Denne effekten gjør at noen typer volumøkende belegg kan oppføre seg annerledes dersom de utsettes for sakte oppvarming, sammenlignet med brå oppvarming.

3.3 Andre relevante dokumenter

Risikovurdering av branner er et stort fagområde, og omfatter aspekter som brannutvikling, effekten av passiv og aktiv brannbeskyttelse, materialer brukt i barrierer, veier for flammespredning, brannbekjempelse med mer [33].

I forbindelse med dette prosjektet har SP Fire Research fått tilgang til en rapport om risikoevaluering av en installasjon. Rapporten er konfidensiell, men det vil her bli gitt en kort gjennomgang av metodikken som er brukt, og SP Fire Research sine kommentarer til dette.

I rapporten blir følgende brannrisikoer vurdert:

1. Design og dimensjonerende brannlast i området
2. Beregning av brannintensitet på overflate (og tak) på av boligkvarter akterut
3. Forskjell i integritet for A- og H-klaseskiller som ikke er utsatt for varmestråling over 100 kW/m^2

Resultatene fra beregningene i rapporten viser at strålingsintensiteten vil være lavere enn 100 kW/m^2 . Ut fra det valgte scenariet antas det at det ikke vil være direkte flammepåkjennning av taket eller ytre overflate til skillet mot boligkvarteret. Det sies ikke hvilken strålingsintensitet som forventes på overflaten av skillet.

I rapporten vurderes betydningen dette resultatet har for forskjeller i integritet for A- og H-klaseskiller som ikke er direkte eksponert for flammer. Vurderingen baserer seg på tid-temperatur- kurvene for ISO- og HC-eksponering, og det påpekes at temperaturen i begge tilfellene overskrider 450°C i løpet av få minutter, og at fastheten til stålet deretter er vesentlig svekket. Fastheten til begge typene av skiller vurderes derfor til å ha samme betydning for å opprettholde integriteten i den gjenværende tiden av testen. Det antas også at varmeeksponeringen av skillene vil bli vesentlig lavere enn i tid-temperaturkurvene, på grunn av at det ikke forventes direkte flammepåkjennning.

Rapporten beskriver at integriteten til gjennomføringer og isolasjonsmateriale er sammenlignbare for A- og H-skiller i dette tilfellet, med en varmestrålingseksponering under 100 kW/m^2 , og uten direkte flammepåkjennning. Det forventes at forskjellen i integritet for de første 60 minuttene er marginal.

I dokumentasjonen er det vurdert at integriteten til brannskillene i hovedsak er bestemt av fastheten til stålet, og at fastheten er vesentlig svekket når temperaturen overstiger 450°C . Dette er for så vidt korrekt, men vi mener at faktorer som skjøter og gjennomføringer i stor grad vil være bestemmende for integriteten. Som beskrevet i avsnitt 3.2.3 kan materialer oppføre seg ulikt ved ulike nivåer for varmestråling, og ved ulike forløp av varmestrålingsnivået som funksjon av tid..

For øvrig registrer vi at det er skilt mellom varmepåkjennning med og uten direkte flammeeksponering i rapporten. Varmepåkjennningen i denne sammenhengen er uavhengig av om det er direkte flammeeksponering eller ikke.

Rapporten vurderer kun integritet, og ikke isolasjonsevne eller stabilitet til brannveggen. Dette mener vi er mangelfullt, ettersom varmeledningsevnen til ulike typer materialer kan påvirkes av typen brannpåkjenning. Vi mener at det i en rapport om risikoevaluering av tåleevne til brannvegger er viktig å ta hensyn til følgende fire punkter:

- Integritet
- Isolasjonsevne
- Stabilitet ved egenvekt

- Stabilitet ved ytre påført last

Dersom noen av disse skal utelates fra vurdering, bør det gjøres basert på en evaluering som fremkommer i rapporten. Hvis ikke, bør alle punkter vurderes på lik linje.

4 Introduksjon til og diskusjon av brannlast

I forbindelse med vurderinger knyttet til hvilke typer eksponeringer en skillekonstruksjon kan bli utsatt for ved et branntilløp eller brann på en offshore installasjon, er det i dette prosjektet pekt på brannlast med varmeflukstetthet større eller mindre enn 100 kW/m^2 . Denne verdien for varmeflukstetthet skriver seg fra NORSOK S-001, og er knyttet til boligkvarter hvor de sidene som ikke vender mot prosessområdet har blitt ansett som mindre utsatt for en hydrokarbonbrannbelastning, se avsnitt 2.6. At nivået på 100 kW/m^2 er valgt i NORSOK S-001 kan ha sammenheng med at ISO-kurven når en temperatur på 945°C etter 60 minutter. Beregnes varmeflukstettheten med en emissivitet på 0,8 for det som avgir stråling ved denne temperaturen, blir dette 100 kW/m^2 , se Figur 4-1.

Brannlastnivået fra NORSOK S-001 på 100 kW/m^2 er en varmeflukstetthet som er hentet fra en standardisert branntestmetode. Branntestmetoden benyttes til å godta eller forkaste konstruksjonsmaterialer og konstruksjonsløsninger. Branntester av denne typen er designet for å være repeterbare og reproducerbare. Et tilleggskrav som en brannkyndig bruker av slike standardiserte metoder alltid stiller, er at metoden også skal være relevant.

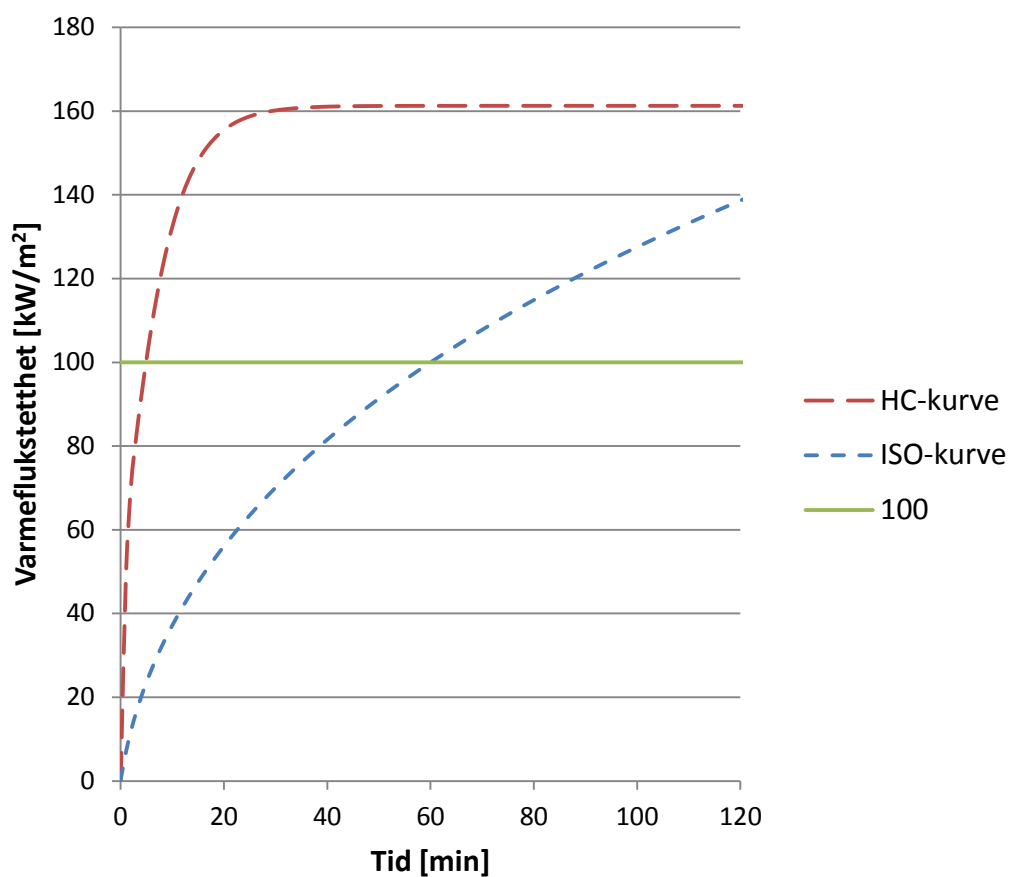
Brannlast i forbindelse med bygninger og konstruksjoner kan fastlegges ved vurderinger, beregninger eller som minstekrav satt i forskrifter. Hydrokarbonbrann i forbindelse med olje- og gassinstallasjoner vil ofte være fastlagt ved egne kvantitative risikoanalyser, og ofte inngår avanserte beregninger for å tallfeste brannbelastninger lokalt. Utgangspunktet er hva slags utslipp eller lekkasje av hydrokarboner som kan forekomme. En hydrokarbonbrann vil derfor kunne opptre med et stort antall varmeflukser, avhengig av lekkasjekarakteristikk, avstand mellom brann og utsatt objekt og geometriske forhold. Vær og vind kan medvirke til reell last, likeså om det benyttes aktive tiltak til brannbekjempelse.

Varmestrålingsnivået på 100 kW/m^2 som angis i NORSOK S-001 er angitt som en konstant varmelast, til forskjell fra varmeflukstettheter som brukes i testsammenheng. En brå temperaturstigning kan være mer belastende for en brannvegg enn en svak temperaturstigning eller konstant varmelast. Sammenhengen mellom den konstante varmeflukstettheten på 100 kW/m^2 fra NORSOK S-001 og varmestrålingsnivå fra test med ISO-kurve og en HC-kurve er illustrert i Figur 4-1. Den akkumulerte brannlasten (energimengden) utgjør den første timen henholdsvis 66 kW/m^2 og 148 kW/m^2 for ISO-kurve og HC-kurve, se Tabell 4-1.

Merk at det er viktig å skille mellom prøvingsforhold og forhold som kan oppstå i en reell brann. En HC-kurve er ikke nødvendigvis representativ for alle typer hydrokarbonbranner, ettersom disse kan variere avhengig av størrelse på og type brann, samt brenselstype, slik det er beskrevet i avsnitt 3.2.2.

Tabell 4-1: Beregnet brannlast for ISO-kurve og HC-kurve, sammenlignet med konstant 100 kW/m^2 . Se også Figur 4-1.

Kurve	Akkumulert brannlast den første timen [kJ/m^2]	Gjennomsnittlig varmeflukstetthet den første timen [kW/m^2]
ISO-kurve	238 000	66
100 kW/m^2	360 000	100
HC-kurve	534 000	148



Figur 4-1: Beregnet varmeklukstetthet for HC-kurve og ISO-kurve. Emissivitet i beregningene er 0,8. Nivået for 100 kW/m² er også markert.

5 Diskusjon av problemstillinger

I dette kapitlet gjennomgås problemstillingene som er gitt av oppdragsgiver. Avsnittene presenterer først problemstillingen slik den er formulert av oppdragsgiver, se første ramme i avsnittene. Diskusjonen som følger etter dette er basert på kartlegging av regelverk, testrapporter og faglitteratur, presentert i kapittel 2 og 3. Til slutt er det gitt en oppsummering av vår faglige vurdering av problemstillingen. Vurderinger av prosjektets problemstillinger er gjort av seniorforskere ved SP Fire Research på grunnlag av dokument- og litteraturstudiet som er gjort, og på grunnlag av lang erfaring med forskning på fenomenet brann.

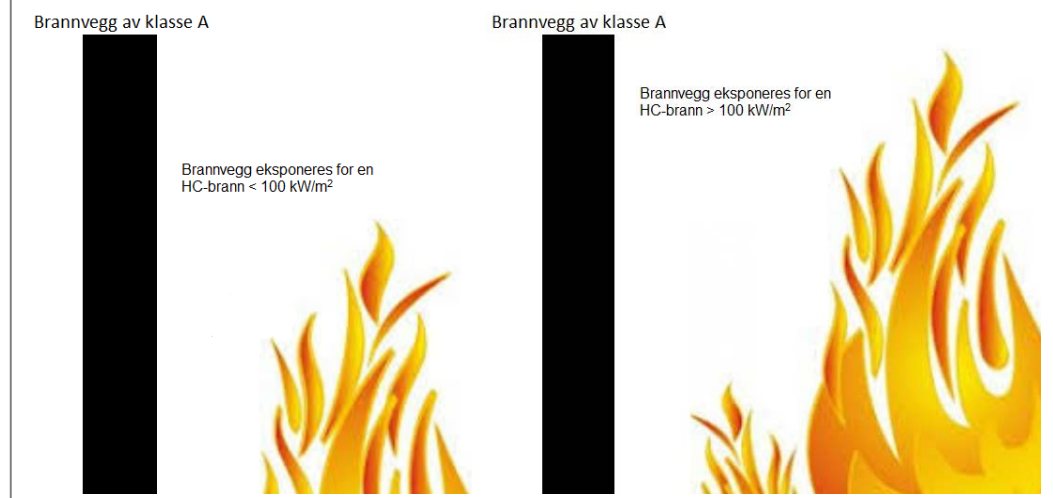
5.1 Problemstilling 1

I problemstillingen under antar vi at begrepet *brannlast* er brukt i betydningen *varmeflukstetthet*.

Problemstilling 1:

Hvordan vil en brannvegg av brannklasse A som eksponeres for en hydrokarbonbrann oppføre seg gitt følgende brannscenarier med forskjellig varighet:

- Brannveggen eksponeres for en hydrokarbonbrann med brannlast mindre enn 100 kW/m^2
- Brannveggen eksponeres for en hydrokarbonbrann med brannlast større enn 100 kW/m^2



I en hydrokarbonbrann slik den er definert i forbindelse med standardisert testing av konstruksjoner og konstruksjonselementer (HC-kurve), vil tiden det tar å nå 100 kW/m^2 være en funksjon av temperaturen omkring testobjektet. Tiden det tar å nå samme strålingsfluks for ISO-kurven vil være vesentlig lengre enn for en HC-kurve, som vist i Figur 2-1 og Figur 3-10. Den brå temperaturstigningen i en test med HC-kurve er en mye tøffere påkjenning på materialene enn for en test med ISO-kurve. En A-konstruksjon vil derfor kunne oppføre seg forskjellig når den utsettes for en hydrokarbonbrann sammenlignet med en ISO-eksponering.

I tillegg til temperaturstigningen, vil brannlasten som en konstruksjon utsettes for hvert sekund være høyere for en HC-eksponering sammenlignet med en ISO-eksponering, se Tabell 4-1. For hydrokarbonbranner som har en konstant varmeflukstetthet på 100 kW/m^2 , utgjør denne forskjellen en økning i gjennomsnittlig brannlast fra 66 kW/m^2 til 100 kW/m^2 . For hydrokarbonbranner som følger HC-kurven representerer denne

forskjellen en økning fra 66 kW/m² til 148 kW/m². Dette er en drastisk økning i varmekrafttetthet.

For å kunne vurdere om det er mulig å si noe generelt om hva en A-konstruksjon er god for ved HC-eksponering, er det nødvendig å se på beskrivelsene av aktuelle A-konstruksjoner sammen med eksisterende dokumentasjon fra utførte branntester. I gjennomgangen av dokumentasjon fra branntester i avsnitt 3.1, ble det presentert to tilfeller som kan belyse denne problemstillingen. Dette er de to eneste tilfellene vi har funnet hvor like eller lignende skott eller panel har blitt utsatt for både en A-klassestest og en H-klassestest, ut fra databasene til SP Fire Research i Norge og Sverige. Det vil si at det eksperimentelle dokumentasjonsgrunnlaget som ligger til grunn for å kunne vurdere hvorvidt en brannvegg av A-klasse vil tåle å bli eksponert for en hydrokarbonbrann er svært begrenset.

Det er mest sannsynlig en god grunn til at det foreligger så lite dokumentasjon på området. Ettersom temperaturkurvene for test i henhold til A-klasse og H-klasse er ulike, er det i mange tilfeller nødvendig med ulik oppbygging av brannveggene for å kunne bestå de to ulike testene. Merk at dokumentasjonsgrunnlaget som finnes kun er basert på vellykkede tester, hvor testkriterier er oppfylt.

På bakgrunn av det begrensede dokumentasjonsgrunnlaget er det vanskelig å gi en *generell vurdering* av hvordan en A-konstruksjon vil tåle en HC-eksponering, ettersom parametere som kan ha betydning er type isolasjon, innfesting, eksponeringsretning med mer. Det er likevel mulig å si noe om de tilfellene hvor det er funnet brannteknisk dokumentasjon, nemlig for tilfellene:

- Isolerte skott uten skjøter med samme isolasjonstype.
- Isolerte stålpanel med skjøteprofiler og forskjellig isolasjon

I det første tilfellet var to isolerte skott uten skjøter med samme isolasjonstype testet med ISO- og HC-kurve, se avsnitt 3.1.1. Resultatene viser at det ikke var brudd på integritetskriteriene for noen av testene, mens isolasjonskriteriet ble brutt på et tidligere tidspunkt for H-test enn for A-test. Dette viser at når det er snakk om integritet av brannveggen, så vil en 1,5 mm stålplate uten skjøter være i stand til å motstå en hydrokarbonbrann representert ved en HC-kurve uten gjennombrenning. Når det er snakk om isolasjon, så vil det ikke nødvendigvis være tilfellet, ettersom temperaturen steg betraktelig raskere for HC-eksponering enn for en ISO-eksponering. Merk at det i denne testen var montert isolasjon på ueksponert side, som er konservativt med tanke på oppnådd ståltemperatur. Dette på grunn av magasinering av varme i stålet.

I gjennomgangen av testresultater fra tester utført på isolerte stålpanel med skjøteprofiler og forskjellig isolasjon, hvor stålkonstruksjonen var lik, men tykkelsen på og type isolasjonsmateriale var forskjellig, kom det frem at det panelet som ble testet med HC-kurve tålte brannbelastningen bedre enn panelet som ble testet med ISO-kurve, se avsnitt 3.1.2. Dersom panelene hadde vært *helt* like ville antagelig resultatet ha vært motsatt av dette, ettersom HC-kurven representerer en større branneksponering av panelet. Tilfellet viser at type isolasjonsmateriale som brukes, og tykkelsen på dette er avgjørende for hvor godt en brannvegg tåler påkjenningene fra en hydrokarbonbrann. Eksemplet viste også at begge konstruksjonene oppfylte integritetskriteriene ved henholdsvis ISO- og HC-eksponering. Ettersom oppbyggingen til panelene var såpass forskjellig, er det vanskelig å si noe mer generelt om integritet og isolasjonsevne for en A-vegg som utsettes for en hydrokarbonbrann basert på dette eksemplet.

I begge tilfellene var temperaturresponsen på ueksponert side av prøvestykket tilnærmet lik de første 3-5 minuttene av testene, både for ISO-eksponering og for HC-eksponering.

Dette kan ses av temperaturkurvene Figur 3-2 - Figur 3-6, hvor det var ingen eller bare en svak temperaturstigning de første minuttene. Dette innebærer at en brannvegg av brannklasse A ikke vil få integritetsbrudd eller temperaturoverskridelser de første minuttene dersom den utsettes for en hydrokarbonbrann tilsvarende HC-kurven.

Det er viktig å merke seg at det ikke finnes testdokumentasjon hvor en brannvegg har blitt utsatt for en konstant varmeflukstetthet på 100 kW/m^2 . Dette er på grunn av at relevante teststandarder (se avsnitt 2.3 - 2.5) baserer seg på en temperaturøkning over tid, representert ved HC-kurven og ISO-kurven. Det finnes derfor ingen dokumentasjon på hvorvidt tidsgradienten er kritisk for forskjellige materialer og konstruksjoner, sammenlignet med en konstant brannlast.

Under følger en oppsummering av vår faglige vurdering av problemstillingen.

Oppsummert faglig vurdering av problemstilling 1:

a) En brannvegg av brannklasse A uten margin med hensyn på testkriterier, som eksponeres for en hydrokarbonbrann med brannlast med varmeflukstetthet mindre eller lik 100 kW/m^2 , vil kunne oppnå integritetsbrudd eller temperaturoverskridelser tidligere enn forutsatt på grunn av følgende forhold:

- Med økning i tilført varmemengde må det forventes at gjennomsnittstemperatur og temperatur i enkeltpunkt på ueksponert side vil kunne stige mer enn henholdsvis 140°C og 180°C i løpet av 60 minutter.
- Økt tilført varmemengde samt raskere temperatureksponering kan påvirke materialoppførselen til enkeltkomponenter i skillekonstruksjonen på et tidligere tidspunkt enn forventet, og gi uventede åpninger i konstruksjonselementet (oppsprekking mellom materialer, oppsprekking i overgang skott/dekke, osv.). Stabiliteten til konstruksjonen vil også kunne bli svekket.
- Kort varighet (noen minutter branneksponering) vil ikke resultere i integritetsbrudd eller temperaturoverskridelser.

b) En brannvegg av brannklasse A uten margin med hensyn på testkriterier, som eksponeres for en hydrokarbonbrann med brannlast med varmeflukstetthet lik 100 kW/m^2 eller mer vil oppnå integritetsbrudd eller temperaturoverskridelser tidligere enn forutsatt på grunn av følgende forhold:

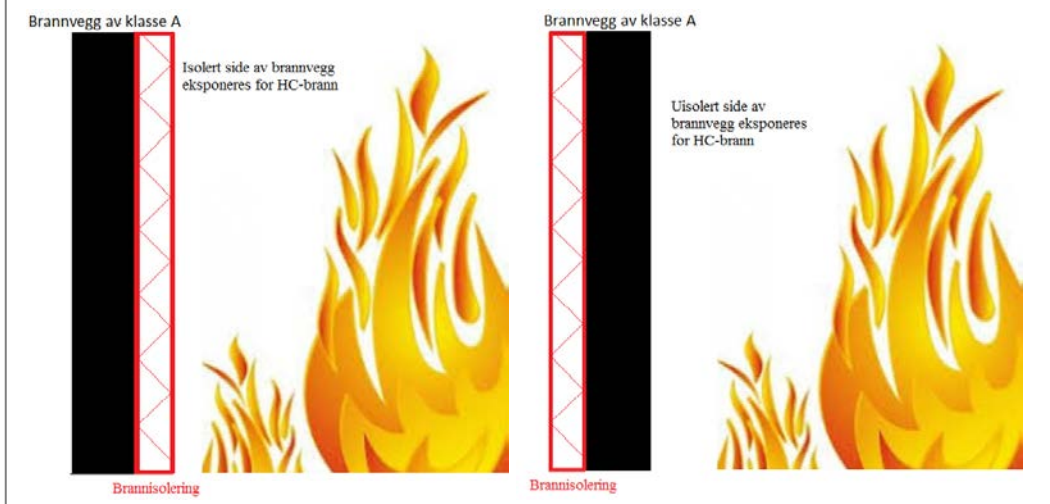
- Med økning i tilført varmemengde må det forventes at gjennomsnittstemperatur og temperatur i enkeltpunkt på ueksponert side stiger mer enn henholdsvis 140°C og 180°C i løpet av 60 minutter.
- Økt tilført varmemengde, samt raskere temperatureksponering, kan påvirke materialoppførselen til enkeltkomponenter i skillekonstruksjonen på et tidligere tidspunkt enn forventet, og gi uventede åpninger i konstruksjonselementet (oppsprekking mellom materialer, oppsprekking i overgang skott/dekke, osv.). Stabiliteten til konstruksjonen vil også kunne bli svekket.
- Kort varighet (noen minutter branneksponering) vil ikke resultere i integritetsbrudd eller temperaturoverskridelser.

5.2 Problemstilling 2

Problemstilling 2:

En brannvegg av brannklasse A eksponeres for en hydrokarbonbrann. Har det noen betydning hvilken side av brannveggen som er isolert? Følgende scenarioer skal vurderes:

- Isolert side av brannvegg eksponeres for hydrokarbonbrann
- Uisolert side av brannvegg eksponeres for hydrokarbonbrann



Plassering av isolasjon på eksponert eller ueksponert side, i sammenheng med type isolasjonsmateriale som brukes og tykkelsen på dette, vil avgjøre hvor godt en brannvegg tåler påkjenningene fra en hydrokarbonbrann. Den optimale plasseringen av isolasjon er avhengig av hensikten med brannskillet, for eksempel om strukturen trenger beskyttelse for at veggkonstruksjonen skal oppnå tilstrekkelig integritet, stabilitet eller isolasjonsevne.

Når det gjelder stabilitet til en brannskillende konstruksjon, så vil plasseringen av isolasjonen i forhold til branneksposeringen være avgjørende.

Når det gjelder isolasjonsevne, er bildet mer sammensatt. For materialer som ikke slipper gass gjennom strukturen, så er variasjon i isolasjonsevne mindre kritisk med hensyn til hvilken side som isoleres. For andre materialer som for eksempel er volumøkende eller porøse, så vil isolasjonsevnen til skillekonstruksjonen kunne variere avhengig av hvilken side som er isolert.

Isolering på eksponert side gir en beskyttelse av stålet bak isolasjonen. Dersom det er snakk om en stålplate uten skjøter, vil isolasjonen likevel ikke ha stor betydning for stålets integritet. Slik testresultatene som er gjennomgått i avsnitt 3.1.1 viser, fikk ikke en stålplate uten skjøter gjennombrenning i løpet av to timer eksponering for HC-kurven, selv om den var utformet som en brannvegg med hensyn på brannklasse A. Dette ble registrert i standard ovnstest.

I dokument- og litteraturstudiet som er gjennomført, er det funnet et eksempel på at type isolasjonsmateriale og tykkelsen på dette er viktig for ytelsene til en brannvegg når den utsettes for en hydrokarbonbrann. Se nærmere beskrivelse under problemstilling 1, og avsnitt 3.1.2.

Det er ikke funnet noen eksempler på tilfeller hvor den samme typen isolasjonsmateriale er testet på eksponert og ueksponert side. Dette skyldes mest sannsynlig at det er behov for ulike typer isolasjonsmaterialer på eksponert og ueksponert side. Et materiale som benyttes på eksponert side vil bli utsatt for sterkere påkjenninger enn et materiale som benyttes på ueksponert side, og må derfor være designet for dette. Et eksempel her er volumøkende belegg, som i mange tilfeller er designet for å brukes på eksponert side av brannveggen, ettersom belegget ekspanderer når det utsettes for høye temperaturer.

Oppsummert faglig vurdering av problemstilling 2:

Type isolasjonsmateriale som brukes, og tykkelsen på dette, er avgjørende for hvor godt en brannvegg tåler påkjenningene fra en hydrokarbonbrann, avhengig av om isolasjonen er plassert på eksponert eller ueksponert side. Den optimale plasseringen av isolasjon er avhengig av hensikten med brannskillet, for eksempel om strukturen trenger beskyttelse for at veggkonstruksjonen skal oppnå tilstrekkelig integritet, stabilitet eller isolasjonsevne.

En brannvegg som eksponeres for en hydrokarbonbrann mot uisolert side vil måtte dimensjoneres og bygges slik at temperaturøkningen i den bærende delen av skillekonstruksjonen (enten det er en lastbærende vegg eller ikke) ikke når kritisk materialtemperatur med hensyn til å kunne opprettholde integritetsevne og isolasjonsevne gjennom hele veggens tverrsnitt.

En brannvegg som eksponeres for en hydrokarbonbrann mot isolert side, vil kunne dimensjoneres og bygges uten at man må ta hensyn til hva som er kritisk materialtemperatur i den bærende delen av skillekonstruksjonen, så lenge egenskapene til isolasjonsproduktet sikrer hele veggens integritetsevne og isolasjonsevne.

5.3 Problemstilling 3 og 4

Problemstilling 3 og 4:

Hva er forskjellen på en brannvegg av brannklasse H-60 og en brannvegg av brannklasse A-60 som eksponeres for en hydrokarbonbrann?

Stilles det spesielle krav til materialer og materialeegenskaper for de forskjellige utformingene av brannskiller, eksempelvis brannisolasjon på eksponert side kontra brannisolasjon på ikke eksponert side?

En viktig forskjell på klasse A og H er i utgangspunktet at en brannvegg av brannklasse A-60 skal ha integritet i 60 minutter og en brannvegg av klasse H (uansett 0, 60 eller 120) skal ha integritet i 120 minutter. Med andre ord kan en brannvegg av A-klasse «kollapse» etter 60 minutter og likevel opprettholde integritetskriteriene, mens en H-klassevegg skal holde 120 minutter HC-eksponering før den eventuelt «kollapser». Dette er basert på de definisjonene som ligger til grunn for testmetodene som produktene klassifiseres etter.

I utgangspunktet stilles det ikke spesielle krav i regelverk eller standard til materialer og materialeegenskaper annet enn at materialene skal være ubrennbare. Montering og respons ved direkte branneksposering må tas hensyn til avhengig av egenskapene og kvaliteten til materialene.

Generelt er det ofte forskjeller i oppbyggingen av en brannvegg av klasse A og av klasse H. Som nevnt under problemstilling 1 og 2, er det i de fleste tilfeller nødvendig med en annen oppbygging av brannveggen for å kunne opprettholde integritets- og isolasjonskriteriene for de aktuelle testene. Forskjellen mellom brannveggene kan både bestå av oppbygging av hele brannveggen, eller oppbygging av stålkonstruksjonen. Videre er det ofte forskjellige isolasjonsmaterialer som brukes, og dersom det brukes samme type isolasjon, er det ofte forskjell på for eksempel tykkelse, densitet, vekt og robusthet på disse. Et eksempel på dette er gitt i avsnitt 3.1.2, hvor det var forskjell på både type isolasjon som ble brukt ISO- og HC-testen, og tykkelsen på isolasjonen.

En viktig forskjell på materialer som brukes i en brannvegg av brannklasse H-60 og av brannklasse A-60, er at disse må være designet for å motstå brannlasten med temperaturutviklingen for den aktuelle testen. Som tidligere beskrevet, er det stor forskjell på temperaturutviklingen og maksimaltemperaturen i en test med ISO-eksponering og en test med HC-eksponering. Dette gjelder særlig den første timen av branneksposeringen, som vist i Figur 2-1.

Den brå temperaturstigningen som en HC-eksponering innebærer, vil kunne gjøre at enkelte materialer oppfører seg annerledes enn ønskelig hvis en A-vegg utsettes for en hydrokarbonbrann. Det er mange materialeegenskaper som avhenger av oppvarmingshastighet, ettersom den termiske responsen til ulike materialer avhenger av oppvarmingshastighet, som beskrevet i avsnitt 3.2.3. Dersom materialene som er brukt i en A-vegg ikke er dimensjonert for å utsettes for en hydrokarbonbrann, vil feil bruk kunne føre til brudd, sprekker og andre uønskede endringer.

Maksimaltemperaturene som oppnås i en HC-eksponering vil kunne påvirke materialer som endrer egenskaper som følge av temperaturavhengige faseoverganger i materialet ved gitte temperaturer. Dette gjelder for eksempel vannholdige materialer som gips samt enkelte typer glassull. Volumøkende belegg har også temperaturavhengige egenskaper som gjør at de kan oppføre seg annerledes i en A- og HC-eksponering.

Når det gjelder eksponeringsside, er dette omtalt under problemstilling 2. Generelt vil et materiale som benyttes på eksponert side bli utsatt for sterkere påkjenninger enn et materiale som benyttes på ueksponert side. Det er derfor viktig at materialet er designet for dette.

Oppsummert faglig vurdering av problemstilling 3 og 4:

Det er forskjell på brannvegger av brannklasse H-60 og brannvegger av brannklasse A-60 med hensyn på følgende parametre:

- Oppbygging
- Materialvalg
- Materialkvaliteter (tykkelser, densitet, vekt, robusthet, etc.)

Brannisolasjon på eksponert side vil ikke ha den samme mekaniske beskyttelsen som brannisolasjon på ueksponert side.

5.4 Problemstilling 5

I problemstillingen under antar vi at begrepet *brannbelastning* er brukt i betydningen *brannpåkjenning*.

Problemstilling 5:

Er standardenes krav til brannmotstand og tester relevant med tanke på den aktuelle brannbelastning en brannvegg kan utsettes for?

Når det gjelder standardenes krav til temperaturkriterier på ueksponert side av brannvegger, anbefaler Babrauskas at dette økes fra 140/180 °C opp til 400 °C, slik det er beskrevet i avsnitt 3.2.1. En slik endring vil gi høyere varmestråling, og dermed høyere risiko for brann og personskade på ueksponert side av brannveggen. Dersom den ueksponerte siden av brannveggen er en uisolert stålplate, vil dette medføre en varmestråling som kan gi andregradsforbrenning etter få sekunder. Videre vil det kunne medføre antennelse av normalt antennelige materialer som tre og papir etter kort tid. Dette vil ha spesielt store konsekvenser hvis området brukes som rømningsvei. Vi konkluderer derfor med at standardenes krav til temperaturkriterier på ueksponert side ikke bør endres.

Når flammer enten omhyller brannveggen eller er i umiddelbar nærhet til veggen, er det ikke grunnlag for å si om standardenes krav til brannmotstand og tester er relevant for den aktuelle brannbelastningen en brannvegg utsettes for. Det vil i slike tilfeller alltid være nødvendig å foreta en vurdering, eventuelt inkludert beregning av hvilke brannlaster brannvegger og konstruksjonselementer vil bli utsatt for i en reell brannsituasjon. Beregning av hvor lenge en brannvegg vil oppfylle de spesifikke krav som er satt til den, vil kunne avvike fra det som er oppnådd i de standardiserte branntestene.

Når det gjelder standardenes krav til den aktuelle brannlast som en brannvegg kan utsettes for, er det i avsnitt 3.2.2 gitt eksempler på noen sentrale prosjekter hvor brannlaster fra hydrokarbonbranner er omhandlet. I disse prosjektene fremkommer eksperimentelle resultater som viser at varmeutviklingen i en hydrokarbonbrann kan resultere i større brannlast enn hva HC-kurven representerer. Dette gjelder både for åpne branner og for innelukkede branner. Dette innebærer at det i nærheten av brannvegger kan oppstå hydrokarbonbranner som har høyere brannlaster enn det som dagens tester representerer.

Problemstillingen vil være aktuell for åpne områder, og kanskje særlig for innelukking av områder, ettersom innelukkede branner vil kunne gi svært høye brannlaster. Dette er aktuelt med tanke på vinterisering av plattformer, hvor innelukking av hele anlegg er et tema.

Videre innebærer dette at de varmeklukser som benyttes i risikovurderinger og som input i konsekvensberegninger er lavere enn det som er påvist i relevante eksperimenter. 100 kW/m^2 er en varmekluksetetthet som sjelden har blitt observert i eksperimenter i relevant skala. Dette har ikke blitt tatt til følge i regelverket i Norge. NORSOK S-001 benytter for eksempel varmeklukser som ikke gjenspeiler målte verdier i relativt moderat skala. Det er heller ikke i samsvar med de oppgitte verdier i grunnleggende litteratur, som beskrevet i avsnitt 3.2.2.

Oppsummert faglig vurdering av problemstilling 5:

Standardenes krav til brannmotstand og tester er ikke nødvendigvis relevant for den aktuelle brannbelastningen en brannvegg utsettes for.

Begrunnelsen for dette er at det finnes eksperimentelle resultater som dokumenterer at varmemengden fra en hydrokarbonbrann kan resultere i større brannlast enn hva HC-kurven representerer.

6 Konklusjoner

En branneksposering i henhold til NORSOK S-001 på 100 kW/m^2 er ikke direkte sammenlignbar med en branneksposering i henhold til HC-kurve og ISO-kurve. Dette er fordi de to sistnevnte er avhengig av en rekke parametere, som for eksempel eksponeringstiden og temperaturgradienten i eksponeringsforløpet. En branneksposering i henhold til HC-kurven er konservativ i forhold til en branneksposering på 100 kW/m^2 i henhold til NORSOK S001.

En branneksposering i henhold til ISO-kurven gir de forskjellige materialkomponentene i en veggkonstruksjon lengre tid til reaksjon på grunn av en svakere temperaturgradient enn hva som er tilfellet ved en branneksposering i henhold til NORSOK S-001 på 100 kW/m^2 . Hvorvidt dette har signifikant betydning er vanskelig å vurdere på grunn av manglende sammenlignbare testresultat. De vurderinger som er utført i dette studiet er basert på bruk av stål i de skillende konstruksjonselementene i en brannvegg. Vi har kommet frem til følgende konklusjoner:

- Dokumentasjonsgrunnlaget for å kunne vurdere hvorvidt en brannvegg av A-klasse vil tåle å bli eksponert for en hydrokarbonbrann, er svært begrenset. Det må fremskaffes relevante forsøksdata og testdokumentasjon som grunnlag for vurderinger knyttet til aksept av eksisterende A-60 konstruksjoner i områder hvor det kan oppstå hydrokarbonbrann.
- Type isolasjonsmateriale som brukes, og tykkelsen på dette, er avgjørende for hvor godt en brannvegg tåler påkjenningsene fra en hydrokarbonbrann, avhengig av om isolasjonen er plassert på eksponert eller ueksponert side. Den optimale plasseringen av isolasjon er avhengig av hensikten med brannskillet, for eksempel om strukturen trenger beskyttelse for at veggkonstruksjonen skal oppnå tilstrekkelig integritet, stabilitet eller isolasjonsevne.
- Observasjoner fra test med 1,5 mm isolert stålplate uten skjøter viser at denne er i stand til å motstå en hydrokarbonbrann i 120 minutter uten gjennombrenning. Eksemplet er fra test med isolasjonen plassert på ueksponert side, noe som er konservativt i forhold til oppnådd ståltemperatur, på grunn av magasinering av varme i stålet.

Basert på punktene over vil det være mulig å vurdere bruk av brannvegger med dokumentert brannmotstand A-0, A-60 eller A-120 der kravet er brannmotstand i henhold til eksponering for hydrokarbonbrann. En slik vurdering vil være lettere å akseptere dersom den aktuelle branneksposeringen er definert til å være mindre eller lik en varme-flukstetthet på 100 kW/m^2 . Et annet moment som vil kunne forenkle en slik vurdering, er at det kun stilles krav til integritet for brannveggen. I tilfeller hvor den aktuelle branneksposeringen er definert til å være høyere enn en varme-flukstetthet på 100 kW/m^2 vil det være vanskeligere å dokumentere at brannvegger med A-klasse kan benyttes uten at det foreligger relevant testdokumentasjon. Jo høyere varme-flukstettheten er over 100 kW/m^2 desto mindre er sannsynligheten for at det vil være akseptabelt å benytte brannvegger med A-klasse.

En reell brannvegg kan ha skjøter, hjørner, gjennomføringer og annet som ikke er testet eller mulig å inkludere i en standardisert test. Dette er en av de underliggende årsakene til sikkerhetsmarginene som ligger inne i bruken av H-klassifiserte brannvegger på installasjoner, marginer som ikke uten videre bør reduseres.

I en rapport om risikoevaluering av tåleevne til brannvegger er viktig å ta hensyn til følgende fire punkter:

- Integritet
- Isolasjonsevne
- Stabilitet ved egenvekt
- Stabilitet ved ytre påført last

Dersom noen av disse skal utelates fra vurdering, bør det gjøres basert på en evaluering som fremkommer i rapporten. Hvis ikke, bør alle punkter vurderes på lik linje.

7 **Anbefalinger til videre arbeid**

I dette prosjektet er det pekt på at en A-klassifisert brannvegg mangler tilstrekkelig dokumentasjon når den skal benyttes i områder der den vil kunne bli utsatt for en hydrokarbonbrann. På bakgrunn av dette anbefaler vi at det settes opp og gjennomføres et testprogram hvor ulike typer installerte A-klassifiserte brannvegger utsettes for hydrokarbonbranner med en gitt brannlast for å avdekke hvorvidt det er behov for oppgraderinger av eksisterende brannvegger. Brannlast som kan brukes her er en hydrokarbonbrann med varmeklukstetthet 100 kW/m^2 , eller andre relevante brannlaster. På bakgrunn av et slikt testprogram, er målsettingen å komme frem til om det er mulig å etablere grunnlagskriterier for å vurdere andre eksisterende løsninger som ikke er testet.

For fremtiden anbefaler vi at det etableres en testmetode der skillekonstruksjoner eksponeres for en hydrokarbonbrann med varmeklukstetthet 100 kW/m^2 som et alternativ til standard HC-kurve, for de tilfellene der det er tilstrekkelig å beskytte seg mot en redusert hydrokarbonbrann (100 kW/m^2).

Videre er det avdekket behov for kunnskapsoppdatering og en eventuell endring i regelverk basert på kunnskapsoppdateringen når det gjelder hvilke brannlaster som er aktuelle for hydrokarbonbranner. Det er i denne rapporten gjengitt eksperimentelle resultater som dokumenterer at varmemengden fra en hydrokarbonbrann kan gi en større brannlast enn hva dagens standarder og testmetoder omfatter. Dette gjelder både for åpne og innelukkede branner. En slik kunnskapsoppdatering vil være svært viktig med tanke på aktuelle fremtidige problemstillinger. Et eksempel er vinterisering av plattformer, hvor innelukking av branner kan føre til en høyere brannlast enn det som dagens regelverk er dimensjonert for.

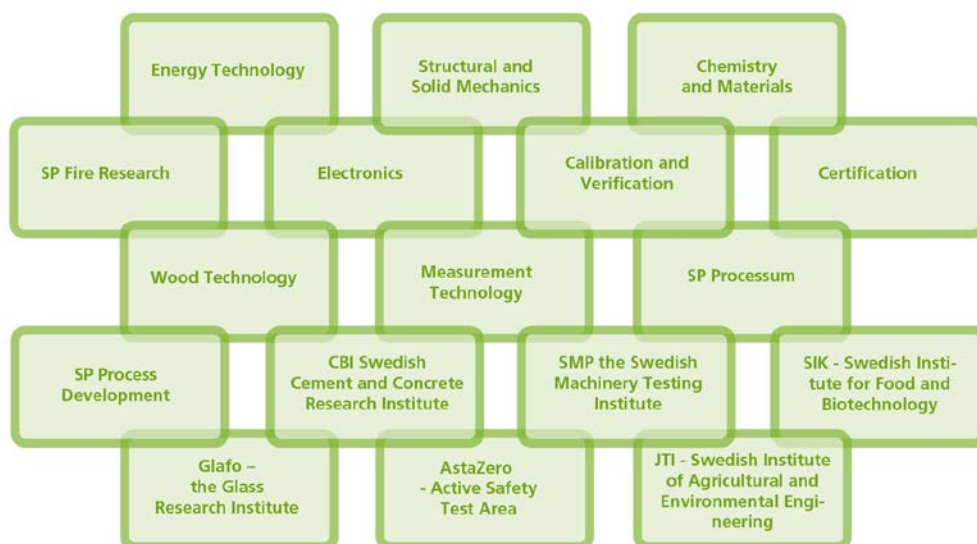
Referanser

- [1] Forskrift 31. januar 1984 nr. 227 om sikringstiltak mot brann og eksplosjon på flyttbare innretninger. 1984.
- [2] Forskrift 29. april 2010 nr. 634 om utforming og utrustning av innretninger med mer i petroleumsvirksomheten (Innretningsforskriften). 2010.
- [3] Standard Norge, "NS-EN 1363-1:1999, Prøving av brannmotstand - Del 1: Generelle krav." Standard Norge, 1999.
- [4] "Sjøfartsdirektoratet, beskrivelse av flyttbare innretninger," www.sjofartdir.no. [Online]. Available: <http://www.sjofartdir.no/fartoy/fartoystyper/flyttbare-innretninger/>. [Accessed: 11-Sep-2014].
- [5] Forskrift 12. februar 2010 om helse, miljø og sikkerhet i petroleumsvirksomheten og på enkelte landanlegg (rammeforskriften). 2011.
- [6] "Kollegiet for brannfaglig terminologi," Kollegiet for brannfaglig terminologi, 12-Dec-2014. [Online]. Available: <http://www.kbt.no>. [Accessed: 12-Dec-2014].
- [7] Petroleumstilsynet, "Veiledning til innretningsforskriften," www.ptil.no. [Online]. Available: <http://www.ptil.no/innretningsforskriften/category385.html>. [Accessed: 01-Oct-2014].
- [8] International Organization for Standardization, "ISO 834-1:1999 - Fire-resistance tests -- Elements of building construction -- Part 1: General requirements," 1999.
- [9] Standard Norge, "NS-EN 1363-2:1999, Prøving av brannmotstand - Del 2: Alternative prosedyrer og tilleggsprosedyrer." Standard Norge, 1999.
- [10] Standard Norge, "NS-EN 1363-3:1999, Prøving av brannmotstand - Del 3: Verifikasjon av prøvningsovnnens ytelse." Standard Norge, 1999.
- [11] 2010 FTP Code - International Code for Application of Fire Test Procedures, 2010, Resolution MSC.307(88). International Maritime Organization, 2012.
- [12] "NORSOK- direktiv A-001N: Utvikling av NORSOK standarder. Utgave 5, desember 2008." Standard Norge, 2008.
- [13] "NORSOK STANDARD S-001 Technical safety. Edition 4, February 2008." Standard Online AS, 12-Feb-2008.
- [14] V. Babrauskas, "Unexposed-face temperature criteria in fire resistance tests: A reappraisal," *Fire Saf. J.*, vol. 44, no. 6, pp. 813–818, Aug. 2009.
- [15] International Organization for Standardization, "ISO 13571 Life-threatening components of fire - Guidelines for the estimation of time to compromised tenability in fires." International Organization for Standardization, 2012.
- [16] J. P. Stensaas and B. A. Mostue, "NBL A04148 Ny kunnskap om brann offshore. En innføring i ny kunnskap om brann offshore, tilegnet gjennom de siste 10 års forskning - 2. utgave," SINTEF NBL as, SINTEF report NBL A04148, Feb. 2005.
- [17] C. L. Beyler, *The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, section 3, chapter 11, 3rd ed. 2002.
- [18] K. Opstad, P. Aune, B. E. Vembe, Ø. Johansen, and M. Bugge, "NBL A07126 Fire on the Sea Surface - Phase IV, Ignitability and sustainability - Real-Scale Behaviour," SINTEF report NBL A07126, 2007.
- [19] R. Wighus, G. Drangsholt, K. Nygård, G. Tronstad, and J. P. Stensaas, "NBL A07130 Fire on the sea surface: Technical report for the Svalbard winter experiment in April-May 1994," SINTEF Report NBL A07130, 2007.
- [20] R. Wighus, L. E. Lønvik, and K. Nygård, "NBL A07131 Fire on the sea surface: Technical report for the Svalbard summer experiment in September - October 1994," SINTEF Report NBL A07131, 2007.
- [21] R. Wighus and L. E. Lønvik, "NBL A07132 Fire on the sea surface: Experiments at Svalbard 1994. Summary report of the Winter and Summer Experiments.," http://nbl.sintef.no/publication/lists/docs/NBL_A07132.pdf, SINTEF Report NBL A07132, 2007.

- [22]G. A. Chamberlain, M. A. Persaud, R. Wighus, and G. Drangsholt, “NBL A08102 Blast and Fire Engineering for Topside Structures. Test Programme F3, Confined Jet and Pool Fires. Final report,,” SINTEF Report NBL A08102, 2008.
- [23]C. A. Selby and B. A. Burgan, “SCI-P-253 Blast and Fire Engineering for Topside Structures - Phase 2- Final Summary Report,” The Steel Construction Institute, United Kingdom, SCI Publication number 253, ISBN 1-85942-078-8, 1998.
- [24]J. A. Koski, S. D. Wix, and D. E. Beene, “Experimental measurement of a shipboard fire environment with simulated radioactive materials packages,” ASTM Spec. Tech. Publ., no. 1336, pp. 135–149, 1998.
- [25]J.-C. Lee and T.-Y. Liu, “Experimental study on the performance of ship fire protection materials,” J. Mar. Sci. Technol., vol. 14, no. 1, pp. 39–48, 2006.
- [26]J.-C. Le and S.-K. Chang, “Heat insulation performance of marine structures,” J. Ship Res., vol. 53, no. 3, pp. 130–136, 2009.
- [27]S. S. Manson, “Behavior of materials under conditions of thermal stress,” National Advisory Committee for Aeronautics, Washington, NACA Technical note 2933, 1953.
- [28]N. J. Tro, Chemistry- A Molecular Approach, 1st ed. New Jersey: Pearson Education Inc., 2008.
- [29]“Stål,” Store norske leksikon, nettutgave. 15-Feb-2009.
- [30]B. Predel, M. Hoch, and M. J. Pool, Phase Diagrams and Heterogeneous Equilibria. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2004.
- [31]J. A. Rhys, “Intumescent coatings and their uses,” Fire Mater., vol. 4, no. 3, pp. 154–156, Sep. 1980.
- [32]M. Władyka-Przybylak and R. Kozłowski, “The thermal characteristics of different intumescent coatings,” Fire Mater., vol. 23, no. 1, pp. 33–43, Jan. 1999.
- [33]C. M. . Sprague, R. C. Richards, and M. A. Blanchard, “A Methodology for Evaluation of Ship Fire Safety,” Nav. Eng. J., vol. 104, no. 3, pp. 104–113, May 1992.

SP Technical Research Institute of Sweden

Our work is concentrated on innovation and the development of value-adding technology. Using Sweden's most extensive and advanced resources for technical evaluation, measurement technology, research and development, we make an important contribution to the competitiveness and sustainable development of industry. Research is carried out in close conjunction with universities and institutes of technology, to the benefit of a customer base of about 10000 organisations, ranging from start-up companies developing new technologies or new ideas to international groups.



SP Fire Research AS

Postboks 4767 Sluppen, 7465 Trondheim

Telefon: 464 18 000

E-post: post@spfr.no, Internett: www.spfr.no

www.spfr.no

SPFR-rapport SPFR A14116

ISBN 978-82-14-00131-0

For mer informasjon om publikasjoner utgitt av SP: www.sp.se/publ