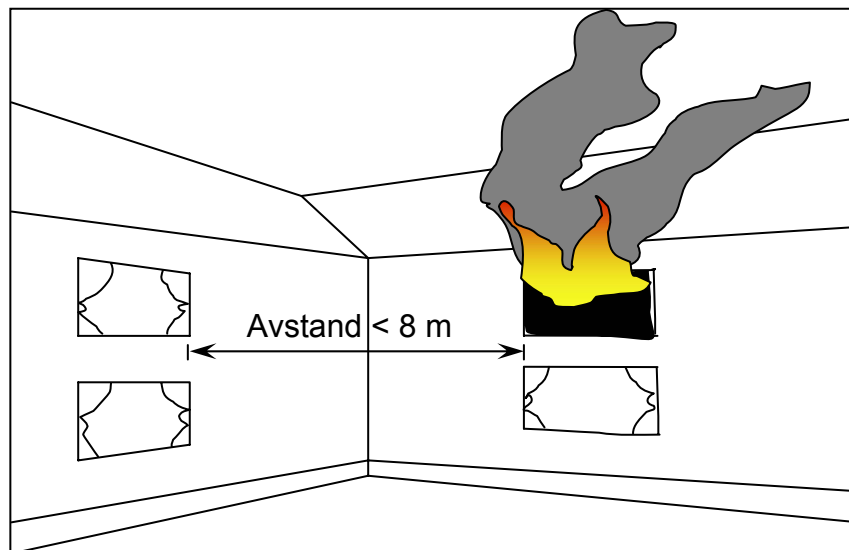


HØGSKOLEN STORD/HAUGESUND

Brannspredning mellom vinduer i innvendige hjørner



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

Studieretning : Brannsikkerhet

Av : Jonas Lindstén
Anders Pettersen

Kandidatnummer 46

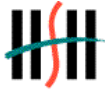
Kandidatnummer 35

Oppgavens tittel Brannspredning mellom vinduer		Rapportnummer
Utført av Jonas Lindstén og Anders Pettersen		
Linje Sikkerhet		Studieretning Brann
Gradering Åpen	Innlevert Dato 30.04.03	Veileder ved HSH Stefan Andersson
Oppdragsgiver Skansen Consult AS		Kontaktperson hos oppdragsgiver Jens Bjerkelund

Ekstrakt:

Ofte blir løsninger gitt i REN, veiledning til Teknisk forskrift (TEK) til Plan- og bygningsloven, vurdert som konservative og fordyrende ved brannteknisk prosjektering/vurdering av bygg. Gjennom beregninger og vurdering av gjeldene lovverk tar denne rapporten sikte på å utvikle en tabell for raskt å kunne vurdere nødvendig avstand, og eller vurdere nødvendig brannmotstand til vinduer i innvendig hjørne.

Tabellen som blir presentert er utarbeidet med hensyn til allment godtatte akseptkriterier, og det anses derfor at brannsikkerheten er ivaretatt ved bruk av tabellen. Resultatene er ikke å anse som preaksepterte på grunn av at løsningene avviker fra de anbefalingene som er gitt i REN.



Forord

Denne rapporten er skrevet som en obligatorisk og avsluttende del i den treårige branningeniørutdannelsen ved Høgskolen Stord Haugesund. Prosjektet skal ha en bredde og arbeidsmengde som dekker fire vektball.

Under høsten 2002 ble vi oppmerksomme på at en del av de løsninger som anbefales i REN, veiledning til Teknisk Forskrift til Plan- og bygningsloven gir for konservative løsninger. Den som var mest interessant å se på var brannspredning mellom vinduer i innvendige hjørner. Vi tok kontakt med Stefan Andersson ved Skansen Consult AS som viste stor interesse for vår problemstilling.

Rapporten henvender seg først og fremst til personer som sitter med prosjektering av branntekniske problem. Vi håper at resultatene i rapporten vil kunne bidra til å belyse problemet med brannsikring av innvendig hjørne, og eventuelt bli brukt som et verktøy i prosjektering.

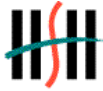
Ved gjennomføring av prosjektet har vi hatt et godt samarbeid med flere personer, og vi ønsker spesielt å takke:

Stefan Andersson	Skansen Consult AS (Intern veileder)
Jens Bjerkelund	Skansen Consult AS (Ekstern veileder)
Silvia Encheva	Høgskolen Stord/Haugesund
Alf Reidar Nielsen	Høgskolen Stord/Haugesund
Torgrim Log	Høgskolen Stord/Haugesund
Pirjo Kurki	Miljøministeriet, Finland

Jonas Lindstén

Anders Pettersen

Haugesund
30 april 2003



Sammendrag

Ved brann i byggverk vil omfanget til brannen kunne begrenses av byggets utforming og brannvesenets innsats. En brann vil kunne spre seg ut vinduer og bidra til brannspredning i fasaden. En uheldig plassering av vinduer i fasaden ved innvendig hjørne kan bidra til en rask brannspredning i bygg. REN, veiledning til Teknisk forskrift (TEK) til Plan- og bygningsloven, angir bestemte branntekniske løsninger for nødvendig sikring av innvendig hjørne. Ofte blir løsninger gitt i REN vurdert som konservative og fordyrende ved brannteknisk prosjektering/vurdering av bygg. Ved å se på lovverkene i Sverige og Finland blir de anbefalte løsningene i REN vurdert å være konservative fordi det er ingenting som tyder på at sikkerhetsnivået i noen av disse landene er lavere enn i Norge.

Hensikten med dette arbeidet er å utvikle et verktøy/tabell for raskt å kunne vurdere nødvendig avstand mellom, og eller vurdere nødvendig brannmotstand til vinduer i innvendig hjørne. Det skal ved beregninger og litteraturstudie gjøres en helhetlig vurdering av de forhold som påvirker risikoen for brannspredning i innvendige hjørner. Resultatene skal vurderes opp mot de løsninger som anbefales i REN.

Brannspredning i form av varmestråling er den mest vanlige formen for spredning mellom vinduer i innvendig hjørne. Utrekninger gjort ved hjelp av flere metoder viser at strålingsnivåene ikke vil kunne tilsi så konservative avstander som REN angir. En av metodene gav verdier som strider mot generelle prinsipper for varmestråling og ble derfor forkastet. Beregninger gjort med hensyn til åpningsfaktor og temperatur i brannrommet gir verdier for avstander med hensyn til brannbelastning og åpningsfaktor. Det går ett klart skille mellom brannbelastninger større og mindre enn 150 MJ/m^2 .

Beregninger basert på overnevnte metoder og krav i TEK har ført til de resultat som blir presentert i denne rapporten, se Tabell 6.1. Resultatene er ikke å anse som preaksepterte på grunn av at løsningene avviker fra de anbefalingene som er gitt i REN. Rapporten er gjort som en del av en treårig ingeniørutdanning og har ikke gjennomgått kvalitetssikring i den grad som kreves for at løsningene skal kunne benyttes i prosjekt der det settes krav om ansvarsrett ifølge Plan- og bygningsloven.

Tabell 6.1 Avstand mellom vinduer i innvendig hjørne

Areal på strålende flate	Anbefalt minste avstand	Utforming
Areal mindre enn 4 m^2	1 m	Ett vindu i klasse E30
	2 m	Uklassifisert
Areal større enn 4 m^2	1,5 m	Ett vindu i klasse E30
	3 m	Uklassifisert

Tabellen er utarbeidet med hensyn til arealet på den strålende flaten. Med en tillatt akseptabel stråling på 12.5 KW/m^2 vil en kunne si at for alle avstander over 3 meter er brannsikkerheten ivaretatt. Ved avstander under to meter vil det anbefales bruk av glass med brannmotstand i vinduene i form av E30.



Innhold

1. Innledning	1
1.1. Bakgrunn	1
1.2. Formål	2
1.3. Problembeskrivelse	2
2. Lovverk og anbefalinger	3
2.1. Generelt	3
2.2. Krav og anbefalinger i forskjellige land	3
2.3. Diskusjon	5
3. Enkle strålingsberegninger	7
3.1. Generelt	7
3.2. Emissivitet	7
3.3. Flammetemperatur	8
3.4. Akseptkriterier	8
3.5. Konfigurasjonsfaktor	9
3.6. Resultat	14
3.7. Diskusjon	15
4. Avanserte strålingsberegninger	17
4.1. Generelt	17
4.2. Brannbelastning	17
4.3. Åpningsfaktor	18
4.4. Termisk treghet	19
4.5. Flammetemperatur	19
4.6. Resultat	24
4.7. Diskusjon	25
5. Øvrige forhold	28
5.1. Flammer gjennom vindusåpning	28
5.2. Vind	31
5.3. Vinduer med brannmotstand	32
6. Resultater	34
7. Diskusjon	35
7.1. Oppsett av tabell	35
7.2. Sikkerhetsnivå	35
7.3. Usikkerhet	36
7.4. Videreføring av prosjekt	37
8. Konklusjon	38
9. Referanser	39



Vedleggsliste

Vedlegg 1	Beregningseksempel for å finne emissiviteten til en flamme
Vedlegg 2	Beregningseksempel, konfigurasjonsfaktor gjennom integrasjon
Vedlegg 3	Beregningseksempel, konfigurasjonsfaktor ved bruk av Eurocode 3
Vedlegg 4	Beregningseksempel, konfigurasjonsfaktor med Introduction to Heat Transfer
Vedlegg 5	Beregningseksempel for temperaturer i henhold til Eurocode 1
Vedlegg 6	Beregningseksempel for temperaturer i henhold til Law
Vedlegg 7	Beregningseksempel for temperaturer i henhold til M&T-metoden

Figurliste

Figur 1.1	Avstand mellom vinduer i innvendig hjørne.....	1
Figur 3.1	Geometrisk forhold for emitterende og absorberende objekt.....	9
Figur 3.2	Illustrasjon av stråling mellom vinduer.....	10
Figur 3.3	Stråling mellom parallelle flater.....	11
Figur 3.4	Modell for addering av konfigurasjonsfaktorer	13
Figur 4.1	Standard tid-temperaturkurver for ASTM E119 og ISO 834.....	20
Figur 4.2	Tid-temperaturkurve for Eurocode 3.....	22
Figur 4.3	Korrelasjon mellom omhyllingsareal og vindusåpning for kvadratisk vindu.....	27
Figur 5.1	Emisjonstall som funksjon av flammetykkelse.....	31

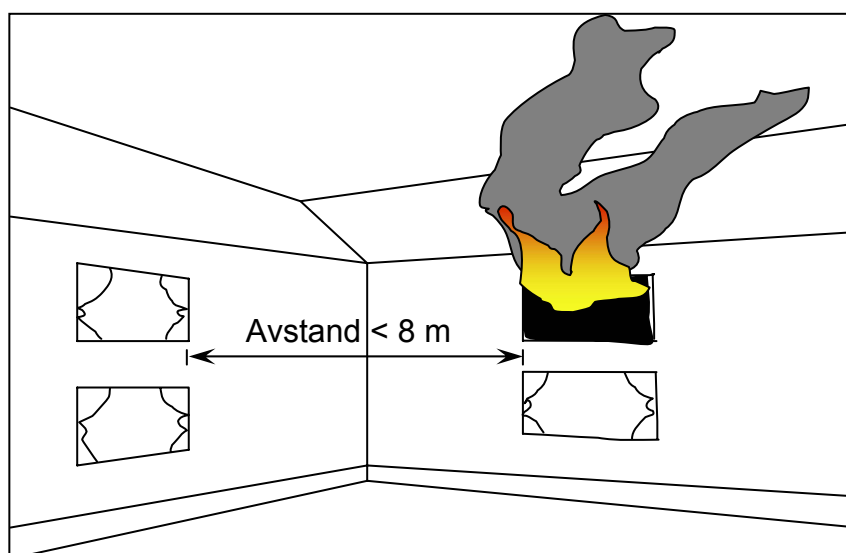
Tabelliste

Tabell 2.1	Avstand mellom vinduer i innvendig hjørne, Norge.....	4
Tabell 2.2	Avstand mellom vinduer i innvendig hjørne, Sverige.....	4
Tabell 2.3	Vurderinger for bruk av tabeller og lovverk	5
Tabell 3.1	Akseptabel avstand ved bruk av konfigurasjonsfaktor gjennom integrasjon... ..	11
Tabell 3.2	Akseptabel avstand ved bruk av Eurocode 3	12
Tabell 3.3	Akseptabel avstand ved bruk av modell i Introduction to Heat Transfer.....	14
Tabell 3.4	Akseptabel avstand ved enkle strålingsberegninger.....	14
Tabell 3.5	Vurderinger for bruk av akseptabel avstand fra enkle strålingsberegninger....	15
Tabell 4.1	Statistiske data for brannbelastning.....	18
Tabell 4.2	Akseptable avstand ved avanserte strålingsberegninger	24
Tabell 4.3	Vurderinger for bruk av avanserte strålingsberegninger.....	25
Tabell 6.1	Akseptable avstand mellom vinduer i innvendig hjørne.....	34

1. Innledning

1.1. Bakgrunn

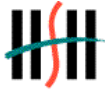
Ved brann i byggverk vil omfanget til brannen kunne begrenses av byggets utforming og brannvesenets innsats. Bygget skal være utformet slik at brann- og røykspredning begrenses. Spredning av brann ut vinduer til fasade er en vanlig årsak til rask brannspredning. For å oppnå tilfredsstillende sikkerhet for personer og materielle verdier deler en ofte inn byggverk i såkalte brannceller, som skal forhindre eller begrense brann- og røykspredningen. Internt i bygningen brukes konstruksjoner (vegger, dører, tak og gulv), som har nødvendig brannmotstand. Uheldig plassering av vindu i fasaden vil kunne svekke en branncelles evne til å hindre brannspredning i byggverket. Vinduer i innvendig hjørne med liten innbyrdes avstand i separate brannceller er ett eksempel på dette, se Figur 1.1.



Figur 1.1 Avstand mellom vinduer i innvendig hjørne

Moderne arkitektur og en funksjonsbasert Teknisk forskrift (TEK) til plan og bygningsloven har gjort at utformingen av nye bygg varierer mer. Bygg med store glassfasader og store lysgårder er blitt et stadig mer vanlig syn. Den store variasjonen i utforming av byggverk har ført til større behov for alternative løsninger på branntekniske problem.

Kostnadene for brannsikring av bygg vil variere, men kan være betydelige. Dette gjelder nybygg men også ved oppgradering av sikkerheten ved gamle bygg. Det er derfor knyttet stor oppmerksomhet til hvilke løsninger som er mest kostnadseffektive, samtidig som de holder sikkerhetsnivået på et tilfredsstillende nivå. Fordi de preaksepterte anbefalingene i veiledningen til teknisk forskrift (REN) er generelle mener mange at de er konservative noe som igjen kan føre til høyere kostnader enn nødvendig ved brannsikring av byggverk. Løsningene i denne blir fortsatt brukt fordi de kunnskapene som trengs for å utarbeide ingeniørmessige løsninger mangler, en har ikke tilstrekkelig med tid, eller en mangler offentlig godkjenning for å få lov til å utarbeide sikre løsninger.



1.2. Formål

Hensikten med dette arbeidet er å utvikle et verktøy/tabell for å forenkle vurderingen av nødvendig avstand mellom, og eller vurdering av nødvendig brannmotstand til vinduer i innvendig hjørne. Det skal ved beregninger og litteraturstudie gjøres en helhetlig vurdering av de forhold som påvirker risikoen for brannspredning i innvendige hjørner. Resultatene skal vurderes opp mot de løsninger som anbefales i REN. Et slikt verktøy vil kunne brukes ved nybygging, ombygging eller for å vurdere eksisterende sikkerhet mot brannspredning i innvendig hjørne.

1.3. Problembeskrivelse

Først skal de forskjellige nordiske lands regelverk studeres for å finne likhetstrekk eller forskjeller ved de anbefalinger som brukes ved vurdering av nødvendig sikring mot brannspredning i innvendig hjørner. Det beste men også det mest kostbare er å gjøre branntester av den planlagte løsningen, men dette er ikke en hensiktsmessig måte å raskt evaluere forskjellige avstander på. I denne oppgaven skal ikke denne metoden benyttes. Utover dette finnes ulike metoder for å kvantitativt beregne hvilke tiltak som er nødvendige for å oppnå tilfredsstillende sikkerhet i det enkelte tilfelle.

Når en ved å benytte beregninger prøver seg frem for å få ønskelige resultater trengs det informasjon om de scenarier som skal undersøkes. Mer avanserte beregningsmetoder krever som regel mer detaljert inndata og tar mer tid å bearbeide, men til gjengjeld blir svaret mer nøyaktig. Det trengs også en type av kritisk faktor, såkalt akseptkriterium, som setter en grense for hva som kan aksepteres. De beregninger og metoder som skal brukes i dette arbeid er:

- Enkle strålingsberegninger
- Avanserte strålingsberegninger med varierende temperaturer

Det finnes flere andre faktorer som påvirker risikoen for denne type brannspredning. Faktorene kan ha en negativ eller positiv innvirkning. Forhold som kan ha betydelig innvirkning og skal vurderes er:

- Flammer som kommer ut gjennom vindusåpningene
- Vind
- Bruk av vinduer med brannmotstand



2. Lovverk og anbefalinger

2.1. Generelt

I de nordiske landene er det gitt forskrifter som setter krav til brannsikring av nye byggverk. Kravene i forskriftene er funksjonskrav som skiller seg fra detaljkrav og viser til et ønsket sikkerhetsnivå. Intensjonen bak forskriftene er å sikre gode og bruksvennlige byggverk som skal være tilstrekkelig sikre selv om de avviker fra det tradisjonelle, dersom egenskapene kan dokumenteres.

I den svenske og finske forskriften er det gitt anbefalte løsninger, mens det i Norge er gitt en veiledning til den Tekniske forskriften (TEK) der det gis anbefalte løsninger. I veiledningen til teknisk forskrift (REN) i Norge er de preaksepterte anbefalingene vurdert som de løsningene som er vanligst for tradisjonelle bygg. Ved å følge de anbefalte løsningene anses det at de funksjonskrav som er i TEK er ivaretatt, og det er ikke nødvendig med ekstra verifisering og eller dokumentasjon.

2.2. Krav og anbefalinger i forskjellige land

2.2.1. Norge

I Norge er det Plan og Bygningsloven som er overordnet lovverk når det gjelder byggesak. Teknisk forskrift (TEK) er gitt til gjennomføring og utfylling av bestemmelsene i plan og bygningsloven. TEK angir ingen avstand mellom vinduer i innvendig hjørne. Den angir derimot en innbyrdes avstand på åtte meter mellom byggverk hvis ikke andre tiltak er gjort for å hindre brannspredning.

I § 7-24 i TEK stilles følgende krav til utforming av brannceller:

Brannceller skal være slik utført at de forhindrer spredning av brann og branngasser til andre deler av brannseksjonen i den tid som er nødvendig for rømning og redning.

REN¹ angir en avstand på minst åtte meter mellom vinduer i innvendig hjørne for å hindre brannspredning mellom brannceller. Videre angir også REN at ved mindre avstander enn åtte meter må vinduene ha brannmotstand som vist i Tabell 2.1. Det er gjort unntak som gjelder hvis det er små brannceller som ligger mot hverandre i innvendig hjørne og som ikke er rømningsvei, så kan disse ha vinduer uten brannmotstand. Anbefalingene varierer med bygningens brannklasse (BKL). Bygningens brannklasse er en funksjon av bygningens risikoklasse og antall etasjer, og sier noe om en potensiell konsekvens ved brann.

Tabell 2.1 Avstand mellom vinduer i innvendig hjørne, Norge

Plassering av vinduer	Avstand mellom vinduer	Utforming
Vinduer i innvendig hjørne i BKL 1	$L \leq 5$ meter	Ett vindu i klasse EI 30 eller begge i klasse EI 15
	$5 < L < 8$ meter	Ett vindu i klasse EI 15
Vinduer i innvendig hjørne i bygning i BKL 2 og 3	$L \leq 5$ meter	Ett vindu i klasse EI 60 eller begge i klasse EI 30
	$5 < L < 8$ meter	Ett vindu i klasse EI 30

2.2.2. Sverige

I Sverige bestemmes krav til avstand mellom vinduer i innvendig hjørne av Boverkets byggregler, (BBR)². Denne angir at vinduer som tilhører forskjellige brannceller og vender mot hverandre, skal utformes og plasseres slik at brannspredning mellom branncellene blir vanskeligere. Disse vinduer må alene kunne åpnes med verktøy eller nøkkel. Hvis vinkelen i det innvendige hjørnet er mindre enn 60° så anses vinduene som parallelle.

I de generelle anbefalingene kan det observeres at det eneste som innvirker på avstanden mellom vinduene er hvis de sitter i en pleieinstitusjon og hvis vinduene er av brannsikker type. Forandringer i brannbelastning, antall etasjer eller vindustørrelse vil ikke gjøre noen forskjell på avstanden, se Tabell 2.2.

Tabell 2.2 Avstand mellom vinduer i innvendig hjørne, Sverige

Plassering av vinduer	Avstand mellom vinduer	Utforming
Vinduer i innvendig hjørne i pleieinstitusjon	$L < 3$ meter	Ett vindu i klasse E30 eller begge i klasse E15
	$L \geq 3$ meter	Uklassifisert vindu
Vinduer i innvendig hjørne øvrig	$L < 2$ meter	Ett vindu i klasse E15
	$L \geq 2$ meter	Uklassifisert vindu

2.2.3. Finland

Bygg i Finland er regulert av de finske byggreglene. I støtte av denne er en handledning³ gitt ut som er basert på et funksjonelt utgangspunkt. Hvert avsnitt presenterer det overordnede målet før detaljerte bestemmelser og anvisninger. Hensikten med dette er å gi mulighet for å kunne danne nye tekniske løsninger. Brannsikkerhetskrav kan anses være oppfylt hvis ett bygg prosjekteres i henhold til foreskrifter og anvisninger eller hvis kravene verifiseres på andre måter.

I henhold til de finske byggreglene bør ikke vinduer plasseres i innvendig hjørne med seksjonerende vegg. Hvis vinduer enda plasseres slik skal avstanden mellom dem være minst to meter. Hvis hjørnevinkelen er større enn 135° gjelder ikke kravet til avstand.

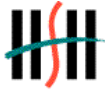
2.3. Diskusjon

2.3.1. Brukbarhet av anbefalingene

De preaksepterte løsningene i REN er de løsningene som er vurdert som de mest vanlige for tradisjonelle bygg. Det fakta at REN er en detaljveiledning gjør den enkel å bruke, og kravet til dokumentasjon ikke er stort uten om det som allerede er gitt i veiledningen. Det er i REN oppgitt en tabell for avstander mellom vinduer i innvendig hjørne på lik linje med den som er gitt i det svenske lovverket. Tabell 2.3 viser en vurdering av tabellene, og det finske lovverket.

Tabell 2.3 Vurderinger for bruk av tabeller og lovverk

	Antatt positive vurderinger	Antatt negative vurderinger
Norge/REN	<ul style="list-style-type: none">– Generell– Stor sikkerhetsmargin	<ul style="list-style-type: none">– Unødvendig stor avstand– Kostnadskrevene grunnet konservative verdier
Sverige	<ul style="list-style-type: none">– Enkel å bruke– Kort avstand og lav klassifisering gir lavere kostnader– Samsvarer med løsninger gjort ved beregninger	<ul style="list-style-type: none">– Usikkerhet knyttet til to meter avstand
Finland	<ul style="list-style-type: none">– Enkel å bruke	<ul style="list-style-type: none">– Usikkerhet knyttet til to meter avstand– Skiller ikke mellom forskjellige type bygninger



2.3.2. Sikkerhetsnivå

Ved å bruke REN vil en tilfredsstillende det norske lovverket fullt ut. Sikkerhetsnivået vil være høyt, men det stilles spørsmål ved om sikkerhetsmarginen er for stor. Ved å se på bygningsmassen i de nordiske landene kan man se klare særpreg knyttet til byggeskikk. Sverige og Norge har en veldig lik bygningsmasse. Det er i begge land mye bruk av tre i konstruksjoner, og tildels i kledning. Det er derfor vanskelig å knytte problematikken med avstand mellom vinduer i innvendig hjørne opp mot byggeskikk når det gjelder disse landene. Med bakgrunn i dette er det litt rart at de anbefalte avstandene mellom vindu i innvendig hjørne er så forskjellige.

Det er ingenting som tyder på at de generelle kravene til brannsikkerhet i Sverige og Finland er langt lavere enn i Norge. Løsninger gjort i henhold til TEK i Norge viser seg å samsvare bra med de anbefalingene som er gitt i det svenske lovverket. Dette gir en klar indikasjon på at sikkerhetsnivået landene imellom er relativt likt.

Ved valg av glass med brannmotstand som et kompensierende tiltak er det i REN brukt ulike typer av EI-glass for avstander under åtte meter. I de svenske anbefalingene anbefales bruk av E-glass ved avstander under to og tre meter. En reduksjon i glassets egenskaper fra EI til E vil redusere glassets isolasjonsevne mot varmestråling.

Det er klare indikasjoner på at det er relevant å skille mellom typer bygg i lovverkene. Den store fokuseringen på brannsikkerhet ved pleieinstitusjoner gjenspeiler behovet for økt sikkerhet ved slike bygg. I de svenske og norske anbefalingene er det tatt hensyn til dette, men det er forskjellige tiltak knyttet til løsningene. Tabellen gitt i REN skiller mellom bygg i BKL 1 (brannklasse) og BKL 2 og 3. Skillet gjør seg gjeldende ved at brannmotstanden i antall minutter for glasset fordobles. Tabellen gitt i det svenske lovverket skiller mellom vanlig bygg og pleieinstitusjoner. Skillet gjør seg gjeldende i at den anbefalte avstanden økes med en meter.

2.3.3. Usikkerhet

Ved å følge de anbefalte løsningene i REN anses det at de funksjonskrav som er i TEK er ivaretatt. Ved å skille mellom bygg i forskjellige brannklasser slik det gjøres i REN vil bygg med lav risikoklasse, men stort antall etasjer, kunne få samme branntekniske krav som bygg med høy risikoklasse. Dette kan virke lite hensiktsmessig.

I de svenske anbefalingene er det gjort et skille mellom pleieinstitusjon og andre bygg, en vurdering gjort med hensyn til risiko. Et skille disse typer bygg vil i utgangspunktet virke rimelig, men det kan stilles spørsmål ved at det er en del bygg med høy risikoklasse vil falle utenfor. I likhet med de finske anbefalingene er det i de svenske satt en generell avstand på to meter mellom vinduer i innvendig hjørne. Er dette sikkert nok?

3. Enkle strålingsberegninger

3.1. Generelt

Varmestråling er overføring av energi gjennom elektromagnetiske bølger. Både gasser, væsker og faste stoffer kan avgi varmestråling. Alle varme objekt stråler med en intensitet som raskt vokser med temperaturen. Strålingen sendes ut i alle retninger, men intensiteten er størst normalt på strålingsflaten. Denne energioverføring kan beskrives med Ekvasjon (3.1) nedenfor. Enheten er energi per sekund og areal [W/m^2].

$$\dot{q}'' = \phi \varepsilon \sigma T^4 \quad (3.1)$$

hvor:	\dot{q}''	=	mottatt stråling
	ϕ	=	konfigurasjonsfaktor
	ε	=	emissivitet til den strålende flaten
	σ	=	Stefan-Boltzmanns konstant = $5,67 \times 10^{-8} \text{ W}/\text{m}^2\text{K}^4$
	T	=	temperatur til strålende flate

Stråling er den vanligste måten for brann å spre seg mellom vinduer. Den største strålingsrisikoen ligger innenfor 45° til hver side fra normalen. For å raskt kunne vurdere brannspredning mellom innvendig hjørne for mange forskjellige tilfeller er det lagt beregningsverktøy i Microsoft Excel. Eksempel på regneark for alle de metodene som er beskrevet i dette kapittel ligger som Vedlegg 2 til 4.

3.2. Emissivitet

Emissivitet beskriver hvor godt et objekt stråler. For en sort objekt er emisjonstallet 1, hvilket betyr at 100 % av energien emitteres. Den største delen av strålingen i en flamme kommer fra hete sotpartikler. En emissivitet på 0,3 – 0,7 for flammer blir ofte brukt, dette avhenger av mengden sot, og tykkelsen på flammen⁵. Ekvasjon (3.2) viser hvordan en kan beregne emissiviteten til en flamme⁶.

$$\varepsilon = (1 - e^{-KL}) \quad (3.2)$$

hvor:	ε	=	emissiviten til flammen [-]
	K	=	effektiv emisjonskoeffisient [m^{-1}]
	L	=	flammens eller branngassenes tykkelse [m]

Emisjonskonstanten varierer stort mellom forskjellige stoffer⁷. For tre kan K variere mellom 0,5 – 0,8, og for diverse møbler brukes en verdi rundt 1,1. I beregningene vil K settes til 1,2 for å få konservative verdier.



Resultantene viser at eksakte verdier på emisjonstallet fra vindusåpninger i et helt brannforløp kan være vanskelig å finne grunnet variasjonene av flammens dybde i rommet. Det er lagt et regneark i Microsoft Excel og et eksempel finnes som Vedlegg 1. Emisjonstallet ligger over 0,9 for rommer med en dybde på over to meter. For de videre beregningene vil derfor emissiviteten til de strålende flatene settes til 1,0 for å få konservative resultater.

3.3. Flammentemperatur

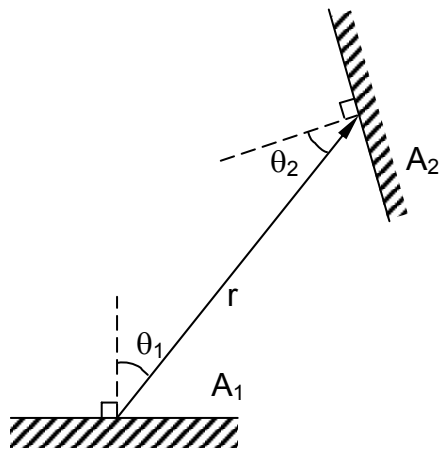
Temperaturen hos en flamme varierer mellom forskjellige brenselstyper, tilgang på oksygen og hvor effektiv forbrenningen er. En mer fullstendig forbrenning gir lavere innhold av sotpartikler som gir lavere stråling. Fullskala eksperiment⁷ har vist at den høyeste temperaturen på flammer ved vindu vil være 1000°C. For høyere temperaturer må brenselet bestå av syntetiske materialer eller brennbare væsker. I branner med lav brannbelastning har temperaturer i vindusflammen på 800°C til 900°C blitt registrert. I de enkle strålingsberegningene vil derfor 1000°C brukes som ett godt estimat på de høyeste temperaturene som kan oppnås i vindusåpningen.

3.4. Akseptkriterier

Flere kilder^{2,7,6} angir en innfallende stråling på 12,5-15 kW/m² som kritisk nivå for å få brannspredning mellom vinduer. Dette fordi tre og andre materialer begynner å avgi brennbare gasser og kan antennes av pilotflamme, som for eksempel flyvebranner eller gnist. Den innfallende strålingen gjennom vinduet til materialer på innsiden vil være lavere enn til utsiden. Ordinære vinduer har lav brannmotstand og integriteten vil trolig svekkes tidlig i et brannforløp. Spontan antennelse av møbler nær vindu kan skje etter 20 minutters eksponering ved 13 kW/m². Ved strålingsnivåer rundt 30 kW/m² kan tre antennes spontant. Inndata på akseptabel stråling kommer å settes til 12,5 kW/m².

3.5. Konfigurasjonsfaktor

Konfigurasjonsfaktoren, også kalt synsfaktor eller formfaktor, beskriver hvordan en flate stråler til et vilkårlig plassert punkt. Det tas hensyn til den emitterende overflatens plassering i forhold til den absorberende. Dette geometriske forhold bestemmer størrelsen til konfigurasjonsfaktoren (Figur 3.1). Denne figur viser alle forskjellige typer av situasjoner som kan oppstå, fordi avstand og vinkel mellom objektene enkelt kan varieres.



Figur 3.1 Geometrisk forhold for emitterende og absorberende objekt

3.5.1. Beregning av konfigurasjonsfaktor gjennom integrasjon

Det geometriske forhold i Figur 3.1 kan settes opp som i Ekvasjon (3.3). Denne beskriver hvordan konfigurasjonsfaktoren fås frem gjennom å summere bidragene fra alle små "arealbiter" dA_1 til et punkt på det absorberende vinduet A_2 .

$$\phi = \int_{A_1} \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{\pi r^2} dA_1 \quad (3.3)$$

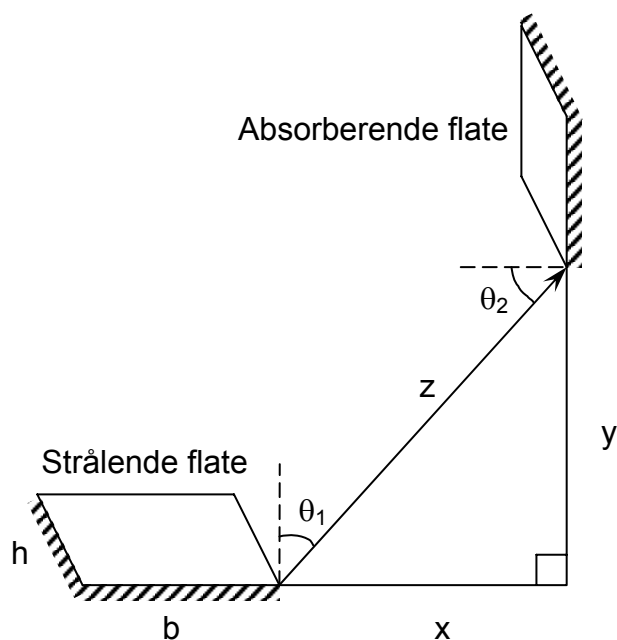
hvor: A_1 = strålende flate
 θ_1 = vinkel fra normal på strålende flate
 θ_2 = vinkel fra normal på absorberende flate
 r = avstand mellom flatene

Det finnes her tre forskjellige måter for å beregne konfigurasjonsfaktoren. Det kan antas at vinklene og radien er konstant gjennom hele integralet, at de kun varierer med bredden eller at de varierer med både bredden og høyden på vinduet.

Beregninger med den første av de tre modellene vil gi for høye verdier på konfigurasjonsfaktoren. Det gis enda en ganske god pekepinn på størrelsen på faktoren og er rask og enkel å beregne. Gjennom å sette høyden på vinduet konstant kan en få frem Ekvasjon (3.4), en tilstand som er visualisert i Figur 3.2. Denne modell kan gi for høye verdier på konfigurasjonsfaktoren når vinduet er veldig høyt i forhold til bredden.

$$\phi = \frac{hy}{2\pi} \left(\frac{1}{y^2 + x^2} - \frac{1}{y^2 + (x+b)^2} \right) \quad (3.4)$$

hvor: h = høyde til strålende vindu
 b = bredde til strålende vindu
 y = avstand mellom absorberende flate og hjørne
 x = avstand mellom strålende flate og hjørne



Figur 3.2 Illustrasjon av stråling mellom vinduer

Integralet hvor alle parametere i Ekvasjon (3.3) varierer med både bredden og høyden på vinduet er ikke enkelt å løse ved hjelp av integrasjon. Derfor må Ekvasjon (3.5) løses numerisk med hjelp av matematisk verktøy.

$$\phi = -\frac{1}{2\pi} \int_0^{H_1} \sqrt{y^2 + h^2} \left(\frac{1}{(B+x)^2 + y^2 + h^2} - \frac{1}{x^2 + y^2 + h^2} \right) dh \quad (3.5)$$

Resultatene viser at Ekvasjon (3.5) gir de antatt mest realistiske verdiene på konfigurasjonsfaktoren fordi den er mest nøyaktig. Gjennom å integrere over både bredde og høyde vil konfigurasjonsfaktoren mest mulig speile virkelige forhold. Eksempel på beregninger i Microsoft Excel med de tre metodene finnes som Vedlegg 2.

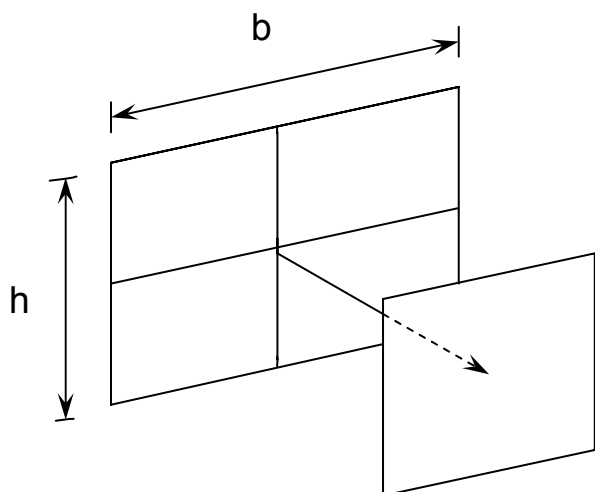
Forskjellige akseptable avstander mellom vinduer i innvendig hjørne er beregnet ved hjelp av Ekvasjon (3.5). Denne gjelder når emissiviteten er lik 1, den strålende flaten holder 1000 °C og akseptabel innfallende stråling er 12,5 kW/m². Avstandene, satt som z i Figur 3.2, er en funksjon av størrelser på det strålende vinduet, se Tabell 3.1.

Tabell 3.1 Akseptabel avstand ved bruk av konfigurasjonsfaktor gjennom integrasjon

Høyde × bredde [m]	Akseptabel minste avstand
1 × 1	0,87 m
2 × 2	1,73 m
2 × 3	1,99 m
2 × 4	2,16 m
3 × 3	2,59 m
3 × 4	2,86 m

3.5.2. Beregning av konfigurasjonsfaktor i henhold til Eurocode 3

Eurocode er et arbeid igangsatt av CEN (European Committee for Standardization) for å skape tekniske regler for byggdesign i de europeiske lundene. Disse metoder blir brukt i Europa og er allment akseptert. I høringsutkastet til Eurocode 3, Annex D beskrives tre måter for å beregne konfigurasjonsfaktoren ved stråling mellom objekt⁸. Det er valgt å undersøke to av disse, stråling mellom parallelle flater og stråling mellom flater som står i vinkel.



Figur 3.3 Stråling mellom parallelle flater



Stråling mellom motstående parallelle flater, se Figur 3.3, er kun interessant å se på ved spesielle konstruksjoner med for eksempel lysgårder med liten avstand mellom vinduer eller mellom bygg med avstand under åtte meter. Den kan også brukes for å se hvor stor forskjell det er mellom stråling normalt fra overflaten og stråling som treffer ett objekt som ligger ved 45° vinkel fra normalen.

Resultatene viser at konfigurasjonsfaktoren blir meget lav. Det blir stor forskjell mellom de to beregningsmetodene når en ser på stråling normalt fra overflaten og setter vinkler og avstand i den andre metoden slik at denne viser samme forhold. Dette gir et usikkerhetsmoment, fordi en ikke vet om de resultat en får frem er for konservative, eller ikke konservative nok. Det er også usikkert hvilke forhold som er tatt hensyn til i denne beregningsmetoden. Eksempel på beregninger i Microsoft Excel med de to metodene finnes som Vedlegg 3.

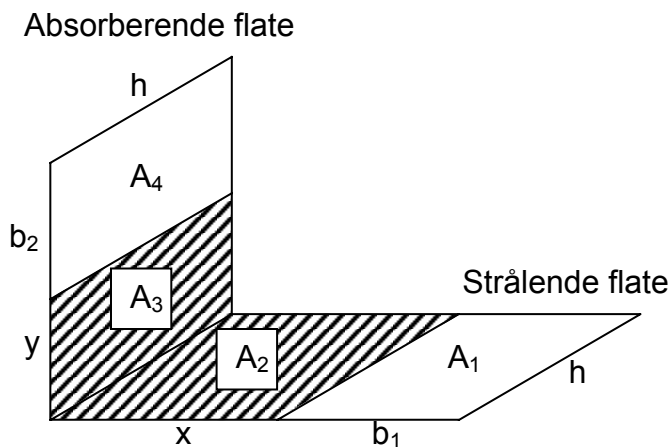
Tabell 3.2 viser en sammenstilling av akseptable avstander mellom vinduer i innvendig hjørne fra beregninger ved hjelp av metoden som er beskrevet i Eurocode 3. Denne gjelder når emissiviteten er lik 1, den strålende flaten holder 1000 °C og akseptabel innfallende stråling er 12,5 kW/m².

Tabell 3.2 Akseptabel avstand ved bruk av Eurocode 3

Høyde × bredde [m]	Akseptabel minste avstand
1 × 1	0,43 m
2 × 2	0,86 m
2 × 3	1,04 m
2 × 4	1,13 m
3 × 3	1,29 m
3 × 4	1,49 m

3.5.3. Beregning av konfigurasjonsfaktor i henhold til Introduction to Heat Transfer⁹

Frank P. Incropera og David P. DeWitt har i sin bok beregnet formfaktoren for stråling i forskjellige situasjoner. Disse kan adderes for å få frem relevante uttrykk for mer kompliserte forhold (Figur 3.4). Ekvasjon (3.6) viser denne addering for formfaktoren slik at strålingen mellom to vinduer kan beregnes. Her spiller det absorberende vinduets geometri inn, og vi antar i de fleste tilfeller at den er av samme størrelse som det i brannrommet. En begrensning er at vinduenes høyde er nødt til å være like, fordi modellen ikke tar hensyn til andre situasjoner ved 90° vinkel. For hele beregningsmetoden henvises till boken *Introduction to Heat Transfer*⁹.



Figur 3.4 Modell for addering av konfigurasjonsfaktorer

$$F_{14} = \frac{1}{A_1} \left[(A_1 + A_2) F_{(1,2)(3,4)} + A_2 F_{23} - (A_1 + A_2) F_{(1,2)3} - A_2 F_{2(3,4)} \right] \quad (3.6)$$

hvor: F = formfaktor for stråling mellom to flater
 A = areal til de forskjellige flatene

Modellen er noe vanskelig å arbeide med og gir høye verdier på konfigurasjonsfaktoren, som også varierer med størrelsen på den absorberende flaten. Resultatene viser at metoden gir lavere strålingsnivåer når høyden økes for visse vindusstørrelser. I tillegg er strålingen størst når breddene på vinduet er lik, se b_1 og b_2 på Figur 3.4. Hvis den strålende flaten blir større enn den absorberende vil vi få mindre utsendt stråling. Dette stemmer ikke overens med resultatene fra de andre metodene og observasjoner fra virkelige tilfeller. Når det strålende arealet øker vil strålingen også øke med denne. Dette viser at denne metoden ikke kan være korrekt. Det anbefales at denne metoden ikke brukes for beregninger av konfigurasjonsfaktor mellom vinduer i innvendig 90° hjørne. Eksempel på regneark i Microsoft Excel for denne metoden finnes som Vedlegg 4.

Tabell 3.3. viser en sammenstilling av akseptable avstander mellom vinduer i innvendig hjørne fra beregninger ved bruk av modellen i Introduction to Heat Transfer. Denne gjelder når emissiviteten er lik 1, den strålende flaten holder 1000°C og akseptabel innfallende stråling er $12,5\text{ kW/m}^2$. Resultatene vil ikke brukes i denne oppgaven fordi metoden gav urimelige svar ved flere tilfeller.

Tabell 3.3 Akseptabel avstand ved bruk av modell i Introduction to Heat Transfer

Høyde \times bredde på strålende flate [m]	Bredde på absorberende flate	Akseptabel avstand
1 \times 1	1 m	1,69 m
2 \times 2	1 m	1,55 m
2 \times 2	2 m	3,39 m
2 \times 3	2 m	3,67 m
3 \times 3	3 m	5,08 m

3.6. Resultat

Tabell 3.4 er satt opp for å raskt kunne vurdere kortest akseptable avstand mellom vinduer i innvendig 90° hjørne. Den er vurdert mot arealet på den strålende flaten. I strålingsberegningene har konfigurasjonsfaktoren funnet gjennom integrasjon og ved hjelp av metoden beskrevet i Eurocode 3 blitt brukt. Det har setts bort fra avstandene beskrevet i Introduction to Heat Transfer fordi metoden gav direkte feilaktige svar. For å få frem disse avstander er det tatt i bruk at emissiviteten er lik 1, det strålende vinduet 1000°C og at akseptabel innfallende stråling på det andre vinduet er $12,5\text{ kW/m}^2$.

Tabell 3.4 Akseptabel avstand ved enkle strålingsberegninger

Areal på strålende flate	Akseptabel minste avstand
Areal mindre enn 1 m^2	1 m
Areal mindre enn 4 m^2	2 m
Areal større enn 4 m^2	3 m

3.7. Diskusjon

3.7.1. Brukbarheten for tabellen

Beregningene viser at strålingsnivåene blir høyest når avstanden fra begge vinduene (x og y i Figur 3.2) til hjørnet er like store og danner en likebent triangel. Når vinkelen fra normalen ved noen av vinduene blir større en 45° så vil den innfallende strålingen minke drastisk. Tabellen kan derfor brukes når det er ulik avstand fra hjørnet til vinduene fordi sikkerhetsmarginen blir større. Ved mindre vinkler enn 90° i hjørne vil den innfallende strålingen øke og tabellen er ikke lenger gyldig.

Det er gjort beregninger for både brede og høye vinduer. Når mer av arealet er nærmere det innvendige hjørnet, som er fallet ved smale vinduer, gir dette høyere nivåer på strålingen. Dette er tatt hensyn til i tabellen som da er gyldig for alle former på vinduet. Brede vinduer vil kunne gi mindre avstand, men dette er ikke tatt hensyn til.

Fordi tabellen kun tar utgangspunkt i arealet på den strålende flaten vil endringer i bruk av rommet eller økt brannbelastning ikke gi noen forandring av avstanden. Tabell 3.5 viser en sammenstilling av positive og negative faktorer for denne metoden.

Tabell 3.5 *Vurderinger for bruk av akseptabel avstand fra enkle strålingsberegninger*

Positive vurderinger	Negative vurderinger
<ul style="list-style-type: none">– Enkel å bruke– Basert på flere forskjellige beregningsverktøy og er gjennom dette godt verifisert– Verdier på temperatur og emissivitet er konservative– Vurdert mot forhold relevante for brannspredning– Fleksibel, er mulig å bruke for mange forskjellige situasjoner	<ul style="list-style-type: none">– Tar ikke hensyn til brannbelastning– Tar ikke hensyn til materialer i gulv, vegger og tak i brannrommet– Usikkerhetsmoment med konstant temperatur– Stilles krav til å vite størrelse på vinduene tidlig i byggplanlegging

3.7.2. Sikkerhetsnivå

Det kan stilles spørsmål til sikkerhetsnivået når en bruker 1000 °C som konstant temperatur. En økt temperatur til 1100 °C gir en 35 % økning i utfallende stråling. Ved 1200 °C er strålingen 79 % høyere enn ved 1000 °C. Det er ikke trolig at brannen vil oppnå så høye temperaturer, spesielt ikke ved vinduene. Dette forhold vil bli videre analysert i Kapittel 4.

Et akseptkriterium for innfallende stråling på 12,5 kW/m² bør være konservativt nok. Bruk av lavere tillatt stråling vil gi økt sikkerhet. Ett akseptkriterium på 10 kW/m² gir økt avstand med cirka 20 %. Dette vil ikke gi store forandringer i forhold til de verdier som er satt nå. Når det i tillegg har blitt brukt konservative verdier på emissivitet og realistiske temperaturer bør sikkerhetsnivået være godt nok. Tabellen har i seg en sikkerhetsmargin i det at alle akseptable avstander er rundet opp til nærmeste heltall. For eksempel er det fra beregninger funnet at for en 4 m² strålende flate er 1,78 meter minste avstand, som i Tabell 3.4 er satt til 2 meter.

Når stråling møter en vindusflate i 45° vinkel vil den delvis reflekteres. Det er ikke tatt hensyn til dette i tabellen, men vil i praksis være en konservativ faktor. Hvis strålingen isteden treffer ett ikke-reflekterende materiale, for eksempel en gardin, vil mesteparten av strålingen absorberes.

3.7.3. Usikkerheter ved beregninger

De forskjellige metodene gir ikke samme avstand ved lik inndata. Dette gir ett usikkerhetsmoment når en prøver å danne seg et samlet bilde av avstand mellom vinduene. De to brukte metodene viser en skille ved 4 m² strålende flate og en økt flate vil ikke gi store forskjeller i innfallende stråling på det andre vinduet. Ved økt bredde så vil den meste av strålingen ha en så stor vinkel i forhold til den mottagende flaten at den ekstra strålingen kan neglisjeres.

Den brukte beregningsmetoden som gir høyest verdier, og derfor er begrensende, er satt opp fra grunnleggende geometriske forhold. Den er altså ikke et generelt akseptert beregningsverktøy. De konfigurasjonsfaktorer som er gitt ved bruk av integrasjonsmetoden er å betrakte som et godt estimat på virkelige forhold. Diskusjoner med Prof. Torgrim Log ved Høgskolen Stord/Haugesund bekrefter dette.

Flammer fra brann i rom vil trolig slå ut av vinduet og gi en større strålingsflate enn kun vinduet. Beregninger viser at denne ekstra strålingsflate vil ha meget lav emissivitet, grunnet at flammen er tynn og dette gir ikke noen forskjell på strålingen. Beregningene er gjort i Microsoft Excel og ett eksempel ligger som Vedlegg 4. Bruk av strålingsflate lik vinduets areal kan da anses som akseptert.

4. Avanserte strålingsberegninger

4.1. Generelt

Strålingen fra en brann varierer sterkt med temperaturen. Temperaturen varier i de ulike fasene i et brannforløp. En brann kan forenklet deles opp i tre deler. Tilvekstfasen er enkel å beskrive gjennom å se på forbrenningen i rommet og statistiske data. Den fullt utviklede brannen er vanskeligere å danne et godt bilde av. Her dominerer beregninger av gasstemperaturer, stråling fra røyklag, og brannspredning mellom rom. Avkjølingsfasen er i stor grad lineær og er stort sett lik i de fleste typer branner. De faktorer som styrer et naturlig brannforløp er:

- Brannbelastning
- Åpningsfaktor
- Termisk treghet

Det er den maksimale temperaturen og tiden til denne oppnås som er interessant og derfor skal kun det tidlige brannforløpet studeres. De strålingsberegningene som skal utføres vil variere med temperaturen. Det er utarbeidet regneark i Microsoft Excel for å finne forskjellige verdier. Eksempel på disse beregninger for de tre siste beregningsmetodene ligger som Vedlegg 5 til 7. Konfigurasjonsfaktoren vil bli beregnet ved hjelp av integrasjon, se Kapittel 3.5.1. Verdier på emissivitet og akseptkriteriet for stråling er fortsatt lik 1 og $12,5 \text{ kW/m}^2$.

4.2. Brannbelastning

Brannbelastning angir den samlede energimengden som utvikles ved fullstendig forbrenning av alt brennbart materiale i et rom. Denne skal ses med hensyn til det totale omhyllingsarealet, som innebærer alle overflater i et rom (vegger, gulv og tak). Den kan fås gjennom nøyaktige beregninger basert på stoffers varmeverdi eller fra standardverdier for ulike bruksområder. Brannbelastning påvirker sterkt oppførselen til en brann. Mer brennbart materiale gir høyere temperaturer, men øker også sannsynligheten for at brannen blir ventilasjonskontrollert istedenfor brenselskontrollert.

Forbrenningen av materialer vil til tross for god oksygentilgang være ufullstendig. Bøker som er tett pakket i en reol vil ikke brenne fullstendig gjennom et helt brannforløp. Et brannforløp pleier også å avbrytes av brannvesenets innsats, noe som også vil påvirke den totale energimengden fra en brann. Brannbelastningen varierer altså med omstendighetene rundt en brann, og ikke bare med materialene i rommet. Tabell 4.1 viser statistisk bestemt brannbelastning for forskjellige lokaler⁴. Brannbelastning for kontorlokale er beregnet for dimensjonene $2,5 \times 4 \times 6 \text{ m}$.

Tabell 4.1 Statistiske data for brannbelastning

Type lokal eller bygging	Brannbelastning middelværdi [MJ/m ²]	Brannbelastning ved 80 % av observerte tilfeller [MJ/m ²]
Bolig, 2 rom + kjøkken	150	168
Bolig, 3 rom + kjøkken	139	149
Kontorlokale	142	169
Sykehus	116	147

4.3. Åpningsfaktor

Åpningsfaktoren beskriver ett forhold mellom åpningene til ett rom og rommets geometri. Den er en viktig parameter for en branns utvikling og kan endre brannens intensitet og varaktighet. En ventilasjonskontrollert brann er begrenset av hvor mye oksygen som tilføres gjennom åpninger til rommet og har høyere temperatur enn en brenselkontrollert. Åpningsfaktoren vil bestemmes gjennom å studere åpninger i flere typer rom og ut ifra dette velge verdier slik at resultatene blir konservative. Vinduets størrelse vil her være av stor betydning og vil undersøkes parallelt med emittert stråling. Åpningsfaktoren er gitt ved Ekvasjon (4.1).

$$O = \frac{A_v \sqrt{h}}{A_t} \quad (4.1)$$

hvor: O = åpningsfaktor [m^{1/2}]
A_v = area av vertikale åpninger [m²]
h = høyde av vertikale åpninger [m]
A_t = total omhyllsareal [m²]

Ventilasjonskontrollerte romsbranner er følsomme for størrelse og plassering av ventilasjonsåpninger. Plassering av åpninger i tak vil effektivt føre ut varm røyk og kald luft føres inn gjennom vindu. Rom med åpninger i hver ende kan få gjennomtrekk, spesielt hvis det blåser.

Høyde, bredde og lengde på rommet vil innvirke på temperaturene i en brann. Større romvolumer vil gi lavere temperaturer fordi det er større mengde luft å varme opp. Rektangulære eller usymmetriske rom vil i praksis gi lavere temperaturer i og med at det overføres mer energi gjennom veggene ved større overflate, men det velges å se bort ifra dette forholdet fordi det ikke vil påvirke beregningene i stor grad.



4.4. Termisk treghet

Den termiske tregheten er forskjellig for ulike materialer. Denne angir motstandskreftene til forandring av varme i en bygning. Materialene absorberer en del av energien i rommet og varmes opp, men ved ulik hastighet. Rom med tak, vegger og gulv i materialer med lav termisk treghet vil oppleve høyere temperaturer enn ved høy termisk treghet ved samme brannbelastning.

I de fleste tilfeller består et rom av flere materialer. Det vil i denne oppgaven ikke tas med beregningsverktøy som tar hensyn til dette. Rommet kan isteden antas å være av en type materiale slik at beregningene blir konservative. Den termiske tregheten er gitt ved Ekvasjon (4.5) og bør ligge i et område mellom 1000 – 2000 J/m²s^{1/2}K, hvor 1000 er ett konservativt estimat.

$$b = \sqrt{\rho c_p \lambda} \quad (4.5)$$

hvor:

b	=	termisk treghet [J/m ² s ^{1/2} K]
ρ	=	densitet til flater i rommet [kg/m ³]
c _p	=	spesifikk varmekapasitet [K/kgK]
λ	=	termisk konduktivitet [W/mK]

4.5. Flammetemperatur

4.5.1. Standard tid-temperaturkurver

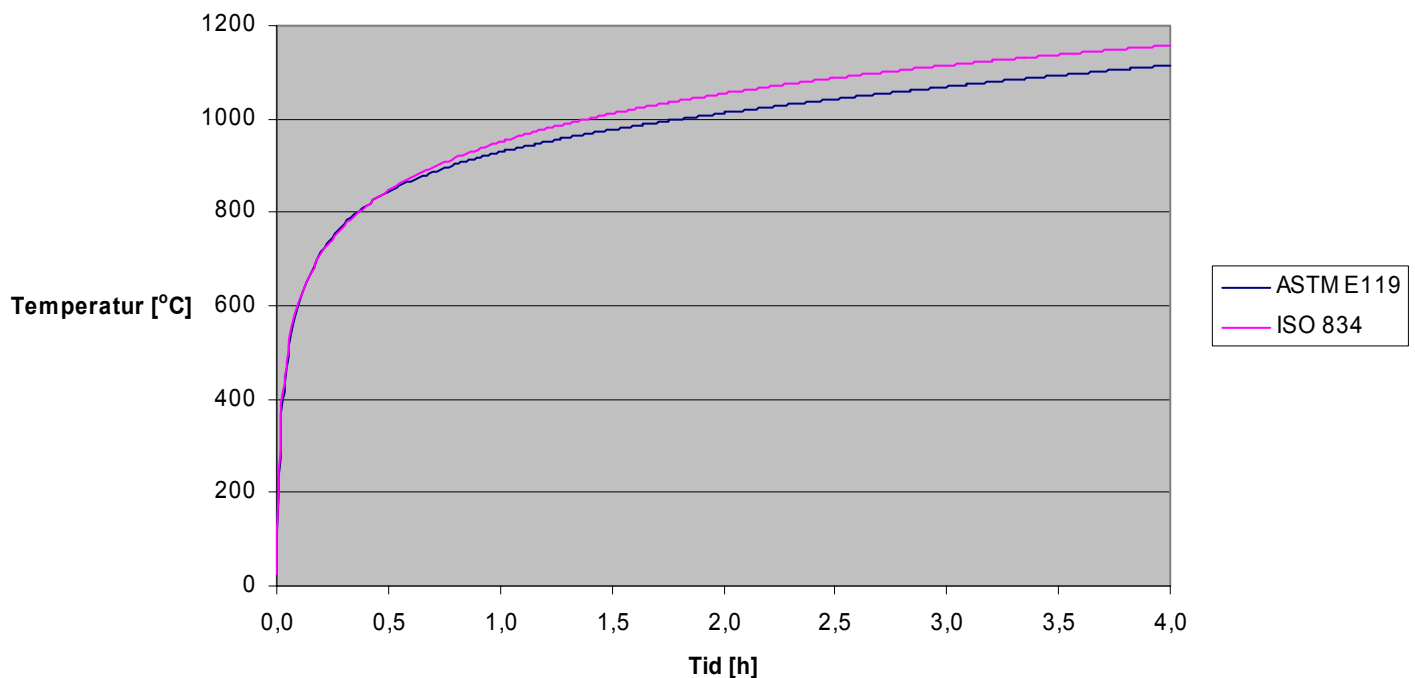
En enkel metode for å beregne temperaturer fra en brann er gjennom å bruke standard tid-temperaturkurver. Disse blir brukt for å kunne utføre lignende branntester på forskjellige plasser, gjennom at en konstruksjon utsettes for en standardisert brann og man måler hvor lang tid en skillekonstruksjon kan hindre gjennomtrengning av brannen. Bærende og avskillende konstruksjoner konstruert etter slike beregningsmetoder har en tendens til å bli overdimensjonert, fordi de gir en for høy branntemperatur.

De to vanligste testene av denne typen er ASTM E119 og ISO 834, som kan ses i Ekvasjon (4.1) og Ekvasjon (4.2)⁵. De er enkle å utføre, men unøyaktige i forhold til faktorer som ses på som relevante. Det tas ikke hensyn til brannbelastning, ventilasjonsforhold eller materialer i vegger og gulv i brannrommet. Brannkurvene vises i Figur 4.1.

$$T = 750(1 - e^{-3,796\sqrt{t}}) + 170,41\sqrt{t} + T_0 \quad (4.1)$$

$$T = 345 \log(480t + 1) + T_0 \quad (4.2)$$

hvor: T = temperatur i brannen [°C]
 T₀ = temperatur til omgiende luft [°C]
 t = branntid [h]



Figur 4.1 Standard tid-temperaturkurver for ASTM E119 og ISO 834

Å bruke denne typen av beregninger for å beskrive en brann gir mange avvik i forhold til en virkelig brann. Vekstfasen er meget rask og avkjølingsfasen er ikke medregnet. Det finnes enkle metoder for å uttrykke denne siste fasen, men det har her blitt valgt å ikke ta den med. Brannen når enkelt temperaturer på over 1000 °C etter cirka halvannen time.

4.5.2. Parametriske tid-temperaturkurver

Det finns flere forskjellige, og mer avanserte metoder for å beregne temperaturer i et brannforløp. De fleste beskriver vekstfasen og avkjølingsfasen og kan da danne et bilde av hele brannforløpet.

I Eurocode 1 beskrives en slik beregningsmetode¹⁰. Denne tar utgangspunkt i branncellens egenskaper og brannbelastningen i rommet. Eurocode er beregnet for en branncelle med standard egenskaper, åpningsfaktor lik $0,04 \text{ m}^{1/2}$ og termisk treghet lik $1160 \text{ J/m}^2\text{s}^{1/2}\text{K}$. Tid-temperaturkurven, gitt ved Ekvasjon (4.3), justeres deretter med hensyn til reelle forhold. Hvis rommet består av flere ulike materialer så kan denne metoden ta hensyn til dette. Metoden er utsatt for en del kritikk, spesielt måten som den termiske tregheten regnes ut på¹¹. Eurocode 1 er utarbeidet for branner på maks $1300 \text{ }^\circ\text{C}$ i rom med opp til 100 m^2 gulvareal og maks høyde på 4 m. Åpningsfaktoren bør ligge i intervallet $0,02 - 0,20 \text{ m}^{1/2}$.

$$\theta_g = 1325 \left(1 - 0,324e^{-0,2t^*} - 0,204e^{-1,7t^*} - 0,472e^{-19t^*} \right) \quad (4.3)$$

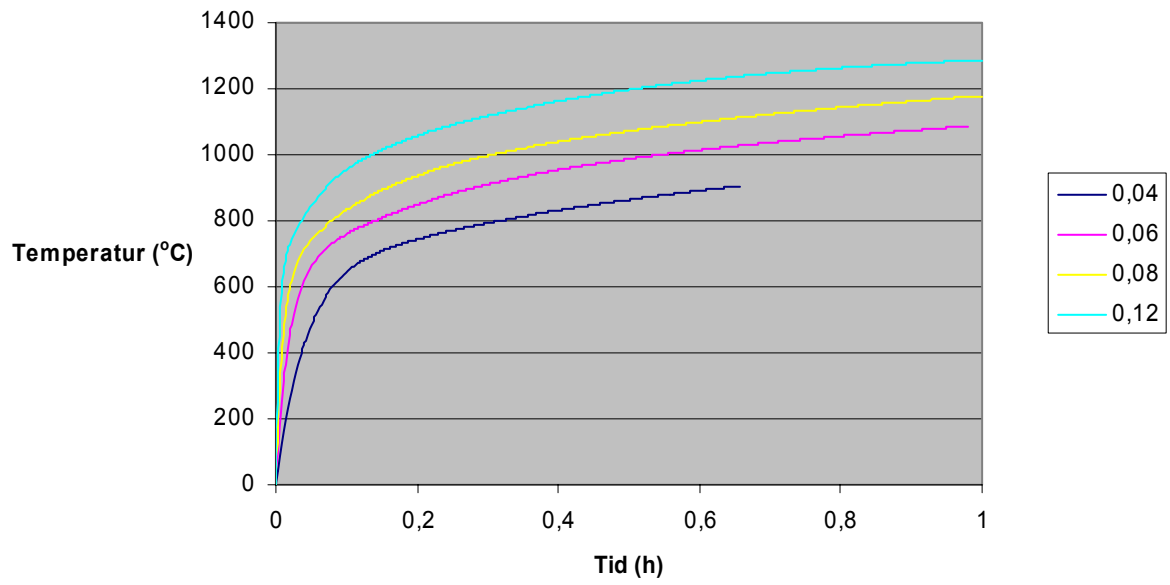
hvor: θ_g = temperatur i brannrom [$^\circ\text{C}$]
 t^* = $t \times \Gamma$ [h]
 t = tid [h]
 Γ = $\left(\frac{O}{b}\right)^2 \left(\frac{1160}{0,04}\right)^2$ [-]

Det vil ikke være interessant å se på nedkjølingsfasen i brannen, men kun tidspunktet til den maksimale temperaturen. Tiden til denne vil fås fra Ekvasjon (4.6).

$$t_d^* = (0,13 \times 10^{-3} q_{t,d} \Gamma) / O \quad (4.6)$$

hvor: $q_{t,d}$ = spesifikk brannbelastning [MJ/m^2]

Resultatene viser at temperaturene i brannrommet kan komme til å overstige $1000 \text{ }^\circ\text{C}$, spesielt ved åpningsfaktorer over $0,04 \text{ m}^{1/2}$. Temperaturene er også sterkt avhengige av brannbelastningen og den termiske tregheten i rommet. Figur 4.2 viser tid-temperaturkurvene for forskjellige åpningsfaktorer ved 150 MJ/m^2 brannbelastning og en termisk treghet på $1000 \text{ J/m}^2\text{s}^{1/2}\text{K}$. Kurvene i Figur 4.2 viser utviklingen av brannen frem til dess at maksimal temperatur har blitt oppnådd. I Eurocode 1 nås i de fleste tilfeller ikke den maksimale temperaturen i løpet av den første timen. Metoden er blitt beregnet med Microsoft Excel og ett eksempel på regneark ligger som Vedlegg 5.



Figur 4.2 Tid-temperaturkurve for Eurocode 3

4.5.3. Håndberegninger

Det finns enkle beregningsmetoder for å finne en gjennomsnittlig temperatur som en kan forvente i et brannrom. Law (1981) har beskrevet en uttrykk⁵ som er funnet gjennom eksperiment med forskjellige trebranner. For andre typer branner kan en finne temperaturen gjennom å uttrykke brannbelastningen i en ekvivalent tremengde. Det har blitt brukt at forbrenningsvarmen til tre⁵ er 16,7 MJ/kg. Flere andre kilder angir 18-19 MJ/kg som akseptable, men de noe lavere verdiene vil brukes for å få konservative beregninger. Den er avhengig av åpningene til og størrelser på rommet.

$$T_{maks} = T_0 + 6000 \frac{(1 - e^{-0,1\eta})}{\eta^{1/2}} (1 - e^{-0,05\psi}) \quad (4.7)$$

hvor:	T_{maks}	=	maksimal temperatur [°C]
	T_0	=	temperatur til omgiende luft [°C]
	η	=	$\frac{A_T}{A_w h^{1/2}}$ [m ^{-1/2}]
	ψ	=	$\frac{L}{(A_w A_T)^{1/2}}$ [kg/m ²]
	A_T	=	total omhyllingsareal minus vindusareal [m ²]
	A_w	=	total vindusareal [m ²]
	h	=	høyde på vindusåpninger [m]
	L	=	brannbelastning i ekvivalent mengde tre [kg]

Metoden gir sterkt varierende temperaturer i rom med forskjellig åpningsfaktor. Det viser seg at ved tilstrekkelig brannbelastning så vil temperaturen overstige 1000 °C i de fleste rom, ved åpninger over 2 × 2 meter. Temperaturen blir ofte begrenset av brannbelastningen i rommet og de høyeste verdiene ligger rundt 1100 °C. Modellen viser at temperaturen blir lavere ved store åpningsfaktorer, over 0,1 m^{1/2}, fordi mye varm røyk enkelt kan forsvinne ut av brannrommet. Metoden er blitt beregnet med Microsoft Excel og ett eksempel på regneark ligger som Vedlegg 6.

4.5.4. Publiserte kurver

Magnusson og Therlandersson (1970) har publisert kurver som er basert på energibalanseligninger og som for vekst- og nedkjølingsfasen er basert på data fra tester i full skale. Den fullt utviklede brannen er antatt å være ventilasjonskontrollert. I denne metoden, allment kjent som "Swedish fire curves", er det antatt å være en fullstendig forbrenning med jevn temperaturfordeling i hele brannrommet.

Dataene er presentert i form av fire tabeller med forskjellige verdier⁶ for åpningsfaktor og brannbelastning. Gjennom interpolering kan data fås for andre tilfeller, men åpningsfaktoren er begrenset mellom 0,04 til 0,12 m^{1/2}. Metoden er likt Eurocode beregnet for en standard branncelle med standard egenskaper. For å beregne temperaturene i brannen ved forskjellige materialer i de omgiende flatene så justeres åpningsfaktoren og brannbelastningen med en faktor. En realistisk verdi for de fleste typer bygg er 1,5. Denne motsvarer bruk av vanlige materialer i tak, vegger og gulv. Høyere verdier fås når de omhyllende flatene har ekstremt god varmelagringsevne.

Resultatene viser at brannens maksimale temperatur ligger rundt 1000 °C og oppnås allerede etter 10-15 minutter. Modellen viser hvordan økt åpningsfaktor vil gi en raskere og varmere brann. Interpoleringen vil i visse tilfeller gi en usymmetrisk brannkurve og det kan være vanskelig å se hva den maksimale temperaturen blir i alle tilfeller. Metoden er blitt beregnet med Microsoft Excel og ett eksempel på regneark ligger som Vedlegg 7.

4.6. Resultat

Tabell 4.2 viser akseptable korteste avstand mellom vinduer i innvendig 90° hjørne som en funksjon av brannbelastning og åpningsfaktor. For å få frem disse avstander er det tatt i bruk at emissiviteten er lik 1 og at akseptabel innfallende stråling på det andre vinduet er 12,5 kW/m². Temperaturene som er blitt brukt er fra alle metodene beskrevet i dette kapittel.

Tabell 4.2 Akseptabel avstand ved avanserte strålingsberegninger

Brannbelastning	Åpningsfaktor	Akseptabel avstand
Mindre enn 150 MJ/m ²	$O < 0,04$	1 m
	$0,04 < O < 0,06$	2 m
	$0,06 < O$	3 m
Større enn 150 MJ/m ²	$O < 0,04$	2 m
	$0,04 < O < 0,06$	3 m
	$0,06 < O$	4 m

4.7. Diskusjon

4.7.1. Brukbarheten for tabellen

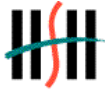
Tabell 4.2 kan brukes for alle typer rom, åpningsfaktorer, materialer i de omgiende flatene og brannbelastninger. Den er lik tabellen for enkle strålingsberegninger kun utarbeidet for 90° innvendig hjørne. Tabellen kan også brukes når åpningsfaktoren forventes være større grunnet flere åpninger.

I de fleste tilfeller hvor vinduet er eneste åpning til rommet vil åpningsfaktorene være lavere enn $0,04 \text{ m}^{1/2}$. Det er fremst ved større vinduskonfigurasjoner som for eksempel glassfasader eller bygg med flere vinduer i bredde hvor det blir aktuelt å se på større åpningsfaktorer.

Det kreves på forhånd en analyse av bruksområdet til rommet fordi brannbelastningen og åpningsfaktoren vil gi nødvendig avstand. I etterhånd vil en økning av brannbelastningen i rommet lede til at avstanden mellom vinduene ikke lenger er sikker nok. Tabellen er da mindre motstandsdyktig til forandringer. Tabell 4.3 viser en sammenstilling av positive og negative faktorer for denne metoden.

Tabell 4.3 *Vurderinger for bruk av avanserte strålingsberegninger*

Positive vurderinger	Negative vurderinger
<ul style="list-style-type: none">– Gir realistiske verdier grunnet nøyaktige beregninger– Basert på flere forskjellige beregningsverktøy og er gjennom dette godt verifisert– Vurdert mot forhold som er mest relevante for strålingsnivåene– Har blitt brukt konservative verdier på emissivitet	<ul style="list-style-type: none">– Trenger å finne brannbelastning og åpningsfaktor– Mindre fleksibel, begrenser mulighetene for bruksendring av rommet– Stiller krav til å vite hva rommet skal brukes til tidlig i byggplanlegging



4.7.2. Sikkerhetsnivå

Ved vinduet vil temperaturene sannsynligvis ikke overstige de i brannrommet, men vil heller være noe lavere. Ved bruk av brannrommets temperatur blir strålingsberegningene trolig konservative. I henhold med det norske lovverket så skal en branncelle holde for brannpåkjenning i 60 minutter beroende på brannklasse. Realistisk sett er det da temperaturen i brannrommet før denne første time som er relevant for denne analysen.

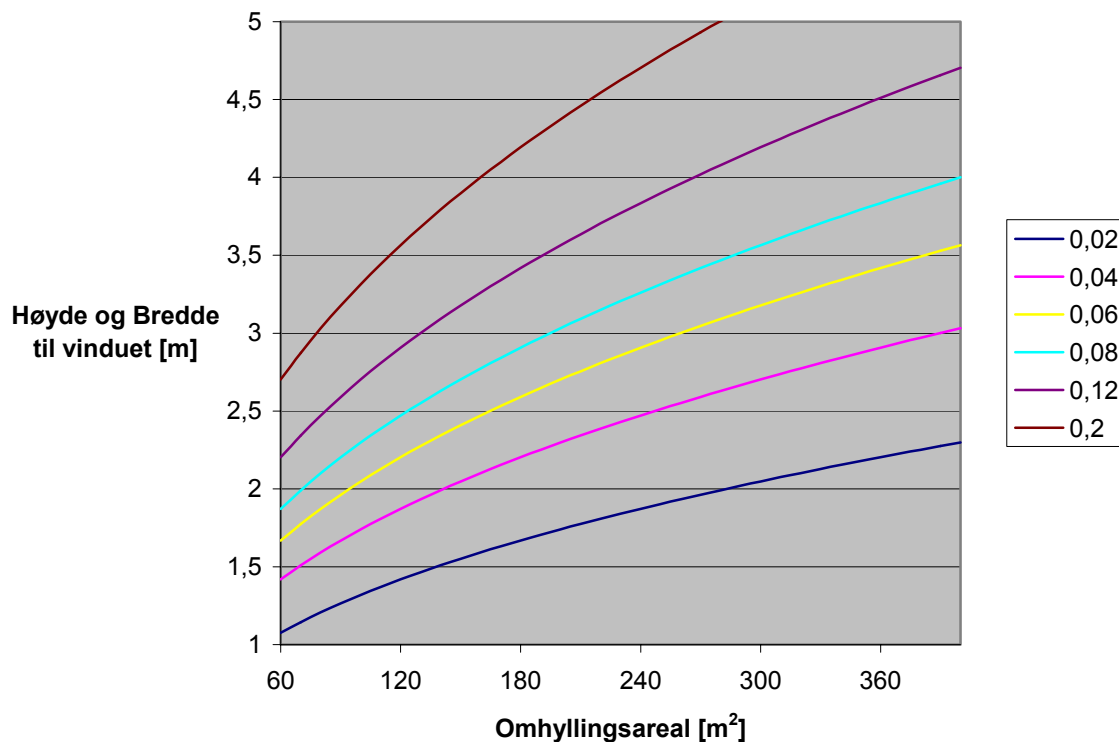
I flere tilfeller ble temperaturen større enn 1000 °C. Det har tidligere blitt nevnt at denne temperatur anses som høyest mulig å få i en brann i rom som ikke inneholder brensel med høyt energiinnhold, som syntetiske stoffer og brennbare væsker. Høyeste temperaturer brukt i beregningene var 1200 °C, noe som meget sjelden vil oppstå i en brann. Tabellen har også innlagt en sikkerhetsmargin fordi alle akseptable avstander er rundet opp til nærmeste heltall. Dette gjelder fremst ved brannbelastninger over 150 MJ/m², hvor de fleste avstandene har blitt økt i størrelsesorden 0,5 m. Dette fordi at tabellen skal være sikker, selv ved ekstremt høye brannbelastninger.

Branntemperaturene har blitt beregnet med brannbelastning opp mot 500 MJ/m² og det ble vist at brannforløpet ikke ble veldig forskjellig. Brannen var fortsatt ventilasjonskontrollert, men brann en lenger tid. Dette vil stemme godt med observerte branner med høy brannbelastning. Branner i syntetiske stoffer, petroleumsprodukter og hydrokarboner vil gi høyere temperaturer, men ikke betydelig høyere enn de brukt for å få frem Tabell 4.2.

4.7.3. Usikkerhet

Temperaturene i brannrommet er beregnet med fire forskjellige metoder. Disse gir ikke samme svar, men viser i hvilke områder temperaturene omtrent bør ligge. Dette estimat har siden sammen med vindusarealet fra åpningsfaktoren gitt innfallende stråling til det mottagende vinduet. Termisk treghet har blitt brukt med en anerkjent konservativ verdi på $1000 \text{ J/m}^2 \text{ s}^{1/2} \text{ K}$. Lavere verdier på denne vil drastisk høye temperaturene til brannen.

Åpningsfaktoren har blitt brukt i de tre siste beregningsverktøyene. Den varierer med størrelsen på åpningen og omhyllingsarealet. Figur 4.3 viser hvordan disse to varierer ved forskjellige åpningsfaktorer for kvadratiske vinduer. Usikkerhet er knyttet til hvis samme brannforløp vil kunne oppstå i et lite rom med liten vindusåpning som i et stort rom med stor åpning. Fordi ingen av metodene tar hensyn til dette kan det antas at dette motsvarer virkelige forhold, men det vil være ønskelig å utdype denne korrelasjon i videre forsøk. Det minste omhyllingsarealet som er relevant å se på er 60 m^2 som fås i et rom med en lengde og bredde på 3,5 meter.



Figur 4.3 Korrelasjon mellom omhyllingsareal og vindusåpning for kvadratisk vindu

5. Øvrige forhold

5.1. Flammer gjennom vindusåpning

5.1.1. Generelt

En brann bryter nesten alltid ut gjennom vinduene i fasaden. Hvis fasaden består av brennbare materialer kan den komme til å delta i brannen. Det er i forsøk observert at flammer ut smale vinduer har en sterk tendens til å strekke seg lengre ut enn ved brede vinduer hvor de i større grad legger seg langs med veggen. Det er også et skille mellom brenselskontrollerte og ventilasjonskontrollerte branner. Ved ventilasjonskontrollerte branner har flammene en klar tendens til å strekke seg lengre ut av vinduene grunnet mangel på luft i forbrenningen.

Det er ikke alltid sikkert at fasaden tar fyr. Ytterveggene pleier å være noe motstandskraftige til brann grunnet krav på varmeisolering. Det stilles i de norske lovverkene krav til at den ytterste kledningen på bygg over tre etasjer (BKL 2 og 3) skal være begrenset brennbar (klasse Ut 1). I tillegg må temperaturene bli høye nok, og vær og vind kan ytterligere påvirke brannspredningen. I Kapittel 5.1.2. antas det at fasaden er lagt av et brennbart materiale.

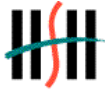
5.1.2. Flammehøyde

Høyden til en flamme påvirker hvor mye av fasaden som kan ventes brenne. Når denne antennes blir arealet på den strålende flaten noe større en ellers. Thomas Law har observert hvordan flammens høyde varierer med vindusåpningen, beskrevet i Ekvasjon (5.1) ⁷.

Denne metoden gjelder for branner i tre eller lignende materialer. Rom hvor brannbelastninger til stor del er plast eller petroleumsprodukter kan forvente å få høyere flammer grunnet større røykproduksjon. Det forutsettes at alt brensel er forbrent inne i rommet. Metoden er kun gyldig ved vindstille forhold. Toppen på flammen er satt til den punkt hvor temperaturen er 550 °C.

$$z = 12,8(m / B)^{2/3} - H \quad (5.1)$$

hvor: z	=	flammens høyde fra overkant på vinduet [m]
B	=	vindusåpningens bredde [m]
H	=	vindusåpningens høyde [m]
m	=	$M / 1200$, forbrenningshastighet for ekvivalent tremengde [kg/s]
M	=	mengden materiale som blir forbrent i løpet av 20 minutter [kg]



Resultatene viser at høye og smale vinduer vil gi store flammer ut fra vinduet som enkelt kan bli opp mot fire til fem meter høye. For høye brannbelastninger gis flammehøyder opp mot ti til femten meter, noe som ikke stemmer overens med virkelige forsøk. For øvrig anses metoden å gi noenlunde realistiske verdier for normale forhold. Maksimal flammehøyde vil normalt omtrent motsvare høyden på vinduet, noe som er allment akseptert. Ved større vinduer vil da flammene strekke seg cirka halvannen til to meter opp. Den strålende flaten vil da ikke bli merkbart

større. Den vil i tillegg ikke ha samme høye temperatur som i brannrommet, men vil som mest nå 600 °C. Beregninger viser at strålingsøkningen vil gi en økt avstand med som mest en halv meter. Det finnes ikke noen anledning å forandre de avstandene gitt ved Tabell 3.4 eller Tabell 4.2 grunnet denne ekstra strålingsflate. Det vil isteden være aktuelt å se på hvordan disse flammene vil påvirke brannspredning oppover fasaden. Dette er et forhold som ikke direkte påvirker brannspredningen mellom vinduer i innvendig hjørne og vil derfor ikke drøftes mer i denne oppgaven.

5.1.3. Flammelengde

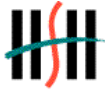
Beregninger for flammelengder skal gjøres for å få en minste avstand mellom vinduer for å unngå brannspredning. Flammer kan slå ut gjennom vinduet og antenne brennbart materiale i det andre rommet, hvis det er åpent. Tynne materialer som for eksempel gardiner vil lett antennes av direkte påkjønning fra flammer. Thomas Law har også fått frem ett uttrykk for lengden til flammen som funksjon av vindusåpningen, se Ekvasjon (5.2) ⁷.

$$x = 0,454 / n^{0,53} \times H \quad (5.2)$$

hvor: x	=	avstand fra fasade til toppen på flammen [m]
n	=	$2B / H$, vinduets formfaktor [-]
B	=	vindusåpningens bredde [m]
H	=	vindusåpningens høyde [m]

Ved høye åpninger fås flammer som nesten når en meter i lengde. Denne er rettet normalt på vinduet, men vil ved sterke vindforhold kunne strekke seg til sidene. Dette kan også lede til at flammen blir noe lengre. Avstanden er oftest ikke i nivå med vinduet, uten ett par meter ovenfor denne.

Det finnes en mer avansert beregningsmetode i Eurocode 1. Den krever mye detaljert inndata og gir i gjengjeld antatt mer nøyaktige resultater. På bakgrunn att metoden er så krevende blir den uegnet å bruke for å gjøre generelle vurderinger av flammelengder. Den bør isteden brukes som et verktøy for detaljprosjektering. En inngående forklaring av beregningsmetoden finnes i Annex C i Eurocode 1 ¹⁰.



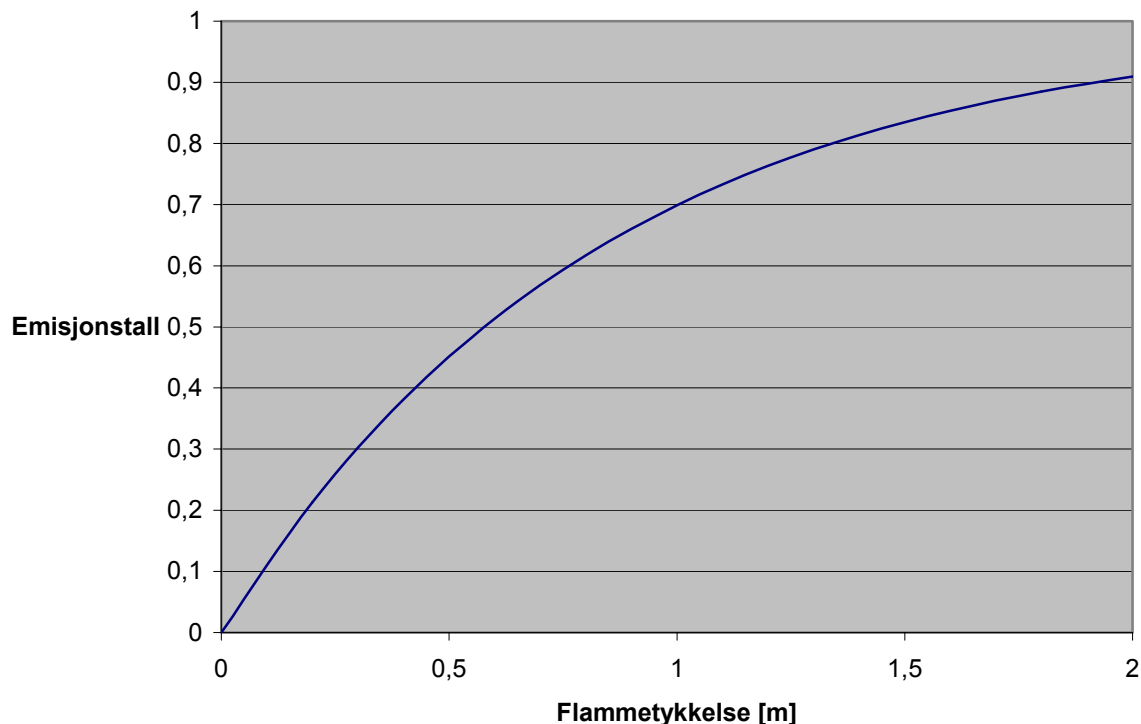
Det har i Microsoft Excel blitt utført noen beregninger for hvilke flammelengder en kan forvente ved bruk av metoden i Eurocode 1. Den viser at flammer vil kunne strekke seg opp til en meter fra vinduet og kan ved vind blir noe lengre. Det meste av røykgassene vil følge fasaden oppover og påvirke etasjene over. Temperaturene varierer mellom 400 til 700 grader avhengig av brannbelastning og størrelse på vindu. Hvis det er flere vinduer i rommet vil flammehøyden og flammelengden rask bli mindre.

Det er allment akseptert at en avstand mellom vinduer vertikalt som motsvarer vinduets høyde er tilstrekkelig for å forhindre brannspredning. Grunnet oppdrift vil den meste av flammen være rettet oppover, slik at en tilstrekkelig avstand mellom horisontalt plasserte vinduer ikke kan overstige den vertikale, spesielt ikke 45° fra normalen. Dette sammen med resultatene for beregning av flammelengde i dette kapitel gjør at det antas at tilstrekkelig sikkerhetsavstand grunnet direkte flammepåkjønning mellom vinduer i innvendig hjørne motsvarer vinduets høyde. Dette forhold vil bli tatt rede for i den slutlige tabellen som vill settes opp i Kapittel 6 – Resultater.

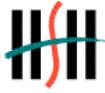
5.2. Vind

Vind er en faktor som kan øke faren for brannspredning i eller mellom fasader. Vind er et uforutsigbart fenomen og det er vanskelig å forutsi hvilke rolle det kan spille i et brannforløp. Vindretning og styrke på vinden er momenter som begge kan være positive og negative. Ved sterk stråling kan materialer varmes opp til grensen for selvantennelse, men materialer vil kunne pilotantennes ved en tidligere fase. Ved vind kan brennbare partikler lettere transporteres gjennom luften og fungere som pilotflammer på allerede strålingsutsatte områder. Såkalte flyvebranner kan også føre til direkte antennelse av materialer som ikke har vært utsatt for stråling. Avhengig av vindretningen vil også flammene kunne bli liggende tettere inntil fasaden. Dette kan bli et problem der det er brennbare fasader.

Når flammene slår ut gjennom et vindu kan vinden påvirke flammelengden og oppførselen til flammene. Når flammene blir lenger vil de også bli tynnere. Formen vil variere men flammene maksimalt kunne bli en halv meter tykk. Dette gir at emissiviteten blir lav og avgir derfor ikke mer stråling enn ellers. Hvordan emisjonstallet varierer med flammetykkelsen vises i Figur 5.1. Effekten av vind har allerede blitt tatt opp ved beregning av flammelengde med Eurocode 1. Fordi strålingsberegningene ikke varierer med vind kan det anses at dette forhold er gjort rede for.



Figur 5.1 *Emisjonstall som funksjon av flammetykkelse*



5.3. Vinduer med brannmotstand

5.3.1. Generelt

Glass er ubrennbart og et vindu vil i utgangspunktet kunne beskytte mot flammer og røykspredning, men disse egenskapene er begrenset ved bruk av vanlig glass. Det er ikke glasset alene som bestemmer hvor motstandsdyktig det er ved brannpåkjenning. Det er viktig å se på glasskonstruksjonen som en helhet, og da spiller også rammekonstruksjonen og monteringsmåte inn. Det er viktig at vinduene monteres riktig med hensyn til isolasjon, tetthet og støtsikkerhet. Vanlig glass går i stykker ved 150- 300 °C.

Det er utviklet forskjellige typer vindu med brannmotstand. Disse³ er delt i to aktuelle klasser, klasse E, og klasse EI. Etter klassebenevnningen vil det stå ett tall, henholdsvis 15, 30, 60 som sier noe om hvor lenge vinduet vil beholde sine egenskaper ved brannpåkjenning.

5.3.2. Klasse E

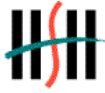
Materialer i denne brannklasse skal forhindre spredning av flammer og branngasser, men oppfyller ikke kravet til beskyttelse mot varmestråling. Eksempel på glasstyper som oppfyller disse krav er trådglass, glassbyggestein og gjennomsiktig brannglass.

I trådglass er det montert inn ståltråder som vil forhindre at det går i stykker på samme måte som vanlig glass ved en brann. Dette vil kunne gi en brannmotstandstid opp mot 45 minutter. Trådglass er følsomt for temperaturforandringer og bør ikke brukes i fasader grunnet den forskjellen som kan oppstå mellom sol og skygge på overflaten.

Glassbyggestein har større brannmotstandstider enn trådglasskonstruksjoner. De er utformet som store lufttette blokker i glass. Brukbarheten for denne type glass må bedømmes fra tilfelle til tilfelle fordi store konstruksjoner kan ha problemer med vannlekkasje gjennom fuger. Glassbyggestein bør ikke bli utsatt for belastninger fra de omkringliggende konstruksjonene. Konstruksjoner bygget med denne type glass har noe lavere innslipp av lys enn ved bruk av vanlig glass.

Visse typer av brannglass er gjennomsiktige og ser ut som vanlig glass. De er trådløse og tåler spenninger fra temperaturforskjeller bedre. Utseendet til disse vil ikke forandres ved temperaturforandringer. Det er mulig å produsere gjennomsiktig brannglass opp til klasse E120.

Vinduer som oppfyller klasse E vil redusere de innfallende strålingsnivåene⁴ med 50 %. Ved bruk av vinduer i denne klasse vil det være mulig å plassere vinduene mye nærmere hverandre. Beregninger viser at avstanden da kan halveres for alle typer vinduskonfigurasjoner. Dette forhold vil bli gjort rede for i den endelige tabellen som vil settes opp i Kapittel 6 – Resultater.



5.3.3. Klasse EI

Materialer i denne klasse forhindrer spredning av flammer, branngasser og beskytter mot varmestråling. I det norske lovverket er det ruter med EI klassifisering som blir brukt for å redusere faren for brannspredning i innvendig hjørne. Det er først og fremst ugjennomsiktig brannglass som oppfyller disse kravene.

Ved temperaturøkninger ekspanderer en gel eller lamineringssjikt mellom glassene og danner et grumsete sjikt. Dette vil hjelpe til å isolere mot varmegjennomgang. Det er mulig å produsere ugjennomsiktig brannglass i klasse EI 120 eller høyere. Disse unike egenskapene ville vært å foretrekke i alle ruter der det er fare for brann. Med en pris rundt 10-15'000 kr/m² blir det svært kostbart. Ved bruk av glass i klasse EI vil det være mulig å plassere vinduene uten begrensning til avstand.

6. Resultater

Tabellen er satt opp for å raskt kunne vurdere korteste akseptable avstand mellom vinduer i innvendig 90° hjørne. For å få frem disse avstander er det tatt i bruk at emissiviteten er lik 1, det strålende vinduet holder en temperatur på 1000 °C og at akseptabel innfallende stråling på det andre vinduet er 12,5 kW/m². Disse verdier er i denne rapport vurdert som realistiske og vil gi konservative resultater. Det er vurdert at for avstander under to meter må det benyttes vinduer med brannmotstand.

Tabell 6.1 Akseptabel avstand mellom vinduer i innvendig hjørne

Areal på strålende flate	Anbefalt minste avstand	Utforming
Areal mindre enn 4 m ²	1 m	Ett vindu i klasse E30
	2 m	Uklassifisert
Areal større enn 4 m ²	1,5 m	Ett vindu i klasse E30
	3 m	Uklassifisert

7. Diskusjon

7.1. Oppsett av tabell

Tabellen er vurdert opp mot arealet på den strålende flaten og det er tatt hensyn til direkte flammespredning ut gjennom vindu. Forhold som brannbelastning, åpningsfaktor og termisk treghet er også vurdert, men er ikke inkludert i tabellen. Det har blitt lagt vekt på at den endelige tabellen skal være enkel å bruke.

Forskjellen ved bruk av vinduer med klasse E30 er at avstanden vil kunne halveres grunnet en halvering av den innfallende strålingen. Ubeskyttede vinduer må ikke plasseres på nærmere avstand en to meter grunnet risikoen for direkte flammepåkjønning. Ved å kun sikre et av vinduene i innvendig hjørne gir man en mulighet for fleksibilitet med henhold til plassering av brannceller med forskjellige behov knyttet til mulighet for å kunne åpne vinduene. Ved bruk av glass av klasse EI60 eller høyere vil det ikke være noen krav til avstand mellom vinduene.

7.2. Sikkerhetsnivå

Tabellen som er utviklet i denne rapporten avviker fra de anbefalingene som er gitt i REN, men samsvarer godt med de svenske anbefalingene. Løsninger gjort i henhold til TEK i Norge viser seg også å samsvare bra med de anbefalinger som er gitt i det svenske lovverket, og dette gir en klar indikasjon på at sikkerhetsnivået landene imellom er relativt likt.

Temperaturen ved en brann har blitt mye drøftet i oppgaven. En gjennomsnittlig temperatur i brannrommet over 1000 °C vil være uvanlig, men kan oppstå ved høye brannbelastninger og gunstige åpningsforhold. Ved brann i syntetiske stoffer og brennbare væsker vil temperaturene kunne nå 1200 °C, men det viser seg at avstandene ikke skiller seg stort tross de høye temperaturene. Ved vinduet vil temperaturene mest sannsynlig ikke overstige de i brannrommet, men vil heller være noe lavere. Tabellen innehar også en sikkerhetsmargin fordi alle akseptable avstander er rundet opp. For eksempel er det fra beregninger funnet at for en 4 m² strålende flate er 1,78 meter minste avstand, som i Tabell 6.1 er satt til to meter.

Et akseptkriterium for innfallende stråling på 12,5 kW/m² anses som konservativt. Bruk av lavere tillatt stråling vil gi økt sikkerhet. Ett akseptkriterium på 10 kW/m² gir økt avstand med cirka 20 %. Dette vil ikke gi store forandringer i forhold til de verdier som er satt nå. Når det i tillegg har blitt brukt konservative verdier på emissivitet og realistiske temperaturer bør sikkerhetsnivået være godt nok.

Når stråling møter en vindusflate i 45° vinkel vil den delvis reflekteres. Det er ikke tatt hensyn til dette i tabellen, men vil i praksis være en konservativ faktor. Hvis strålingen isteden treffer ett ikke-reflekterende materiale, for eksempel en gardin, vil mesteparten av strålingen absorberes.

For normale forhold er det allment akseptert at den største flammehøyden ut vindu omtrent vil tilsvare høyden på vinduet. Maksimal flammelengde ut fra fasaden vil ikke kunne overstige dette. Gjennom å sette minste tillatte avstand for ubeskyttet vinduer lik to meter tar en høyde for risikoen for denne typen brannspredning. For avstander mindre enn to meter blir det grunnet dette forhold anbefalt å bruke vinduer med brannmotstand. Det er i de svenske anbefalingene brukt E15 glass ved avstander mindre enn to meter, men for å være på den sikre siden vil det anbefales å bruke et vindu i klasse E30.

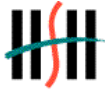
Ved bruk av E-glass vil strålingen halveres og beskytte mot direkte påvirkning fra flammer. Dette betyr at avstanden mellom vinduene kan halveres ved bruk av denne typen glass. I bygg hvor en brann vil ha særdeles store konsekvenser som for eksempel ved pleieinstitusjon vil det også kunne være en mulighet å øke egenskapene i brannmotstand til EI, men det vil måtte vurderes ved hvert enkelt tilfelle.

7.3. Usikkerhet

Den største usikkerheten er knyttet til de forskjellige beregningsmetodene som er brukt. Ved beregningene av konfigurasjonsfaktor ble en metode forkastet fordi den gav svar som stred mot de grunnleggende prinsippene for elektromagnetisk stråling. Bruk av konfigurasjonsfaktor gjennom integrasjon ga høyest verdier og var derfor begrensende. Den ble satt opp ut ifra grunnleggende geometriske forhold. Resultatene fra denne er ansett som realistiske, noe som ble bekreftet gjennom diskusjoner med Prof. Torgrim Log ved Høgskolen Stord/Haugesund.

Temperaturene i brannrommet er beregnet med fire forskjellige metoder. Disse gir ikke samme svar, men viser i hvilke områder temperaturene omtrent vil ligge. Flammer fra brann i rom vil trolig slå ut av vinduet og gi en større strålingsflate enn kun vinduet. Beregninger viser at denne ekstra strålingsflaten vil ha meget lav emissivitet, grunnet at flammen er tynn. Dette vil derfor ikke gi noen økt stråling. Bruk av strålingsflate lik vinduets areal kan derfor anses som akseptert.

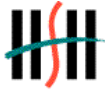
I de svenske anbefalingene er det gjort et skille mellom pleieinstitusjon og andre bygg, en vurdering gjort med hensyn til risiko. Det kan i utgangspunktet virke rimelig, men det kan stilles spørsmål ved at det er en del bygg med høy risikoklasse som vil falle utenfor. Det er valgt å ikke ta med dette forhold.



7.4. Videreføring av prosjekt

Denne rapporten er basert på teoretiske beregninger. Det er i ikke utført noen praktiske forsøk. I forbindelse med denne rapporten kunne det vært interessant å gjennomføre noen praktiske forsøk hvor aktuell stråling og temperatur for diverse avstander ble målt. Dette dreier seg om forholdsvis enkle forsøk der de to parametrene blir målt og sammenlignet med verdier vi har fått og brukt i våre beregninger. Det ville også være interessant å se nærmere på hvorfor verdiene ved bruk av Eurocode, som er en av de mest brukte metodene i Europa, gir så lave verdier i forhold til de som anses som realistiske.

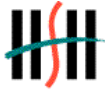
Åpningsfaktoren brukes inn i flere av beregningsmetodene for å finne temperaturen i brannrommet. Ved store rom med store vindusåpninger og små vinduer med små åpninger kan denne være lik. Det stilles spørsmål ved om disse to forskjellige rommene gir en lignende brann i virkeligheten. Å få undersøkt dette gjennom praktiske forsøk eller videre beregninger ville være interessant.



8. Konklusjon

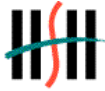
Ved beregninger basert på ulike metoder og krav i TEK kan vi i denne rapporten presentere en tabell som raskt vil kunne avgjøre hvilke avstand som er nødvendig for å sikre mot brannspredning mellom, og eller vurdere nødvendig brannmotstand til vinduer i innvendig hjørne. Tabellen er utarbeidet med hensyn til arealet på den strålende flaten. Med en tillatt akseptabel innfallende stråling på 12.5 kW/m² anses det at for alle avstander over tre meter er sikkerheten mot brannspredning ivaretatt. Ved avstander under tre meter må tabellen følges i form av avstander og krav til vinduer med brannmotstand.

Resultatene er ikke å anse som preaksepterte på grunn av at løsningene avviker fra de anbefalingene som er gitt i REN. Rapporten er gjort som en del av en treårig ingeniørutdanning og har ikke gjennomgått kvalitetssikring i den grad som kreves for at løsningene skal kunne benyttes i prosjekt der det settes krav om ansvarsrett ifølge Plan- og bygningsloven.



9. Referanser

1. *Veiledningen til teknisk forskrift til plan- og bygningslover, 2.utgave* (Statens bygningstekniske etat, 1999)
2. *Boverkets byggregler, BBR* (Boverket, Karlskrona, 2001)
3. *Byggnaders brandsäkerhet & Brandsäkerhet ved reparationsbyggande* (Miljöministeriet, Helsingfors, 1998)
4. Brandskyddslaget och Brandteknik vid LTH *Brandskyddshandboken* (Lunds tekniska högskola, Lund, 2002)
5. Carlsson, Emil *External spread to adjoining buildings* (Brandteknik - Lunds tekniska högskola, Lund, 1999).
6. Dougal Drysdale *An introduction to fire dynamics – 2nd ed.* (John Wiley & Sons Ltd., West Sussex, 1999)
7. Brandskyddslaget och Brandteknik vid LTH *Brandskydd Teori och Praktik* (Lunds tekniska högskola, Lund, 1994)
8. *Eurocode 3 – Design of steel structures (ENV 1993-1-2)* (European Committee for Standardization, 1995)
9. Frank P. Incropera, David P. DeWitt *Introduction to Heat Transfer, 3ed.* (John Wiley & Sons Ltd., New York, 1996)
10. *Eurocode 1 – Basis of design and actions on structures (ENV 1991-2-2)* (European Committee for Standardization, 1995)
11. Jan Torgil Josefsen *Kokebok for konstruksjon av brannkurver* (Haugesund, Høsten 2002)



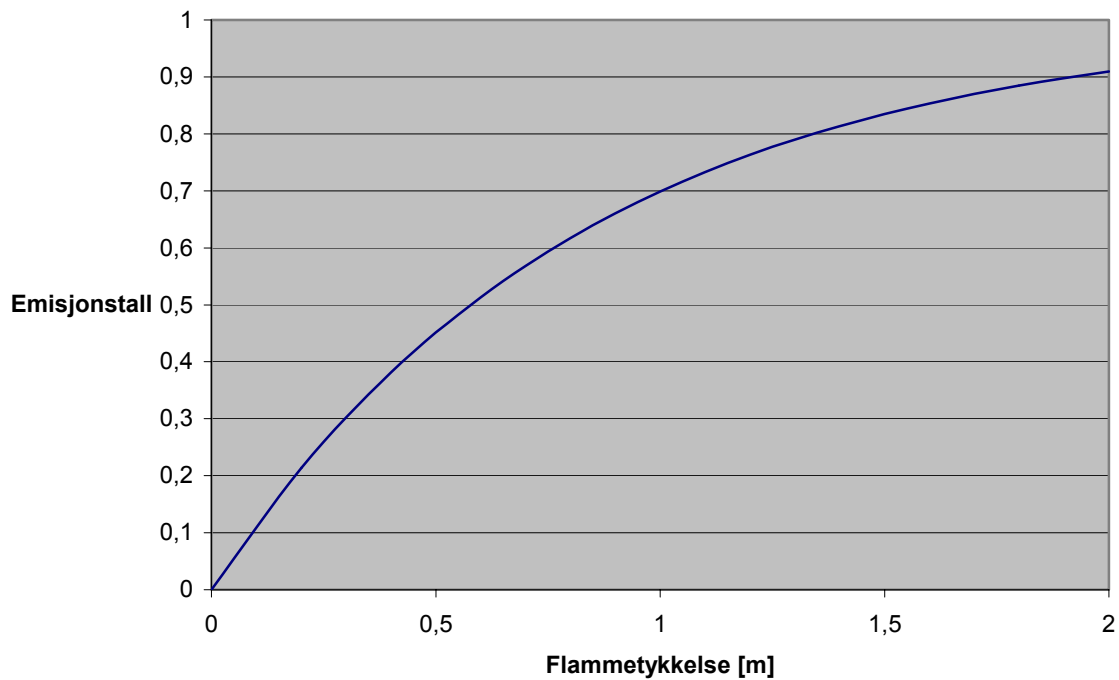
Vedlegg 1

Beregningseksempel for å finne emissiviteten til en flamme

Emissivitetsberegninger

Emisjonskonstant K 1,2 m⁻¹

Tykkelse til flamme	Emisjonstall
0	0
0,2	0,213372139
0,4	0,381216608
0,6	0,513247744
0,8	0,617107114
1	0,698805788
1,2	0,763072241
1,4	0,813626024
1,6	0,853393038
1,8	0,884674879
2	0,909282047
2,2	0,92863873
2,4	0,943865237
2,6	0,955842832
2,8	0,965264741
3	0,972676278
3,2	0,978506399
3,4	0,983092534
3,6	0,986700116
3,8	0,989537941
4	0,991770253



Vedlegg 2

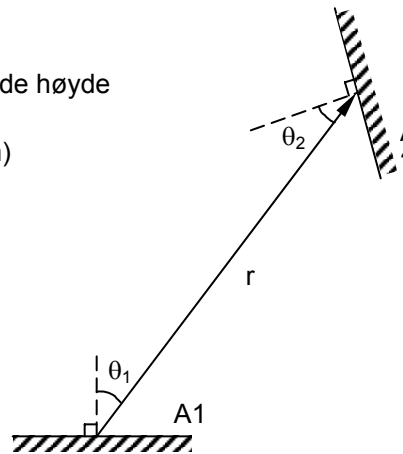
Beregningseksempel, konfigurasjonsfaktor gjennom integrasjon

Konfigurasjonsfaktor

Integrering med konstant og varierende høyde

(Jonas Lindsten og Anders Pettersen)

$$\phi = \int_0^{A_1} \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{\pi r^2} dA_1$$

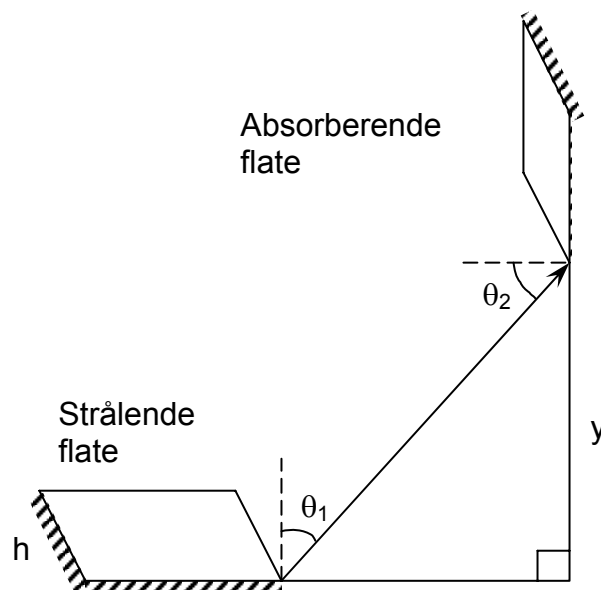


Vindushøyde	h	2	m	(Inndata)	
Vindusbredde A1	b1	1,5	m	(Inndata)	
Avstand mellom vinduer	r	1,53163098	m	(Inndata)	(Utdata)
Vinkel fra normalen, vindu A1	θ_1	45	°	(Inndata)	
Vinkel fra normalen, vindu A2	θ_2	45	°	(Utdata)	
Horizontal avstand	x	1,083	m	(Utdata)	
Vertikal avstand	y	1,083	m	(Utdata)	

Ved konstant r, v1 og v2	ϕ_{konst}	0,20353219	-	(Utdata)	Makro: Ctrl+q
--------------------------	----------------	------------	---	----------	---------------

r, v1 og v2 varierer med b1	ϕ_{var1}	0,10301004	-	(Utdata)	Makro: Ctrl+w
-----------------------------	---------------	------------	---	----------	---------------

r, v1 og v2 varierer med b1 og h	ϕ_{var2}	0,08394539	-	(Integrering)	Makro: Ctrl+e
----------------------------------	---------------	------------	---	---------------	---------------





Vedlegg 2

Beregningseksempel, konfigurasjonsfaktor gjennom integrasjon

Innfallende stråling

Drysdale

$$Q = \phi \varepsilon \sigma T_b^4$$

Konfigurasjonsfaktor (ϕ_{konst})	0,203532189	-	(Utdata)
Konfigurasjonsfaktor (ϕ_{var1})	0,103010038	-	(Utdata)
Konfigurasjonsfaktor (ϕ_{var2})	0,08394539	-	(Utdata)
Emissivitet (ε)	1	-	(Inndata)
Stefan-Boltzman (σ)	5,67E-11	kW/m ² K ⁴	(Inndata)
Temperatur (T_b)	1000	°C	(Inndata)
Tillatt innfallende stråling	12,5	kW/m ²	(Inndata)

Emittert stråling	148,90	kW/m ²	(Utdata)
Innfallende stråling (konst)	30,31	kW/m ²	(Utdata)
Innfallende stråling (variabel 1)	15,34	kW/m ²	(Utdata)
Innfallende stråling (variabel 2)	12,50	kW/m ²	(Utdata)

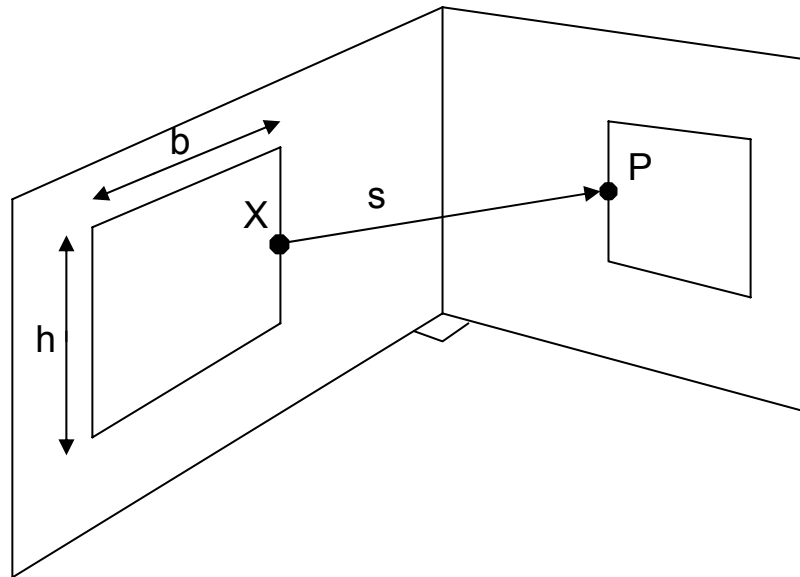
Stråling under kritisk nivå (Konstant)	NEI	(Utdata)
Stråling under kritisk nivå (Variabel 1)	NEI	(Utdata)
Stråling under kritisk nivå (Variabel 2)	JA	(Utdata)

Vedlegg 3

Beregningseksempel, konfigurasjonsfaktor ved bruk av Eurocode 3

Konfigurasjonsfaktor

Eurocode 3
Annex D



Størrelse til vindu (strålingsflate)	Høyde (h)	2	m	(Inndata)	
	Bredde (b)	1,5	m	(Inndata)	
Avstand mellom vinduene	Lengde (s)	0,68616641	m	(Inndata)	(Utdata)
Tillatt innfallende stråling	Qflux (Q)	12,5	kW/m ² s	(Inndata)	

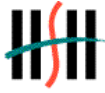
Vinkel mellom strålingsflate og mottagende flate	Vinkel	135	°	(Inndata)	
		2,355	rad	(Utdata)	
Avstand mellom flatene og innvendig hjørn	Lengde	0,5	m	(Utdata)	

Konf.faktor ved Vinkel	Høyde	Bredde	h/s	w/s	φ
Flate 1	2	1,5	2,914744854	2,18605864	0,0839486

Total φ	0,0839486	(Utdata)	Makro: Ctrl+a
---------	-----------	----------	--------------------------

Konf.faktor ved Normal	Høyde	Bredde	h/s	w/s	φ
Flate 1	2	1,5	2,914744854	2,18605864	0,2204154

Total φ	0,2204154	(Utdata)
---------	-----------	----------



Vedlegg 3

Beregningseksempel, konfigurasjonsfaktor ved bruk av Eurocode 3

Innfallende stråling

Drysdale

$$Q = \phi \epsilon \sigma T_b^4$$

Konfigurasjonsfaktor (ϕ)	0,083948595	-	(Utdata)
Emissivitet (ϵ)	1	-	(Inndata)
Stefan-Boltzman (σ)	5,67E-11	kW/m ² K ⁴	(Inndata)
Temperatur (T_b)	1000	°C	(Inndata)
Tillatt innfallende stråling	12,5	kW/m ² s	(Inndata)

Emittert stråling	148,90	kW/m ²	(Utdata)
Innfallende stråling	12,50	kW/m ²	(Utdata)

Stråling under kritisk nivå	JA	(Utdata)
-----------------------------	----	----------

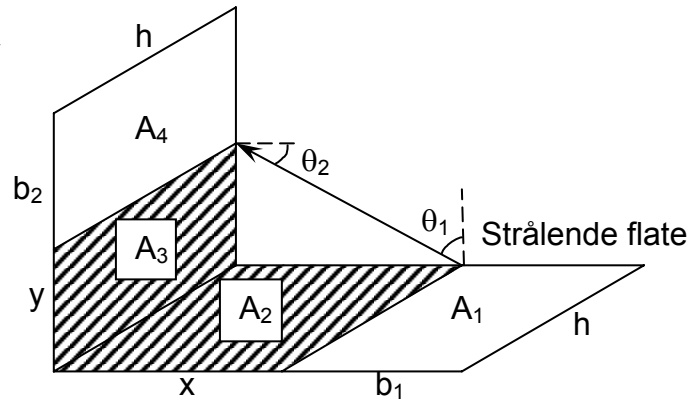
Vedlegg 4

Beregningseksempel, konfigurasjonsfaktor med Introduction to Heat Transfer

Konfigurasjonsfaktor

Absorberende flate

Introduction to Heat Transfer

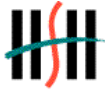


Vindushøyde	h	3	m	(Inndata)
Vindusbredde A1	b1	3	m	(Inndata)
Vindusbredde A2	b2	3	m	(Inndata)
Avstand mellom vinduer	r	4,00	m	(Inndata)
Vinkel på vindu A1	θ_1	45,0	°	(Inndata)
Vinkel på vindu A2	θ_2	45,0	°	(Utdata)
Horisontalt avstand	x	2,82843	m	(Utdata)
Vertikalt avstand	y	2,82843	m	(Utdata)

(X og Y for beregning)	X	1,94280904	-	(Utdata)
	Y	1,94280904	-	(Utdata)
Stråling (1,2) -> (3,4)	$F_{(1,2)(3,4)}$	0,15153282	-	(Utdata)
	X	0,94280904	-	(Utdata)
	Y	0,94280904	-	(Utdata)
Stråling 2 -> 3	F_{23}	0,2326998	-	(Utdata)
	X	0,94280904	-	(Utdata)
	Y	1,94280904	-	(Utdata)
Stråling (1,2) -> 3	$F_{(1,2)3}$	0,09276583	-	(Utdata)
	X	1,94280904	-	(Utdata)
	Y	0,94280904	-	(Utdata)
Stråling 2 -> (3,4)	$F_{2(3,4)}$	0,25019231	-	(Utdata)

Areal strålingsflate 1	A_1	9	m ²	(Utdata)
Areal strålingsflate 2	A_2	8,48528137	m ²	(Utdata)

Stråling 1 -> 4	F_{14}	0,09768095	-	(Utdata)	Makro: Ctrl+s
-----------------	----------	------------	---	----------	--------------------------



Vedlegg 4

Beregningseksempel, konfigurasjonsfaktor med Introduction to Heat Transfer

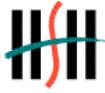
Innfallende stråling

$$Q = \phi \epsilon \sigma T_b^4$$

Konfigurasjonsfaktor (ϕ)	0,09768095	-	(Utdata)
Emissivitet (ϵ)	1	-	(Inndata)
Stefan-Boltzman (σ)	5,67E-11	kW/m ² K ⁴	(Inndata)
Temperatur (T_b)	1000	°C	(Inndata)
Tillatt innfallende stråling	12,5	kW/m ²	(Inndata)

Emittert stråling	148,90	kW/m ²	(Utdata)
Innfallende stråling	14,54	kW/m ²	(Utdata)

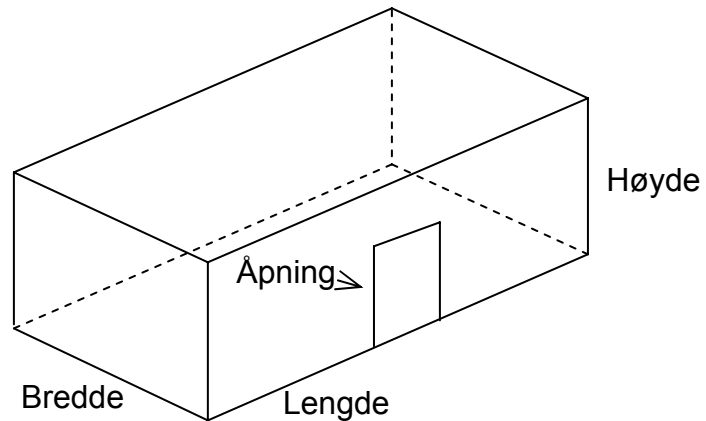
Stråling under kritisk nivå	NEI	(Utdata)
-----------------------------	-----	----------



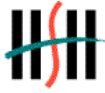
Vedlegg 6

Beregningseksempel for temperaturer i henhold til Law

Law



Høyde til rom	H	2,4 m	(Inndata)	
Bredde til rom	B	4 m	(Inndata)	
Lengde til rom	L	6 m	(Inndata)	
Høyde på vindu	h_{vindu}	2 m	(Inndata)	
Bredde på vindu	b_{vindu}	2 m	(Inndata)	
Høyde på øvrige åpninger	$h_{\text{øvrig}}$	0 m	(Inndata)	
Bredde på øvrige åpninger	$b_{\text{øvrig}}$	0 m	(Inndata)	
Vektet høyde	h	2 m	(Utdata)	
Area av vertikale åpninger	A_v	4 m ²	(Utdata)	
Totalt omhyllsareal	A_t	96 m ²	(Utdata)	
Åpningsfaktor	O	0,06148755 m ^{1/2}	(Utdata)	
Brannbelastning	$q_{t,d}$	150 MJ/m ²	(Inndata)	!
Starttemperatur	T_0	20 °C	(Inndata)	
Mengde "tre-ekivalent"	L	862,275449 kg	(Utdata)	
Maksimal temperatur	T_{max}	1088,93296		



Vedlegg 7

Beregningseksempel for temperaturer i henhold til M&T-metoden

M & T Swedish curves

Høyde til rom	H	2,4 m	(Inndata)
Bredde til rom	B	5 m	(Inndata)
Lengde til rom	L	6 m	(Inndata)
Høyde på vindu	h_{vindu}	2 m	(Inndata)
Bredde på vindu	b_{vindu}	2,5 m	(Inndata)
Høyde på øvrige åpninger	$h_{\text{øvrig}}$	0 m	(Inndata)
Bredde på øvrige åpninger	$b_{\text{øvrig}}$	0 m	(Inndata)
For andre materialer i celle	K_f	1,5 -	(Inndata)
Vektet høyde	h	2 m	(Utdata)
Area av vertikale åpninger	A_v	5 m ²	(Utdata)
Totalt omhyllesareal	A_t	112,8 m ²	(Utdata)
Åpningsfaktor	O	0,09403 m ^{1/2}	(Utdata)
Brannbelastning	q	150 MJ/m ²	(Inndata)
Modifisert brannbelastning	$q_{t,d}$	225 MJ/m ²	(Utdata)



Vedlegg 7

Beregningseksempel for temperaturer i henhold til M&T-metoden

0,171441

t (h)	225
0,05	669,6945
0,1	960,2694
0,15	962,5679
0,2	965,2171
0,25	974,5156
0,3	978,3894
0,35	973,1139
0,4	911,1979
0,45	830,7035
0,5	755,4595
0,55	671,0214
0,6	602,2137
0,65	561,1059
0,7	518,6394
0,75	483,4201
0,8	446,9613
0,85	410,1962
0,9	371,6025
0,95	333,0689
1	319,3752
1,1	290,988
1,2	264,0628
1,3	236,7947
1,4	208,3551
1,5	179,9747
1,6	156,9049
1,7	133,1555
1,8	107,9716
1,9	82,84781
2	74,53466

Makstemp 978,3894

