

Indholdsfortegnelse

8.0.0.	Introduktion.....	3
8.1.0.	Metoder til eftervisning.....	4
8.1.1.	<i>Komparative</i> analyse med udgangspunkt i de præaccepterede løsninger	4
8.1.2.	Brandteknisk dimensionering.....	4
8.1.3.	Brandprøvning (orienterende)	5
8.1.4.	Kombination af metoder	5
8.1.5.	Særligt omkring anvendelse af metoder og vurdering af resultater	5
8.2.0.	Acceptkriterier og kritiske forhold	7
8.2.1.	Kritiske forhold	7
8.2.2.	Fastsættelse af acceptkriterier for personer, som opholder sig i byggeriet.....	7
8.2.3.	Eksempler	10
8.2.4.	Fastsættelse af acceptkriterier for brandspredning mellem bygninger.....	12
8.2.5.	Fastsættelse af acceptkriterier for adskillende bygningsdele	12
8.2.6.	Fastsættelse af acceptkriterier for evakueringsberegninger.....	12
8.3.0.	Brandteknisk dimensionering af personsikkerhed.....	13
8.3.1.	Proces for brandteknisk dimensionering	13
8.3.2.	Fastlæggelse af brandscenarier, svigtscenarier og designbrand	14
8.3.3.	Håndberegninger.....	29
8.3.4.	2-zonemodeller	32
8.3.5.	Modellering med CFD.....	36
8.3.6.	Evakueringsanalyser	45
8.3.6.6.	<i>Reaktions</i>	54
8.3.7.	Vurdering af tiderne til kritiske forhold imod evakueringstiderne for grund- og svigtscenarierne og fastlæggelse af sikkerhedsmargin	64
8.4.0.	Brandteknisk dimensionering af bygningsdele	65
8.4.1.	Eftervisning af bygningsdele.....	65
8.5.0.	Komparative analyser.....	70
8.5.1.	Forudsætninger og begrænsninger for komparativ analyse.....	70
8.5.2.	Beskyttelsesformål	71
8.5.3.	Procedure for komparativ analyse	72
8.5.4.	Håndtering af usikkerhed og sensitivitet.....	81
8.6.0.	Brandprøvning (orienterende)	82
8.6.1.	Prøvning af brandmæssige egenskaber	82
8.6.1.2.	<i>Dokumentation af brandprøvning</i>	84

8.6.2.	Forsøg omkring evakuering og flugtveje	85
8.7.0.	Kombination af metoder	86
8.8.0.	Litteraturliste	87
8.8.1.	Håndberegninger	91
8.8.2.	Systemsvigtsanalyse	108
8.8.3.	Eksempel på beregning af bygningsdele	115
8.8.4.	Eksempler på komparativ analyse	119
8.8.5.	Fuld modellering af brandventilationsåbning med CFD (informativt)	145

Information til læser af kommenteringsudgave

Formålet med dette kapitel er at opstille rammerne for den brandtekniske dokumentation for byggeri i BK3 og BK4, som skal foreligge i henhold til bygningsreglementets bestemmelser.

Da risikoanalyse ikke er en beskrevet metode til eftervisning jf. BR18 er den heller ikke medtaget her. Risikoanalyser vil kunne indgå i eftervisningen af projekter i BK 4. Tilsvarende gælder for acceptkriterier baseret på toksicitet, som ikke er yderligere beskrevet, men som kan anvendes i BK4.

Vejledningen er uafhængig af specifikke programmer, så der er ikke opstillet modelspecifikke krav til f.eks. FDS eller Pathfinder.

Figurer i denne kommenteringsudgave er ikke de endelige.

Alle henvisninger/krydsreferencer er ikke opdateret og kontrolleret.

Ganghastigheder er sænket for at omfatte personer med funktionsnedsættelser.

Begrebet gangtid er i denne vejledning beskrevet, og dækker over

- Bevægelsestid, som er den tid som det tager at bevæge sig eksempelvis gennem større rum og flugtvejsgange
- Køtid, der er den tid som det tager at passere åbninger m.m. hvor der vil opstå kø

8.0.0. INTRODUKTION

Dette kapitel indeholder rammerne for udarbejdelse og kontrol af dokumentation for eftervisning af brandsikkerhed. Vejledningen kan anvendes for byggeri i brandklasse 3 og 4, når der anvendes løsninger, som ikke følger de generelle eller præ-accepterede løsninger i denne vejledning.

Metoder og designværdierne i dette kapitel, skal anvendes ved dokumentation af brandsikkerheden af byggeri i brandklasse 3. De kan også anvendes i brandklasse 4, men det er i brandklasse 4 også muligt at anvende andre metoder.

Når der i dette kapitel anvendes formuleringen ”skal” betyder det, at denne metode skal anvendes ved eftervisning af byggeri i brandklasse 3, idet det af BR18, §493, fremgår at de tekniske løsninger skal udføres i overensstemmelse med præ-accepterede løsninger, komparativ analyse med udgangspunkt i de præ-accepterede løsninger, brandteknisk dimensionering, eller ved anvendelse af en kombination af metoderne, som beskrevet i Bygningsreglementets vejledning til kapitel 5 - Brand.

Når der anvendes formuleringen ”bør” er dette en anbefaling, som skal behandles, men ikke nødvendigvis følges, når der udføres eftervisning på baggrund af dette kapitel.

Der er i dette kapitel givet en række informative beskrivelser. Når der anvendes formuleringen ”kan ikke anvendes til” betyder det, at der ikke kan udføres eftervisning af forholdet på baggrund af dette kapitel. Dette udelukker dog ikke, at metodikken kan anvendes ved byggeri i brandklasse 4, hvorfor der i nogle tilfælde er beskrevet ”informative” anbefalinger til de enkelte emner.

Eftervisning af brandforhold kan ske på forskellig vis jf. BR18 § 492. Der skal anvendes en af følgende metoder:

- Præ-accepterede løsninger, der angiver eksempler på, hvordan brandsikringen kan udføres for at opfylde bygningsreglementets brandkrav. De præ-accepterede løsninger er beskrevet i bilag 1-11 til denne vejledning.
- Komparativ analyse med udgangspunkt i de præ-accepterede løsninger der er beskrevet i afsnit 8.5.0.
- Brandteknisk dimensionering, som er beskrevet i afsnit 8.3.0 og afsnit 8.4.0 .
- Brandprøvning(er). Brandprøvninger og forsøg er beskrevet i afsnit 8.6.0.
- En kombination af de ovennævnte fire metoder, som er beskrevet i afsnit 8.7.0

Anvendelse af orienterende brandprøvning eller forsøg til eftervisning af brandsikkerhed for et byggeri i brandklasse 3, medfører at byggeriet skal henføres til brandklasse 4.

Idet BR18 ikke stiller krav til processen for udarbejdelse af den del af den brandtekniske dokumentation, som er omfattet af dette kapitel, beskriver dette kapitel heller ikke en fast proces eller fremgangsmåde, som skal følges. Det er op til bygningsejeren og dennes rådgivere, at fastlægge processen, samt i sidste ende at sikre at kravene i BR18 samt rammerne i dette kapitel overholdes.

8.1.0. Metoder til eftervisning

De metoder der kan anvendes til eftervisning af brandsikkerheden, er de metoder der er beskrevet i BR18, § 492.

Hvis der alene anvendes præ-accepterede løsninger efter *Bygningsreglementets vejledning til Kapitel 5 – Brand*, vil der ikke være behov for at foretages en eftervisning af de valgte løsninger.

Eftervisning af brandforhold kan derfor foretages som:

- Komparativ analyse med udgangspunkt i de præ-accepterede løsninger
- Brandteknisk dimensionering
- Brandprøvning(er), orienterende

Derudover kan der anvendes en kombination af metoderne herunder også de præ-accepterede løsninger.

Eftervisningen kan derfor foretages for det samlede byggeri, eller for dele af byggeriet. Der kan også anvendes forskellige metoder til at eftervise enkelte dele af byggeriet.

Det bør tydeligt fremgå af den brandtekniske dokumentation hvilken metode der er anvendt i det forskellige dele af byggeriet.

8.1.1. *Komparative analyse med udgangspunkt i de præaccepterede løsninger*

Ved brug af komparative analyser, tages der udgangspunkt i en specifik præ-accepteret løsning angivet i bilag 1-11 eller de generelle løsninger i kapitel 1-7. Ved en komparativ analyse, eftervises det ved brug af vurdering, brandteknisk dimensionering eller brandprøvning, at den valgte brandtekniske løsning mindst giver samme sikkerhedsniveau, som den pågældende præ-accepterede løsning, under hensyntagen til svigtsituationer. Herigennem eftervises det, at sikkerhedsniveauet i BR18 er opfyldt. Metoden er mest velegnet, når der er få afvigelser fra de præ-accepterede løsninger og kan kun anvendes i det omfang, de præ-accepterede løsninger er dækkende for referencebyggeriet.

8.1.2. Brandteknisk dimensionering

Ved brug af brandteknisk dimensionering benyttes kvantitative og deterministiske analyser, hvor konsekvensen af en brand beregnes ud fra fastsatte scenarier ved inddragelse af sikkerhedsmarginer og følsomhedsanalyser. Ved en brandteknisk dimensionering foretages en direkte beregningsmæssig eftervisning af, at sikkerhedsniveauet i BR18 er opfyldt gennem overholdelse af acceptkriterierne.

Metoden er mest velegnet, når der er flere eller store afvigelser fra de præ-accepterede løsninger.

Hvor følsomhedsanalysen i forbindelse med konsekvensanalysen viser stor variation i brandsikkerhedsniveauet ved ændring af en eller flere af de indgående parametre, kan det være nødvendigt eller hensigtsmæssigt, at benytte probabilistiske analysemetoder. Probabilistiske analyser er ikke omfattet af denne vejledning. Der henvises til DS/INSTA 951 [2] og PD 7974-7 [3].

8.1.3. Brandprøvning (orienterende)

Ved brandprøvning dokumenteres en konkret identificeret brandteknisk løsnings egnethed ved et forsøg, der repræsenterer den løsning, der udføres i bygningen, men ikke nødvendigvis er identisk med denne. En brandprøvning vil normalt blive benyttet som supplement til de øvrige metoder til eftervisning og kan f.eks. benyttes til, at fremskaffe eller supplere øvrigt input.

Metoden er mest velegnet til eftervisning af veldefinerede afvigelser fra de præ-accepterede løsninger hvor der anvendes produkter der ikke er klassificerede jf. godkendte standarder.

Brandprøvningen kan udføres enten som standardiseret prøvning, men også som en prøvning hvor både den udførende brandrådgiver, den kontrollerende brandrådgiver og 3. partskontrollanten overværer forsøget og vurderer at de brandtekniske egenskaber for materialet svarer det funktionskrav der skal opfyldes.

Brandprøvning vil oftest blive anvendt for produkter eller materialer der ikke skal CE-mærkes.

8.1.4. Kombination af metoder

En kombination af to eller flere af de ovenfor beskrevne metoder kan anvendes for alle typer af bygninger, når alle kravene for de anvendte metoder opfyldes.

8.1.5. Særligt omkring anvendelse af metoder og vurdering af resultater

I dette kapitel er metoderne beskrevet på et overordnet plan og suppleret med eksempler. Ved anvendelse af metoderne til eftervisning af brandsikkerhedsniveauet i bygninger, vil der skulle foretages en vurdering og individuel tilpasning til den konkrete bygning.

Dette gælder særligt i forhold til de avancerede beregningsprogrammer, som løbende udvikles, og hvor vejledningens krav og intentioner derfor potentielt skal "oversættes" og indarbejdes i det pågældende beregningsprogram.

For alle metoder, der omfatter brug af beregningsprogrammer, gælder, at resultaterne alene er en numerisk tilnærmelse af virkeligheden. Resultaterne er dermed baseret på en lang række forudsætninger og tilnærmelser udover de direkte beregningsforudsætninger, der skal bruges i programmet.

Anvendte programmer skal derfor være verificerede og validerede i forhold til deres anvendelse, og der skal ske en afdækning af de væsentligste usikkerheder ved anvendelsen af beregningsprogrammet.

Ved anvendelse af alle metoder, skal gennemførelsen af analyser, beregninger og prøvninger samt anvendelsen af resultaterne herfra, alene ske ud fra et fagligt skøn og under hensyntagen til risikoen ved svigt og resultaternes følsomhed.

8.1.5.1. Verificering

Verificering omfatter en undersøgelse af at f.eks. et beregningsprogram regner matematisk korrekt, samt at det teoretiske grundlag og programmets antagelser kan godtages. Verificering foretages typisk ved gennemgang af de tekniske manualer, for de pågældende programmer, fagligt skøn og evt. kontrolberegninger.

8.1.5.2. *Validering*

Validering omfatter en undersøgelse af, at f.eks. en beregningsmodel er velegnet til den aktuelle problemstilling, dvs. at den anvendes indenfor det område modellen er kalibreret op imod. Validering undersøges typisk ved gennemgang af den tekniske dokumentation (herunder valideringsrapporter) samt publicerede forskningsartikler. I den tekniske dokumentation vil det ofte være nævnt hvis der er problemstillinger programmet ikke vil kunne anvendes til at eftervise. Validering benyttes også til vurdering af, om de beregnede resultater virker korrekte, hvilket kan ske ved fagligt skøn, kontrolberegninger eller litteraturhenvvisninger.

8.1.5.3. *Svigtanalyser*

Svigtanalyser omfatter undersøgelser af konsekvensen af fejl i funktionen af brandtekniske anlæg, bygningsdele og flugtveje.

Normalt vil det være tilstrækkeligt at svigtscenarierne omfatter ét svigt eller én ændring ad gangen. Det skal dog altid vurderes, om der er sandsynlighed for flere samtidige svigt og/eller ændringer samtidigt.

Svigt er nærmere beskrevet under afsnit 8.3.2.2 og 8.3.6.3.3.

8.1.5.4. *Følsomhedsanalyser*

Følsomhedsanalyser omfatter en undersøgelse af de forudsatte beregningsparametre og beregnede delresultater, samt deres indflydelse på resultaterne af analysen. Eksempler på følsomhedsanalyser er givet i de enkelte afsnit.

En følsomhedsanalyse belyser de inputparametre, der anvendes ved en beregning. Følsomhedsanalysen skal vise hvilke inputparametre, der kan have stor betydning for det endelige resultat.

Generelt vil en følsomhedsanalyse foretages ved at ændre på inputparametre, for at se hvor store udsving selv små ændringer kan give. Når de parametre, der kan have størst betydning, er fundet, bør de gennemføres en række beregninger eller simuleringer med forskellige værdier, både højere og lavere, så det kan vurderes om en mindre usikkerhed i inputparametre eventuelt kan have alvorlige konsekvenser.

8.2.0. Acceptkriterier og kritiske forhold

Til evaluering af beregningsresultaterne for de opstillede grund- og svigtscenarier, anvendes en række acceptkriterier, som er fastsat med udgangspunkt i:

- Direkte påvirkning fra røg i form af røggaslagets højde eller nedsat sigtbarhed for personer i flugtvejssystemer, store rum og passager
- Temperatur i flugtvejssystemer, store rum og passager
- Stråling på personer og overflader

Acceptkriterierne er opstillet med henblik på, at der ikke optræder kritiske forhold for personer i bygningen.

Der er sammenhæng mellem sigtbarhed og toksicitet. Det kan normalt antages, at ikke optræder kritiske forhold i forhold til toksicitet, når de beskrevne acceptkriterier for røggaslagets højde og sigtbarhed ikke overskrides. Toksicitet anvendes ikke som direkte acceptkriterie i dette kapitel.

Til flere af acceptkriterierne er der opstillet underkriterier, som beskrives nedenfor.

8.2.1. Kritiske forhold

Kritiske forhold betyder, at sikkerhedsniveauet ikke er tilstrækkeligt, idet en person, kan udsættes for en påvirkning, som enten direkte eller indirekte kan udgøre en fare. Der må ikke indenfor det tidsrum, hvor der pågår evakuering opstå kritiske forhold i en bygning. Dette gælder både når bygningens brandtekniske tiltag fungerer, og i tilfælde af svigt af disse. Der skal derfor være en sikkerhedsmargin, til der opstår kritiske forhold, som dog kan være mindre i svigttilfældene, end i det tilfælde, hvor alt fungerer efter hensigten.

Kritiske forhold opstår, hvis et eller flere acceptkriterier eller underkriterier overskrides indenfor det tidsrum, hvor der pågår evakuering.

8.2.2. Fastsættelse af acceptkriterier for personer, som opholder sig i byggeriet

For at evaluere, om der optræder kritiske forhold for personer, er de nedenstående acceptkriterier defineret. Der optræder kritiske forhold, hvis et acceptkriterie overskrides.

Kriterierne skal evalueres for de områder, hvor personer opholder sig samt de områder, som indgår i flugtvejssystemet, og dermed benyttes af personer under evakuering.

Tabel 8.0-1: Kriterier og underkriterier for kritiske forhold for personsikkerhed

	Acceptkriterier
Røgpåvirkning	Højde til røggaslag (z) målt fra gulv i flugtvejsareal med loftshøjden h må ikke være mindre end $1,6 \text{ m} + 0,1 \cdot h$. Højden, z, til røggaslaget må dog ikke være mindre end 2,0 m
	Sigtbarhed (optisk densitet OD), måles i højden z og må højst være: • 2,0 i rum indtil 150 m² • 1,0 i flugtvejsarealer og i rum større end 150 m² • 2,0 ved kortvarig kødannelse (højst 120 sek.), forudsat at kødannelsen er etableret tidligt i evakueringsforløbet, hvor sigtbarheden er tilstrækkelig stor (OD mindre end 1,0) til at personer kan identificere flugtvejen

Temperatur	Røggasttemperaturen må ikke overstige 80 °C målt 2 m over gulv
Varmestråling	Direkte påvirkning målt på torso og hoved 2,0 m over gulv må ved: • Længerevarende stråling ikke overstige 2,5 kW/m² • Kortvarig stråling ikke overstige 10,0 kW/m² i op til 4 sekunder • den akkumulerede påvirkning må ikke overstige 60,0 kJ/m², udover en baggrundsstråling på 1,0 kW/m²

Kritiske forhold for personer kan både opstå:

- lokalt,
- i et område af et større rum eller
- i et helt rum.

Særligt i CFD-modeller kan overskridelsens omfang og udbredelse varierer over tid i takt med, at røggaslaget fluktuerer. Målingen skal derfor foretages, som et gennemsnit over tid under hensyntagen til de kriterier, der evalueres mod og anvendelsen af resultaterne. Et løbende gennemsnit på 5-10 sekunder vil oftest være repræsentativt. I 2-zonemodeller kan målinger benyttes direkte, da fluktuationerne typisk er små og resultaterne et gennemsnit for zonerne.

8.2.2.1. *Områder tæt på branden, hvor acceptkriterier for personsikkerhed ikke anvendes*

Overskridelse af et acceptkriterie vil ofte forekomme i området tæt på branden, på et tidligere tidspunkt end overskridelsen for hele det beregnede domæne eller bygningsafsnit.

Røgen fra en brand kan f.eks. ophobes og slå ned lokalt i rum uden stor rumhøjde, uden at hele rummet er udsat for røg. Personer der ikke er i umiddelbar nærhed af branden, kan være lang tid om at opdage og reagere på en brand, mens personer tæt på branden, sandsynligt vil opdage branden og reagere hurtigere. Derfor kan det, for personer tæt på en brand, antages at de opdager og fjerner sig fra en brand, der udvikler sig truende, når følgende punkter alle er opfyldt:

- Personerne er i samme rum som branden.
- Personerne er vågne, opmærksomme og selvhjulpne.
- Persondensiteten er lav, dvs. mindre end 0,2 pers/m².
- Personerne er højst 10 m fra branden.
- Der er overskuelige oversigtsforhold i rummet.
- Der er tydelige brandkendetegn (f.eks. røg, flammer, lyde).

Opmærksomheden henledes på, at undtagelsen alene gælder evaluering af acceptkriterier for personer.

Undtagelsen kan ikke benyttes som begrundelse for at der reduceres i flugtvejspassager, eller at der ikke kan opstå kritiske forhold i rummet.

8.2.2.2. Højden til røggaslaget

Højden til røggaslaget, z , er afstanden målt fra gulv i flugtvejsarealet/rummet og op til grænselaget af røggaslaget.

Acceptkriteriet for højden, z , til røggaslaget fra gulv er:

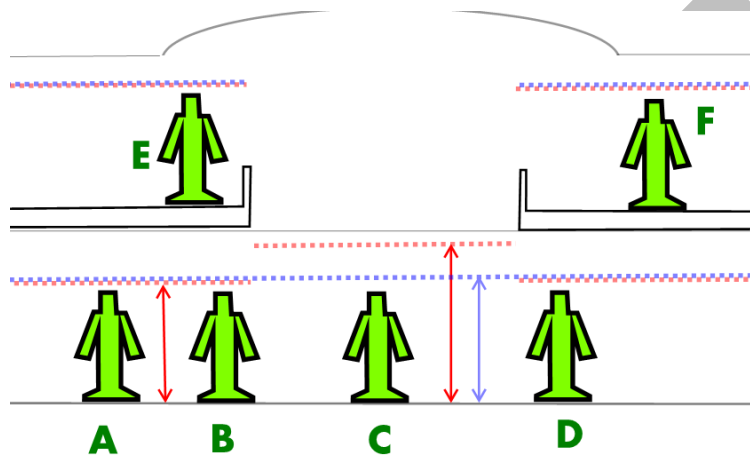
$$z \geq 1,6 \text{ m} + 0,1 \cdot h, \text{ dog skal } z \text{ være mindst } 2,0 \text{ m.}$$

Det betyder at acceptkriteriet vil være 2,0 m i rum med loftshøjder på indtil 4,0 m.

Eksempler:

I et rum med 5,0 m til loftet vil acceptkriteriet for højden til røggaslaget være 2,10 m (1,6 m + 0,50 m).

I et rum med 10,0 m til loftet vil acceptkriteriet for højden til røggaslaget være 2,6 m (1,6 m + 1,0 m).



Figur 8.0-1: Acceptkriteriet for højden til røggaslaget og sigtbarhed (rød) ligger over det niveau hvor de øvrige acceptkriterier (blå) evalueres i atrier og andre rum med stor rumhøjde.

Acceptkriteriet for højde til røggaslaget skal anvendes, når en eftervisning er baseret på håndberegninger og 2-zonemodeller. Ved anvendelse af CFD-modeller er det ofte svært at definere højden til røggaslaget entydigt, hvorfor der kan ses bort fra dette acceptkriterie, når de øvrige acceptkriterier anvendes.

8.2.2.3. Sigbarhed

Acceptkriteriet for sigtbarhed er fastsat ved en optisk densitet, som er omvendt proportional med sigtbarheden. En optisk densitet på 1,0 svarer til 10 m sigtbarhed og en optisk densitet på 2,0 svarer til 5 m sigtbarhed.

Niveauet hvor den optiske densitet beregnes, er samme højde, z , som er acceptkriteriet for røggaslagets højde over gulv.

Personer som er ved at evakuere en bygning kan opholde sig i områder med optiske densiteter på højst 1,0, i op til 120 sekunder.

Personerne skal dog samtidigt være i en kø foran f.eks. en udgang til sikkert sted og kødannelsen skal være etableret tidligt i evakueringsforløbet, hvor sigtbarheden er tilstrækkelig stor ($OD < 1,0$) til, at personer kan identificere flugtvejen.

Ved anvendelse af 2-zonemodeller vil dette kriterie normalt først komme i brug, efter at der er opstået kritiske forhold ift. højde til røggaslaget.

Sigtbarheden kan evalueres efter to metoder i en CFD-model.

I den første metode, som giver den største sikkerhedsmargin, evalueres sigtbarheden direkte i et plan svarende til acceptkriteriet for røggaslagets højde over gulv, z , i flugtvejsarealet og en overskridelse af den optiske densitet, betragtes som kritiske forhold. I CFD-modeller vil der opstå områder med lav sigtbarhed, hvis røgen slår ned f.eks. ved endevægge eller røgskærme. Det må derfor manuelt vurderes, om udstrækningen af området i kombination med sigtbarheden i de berørte beregningsceller medfører, at acceptkriteriet for optisk densitet overskrides.

I den anden metode beregnes den faktiske akkumulerede optiske densitet målt fra f.eks. vægge eller flugtvejsskilte og til ethvert punkt i flugtvejsarealet. Hermed findes et direkte mål for, om acceptkriteriet for optisk densitet overskrides.

Beregningen af den optiske densitet kan principielt ske på baggrund af både passive flader (f.eks. vægge) og aktive flader (f.eks. gennemlyste flugtvejsskilte) forudsat, at de sidstnævnte er synlige i hele den del af flugtvejsarealet, som beregningen foretages for. Ved beregning baseret på aktive flader, skal det sikres at flugtvejsbelysningen i praksis kan ses i hele den del af flugtvejsarealet beregningen foretages for, og det skal ske under hensyn til øvrige installationer, dekorationer mm.

8.2.2.4. *Temperatur*

Acceptkriteriet for temperatur evalueres i forhold til personsikkerhed i en højde af 2,0 m over gulv.

Ved anvendelse af CFD-modeller kan dette ske ved, at der indlægges et vandret plan eller en isosurface med acceptkriteriet som grænseværdi.

Ved anvendelse af 2-zonemodeller vil kriteriet normalt først komme i brug, efter at der er opstået kritiske forhold ift. højde til røggaslaget.

8.2.2.5. *Varmestråling*

Evalueret af om acceptkriteriet for varmemestråling er overholdt kræver typisk, at der kan måles på et objekt i beregningsmodellen.

I en CFD-model kan målingen f.eks. foretages ved indsættelse af elementer, som modsvare hoved og torso relevante steder i flugtvejssystemet.

For 2-zonemodeller kan der omregnes manuelt fra målinger på gulv, hvis der ikke kan måles i den rigtige højde direkte i modellen.

8.2.3. *Eksempler*

8.2.3.1. *Eksempel på beregning af akkumuleret strålingspåvirkning*

En person flygter gennem en flugtvej med et varmt røggaslag under loftet, og skal undervejs passere en åbning mod det brandramte rum. Varmestrålingen fra røggaslaget har en intensitet på $2,5 \text{ kW/m}^2$ i hovedhøjde, og strålingen gennem åbningen har en intensitet på $8,0 \text{ kW/m}^2$ på personen. Personen bevæger sig i alt i 30 sekunder gennem området og heraf 3 sekunder foran åbningen.

Den akkumulerede effekt kan dermed beregnes som:

$$\text{Strålingsbidrag fra røggaslag} : 30 \text{ s} + (2,5 - 1,0) \text{ kW/m}^2 = 45 \text{ kJ/m}^2$$

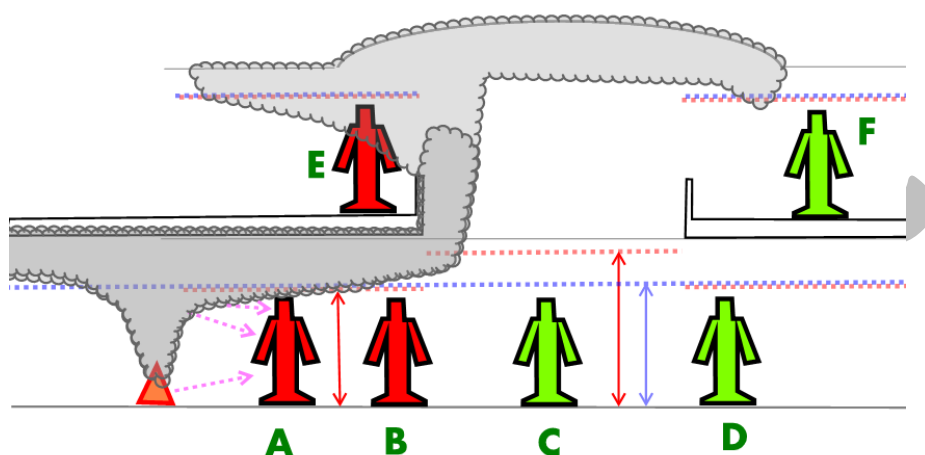
Strålingsbidrag fra åbning : $30 \text{ s} + 8,0 \text{ kW/m}^2 = 24 \text{ kJ/m}^2$

Det samlede strålingsbidrag er : $45 \text{ kJ/m}^2 + 24 \text{ kJ/m}^2 = 69 \text{ kJ/m}^2$

Da det samlede strålingsbidrag er større end 60 kJ/m^2 opstår der kritiske forhold.

Eksempel på evaluering af acceptkriterier

Baseret på en CFD-model modelleres en brand i stueplan i et indkøbscenter, hvor der sker røgspredning til et dobbelthøjt område.



Figur 8.0-2: Lodret snit i indkøbscenter med seks områder, som evalueres i forhold til acceptkriterierne

Nedenfor evalueres der i forhold til acceptkriterierne for de seks områder A-F. Evalueringen sker ud fra de opstillede acceptkriterier. Der er i dette eksempel ikke foretaget beregninger, og evalueringen sker på baggrund af figur 8.0-2. Evalueringen er både vist i Tabel 8.0-2: Evaluering af kriterier for kritiske forhold for personer i seks områder og efterfølgende beskrevet.

Tabel 8.0-2: Evaluering af kriterier for kritiske forhold for personer i seks områder

Acceptkriterie	Acceptkriterie overskredet					
Område	A	B	C	D	E	F
Røgpåvirkning (Optisk densitet)	Ja	Ja	(Nej)	Nej	Ja	(Nej)
Temperatur	Ja	Ja	Nej	Nej	Nej	Nej
Varmestråling	Ja	Nej	Nej	Nej	Nej	Nej
Kritiske forhold opstået	Ja	Ja	Nej	Nej	Ja	Nej

For område A optræder der kritiske forhold, idet alle acceptkriterier overskrides. Sikkerhedsniveauet er ikke tilstrækkeligt, med mindre personen er så tæt på branden, at de falder ind under undtagelsen beskrevet i afsnit 8.2.2.1 ovenfor.

For område B optræder der kritiske forhold, idet sigtbarheden er for lav og temperaturen for høj målt 2,0 m over gulv.

For område C optræder der ikke kritiske forhold, fordi personer kan evakuere udenom det lille område, hvor røgen passerer op mod balkonen på 1. sal.

For område D overskrides ingen acceptkriterier.

For område E optræder der kritiske forhold, idet sigtbarheden er for lav målt 2 m over gulv på balkonen.

For område F optræder der ikke kritiske forhold, fordi personer kan evakuere udenom det lille område, hvor røgen slår ned.

8.2.4. Fastsættelse af acceptkriterier for brandspredning mellem bygninger

Acceptkriterier for brandspredning mellem bygninger er, at den indgående varmestråling ikke må overstige 15 kW/m^2 indenfor de første 30 minutter regnet fra brandens opståen. Som strålingskilde skal der regnes med en fuldt udviklet brand i byggeriet. Herved udsættes tilstødende bygninger for stråling gennem åbninger og flammer fra uforbrændte gasser, som beskrevet i DS/EN 1991-1-2 [4].

8.2.5. Fastsættelse af acceptkriterier for adskillende bygningsdele

Acceptkriterier for temperaturstigning ved beregning af adskillende bygningsdeles isoleringsevne, er beskrevet under afsnit 8.4.0.

8.2.6. Fastsættelse af acceptkriterier for evakueringsberegninger

For at sikre sig at personer der opholder sig i bygningen, ikke oplever at det tager for lang tid at forlade et byggeri, er der fastsat et supplerende acceptkriterie for den maksimale evakueringstid. Dette acceptkriterie er fastsat til 8 min.

Gangtiden måles fra personerne påbegynder evakuering til de har passeret den sidste dimensionerende flaskehals, og er i et naturligt flow på vej mod den sidste udgang til det fri. Acceptkriteriet er beskrevet under afsnit 8.3.6.

8.3.0. Brandteknisk dimensionering af personsikkerhed

Brandteknisk dimensionering omfatter brug af deterministiske beregningsmetoder, hvor en specifik parameter beregnes, med henblik på sammenligning med acceptkriterier eller en parameter f.eks. tiden, der også er beregnet.

Det beregningsprogrammetoden skal baseres på, skal være valideret til formålet, og der vil ofte skulle foretages indledende følsomhedsanalyser for, at fastlægge en række parametre og beregningsforudsætninger.

Ofte analyseres evakueringstiden beregnet med et beregningsprogram, og tiden til kritiske forhold, beregnes med et andet beregningsprogram. Analysen baseres på en række sandsynlige brand- og evakueringsscenarier (grundscenarier), samt scenarier, hvor der sker svigt eller ændringer i de brandtekniske tiltag og flugtveje (svigtscenarier).

8.3.1. Proces for brandteknisk dimensionering

Processen for brandteknisk dimensionering er i praksis ofte iterativ og det vil ofte være nødvendigt at ændre i designet af byggeriet, eksempelvis brandbelastning, personbelastning, antal og bredde på døre m.v.

Da beregningerne ikke altid er afhængige af hinanden vil beregningerne for eksempelvis brand- og røgspredning kunne udføres parallelt med evakueringsberegningerne.

Processen i den brandtekniske dimensionering kan ofte udføres beskrevet i nedenstående punktopstilling. Listen er ikke nødvendigvis udtømmende, ligesom det i mange tilfælde ikke vil være nødvendigt at gennemgå alle punkterne:

1. Formål med brandtekniske dimensionering
2. Fastlæggelse af acceptkriterier, som er beskrevet i afsnit 8.2.0.
3. Definition af brandscenarier og designbrande, som er beskrevet i afsnit 8.3.2.1 og 8.3.2.3.
4. Definition af svigtscenarier og gennemførelse af systemsvigtanalyse som beskrevet i afsnit 8.3.2.2.
5. Valg af beregningsmetode til bestemmelse af tiden til kritisk forhold (t_{krit}) eller dimensionering af brandtekniske tiltag. Hertil verificering af metodens egnethed som beskrevet i afsnit 8.3.3, 8.3.5 og 8.4.0.
6. Opsætning af model inkl. gennemførelse af indledende følsomhedsanalyser for fastlæggelse af beregningsparametre
7. Beregning af tider til kritiske forhold (t_{krit})
8. dimensionering af brandtekniske tiltag
9. Validering af resultater inkl. gennemførelse af følsomhedsanalyser for vurdering af resultater for brand- og røgspredning (t_{krit})
10. Definition af evakueringsscenarier og tilhørende svigtscenarier i afsnit 8.3.2 og 8.3.6.
11. Valg af beregningsmetode til bestemmelse af evakueringstiden (t_{evak}) som beskrevet i afsnit 8.3.6.

12. Opsætning af model inkl. gennemførelse af indledende følsomhedsanalyser for fastlæggelse af beregningsparametre
13. Beregning af evakueringstider (t_{evak})
14. Validering af resultater inkl. gennemførelse af følsomhedsanalyser for vurdering af resultater for evakuering (t_{evak})
15. Tiderne til kritiske forhold vurderes i forhold til evakueringstiderne for grund- og svigtscenarierne som beskrevet i afsnit 8.3.78.3.7.
16. Kontrol af den brandtekniske dimensionering
17. Dokumentation af den brandtekniske dimensionering og brandsikkerhedstiltagenes udformning

Verificering af den brandtekniske dimensionering omfatter beskrivelse af de ovenstående punkter i processen for brandteknisk dimensionering. Undtaget er dog:

- verificering af metodernes egnethed,
- de indledende følsomhedsanalyser,
- validering af resultater og
- kontrol af den brandtekniske dokumentation.

I de følgende afsnit for de enkelte metoder er der givet en nærmere beskrivelse af udvalgte emner, der skal indgå i eftervisningen.

8.3.2. Fastlæggelse af brandscenarier, svigtscenarier og designbrand

8.3.2.1. Fastlæggelse af brandscenarier

For at eftervise brandsikkerheden i et bygningsafsnit, skal det sikres, at funktionskravene i BR18 opfyldes for hele bygningsafsnittet inkl. dets flugtveje. Dette betyder, at det skal eftervises, at bygningsafsnittet er sikkert uanset, hvor en brand opstår.

Principielt skal der derfor foretages eftervisning for alle potentielle placeringer af brande, men dette er i praksis ikke muligt. Der defineres derfor typisk en række brandscenarier, som hver især dækker en eller flere sandsynlige brande i et bygningsafsnit. Et brandscenarie er en beskrivelse af en brands placering, opståen, størrelse og tilvækst i et bygningsafsnit under hensyntagen til de brandtekniske tiltag, som kan påvirke branden.

I praksis benyttes designbrande til at repræsentere de sandsynlige brande, frem for en detaljeret fastlæggelse af omfang af brandbart materiale og tændkilder. Designbrande er beskrevet under afsnit 8.3.2.3.

Ved fastlæggelse af brandscenarierne, vælges disse konservativt i forhold til de acceptkriterier, der skal dokumenteres. Herved kan et brandscenarie dække flere potentielle brande, når det udgør den mindst gunstige kombination i forhold til de parametre, der skal evalueres på. Det kan være nødvendigt, at foretage følsomhedsanalyser for, at fastlægge hvilket scenarie, der er mindst gunstigt.

Ved definitionen af brandscenarierne, skal der mindst foretages en vurdering af:

- Hvilke parametre, der søges eftervist med brandscenariet f.eks. til sammenligning med acceptkriterier
- Brandens placering og hvilke områder scenariet er repræsentative for
- Brandtilvæksten og produktion af røggasser
- Brandtekniske installationer, som påvirker branden
- Ventilationsforhold
- De geometriske afgrænsninger omkring branden, herunder åbninger i bygningsdele

Eksempler på dette er:

- I en række sportshaller skal brandventilationen dimensioneres af hensyn til højden til røggaslaget (personsikkerhed). Sportshallerne er en række selvstændige brandceller på 1.000-1.500 m², med tilnærmelsesvist samme indretning, brandbelastning, loftshøjde og ventilationsforhold. Branden defineres som beskrevet i afsnit 8.3.2.3.

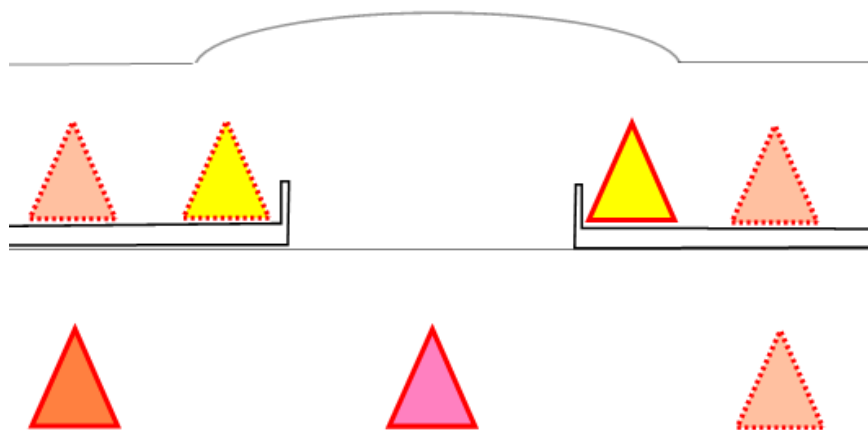
Som grundscenarie vælges det at tage udgangspunkt i det rum, hvor voluminet er mindst og røgfylldningen dermed vil ske hurtigst. Dimensioneringen vil dermed også være gyldig for de større rum, når grundscenariets forudsætninger til brandventilationsanlægget inkl. erstatningsluft er overholdt.

Hvis temperaturen i røggaslaget skal beregnes iht. brandventilationens komponenter, kan dette principielt også ske ud fra det ene valgte grundscenarie, da temperaturen vil være højere i det mindste rum end i de større.

- I et butikscenter skal brandventilationen dimensioneres af hensyn til højden til røggaslaget (personsikkerhed) i og omkring et atrium. En brand kan udvikle sig fra en position under et etagedæk eller i atriet. Brandbelastning og ventilationsforhold er sammenlignelige for de to positioner, mens den geometriske afgrænsning er forskellig.

Der vælges to grundscenarier, hvor det ene dækker alle positioner under etagedæk, og det andet dækker en brand i atriet. Begge brande placeres i bygningens nederste plan, hvilket giver den største røgproduktion og røgspredning. Branden defineres som beskrevet i afsnit 8.3.2.3, men aktiveringstiden for de brandtekniske installationer er forskellig for de to positioner, hvilket f.eks. kan påvirke den maksimale brandeffekt.

Hvis temperaturen i røggaslaget skal benyttes til dimensionering af en mekanisk brandventilations komponenter, vil dette kræve mindst et ekstra brandscenarie, hvor brandens position er tættere på brandventilations udsugningspunkt. Dette kunne f.eks. være i området omkring atriet, men på en position på det øverste plan, hvor brandbelastningen i dette eksempel er antaget at være lavere end i det øvrige butikscenter.



Figur 8.0-3: Placering af designbrande under etagedæk (røde), i atrium (pink) og til bestemmelse af temperaturpåvirkning af brandtekniske komponenter (gul). De stiplede positioner er dækket af den tilsvarende designbrand med samme farve.

Ved analyser af temperaturpåvirkning af de brandtekniske installationer, skal der både foretages en undersøgelse af temperaturen i røggaslaget og flammehøjden, for at belyse risikoen for direkte flammepåvirkning, der kan medføre temperaturpåvirkninger, som lokalt er væsentligt højere.

Brandtekniske installationer, som påvirker branden, skal inddrages i fastlæggelsen af brandscenarier, dette omfatter både installationer til begrænsning af brandens udbredelse og øvrige installationer, som kan medvirke til at begrænse brand- og røgspredning. Eksempler på installationer er sprinkleranlæg og brandventilationsanlæg.

Det skal sikres, at brandscenarierne opstilles i overensstemmelse med funktionsmatrixen for aktivering af de brandtekniske installationer samt evt. interaktion fra personer i bygningen. Redningsberedskabets indsats vil normalt ikke (indsatstaktisk utraditionelt) indgå i fastlæggelsen af brandscenarierne for den tidlige fase.

På denne vis fastlægges der en række brandscenarier, som beskriver, hvor en given brand opstår, og hvordan hændelsesforløbet efterfølgende er, når alle de brandtekniske tiltag regnes at fungere efter hensigten.

For eksemplet med butikscentret ovenfor fandtes tre brandscenarier (grundscenarier):

Tabel 8.0-3: Eksempel på tre brandscenarier for butikscenter sikret med ABA, AVA og ABV

Brandscenarium (grundscenarium)	Placering	Brandbelastning	Brandtekniske installationer i funktion
1	Under dæk, i stueplan	Normal	ABA, AVA, ABV
2	I atrium, i stueplan	Normal	ABA, AVA, ABV
3	På 1. sal, til højre for atrium	Lav	ABA, AVA, ABV

8.3.2.2. Svigtscenarier

For alle brandscenarier, som er påvirket af brandtekniske installationer, skal der principielt foretages en vurdering af konsekvensen af et svigt, for hvert enkelt system. Ved brandteknisk eftervisning, vil svigtscenarierne ofte kunne udføres som en variant af grundscenariet, hvor effekten af det enkelte brandtekniske tiltag, helt eller delvist negligeres. Jo mere omfattende svigtet regnes at være, des færre svigtscenarier skal beregnes, men det vil ofte give et mere præcist risikobillede, at detaljere de betragtede svigt.

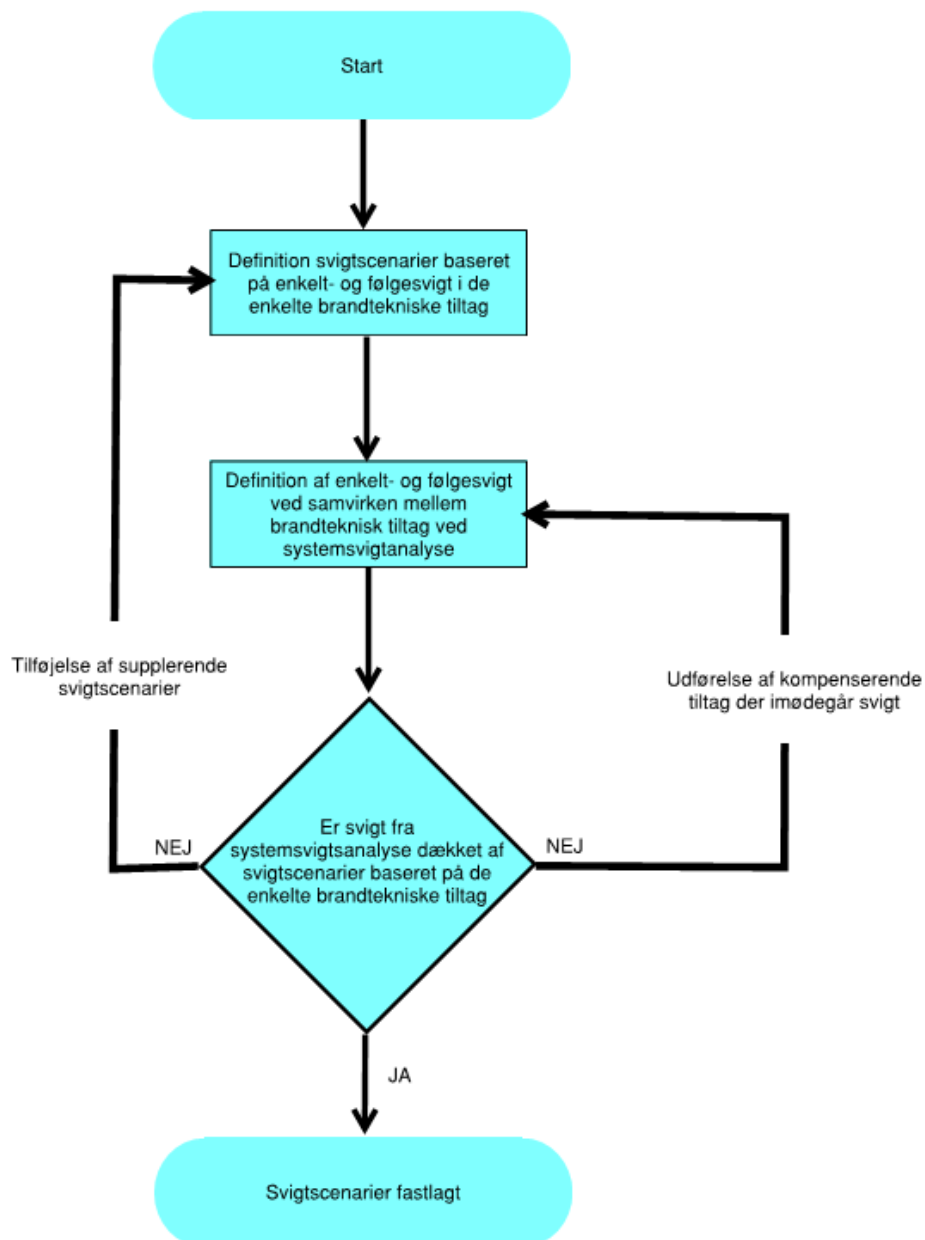
Fastlæggelse af svigtscenarier skal ske ud fra både enkelt- og følgesvigt i de enkelte brandtekniske tiltag, samt enkelt- og følgesvigt baseret på samvirken mellem de brandtekniske tiltag.

Et eksempel på et enkeltsvigt kan være afbrydelse af vandforsyningen til et sprinkleranlæg. Et eksempel på et følgesvigt i et samvirkende anlæg kan være udkobling af detektorer i ABA-anlæg, som skal aktivere atriumsprinkling. Førstnævnte svigt er et oplagt svigt af enkeltanlæg, mens følgesvigtet ikke nødvendigvis identificeres ved fastlæggelse af svigt for enkeltanlæggene ABA eller AVS.

Fastlæggelse af svigtscenarier kan ske i tre tempi:

1. Definition af svigt og følgesvigt baseret på de enkelte brandtekniske tiltag
2. Definition af svigt og følgesvigt baseret på samvirken mellem brandtekniske tiltag (systemsvigtsanalyse)
3. Fastlæggelse af svigtscenarier ud fra de definerede svigt og følgesvigt

Princippet er, at der enten tilføjes supplerende beregningsscenarier eller foretages supplerende tiltag til at imødegå svigt, hvis der identificeres svigtscenarier i systemsvigtanalysen, som ikke er identificeret eller dækket af svigtscenarierne for de enkelte brandtekniske installationer/tiltag.



Figur 8.0-4: Proces for fastlæggelse af svigtscenarier

For enkeltstående aktive brandtekniske installationer og passive brandtekniske tiltag, kan svigtscenarierne som udgangspunkt baseres på, svigt af de enkelte installationer/tiltag.

Svigt i sammenkoblede brandsikringsanlæg skal analyseres som beskrevet nedenfor i appendiks 8.8.2.

Til fastlæggelse af de nødvendige svigtscenarier, skal der udføres en analyse af svigt i:

- Brandalarmanlæg (ABA)
- Varslingsanlæg (AVA/VA)
- Sprinkleranlæg (AVS)

- Brandmæssige adskillelser og gennemføringer
- Brandklassificerede porte og døre med og uden ABDL
- Brandventilation (ABV) herunder afkast og/eller erstatningsluft
- Røgskærme (aktive og passive)
- ATA-anlæg, tryksætningsanlæg
- Elevatorer der anvendes til evakuering uden redningsberedskabets indvirkning

Der skal normalt ikke udføres en separat analyse af svigt i bl.a.:

- Røgalarmanlæg
- Røgdudluftningssystemer
- Flugtvejs- og panikbelysning
- Slangevinder
- Stigrør med og uden trykforøgeranlæg eller overvågning
- Brandmandselevatore
- Brandmandspanel
- Anlæg til sikring mod brand- og røgspredning i ventilationsanlæg (skal dokumenteres jf. DS428)

Ved fastlæggelse af svigtomfanget skal oplagte følgesvigt eller flere samtidige svigt også indtænkes. De samtidige svigt og følgesvigt kan optræde både under bygningens almindelig anvendelse og specifikt i forbindelse med en brand.

Eksempler på oplagte samtidige svigt i passive brandtekniske tiltag kan være:

- flere brandklassificerede døre uden ABDL i serie, som fastholdes i åben position f.eks. af beboere under flytning eller ikke lukkes under evakuering fra en brand
- mangelfulde brandtætninger i fortløbende adskillelser, der ikke er lukket forsvarligt efter føring af nye kabler

For de sammenkoblede aktive installationer henvises til appendiks 8.8.2 for fastlæggelse af følgesvigt. Resultatet af systemsvigtanalysen skal indgå i fastlæggelsen af svigtscenarierne, så de væsentligste svigt behandles direkte i et separat svigtscenarium eller er dækket af et andet mere omfattende svigtscenarium.

For eksempel vil et svigtscenarium baseret på svigt af et ABA-anlæg med følgesvigt i varslingsanlæg og atriumsprinkleranlæg, kunne være dækkende for svigt i de to sidstnævnte i nogle situationer.

I eksemplet med butikscentret ovenfor fandtes tre grundscenarier. Der er tre brandtekniske installationer (ABA, AVA, ABV), som principielt kan svigte for hvert grundscenarium. Det skal dermed som udgangspunkt udføres ni svigtscenarier, men i dette tilfælde vil nogle svigtscenarier være mere kritiske end andre og dermed dække flere svigtscenarier.

Tabel 8.0-4: Eksempel svigtscenarier for et butikscenter baseret på grundscenarierne

Baseret på brand-scenarium	Placering	Brand-belastning	Svigt i	Følgesvigt i	Brandtekniske installationer i funktion	Bemærkninger	Svigt-scenariue
1	Under dæk, i stueplan	Normal	ABA	AVA, ABV	-	ABA er centralt anlæg. Svigtscenarium regnes uden ABV og AVA	1A
1	Under dæk, i stueplan	Normal	AVA	-	ABA, ABV	Varsling påvirker ikke brandens udvikling. Dækket af brandscenarium 1.	-
1	Under dæk, i stueplan	Normal	ABV	-	ABA, AVA	Svigt af ABV skal specificeres nærmere	1C
2	I atrium, i stueplan	Normal	ABA	AVA, ABV	-	ABA er centralt anlæg. Svigtscenarium regnes uden ABV og AVA	2A
2	I atrium, i stueplan	Normal	AVA	-	ABA, ABV	Varsling påvirker ikke brandens udvikling. Dækket af brandscenarium 2.	-
2	I atrium, i stueplan	Normal	ABV	-	ABA, AVA	Svigt af ABV skal specificeres nærmere	2C
3	I atrium, på 1. sal	Lav	ABA	AVA, ABV	-	Brandscenarium 3 benyttes kun til dimensionering af komponenter til brandventilation. Dækket af brandscenarium 3.	-
3	I atrium, på 1. sal	Lav	AVA	-	ABA, ABV		-
3	I atrium, på 1. sal	Lav	ABV	-	ABA, AVA		-
3	I atrium, på 1. sal	Normal	-	-	ABA, AVA, ABV	Brandscenarium 3 benyttes kun til dimensionering af komponenter til brandventilation.	3A

På denne måde reduceres antallet af svigtscenarier for de brandtekniske anlæg til fire (1A, 1C, 2A, 2C). Sammen med et svigtscenarium med forhøjet brandbelastning (3A) og de tre grundscenarier (1, 2, 3) medfører dette, at det samlede antal scenarier for eftervisningen udgør otte.

8.3.2.2.1 Systemsvigtsanalyse

En systemsvigtsanalyse omfatter en systematisk gennemgang af sammenhænge og funktioner i de installationer, som indgår i brandsikringen af en bygning.

Der skal gennemføres en systemsvigtsanalyse på alle bygningsafsnit i brandklasse 3 og 4, som baseres på brandteknisk dimensionering. Analysen skal ydermere omfatte tilhørende flugtveje og øvrige bygningsafsnit som indgår i, eller kan påvirke de bygningsafsnit, som analysen omhandler, f.eks. bygningsafsnit der benyttes som sikkert sted.

Analysen indbefatter en undersøgelse af, hvilke scenarier der vil udspille sig, hvis de forskellige brandsikringsanlæg svigter, i tilfælde af brand. Analysen omfatter også en overordnet vurdering af hvad sandsynlighed og konsekvens af scenarierne er.

Systemsvigtsanalysen vil typisk blive udført af brandrådgiveren, i samarbejde med de projekterende fagingeniører og de udførende, som fastlægger anlægsopbygningen på de brandtekniske installationer.

Formålet med systemsvigtanalysen er på et kvalitativt niveau, at afdække hvilke svigt i selvstændige og sammenkoblede brandsikringssystemer, der udgør den største risiko, og derfor skal undersøges nærmere. Systemsvigtanalysen er mindre omfattende end en traditionel risikoanalyse, men er typisk mere detaljeret end en binær vurdering baseret på en enten/eller-betragtning om fuldstændigt svigt eller ikke-svigt. Gennem systemsvigtanalysen kan konsekvensen af fejl på dele af brandtekniske installationer vurderes, hvilket giver et bedre grundlag for dimensionering og dokumentation af brandtekniske installationer, samt for beskrivelse af f.eks. driftsmæssige tiltag. Analysen omfatter kun hovedkomponenter og f.eks. ikke fejl i projektering eller udførelse.

Resultatet benyttes til vurdering af, om de mest risikofyldte systemsvigt der identificeres ved systemsvigtanalysen, er dækket af de opstillede svigtscenarier som beskrevet i afsnit 8.3.2.2.

Analysens metodik kan også benyttes som udgangspunkt for en komparativ analyse, hvis brandtekniske installationer og systemer benyttes udenfor deres almindelige anvendelsesområde f.eks. i højere bygninger end forudsat i de almindeligt anvendte retningslinjer og normer.

Fremgangsmåden for systemsvigtanalysen er at:

1. beskrive den diagrammatiske anlægsopbygning og identificere typer af svigt
2. vurdere sandsynlighed og konsekvens af svigt under hensyntagen til evt. kompenserende tiltag.
3. Indarbejde evt. kompenserende tiltag i den øvrige brandtekniske dokumentation herunder typisk brandstrategi, funktionsbeskrivelse og DKV-plan

8.3.2.3. Designbrande

En designbrand er den dimensionerende brand, og udgør en kvantitativ beskrivelse af den modelbrand, der anvendes til analyse af et specifikt brandscenarie. Den dimensionerende brand repræsenteres af den effekt, som antages at kunne udvikles i det materiale/de materialer, der brænder i det rum, hvor branden er placeret.

Brandbelastning, type af brandbelastning og ventilationsforhold er nogle af de faktorer, der påvirker den dimensionerende brand. Der skal ligeledes ved fastlæggelse af den dimensionerende brand, tages hensyn til aktivering af sprinkleranlæg og brandventilationsanlæg, brandens placering, samt om dørene er åbne eller lukkede til rummet, hvor designbranden er placeret.

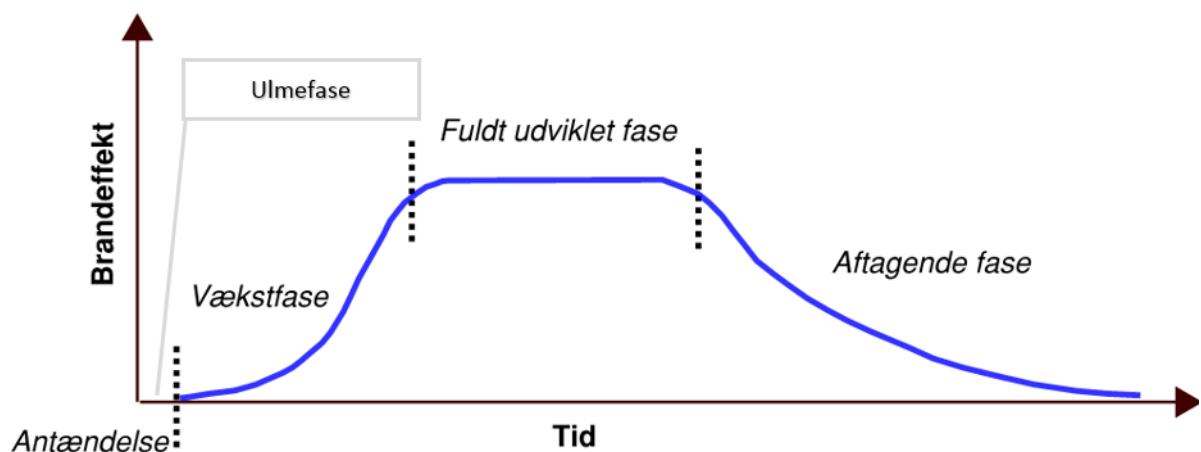
Bestemmelse af en designbrand vil være relateret til, hvilket brandkrav og brandscenarier der skal eftervises. F.eks. vil forhold relateret til flugtvejsforhold og evakuering af personer, ofte være begrænset til at undersøge perioden, indtil personer skal være ude af bygningen, evt. med et tillæg til modeltiden som beskrevet under afsnit 8.3.5. Da personer uden særlig beskyttelse, ikke kan overleve at opholde sig i et overtændt rum, vil det normalt ikke være relevant at undersøge brandforløbet længere, end til det tidspunkt hvor der sker overtænding.

Hvis designbranden fastsættes med andre værdier end beskrevet nedenfor, skal oplagets type og omfang beskrives i Drifts-, kontrol- og vedligeholdelsesplanen.

8.3.2.3.1 Brandforløb

En designbrand er delt op i et brandforløb, der som udgangspunkt indeholder en ulmefase frem mod antændelse, en vækstfase, en fuldt udviklet fase og en aftagende fase.

Ulmefasen skal ikke medregnes ifm. brandteknisk eftervisning.



Figur 8.0-5 - Illustration af et traditionelt brandforløb

Vækstfasen beskriver tid fra antændelse af første objekt, brandudvikling i første objekt og brandspredning til andre objekter frem til en stabil fase opstår, eller at der sker overtænding.

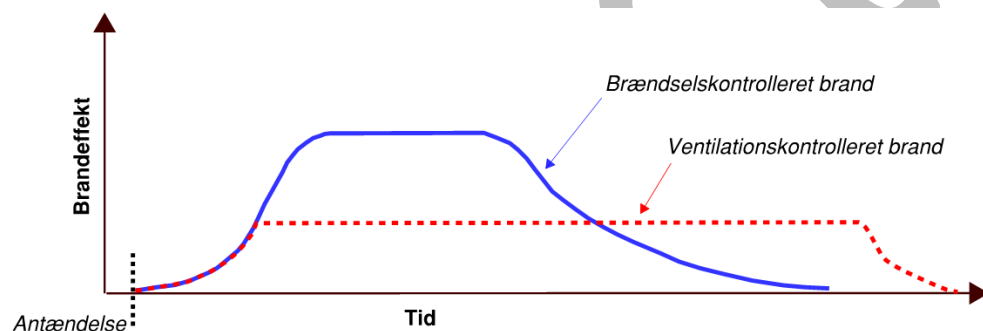
Den *fuldt udviklede brand* beskriver den fase, hvor brandens omfang stabiliseres pga. brændstoffets egenskaber og placering i rummet (brændstofkontrolleret brand), eller hvor brandens udvikling er begrænset af mulig ilttilførsel (ventilationskontrolleret brand).

Den fuldt udviklede brand omtales også som den stabile fase, da brandeffekten ikke vil forøges signifikant i denne fase. Temperaturen er derimod ikke konstant i denne fase, da temperaturen som følge af energibalancen for rummet, vil ændre sig afhængig af varmetabet fra rummet.

Den ventilationskontrollerede brand er defineret på baggrund af ilttilførslen til rummet. En begrænsning af tilførsel af ilt til et rum vil betyde at brandeffekten begrænses.

Ventilationskontrollerede brande har, på grund af en mere ufuldstændig forbrænding, en større sodproduktion og røgproduktion end brændstofkontrollerede brande, og kan derfor ikke anvendes til eftervisning af personsikkerhed efter denne vejledning.

Den brændstofkontrollerede brand, der samtidig er stabil, kendetegnes ved, at brandens omfang ikke længere tager til i effekt. Dette kan enten skyldes, at brandens omfang kontrolleres ved, at et brandslukningsanlæg som f.eks. et sprinkleranlæg, eller at der ikke kan ske brandspredning til yderligere objekter eller at balancen mellem til- og aftagende faser for enkeltobjekter er tilnærmelsesvis konstant.



Figur 8.0-6 - Illustration med sammenligning af et brændstofs-kontrolleret- og et ventilations-kontrolleret brandforløb.

Afkølingsfasen er den del af brandforløbet, hvor brandeffekten/rumtemperaturen gradvist reduceres, indtil branden går ud fordi alt brændbart materiale af brændt væk eller fordi branden slukkes af redningsberedskabet.

Designbrande for eftervisning af personsikkerhed og til dimensionering af brandtekniske installationer aht. personsikkerhed er beskrevet i afsnit 8.3.0.

Bærende konstruktioner eftervises efter et fuldt udviklet brandforløb, og er ikke omfattet af denne vejledning.

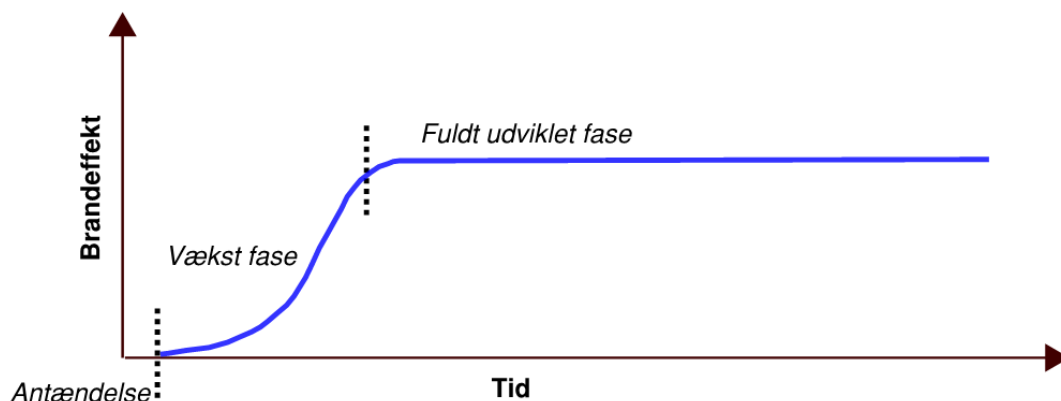
8.3.2.3.2 Designbrande for eftervisning af personsikkerhed

Designbrande for eftervisning af personsikkerhed repræsenterer alene brande i de tidlige faser, hvor brande er brændstofkontrollerede, og hvor der ikke er opstået overtænding.

For eftervisning af personsikkerhed skal der defineres følgende egenskaber for designbranden:

- Brandtilvæksten
- Brandeffektens øvre begrænsning
- Produktion af sod

Brandtilvæksten bestemmer hastigheden på brandens udvikling i vækstfasen, som stopper når branden har nået den maksimale brandeffekt, hvorefter branden forsætter som en stabil brand med den maksimale brandeffekt.



Figur 8.0-7 - Illustration af designbrand for eftervisning af personsikkerhed

8.3.2.3.2.1. Brandtilvækstfaktor

Brandtilvæksten kan fastlægges ved at vurdere indretningen og andet, der sandsynligt vil forekomme i rummet, og som kan bidrage til en brand. Den dimensionerende brandtilvækst skal være dækkende for typen og mængden af brandbelastning i rummet, og kan tilpasses evt. fremtidig fleksibilitet i rummets anvendelse.

Brandtilvækstfaktoren, α , angiver hvor hurtigt en designbrands brandeffekt øges.

Formlen:

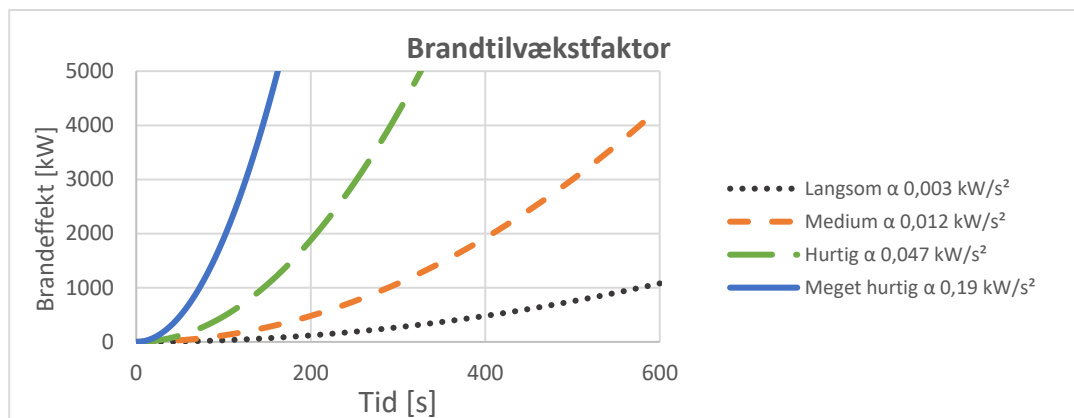
$$Q(t) = \alpha t^2$$

angiver brandeffekten $Q(t)$ (kW) baseret på brandtilvækstfaktor α (kW/s²), og tiden t (s).

Brandtilvæksten opdeles i langsom, medium, hurtig og meget hurtig.

Tabel 8.0-5: Eksempler på brandtilvækstfaktorer og tilhørende tid til maksimale brandeffekter

Brandtilvækst	Tilvækstfaktor α (kW/s ²)	Tid til brandeffekten når		
		1.000 kW	5.000 kW	10.000 kW
Langsom	0,003	577 s	1291 s	1826 s
Medium	0,012	289 s	645 s	913 s
Hurtig	0,047	1546 s	326 s	461 s
Meget hurtig	0,190	73 s	162 s	229 s



Figur 8.0-8 - Illustration af brandens tilvækst

Den mindste brandtilvækstfaktor baseres på anvendelsestyper iht. Tabel 8.0-6

Hvis det brændbare oplag afviger fra, hvad der normalt kan forventes af oplag i en bygning med en specifik anvendelsestype, skal brandtilvækstfaktoren vurderes i forhold til det faktiske oplag. Brandtilvækstfaktoren kan dermed skulle vælges højere.

Tabel 8.0-6: Eksempler på den mindste brandtilvækstfaktor for forskellige anvendelsestyper

Anvendelsestyper	Brandtilvækstfaktor
Industri og lager ILK 1	Langsom
Industri og lager ILK 2	Hurtig
Industri og lager ILK 3	Hurtig
Industri og lager ILK 4	Meget hurtig
Industri og lager ILK 5	Meget hurtig
Parkeringskælder	Hurtig
Kontor	Medium
Skole, klasselokale	Medium
Butikker og butik i butikscenter	Meget hurtig
Fællesområder i butikscenter	Hurtig
Bibliotek	Medium
Diskotek/natklub	Hurtig
Indendørs legeland	Meget hurtig
Stoleopstillinger i biograf, teater m.v.	Medium
Sceneopbygning i teater	Hurtig
Forsamlingslokaler generelt	Hurtig
Bolig, herunder stue, værelse og køkken	Medium
Hotelværelse	Medium
Børnehave/vuggestue	Medium
Plejehjem	Medium
Hospital, sengerumsafsnit	Medium
Koncerthal/Arena	Hurtig

Brandtilvækstfaktoren kan også fastsættes ud fra bygningsafsnittets konkrete oplag, når disse er veldefinerede. Begrænsningen skal beskrives i bygningens DKV-plan (Drifts-, kontrol- og vedligeholdelsesplan).

I Tabel 8.0-7 kan findes eksempler på brandtilvækstfaktor for udvalgte typer af oplag.

Tabel 8.0-7: Eksempler på brændbart oplag og brandtilvækstfaktor

Brændbart oplag	Brandtilvækstfaktor
Stablede stole med skumplast og cellulosemateriale	Meget hurtig
Pakket brændbart affald i f.eks. skraldespand	Meget hurtig

Ikke-brandhæmmet skumplast	Meget hurtig
Juletræ, tørt	Meget hurtig
Plastikboks lodret stablet	Meget hurtig
Klædeskab af træ med tøj	Meget hurtig
Papkasser med indhold stablet lodret	Hurtig
Oplag af sengetøj og linned	Hurtig
Arbejdsstationer på kontor	Hurtig
Bil	Hurtig
Oplag af træpaller	Hurtig
Salgsvogn	Hurtig
Fjernsyn i emballage	Hurtig
Stole af træ med plastsium og stof	Medium
Kontormøbler	Medium
Bomuld/polyestermadras	Medium
Stole af metal med brandhæmmende skumplast	Langsom

8.3.2.3.2.2. Maksimal brandeffekt

Den maksimale brandeffekt er naturligt begrænset af ilttilførslen til branden (ventilationskontrolleret brand) eller af mængden af brændbart materiale (brændstofkontrolleret brand), medmindre den begrænses af et automatisk sprinkleranlæg eller tilsvarende foranstaltninger.

Den maksimale brandeffekt fastsættes som minimumsværdien den ventilationskontrollerede brand og den brændstofkontrollerede brand, som begge kan findes ved beregning.

Den maksimale brandeffekt for en ventilationskontrolleret brand kan beregnes på basis af formlerne givet i appendiks 8.8.1.1.1.

Den maksimale brandeffekt bestemmes for den brændstofkontrollerede brand, ud fra forbrændingshastigheden, den effektive forbrændingsvarme og det antændte areal. I appendiks 8.8.1.1.28.8.1.1 er givet et forslag til, hvordan den maksimale effekt normalt kan beregnes.

Den maksimale effekt for en brændstofkontrolleret brand, kan ligeledes bestemmes ved at betragte brandbelastningen i et lokale eller scenarie, hvor det brændbare materiale/oplag defineres og en samlet brandeffekt defineres.

I Tabel 8.0-8 ses de maksimale brandeffekter, der mindst skal antages som designbrande, ved anvendelse af denne vejledning, når der ikke sker svigt. Ved svigt af de brandtekniske anlæg AVS og ABV, kan designbrandens maksimaleffekt sættes til halvdelen af maksimaleffekten, i forhold til eftervisning af personsikkerhed. Halveringen kan foretages for at undgå at de brandtekniske anlæg dimensioneres for svigttilfældet.

Tabel 8.0-8: Eksempler på maksimal brandeffekt, der mindst skal anvendes til designbrande i scenarier med og uden svigt.

1) Der er taget udgangspunkt i en maksimal brandeffekt baseret på brand i tre almindelige biler af gennemsnitlig størrelse. Denne antagelse er kun i gældende forhold til eftervisning af personsikkerhed.

Anvendelse/områder	Maksimal brandeffekt	
	Grundscenarier	Svigtscenarier AVS eller ABV
Flytbar brandlast i områder med ingen eller lav brandbelastning	1 MW	1 MW
Industri og lager ILK 1	5,0 MW	2,5 MW

Industri og lager ILK 2	10,0 MW	5 MW
Industri og lager ILK 3	10,0 MW	5 MW
Industri og lager ILK 4	35,0 MW	17,5 MW
Industri og lager ILK 5	35,0 MW	17,5 MW
Parkeringskælder	10,0 MW ¹	5 MW
Kontorlokaler	5,0 MW	2,5 MW
Undervisningslokale	5,0 MW	2,5 MW
Butikker	10,0 MW	5 MW
Bibliotek	10,0 MW	5 MW
Diskotek/natklub	5,0 MW	2,5 MW
Indendørs legeland	10,0 MW	5 MW
Stoleopstillinger i biograf, teater m.v.	5,0 MW	2,5 MW
Sceneopbygning	10,0 MW	5 MW
Forsamlingslokaler generelt	10,0 MW	5 MW
Bolig	5,0 MW	2,5 MW
Hotelværelse	5,0 MW	2,5 MW
Børnehave/vuggestue	5,0 MW	2,5 MW
Plejehjem	5,0 MW	2,5 MW
Hospital, sengerumsafsnit	5,0 MW	2,5 MW
Større sceneopbygninger og messecentre	25,0 MW	12,5 MW

Det skal i det enkelte tilfælde vurderes, om ovenstående maksimale effekt er anvendelige i det aktuelle tilfælde, da der kan være store variationer i art og mængde af brændbart materiale indenfor samme anvendelse. F.eks. vil en multihal ikke nødvendigvis være dækket af den maksimale brandeffekt for et almindeligt forsamlingslokale, hvorfor der bør foretages en vurdering i forhold til det forventede oplag, sceneopstilling mm. For lagerhaller mv. bør den maksimale brandeffekt ligeledes vurderes ud fra det reelle brændbare oplag.

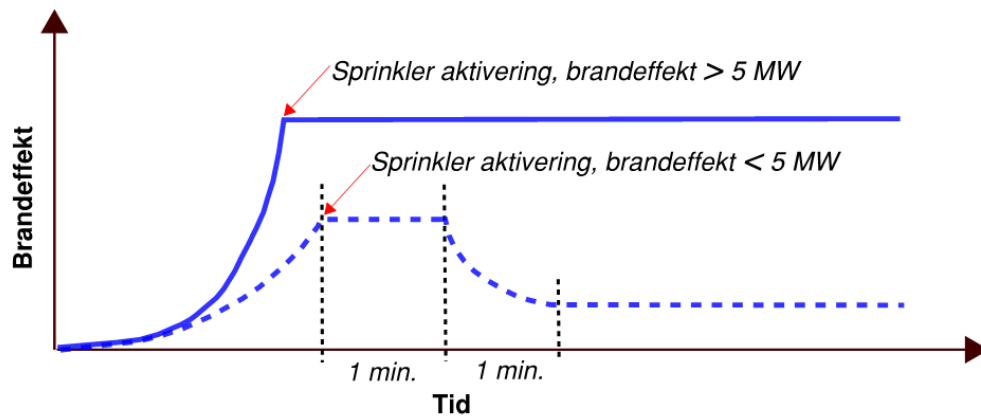
Brandtilvæksten kan påvirkes af automatisk sprinkleranlæg og automatisk vandtågesystem som beskrevet nedenfor.

8.3.2.3.2.3. Begrænsning af den maksimale brandeffekt i sprinklede områder

Ved fastsættelse af en designbrand i sprinklede områder, kan det normalt antages, at branden mindst fortsætter som kontrolleret af sprinkleranlægget med konstant effekt, når sprinklerne er blevet aktiveret.

Hvis brandeffekten er mindre end 5 MW ved aktivering af sprinkleranlægget, holdes brandeffekten konstant i ét minut. Herefter reduceres brandeffekten i løbet af et minut til 1/3 af brandeffekten ved aktivering af sprinkleranlægget, hvorefter brandeffekten holdes konstant.

Er brandeffekten over 5 MW ved aktivering af sprinkleranlægget, antages brandeffekten at være konstant efter aktivering af sprinkleranlægget.



Figur 8.0-9 – Illustration af eksempel på den maksimale effekt for brand i bygning med et sprinkleranlæg

Aktiveringstid for sprinkler eller detektor

Aktiveringstiden for et sprinkleranlæg eller andet anlæg, som er styret af detektorer, kan bestemmes ved hjælp af computersimulering eller håndberegninger.

For sprinklere og simple termidetektorer, hvor udløsningen sker, når det temperaturfølsomme element opnår en bestemt temperatur, kan udløsningstidspunktet beregnes på grundlag af detektorens aktiveringstemperatur, RTI-værdi, samt røgens temperatur og hastighed umiddelbart ved detektoren. Se appendiks 8.8.1.7 for eksempel på beregning af aktiveringstid.

Aktiveringstemperaturen for det varmfølsomme element samt RTI-værdi (Response Time Index) for et specifikt produkt fremgår af produktets specifikationer.

Aktiveringstemperaturen for det varmfølsomme element kan være mellem 57°C og 260°C . Under normale forhold anses en aktiveringstemperatur på 68°C for passende.

Ved beregning af aktiveringstid for detektorer og aktiveringstid for sprinklere skal der tages udgangspunkt i den dårligst placerede detektor/sprinkler herunder indvirkning fra bjælker og andet, der kan påvirke aktiveringstiden. Der skal indregnes et evt. tillæg for tidsforsinket alarmbehandling eller signalbehandling, som foretages i detektoren.

For sprinkleranlæg der igangsættes af andre typer detektorer, som f.eks. røgdetektorer, flammedetektor mm. vil det være nødvendigt at vurdere/beregne, hvornår der detekteres brandkendetegn.

For sprinkleranlæg der kræver mere end et brandkendetegn, vil det være nødvendigt at vurdere eller beregne, hvornår de nødvendige brandkendetegn er tilstede.

For simple røgdetektorer er følsomheden ofte angivet som den optiske densitet målt i dB/m (=Obscura), ved hvilken detektoren aktiveres. En følsomhed på $0,2 \text{ dB/m}$ vil ofte være relevant for sædvanlige punktdetektorer.

Til brug for håndberegninger, hvor røgdetektortypen ikke kendes, kan en "sprinkler" med en aktiveringstemperatur på 33°C og en RTI værdi på $0,5$ benyttes.

8.3.2.3.2.4. Produktion af sod

For en designbrand der benyttes til eftervisning af personsikkerhed, skal der medregnes produktion af sod, da soden vil have indvirkning på hvornår der opstår kritiske forhold i forhold til sigtbarhed.

Ventilationskontrollerede brande har en større sodproduktion og kan ikke anvendes til eftervisning af personsikkerhed efter denne vejledning.

Forskellige materialer udvikler forskellig mængde af sod. F.eks. kan fleksibelt polyuretan udvikle op til 10 gange så meget sod pr. gram afbrændt materiale end træ. Se Tabel 8.0-9.

Tabel 8.0-9: Eksempel på sod-produktion og brændværdi i forhold til bestemte materialer.

Materiale	Sod-produktion g/g	Kalorimetriske brændværdi ΔH_c [MJ/kg]
Træ	0,01	19
Polyuretan	0,1	23

Et kompositmateriale kan defineres ud fra dette og materialernes opbygning, eller ud fra fundne data for de pågældende materialer.

Værdierne for produktion af sod og brændværdi skal dog mindst være som angivet i Tabel 8.0-10, der angiver værdier, som er gældende for designbrande, der ikke er ventilationskontrollerede.

En brand, der er kontrolleret eller reduceret af et sprinkleranlæg, vil i praksis have en højere sodproduktion, men ved brandteknisk dimensionering efter denne vejledning kan der anvendes samme kalorimetriske brændværdi for sprinklede og usprinklede brande.

Tabel 8.0-10: Mindste værdier for produktion af sod og røggasser ved velventilerede brande

Brandscenarie	Sod-produktion [g/g]	Kalorimetriske brændværdi ΔH_c [MJ/kg]
Designbrande, generelt	0,06	20
Designbrande kontrolleret eller reduceret af et sprinkleranlæg	0,1	20

8.3.3. Håndberegninger

Håndberegninger i dette afsnit er en samling af forenklede løsninger og empiriske metoder til beregning af bl.a. flammehøjder, massestrømme, temperatur og hastigheder i røgfaner, tid til sprinkleraktivering, rumovertryk og flere andre variabler.

Håndberegninger kan i flere tilfælde også benyttes til verificering af resultater fra beregninger med 2-zonemodeller og CFD-modeller samt ved udførelse af prøvninger og forsøg.

En række af håndberegningerne kan evalueres direkte imod acceptkriterier, mens andre af håndberegningerne kan benyttes til dimensionering af brandtekniske tiltag eller kontrol af forudsætninger for andre håndberegninger.

For alle håndberegninger gælder der en række forudsætninger, som skal være opfyldt for at de er gyldige. Hvis forudsætningerne ikke er opfyldt, skal det på anden vis dokumenteres at håndberegningernes resultater er gyldige. De nødvendige forudsætninger er beskrevet under de enkelte håndberegninger.

- Brandens maksimale effekt kan bestemmes baseret på formlerne i appendiks 8.8.1.1, som en kontrol af om branden bliver ventilationskontrolleret eller for fastsættelse af den brændstofkontrollerede maksimale brandeffekt.

Bestemmelse af den gennemsnitlige højde til røggaslaget vil normalt ske med udgangspunkt i acceptkriteriet for højden til røggaslaget hvorfra massestrømmen i røgfanen fra branden kan bestemmes baseret på formlerne i appendiks 8.8.1.2. For linjerøgfaner kan massestrømmen bestemmes baseret på formlerne i appendiks 8.8.1.2.5.

- For at opretholde en konstant højde til røggaslaget kan den nødvendige kapacitet af brandventilation bestemmes baseret på metodikker og formler i appendiks 8.8.1.3 for hhv. termisk (naturlig) og mekanisk brandventilation.
- For mekanisk brandventilation kan den mindste afstand mellem udsugningspunkter bestemmes baseret på formlerne i appendiks 8.8.1.4.
- Ved røgfyldning af et rum uden åbninger, men med lækager kan tiden til kritiske forhold bestemmes konservativt med formlen i appendiks 8.8.1.3.1.
- Den gennemsnitlige temperatur i røggaslaget kan bestemmes baseret på formlerne i appendiks 8.8.1.2 eller ved simpel energibevarelse.
- Sigtbarheden og den optiske densitet kan bestemmes baseret på formlerne i appendiks 8.8.1.6.
- Flammehøjder kan bestemmes baseret på formlerne i appendiks 8.8.1.2
- Varmestråling fra et røggaslag eller en varm flade mod et punkt kan bestemmes baseret på formlerne i appendiks 8.8.1.5.
- Aktiveringstiden for sprinklere og simple termodetektorer kan bestemmes baseret på formlerne i appendiks 8.8.1.7.

8.3.3.1. *Antagelser og begrænsninger for håndberegninger*

Ved anvendelse af en håndberegning skal det sikres, at håndberegningens forudsætninger passer til det enkelte brandscenarie, så resultaterne er gyldige. Følgende forhold bevirker, at håndberegninger ikke længere er gyldige for beregning af røgspredning og røgfaner:

- Efter aktivering af sprinkling, da det vil medføre en opblanding af røgfanen.
- Hvor flammehøjden bliver så stor, at flammerne rammer loftet.
- Efter overtænding. Modellen kan dog godt være gyldig indtil overtændingen indtræder.
- Hvis røgfanen rammer forhindringer inden røggaslaget.
- Kraftige turbulenser, som ikke er skabt af branden. Turbulenser kan eksempelvis findes, hvor en brand er placeret tæt på en naturlig eller mekanisk erstatningsluftåbning.

Yderligere antagelser og begrænsninger fremgår af de enkelte afsnit i appendikserne.

8.3.3.2. *Validering af resultater*

Håndberegninger skal valideres ud fra fagligt skøn og følsomhedsanalyser.

8.3.3.3. *Dokumentation af analyser med håndberegninger*

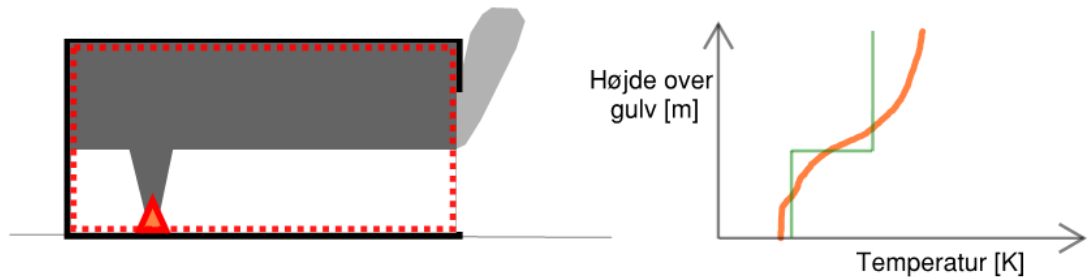
Dokumentation af analyser med håndberegninger skal som minimum altid omfatte en beskrivelse af:

- Formålet med beregningen og at formlerne er valide
- De opstillede acceptkriterier
- Forudsætninger for dimensioneringen, herunder geometri, materialeparametre, modellerede brandtekniske tiltag og de væsentligste parametre og modeltilpasninger
- De anvendte designbrande og brandscenarier inkl. svigtscenarier
- Tabel med resultater for f.eks. tiden til kritiske forhold og kapacitet af de dimensionerede brandtekniske tiltag
- Konklusion

8.3.4. 2-zonemodeller

2-zonemodellering er en deterministisk metode, der kan bruges til at simulere en brand, i simpelt udformede rum, ved at betragte brandbelastning, rumvoluminen, indvirkningen af åbninger og bygningskonstruktionernes termiske egenskaber.

2-zonemodeller kan omfatte et eller flere rum, der hver opdeles i to zoner – en nedre røgfri kold zone og en øvre varm røgzone. I den øvre zone antages røglaget dannet, som følge af den termiske opdrift.



Figur 8.0-10: Princip for 2-zonemodel med illustration af den forudsatte temperaturgradient (grøn) i den homogene øvre zone set i forhold til en virkelig temperatur gradient (orange).

Højden til røglaget i brandrummet afhænger af balancen mellem den mængde røg, som tilføres den øvre varme zone, og den mængde der forsvinder via åbninger til andre rum eller til det fri.

Nogle modeller kan ydermere beregne røgfylldning ud fra en 1-zonemodellering, hvor der ikke dannes et røgslag og røgen i stedet fordeles jævnt i hele rummets volumen f.eks. som følge af manglende opdrift i røgen.

8.3.4.1. Formål med analysen

Formålet med brugen af 2-zonemodellen skal være fastlagt, da det har betydning for opbygningen af modellen, og hvilken problemstilling der søges eftervist.

Typiske formål kan være eftervisning af tid til kritiske forhold for personer, med henblik på at sammenholde denne med tiden til endt evakuering. Andre eksempler kan være gennemsnitlige påvirkninger af bygningsdele eller brandtekniske komponenter.

2-zonemodeller kan også benyttes til analyse af risikoen for overtænding til eftervisning af redningsberedskabets indsatsforhold.

8.3.4.2. Valg af beregningsmodel

Den anvendte 2-zonemodel skal være velegnet og valideret til anvendelse for modellering af den konkrete problemstilling.

Der findes adskillige beregningsprogrammer, der kan simulere 2-zonemodeller, og de fleste giver mulighed for en række supplerende og specialiserede beregningsfunktioner (f.eks. 1-zone). Mange programmer baserer sig på flere af de samme grundlæggende antagelser i forhold til 2-zonemodellerne, men beregningsprogrammerne varierer ofte ved de mere specialiserede funktioner og deraf programspecifikke antagelser. En mere detaljeret beskrivelse af 2-zonemodellerne findes bl.a. i SFPE -håndbogen kapitel 29 [6].

Til vurdering af en 2-zonemodel med henblik på verifikation og validering af modellen henvises til DS/ISO/TR 16730-2 [7].

Der findes ikke et generisk sæt kvantitative grænser for hvornår 2-zonemodeller er valide, men nedenstående kan anvendes som retningslinjer:

- Rummene skal fremstå med en simpel geometri
- Etagearealet må højst være 2.000 m²
- Rumhøjden må maksimalt være 10,0 m

Da de forskellige beregningsprogrammer, til at simulere 2-zonemodeller, har individuelle gyldigheder, skal det sikres, at den konkrete model er valid til den pågældende beregning. Hvis der afviges fra de ovenstående retningslinjer, skal der henvises til den tekniske manual for det pågældende beregningsprogram.

8.3.4.3. *Modelinput*

De nødvendige inputdata varierer afhængig af den valgte 2-zonemodel. Som minimum kræves inputdata vedrørende:

- Bygningsgeometrien, herunder gulv- og loftareal, rumhøjde, placering og størrelse af åbninger, der fører til andre rum eller til omgivelserne.
- Bygningskonstruktionerne, herunder deres specifikke varmekapacitet, densitet og varmeledningsevne.
- Designbranden jf. afsnit 8.3.2.3.

8.3.4.4. *Modelbegrænsninger*

Ved anvendelse af en 2-zonemodel skal det sikres, at 2-zonemodellens designparametre passer til det enkelte brandscenarie, så resultaterne findes inden for modellens gyldighedsområde. Følgende forhold bevirker, at 2-zonemodellen ikke længere er gyldig:

- Aktivering af sprinkling, da det vil medføre en opblanding af røggaslaget.
- Hvor flammehøjden bliver så stor, at flammerne rammer loftet.
- Efter overtænding. Modellen kan dog godt være gyldig indtil overtændingen indtræder.
- Bestemmelse af værdier for specifikke punkter i røggaslaget f.eks. maksimal temperatur da den øvre røggastemperatur bestemmes som en gennemsnitstemperatur i hele den øvre zone.

Følgende forhold kan bevirke, at 2-zonemodellens antagelser ikke længere er gyldig:

- I rum med store rumhøjder eller ved branden med lav effekt, kan de varme røggasser miste deres termiske opdrift inden røggaslaget når loftet. Derved kan røgen lægge sig mellem den nedre og øvre zone, hvilket er i modstrid med 2-zoneantagelsen.
- I rum med store rumvolumener eller rumhøjder, kan de varme røggasser miste deres termiske opdrift som følge af køling af røggaslaget.
- Hvis røglaget rammer forhindringer (f.eks. loftsbjælker, indskudte etager mv.) eller går gennem åbninger (f.eks. dør- og vinduesåbninger), øges indblandingen

af den kolde luft, hvilket kan medføre at røgen mister sin termiske opdrift da opblandingen med kold luft øges.

- Hvis røgfanen passerer under en balkon, vil opblandingen øges væsentligt.
- Kraftige turbulenser, som ikke er skabt af branden, kan skabe en røgopblanding, hvilket vil medføre, at der kun findes én zone eller forøget indblanding i røgfanen. Turbulenser kan eksempelvis opstå, hvor en brand er placeret tæt på en naturlig eller mekanisk erstatningsluftåbning.

8.3.4.5. *Simplificering af modeller*

For at kunne gennemføre en 2-zonesimulering, kan det være nødvendigt at simplificere beregningsmodellen. Dette kan eksempelvis gøres ved, at skrå lofter modelleres vandrette, med en middelhøjde, så modellens volumen af røggaslaget afspejler den faktiske bygning. Simplificeringer skal opsættes til ugunst for beregningen, så resultatet bliver konservativt.



Figur 8.0-11: Simplificering ved opretholdelse af volumen

8.3.4.6. *Validering af resultater*

En korrekt anvendt 2-zonemodells resultater findes ofte med en nøjagtighed inden for 10% til 25%. Der henvises til 2-zonemodellens valideringsdokumentation.

Validering skal ske for de resultater, der knytter sig til acceptkriterierne og kan f.eks. ske som:

- Validering med håndberegninger
 - **Validering af flammehøjde:** 2-zonemodellen kan ikke håndtere at flammehøjden rammer loftet. Derfor skal flammehøjden beregnes som en del af valideringen.
 - **Validering af højde til røggaslaget og røggastemperatur:** kan eksempelvis gøres for det stationære tilfælde i en iterativ beregning, ved at ligestille massestrømmen i den øvre varme zone, med den massestrøm som forlader brandrummet.
 - **Validering af stråling:** kan eksempelvis ske for det stationære tilfælde ved en håndberegning af strålingsintensiteten mod gulv.
 - **Optisk densitet:** kan eksempelvis ske ved hjælp af en håndberegning.
- - Beregning af scenariet i et andet 2-zoneprogram og sammenligning af resultater

8.3.4.7. *Dokumentation af analyser med 2-zonemodeller*

Dokumentation af analyser med 2-zonemodeller skal som minimum altid omfatte en beskrivelse af:

- Formålet med beregningen og at modellen er valid
- De opstillede acceptkriterier
- Forudsætninger for dimensioneringen, herunder geometri, materialeparametre, modellerede brandtekniske tiltag og de væsentligste parametre og modeltilpasninger
- De anvendte designbrande og brandscenarier inkl. svigtscenarier
- Tabel med resultater for f.eks. tiden til kritiske forhold og kapacitet af de dimensionerede brandtekniske tiltag
- Konklusion

Resultater skal fremstilles entydig og præsenteres som et dynamisk tidsforløb. Eksempelvis kan resultater præsenteres i grafer som funktion af tiden som det fremgår af Figur 8.0-12.



Figur 8.0-12: Præsentation af resultater.

8.3.5. Modellering med CFD

CFD (Computational Fluid Dynamics) er en beregningsmetode hvor røggassers bevægelse, koncentration, temperatur mm. kan bestemmes med større detaljeringsgrad, end ved anvendelse af håndberegninger og 2-zonemodeller, idet beregningsdomænet opdeles i et beregningsnet med mange mindre celler.

Analysen af CFD-modeller kan jf. denne vejledning, alene anvendes til eftervisning af brande i det tidlige brandforløb og af brande som er brændstofkontrollerede.

8.3.5.1. Formål med analysen

Formålet med en analyse af en CFD-model skal være fastlagt, da det har betydning for opbygningen af modellen, og hvilken problemstilling der søges eftervist.

Et typisk formål med CFD-modellen kan f.eks. være eftervisning af tid til kritiske forhold for personer med henblik på sammenligning med tiden, til endt evakuering.

Andre eksempler er påvirkning af bygningsdele eller brandtekniske komponenter.

Analysen af CFD-modeller kan eksempelvis også benyttes til eftervisning af redningsberedskabets indsatsforhold.

8.3.5.2. Valg af beregningsmodel

Den anvendte CFD-model skal være velegnet og valideret til anvendelse for modellering af den konkrete problemstilling.

Det skal beskrives om analysen udføres som en transient eller steady state simulering.

Det skal beskrives om analysen af CFD-modellen benyttes enkeltstående eller i en kombination med andre metoder eller programmer til samlet eftervisning af brandsikkerheden som f.eks. evakueringsanalyser eller varmepåvirkning af brandtekniske komponenter og bygningsdele.

8.3.5.3. Modellering af geometri og overflader

Geometrien skal i passende grad afspejle den bygning som ønskes analyseret. Der vil ofte være udarbejdet en 3D model, der evt. via et ikke kommercielt format kan importeres til CFD-programmet.



Det er væsentligt at der ved anvendelse af CFD-interfac, program, tages stilling til alle defaultværdier, der er givet i dette program, så der ikke overføres en uventet parameter til CFD-modellens solver, hvilket der skal redegøres for i dokumentationen af simuleringen.

Ved opbygning af geometrien, skal der i detaljeringsgraden tages hensyn til beregningsnettet, så objekter, der kan påvirke resultaterne, afspejles i geometrien. Samtidigt kan objekter, som ikke påvirker resultaterne, modelleres groft eller udgå af geometrien.

Eksempelvis kan undersiden af en trapper modelleres detaljeret, mens oversiden med trinene ikke nødvendigvis modelleres, da røgspredningen kun vil ske på undersiden.

Ved modellering af røgspredning gennem rum, skal særligt rummenes volumener og afstande sikres, at være i overensstemmelse med den modellerede bygning.

Der må, i selve CAD-modellen eller gennem eksportprocessen til det ikke kommercielle format, forventes at kunne opstå utætheder mellem flader i modellen, der ikke afspejler den færdige bygning. Derfor skal der foretages en tæthedsprøve, der eksempelvis kan udføres ved at blæse gas ind i modellen samtidigt med at alle åbninger holdes lukket, hvorefter trykket skal stige i modellen. En lineær trykstigning på op til ca. 1.000 Pa indikerer tæthed.

Det skal vurderes, i hvilket omfang materialeegenskaber for overflader skal modelleres, i forhold til påvirkningen af resultaterne.

De væsentligste parametre for materialer kan være f.eks. varmekapacitet, varmeledningsevne, densitet, starttemperatur, permabilitet og ruhed.

Ved længere simuleringer f.eks. ved eftervisning af redningsberedskabets indsatsforhold, vil energiudvekslingen mellem røggassen og bygningsdelene få en betydelig indvirkning på analysen, hvorfor bygningsdelenes egenskaber som oftest vil skulle defineres mere detaljeret.

8.3.5.4. *Beregningsnet for strømning og stråling*

Beregningsnettenes finhed har stor betydning for resultaternes pålidelighed. Det anvendte beregningsprogrammes tekniske manuals anbefalinger, skal som udgangspunkt følges sammen med de nedenstående krav til beregningsnettet. Ydermere skal der argumenteres for, at de beregnede resultater er uafhængige af beregningsnettenes finhed.

En sådan argumentation vil oftest skulle understøttes af en netpunktsanalyse (følsomhedsanalyse), hvor en forfinelse af beregningsnet viser resultater af tilnærmelsesvist samme værdi. Netpunktsanalysen behandles i de enkelte underafsnit til dette afsnit.

8.3.5.4.1 *Strømningsnet*

Strømningsnettet er inddelt i beregningsceller. Oftest er der flere strømningsnet i en model, og summen af disse benævnes beregningsdomænet.

Korrekt opbygning af beregningsdomænet har afgørende betydning for resultaterne.

Beregningsceller kan have flere geometriske udformninger, afhængigt af det anvendte program. Ved anvendelse af programmer, der benytter sig af retvinklede celler, skal der udvises opmærksomhed på modellens tilpasning til den beregnede geometri. Ved anvendelse af flere strømningsnet skal grænsefladerne mellem disse placeres hvor der ikke optræder store hastighedsgradienter parallelt med grænsefladerne.

Tilsvarende skal der rettes særlig opmærksomhed mod CFD-programmet følsomhed over for beregningscellernes udformning. Benyttes eksempelvis celler med stor variation (>2) mellem X-Y-Z, kan der opstå "ufysiske" resultater. Som udgangspunkt skal der bruges ens sidelængder, medmindre at beregningscellernes form er udformet jf. anvisningerne i CFD-programmet manual, eller at en følsomhedsanalyse viser at resultaterne ikke påvirkes af de uens sidelængder.

Ved modellering af strømninger uden for den modellerede bygningsgeometri, skal beregningsnettet føres et passende stykke ud i "det fri", for at modellere strømninger ud af bygningens åbninger. Brandventilationsåbninger behandles nedenfor.

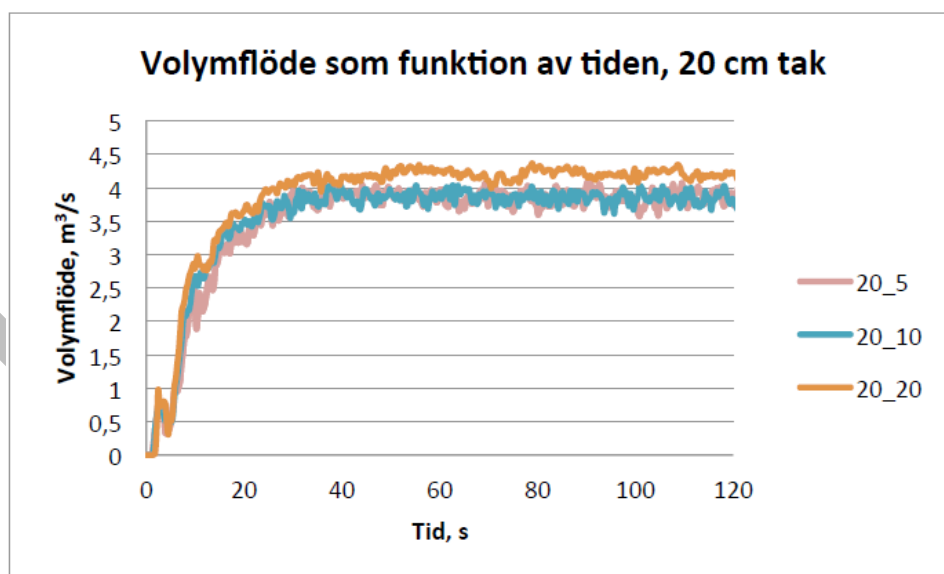
Selve finheden af beregningsnettet har afgørende betydning for resultaterne. Det skal her bemærkes, at forskellige CFD-programmer kræver forskellige finhed af nettet, afhængigt af metoden programmet benytter, til bl.a. at modellere turbulensen i strømmingen.

Beregningsnettets finhed er særligt væsentligt omkring branden, i områder med store hastighedsgradienter, og omkring de bygningsdele, der har væsentlig indvirkning på strømningsbilledet. Det kan f.eks. være omkring bjælker under loft, der kan virke som røgskørter, og strømninger gennem åbninger hvor hastigheden er stor.

Der skal derfor foretages en vurdering af, hvor fin en opløsning strømningsnettet skal have.

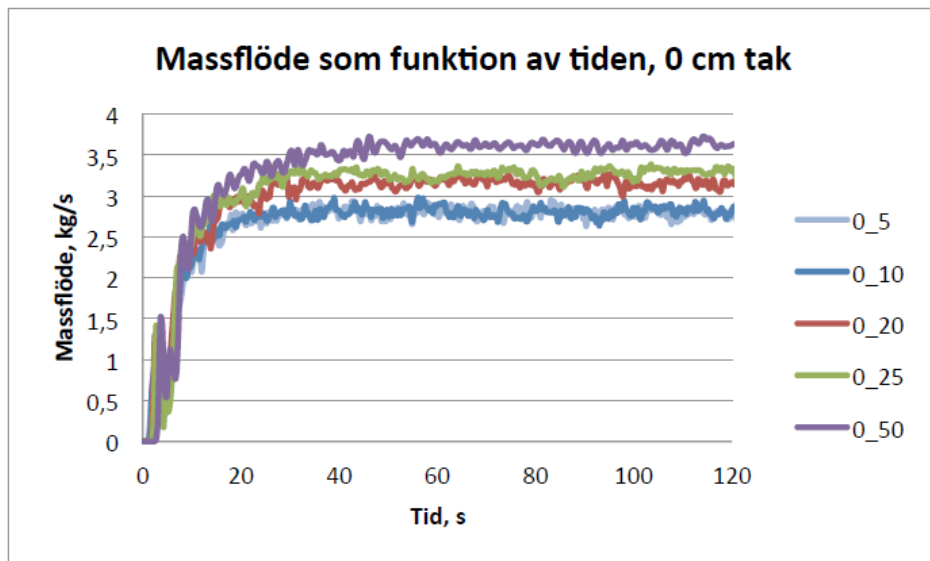
Som supplement til retningslinjerne i CFD programmets manual, til bestemmelse af strømningsnettets opløsning, kan der udføres en såkaldt netpunktsanalyse, hvor en parameter, som eksempelvis temperatur eller hastighed i en retning, betragtes, mens cellernes størrelse varieres. Når resultaterne konvergerer mod en værdi, vil resultaterne oftest være tilpas uafhængige af cellernes størrelse

På følgende figurer ses eksempel på en netpunktsanalyse, hvor volumenstrømmen gennem en åbning i et rum betragtes ved forskellige simuleringer med stigende finhed i strømningsnettet:



Figur 8.0-13: Volumenstrømning gennem åbning beregnet med tre finheder af beregningsnet

Det bemærkes at der ved fortsat forfining af beregningsnettet kan opstå trinvis konvergens, hvilket betyder at der optræder flere niveauer hvor resultaterne konvergerer f.eks. parvist som i eksemplet med massestrømmen nedenfor.

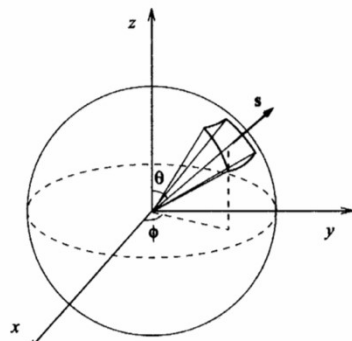


Figur 8.0-14: Eksempel på trinvis konvergens hvor resultaterne konvergerer parvist ved forøget finhed af beregningsnettet

8.3.5.4.2 Strålingsnet

CFD-programmer, der er egnet til modellering af flammer og røg, skal kunne beregne transport af energi ved stråling. Strålingsnettet skal modellere den sfæriske udstråling fra overflader, flammer samt røggasser.

På figuren herunder ses en såkaldt "solid rumvinkel", der er et element i strålingsnettet:



Figur 8.0-15: Enhedssfæren. Den udstrålende kilde findes i centrum af sfæren. Udstrålingen fordeles over x-antal rumvinkler, hvor en tilfældig er angivet på denne sfære.

Som udgangspunkt påskrives alle celler sådanne rumvinkler så nettostrålingen til alle celler, herunder overflader og flammeoverfladen, kan bestemmes.

Der skal sikres et passende antal inddelinger af denne sfære, ved at følge CFD-programmets manual, idet strålingsnettet mindst skal indeles i 100 solide rumvinkler. Dette antal modellerer som udgangspunkt udstråling fra røggaslag, flammer mm. tilfredsstillende, i analyser hvor energitransporten via stråling blot skal medtages i en generel betragtning.

Et særligt fint strålingsnet må forventes at skulle benyttes, når strålingsberegning benyttes til modellering af eksempelvis:

- Bestemmelse af temperatur af bygningsdele

- Bestemmelse af brandspredning
- Bestemmelse af strålingsniveau på personer

Hvis der analyseres på strålevarme fra flammer til bygningsdele, vil 500 vinkler typisk være tilstrækkeligt, hvilket kan dokumenteres ved at der f.eks. udføres en netpunksanalyse, hvor antallet af rumvinkler øges, til resultaterne konvergerer mod et resultat som beskrevet ovenfor.

8.3.5.5. *Modeltid*

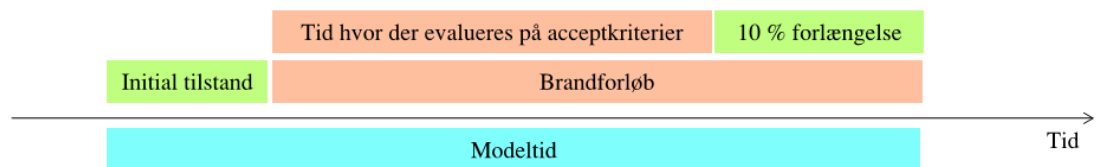
Modeltiden beskriver det tidsrum som en CFD-beregning skal omfatte, hvilket ofte vil være længere end tiden fra brandens opståen, til der f.eks. opstår stationære forhold.

For at CFD-analysen pålideligt kan eftervise f.eks. røgspredning, skal indflydelsen fra bygningens dominerende strømningsfelter eller områder med afvigende temperatur i normalsituationen, medregnes i nødvendigt omfang, hvor det kan påvirke de resultater, der lægges til grund for eftervisningen af personsikkerheden i bygningen.

Eksempler er:

- Termisk, mekanisk eller hybridventilation i atrier
- Varmeophobning under glastage eller i bygningers øvre etager i sommermåneder
- Køling fra kolde overflader i vintermåneder

Modeltiden må derfor startes så tidligt, at et realistisk strømningsfelt (initial tilstand), svarende til bygningens normalsituationer, kan indstille sig i beregningsdomænet før designbranden regnes at antændes.



Figur 8.0-16: Eksempel på fastlæggelse af modeltid for CFD-beregning

Tilsvarende skal modeltiden forlænges udover det tidspunkt hvor acceptkriterierne sidst evalueres, for at sikre at der ikke sker væsentlige forandringer i resultaterne.

Forlængelsen af modeltiden bør udgøre 10 % af modeltiden fra brandens antændelse, til sidste evaluering af acceptkriteriet, dog mindst 30 sekunder. Forlængelsen af modeltiden skal medtages med mindre det oplagt ikke er nødvendigt f.eks. fordi der tidligt opstår stationære forhold eller det på anden vis dokumenteres ikke at være nødvendigt.

8.3.5.6. *Modellering af brande*

Ved modellering af en brand skal der tages udgangspunkt i brandtilvækstfaktorer og -kurver, sodproduktion og brændværdi som beskrevet i afsnit 8.3.2.3.

Ved modellering af brandeffekten, skal der sikres stor overensstemmelse mellem den forudsatte og beregnede brandtilvækst. Dette gælder særligt i brandens helt tidlige fase, hvor en for lille brandeffekt eller sodproduktion, kan medføre en forsinkelse af tiden til kritiske forhold.

Brandens udformning skal ske under hensyntagen til strømningens inddeling sådan at:

- Temperaturen i centeret af en flammebrand skal være mellem 700 °C og 1.200 °C, mens temperaturen i toppen af en flammebrand mindst skal være omkring 500-600 °C. jf. Brandskyddshandboken [8]
- Flammehøjden, der skal være realistisk, kan f.eks. beregnes ud fra:

$$L = 0,235Q^{2/5} - 1,02 D$$

- Den dimensionsløse effekt Q^* bør ligge mellem 0,3, og 2,5 [Cox, 2002], hvor værdien på 0,3 er den generelle nedre grænse for formlens gyldighedsområde.

Q^* beregnes ud fra:

$$Q^* = \frac{Q}{\rho_{\infty} c_p T_{\infty} D^2 \sqrt{g D}}$$

- Den afgivne effekt per arealenhed er mellem 800 kW/m² og 1000 kW/m² for almindeligt forekomne faste brændsler.

D^*/dx mindst er 10, hvor:

$$D^* = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_{\infty} c_p T_{\infty} \sqrt{g}} \right)^{2/5}$$

og dx er beregningscellens sidelængde.

Da CFD-modeller normalt ikke kan variere beregningsnettets finhed under beregningen, kan designbrandens maksimaleffekt anvendes ved de ovenstående kontrolberegninger.

8.3.5.7. Modellering af åbninger

8.3.5.7.1 Brandventilationsåbninger

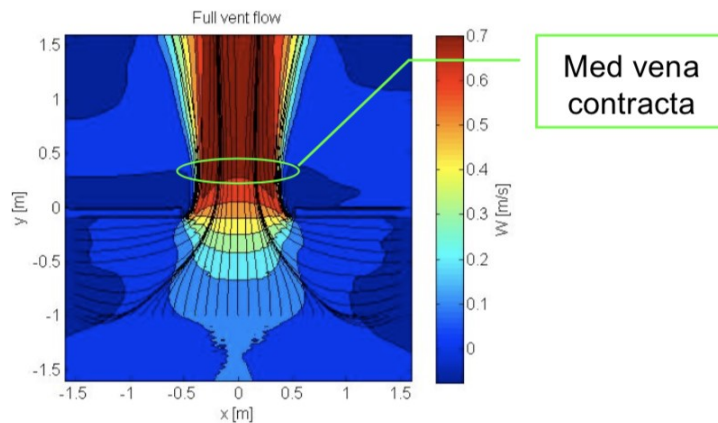
Naturlige brandventilationsåbninger er styret af opdriften og modstanden igennem ventilationsåbningen. Ved passage igennem en brandventilationsåbning med det geometriske areal A_g vil røgstrømmen blive presset sammen, så der dannes et område nedstrøms med det mindste tværsnitsareal i røgstrømmen igennem ventilationsåbningen. Dette område benævnes "vena contracta", som definerer det aerodynamiske areal A_a .

I REF CFD Best Practice [9], er der beskrevet tre metoder til modellering af strømning igennem naturlige ventilationsåbninger, hvoraf kun den ene (modellering af blænde) kan anvendes efter denne vejledning. De to øvrige metoder kan ikke benyttes og behandles ikke yderligere, men er vedlagt informativt i appendiks 8.8.5.

8.3.5.7.2 Modellering af blænde

Der modelleres en åbning som en blænde, med komplet tilstrækkeligt opløst strømning igennem åbningen, og med beregningsdomænet udstrakt nedstrøms, sådan at vena contracta dannes i beregningsdomænet. Korrekt opløsning forudsætter normalt mindst 9

celler på hver led i en åbning. Ved en korrekt opløsning af strømning kendes kontraktionskoefficienten for en blænde som typisk $C_v = 0,60$ for en horisontal åbning (loft) og $C_v = 0,68$ for en vertikal åbning (væg), se Emmons [10]. Herved kan det nødvendige aerodynamiske areal findes på baggrund af det i CFD-modellen fastlagte geometriske areal.



Figur 8.0-17: Modellering af blænde for strømning gennem naturlig ventilationsåbning. Lånt fra CFD Best Practice.

Ved anvendelse af denne metode skal der udføres en særskilt følsomhedsanalyse, som viser at strømmingen gennem åbningen er tilstrækkeligt opløst i og uden for åbningen.

Det fundne aerodynamiske areal kan anvendes til beskrivelse af komponenter jf. DS/EN 12101-2 [11], og placeringen af brandventilationsåbningerne i CFD-modellen bør markeres på f.eks. brandplaner.

Eksempel: I en CFD-model beregnes det, at fem brandventilationsåbninger i et tag, er nødvendige. I CFD-modellen er brandventilationsåbningerne modelleret med mindst 9 beregningsceller på hver led af åbningerne. Herved er det bestemt at hver brandventilationsåbning har et geometrisk areal A_g på $1,4 \text{ m}^2$ som kan omregnes til et aerodynamisk areal A_a på $0,84 \text{ m}^2$ via C_v -faktoren på $0,60$ for en horisontal åbning. Ved beskrivelse af komponenter jf. DS/EN 12101-2 [11] skal der i funktionsbeskrivelsen angives: mindst fem brandventilationsåbninger hver med et mindste aerodynamisk areal på $0,84 \text{ m}^2$ placeret efter angivelserne på brandplanen.

8.3.5.7.3 Øvrige åbninger

Ved modellering af strømninger udenfor den opstillede geometri, skal beregningsnettet føres et passende stykke ud i "det fri", for at modellere strømningerne korrekt. Dette gælder både hvis strømmingen passerer fra det fri og ind i bygningen (erstatningsluft) eller omvendt hvis strømmingen passerer ud ad åbningen til det fri (f.eks. ikke-forbrændt gas).

Den nødvendige afstand fra den geometriske åbning til beregningsdomænets rand, afhænger af celledørrelsen og skal fastlægges ved en følsomhedsanalyse, eller mindst 9 celler i dybden.

Den modellerede åbnings geometriske areal A_g kan omregnes til det aerodynamiske areal A_a , ud fra kontraktionskoefficienten for en blænde der kendes som typisk $C_v = 0,68$ for en vertikal åbning (væg).

Ved længerevarende kø foran erstatningsåbninger, skal der tages højde for personers blokerende effekt på åbningernes effektivitet. Dette kan ske ved at blokere de nederste 1,6 m af åbningen, i den tid hvor køen består.

8.3.5.8. *Modellering af aktive brandtekniske installationer*

Medtages de aktive installationers virkemåde i CFD-analyse, skal disse modelleres i modellen i overensstemmelse med beskrivelser i brandstrategi, funktionsbeskrivelse og brandmatrixen. Særligt skal tidsperioden fra aktivering af komponenter, til fuld funktion, iagttages.

8.3.5.8.1 *Brandalarmering ABA*

Detektorer og andre komponenter, der benyttes til aktivering af brandtekniske installationer, skal modelleres så funktionen modsvarer den bygning for hvilket eftervisningen foretages. Dette omfatter f.eks. at røgdetektorer modsvarer de komponenter, som indbygges i bygningen, og at loftsoverfladers beskaffenhed giver en realistisk påvirkning på hastigheden af ceiling-jetten, i de tilfælde hvor detektorerne ikke er placeret tilnærmelsesvist lige over branden. Dette er væsentligt ved bestemmelse af detekteringstiden ift. aktivering af brandtekniske installationer og iværksættelse af evakuering.

Muligheden for tidsundertrykkelse af hensyn til f.eks. signalbehandling skal også indarbejdes i modellen.

8.3.5.8.2 *ABV*

Benyttes mekaniske brandventilatorer kan formålet med analysen også være at vælge en passende type ventilator, der kan modstå den termiske belastning fra røggasserne. Når designbranden placeres mindst gunstigt i forhold til den brandtekniske komponent, kan temperaturen måles midt i udsugningspunktet.

Benyttes udgange i flugtveje som tilluftsåbninger, skal det sikres at der ikke optræder lufthastigheder som kan forsinke evakueringen. Evakuering kan regnes ikke at blive forsinket af lufthastigheder under 5 m/s, målt som middelhastighed i åbningen.

Tryktab i kanalsystemet kan ofte ikke beregnes direkte i CFD-modellen, hvorfor den dimensionerede kapacitet af brandventilation må overføres fra CFD-modellen til den videre projektering.

For korrekt modellering af ABV-anlægs funktion, vil det oftest være nødvendigt at modellere, den sekvens af hændelser anlæggets komponenter gennemgår.

I følgende tabel er der givet et eksempel på trinvis opstart af en mekanisk ABV-anlæg med naturlig erstatningsluft.

Tid efter detektering	Tilluft	Brandventilatorer			
		Vent. 1	Vent. 2	Vent. 3	Vent. 4
0 s	Starter	-	-	-	-

30 s	Åben	Starter	-	-	-
35 s	Åben	Operativ	Starter	-	-
40 s	Åben	Operativ	Operativ	Starter	-
45 s	Åben	Operativ	Operativ	Operativ	Starter
50 s	Åben	Operativ	Operativ	Operativ	Operativ

Tabel 8.0-11: eksempel på trinvis opstart af en mekanisk ABV-anlæg med naturlig erstatningsluft

8.3.5.8.2.1. Impulsventilatorer

Ved modellering af impulsventilatorer i eksempelvis p-kældre, skal det sikres at den rette volumenstrøm og spredning vertikalt og horisontalt tilskrives. Dette indebærer blandt andet, at hastighedsprofilen og spredningen af udblæsningsfanen, hastighedsforøgelsen over impulsventilatorens længde og impulsens samlede udstrækning nedstrøms modelleres korrekt. Dette indebærer en særskilt analyse for at sikre tilstrækkelig opløsning af strømningsnettet.

8.3.5.8.3. Sprinkling og vandtågeanlæg

Udløsning af sprinkler- og vandtågeanlæg vil medføre en ændring i strømningsbilledet omkring de udløste dyser, som kan medføre opblanding og nedslag af røggaslaget med tilhørende forringelse af sigtbarhed.

Brandeffekten er fastsat via designbranden og derfor må sprinkler- og vandtågeanlæg ikke anvendes til at modellere ændringer i brandeffekten.

8.3.5.8.4. Udfordringer ved sammenvirkning af visse anlægstyper (informativt)

Ved dimensionering af brandventilation i områder som også beskyttes af vandtågeanlæg, skal det sikres at luftstrømmenes hastighedsprofil og impuls ikke påvirker spredningen af vandpartikler ugunstigt i de områder der dækkes af begge brandsikringsanlæg.

8.3.5.9. Præsentation af resultater

Ved præsentation af resultater er det vigtigt at værdierne som udgangspunkt fremstår entydigt, hvorfor værdier skal angives i grafer eller tabeller. Ved præsentation af resultater vil det oftest være nødvendigt, at middel værdier over 5-30 sekunder anvendes for at udjævne fluktuationer.

Tabelværdierne kan evt. understøttes af billeder taget fra CFD-modellen.

8.3.5.10. Validering af analyse og resultater

Der skal foretages validering af analysen i form af aflæsning af outputdata fra CFD-programmet, herunder kontrol af:

- at den faktisk beregnede brandeffektkurve følger designbrandens brandeffektkurve med særligt fokus på overensstemmelse i den tidlige vækstfase hvor personer endnu ikke er evakuerede og de brandtekniske anlæg ikke nødvendigvis er aktiverede
- at den producerede sod-mængde stemmer overens med designbrandens forudsætninger
- at flammetemperaturen og den dimensionsløse effektudvikling opfylder kravene i afsnit 8.3.5.6.
- at beregningsnettene er tilstrækkeligt fine, herunder at der er udført følsomhedsanalyser på finheden af de betydende beregningsnet.
- at beregningsnet er opdelt hensigtsmæssigt og f.eks. ikke har grænseflader parallelt i områder med store hastighedsgradienter
- at forbrændingen ikke har været ventilationskontrolleret
- massebalance
- massestrømmen og hastigheder gennem åbninger
- at de aktive tiltag er aktiveret som forudsat og til rette tid
- at de primære resultater virker rimelige f.eks. ved kontrolberegning med håndberegning eller 2-zonemodel eller ved fagligt skøn.

8.3.5.11. *Dokumentation ved CFD-analyser*

Dokumentation ved CFD-analyser skal som minimum altid omfatte en beskrivelse af:

- Formålet med beregningen og at modellen er valid
- De opstillede acceptkriterier
- Forudsætninger for dimensioneringen, herunder geometri, materialeparametre, modellerede brandtekniske tiltag og de væsentligste parametre og modeltilpasninger
- De anvendte designbrande inkl. brandeffekt og sodproduktion, brandscenarier og svigtscenarier
- Tabel med resultater for f.eks. tiden til kritiske forhold og kapacitet af de dimensionerede brandtekniske tiltag
- Konklusion

8.3.6. *Evakueringsanalyser*

Evakueringsanalyser bruges til at estimere den tid det tager at evakuere en bygning eller et bygningsafsnit. Evakueringsanalyser bruges normalt, hvor der er mange personer og hvor der ikke er mindst en 1 cm fribredde pr. person i udgangene, samt steder hvor der er lange eller komplekse flugtveje. Typiske eksempler på bygninger, hvor evakueringsanalyser benyttes er:

- Forsamlingslokaler

- Arenaer/haller
- Stadioner
- Butikscentre
- Konferenceområder
- Kontorbygninger

Af ovenstående eksempler ses det, at bygningsafsnittene typisk vil være placeret i anvendelseskategori 1, 2 og 3, som omfatter bygningsafsnit uden sovende personer.

Beregning af evakueringstiden for sovende personer og ikke-selvhjulpne personer er behæftet med stor usikkerhed, og kan ikke udføres med udgangspunkt i denne vejledning. Usikkerheden er særlig stor omkring reaktions- og beslutningstid for sovende personer samt forhold omkring assisteret evakuering.

For bygninger i anvendelseskategori 4, 5 og 6, hvor der er sovende gæster, kan der alene foretages verificering i forhold til acceptkriteriet om af maksimal gangtid.

8.3.6.1. *Evakueringsanalyser generelt*

Evakueringsanalyser er et estimat, af den tid det tager at evakuere en bygning eller bygningsafsnit ved bestemmelse af en evakueringstid. Evakueringstiden, t_{evak} , findes som summen af flere enkelte tidselementer, som er oplistet nedenfor:

$$t_{evak} = t_{det} + t_{var} + t_{rb} + t_g$$

Hvor:

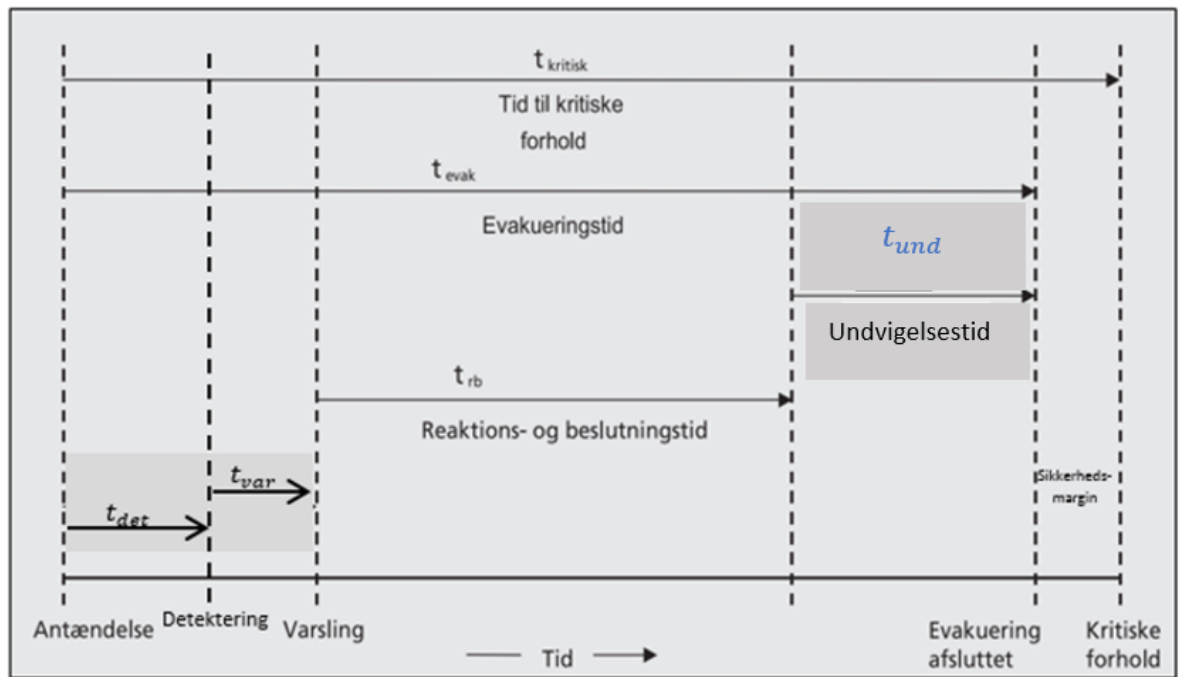
t_{det} er tiden til detekteringstiden

t_{var} er varslingstiden

t_{rb} er reaktions- og beslutningstiden

t_g er gangtiden (som omfatter bevægelses- og køtid)

Hver af de fire delelementer for evakueringstiden fremgår af Figur 8.0-18 og er beskrevet i de følgende afsnit.

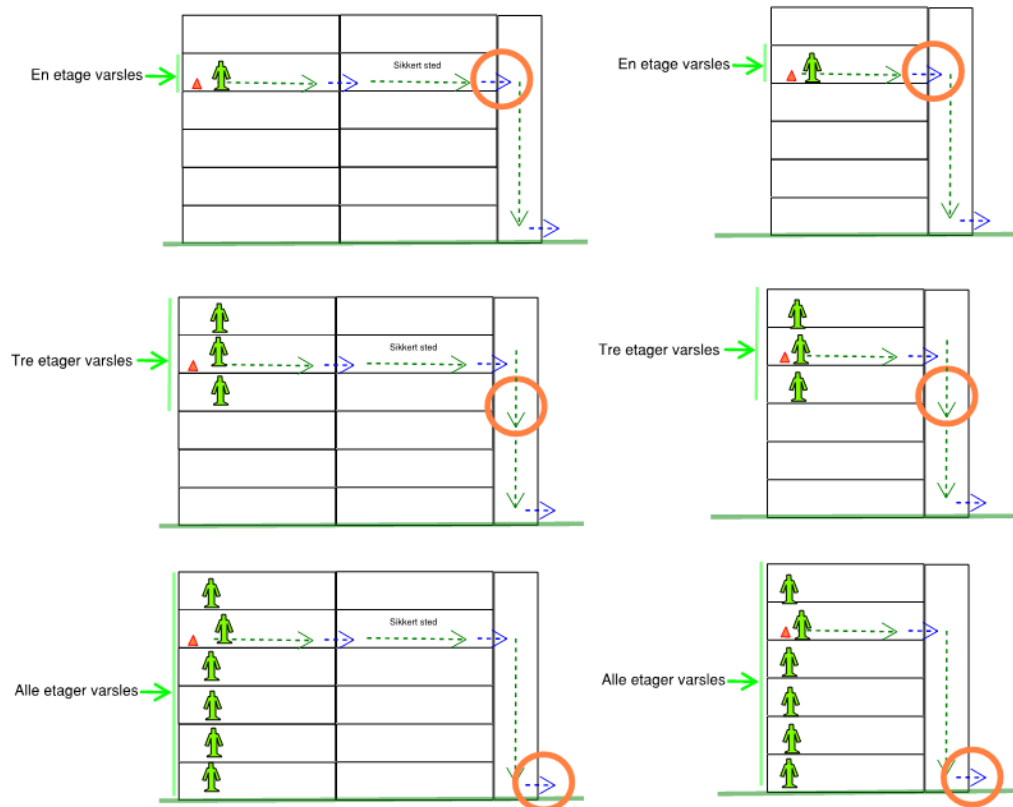


Figur 8.0-18: Evakueringstid og de enkelte tidselementer for denne, samt tiden til kritiske forhold og sikkerhedsmargin.

8.3.6.1.1 Maksimal tid til naturligt flow (supplerende acceptkriterie)

Den maksimale tid til naturligt flow er den tid, som pågår fra at de selvhjulpne personer påbegynder evakuering, indtil de har passeret den sidste udgang hvor der kan opstå køtid. Den dimensionerende flaskehals kan optræde i f.eks. en døråbning på en etage, på en trappe eller i facadedøren, og afhænger af evakueringsprincippet.

Som eksempel betragtes en kontorbygning i flere etager hvor døren til trappen har en konkret flow på 1 pers/s, trappen har en konkret flow på 1,5 pers/s og døren til terræn har en konkret flow på 2 pers/s. Afhængigt af varslingscenariet hvor hhv. en, tre og seks etager varsles, findes den maksimale tid til frit flow, som tiden fra at den af de markerede personer, passerer den sidste flaskehals (orange cirkel).



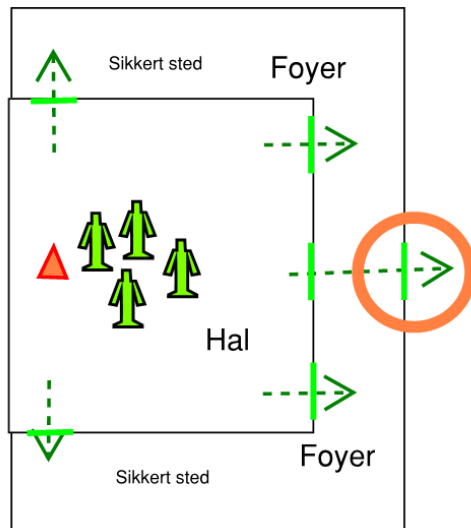
Figur 8.0-19: Eksempel på sidste flaskehals i kontorbygning ved forskellige varslingsscenarier for kontorbygning med evakuering via sikkert sted og direkte til flugtvejstrappe.

Den maksimale tid til naturligt flow, omfatter mindst gangtiden til sikkert sted, men vil typiske også omfatte tiden for passage af dele af det resterende flugtvejssystem. Den sidste dimensionerende flaskehals kan f.eks. være en dør til flugtvejstrappe, et trappeløb, en dør fra trappe til terræn i det fri eller en dør til anden brandsektion, der er regnet som sikkert sted.

Den maksimale tid til naturligt flow må ikke overstige 8 minutter.

I det naturlige flow må der ikke opstå køer, der forsinker personerne, og et naturligt flow optræder således først når personerne har passeret sidste bestemmende flaskehals i flugtvejen.

Nedenfor ses et eksempel for en hal med flugtvej gennem foyer (sikkert sted), hvor den maksimale tid til frit flow findes som tiden, fra at den sidste person i hallen passerer flaskehalsen (orange cirkel) i facadedøren.



Figur 8.0-20: Eksempel på sidste flaskehals hal med flugtvej via fælles foyer. Eksemplet er alene illustrativt og opfylder ikke krav om tilstrækkelige uafhængige flugtveje.

8.3.6.2. Begrænsninger ved evakueringsberegninger

8.3.6.2.1 Menneskelig adfærd, generelle antagelser og sikkerhedsmargin

Evakueringstiden er et udtryk for den sandsynlige tid, der går ved en optimeret evakuering af en bygning eller bygningsafsnit. Menneskelig adfærd er svær at forudsige, og det er væsentligt, at der er en tilstrækkelig sikkerhedsmargin mellem at evakuering regnes afsluttet og at der optræder kritiske forhold. Behovet for sikkerhedsmarginen er også betinget af, at der foretages en række generelle antagelser ved beregning af evakueringstiden.

8.3.6.2.2 Modsatrettede flows

Håndberegninger i dette afsnit tager ikke højde for modsatrettede flows, og kan ikke anvendes til beregning af disse efter denne vejledning. Der henvises til f.eks. CIBSE Guide: D [12], som angiver at der er behov for dobbelt så meget plads til modsatrettede flows, som for ensrettede flows.

8.3.6.2.3 Døre til og i flugtveje, der anvendes af mere end 150 personer

Hverken håndberegninger eller de kendte simuleringsprogrammer til bestemmelse af evakueringstider, kan tage højde for fastklemning af personer i døre.

Beregningsmetoderne i denne vejledning kan ikke anvendes til at dokumentere:

- at der ikke sker fastklemning i døre, der anvendes af mere end 150 personer – Døre skal dermed udføres med en fri bredde på minimum 1,2 m tilsvarende de præ-accepterede løsninger.
- at døre, der anvendes af mere end 150 personer, kan åbne mod flugtvejsretningen – Døre skal dermed åbne i flugtvejsretningen som angivet i BR 18 § 94 stk. 2.7 [13].

8.3.6.3. Evakueringsscenarier

Evakueringsscenarierne skal tage udgangspunkt i bygningsafsnittes eller bygningens brug og brandstrategien for bygningen. Der skal udvælges repræsentative

evakueringsscenarier, som afspejler den brug som bygningen er tiltænkt, og evakueringsscenarierne skal være med de brandscenarier og svigtscenarier mht. tilgængelige flugtveje og udgange, fasedelt varsling, detekteringstider, alarmbehandling mv.

Evakueringsscenarier skal afspejle de maksimale sandsynlige personbelastninger i hvert bygningsafsnit i bygningen, som er omfattet af eftervisningen. I de tilfælde hvor de samme personer kan opholde sig flere steder i den samme bygning, skal der defineres evakueringsscenarier som afspejler begge situationer.

Eksempelvis kan et kontorhus i flere etager med fælles kantine, kræve eftervisning af evakueringsscenarier for fuld personbelastning på kontoretagerne, fuld personbelastning i kanten og evt. mulige kombinationer, som ikke er omfattet af de øvrige.

Såfremt evakuering sker via sikkert område, skal det i evakueringsberegningerne vises, at der er plads til, at personerne kan opholde sig i det sikre område, indtil de kan evakuere videre til terræn i det fri.

Ved brug af automatisk zonevarsling skal etagen umiddelbart over den brandramte varslingszone, som udgangspunkt varsles samtidigt med den brandramte etage. Dette skyldes at der er en forøget risiko for, at branden eller røgen vil sprede sig opad forholdsvis hurtigt. I modsat fald skal der udføres en følsomhedsanalyse, som viser konsekvensen, hvis der iværksættes evakuering af den overliggende etage umiddelbart efter varslingen af den første etage.

Ved brug af automatisk zonevarsling, hvor der fra en evakueringszone flygtes gennem en anden evakueringszone, skal der foretages en følsomhedsanalyse. Følsomhedsanalysen skal belyse konsekvensen af, at de personer, som oprindeligt opholdt sig i det sikre område, påbegynder evakuering tidligt, som følge af at personer evakuerer gennem området.

Der skal altid udføres et evakueringsscenarie for totalevakuering, hvor hele bygningen evakueres samtidig.

8.3.6.3.1 Personbelastning

Personbelastningen skal afspejle det sandsynlige maksimale antal personer, som samtidigt opholder sig i det eller de bygningsafsnit, der er omfattet af evakueringssimuleringen. For at bestemme personbelastningen i et bygningsafsnit, kan der tages udgangspunkt i hvad bygningen designes til. Dette kan f.eks. være antal skoleelever og personale for en skole, antal ansatte i en kontorbygning eller kapaciteten af en koncertarena inkl. personale. Hvor disse tal ikke kendes kan der tages udgangspunkt i

Tabel 8.0-12 baseret på NFPA 101 – Life Safety Code Handbook [14], ved fastsættelsen af personbelastningen i de enkelte rum.

Udkast

Tabel 8.0-12: Personbelastning til design af forskellige bygningsafsnit ud fra deres funktion.

Område	m ² /pers	Pers/m ²
Forsamlingslokaler:		
Høj densitet uden faste sæder	0,65	1,54
Lavere densitet uden faste sæder	1,4	0,71
Bænke	1 pers/45,5cm	
Sæder	1 pers/sæde	
Køkkener	9,3	0,11
Biblioteker områder med bogreoler	9,3	0,11
Biblioteker læsesale	4,6	0,22
Svømmehaller (pr. m ² vandoverflade)	4,6	0,22
Træningslokaler med træningsmaskiner	4,6	0,22
Træningslokaler uden træningsmaskiner	1,4	0,71
Scener	1,4	0,71
Casinoer og lignende	1	1,00
Skøjtehallen	4,6	0,22
Kontorlokaler	14	0,07
Daginstitution	3,3	0,30
Undervisningslokaler:		
Klasseværelser	1,9	0,53
Faglokaler, laboratorier osv.	4,6	0,22
Salgslokaler	3,7	0,27

8.3.6.3.2 Fordeling af personer på rum og udgange

Til bestemmelsen af køtiden er det vigtigt, at medregne fordelingen af personer på de enkelte udgange.

Som udgangspunkt skal personers startposition fordeles i bygningen, ud fra deres mest sandsynlige placering. Ved evakuering fordeles personerne som udgangspunkt jævnt på antallet af flugtveje, idet døre der anvendes dagligt, er placeret fordelagtigt eller på anden vis virker attraktive kan tildeles en større personandel.

De primære adgangsveje bør dimensioneres til 2/3 af den totale personbelastning i rummet ved en evakuering, fordi personer ofte søger mod de udgange de kender, og ved fører til sikkerhed.

Såfremt der afviges fra denne fordeling af personer, skal der gøres særlige tiltag, for at gøre de øvrige udgange mere attraktive, for personerne med ophold i bygningen.

Eksempler er:

- Personale, der kan anviser flugtveje.
- Regelmæssig afholdelse af evakueringsøvelser.
- Flugtskilte.
- Glasfelter i døre der giver udsyn til flugtvejssystem eller til terræn i det fri.
- Anvendelse af flugtvejssystemet i daglig brug.
- Tilsvarende tiltag som øger personernes kendskab til udgangen.

- Øget bredde på sekundære flugtvejsdøre

8.3.6.3.3 Svigtanalyser

Der skal udføres svigtanalyser, som belyser konsekvensen af de mest kritiske svigt i flugtvejssystemet. De mest kritiske svigt, er typisk blokering af den bredeste udgang eller flugtvej i grundscenarierne, den mest benyttede flugtvej i grundscenarierne, eller hovedadgangsvejen.

Udgange og flugtveje, der har en indbyrdes afstand på mindre end 5 meter, betragtes som samme flugtvej ved svigt.

Eksempelvis kan den bredeste udgang være fem dobbeltdøre, hver med en fribredde på 1,2 meter, der er placeret lige ved siden af hinanden. Svigt af bredeste flugtvej, vil således omfatte alle fem dobbeltdøre.

8.3.6.4. Detekteringstiden

Detekteringstiden defineres som tiden fra antændelse til branden detekteres. Detekteringstiden vil som udgangspunkt findes ud fra CFD-modeller, 2-zonemodeller eller håndberegninger og der henvises til afsnit 8.3.5.8 og 8.8.1.7 for nærmere beskrivelse. Hvis der foretages signalbehandling f.eks. i detektorer medregnes denne i detekteringstiden.

Ovenstående detekteringstid forudsætter, at der i byggeriet er et automatisk varslingsanlæg, der igangsætter varlingssignalet.

Hvis der ikke er et automatisk varslingsanlæg, vil detekteringstiden være den tid, der går fra branden starter, til brandkendetegn erkendes af tilstedeværende personer, som vil kunne igangsætte varslingsanlæg eller foretage anråb. Da denne tid ikke umiddelbart kan bestemmes, kan områder uden varslingsanlæg ikke anvendes til eftervisning af personsikkerhed efter denne vejledning.

8.3.6.5. Varlingstiden

Varlingstiden defineres som tiden fra en brand er detekteret, til varlingen er iværksat eller påbegyndt.

Normalt vil varling ske på følgende tre måder:

- automatisk varslingsanlæg, hvor varlingssignalet aktiveres via detektorer
- manuelt varslingsanlæg, hvor personer i byggeriet skal aktivere et varlingstryk for at aktivere varlingssignalet
- intet varslingsanlæg, hvor varling skal ske ved anråb eller andre lignende metoder

8.3.6.5.1 Automatisk varslingsanlæg

Såfremt der er tidsforsinkelse af varlingen, som det er kendt fra f.eks. arenaer/haller og indkøbscentre, vil tiden til tidsforsinket alarmbehandling således være en del af varlingstiden. Undtaget kan være varslingsanlæg som, ud over tidsforsinkelse, er udført med flerdetektorafhængighed, hvor varlingen opstarter enten efter tidsforsinkelsens udløb eller aktivering af anden detektor.

Afspilning af varlingssignalet er ligeledes en del af varlingstiden. For tonevarling, som opfattes umiddelbart, kan bidraget fra denne regnes som 5 sekunder. For talevarling

svarer bidraget til første gennemspilning på hovedsproget, som maksimalt bør være 20 sekunder.

8.3.6.5.2 Manuelt varslingsanlæg

Ved et manuelt varslingsanlæg vil varslingen først kunne aktiveres når tilstedeværende personer har erkendt og detekteret en brand. Det manuelle varslingsanlæg kan ligesom det automatiske varslingsanlæg etableres med tone- eller talevarsling, hvorfor de samme tider efter aktivering af varslingsanlægget er de samme for det manuelle varslingsanlæg.

8.3.6.5.3 Varsling uden varslingsanlæg

Hvis der ikke er etableret et varslingsanlæg i byggeriet, vil varsling ske ved anråb eller lignende metode. Dette sker ved at den eller de personer der har detekteret/erkendt brandkendetegn råber brand og sikrer sig at alle i det område hvor branden er opstået.

8.3.6.6. Reaktions- og beslutningstiden

Reaktions- og beslutningstiden defineres som tiden, hvor personer skal fortolke og forstå varslingssignalet, inden de træffer en beslutning om at bevæge sig mod udgangene og ad hvilken vej. Reaktions- og beslutningstiden er kompleks og kan ikke defineres entydigt, og afhænger af mange forskellige faktorer.

Nedenfor er angivet faktorer, der som minimum skal inddrages i overvejelserne i relation til bestemmelsen af reaktions- og beslutningstiden:

- Hvorvidt personerne er stedkendte, vågne og i stand til at evakuere sig selv.
- Varslingstype (tone, tale, optisk, via personale)
- Forberedelsesniveauet af personalet eller medarbejderne i bygningen
- Informationsniveauet af varslingssignalet
- Om der er tydelige brandkendetegn (f.eks. røg, flammer, lyde)

Personer opfatter og reagerer på disse faktorer i forskelligt temp, og reaktions- og beslutningstiden for en given gruppe personer er derfor en fordeling henover tid.

Fordelingen følger tilnærmelsesvist en log-normal fordeling, idet en stor del af personerne i et område vil igangsætte evakueringen efter de første personer er begyndt at bevæge sig.

Til illustration henvises til PD 7974-6:2019 [15], som refererer forsøg i brandmæssigt veldrevne bygninger, der viser en forskel mellem 1 % og 99 % på 20-50 sekunder for fem forskellige dagopholdsbygninger.

I evakueringsanalyser, hvor køtiden er den betydende del af gangtiden, kan reaktions- og beslutningstiden estimeres som tiden til 1 % af personerne har reageret og besluttet sig for at igangsætte en evakuering [15].

Tiden, til 1 % af personerne har reageret og besluttet sig for at evakuere, kan aflæses af nedenstående Tabel 8.0-13: Reaktions- og beslutningstider baseret på bygningsafsnittets funktion og typen af varsling., der afhænger af bygningsafsnittets funktion og typen af

varsling. Reaktions- og beslutningstiderne er baseret på værdier angivet i Insta TS 950 [16] samt PD 7974-6:2019 [15].

Tabel 8.0-13: Reaktions- og beslutningstider baseret på bygningsafsnittets funktion og typen af varsling.

Bygningsafsnittets funktion	Varslingstype	Reaktions- og beslutningstid [min:sek]
Storcenter	Tone	3:30
	Tale	2:00
Kontorer	Tone	2:00
	Tale	1:00
Undervisning	Tone	2:00
	Tale	1:00
Natklubber og lign.	Tone	5:00
	Tale	3:00
Hospitaller, plejehjem og lignende (kun for vågent personale)	Personalevarsling	1:00
	Tone	2:00

Såfremt personerne kan se branden og er i et rum, hvor der ikke forventes røg, flammer eller lignende, kan reaktions- og beslutningstiden fastsættes til 60 sekunder, samtidig med at varslingstiden reduceres til 0 sek (se afsnit 8.3.6.6.3).

8.3.6.6.1 Forberedelsesniveau og personale (informativt)

Reaktions- og beslutningstiden afhænger i høj grad af hvor forberedte og vidende personerne i bygningen er, set i forhold til den korrekte/ønskede reaktion ved varsling. Denne reaktion beror i høj grad af, om personer eller personalet ved, hvad de skal foretage sig i tilfælde af en brand.

Evakueringsøvelser er en måde at øge sandsynligheden for denne ønskede reaktion, og er derfor et positivt tiltag. Dette gælder særligt for bygninger omfattet af §§ 147-148 i BR18 [13] hvilket bl.a. omfatter forsamlingslokaler, undervisningslokaler og butikker.

Såfremt bygningen bruges af personer, der ikke nødvendigvis har kendskab til bygningsafsnittets flugtveje, og der er personale tilstede som f.eks. ved koncerter skal personaleantallet i forhold til gæster være rimeligt. Om forholdet mellem personale og gæster er rimeligt, beror på en konkret vurdering og den forventede brug af bygningen. Heri indgår forventet opførsel og gæsternes tilstand. Således kræves der mere personale såfremt gæster er f.eks. alkoholpåvirkede og i et miljø med højt lydniveau, end hvis personer i bygningen er ædru, opmærksomme og i et miljø hvor lydniveauet er forholdsvis lavt. For denne vurdering henvises der til principperne for udarbejdelse af sikkerhedsplaner, der er obligatoriske for 'større udendørs musikarrangementer og lign.' [17].

Inddragelser af ovenstående kan ikke anvendes til eftervisning efter denne vejledning.

8.3.6.6.2 Varslingens informationsniveau

Varslingens informationsniveau, har betydning for hvor hurtigt personer opfatter en situation som værende farlig.

Tonevarsling giver et lavt informationsniveau og personer, som hører denne varsling, har derfor brug for længere tid til at fortolke denne type af varsling. Derfor er reaktions- og beslutningstiden længere for tonevarsling end for talevarsling.

Talevarsling med generiske talemødelser vil ofte være mere effektive end tonevarsling i forhold til at sikre en kort reaktions- og beslutningstid. Et eksempel på en simpel generisk talevarsling kan være: "Der er opstået en kritisk situation i bygningen. Forlad venligst bygningen".

Informativ varsling er talevarsling, som giver præcise oplysninger og instruktioner, og kan være mere effektive i forhold til at sikre en kort reaktions- og beslutningstid end generiske talemødelser.

En informativ talevarsling, skal som minimum give information om, hvad der er detekteret, hvor det er detekteret og anvisning om hvad personer skal gøre. Det er i den henseende vigtigt, at anvisningen baserer sig på alment kendte termer og betegnelser. En informativ talevarsling kan ikke anvendes efter denne vejledning.

8.3.6.6.3 Tydelige brandkendetegn

Personer, som er i visuel kontakt med branden, reagerer hurtigere end personer, der ikke kan se branden eller tydelige brandkendetegn, uanset om varslingen er aktiveret eller ej. Der henvises i øvrigt til 'Tid för utrymning vid brand' [18].

Reaktions- og beslutningstiden kan sættes til 60 sekunder [18] og varslingstiden til 0 sekunder, når følgende forudsætninger alle er opfyldt:

- Personer er vågne og opmærksomme på f.eks. flammer eller røg (i et miljø hvor det ikke forventes).
- Personer er i samme rum som branden.
- Personer er selvhjulpne og i stand til ved egen hjælp at bringe sig i sikkerhed.
- Der er gode oversigtsforhold, så at branden kan ses fra hele rummet.

Tydelige brandkendetegn er f.eks. sigtbarhed nedsat til 20 m evalueret i et plan placeret i 4/5 af rumhøjden [19].

8.3.6.7. Gangtiden

Gangtiden er defineret, som tiden fra personer er begyndt at bevæge sig, til de er i sikkerhed. Gangtiden er således den tid det tager at tilbagelægge afstanden til terræn i det fri eller sikkert område, inkl. eventuel køtid foran udgange eller flaskehalse i flugtvejsruten.

Gangtiden kan bestemmes ud fra håndberegninger eller computersimuleringer, og er beskrevet i de følgende afsnit.

8.3.6.7.1 Valg af metode

Den anvendte metode skal være velegnet og valideret til anvendelse for beregning eller simulering af den konkrete problemstilling. Simuleringer vil ofte være velegnede til undersøgelse af situationer hvor flere persongrupper mødes i fælles flugtveje.

8.3.6.7.2 Håndberegninger

Håndberegninger er en simplificeret tilgang til at estimere gangtiden i en evakueringssituation. Gangtiden beregnes som summen af bevægelsestid og køtid ud fra nedenstående formel:

$$t_g = t_b + t_{kø} = \frac{l}{v} + \frac{n}{f_k}$$

Hvor

l er ganglængden [m]

v er ganghastigheden [m/s]

n er antal personer [pers]

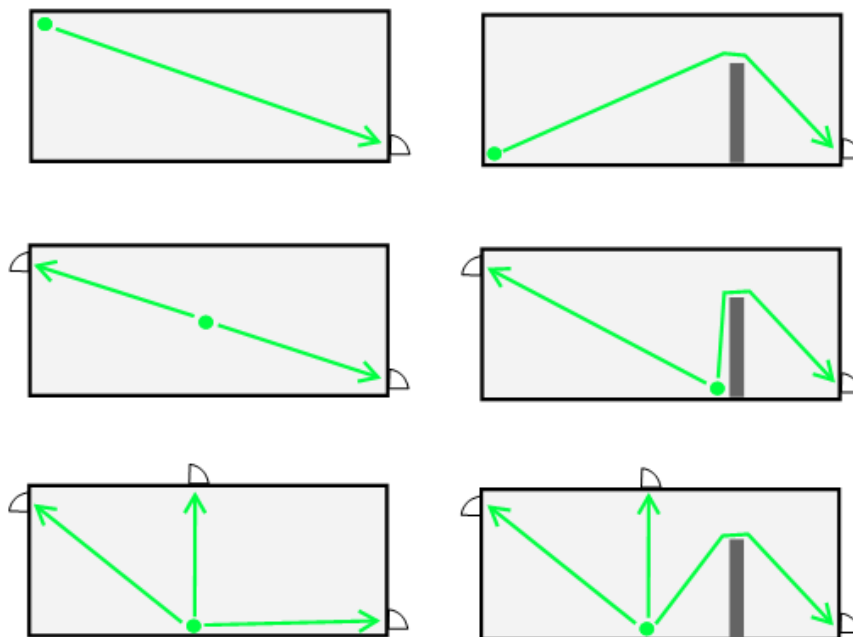
f_k er det konkrete flow gennem udgange [pers/s].

I bygningsafsnit med relativt mange personer vil bevægelsestiden ofte være mindre end køtiden. Idet der dannes kø, kan der principielt ses bort fra bevægelsestiden, men dette må ikke medtages til eftervisning efter denne vejledning. Der henvises til, at bevægelsestiden i stedet medtages i den endelige vurdering af sikkerhedsmarginens størrelse som er beskrevet i 8.3.7.

Bestemmelsen af de forskellige elementer for input til håndberegninger er givet i det nedenstående.

8.3.6.7.2.1. Ganglængde

Ganglængden er den længde, som personer skal tilbagelægge for at komme fra deres startposition til terræn i det fri eller til sikkert område. Ganglængden kan bestemmes som den korteste afstand til en udgangsdør eller udgang, under hensyntagen til inventar og indretning.



Figur 8.0-21: Længste afstand under hensyn til inventar og indretning

8.3.6.7.2.2. Ganghastighed

Ganghastigheden har en direkte sammenhæng med persondensiteten, så personer bevæger sig langsommere med stigende persondensitet.

Ved brug af hånberegninger og for persondensiteter mindre end 0,54 pers/m² (1,85 m²/pers) kan følgende værdier bruges for ganghastigheder. Disse værdier bygger på anbefalingerne i Insta TS 950 [16] og PD 7974-6:2019 [15].

Tabel 8.0-14: Ganghastigheder på vandrette flader ved densiteter mindre end 0,54 pers/m²

Bevægelse	Ganghastighed langs planet
Vandret	1,2 m/s
Op ad trapper*	0,6 m/s
Ned ad trapper	0,75 m/s

* max en etage op

For persondensiteter højere end 0,54 pers/m² er ganghastigheden givet ved:

$$v = k - a \cdot k \cdot D$$

Hvor:

D er persondensiteten [pers/m²].

$a = 0,266 \text{ m}^2/\text{pers}$ [konstant].

$k=1,4$ for døre, korridorer, gange og ramper.

$k = 0,86 \sqrt{\frac{G}{S}}$ for trapper (G er trappens grund. S er trappens stigning).

$k = 1,07$ for en trappe med grund på 280 mm og stigning på 180 mm.

For densiteter over 2,5 pers/m² giver ligningen lave ganghastigheder. Det må derfor vurderes om evakueringssituationen i disse tilfælde reelt modsvarer en kø. I dette tilfælde kan ganghastigheden bestemmes svarende til densiteter for 2,5 pers/m² for simple beregningsscenarier.

Persondensitet til bestemmelse af ganghastigheden

Persondensiteten, D , skal bestemmes ud fra antallet af personer indenfor det frie areal, som personerne sandsynligt vil opholde sig på i evakueringssituationen. For mindre rum, kan personer regnes jævnt fordelt i rummet. I større rum og i rum med ujævn personfordeling, skal det vurderes hvor stort et areal personerne vil opholde sig på i evakueringssituationen.

8.3.6.7.2.3. Antal personer

Personantallet er fastlagt som en del af evakueringsscenarierne, se afsnit 8.3.6.3.

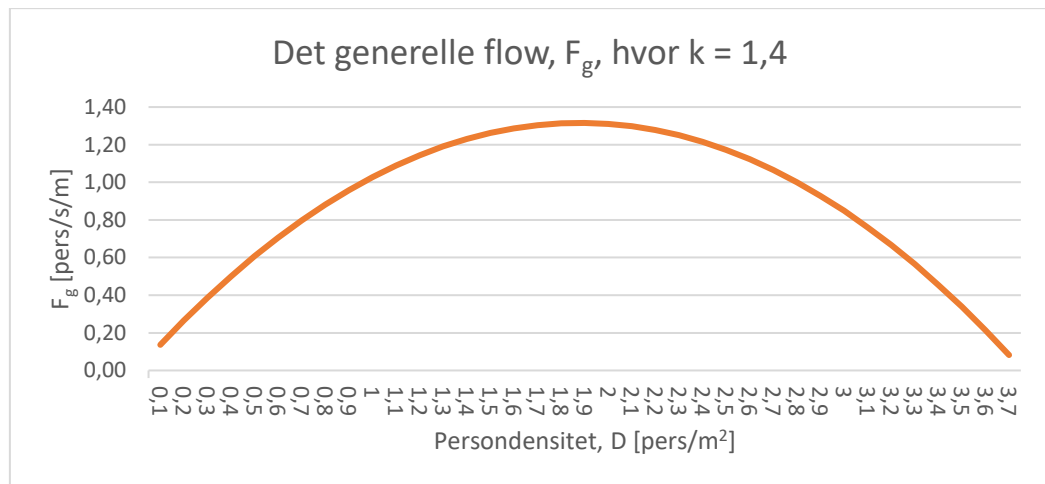
8.3.6.7.2.4. Flow

Ved hånberegninger skelnes der mellem det generelle flow og et konkret flow. Det generelle flow er givet som antal personer pr. sekund pr. meter [pers/s/m] udgang/dør/flaskehals, mens det konkrete flow er givet som antal personer pr. sekund [pers/s] for en konkret udgang/dør/flaskehals.

Det generelle flow F_G [pers/s/m], som er antallet af personer der bevæger sig gennem en flaskehals, afhænger af persondensiteten, og er givet ved følgende ligning:

$$F_G = vD = (1 - \alpha D)kD$$

Kurven for det generelle flow som funktion af persondensiteten, er parabelformet og har et maksimum ved en densitet på 1,9 pers/m².



Tabel 8.0-15: Kurve for generelt flow ved en k-værdi på 1,4 svarende til flow gennem døre, korridorer, døre og ramper

For persondensiteter højere end 2,5 pers/m² kan flowet fastsættes som det maksimale design flow for flaskehalse tilsvarende 8.3.6.7.3.3, idet der skal medregnes grænselag i flaskehalsen som beskrevet nedenfor.

Det konkrete flow, F_K [pers/s], ved en flaskehals kan bestemmes som det generelle flow, ganget med den effektive bredde, B_e [m], af flaskehalsen.

$$F_K = F_G B_e = (1 - \alpha D)kD \cdot B_e$$

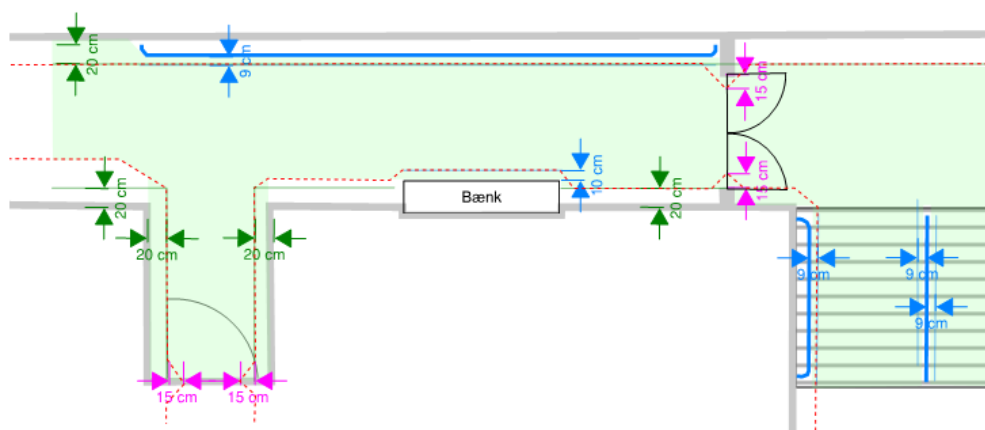
Den effektive bredde, er givet som en reduceret geometrisk fri bredde af flugtvejen, som følge af et grænselag de steder hvor der optræder forhindringer eller afgrænsninger af flugtvejen. Størrelsen af grænselaget varierer, og bestemmes af hvilket element personerne passerer (f.eks. en trappe, dør, eller korridor). Hvis der er håndlister i gange eller trapper, skal den frie bredde af flugtvejen måles mellem håndlisterne.

Tabel 8.0-16: Grænselagsstørrelse for forskellige flaskehalselementer

Flaskehalselement	Grænselag [cm]
Trapper – væg eller trinkant ^a	15
Håndliste ^a	9
Teater-/stadionstolerækker	0
Væg i gang ^a	20
Forhindringer i flugtvej	10
Døre	15
Vægge i buengange ^a	15

^a I rum med håndlister bruges den værdi, der giver den mindste effektive bredde.

Grænselagens størrelse er baseret på SFPE håndbogen [20] og skal medregnes i begge sider af flaskehalsen.



Figur 8.0-22: Eksempel på fastsættelse af effektiv bredde (rød stiple) i flugtvejssystem med vægge (med og uden håndlister), forhindringer og døre og trapper.

8.3.6.7.2.5. Personers fordeling på udgange

Fordeling af personer i forhold til udgange skal følge beskrivelsen i afsnit 8.3.6.3.2.

8.3.6.7.3 Simuleringer

Gangtiden kan bestemmes ud fra computersimuleringer hvor personers (benævnes agents) bevægelse gennem en bygning kan simuleres individuelt og med større detaljeringsgrad end ved anvendelse af håndberegninger.

Simuleringsprogrammet skal være agentbaseret, for at kunne anvendes til eftervisning efter denne vejledning.

De agentbaserede simuleringsprogrammer kan opdeles i nogle overordnede typer, alt efter hvilke metodetyper de er baseret på. Metodetyperne vil være beskrevet i den tekniske manual til simuleringsprogrammet.

Der kan benyttes to metodetyper til at definere de områder, som personer kan bevæge sig gennem. De to metodetyper benævnes *continuous space* eller *grid/node*. Continuous space baserede modeller betragter de flader, hvorpå personer kan bevæge sig, som et fortløbende domæne og agenternes bevægelse afspejler dermed bygningsafsnittets virkelige afgrænsninger.

Grid/node baseret betyder, at beregningsdomænet inddeles i knudepunkter, hvor agenter kan bevæge sig fra et knudepunkt til det næste. Såfremt softwaret er Grid/node baseret skal knudepunktsafstande sættes til mindst 0,5 x 0,5 m for horisontale planer og mindst 30 % højere for planer/trapper der går op eller nedad.

Den anden metodetype, som simuleringsprogrammer kan opdeles efter, er hvilken bevægelsesalgoritme, personerne bevæger sig efter. Continuous space modeller, der er valideret på nuværende tidspunkt, fungerer overvejende ved enten *social force model* [21] eller *optimal steps model* (OSM) [22]. For grid/node baserede simuleringsprogrammer, kan der maksimalt være en agent i hvert knudepunkt og agenter kan kun bevæge sig til et frit knudepunkt. Simuleringsprogrammer der er baseret på andre metodetyper, kan ikke anvendes til eftervisning efter denne vejledning.

Såfremt der benyttes et simuleringsprogram, som benytter stokastiske variable, skal der udføres et passende antal simuleringer for at sikre, at der ikke kun regnes på en kombination, som er best-case. Et "passende antal" afhænger af spredningen af resultaterne, for hvert enkelt evakueringsscenarium.

Analysen af evakuerings-scenariet kan herefter baseres på den simulering, der har en gangtid tættest på medianen af de gennemførte simuleringer for evakuerings-scenariet. Spredningen for evakuerings-scenariet skal inddrages i vurderingen af sikkerhedsmarginen, som beskrives i afsnit 8.3.7.

8.3.6.7.3.1. Inputparameter til simuleringer

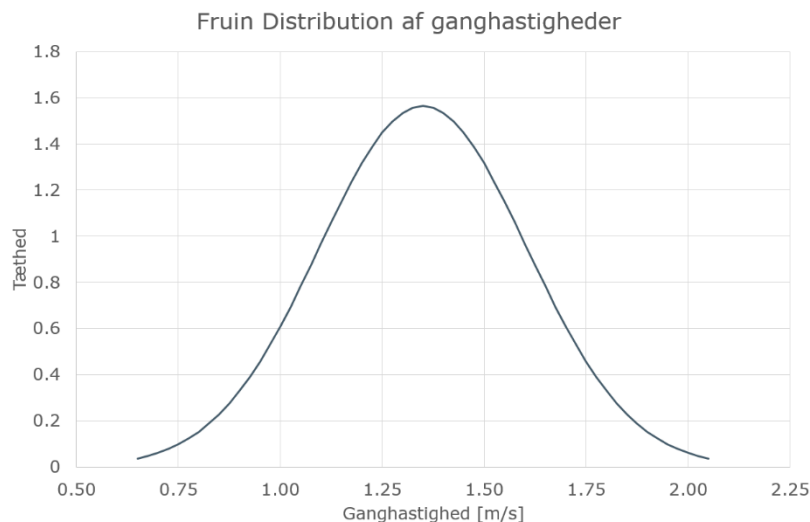
Evakuerings-simuleringer udført med computersoftware afhænger af de input, som skal gives i programmet. Ved opbygning af modellen for simulering af gangtiden ved evakuering, skal der som minimum tages stilling til følgende inputparametre:

- Maksimal ganghastigheder
- Design flows
- Maksimal densiteter og personers størrelse
- Fordeling af personer i forhold til udgange

8.3.6.7.3.2. Ganghastighed

Til fastsættelse af de maksimale ganghastigheder kan Tabel 8.0-17 bruges. Det anbefales dog at benytte en distribution af ganghastigheder, da dette bedre afspejler den forskellighed, der er for personers ganghastigheder.

Der henvises til den såkaldte 'Fruin distribution' af ganghastigheder [23] som input for ganghastigheder til evakuerings-simuleringer. 'Fruin distribution' er givet som en normalfordeling, med en middelværdi på 1,35 m/s, en spredning på 0,255 m/s, samt maksimal og minimale ganghastigheder på hhv. 2,05 m/s og 0,65 m/s, som vist nedenfor i Figur 8.0-23.



Figur 8.0-23: Fordelingen af ganghastigheder i 'Fruin distribution' [19].

8.3.6.7.3.3. Maksimale design flows

Nedenstående maksimale design flows for flaskehalse i Tabel 8.0-17, som f.eks. døre, indsnævring, trapper og lignende, skal benyttes ved evakueringssimuleringer. PD 7974-6:2019 [15].

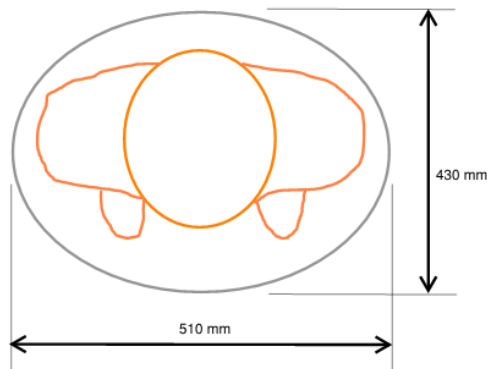
Tabel 8.0-17: Maksimale design flows for evakueringssimuleringer.

Flaskehalselement	Maksimalt design flow [pers/s/m]
Døre, indsnævring i gange, buegange og lignende.	1,30
Trapper Grund/stigning: 280/180mm	1,00
Trapper Forhold mellem grund (G) og stigning (S).	$0,86 \sqrt{\frac{G}{S}}$

8.3.6.7.3.4. Maksimale persondensiteter

De maksimale persondensiteter [pers/m²] afhænger af størrelsen på de involverede personer og den kraft, de bliver presset sammen med. En persons størrelse afhænger af flere faktorer, bl.a. alder, køn, vægt, påklædning og om personen bruger hjælpemidler til at gå, eller har bagage med.

Den plads en person optager af gulvarealet skal modsvarer en ellipse. Denne ellipses akser skal beskrives som mindst 510 mm (bredde) og 430 mm (dybde) for en person uden bagage eller behov for hjælpemidler CIBSE Guide D [12]. Dette er vist i Figur 8.0-24.



Figur 8.0-24: Det typiske område som en person optager

Den maksimale persondensitet kan således bestemmes på baggrund af denne ellipse, idet personer maksimalt kan dække 92 % af et areal [20]. Den maksimale persondensitet kan derfor højst være 5,3 pers/m² baseret på ovenstående ellipse.

8.3.6.7.3.5. Fordeling af personer i forhold til udgange

Fordeling af personer i forhold til udgange skal følge beskrivelsen i afsnit 8.3.6.2.3.

8.3.6.8. *Præsentation af resultater*

Ved præsentation af resultater, er det vigtigt at disse fremstår entydigt i grafer eller tabeller. Tabelværdierne kan ofte understøttes af billeder, taget fra evakueringsmodellen.

8.3.6.9. *Validering af analyse og resultater*

Der skal foretages validering af analysen i form af aflæsning af outputdata fra simuleringsprogrammet, herunder kontrol af:

- overensstemmelse mellem det forudsatte personantal og antal personer som har passeret sidste udgang i modellen samt fordeling på udgange.
- at fasedelt varsling iværksættes som forudsat
- at de primære resultater virker rimelige f.eks. ved kontrolberegning med håndberegning eller ved fagligt skøn.

8.3.6.10. *Dokumentation ved evakueringsanalyser*

Dokumentation ved evakueringsanalyser skal som minimum altid omfatte en beskrivelse af:

- Formålet med beregningen og at modellen er valid
- Forudsætninger for dimensioneringen, herunder geometri og modeltilpasninger
- De anvendte evakueringsscenarier og svigtscenarier inkl. varslingsfaser og maksimale forsinkelser.
- Antal personer, og hvordan de er fordelt ved evakueringsstart
- Personkarakteristika
 - Ganghastighed i vandret plan og på trapper
 - Størrelse af personer eller grid/knudepunkt

- Fordeling af agenter på rum og på udgange
- Fribredde af de benyttede flugtvejsdøre og om de betragtes som værende primære eller sekundære
- Design flow for flugtvejsdøre/flaskehalse/indsnævninger samt trapper og/eller ramper
- Tabel med resultater for evakueringsscenarier, herunder:
 - Varslingstid, reaktions- og beslutningstid og gangtid
 - Spredning på resultater for bevægelsestid
 - Samlet evakueringstid for hvert evakueringsscenarium og svigtscenarium
 - Tid til evakuering til evt. sikkert område.
 - At acceptkriteriet for bevægelsestiden i naturligt flow ikke overskrides
 - Tid til total evakuering
- Konklusion

8.3.7. Vurdering af tiderne til kritiske forhold imod evakueringstiderne for grund- og svigtscenarierne og fastlæggelse af sikkerhedsmargin

Baseret på de gennemførte analyser af brand- og røgspredning, som har fastlagt tiden til kritiske forhold, og evakueringsanalyser, der har fastlagt evakueringstiden, kan sikkerhedsmarginen fastslås.

Sikkerhedsmarginen beregnes som differencen mellem evakueringstiden og tiden til kritiske forhold.

Sikkerhedsmarginen skal angives for alle relevante kombinationer af de opstillede brandscenarier og evakueringsscenarier inkl. svigtscenarier.

Sikkerhedsmarginen vil ofte være højere for et grundscenarium end for et svigtscenarium, idet der ved svigtscenarier enten vil være kortere tid til der opstår kritiske forhold eller være en forlænget evakueringstid. Sikkerhedsmarginen skal altid være positiv..

Der er ikke specifikke krav til størrelse af sikkerhedsmarginen i grund- og svigtscenarier men den skal afspejle bygningens anvendelse, indretning, brandsikringstiltag, driftstilstand mv.

8.4.0. Brandteknisk dimensionering af bygningsdele

8.4.1. Eftervisning af bygningsdele

I BR18 og de tilhørende vejledninger stilles der krav til bygningsdeles bærende- og adskillende egenskaber, og herunder krav til de materialer bygningsdelen udføres af.

Ofte vil hovedparten af dokumentationen for en bygningsdels adskillende funktion, kunne udgøres af en leverandørs klassifikationsrapport for den pågældende bygningsdel, som er udarbejdet på baggrund af en brandprøvning. Dog kan der opstå situationer i et projekt, hvor det kan være nødvendigt at beregne den adskillende funktion for en konkret bygningsdel.

Dette afsnit beskriver metoder til hvordan adskillende bygningsdele anvendt i specifikke projekter kan eftervises. Dette kan f.eks. være eftervisning af brandmodstandsevnen i en given bygningsdel, der skal fungere som adskillende væg eller etageadskillelse, og skal udgøre en brandcelle- eller brandsektionsadskillelse.

Dokumentation af brandsikring af bærende bygningsdele behandles ikke i denne vejledning, da dette arbejde er omfattet af den certificeret statikers virke. Der henvises til Bygningsreglementets kapitel 15 – Konstruktioner.

Der kan være grænseflader omkring brandsikring af bygningsdele, som vil kræve koordinering mellem den certificerede brandrådgiver og den certificerede statikers arbejdsområder.

Dette kan f.eks. være i tilfælde hvor en brandrådgiver efterviser, at en adskillende bygningsdel beskytter en bærende bygningsdel eller hvor en brandrådgiver beregner en varmepåvirkning af en bærende bygningsdel f.eks. i en CFD-model. I begge tilfælde er arbejdet omfattet af den certificerede statikers virke, og behandles ikke videre i denne vejledning.

8.4.1.1. Adskillende bygningsdele

De beskrevne beregningsmetoder kan benyttes for hovedparten af lagopbyggede adskillende bygningsdele, men der kan være nogle typer bygningsdele, hvor dette afsnit ikke kan finde anvendelse, fordi der er supplerende krav til bygningsdelen. Dette kan f.eks. være mekanisk lastpåvirkningsklasse M [Tung Bygningsdel], hvor bygningsdelen under brandprøvning vil skulle udsættes for en mekanisk last, som angivet i DS/EN 1363-2 [24].

Derudover skal opmærksomheden henledes på, at alle adskillende bygningsdele skal kunne opretholde deres egen bæreevne i den tid bygningsdelen har en adskillende funktion.

8.4.1.2. *Acceptkriterier*

Ved eftervisning af adskillende bygningsdele, skal det påvises at bygningsdelens integritet, E, (adskillende/flammende- og røgstoppende funktion) og isoleringsevne, I, er tilstrækkelig.

Isoleringsevnen skal eftervises ud fra en standardiseret beregningsmetode, som f.eks. Eurocode 5 for konstruktioner med træ. Tætheden omkring samlinger skal udføres så integriteten og isoleringsevnen ikke mindskes lokalt. Ligeledes skal gennemføringer sikres.

Hvis en adskillende bygningsdel eftervises af have en tilstrækkelig isoleringsevne i et tidsrum, vil kravene til integritet, E, ligeledes være opfyldt, såfremt monteringen af bygningsdelen følger de anvisninger der er anvendt ved prøvningen af bygningsdelen.

En bygningsdels integritet kan opretholdes hvis bygningsdelen udføres efter montageanvisninger beskrevet i henhold til:

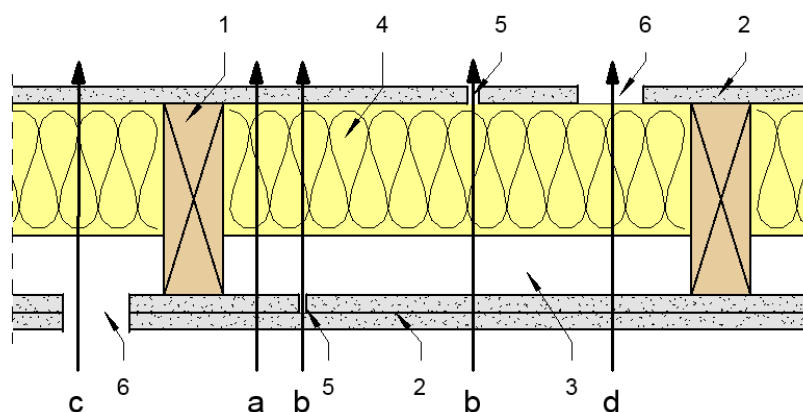
- Eurocode 5 del 1-2 [25] eller,
- Alment teknisk fælleseje eller,
- En leverandørs dokumentation på de enkelte dele i den sammensatte bygningsdel. [26]

Herefter udgør eftervisningen af, om en bygningsdel klasse EI på om bygningsdelen kan overholde acceptkriterierne for hvor varm bygningsdelen må blive, på den ikke-eksponerede side ved brandpåvirkning.

Acceptkriterierne for isolering I af bygningsdel er en:

- Den gennemsnitlige temperaturstigning må maksimalt være på maksimalt 140 K for det generelle tværsnit i bygningsdelen. Normalt er dette beregnet for et tværsnit placeret mellem de bjælker/søjler som de forskellige lag monteres på.
- Temperaturstigning maksimalt på 180 K på den ueksponerede side, herunder ved samlinger, f.eks. stødsamlinger af plademateriale, fuger, installationshuller mm.

Figur 8.0-25 beskriver de forskellige varmeovergangsveje. Acceptkriteriet for varmeovergangsvej a er en temperaturstigning på maksimalt 140 K, og acceptkriteriet for varmeovergangsvej b - d er en temperaturstigning på maksimalt 180 K.



Figur 8.0-25 - Illustration af varmeovergangsveje i en lagopbygget bygningsdel

- a) Generel konstruktion
- b) Fuge/stødsamling
- c) Installationshul
- d) Installationshul

- 1) Træskelet
- 2) Beklædning
- 3) Hulrum
- 4) Hulrumsisolering
- 5) Beklædningsstød uden bagvedliggende fastgørelse
- 6) Hul for installation

Ved en symmetrisk opbygget bygningsdel (uden samlinger eller gennemføringer) vil det være tilstrækkeligt at eftervise det generelle tværsnit i bygningsdelen.

8.4.1.3. Brandpåvirkning

Adskillende bygningsdele skal eftervises iht. ISO 834 standardbrandkurven.

8.4.1.4. Beregningsmetoder

Der findes flere metoder til beregning og eftervisning af adskillende bygningsdele, alt afhængig af hvilken type bygningsdel der ønskes eftervist.

Bestemmelse af brandmodstandsevnen vil for massive bygningsdele, som beton, porebeton, mursten vil ofte kunne ske som et tabelopslag og simple beregningsmetoder. Som eksempel for mursten hhv. Anneks B og C i DS/EN 1996-1-2 [26] og for beton kapitel 5 og Anneks B i DS/EN 1992-1-2 [27].

Beregning af adskillende og isolerende funktion for lagopbyggede bygningsdele, hvori der indgår træ sammen med andre materialer, kan ske iht. Eurocode 5 del 1-2 [25].

Der kan ikke anvendes computerberegninger, som f.eks. Finit Element til eftervisning af brandmodstandsevne efter denne vejledning.

Bygningsdelen regnes normalt kun brandpåvirket på den ene side, og det skal afklares om bygningsdelen eftervises til, at kunne modstå brandpåvirkning fra begge sider af bygningsdelen eller kun fra den ene side. Hvis bygningsdelen skal kunne modstå brandpåvirkning fra begge sider og ikke er symmetrisk opbygget, skal der foretages eftervisning baseret på ensidig brandpåvirkning fra begge sider.

Bruges adskillende bygningsdele som brandbeskyttelse af bærende bygningsdele, kan der være situationer, hvor bygningsdelen skal kunne modstå påvirkning fra en brand fra flere sider af bygningsdelen samtidigt.

8.4.1.4.1 Eurocode metode

Eftervisning af lagopbyggede bygningsdele (sammensat af flere materialer) kan ske iht. Eurocode 5 del 1-2 [25] eller dennes videreudvikling. Videreudviklingen er beskrevet i Fire safety in timber buildings, Technical guideline for Europe [28], Brandsäkra trähus [29] og TRÆ 71 [30]. Videreudviklingen af Eurocode metoden er mere konservativ, men kan anvendes ved flere forskellige typer af sammensatte bygningsdele og materialer.

Begge beregningsmetoder omhandler udelukkende 1D-bestemmelse af brandmodstandsevne for vægge og etageadskillelser der er opbygget af træ, som f.eks. træskellet eller træbjælkelag eller lignende, og som udsættes for en standardbrand. Metoderne kan anvendes til bestemmelse af brandmodstandstid til og med 60 minutter, som f.eks. EI 30 eller EI 60.

Metoderne stiller krav til montagen af de forskellige lag og herunder især fastholdelsen af de enkelte lag i bygningsdelen. Det skal herunder sikres, at beklædninger og isoleringsmateriale fastholdes i den tid de bidrager til brandmodstandsevnen. For eksempel skal forskallingens dimensioner være tilstrækkelige til, at den kan fastholde isolering. Tilsvarende skal skruer eller søm, der bruges til montage, have tilstrækkelig dimensioner til at de sikrer fastholdelse i ikke-forkullet træ.

Der henvises til appendiks 8.8.3, for eksempel på beregning af en lagopbygget, adskillende bygningsdel efter Eurocode metoden.

8.4.1.4.2 Finit element (informativt)

Finit-element er en beregningstype hvormed temperaturgradienter i sammensatte bygningsdele kan bestemmes i 2D eller 3D.

Finit-element kan benyttes til at beregne temperaturen på den ikke-eksponerede side af en bygningsdel, hvor det kan anvendes til eftervisning af en bygningsdels isolerende egenskab.

Metoden beregner transport af energi gennem den sammensatte bygningsdel, ved inddeling i et beregningsnet. Der skal derfor benyttes et tilstrækkeligt fint beregningsnet, for at kunne modellere temperaturgradienterne gennem bygningsdelen i beregningsdomænet. Der henvises til beregningsprogrammets tekniske manual, som bør suppleres med netpunktsanalyser, hvor beregningsnettets forfines indtil resultaterne konvergerer mod et stabilt resultat.

Ved anvendelse af finite-element, er det væsentligt at sikre, at randbetingelserne er realistiske, herunder især strålingsandelen og konvektionen i grænselaget.

Metoden kan også anvendes til, at beregne f.eks. ståltemperaturen i stålkonstruktioner eller armering i betonkonstruktioner. I disse tilfælde skal den kritiske ståltemperatur beregnes i regi af den certificerede statiker.

Finite-elementberegninger kan ikke anvendes til eftervisning efter denne vejledning.

8.4.1.5. Materialeklassifikation

Den samlede bygningsdels materialeegenskaber skal bestemmes ud fra klassifikationen af det materiale, der har den ringeste materialeklasse, og som indgår i bygningsdelen.

Et eksempel kan være, at en bygningsdel eftervises at være EI 60, og er sammensat af et træskellet (D-s2,d0) med fastholdt mineralulds isolering (A2-s1,d0), forskalling af træ (D-s2,d0) og gipskartonplader på begge sider (A2-s1,d0). Her vil den samlede bygningsdel klasse kunne anses som EI 60 D-s2,d0.

Der henvises til appendiks 8.8.3 for eksempel på eftervisning/beregning af lagopbygget adskillende bygningsdel med Eurocode metoden, hvor den samlede bygningsdels materiale klasse bestemmes.

8.4.1.6. *Dokumentation af brandteknisk dimensionering af bygningsdele*

Dokumentation af den brandtekniske dimensionering af bygningsdele skal som minimum altid omfatte en beskrivelse af:

- Formålet med beregningen og at modellen er valid
- Forudsætninger for dimensioneringen, herunder opbygning af bygningsdelen og de enkelte materials brandmæssige egenskaber
- De opstillede acceptkriterier
- For beregninger er det nødvendigt også at præsentere selve beregningen og i tilfælde med beregningsprogrammer/simuleringer at præsentere resultater med grafer og visualiseringer af bygningsdelen.
- Den projektspecifikke klassifikation af brandmodstandsevne og om bygningsdelen kan modstå brand ensidigt fra en eller begge sider eller evt. flersidigt.
- Den projektspecifikke materialeklassifikation

I beskrivelsen skal forudsætningerne for sammensætning af den pågældende bygningsdel fremgå klart og entydigt. Herunder skal bygningsdelen illustreres med en simpel detaljetegning, der viser opbygningen i en størrelse hvor detaljeringsgraden er læsbar, f.eks. i målestoksforhold 1:10.

Den projektspecifikke klassifikation af brandmodstandsevne skal angives iht. eftervisningsmetoden, er bygningsdelen f.eks. er eftervist iht. Eurocode metoden, vil den skulle bestemmes efter det europæiske system som f.eks. bygningsdel klasse EI 60.

Det skal beskrives om bygningsdelen er eftervist til at kunne modstå brandpåvirkning fra begge sider af bygningsdelen (symmetrisk opbygget), kun fra den ene side eller beregnet fra begge sider.

8.5.0. Komparative analyser

En komparativ analyse er en analyseform, som sammenligner to løsninger, for at undersøge forskelle i niveauet for brandsikkerheden. En komparativ analyse kan benyttes til at dokumentere, at Bygningsreglementets krav er opfyldt, selvom et specifikt bygningsdesign afviger fra de præ-accepterede løsninger (beskrevet i vejledninger til BR18, kap. 5 og dertilhørende appendiks) på et eller flere punkter. Konkret gøres dette ved at sammenligne det ønskede bygningsdesign, benævnt analysebyggeriet med en præ-accepteret referencebyggeriet og eftervise, at sikkerhedsniveauet i analysebyggeriet mindst modsvarer sikkerhedsniveauet i referencebygningen. Eftervisningen baseres ofte på etablering af kompenserende tiltag, eksempelvis supplerende brandtekniske installationer, supplerende eller forbedrede flugtveje, forbedrede forhold for redningsberedskabets indsats eller en særlig bygningsudformning, som bidrager positivt til sikkerhedsniveauet.

I nogle tilfælde kan et brandsikringstiltag virke kompenserende, selvom tiltaget allerede indgår i den præ-accepterede løsning, hvis den præ-accepterede løsning foreskriver det af andre hensyn, end det afvigelsen omhandler. F.eks. kan et sprinkleranlæg være nødvendigt ifølge de præ-accepterede løsninger på grund af størrelsen på en brandsektion og samtidig virke kompenserende i forhold til sikring af brand- og røgspredning fra rum til flugtveje.

Komparative analyser benyttes typisk ved begrænsede afvigelser fra de præ-accepterede løsninger, hvor omfanget af en fuldstændig brandteknisk dimensionering er disproportionalt med afvigelsens omfang og brandtekniske betydning. Komparative analyser kan i princippet også benyttes til at dokumentere afvigelser i større skala, så længe der findes præ-accepterede løsninger, som er velegnede at sammenligne med.

I dette afsnit gennemgås en metode for komparative analyser for dokumentation af brandsikkerhed, og der gives eksempler på, hvordan analyseformen konkret kan anvendes. Den beskrevne metode er hovedsageligt baseret på DS/INSTA TS 950:2014.

8.5.1. Forudsætninger og begrænsninger for komparativ analyse

Komparative analyser har fordele og ulemper, som der skal tages hensyn til, når metoden for eftervisningen af en afvigelse fastlægges.

Fordelene er, at komparative analyser ofte kan gennemføres relativt enkelt, og at de kan tilpasses de fleste forhold, som er aktuelle i en brandteknisk eftervisning. Desuden betyder analyseformen, at usikkerheder minimeres i forhold til en fuld brandteknisk dimensionering. Dermed kan bygningsdesignet i højere grad optimeres.

En ulempe er, at analysebyggeriet skal kunne sammenlignes med et referencebyggeri, som både er et normalt forekommende og brandmæssigt præ-accepteret design. En anden ulempe er, at en afvigelse kan påvirke flere formål for brandsikringen, og dermed blive for kompleks at behandle komparativt. Desuden kan flere samtidige afvigelser betyde, at analysen bliver uoverskuelig, og metoden dermed ikke resulterer i en entydig konklusion.

Grundlæggende er det en forudsætning for en komparativ analyse, at der kan fastlægges et egnet referencebyggeri. Hvis dette ikke er muligt, f.eks. fordi der ikke findes præ-accepterede løsninger som overordnet set modsvarer analysebyggeriet, kan en

komparativ analyse ikke anvendes, og brandsikringen af analysebyggeriet må derfor eftervises ad anden vej. Dette kan f.eks. være gennem en fuld brandteknisk dimensionering som beskrevet i afsnit 8.3.0. Krav til fastlæggelse af referencebyggeriet er beskrevet nærmere i afsnit 8.5.3.1.

8.5.2. Beskyttelsesformål

Det centrale i en komparativ analyse er eftervisningen af den valgte løsning – det vil sige analysen af, om det valgte design opfylder Bygningsreglementets § 82, stk. 1 og 2, hvor de overordnet beskyttelsesformål beskrives.

De præ-accepterede løsninger, som følger af beskyttelsesformålene, og de underliggende funktionskrav, kan inddeles i følgende grupper og undergrupper:

1. Evakuering og redning af personer
2. Bærende konstruktioners brandmodstandsevne
3. Antændelse og brand- og røgspredning
 - 3a. Materialer og overflader
 - 3b. Brandsektioner
 - 3c. Brandceller
 - 3d. Brandspredning til andre bygninger
 - 3e. Brandsikring af tekniske installationer
4. Redningsberedskabets indsatsmuligheder

I det følgende beskrives nærmere, hvad de enkelte beskyttelsesformål dækker over. Ved komparative analyser kan afvigelser fra præ-accepterede løsninger påvirke flere grupper.

Brandtekniske installationer henføres ikke en særskilt gruppe, da de er omfattet af de øvrige grupper, hvor de indgår som brandtekniske tiltag for at opfylde funktionskravene, f.eks. for at begrænse brand- og røgspredning eller for at forbedre evakueringsforhold.

8.5.2.1. Evakuering og redning af personer

Evakuering og redning af personer omfatter de præ-accepterede løsninger, som omhandler alle forhold omkring flugtveje, herunder eksempelvis udformning af flugtveje, redningsåbninger og i nogle tilfælde præ-accepterede løsninger for valg af brandtekniske installationer. De præ-accepterede løsninger kan eksempelvis være antallet af uafhængige flugtvejsdøre og udgange, den samlede flugtvejsbredde, flugtvejsdøres åbningsretning, eller brug af varslingsanlæg og flugtvejs- og panikbelysning.

8.5.2.2. Bærende konstruktioner

Bærende konstruktioner omfatter de præ-accepterede løsninger for bæresystemet i en bygning herunder både bærende og stabiliserende dele. Dette kan være både bæreevnen og bæresystemets materialeklassifikation. Ved afvigelser på bæresystemets materialeklassifikation, hvor bæresystemet udgør en indvendig overflade, vil både forholdene i denne gruppe og i "materialer og overflader" blive påvirket.

8.5.2.3. *Antændelse og brand- og røgspredning*

8.5.2.3.1 *Materialer og overflader*

Materialer og overflader omfatter de præ-accepterede løsninger som relateres til byggematerialer, indvendige- og udvendige overflader. Dette gælder eksempelvis isolering eller facadebeklædning, men det kan også være løsninger for væg- eller loftsoverflader, overflader i hulrum, materialebrug i nedsænket loft og lignende. Denne kategori omfatter dermed alt vedrørende et materiales medvirken til en brands udvikling og spredning.

8.5.2.3.2 *Brandsektioner*

Disse præ-accepterede løsninger omhandler opdeling i brandsektioner. Gruppen omfatter brandsektionernes størrelse, brandsektionsadskillelsernes brandmodstandsevne eller materialeklassifikation, samt forhold omkring brandkamserstatninger, vinkelsmitte eller høj/lav brandsmitte.

8.5.2.3.3 *Brandceller*

Disse præ-accepterede løsninger omhandler opdeling i brandceller og røgadskillelser og deres adskillende egenskaber for at sikre mod brand- og røgspredning samt for at sikre flugtveje og redningsberedskabets indsatsveje.

8.5.2.3.4 *Brandspredning til andre bygninger*

Disse præ-accepterede løsninger omfatter forhold, som påvirker risikoen for brandspredning til nabobygninger både på samme eller anden grund. Det kan dermed være afvigelser fra præ-accepterede løsninger om facadebeklædning, afstandsforhold, brandvægge eller lignende.

8.5.2.3.5 *Brandsikring af tekniske installationer*

Disse præ-accepterede løsninger relateres til brandsikring mod brand og røgspredning i installationer, eksempelvis ventilationsanlæg, elektriske eller sanitære installationer, brandtætninger af rør og kabler og lignende.

Forhold, som omhandler brandtekniske installationer, omfattes normalt ikke i denne gruppe, da disse typisk installeres for at modvirke eller begrænse brandspredning (brandsektioner) eller for at forbedre evakuerings- eller indsatsforhold.

Redningsberedskabets indsatsforhold

Disse præ-accepterede løsninger omhandler indsatsforholdende for redningsberedskabet. Dette kan eksempelvis være adgangs- og tilkørselsforhold samt mulighederne for redning, røgudluftning eller fremføring af slukningsvand i bygninger.

Ved komparative analyser omkring redningsberedskabets indsatsforhold, henledes opmærksomheden på at afvigelser har indflydelse på om bygningen er indsatstaktisk traditionel. Det skal fremgå af dokumentationen for om byggeriet er indsatstaktisk traditionelt at der er foretaget en komparativ analyse eller lign.

8.5.3. *Procedure for komparativ analyse*

En komparativ analyse består af en række delanalyser og -vurderinger, og den grundlæggende struktur er illustreret på Figur 8.0-26.

Udgangspunktet for den komparative analyse er det brandtekniske design af det givne analysebyggeri. De første skridt er at identificere afvigelser, definere acceptkriterier og at

fastsætte en egnet referencebyggeriet (som overordnet set ligner analysebyggeriet) og analysere afvigelserne.

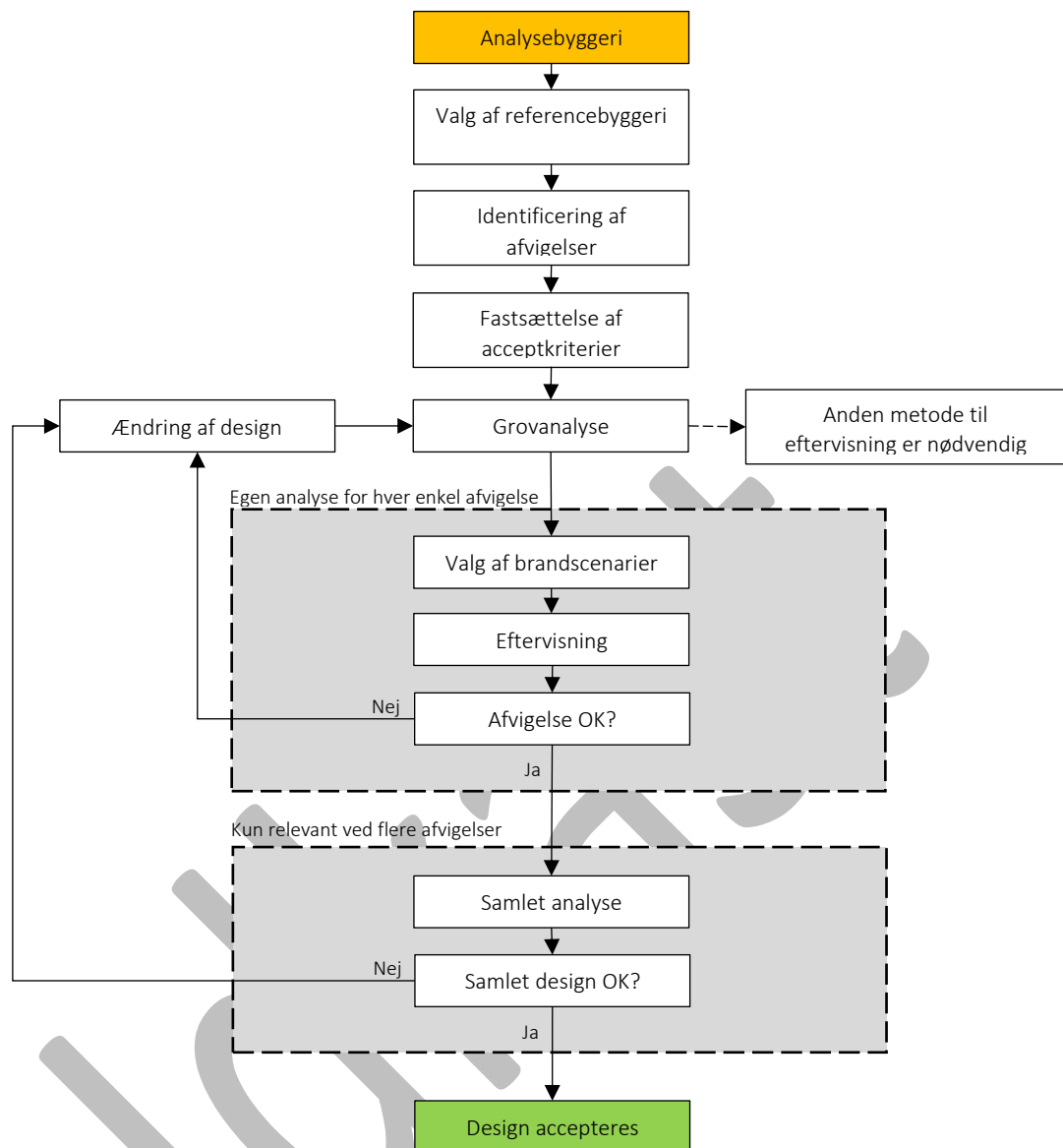
Efterfølgende foretages en indledende grovanalyse, som ser samlet på alle afvigelser i analysebyggeriet, for at klarlægge om den komparative analyseform er anvendelig. Hvis det konkluderes, at en komparativ analyse ikke er anvendelig, må der vælges en anden metode til eftervisning. Dernæst skal grovanalysen vurdere ændringer i sikkerhedsniveauet i bygningen som følge af afvigelserne for at afdække hvilke risikoforhold, der er relevante at analysere for hver afvigelse. På baggrund af grovanalysen afklares det, hvilken metode som skal benyttes for at eftervise hver af afvigelserne.

Efter grovanalysen ses der på hver enkelt afvigelse i analysebyggeriet. Der foretages en eftervisning, som kan være kvalitativ eller kvantitativ afhængig af konklusionen af grovanalysen. Hvis eftervisningen af en afvigelse viser, at sikkerhedsniveauet er mindst lige så godt i analysebyggeriet som i referencebyggeriet, kan analysen fortsætte til næste trin. I modsat fald ændres designet, og der foretages en ny grovanalyse.

Hvis analysebyggeriet kun har en enkelt afvigelse, er den komparative analyse færdig, efter afvigelsen er eftervist. Hvis der derimod er flere afvigelser, skal afvigelserne også vurderes og eftervises samlet. Dette skal sikre, at afvigelser, som hver for sig tilfredsstiller funktionskravene i Bygningsreglementet, ikke har en gensidig negativ påvirkning, som samlet set medfører et sikkerhedsniveau, der er ringere end referencebyggeriets. Hvis denne udvidede analyse giver anledning til ændring af designet eller de brandtekniske tiltag, skal der gennemføres en ny iteration, startende fra grovanalysen. Hvis den samlede analyse derimod viser, at der ikke er gensidige negative påvirkninger imellem afvigelserne, kan det samlede design verificeres, og analysen afsluttes.

For dokumentation af en komparativ analyse er det kun nødvendigt at dokumentere den endelige iteration af processen. Det er dermed ikke nødvendigt at dokumentere baggrunden for eventuelle ændringer i det endelige design.

De enkelte trin i en komparativ analyse beskrives nærmere i de følgende afsnit.



Figur 8.0-26: Arbejdsprocessen i en komparativ analyse fra en analysebyggeriet over verificering til accept af afvigelser.

8.5.3.1. Valg af referencebyggeri

Første skridt i analysen er at definere et passende referencebyggeri. Et referencebyggeri skal have et normalt forekommende, traditionelt og bygbart design, og alle brandtekniske løsninger skal være præ-accepterede. Præ-accepterede løsninger omfatter både løsninger beskrevet i hovedvejledning og bilag til Bygningsreglementets vejledning til kapitel 5 – Brand. Referencebyggeriet må ikke have afvigelser fra gældende tekniske standarder og normer for eksempelvis de brandtekniske installationer eller bærende konstruktioner.

Referencebyggeriet skal have samme anvendelse, samme personbelastning og mindst samme størrelse som analysebyggeriet, for at en komparativ analyse kan anvendes. Referencebyggeriet skal også indeholde andre specielle risikoforhold, hvis analysebyggeriet indeholder sådanne, i det omfang det er muligt inden for de præ-accepterede løsninger. Bygningerne skal dermed være så ens som muligt. Det er således

ikke tilladt at sammenligne sikkerhedsniveauet i eksempelvis en præ-accepteret hotelbyggeri med et boligbyggeri.

Et eksempel på, at en komparativ analyse kan anvendes, er for et analysebyggeri med en brandsektion på 12.000 m², som sammenlignes med et referencebyggeri på 12.000 m². Referencebyggeriet er opdelt i to brandsektioner på f.eks. hver 6.000 m². Der kan ikke benyttes et referencebyggeri med en brandsektion på 12.000 m², da den øvre grænse for de præ-accepterede løsninger er brandsektioner på 10.000 m².

Tilsvarende kan der som udgangspunkt ikke benyttes komparative analyser for bygninger over 45 m da der ikke findes præ-accepterede løsninger for disse. Et eksempel på, at en komparativ analyse ikke kan anvendes, er et analysebyggeri, som er væsentligt højere end, hvad der er opstillet præ-accepterede løsninger for. Dermed kan der ikke fastsættes et egnet referencebyggeri, fordi størrelsen afviger væsentligt.

En afvigelse, som alene omfatter et mindre udsnit af et analysebyggeri, for eksempel en enkelt brandcelle eller brandsektion, kan dog verificeres mod et tilsvarende udsnit af et egnet referencebyggeri. Omfatter en afvigelse et større udsnit af analysebyggeriet, skal den komparative analyse mindst omhandle hele det pågældende bygningsafsnit.

Der henvises til appendiks 8.8.4.1.2 for eksempler på fastsættelse af referencebyggerier

8.5.3.2. *Identificere afvigelser og fastsættelse af acceptkriterier*

Når referencebyggeriet er defineret, fastlægges acceptkriterierne, så målet for analysen bliver klart. Grundlæggende er acceptkriteriet for komparative analyser altid, at analysebyggeriet er mindst ligeså sikker som et referencebyggeri efter præ-accepterede løsninger, og derfor opfylder sikkerhedsniveauet i BR 18, kapitel 5.

I en komparativ analyse vil en præ-accepteret løsning og det bagvedliggende funktionskrav normalt angives som acceptkriteriet. De præ-accepterede løsninger er en måde at definere et sikkerhedsniveau for det enkelte forhold, og målet er derfor at eftervise, at afvigelsen og de kompenserende tiltag mindst afstedkommer dette sikkerhedsniveau.

Selvom det overordnede acceptkriterium i en komparativ analyse er meget bredt defineret, kan det dog i mange tilfælde være nyttigt at definere absolutte acceptkriterier for specifikke parametre i tillæg. Dette kan være kriterier for temperatur, strålingsintensitet, sigtbarhed og lignende som beskrevet i afsnit 8.2.2. Disse kriterier kan eksempelvis benyttes til at sammenligne tiden til kritiske forhold i et rum i analysebyggeriet og referencebyggeriet eller sammenligne evakueringstiden, for på den måde at verificere om sikkerhedsniveauet er acceptabelt eller ikke.

8.5.3.3. *Grovanalyse*

Grovanalysen har til formål at afdække, om den komparative analysemetode er anvendelig i den konkrete sammenhæng. Desuden skal grovanalysen afklare, hvad fokus for verificeringen skal være, og i hvilket detaljeringsniveau analysen skal gennemføres. Dette gøres gennem en fareidentifikation og en analyse af ændringen i beskyttelsesniveauet.

8.5.3.3.1 *Risikoforhold*

Første skridt i grovanalysen er at identificere, hvilke risikoforhold som er gældende for analysebyggeriet som helhed og specifikt for de enkelte afvigelser. Risikoforhold kan

eksempelvis være store personbelastninger, stor bygningshøjde, og/eller personer, som ikke kan bringe sig selv i sikkerhed. Der bør ikke være forskel på brandårsager og - sandsynligheder i reference- og analysebyggeriet. Hvis der alligevel konstateres væsentlige forskelle mellem analyse- og referencebyggeri, må det vurderes, om en komparativ analyse er dækkende for afvigelsen.

Fareidentifikationen kan også afdække om afvigelserne har væsentligt større konsekvenser ved brand end en tilsvarende situation i referencebyggeriet, eksempelvis i svigttilfælde – dette skal dog uanset vurderes i selve eftervisningen af afvigelsen. Dette kan senere bidrage til at afklare, hvilke brand- og evakueringsscenarier som skal undersøges.

Ved identifikationen af risikoforhold skal der også ses konkret på de enkelte afvigelser. En afvigelse kan i sig selv introducere specielle risikoforhold, som normalt ikke forekommer i den konkrete anvendelse. En afvigelse fra en præ-accepteret løsning vil ofte indirekte påvirke andre beskyttelsesformål, som den præ-accepterede løsning ikke direkte adresserer. Det er derfor vigtigt at sikre, at alle påvirkninger og afledte effekter af en afvigelse afdækkes. For eksempel er det klart, at smallere flugtveje har betydning for evakueringsforholdene i en bygning, men en ændring af flugtvejsbredden kan også have betydning for redningsberedskabets indsatsforhold, og dette må derfor også adresseres i verifikationen.

For de enkelte afvigelser i analysebyggeriet kan Tabel 8.0-18 benyttes til at identificere, hvilke beskyttelsesformål der normalt påvirkes af en afvigelse fra en given præ-accepteret løsning. Bemærk, at der kan være specielle forhold som betyder, at generelle eller typiske sammenhænge ikke er gældende. Tabellen er derfor alene vejledende.

Tabel 8.0-18: Værktøj til identifikation af afledte effekter for en afvigelse. For en afvigelse fra en præ-accepteret løsning for et givent beskyttelsesformål kontrolleres det, hvilke andre forhold som påvirkes.

- **Rød:** Typisk stor betydning – primært fokus for eftervisningen.
- **Orange:** Typisk medium betydning – sekundært fokus for eftervisningen.
- **Grøn:** Typisk lille betydning – tertiært fokus for eftervisningen.
- **Hvid:** Typisk ingen betydning – behøves normalt ikke vurderes i eftervisningen.

Tabellen er gengivet og modificeret fra DS/INSTA TS 950:2014.

Afgivelse fra løsning for:	Kontrol af betydning for:	1. Evakuering og redning af personer	2. Bærende konstruktioners	3a. Materialer og overflader	3b. Brandsektioner	3c. Brandceller	3d. Brandspredning til andre bygninger	3e. Brandsikring af tekniske installationer	4. Redningsberedskabets indsatsmuligheder
1. Evakuering og redning af personer		Rød		Orange					Grøn
2. Bærende konstruktioners brandmodstandsevne		Orange	Rød		Grøn		Grøn		Orange
3a. Materialer og overflader		Orange		Rød		Grøn	Orange		Grøn
3b. Brandsektioner					Rød	Grøn			Orange
3c. Brandceller		Orange			Grøn	Rød			Orange
3d. Brandspredning til andre bygninger			Grøn		Grøn		Rød		Grøn
3e. Brandsikring af tekniske installationer		Grøn			Grøn	Grøn		Rød	Grøn
4. Redningsberedskabets indsatsmuligheder		Grøn	Grøn		Grøn	Grøn	Grøn		Rød

Dokumentationen og omfanget af fareidentifikationen kan skaleres i forhold til afvigelsesernes antal, størrelse og omfang. Tabel 8.0-18 er et værktøj, der angiver hvilke risikoforhold der som minimum bør analyseres, men skal i mange tilfælde suppleres alt efter afvigelsens art og omfang. I dokumentation for den komparative analyse skal der altid redegøres for forholdene vedrørende opfyldelse af de primære (røde) og sekundære (orange) beskyttelsesformål. De tertiære (grønne) formål bør også medtages, men de kan udelades i tilfælde hvor det åbenlyst ikke er relevant. De ubetydelige (hvide) formål kan som udgangspunkt udelades, hvis der ikke er årsager til at de skal vurderes.

8.5.3.3.2 Ændring i sikkerhedsniveau

Ændringen i analysebyggeriets sikkerhedsniveau kan groft bestemmes ud fra identifikationen af risikoforhold. Ændringen vurderes for hver enkelt afvigelse og hvert af de kompenserende tiltag, hvor det skal vurderes, om afvigelsen eller det kompenserende tiltag har positiv, negativ eller ingen påvirkning for hvert enkelt beskyttelsesformål. Dette gøres normalt gennem en kvalitativ beskrivelse. Det vil ofte give en god oversigt, hvis ændringerne opsummeres i en tabel som vist i Tabel 8.0-19. I analyser med mange

afvigelser kan tabellen deles i to, så der laves særskilte tabeller for afvigelser og kompenserende tiltag.

Tabel 8.0-19: Eksempel på oversigtsskema for effekten af afvigelser og kompenserende tiltag på beskyttelsesformålene. Tabellen er gengivet og modificeret fra DS/INSTA TS 950:2014.

Beskyttelsesformål	Forskelle fra præ-accepterede løsninger							
	Afvigelser				Kompenserende tiltag			
	1	2	3	4	A	B	C	D
1. Evakuering og redning af personer								
2. Bærende konstruktioners brandmodstandsevne								
3a. Materialer og overflader								
3b. Brandsektioner								
3c. Brandceller								
3d. Brandspredning til andre bygninger								
3e. Brandsikring af tekniske installationer								
4. Redningsberedskabets indsatsmuligheder								

Tabellen udfyldes ved at 1, 2, 3, og 4 erstattes med de enkelte afvigelser, det vil sige de præ-accepterede løsninger, som ikke tilfredsstilles. A, B, C og D erstattes af de forskellige kompenserende tiltag.

Hver kolonne med et kompenserende tiltag eller en afvigelse udfyldes derefter med:

- "+" ud for de beskyttelsesformål, som påvirkes positivt.
- "-" ud for de formål, som påvirkes negativt.
- "0" ud for de formål, som ikke påvirkes.

Vurderingen af ændringen i sikkerhedsniveauet skal være specifik for det konkrete analysebyggeri relativt til referencebyggeriet. Der er ikke krav om, at der er lige mange plusser og minusser for hvert formål, idet grovanalysen som udgangspunkt bare skal identificere og tydeliggøre forskellene mellem reference- og analysebyggeri til brug i eftervisningen.

Der henvises til appendiks 8.8.4.1 for eksempler på udfyldte skemaer.

8.5.3.3.3 Bestemmelse af analysemetode og -niveau

Sidste trin i grovanalysen er at vurdere analysemetode og den videre fremgangsmåde for eftervisningen. Dette gøres på grundlag af identifikationen af risikoforhold og vurderingerne af det ændrede sikkerhedsniveau.

En eftervisning med en komparativ analyse vil typisk ikke kunne gennemføres, hvis identifikationen af risikoforhold viser, at der er særlige risikoforhold i analysebyggeriet, som er meget forskellige fra, hvad der tillades i referencebyggeriet. Det kan være, fordi konsekvensen af en brand eller de potentielle brandårsager er væsentlig anderledes i

analysebyggeriet. Det er også muligt, at vurderingerne af det ændrede sikkerhedsniveau viser, at de kompenserende tiltag slet ikke forbedrer de forhold, som afvigelserne forværrer. Eller at alle afvigelser påvirker samme beskyttelsesformål, og at det derfor bliver for komplekst at vurdere dem i forhold til et referencebyggeri. I disse tilfælde vil en anden metode for eftervisning være nødvendig.

Hvis grovanalysen indikerer, at en komparativ verificering er mulig, er næste skridt at vurdere, hvordan selve verificeringen skal gennemføres. Ved mindre afvigelser, der påvirker få beskyttelsesformål, kan det være tilstrækkeligt at gennemføre verificeringen kvalitativt. Et eksempel på dette, kan være ved en blind ende i en flugtvejsgang, længere end de præ-accepterede løsninger anviser. Se eksempel på dette i appendiks 8.8.4.4. Ved større afvigelser, som påvirker mange beskyttelsesformål eller som har stor betydning for et enkelt beskyttelsesformål, vil det ofte være nødvendigt at bruge kvantitative metoder, eventuelt suppleret med kvalitative argumenter. Hvordan eftervisningen skal gennemføres, bliver dermed en vurdering baseret på det konkrete analysebyggeri. Et eksempel på dette, kan være en bygning med åbent atrium, der har brandteknisk åben forbindelse mellem flere etager end de præ-accepterede løsninger anviser. Se eksempel på dette i appendiks 8.8.4.1.

Der henvises generelt til appendiks 8.8.4 for eksempler på argumenter for henholdsvis kvalitativ og kvantitativ verificering.

8.5.3.4. *Valg af brand- og evakueringsscenarier*

Det skal vurderes, hvilke brandscenarier som skal bruges som grundlag for eftervisning for hver enkel afvigelse. Det er derfor ikke nødvendigvis et krav, at de samme brandscenarier benyttes til at analysere de forskellige afvigelser i det samme analysebyggeri.

For hver afvigelse skal alle scenarier, som er relevante, analyseres. Eftersom det ikke altid er tydeligt, hvilken effekt en præ-accepteret løsning har, er det ofte nødvendigt at betragte flere forskellige brandtyper end det, der normalt analyseres i en brandteknisk dimensionering. I komparative analyser skal det derfor altid vurderes om følgende brandscenarier er relevante:

- A. Brandscenarie med hurtig brandudvikling og høj brandeffekt. Det vil sige den kraftigste, troværdige brand, som kan forventes i bygningen.
For analyse af bygningsdele anvendes en standardbrand jf. ISO 834.
For analyser med CFD-modeller, håndberegninger og 2-zone modeller for beregning af røg- og brandspredning anvendes designbrande jf. afsnit 8.3.2.3.
- B. Brandscenarie med en brand som opstår i et rum/område, som normalt er uden personophold, og som kan vokse sig stor, inden den opdages. Dette er ofte relevant i forhold til afvigelser omkring redningsberedskabets indsatsforhold, men det kan også være relevant i andre sammenhænge.
- C. Brandscenarie med en brand med stor røgproduktion som udvikler sig langsomt, og som ikke vil udløse et eventuelt sprinkleranlæg før sent i brandforløbet. Dette scenarie er ofte relevant i forhold til vurdering af redningsberedskabets indsatsforhold.

- D. Eventuelle brandscenarier som er relevante for at afdække robustheden af den valgte løsning. Scenariet vil eksempelvis være relevant, hvis den kraftigste brand (scenarie A) ikke er placeret det mest kritiske sted i forhold til flugtveje eller tilsvarende.

Ved komparative analyser for evakueringsforhold er det ofte nødvendigt at definere personbelastninger og -fordelinger for evakuerings-scenarier. Dette kan gøres med udgangspunkt i afsnit 8.3.6.3. Som for brandscenarierne kan det dog i nogen tilfælde være relevant at se bredere på scenarierne, når der udføres en komparativ analyse. Eksempelvis kan der være andre forhold for personbelastning i en butik i og udenfor åbningstiden. I begge tilfælde må det dog eftervises at flugtvejene er tilstrækkelige, da der også skal være acceptable flugtveje, når det bare er personalet, som er i lokalet. I dette tilfælde vil en analyse af spidsbelastningen i åbningstiden ikke give det fulde billede af afvigelsens påvirkning af sikkerhedsniveauet.

I forbindelse med valg af brand- og evakuerings-scenarier skal der også laves vurderinger af svigt. Hvis der kompenseres med sammenkoblede brandsikringsanlæg, skal der gennemføres en systemsvigtsanalyse som beskrevet i afsnit 8.3.2.2.1.

8.5.3.5. *Eftervisning af afvigelse*

Eftervisning af en afvigelse kan gennemføres med kvalitative eller kvantitative metoder eller som en blanding af disse. Komparative analyser indeholder normalt elementer af kvalitativ analyse, mens omfanget af kvantitative elementer afhænger af afvigelsernes art og omfang.

I eftervisningen skal det, med den valgte metode, eftervises, at sikkerhedsniveauet i analysebyggeriet er mindst lige så godt som sikkerhedsniveauet i i referencebyggeriet for hvert enkelt brandscenarie. Sikkerhedsniveauet skal forstås som det samlede sikkerhedsniveau for beskyttelsesformålene – det vil sige, at alle beskyttelsesformålene skal tilfredsstilles. Desuden skal det eftervises, at analysebyggeriet er mindst lige så robust overfor svigt af brandtekniske tiltag som referencebyggeriet, eller at der er indført supplerende tiltag, som giver en tilsvarende sikkerhed i forhold til svigt.

Ved en kvalitativ analyse gennemføres eftervisningen med argumenter baseret på en faglig vurdering ved hjælp af faglitteratur, prøvningsrapporter, brandstatistikker eller lignende. Det kan eksempelvis være, at der argumenteres for, at kravene til overflader i et forsamlingslokale er reduceret i forhold til den præ-accepterede løsning, men at dette er kompenseret med ekstra flugtveje eller installation af et sprinkleranlæg eller lignende. I dette eksempel kunne der kvalitativt argumenteres for, at tiltagene henholdsvis sænker den nødvendige evakuerings-tid, sådan at niveauet for personsikkerheden er tilfredsstillt. Der kunne også argumenteres kvalitativt for at sprinkleranlægget begrænser en brands udbredelse, hvilket kompenserer for en let øget brandbelastning.

Ved en kvantitativ analyse benyttes derimod konkrete beregninger til at verificere, at sikkerhedsniveauet er tilstrækkeligt. Dette kan være deterministiske beregninger af brand- og røgspredning, som beregner konsekvensen af branden i de forskellige brandscenarier og med forskellige svigt for både analyse- og referencebyggeriet, eller beregninger af evakuerings-tiden for bygningen. Det kan eksempelvis være en kvantitativ eftervisning af, at sikkerhedsmarginen (tiden mellem endt evakuering og kritisk røgfylldning af et rum) ikke er mindre i et analysebyggeri end i et referencebyggeri.

Hermed kan afvigelsen accepteres i forhold til personsikkerhed. For en fuld eftervisning af eksemplet må blandt andet redningsberedskabets indsatsforhold dog også vurderes.

Eksempler på eftervisning af forskellige afvigelser er givet i appendiks 8.8.4.

8.5.3.6. *Samlet analyse af afvigelser*

I tilfælde af, at analysebyggeriet indeholder mere end en enkelt afvigelse, skal der foretages en samlet analyse af afvigelserne. I tilfælde, hvor afvigelserne påvirker uafhængige dele af analysebyggeriet, vil det normalt ikke være nødvendigt at gennemføre en samlet analyse. Hvis alle afvigelserne omvendt påvirker samme brandmæssige enhed, skal det eftervises, at de enkelte afvigelser ikke påvirker hinanden til ugunst eller at designet imødekommer dette.

Den samlede analyse skal dermed fastslå, om de enkelte afvigelser påvirker hinanden negativt og som ikke vil fremgå, når afvigelserne analyseres enkeltvis. Samtidig skal det vurderes, om svigt af et eller flere af de kompenserende tiltag vil betyde, at det samlede sikkerhedsniveau i bygningen reduceres væsentligt i forhold til referencebyggeriet.

8.5.4. *Håndtering af usikkerhed og sensitivitet*

En af styrkerne ved komparative analyser er, at usikkerheder, som knyttes til inputparametre, modeller og beregningsmetoder, ofte er ens for både analyse- og referencebyggeriet. Dermed er usikkerheden på de relative forskelle mellem analyse- og referencebyggerierne mindre end usikkerhederne på de absolutte resultater for hver enkelt bygning. Eksempelvis vil usikkerheden omkring evakueringstiden i henholdsvis analyse- og referencebyggeriet ofte være større end usikkerheden omkring forskellen mellem de to tider. Dette betyder, at usikkerhederne ofte har mindre betydning for analysens resultat end ved en tilsvarende fuld brandteknisk analyse uden sammenligning med præ-accepterede løsninger.

Som for alle andre analyseformer er det dog vigtig at analysere, vurdere og dokumentere de usikkerheder, som optræder i analysen. Fordi mange parametre ofte er ens i analyse- og referencebyggeriet, kan der dog fokuseres på usikkerhederne omkring de parametre, som er forskellige i de to bygninger. Dette skal sikre, at usikkerhederne i analysen kan minimeres, eller at der som minimum bliver gjort opmærksom på, hvad konsekvenserne af usikkerhederne kan være.

8.6.0. Brandprøvning (orienterende)

Anvendes dette afsnit til eftervisning af brandsikkerhed for en bygning i brandklasse 3, medfører dokumentationsformen i form af en orienterende brandprøvning at bygningen skal henføres til brandklasse 4.

Det er væsentligt, at personer som arbejder med planlægning, udførelse, dokumentation og kontrol af forhold vedr. brandprøvninger har de fornødne kompetencer til at udføre dette arbejde, og er bevidst om eventuelle begrænsninger.

En orienterende brandprøvning eller et forsøg i forhold til denne vejledning, må ikke forveksles med brandtest udført af akkrediterede prøvningslaboratorier. Når en byggevars brandtekniske egenskaber dokumenteres på baggrund af brandtest, udført af et akkrediteret prøvningslaboratorium, og dette fører til en klassifikation iht. det europæiske eller nationale system for brandtest og klassifikation, svarer dette til at brug af en præ-accepteret løsning, når ydeevnen svarer til den givne præ-accepterede løsning.

Ved brandprøvning dokumenteres et specifikt brandteknisk tiltags egnethed ved et forsøg, der repræsenterer den løsning, som udføres i bygningen, men ikke nødvendigvis er identisk med denne.

En brandprøvning kan omfatte det enkelte brandtekniske tiltag som f.eks. et brandteknisk slukningsanlægs evne til at begrænse en given brand.

En brandprøvning kan, men er ikke begrænset til brandprøvninger, der dokumentere muligheden for evakuering eller redning f.eks. i form af input data til evakueringsmodeller.

Brandprøvning kan også omfatte andre forhold, der ønskes belyst.

En brandprøvning vil sædvanligvis ikke omfatte den samlede bygning, men belyse omstændigheder i bygningen som ønskes dokumenteret og kan supplere en af de andre dokumentationsmetoder.

Metoden kan anvendes ved både traditionelle og utraditionelle bygninger.

Dette afsnit er delt op i to underafsnit der omhandler brandprøvning af brandtekniske egenskaber og forsøg omkring evakuering og flugtveje.

8.6.1. Prøvning af brandmæssige egenskaber

Dette afsnit omhandler brandprøvninger af bygningsdele, materialer, beklædninger, regnskærme og oplags brandtekniske egenskaber i forhold til projektspecifikke løsninger. Når de brandtekniske egenskaber ikke er dokumenteret med en brandklassifikation fra et akkrediteret prøvningslaboratorium, skal de projektspecifikke løsninger i hvert enkelt tilfælde vurderes, for at afklare, om de kan anvendes i en bygning.

Brandprøvninger udført på baggrund af dette afsnit, vil ikke kunne anvendes til brandklassifikation af byggevarer og bygningsdele.

Brandprøvninger kan anvendes til indikation af f.eks. en bygningsdels brandmodstandsevne eller materiales reaktion på brand, men kan også anvendes som input til en brandteknisk dimensionering eller komparativ analyse.

I den følgende afsnit beskrives forholdene nærmere for forskellige typer brandprøvninger.

8.6.1.1. Byggevarer og bygningsdele

Til eftervisning af byggevarer og bygningsdeles brandtekniske egenskaber ved brandprøvning, skal der tages udgangspunkt i de på området gældende DS, EN, ISO og INSTA-standarder for prøvningsmetoder. I standarderne beskrives usikkerheder, omfang af prøvningen, behandling af resultater mm. for de forskellige typer af brandprøvninger. Ofte udføres brandprøvning af byggevarer og bygningsdele som småskalaforsøg, hvor resultatet skaleres op.

Brandprøvninger skal udføres, så alle observationer og resultater registreres med henblik på, at det er muligt at repetere alle forsøg. Brandprøvningerne bør derfor udføres med laboratorieudstyr, hvor prøveemnerne kan udsættes for kontrollerede brandpåvirkninger.

Anvendes der flere prøveemner til samme brandprøvning, bør prøveemnerne være sammenlignelige og repræsentative for den byggevarer eller bygningsdel der eftervises.

8.6.1.1.1 Materialer

For at undersøge et materiales brandtekniske egenskaber skal der undersøges følgende forhold:

- Antændelighed,
- Brændværdi
- Forbrændingshastighed
- Røgafgivelse
- Afgivelse af brændende dråber

De brandtekniske egenskaber kan vurderes ud efter de repræsentative standarder eller vurderes komparativt, hvis der også udføres brandprøvninger af materialer, hvis brandtekniske egenskaber i forvejen er kendt.

Et eksempel på en projektspecifik brandprøvning af et materiale, kan være en konkret udsmykning der ønskes opsat i et lokale, hvor der er krav til de brandtekniske egenskaber af rummets overflader. Det vil derfor være relevant at tage udsmykningen i betragtning ved vurdering af brandsikkerheden i lokalet.

8.6.1.1.2 Adskillende bygningsdele

For adskillende bygningsdele skal der mindst anvendes en brandpåvirkning svarende til ISO 834 standardbrandkurven [31], så resultaterne er sammenlignelige med klassificerede bygningsdele og præaccepterede eksempler.

Brandprøvninger der udføres for at fastlægge en adskillende bygningsdels brandtekniske egenskaber, kan udføres som fuldskala- eller småskalaforsøg når brandprøvningen er størrelsesmæssigt repræsentativ, for den konkrete bygningsdels anvendelse i bygningen.

Et eksempel på en fuldskala brandprøvning af en bygningsdel, kan være en dørtype fra en fredet bygning, som skal opgraderes. Et eksemplar af den pågældende dørtype nedtages og opgraderes, hvorefter dørens brandtekniske egenskaber eftervises ved brandprøvning.

Eftervises en adskillende bygningsdel med småskalaforsøg skal konsekvenserne ved skaleringen af resultaterne fra brandprøvning vurderes i forhold til bygningsdelenes anvendelse i projektet.

Et eksempel på et småskalaforsøg, der størrelsesmæssigt er repræsentativt, kan være en undersøgelse af indbrændingen i et massivt træelement. Her kan prøvningsresultatet benyttes til at fastlægge indbrændingshastigheden, og hvor meget træ der brænder bort indenfor et fastsat tidsrum.

Hvis brandprøvning af adskillende bygningsdele anvendes til eftervisning af den nødvendig brandbeskyttelse af bærende bygningsdele, skal denne eftervisning foretages af den certificerede statiker.

8.6.1.1.3 Designbrande

I tilfælde hvor de nødvendige brandtekniske data til at definere en designbrand for et oplag eller materiale ikke er tilstede, kan det være nødvendigt, at udføre forsøg med det pågældende oplag. Dette kan f.eks. være til brug i brandteknisk dimensionering.

Brandprøvningen skal foretages i en skala, hvor der er muligt at indsamle de nødvendige data og resultater for at kunne definere brandtilvækst, brandeffekt, produktion af sod og brændværdi. Størrelsen af oplaget/brandprøvningen bør derved ikke være større, end at de nødvendige data f.eks. kan opsamles og analyseres i en udsugningshætte.

8.6.1.1.4 Ad hoc-prøvnings

I nogle tilfælde kan det, der ønskes eftervist, være så komplekst eller projektspecifikt, at der udføres en ad hoc-brandprøvning.

En ad hoc-brandprøvning skal som vidt muligt repræsentere et forventeligt brandscenarie og designbrand i fuldskala geometri, samtidig med at der opretholdes en veldefineret, veldokumenteret og velkontrolleret brandprøvning.

Eksempler på ad hoc-brandprøvnings:

- Opbygning af et modul med bolig, hvor det undersøges hvor meget boligens oplag og overflader bidrager til lodret brandspredning i facaden.
- Anskuelse af bygningers interne afstand i forhold til brandspredning til anden bygning på samme grund.
- Undersøgelse af brand og røgspredning til flugtveje fra anden brandmæssig enhed.
- Undersøgelse af flammespredning og røgproduktion for f.eks. gardiner eller tæpper til ophængning langs vægge, hvor gardinet eller tæppet ikke kan klassificeres som et beklædningsmateriale jf. DS/EN 13501-2 [32].

8.6.1.2. Dokumentation af brandprøvning

Resultater for en brandprøvning skal beskrives i en brandprøvningsrapport, der beskriver følgende forhold:

- Hvad der ønskes eftervist ved brandprøvning
- Prøveemnet
- Metode for forsøg
- Resultater
- Usikkerheder i forbindelse med målinger og data opsamling

- Diskussion af resultater i forhold til den tænkte anvendelse.
- Konklusion, herunder evt. vurderet klassifikation.

I nogle tilfælde, kan dele af denne rapport med fordel indarbejdes i en komparativ analyse eller brandteknisk dimensioneringsrapport.

Data, resultater, registrering af observationer, samt evt. video- og billedokumentation fra brandprøvning bør gemmes sammen med den samlede brandtekniske dokumentation.

8.6.2. Forsøg omkring evakuering og flugtveje

Såfremt det ønskes at udlægge utraditionelle flugtveje, optimere flugtveje eller evakuere persontyper, der ikke er beskrevet i denne vejledning, kan dette gøres via forsøg. Ved gennemførelse af forsøg omkring evakuering skal det sikres at:

- Forsøgspersonerne er repræsentative for brugerne af flugtvejene.
- Antallet af forsøgspersoner er tilstrækkeligt til at give et repræsentativt resultat.
- Forsøgssopstillingens fysiske rammer svarer til den løsning, der ønskes eftervist for projektet.
- Der ved flere forsøgsgennemløb tages hensyn til træningseffekten i resultatbehandlingen. Træningseffekt er blandt andet hvor evakueringstiderne i forsøgene vil være kortere i sidste gennemløb end i det første, som følge af at forsøgspersonerne f.eks. optimerer deres bevægelsesmønstre.
- Ændringer af projektet i de sene faser i byggeriet, kan medføre behov for nye forsøg, hvis de fysiske rammer ændres.

Hvis der inddrages anvendelse af redningsberedskabets udstyr i forsøg, skal det sikres at udstyret modsvarer det som det lokale redningsberedskab anvender. F.eks. skal kørbare stiger være af type 23/12.

Ovenstående punkter er ikke en fuldkommen liste over alle overvejelser, der skal tages i betragtning, når der udføres forsøg med evakuering og flugtveje, men et udtryk for minimumsbetragtninger for sådanne forsøg.

8.7.0. Kombination af metoder

Ved anvendelse af en kombination af to eller flere metoder til eftervisning af, at en løsning opfylder funktionskravene i BR18, skal kravene til anvendelsen af hver af de enkelte metoder også opfyldes.

Udover nedenstående eksempler beskrives emnet ikke nærmere i denne vejledning.

En ofte anvendt kombination af metoder er, hvor der udføres en komparativ analyse, baseret på en præaccepteret løsning, og hvor der anvendes en brandteknisk beregning, som grundlag for sammenligningen. Brandteknisk beregning er beskrevet i afsnit 8.3.0. Ved anvendelse af komparativ analyse, er det ikke nødvendigt at anvende acceptkriterierne direkte til evaluering af resultaterne, da acceptkriterierne implicit ligger til grund for de præaccepterede løsninger. Den komparative analyse skal, når den kombineres med brandtekniske beregninger som beskrevet under afsnit 8.3.0 baseres på både scenarier med og uden svigt og på følsomhedsanalyser. Dette uanset at de præaccepterede løsninger normalt kan anvendes uden denne vurdering, som derfor må baseres på sund fornuft og fagligt skøn.

Et eksempel på en kombination af metoder, kan være en eftervisning af antal, placering og bredde på udgange, hvor bevægelses- og køtiden sammenlignes for evakueringsberegninger af hhv. en præaccepteret løsning og en funktionsbaseret løsning. Et relevant svigtscenarium kan i dette tilfælde være blokering af en eller flere udgange, og en relevant følsomhedsanalyse kan være, hvad konsekvensen er ved totalvarsling, uanset om løsningen er acceptabel som en præaccepteret løsning.

Et andet eksempel kan være en eftervisning af effekten af en luftsluse, der afviger geometrisk fra de præaccepterede løsninger, og som derfor sammenlignes på baggrund af en CFD-beregning af hhv. den præaccepterede løsning og den funktionsbaserede løsning. En relevant følsomhedsanalyse kan være vindafhængighed uanset at dette normalt ikke vurderes ved en præaccepteret løsning.

Andre anvendte kombinationer er anvendelse af inputdata baseret på prøvning eller forsøg. F.eks. forsøgsdata om personflow på en konkret spindeltrappe, anvendes som input i en evakueringsmodel, og data fra en brandprøvning anvendes som designbrand i en brandteknisk dimensionering.

8.8.0. Litteraturliste

- [1] Trafik-, Bygge- og Boligstyrelsen, Vejledning til Bygningsreglementets afsnit 5 - Brand, Trafik-, Bygge- og Boligstyrelsen, 2019.
- [2] Fonden Dansk Standard, DS/INSTA 951:2018 Fire Safety Engineering - Probabilistic Methods for Verifying Fire Safety Design in Buildings, Fonden Dansk Standard, 2018.
- [3] British Standard (BSI), PD 7974-7:2019 - Application of fire safety engineering principles to the design of buildings. Part 7: Probabilistic risk assessment, British Standard (BSI), 2019.
- [4] Fonden Dansk Standard, DS/EN 1991-1-2; Eurocode 1: Last på bærende konstruktioner - Del 1-2: Genrelle laster - Brandlast, Fonden Dansk Standard, 2007.
- [5] Fonden Dansk Standard, DS/CEN/TR 12101-5 Brandventilation - Del 5: Retningslinjer vedrørende funktionelle henstillinger og beregningsmetoder for brandventilationssystemer, Fonden Dansk Standard, 2005.
- [6] SFPE , Handbook of Fire Protection Engineering Fifth edition, 2015.
- [7] Fonden Dansk Standard, DS/ISO/TR 16730-2:2013 Funktionsbestemte brandkrav - Vurdering, verificering og validering af beregningsmetoder - Del 2: Eksempel på brandzonemodel, Fonden Dansk Standard, 2013.
- [8] S. Bengtson, Brandskyddshandboken : en handbok för projektering av brandskydd i byggnader, Lund : Lunds Tekniska Högskola, 2005.
- [9] Best Practice gruppen, CFD Best Practice, Best Practice gruppen, 2009.
- [10] Emmons, Emmons, Emmons, 1997.

- [11] Fonden Dansk Standard, DS/EN 12101-2:2017 - Brandventilation – Del 2: Naturlige røg- og varmeudsugningsventilatorer, Fonden Dansk Standard, 2017.
- [12] The Chartered Institution of Building Services Engineers, Transportation systems in Buildings - CIBSE Guide D: 2015, 5th ed., Norwich Great Britain: Page Bros Ltd., 2015.
- [13] Trafik-, Bygge- og Boligstyrelsen, Bygningsreglement 2018, København: Trafik-, Bygge- og Boligstyrelsen, 2018.
- [14] NFPA, NFPA 101 – Life Safety Code Handbook.
- [15] British Standards (BSI), PD 7974-6:2019 - The application of fire safety engineering principles to fire safety design of buildings, Part 6: Human factors: Life safety strategies - Occupant evacuation, behaviour and condition (Sub-system 6), London: British Standards (BSI), 2019.
- [16] DS/INSTA, ”DS/INSTA TS 950:2014 Fire Safety Engineering - Comparative method to verify fire safety design in buildings,” DS-information, København, 2015, 1. udgave.
- [17] Justitsministeriet og Kulturministeriet, ”Vejledning om sikkerhed ved udendørs musikarrangementer o.lign.,” Justitsministeriet og Kulturministeriet, København, 2010.
- [18] H. Frantzich, Tid för utrymning vid brand, Lund: Department of Fire Safety Engineering, Lund University, 2001.
- [19] N. B. Nordiska kommittén för byggbestämmelser, Funktionsbestemte brandkrav og teknisk vejledning for beregningsmæssig eftervisning, NKB Utskotts- och arbetsrapporter, 1994.
- [20] Society of Fire Protection Engineers, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Fourth Edition ed., SFPE, 2008.
- [21] D. Helbing and P. Molnár, ”Social Force Model for pedestrian dynamics,” *Physical review e*, vol. 51, nr 5, p. 4282–4286, 1995.
- [22] M. J. Seitz, F. Dietrich, and G. Köster, ”The effect of stepping on pedestrian trajectories,” *Physica a: statistical mechanics and its applications*, vol. 421, p. 594–604, 2015.
- [23] Fruin JJ, Pedestrian Planning and Design, 1971.
- [24] Fonden Dansk Standard, DS/EN 1363-2 Prøvning af brandmodstandsevne. Del 2, Fonden Dansk Standard.
- [25] Erhvervs- og Byggestyrelsen, EN 1995-1-2 DK NA:2007 Eurocode 5: Trækonstruktioner – Del 1-2: Generelt – Brandteknisk dimensionering, Erhvervs- og Byggestyrelsen, 2007.
- [26] Fonden Dansk Standard, DS/EN 1996-1-2:2007 Eurocode 6: Murværkskonstruktioner - Del 1-2: Generelle regler - Brandteknisk dimensionering, Fonden Dansk Standard, 2007.
- [27] Fonden Dansk Standard, DS/EN 1992-1-2 + AC:2013 Eurocode 2: Betonkonstruktioner - Del 1-2: Generelle regler - Brandteknisk dimensionering, Fonden Dansk Standard, 2013.
- [28] SP Trätekt, Fire safety in timber buildings - Technical guideline for Europe, SP Trätekt, 2010:19.

- [29] SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut, Brandsäkra trähus 3. udgave 2012, SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut, 2012.
- [30] Træinformation, TRÆ 71 - Brandsikre bygningsdele 1. udgave 2015, Træinformation, 2015.
- [31] J. Q. Bjorn Karlsson, Enclosure Fire Dynamics, Environmental & Energy Engineering, 1999.
- [32] J. M. J. Klote, Design of Smoke Management Systems, ASHRAE Special Publications, 1992.
- [33] NFPA, NFPA 92B - Standard for Smoke Management Systems in Malls, Atria, and, NFPA, 2005.
- [34] D. Drysdale, An introduction to Fire Dynamics, Department of Fire Safety Engineering, 1986.
- [35] P. & C. DiNenno, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering 3rd., Society of Fire Protection Engineers, National Fire Protection Association, 2002.
- [36] Nordic Committee on Building Regulations. Fire Safety Committee, Funktionsbestemte brandkrav og teknisk vejledning for beregningsmæssig eftervisning, Nordic Committee on Building Regulations. Fire Safety Committee, 1994:07.
- [37] Rasbash, D.J, Phillips, R.P, Quantification of smoke produced at fires. Test methods for smoke and methods of expressing smoke evolution, 1978.
- [38] R. L. Alpert, Fire Technology, Factory Mutual Research Corporation, 1972.
- [39] Fonden Dansk Standard, EN 1995-1-2 DK NA:2007 Eurocode 5 - Trækonstruktioner - Del 1-2: Generelt - Brandteknisk dimensionering, Fonden Dansk Standard, 2007.
- [40] Trafik-, Bygge- og Boligstyrelsen, Bilag 5 til bygningsreglementets vejledning til kap. 5 - Brand- Præ-accepterede løsninger - Kontorbygninger, Trafik-, Bygge- og Boligstyrelsen.
- [41] Trafik-, Bygge- og Boligstyrelsen, Bilag til bygningsreglementets kap. 5 - Kap. 4 Antændelse og brand- og røgspredning, Trafik-, Bygge- og Boligstyrelsen, 2019.
- [42] Fonden Dansk Standard, DS/EN 13501-2:2016; Brandklassifikation af byggevarer og bygningsdele - Del 2: Klassifikation ud fra resultater opnået ved prøvning af brandmodstandsevne, eksklusive ventilationssystemer, Fonden Dansk Standard, 2016.
- [43] Trafik-, Bygge- og Boligstyrelsen, Bilag 4 til bygningsreglementets vejledning til kap. 5 – brand. Præ-accepterede løsninger for brandsikring af bygningsafsnit med forsamlingslokaler, butikker mv., København: Trafik-, Bygge- og Boligstyrelsen, 2019.
- [44] Trafik-, Bygge- og Boligstyrelsen, Bilag 6 til bygningsreglementets vejledning til kap. 5 - Brand- Præ-accepterede løsninger - Hoteller mv., Trafik-, Bygge- og Boligstyrelsen, 2018.
- [45] Trafik-, Bygge- og Boligstyrelsen, Bygningsreglementets vejledning til kap. 5 – Brand, kapitel 2 – Evakuering, Trafik-, Bygge- og Boligstyrelsen, 2019.
- [46] Boyce, K.E., Shields, T.J.m and Silcock, G.W.H., "Toward the Characterization of Building Occupancies for Fire Safety Engineering: Capabilities of Disabled People Moving Horizontally and on an Incline," *Fire Tech*, vol. 35, pp. 51-86, 1999.

- [47] Grosshandler, W., Bryner, N., Madrzykowski, D. & Kuntz, K., "Report of the Technical Investigation of the station nightclub fire," National Institute of Standards and Technology (NIST), USA, 2005.
- [48] Department for Culture, Media and Sport, Guide to Safety at Sports Grounds, Fourth Edition, London: Department for Culture, Media and Sport, 1997.
- [49] ISO, ISO 834-14:2019 - Fire-resistance tests -- Elements of building construction -- Part 14: Requirements for the testing and assessment of applied fire protection to solid steel bar, ISO, 2019.

Udskast

Appendiks NB: Disse afsnit placeres i hver deres appendiks.

8.8.1. Håndberegninger

8.8.1.1. *Brandens maksimale effektudvikling*

Brandens maksimale effektudvikling er begrænset af mængden af tilgængelig ilt eller brændstof. Det er derfor den mindste værdi af hhv. den ventilationskontrollerede og den brændstofkontrollerede brand, som er den maksimale brandeffekt.

8.8.1.1.1 Ventilationskontrolleret

Den maksimale effektudvikling ved en ventilationskontrolleret brand kan jf. J. G. Quintiere et al. bogen Enclosure Fire Dynamics [31]. beregnes ud fra de åbninger i brandrummet, som iltten kan tilføres gennem.

Den maksimale effektudvikling kan beregnes som:

$$\dot{Q}_{maks,v} = 1518 \cdot A_{\text{åbning}} \cdot \sqrt{H_{\text{åbning}}}$$

Hvor:

$\dot{Q}_{maks,v}$ Maksimal effekt ved ventilationskontrolleret brand [kW]

$A_{\text{åbning}}$ Arealet af ventilationsåbningerne [m²]

$H_{\text{åbning}}$ Ventilationsåbningernes højde [m]

I brandrum med flere ventilationsåbninger med forskellig højde, er $H_{\text{åbning}}$ den gennemsnitlige højde vægtet i forhold til åbningernes areal.

$$H_{\text{åbning}} = \frac{\sum(A_{\text{åbning}} \cdot H_{\text{åbning}})}{\sum A_{\text{åbning}}}$$

De ovenstående formler forudsætter, at alle ventilationsåbninger er vertikale og befinder sig i nogenlunde samme højde over gulv. Formlerne er således ikke egnede til rum med horisontale brandventilationsåbninger.

8.8.1.1.2 Brændstofkontrolleret

Den maksimale effektudvikling ved en brændstofkontrolleret brand, kan bestemmes ud fra forbrændingshastigheden, den effektive forbrændingsvarme og det horisontale antændte areal er kendt, som beskrevet nedenfor.

$$\dot{Q}_{maks,b} = \chi \cdot A_{tot} \cdot \dot{m}'' \cdot \Delta H_c$$

Hvor:

$\dot{Q}_{maks,b}$ Maksimal brandeffekt ved brændstofkontrolleret brand [kW]

ΔH_c Den kalorimetriske brændværdi [kJ/g]

$\dot{m}''$ Forbrændingshastighed pr. arealenhed [g/m²s]

A_{tot} Arealet af antændte horisontale flader [m²]

χ Forbrændingseffektivitet sat til 1,0 for designbrande [-]

Tabel 8.0-20: Materialeparametre for forskellige materialer jf. J. G. Quintiere et al. bogen Enclosure Fire Dynamics [31]

Materiale	$\dot{m}''$ [g/m ² s]	ΔH_c [kJ/g]
Benzin	55	44
Træ	13	19
Polystyren (fast)	35	39
Ethanol	15	27

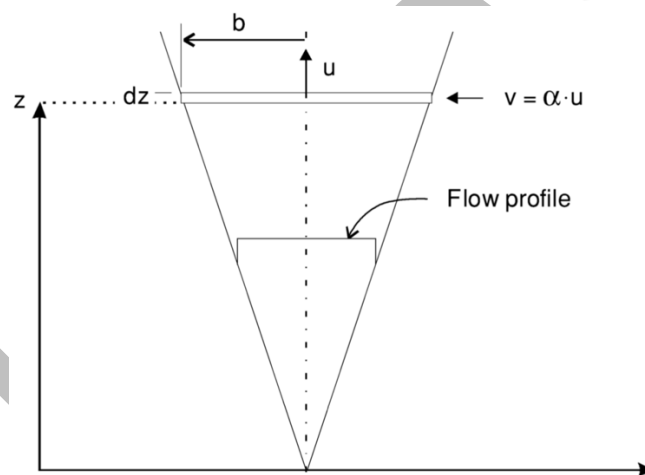
8.8.1.2. Aksesymmetriske røgfanemodeller

En opdriftsdrivet røgfane (plume), dannes som resultat af flammerne, over det brændende brændstof. Den aksesymmetriske røgfane antages at være fritstående fra vægge og hjørner, og derfor symmetrisk langs den lodrette midterlinje, og indblanding af luft sker horisontalt fra alle retninger. I dette afsnit beskrives tre typer røgfaner, benævnt hhv. Zukoski, og Heskestad og McCaffrey.

Der henvises til J. G. Quintiere et al. bogen Enclosure Fire Dynamics [31]. for yderligere information.

8.8.1.2.1 Zukoski røgfanen

Zukoski røgfanen kan benyttes til at beregne massestrømmen og røggastemperaturen i røgfanens midterlinje.



Figur 8.0-27: Zukoskis røgfane. (figur fra Enclosure Fire Dynamics, egen figure skal laves)

8.8.1.2.1.1. Modelbegrænsninger

Zukoski røgfanen kan benyttes når:

- Afstanden fra kanten af brændstoffet til andre objekter f.eks. vægge og søjler skal være mindst det halve af den største af brændstofudbredelsens længde, L, og bredde, B,
- Højden til røggaslaget fra branden skal være større end $0,45 \cdot \dot{Q}^{2/5}$
- Brændstofudbredelsen forudsættes at være cirkulær eller rektangulær. Hvis udbredelsen er rektangulær skal forholdet mellem udbredelsens længste og korteste side ikke større end 1,2.

Massestrømning i røgfanen, $\dot{m}_p$ [kg/s], for en given højde over branden, z [m], beregnes ved følgende udtryk:

$$\dot{m}_p(z) = 0.071 \cdot \dot{Q}^{\frac{1}{3}} z^{\frac{5}{3}}$$

Temperaturen i røgfanen, T [K], for en given højde over branden, z [m], beregnes ved følgende udtryk:

$$T(z) = 13.76 \cdot \dot{Q}^{\frac{2}{3}} z^{-\frac{5}{3}} + 293$$

Hvor:

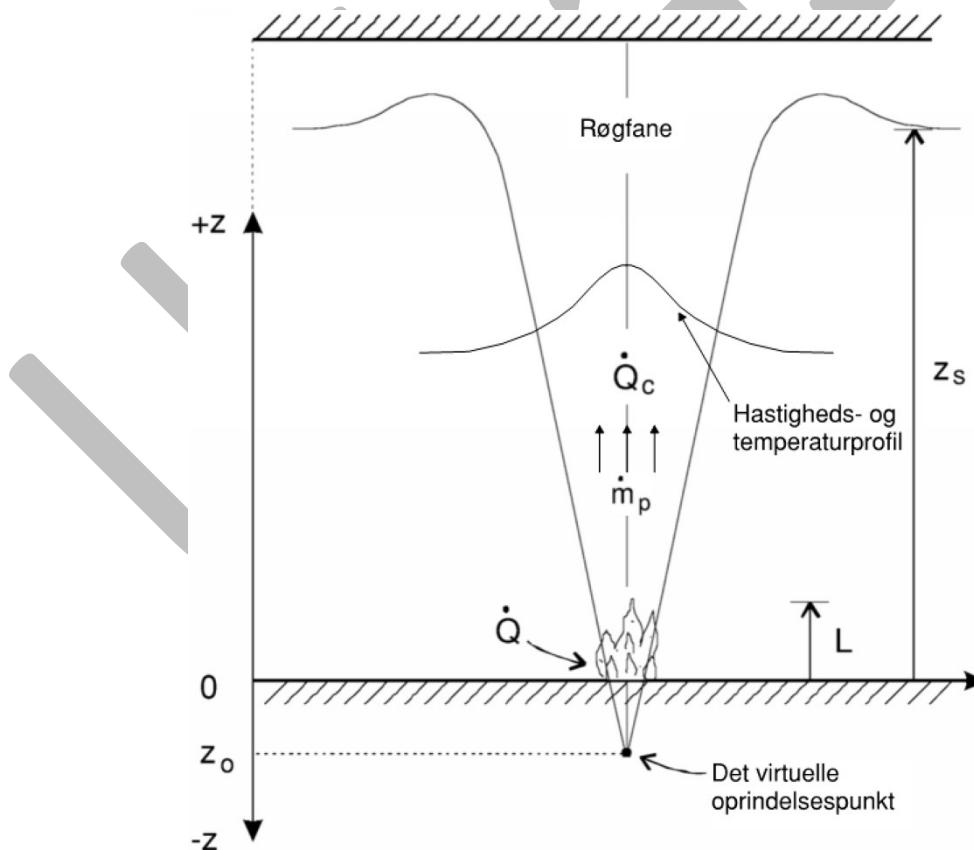
$\dot{Q}$ Brandeffekten [kW]

z Højden over branden [m]

8.8.1.2.2 Heskestad

Heskestad røgfanen kan benyttes til at beregne massestrømmen og røggastemperaturen i røgfanens midterlinje.

Heskestad røgfanen benytter en vertikal forskydning af røgfanens oprindelsespunkt, benævnt det virtuelle oprindelsespunkt.



Figur 8.0-28: Heksestad's røgfane. (figur fra Enclosure Fire Dynamics, egen figur skal laves)

Brandeffect, $\dot{Q}$, anvendes ved beregning af middelflammehøjden og positionen af det virtuelle oprindelsespunkt.

Den konvektive brandeffekt $\dot{Q}_c$ [kW] sættes til 70 % af designbrandens effekt, $\dot{Q}$ [kW] for ukendte brændstoffer. Hvis brændstoffet er kendt, kan $\dot{Q}_c$ defineres med udgangspunkt i dette.

Det virtuelle oprindelsespunkt kaldes z_0 [m] kan beregnes ved følgende udtryk, hvor brandeffekten $\dot{Q}$ [kW] anvendes:

$$z_0 = 0,083\dot{Q}^{\frac{2}{5}} - 1,02D$$

Den gennemsnitlige flammehøjde L [m] kan beregnes ved følgende udtryk, hvor brandeffekten $\dot{Q}$ [kW] anvendes:

$$L = 0,235\dot{Q}^{\frac{2}{5}} - 1,02D$$

Røgfanens massestrøm $\dot{m}_p$ [kg/s] kan beregnes ved en given højde over branden ved følgende udtryk, hvor den konvektive brandeffekt $\dot{Q}_c$ anvendes:

$$\dot{m}_p(z) = \begin{cases} 0,0056\dot{Q}_c^{\frac{1}{3}} \frac{z}{L} & \text{For } z < L \\ 0,071\dot{Q}_c^{\frac{1}{3}}(z - z_0)^{\frac{5}{3}} + 1,92 \cdot 10^{-3}\dot{Q}_c & \text{For } z > L \end{cases}$$

Temperaturen i røgfanen T [K] kan beregnes ved en given højde over branden ved følgende udtryk:

$$T(z) = 9,1 \left(\frac{T_\infty}{g c_p^2 \rho_\infty^2} \right)^{\frac{1}{3}} \dot{Q}_c^{\frac{2}{3}} (z - z_0)^{-\frac{5}{3}} + T_\infty$$

Hvor:

T_∞ Temperaturen på den omgivende luft = 293 [K]

ρ_∞ Densitet på den omgivende luft = 1,2 [kg/m³]

c_p Den specifikke varmekapacitet for den omgivende luft = 1,0 [kJ/(kg K)]

g Tyngdeaccelerationen = 9,81 [m/s²]

$\dot{Q}$ Brandeffekten [kW]

$\dot{Q}_c$ Den konvektive brandeffekt [kW]

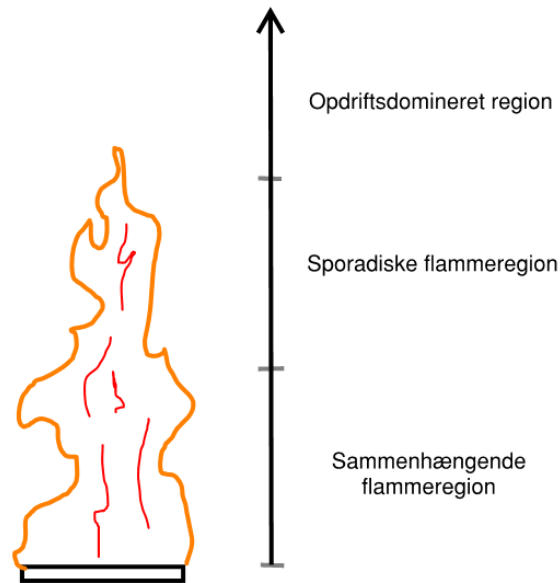
z Højden over branden [m]

D Omregning af brandkildens areal i kvadratmeter x [m²] til ækvivalent diameter. $D = \sqrt{\frac{4 \cdot x}{\pi}}$ [m]

8.8.1.2.3 McCaffrey

McCaffrey røgfanen opdeles i tre regioner; de sammenhængende flammer, de sporadiske flammer og den opdriftsdominerede region. McCaffrey røgfanen kan benyttes til at

beregne røggashastigheden i røgfanen og røggastemperaturen i røgfanens lodrette midterlinje.



Figur 8.0-29: Regioner i McCaffrey røgfane.

8.8.1.2.3.1. Modelbegrænsninger

McCaffrey røgfanen forudsiger maksimumtemperaturer på 800°C, mens der ved meget store brande, kan være flammemetemperaturen på omkring 1200°C i det sammenhængende flammeområde.

8.8.1.2.3.2. Modelanvendelse

Den opadgående gashastighed i røgfanen u [m/s] kan beregnes ved en given højde over branden ved følgende udtryk:

$$u(z) = \kappa \left(\frac{z}{2} \right)^{\eta} \dot{Q}_t^{\frac{1}{5}}$$

Temperaturen i røgfanen T [K] kan beregnes ved en given højde over branden ved følgende udtryk:

$$T(z) = T_{\infty} \left(1 + \left(\frac{\kappa}{0,9\sqrt{2g}} \right)^2 \left(\frac{z}{2} \right)^{2\eta-1} \right)$$

Hvor:

$\dot{Q}$ Brandeffekten [kW]

T_{∞} Temperaturen på den omgivende luft = 293 [K]

g Tyngdeaccelerationen = 9,81 [m/s²]

Idet nedenstående konstanterne benyttes for de tre flammeniveauer:

Tabel 8.0-21: Konstanter i McCaffreys røgfane jf. J. G. Quintiere et al. bogen Enclosure Fire Dynamics [31]

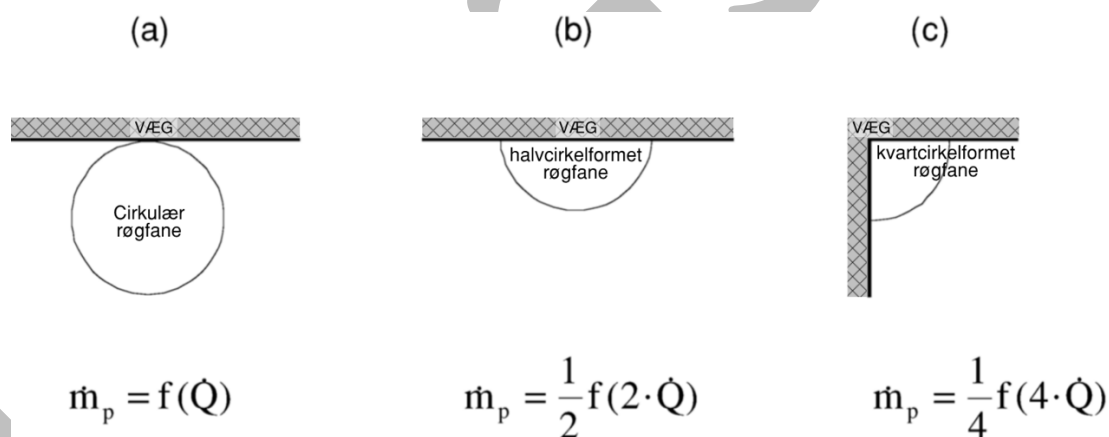
Flammerne i røgfanen	$\frac{z}{Q^{\frac{2}{5}}}$	η	κ
Sammenhængende	$< 0,08$	$1/2$	$6,8$
Sporadiske	$0,08 - 0,2$	0	$1,9$
Opdriftsdominerede	$> 0,2$	$-1/3$	$1,1$

8.8.1.2.4 Ikke aksesymmetriske røgfaner

Brande, der er placeret op ad en væg eller i et hjørne, vil ikke udvikle en aksesymmetriske røgfane, da indblandingen begrænses.

For brande placeret op ad en væg, kan massestrømmen findes som halvdelen af den beregnede massestrøm, baseret på en dobbelte brandeffekt.

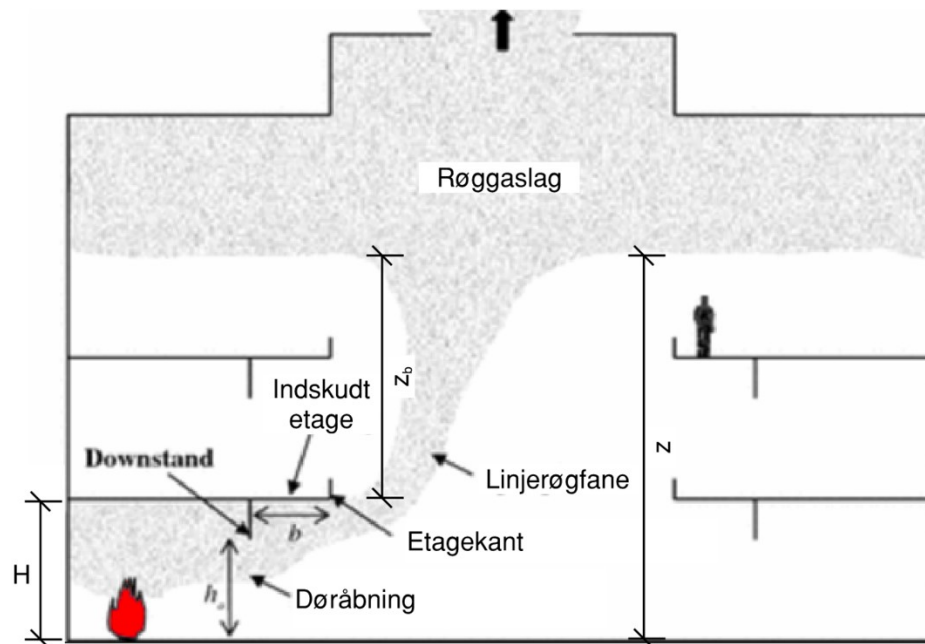
For brande placeret i et hjørne, kan massestrømmen findes som halvdelen af den beregnede massestrøm, baseret på en dobbelte brandeffekt.



Figur 8.0-30: Brandkilder nær vægge og hjørner.

8.8.1.2.5 Linjerøgfanen

Linjerøgfanen kan benyttes ved bygninger med indskudte etager og i byggerier med åbne atrier, hvor røgfanen passerer fra et brandrum, under en kant, mod et rum med større rumhøjde.



Figur 31:

Massestrømmen afhænger af bredden af linjerøgfanen W der, når der ingen hindringer er, bestemmes som:

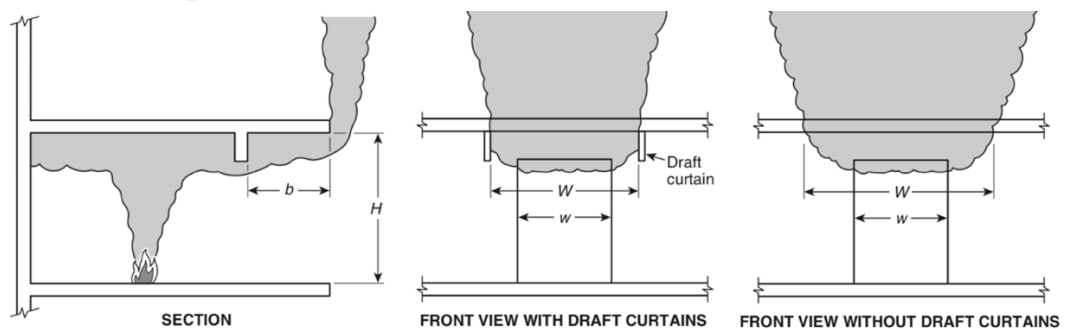
$$W = w + b$$

Hvor:

- W Bredden af linjerøgfanen [m]
- w Bredden af åbningen fra oprindelsesområdet [m]
- b Afstanden fra åbningen til etagedækkets kant [m]

Hvis der er fysiske barrierer, som kan begrænse røgens vandring under loftet mod det høje rum, kan W sættes til afstanden mellem disse når:

- De fysiske barrierer er placeret vinkelret på åbningen til brandrummet.
- De fysiske barrierer har en højde på mindst 10 procent loftshøjden, H .



Figur 32: Illustration af en linjerøgfanen

Beregning af massestrømmen skal foretages ud fra z_b [m], der er højden fra undersiden af etagedækket til røggaslagets underkant og W der er bredden af linjerøgfanen.

For z_b under 15 m kan følgende udtryk til beregning af massestrømmen benyttes:

anvendes:

$$\dot{m}_b(z_b) = 0,36(\dot{Q}W^2)^{\frac{1}{3}}(z_b + 0,25H)$$

Hvor $T_p - T_\infty$ skal være større end $2,2^\circ\text{C}$ før ovenstående er gyldigt:

$$T_p = T_\infty + \frac{\dot{Q}_c}{\dot{m}_b \cdot c_p}$$

For z_b under 15 m, hvor W er under 10 m, kan følgende udtryk til beregning af massestrømmen benyttes:

$$\dot{m}_b(z_b) = 0,59\dot{Q}^{\frac{1}{3}}W^{\frac{1}{5}}\left(z_b + 0,17W^{\frac{7}{15}}H + 10,35W^{\frac{7}{15}} - 15\right)$$

I de ovenstående formler er:

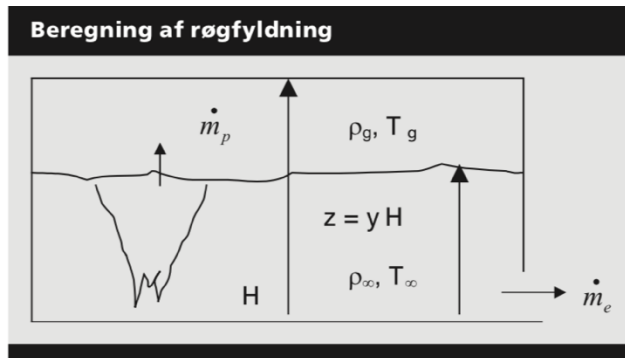
- H Loftshøjden på den brandramte etage [m]
- z_b Højde fra undersiden af etagedækket til røggaslagets underkant [m]
- z $z_b + H$
- $\dot{Q}_c$ Den konvektive brandeffekt $\dot{Q}_c$ [kW] hvor 30 % af designbrandens brandeffekt antages at gå tabt af stråling.
- $\dot{m}_b$ Massestrømningen i linjerøgfanen ved højden z [kg/s]
- c_p Den specifikke varmekapacitet for den omgivende luft = 1.0 [kJ/(kg·°C)]
- T_p Den gennemsnitlige røggastemperatur ved højden z [°C]
- T_∞ Temperaturen på den omgivende luft = 20 [°C]

8.8.1.3. Røgfylldning

Formlerne i dette afsnit kan benyttes til beregning af røgfylldning og dimensionering af brandventilationsanlæg.

8.8.1.3.1 Røgfylldning af rum med små lækagearealer ved gulv

For lukkede rum med små lækagearealer ved gulvniveau kan tiden til røgfylldning beregnes baseret på en konstant brandeffekt $\dot{Q}_c$ som beskrevet af J. G. Quintiere et al. i bogen Enclosure Fire Dynamics [31].



Figur 8.0-33: Røgfylldning af rum med små lækagearealer ved gulv

Metoden er baseret på beregning af en dimensionsløs brandeffekt, $\dot{Q}^*$ og en dimensionsløs røglagshøjde y^* , hvorfra der kan bestemmes en dimensionsløs tid baseret på aflæsning af kurver. Herfra kan tiden til kritiske forhold beregnes.

Den dimensionsløse brandeffekt, $\dot{Q}^*$ kan under normale forhold beregnes som:

$$\dot{Q}^* = \frac{\dot{Q}_c}{1100 \cdot H^{5/2}}$$

Hvor:

$\dot{Q}_c$ Den konstante konvektive brandeffekt (kW), sættes til $0,7 \cdot \dot{Q}$

H Højden fra gulv til underside af loft [m]

Den dimensionsløse røglagshøjde over gulv:

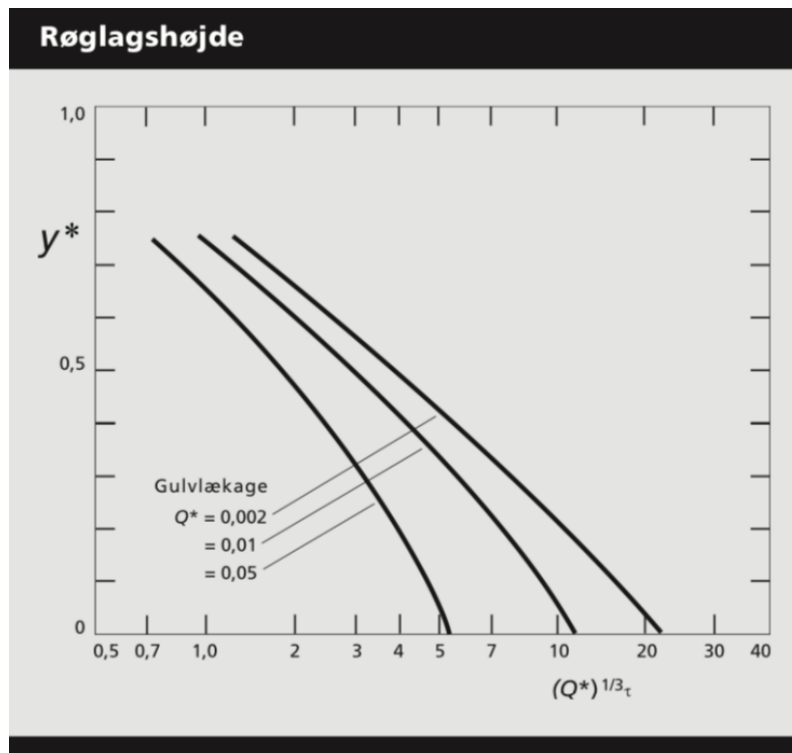
$$y^* = \frac{z}{H}$$

Hvor:

z Røglagets højde over gulv [m]

H Højden fra gulv til underside af loft [m]

$(\dot{Q}^*)^{1/3} \tau$ kan aflæses af nedenstående figur for en given y^* og $\dot{Q}^*$



Figur 8.0-34: Røglagshøjden over gulv som funktion af tid - effekt, når højde, tid og effekt er normeret til dimensionsløse størrelser.

Den dimensionsløse tid t , som anvendes ved bestemmelse af røglags højden ved de normerede kurver i ovenstående figur:

$$\tau = t_{kritisk} \sqrt{\frac{g}{H}} \frac{H^2}{A_g}$$

Hvor:

τ	Dimensionsløs tid
$t_{kritisk}$	Tid til kritiske forhold [s]
g	Tyngdeaccelerationen (9,81) [m/s ²]
H	Højden fra gulv til underside af loft [m]
A_g	Gulvareal [m ²]

8.8.1.3.2 Beregning af røgfylldning i lokaler med naturlig (termisk) brandventilation

Denne model kan anvendes til bestemmelse af massestrømmen gennem en brandventilationsåbning for en stationær højde til røggaslaget og en konstant brandeffekt.

Forudsætningen for beregning af massestrømmen gennem en brandventilationsåbning er, at store brandventilationsåbninger i taget opdeles i flere åbninger. Arealet af den enkelte ventilationsåbning skal være mindre end $2(H-z)^2$, hvor H er højden fra gulv til brandventilationsåbningen, og z er højden fra gulv til røglaget.

Det er endvidere en forudsætning, at områdets udstrækning er så begrænset i forhold til brandens størrelse, at røgen vil holde sig i et stabilt lag under loftet. Store rum må derfor

opdeles med røgskærme så dybe, at røglaget holdes over deres underkant. Jf. J. G. Quintiere et al. Massestrømmen gennem brandventilationsåbninger bestemmes som:

$$\dot{m}_v = C_d A_v \sqrt{2\rho_g [-\Delta P_l + (\rho_\infty - \rho_g)g(H_v - z)]}$$

Hvor:

$\dot{m}_v$ Massestrømmen gennem brandventilationsåbninger [kg/s]

C_d Strømningskoefficient for åbning (komponentspecifik)

A_v Det frie areal af brandventilationsåbninger [m²]

z Røglagets højde over gulv (m)

ΔP_l Trykforskel i tilluftsåbningerne [Pa]

ρ_g Densitet på røgen [kg/m³]

ρ_∞ Densitet på luft ved omgivelsernes temperatur [kg/m³]

g Tyngdeaccelerationen [m/s²]

H_v Højde til brandventilationsåbninger, middel [m]

Røgens densitet kan beregnes som:

$$\rho_g = \frac{353}{T_g}$$

Hvor:

T_g Røggastemperaturen [K]

Trykforskel over tilluftåbninger bestemmes til:

$$\Delta P_l = \frac{\dot{m}_v^2}{2\rho_\infty (C_d A_D)^2}$$

A_D Samlet areal af tilluftsåbninger [m²]

C_d Strømningskoefficient for tilluftåbninger [-]

Massestrømmen i røgfanen $\dot{m}_p$ kan herefter beregnes for en given værdi af z og sammenholdes med $\dot{m}_v$.

For at sikre, at stationær tilstand er indtrådt, skal det kontrolleres, at:

$$\dot{m}_p \approx \dot{m}_v$$

Hvis dette ikke er tilfældet, skal beregningen gentages med andre inddata, f.eks. ved at ændre brandventilationsarealet, tilluftsarealet eller højden til røggaslaget. Beregningen kan også udføres ved iteration.

8.8.1.3.3 Beregning af røgfylldning i lokaler med mekanisk ventilation

Massestrømmen som mekanisk brandventilation kan bortlede kan beregnes ud fra røggassens densitet baseret på:

$$\dot{m}_v = \dot{V}_{vent} \rho_g$$

$\dot{m}_v$ Massestrømmen gennem brandventilationen [kg/s]

$\dot{V}_{vent}$ Volumenstrømmen i den mekaniske ventilation [m³/s]

Røgens densitet ρ_g [kg/m³] kan beregnes som:

$$\rho_g = \frac{353}{T_g}$$

Hvor:

T_g Røggastemperaturen [K] som bestemmes for røgfanen.

Massestrømmen i røgfanen $\dot{m}_p$ kan tilsvarende beregnes for en given værdi af z og sammenholdes med $\dot{m}_v$.

For at sikre, at stationær tilstand er indtrådt, skal det kontrolleres, at:

$$\dot{m}_p \approx \dot{m}_v$$

Hvis dette ikke er tilfældet, skal beregningen gentages med andre ind- data, f.eks. ved at ændre kapaciteten af brandventilationsanlægget eller sænke højden til røggaslaget.

Beregningen kan også udføres ved iteration

Ved tilførsel af erstatningsluft gennem flugtvejsdøre må middelhastigheden ikke overstige 5 m/s.

8.8.1.3.4 Røgfylldning af atrier og lignende rum

For brande med konstant effekt kan røglagets højde jf. Design of Smoke Management Systems [32] i ikke ventilerede rum overslagsmæssigt beregnes som:

$$\frac{z}{H} = 1,11 - 0,28 \ln \left[\frac{t \dot{Q}_c^{\frac{1}{3}} H^{-\frac{4}{3}}}{\frac{A_g}{H^2}} \right]$$

Hvor:

z Røglagets højde [m]

H Rummets højde [m]

$\dot{Q}_c$ Den konvektive effekt [kW]

t Tid efter antændelse [s]

A_g Rummets gulvareal [m²]

Formlen kan anvendes for $A_g/H^2 = 0,9$ til 14 og z/H større end 0,2. Hvis z/H bliver større end 1,0, skal dette tolkes, som at der ikke dannes et røglag i atriet.

8.8.1.4. Plugholing og afstand mellem ventilatorer

Plugholing opstår når udsugningskapaciteten på et enkelt punkt i et brandventilationsanlæg er tilstrækkeligt stort til at trække luft fra det nedre lag og derved omgå selve røggaslaget. Heraf fjernes mindre røg ved udsugningen, som resulterer i et dybere røggaslag.

Følgende metoden er gyldig for mekanisk udsugning, jf. NFPA 92b [33]:

$$\dot{V}_{max} = 4,16 \cdot \gamma \cdot d^{\frac{5}{2}} \cdot \left(\frac{T_g - T_{\infty}}{T_{\infty}} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Hvor:

$\dot{V}_{max}$ Den maksimale lufthastighed [m^3/s]

γ Er en dimensionsløs faktor relateret til placeringen af udsugningspunktet i forhold til væggen.

Når centrum af udsugningspunkt er placeret mere end to gange udsugningsdiameteren fra nærmeste væg: $\gamma = 1,0$

Når centrum af udsugningspunkt er placeret tættere end to gange udsugningsdiameteren fra nærmeste væg eller udsugningspunkt er placeret i væg: $\gamma = 0,5$

d Dybden af røggaslaget [m]

T_g Den gennemsnitlige røggastemperatur [$^{\circ}\text{C}$]

T_{∞} Temperaturen på den omgivende luft = 293 [K]

Minimumsafstanden mellem ventilatorerne beregnes iht. NFPA 92b [33] som følgende:

$$S_{min} = 0,9 \cdot \dot{V}_e^{\frac{1}{2}}$$

Hvor:

S_{min} Er den mindste afstand mellem udsugningspunkter [m]

$\dot{V}_e$ Volumenstrøm pr. udsugning [m^3/s]

Forholdet $\frac{d}{D_{uds}}$ skal være større end 2, hvor D_{uds} er diameteren på udsugningspunktet:

$$D_{uds} = \frac{2ab}{a+b}$$

Hvor:

a Længde på udsugningsåbningen

a Bredde på udsugningsåbningen

8.8.1.5. *Stråling*

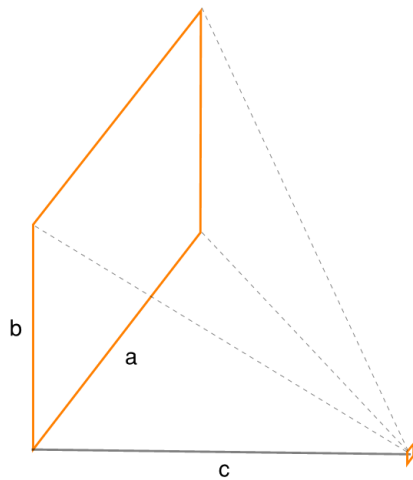
Nedenstående metode kan anvendes til at bestemme strålingsintensiteten i et punkt fra en varm flade.

Der henvises til DS/EN 1991-1-2 [27] for fastlæggelse af røgfanens omfang udenfor en bygning ved beregning af stråling mellem bygninger.

8.8.1.5.1 Beregning af stråling fra en flade mod et punkt

Beregningen af den strålingsintensitet en person eller en bygningsdel udsættes for er baseret på synsfaktoren $F_{\text{flade} \rightarrow \text{punkt}}$ mellem en rektangulær flade med sidelængde a og b og et punkt i afstanden c .

$$F_{\text{flade} \rightarrow \text{punkt}} = \frac{1}{2\pi} \left(\tan^{-1} \left(\frac{b}{c} \right) - \frac{c}{\sqrt{a^2 + c^2}} \cdot \tan^{-1} \left(\frac{b}{\sqrt{a^2 + c^2}} \right) \right)$$



Figur 8.0-35: Synsfaktor mellem flade og punkt

Strålingsintensitet som punktet udsættes for fra flade kan beregnes ved følgende udtryk Jf. J. G. Quintiere et al. I bogen Enclosure Fire Dynamics [31]:

$$\dot{q}_{\text{flade} \rightarrow \text{punkt}}'' = \epsilon_{\text{gas}} F_{\text{flade} \rightarrow \text{punkt}} \sigma (T_{\text{flade}}^4 - T_{\text{punkt}}^4)$$

Hvor:

T_g Den gennemsnitlige røggastemperatur [K]

T_{punkt} Temperaturen på den omgivende luft = 293 [K]

σ Stefan-Boltzmanns konstant = $5,67 \cdot 10^{-8}$ [W/m²K⁴]

ϵ_{gas} Almindeligvis kan emmisiviteten af røggas antages til $\epsilon_{\text{gas}} \approx 0,85$ [-]

For beregning af strålingsintensitet på personer under røglaget under er røggaslag betragtes røggaslagets underside som fladen og personen som punktet.

For beregning af strålingsintensitet på bygningsdele fra et røggaslag eller en flamme betragtes røggaslagets underside eller flammen som fladen og den modtagende bygningsdel som punktet.

8.8.1.6. Optisk densitet

En forøget optisk densitet kan medføre kritiske forhold. Kontrol af, hvor meget materiale, der kan afbrændes, inden kritiske forhold opnås, kan beregnes ud fra:

$$\frac{D}{L} = \frac{D_0 W_l}{V}$$

$\frac{D}{L}$ Optisk densitet [dB/m]

D_0 Røgpotentialet [dBm^2/g]

W_l Vægt af forbrændt materiale [g]

V Rummets volumen [m^3]

Et røgpotentiale D_0 på $0,52 \text{ dBm}^2/\text{g}$ svarer til et soot yield på $0,06 \text{ g/g}$.

Nedenstående er der givet forslag til en række specifikke materials røgpotentiale.

Tabel 8.0-22: Røgpotentiale for visse materialer, jf. An introduction to Fire Dynamics, D Drysdale, Department of Fire Safety Engineering, University of Edinburgh, UK, 1986 [34]

Materiale	Røgpotentiale, D_0 [$\text{dB m}^2/\text{g}$]	
	Flammebrand	Glødebrand
Træuldbetonplade	0,16	1,8
Spånplade	0,37	1,9
Hård træfiberplade	0,35	1,7
Krydsfinerplade	0,17	1,7
PVC plade	1,7	1,8
Ekstruderet ABS	3,3	4,2
PUR skive	4,2	1,7
PUR skive fleksibel	0,96	5,1
Gipskartonplade	0,042	0,37

Yderligere røgpotentiale kan for eksempel findes i [35], [36], [37] hvor de tillige er angivet i forskellige enheder.

Det i [35] anvendte røgpotentiale (D_m i m^2/g) omregnes til D_0 (i dBm^2/g) ved multiplikation med 10. Det vil sige: $D_0 = 10 D_m$.

Det i [36] anvendte røgpotentiale (S_0) kan teoretisk defineres som røgtætheden (i dB/m) i røg (ved 1 atm. og 20°C) fremkommet ved forbrænding med 100 % omsætning af den tilstedeværende ilt. Det vil sige:

$$S_0 = D_0 \frac{\Delta h_{luft}}{\Delta h_c} \rho_0$$

hvor:

S_0 Røgpotentialet [dB/m eller ob]

D_0 Røgpotentialet [dBm^2/g]

Δh_{luft} Nedre forbrændingsvarme [kJ/kg luft]

Δh_c Nedre forbrændingsvarme for materialet [kJ/kg materiale]

ρ_0 Densiteten af tør luft ved 1 atm. og 20°C er 1200 g/m^3

For almindeligt forekommende brændbart materiale kan ΔH_{luft} antages at være ca. 3.000 kJ/kg luft, jf. An introduction to Fire Dynamics, D Drysdale, Department of Fire Safety Engineering, University of Edinburgh, UK, 1986 [34].

For uventilerede rum med en brandtilvækstsvarende til $Q(t) = \alpha t^2$, kan tiden til kritiske forhold ved overskridelse af sigtbarhedskriteriet udledes til:

$$t_{kritisk} = \sqrt[3]{\frac{D\Delta h_c V^3}{LD_0\alpha}}$$

α Brandtilvækstfaktor [kW/s²]

$t_{kritisk}$ Tid til kritiske forhold [s]

8.8.1.7. Aktiveringstider

For sprinklere og simple termodetektorer, hvor udløsningen sker, når det varmfølsomme element når en bestemt temperatur, kan udløsnings- tidspunktet beregnes ved en simpel metode, som beskrives i dette afsnit.

Af praktiske årsager anvendes kun betegnelsen sprinkler i det følgende, selv om metoden også kan anvendes for termodetektorer med smelteled, glasbulb eller anden type med en tilsvarende karakteristik. Metoden kan ikke anvendes til eftervisning efter denne vejledning ved detektorer med differentieringsled eller anden elektronisk kompensering i forbindelse med en elektronisk diskriminator.

Udgangspunkt for beregningen er sprinklerens aktiveringstemperatur og RTI-værdi (Response Time Index) samt røgens temperatur og hastighed umiddelbart ved sprinkleren.

Aktiveringstemperatur og RTI-værdi findes af sprinklerens datablad.

For en termodetektor kan de tilsvarende data bestemmes ud fra klassen i henhold til DS/EN 54-5 Alarmsystemer.

Røgens temperatur og hastighed bestemmes, som beskrevet nedenfor, alene ud fra brandens effekt og placering i forhold til detektoren.

RTI-værdien er defineret ved en differentiaalligning for opvarmningen af det varmfølsomme element jf. J. G. Quintiere et al. I bogen Enclosure Fire Dynamics [31].

$$\frac{dT_c}{dt} = u^2(T_j - T_c)RTI^{-1}$$

hvor:

$T_c = T_c(t)$ Temperaturen af det varmfølsomme element i sprinkleren [K]

$u = u(t)$ Røgens hastighed umiddelbart ved sprinkleren [m/s]

$T_j = T_j(t)$ Røgens temperatur umiddelbart ved sprinkleren [K]

RTI Response Time Index er defineret ved ovenstående formel. (m^{1/2} s^{1/2}). Der skal anvendes SI-enheder.

T_j og u kan ved en brand på gulvniveau bestemmes for den afstand under loftet, hvor værdierne er maksimale.

Følgende er de empiriske formler for de maksimale værdier i en given afstand fra brandens centrum jf. Alpert, Fire Technology 8. 181 1972 [38]. De gælder kun for brande

med konstant effekt, placeret under et horisontalt og glat loft, hvor der ikke er opbygget et røglag.

For $r/H < 0,15$

$$u_{max} = 0,96 \left(\frac{\dot{Q}}{H} \right)^{\frac{1}{3}}$$

For $r/H > 0,15$

$$u_{max} = \frac{0,195 \dot{Q}^{\frac{1}{3}} H^{\frac{1}{2}}}{r^{\frac{5}{6}}}$$

For $r/H < 0,18$

$$T_{jmax} - T_{\infty} = \frac{16,9 \dot{Q}^{\frac{2}{3}}}{H^{\frac{5}{3}}}$$

For $r/H > 0,18$

$$T_{jmax} - T_{\infty} = \frac{5,38 (\dot{Q}/r)^{\frac{2}{3}}}{H}$$

Hvor:

T_{∞}	Rumtemperaturen [K]
r	Den radiale afstand fra brandens centrum [m]
H	Afstand fra gulv til loft [m]
$\dot{Q}$	Brandeffekten [kW]

I det almindelige tilfælde må man integrere numerisk for at finde tiden til aktivering af sprinkleren, som indtræffer når temperaturen i rummet svarer til sprinklerens aktiveringstemperatur.

8.8.1.7.1 Tid til aktivering af sprinkler/termodektorer ved konstant effekt

Hvis effekten $\dot{Q}$ er konstant i tiden, har differentialligningen en analytisk løsning, og tiden til aktiveringen kan beregnes.

$$t_{op} = RTI u_{max}^{-\frac{1}{2}} \ln \left(\frac{T_{op} - T_{jmax}}{T_{jmax} - T_o} \right)$$

t_{op}	Tid til aktivering af sprinkler [s]
T_{op}	Temperatur hvorved sprinkleren udløser [K]
T_o	Det aktive elements temperatur til $t = 293$ [K]
T_{jmax}	Maksimal temperatur i røgen på det sted, hvor sprinkleren er placeret [K]

$u_{\max}$ Maksimal hastighed i røgen på det sted, hvor sprinkleren er placeret
[m/s]

Det forudsættes at sprinklerens eller termodektorens varmekølsomme element er anbragt i en optimal afstand under loftet, og fri af bjælker, vægge m.v.

Hvis sprinklerne er anbragt i et kvadratisk mønster med sidelængden S , er $r = \sqrt{(2)}/2 S$ svarende til at brandens centrum er midt i kvadratet og således i den størst mulige afstand fra en sprinkler.

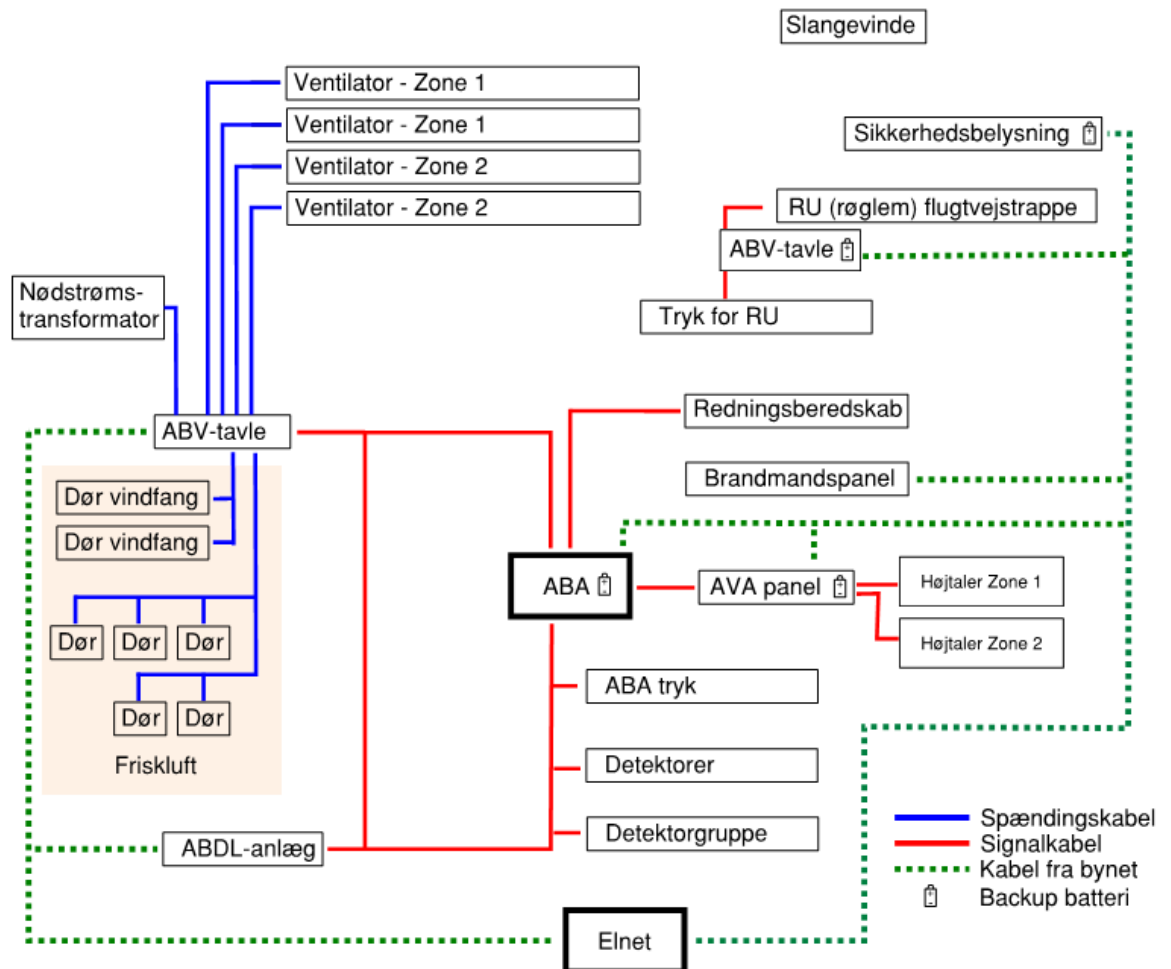
8.8.2. Systemsvigtsanalyse

8.8.2.1. *Afklaring af anlægsopbygning og identifikation af typer af svigt*

Systemsvigtanalysen starter med optegning af et diagram over anlægsopbygning med hovedkomponenter, signalveje og føringsveje for de installationer og systemer som indgår i brandsikringen af en bygning.

Simple og selvstændige installationer som ABDL-anlæg, tørre stigrør, røgalarmanlæg og slangevinder mv. kan medtages som et enkeltstående svigt eller evt. helt undlades i analysen, medmindre de indgår eller sammenkobles med andre brandtekniske installationer. Alle brandtekniske installationer skal fremgå af diagram over anlægsopbygning.

Til eksemplificering optegnes et diagram for en bygning med to atrier, som begge er udført med mekanisk ABV. Der tilføres erstatningsluft via adgangsveje, hvoraf to har flere døre i serie. Bygningen har ABA og AVA.



Figur 8.0-36: Diagrammatisk anlægsopbygning for brandsikringsanlæg

Installationer der udføres efter anerkendte retningslinjer og normer vil typisk have indarbejdet krav og foranstaltninger, som imødegår de væsentligste anlægstekniske svigt. For disse installationer, kan analysen derfor begrænses til at omhandle f.eks. fejlagtig anvendelse og uhensigtsmæssig drift, medmindre anlægget sammenkobles med andre brandtekniske installationer. Generelt gælder at jo mere velafprøvet og pålidelige en anlægstype er, des simplere kan analyse udføres for selve anlægget.

Som eksempel kan nævnes sprinkleranlæg og ABA-anlæg, som hver især er velafprøvede og pålidelige, hvorfor fokus skal være på en sammenkobling som f.eks. anvendelse af linjerøgdetektorer til aktivering af atriumsprinkling, fordi én uhensigtsmæssig udkobling af en ABA-sløjfe kan sætte to væsentlige brandtekniske installationer ud af drift samtidigt.

Et andet eksempel kan være blokering af et air-releasespjæld på en etage i en bygning med ATA-anlæg, hvilket potentielt kan have stor indflydelse på det samlede anlægs funktion.

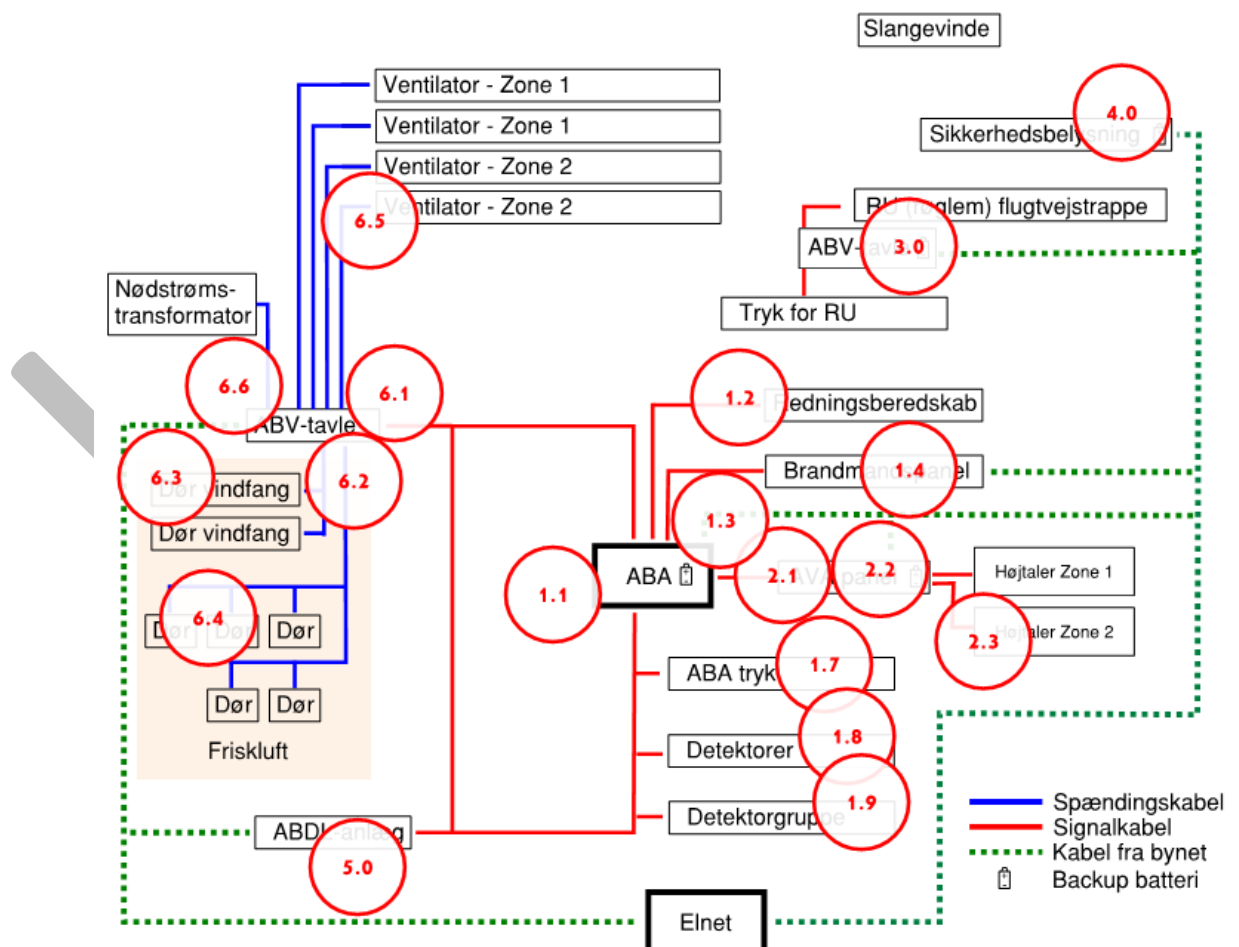
Eksempler på svigt kan f.eks. være:

- Fejl eller udkobling af ABA-anlæg
- Fejl på ABA-detektor – en detektor der skades/afskærmes
- Fejl på byelforsyning

- Fejl eller udkobling på sprinklerpumpe
- Fejl på vandforsyning
- Fejl på sprinklerhoved
- Blokering af spjæld i brandventilationsanlæg, ATA-anlæg eller anlæg til sikring mod brand- og røgspredning i ventilationsanlæg
- Erstatningsluft tilført gennem flere døre i serie
- Fejl i automatisk røggardin

De identificerede svigt kan markeres på den diagrammatiske anlægsoversigt, som angivet nedenfor, hvor de identificerede svigt er nummereret ud fra hvilket brandteknisk installationer de tilhører.

Det bemærkes at slangevinder er påført diagram over anlægsofbygning, men at der ikke identificeres som svigt, da anlægget er simpelt og ikke er sammenkoblet med øvrige brandtekniske installationer. Omvendt er svigt i sikkerhedsbelysning, ABV-anlæg i trapper og ABVL identificeret som svigt, men alene på anlægsniveau på trods af at anlæggene er simple og ikke er sammenkoblede med øvrige brandtekniske installationer. Dette beskrives nedenfor.



Figur 8.0-37: Diagrammatiske anlægsoversigt med angivelse af de identificerede svigt **Figur 8.0-37: Diagrammatiske anlægsoversigt med angivelse af de identificerede svigt**

For hvert identificeret svigt, foretages en vurdering af konsekvensen og/eller tiltag, der gøres for at imødegå svigtet eller konsekvensen af svigtet. For installationer, som udføres efter anerkendte retningslinjer eller normer, kan analysen af det enkelte installationer undlades, så der for den anlægstekniske del alene foretages en vurdering af de sammenkoblede installationer.

I vurderingen kan det også indgå om løsningen er alment anvendt i traditionelle bygninger, hvorved der ikke nødvendigvis skal udføres supplerende tiltag for alle svigt. Eksempelvis, for et stigrør i en bygning med gulv indtil 22 m, hvor risikoen for at stigrøret er stoppet, er accepteret

uden krav om redundans. Hvis stigrøret anvendes i højere bygninger, kan det dog vurderes at svigtet har større konsekvens, hvorved der kan være behov for supplerende tiltag.

Tilsvarende kan metodikken anvendes ved komparativ vurdering af egnetheden af et brandsikringsanlæg udenfor det pågældende anlægs norms anvendelsesområde.

Til illustration at princippet betragtes eksemplet ovenfor:

Tabel 8.0-23: Eksempel på svigtbeskrivelse for butikscenter

Nummer	Installationer	Svigtbeskrivelse	Beskrivelse af konsekvens eller tiltag der imødegår svigt
1	ABA		
1.1		Svigt i tavle, fuld udkobling	ABV og AVA virker ikke
1.2		Signal til redningsberedskabet	Påvirker ikke personsikkerhed
1.3		Strømforsyning til ABA	Batteribackup
1.4		Signal til brandmandspanel eller svigt af brandmandspanel	Påvirker ikke personsikkerhed
1.5		Strømforsyning til brandmandspanel	Påvirker ikke personsikkerhed
1.6		Signalkabel klippes	Ringforbundet jf. retningslinje, overvåget
1.7		Alarmtryk blokeret	Detektorer fungerer
1.8		En detektor blokeret/ødelagt	Alarmtryk fungerer. Varsling kan blive forsinket
1.9		Detektorgruppe udkoblet	Brand kan udvikle sig uopdaget
2	AVA		
2.1		Svigt i tavle eller signalkabel fra ABA	Varsling forsinkes
2.2		Strømforsyning til AVA	Batteribackup
2.3		Kabel til højtalere i en zone	Varsling forsinkes i pågældende zone
3	ABV i trappe	Svigt i anlæg eller forsyning	Påvirker ikke personsikkerhed, dimensioneret efter anerkendt norm
4	Sikkerhedsbelysning	Svigt i armatur eller forsyning	Batteribackup i de enkelte armaturer, øvrige fungerer, dimensioneret efter anerkendt norm
5	ABDL	Svigt i anlæg eller forsyning	Fail safe, dimensioneret efter anerkendt norm
6	ABV		
6.1		Svigt i tavle	Overvåges af ABA.
6.2		Svigt i forsyning til erstatningsluft	2 ud af 4 grupper svigter
6.3		Svigt i enkelt åbning for erstatningsluft	3 ud af 4 grupper fungerer
6.4		Svigt i serie af åbninger for erstatningsluft	
6.5		Svigt i forsyning til ventilator	Der er 100% redundans jf. retningslinje
6.6		Svigt i strømforsyning	Der er nødstrøm

8.8.2.2. Sandsynlighed og konsekvens af svigt samt supplerende tiltag

Herefter vurderes for hvert identificeret svigt en sandsynlighed og konsekvens under hensyntagen til eventuelle kompenserende tiltag. Begge vurderes alene på et overordnet plan, hvorfor der som udgangspunkt ikke knyttes statistiske data til sandsynligheden eller brandtekniske beregninger til konsekvensen.

Tabel 8.0-24: Skema til vurdering af sandsynlighed og konsekvens af hændelser

Benævnelse		Sandsynlighed for hændelse i bygnings levetid	Konsekvens
1	Meget lav	Usandsynlig hændelse i bygnings levetid	Lille værdiskade
2	Lav	Sjælden hændelse, enkelte gange i bygningens levetid	Større værdiskade
3	Middel	Hændelse forventes flere gange i bygningens levetid	Enkelte personer påvirkes kritisk Stor værdiskade
4	Høj	Hændelse forventes i bygningen flere gange om året	Flere personer påvirkes kritisk Meget stor værdiskade
5	Meget høj	Hændelse forventes i bygning flere gange månedligt	Katastrofe

Herefter vurderes de væsentligste svigt, baseret på produktet af sandsynligheden og konsekvensen. De væsentligste svigt skal enten behandles og dokumenteres i den brandtekniske eftervisning (svigtanalyser) eller ved at der indføres supplerende tiltag, for at imødegå sandsynligheden eller konsekvensen af det enkelte svigt.

De supplerende tiltag behandles ud fra ALARP-princippet (as low as reasonably practicable) sådan at restrisikoen bliver reduceret så meget som det er rimeligt og praktisk muligt. Dette indebærer at der ikke nødvendigvis skal foretages supplerende tiltag for alle svigt.

Supplerende tiltag kan f.eks. være overvågning, redundant funktion, øget vedligeholdelsesfrekvens, driftsmæssige foranstaltninger og andre tiltag som vides at øge sandsynligheden for at anlægget virker som forudsat i tilfælde af brand.

Eksempler kan være:

- Overvågning: signal til en stedlig driftsorganisation eller redningsberedskab ved fejl på ABA-anlæg
- Overvågning: Stigrørets ventiler overvåges eller stigrør er vandfyldt så åbning opdages.
- Redundant funktion: Opdeling af erstatningsluft på flere grupper
- Redundant funktion: ABA-anlæg med mindst to detektorer per rum
- Øget vedligeholdelsesfrekvens: runderende driftspersonale som lukker, og dermed kontrollerer, brandporte dagligt.
- Driftsmæssige foranstaltninger: Udkobling kun sker indenfor særlige fastsatte tidspunkter
- Andre tiltag: Stigrør opdeles på flere strenge.
- Andre tiltag: Stigrørsventiler placeres bag aflåst luge.
- Andre tiltag: Krav om ABDL på døre, der forventes at stå åbne.
- Andre tiltag: Opdeling af ventilationsanlæg på flere mindre anlæg for at begrænse antal røgpåvirkede boliger i høje bygninger

Til illustration at princippet betragtes eksemplet ovenfor:

Tabel 8.0-25: Eksempel på konsekvensbeskrivelse og supplerende tiltag for butikcenter

Nummer	Installationer	Svigtbeskrivelse	Konsekvensbeskrivelse	Nyt tiltag	Scenarium til eftervisning
1	ABA				
1.1		Svigt i tavle	ABV og AVA virker ikke	AVA skal aktiveres umiddelbart	Grundscenarium 1 og 2
1.8		En detektor blokeret/ødelagt	Alarmtryk fungerer. Varsling kan blive forsinket	Mindst to detektorer per rum	Grundscenarium 1 og 2
1.9		Detektorgruppe udkoblet	Brand kan udvikle sig uopdaget	brandvagt, ABV starter på alarmtryk	Grundscenarium 1 og 2
2	AVA				
2.1		Svigt i tavle eller signalkabel fra ABA	Varsling forsinkes	-	Grundscenarium 1 og 2 (AVA svigt håndteres under evakuering)
2.3		Kabel til højttalere i en zone	Varsling forsinkes i pågældende zone	Kabel overvåges	Grundscenarium 1 og 2
6	ABV				
6.1		Svigt i tavle	Overvåges af ABA.	Driftsmæssig begrænsning. Bygning tømmes	Grundscenarium 1 og 2
6.2		Svigt i forsyning til erstatningsluft	2 ud af 4 grupper svigter	Forsyningskabel skal opdeles på fire grupper	Svigtscenarium 1C og 2C Erstatningsluft 75%
6.3		Svigt i enkelt åbning for erstatningsluft	3 ud af 4 grupper fungerer	-	Svigtscenarium 1C og 2C Erstatningsluft 75%
6.4		Svigt i serie af åbninger for erstatningsluft	-	Åbninger udføres fail safe og testes jf. DKV-plan	Svigtscenarium 1C og 2C Erstatningsluft 75%

På denne måde imødegås de væsentligste svigt, enten med supplerende tiltag eller eftervises direkte ved brandteknisk dokumentation, i form af svigtscenarier eller ved en kombination.

Samtidigt er antallet af scenarier, der indgår i den brandtekniske dimensionering fastlagt i eksemplet til 3 brandscenarier (1, 2 og 3) samt et svigtscenarium for erstatningsluft. Hertil kommer en svigtsituation omkring varsling, som behandles under analysen for afsnit 8.3.6.3.3.

De supplerende tiltag indarbejdes i den brandtekniske dokumentation.

8.8.3. Eksempel på beregning af bygningsdele

8.8.3.1. *Beregning af en vægs adskillende funktion.*

I dette eksempel eftervises den adskillende funktion af en lodretstående lagopdelt væg, ved brug af Eurocode 5 Anneks E [39].

Det ønskes eftervist, at den pågældende væg kan opretholde en adskillende og isolerende funktion (EI) i mindst 60 minutter, så væggen kan anvendes som en brandcelleadskillelse iht. præaccepteret-løsninger.

8.8.3.1.1 Bygningsdelen

Bygningsdelen er symmetrisk opbygget, beklædt med 2 lag 13 mm almindelige gipskartonplader på hver side og træstolper af 45 x 95 mm og hulrum udfyldt med 95 mm glasuld. Dvs. vil bygningsdelen være opbygget af 5 lag.

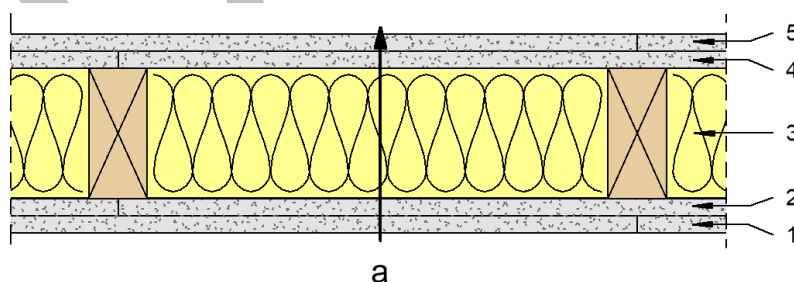
Det kan for denne bygningsdel være relevant at undersøge flere varmeovergangsveje, som f.eks.:

- Traditionelt tværsnit i bygningsdelen
- Manglende beklædning pga. installation
- Stødsamlinger

Der tages dog i dette beregningseksempel udgangspunkt i at beklædninger ikke gennembrydes af installationer og at alle samlinger er placeret over træstolper. Derved ses der kun på en varmeovergangsvej, markeret med a på Figur 8.0-38.

De enkelte af de 5 lag er markeret på Figur 8.0-38 og er:

- 13 mm almindelige gipskartonplader
- 13 mm almindelige gipskartonplader
- 95 mm glasuld
- 13 mm almindelige gipskartonplader
- 13 mm almindelige gipskartonplader



Figur 8.0-38: Illustration af bygnings, med angivelse af varmeovergangsvej og lagopbygning

8.8.3.1.2 Metode

For adskillende elementer forudsættes eftervist, at:

$$t_{ins} \geq t_{req}$$

hvor

t_{ins} er tiden, indtil temperaturstigningen (angivet i afsnit 8.4.1.2) på den ikke-brandeksponerede side er nået

t_{req} er den krævede brandmodstandsevne for bygningsdelens adskillende funktion. I dette eksempel 60 minutter.

Værdien af t_{ins} kan beregnes som summen af bidragene fra de enkelte lag anvendt i bygningsdelen i henhold til:

$$t_{ins} = \sum_i t_{ins,0,i} k_{pos} k_j$$

hvor

$t_{ins,0,i}$ er grundisoleringsværdien for lag "i" i minutter

k_{pos} er en positionskoefficient

k_j er en koefficient for en forbindelse

8.8.3.1.3 Beregning

I dette beregningseksemplet eftervises kun varmeovergangsvej for det traditionelle tværsnit.

$$t_{ins} = t_{ins,1} + t_{ins,2} + t_{ins,3} + t_{ins,4} + t_{ins,5}$$

Lag i positions 1 – 13 mm gipskartonplade

$$t_{ins,1} = t_{ins,0,1} k_{pos} k_j$$

$$t_{ins,1} = 1,4 h_p * 1,0 * k_f$$

Hvor

$1,4 h_p$ er grundisoleringsværdien for gipskartonplade og h_p er tykkelse af pladen i mm.

1,0 er positionskoefficienten for en gipskartonplade i 1. lag med en bagvedliggende gipskartonplade.

k_f fugekoefficient udgår, da dette ikke er relevant i denne varmeovergangsvej.

$$t_{ins,1} = 1,4 * 13 * 1,0$$

$$t_{ins,1} = 18,2 \text{ min.}$$

Lag i positions 2 – 13 mm gipskartonplade

$$t_{ins,2} = t_{ins,0,2} k_{pos} k_j$$

$$t_{ins,2} = 1,4 h_p * 0,8 * k_j$$

Hvor

1,4 h_p er grundisoleringsværdien for gipskartonplade og h_p er tykkelse af pladen i mm.

0,8 er positionskoefficienten for en gipskartonplade i 2. lag med en bagvedliggende glasuld.

k_j fugekoefficient udgår, da dette ikke er relevant i denne varmeovergangsvej.

$$t_{ins,2} = 1,4 * 13 * 0,8$$

$$t_{ins,2} = 14,56 \text{ min.}$$

Lag i positions 3 – 95 mm glasuld med en densitet på 15 kg/m³

$$t_{ins,3} = t_{ins,0,3} k_{pos} k_j$$

$$t_{ins,3} = 0,1 h_{ins} k_{dens} * 1,0 * k_j$$

Hvor

0,1 er grundisoleringsværdien for glasuld og h_{ins} er isoleringstykkelsen i mm.

k_{dens} er koefficienten for isoleringens densitet

1,0 er positionskoefficienten for en glasuld i 3. lag med en bagvedliggende gipskartonplade.

k_j fugekoefficient udgår, da dette ikke er relevant i denne varmeovergangsvej.

$$t_{ins,3} = 0,1 * 95 * 0,9 * 1,0$$

$$t_{ins,1} = 8,55 \text{ min.}$$

Da isoleringen kun bidrager til bygningsdelens isoleringsevne i 8,55 min., antages det at isoleringen er fastholdt, af det tilbageværende plademateriale.

Havde der været anvendt en stenulds isolering med et større bidrag, vil isoleringen skulle være fastholdt af forskalling eller ståltråd. I begge tilfælde skal dybden af søm eller skruer til montage, dimensioneres efter indbrænding i træstolpen, tilsvarende isoleringens bidrag til brandmodstandsevne.

Lag i positions 4 – 13 mm gipskartonplade

$$t_{ins,4} = t_{ins,0,4} k_{pos} k_j$$

$$t_{ins,4} = 1,4 h_p * 0,8 * k_j$$

Hvor

$1,4 h_p$ er grundisoleringsværdien for gipskartonplade og h_p er tykkelse af pladen i mm.

0,8 er positionskoefficienten for en gipskartonplade i 2. lag med en bagvedliggende glasuld.

~~k_f~~ fugekoefficient udgår, da dette ikke er relevant i denne varmeovergangsvej.

$$t_{ins,4} = 1,4 * 13 * 0,8$$

$$t_{ins,4} = 14,56 \text{ min.}$$

Lag i positions 5 – 13 mm gipskartonplade

$$t_{ins,5} = t_{ins,0,5} k_{pos} k_j$$

$$t_{ins,5} = 1,4 h_p * 0,7 * \cancel{k_f}$$

Hvor

$1,4 h_p$ er grundisoleringsværdien for gipskartonplade og h_p er tykkelse af pladen i mm.

0,7 er positionskoefficienten for en gipskartonplade i 2. lag med en bagvedliggende glasuld.

~~k_f~~ fugekoefficient udgår, da dette ikke er relevant i denne varmeovergangsvej.

$$t_{ins,5} = 1,4 * 13 * 0,7$$

$$t_{ins,5} = 12,74 \text{ min.}$$

Bygningsdelen samlet

$$t_{ins} = t_{ins,1} + t_{ins,2} + t_{ins,3} + t_{ins,4} + t_{ins,5}$$

$$t_{ins} = 18,2 + 14,56 + 8,55 + 14,56 + 12,74$$

$$t_{ins} = 68,61 \text{ minutter}$$

$$68,61 \geq 60$$

$$t_{ins} \geq t_{req} \rightarrow \text{Eftervist}$$

Materialeegenskaber

Den samlet bygningsdels materialeegenskaber skal bestemmes, ud fra klassifikationen af det materiale der har den ringeste materialeklasse og som indgår i bygningsdelen.

Denne bygningsdel er sammensat af et træskellet (D-s2,d0) med fastholdt mineralulds isolering (A2-s1,d0), og gipskartonplader på begge sider (A2-s1,d0).

Her vil den samlet materialeklasse kunne antages, som materiale klasse D-s2,d0, med overflader af materialeklasse A2-s1,d0.

Samlet bygningsdel

Bygningsdelsklassen for denne projektspecifikke væg, vil kunne anses som bygningsdel klasse EI 60 D-s2,d0.

8.8.4. Eksempler på komparativ analyse

I det følgende præsenteres fire eksempler på forskellige afvigelser, og hvordan disse kan dokumenteres med en komparativ analyse. Eksemplerne er:

1. Kontorbygning: Åbenhed mellem mere end to kontoretager
2. Skole: Øget brug af glas mod flugtvejsgang på skole
3. Hotel: Brændbart bæresystem i hotelbygning
4. Ungdomsboliger/kollegie: Blinde ender i flugtvejsgang

Eksemplerne skal bidrage til forståelsen af den beskrevne metode for komparativ analyse, og de er derfor generelle og ikke fuldt detaljerede. Blandt andet fremgår mange beregninger og specifik dokumentation ikke. Eksemplerne kan dermed ikke overføres direkte til en konkret projektering uden yderligere analyse og dokumentation for det konkrete tilfælde.

8.8.4.1. *Eksempel 1: Åbenhed mellem mere end to kontoretager*

8.8.4.1.1 Analysebyggeri

Analysebyggeriet i dette eksempel er en kontorbygning med fem etager over terræn. Bygningens grundareal er 1.000 m², og overkant af gulvet i øverste etage er placeret 14,4 m over terræn. Etagerne er indrettet som storrumskontorer. Personbelastningen i bygningen er fastlagt til 320 personer fordelt ligeligt på etagerne. Der er ikke indrettet større møde- eller konferencerum i bygningen, og alle dele af bygningen henføres derfor til anvendelseskategori 1 og risikoklasse 3.

De fem etager over terræn er forbundet gennem et atrium. Der er således åben forbindelse mellem alle fem kontoretager. Flugtvejstrapper er udført som brandsektioner, mens resten af bygningen er samme brandsektion. Kontorarealet, teknikrum, kopirum, depoter mv. er inddelt som selvstændige brandceller.

Da rummet er større end 1.000 m² og etagearealet er større end 2.000 m², er bygningen iht. BR 18 § 122 og § 123 stk. 2 forsynet med et fulddækkende automatisk sprinkleranlæg (AVS-anlæg).

På nær afvigelsen, som denne analyse beskriver, kan bygningens brandsikkerhed dokumenteres med henvisning til Bilag 3 til Bygningsreglementets vejledning til kap. 5 – Brand: Præ-accepterede løsninger for brandsikring af bygningsafsnit med kontorer mv. [40].

Som kompenserende tiltag installeres der automatisk brandalarmanlæg (ABA-anlæg) og automatisk tonevarslingsanlæg (AVA-anlæg) i hele bygningen. For at sikre acceptable evakueringsforhold har det desuden vist sig nødvendigt at installere et automatisk brandventilationsanlæg (ABV-anlæg) i atriummet.

8.8.4.1.2 Referencebyggeri

Som referencebyggeri defineres en kontorbygning med fem etager, hver med et etageareal på 1.000 m². Anvendelsen og personbelastningen på de enkelte etager er den samme som i analysebyggeriet. Referencebyggeriet er åben mellem stueetagen og 1. etage. Da arealet i dette rum overstiger 1.000 m² er der installeret AVS-anlæg i brandsektionen som omfatter disse to etager. De øvrige etager udgør egne brandsektioner. Referencebyggeriet udføres jf. Bilag 3 til Bygningsreglementets

vejledning til kap. 5 – Brand: Præ-accepterede løsninger for brandsikring af bygningsafsnit med kontorer mv. [40]

8.8.4.1.3 Fastsættelse af acceptkriterier

For eftervisning af bygningens brandsikkerhed er de præ-accepterede løsninger er fulgt, bortset fra at der er en brandcelle, som er åben over mere end to etager.

Den præ-accepterede løsning beskrevet i Bilag 3 til Bygningsreglementets vejledning til kap. 5 – Brand: Præ-accepterede løsninger for brandsikring af bygningsafsnit med kontorer mv. [40] angiver:

”For at begrænse en eventuel brandspredning lodret igennem bygningsafsnittet, må en brandcelle ikke strække sig over mere end 2 etager.”

Det bagvedliggende funktionskrav til denne løsning findes i Bygningsreglementet § 104, Antændelse og brand- og røgspredning:

”Bygninger skal projekteres og udføres, så det sikres, at der i tilfælde af brand ikke sker væsentlig brand- og røgspredning. Dette skal ske under hensyn til, at:

- 1) Risikoen for, at en brand opstår, begrænses.*
- 2) Brand- og røgspredning begrænses i den brandmæssige enhed, hvor branden er opstået.*
- 3) Brand- og røgspredning til andre brandmæssige enheder forhindres i den tid, som er nødvendig for evakuering og redningsberedskabets indsats.*
- 4) Brandspredning til andre bygninger på samme grund begrænses.*
- 5) Der ikke sker brandspredning til bygninger på anden grund.”*

Afvigelsen berører punkt 2 i funktionskravet, og kan ses som en afvigelse fra beskyttelsesformål ”3c. Brandceller”, beskrevet i afsnit 8.5.2.

Ifølge Bygningsreglementets vejledning til kap. 5 – Brand: kapitel 4, Antændelse og brand- og røgspredning [41] sker opdeling i brandceller af hensyn til sikkerheden for de personer, der opholder sig i bygningen, herunder:

- dels for at kunne begrænse udbredelsen af brand og røg til flugtvejene i den tid evakuering pågår, og
- dels for at tilgodese muligheden for at personer kan blive i sikkerhed i en brandcelle og afvente redning af redningsberedskabet.

Acceptkriteriet for analysen bliver derfor, at en brand i analysebyggeriet begrænses i henhold til de to punkter (overstående punkt 2 og ”3.C Brandceller”) mindst lige så godt som i et præ-accepteret referencebyggeri.

8.8.4.1.4 Grovanalyse

Risikoforholdene i analyse- og referencebyggeriet vurderes at være sammenlignelige. Der er ikke anledning til at tro, at brandårsager i de to bygninger vil være væsentligt forskellige. En brand i analysebyggeriet kan dog potentielt påvirke flere personer end en brand i referencebyggeriet. Dette skyldes, at der ikke er samme brandmæssige opdeling mellem etagerne, og at der er større sandsynlighed for brand i analysebyggeriet som følge af, at arealet er større.

Ved hjælp af Tabel 8.0-18 konstateres det, at afvigelsen kan have betydning for evakueringsforhold, redningsberedskabets indsatsforhold og inddeling i brandsektioner i tillæg til krav om brandcelleopdeling. Ingen af disse forhold kan umiddelbart afskrives, og de må derfor alle omhandles i eftervisningen af afvigelsen. Der er ikke fundet yderligere beskyttelsesformål, som behøver vurdering.

Grundet den beskrevne forskel mellem analysebyggeriet og referencebyggeriet, vælges der til analysebyggeriet i grovanalysen kompenserende tiltag, som virker kompenserende i forhold til afvigelsen. Der vælges følgende kompenserende brandsikringstiltag for at sikre acceptable evakueringsforhold:

- automatisk brandventilationsanlæg (ABV-anlæg) i atriummet, og
- automatisk brandalarmanlæg (ABA-anlæg) og automatisk tonevarslingsanlæg (AVA-anlæg) i hele bygningen.

Der er gjort indledende vurderinger af ændringen i sikkerhedsniveauet, som skyldes afvigelsen og de kompenserende tiltag. Disse er sammenfattet i Tabel 8.0-26, som er udarbejdet på baggrund af Tabel 8.0-19.

Tabel 8.0-26: Oversigt over ændring i beskyttelseeffekt.

Beskyttelsesformål	Forskelle fra præ-accepterede løsninger		
	Afgivelse	Kompenserende tiltag	
	Åbenhed mellem fem etager	ABA- og AVA-anlæg	ABV-anlæg
1. Evakuering og redning af personer	-	+	+
2. Bærende konstruktioners brandmodstandsevne	0	0	+
3a. Materialer og overflader	0	0	+
3b. Brandsektioner	-	0	+
3c. Brandceller	-	0	+
3d. Brandspredning til andre bygninger	0	0	0
3e. Brandsikring af tekniske installationer	0	+	0
4. Redningsberedskabets indsatsmuligheder	-	+	+

Af tabellen fremgår det, at de fleste beskyttelsesformål påvirkes.

- 1) Evakuering og redning af personer påvirkes positivt gennem kompenserende tiltag. ABA- og AVA-anlæg igangsætter evakuering tidligere i brandforløbet, og ABV-anlægget vil bidrage positivt til at friholde lokalet for røg, mens evakuering pågår. Forholdene påvirkes negativt af afvigelsen, idet flere personer befinder sig i samme rum som branden.

- 2) Bærende konstruktioners brandmodstandsevne påvirkes positivt af ABV-anlægget, idet varme fjernes fra bygningen.
- 3) Antændelse og brand- og røgspredning.
 - a) Materialer og overflader påvirkes positivt af, at varme og røg bortventileres gennem ABV-anlægget.
 - b) og c) Brandcelle- og brandsektionsopdelingen påvirkes positivt af ABV-anlægget, fordi varme og røg fjernes. Brandceller påvirkes positivt af ABA- og AVA-anlægget, da personer bliver hurtigere opmærksom på branden, og ikke bliver fanget i en brandcelle, hvor de skal afvente redning af redningsberedskabet. Forholdene påvirkes negativ af afvigelsen, idet der er færre brandtekniske opdelinger med større røg- og eventuel brandspredning.
 - e) Brandsikring af tekniske installationer påvirkes ikke af afvigelsen og vurderes ikke nærmere.
- 4) Redningsberedskabets indsatsforhold påvirkes positivt af både den tidligere alarmering fra ABA-anlægget og fjernelsen af varme og røg gennem ABV-anlægget. Det påvirker indsatsforholdene negativt, at der er åbent mellem etagerne.

I tillæg til ovenstående vurderinger vil det generelt være positivt i forhold til beskyttelsesformål, at AVS-anlægget i bygningen er udvidet til alle etager.

Baseret på ovenstående grovanalyse vurderes det, at det er muligt at gennemføre en komparativ analyse for at eftervise afvigelsen. Den store påvirkning af evakuerings- og indsatsforholdene betyder, at analysen gennemføres som en kvantitativ analyse med beregning af brand- og røgspredning. Det vurderes, at der kan benyttes kvalitativ analyse til at bedømme svigtscenarier, idet analyse- og referencebyggeri for øvrigt er relativt ens.

8.8.4.1.5 Valg af brandscenarier

I analysebyggeriet analyseres scenarier med brandplaceringer på hver etage på nær på øverste etage. I referencebyggeriet regnes der kun med brandplacering i stueetagen.

I både analyse- og referencebyggeriet analyseres et brandscenarie med en designbrand iht. afsnit 8.3.2.3, dvs. med en medium brandtilvækst, med en maksimumseffekt på 5 MW, i begge tilfælde reduceret af sprinkleranlæg. Brandscenariet modsvarer scenarie A i afsnit 8.5.3.4. Desuden vurderes scenarie C at være relevant. Scenarie B og D vurderes ikke at være relevante i forhold til afvigelsen.

Det er i tillæg relevant at se på brandscenarier med svigt af hvert af de brandtekniske installationer.

8.8.4.1.6 Eftervisning

Der gennemføres en CFD-beregning af brand- og røgspredning, og evakueringsforholdene analyseres i både analyse- og referencebyggeriet. Disse beregninger og vurderinger med tilhørende sensitivitetsanalyser og vurderinger af usikkerheder er dog ikke præsenteret her, da det ligger ud over formålet med eksemplet. I stedet fokuseres der på den komparative analyse. På baggrund af beregningerne fås følgende resultater:

Scenarie A:

- Uanset brandplacering opstår der ikke kritiske forhold på femte sal (øverste etage med åbenhed nedover) i analysebyggeriet hurtigere end der gør på første sal (øverste etage med åbenhed nedover) i referencebyggeriet. Dog vil der på grund af

det forøgede areal være en større chance for, at der opstår en brand i det rum, som er åbent mellem flere etager.

- Evakuering til flugtvejstrapper sker på ca. samme tid i analysebyggeriet som for referencebyggeriet.
- ABV-anlægget i analysebyggeriet er udformet og dimensioneret, så der ikke strømmer røg eller varme ind på etagerne mellem branden og øverste etage. Det er dermed kun den brandramte etage og den øverste etage, som påvirkes af varme og røg. Dette modsvarer situationen i referencebyggeriet.

Scenarie C:

- Forholdene er stort set ens som for scenarie A, men den lavere brandeffekt betyder, at ABV-anlæggets effekt er mindre tidligt i brandforløbet. Tiden til kritiske forhold på øverste etage er dermed mere ens i de to bygninger i dette scenarie.
- I analysebyggeriet er der fortsat ikke røgindtrængning på etagerne mellem øverste etage og branden.

Svigttilfældene kan i dette eksempel vurderes kvalitativt ifølge grovanalysen. Der er derfor ikke gennemført CFD-beregninger for disse scenarier. Baseret på de kvantitative resultater for grundscenariet vurderes det ikke, at der er behov for at se på forskellige brandscenarier for svigttilfældene. Overvejelser ved svigttilfælde er beskrevet nedenfor, som for denne analysebyggeriet vil skulle behandles nærmere i en systemsvigtsanalyse, se appendiks 8.8.2.

Svigt af ABV-anlæg:

- Der vil være mindst lige så gode evakueringsforhold på øverste etage i analysebyggeriet som på første sal i referencebyggeriet ved et fuldstændigt svigt af ABV-anlægget. Det kan forventes, at forholdene i analysebyggeriet er marginalt bedre på grund af det øgede volumen i bygningen. Dermed er evakueringsforholdene i dette svigttilfælde acceptable.
- I analysebyggeriet vil alle etagerne blive røgpåvirket, efterhånden som branden udvikler sig. Dette giver dårligere indsatsforhold i forhold til redning og eftersøgning. ABA-anlægget vil give tidligere alarmering, hvilket vil betyde en forbedring af indsatsforholdene, eftersom rednings- og slukningsindsatsen kan starte tidligere.

Svigt af ABA- og/eller AVA-anlæg:

- Svigt af varslingsanlægget giver længere tid til evakuering for analysebyggeriet.
- Eventuelle svigt i ABA-anlægget, som fører til svigt af ABV-anlægget, se svigt af ABV-anlæg.
- Ved svigt i ABA-anlægget eller ved en brand, som er placeret, så detekteringen forsinkes, vil der ikke opnås en tidligere alarmering af redningsberedskabet. Dermed opnås en forbedring af indsatsforholdene ikke. Dette vurderes acceptabelt, da bygningen forventes evakueret, inden redningsberedskabet vil være til stede og at det ved evakuering er sandsynligt at brandtryk aktiveres.

Svigt af AVS-anlæg:

- I forhold til personsikkerhed vil svigt af dette anlæg være mest kritisk i referencebyggeriet, da ABV-anlægget vil give længere tid til kritiske forhold i forhold

til evakuering af etagerne over branden. Der er ikke nødvendigvis nogen ændring af forholdene på den brandramte etage i nogen af bygningerne.

- I forhold til redningsberedskabets indsatsforhold vil svigtet føre til en større brand. Ved AVS-svigt i analysebyggeriet vil røggasserne automatisk og mere effektivt bortventileres, hvilket vil være en væsentlig forbedring af indsatsforholdene sammenlignet med referencebyggeriet.

Der er ikke behov for en samlet analyse, eftersom der er tale om en enkelt afvigelse.

8.8.4.1.7 Konklusion

Eftervisningen dokumenterer, at acceptkriterierne er overholdt i alle grundscenarier og i svigttilfælde. Niveauerne for personsikkerhed er tilstrækkelige idet løsningen:

Begrænser udbredelsen af brand og røg til flugtvejene i den tid evakuering pågår, tilgodeser muligheden for at personer kan blive i sikkerhed i en brandcelle og afvente redning af redningsberedskabet.

Sikkerhedsniveauet i analysebyggeriet er dermed mindst tilsvarende sikkerhedsniveauet i referencebyggeriet.

Dermed konkluderes det, at designet af analysebyggeriet tilfredsstiller kravet om, at "der i tilfælde af brand ikke sker væsentlig brand- og røgspredning".

8.8.4.2. Eksempel 2: Øget brug af glas mod flugtvejsgang på skole

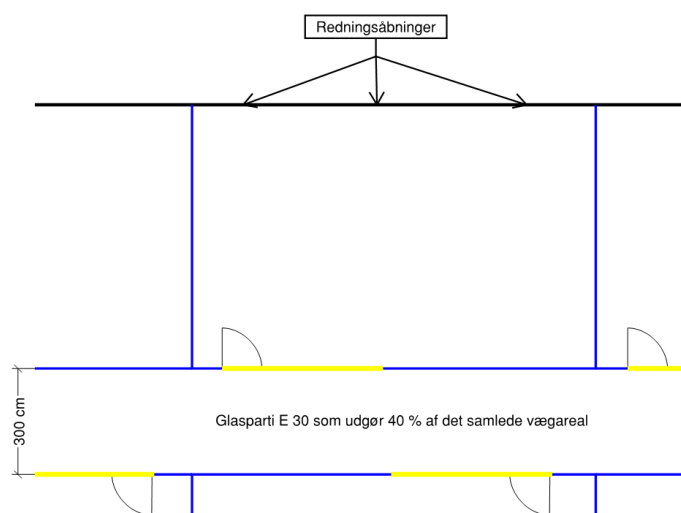
8.8.4.2.1 Analysebyggeri

Analysebyggeriet i dette eksempel er en skole i to etager. Afvigelsen berører en enkelt flugtvejsgang mellem to trapper. Flugtvejsgangen betjener otte undervisningslokaler som hver er beregnet for op til 30 personer. Bygningen henføres derfor til anvendelseskategori 2 og risikoklasse 3. Totalt skal 240 personer dermed benytte korridoren, fordelt med 120 personer på hver trappe. Hvert undervisningslokale har desuden tre redningsåbninger.

Flugtvejsgangen har en fri bredde på 300 cm, mens hver af trapperne og dørene dertil har en bredde på 150 cm. Flugtvejsgangen har en længde på mindre end 60 m og er derfor udført uden opdeling.

Flugtvejsgangen og de otte undervisningslokaler, udgør en samlet brandsektion med areal på 1.500 m². Trapperne er desuden egen brandsektioner. Undervisningslokalerne og flugtvejsgangen er inddelt som egne brandceller. Mellem flugtvejsgangen og undervisningslokalerne placeres glaspartier, inklusive glasdøre som udgør 40 % af det samlede vægareal. Glaspartierne inklusive dørene er klassificeret E 30 og er ikke placeret direkte overfor hinanden.

I bygningen installeres der automatisk brandalarmanlæg (ABA-anlæg) og automatisk varslingsanlæg (AVA-anlæg) som kompenserende tiltag. På grund af arealet af brandsektionen, er der desuden installeret et automatisk sprinkleranlæg (AVS-anlæg), som også virker kompenserende i forhold til afvigelsen.



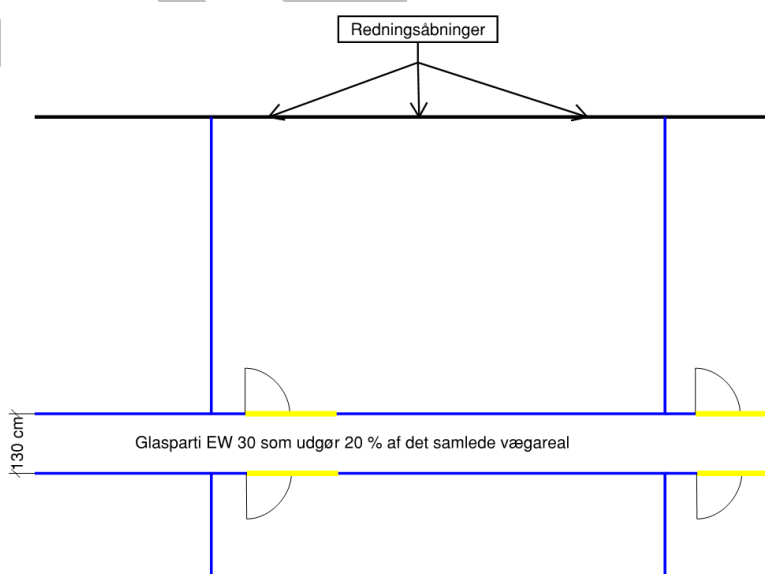
Figur 8.0-39 - Illustration af relevant udsnit af analysebyggeriet

8.8.4.2.2 Referencebyggeri

På grund af den brandmæssige opdeling af analysebyggeriet, kan afvigelsen ses isoleret for hvert undervisningslokale, med tilhørende del af flugtvejsgang foran glasparket og undervisningslokalet på modsatte side af gangen. Der ses derfor på dette udsnit af analysebyggeriet i forhold til at definere et referencebyggeri.

Referencebyggeriet bliver i dette tilfælde en bygning af tilsvarende størrelse, anvendelse og udformning som analysebyggeriet. Flugtvejsgangen og døre til trapperne er dog begrænset til en bredde på 130 cm, og glasparkerne på hver side af gangen er placeret direkte overfor hinanden.

I referencebyggeriet er der installeret AVS-anlæg på grund af størrelsen af brandsektionen iht. BR 18 §123 stk. 5, samt installeret et AVA-anlæg som aktiveres af AVS-anlægget på grund af personbelastningen iht. BR 18 §93 stk. 2. I analysen ses der på et udsnit af bygningen som indeholder et undervisningslokale, den del af flugtvejsgangen foran lokalet samt den nærmeste del af undervisningslokalet på modsat side af gangen.



Figur 8.0-40 - Illustration af relevant udsnit af referencebyggeriet

Udskast

8.8.4.2.3 Fastsættelse af acceptkriterier

Det fremgår af den brandtekniske dokumentation for bygningen, at de præ-accepterede løsninger er fulgt bortset fra afvigelsen omkring størrelsen af og klassifikationen på glasadskillelsen mod flugtvejsgangen. Den præ-accepterede løsning for dette forhold er angivet i Bilag 5 til Bygningsreglementets vejledning til kap. 5 – Brand, Præ-accepterede løsninger for brandsikring af bygningsafsnit med undervisningslokaler mv.:

”Det kan tillades, at op til 20 % af vægadskillelsen mellem flugtvejsgang og det enkelte tilstødende opholdsrum, udført som egen brandcelle, udføres mindst som glasparti klasse EW 30/ EI 15”.

Videre angiver bilag 5, at døre i sådanne glaspartier skal tilfredsstille EW 30. Dette kan tolkes som, at døren kan regnes som en del af glaspartiet. Dele af brandcelleadskillelsen som ikke er glasparti skal have en brandmodstand på EI 60.

Afvigelsen består dermed af to dele: Størrelsen på glaspartierne og glassets brandmodstand. Det bagvedliggende funktionskrav til den præ-accepterede løsning findes i Bygningsreglementet § 94, Udformning af flugtveje til evakuering af personer:

”En flugtvej er et sammenhængende system af udgange, gangarealer, flugtvejsgange og flugtvejstrapper, og den skal sikre, at personer kan forlade en bygning på sikker vis.

Stk. 2. Design, projektering og udførelse af flugtveje skal ske under hensyn til:

- 1) Personers kendskab til flugtvejene i bygningen.*
- 2) At flugtveje skal være lette at identificere, nå og anvende.*
- 3) Personers mulighed for og evne til at anvende flugtveje i bygningen.*
- 4) At evakuering af personer på sikker vis kan ske til terræn i det fri eller til et sikkert sted i bygningen og derfra på sikker vis til terræn i det fri.*
- 5) At der ikke opstår kritiske temperaturer, røgkoncentrationer, varmestråling eller tilsvarende kritiske forhold i det tidsrum, i hvilket flugtvejene skal anvendes til evakuering.*
- 6) At flugtvejene skal være dimensioneret til det antal personer, der skal benytte dem.*
- 7) At døre i flugtveje skal være lette at åbne uden brug af nøgle og værktøj, når flugtvejen skal benyttes af personer, og at døre i flugtveje, der skal anvendes af flere end 150 personer, skal åbne i flugtreningen.*
- 8) At flugtveje skal være fri i hele den nødvendige bredde.”*

Afvigelsen har betydning for punkt 4 og 5. Desuden berøres krav til brandmæssig opdeling med det bagvedliggende funktionskrav i Bygningsreglementet § 104, Antændelse og brand- og røgspredning:

”Bygninger skal projekteres og udføres, så det sikres, at der i tilfælde af brand ikke sker væsentlig brand- og røgspredning. Dette skal ske under hensyn til, at:

- 1) Risikoen for, at en brand opstår, begrænses.*
- 2) Brand- og røgspredning begrænses i den brandmæssige enhed, hvor branden er opstået.*
- 3) Brand- og røgspredning til andre brandmæssige enheder forhindres i den tid, som er nødvendig for evakuering og redningsberedskabets indsats.*
- 4) Brandspredning til andre bygninger på samme grund begrænses.*
- 5) Der ikke sker brandspredning til bygninger på anden grund.”*

I forhold til dette krav berøres punkt 3.

8.8.4.2.4 Grovanalyse

Anvendelsen og dermed de mulige brandårsager er ens i analyse- og referencebyggeriet. Konsekvenser ved brand er også i udgangspunktet meget ens.

Ved hjælp af Tabel 8.0-18 konstateres det, at afvigelsen kan have betydning for evakueringsforhold, redningsberedskabets indsatsforhold og inddeling i brandsektioner i tillæg til krav om brandcelleopdeling. Ingen af disse forhold kan umiddelbart afskrives, og de må derfor alle omhandles i verificeringen af afvigelsen. Forhold omkring drift og vedligehold vurderes ikke, at blive påvirket af afvigelsen i sig selv. Der er ikke fundet yderligere tiltagsgrupper, som behøver vurdering.

Bredden af flugtvejen og den indbyrdes placering af glaspartierne, det vil sige analysebyggeriets geometriske design, fungerer som kompenserende tiltag. Ændringen i beskyttelseeffekt på baggrund af disse forhold er groft analyseret i Tabel 8.0-27, som er baseret på Tabel 8.0-19. Den præ-accepterede løsning om størrelsen og brandmodstanden af glaspartier mod flugtvej, gælder uanset om der er sprinklet eller ikke. Ændringen i beskyttelseeffekten, som AVS-anlægget introducerer, er derfor også beskrevet, selvom dette ikke er direkte kompenserende.

Tabel 8.0-27: Oversigt over ændring i beskyttelseeffekt.

Beskyttelsesformål	Forskelle fra præ-accepterede løsninger		
	Afvigelse	Kompenserende tiltag	
	Størrelse og brandmodstand på glasparti	Specifik bygningsgeometri	(AVS-anlæg)
1. Evakuering og redning af personer	-	+	(+)
2. Bærende konstruktioners brandmodstandsevne	0	0	(+)
3a. Materialer og overflader	0	0	(+)
3b. Brandsektioner	0	0	(0)
3c. Brandceller	-	+	(+)
3d. Brandspredning til andre bygninger	0	0	(+)
3e. Brandsikring af tekniske installationer	0	0	(+)
4. Redningsberedskabets indsatsmuligheder	-	+	(+)

Af tabellen fremgår det, at tre beskyttelsesformål påvirkes negativt af afvigelsen, mens tre forhold påvirkes positivt af de kompenserende tiltag foruden alle effekterne af AVS-anlægget.

- 1) Evakueringsforholdene påvirkes positivt af de brede flugtveje og placering af glaspartier, der sikrer, at der altid kan flygtes i retning væk fra branden. Forholdene

påvirkes negativt, idet flugtvejen i udgangspunktet er dårligere beskyttet end i referencebyggeriet.

- 3) Antændelse og brand- og røgspredning.
 - c) Brandcelleopdelingen påvirkes potentielt positivt som følge af bredden af flugtvejsgangen og den indbyrdes placering af glaspartierne, idet antændelse som følge af strålevarme nedsættes. Samtidig påvirker afvigelsen negativt, idet størrelse og brandmodstandsevne er ringere.
- 4) Redningsberedskabets indsatsforhold påvirkes positivt af de brede flugtveje. De dårligere brandcelleadskillelser påvirker indsatsforholdene negativt, idet der som udgangspunkt er øget risiko for brandspredning mellem brandceller.

Baseret på disse vurderinger konkluderes det, at en komparativ analyse er mulig, og at verificeringen kan bygge på en hovedsagelig kvalitativ analyse. Der benyttes dog alligevel strålingsberegninger for, at verificere strålingsniveauet i flugtvejen i tilfælde af sprinklersvigt.

8.8.4.2.5 Valg af brandscenarier

Afvigelsen har primært betydning for niveauet af varmestråling i flugtvejen og brandspredning mellem brandceller. Eftersom der skal gennemføres strålingsberegninger i forbindelse med klassifikationer af bygningsdele, vælges brandscenarie A som en standardbrand i henhold til ISO 834. Scenarie B-D vurderes ikke at være relevante i dette tilfælde.

Branden placeres i et undervisningslokale. Derudover skal svigttilfælde analyseres.

8.8.4.2.6 Eftervisning

Eftersom flugtvejstrapperne er placeret i hver ende af gangen, er der i udgangspunktet ikke nogen personer, som tvinges til at evakuere forbi det potentielt varme glas. Den øgede gangbredde og dørbredde i analysebyggeriet betyder, at kapaciteten af flugtvejen er højere end i referencebyggeriet.

I det tilfælde, at det alligevel skulle blive nødvendigt at evakuere forbi glaspartiet, vil personerne kunne holde sig længere væk fra glaspartiet i analysebyggeriet end i referencebyggeriet på grund af den øgede gangbredde. Dette vil reducere den modtagne varmestråling i en vis grad. Selv med et glasparti som er klassificeret EW, kan der forventes en varmestråling på op til 15 kW/m^2 målt 1 m fra glaspartiet jf. klassifikationskriterierne i DS/EN 13501-2:2016 [42].

Ved brand vil AVS-anlægget i tillæg have en effekt på branden i både analyse- og referencebyggeriet. Generelt har AVS-anlæg følgende effekter i forhold til branden:

- Anlægget begrænser brandens omfang.
- Anlægget reducerer den samlede røgproduktion.
- Anlægget reducerer strålingsintensiteten fra branden.
- Anlægget begrænser overtrykket i brandrummet.

AVS-anlæg antages generelt at have høj pålidelighed i forhold til at slukke eller begrænse en brand. Der kan dog ske svigt, ofte på grund af at AVS-anlægget delvis er forældet, dårlig vedligehold, eller at anlægget er upassende/uegnet til forholdene.

Hvis AVS-anlægget fungerer som forudsat, kan det derfor forventes, at varmestrålingen til flugtvejen vil være meget begrænset. Den vil desuden ikke nødvendigvis påvirke personer, da disse kan evakuere væk fra det brandramte rum.

I forhold til brandspredning mellem brandcellerne er glaspartierne i analysebyggeriet placeret forskudt og med så stor afstand, at der ikke vurderes at være fare for brandspredning, når AVS-anlægget fungerer. Sikkerhedsniveauet vurderes derfor at være tilstrækkeligt i forhold til grundscenariet både i forhold til evakueringsforholdene og i forhold til forebyggelse af brand- og røgspredning.

For at undersøge sikkerhedsniveauet ved svigt af AVS-anlægget, er der udført beregninger af varmestrålingen. Her er det antaget, at hele glaspartiet udgør en samlet flade med en konstant temperatur svarende til temperaturen i brandrummet ved en fuldt udviklet brand.

Strålingsintensiteten beregnes i en afstand på 0,5 m fra væggen på modsatte side af brandrummet. Dette sikrer at der er en "korridor" med en bredde på 0,5 m, hvor det er muligt at evakuere. I analysebyggeriet beregnes varmestrålingen derfor 2,5 m fra det varme glasparti og direkte ud fra midten af glaspartiet til $9,95 \text{ kW/m}^2$.

Med en middel ganghastighed på 1,3 m/s (se afsnit 8.3.6.7.2.2) og en længde af glaspartiet på 3,5 m, vil det tage omkring 2,7 sekunder at passere glaspartiet. I begge tilfælde er der således ca. 0,5 m fri flugtvejsgang ved sprinklersvigt jf. acceptkriteriet for maksimal strålevarme (mindre end 4 sekunder) i flugtvejsgang på 10 kW/m^2 angivet i afsnit 8.2.2.

Strålingsintensiteten til væggen på modsatte side af flugtvejsgangen vil være mindre end 10 kW/m^2 i analysebyggeriet og derfor anses faren for brandspredning mellem undervisningslokaler som passende reduceret jf. klassifikationskravet for EW-klassificering. En fuld beregning af varmestrålingen fra et brandramt undervisningslokale, til nærmeste lokale på modsat side af gangen, vil vise en intensitet, som ligger væsentligt under det maksimalniveau, som er beregnet over. Dermed vil sikring mod brandspredning være mindst den samme i analysebyggeriet som i referencebyggeriet.

Med ovenstående beregninger for eftervisning af evakueringsforholdene, vurderes det, at også redningsberedskabets indsatsforhold i analysebyggeriet, er acceptable og mindst ligeså gode som i referencebyggeriet.

Strålingsberegningerne er behæftet med en del usikkerhed, men eftersom forskellen mellem analyse- og referencebyggeriet er relativt store, vurderes det, at dette er acceptabelt. Selvom usikkerheden kan betyde en ændring af konklusionen for analysebyggeriet, vil det betyde, at der også i dette tilfælde vil ske en blokering af flugtvejen. Dette forringer ikke sikkerheden til et niveau, som er dårligere end referencebyggeriet. Forskellen i forhold til brandspredning mellem brandceller vurderes at være så stor, at det ligger udover usikkerheden i metoden.

8.8.4.2.7 Konklusion

Der er ikke behov for en samlet analyse, eftersom der bare er tale om en enkelt afvigelse. På baggrund af eftervisningen konkluderes det, at designet af analysebyggeriet tilfredsstiller kravet om, at det er sikret, "at personer kan forlade en

bygning på sikker vis". Det konkluderes desuden, at det er sikret "at der i tilfælde af brand ikke sker væsentlig brand- og røgspredning".

Udkast

8.8.4.3. *Eksempel 3: Brændbart bæresystem i hotelbygning*

8.8.4.3.1 *Analysebyggeri*

Analysebyggeriet i dette eksempel er et hotel med seks etager, hvor overkant gulv i øverste etage er 21 m over terræn. Der er ikke andre bygninger på grunden, og der er gode tilkørselsforhold og brandredningsarealer hele vejen rundt om bygningen. Udvendig beklædning på bygningens facade på bygningen er mindst beklædning klasse K₁ 10 B-s1,d0 [klasse 1 beklædning].

Isoleringsmateriale i bygningen, bortset fra i terrændæk, er mindst materiale klasse A2-s1,d0.

Stueetagen er indrettet med reception og restaurant, og er derfor henført til anvendelseskategori 3 og risikoklasse 3, mens de øvrige etager indeholder hotelværelser, og derfor er henført til anvendelseskategori 5 og risikoklasse 3. Bygningen har to flugtvejstrapper, og fra stueetagen er der udgang direkte til terræn fra alle opholdsrum.

Brandceller i bygningens soverumsafsnit begrænses til et areal på maksimalt 50 m² for værelser og maksimalt 100 m² for rum uden brændbart inventar, som f.eks. flugtvejs gange.

Hver etage udgør en brandsektion med et areal på 600 m². Bygningen er udført med et bæresystem i træ med en blanding af søjler, bjælker og massivtræselementer. Derudover udføres adskillende vægge som lette vægge.

Bæresystemet og stabiliserende konstruktioner udføres som bygningsdel klasse R 120 / D-s2,d2 eller bygningsdel klasse R 60 D-s2,d0 med beklædning klasse K₂ 60 A2-s1,d0. Konstruktioner over gulv på øverste etage udføres som bygningsdel klasse R 60 / D-s2,d2, og disse bidrager ikke til bygningens stabiliserende konstruktioner.

Der vil indvendigt kun blive anvendt overflader af massivtræ, de steder hvor der i referencebyggeriet accepteres beklædning klasse K₁ 10 D-s2,d2. Hvor der i referencebygningen er krav om beklædning klasse K₁ 10 / B-s1,d0, anvendes der beklædning klasse K₂ 60 / A2-s1,d0 (senere benævnt brandbeskyttelsessystem).

Brandsektionsadskillelserne udføres af bygningsdel klasse EI 60 / D-s2,d0 med beklædning klasse K₂ 60 / A2-s1,d0 (senere benævnt brandbeskyttelsessystem). Brandsektionsadskillelser mod trapper udføres som bygningsdel klasse EI 60 / A2-s1,d0 og trapperne er i sig selv klassificeret R 30 / A2-s1,d0.

Analysebyggeriet har i overensstemmelse med præ-accepterede løsninger installeret ABA-anlæg, AVA-anlæg og flugtvejsbelysning. Bygningen forsynes desuden med et fulddækkende, automatisk sprinkleranlæg (AVS-anlæg) som kompenserende tiltag.

8.8.4.3.2 *Referencebyggeri*

Referencebyggeriet i dette eksempel er en hotelbygning med seks etager, hvor størrelsen, anvendelsen og personbelastning af de enkelte etager modsvarer analysebyggeriet.

Referencebyggeriet er udført uden AVS-anlæg.

Bæresystemet udføres som bygningsdel klasse R 120 / A2-s1,d0, bortset fra konstruktioner over gulv på øverste etage, som er udført med bygningsdel klasse R 60.

Isolering i facader, etagedæk og terræn er ringere end materiale klasse D-s2,d2. Isoleringen inddækkes af mindst bygningsdel klasse EI 30 A2-s1,d0 på vægge og mindst bygningsdel klasse EI 60 A2-s1,d0 på undersiden af etage adskillelsen.

Opdelingen i brandsektioner er udført som i analysebyggeriet, men alle brandsektionsadskillelser udføres som bygningsdel klasse EI 60 / A2-s1,d0.

Der er ikke begrænsninger på størrelse af brandceller.

Alle øvrige forhold er ens i de to bygninger.

8.8.4.3.3 Fastsættelse af acceptkriterier

De præ-accepterede løsninger for stueetagen er beskrevet i Bilag 4 til Bygningsreglementets vejledning til kap. 5 – Brand, Præ-accepterede løsninger for brandsikring af bygningsafsnit med forsamlingslokaler, butikker mv. [43], mens det for de øvrige etager er Bilag 6 til Bygningsreglementets vejledning til kap. 5 – Brand, Præ-accepterede løsninger for brandsikring af bygningsafsnit med hoteller mv. [44] som er gældende.

Begge bilag med præ-accepterede løsninger angiver, at bæresystemet i bygningen, bortset fra i øverste etage, skal opfylde bygningsdel klasse R 120 / A2-s1,d0, samt at brandsektionsadskillelser skal opfylde bygningsdel klasse EI 60 / A2-s1,d0. Da analysebyggeriet afviger derfra, med et bæresystem af træ/materiale klasse D-s2,d0, vil acceptkriteriet for denne komparative analyse være, at kunne eftervise samme sikkerhedsniveau som:

- bærende bygningsdele som bygningsdel klasse R 120 / A2-s1,d0, og
- brandsektionsadskillelser som bygningsdel klasse EI 60 / A2-s1,d0.

Det bagvedliggende funktionskrav til løsningen omkring bæresystemer findes i Bygningsreglementet § 99:

"I tilfælde af brand skal bygninger og bygningsdele have en tilstrækkelig brandmodstandsevne.

Stk. 2. Projektering og udførelse af bygningers konstruktioner skal ske under hensyn til, at:

- 1) Evakuering af de personer, der opholder sig i bygningen, kan ske på sikker vis, og at der ikke sker væsentlige skader på bygningen.*
- 2) Der ikke sker skade på personer og bygninger på anden grund.*
- 3) Redningsberedskabet har forsvarlig mulighed for redning af personer og for at gennemføre det slukningsarbejde og den begrænsning af brandspredning, som er nødvendig herfor.*
- 4) Der ikke sker væsentlige skader på andre bygninger på egen grund, som kan medføre fare for personer eller redningsberedskabets indsatsmulighed."*

Eftersom afvigelserne i forhold til bæresystemet påvirker alle fire punkter, skal det verificeres at de alle tilfredsstilles. Det er dog ikke relevant at se på punkt 4, da der ikke er andre bygninger på grunden.

Med hensyn til afvigelsen omkring brandsektioner findes funktionskravet tilsvarende i Bygningsreglementet § 104, Antændelse og brand- og røgspredning:

”Bygninger skal projekteres og udføres, så det sikres, at der i tilfælde af brand ikke sker væsentlig brand- og røgspredning. Dette skal ske under hensyn til, at:

- 1) Risikoen for, at en brand opstår, begrænses.*
- 2) Brand- og røgspredning begrænses i den brandmæssige enhed, hvor branden er opstået.*
- 3) Brand- og røgspredning til andre brandmæssige enheder forhindres i den tid, som er nødvendig for evakuering og redningsberedskabets indsats.*
- 4) Brandspredning til andre bygninger på samme grund begrænses.*
- 5) Der ikke sker brandspredning til bygninger på anden grund.”*

I forhold til disse krav er det alene punkt 3 som er relevant i forhold til afvigelsen.

8.8.4.3.4 Grovanalyse

Anvendelsen, og dermed de mulige brandårsager og -sandsynligheder, er ens i analyse- og referencebyggeriet. I analysebyggeriet vil den samlede brandlast være højere på grund af de brændbare bygningsdele, og dermed kan konsekvenserne af en brand i værste fald være mere alvorlige.

Ved hjælp af Tabel 8.0-18 konstateres det, at afvigelserne som udgangspunkt kan have negativ betydning for materialer og overflader, bærende konstruktioner, redningsberedskabets indsatsforhold og brandspredning til andre bygninger.

Som kompenserende tiltag installeres der fulddækkende sprinkleranlæg, og alle brandceller i bygningen begrænses til et areal på maksimalt 50 m² eller 100 m² for rum uden brændbart inventar.

De overordnede ændringer i beskyttelseseffekterne som følge af afvigelser og kompenserende tiltag er beskrevet i Tabel 8.0-28.

Tabel 8.0-28: Oversigt over ændring i beskyttelsesformål.

Beskyttelsesformål	Forskelle fra præ-accepterede løsninger			
	Afvigelser		Kompenserende tiltag	
	Brændbart bæresystem	Brændbare brandsektionsadskillelser	AVS-anlæg	Størrelse af brandceller
1. Evakuering og redning af personer	0	0	+	+
2. Bærende konstruktioners brandmodstandsevne	-	0	+	0
3a. Materialer og overflader	-	-	+	0
3b. Brandsektioner	0	-	+	+
3c. Brandceller	0	0	+	+
3d. Brandspredning til andre bygninger	-	0	+	0
3e. Brandsikring af tekniske installationer	0	-	+	0
4. Redningsberedskabets indsatsmuligheder	-	-	+	+

Af tabellen fremgår det at følgende forhold påvirkes:

- 1) Evakuering og redning af personer påvirkes ikke direkte af afvigelserne. De kompenserende tiltag med mindre brandceller (bortset fra i stueetagen) og AVS-anlæg, vil give et højere sikkerhedsniveau i forhold til personsikkerheden i bygningen, eftersom udbredelsen af brand og røg begrænses.
- 2) Bærende og stabiliserende konstruktioner vil generelt blive udsat for lavere varmepåvirkning, når AVS-anlægget udløses. Dette vil i praksis betyde en øget bæreevne under brand, i de fleste tilfælde. Et brændbart bæresystem vil påvirke bæreevnen negativt, idet bæresystemet selv bidrager til branden og dermed kan forlænge en brands varighed. Nedsat brandmodstand vil som udgangspunkt være negativt.
- 3) Antændelse og brand- og røgspredning.
 - a) Materialer og overflader påvirkes, idet AVS-anlægget vil begrænse brandspredningen i et rum, da branden og omkringliggende materialer vædes og køles ned. Brugen af brændbare byggematerialer betyder en øget brandenergi i bygningen, hvilket er negativt da det kan give kraftigere og/eller længerevarende brande.
 - b) Brandsektioner påvirkes positivt af, at der er installeret AVS-anlæg, og at brandcellernes areal begrænses. Begge tiltag nedsætter sandsynligheden for, at en brand kommer ud af kontrol, spreder sig til hele brandsektionen og potentielt truer tilstødende brandsektioner. Brugen af brændbare elementer i brandsektionsadskillelserne nedsætter pålideligheden af disse i nogen i tilfælde af svigt.
 - c) Øgede krav til brandcelleinddeling samt installation af AVS-anlæg betyder, at brandudbredelse på en etage hæmmes. Afvigelserne har ikke negativ konsekvens for dette område.

- d) Brandspredning til andre bygninger påvirkes positivt af AVS-anlægget, eftersom sandsynligheden for, at en brand kommer ud af kontrol, reduceres. Forholdet påvirkes negativt af afvigelserne omkring bæresystemet af de samme årsager som beskrevet for "bærende konstruktioner".
 - e) Brandsikring af tekniske installationer forringes af afvigelsen omkring brændbare brandsektionsadskillelser, idet gennemføringer i brandsektionsadskillelser af træ giver øget sandsynlighed for antændelse inde i konstruktionen gennem varmeledning. Dette kompenseres af, at AVS-anlægget giver lavere temperaturpåvirkning.
- 4) Redningsberedskabets indsatsforhold påvirkes positivt af både AVS-anlægget og begrænsning i størrelse på brandceller. Dette skyldes, at brandudbredelsen begrænses, og at branden bliver lettere at kontrollere. Begge afvigelser har derimod potentiale til at sænke sikkerheden for slukningsmandskaberne.

Samlet vurderes det, at en komparativ analyse af forholdene er mulig. Da begge afvigelser påvirker samme forhold, kræver dette dog en grundig analyse af de samlede effekter i tillæg til eftervisning af hver enkelt afvigelse.

8.8.4.3.5 Valg af brandscenarier

Brandscenarierne, der lægges til grund for eftervisninger af afvigelserne, er følgende. Scenarie 1-4 er valgt med udgangspunkt i scenarie A i afsnit 8.5.3.4. Scenarie 5 modsvarer scenarie D. Scenarie B og C vurderes ikke at være relevante for disse afvigelser.

1. Sprinklerkontrolleret/-reduceret brand.
2. Fuldt udviklet brand i restaurant/reception.
3. Fuldt udviklet brand på hotelværelse.
4. Fuldt udviklet brand i mindre, lukkede rum såsom teknikrum, depoter mv.
5. Lokal brand nær en konstruktion som er skærmet fra AVS-anlæggets effekt.

Scenarie 1 er grundscenariet, hvor sprinkleranlægget fungerer, og vil være en sprinklerkontrolleret/-reduceret brand.

Scenarie 2-4 modsvarer en fuldt udviklet rumbrand, som dog ikke forventes ved korrekt funktion af AVS-anlægget. Scenarie 2-4 betragtes derfor som et svigtscenarie.

Scenarie 5 bør eftervises, men er ikke det primære scenarie, grundet det fulddækkende, automatiske brandalarmanlæg i både analyse- og referencebyggeriet.

Grundscenariet vil derved være en sprinklerkontrolleret/-reduceret brand, hvor svigtscenariet vil være en fuldt udviklet brand.

8.8.4.3.6 Eftervisning

8.8.4.3.6.1. Brændbart bæresystem – Grundscenarie

Omhandler scenarie 1

2. Bærende konstruktioners brandmodstandsevne

For grundscenariet udføres det bærende system med to typer bygningsdele:

1. bygningsdel klasse R 120 D-s2,d0, og
2. bygningsdel klasse R 60 D-s2,d0 med beklædning klasse K₂ 60 A2-s1,d0.

Bygningsdelstype 1 er dimensioneret til modstå 120 minutters indbrænding og stadig have tilstrækkelig restbæreevne.

Bygningsdelstype 2 er udført med beklædning klasse K₂ 60 A2-s1,d0, der vil sikre at en brand ikke påvirker det bagvedliggende træ i mindst 60 minutter. Herefter kan den bærende bygningsdel af træ antænde, og dimensioneres derfor til at have tilstrækkelig restbæreevne efter de resterende 60 minutters indbrænding efter en 120 minutters ISO 834 standardbrand.

For de dele af de bærende konstruktioner, der udgøres af CLT-elementer, foretages dimensioneringen under hensyn til de specifikke elementers egenskaber, hvor eksempelvis delaminering kan bidrage til en hurtigere indbrænding.

Sprinkling kan ikke tages med i denne betragtning, derfor scenarie, som ved svigt af sprinkling.

3a. Materialer og overflader

I grundscenariet vil AVS-anlægget begrænse brandspredningen i et rum med brændbare overflader. De brændbare overflader vil generelt blive udsat for lavere varmepåvirkning,

når AVS-anlægget udløses. Dette vil i praksis betyde en øget bæreevne under brand i de fleste tilfælde.

3e. Brandsikring af tekniske installationer

Ved installationsgennemføringer i brændbare bygningsdele, skal det sikres, at der vælges brandtætningssystemer, der er godkendt til den pågældende bygningsdel de gennembyrder. Dette omfatter også, at der ikke sker indbrænding fra hullet i bygningsdelen.

4. Redningsberedskabets indsatsmuligheder

Det vurderes for analysebyggeriet, at AVS-anlægget i kombination med begrænset bygningshøjde og etageareal, samt gode tilkørselsforhold og brandredningsarealer giver acceptable indsatsforhold for redningsberedskabet.

I stueetagen forbedres indsatsforholdene af, at der er direkte adgang fra terræn, mens det på de øvrige etager forbedrer indsatsforholdene, at brandcellernes størrelse er begrænset, da dette reducerer det brandramte område.

Disse forbedringer betyder, at sandsynligheden for en fuldt udviklet brand, som ikke kontrolleres hurtigt af redningsberedskabet, er lav i forhold til referencebyggeriet, som ikke har AVS-anlæg og begrænsning på brandcellestørrelser.

8.8.4.3.6.2. Brændbart bæresystem – Svigtscenarie

Omhandler scenarie 2, 3, 4 og 5, hvor der i dette afsnit beskrives de forhold der bliver anderledes påvirket i svigtscenariet frem for grundscenariet.

3a. Materialer og overflader

I svigt scenarier vil AVS-anlægget ikke begrænse brandudviklingen i de rum med brændbare overflader. De brændbare overflader vil generelt blive udsat for et fuldt udviklet brandforløb og varmepåvirkning. Dette afsnit er opdelt i en eftervisning af brændbare overflader og overflader med brandbeskyttelsessystem.

Rå brændbare overflader (hovedsageligt værelser)

Der er i analysebyggeriet kun brændbare overflader de steder, hvor der i referencebyggeriet kan accepteres beklædning klasse K₁ 10 D-s2,d2. Materialer og overflader i analysebyggeriet ikke vil have en øget indvirken på brandspredning, brandudvikling og røgudvikling i rummet indenfor de første 10 minutter af branden sammenlignet med referencebyggeriet, dvs. inden for det tidsrum en evakuering foregår. Herefter vil de reducerede brandceller reducere brandspredning, brandudvikling og røgudvikling fra rummet.

Brandbeskyttelsessystem

De steder i analysebyggeriet hvor der er krav om beklædning klasse K₁ 10 B-s1,d0, monteres der beklædning klasse K₂ 60 A-s1,d0. Dette medvirker til at de brændbare overflader ikke medvirker til brandens udvikling de første 60 minutter.

Referencebyggeriet har isoleringsmateriale, der er ringere end materiale klasse D-s2,d2, som er inddækket af mindst bygningsdel klasse EI 30 A2-s1,d0 på vægge og mindst bygningsdel klasse EI 60 A2-s1,d0 på undersiden af etageadskillelser. Det accepteres her at den brændbare isolering medvirker til brandens udvikling efter henholdsvis 30 og 60 minutter.

På baggrund af overstående ses det, at det er acceptabelt at de brændbare bærende bygningsdele medvirker til brandens udvikling efter 60 minutter.

4. Redningsberedskabets indsatsmuligheder

Ved svigt i sprinkleranlæg, kan der forventes en større brandeffekt fra brand i rum med brændbare overflader (værelser). I disse tilfælde vil der være en større risiko for lodret brandsmitte ud ad det brandramte værelses vindue.

Dette vurderes i dette svigtscenarie acceptabelt, da regningsberedskabet hele vejen rundt om bygningen har mulighed for udfører slukningsindsats udvendig fra på alle værelser.

På grund af de forbedrede indsatsforhold beskrevet for grundscenariet vurderes det, at denne afvigelse, også vil være acceptabel i forhold til scenarie 5 med en lokal brand, der hurtigt kan bringes under kontrol og slukkes.

Generelt

Konkret vurderes det, at konstruktionernes udførelse sammen med de kompenserende tiltag giver et sikkerhedsniveau, som ikke er dårligere i analysebyggeriet end i referencebyggeriet. Dette gælder med hensyn til evakuering af personer, skade på personer og bygninger på anden grund samt redningsberedskabets indsats. Funktionskravet i BR18, § 99, stk. 2 er dermed tilfredsstillet.

Da der er brugt AVS-anlæg som kompenserende tiltag, så vil der være nødvendigt at der bliver udarbejdet en systemsvigtsanalyse iht. afsnit 8.3.2.2.1

8.8.4.3.6.3. Brændbare brandsektionsadskillelser

Denne afvigelse er negligerbar, når AVS-anlægget fungerer korrekt, fordi de forenklede indsatsforhold vil indebære en øget sandsynlighed for at branden kontrolleres og/eller slukkes tidligt i brandforløbet.

Brandsektionsadskillelserne udføres med beklædning klasse K₂ 60 A2-s2,d0 på begge sider af det brændbare materiale.

Ved sprinklersvigt, vil branden ikke sprede sig hurtigere mellem brandsektionerne, idet kravet til brandmodstandsevne for henholdsvis analyse- og referencebyggeriet er 60 minutter.

Brandbeskyttelsessystemet vil sikre, at brandsektionsadskillelsen ikke bidrager til branden i 60 minutter, hvilket svarer til den præ-accepterede løsning. Dette forhold af afvigelsen vurderes derfor at være eftervist.

Af disse årsager vurderes sikkerhedsniveauet i analysebyggeriet i forhold til brand- og røgspredning mellem brandsektioner ikke er lavere, end det i referencebyggeriet. Der vil således være længere tilgængelig tid til evakuering og redningsindsats i analysebyggeriet. Acceptkriteriet om, at bygningen skal udføres, så "brand- og røgspredning til andre brandmæssige enheder forhindres i den tid, som er nødvendig for evakuering og redningsberedskabets indsats", er dermed tilfredsstillet.

8.8.4.3.7 Samlet analyse

Selvom det fremgår af grovanalysen, at de forskellige afvigelser vil påvirke flere af de samme forhold. Vurderes forholdene ikke at yderlige negative konsekvenser på hinanden.

Den øget brandbelastning for værelser med brændbare overflader, forventes i svigtscenarie at påvirke brandsektionsadskillelserne i en mindre udstrækning. Dette vurderes acceptabelt, da det er et svigtscenarie.

Reduceret brandmodstand i forhold til bæreevne af etageadskillelserne påvirker bæresystemet på en anden måde end, at bæresystemet som helhed er brændbart. Disse to forhold vurderes derfor at kunne betragtes separat, og ingen yderligere analyse er nødvendig da forholdene er verificeret hver for sig.

Det vurderes på denne baggrund, at alle afvigelser er verificeret tilstrækkeligt.

8.8.4.3.8 Konklusion

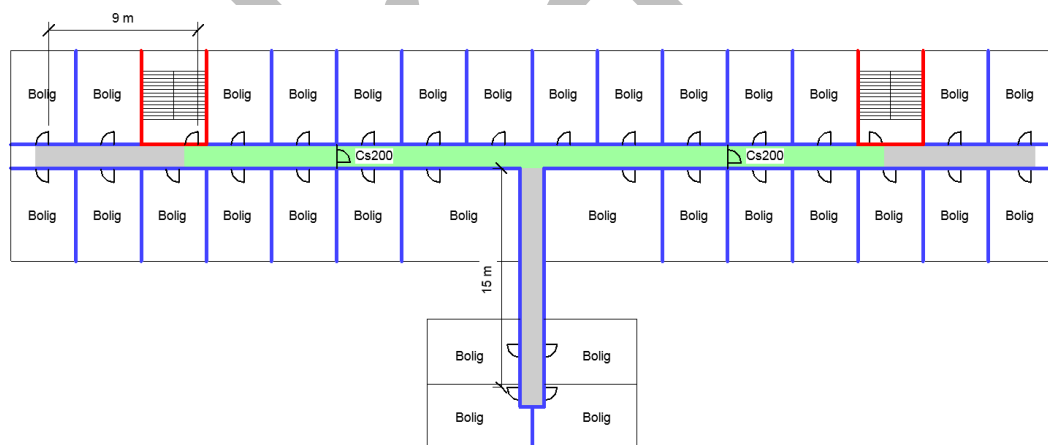
Baseret på eftervisning af hver enkelt afvigelse, samt den samlede vurdering af afvigelserne konkluderes det, at acceptkriterierne givet af Bygningsreglementets § 99 og 104, samt præ-accepteret løsninger for bæreevne og brandsektionsadskillelser er tilfredsstillet. Dermed godtages designet.

8.8.4.4. Eksempel 4: Blinde ender i flugtvejsgang

8.8.4.4.1 Analysebyggeri

Analysebyggeri i dette eksempel er en bygning med seks etager, hvor overkant af gulv i øverste etage er 21 m over terræn. Hele bygningen indeholder ungdomsboliger og er udført som et korridorgangsbyggeri. Derfor henføres bygningen til anvendelseskategori 5 og risikoklasse 3. Bygningen er opdelt i brandsektioner med et areal på højst 600 m².

Analysebyggeriet har to flugtvejstrapper, som er placeret i modstående ender af korridorgangen. Ved hver trappe er en blind ende på 9 m fra bagerste bolig. Samtidig er der midt i bygningen en ekstra flugtvejsgang med blind ende på 15 m. Se Figur 8.0-41.



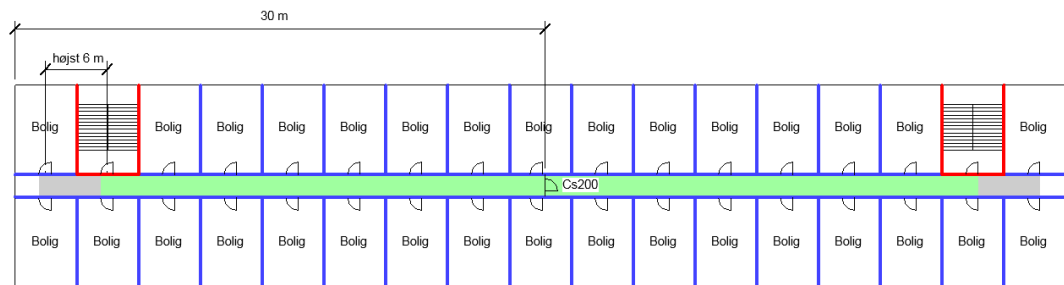
Figur 8.0-41 - illustration af analysebyggeriet, grøn farve angiver flugtvejsgang med mulighed for at flygte i to retninger, grå farve angiver områder med mulighed for at flygte i en retning.

Analysebyggeriet har i iht. præ-accepterede løsninger installeret ABA-anlæg, AVA-anlæg og flugtvejs- og panikbelysning.

Brug af røgadskillende døre til opdeling i røgzoner og et begrænset antal boliger i denne røgzone fungerer som kompenserende tiltag, hvilket beskrives yderligere i eftervisningsafsnittet.

8.8.4.4.2 Referencebyggeri

Referencebyggeriet har samme størrelse og anvendelse som analysebyggeriet, men er udført i overensstemmelse med præaccepteret løsninger. Dette indebærer at de blinde ender er højst 6 m ved hver flugtvejstrappe, at der er opdeling af korridorgangen med røgtætte døre pr. 30 m gang Se Figur 8.0-42.



Figur 8.0-42 - illustration af referencebyggeriet, grøn farve angiver flugtvejsgang med mulighed for at flygte i to retninger, grå farve angiver områder med mulighed for at flygte i en retning.

8.8.4.4.3 Fastsettelse af acceptkriterier

De præ-accepterede løsninger for bygningen er beskrevet i Bygningsreglementets vejledning til kap. 5 – Brand, kapitel 2 – Evakuering [45] og Bilag 6 til

Bygningsreglementets vejledning til kap. 5 – Brand, Præ-accepterede løsninger for brandsikring af bygningsafsnit med hoteller mv. [44].

Begge vejledninger med præ-accepterede løsninger angiver, at *”Når gangafstanden mellem udgang fra en brandcelle og udgang til en flugtvejstrappe er mindre end 6 m og dermed kort, kan det for bygninger, hvor gulv i øverste etage er mindre en 22 m over terræn, tillades, at der kun er adgang til udgang i én retning i en flugtvejsgang”*.

Da analysebyggeriet ikke imødekommer dette, og afviger med en længere afstand for de blinde ender, vil acceptkriteriet for denne komparative analyse være at kunne eftervise samme sikkerhedsniveau.

Afvigelsen består af to dele: Blinde ender ved flugtvejstrappe og blind ende i tilstødende korridor.

Det bagvedliggende funktionskrav til den præ-accepterede løsning findes i Bygningsreglementet § 94, Udformning af flugtveje til evakuering af personer:

”En flugtvej er et sammenhængende system af udgange, gangarealer, flugtvejsgange og flugtvejstrapper, og den skal sikre, at personer kan forlade en bygning på sikker vis.

Stk. 2. Design, projektering og udførelse af flugtveje skal ske under hensyn til:

- 1) Personers kendskab til flugtvejene i bygningen.
- 2) At flugtveje skal være lette at identificere, nå og anvende.
- 3) Personers mulighed for og evne til at anvende flugtveje i bygningen.
- 4) At evakuering af personer på sikker vis kan ske til terræn i det fri eller til et sikkert sted i bygningen og derfra på sikker vis til terræn i det fri.
- 5) At der ikke opstår kritiske temperaturer, røgkoncentrationer, varmestråling eller tilsvarende kritiske forhold i det tidsrum, i hvilket flugtvejene skal anvendes til evakuering.
- 6) At flugtvejene skal være dimensioneret til det antal personer, der skal benytte dem.
- 7) At døre i flugtveje skal være lette at åbne uden brug af nøgle og værktøj, når flugtvejen skal benyttes af personer, og at døre i flugtveje, der skal anvendes af flere end 150 personer, skal åbne i flugtreningen.
- 8) At flugtveje skal være fri i hele den nødvendige bredde.”

Afvigelsen har betydning for punkt 2, 3 og 5.

8.8.4.4.4 Grovanalyse

Anvendelsen og dermed de mulige brandårsager og -sandsynligheder, samt størrelse er ens i analyse- og referencebyggeriet.

Ved hjælp af Tabel 8.0-18 konstateres det, at afvigelsen kan have negativ betydning for evakueringsforhold og redningsberedskabets indsatsforhold. Ingen af disse forhold kan umiddelbart afskrives, og de må derfor begge omhandles i verificeringen af afvigelsen. Der er ikke fundet yderligere beskyttelsesformål, som behøver vurdering.

Brug af røgadskillende døre til opdeling i røgzoner og et begrænset antal boliger i denne røgzone fungerer som kompenserende tiltag. Ændringen i beskyttelseeffekt på baggrund af disse forhold er groft analyseret i Tabel 8.0-29, som er baseret på Tabel 8.0-19.

Tabel 8.0-29: Oversigt over ændring i beskyttelseeffekt.

Beskyttelsesformål	Forskelle fra præ-accepterede løsninger		
	Afvigelse	Kompenserende tiltag	
	Blind ende (Flugtvej i en retning)	Røgadskillende døre	Begrænset antal boliger pr. røgzone
1. Evakuering og redning af personer	-	+	+
2. Bærende konstruktioners brandmodstandsevne	0	0	0
3a. Materialer og overflader	0	0	0
3b. Brandsektioner	0	0	0
3c. Brandceller	0	0	0
3d. Brandspredning til andre bygninger	0	0	0
3e. Brandsikring af tekniske installationer	0	0	0
4. Redningsberedskabets indsatsmuligheder	0	+	+

Af tabellen fremgår det, at to forhold påvirkes negativt af afvigelsen, mens to forhold påvirkes positivt af de kompenserende tiltag.

- 1) Evakueringsforholdene påvirkes positivt, ved at områder med blinde ender adskilles af en røgadskillende dør, så at flugtvejsforholdene fra hver bolig kan påvirkes af en brand fra færre boliger. Forholdene påvirkes negativt, idet der i længere afstand end 6 m kun kan flygtes i en retning.
- 4) Redningsberedskabets indsatsmuligheder påvirkes positivt, det øgede antal røgadskillelser betyder, at indsatsen i højere grad kan koncentrerer i den brandramte zone, hvormed mandskabets effektivitet forøges.

Den relativt begrænsede påvirkning af beskyttelsesformålene, som afvigelsen introducerer, medfører at analysen har lav kompleksitet og omfang. Derfor konkluderes

det, at en komparativ analyse er mulig, og at eftervisningen kan bygge på en hovedsagelig kvalitativ analyse.

8.8.4.4.5 Valg af brandscenarier

Afvigelsen har primært betydning for evakuering og redning af personer. Det vurderes derfor, at brandscenariet A er eneste relevante brandscenarie.

I grundscenariet vil der ikke ske brand- og røgspredning fra en brand i en bolig til flugtvejsgangen, inden den automatiske varsling har sikret hurtig evakuering af beboere. I dette scenarie, vil de blinde ender ikke have en nævneværdig betydning. Scenariet er derfor ikke relevant i forhold til eftervisning af afvigelsen.

Eftervisningen vil derfor omhandle et svigtscenarie, hvor det kritiske scenarie vil være en brandscenarie A brand i en bolig, hvor døren til boligen forbliver åben.

8.8.4.4.6 Eftervisning

Det kritiske svigtscenarie vil være, at en beboer i tilfælde af brand ikke lukker døren til den brandramte bolig efter sig, og der derved sker brand- og røgspredning til flugtvejsgangen. Dette vil have indflydelse på flugtvejsforholdene for naboboligerne i samme røgzone, og derfor sker eftervisningen med fokus på dette svigtscenarie.

I analysebyggeriet findes som beskrevet to situationer, der afviger fra de præaccepterede løsninger. De eftervises hver for sig i de følgende afsnit.

Blind ende ved flugtvejstrappe

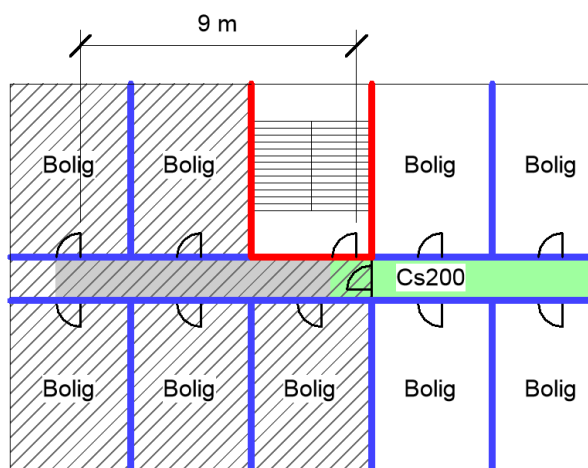
I referencebyggeriet accepteres en blind ende på 6 m og en røgopdeling af flugtvejsgangen for hver 30 m. I referencebyggeriet vil dette medvirke, at en røgspredning til flugtvejsgangen vil kunne påvirke op til 17 boliger.

I analysebyggeriet er den blinde ende på 9 m. Her tilføjes en røgadskillende dør efter flugtvejstrappen, så at der kun er fem boliger i samme røgzone frem for 17 boliger. Dette reducerer konsekvensen af brand- og røgspredning i røgzonerne betydeligt.

I tilfælde af at der alligevel sker brand- og røgspredning skal der i det værste tilfælde maksimalt flygtes forbi fire boliger. Ligeledes er den samlede størrelse på de fem boliger inkl. gangløb mindre end 150 m² (markeret på illustration med skravering), hvilket er tilsvarende en præ-accepteret størrelse, hvis der kun var placeret en bolig.

Er gangen røgfylt, vil den røgadskillende dør medvirke til, at personer ikke bevæger sig forbi flugtvejstrappen, da den røgadskillende dør er placeret lige efter trappen. Dette vil samlet set hjælpe til at identificere døren til flugtvejstrappen eller alternativt døren til den røgfrie del af flugtvejsgangen. Vælger alle beboere at blive i deres boliger, grundet røgspredning til flugtvejsgangen, vil der være et begrænset antal som skal reddes med stige.

Se illustration af kompenserende tiltag på Figur 8.0-43.



Figur 8.0-43 - illustration af analysebyggeriet med kompenserende tiltag, grøn farve angiver flugtvejsgang med mulighed for at flygte i to retninger, grå farve angiver områder med mulighed for at flygte i en retning. Skraveringen viser områder i røgzone, som direkte eller indirekte påvirkes af branden.

Konkret vurderes det, at forlængelsen af den blinde ende fra 6 til 9 m med de kompenserende tiltag giver et sikkerhedsniveau, som ikke er dårligere i analysebyggeriet end i referencebyggeriet med hensyn til evakuering af personer.

Blind ende ved flugtvejsgang

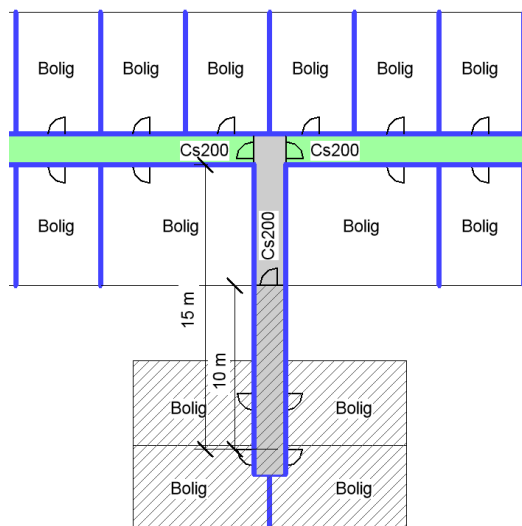
Denne situation er sammenlignelig med den foregående, men i dette tilfælde er den blinde ende dog 15 m i stedet for 9 m. Omvendt vil der kun blive påvirket fire boliger af røgspredning frem for fem boliger. Arealet af boliger inkl. gangløb er fortsat mindre end 150 m² (markeret på illustration med skravering). Antal boliger og det påvirkede areal vurderes at være sammenlignelige, som i den tidligere eftervisning. De nævneværdige forskelle på de to situationer er følgende afvigelser:

1. Denne blinde ende er til en flugtvejsgang og ikke en flugtvejstrappe som i tidligere verificering og som de præ-accepteret løsninger anviser.
2. Den blinde ende er 15 m lang fra fjerneste dør.

Som kompenserende tiltag for afvigelse 1, placeres der to røgtætte døre, en på hver side af punktet, hvor den blinde ende tilstøder flugtvejsgangen. Dette sikrer, at lige meget hvilken side af flugtvejsgangen, der er røgfylt, vil der altid kunne flygtes i en ikke-røgfylt retning.

Som kompenserende tiltag for afvigelse 2, placeres en røgtæt dør som opdeling af gangforløbet i den blinde ende, så at der ikke flygtes længere end 10 m i røgfylt gang i tilfælde af røgspredning til flugtvejsgang.

Se illustration af kompenserende tiltag på Figur 8.0-44.



Figur 8.0-44 - illustration af analysebyggeriet med kompenserende tiltag. Grøn farve angiver flugtvejsgang med mulighed for at flygte i to retninger, grå farve angiver områder med mulighed for at flygte i en retning.

Konkret vurderes det, at den blinde ende til flugtvejsgangen med de kompenserende tiltag giver et sikkerhedsniveau, som ikke er dårligere i analysebyggeriet end i referencebyggeriet med hensyn til evakuering af personer.

8.8.4.4.7 Konklusion

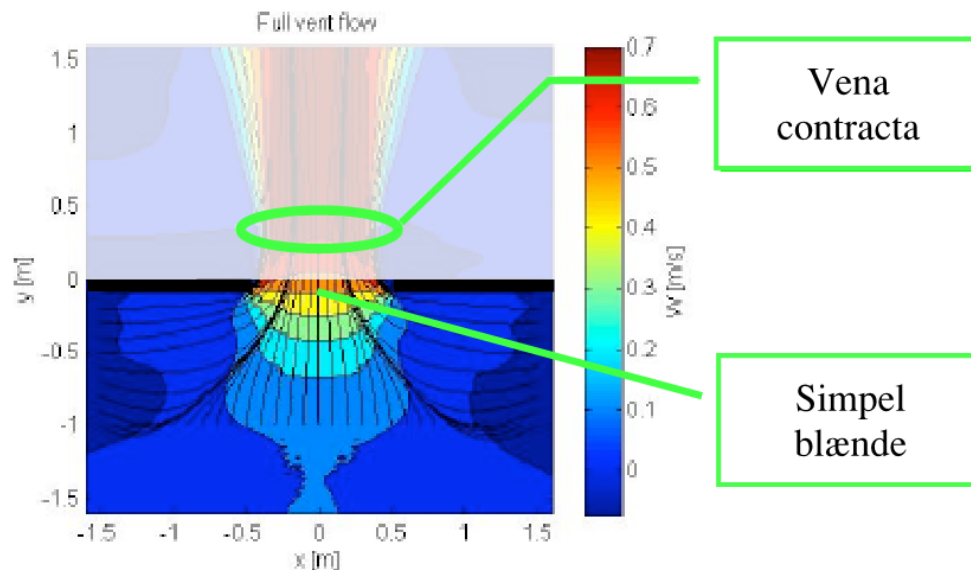
Der er ikke behov for en samlet analyse, eftersom der bare er tale om samme type afvigelse. På baggrund af eftervisningen af de to situationer konkluderes det, at designet af analysebyggeriet tilfredsstiller BR18's funktionskrav om, "at personer kan forlade en bygning på sikker vis".

8.8.5. Fuld modellering af brandventilationsåbning med CFD (informativt)

Dette bilag beskriver metoder til modellering af brandventilationsåbninger der alene kan anvendes når der tilknyttes en certificeret 3.partkontrol for anvendelsen af metoderne.

8.8.5.1. *Simpel modellering af blænde*

Ved simpel modellering af en brandventilationsåbning modelleres åbningen som en simpel blænde, men strømmingen nedstrøms og vena contracta inkluderes ikke i beregningsnettet.



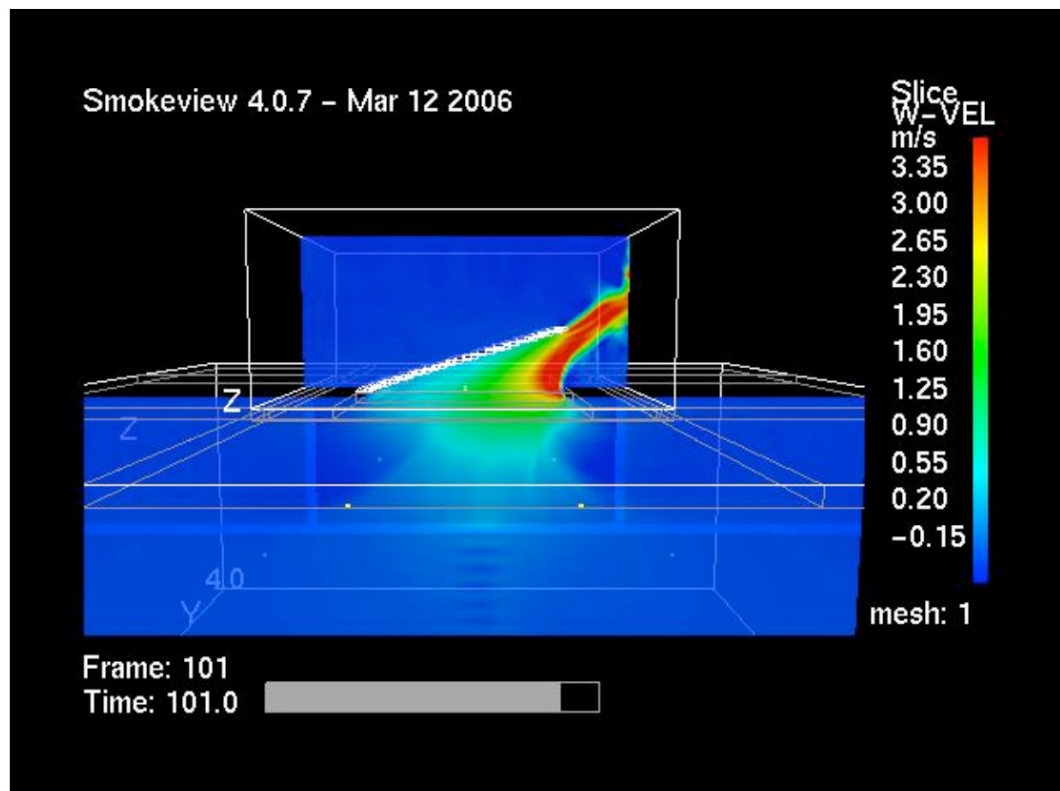
Figur 8.0-45: Simpel modellering af strømning igennem blænde uden vena contracta. Figur tilpasset ud fra CFD Best Practice [9]

Især ved anvendelse af grove strømningsnet vil åbninger vise sig for effektive. Der skal derfor beregnes en supplerende faktor C_{cfd} for at kompensere for dette. En metode er beskrevet i New Engineering Principles In Atrium Smoke Management [46].

Den modellerede brandventilationsåbnings geometriske areal A_g kan efter compensation omregnes til det aerodynamiske areal A_a . Dette kan ske ud fra kontraktionskoefficienten for en blænde der kendes som typisk $C_v = 0,6$ for en horisontal åbning (loft) og typisk $C_v = 0,68$ for en vertikal åbning (væg), Emmons [10].

8.8.5.2. *Fuld modellering af brandventilationsåbning*

Den fulde ventilationsåbning modelleres med en opløsning, der er tilstrækkelig høj til at definere størrelsen og placeringen af vena contracta. Dette vil kræve, at beregningsdomænet er udstrakt tilstrækkeligt nedstrøms til at dannelsen af vena contracta sker inde i beregningsdomænet.



Figur 8.0-46: Fuld modellering af strømning igennem naturlig ventilationsåbning.

Ved anvendelse af denne metode skal der udføres en særsilt følsomhedsanalyse som viser at strømmingen gennem åbningen er tilstrækkeligt opløst.

Ved anvendelse af denne metode skal der også foretages eftervisning på baggrund af udvendig vindpåvirkning og bygningsdele mv. som kan påvirke det strømmingen gennem åbningen.