

---

## Bygningsreglements vejledning til kap 5 - Brand

---

### Kapitel 8: Eftervisning

8.1	Indledning .....	3
8.1.1	Metoder til eftervisning .....	4
8.1.2	Komparativ analyse med udgangspunkt i de præ-accepterede løsninger.....	4
8.1.3	Brandteknisk dimensionering.....	4
8.1.4	Brandprøvning (orienterende) .....	4
8.1.5	Kombination af metoder .....	5
8.1.6	Særligt omkring anvendelse af metoder og vurdering af resultater.....	5
8.2	Acceptkriterier og kritiske forhold .....	6
8.2.1	Kritiske forhold .....	6
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 .....	11
8.2.5	Fastsættelse af acceptkriterier for adskillende bygningsdele.....	11
8.2.6	Fastsættelse af acceptkriterier for evakueringsberegninger .....	11
8.3	Brandteknisk dimensionering af personsikkerhed .....	12
8.3.1	Proces for brandteknisk dimensionering .....	12
8.3.2	Fastlæggelse af brandscenarier, svigtscenarier og designbrand .....	13
8.3.3	Håndberegninger.....	27
8.3.4	2-zonemodeller .....	29
8.3.5	Modellering med CFD.....	32
8.3.6	Evakueringsanalyser.....	42
8.3.7	Begrænsninger ved evakueringsberegninger.....	45
8.3.8	Evakueringsscenarier.....	45
8.3.9	Håndberegninger.....	51
8.3.10	Evakueringssimuleringer .....	55
8.3.11	Dokumentation ved evakueringsanalyser.....	57
8.4	Brandteknisk dimensionering af bygningsdele .....	58
8.4.1	Eftervisning af bygningsdele.....	58
8.5	Komparative analyser .....	62
8.5.1	Forudsætninger og begrænsninger for komparativ analyse.....	63
8.5.2	Beskyttelsesformål .....	63
8.5.3	Evakuering og redning af personer .....	64
8.5.4	Bærende konstruktioner .....	64
8.5.5	Antændelse og brand- og røgspredning.....	64
8.5.6	Redningsberedskabets indsatsforhold.....	65
8.5.7	Procedure for komparativ analyse .....	65
8.5.8	Håndtering af usikkerhed og sensitivitet.....	72

8.6	Brandprøvning (informativt).....	72
8.6.2	Forsøg omkring evakuering og flugtveje.....	76
8.7	Kombination af metoder .....	77
8.8	Litteraturliste .....	78
8.9	Appendiks.....	81
8.10	Kontrol af eftervisning.....	81
8.11	Håndberegninger .....	81
8.11.1	Brandens maksimale effektudvikling .....	81
8.11.2	Aksesymetriske røgfanemodeller.....	82
8.11.3	Ikke aksesymetriske røgfaner.....	86
8.11.4	Linjerøgfanen.....	87
8.11.5	Røgfylldning.....	89
8.11.6	Stråling.....	93
8.11.7	Optisk densitet .....	95
8.11.8	Aktiveringstider for sprinklere og simple termodetektorer .....	96
8.11.9	Aktiveringstider for sprinklere og simple termodetektorer ved konstant effekt .....	97
8.12	Systemsvigtsanalyse.....	98
8.12.1	Afklaring af anlægsopbygning og identifikation af typer af svigt.....	98
8.12.2	Sandsynlighed og konsekvens af svigt samt supplerende tiltag .....	101
8.13	Eksempel på beregning af bygningsdele .....	104
8.13.1	Beregning af en vægs adskillende funktion.....	104
8.13.2	Bygningsdelen .....	104
8.13.3	Metode .....	105
8.13.4	Beregning .....	105
8.14	Eksempler på komparativ analyse.....	107
8.14.1	Eksempel 1: Åbenhed mellem mere end to kontoretager.....	108
8.14.2	Eksempel 2: Øget brug af glas mod flugtvejsgang på skole .....	112
8.14.3	Eksempel 3: Brændbart bæresystem i hotelbygning .....	118
8.14.4	Eksempel 4: Blinde ender i flugtvejsgang.....	124
8.15	Fuld modellering af brandventilationsåbning med CFD (informativt) .....	129
8.15.1	Fuld modellering af brandventilationsåbning .....	129

## 8.1 Indledning

Dette kapitel indeholder rammerne for udarbejdelse og kontrol af dokumentation for eftervisning af brandsikkerhed. Kapitlet 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.

Kapitlet indeholder en række nationale valg, som beskriver det accepterede sikkerhedsniveau i Danmark.

Metoder, acceptkriterier og designværdier i dette kapitel skal anvendes ved dokumentation af brandsikkerheden af byggeri i brandklasse 3. Anvisningerne i dette kapitel er minimumskrav, som skal følges for byggeri i brandklasse 3. Hvor der er beskrevet mulighed for vurdering, må dette ikke ske til ugunst for brandsikkerheden i byggeriet. Muligheden for vurdering på beregningsforudsætninger er alene mulig i forhold til et evt. behov for skærpelser af f.eks. designværdier efter fagligt skøn. Metoder, acceptkriterier og designværdier kan også anvendes i brandklasse 4, men det er i brandklasse 4 også muligt at udfærdige dokumentationen på anden vis.

Når der i dette kapitel anvendes formuleringen, "skal", betyder det, at denne metode skal anvendes ved eftervisning af byggeri i brandklasse 3, da det af BR18, §493, fremgår, at de tekniske løsninger skal udføres i overensstemmelse med præ-accepterede løsninger, komparative analyser 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 dette kapitel.
- Komparativ analyse med udgangspunkt i de præ-accepterede løsninger, der er beskrevet i afsnit 8.5.
- Brandteknisk dimensionering, som er beskrevet i afsnit 8.3 og afsnit 8.4 .
- Brandprøvning(er). Brandprøvninger og forsøg er beskrevet i afsnit 8.6.
- En kombination af de ovennævnte fire metoder, som er beskrevet i afsnit 8.7.
- 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 bygningssejeren og dennes rådgivere at fastlægge processen samt i sidste ende at sikre, at kravene i BR18 samt rammerne i dette kapitel overholdes.

### 8.1.1 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 foretage 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.

Uanset metode skal der foretages et fagligt skøn af de enkelte metoder samt af den samlede løsning for brandsikkerhed for både individer i byggeriet og den samlede population i byggeriet.

### 8.1.2 Komparativ analyse med udgangspunkt i de præ-accepterede 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.

### 8.1.3 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 [1] og PD 7974-7 [2].

### 8.1.4 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 til det funktionskrav, der skal opfyldes.

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

#### 8.1.5 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.

#### 8.1.6 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 ud over 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.

##### 8.1.6.1 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.

##### 8.1.6.2 Validering

Validering omfatter en undersøgelse af, at f.eks. en beregningsmodel er velegnet til den aktuelle problemstilling, dvs. at den anvendes inden for 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, som 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 litteraturhenvisninger.

### 8.1.6.3 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 0 og 8.3.8.3.

### 8.1.6.4 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 der 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 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 der ikke optræder kritiske forhold i forhold til toksicitet, når de beskrevne acceptkriterier for røggaslagets højde og sigtbarhed ikke overskrides. Toksicitet kan ikke anvendes 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 inden for det tidsrum, hvor der pågår evakuering, opstå kritiske forhold. 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 acceptkriterium overskrides for et konkret område inden for det tidsrum, hvor der pågår evakuering fra eller gennem det konkrete område.

### 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.

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

**Tabel 1 Acceptkriterier for personer**

	Acceptkriterier
Røgpåvirkning	Højde til røggaslag (z) målt fra gulv i flugtvejsareal med loftshøjden h må ikke være mindre end $1,6 \text{ m} + 0,1 * h$ .  Højden, z, til røggaslaget må dog ikke være mindre end 2,0 m
	Sigtbarhed i meter måles i højden 2,0 m over gulv og skal mindst være:  5 m i rum indtil $150 \text{ m}^2$ 10 m i flugtvejsarealer og i rum større end $150 \text{ m}^2$
Temperatur	Temperaturen i røggasser og luft må ikke overstige $80 \text{ }^\circ\text{C}$ målt 2 m over gulv
Varmestråling	Direkte påvirkning målt på torso og hoved 2,0 m over gulv må ved: Længerevarende stråling ikke overstige $2,5 \text{ kW/m}^2$ Kortvarig stråling ikke overstige $10,0 \text{ kW/m}^2$ i op til 4 sekunder Den akkumulerede påvirkning må ikke overstige $60,0 \text{ kJ/m}^2$ , udover energien fra en strålingsintensitet på $1,0 \text{ kW/m}^2$

Kritiske forhold for personer kan både opstå:

- Lokalt.
- I et område af et større rum.
- I et helt rum.

Særligt i CFD-modeller kan overskridelsens omfang og udbredelse variere 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 er 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 sandsynligvis 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 i rummet er lav, dvs. mindre end 0,2 pers/m<sup>2</sup>.
- 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 antal eller bredder af flugtveje fra et rum, 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:

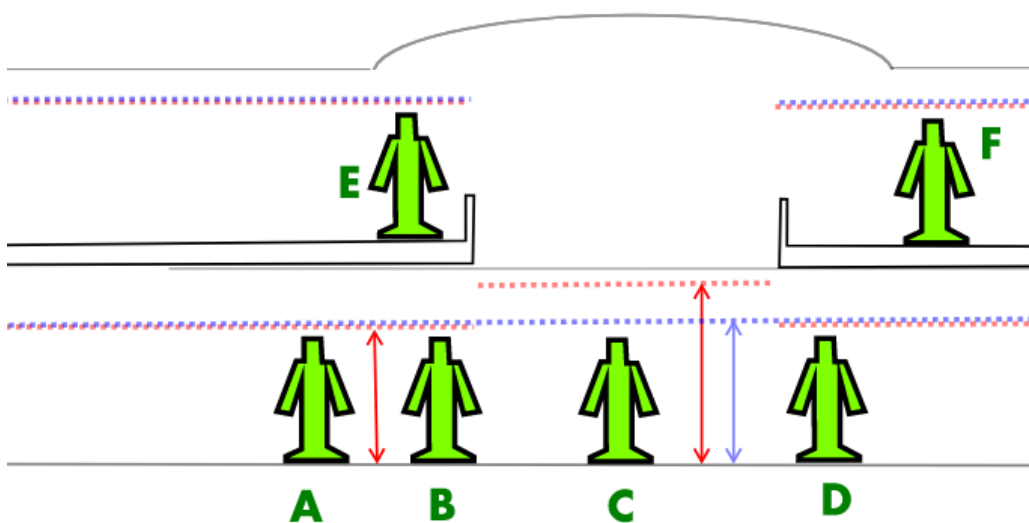
$$z \geq 1,6 \text{ m} + 0,1 \cdot h, \text{ dog skal } z \text{ være mindst } 2,0 \text{ m.}$$

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 1 Acceptkriteriet for højden til røggaslaget (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 (sigtbarhed, temperatur og varmestråling) anvendes.



### 8.2.2.3 Sigtbarhed

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

Sigtbarheden evalueres i et niveau 2,0 m over gulv.

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 sigtbarheden 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 sigtbarhed overskrides.

I den anden metode beregnes den faktiske akkumulerede optiske densitet målt fra f.eks. vægge eller flugtvejsskilte og til ethvert punkt i flugtvejsarealet. Herfra kan sigtbarheden beregnes, og det kan vurderes, om acceptkriteriet for sigtbarheden overskrides.

Beregningen af sigtbarheden 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, som 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

Evalueres af, om acceptkriteriet for varmestråling 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 modsvarer 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  $7,0 \text{ kW/m}^2$  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:

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

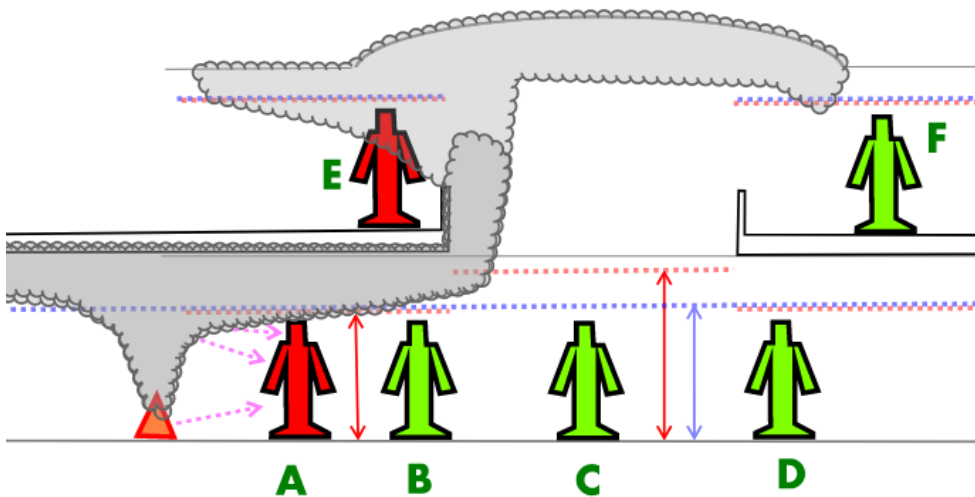
$$\text{Strålingsbidrag fra åbning: } 3 \text{ s} * 7,5 \text{ kW/m}^2 = 22,5 \text{ kJ/m}^2$$

$$\text{Det samlede strålingsbidrag er: } 45 \text{ kJ/m}^2 + 22,5 \text{ kJ/m}^2 = 67,5 \text{ kJ/m}^2$$

Da det samlede strålingsbidrag er større end  $60 \text{ kJ/m}^2$ , opstår der kritiske forhold.

### 8.2.3.2 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 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 2. Evalueringen er både vist i **Fejl! Henvisningskilde ikke fundet.** og er efterfølgende beskrevet.

**Tabel 2** Evaluering af kriterier for kritiske forhold for personer i seks områder

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

For område A optræder der kritiske forhold, idet alle acceptkriterier overskrides. Sikkerhedsniveauet er ikke tilstrækkeligt, medmindre 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 varmemestråling ikke må overstige 15 kW/m<sup>2</sup> inden for de første 60 minutter regnet fra brandens opståen. Som strålingskilde skal der regnes med en fuldt udviklet brand i byggeriet. Herved udsættes tilstødende bygninger for stråling gennem f.eks. åbninger og flammer fra uforbrændte gasser, som beskrevet i DS/EN 1991-1-2 [3].

#### 8.2.5 Fastsættelse af acceptkriterier for adskillende bygningsdele

Acceptkriterier for temperaturstigning ved beregning af adskillende bygningsdeles isoleringsevne er beskrevet under afsnit 8.4.

#### 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 tid til naturligt flow. Dette acceptkriterie er fastsat til 8 min.

Tid til naturligt flow 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 eller allerede er kommet til det fri. Acceptkriteriet er beskrevet under afsnit 8.3.6.

## 8.3 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, som beregningsprogrammet 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 evakueringsscenerier (grundscenerier), samt scenarier, hvor der sker svigt eller ændringer i de brandtekniske tiltag og flugtveje (svigtscenerier).

### 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, f.eks. brandbelastning, personbelastning, antal og bredde på døre m.v.

Da beregningerne ikke altid er afhængige af hinanden, vil beregningerne for f.eks. brand- og røgspredning kunne udføres parallelt med evakueringsberegningerne. Når personsikkerheden eftervises med brandteknisk dimensionering, udføres der dog altid både beregninger for brand- og røgspredning og evakueringsberegninger for at kunne sammenligne tiderne. Når komparativ analyse bruges til eftervisning, beregnes der ikke nødvendigvis begge dele, se afsnit 8.5.

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 brandteknisk dimensionering.
2. Fastlæggelse af acceptkriterier, som er beskrevet i afsnit 8.2.
3. Definition af brandscenerier og designbrande, som er beskrevet i afsnit 8.3.2.1 og 8.3.2.4.
4. Definition af svigtscenerier og gennemførelse af systemsvigtanalyse som beskrevet i afsnit 0.
5. Valg af beregningsmetode til bestemmelse af tiden til kritiske 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.
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 evakueringsscenerier og tilhørende svigtscenerier 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 8.3.11.1.
16. Kontrol af den brandtekniske dimensionering.
17. Dokumentation af den brandtekniske dimensionering og brandsikkerhedstiltagens 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.
- 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 8.3.2.4.

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 m<sup>2</sup>, med tilnærmelsesvist samme indretning, brandbelastning, loftshøjde og ventilationsforhold. Branden defineres som beskrevet i afsnit 8.3.2.4.

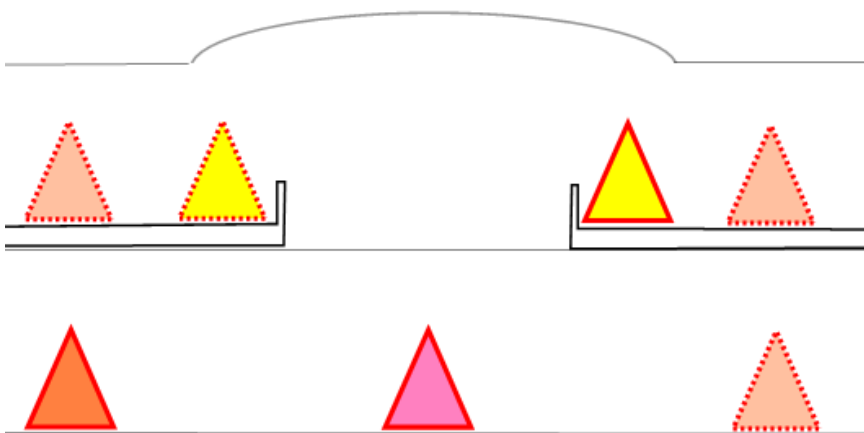
Som grundscenarie vælges det at tage udgangspunkt i det rum, hvor voluminet er mindst, og røgfylldningen dermed vil ske hurtigst. Dimensioneringen vil dermed også være gyldig for de større rum, når grundscenariets forudsætninger til brandventilationsanlægget inkl. erstatningsluft er overholdt.

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 røgspredning. Branden defineres som beskrevet i afsnit 8.3.2.4, 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 brandventilationskomponenter, vil dette kræve mindst et ekstra brandscenarie, hvor brandens position er tættere på brandventilationens 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 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 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.

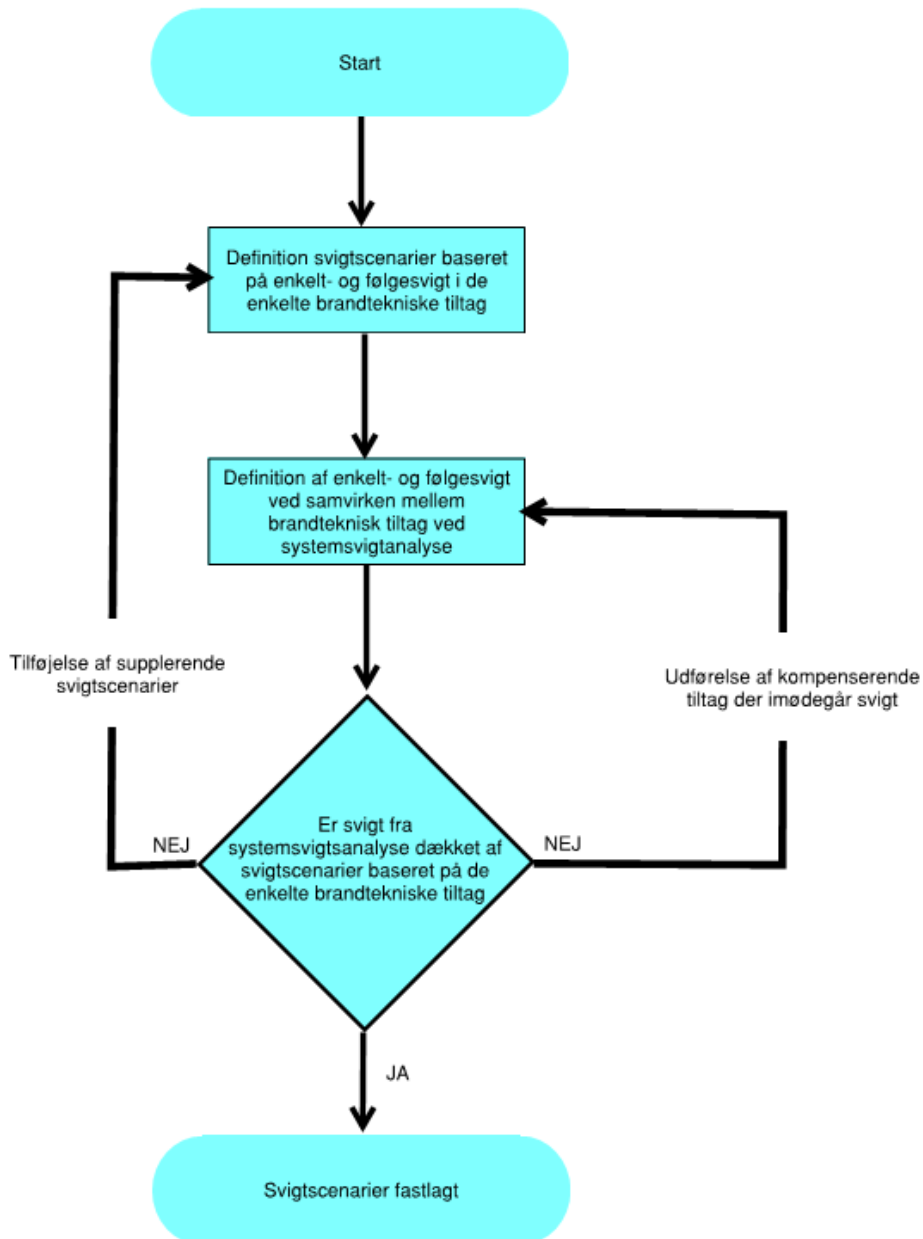
Et eksempel på et enkeltsvigt kan være afbrydelse af vandforsyningen til et sprinkleranlæg. Et eksempel på et følgesvigt i et samvirkende anlæg kan være udkobling af detektorer i ABA-anlæg, som skal aktivere atriumsprinkling. Førstnævnte svigt er et oplagt svigt af enkeltanlæg, mens følgesvigtet ikke 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 systemsvigtanalyse, som ikke er identificeret eller dækket af svigtscenarierne for de enkelte brandtekniske installationer/tiltag.



Figur 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 8.12.

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.:

- Røgalarmnæg.
- Røgdudluftningssystemer.
- Flugtvejs- og panikbelysning.
- Slangevinder.
- Stigrør med og uden trykforøgeranlæg eller overvågning.
- Brandmandselevatorer.
- 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 8.12 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.

F.eks. 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. Der skal dermed som udgangspunkt udføres ti svigtscenarier, men i dette tilfælde vil nogle svigtscenarier være mere kritiske end andre og dermed dække flere svigtscenarier.

Tabel 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-scenarie
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.

### 8.3.2.3 Systemsvigtsanalyse

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

Der skal gennemføres en systemsvigtanalyse 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.

Systemsvigtanalysen 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 brandsikringsystemer, 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.

For installationer, som udføres efter anerkendte retningslinjer eller normer, kan analysen af de enkelte installationer undlades, så der for den anlægstekniske del alene foretages en vurdering af de sammenkoblede installationer.

Resultatet benyttes til vurdering af, om de mest risikofyldte systemsvigt, der identificeres ved systemsvigtanalysen, er dækket af de opstillede svigtscenarier som beskrevet i afsnit 0.

Analysens metodik kan også benyttes som udgangspunkt for en komparativ analyse, hvis brandtekniske installationer og systemer benyttes uden for 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.

#### 8.3.2.4 *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

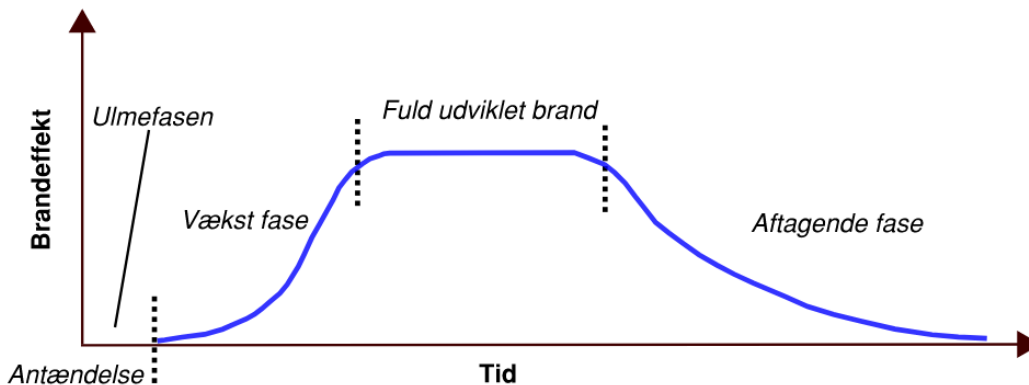
beskrevet under afsnit 8.3.5. Da personer uden særlig beskyttelse ikke kan overleve at opholde sig i et overtændt rum, vil det normalt ikke være relevant at undersøge brandforløbet længere end til det tidspunkt, hvor der sker overtænding.

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

### 8.3.2.5 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 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, at en stabil fase opstår, eller at der sker overtænding.

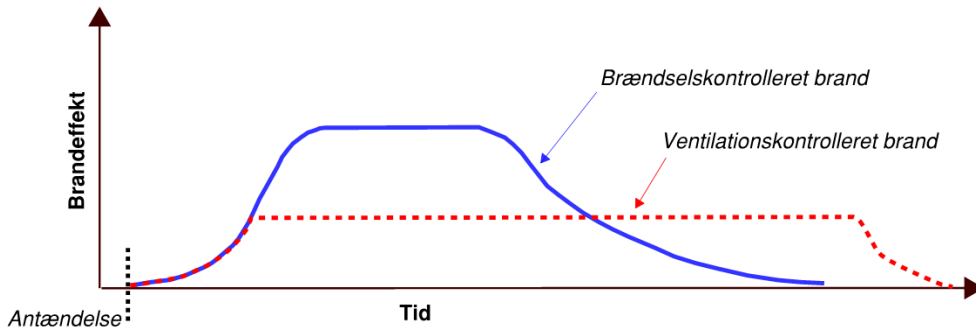
Den *fuldt udviklede brand* beskriver den fase, hvor brandens omfang stabiliseres pga. brændstoffets egenskaber og placering i rummet (brændstofkontrolleret brand), eller hvor brandens udvikling er begrænset af mulig ilttilførsel (ventilationskontrolleret brand).

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, sikrer at der ikke kan ske brandspredning til yderligere objekter, eller at balancen mellem til- og aftagende faser for enkeltobjekter er tilnærmelsesvis konstant.



Figur 6 - Illustration med sammenligning af et brændselskontrolleret- og et ventilationskontrolleret brandforløb.

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

Designbrande for eftervisning af personsikkerhed og til dimensionering af brandtekniske installationer af hensyn til personsikkerhed er beskrevet i afsnit 8.3.

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

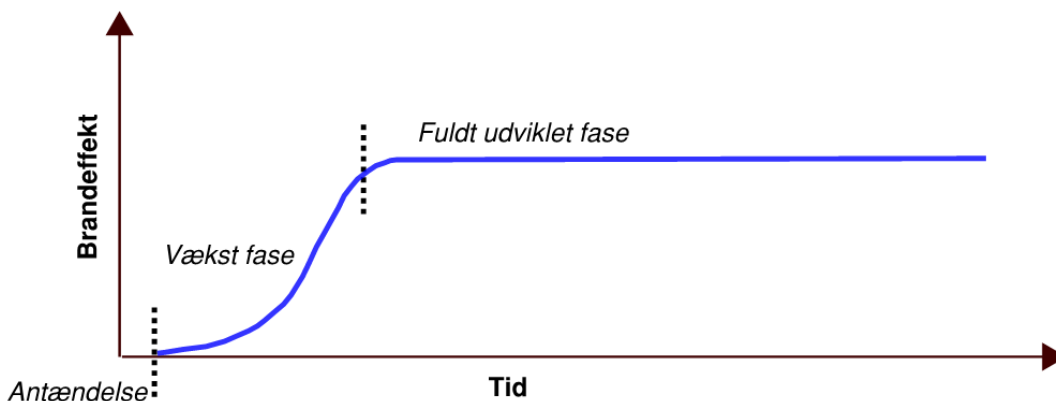
#### 8.3.2.6 Designbrande for eftervisning af personsikkerhed

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 stabiliseres ved den maksimale brandeffekt.



Figur 7 - Illustration af designbrand for eftervisning af personsikkerhed

### 8.3.2.7 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,  $\alpha$ , angiver, hvor hurtigt en designbrands brandeffekt øges. Formlen:

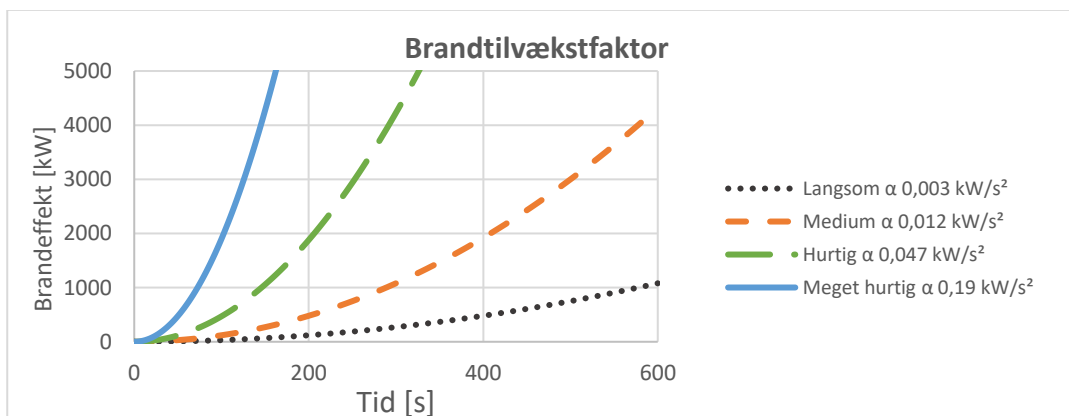
$$Q(t) = \alpha t^2$$

angiver brandeffekten  $Q(t)$  (kW) baseret på brandtilvækstfaktor  $\alpha$  (kW/s<sup>2</sup>) og tiden  $t$  (s).

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

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

Brandtilvækst	Tilvækstfaktor $\alpha$ (kW/s <sup>2</sup> )	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	154 s	326 s	461 s
Meget hurtig	0,190	73 s	162 s	229 s



**Figur 8 - Illustration af brandens tilvækst**

Der skal mindst anvendes den brandtilvækstfaktor angivet i Tabel 6, baseret på bygningens anvendelse.

Hvis det brændbare oplag afviger fra, hvad der normalt kan forventes af oplag i en bygning med en specifik anvendelsestype, skal brandtilvækstfaktoren fastsættes i forhold til det faktiske oplag.

Brandtilvækstfaktoren kan dermed skulle vælges højere, men kan ikke vælges mindre, end hvad Tabel 6 angiver.

**Tabel 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 butikscener	Meget hurtig
Fællesområder i butikscener	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

For at kunne fastsætte brandtilvækstfaktoren ud fra bygningsafsnittets konkrete oplag skal disse være veldefinerede. Begrænsninger skal beskrives i bygningens DKV-plan (Drifts-, kontrol- og vedligeholdelsesplan).

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

**Tabel 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 plastskum og stof	Medium
Kontormøbler	Medium
Bomuld/polyestermadræs	Medium
Stole af metal med brandhæmmende skumplast	Langsom

### 8.3.2.8 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 8.11.1.1.

Den maksimale brandeffekt bestemmes for den brændstofkontrollerede brand ud fra forbrændingshastigheden, den effektive forbrændingsvarme og det antændte areal. I appendiks 8.11.1.2 og 8.11.1 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 ses de maksimale brandeffekter, der mindst skal bruges som designbrande ved anvendelse af denne vejledning for eftervisning af personsikkerhed. Der er angivet værdi for grundscenarie samt et lavere værdi, som bruges ved svigt af AVS og ABV.

For svigtscenarie er brandeffekten sat til det halve af den brandeffekt, som er defineret for grundscenariet. Dette tager udgangspunkt i, at den maksimale brandeffekt, som bruges for grundscenarier, er et konservativt valg, og at det derfor ikke skal regnes med et svigt af AVS eller ABV samtidigt med den største brand. For at undgå at de brandtekniske anlæg dimensioneres for svigttilfældet, halveres den maksimale brandeffekt, så den repræsenterer en mere sandsynlig brand.

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

Anvendelse/områder	Maksimal brandeffekt	
	Grundscenarier	Svigtscenarier AVS eller ABV
Flytbar brandlast i områder med ingen eller lav brandbelastning	1 MW	1 MW <sup>1)</sup>
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 <sup>2)</sup>	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
Plejhjem	5,0 MW	2,5 MW
Hospital, sengerumsafsnit	5,0 MW	2,5 MW
Større sceneopbygninger og messecentre	25,0 MW	12,5 MW
1) Maksimal brandeffekt i dette grundscenarie halveres ikke i svigtscenarie. 2) Der er taget udgangspunkt i en maksimal brandeffekt baseret på brand i tre almindelige biler af gennemsnitlig størrelse, hvor der er parkering i et plan (ikke automatiske parkeringshuse). Denne antagelse er kun i gældende forhold til eftervisning af personsikkerhed.		

I Tabel 8 ses de brandeffekter, der mindst skal bruges som designbrande ved anvendelse af denne vejledning for eftervisning af personsikkerhed. Der er angivet værdi for grundscenarie samt en lavere værdi, som bruges ved svigt af AVS og ABV.

For svigtscenarie er brandeffekten sat til det halve af den brandeffekt, som er defineret for grundscenariet. Dette tager udgangspunkt i, at den maksimale brandeffekt, som bruges for grundscenarier, er et konservativt valg, og at det derfor ikke skal regnes med et svigt af AVS eller ABV samtidigt med den største brand. For at undgå at de brandtekniske anlæg dimensioneres for svigttilfældet, halveres den maksimale brandeffekt, så den repræsenterer en mere sandsynlig brand.

Tabel 8 er mindsteværdier. Der kan opstå tilfælde, hvor de ikke anses som konservative for det aktuelle byggeri, da der kan være store variationer i art og mængde af brændbart materiale inden for samme anvendelse. F.eks. vil en multihal ikke nødvendigvis være dækket af den maksimale brandeffekt for et almindeligt forsamlingslokale. I disse tilfælde skal der foretages en vurdering i forhold til det forventede oplag, sceneopstilling mm. Den maksimale brandeffekt kan dermed skulle vælges højere, men kan ikke vælges mindre, end hvad Tabel 8 angiver.

For lagerhaller mv. bruges den maksimale brandeffekt, ligeledes vurderet ud fra det reelle brændbare oplag.

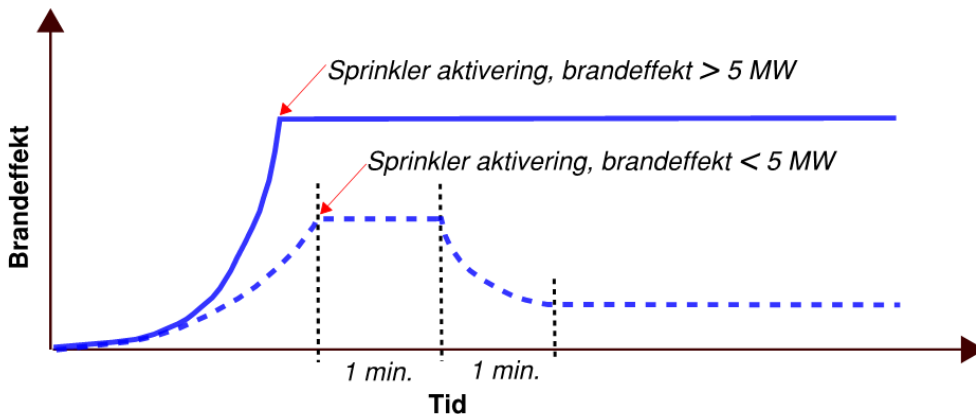
Brandtilvæksten kan påvirkes af automatisk sprinkleranlæg og automatisk vandtågesystem, som beskrevet nedenfor.

#### 8.3.2.9 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, indtil 1/3 af brandeffekten er opnået ved aktivering af sprinkleranlægget, hvorefter brandeffekten holdes konstant. Princippet vises med stiplede linje på Figur 9.

Er brandeffekten over 5 MW ved aktivering af sprinkleranlægget, antages brandeffekten at være konstant efter aktivering af sprinkleranlægget. Princippet vises med hel linje på Figur 9.



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

#### 8.3.2.10 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 termometektorer, 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 8.11.8 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. Der skal altid bruges den i projektet/funktionsbeskrivelsen, specificerede aktiveringstemperatur. En aktiveringstemperatur på 68 °C er typisk forekommende under normale forhold.

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 simple røgdetektorer er følsomheden ofte angivet som den optiske densitet målt i dB/m (=Obscura), ved hvilken detektoren aktiveres. En følsomhed på 0,3 dB/m vil ofte være relevant for sædvanlige punktdetektorer.

Til brug for håndberegninger, hvor røgdetektortypen ikke kendes, kan aktiveringstemperaturen beregnes, som om der var tale om en sprinkler med en aktiveringstemperatur på 33 grader og en RTI-værdi på 0,5 benyttes. Der henvises til afsnit 8.3.3 om håndberegninger.

For sprinkleranlæg, der kræver mere end et brandkendetegn, vil det være nødvendigt at vurdere eller beregne, hvornår de nødvendige brandkendetegn er tilstede. Dette kunne f.eks. være en atriumsprinkler, der skal aktiveres automatisk ved melding fra en linjerøgdetektor og en flammedetektor samtidigt.

#### 8.3.2.11 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 9.

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

Materiale	Sod-produktion g/g	Kalorimetriske brændværdi $\Delta H_c$ [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 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 10: Mindste værdier for produktion af sod og røggasser ved velventilerede brande**

Brandscenarie	Sod-produktion [g/g]	Kalorimetriske brændværdi $\Delta H_c$ [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 forenkledede 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 8.11.1 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 0.  
For linjerøgfaner kan massestrømmen bestemmes baseret på formlerne i appendiks 8.11.4.
- For at opretholde en konstant højde til røggaslaget kan den nødvendige kapacitet af brandventilation bestemmes baseret på metodikker og formler i appendiks 8.11.5 for hhv. termisk (naturlig) og mekanisk brandventilation.
- For mekanisk brandventilation kan den mindste afstand mellem udsugningspunkter bestemmes baseret på formlerne i appendiks 8.11.5.5.
- Ved røgfylldning af et rum uden åbninger, men med lækager, kan tiden til kritiske forhold bestemmes konservativt med formlen i appendiks 8.11.5.1.
- Den gennemsnitlige temperatur i røggaslaget kan bestemmes baseret på formlerne i appendiks 0 eller ved simpel energibevarelse.
- Sigtbarheden og den optiske densitet kan bestemmes baseret på formlerne i appendiks 0.
- Flammehøjder kan bestemmes baseret på formlerne i appendiks 0
- Varmestråling fra et røggaslag eller en varm flade mod et punkt kan bestemmes baseret på formlerne i appendiks 8.11.6.
- Aktiveringstiden for sprinklere og simple termodetektorer kan bestemmes baseret på formlerne i appendiks 8.11.8.

#### 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 f.eks. 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

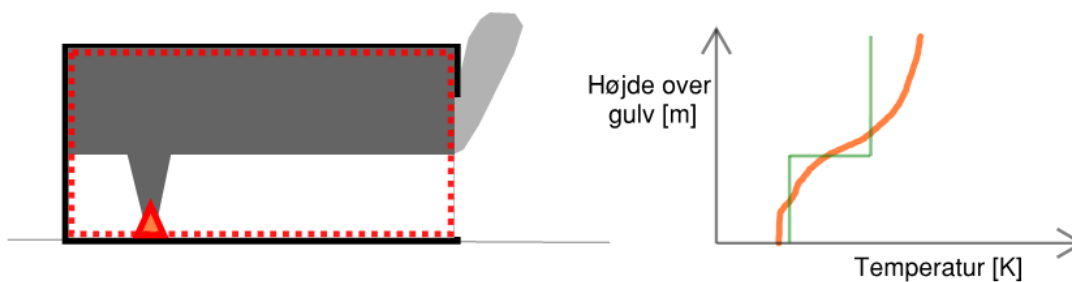
Dokumentation af analyser med håndberegninger skal som minimum altid omfatte en beskrivelse af:

- 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 10: Princip for 2-zonemodeller 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 røggfyldning ud fra en 1-zoneantagelse, hvor der ikke dannes et røggaslag, og røgen i stedet fordeles jævnt i hele rummets voluminen 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.

#### 8.3.4.2 Valg af beregningsmodel

Den anvendte 2-zonemodeller 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-zoneberegningerne, 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 [4].

Til vurdering af en 2-zonemodel med henblik på verifikation og validering af modellen henvises til DS/ISO/TR 16730-2 [5].

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

- Rummene skal fremstå med en simpel geometri.
- Etagearealet må højst være 2.000 m<sup>2</sup>.
- 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 8.3.2.4 **Fejl! Hensningskilde ikke fundet..**

#### 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 gyldige:

- 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 f.eks. 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 f.eks. 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 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 f.eks. 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 f.eks. ske for det stationære tilfælde ved en håndberegning af strålingsintensiteten mod gulv.
  - **Optisk densitet:** kan f.eks. ske ved hjælp af en håndberegning.
- Beregning af scenariet i et andet 2-zoneprogram og sammenligning af resultater.

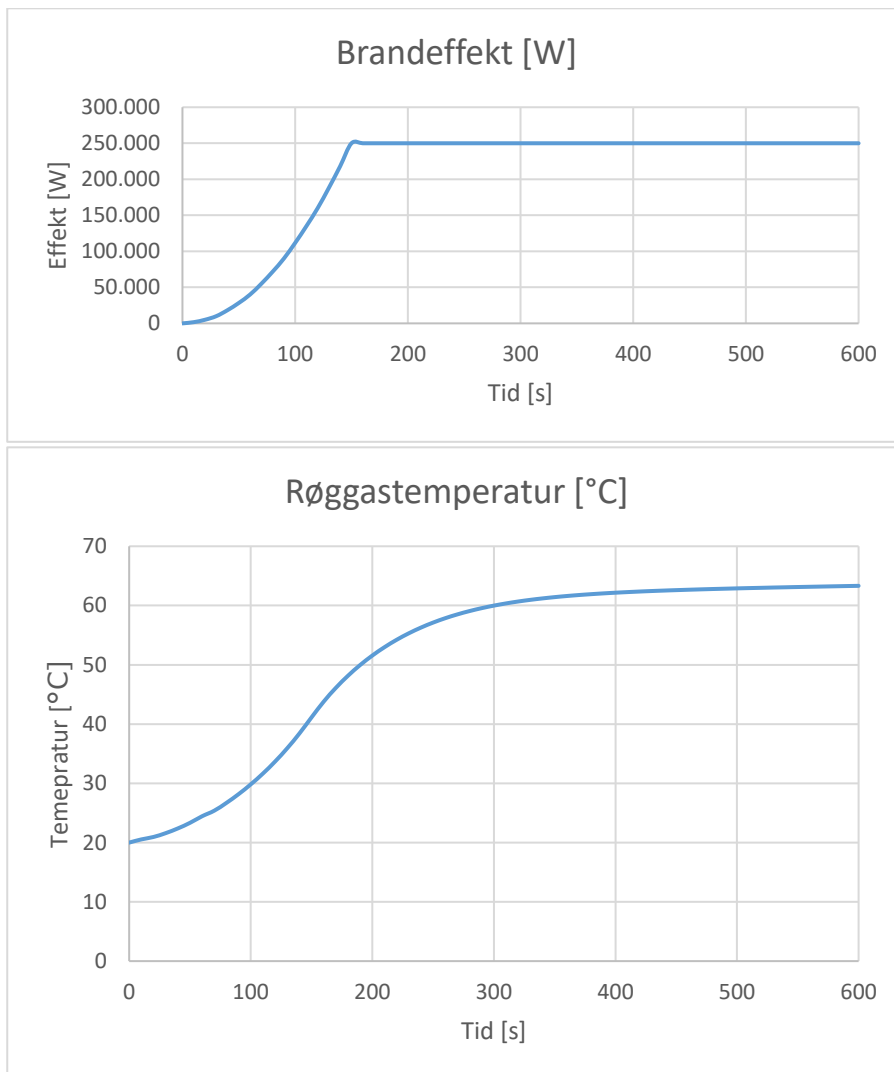
#### 8.3.4.7 Dokumentation af analyser med 2-zonemodeller

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 entydigt, f.eks. ved grafer som funktion af tiden, som det fremgår af Figur 12.



Figur 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.

Analyser 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.

#### 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 et CFD-program tages stilling til alle prædefinerede standardværdier, 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.

F.eks. kan undersiden af en trappe 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 f.eks. 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 undersøgelse af, om der opstår overtænding, 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.

#### 8.3.5.5 Strømningsnet

Strømningsnettet er inddelt i beregningsceller. Ofte 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.

Anvendes der strømningsnet med grænseflader parallelt på store hastighedsgradienter, skal der foretages en følsomhedsanalyse omkring indvirkning på tab af temperatur, tryktab, opdrift mm.

Tilsvarende skal der rettes særlig opmærksomhed mod CFD-programmets følsomhed over for beregningscellernes udformning. Benyttes f.eks. celler med stor variation ( $>2$ ) mellem X-Y-Z, kan der opstå "ufysiske" resultater. Som udgangspunkt skal der bruges ens sidelængder, medmindre beregningscellernes form er udformet, jf. anvisningerne i CFD-programmets 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 ad bygningens åbninger.

Brandventilationsåbninger behandles nedenfor.

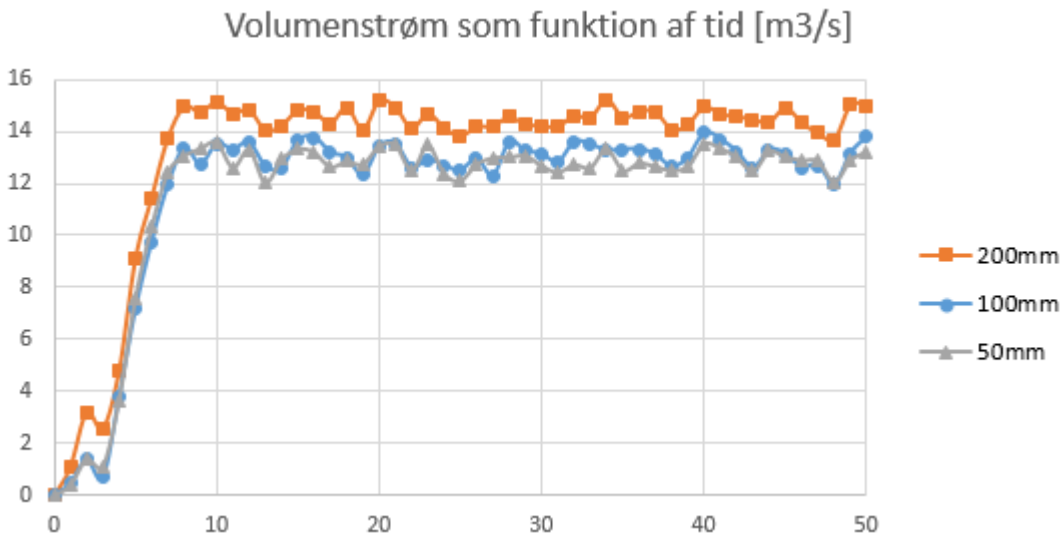
Selve finheden af beregningsnettet har afgørende betydning for resultaterne. Det skal her bemærkes, at forskellige CFD-programmer kræver forskellig finhed af nettet, afhængigt af den metode, som programmet benytter til bl.a. at modellere turbulensen i strømningen.

Beregningsnettets finhed er særligt væsentlig 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, strømningens nettet skal have.

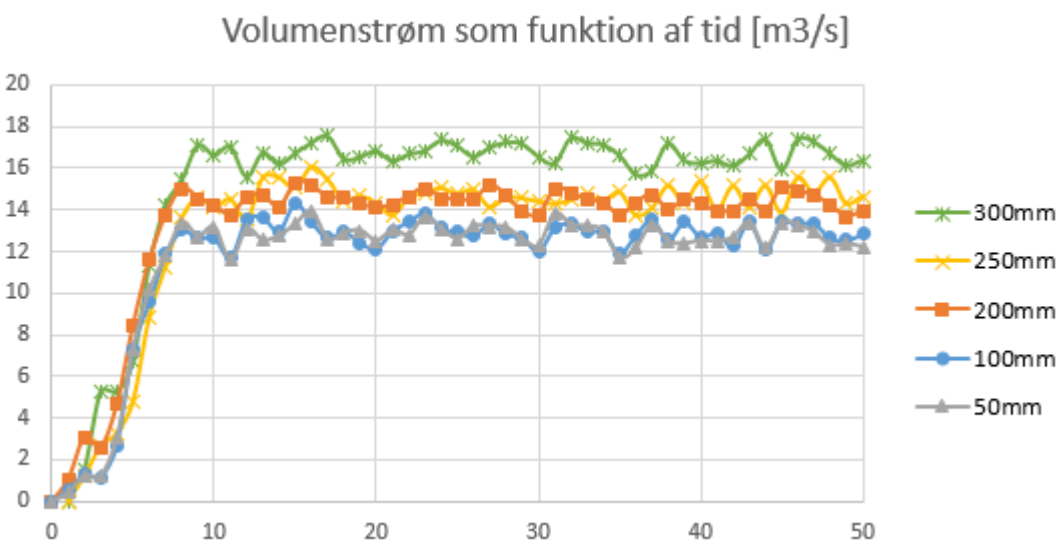
Som supplement til retningslinjerne i CFD programmets manual, til bestemmelse af strømningens nettet opløsning, kan der udføres en såkaldt netpunktsanalyse, hvor en parameter, som f.eks. temperatur eller hastighed i en retning, betragtes, mens cellernes størrelse varieres. Når resultaterne konvergerer 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 strømningens nettet:



Figur 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.

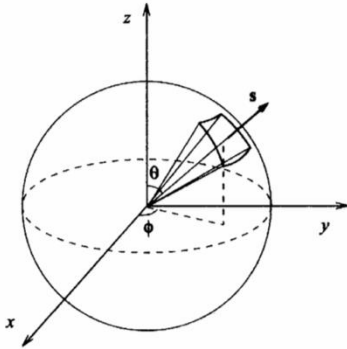


Figur 14: Eksempel på trinvis konvergens hvor resultaterne konvergerer parvist ved forøget finhed af beregningsnettet

### 8.3.5.6 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 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 inddeles 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 f.eks.:

- 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 netpunktsanalyse, hvor antallet af rumvinkler øges, til resultaterne konvergerer mod et resultat, som beskrevet ovenfor.

### 8.3.5.7 Modeltid

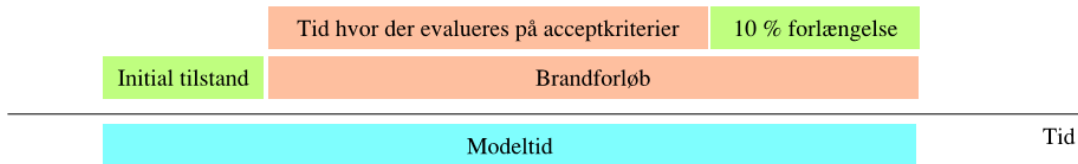
Modeltiden beskriver det tidsrum, som en CFD-beregning skal omfatte, hvilket ofte vil være længere, end tiden fra brandens opståen, indtil der f.eks. opstår stationære forhold.

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 16: Eksempel på fastlæggelse af modeltid for CFD-beregning

Tilsvarende skal modeltiden forlænges ud over 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, medmindre det oplagt ikke er nødvendigt, f.eks. fordi der tidligt opstår stationære forhold, eller det på anden vis dokumenteres ikke at være nødvendigt.

### 8.3.5.8 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.

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 strømningsnettes 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 [6].
- 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:

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

- Den afgivne effekt per arealenhed er mellem 800 kW/m<sup>2</sup> og 1000 kW/m<sup>2</sup> for almindeligt forkomne faste brændsler.

$D^*/dx$  bør mindst være 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.

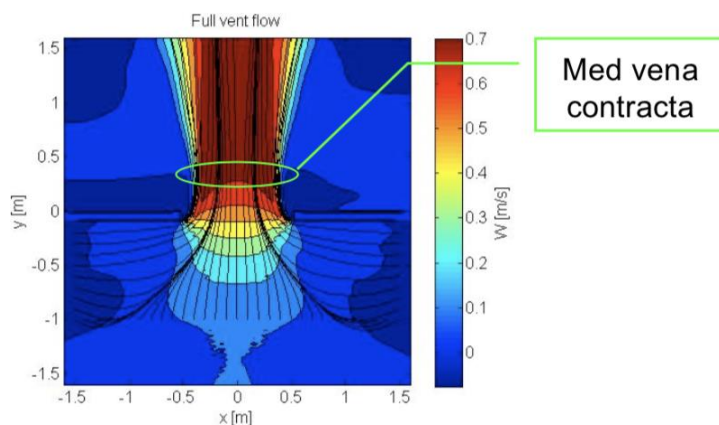
### 8.3.5.9 Brandventilationsåbninger

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 [7], er der beskrevet tre metoder til modellering af strømning igennem naturlige ventilationsåbninger, hvoraf kun **de to** kan anvendes efter denne vejledning. Den tredje metode kan ikke benyttes og behandles ikke yderligere, men er vedlagt informativt i appendiks 8.15.

### 8.3.5.10 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 [8]. Herved kan det nødvendige aerodynamiske areal findes på baggrund af det i CFD-modellen fastlagte geometriske areal.



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

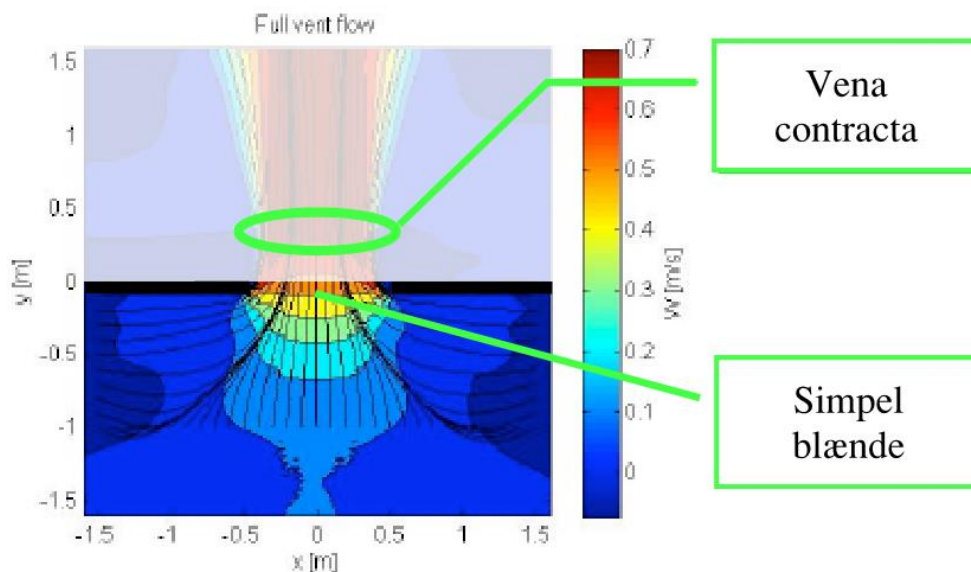
Ved anvendelse af denne metode skal der udføres en særskilt følsomhedsanalyse, som viser, at strømningen gennem åbningen er tilstrækkeligt opløst i og uden for åbningen.

Det fundne aerodynamiske areal kan anvendes til beskrivelse af komponenter, jf. DS/EN 12101-2 [9], 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 [9], 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.

#### 8.3.5.11 Simple 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 18: Simple modellering af strømning igennem blænde uden vena contracta. Figur tilpasset ud fra CFD Best Practice [7]

Især ved anvendelse af grove strømningsnet vil den modellerede åbning vise sig for effektiv. Der skal derfor beregnes en reducerende faktor  $C_{cfd}$  for at kompensere for dette.

Den reducerende faktor  $C_{cfd}$  kan uden anden dokumentation fastsættes til  $0,80$ , når:

- Åbningen er rektangulær og placeret vandret eller lodret.
- Røggastemperaturen er inden for intervallet  $20-450 \text{ }^\circ\text{C}$ .
- Røggaslaget under åbningen skal være ensartet.
- En vandret åbnings geometriske længde er inden for intervallet  $1,0-2,8 \text{ m}$ , og bredde er inden for intervallet  $1,0-2,0 \text{ m}$ .
- En lodret åbnings geometriske bredde og højde begge er inden for intervallet  $1,0-1,8 \text{ m}$ .
- Åbningen ikke er regnet for vindpåvirket.

Den reducerende faktor  $C_{cfd}$  kan også bestemmes efter metode som beskrevet i New Engineering Principles In Atrium Smoke Management [10].

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).

#### 8.3.5.12 Øvrige åbninger

Ved modellering af strømninger uden for 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 cellestørrelsen 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) og  $C_v = 0,60$  for en horisontal åbning (tag).

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.

#### 8.3.5.13 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.

#### 8.3.5.14 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.

#### 8.3.5.15 ABV

Hvis der skal foretages analyse af den termiske belastning fra røggasserne på f.eks. mekaniske ventilatorer, kan temperaturen måles midt i udsugningspunktet, når designbranden placeres mindst gunstigst i forhold til den brandtekniske komponent.

Benyttes udgange i flugtveje som tilluftsåbninger, skal det sikres, at der ikke optræder lufthastigheder, som kan forsinke evakueringen. Evakuering kan regnes for 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, som anlæggets komponenter gennemgår.

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



Tabel 11: eksempel på trinvis opstart af et 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

#### 8.3.5.16 Impulsventilatorer

Ved modellering af impulsventilatorer i f.eks. p-kældre skal det sikres, at den rette volumenstrøm og spredning vertikalt og horisontalt tilskrives. Dette indebærer bl.a., 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 strømningssynet.

#### 8.3.5.17 Sprinkling og vandtågeanlæg

Udløsning af sprinkler- og vandtågeanlæg vil medføre en ændring i strømningssynet 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 ud over at begrænse den maksimale brandeffekt som beskrevet i afsnit 8.3.2.8.

#### 8.3.5.18 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.

#### 8.3.5.19 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 middelværdier anvendes for at udjævne fluktuationer.

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

#### 8.3.5.20 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 brandeffektcurve følger designbrandens brandeffektcurve 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 flammentemperaturen og den dimensionsløse effektudvikling opfylder kravene i afsnit 8.3.5.8.
- 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.

#### 8.3.5.21 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.
- Butikcentre.
- 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 maksimal tid til naturligt flow.

### 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 tids-elementer, som er oplyst nedenfor:

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

Hvor:

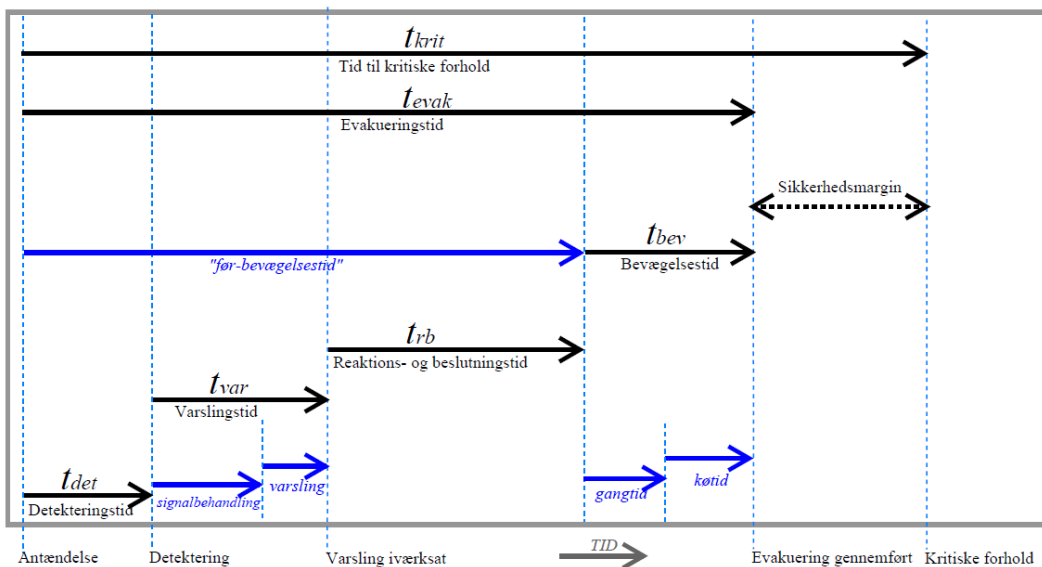
$t_{det}$  er tiden til detekteringstiden

$t_{var}$  er varslingstiden

$t_{rb}$  er reaktions- og beslutningstiden

$t_{bev}$  er bevægelsestid (som omfatter gangtid og køtid)

Hver af de fire delelementer for evakueringstiden fremgår af Figur 19 og er beskrevet i de følgende afsnit.

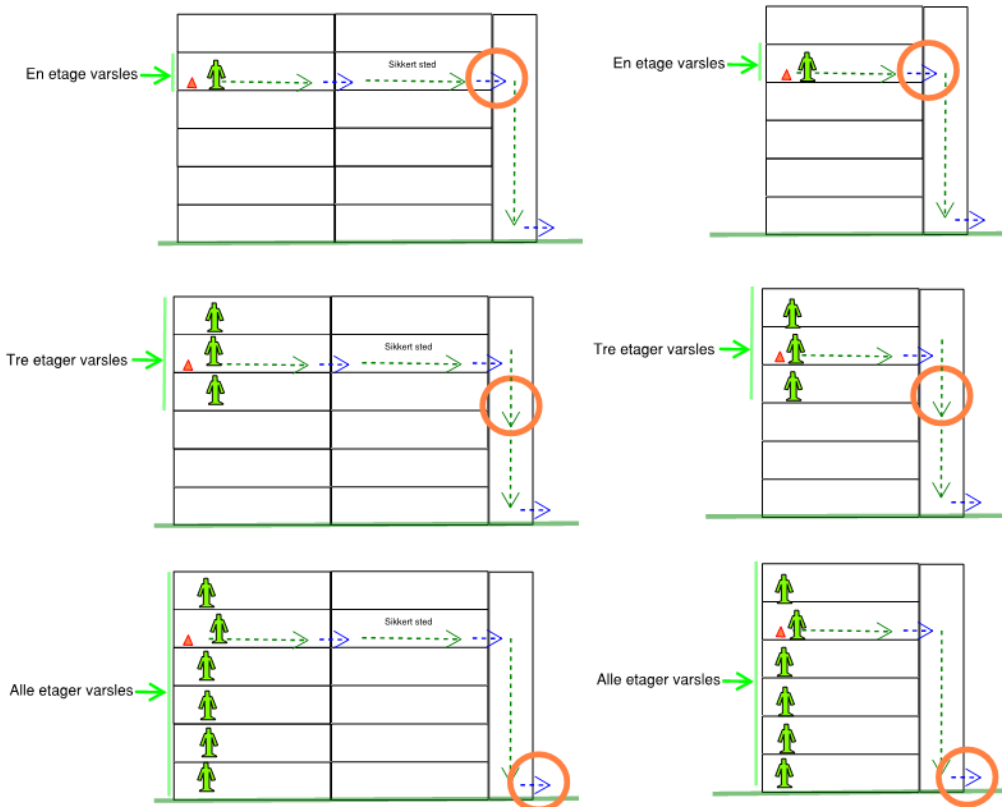


Figur 19: Evakueringstid og de enkelte tids-elementer for denne, samt tiden til kritiske forhold og sikkerhedsmargin.

### 8.3.6.2 Maksimal tid til naturligt flow (supplerende acceptkriterie)

Tid til naturligt flow er den tid, som pågår fra, at de selvhjulpne personer påbegynder evakuering, indtil de har passeret den sidste flaskehals, 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 et konkret flow på 1 pers/s, trappen har et konkret flow på 1,5 pers/s, og døren til terræn har et konkret flow på 2 pers/s. Afhængigt af varslingssceneriet, 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).



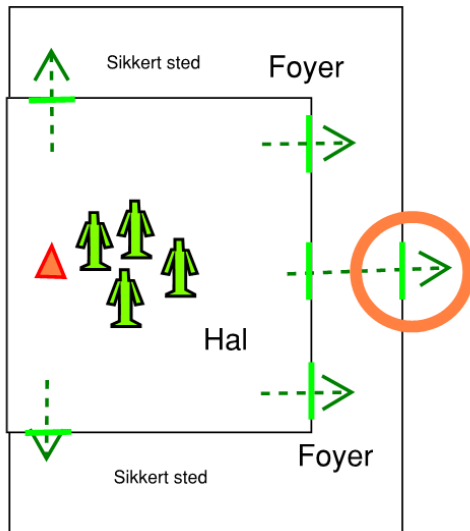
**Figur 20: Eksempel på sidste flaskehals i kontorbygning ved forskellige varslingsscenarier for kontorbygning med evakuering via sikkert sted og direkte til flugtvejstrappe.**

Den maksimale tid til naturligt flow omfatter mindst bevælgelsestiden til sikkert sted, men vil typisk 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.

Naturligt flow betyder ikke, at personer kan bevæge sig frit, altså at ganghastigheden nødvendigvis er personens foretrukne. Når et naturligt flow er opnået, 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 til, at den sidste person i hallen passerer flaskehalsen (orange cirkel) i facadedøren.



Figur 21: Eksempel på sidste flaskehals hal med flugtvej via fælles foyer. Eksemplet er alene illustrativt og opfylder ikke krav om tilstrækkelige uafhængige flugtveje.

### 8.3.7 Begrænsninger ved evakueringsberegninger

#### 8.3.7.1 *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.

#### 8.3.7.2 *Modsattede flows*

Håndberegninger i dette afsnit tager ikke højde for modsattede flows og kan ikke anvendes til beregning af disse efter denne vejledning. Der henvises til f.eks. CIBSE Guide: D [11], som angiver, at der er behov for dobbelt så meget plads til modsattede flows som for ensrettede flows.

#### 8.3.7.3 *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 [12].

### 8.3.8 Evakueringsscenarier

Evakueringsscenarierne skal tage udgangspunkt i bygningsafsnittets eller bygningens brug og brandstrategien for bygningen. Der skal udvælges repræsentative evakueringsscenarier, som afspejler den brug, som bygningen er tiltænkt, og evakueringsscenarierne skal inkludere de brandscenarier og

svigtsscenarier 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 evakuerings-scenarier som afspejler begge situationer. F.eks. kan et kontorhus i flere etager med fælles kantine, kræve eftervisning af evakuerings-scenarier for fuld personbelastning på kontoretagerne, fuld personbelastning i kantine 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 personer 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. Hvis automatisk zonevarsling ikke anvendes, 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 evakuerings-scenarie for totalevakuering, hvor hele bygningen evakueres samtidig.

### 8.3.8.1 Personbelastning

Personbelastningen skal afspejle det sandsynlige maksimale antal personer, som samtidigt opholder sig i det eller de bygningsafsnit, der er omfattet af evakuerings-simuleringen. 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 NFPA 101 – Life Safety Code Handbook [13], ved fastsættelsen af personbelastningen i de enkelte rum.

**Tabel 12: Personbelastning til design af forskellige bygningsafsnit ud fra deres funktion. Arealet henviser til rummets nettoareal, hvor ikke andet er angivet.**

Område	m <sup>2</sup> /pers	Pers/m <sup>2</sup>
Forsamlingslokaler:		
Høj densitet uden faste sæder	0,65	1,54
Lavere densitet uden faste sæder	1,4	0,71
Bænke	1 pers/50cm	
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 <sup>2</sup> vandoverflade)	4,6	0,22
Træningslokaler med træningsmaskiner	4,6	0,22
Træningslokaler uden træningsmaskiner	1,4	0,71
Scener	1,4	0,71
Kasinoer 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

#### 8.3.8.2 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. Døre der anvendes dagligt og 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 på disse tiltag er:

- Personale, der kan anvise flugtveje.
- Regelmæssig afholdelse af evakueringsøvelser.
- Flugtvejsskilte.
- 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.

#### 8.3.8.3 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.

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

#### 8.3.8.4 Detekteringstiden

Detekteringstiden defineres som tiden fra antændelse til, at branden detekteres. Detekteringstiden vil som udgangspunkt findes ud fra CFD-modeller, 2-zonemodeller eller håndberegninger, og der henvises til afsnit 8.3.5.13 og 8.11.8 for nærmere beskrivelse. Hvis der foretages signalbehandling, f.eks. i detektorer, medregnes denne i detekteringstiden. Der bruges sædvanligvis 60 sekunders intern signalbehandlingstid.

Hvis beregningen forudsætter andet, skal dette tydeliggøres i brandstrategien og andre evt. relevante dokumenter for ABA-installatøren.

Ovenstående detekteringstid forudsætter, at der i byggeriet er et automatisk varslingsanlæg, der igangsætter varslings-signalet.

Hvis der ikke er et automatisk varslingsanlæg, vil detekteringstiden være den tid, der går fra branden starter, indtil 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.

#### 8.3.8.5 *Varslingstiden*

Varslingstiden defineres som tiden fra, at en brand er detekteret, til varslingen er iværksat eller påbegyndt.

Normalt vil varsling ske på følgende tre måder:

- Automatisk varslingsanlæg, hvor varslings-signalet aktiveres via detektorer.
- Manuelt varslingsanlæg, hvor personer i byggeriet skal aktivere et varslingsstryk for at aktivere varslings-signalet (dette kapitel kan ikke anvendes til at bestemme varslingstiden for dette anlæg).
- Intet varslingsanlæg, hvor varsling skal ske ved anrÅb eller andre lignende metoder (dette kapitel kan ikke anvendes til at bestemme varslingstiden for denne situation).

#### 8.3.8.6 *Automatisk varslingsanlæg*

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

Afspilning af varslings-signalet er ligeledes en del af varslingstiden. For tonevarsling, som opfattes umiddelbart, kan bidraget fra denne regnes som 5 sekunder. For talevarsling svarer bidraget til første gennemspilning på hovedsproget, som maksimalt bør være 20 sekunder.

#### 8.3.8.7 *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.

(Dette kapitel kan ikke anvendes til at bestemme varslingstiden ved brug af dette anlæg).

#### 8.3.8.8 *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, får beskeden. (Dette kapitel kan ikke anvendes til at bestemme varslingstiden for denne situation).

#### 8.3.8.9 *Reaktions- og beslutningstid*

Reaktions- og beslutningstiden defineres som tiden, hvor personer skal fortolke og forstå varslings-signalet, 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 de 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 tempo, 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 [14], som refererer forsøg i brandmæssigt veldrevne bygninger, der viser en forskel mellem 1 % og 99 % på 20-50 sekunder for fem forskellige dagopholdsbygninger.

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

**Tabel 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
Hospitaler, 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 sek. samtidig med, at varslingstiden reduceres til 0 sek. (se afsnit 8.3.8.12).

#### 8.3.8.10 *Forberedelsesniveau og personale (informativt)*

Reaktions- og beslutningstiden afhænger i høj grad af, hvor forberedte og vidende personer 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 [12], 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 'store udendørs musikarrangementer og lign.' [16].

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

#### 8.3.8.11 *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 talemæssige meddelelser 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 talemæssige meddelelser.

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.

#### 8.3.8.12 *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 for utrykning ved brand' [17].

Reaktions- og beslutningstiden kan sættes til 60 sekunder [17] og varslingstiden til 0 sekunder, når følgende forudsætninger 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 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 [18].

#### 8.3.8.13 *Bevægelsestid*

Bevægelsestiden er defineret som tiden fra, at personer er begyndt at bevæge sig, til de er i sikkerhed. Bevægelsestiden 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.

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

#### 8.3.8.14 *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.

#### 8.3.9 *Håndberegninger*

Håndberegninger er en simplificeret tilgang til at estimere bevægelsestiden i en evakueringsituation. Bevægelsestiden,  $t_{bev}$ , beregnes som summen af gangtid,  $t_g$ , og køtid,  $t_{kø}$ , ud fra nedenstående formel:

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

Hvor:

$l$  er ganglængden [m]

$v$  er ganghastigheden [m/s]

$n$  er antal personer [pers]

$f_k$  er det konkrete flow [pers/s].

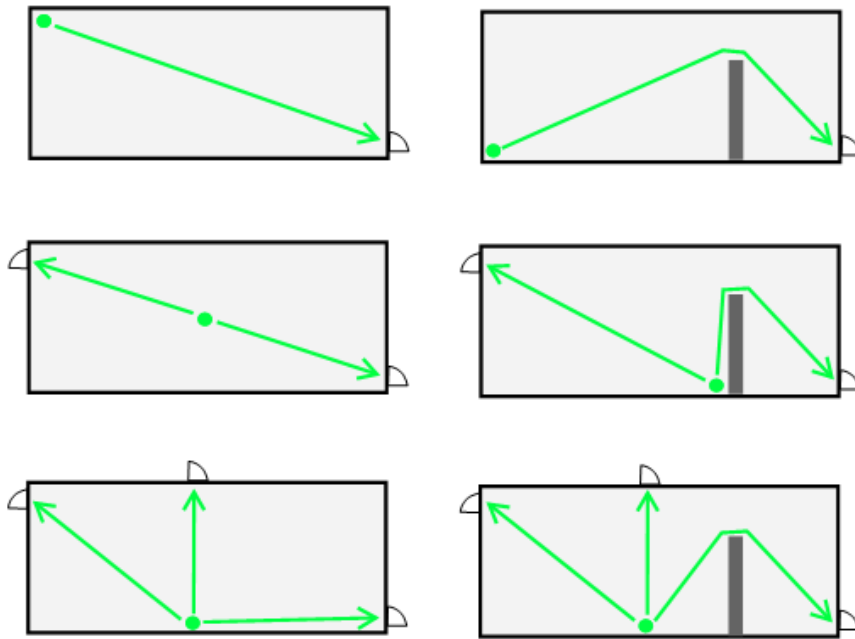
I bygningsafsnit med relativt mange personer vil gangtiden ofte være mindre end køtiden. Idet der dannes kø, kan der principielt ses bort fra gangtiden, men dette må ikke medtages til eftervisning efter denne vejledning. Der henvises til, at gangtiden i stedet medtages i den endelige vurdering af sikkerhedsmarginens størrelse, som er beskrevet i 8.3.11.1.

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

Ved håndberegninger kan reaktions- og beslutningstiden estimeres som tiden til, at 1 % af personerne har reageret og besluttet sig for at igangsætte en evakuering.

##### 8.3.9.1 *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 22: Længste afstand under hensyn til inventar og indretning

### 8.3.9.2 Ganghastighed

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

Ved brug af håndberegninger og for persondensiteter mindre end  $0,54 \text{ pers/m}^2$  ( $1,85 \text{ m}^2/\text{pers}$ ) kan følgende værdier bruges for ganghastigheder. Disse værdier bygger på anbefalingerne i Insta TS 950 [15] og PD 7974-6:2019 [14].

Tabel 14: Ganghastigheder på vandrette flader ved densiteter mindre end  $0,54 \text{ pers/m}^2$

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  $0,54 \text{ pers/m}^2$  er ganghastigheden,  $v$  givet ved:

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

Hvor:

$D$  er persondensiteten [ $\text{pers/m}^2$ ]

$a = 0,266 \text{ m}^2/\text{pers}$  [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/m<sup>2</sup> 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/m<sup>2</sup> for simple beregningsscenarier.

### 8.3.9.3 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 personer vil opholde sig på i evakueringssituationen.

### 8.3.9.4 Antal personer

Personantallet er fastlagt som en del af evakueringsscenarierne, se afsnit 8.3.8 og Tabel 12.

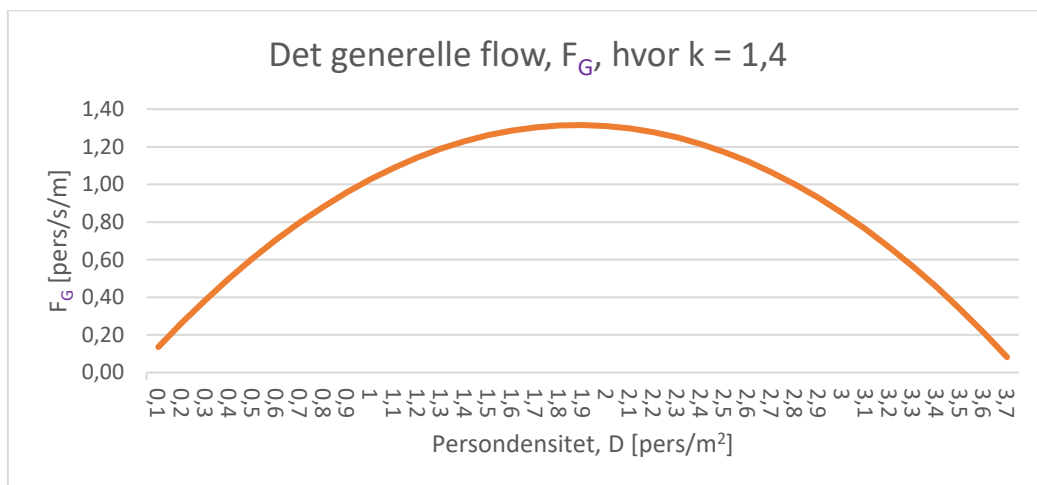
### 8.3.9.5 Flow

Ved håndberegninger 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:

$$F_G = vD = (1 - aD)kD$$

Kurven for det generelle flow, som funktion af persondensiteten, er parabelformet og har et maksimum ved en densitet på 1,9 pers/m<sup>2</sup>.



Tabel 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/m<sup>2</sup> kan flowet fastsættes som det maksimale design flow for flaskehalse tilsvarende 8.3.10.3, 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.

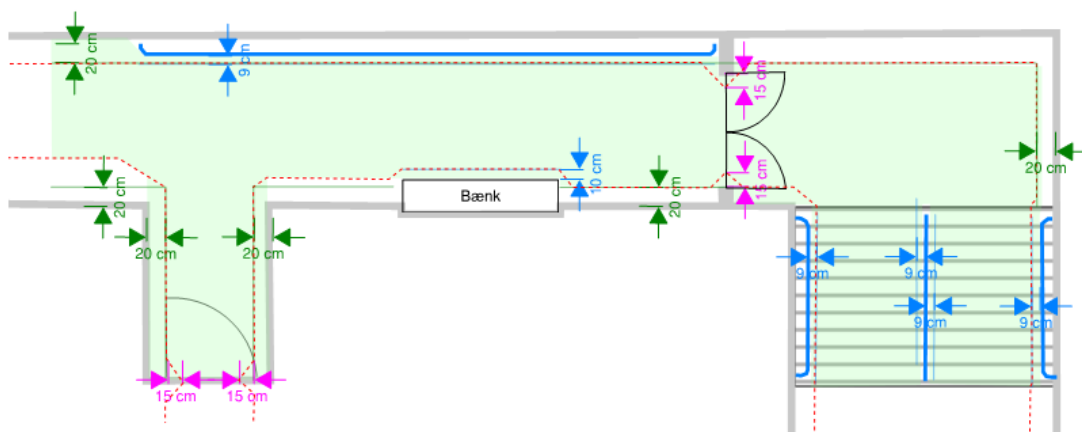
$$F_K = F_G B_e = (1 - aD)kD \cdot B_e$$

Den effektive bredde er givet som en reduceret geometrisk fri bredde af flugtvejen, som følger 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 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 buegange a	15

<sup>a</sup> I rum med håndlister bruges den værdi, der giver den mindste effektive bredde.



**Figur 23** Eksempel på fastsættelse af effektiv bredde (rød stiple) i flugtvejssystem med vægge (med og uden håndlister), forhindringer og døre og trapper.

Grænselagens størrelse er baseret på SFPE håndbogen [19] og skal medregnes i begge sider af flaskehalsen

#### 8.3.9.6 Personers fordeling på udgange

Fordeling af personer i forhold til udgange skal følge beskrivelsen i afsnit 8.3.8.2.

### 8.3.10 Evakueringssimuleringer

Bevægelsestiden kan bestemmes ud fra computersimuleringer, hvor personers (benævnes agenter) 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 bygningsafschnittets 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* [20] eller *optimal steps model* (OSM) [21]. 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 evakueringsscenario. Analysen af evakueringsscenarioet kan herefter baseres på den simulering, der har en bevægelsestid tættest på medianen af de gennemførte simuleringer for evakueringsscenarioet. Spredningen for evakueringsscenarioerne skal inddrages i vurderingen af sikkerhedsmarginen, som beskrives i afsnit 8.3.11.1.

#### 8.3.10.1 Inputparameter til simuleringer

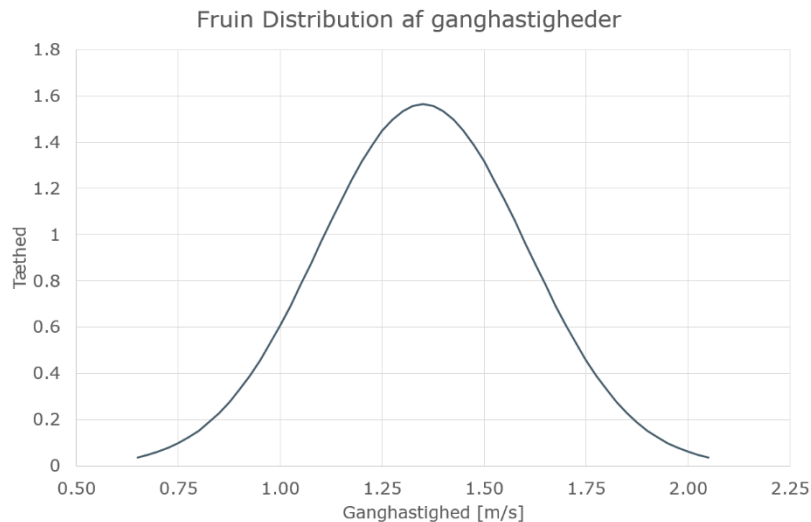
Evakueringssimuleringer udført med computersoftware afhænger af de input, som skal gives i programmet. Ved opbygning af modellen for simulering af bevægelsestiden ved evakuering, skal der som minimum tages stilling til følgende inputparametre:

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

### 8.3.10.2 Ganghastighed

Til fastsættelse af de maksimale ganghastigheder kan Tabel 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 [22] som input for ganghastigheder til evakueringssimuleringer. '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 24.



Figur 24: Fordelingen af ganghastigheder i 'Fruin distribution' [19].

### 8.3.10.3 Maksimale design flows

Nedenstående maksimale design flows for flaskehalse i Tabel 17, som f.eks. døre, indsnævring, trapper og lignende, skal benyttes ved evakueringssimuleringer. PD 7974-6:2019 [14].

Tabel 17: Maksimale design flows for evakueringssimuleringer.

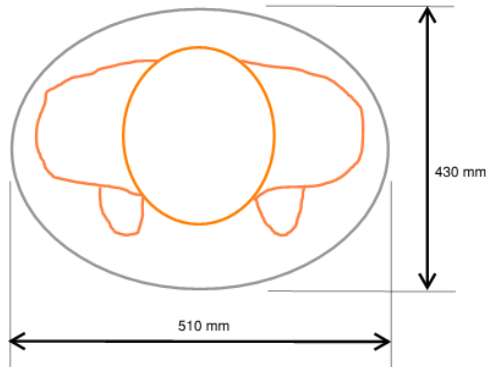
Flaskehalselement	Maksimalt design flow [pers/s/m]
Døre, indsnævring i gange, buegange og lignende.	1,30
Trapper Grund/stigning: 280/180mm	1,00
Trapper Forhold mellem grund (G) og stigning (S).	$0,86 \sqrt{\frac{G}{S}}$

### 8.3.10.4 Maksimale persondensiteter

De maksimale persondensiteter [pers/m<sup>2</sup>] 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 modsvare 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 [11]. Dette er vist i Figur 25.



Figur 25: 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/m<sup>2</sup> baseret på ovenstående ellipse.

#### 8.3.10.5 Fordeling af personer i forhold til udgange

Fordeling af personer i forhold til udgange skal følge beskrivelsen i afsnit 8.3.7.3.

#### 8.3.10.6 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.

#### 8.3.10.7 Validering af analyse og resultater

Der skal foretages validering af analysen i form af aflæsning af outputdata fra simuleringssprogrammet, 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.

#### 8.3.11 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 bevægelsestid.
  - Spredning på resultater for gangtid.
  - Samlet evakueringstid for hvert evakueringsscenarium og svigtscenarium
  - Tid til evakuering til evt. sikkert område.
  - At acceptkriteriet for tiden til naturligt flow ikke overskrides.
  - Tid til total evakuering.
- Konklusion.

#### 8.3.11.1 *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 evakueringsscenarier, 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, at 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 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 certificerede statikers virke. Der henvises til bygningsreglementets kapitel 15 – Konstruktioner.

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

Dette kan f.eks. være i tilfælde, hvor en brandrådgiver efterviser, at en adskillende bygningsdel beskytter en bærende bygningsdel. Dette arbejde vil være 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 [23].

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/flamme- 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 at have en tilstrækkelig isoleringsevne i et tidsrum, vil kravene til integritet E ligeledes være opfyldt, såfremt montering af bygningsdelen følger de montageanvisninger beskrevet i henhold til:

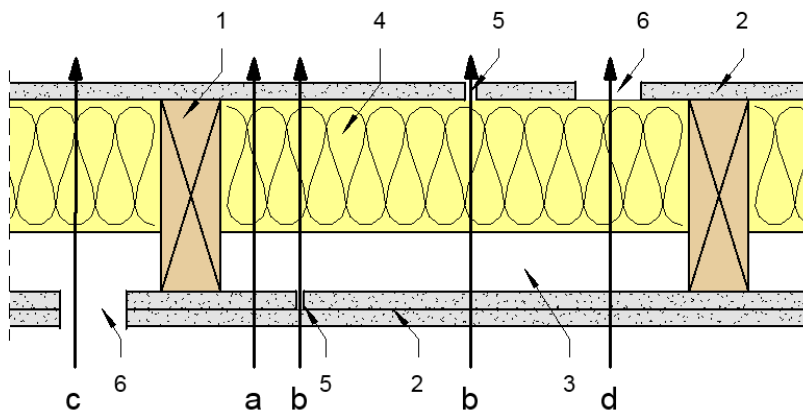
- Eurocode 5 del 1-2 [24] *eller*
- Alment teknisk fælleseje *eller*
- En leverandørs dokumentation på de enkelte dele i den sammensatte bygningsdel [25].

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

Acceptkriterierne for isolering, I, af bygningsdel er følgende:

- 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.
- En temperaturstigning på maksimalt 180 K på den ueksponerede side, herunder ved samlinger, f.eks. stødsamlinger af plademateriale, fuger, installationshuller mm.

Figur 26 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 26 - Illustration af varmeovergangsveje i en lagopbygget bygningsdel

- |                         |  |
|-------------------------|--|
| a) Generel konstruktion | 1) Træskelet                                       |
| b) Fuge/stødsamling     | 2) Beklædning                                      |
| c) Installationshul     | 3) Hulrum  |
| d) Installationshul     | 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, såsom beton, porebeton og mursten ofte kunne ske som et tabelopslag og simple beregningsmetoder. Som eksempel for mursten hhv. Anneks B og C i DS/EN 1996-1-2 [25] og for beton kapitel 5 og Anneks B i DS/EN 1992-1-2 [26].

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 [24].

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.

#### 8.4.1.5 Eurocode metode

Eftervisning af lagopbyggede bygningsdele (sammensat af flere materialer) kan ske iht. Eurocode 5 del 1-2 [24] eller dennes videreudvikling. Videreudviklingen er beskrevet i Fire safety in timber buildings, Technical guideline for Europe [27], Brandsäkra trähus [28] og TRÆ 71 [29]. 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 tilstrækkelige dimensioner til, at de sikrer fastholdelse i ikke-forkullet træ.

Der henvises til appendiks 8.13, for eksempel på beregning af en lagopbygget, adskillende bygningsdel efter Eurocode metoden.

#### 8.4.1.6 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 netpunktanalyser, 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.

#### 8.4.1.7 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 8.13 for eksempel på eftervisning/beregning af lagopbygget adskillende bygningsdel med Eurocode metoden, hvor den samlede bygningsdels materiale klasse bestemmes.

#### 8.4.1.8 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 også nødvendigt 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. 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) eller kun fra den ene side, samt om beregningen er foretaget for begge sider.

## 8.5 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 et præ-accepteret referencebyggeri og eftervise, at sikkerhedsniveauet i analysebyggeriet mindst modsvarer sikkerhedsniveauet i referencebygningen. Eftervisningen baseres ofte på etablering af kompenserende tiltag, f.eks. 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. Krav til fastlæggelse af referencebyggeriet er beskrevet nærmere i afsnit 8.5.7.1.

### 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 BR18, § 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, 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.

#### 8.5.3 Evakuering og redning af personer

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

#### 8.5.4 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.

#### 8.5.5 Antændelse og brand- og røgspredning

##### 8.5.5.1 Materialer og overflader

Materialer og overflader omfatter de præ-accepterede løsninger, som relateres til byggematerialer, indvendige- og udvendige overflader. Dette gælder f.eks. 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.

##### 8.5.5.2 Brandsektioner

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

##### 8.5.5.3 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.

##### 8.5.5.4 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 lign.

##### 8.5.5.5 Brandsikring af tekniske installationer

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



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.

#### 8.5.6 Redningsberedskabets indsatsforhold

Disse præ-accepterede løsninger omhandler indsatsforholdende for redningsberedskabet. Dette kan f.eks. 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.

#### 8.5.7 Procedure for komparativ analyse

En komparativ analyse består af en række delanalyser og -vurderinger, og den grundlæggende struktur er illustreret på Figur 27.

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 et egnet referencebyggeri (som overordnet set ligner analysebyggeriet) og analysere afvigelse.

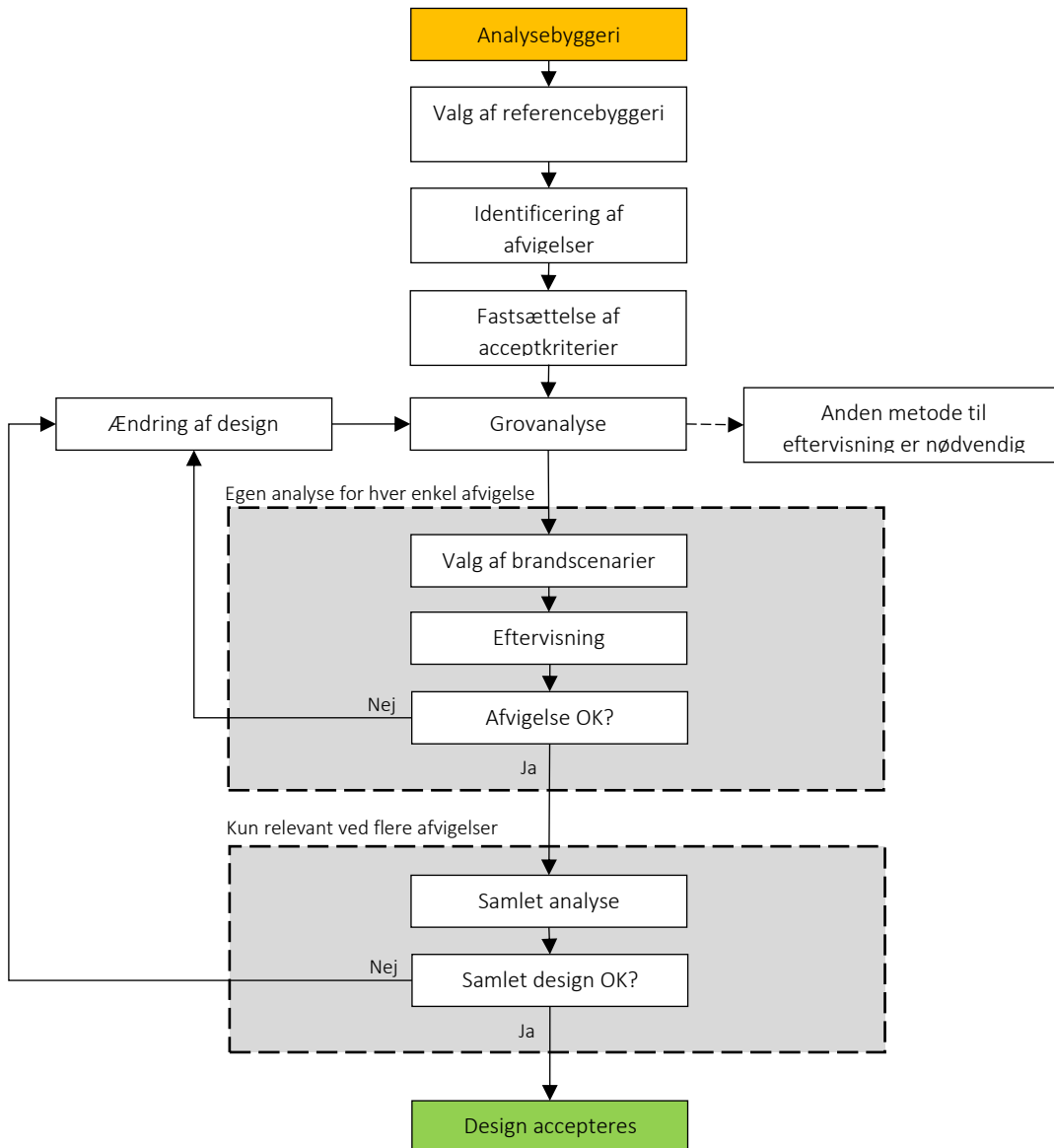
Efterfølgende foretages en indledende grovanalyse, som ser samlet på alle afvigelser i analysebyggeriet for at klarlægge, om den komparative analyseform er anvendelig. Hvis det konkluderes, at en komparativ analyse ikke er anvendelig, må der vælges en anden metode til eftervisning. Dernæst skal groanalysen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

Efter groanalysen ses der på hver enkelt afvigelse i analysebyggeriet. Der foretages en eftervisning, som kan være kvalitativ eller kvantitativ afhængig af konklusionen af groanalysen. 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 groanalyse.

Hvis analysebyggeriet kun har en enkelt afvigelse, er den komparative analyse færdig, efter afvigelsen er eftervist. Hvis der derimod er flere afvigelser, skal afvigelse 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 groanalysen. Hvis den samlede analyse derimod viser, at der ikke er gensidige negative påvirkninger imellem afvigelse, 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 27: Arbejdsprocessen i en komparativ analyse fra en analysebyggeriet over verificering til accept af afvigelser.

### 8.5.7.1 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 f.eks. 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 f.eks. et præ-accepteret hotelbyggeri med et boligbyggeri.

Et eksempel på, at en komparativ analyse kan anvendes, er en sammenligning af et analysebyggeri med en brandsektion på 12.000 m<sup>2</sup> med et referencebyggeri på 12.000 m<sup>2</sup>. Referencebyggeriet er opdelt i to brandsektioner på f.eks. hver 6.000 m<sup>2</sup>. Der kan ikke benyttes et referencebyggeri med en brandsektion på 12.000 m<sup>2</sup>, da den øvre grænse for de præ-accepterede løsninger er brandsektioner på 10.000 m<sup>2</sup>.

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, f.eks. 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 **Fejl! Henvisningskilde ikke fundet.** for eksempler på fastsættelse af referencebyggerier.

#### 8.5.7.2 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 lige så sikkert 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 anvendes til 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 f.eks. 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.

#### 8.5.7.3 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 detaljeringniveau analysen skal gennemføres. Dette gøres gennem en fareidentifikation og en analyse af ændringen i beskyttelsesniveauet.

#### 8.5.7.4 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 f.eks. 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, f.eks. i svigttilfælde – dette skal dog uanset hvad 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. F.eks. 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 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 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 brandmodstandsevne	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	Hvid	Orange	Hvid	Hvid	Hvid	Hvid	Grøn
2. Bærende konstruktioners brandmodstandsevne		Orange	Rød	Hvid	Grøn	Hvid	Grøn	Hvid	Orange
3a. Materialer og overflader		Orange	Hvid	Rød	Hvid	Grøn	Orange	Hvid	Grøn
3b. Brandsektioner		Hvid	Hvid	Hvid	Rød	Grøn	Hvid	Hvid	Orange
3c. Brandceller		Orange	Hvid	Hvid	Grøn	Rød	Hvid	Hvid	Orange
3d. Brandspredning til andre bygninger		Hvid	Grøn	Hvid	Grøn	Hvid	Rød	Hvid	Grøn
3e. Brandsikring af tekniske installationer		Grøn	Hvid	Hvid	Grøn	Grøn	Hvid	Rød	Grøn
4. Redningsberedskabets indsatsmuligheder		Grøn	Grøn	Hvid	Grøn	Grøn	Grøn	Hvid	Rød

Dokumentationen og omfanget af fareidentifikationen kan skaleres i forhold til afvigelsernes antal, størrelse og omfang. Tabel 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.

#### 8.5.7.5 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 19. I analyser med mange afvigelser kan tabellen deles i to, så der laves særskilte tabeller for afvigelser og kompenserende tiltag.

**Tabel 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 8.14 for eksempler på udfyldte skemaer.

#### 8.5.7.6 *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 8.14.4. 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 8.14.1.

Der henvises generelt til appendiks 8.14 for eksempler på argumenter for henholdsvis kvalitativ og kvantitativ verificering.

#### 8.5.7.7 *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.

- 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 f.eks. 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 evakueringsscenarier. Dette kan gøres med udgangspunkt i afsnit 8.3.8. Som for brandscenarierne kan det dog i nogen tilfælde være relevant at se bredere på scenarierne, når der udføres en komparativ analyse. F.eks. kan der være andre forhold for personbelastning i en butik i og uden for 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 evakueringsscenarier skal der også laves vurderinger af svigt. Hvis der kompenseres med sammenkoblede brandsikringsanlæg, skal der gennemføres en systemsvigtsanalyse som beskrevet i afsnit 8.3.2.3.

#### 8.5.7.8 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 afvigelsesernes art og omfang.

I eftervisningen skal det, med den valgte metode, eftervises, at sikkerhedsniveauet i analysebyggeriet er mindst lige så godt som sikkerhedsniveauet 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 over for 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 lign. Det kan f.eks. være, at 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 lign. I dette eksempel kunne der kvalitativt argumenteres for, at tiltagene henholdsvis sænker den nødvendige evakueringsstid, så niveauet for personsikkerheden er tilfredsstillet. 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 evakueringsstiden for bygningen. Det kan f.eks. være en kvantitativ eftervisning af, at sikkerhedsmarginen (tiden mellem endt evakuering og kritisk røgfylgning 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 bl.a. redningsberedskabets indsatsforhold dog også vurderes.

Eksempler på eftervisning af forskellige afvigelser er givet i appendiks 8.14.

#### 8.5.7.9 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 også fastslå, om de enkelte afvigelser påvirker hinanden negativt. 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.

#### 8.5.8 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. F.eks. 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 Brandprøvning (informativt)

Brandprøvninger vil kunne opdeles i 5 forskellige kategorier:

- a) Brandprøvning omfatter prøvninger foretaget i iht. en prøvningsstandard (f.eks. en EN-prøvningsstandard, der er standardiseret af CEN efter mandat fra EU-kommissionen) og udføres af et laboratorium akkrediteret til at gennemføre den konkrete brandprøvning. Formålet med brandprøvningen er at opnå en konkret klassifikation af en byggevare. Brandprøvning foregår dermed iht. en konkret prøvningsstandard samt tekniske krav jf. DS/EN ISO/IEC 17025:2017 - Generelle krav til prøvnings- og kalibreringslaboratoriernes kompetence.
- b) Orienterende brandprøvning foretages med udgangspunkt i en prøvningsstandard af et laboratorium akkrediteret til at gennemføre den konkrete brandprøvning, hvor der kan være enkelte afvigelser fra standarden. Afvigelsen kan f.eks. skyldes, at der ikke foreligger en harmoniseret prøvningsstandard, der er egnet til den konkrete byggevare, eller at der udføres forkortet konditionering af prøvelegeme eller reduceret prøvning (f.eks. færre antal prøvelegemer end foreskrevet i standarden). Afvigelsen beskrives, og der redegøres for, hvorledes metoden er egnet til formålet. Den orienterende brandprøvning fører ikke til klassifikation af byggevaren. Den orienterende brandprøvning foretages i øvrigt som for en brandprøvning, herunder også inden for



rammerne af de tekniske krav i DS/EN ISO/IEC 17025:2017 - Generelle krav til prøvnings- og kalibreringslaboratoriers kompetence.

- c) Orienterende brandprøvning omfatter prøvninger foretaget med udgangspunkt i en prøvningsstandard, som beskrevet i "b", men hvor brandprøvningen udføres af en brandrådgiver, og hvor dette nødvendigvis ikke er inden for rammerne af de tekniske krav i DS/EN ISO/IEC 17025:2017.
- d) Forsøg, der omfatter eksperimentel afprøvning af brandforhold, der ikke er omfattet af punkt a, b og c.
- e) Forsøg, der omfatter eksperimentel undersøgelse af evakueringsforhold som f.eks. utraditionelle flugtveje, optimering af flugtveje eller evakuering af persontyper.

Anvendes brandprøvninger i kategori a og b, vil disse kunne anvendes som dokumentationsform for en bygning i alle brandklasser.

Anvendes brandprøvninger i kategori c, d og e, medfører dokumentationsformen i form af en orienterende brandprøvning, at bygningen skal henføres til brandklasse 4.

Dette afsnit omhandler brandprøvninger i kategori c, d og e.

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

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 dokumenterer muligheden for evakuering eller redning f.eks. i form af inputdata 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.

#### 8.6.1.1 *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.

#### 8.6.1.2 *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.

#### 8.6.1.3 *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 fra 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.

#### 8.6.1.4 *Afskillende bygningsdele*

For adskillende bygningsdele skal der mindst anvendes en brandpåvirkning svarende til ISO 834 standardbrandkurven [30], så resultaterne er sammenlignelige med klassificerede bygningsdele og præ-accepterede 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 bygningsdelens 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 inden for et fastsat tidsrum.

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

#### 8.6.1.5 *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 det 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.

#### 8.6.1.6 *Ad hoc-prøvninger*

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 for så 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-brandprøvninger:

- 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 [31].

#### 8.6.1.7 *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 billeddokumentation 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.
- Forsøgsopstillingens fysiske rammer svarer til den løsning, der ønskes eftervist for projektet.
- Der ved flere forsøgsgennemløb tages hensyn til træningseffekten i resultatbehandlingen. Træningseffekt er bl.a., 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 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.

Ud over 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 præ-accepteret løsning, og hvor der anvendes brandteknisk dimensionering som grundlag for sammenligningen. Brandteknisk dimensionering er beskrevet i afsnit 8.3. 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 præ-accepterede løsninger. Den komparative analyse skal, når den kombineres med brandtekniske beregninger som beskrevet under afsnit 8.3, baseres på både scenarier med og uden svigt og på følsomhedsanalyser. Dette uanset at de præ-accepterede 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 bevægelsestiden (gang- og køtid) sammenlignes for evakueringsberegninger af hhv. en præ-accepteret 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 præ-accepteret løsning.

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

- [1] Fonden Dansk Standard, DS/INSTA 951:2018 Fire Safety Engineering - Probabilistic Methods for Verifying Fire Safety Design in Buildings, Fonden Dansk Standard, 2018.
- [2] 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.
- [3] Fonden Dansk Standard, DS/EN 1991-1-2; Eurocode 1: Last på bærende konstruktioner - Del 1-2: Genrelle laster - Brandlast, Fonden Dansk Standard, 2007.
- [4] SFPE, Handbook of Fire Protection Engineering Fifth edition, 2015.
- [5] 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.
- [6] S. Bengtson, Brandskyddshandboken : en handbok för projektering av brandskydd i byggnader, Lund : Lunds Tekniska Högskola, 2005.
- [7] Best Practice gruppen, CFD Best Practice, Best Practice gruppen, 2009.
- [8] Emmons, Emmons, Emmons, 1997.
- [9] Fonden Dansk Standard, DS/EN 12101-2:2017 - Brandventilation – Del 2: Naturlige røg- og varmeudsugningsventilatorer, Fonden Dansk Standard, 2017.
- [10] Niras A/S, New Engineering Principles in Atrium Smoke Management, Niras A/S, 2007.
- [11] The Chartered Institution of Building Services Engineers, Transportation systems in Buildings - CIBSE Guide D: 2015, 5th ed., Norwich Great Britain: Page Bros Ltd., 2015.
- [12] Trafik-, Bygge- og Boligstyrelsen, Bygningsreglement 2018, København: Trafik-, Bygge- og Boligstyrelsen, 2018.
- [13] NFPA, NFPA 101 – Life Safety Code Handbook.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] Justitsministeriet og Kulturministeriet, "Vejledning om sikkerhed ved udendørs musikarrangementer o.lign.," Justitsministeriet og Kulturministeriet, København, 2010.
- [17] H. Frantzich, Tid för utrymning vid brand, Lund: Department of Fire Safety Engineering, Lund University, 2001.

- [18] N. B. Nordiska kommittén för byggbestämmelser, Funktionsbestemte brandkrav og teknisk vejledning for beregningsmæssig eftervisning, NKB Utskotts- och arbetsrapporter, 1994.
- [19] Society of Fire Protection Engineers, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Fourth Edition ed., SFPE, 2008.
- [20] D. Helbing and P. Molnár, "Social Force Model for pedestrian dynamics," *Physical review e*, vol. 51, nr 5, p. 4282–4286, 1995.
- [21] 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.
- [22] Fruin JJ, Pedestrian Planning and Design, 1971.
- [23] Fonden Dansk Standard, DS/EN 1363-2 Prøvning af brandmodstandsevne. Del 2, Fonden Dansk Standard.
- [24] Erhvervs- og Byggestyrelsen, EN 1995-1-2 DK NA:2007 Eurocode 5: Trækonstruktioner – Del 1-2: Generelt – Brandteknisk dimensionering, Erhvervs- og Byggestyrelsen, 2007.
- [25] Fonden Dansk Standard, DS/EN 1996-1-2:2007 Eurocode 6: Murværkskonstruktioner - Del 1-2: Generelle regler - Brandteknisk dimensionering, Fonden Dansk Standard, 2007.
- [26] Fonden Dansk Standard, DS/EN 1992-1-2 + AC:2013 Eurocode 2: Betonkonstruktioner - Del 1-2: Generelle regler - Brandteknisk dimensionering, Fonden Dansk Standard, 2013.
- [27] SP Trätekt, Fire safety in timber buildings - Technical guideline for Europe, SP Trätekt, 2010:19.
- [28] SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut, Brandsäkra trähus 3. udgave 2012, SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut, 2012.
- [29] Træinformation, TRÆ 71 - Brandsikre bygningsdele 1. udgave 2015, Træinformation, 2015.
- [30] 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.
- [31] 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.
- [32] J. Q. Bjorn Karlsson, Enclosure Fire Dynamics, Environmental & Energy Engineering, 1999.
- [33] J. M. J. Klote, Design of Smoke Management Systems, ASHRAE Special Publications, 1992.
- [34] NFPA, NFPA 92B - Standard for Smoke Management Systems in Malls, Atria, and, NFPA, 2005.
- [35] D. Drysdale, An introduction to Fire Dynamics, Department of Fire Safety Engineering, 1986.

- [36] P. & c. DiNunno, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering 3rd., Society of Fire Protection Engineers, National Fire Protection Association, 2002.
- [37] 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.
- [38] Rasbash, D.J, Phillips, R.P, Quantification of smoke produced at fires. Test methods for smoke and methods of expressing smoke evolution, 1978.
- [39] R. L. Alpert, Fire Technology, Factory Mutual Research Corporation, 1972.
- [40] Fonden Dansk Standard, EN 1995-1-2 DK NA:2007 Eurocode 5 - Trækonstruktioner - Del 1-2: Generelt - Brandteknisk dimensionering, Fonden Dansk Standard, 2007.
- [41] Trafik-, Bygge- og Boligstyrelsen, Bilag 5 til bygningsreglementets vejledning til kap. 5 - Brand- Præ-accepterede løsninger - Kontorbygninger, Trafik-, Bygge- og Boligstyrelsen.
- [42] Trafik-, Bygge- og Boligstyrelsen, Bilag til bygningsreglementets kap. 5 - Kap. 4 Antændelse og brand- og røgspredning, Trafik-, Bygge- og Boligstyrelsen, 2019.
- [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] Trafik-, Bygge- og Boligstyrelsen, Vejledning til Bygningsreglementets kapitel 5 - Brand, Trafik-, Bygge- og Boligstyrelsen, 2019.
- [50] Fonden Dansk Standard, DS/CEN/TR 12101-5 Brandventilation - Del 5: Retningslinjer vedrørende funktionelle henstillinger og beregningsmetoder for brandventilationssystemer, Fonden Dansk Standard, 2005.



## 8.9 Appendiks

### 8.10 Kontrol af eftervisning

Ved eftervisning af brandsikkerhed efter dette kapitel skal det kontrolleres, at de beskrevne forudsætninger er iagttaget for hver af de afsnit/eftervisningsmetoder, som anvendes.

Kontrollen vil ofte være opdelt under hensyntagen til de anvendte metoder, så der f.eks. findes separat kontrol dokumentation for komparative analyser og brandteknisk dimensionering og herunder evakueringsanalyser samt analyser af brand- og røgspredning m.v.

Alle forhold i de relevante afsnit skal kontrolleres iht. projektets kontrolniveau.

Der bør i kontrollen være særligt opmærksomhed på, om der i eftervisningen anvendes brandtekniske anlæg som kompenserende tiltag, der udløser systemsvigtsanalyse.

Kontrollen planlægges i en kontrolplan for brandteknisk dimensionering. Kontrollen dokumenteres i kontrolrapporten for brandteknisk dimensionering.

### 8.11 Håndberegninger

Nedenfor beskrives en række håndberegninger, som kan anvendes til eftervisning, jf. dette kapitel. Der angives også en række materialeparametre, som kan afvige fra beskrivelserne i afsnit 8.3.2 og derfor ikke kan anvendes til ugunst uden, at byggeriet henføres til brandklasse 4.

#### 8.11.1 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.

##### 8.11.1.1 Ventilationskontrolleret brand

Den maksimale effektudvikling ved en ventilationskontrolleret brand kan beregnes ud fra de åbninger i brandrummet, som ilten 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 [m<sup>2</sup>]

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

I brandrum med flere ventilationsåbninger med forskellig højde, er  $H_{\text{åbning}}$  den gennemsnitlige højde vægтет 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.

#### 8.11.1.2 Brændstofkontrolleret brand

Den maksimale effektudvikling ved en brændstofkontrolleret brand kan bestemmes ud fra forbrændingshastigheden og den effektive forbrændingsvarme. 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]

$\Delta H_c$  Den kalorimetrisk brændværdi [kJ/g]

$\dot{m}''$  Forbrændingshastighed pr. arealenhed [g/m<sup>2</sup>s]

$A_{tot}$  Arealet af antændte horisontale flader [m<sup>2</sup>]

$\chi$  Forbrændingseffektivitet sat til 1,0 for designbrände [-]

**Tabel 20: Materialeparametre for forskellige materialer**

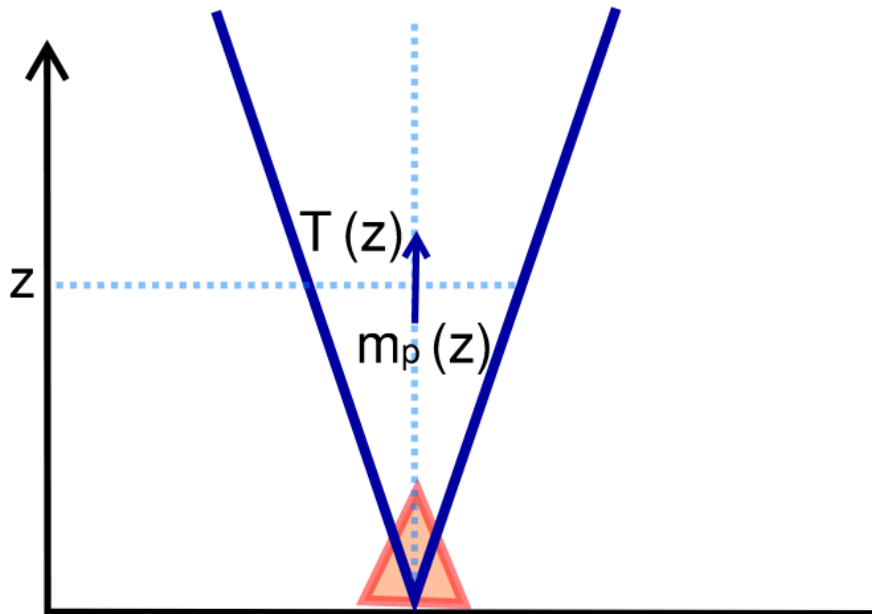
Materiale	$\dot{m}''$ [g/m <sup>2</sup> s]	$\Delta H_c$ [kJ/g]
Benzin	55	44
Træ	13	19
Polystyren (fast)	35	39
Ethanol	15	27

#### 8.11.2 Aksesymmetriske røgfanemodeller

En opdriftsdrevet røgfaner (plume) dannes som resultat af flammerne over det brændende brændstof. Den aksesymmetriske røgfaner 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.

### 8.11.2.1 Zukoski røgfanen

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



Figur 28: Zukoskis røgfaner

### 8.11.2.2 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 være 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:

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

Hvor:

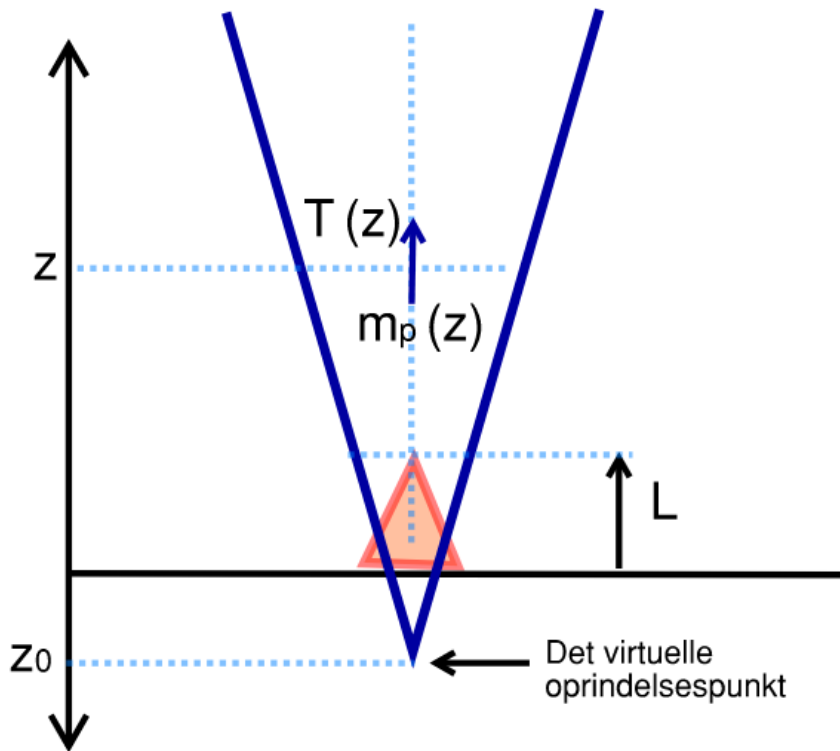
$\dot{Q}$  Brandeffekten [kW]

$z$  Højden over branden [m]

### 8.11.2.3 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 29: Heskestads røgfaner.

Brandeffekt,  $\dot{Q}$ , 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] og 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:

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

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:

$T_\infty$  Temperaturen på den omgivende luft = 293 [K]

$\rho_\infty$  Densitet på den omgivende luft = 1,2 [kg/m<sup>3</sup>]

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

$g$  Tyngdeaccelerationen = 9,82 [m/s<sup>2</sup>]

$\dot{Q}$  Brandeffekten [kW]

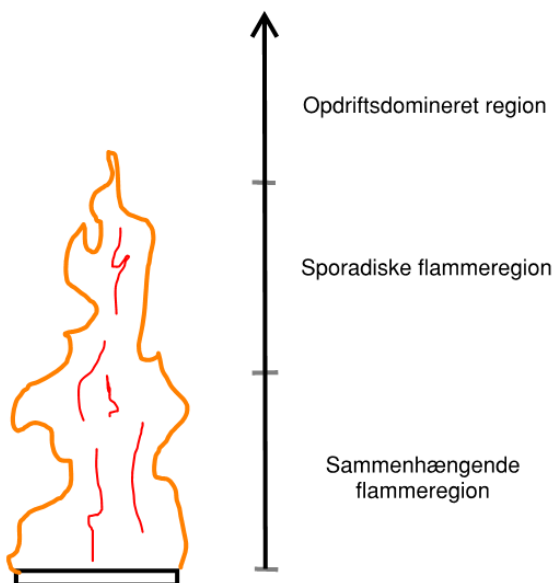
$\dot{Q}_c$  Den konvektive brandeffekt [kW]

$z$  Højden over branden [m]

$D$  Omregning af brandkildens areal i kvadratmeter  $x$  [m<sup>2</sup>] til ækvivalent diameter.  $D = \sqrt{\frac{4 \cdot x}{\pi}}$  [m]

#### 8.11.2.4 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 30: Regioner i McCaffrey røgfane.

### 8.11.2.5 Modelbegrænsninger

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

### 8.11.2.6 Modelanvendelse

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

$$u(z) = \kappa \left( \frac{z}{Q_t^{1/5}} \right)^\eta$$

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

$$T(z) = T_\infty \left( 1 + \left( \frac{\kappa}{0,9\sqrt{2g}} \right)^2 \left( \frac{z}{Q_t^{1/5}} \right)^{2\eta-1} \right)$$

Hvor:

$\dot{Q}$  Brandeffekten [kW]

$T_\infty$  Temperaturen på den omgivende luft = 293 [K]

$g$  Tyngdeaccelerationen = 9,81 [m/s<sup>2</sup>]

Idet nedenstående konstanter benyttes for de tre flammeniveauer:

Tabel 21: Konstanter i McCaffreys røgfane

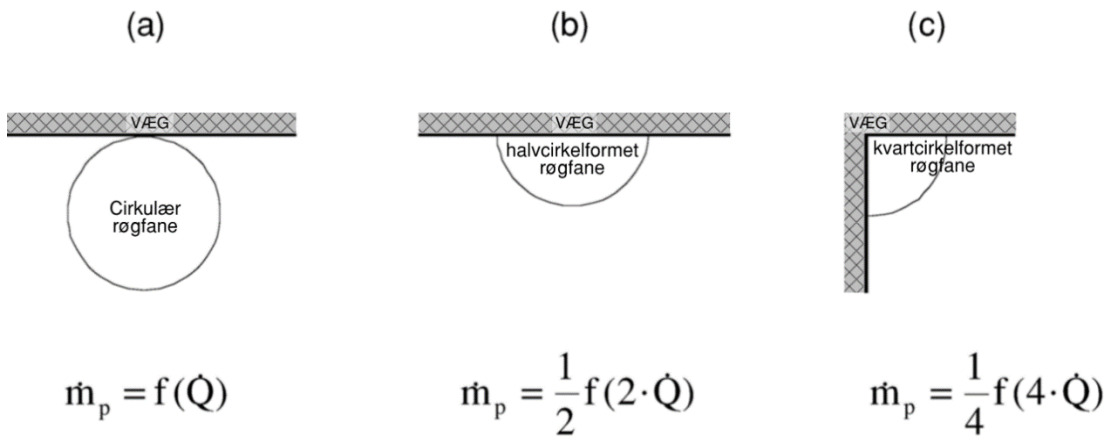
Flammerne i røgfanen	$\frac{z}{Q_t^{1/5}}$	$\eta$	$\kappa$
Sammenhængende	< 0,08	1/2	6,8
Sporadiske	0,08 – 0,2	0	1,9
Opdriftsdominerede	> 0,2	-1/3	1,1

### 8.11.3 Ikke aksesymmetriske røgfaner

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

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

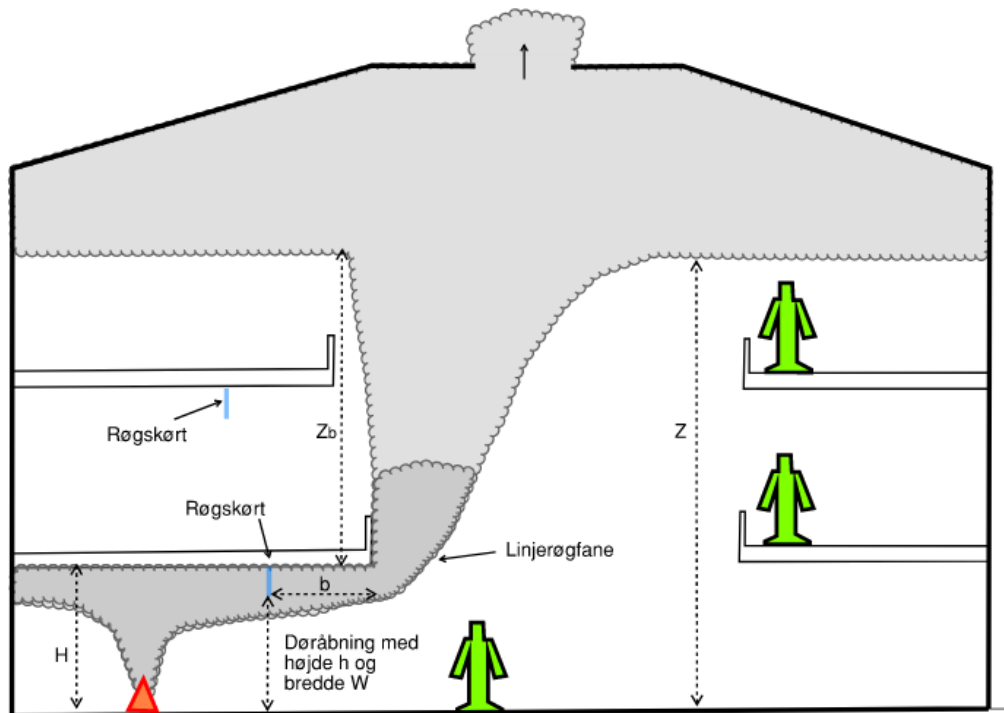
For brande placeret i et hjørne kan massestrømmen findes som halvdelen af den beregnede massestrøm, baseret på den dobbelte brandeffekt.



Figur 31: Brandkilder nær vægge og hjørner.

#### 8.11.4 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 32: Linjerøgfane der viser røgspredning i et atrie

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

$$W = w + b$$

Hvor:

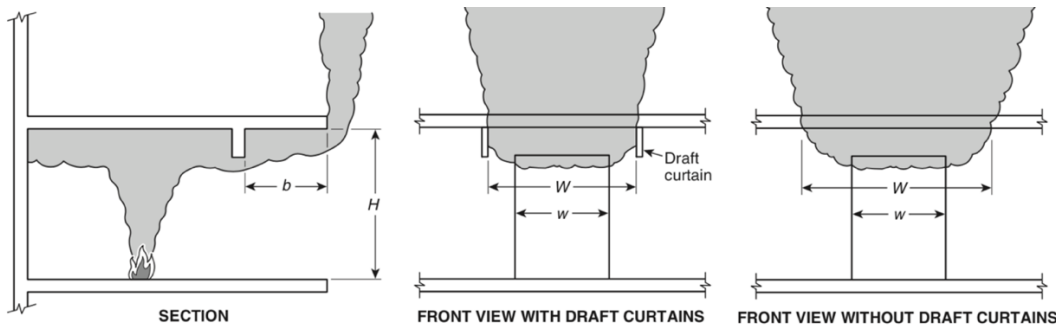
$W$  Bredden af linjerøgfanen [m]

$w$  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 33: Illustration af en linjerøgfane

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:

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

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 konvekktive 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 $^\circ\text{C}$ )]

$T_p$  Den gennemsnitlige røggastemperatur ved højden  $z$  [ $^\circ\text{C}$ ]



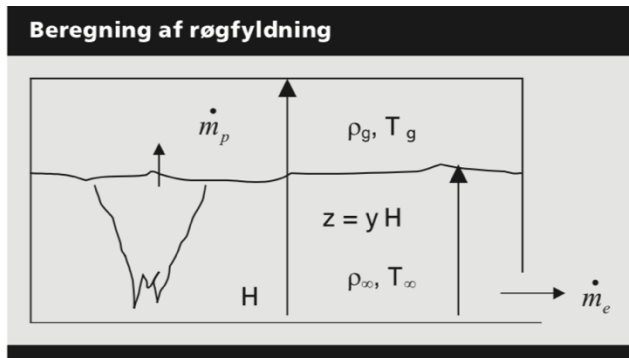
$T_{\infty}$  Temperaturen på den omgivende luft = 20 [°C]

### 8.11.5 Røgfylldning

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

#### 8.11.5.1 Røgfylldning af rum med små lækagearealer ved gulv

For lukkede rum med små lækagearealer ved gulvniveau kan tiden til røgfylldning baseret på en konstant brandeffekt  $\dot{Q}_c$ .



Figur 34: 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:

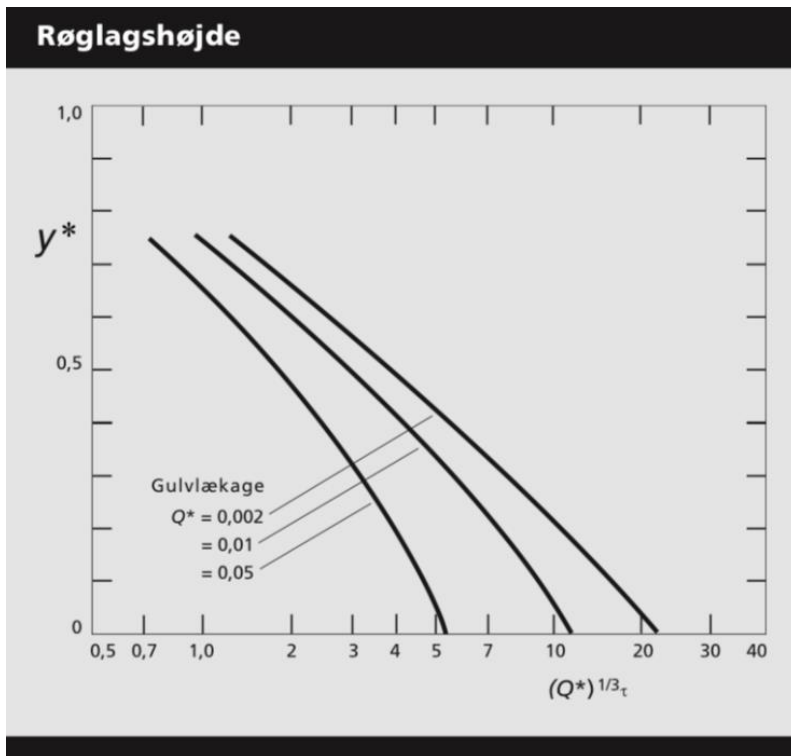
$$y^* = \frac{z}{H}$$

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 35: 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:

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

Hvor:

$\tau$  Dimensionsløs tid

$t_{kritisik}$  Tid til kritiske forhold [s]

$g$  Tyngdeaccelerationen (9,81) [m/s<sup>2</sup>]

$H$  Højden fra gulv til underside af loft [m]

$A_g$  Gulvareal [m<sup>2</sup>]

#### 8.11.5.2 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. 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 [m <sup>2</sup> ]
$z$	Røglagets højde over gulv (m)
$\Delta P_l$	Trykforskel i tilluftsåbningerne [Pa]
$\rho_g$	Densitet på røgen [kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_\infty$	Densitet på luft ved omgivelsernes temperatur [kg/m <sup>3</sup> ]
$g$	Tyngdeaccelerationen [m/s <sup>2</sup> ]
$H_v$	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 [m <sup>2</sup> ]
$C_d$	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.

### 8.11.5.3 Beregning af røgfylgning 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 [m<sup>3</sup>/s]

Røgens densitet  $\rho_g$  [kg/m<sup>3</sup>] 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 inddata, 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.

### 8.11.5.4 Røgfylgning af atrier og lignende rum

For brande med konstant effekt kan røglagets højde 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]

$Q_c$  Den konvektive effekt [kW]

$t$  Tid efter antændelse [s]

$A_g$  Rummets gulvareal [m<sup>2</sup>]

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.

### 8.11.5.5 Plugholding 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 vil omgås selve røggaslaget. Heraf fjernes mindre røg ved udsugningen, som resulterer i et dybere røggaslag.

Følgende metode er gyldig for mekanisk udsugning

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

Hvor:

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

$\Gamma$  Er en dimensionsløs faktor relateret til placeringen af udsugningspunktet i forhold til væggen.

Når centrum af udsugningspunkt er placeret mere end to gange udsugningsdiametere fra nærmeste væg:  
 $\gamma = 1,0$

Når centrum af udsugningspunkt er placeret tættere end to gange udsugningsdiametere fra nærmeste væg eller udsugningspunkt er placeret i væg:  $\gamma = 0,5$

$d$  Dybden af røggaslaget [ $m$ ]

$T_g$  Den gennemsnitlige røggastemperatur [ $^{\circ}C$ ]

$T_{\infty}$  Temperaturen på den omgivende luft = 293 [ $K$ ]

Minimumsafstanden mellem ventilatorerne beregnes [34] 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

### 8.11.6 Stråling

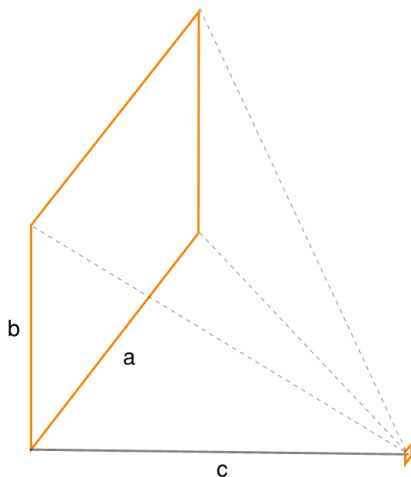
Nedenstående metode kan anvendes til at bestemme strålingsintensiteten i et punkt fra en varm flade.

Der henvises til DS/EN 1991-1-2 [26] for fastlæggelse af røgfanens omfang uden for en bygning ved beregning af stråling mellem bygninger.

#### 8.11.6.1 Beregning af stråling fra en flade mod et punkt

Beregningen af den strålingsintensitet, som en person eller en bygningsdel udsættes for, er baseret på synsfaktoren  $F_{flade \rightarrow punkt}$  mellem en rektangulær flade med sidelængde  $a$  og  $b$  og et punkt i afstanden  $c$ .

$$F_{flade \rightarrow punkt} = \frac{1}{2\pi} \left( \tan^{-1} \left( \frac{b}{c} \right) - \frac{c}{\sqrt{a^2 + c^2}} \cdot \tan^{-1} \left( \frac{b}{\sqrt{a^2 + c^2}} \right) \right)$$



Figur 36: Synsfaktor mellem flade og punkt

Strålingsintensiteten, som punktet udsættes for fra flade, kan beregnes ved følgende udtryk [32]:

$$\dot{q}_{flade \rightarrow punkt}'' = \varepsilon_{gas} F_{flade \rightarrow punkt} \sigma (T_{flade}^4 - T_{punkt}^4)$$

Hvor:

$T_g$  Den gennemsnitlige røggastemperatur [K]

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

$\sigma$  Stefan-Boltzmanns konstant =  $5,67 \cdot 10^{-8}$  [W/m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>]

$\varepsilon_{gas}$  Almindeligvis kan emmissiviteten af røggas antages til  $\varepsilon_{gas} \approx 0,85$  [-]

For beregning af strålingsintensiteten på personer under et røggaslag betragtes røggaslagets underside som fladen og personen som punktet.

For beregning af strålingsintensiteten på bygningsdele fra et røggaslag eller en flamme betragtes røggaslagets underside eller flammen som fladen og den modtagende bygningsdel som punktet.

### 8.11.7 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:

$$\frac{D}{L} = \frac{D_0 W_t}{V}$$

$\frac{D}{L}$  Optisk densitet [dB/m]

$D_0$  Røgpotentialet [dBm<sup>2</sup>/g]

$W_t$  Vægt af forbrændt materiale [g]

$V$  Rummets volumen [m<sup>3</sup>]

Et røgpotentiale  $D_0$  på 0,52 dBm<sup>2</sup>/g svarer til et soot yield på 0,06 g/g.

Nedenfor er der informativt givet eksempler på en række specifikke materialers røgpotentiale. Disse kan ikke anvendes til ugunst uden, at byggeriet henføres til brandklasse 4.

Tabel 22: Røgpotentiale for visse

Materiale	Røgpotentiale, $D_0$ [dB m <sup>2</sup> /g]	
	Flammebrand	Glødebrand
Træuldbetonplade	0,16	1,8
Spånplade	0,37	1,9
Hård træfiberplade	0,35	1,7
Krydsfinerplade	0,17	1,7 materialer [35]
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

[36], [37], [38].

[36] Et røgpotentiale ( $D_m$  i m<sup>2</sup>/g) kan omregnes til  $D_0$  (i dBm<sup>2</sup>/g) ved multiplikation med 10. Det vil sige:  $D_0 = 10 D_m$ .

[37] Et 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<sup>2</sup>/g]

$\Delta h_{luft}$  Nedre forbrændingsvarme [kJ/kg luft]

$\Delta h_c$  Nedre forbrændingsvarme for materialet [kJ/kg materiale]

$\rho_0$  Densiteten af tør luft ved 1 atm. og 20 °C er 1200 g/m<sup>3</sup>

For almindeligt forekommende brændbart materiale kan  $\Delta H_{\text{luft}}$  antages at være ca. 3.000 kJ/kg luft [35].

For ikke-ventilerede rum med en brandtilvækst svarende til  $Q(t) = \alpha t^2$ , kan tiden til kritiske forhold ved overskridelse af sigtbarhedskriteriet udledes til:

$$t_{\text{kritisk}} = \sqrt[3]{\frac{D\Delta h_c V^3}{LD_0\alpha}}$$

$\alpha$  Brandtilvækstfaktor [kW/s<sup>2</sup>]

$t_{\text{kritisk}}$  Tid til kritiske forhold [s]

### 8.11.8 Aktiveringstider for sprinklere og simple termodetektorer

For sprinklere og simple termodetektorer, hvor udløsningen sker, når det varmfølsomme element når en bestemt temperatur, kan udløsningstidspunktet beregnes ved en simpel metode, som beskrives i dette afsnit.

Af praktiske årsager anvendes kun betegnelsen, sprinkler, i det følgende, selvom 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 [32]:

$$\frac{dT_c}{dt} = u^2(T_j - T_c)RTI^{-1}$$

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<sup>1/2</sup> s<sup>1/2</sup>). 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 [39]. 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:

$T_{\infty}$	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.

### 8.11.9 Aktiveringstider for sprinklere og simple termodetektorer ved konstant effekt

Hvis effekten  $\dot{Q}$  er konstant i tiden, har differentilligningen 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]
$T_{jmax}$	Maksimale 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 termodetektorens varmekfølsomme 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.

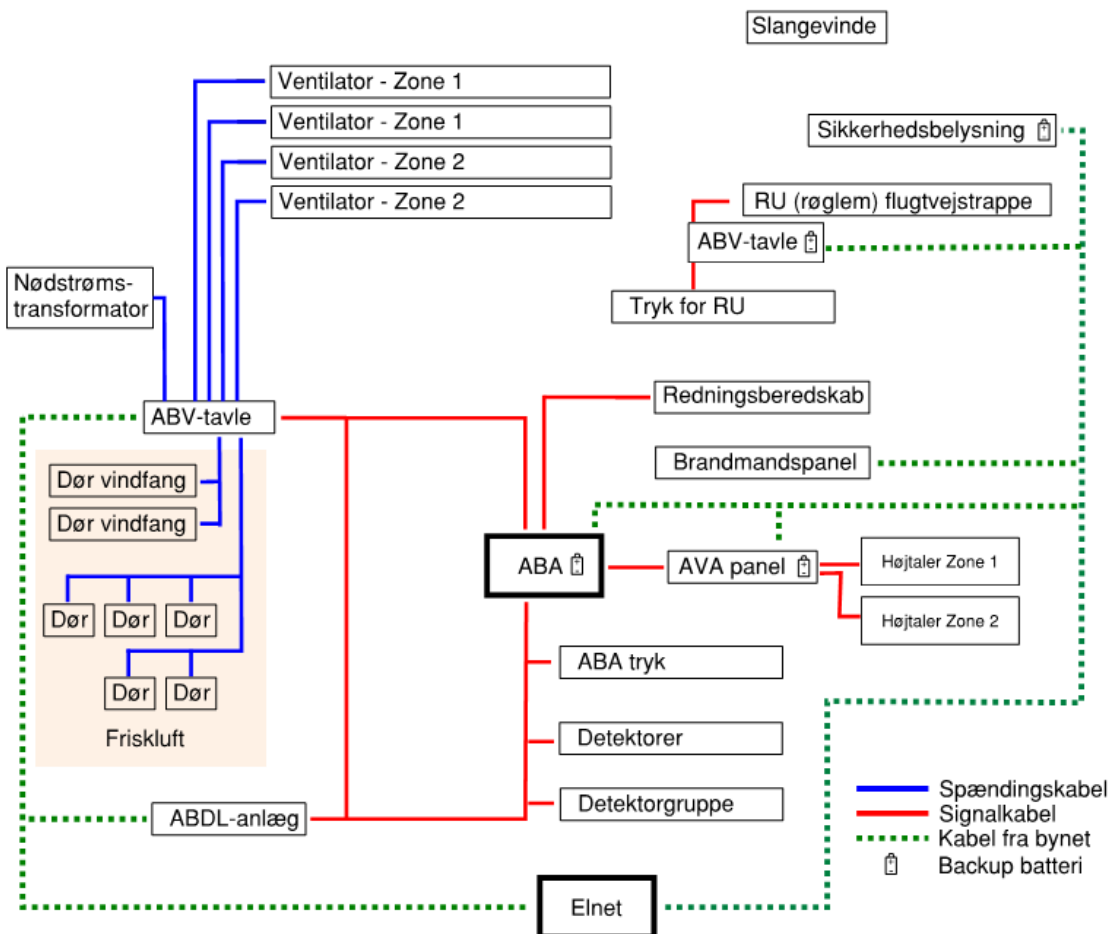
## 8.12 Systemsvigtsanalyse

### 8.12.1 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 37: 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 pålidelig en anlægstype er, des simplere kan analysen 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.

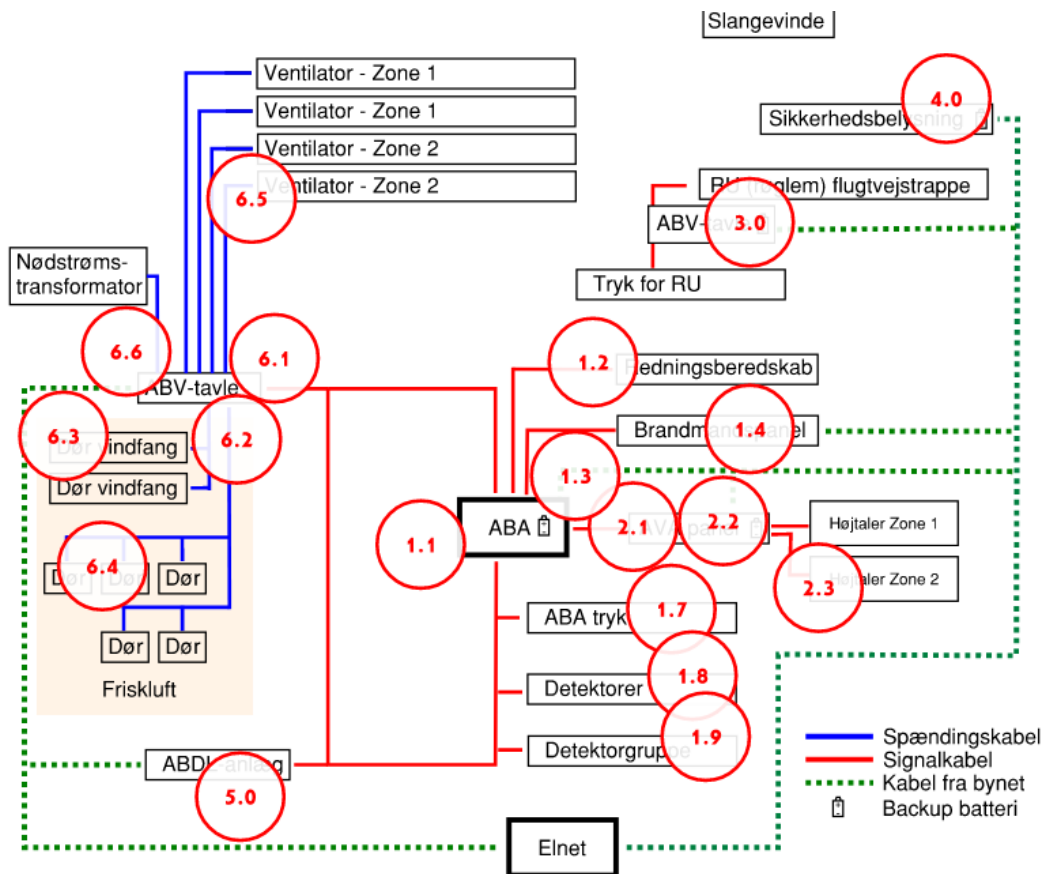
Eksempler på svigt kan f.eks. være:

- 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.

Håndteringen af en række svigt i de mest almindelige brandtekniske anlæg er beskrevet i kapitel 7 om drift.

De identificerede svigt kan markeres på den diagrammatiske anlægsoversigt, som angivet nedenfor, hvor de identificerede svigt er nummereret ud fra hvilke brandtekniske installationer, de tilhører.

Det bemærkes, at slangevinder er påført diagram over anlægsopbygning, men at det 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 ABDL 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 38: Diagrammatisk anlægsopbygning 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 de 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. F.eks. 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 uden for det pågældende anlægs norms anvendelsesområde.

Til illustration at princippet betragtes eksemplet ovenfor.

**Tabel 23: Eksempel på svigtbeskrivelse for butikcenter**

Nummer	Installationer	Svigtbeskrivelse	Beskrivelse af konsekvens (K) eller tiltag (T) der imødegår svigt
1	ABA		
1.1		Svigt i tavle, fuld udkobling	K: ABV og AVA virker ikke T: Fejl til redningsberedskab
1.2		Signal til redningsberedskabet	K: Påvirker ikke personsikkerhed
1.3		Strømforsyning til ABA	T: Batteribackup
1.4		Signal til brandmandspanel eller svigt af brandmandspanel	K: Påvirker ikke personsikkerhed
1.5		Strømforsyning til brandmandspanel	K: Påvirker ikke personsikkerhed
1.6		Signalkabel klippes	T: Ringforbundet jf. retningslinje, overvåget
1.7		Alarmtryk blokeret	K: Detektorer fungerer
1.8		En detektor blokeret/ødelagt	K: Alarmtryk fungerer. Varsling kan blive forsinket
1.9		Detektorgruppe udkoblet	K: Brand kan udvikle sig uopdaget
2	AVA		
2.1		Svigt i tavle eller signalkabel fra ABA	K: Varsling forsinkes
2.2		Strømforsyning til AVA	T: Batteribackup
2.3		Kabel til højtalere i en zone	K: Varsling forsinkes i pågældende zone
3	ABV i trappe	Svigt i anlæg eller forsyning	K: Påvirker ikke personsikkerhed, T: Dimensioneret efter anerkendt norm
4	Sikkerhedsbelysning	Svigt i armatur eller forsyning	K: Batteribackup i de enkelte armaturer, øvrige fungerer T: dimensioneret efter anerkendt norm
5	ABDL	Svigt i anlæg eller forsyning	T: Fail safe, dimensioneret efter anerkendt norm
6	ABV		
6.1		Svigt i tavle	K: Overvåges af ABA.
6.2		Svigt i forsyning til erstatningsluft	K: 2 ud af 4 grupper svigter
6.3		Svigt i enkelt åbning for erstatningsluft	K: 3 ud af 4 grupper fungerer
6.4		Svigt i serie af åbninger for erstatningsluft	
6.5		Svigt i forsyning til ventilator	T: Der er 100% redundans jf. retningslinje
6.6		Svigt i strømforsyning	T: Der er nødstrøm

### 8.12.2 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 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), så 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 sker kun inden for særligt 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 af princippet betragtes eksemplet nedenfor:

**Tabel 25: Eksempel på konsekvensbeskrivelse og supplerende tiltag for butikscenter**

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	Ingen
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	Ingen
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 ved, at der 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 8.3.8.3.

De supplerende tiltag indarbejdes i den brandtekniske dokumentation.

## 8.13 Eksempel på beregning af bygningsdele

### 8.13.1 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 [40].

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. præ-accepterede løsninger.

### 8.13.2 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 er opbygget af i alt fem lag.

Det kan for denne bygningsdel være relevant at undersøge flere varmeovergangsveje som f.eks.:

Traditionelt tværsnit i bygningsdelen.

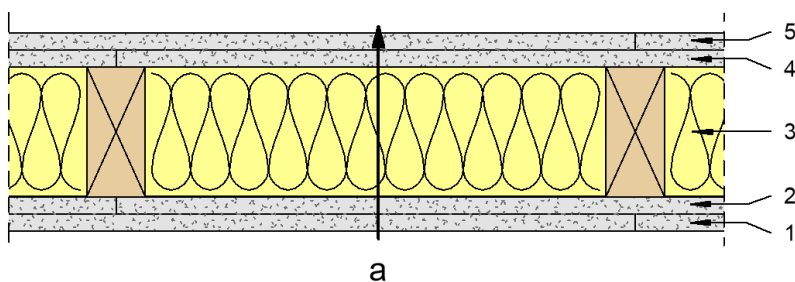
Manglende beklædning pga. installation.

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 39.

De enkelte lag er markeret på Figur 39 og er:

- 13 mm almindelige gipskartonplader.
- 13 mm almindelige gipskartonplader.
- 95 mm glasuld.
- 13 mm almindelige gipskartonplader.
- 13 mm almindelige gipskartonplader.



Figur 39: Illustration af bygningsdelen, med angivelse af varmeovergangsvej og lagopbygning



### 8.13.3 Metode

For adskillende elementer forudsættes eftervist, at:

$$t_{ins} \geq t_{req}$$

Hvor:

$t_{ins}$  Tiden, indtil temperaturstigningen (angivet i afsnit 8.4.1.2) på den ikke-brandeksponerede side er nået

$t_{req}$  Krævede brandmodstandsevne for bygningsdelens adskillende funktion. I dette eksempel er den 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

$t_{ins,0,i}$  Grundisoleringsværdien for lag "i" i minutter

$k_{pos}$  Positionscoeffcient

$k_j$  Koefficient for en forbindelse

### 8.13.4 Beregning

I dette beregningseksempel 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:

$1,4 h_p$  Grundisoleringsværdien for gipskartonplade, og  $h_p$  er tykkelse af pladen i mm

1,0 Positionscoeffcienten for en gipskartonplade i 1. lag med en bagvedliggende gipskartonplade

$k_f$  Fugecoeffcient 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

$$t_{ins,2} = t_{ins,0,2} k_{pos} k_j$$

$$t_{ins,2} = 1,4 h_p * 0,8 * k_f$$

Hvor:

1,4  $h_p$  Grundisoleringsværdien for gipskartonplade ( $h_p$  er tykkelse af pladen i mm.)

0,8 Positionskoefficienten for en gipskartonplade i 2. lag med en bagvedliggende glasuld

$k_f$  Fugekoefficient udgår, da dette ikke er relevant i denne varmeovergangsvej

$$t_{ins,2} = 1,4 * 13 * 0,8$$

$$t_{ins,2} = 14,56 \text{ min.}$$

Lag i positions 3 – 95 mm glasuld med en densitet på 15 kg/m<sup>3</sup>

$$t_{ins,3} = t_{ins,0,3} k_{pos} k_j$$

$$t_{ins,3} = 0,1 h_{ins} k_{dens} * 1,0 * k_f$$

Hvor:

0,1 Grundisoleringsværdien for glasuld ( $h_{ins}$  er isoleringstykkelsen i mm.)

$k_{dens}$  Koefficienten for isoleringens densitet

1,0 Positionskoefficienten for en glasuld i 3. lag med en bagvedliggende gipskartonplade.

$k_f$  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

$$t_{ins,4} = t_{ins,0,4} k_{pos} k_j$$

$$t_{ins,4} = 1,4 h_p * 0,8 * k_f$$

Hvor:

1,4  $h_p$  Grundisoleringsværdien for gipskartonplade ( $h_p$  er tykkelse af pladen i mm.)

0,8 Positionscoeffcienten for en gipskartonplade i 2. lag med en bagvedliggende glasuld.

$k_f$  Fugekoeffcient 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

$$t_{ins,5} = t_{ins,0,5} k_{pos} k_j$$

$$t_{ins,5} = 1,4 h_p * 0,7 * k_f$$

Hvor:

$1,4 h_p$  er grundisoleringsværdien for gipskartonplade, og  $h_p$  er tykkelse af pladen i mm.

0,7 er positionskoeffcienten for en gipskartonplade i 2. lag med en bagvedliggende glasuld.

$k_f$  fugekoeffcient 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 samlede 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 træskelet (D-s2,d0) med fastholdt mineralulds isolering (A2-s1,d0) og gipskartonplader på begge sider (A2-s1,d0).

Her vil den samlede 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.

## 8.14 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. Bl.a. 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.

#### 8.14.1 Eksempel 1: Åbenhed mellem mere end to kontoretager

##### 8.14.1.1 Analysebyggeri

Analysebyggeriet i dette eksempel er en kontorbygning med fem etager over terræn. Bygningens grundareal er 1.000 m<sup>2</sup>, 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 m<sup>2</sup>, og etagearealet er større end 2.000 m<sup>2</sup>, er bygningen iht. BR18, § 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. [41].

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.

##### 8.14.1.2 Referencebyggeri

Som referencebyggeri defineres en kontorbygning med fem etager hver med et etageareal på 1.000 m<sup>2</sup>. Anvendelsen og personbelastningen på de enkelte etager er den samme som i analysebyggeriet. Referencebyggeriet er åbent mellem stueetagen og 1. etage. Da arealet i dette rum overstiger 1.000 m<sup>2</sup>, 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. [41]

##### 8.14.1.3 Fastsættelse af acceptkriterier

For eftervisning af bygningens brandsikkerhed er de præ-accepterede løsninger 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. [41] 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 BR18, § 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 [42] sker opdeling i brandceller af hensyn til sikkerheden for de personer, der opholder sig i bygningen, herunder:

- For at kunne begrænse udbredelsen af brand og røg til flugtvejene i den tid, evakuering pågår.
- 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.

#### 8.14.1.4 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 brandmæssig opdeling mellem etagerne, og at der er større sandsynlighed for brand i analysebyggeriet som følge af, at arealet er større.

Ved hjælp af Tabel 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.
- 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 26, som er udarbejdet på baggrund af Tabel 19.

Tabel 26: Oversigt over ændring i beskyttelseeffekt.

Beskyttelsesformål	Forskelle fra præ-accepterede løsninger		
	Afvigelse	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 opmærksomme på branden og ikke bliver fanget i en brandcelle, hvor de skal afvente redning af redningsberedskabet. Forholdene påvirkes negativt 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.

#### 8.14.1.5 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 8.3.2.4, dvs. med en medium brandtilvækst, med en maksimumseffekt på 5 MW, i begge tilfælde reduceret af sprinkleranlæg, hvilket giver en mindre designbrand. Brandscenariet modsvarer scenarie A i afsnit 8.5.7.7. 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.

#### 8.14.1.6 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) 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 dette analysebyggeri vil skulle behandles nærmere i en systemsvigtsanalyse, se appendiks 8.12.

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 i ABA-anlægget vil medføre at brandtryk ikke virker, hvorfor svigt i ABA-anlæg vil igangsætte AVA.

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 da 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.

#### 8.14.1.7 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 tilfredsstillende opfylder kravet om, at "der i tilfælde af brand ikke sker væsentlig brand- og røgspredning".

### 8.14.2 Eksempel 2: Øget brug af glas mod flugtvejsgang på skole

#### 8.14.2.1 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

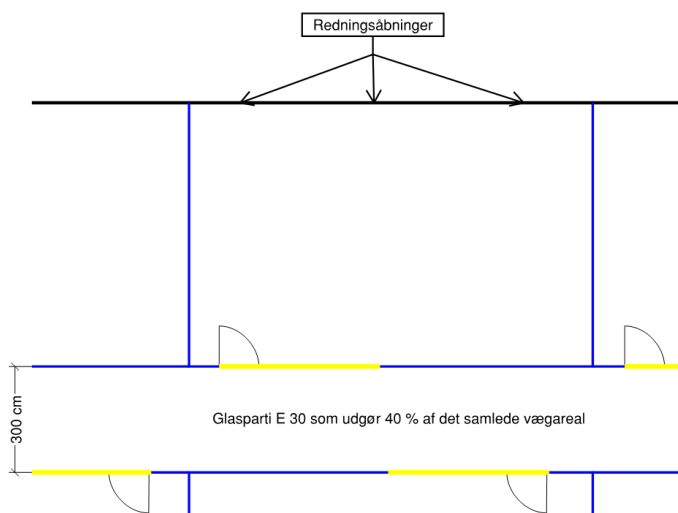


dermed benytte korridoren, fordelt med 120 personer på hver trappe. Hvert undervisningslokale har desuden tre redningsåbninger.

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 m<sup>2</sup>. Trapperne er desuden egne brandsektioner. Undervisningslokalerne og flugtvejsgangen er inddelt som egne brandceller. Mellem flugtvejsgangen og undervisningslokalerne placeres glaspartier inklusiv glassdøre, som udgør 40 % af det samlede vægareal. Glaspartierne inklusiv dørene er klassificeret E 30 og er ikke placeret direkte over for 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.



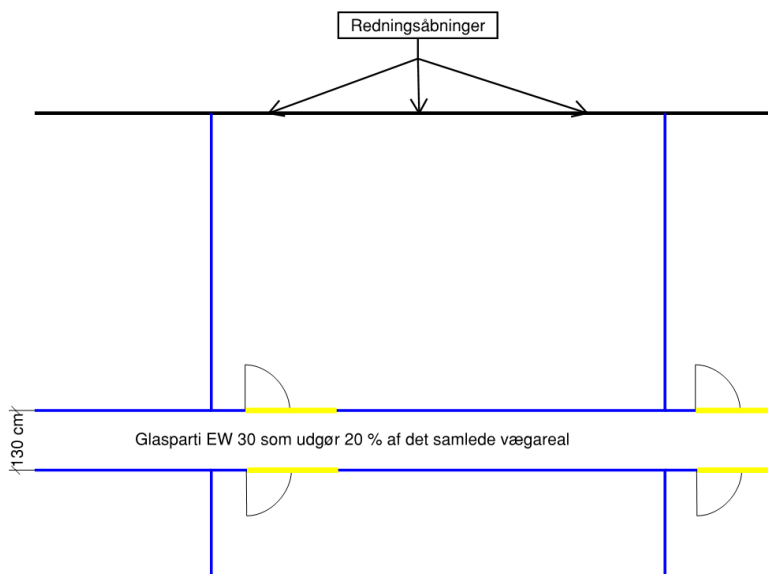
Figur 40 - Illustration af relevant udsnit af analysebyggeriet

#### 8.14.2.2 Referencebyggeri

På grund af den brandmæssige opdeling af analysebyggeriet kan afvigelsen ses isoleret for hvert undervisningslokale med tilhørende del af flugtvejsgang foran glaspartiet 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 glaspartierne på hver side af gangen er placeret direkte over for hinanden.

I referencebyggeriet er der installeret AVS-anlæg på grund af størrelsen af brandsektionen iht. BR18, § 123, stk. 5, samt installeret et AVA-anlæg, som aktiveres af AVS-anlægget på grund af personbelastningen iht. BR18, § 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 41 - Illustration af relevant udsnit af referencebyggeriet

### 8.14.2.3 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 BR18, § 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 BR18, § 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.

#### 8.14.2.4 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 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 27, som er baseret på Tabel 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 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.

#### 8.14.2.5 Valg af brandscenarier

Afvigelsen har primært betydning for niveauet af varmestråling i flugtvejen og brandspredning mellem brandceller. Da 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.

#### 8.14.2.6 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<sup>2</sup> målt 1 m fra glaspartiet, jf. klassifikationskriterierne i DS/EN 13501-2:2016 [31].

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.

Hvis AVS-anlægget fungerer som forudsat, kan det derfor forventes, at varmemstrålingen 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 varmemstrålingen. 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 0,75 m fra væggen på modsatte side af brandrummet. Dette sikrer, at der er en "korridor" med en bredde på 0,75 m, hvor det er muligt at evakuere. I analysebyggeriet beregnes varmemstrålingen derfor 2,25 m fra det varme glasparti og direkte ud fra midten af glaspartiet til  $9,95 \text{ kW/m}^2$  (beregning ikke medtaget i eksemplet).

Sammenholdt med referencebygningen, hvor der ved EW-glaspartiet accepteres en varmemstråling på op til  $15 \text{ kW/m}^2$  målt 1 m fra glaspartiet (hvilket kun giver en resterende gangbredde på 0,3 m), så vil strålingsintensiteten i analysebygningen sikre væsentligt bedre evakueringsforhold.

Ligeledes anses faren for brandspredning mellem undervisningslokaler som passende reduceret, jf. klassifikationskravet for EW-klassificering. En fuld beregning af varmemstrålingen fra et brandramt undervisningslokale til nærmeste lokale på modsatte 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 ud over usikkerheden i metoden.

#### 8.14.2.7 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 tilfredsstillende opfylder 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".

### 8.14.3 Eksempel 3: Brændbart bæresystem i hotelbygning

#### 8.14.3.1 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 K<sub>1</sub> 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 m<sup>2</sup> for værelser og maksimalt 100 m<sup>2</sup> for rum uden brændbart inventar som f.eks. flugtvejs gange.

Hver etage udgør en brandsektion med et areal på 600 m<sup>2</sup>. Bygningen er udført med et bæresystem i træ med en blanding af søjler, bjælker og massivtræelementer. 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 K<sub>2</sub> 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 massivt træ de steder, hvor der i referencebyggeriet accepteres beklædning klasse K<sub>1</sub> 10 D-s2,d2. Hvor der i referencebyggeriet er krav om beklædning klasse K<sub>1</sub> 10 / B-s1,d0, anvendes der beklædning klasse K<sub>2</sub> 60 / A2-s1,d0 (senere benævnt brandbeskyttelsessystem).

Brandsektionsadskillelserne udføres af bygningsdel klasse EI 60 / D-s2,d0 med beklædning klasse K<sub>2</sub> 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.

#### 8.14.3.2 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.

#### 8.14.3.3 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.
- Brandsektionsadskillelser som bygningsdel klasse EI 60 / A2-s1,d0.

Det bagvedliggende funktionskrav til løsningen omkring bæresystemer findes i BR18, § 99:

*”I tilfælde af brand skal bygninger og bygningsdele have en tilstrækkelig brandmodstandssevne.*

*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 afvigelse 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 afvigelse omkring brandsektioner findes funktionskravet tilsvarende i BR18, § 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.

#### 8.14.3.4 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 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 m<sup>2</sup> eller 100 m<sup>2</sup> for rum uden brændbart inventar.

De overordnede ændringer i beskyttelseeffekterne som følge af afvigelser og kompenserende tiltag er beskrevet i Tabel 28.

**Tabel 28: Oversigt over ændring i beskyttelsesformål.**

Beskyttelsesformål	Forskelle fra præ-accepterede løsninger			
	Afvigelser		Kompenserende tiltag	
	Brændbart bæresystem	Brændbare brandsektions-adskillelser	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 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.

#### 8.14.3.5 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 8.5.7.7. 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.

#### 8.14.3.6 Eftervisning

#### 8.14.3.7 Brændbart bæresystem – Grundscenarie

Omhandler scenarie 1

### **2. Bærende konstruktioners brandmodstandsevne**

For grundscenariet udføres det bærende system med to typer bygningsdele:

Bygningsdel klasse R 120 D-s2,d0.

Bygningsdel klasse R 60 D-s2,d0 med beklædning klasse K<sub>2</sub> 60 A2-s1,d0.

Bygningsdelstype 1 er dimensioneret til at modstå 120 minutters indbrænding og stadig have tilstrækkelig restbæreevne.

Bygningsdelstype 2 er udført med beklædning klasse K<sub>2</sub> 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 f.eks. delaminering kan bidrage til en hurtigere indbrænding.

Sprinkling kan ikke tages med i denne betragtning, derfor anvendes samme 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 gennembyder. 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.

#### 8.14.3.8 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 svigtscenarier 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 K<sub>1</sub> 10 D-s2,d2. Materialer og overflader i analysebyggeriet vil ikke have en øget indvirkning på brandspredning, brandudvikling og røgudvikling i rummet inden for 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 K<sub>1</sub> 10 B-s1,d0, monteres der beklædning klasse K<sub>2</sub> 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 redningsberedskabet hele vejen rundt om bygningen har mulighed for at udføre slukningsindsats udvendigt 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 tilfredsstillt.

Da der er brugt AVS-anlæg som kompenserende tiltag, vil det være nødvendigt, at der bliver udarbejdet en systemsvigtsanalyse iht. afsnit 8.3.2.3.

#### 8.14.3.9 *Brændbare brandsektionsadskillelser*

Denne afvigelse er negligerbar, når AVS-anlægget fungerer korrekt, fordi de forenkede indsatsforhold vil indebære en øget sandsynlighed for, at branden kontrolleres og/eller slukkes tidligt i brandforløbet.

Brandsektionsadskillelserne udføres med beklædning klasse K<sub>2</sub> 60 A2-s1,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 det, at 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 tilfredsstillt.

#### 8.14.3.10 *Samlet analyse*

Selvom det fremgår af grovanalysen, at de forskellige afvigelser vil påvirke flere af de samme forhold, vurderes forholdene ikke at forårsage yderligere negative konsekvenser på hinanden.

Den øget brandbelastning for værelser med brændbare overflader forventes i svigtscenariet 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.

#### 8.14.3.11 *Konklusion*

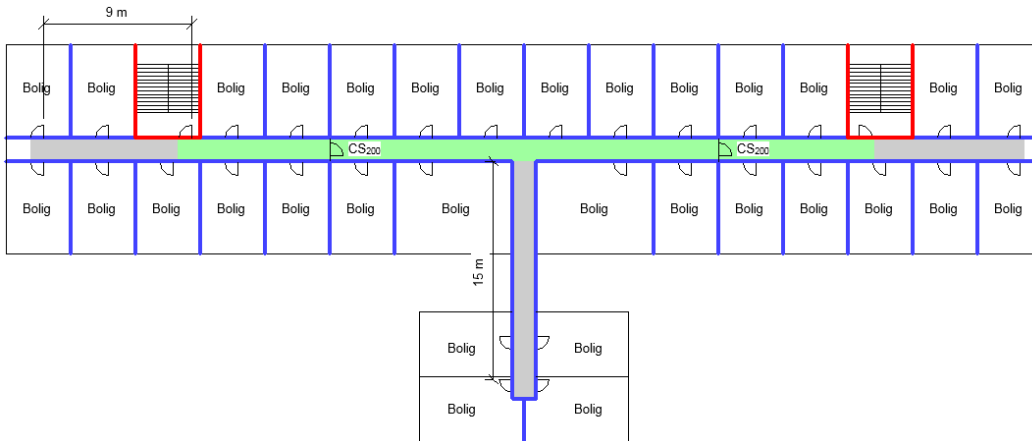
Baseret på eftervisning af hver enkelt afvigelse samt den samlede vurdering af afvigelserne konkluderes det, at acceptkriterierne, givet af BR18, §§ 99 og 104 samt præ-accepterede løsninger for bæreevne og brandsektionsadskillelser, er tilfredsstillt. Dermed godtages designet.

### 8.14.4 Eksempel 4: Blinde ender i flugtvejsgang

#### 8.14.4.1 *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 m<sup>2</sup>.

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 42.



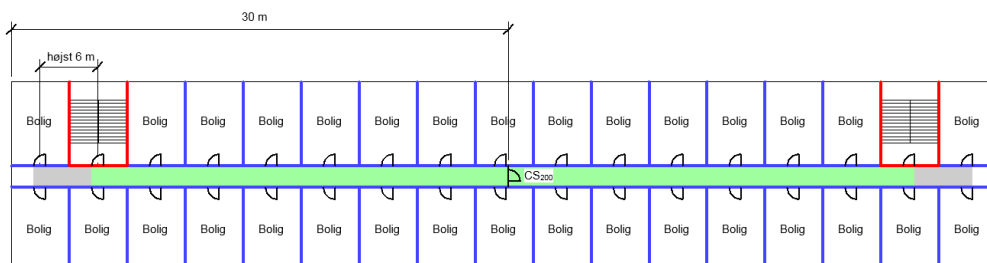
Figur 42 - illustration af analysebyggeriet, grøn farve angiver flugtvejsgang med mulighed for at flygte i to retninger, grå farve angiver områder med mulighed for at flygte i en retning.

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.

#### 8.14.4.2 Referencebyggeri

Referencebyggeriet har samme størrelse og anvendelse som analysebyggeriet, men er udført i overensstemmelse med præ-accepterede løsninger. Dette indebærer, at de blinde ender er højst 6 m ved hver flugtvejstrappe, og at der er opdeling af korridorgangen med røgtætte døre pr. 30 m gang, se Figur 43.



Figur 43 - 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.

#### 8.14.4.3 Fastsættelse 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 gang.

Det bagvedliggende funktionskrav til den præ-accepterede løsning findes i BR18, § 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.

#### 8.14.4.4 Grovanalyse

Anvendelsen og dermed de mulige brandårsager og -sandsynligheder samt størrelse er ens i analyse- og referencebyggeriet.

Ved hjælp af Tabel 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 29, som er baseret på Tabel 19.

**Tabel 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 **et** 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 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 én retning.
- 4) Redningsberedskabets indsatsmuligheder påvirkes positivt, det øgede antal røgadskillelser betyder, at indsatsen i højere grad kan koncentreres 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.

#### 8.14.4.5 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.

#### 8.14.4.6 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 præ-accepterede løsninger. De eftervises hver for sig i de følgende afsnit.

##### *Blind ende ved flugtvejstrappe*

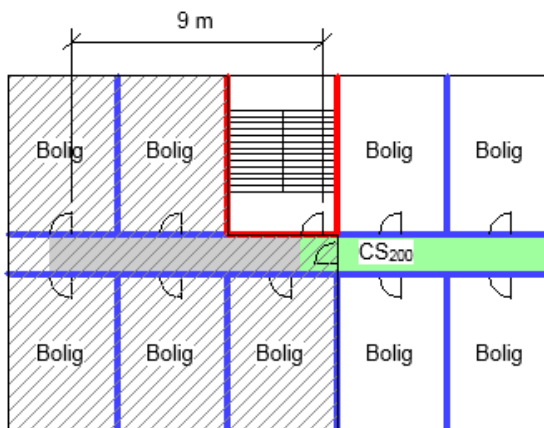
I referencebyggeriet accepteres en blind ende på 6 m og en røgopdeling af flugtvejsgangen for hver 30 m. I referencebyggeriet vil dette medvirke, at en røgspredning til flugtvejsgangen vil kunne påvirke op til 17 boliger.

I analysebyggeriet er den blinde ende på 9 m. Her tilføjes en røgadskillende dør efter flugtvejstrappen, så 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.

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 44.



**Figur 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. 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 m<sup>2</sup> (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:

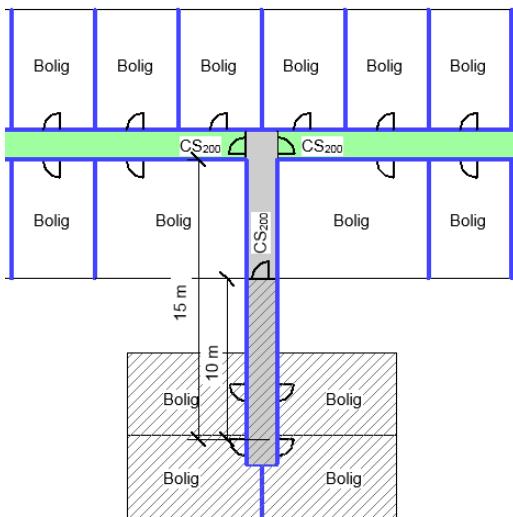
- 1) Denne blinde ende er til en flugtvejsgang og ikke en flugtvejstrappe som i tidligere verificering, og som de præ-accepterede løsninger anviser.
- 2) Den blinde ende er 15 m lang fra fjerneste dør.

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 der ikke flygtes længere end 10 m i røgfylt gang i tilfælde af røgspredning til flugtvejsgang.

Se illustration af kompenserende tiltag på Figur 45.





Figur 45 - 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.

#### 8.14.4.7 Konklusion

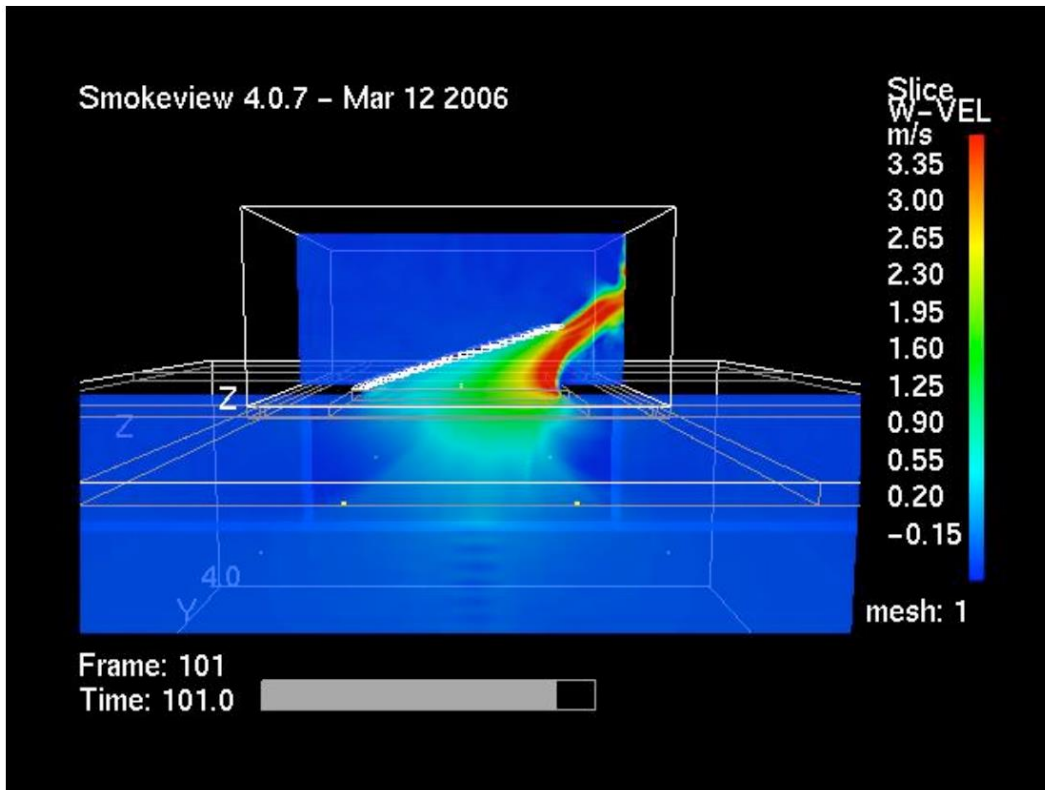
Der er ikke behov for en samlet analyse, eftersom der bare er tale om samme type afvigelse. På baggrund af eftervisningen af de to situationer konkluderes det, at designet af analysebyggeriet tilfredsstiller BR18's funktionskrav om, "at personer kan forlade en bygning på sikker vis".

### 8.15 Fuld modellering af brandventilationsåbning med CFD (informativt)

Dette bilag beskriver metoder til modellering af brandventilationsåbninger, der alene kan anvendes, når der tilknyttes en certificeret tredjepartskontrol for anvendelsen af metoderne.

#### 8.15.1 Fuld modellering af brandventilationsåbning

Den fulde ventilationsåbning modelleres med en opløsning, der er tilstrækkelig høj til at definere størrelsen og placeringen af vena contracta under hensyn til bl.a. naboåbninger, tagudhæng, solafskærmning mv. Dette vil kræve, at beregningsdomænet er udstrakt tilstrækkeligt nedstrøms til, at dannelsen af vena contracta sker inde i beregningsdomænet.



Figur 46: Fuld modellering af strømning igennem naturlig ventilationsåbning.

Ved anvendelse af denne metode skal der udføres en særskilt 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 strømmingen gennem åbningen.