



SAFETY & TRANSPORT
RISE FIRE RESEARCH



BRAVENT – Delrapport 1 Teori- og kunnskapssammenstilling

Andreas Sæter Bøe, Christian Sesseng og Jan Paul Stensaas

RISE-rapport 2019:11

BRAVENT – Delrapport 1

Teori- og kunnskapssammenstilling

Andreas Sæter Bøe, Christian Sesseng og Jan Paul Stensaas

Abstract

BRAVENT – Sub-report 1 – Theory and knowledge compilation

Recently questions about whether spread of heat and smoke in ventilation ducts during a fire represent an increased risk for personal safety and loss of properties have been raised. The technical solutions currently used to fulfill the pre-accepted performance given in the guidelines to the building regulations with regard to fire protection of ventilation ducts are largely based on descriptions in SINTEF's Building Design Sheet 520.352 on fire- and smoke protection of ventilation systems, and in BV Netts Guide for fireproof ventilation, also known as the BVNett Guide. This topic was once again raised in connection with the revision of the 2017 edition of the building regulations, when it was pointed out in inquiry statements that the pre-accepted performances are insufficiently defined and that the solutions outlined in the Building Design Sheet and the BVNett Guide are not sufficiently documented.

In order to elucidate this topic and provide scientific documentation on the extent to which the spread of heat and smoke in ventilation ducts represents a risk to persons and properties, the BRAVENT project (Fire and smoke spread in ventilation ducts) was initiated.

The project investigates issues related to heat dissipation in ventilation ducts, clogging of filters in ventilation systems due to smoke, the effect of the seal-up strategy with respect to pressure build-up in the fire room and smoke spread through leakages in the construction.

The objective of the sub-task presented in this report was to:

Compile a theoretical basis for the experiments and analyzes to be carried out.

1. Map relevant regulations for fire protection of ventilation systems.
2. Map standards that are the basis for determining the fire resistance of components included in a ventilation system.
3. Map the state-of-the-art regarding
 - a. the need to fire insulate ventilation ducts.
 - b. the need to install bypass channels to prevent the filter systems from being clogged by smoke particles.
 - c. the effect of installing fire dampers in all fire-partitions with respect to smoke spread.
 - d. how smoke can be spread via ventilation ducts and leaks in the building structure.
 - e. the pros and cons of seal-up and extraction strategies.

This is sub-report 1, which summarizes the relevant, fire-related theory and state-of-the-art in the focus area. The report serves as the theoretical basis for planning of experiments and for the other activities in the BRAVENT project.

Key words: fire, ventilation, HVAC, insulation

Research Institutes of Sweden AB

RISE-rapport 2019:11

ISBN: 978-91-88695-97-0

Prosjektnummer: 20328

Kvalitetssikring: Anne Steen-Hansen

Finansiert av: Omsorgsbygg Oslo KF, Hordaland fylkeskommune, Stavanger kommune, Sykehusbygg HF, Trondheim kommune, Undervisningsbygg Oslo KF og Direktoratet for byggkvalitet.

Forsidebilde: Photo 97754751 © Korn Vitthayanukarun - Dreamstime.com.

Trondheim 2019

Innhold

Abstract	1
Innhold.....	3
Sammendrag	5
Nomenklatur	6
1 Innledning	8
1.1 Bakgrunn.....	8
1.2 Målsetting	9
1.3 Begrensninger	10
2 Teori.....	11
2.1 Kanalbetegnelser.....	11
2.2 Varmetransport	11
2.2.1 Varmestråling	12
2.2.2 Konveksjon.....	25
2.2.3 Varmedledning	25
2.3 Temperatur og massetetthet.....	26
2.4 Blanding av luftstrømmer med ulike temperaturer.....	26
2.5 Brannutviklingshastighet og -varighet.....	29
2.6 Trykkoppbygging og røykspredning ved brann i rom.....	30
2.6.1 Trykkoppbygging og røykspredningsmekanismer	31
2.6.2 Lekkasjeåpninger – volumstrøm og trykktap	38
2.6.3 Spredning av røyk via ventilasjonsanlegg	40
2.6.4 Spredning av røyk gjennom bygningsdeler	47
3 Regelverk og veiledninger	49
3.1 Historisk regelverk i Norge.....	49
3.2 Dagens forskrift	49
3.3 SINTEF Bygghetjening 520.352	52
3.3.1 Separate ventilasjonsanlegg i hver branncelle.....	52
3.3.2 Steng-inne-løsning	52
3.3.3 Trekk-ut-løsning	53
3.3.4 Kombinert steng-inne- og trekk-ut-løsning	56
3.4 BV Nett – Veileder for brannsikker ventilering	56
4 Teststandards.....	57
4.1 NS-EN 1366-1: 2014 - Prøving av brannmotstanden til tekniske installasjoner - Del 1: Ventilasjonsskanaler.....	59

4.2	NS-EN 1366-2: 2015 – Prøving av brannmotstand til tekniske installasjoner – Del 2: Brannspjeld	61
4.3	NS-EN 1366-3: 2009 – Prøving av brannmotstand til tekniske installasjoner – Del 2: Gjennomføringstetninger	62
5	Ventilasjonsanlegg som har medført brann- og røykspredning	63
5.1	Passasjerfergen Scandinavian Star, 1990.....	63
5.2	Alstadhaug sykehjem, Sandnessjøen, 1974	63
5.3	Gullhella sykehjem, Asker, 1979.....	64
5.4	MGM Grand Hotel, USA, 1980.....	64
5.5	Hotell Caledonien, Kristiansand, 1986	65
5.6	Domus kjøpesenter, Narvik, 2000	66
5.7	Kvartal i Nordre gate, Trondheim, 2002.....	66
5.8	Sveio omsorgssenter, 2007	66
5.9	Thorvald Meyers gate, Oslo, 2014.....	67
	Referanser	68

Sammendrag

Den siste tiden er det blitt stilt spørsmål ved om spredning av varme og røyk i ventilasjonskanaler ved brann medfører en økt risiko for personsikkerhet og materielle verdier. De tekniske løsningene som i dag brukes for å oppfylle de preaksepterte ytelsene i veiledning til byggteknisk forskrift med hensyn til brannsikring av ventilasjonskanaler er i stor grad bygget på beskrivelser i blant annet SINTEFs byggdetaljblad 520.352 *Brannsikring og røyksikring av balanserte ventilasjonsanlegg* og BV Netts *Veiledning for brannsikker ventilasjon*, også kjent som BVNett-Veilederen.

Dette temaet ble på nytt aktuelt i forbindelse med revisjon av byggteknisk forskrift (TEK17). Da ble det påpekt i høringsuttalelser at de preaksepterte ytelsene når det gjelder brann og ventilasjonsanlegg er problematiske, og at løsningene som skisseres i byggdetaljbladet og BVNett-Veilederen ikke er tilstrekkelig dokumentert.

For å belyse dette temaet, og skaffe til veie vitenskapelig dokumentasjon for i hvilken grad spredning av varme og røyk i ventilasjonskanaler representerer en risiko for personer og verdier, ble BRAVENT-prosjektet (Brann- og røykspredning i ventilasjonskanaler) initiert.

Prosjektet omhandler problemstillinger knyttet til varmespredning i ventilasjonskanaler, tetting av filter i ventilasjonsanlegg på grunn av røyk, effekten av steng inne-strategien med hensyn til trykkoppbygging i brannrommet, og røykspredning gjennom utettheter i konstruksjonen.

Målsettingen med deloppgaven som er presentert i denne rapporten var å:

1. Sammenstille et teoretisk grunnlag for de forsøkene og analysene som skal gjennomføres.
2. Kartlegge relevant regelverk for brannsikring av ventilasjonsanlegg.
3. Kartlegge standarder som ligger til grunn for å bestemme brannmotstand til komponenter som inngår i et ventilasjonsanlegg.
4. Kartlegge kunnskapsstatus vedrørende
 - a. behovet for å brannisolere ventilasjonskanaler.
 - b. behovet for å installere bypass-kanaler for å hindre at filtersystemene tettes av røykpartikler.
 - c. effekten av å installere brannspjeld i alle brannskillende konstruksjoner med hensyn til røykspredning.
 - d. hvordan røyk kan spres via ventilasjonskanaler og utettheter i bygningskonstruksjonen.
 - e. fordeler og ulemper med steng-inne- og trekk-ut-strategiene.

Dette er delrapport 1, som oppsummerer den relevante, brannfaglige teorien og forskningsfronten innen fokusområdet. Rapporten fungerer som teoretisk grunnlag for forsøksplanleggingen og de øvrige aktivitetene i BRAVENT-prosjektet.

Nomenklatur

Symbol	Enhet	Beskrivelse
α	kW/s^2	brannutviklingskonstant
ε	-	emissivitet
ρ	kg/m^3	tetthet
ρ_b	kg/m^3	tettheten til røykgasser
ρ_n	kg/m^3	tettheten til romtemperert luft
ρ_o	kg/m^3	uteluftens tetthet
σ	$\text{J s}^{-1} \text{m}^{-2} \text{K}^{-4}$	Stefan-Boltzmanns konstant = $5,67 \cdot 10^{-8} [\text{J s}^{-1} \text{m}^{-2} \text{K}^{-4}]$

Symbol	Enhet	Beskrivelse
A	m^2	lekkasjeareal
C_w	-	trykkoeffisient
c_p	kJ/kg K	spesifikk varmekapasitet
d	m	avstand
F_{d1-2}	-	synsfaktor
g	m/s^2	tyngdens akselerasjon
h	$\text{W}/(\text{m}^2 \text{K})$	konveksjonsfaktor
k	$\text{W}/(\text{m K})$	varmeledningsevne
l	m	lengde
Δp	Pa	trykkdifferanse
Δp_b	Pa	trykktap ved brann
Δp_n	Pa	trykktap i normalsituasjon
Δp_{so}	Pa	trykkdifferanse mellom sjakt og omgivelsene utendørs
p_o	Pa	atmosfæretrykket
p_w	Pa	trykk indusert av vind
$Q(t)$	W	hastighet for varmeavgivelse

Symbol	Enhet	Beskrivelse
q	m^3/s	volumstrøm
q_b	m^3/s	volumstrøm av røykgasser
q_n	m^3/s	volumstrøm av luft
$\dot{q}_k''$	W/m^2	varmeoverføring ved konveksjon per tid og areal
$\dot{q}_l''$		varmeoverføring ved varmeledning per tid og areal
$\dot{q}_s''$	W/m^2	varmeoverføring ved varmestråling per tid og areal
R	kJ/kgK $\text{J}/\text{mol K}$	den spesifikke gasskonstanten den ideelle gasskonstanten
r	m	radius
T	K	temperatur
T_o	K	uteluftens temperatur
T_b	K	temperatur på røykgasser
T_{bl}	$^{\circ}\text{C}$	temperatur på røykgasser blandet med romtemperert luft
T_g	K	temperatur i kanalgods
T_n	$^{\circ}\text{C}$	temperatur på romtemperert luft
T_s	K	temperatur i sjakt
t	s	tid
u_w	m/s	vindhastighet
V	m^3	volum
$\dot{V}$	m^3/s	volumendring per tidsenhet
$\dot{V}_b$	m^3/s	hastighet for volumekspansjon pga. brann

1 Innledning

1.1 Bakgrunn

I byggeforskrift av 1985/87 (BF85/87) [2,3] og i byggteknisk forskrift av 1997 [4] og 2010 [5] var funksjonskravet til ventilasjonskanaler som kan utsettes for brann at:

- Kanalgjennomføringene og selve kanalen skal utføres slik at bygningsdelens brannskillende funksjon skal opprettholdes.
- Løsningene som anvendes skal bidra til at det oppnås tilstrekkelig beskyttelse mot spredning av røyk og varme gasser.

Løsningene som ble angitt i veiledningene til forskriftene (Rett og slett [6] og REN-veiledning [7,8]) i perioden fra 1985 til 2003, var konkrete ytelser vist ved figurer og detaljløsninger som i all hovedsak anbefalte å brannisolere ventilasjonskanalene 1,0 m til hver side av brannskillet, eller 2,0 m til den ene siden. I forbindelse med utgivelsen av 3. utgave av veiledningen (REN-veiledning fra 2003) ble alle eksemplene og figurene fra tidligere utgaver av veiledningen fjernet og teksten ble redusert til følgende ordlyd:

- Kanal som føres gjennom brannklassifisert bygningsdel må ikke svekke konstruksjonenes brannmotstand.
- Utførelsen kan dokumenteres ved prøvning eller ved at det benyttes anerkjente løsninger.

I veiledningen til byggteknisk forskrift, 3. versjon, er ordlyden som følger:

- Ventilasjonskanal som føres gjennom en brannskillende bygningsdel, må utføres slik at bygningsdelens brannmotstand blir opprettholdt.
- Innfesting og oppheng for kanaler og ventilasjonsutstyr må utføres slik at forutsatt funksjonstid og brannmotstand blir opprettholdt.
- Kanal som føres gjennom seksjoneringsvegg, må ha lukkeanordning (brannspjeld) med minimum samme brannmotstand som seksjoneringsveggen.

Løsningene som brukes i dag for å oppfylle de preaksepterte ytelsene omfatter i korte trekk å installere brannspjeld der hvor kanaler passerer brannskillende konstruksjon (se kapittel 3.3.2), eller å isolere ventilasjonskanaler i sin fulle lengde (se kapittel 3.3.3). Disse løsningene er i stor grad bygget på beskrivelser i blant annet SINTEFs byggdetaljblad 520.352 (heretter kalt byggdetaljbladet) [9] og BV Netts *Veiledning for brannsikker ventilasjon*, også kjent som BVNett-Veilederen [10]. Den siste tiden er det imidlertid blitt stilt spørsmål ved om spredning av varme og røyk i ventilasjonskanaler medfører en økt risiko for personsikkerhet og materielle verdier.

Å implementere løsningene som presenteres i de nevnte dokumentene øker byggekostnadene. Spesialhelsetjenesten ved Sykehusbygg HF har gjort overslagsberegninger på hva det koster å brannisolere avtrekkskanalen på nytt psykiatribygg på Østmarka i Trondheim (et bygg med grunnflate 4500 m²). Kostnadene

omfatter heving av etasjehøyde og brannisolering av ca. 2500 m avtrekkskanaler. Beregningen indikerer en kostnad på ca. én million kr. Overført til nytt sykehus i Stavanger vil kostnadene til brannisolering utgjøre ca. 45 millioner kroner. Østfoldsykehuset som sto ferdig i november 2015, har fått installert bypass-kanal på 35 ventilasjonsanlegg, til en pris på ca. ti millioner kroner. For en barnehage i Trondheim med grunnflate ca. 700 m² beløp kostnadene med å installere brannspjeld på både avtrekkskanalene og tilluftskanalene der kanalnettet krysser brannskiller seg til ca. 700 000 kroner. I tillegg til installasjonskostnadene kommer årlige drifts- og vedlikeholdskostnader.

Dette temaet ble på nytt aktuelt i forbindelse med revisjon av byggteknisk forskrift (2017-utgaven), da det ble påpekt i høringsuttalelser at de mangelfulle preaksepterte ytelsene når det gjelder brann og ventilasjonsanlegg er problematiske, og at løsningene som skisseres i byggdetaljbladet og BVNett-Veilederen ikke er tilstrekkelig dokumentert.

For å belyse dette temaet, og skaffe til veie vitenskapelig dokumentasjon for i hvilken grad spredning av varme og røyk i ventilasjonskanaler representerer en risiko for personer og verdier, ble BRAVENT-prosjektet (Brann- og røykspredning i ventilasjonskanaler) initiert. Prosjektet er finansiert av Omsorgsbygg Oslo KF, Hordaland fylkeskommune, Stavanger kommune, Sykehusbygg HF, Trondheim kommune, Undervisningsbygg Oslo KF og Direktoratet for byggkvalitet og ledes av RISE Fire Research.

Prosjektet skal undersøke problemstillinger knyttet til varmespredning i ventilasjonskanaler, tetting av filter i ventilasjonsanlegg på grunn av røyk, effekten av steng inne-strategien med hensyn til trykkoppbygging i brannrommet og røykspredning gjennom utettheter i konstruksjonsdeler.

Dette er delrapport 1, som oppsummerer den relevante, brannfaglige teorien og forskningsfronten innen fokusområdet. Rapporten vil fungere som teoretisk grunnlag for forsøksplanleggingen og de øvrige aktivitetene i BRAVENT-prosjektet.

1.2 Målsetting

Prosjektets målsetting er å skaffe til veie dokumentasjon for behovet for å brannisolere ventilasjonskanaler, installere brannspjeld og bypass-kanaler. Hensikten er å optimalisere bruken av disse løsningene, og følgelig kostnadene forbundet med dem.

Målsettingen med denne deloppgaven var å:

1. Sammenstille et teoretisk grunnlag for de forsøkene og analysene som skal gjennomføres.
2. Kartlegge relevant regelverk for brannsikring av ventilasjonsanlegg.
3. Kartlegge standarder som ligger til grunn for å bestemme brannmotstand til komponenter som inngår i et ventilasjonsanlegg.
4. Kartlegge kunnskapsstatus vedrørende

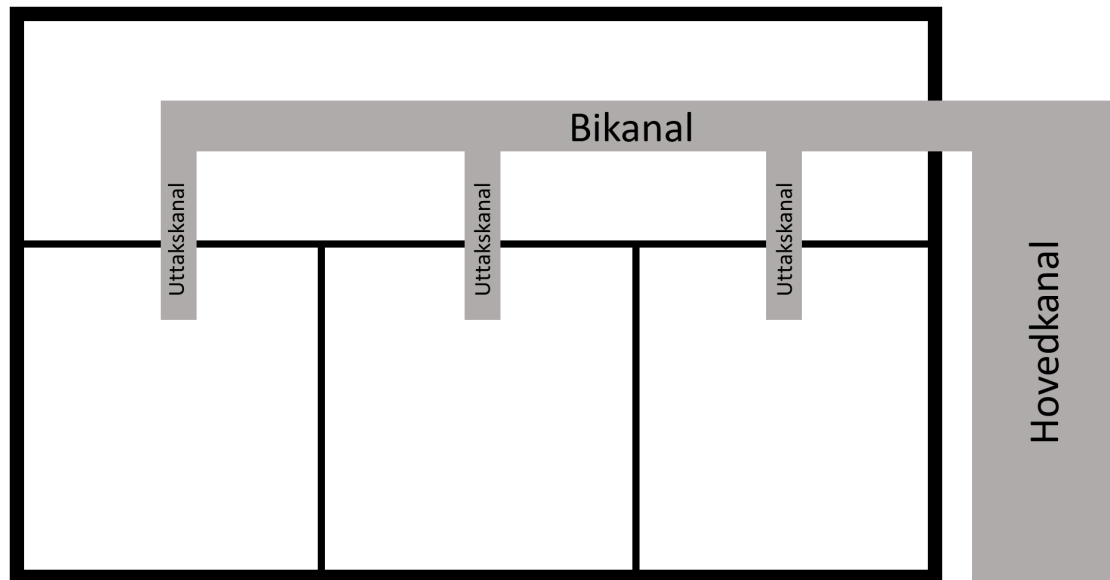
- a. behovet for å brannisolere ventilasjonskanaler.
- b. behovet for å installere bypass-kanaler for å hindre at filtersystemene tettes av røykpartikler.
- c. effekten av å installere brannspjeld i alle brannskillende konstruksjoner med hensyn til røykspredning.
- d. hvordan røyk kan spres via ventilasjonskanaler og utettheter i bygningskonstruksjonen.
- e. fordeler og ulemper med steng inne- og trekk-ut-strategiene.

1.3 Begrensninger

Prosjektet omfatter kun brannisolasjon av komfortventilasjonsanlegg. Kjøkkenventilasjon er derfor ikke inkludert som tema i denne rapporten.

2 Teori

2.1 Kanalbetegnelser



Figur 2-1 Skjematisk fremstilling av et tenkt avtrekkssystem, med betegnelser på de ulike typer ventilasjonskanaler.

I et ventilasjonssystem er det ulike typer kanaler som benyttes for ulike formål. Disse har forskjellige betegnelser, som vist i Figur 2-1. Figuren viser avtrekkskanaler for en etasje i et bygg. Fra hvert rom trekkes luft gjennom uttakskanaler (også tilluftskanaler kalles uttakskanal). Sirkulære uttakskanaler har en diameter i størrelsesorden 80 – 250 mm. I korridoren utenfor rommene ligger det gjerne en bikanal, som uttakskanalene fra de ulike rommene er tilkoblet. Bikanalene har diameter i størrelsesorden 160 – 400 mm. Bikanalene er igjen tilknyttet en hovedkanal, som har dimensjoner i størrelsesorden 400 – 1250 mm. Hovedkanalene forbinder ulike deler av etasjen og ulike etasjer.

2.2 Varmetransport

Det finnes tre måter for overføring av varme fra et objekt til et annet, se følgende underkapitler for flere detaljer:

- | | |
|-----------------------|---|
| Varmestråling: | Overføring av varme ved elektromagnetisk stråling ¹ . |
| Konveksjon: | Transport av varmeenergi når væsker eller gasser strømmer ¹ .
Kalles også varmestrømning. |
| Varmeledning: | Transport av varmeenergi i stoffer ¹ . |

¹ Ref: Kollegiet for brannfaglig terminologi, www.kbt.no

Varmeenergien fra en brann som omslutter en ventilasjonskanal vil overføres til kanalen via de ulike formene for varmetransport. Dette omfatter varmestråling fra flammene, konvektiv oppvarming fra den varme lufta som omslutter kanalen, konvektiv oppvarming fra varm røyk som er trukket inn i kanalen og varmeledning i kanalgodset.

Når kanalen er tilstrekkelig oppvarmet, kan det være fare for antennelse av nærliggende materialer. Varmeledning mellom kanal og brennbart materiale som er i direkte kontakt med kanalen utgjør den største faren for antennelse, og slik kontakt bør derfor unngås.

Foruten direkte kontakt kan antennelse skje ved varmestråling fra kanalens overflate til nærliggende brennbare materialer. Ettersom varmestrålingen er proporsjonal med temperaturen T opphøyd i fjerde potens (T^4), utgjør energien overført ved varmestråling et større bidrag enn energien overført ved konveksjon, som kun øker proporsjonalt med temperaturen.

For å hindre antennelse av brennbart materiale ved varmestråling og direkte kontakt, isoleres kanalene på utsiden. Dette kan også til en viss grad oppnås ved bruk av spjeld i brannskillet, som hindrer at branngassene trenger inn i ventilasjonskanalen i tilstøtende brannceller. Spjeld hindrer imidlertid ikke varmeledning i kanalgodset.

Det som er avgjørende for at en brann ikke skal spre seg til en tilstøtende branncelle, er overflatetemperaturen på ventilasjonskanalen eller på kanalisolasjonen i den tilgrensende branncellen, og avstanden til brennbart materiale. Lekkasje av branngasser via utettheter i kanalen eller kanalgjennomføringen, kan også svekke brannmotstanden.

2.2.1 Varmestråling

Varmestråling fra et objekt er gitt av ligning (2.1).

$$\dot{q}_s'' = \varepsilon \sigma T^4 \quad (2.1)$$

Der

$\dot{q}_s''$	er stråling per tid og areal [W/m^2]
ε	er emissiviteten til kanalen [-]
σ	er Stefan-Boltzmanns konstant, lik $5,67 \cdot 10^{-8} [\text{J s}^{-1} \text{m}^{-2} \text{K}^{-4}]$
T	er temperatur [K].

For å beregne hvor mye stråling som treffer et annet objekt, benytter man en faktor som kalles synsfaktor. Dette er en verdi mellom 0 og 1, og angir hvor stor del av synsfeltet til et objekt som dekkes opp av det strålende objektet. Synsfaktoren avtar med avstanden og vinkelen til det strålende objektet. Les mer om beregning av synsfaktor i kapittel 2.2.1.1 og 2.2.1.2.

Emissiviteten (ε), eller strålingsevnen, er forholdet mellom den energien som blir sendt ut fra et materiale i form av varmestraling, og den energien et svart legeme ved samme temperatur ville ha sendt ut.

Emissiviteten til en ventilasjonskanal avhenger blant annet av hvor blank kanalen er, som påvirkes om kanalgodset er galvanisert. I litteraturen finnes det en rekke ulike verdier. Vi har valgt ut de verdiene som oftest er angitt, og ytterpunktene blant dem er [54–57] som følger:

- Ny, galvanisert ventilasjonskanal $\varepsilon \sim 0,3$.
- Gammel, galvanisert ventilasjonskanal $\varepsilon \sim 0,8$.
- Ventilasjonskanal som har mistet galvaniseringen ved slitasje eller varme (f.eks. under brann) $\varepsilon \sim 0,8$.

I våre beregninger har vi benyttet emissivitet $\varepsilon = 0,8$.

2.2.1.1 Stråling fra ventilasjonskanal tilbake på vegg

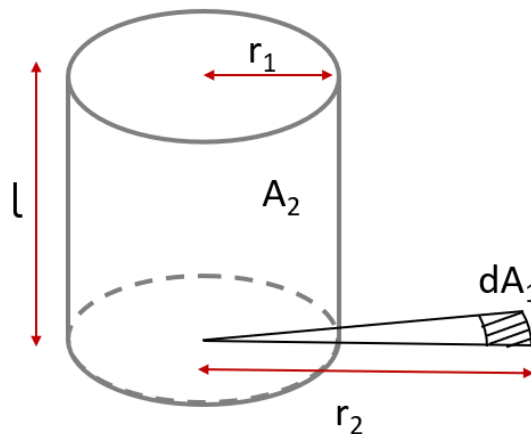
Strålingen fra en varm, uisolert kanal kan utgjøre en fare for at brennbare materialer på overflaten av vegg kanalen går igjennom kan begynne å brenne. Strålingen fra kanalen til et punkt på overflaten av vegg kan beregnes ved å ta hensyn til synsfaktoren til dette punktet.

Figur 2-2 viser en sylinder (ventilasjonskanal), kalt objekt 2. Maksimal innkommende stråling fra objekt 2 til et element på objekt 1 (vegg), som ligger vinkelrett på objekt 2, er gitt av formel (2.2) [58].

$$\dot{q}_s'' = F_{d1-2} \varepsilon_2 \sigma T_2^4 \quad (2.2)$$

Der

$\dot{q}_s''$	er maksimal innkommende stråling [W/m ²]
F_{d1-2}	er synsfaktoren [-]
ε_2	er emissiviteten til kanalen [-]
σ	er Stefan-Boltzmanns konstant, lik $5,67 \cdot 10^{-8}$ [J s ⁻¹ m ⁻² K ⁻⁴]
T_2	er kanalens temperatur[K]



Figur 2-2 Synsfaktor for element vinkelrett på kanal, f.eks. til et punkt på vegg som kanalen går gjennom. A_2 er arealet av kanalen, dA_1 er arealet til et materialelement på vegg.

Synsfaktoren til et element vinkelrett på en sylinder med gitt lengde l (Figur 2-2) er gitt av formel (2.3).

$$F_{d1-2} = \frac{1}{2\pi} \cos^{-1} R + \frac{1}{\pi} \left\{ \tan^{-1} \left[\frac{R}{\sqrt{1-R^2}} \right] - \frac{(1+L^2-R^2)}{X} \tan^{-1} \left[\frac{X \tan(0,5 \cos^{-1} R)}{1+L^2+R^2-2R} \right] \right\} \quad (2.3)$$

Der

F_{d1-2} er synsfaktoren [-]

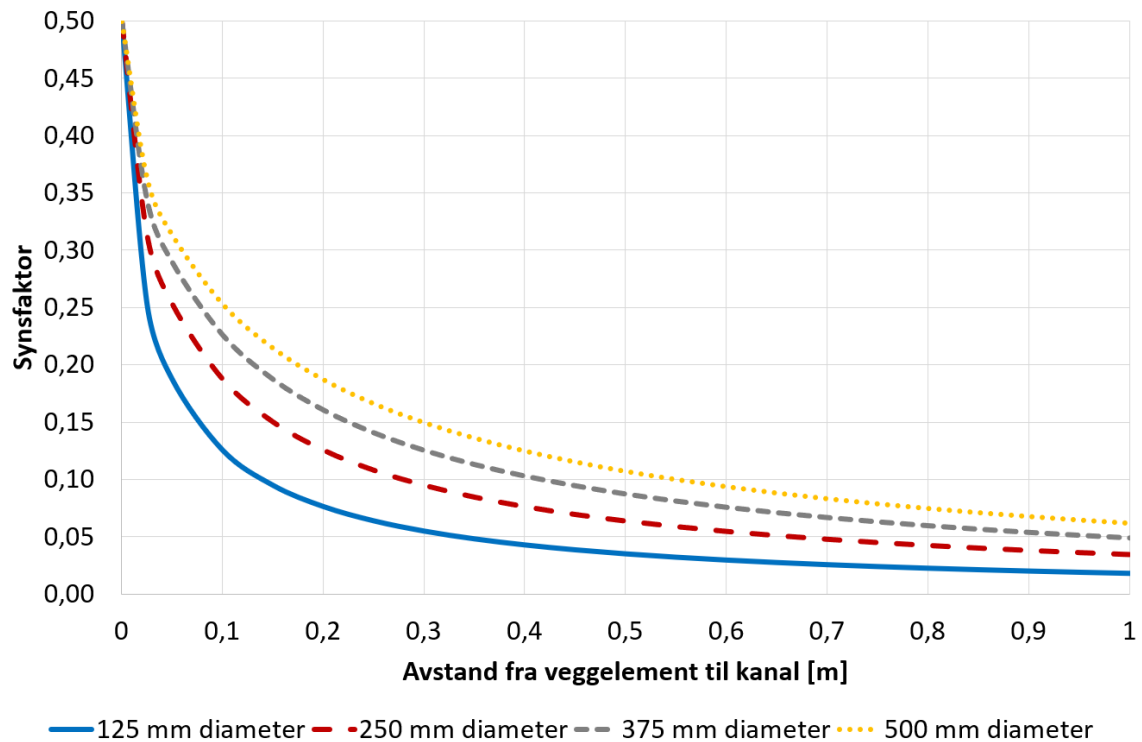
$R = r_1/r_2$

$L = l/r_2$

$X = \sqrt{((1+L^2+R^2)^2 + 4R^2)}$

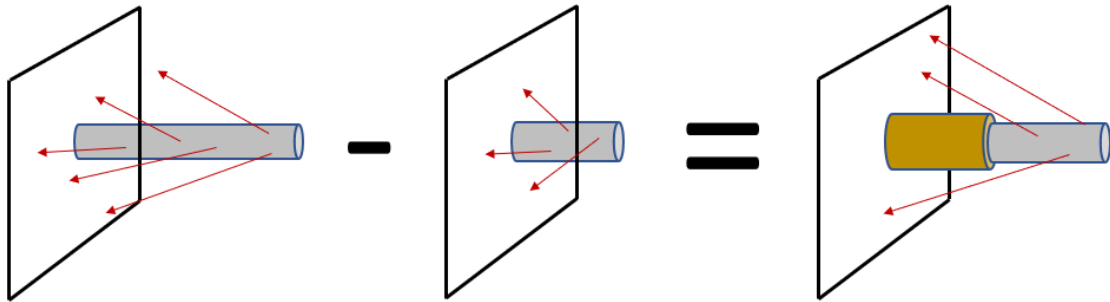
Figur 2-3 viser at den maksimale synsfaktoren er 0,5 når objektene ligger inntil hverandre, og reduseres deretter eksponentielt med økende avstand.

Maksimal synsfaktor er uavhengig av kanaldiameter, men reduseres raskere med avstanden for en kanal med mindre diameter enn for en kanal med større diameter, se Figur 2-3.



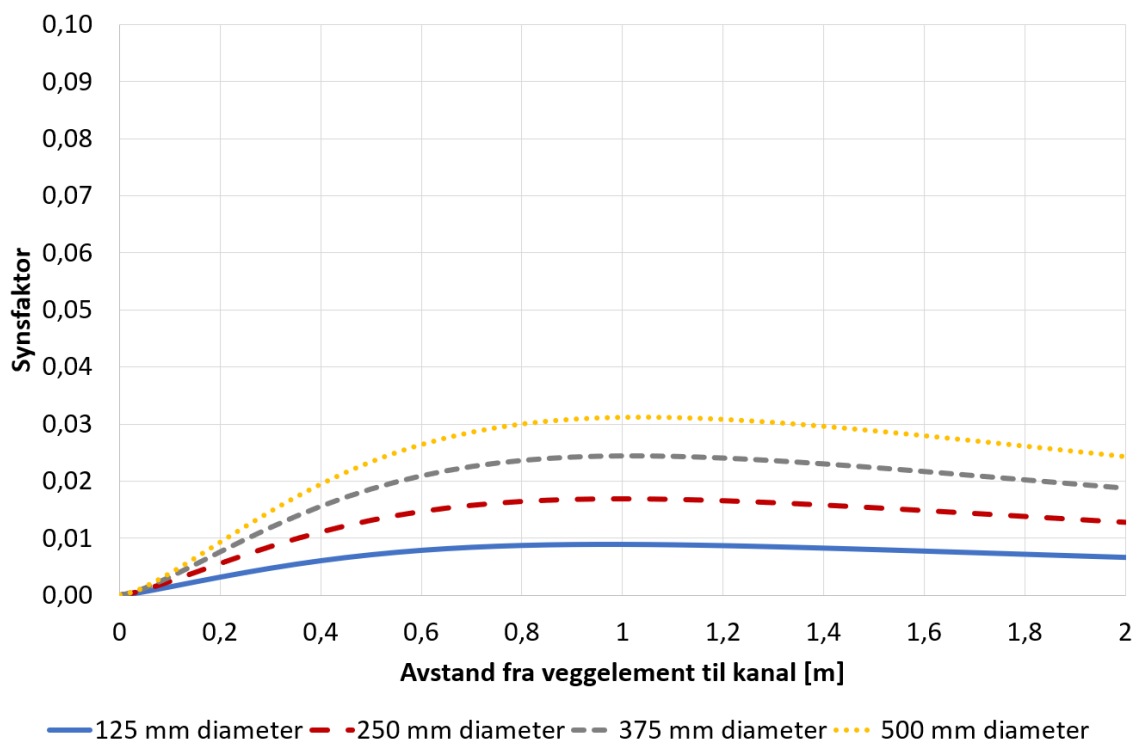
Figur 2-3 Synsfaktor for en 5,5 m lang uisolert kanal tilbake på vegg vinkelrett på kanalen. Diameter på kanalen er gitt i kurven.

I henhold til teknisk forskrift med veiledning fra 1997 [7] var det preakseptert å isolere ventilasjonskanaler 1 m på hver side av et brannskille. Synsfaktoren fra en ventilasjonskanal der den første delen er isolert, kan beregnes ved å finne synsfaktoren for en uisolert kanal med samme lengde, og trekke fra synsfaktoren for en kortere kanal lik lengden av isolasjonen. Dermed vil synsfaktoren til den uisolerte kanalen reduseres betraktelig. Dette er skissert i Figur 2-4 og beregnet i Figur 2-5.



Figur 2-4 Synsfaktoren fra den uisolerte delen av en delvis isolert kanal tilbake på et veggelement kan beregnes som differansen mellom synsfaktoren til hele den uisolerte kanalen og synsfaktoren til en uisolert kanal med lengde lik isolasjonen.

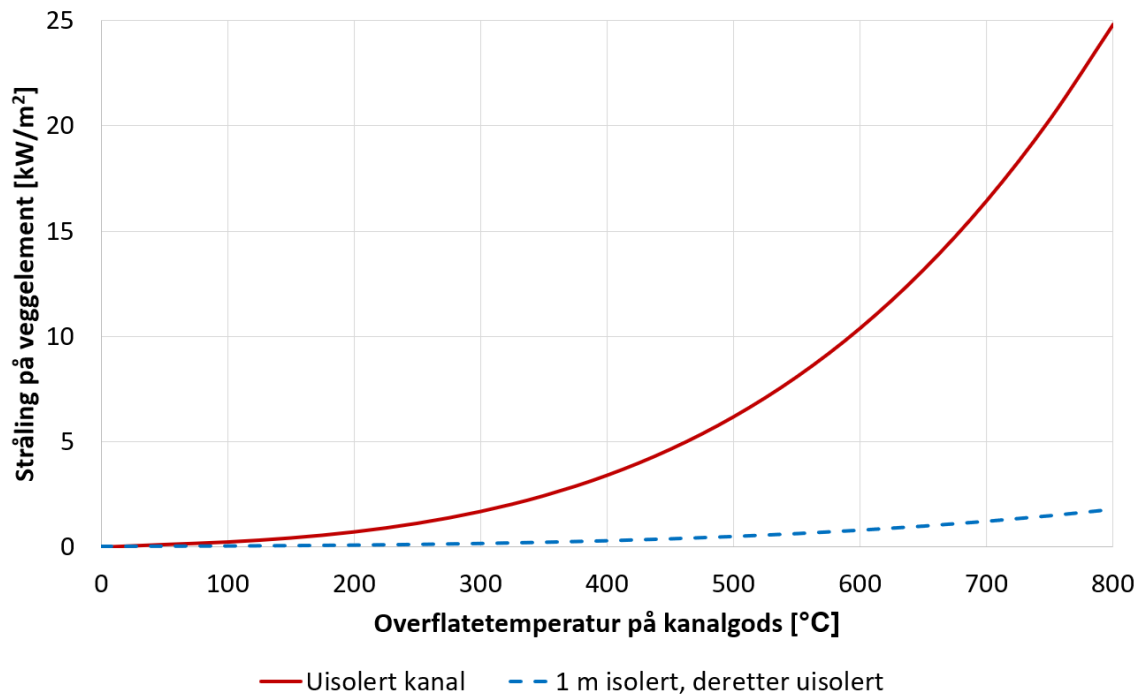
Figur 2-5 viser at synsfaktoren øker med ventilasjonskanalens diameter, og har sin maksimale verdi ved ca. 1 m avstand fra kanalen.



Figur 2-5 Synsfaktor for et veggelement mot en 5,5 m ventilasjonskanal der den første meteren er isolert, deretter er kanalen uisolert.

Ved beregning av varmekraft på veggen må det også tas hensyn til at overflaten på isolasjonen kan få en viss temperaturøkning, og vil bidra til den totale strålingen fra kanalen til veggen. Ettersom isolasjonen som benyttes har vist gjennom tester (NS - EN 1366-1:2014 [38]) at maksimal gjennomsnittstemperatur vil være mindre enn 160 °C, vil ikke den isolerte delen av kanalen bidra stort.

Figur 2-6 viser forskjellen i strålingsintensitet når en kanal er uisolert i forhold til om den første meteren av kanalen er isolert.

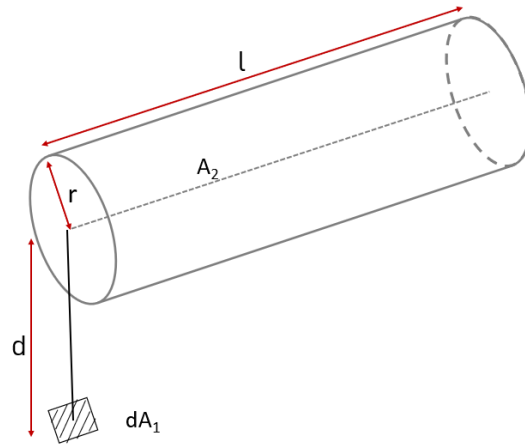


Figur 2-6 Strålingsnivå på et vegglement der kanalen er uisolert og der kanalen har den første meteren isolert, deretter uisolert. Det er benyttet en synsfaktor på 0,5 og 0,03 for henholdsvis uisolert og isolert kanal. Emissiviteten er for begge tilfeller lik $\epsilon = 0,8$.

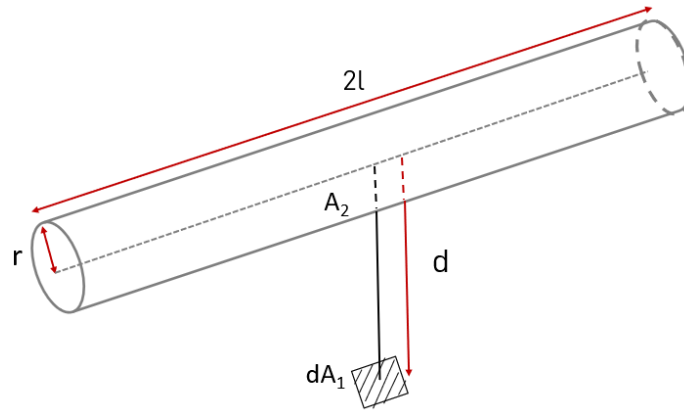
2.2.1.2 Stråling fra kanal til et materiale parallelt med kanalen

Synsfaktoren (F_{d1-2}) [59] for et objekt plassert parallelt med en kanal, er gitt av ligning (2.4) og skissert i Figur 2-7 og Figur 2-8. Figur 2-9 viser hvordan synsfaktoren endres med avstanden fra kanalen, og med kanalens diameter.

Synsfaktoren kan benyttes for å finne stråling fra en kanal mot nærliggende objekter. Dersom objektet det stråles på har en kanal på begge sider dobles synsfaktoren ved symmetri, som vist i Figur 2-8.



Figur 2-7 Synsfaktoren for elementet dA_1 parallelt med en kanal er gitt av ligning (A.4). Merk at her har elementet kun kanal på den ene siden.



Figur 2-8 Synsfaktoren for elementet dA_1 parallelt med en kanal. Merk at her har elementet kanal på begge sider, og synsfaktoren dobles ved symmetri i forhold til Figur 2-7.

$$F_{d1-2} = \frac{1}{\pi H} \tan^{-1} \frac{L}{\sqrt{H^2 - 1}} + \frac{L}{\pi} \left[\frac{(X - 2H)}{H\sqrt{XY}} \tan^{-1} \sqrt{\frac{X(H-1)}{Y(H+1)}} - \frac{1}{H} \tan^{-1} \sqrt{\frac{H-1}{H+1}} \right] \quad (2.4)$$

Der

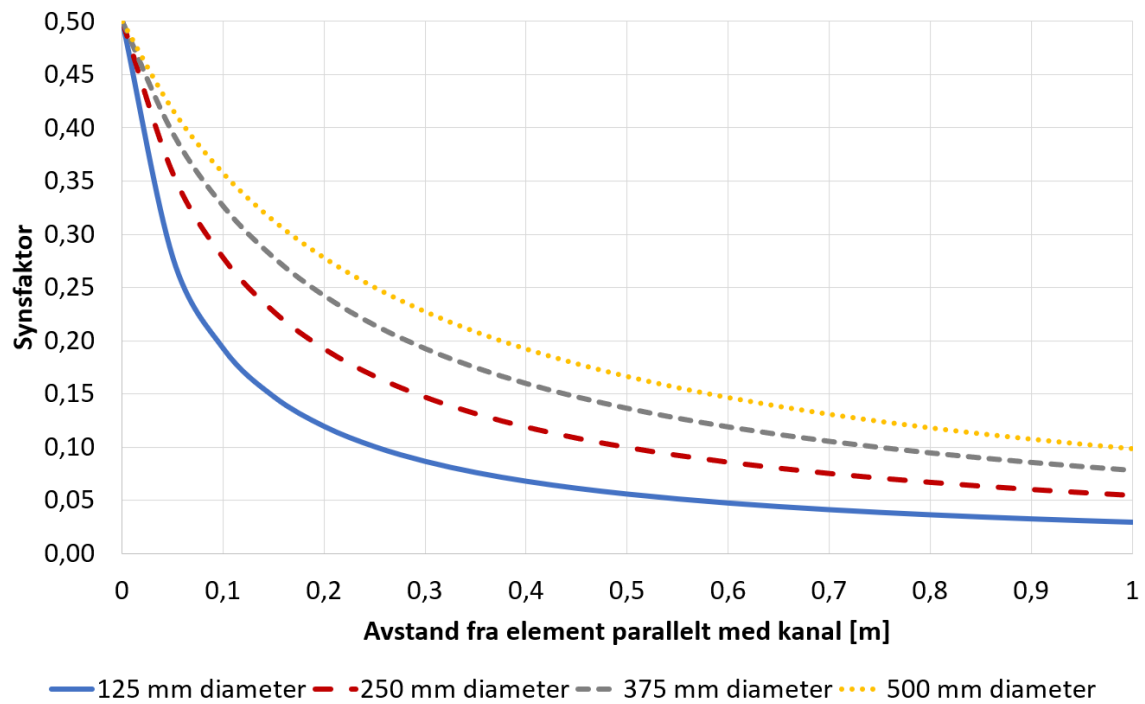
F_{d1-2} er synsfaktoren [-]

$$H = d/r$$

$$L = l/r$$

$$X = (1 + H)^2 + L^2$$

$$Y = (1 - H)^2 + L^2$$



Figur 2-9 Synsfaktor for et element parallelt med en kanal (med kanal på en side, som vist i Figur A-6) som funksjon av avstanden til kanalens overflate. Dersom det er kanal på begge sider, må synsfaktoren dobles.

I Tabell 2-1 er det angitt synsfaktorer for ulike kanaldiametere og ved ulike avstand fra kanalen. Tabell 2-2 viser strålingsnivået fra en uisolert kanal på et punkt normalt på kanalen i 10 cm avstand.

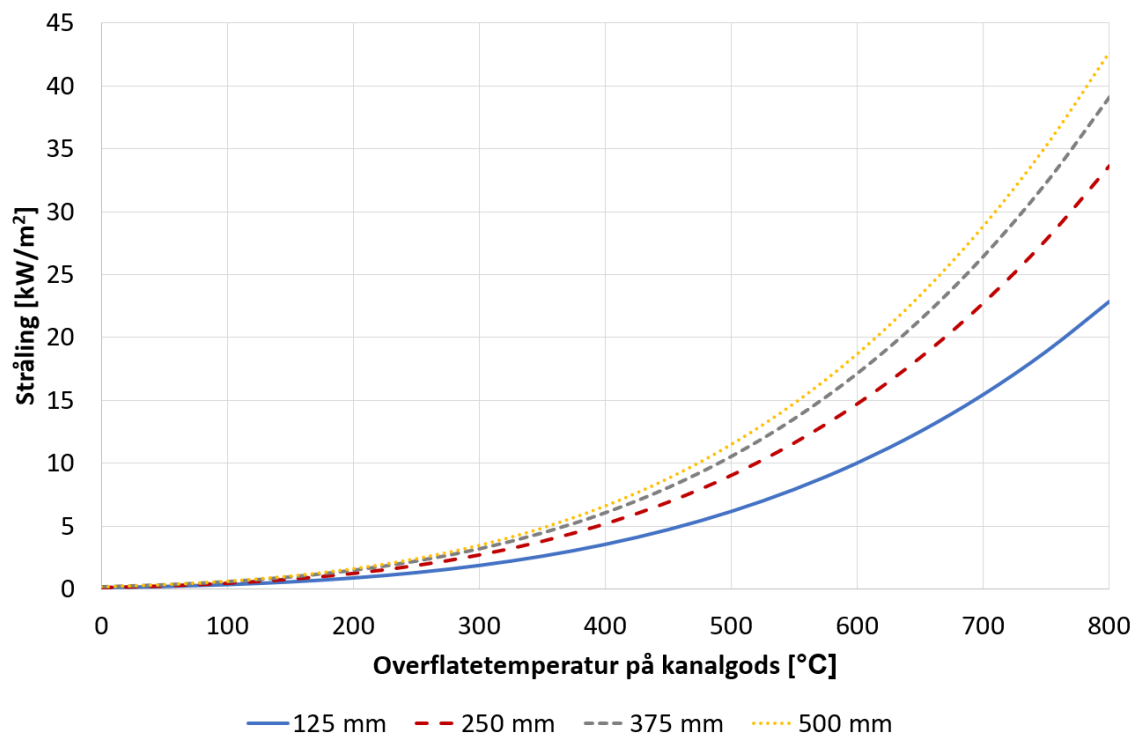
Tabell 2-1 Synsfaktor for et element normalt på en kanal (med kanal på begge sider), som vist i Figur 2-8.

Kanal diameter	Avstand fra kanal				
	50 mm	100 mm	150 mm	200 mm	250 mm
125 mm	0,56	0,38	0,29	0,24	0,20
250 mm	0,71	0,56	0,45	0,38	0,33
375 mm	0,79	0,65	0,56	0,48	0,43
500 mm	0,83	0,71	0,62	0,56	0,50

Tabell 2-2 Stråling fra en uisolert kanal på et punkt normalt på kanalen i 10 cm avstand.

Overflate-temperatur på kanal [°C]	Varmefluks [kW/m ²], gitt emissivitet $\varepsilon = 0,8$			
	Diameter			
	125 mm	250 mm	375 mm	500 mm
350	2,6	3,8	4,4	4,9
400	3,5	5,2	6,0	6,6
450	4,7	6,9	8,1	8,8
500	6,2	9,1	10,5	11,5
550	7,9	11,7	13,5	14,8
600	10,0	14,8	17,1	18,7
650	12,5	18,4	21,4	23,4
700	15,4	22,8	26,4	28,9
750	18,9	27,8	32,3	35,3

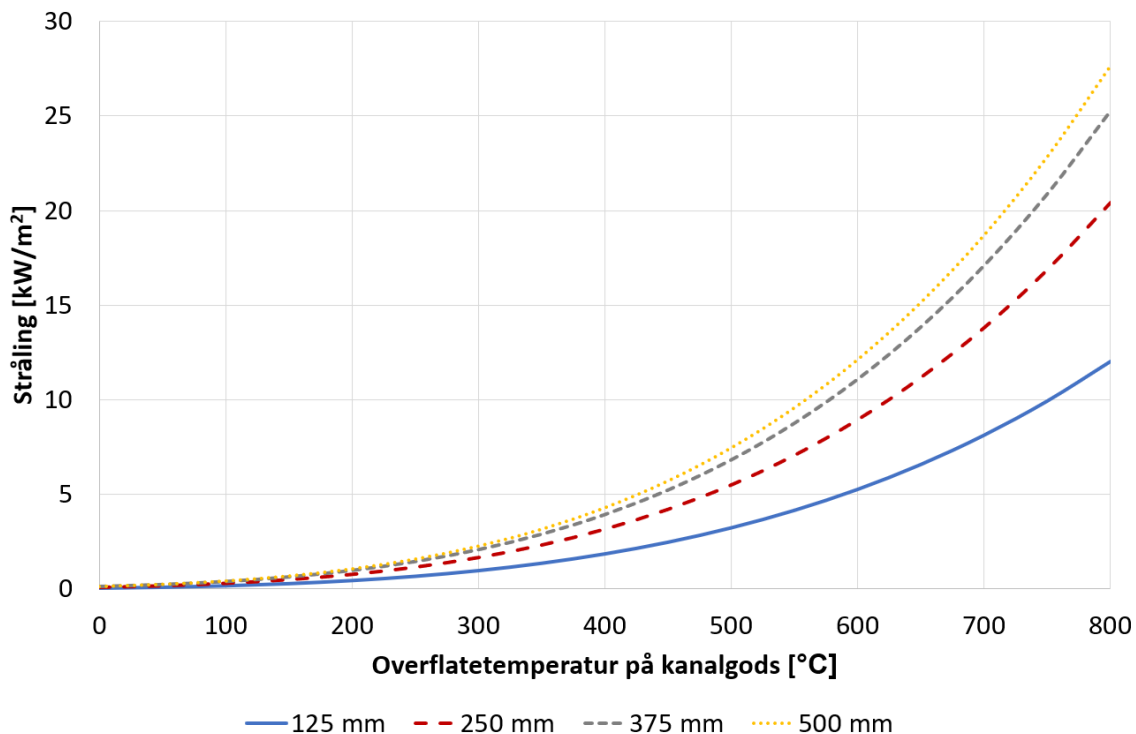
Strålingsverdier kan da beregnes med ligning (2.2). Strålingsverdier ved 10 og 25 cm er gitt i henholdsvis Tabell 2-3 og Tabell 2-4.



Figur 2-10 Stråling på materialelement normalt på uisolert kanal. I beregningene er det benyttet en emissivitet lik $\epsilon = 0,8$ og en avstand på 10 cm, noe som gir synsfaktor 0,38, 0,56, 0,65 og 0,71 for henholdsvis 125 mm, 250 mm, 375 mm og 500 mm kanaldiameter.

Tabell 2-3 Stråling fra en uisolert kanal på et punkt normalt på kanalen i 25 cm avstand.

Overflate- temperatur på kanal [°C]	Varmefluks [kW/m ²], gitt emissivitet $\varepsilon = 0,8$			
	Diameter			
	125 mm	250 mm	375 mm	500 mm
350	1,4	2,3	2,9	3,4
400	1,9	3,1	4,0	4,7
450	2,5	4,1	5,3	6,2
500	3,2	5,3	7,0	8,1
550	4,2	6,9	8,9	10,4
600	5,3	8,7	11,3	13,2
650	6,6	10,9	14,2	16,5
700	8,1	13,4	17,5	20,3
750	9,9	16,4	21,4	24,8



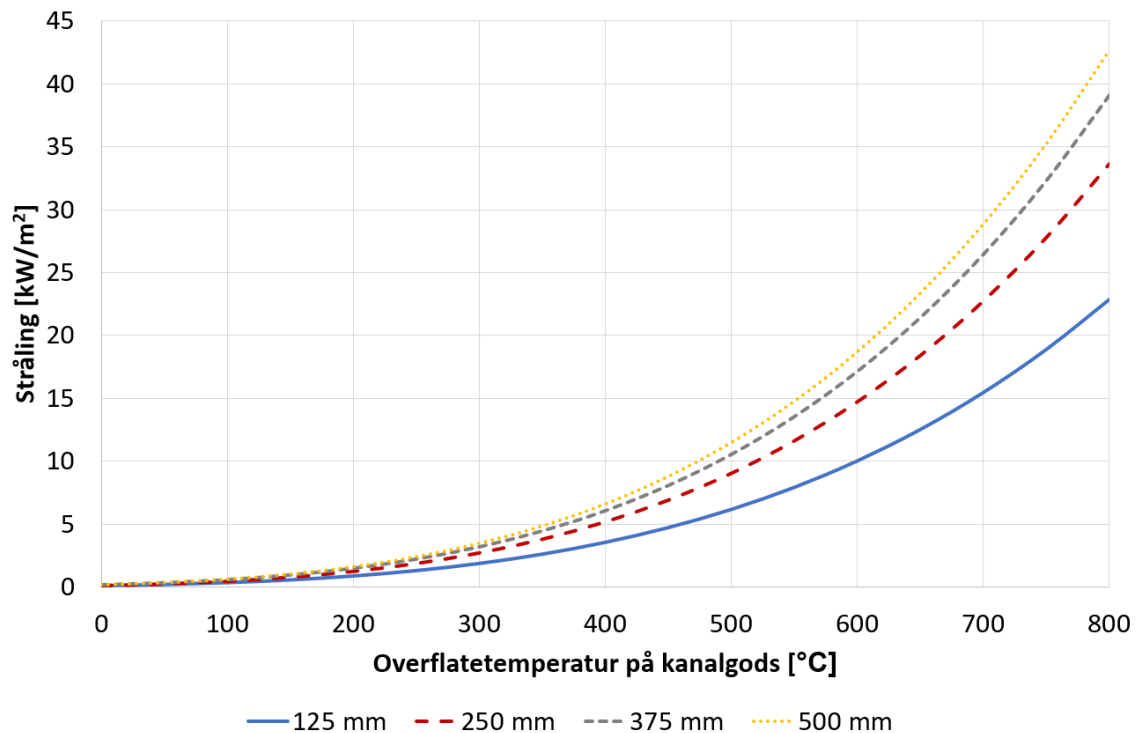
Figur 2-11 Stråling på materialelement normalt på uisolert kanal. I beregningene er det benyttet en emissivitet lik 0,8 og en avstand på 25 cm som gir synsfaktor 0,20 , 0,33 , 0,43 og 0,50 for henholdsvis 125 mm, 250 mm, 375 mm og 500 mm kanal.

Tabell 2-3 og Tabell 2-4 viser at maksimal stråling på et punkt avtar med økende avstand til kanalen, og øker med økende kanaldiameter. For en ventilasjonskanal med diameter 250 mm og emissivitet $\varepsilon = 0,8$, og kritisk grense for antennelse av brennbart materiale er 10 kW/m^2 , kan ventilasjonskanalen ha en overflatetemperatur på ca. 630°C dersom brennbart materiale befinner seg i en avstand på 25 cm. Hvis avstanden reduseres til 10 cm kan overflatetemperaturen være ca. 500°C .

Dersom kanalen er innelukket i et lite volum, vil omgivelsestemperaturen kunne øke betydelig, og bidra til oppvarming av brennbart materiale. Strålingen fra kanalen vil imidlertid utgjøre den største delen av varmeoverføringen.

2.2.1.3 Kritisk varmekraft

For at brennbart materiale med en viss avstand til en ventilasjonskanal skal spontanantenne på grunn av varmestråling, må den innkommende strålingen til materialet overstige en kritisk varmekraft. Kritisk varmekraft vil variere basert på type materiale og om materialet kan anses som termisk tykt eller tynt, og også med hensyn til testmetoden som er brukt for å finne kritisk kraft [12,13]. Kritisk varmekraft for antennelse av brennbare materialer som ofte befinner seg i et bygg er ca. 10 kW/m^2 eller høyere. Innkommende stråling fra en kanal til et materiale avtar med økende avstand til kanalen, og øker med økende diameter på kanalen. Figur 2-12 viser maksimalt innkommende stråling på et materialelement med 100 mm avstand fra en kanal ved ulike overflatetemperaturer og kanalstørrelser.



Figur 2-12 Stråling på materialelement parallelt med en uisolert kanal. I beregningene er det benyttet en emissivitet lik 0,8 og en avstand på 100 mm, noe som gir synsfaktorer på 0,38, 0,56, 0,65 og 0,71 for henholdsvis 125 mm, 250 mm, 375 mm og 500 mm kanaldiameter.

Kritisk varmekraft for antennelse for ulike materialer hentet fra Tabell A.35 i SFPE Handbook of Fire Protection Engineering [13], og gjengitt i Tabell 2-4.

Tabell 2-4 Kritisk varmekraft for enkelte materialer [13]

Material	Kritisk varmekraft [kW/m²]
Trevirke	10
Polyetylen	15
Polypropylen	10 – 15
Polystyren	13
Polyuretan	13 – 40
Polykarbonat	15
PVC	13 - 15
Polyester	10 – 15

2.2.2 Konveksjon

Når varm luft passerer gjennom en ventilasjonskanal varmes kanalen opp ved konveksjon. Varmer overføres via konveksjon når fluider (væske eller gass) er i kontakt med en overflate med ulik temperatur. Det skilles mellom *naturlig konveksjon*, som oppstår ved temperaturforskjeller, og *tvungen konveksjon*, der fluiders bevegelser er styrt av en vifte. Konveksjonen styres av temperaturdifferansen mellom fluidet og overflaten, i tillegg til en konveksjonsfaktor, h , og kan beregnes ved bruk av ligning (2.5).

$$\dot{q}_k'' = h(T_g - T_s) \quad (2.5)$$

Der

- $\dot{q}_k''$ er varmetransporten ved konveksjon per tid og areal [W/m^2]
- h er konveksjonsfaktoren [$\text{W}/(\text{m}^2 \text{ K})$]
- T_g er røykgasstemperaturen [K]
- T_s er kanalgodstemperaturen

h kan beregnes ved å inkludere konduktiviteten til luft, viskositeten til luft, lufthastigheten, og om det er en laminær eller turbulent luftstrøm.

2.2.3 Varmedledning

Varmer vil overføres fra et område med høy temperatur til et område med lavere temperatur, se ligning (2.6). Varmemengden som overføres er gitt av temperaturforskjellen, tykkelsen på materialet og varmedledningsevnen til materialet.

$$\dot{q}_l'' = -k \frac{\partial T}{\partial x} \approx -k \frac{\Delta T}{\Delta x} \approx -\frac{k}{d}(T_1 - T_2) \quad (2.6)$$

Der

- $\dot{q}_l''$ er varmeoverføring per tid og areal [W/m^2]
- k er varmedledningsevnen til materialet [$\text{W}/(\text{m K})$]
- T er temperaturen [K]
- T_1 er temperaturen ved punkt 1 [K]
- T_2 er temperaturen ved punkt 2 [K]
- d er avstanden mellom punktene med temperatur T_1 og T_2 [m]

Ettersom vi antar at ingen brennbare materialer er i direkte kontakt med uisolerte stålskanaler, behandles ikke varmedledning ytterligere i denne rapporten.

2.3 Temperatur og massetetthet

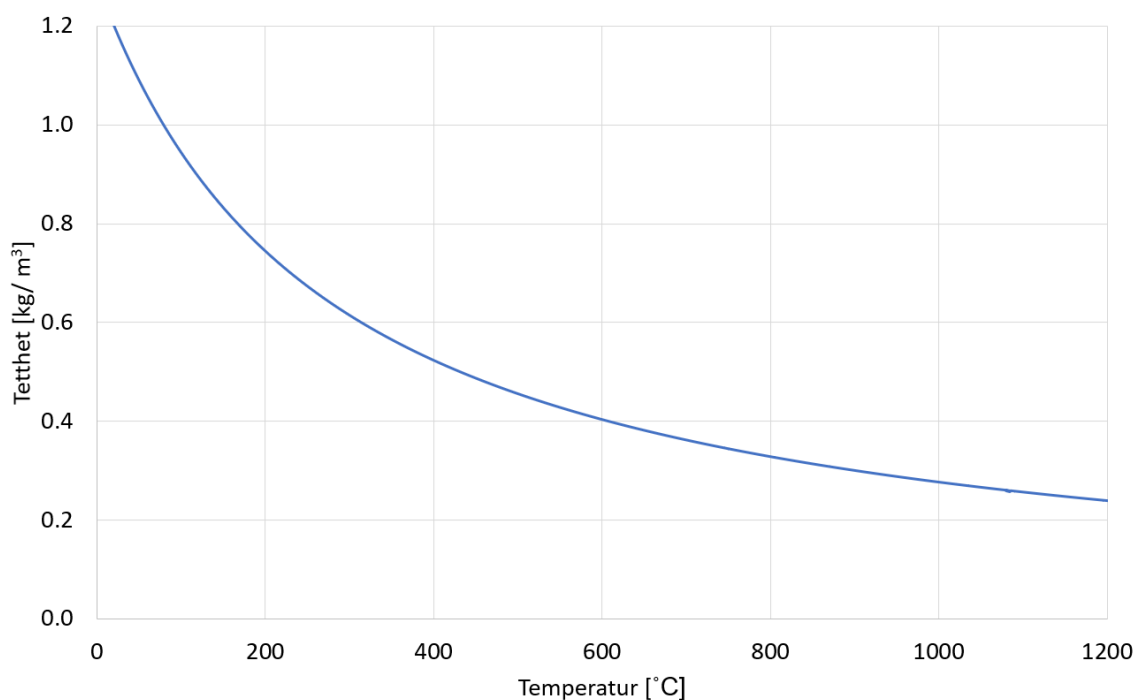
Sammenheng mellom tetthet og temperatur kan utledes fra ideell gasslov, og er som følger:

$$\rho = \frac{\Delta p}{RT} \quad (2.7)$$

Der:

- ρ er tettheten for tørr luft [kg/m^3]
- Δp er lufttrykket [Pa], ved normale forhold er trykket 101 325 Pa.
- T er temperatur [K].
- R er den spesifikke gasskonstanten, lik 287 for tørr luft [$\text{J}/(\text{kgK})$]

Figur 2-13 viser sammenhengen mellom temperatur og tetthet for tørr luft.

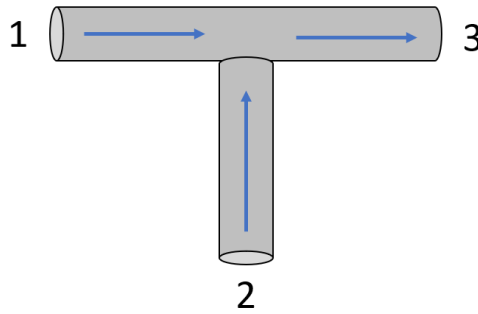


Figur 2-13 Sammenhengen mellom temperatur og tetthet for tørr luft.

2.4 Blanding av luftstrømmer med ulike temperaturer

I større ventilasjonsanlegg trekkes luft ut fra ulike brannceller gjennom uttakskanaler, før lufta samles og blandes i bikanalene. I tilfelle brann vil derfor varm luft fra brannen blandes med kald luft fra andre rom. For å beregne temperaturen for en slik luftblanding

må det settes opp en energibalanse basert på massestrøm, som vist i ligning (2.8), heretter kalt *massestrømsformelen*. Energibalansen er satt opp for eksempelet vist i Figur 2-14.



Figur 2-14 Eksempel hvor luftstrømmer fra kanal 1 og 2 samles og blandes i kanal 3.

Energibalanse for luft som blandes kan uttrykkes som følger:

$$\rho_1 q_1 T_1 c_{p_1} + \rho_2 q_2 T_2 c_{p_2} = \rho_3 q_3 T_3 c_{p_3} \quad (2.8)$$

Der

- c_p er den spesifikke varmekapasiteten til luft ved konstant trykk [kJ/kg K]
- q er volumstrøm [m³/h]
- T er temperatur [K]
- ρ er lufttettheten [kg/ m³]

Uttrykket, løst for blandingstemperaturen T_3 , blir da:

$$T_3 = \frac{\rho_1 q_1 T_1 c_{p_1} + \rho_2 q_2 T_2 c_{p_2}}{q_3 \dot{V}_3 c_{p_3}} \quad (2.9)$$

Den spesifikke varmekapasiteten til den blandede lufta er gitt av masseforholdet til luftvolum 1 og 2 i forhold til massen til det samlede volumet 3, som vist i ligning (2.10).

$$c_{p_3} = \frac{m_1}{m_3} c_{p_1} + \frac{m_2}{m_3} c_{p_2} = \frac{\rho_1 q_1}{\rho_3 q_3} c_{p_1} + \frac{\rho_2 q_2}{\rho_3 q_3} c_{p_2} \quad (2.10)$$

Ved å sette ligning (2.10) inn i (2.9), blir ligningen for blandingstemperatur redusert på følgende måte:

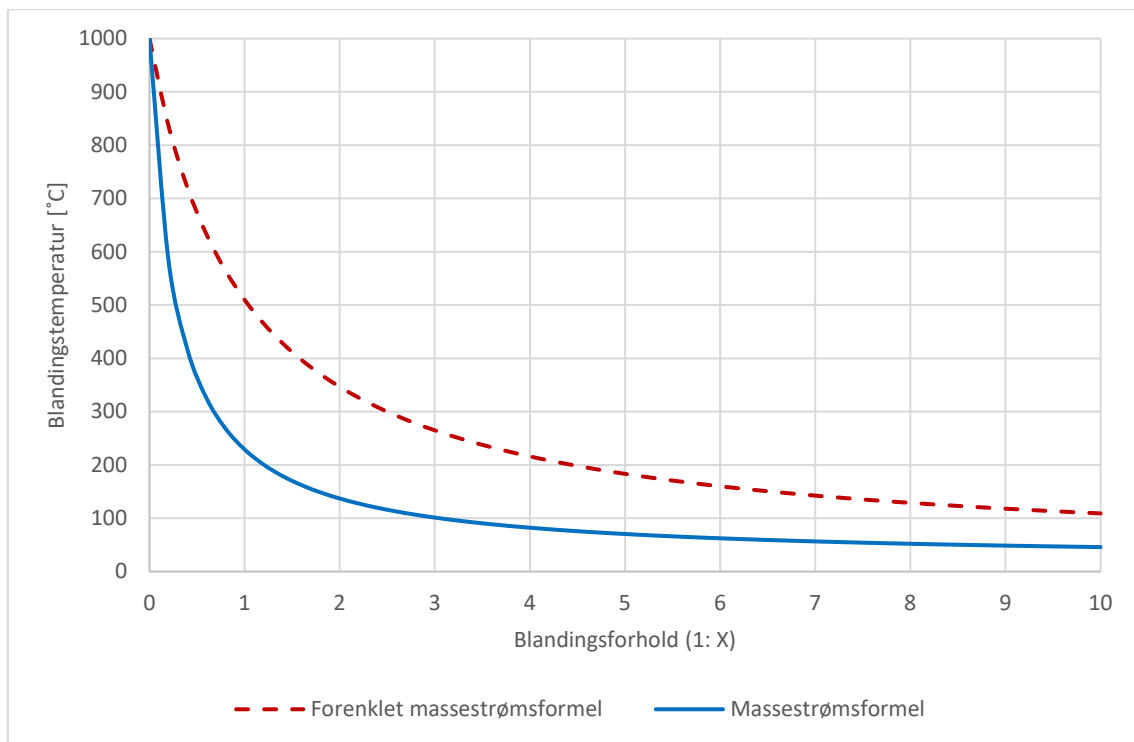
$$T_3 = \frac{\rho_1 \dot{q}_1 T_1 c_{p1} + \rho_2 \dot{q}_2 T_2 c_{p2}}{\rho_3 \dot{V}_3 \left(\frac{\rho_1 \dot{q}_1}{\rho_3 \dot{q}_3} c_{p1} + \frac{\rho_2 \dot{q}_2}{\rho_3 \dot{q}_3} c_{p2} \right)} \quad (2.11)$$

$$= \frac{\rho_1 \dot{q}_1 T_1 c_{p1} + \rho_2 \dot{q}_2 T_2 c_{p2}}{\rho_1 \dot{q}_1 c_{p1} + \rho_2 \dot{q}_2 c_{p2}} \quad (2.12)$$

I SINTEF Byggforsks bygghetallblad 520.352 benyttes en forenklet ligning for å beregne blandingstemperaturen (se ligning (3.1) i kapittel 3.3). Denne ligningen tar ikke hensyn til at luft har forskjellig varmekapasitet ved ulike temperaturer, og vil gi et avvik i forhold til massestrømsformelen. Å benytte en forenklet ligning kan være hensiktsmessig når man beregner blandingstemperatur for to strømmer med relativt like temperaturer, men ved store temperaturforskjeller vil det gi et vesentlig avvik.

Figur 2-15 sammenligner de to nevnte måtene å beregne blandingstemperaturer på. I sammenligningen blandes luft med temperatur $T_1 = 1000 \text{ }^\circ\text{C}$, tetthet $\rho_1 = 0,28 \text{ kg/m}^3$ og varmekapasitet $c_{p1} = 1,005 \text{ kJ/(kg K)}$ med luft med temperatur $T_2 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, tetthet $\rho_2 = 1,20 \text{ kg/m}^3$ og varmekapasitet $c_{p2} = 1,190 \text{ kJ/(kg K)}$.

Figuren viser at den forenklete ligningen (rød, stiplet linje) gir et konservativt avvik forhold til massestrømsformelen (blå, heltrukken linje).



Figur 2-15 Sammenligning av ulike formler for å beregne blandingstemperatur når én del luft med temperatur $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ blandes med X deler luft med temperatur $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

2.5 Brannutviklingshastighet og -varighet

Brannutviklingen kan foregå ved ulike hastigheter, avhengig av ulike faktorer, eksempelvis tilgang på oksygen eller brensel. En generell måte å presentere brannutviklingen på, er vist i ligning (2.13) som angir hastigheten for varmeavgivelse Q som funksjon av tiden t fram til maksimal varmeeffekt [11].

$$Q(t) = \alpha t^2 [W] \quad (2.13)$$

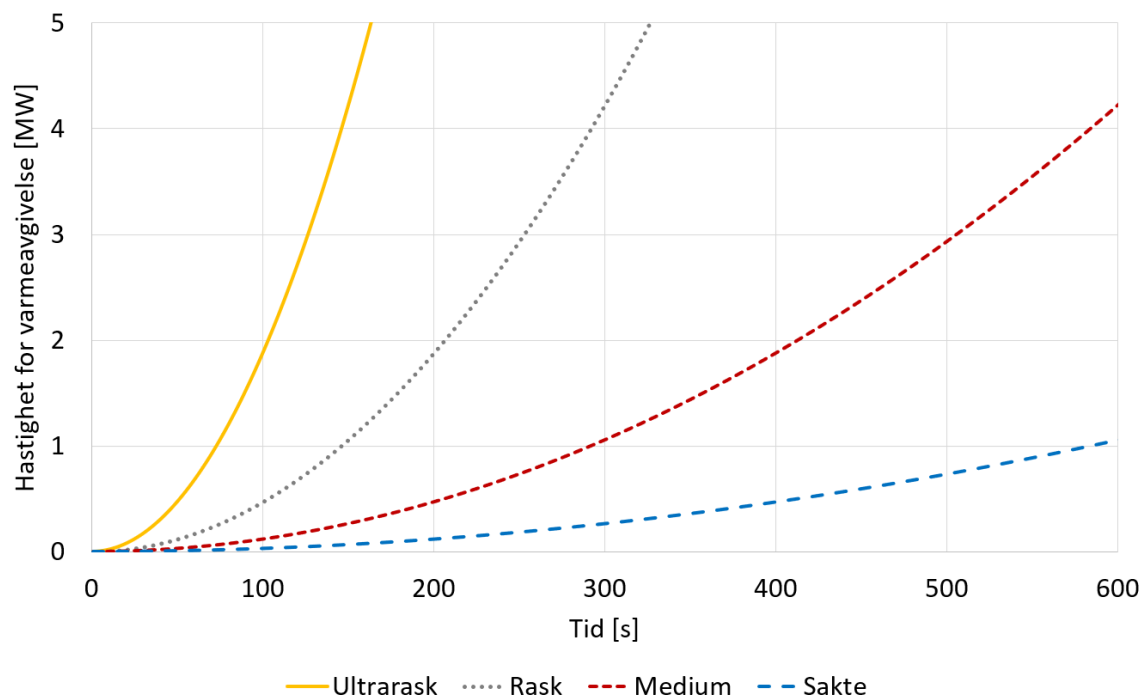
Der

- Q er hastighet for varmeavgivelse [W]
- α er en konstant for en gitt brannutvikling [kW/s^2]
- t er tiden fra brannstart [s]

Følgende parametere er vanlige for å beskrive de ulike variantene av brannutvikling [12]:

- α (sakte brannutvikling) = $0,00293 \text{ kW/s}^2$
- α (medium brannutvikling) = $0,01172 \text{ kW/s}^2$
- α (rask brannutvikling) = $0,04690 \text{ kW/s}^2$
- α (ultrarask brannutvikling) = $0,18760 \text{ kW/s}^2$

Hastigheten for varmeavgivelsen $Q(t)$ for disse variasjonene av α er vist i Figur 2-16.



Figur 2-16 Hastigheter for varmeavgivelse for sakte, medium, rask og ultrarask brannutvikling.

Når det gjelder spredning av røyk i ventilasjonskanaler, er det interessant å studere brannens tidlige forløp, da det er i denne fasen faren for overtrykk i brannrommet, og følgelig røykspredning, er størst. Denne fasen er antatt å vare frem til et vindu knuses og overtrykket utlignes, eller til at oksygennivået i rommet har nådd ca. 10 % og brannveksten avtar på grunn av oksygenmangel. Tiden til en av disse to hendelsene inntreffer kan beregnes ved hjelp av ligning (2.14), som er utledet med bakgrunn i regresjonsanalyser [13].

$$t_{\text{stop}} = 20V^{0,313}\alpha^{-0,33} \quad (2.14)$$

Der

t_{stop} er tiden fra brannstart til vindu knuses eller oksygennivået har nådd ca. 10 % [s]

V er volum av brannrommet [m^3]

α er en konstant for en gitt brannutvikling [kW/s^2]

2.6 Trykkoppbygging og røykspredning ved brann i rom

For at røykspredning skal finne sted i en bygning, må følgende faktorer være oppfylt:

- Det må være lekkasjeåpninger mellom rommene i bygningen.
- Det må være trykkforskjeller mellom rom med røyk og rom uten røyk.

Røykgasser strømmer fra områder med høyt trykk til områder med lavt trykk. Størrelsen på denne trykkdifferansen er derfor viktig for omfanget av røykspredningen og hvor rask røykspredningen skjer. Store trykkdifferanser kan forårsake stor røykspredning og stor røykspredningshastighet.

For at røyken skal kunne spres ut fra brannrommet, må det finnes lekkasjeåpninger mellom rommene. Slike åpninger kan være direkte røykspredningsveier, slik som åpne dører, korridorer, trappesjakter, eller indirekte røykspredningsveier som utettheter i forbindelse med dører, og i områder hvor vegger og tak eller gulv møtes.

Trykkforskjellene, sett bort i fra trykkforskjeller generert av atmosfæriske trykkforhold, kan deles opp i to kategorier:

1. Årsaker til trykkforskjeller forårsaket av brannen:

- Termisk oppdriftskraft
- Forhindret termisk ekspansjon av branngassene

2. Årsaker til normale trykkforskjeller:

- Skorsteinseffekt på grunn av forskjeller i temperatur mellom ute- og inneluften

- Vind
- Ventilasjon (mekanisk ventilasjon og naturlig ventilasjon)

I en brann vil de to drivkreftene nevnt under punkt 1 forårsake den største trykkoppbyggingen i brannrommet, men vindeffekten kan også bli betydelig dersom vinden er sterk nok. Skorsteinseffekten kan også bli betydelig i høye bygninger med sjakter, slik som trappe-, ventilasjons- og kabelsjakter, og ved store temperaturforskjeller. Alle disse drivkreftene vil bidra til den total trykkoppbyggingen i rommet. Noen av disse drivkreftene vil virke i samme retning og forsterke overtrykket, mens andre vil motarbeide hverandre, slik at trykkforskjellene mer eller mindre utlignes.

For en flammebrann i relativt høye hus vil som regel alle disse mekanismene være tilstede, mens skorsteinseffekten vil være relativt ubetydelig i lavere bygninger. Ved ulmebranner, som utvikler relativt mye, men relativt kald røyk, vil oppdriften og ekspansjonen være neglisjerbar. Det vil den også være ved flammebrann, hvor røyken er blitt avkjølt på grunn av varmetap og innblanding av kald omgivelsesluft.

Når varm røyk strømmer gjennom sprekker eksempelvis rundt dører, vil luftinnblanding på den andre siden forårsake en rask nedkjøling av røyken. Hvis røyken derimot strømmer gjennom større åpninger, slik som en åpen dør, vil det på grunn av en større røykmengde bli mindre luftinnblanding, og dermed en langsommere avkjøling av røykgassene. Når brannrøyk spres via kanaler og sjakter, vil det bli en ubetydelig luftinnblanding i røyken, og dermed liten nedkjøling av røyken. Når røyken fra en flammebrann er nedkjølt tilstrekkelig, vil røyken spres ved hjelp av de samme mekanismer som røyk fra en ulmebrann, og røykspredningen blir neglisjerbar.

2.6.1 Trykkoppbygging og røykspredningsmekanismer

2.6.1.1 Forhindret termisk ekspansjon av branngassene

Når lufta i et rom varmes opp, øker trykket, og lufta vil presses ut gjennom tilgjengelige åpninger. Trykkøkningen vil være et forhold mellom hvor rask brannutviklingen er, rommets volum og hvor store avlastningsflater (lekkasjer) det er. Perioden med høyt trykk vil normalt vare i noen minutter, men dette vil kunne variere med brannutviklingen. Maksimalt trykk vil inntreffe i løpet av brannvekstfasen [14]. Når all lufta har nådd maksimal temperatur vil det ikke bli noen ytterligere trykkøkning.

En åpen ventilasjonskanal vil bidra til å avlaste trykket, mens en ventilasjonskanal med lukkede spjeld vil ikke bidra til trykkavlastning. Sjansen for at røyk presses ut gjennom andre åpninger blir derfor større med lukkede spjeld. Når oksygennivået har blitt redusert til ca. 10 % vil brannen kveles og temperaturen i rommet falle, noe som kan skape et undertrykk i rommet [15].

Dersom rommet er tett vil ikke lufta kunne ekspandere, og man får *forhindret termisk ekspansjon*. Dette er beskrevet nærmere i avsnitt 2.6.1.1.

Et forenklet uttrykk for volumekspansjon q_v i en brann er gitt av rommets volum V og en brannutviklingskoeffisient α , vist i ligning (2.15) [16].

$$\dot{V} = 0,28V^{0,53}\alpha^{0,425} \quad (2.15)$$

Der

- $\dot{V}$ er volumendring per tidsenhet [m^3/s]
- V er romvolum [m^3]
- α er en konstant for en gitt brannutvikling [kW/s^2]

En tommelfingerregel gir at volumstrømmen som oppstår ved ekspansjon av luft ved oppvarming er ca. $1 \text{ m}^3/\text{s}$ per MW branneffekt.

En annen forenklet måte å beregne volumekspansjon på, er å ta utgangspunkt i ideell gasslov. Dersom man antar at trykket er konstant i rommet, noe som vil være en forenkling, kan man beregne volumekspansjon og gjennomsnittlig volumstrøm ut av rommet når temperaturen øker fra T_1 til T_2 , ligning (2.16) og ligning (2.17).

$$\Delta V = V_2 - V_1 = V_1 \frac{T_2}{T_1} - V_1 = V_1 \left(\frac{T_2}{T_1} - 1 \right) \quad (2.16)$$

$$\dot{V}_{avg} = \frac{\Delta V}{t} = \frac{V_1}{t} \left(\frac{T_2}{T_1} - 1 \right) \quad (2.17)$$

Der

- V_x er luftens volum ved temperatur T_x [m^3]
- T_x er gjennomsnittlig temperatur i brannrommet på et gitt tidspunkt [K]
- $\dot{V}_{avg}$ er gjennomsnittlig volumendring per tidsenhet [m^3/s]

Den termiske ekspansjonen fører til et overtrykk i brannrommet og følgelig en bevegelse i røyken. For et rom med åpen dør eller åpent vindu, vil det ikke blir noen trykkøkning på grunn av forhindret termisk ekspansjon, eller den vil være neglisjerbar. For relativt tette rom derimot, kan trykkøkningen på grunn av forhindret termisk ekspansjon bli betydelig. Ifølge Magnusson kan trykkøkningen Δp på grunn av forhindret termisk ekspansjon bestemmes av ligning (2.18) [17]:

$$\Delta p = \left(\frac{Q}{c_p T_b A} \right)^2 \frac{1}{2\rho_e} \quad (2.18)$$

Der

- Δp er trykkøkning forårsaket av forhindret termisk ekspansjon
- Q er hastigheten for varmeavgivelsen i rommet på grunn av brannen [kW]
- c_p er spesifikk varmekapasitet for luft ≈ 1 [$\text{kJ}/\text{kg K}$]
- T_b er temperaturen på røykgassene som forlater rommet [K]
- A er rommets totale lekkasjeareal [m^2]

ρ_b er tetthet til røykgassene som forlater rommet [kg/m^3] = $352,17/T_b$ (fra ideell gasslov)

Av ligning (2.18) ser man at overtrykket i brannrommet på grunn av forhindret termisk ekspansjon øker proporsjonalt med kvadratet av energiutviklingen og omvendt proporsjonalt med kvadratet av rommets totale lekkasjeareal. Mulig overtrykk på grunn av forhindret termisk ekspansjon øker altså raskt med avtagende lekkasjeareal for rommet. For et svært tett rom med relativt rask brannutvikling, kan overtrykket på grunn av forhindret termisk ekspansjon bli ekstremt stort. Gitt et 60 m^3 rom, med et samlet lekkasjeareal på $0,02 \text{ m}^2$, energiutvikling på 100 kW og røykgasstemperatur på ca. 80°C , vil den totale trykkøkning på grunn av forhindret termisk ekspansjon bli ca. 100 Pa ifølge ligning (2.18). Hvis åpningsarealet økes til $0,1 \text{ m}^2$, vil trykkøkningen bli kun ca. $0,1 \text{ Pa}$.

Ifølge Magnusson [17] viser beregninger at for små lekkasjeareal skjer trykkøkningen på grunn av forhindret termisk ekspansjon temmelig raskt. 90 % av den maksimale trykkøkningen oppnås i normalt innenfor et tidsrom på 10 sekunder. Heskestad [18] har påvist eksperimentelt at trykkdifferansen på grunn av termisk ekspansjon kan bli relativ stor (20-250 Pa) for meget tette rom med rask brannutvikling.

Forsøk av nyere dato, utført av R. Kallada Janardhan og S. Hostikka [19] ved Aalto University, Espoo, Finland, har vist at trykkoppbyggingen på grunn av forhindret termisk ekspansjon kan bli så høye som 1650 Pa i en leilighet. Varigheten av denne trykkøkningen var imidlertid bare 1 minutt, hvorefter brannen døde ut på grunn av oksygenmangel. Dette fordi det høye trykket hindrer lufttilførselen til rommet, og den raske brannutviklingen bruker opp tilgjengelig oksygen svært raskt.

I 2005 [20] ble det utført en rekke brannforsøk i Frankrike der effekten av åpne og lukkede kanalspjeld ble sammenlignet. Resultatene viste markante forskjeller. I tilfellene hvor både tillufts- og avtrekkskanalen var åpen, økte trykket med ca. 200 Pa innen 2 minutter før trykket gradvis ble utlignet igjen. For tilfellet der begge kanalene var stengte, økte trykket nesten med 4000 Pa . Trykket ble opprettholdt gjennom hele testen. Testene ble utført i et spesialdesignet rom med 25 cm tykke betongvegger som skulle etterligne en atombunker. Et slikt rom vil altså kunne motstå et mye høyere trykk enn vanlige rom i et bygg. Til tross for at rommet skiller seg fra vanlige rom, viser testene at ved å stenge et ventilasjonsanlegg, vil trykket i et rom på grunn av volumekspansjon bli vesentlig høyere enn om ventilasjonsanlegget får være i drift.

2.6.1.2 Oppdrift

Røyk med en temperatur høyere enn omgivelsene vil ha en oppdriftskraft fordi den har mindre tetthet enn omgivelseslufta. Denne oppdriften kan bli stor i selve brannrommet, hvor røykgasstemperaturen kan bli høy. Trykkdifferansen mellom brannrommet og de tilstøtende rom på grunn av oppdrift kan ifølge Magnusson uttrykkes ved hjelp av ligning (2.19) [17]:

$$\Delta p = K \left(\frac{1}{T_o} - \frac{1}{T_g} \right) d \quad (2.19)$$

Der

Δp	er trykkdifferansen [Pa]
K	er $g p_o / R$ (≈ 3460)
g	er tyngdens akselerasjon [m/s^2] = 9,81 m/s^2
p_o	er atmosfæretrykket [Pa] $\approx 1,01 \cdot 10^5$ Pa
R	er den spesifikke gasskonstanten [kJ/kgK] = 0,2871 kJ/kgK
T_o	er uteluftens temperatur [K]
T_b	er temperaturen på røykgassene i brannrommet [K]
d	er avstanden over nøytralplanet i rommet [m]

Ved brann i rom vil det være et plan over gulvet hvor trykkdifferansen $\Delta p = 0$ Pa. Dette planet kalles nøytralplanet og vil som regel innstille seg på en høyde over gulvet lik 1/3 av takhøyden. Hvis røykgasstemperaturen er 800 °C og takhøyden er 2,4 m, vil maksimal trykkdifferanse ved taket (det vil si: $d \approx 1,5$ m over nøytralplanet) bli ca. 13 Pa, ifølge ligning (2.19). Ifølge Klote [21] vil trykkdifferansen på grunn av oppdrift for vanlige oppholdsrom, med takhøyde ca. 2.5 m, neppe overstige 15 - 16 Pa. For rom med større takhøyde kan imidlertid denne trykkdifferansen bli betydelig større, ettersom trykkdifferansen er proporsjonal med høyden over nøytralplanet. Ved å benytte ligning (2.19), og anta en utetemperatur på $T_o = 20$ °C, røykgasstemperatur på $T_b = 1000$ °C og takhøyde $d = 20$ m ser man at det er lite sannsynlig at trykkdifferansen på grunn av oppdriften vil overstige 200 Pa, selv for store branner og store takhøyder.

I en bygning med lekkasjeveier i horisontale skiller, vil oppdriftskraften forårsake røykspredning til rom over brannrommet. I tillegg vil det finne sted en røykspredning via alle lekkasjearealer i veggene fra brannrommet (for eksempel utettheter rundt dører i brannrommet). Ettersom røyken fjerner seg fra selve brannen, vil røykgasstemperaturen synke som følge av innblanding av kald luft, samt på grunn av varmetap til vegger og tak. Dermed avtar oppdriftseffekten med avstanden fra brannen. I den tidlige fasen av brannen er oppdriftseffekten normalt av betydning bare i selve brannrommet.

2.6.1.3 Skorsteinseffekt

I oppvarmede bygg vil en ofte kunne føle at det er en bevegelse av lufta oppover, for eksempel i trapperom. Luften i bygningen vil ha en oppdrift, på grunn av at den er varmere og har lavere tetthet enn utelufta. Oppdriften er størst ved lave utetemperaturer og for høye bygg. Denne drivkraften blir kalt den normale skorsteinseffekten. Hvis derimot utelufta er varmere enn lufta inne i bygget, vil det finne sted en "motsatt skorsteinseffekt". Det vil si at vi vil ha en nedoverrettet bevegelse av lufta i bygningen. Dette er imidlertid lite aktuelt for land med relativt kaldt klima, slik som i Norge. Trykkdifferansen mellom

sjakt og omgivelsene utendørs forårsaket av skorsteinseffekten, er gitt av følgende uttrykk (2.20) [22]:

$$\Delta p_{so} = K \left[\frac{1}{T_o} - \frac{1}{T_s} \right] d \quad (2.20)$$

Der

- Δp_{so} er trykkdifferansen mellom sjakt og omgivelsene utendørs [Pa]
- K er g_p/R (≈ 3460)
- g er tyngdens akselerasjon [m/s^2] = 9,81 m/s^2
- p_o er atmosfæretrykket [Pa] $\approx 1,01 \cdot 10^5$ Pa
- R er den spesifikke gasskonstanten [kJ/kgK] = 0,2871 kJ/kgK
- T_o er uteluftas temperatur [K]
- T_s er temperaturen i sjakt [K]
- d er høydeforskjellen mellom byggets nøytralplan og det nivået man beregner trykkforskjell for [m]

Hvis lekkasjene i bygget er jevnt fordelt over høyden av bygget, vil nøytralplanet innstille seg på et nivå omtrent lik den halve høyden av bygningen. Trykkdifferansen vil være positiv (det vil si større trykk inne i bygning) over nøytralplanet og negativ under nøytralplanet, forutsatt at $T_s > T_o$, og at trykkdifferansen er proporsjonal med avstanden fra nøytralplanet. Det oppstår altså en luftstrøm oppover i sjakten. Hvis derimot $T_s < T_o$, vil det føre til en nedoverrettet luftstrøm i sjakten.

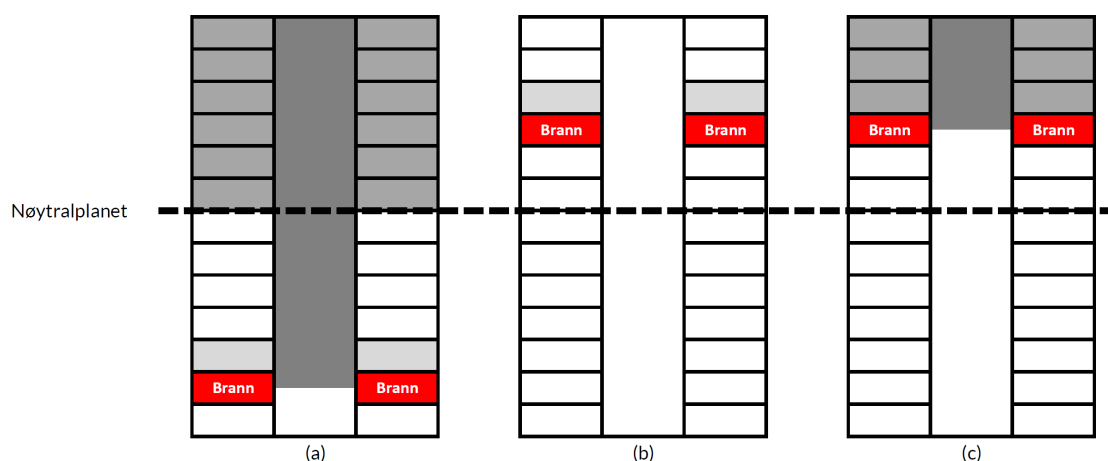
Skorsteinseffekten er avhengig av differansen mellom temperaturen ute og inne. Den øker med avtagende utetemperatur og økende innetemperatur. Når temperaturen er den samme innen- og utendørs er det ingen trykkdifferanse, og da vil det ikke oppstå luftbevegelser på grunn av skorsteinseffekten i trappesjakten. Ved en ute- og innetemperatur lik henholdsvis -20 og 21 °C, vil det oppstå en trykkdifferanse mellom sjakten og ute på grunn av skorsteinseffekten som er 2,4 Pa per høydemeter av sjakten. Dette betyr at ved en 20 m høy bygning vil det være et overtrykk ved toppen av sjakten lik $\Delta p_{so} = 24$ Pa, og et tilsvarende undertrykk i bunnen av trappesjakten. Det er her forutsatt at nøytralplanet ligger ved halve høyden av bygget. Trykket mellom trappesjakten og resten av bygningen i dette eksemplet blir imidlertid vesentlig mindre, avhengig av lekkasjearealene.

Hvis brannen befinner seg under nøytralplanet, vil skorsteinseffekten føre til at røyken spres fra brannrommet og inn i vertikale sjakter som er forbundet med brannrommet. Når røyken kommer over nøytralplanet, vil den positive trykkdifferansen føre til at røyken strømmer ut av sjakten og inn i alle etasjene over nøytralplanet og inn i tilstøtende leiligheter (se Figur 2-17a). Det er denne kritiske situasjonen som er årsaken til den store røykbelastningen, og det store antall døde i de øverste etasjene ved branner som har sin opprinnelse i en av de lavere etasjene. Brannen ved hotell Caledonien i Kristiansand i september 1986, hvor brannen oppsto i vestibyleområdet i første etasje, er et godt eksempel på en slik brann (se kapittel 5.5). Når brannrommet ligger over nøytralplanet,

som vist i Figur 2-17 b og c, er det vesentlig bedre med hensyn til røykspredningen i bygget.

Hvis lekkasjen i horisontale skiller mellom etasjene er neglisjerbar, vil rommene som befinner seg under etasjen hvor brannen oppsto være relativt røykfrie, forutsatt at røykproduksjonen ikke er større enn den røykmengden som maksimalt kan strømme gjennom de vertikale sjaktene.

Røyken fra en brann lokalisert over nøytralplanet blir ved hjelp av bygningens naturlige luftbevegelser (skorsteinseffekten) ført til utsiden av bygget gjennom lekkasjeåpninger i ytterveggene i samme etasje. Hvis lekkasjearealet mellom etasjene er neglisjerbart, vil alle etasjer, bortsett fra etasjen hvor brannen befinner seg, forbli relativt røykfrie (se Figur 2-17b).



Figur 2-17 Røykspredning i en bygning: (a) brann (rødt rom) under nøytralplanet, (b) brann over nøytralplanet og skorsteinseffekten dominerer over drivkreftene fra selve brannen og (c) brann over nøytralplanet og drivkreftene fra selve brannen dominerer over skorsteinseffekten. Figuren er basert på [21].

Dette gjelder så lenge røykproduksjonen ikke er større enn det de vertikale sjaktene kan ta unna, og skorsteinseffekten dominerer over drivkreftene fra selve brannen (oppdriften og termisk ekspansjon). Slike branner vil som regel være betydelig mindre kritiske med hensyn til røykspredning, sammenlignet med branner som starter under nøytralplanet. Dette gjelder spesielt i den tidlige fasen av brannen. Hvis derimot lekkasjearealet mellom etasjene ikke kan neglisjeres, vil det finne sted røykspredning også til etasjene over brannrommet (se Figur 2-17c).

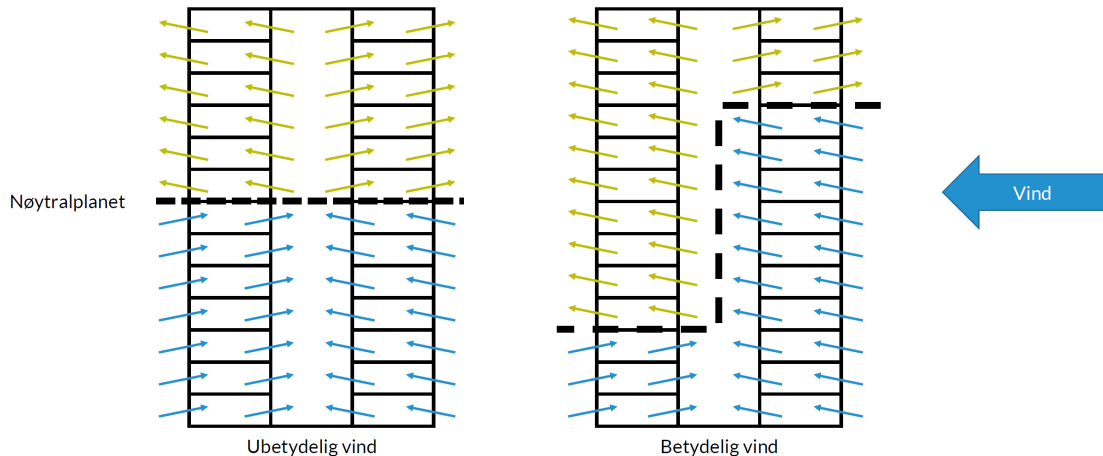
2.6.1.4 Vind

Vinden kan ofte være en avgjørende faktor ved røykspredning i bygninger. Figur 2-18 viser hvordan trykket varierer langs vegger og tak i en bygning, hvor vinden er rettet mot den ene siden av bygningen. Av figuren ser man at losiden (den siden vinden treffer) av bygningen blir utsatt for et innoverrettet trykk, mens leveggen og de to sideveggene blir

utsatt for et utoverrettet trykk, eller sug. Trykket på taket blir rettet oppover, med maksimaltrykk på den kanten av taket som vender mot vinden.

Trykkfordelingen på utsiden av høye og lave bygg vil være vesentlig forskjellig. For en lav bygning vil hovedstrømmen av luft passere over taket, og forårsake størst overtrykk her. For høye bygninger med relativt liten grunnflate vil derimot mesteparten av lufta passere langs ytterveggene, og dermed skape relativt større trykk her sammenlignet med trykket på taket.

Vindtrykket på loveggen og det utoverrettede trykket på leveggen og sideveggene påvirker røykspredningen i bygninger sterkt. Røyken spres til de rom i bygningen som ligger på lesiden. Dette ble tydelig dokumentert ved brannen på hotell Caledonien i Kristiansand i 1986 (se avsnitt 5.5). På lesiden av bygget fant man de fleste omkomne og de største røykavsetningene på vegger og tak.



Figur 2-18: Innflytelsen av vinden på luftbevegelsene i et høyt bygg, samt hvordan nøytralplanet (stiplet linje) forandrer seg som følge av vinden. Figuren er basert på [23].

Figur 2-18 viser at nøytralplanet hever seg på losiden av bygningen, mens det senkes på lesiden av bygningen. På grunnlag av strømningsretningene som dette forårsaker, forstår en hvorfor røykavsetningene var mye større på lesiden i forhold til losiden av bygget ved brannen i hotell Caledonien.

Trykket som vinden forårsaker mot en flate, kan uttrykkes ved ligning (2.21) [22]:

$$p_w = \frac{1}{2} C_w \rho_o u_w^2 \quad (2.21)$$

Der

p_w er trykket indusert av vinden [Pa]

- C_w er en dimensjonsløs trykkoeffisient [-]
 ρ_o er uteluftens tetthet [kg/m^3]
 u_w er vindhastigheten [m/s]

Trykkoeffisienten C_w varierer i området -0,8 til 0,8, hvor lesiden vil ha negative verdier, mens losiden vil ha positive verdier. Trykkoeffisienten varierer med bygningens geometri, og varierer over overflaten. Vind med hastighet på 10 m/s rettet mot en vegg vil forårsake et trykk på ca. 45-55 Pa, avhengig av utetemperaturer i området -20 til +20 °C.

Effekten av vinden i tette bygg er liten, men den kan bli stor i utette bygg. Vind som blåser inn et åpent eller knust vindu i brannrommet kan ha stor betydning for spredning av røyken fra rommet. Hvis det knuste vinduet er på leveggen av bygget, vil det negative trykket forårsaket av vinden føre til at store mengder røygasser slipper ut her, fordi vinden skaper et undertrykk på lesiden. Dette vil normalt være meget gunstig, fordi røyken dermed ikke spres til andre deler av bygget.

Hvis derimot det knuste vinduet er på losiden av bygget, kan vindtrykket addere seg til oppdriften og trykket på grunn av forhindret termisk ekspansjon, slik at røykspredningen fra rommet til resten av bygningen økes vesentlig. Dette kan være meget ugunstig for personer som evakuerer bygget.

2.6.2 Lekkasjeåpninger – volumstrøm og trykktap

Trykktap og volumstrøm i forbindelse med en lekkasjeåpning kan beregnes, både for en situasjon med brann og for normalsituasjonen. Lekkasjeåpningen kan være utettheter i konstruksjonen eller åpninger i komponenter, som ventiler, døråpninger eller ventilasjonskanaler.

Trykktapet i et system avhenger av tettheten til lufta eller røyken og strømningshastigheten [13]:

$$\Delta p = \rho R q^n \quad (2.22)$$

Der

- Δp er trykkdifferanse (trykktap) [Pa]
 ρ er tettheten til lufta/røyken [kg/m^3]
 R er den ideelle gasskonstanten, 8,31 [J/mol K]
 q er luftstrøm [m^3/s]
 n er en konstant, $n \in \{1, 2\}$, $n = 1$ ved laminær strømming, $n = 2$ ved turbulent strømming [-]

Luftstrømmen gjennom en lekkasjeåpning antas å være turbulent. Trykkfallet i et branntilfelle blir da:

$$\Delta p_b = \Delta p_n \frac{\rho_b}{\rho_n} \left(\frac{q_b}{q_n} \right)^2 \quad (2.23)$$

Der

- Δp_n er trykktapet over lekkasjeåpning i normalsituasjon [Pa]
- Δp_b er trykktapet over lekkasjeåpning ved brann [Pa]
- ρ_n er tettheten til romtemperert luft [kg/m³]
- ρ_b er tettheten til røykgassene [kg/m³]
- q_n er volumstrøm av luft gjennom lekkasjeåpning ved normalsituasjon [m³/s]
- q_b er volumstrøm av røykgasser gjennom lekkasjeåpning ved brann [m³/s]

Med utgangspunkt i ligning (2.22) kan man også beregne volumstrømmen gjennom lekkasjeåpningen. Det antas turbulente forhold (n=2).

$$q_b = q_n \cdot \sqrt{\frac{\Delta p_b \rho_n}{\Delta p_n \rho_b}} \quad (2.24)$$

Der

- Δp_n er trykktapet over lekkasjeåpning ved normalsituasjon [Pa]
- Δp_b er trykktapet over lekkasjeåpning ved brann [Pa]
- ρ_n er tettheten til romtemperert luft [kg/m³]
- ρ_b er tettheten til røykgassene [kg/m³]
- q_n er volumstrøm av luft gjennom lekkasjeåpning ved normalsituasjon [m³/s]
- q_b er volumstrøm av røykgasser gjennom lekkasjeåpning ved brann [m³/s]

2.6.2.1 Lekkasje (volumstrøm) fra brannrom

For å beregne den totale volumstrømmen (lekkasjen) ut fra brannrommet, kan man summere alle volumstrømmene fra hvert lekkasjepunkt. Eksempelvis:

Volumstrøm (fra brannrom) = Volumstrøm (lekkasje gjennom vegg) +
Volumstrøm (lekkasje gjennom vindusventiler) + Volumstrøm (kanal)

Den totale volumstrømmen fra brannrommet, q_{tot} , kan uttrykkes ved ligning (2.25):

$$q_{tot} = \sum_j q_{n,j} \sqrt{\frac{\Delta p_{b,j} \rho_n}{\Delta p_n \rho_b}} \quad (2.25)$$

der indeksen j angir ulike lekkasjepunkter.

Uttrykket er et forenklet uttrykk for å beregne volumstrøm, og tar ikke hensyn til over/undertrykk i kanal etter åpningen, som avhenger av trykk utendørs, temperatur til brannmassene, strømningshastighet, kanaldimensjoner, etasjehøyde m.m.

For å beregne hvor mye røyk som spres via tilluftssystemet, kan man tenke på tilluftskanalen som en vindusventil med et mottrykk som tilsvarer trykkfallet over uttakskanalen.

2.6.3 Spredning av røyk via ventilasjonsanlegg

Det har tidligere vært en oppfatning at ventilasjonsanlegg i drift har ført til at brannrøyk har blitt spredd rundt i bygget via kanalsystemet, ved hjelp av suget generert av ventilasjonsanlegget. Det ble antatt at når en brann oppstår i et rom i bygning, kan ventilasjonsanlegget transportere røyk til alle de områder som det betjener, og dermed gjøre situasjonen i disse områdene kritisk med hensyn til røykeksponering. Nå peker imidlertid flere studier på at det kan være en fordel å ha ventilasjonsanlegget i drift så lenge som mulig under en brann. [15]

Jensen [24] konkluderer i sin studie at ved rene avtrekksanlegg kan ventilasjonssystemet knapt spre røyk, mens røykspredning derimot kan finne sted i kombinerte avtrekks- og tilluftssystem. I et tilluftssystem vil røykspredningen primært skje nedstrøms i kanalsystemet. Resultatet blir en rask røykspredning til rom som betjenes av samme kanalsystem og som ligger nedstrøms i dette systemet. Når røyk sprer seg via tilluftssystemet vil røyken blandes med frisk luft, og bli fortynnet. Det kan derfor ta lang tid før forholdene i naborommene blir kritiske. I tillegg vil en slik røykspredning kun skje i den perioden der trykket i brannrommet er høyest, det vil si i løpet av noen minutter etter brannstart. Når trykket i rommet er utlignet, enten ved at brannveksten har stabilisert seg eller at et vindu har blitt ødelagt, vil røyk kun suges inn avtrekksanlegget og ut i friluft.

Et ventilasjonsanlegg i drift fører til at brannrommet får tilført ekstra luft, noe som kan føre til at brannen enten varer lenger eller utvikler seg raskere. Dette er en av grunnene til at ventilasjonen tidligere ble stengt når brann ble detektert i en bygning.

Jensen [24] konkluderer også med at det er best at ventilasjonsanlegget er i drift ved brann i en bygning, både med hensyn til evakuering og brannvesenets sløkkearbeid. Fordelen med at ventilasjonsanlegget er i drift, er at man får en kontrollert røykspredning. Stenges ventilasjonen vil man få en mer ukontrollert røykspredning ved at røyken går i den retning det tilfeldigvis er størst trykkfall.

Jensen peker imidlertid på et tilfelle hvor det kan være direkte uheldig å la ventilasjonsanlegget være i drift under en brann. Det er det tilfellet hvor avtrekkets utløp ligger relativt nær friskluftinntaket. Det vises til flere branntilfeller i Sverige, hvor det har vært kortslutning mellom tillufts- og avtrekksystemene, på grunn av for nær plassering. Det har vist seg i disse tilfellene at tilluftssystemet har spredd betydelige mengder røyk raskt til rom som ligger fjernt fra selve brannrommet.

I en nyere rapport fra Jensen [25] konkluderes det med at risikoen for røykspredning mellom brannceller bestående av flere rom er tilnærmet null. Det trykket som kreves er så høyt at bygningsdeler vil kollapse og utjevne trykket før røykspredning vil finne sted. Røyken kan likevel spres innad i en branncelle.

Ved å stenge av ventilasjonsanlegget ved brann, og stenge kanaler med spjeld i alle brannskillende konstruksjoner, vil man i stor grad hindre at røyk sprer seg via eksempelvis tilluftskanaler. På den andre siden vil man kunne bidra til at trykket i rommet øker, og at røykspredning gjennom utettheter i vegger og gjennomføringer dermed øker. Faren for at konstruksjonen bryter sammen vil også øke.

For at røyk skal kunne spre seg gjennom et ventilasjonsanlegg i drift, må trykket i brannrommet overstige mottrykket i ventilasjonskanalen. Her skilles det mellom F- (fraluftssystem, les avtrekkssystem) og FT-systemer (fra- og tilluftssystem).

I et F-system hentes luft normalt fra utsiden gjennom ventiler i veggen, mens et FT-system er balansert slik at like mye luft tilføres gjennom tilluftskanalen som mengden luft som trekkes ut gjennom avtrekkskanalen.

I et F-system skal det mye til for at røyk sprer seg gjennom ventilasjonsanlegget, mens det er noe lettere i et FT-system.

2.6.3.1 Spredning av røyk i et F-system

Som tidligere nevnt konkluderer Jensen [24] i sin studie at ved rene avtrekksanlegg kan ventilasjonssystemet knapt spre røyk. Dette fordi det trykket som kreves for dette vil føre til at vegger, vinduer og dører blir ødelagt før dette skjer [25]. Røykspredning innad i en branncelle kan likevel skje.

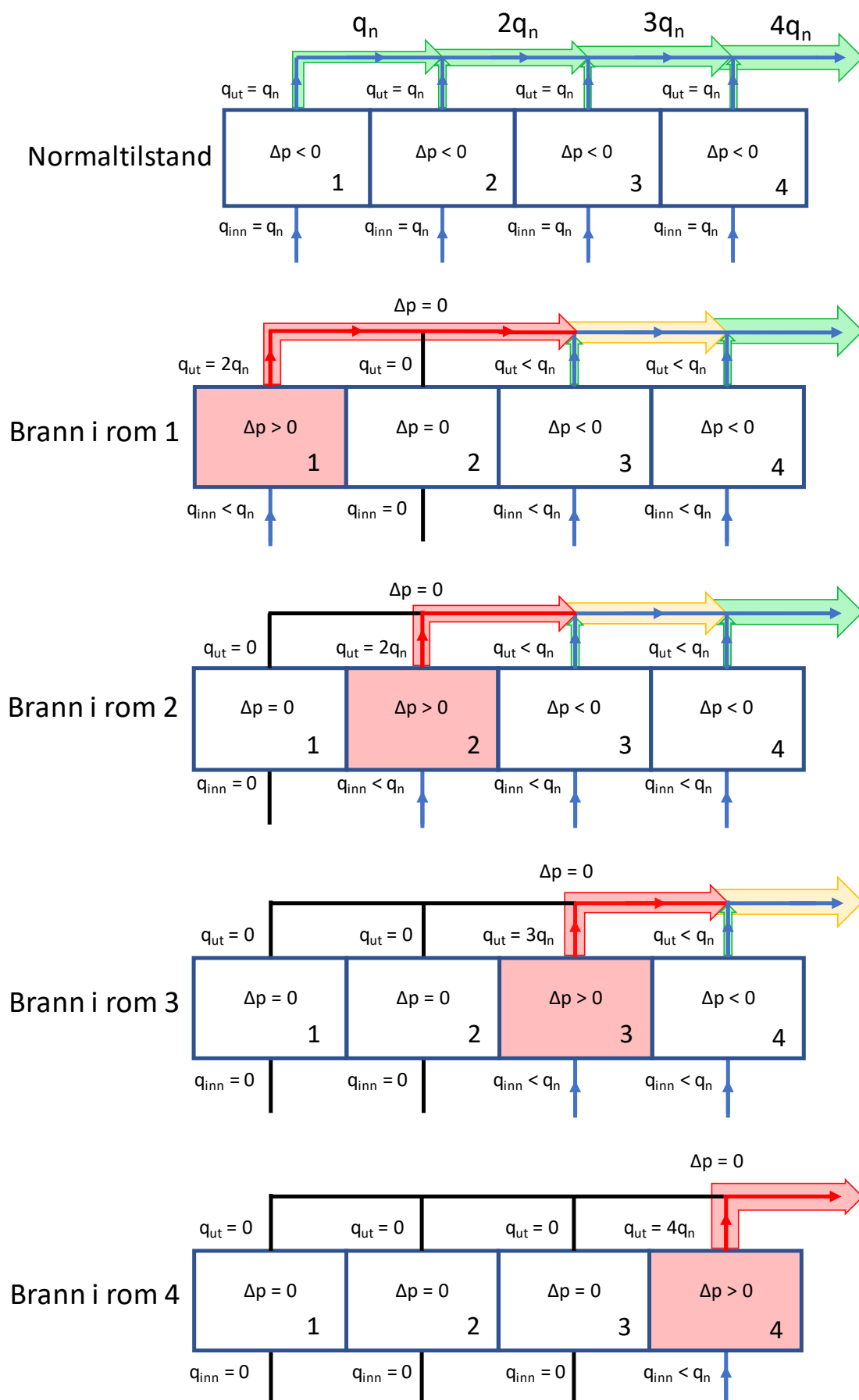
For å vise hvorfor det skal mye til at røyk spres i et F-system, benyttes her eksempler basert på boken *Installationsbrandskydd* [26].

En vanlig tilnærming for å finne når røyk kan spres fra en branncelle til en annen, er å benytte et grensetilfelle. I grensetilfellet er volumekspansjonen så stor at den er lik volumstrømmen fra en nabobranncelle, og trykket i knutepunktet blir da lik 0. Ved en volumekspansjon større enn grensetilfellet vil røykspredning finne sted.

I et F-system med bikanal er grensetilfellet avhengig av hvilket rom brannen oppstår i, se Figur 2-19. Overtrykket som behøves for å spre røyk i avtrekkskanalene er minst i de rommene som er lengst oppstrøms, det vil si ytterst på bikanalen, og størst på rommet tilknyttet øverst på bikanalen.

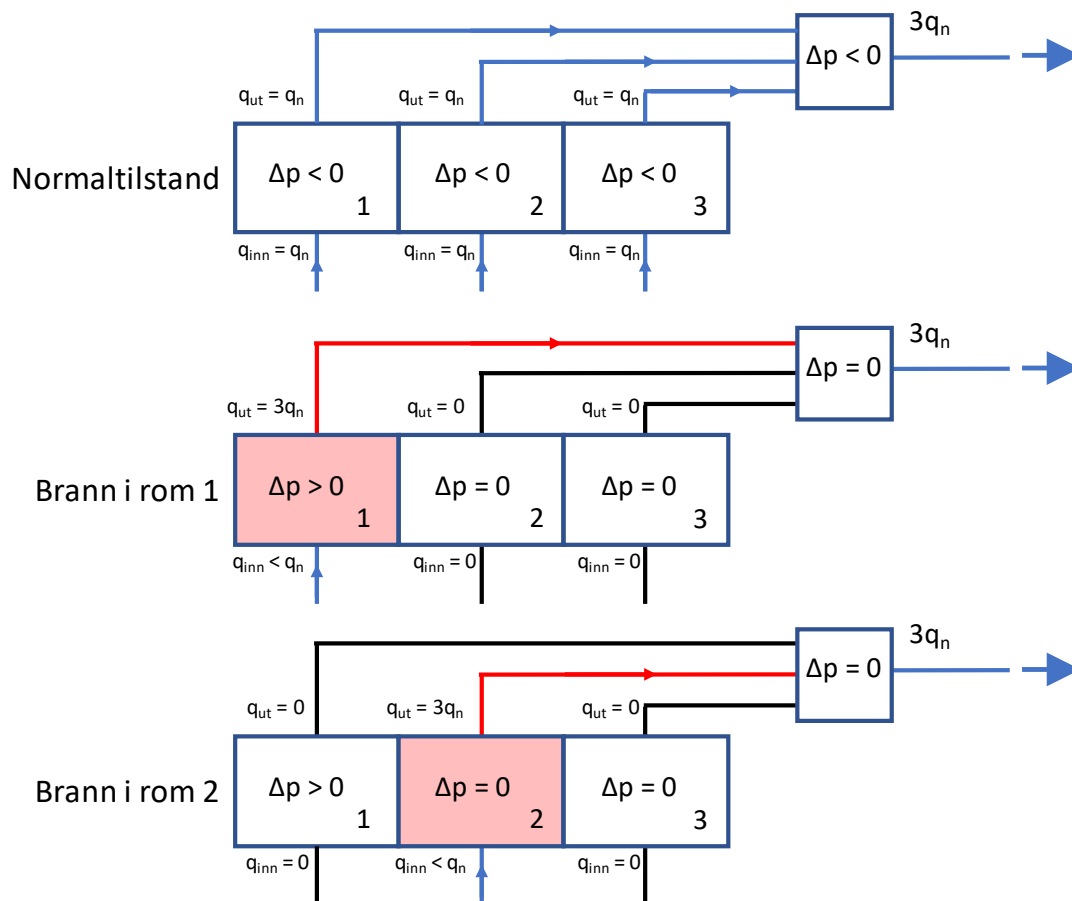
Eksempelvis trenger man en volumstrøm av røyk som er større enn det dobbelte av normal luftstrøm for å spre røyk fra rom 1 til rom 2. Man trenger tilsvarende volumstrøm av røyk for å spre røyk fra 2 til rom 1. For å spre røyk fra rommene 3 og 4 til de øvrige rommene, trenger man henholdsvis en røykstrøm som er større enn tre og fire ganger den normale luftstrømmen. Det er derfor en større risiko for røykspredning via

ventilasjonsanlegget jo lenger oppstrøms brannrommet er plassert i forhold til kanalstrekket.



Figur 2-19 Skisse som viser grensetilfellene for røykspredning ved brann i ulike rom. Figuren viser at ved brann i rom 1 behøves et overtrykk som induserer en røykstrøm q_{ut} som er minst dobbelt så stor som strømmen ved normaltilstand q_n for å spre røyk til rom 2. Tilsvarende trenger man en røykstrøm større enn fire ganger normalstrøm for å spre røyk fra rom 4 til rommene 1, 2 og 3. Grønn farge indikerer romtemperert luft, rød farge indikerer varm røyk, mens gult indikerer røyk som er blitt blandet med romtemperert luft, og dermed har blitt avkjølt. Svarte streker indikerer ventilasjonskanaler hvor luftstrømmen stoppes pga. høyt mottrykk. Figuren er basert på [26].

En måte å øke trykkgrensen for når røyk kan spres på, er å samle all innlufta i en samlingsboks som vist i Figur 2-20. Ved et slikt oppsett øker grenseverdien for røykspredning, og blir den samme for alle rom. En slik løsning vil naturlig nok være lite hensiktsmessig i praksis, da man må installere egen kanal fra hvert rom til samlingsboksen, noe som kan bli plasskrevende.



Figur 2-20 Grensetilfelle for røykspredning når alle kanaler samles i en samlingsboks. Her er grensen for røykspredning høyere enn for tilfellet hvor hvert enkelt rom kobles direkte på bikanalen, og grensen er lik for alle rom. Svarte streker indikerer ventilasjonskanaler hvor luftstrømmen stoppes pga. høyt mottrykk. Figuren er basert på [26].

2.6.3.2 Spredning av røyk i et FT-system

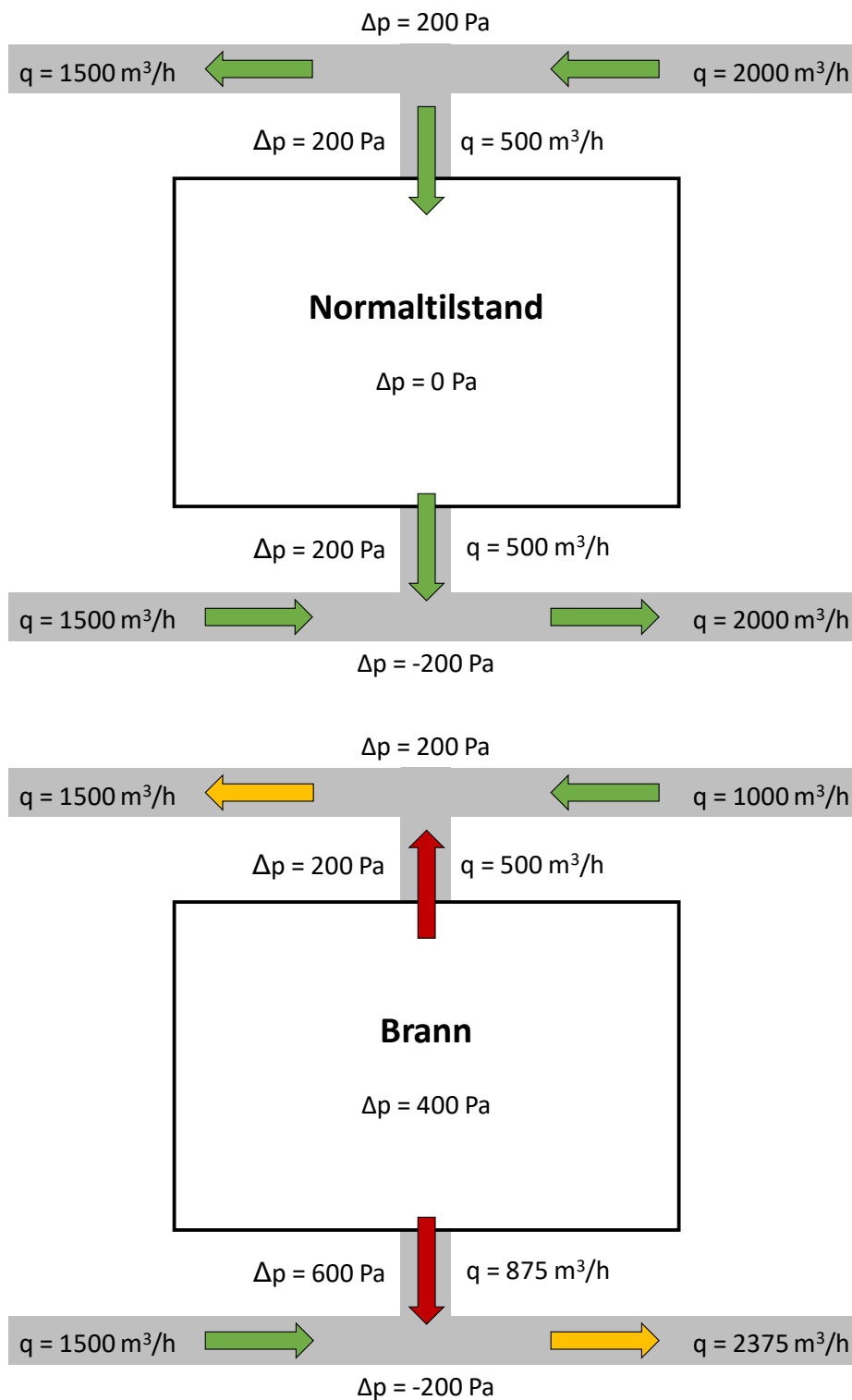
I et FT-system er det teoretisk sett to måter røyk kan spre seg på, enten gjennom tilluftskanalen eller gjennom avtrekkskanalen. I praksis vil det kun være røykspredning gjennom tilluftskanalen.

Grensen for spredning av røyk i et balansert ventilasjonsanlegg (tilluft og avtrekk) er når luftstrømmen gjennom tilluftssystemet blir lik null, noe som skjer dersom trykket i brannrommet blir likt mottrykket i tilluftskanalen [13]. Normalt mottrykk i tilluftskanalen er i størrelsesorden 50-80 Pa. Ved et trykk på 80 Pa i tilluftskanalen vil tilluften stoppe opp dersom trykket i brannrommet blir 80 Pa. Ved 160 Pa i tilluftskanalen vil luftstrømmen i tilluftskanalen ha samme hastighet som ved normaltilstand, men i motsatt retning. Røyken som da transporteres inn i tilluftskanalen vil fortynnes med frisk tilluft, og sendes ut i rom nedstrøms for brannrommet. Jo mer røyken fortynnes, jo lengre tid vil det ta før konsentrasjonen av giftige gasser vil være til hinder for evakuering [24].

For at røyk skal kunne spre seg via avtrekkskanalene kreves det et mye høyere trykk i brannrommet. Sannsynligvis vil vegger og dører kollapse før trykket blir så høyt at røyken spres via avtrekkssystemet.

Ved tilluft- og avtrekkssystemer er det viktig at friskluftsinntaket ikke befinner seg i en posisjon hvor røyk fra avtrekket kan trekkes inn i bygget igjen.

Hauken beskriver følgende eksempel i sin masteroppgave [27]: En branncelle er utstyrt med et balansert ventilasjonsanlegg, se Figur 2-21. Over uttakskanalene er det et trykktap på 200 Pa, både på tilluftskanalen og avtrekkskanalen. 500 m³/h luft tilføres rommet via tilluftskanalen og tilsvarende mengde trekkes ut via avtrekkskanalen. Det oppstår en brann i rommet som genererer en trykkøkning på 400 Pa. For enkelhets skyld antas rommet å være helt tett, slik at alt trykk som oppstår i rommet avlastes via ventilasjonsanlegget.



Figur 2-21 Eksempel på hvordan røyk vil fordeles i en tilluftskanal og en avtrekkskanal ved økt trykk i brannrommet. Grunnet trykkøkningen vil tilluftsstrømmen snu, og spre røyk til rom som ligger nedstrøms i kanalstrekket. Samtidig vil volumstrømmen gjennom avtrekkskanalen øke. Pilenes farge indikerer temperatur og røykkonsentrasjon. Grønne piler indikerer lav temperatur og ingen røyk, røde piler indikerer høy temperatur og høy røykkonsentrasjon, mens gule piler indikerer en temperatur og røykkonsentrasjon et sted i mellom grønt og rødt nivå. Figuren er basert på [27].

Grensetilfellet for at røyk skal kunne spre seg via tilluftskanalen, er en trykkøkning i brannrommet på 200 Pa. Siden trykket i rommet er 400 Pa, er grensetilfellet allerede overskredet med 200 Pa. Røyk sprer seg derfor via tilluftskanalen. Volumstrømmen som går gjennom kanalen er nå den samme som i normaltstanden, men i motsatt retning.

Dersom det antas at volumstrømmen gjennom avtrekkskanalen er proporsjonal med kvadratroten av differansetrykket, som vist i ligning (2.26) [25], blir den nye volumstrømmen 875 m³/h som vist i ligning (2.27).

$$q = k \cdot \Delta p^{0,5} \quad (2.26)$$

$$q_b = q_n \left(\frac{\Delta p_b}{\Delta p_n} \right)^{0,5} = 500 \frac{m^3}{h} \left(\frac{3\Delta p_n}{\Delta p_n} \right)^{0,5} = 875 \frac{m^3}{h} \quad (2.27)$$

Der

Δp_n er normaltrykktapet over avtrekkskanal [Pa]

Δp_b er trykktapet over avtrekkskanal ved brann [Pa]

q_n er volumstrøm av luft gjennom avtrekkskanal ved normalsituasjon [m³/s]

q_b er volumstrøm av røykgasser gjennom avtrekkskanal ved brann [m³/s]

Volumstrømmen ved brann øker gjennom avtrekkskanalen i forhold til ved normaltstand. Siden volumstrømmen er mindre enn 1500 m³/h, som er den mengden luft og røyk som kommer fra andre rom, vil ikke røyken spres via avtrekkskanalen.

For at trykket skal opprettholdes i rommet, må brannen føre til en volumøkning av gasser i brannrommet tilsvarende 0,38 m³/s. I dette eksemplet vil 37 % (500 m³/h) av volumet spre seg motstrøms i tilluftskanalen, mens 63 % (875 m³/h) vil bli fjernet via avtrekkskanalen.

Dette eksemplet har endel forenklinger, men demonstrerer likevel en del prinsipper med hensyn til brannspredning i tillufts- og avtrekkskanaler.

I en studie fra universitetet i Lund, Sverige [13], ble det vist at størrelsen på bikanalen påvirker røykspredningen. Jo større bikanal, desto mindre sannsynlighet for spredning av røyk.

2.6.4 Spredning av røyk gjennom bygningsdeler

I en bygningsbrann produseres det store mengder røyk og varme. Trykket som oppstår i et brannrom bidrar til å presse røyk ut gjennom utettheter i vegg- og takskjøter, rundt dører, og andre installasjoner som går gjennom vegger og tak. I hvilken grad røyk sprer seg ut av brannrommet vil avhenge av hvor tett rommet er. Tillatte lekkasjerater for ulike komponenter er gitt i følgende kapitler.

2.6.4.1 Brannspjeld

Tillatt lekkasje gjennom et brannspjeld under branntest er ifølge standarden *NS-EN 1366-2:2015 Prøving av brannmotstand til tekniske installasjoner – Del 2: Brannspjeld* [28]:

- Integritet: Lekkasje rate gjennom spjeldet skal ikke overstige 360 m³/h (omregnet til volumstrøm ved 20 °C) ved 300 Pa trykkforskjell.
- Lekkasje: Før test og etter 5 min av teststart skal lekkasjeraten ikke overstige 200 m³/(h m²) (omregnet til volumstrøm ved 20 °C) ved 300 Pa trykkforskjell.

2.6.4.2 Dører

Typegodkjente branndører er ikke nødvendigvis helt røyktette, da det kan oppstå lekkasjer langs karmen. For dører som ikke er testet for røyktetthet, aksepteres det åpninger på opptil 25 mm ved dørterskelen [29]. Dette vil kunne bidra til stor røykspredning fra et rom til et annet, selv med lukket dør. For dører mot trapperom, korridorer og andre evakueringsveier, er den preaksepterte ytelsen i veiledningen til TEK17 (VTEK) at dører skal tilfredsstille kravet om røyktetthet klasse S_a [1]. For å oppfylle denne klassifiseringen, må lekkasjeraten ved 25 Pa og 20 °C være mindre enn 3 m³/h per meter spalte mellom fast og bevegelig del av dør (dørblad/karm) [30,31].

Til sammenligning vil et tenkt tilfelle, der trykket i et rom er 400 Pa og temperaturen er 600 °C, gi en lekkasje gjennom døren på 41,5 m³/h, se ligning (2.28).

$$q_b = q_n \sqrt{\frac{\Delta p_b \rho_n}{\Delta p_d \rho_b}} = 20 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \sqrt{\frac{400 \text{ Pa} \cdot 0,74 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{50 \text{ Pa} \cdot 0,40 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}} = 41,5 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \quad (2.28)$$

2.6.4.3 Lekkasje gjennom vegger

Etter passivhusstandarden [32] skal lekkasjeraten gjennom yttervegg være mindre enn 0,6 per time, mens lavenergibygninger har en lekkasje rate mindre enn 1,5 per time. Ved målinger av faktiske installasjoner er det normalt stort fokus på ytterveggers tetthet, men mindre fokus på tetthet til lettvegger², og det er erfart at lekkasjeforskjellen mellom to i utgangspunktet like rom (isolat ved sykehus) har variert med en faktor 7.

² Mailkorrespondanse med Finn Drangsholt, Sykehusbygg.

3 Regelverk og veiledninger

3.1 Historisk regelverk i Norge

To masteroppgaver [33,34] oppsummerer historisk regelverk i Norge med hensyn til brannbeskyttelse av ventilasjonsanlegg:

I løpet av de siste 30 år (fra byggeforskrift 1987 [3] til TEK17) har det vært få endringer i byggteknisk forskrift. I hele denne perioden har det vært krav om at både kanaler og festeløsninger skal være ubrennbare og tåle den mulige belastningen de kan utsettes for ved en brann. Kanalgjennomføringer i branncellevegg skal utføres slik at bygningsdelens brannskillende funksjon opprettholdes. Ventilasjonsanlegg skal være utformet slik at det gir tilfredsstillende sikkerhet mot brann- og røykspredning i nødvendig tid.

Byggeforskrift 87 med tilhørende veileder beskrev både *steng-inne* og *trekk-ut prinsippet*, og hvilke forholdsregler som måtte tas ved de ulike strategiene. Det var detaljerte beskrivelser av løsninger som tilfredsstilte forskriften. Det ble anbefalt å isolere ventilasjonskanalene 1,0 meter på hver side ut fra brannskillet, alternativt 2,0 meter til den ene siden.

Byggeforskrift 87 ble senere erstattet av TEK97, som var en funksjonsbasert forskrift, og åpnet med det opp for at andre løsninger enn de som var beskrevet kunne benyttes, gitt at det kunne dokumenteres at løsningene representerte samme sikkerhetsnivå som de preaksepterte løsningene eller bedre. Da veiledningen ble revidert til tredje utgave i 2003 [8], ble løsningsbeskrivelsene fjernet, da man mente at de hindret innovasjon.

3.2 Dagens forskrift

Dette kapittelet oppsummerer hvilke forskriftsparagrafer med veiledninger som legger føringer for utførelsen av ventilasjonsanlegg med tilhørende brannsikringstiltak (tekstbokser). I gjengivelsen av forskrifts- og veiledningstekster har vi understreket det vi anser som viktige formuleringer.

TEK17 §11 -10 Tekniske installasjoner

- (1) Tekniske installasjoner skal prosjekteres og utføres slik at installasjonene ikke øker faren vesentlig for at brann oppstår eller at brann og røyk sprer seg.
- (2) Installasjoner som er forutsatt å ha en funksjon under brann, skal være prosjektert og utført slik at deres funksjon opprettholdes i den tiden som er nødvendig. Dette omfatter også tilførsel av vann, strøm eller signaler som er nødvendig for å opprettholde installasjonens funksjon.

Utdrag fra veiledningen §11-10:

Tilfredsstillende sikkerhet i et byggverk er betinget av at sentrale tekniske installasjoner opprettholder sin funksjon og brannmotstandsevne under hele eller deler av brannforløpet, og minst i den tiden som skal være tilgjengelig for rømning. Samtidig må slike installasjoner heller ikke, direkte eller indirekte, bidra til uakseptabel brann- eller røykspredning.

Ventilasjonsanlegg må utføres slik at de ikke bidrar til brann- eller røykspredning i byggverket via kanalnett, på grunn av utettheter ved gjennomføringer i brannskillende bygningsdeler, eller på grunn av varmeledning i kanalgodset.

Kanaler, kabler og andre installasjoner som føres gjennom branncellebegrensende konstruksjoner, må ikke svekke konstruksjonens brannmotstand. Brannmotstand for installasjoner som føres gjennom brannskillende bygningsdeler må dokumenteres ved prøving eller beregning. Kanaler og ventilasjonsutstyr må være festet slik at de ikke faller ned og bidrar til økt fare for brann- og røykspredning.

Veiledning til §11-10, første ledd:**Preaksepterte ytelser**A Ventilasjonsanlegg:

1. Ventilasjonskanal som føres gjennom en brannskillende bygningsdel, må utføres slik at bygningsdelens brannmotstand blir opprettholdt.
4. Ventilasjonsanlegg må utføres i materialer som tilfredsstiller klasse A2-s1,d0 [ubrennbare materialer]. For kanaler gjelder dette hele tverrsnittet (kanalgodset).
9. Kanal som føres gjennom seksjoneringsvegg, må ha lukkeanordning (brannspjeld) med minimum samme brannmotstand som seksjoneringsveggen.

C Rør- og kanalisolasjon

1. Dersom den samlede eksponerte overflaten av isolasjonen på rør og kanaler utgjør mer enn 20 prosent av tilgrensende vegg- eller himlingsflate, må isolasjonen tilfredsstille klasse A2_L-s1,d0 [ubrennbar eller begrenset brennbar] eller ha minst samme klasse som de tilgrensende overflatene.
2. Dersom den samlede eksponerte overflaten av isolasjonen utgjør mindre enn 20 prosent av tilgrensende vegg- eller himlingsflate, gjelder følgende:
 - a) Isolasjon på rør og kanaler i rømningsveier må minst tilfredsstille klasse B_L-s1,d0 [PI]. Unntak gjelder isolasjon på enkeltstående rør eller kanal med ytre diameter til og med 200 mm som minst må tilfredsstille klasse C_L-s3,d0 [PII].
 - b) Isolasjon på rør og kanaler som er lagt i sjakt, i hulrom og bak nedforet himling med branncellebegrensende funksjon, må minst tilfredsstille klasse C_L-s3,d0 [PII].
 - c) Øvrig isolasjon på rør og kanaler i byggverk i risikoklasse 3, 5 og 6, og i byggverk i brannklasse 2 og 3 må minst tilfredsstille klasse C_L-s3,d0 [PII].
 - d) Øvrig isolasjon på rør og kanaler i byggverk i risikoklasse 1, 2 og 4 i brannklasse 1 må minst tilfredsstille klasse D_L-s3,d0 [PIII].

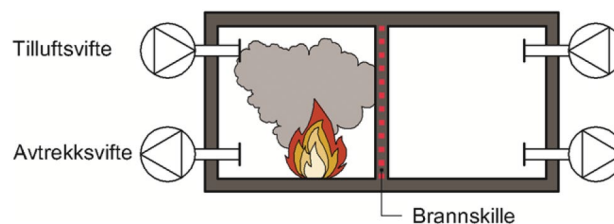
3.3 SINTEF Bygghetjblad 520.352

SINTEF Bygghetj har i Bygghetjserien publisert et bygghetjblad som omhandler sikring mot brann- og røykspredning i balanserte ventilasjonsanlegg [9]. Heretter vil dette dokumentet omtales som *bygghetjbladet*. Bygghetjbladet presenterer eksempler på løsninger som tilfredsstiller de branntekniske kravene i TEK17. Bygghetjbladet redegjør for hvilke krav og forutsetninger som ligger til grunn for dokumentet. Videre beskrives fire prinsipper for ventilasjon: separat ventilasjonsanlegg i hver branncelle, steng-inne-løsning, trekk-ut-løsning og kombinert steng-inne- og trekk-ut-løsning. I motsetning til det første prinsippet, benytter de tre siste prinsippene samme ventilasjonsanlegg i hele eller større deler av bygget. De ulike prinsippene er kort beskrevet nedenfor.

3.3.1 Separate ventilasjonsanlegg i hver branncelle

Ved å benytte separate ventilasjonsanlegg i hver branncelle, vil ikke ventilasjonssystemene benytte seg av samme kanalnett, se Figur 3-1

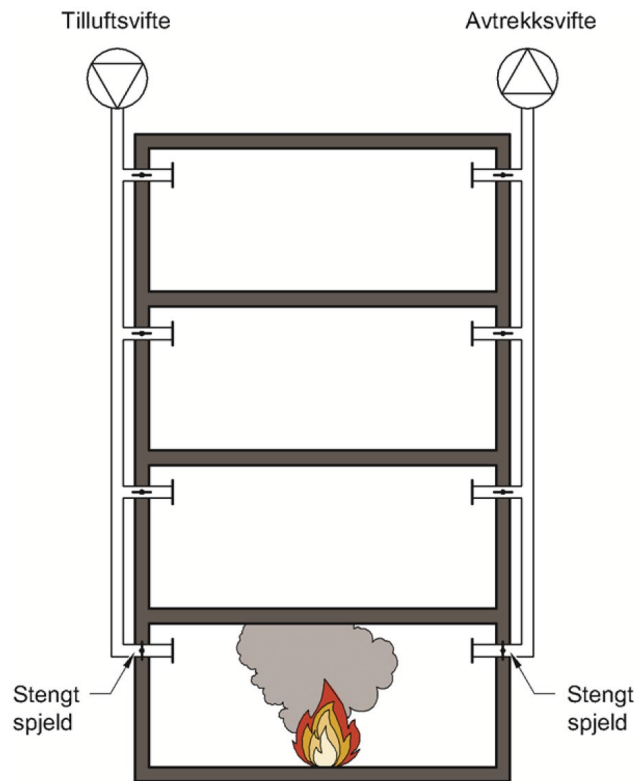
Prinsippkisse som viser løsningen med å benytte separate ventilasjonsanlegg i hver branncelle. Illustrasjon: Bygghetjserien 520.352, SINTEF Bygghetj [9].. Det vil derfor ikke være noen fare med tanke på brann- og røykspredning mellom branncellene forbundet med dette prinsippet.



Figur 3-1 Prinsippkisse som viser løsningen med å benytte separate ventilasjonsanlegg i hver branncelle. Illustrasjon: Bygghetjserien 520.352, SINTEF Bygghetj [9].

3.3.2 Steng-inne-løsning

Steng-inne-løsningen innebærer at man ved hjelp av spjeld stenger både avtrekks- og tilluftskanalene til det rommet hvor brannen er, slik at røyk og varme ikke trekkes inn i kanalnettet, se Figur 3-2 Prinsippkisse som viser steng-inne-løsningen. Spjeld på tilluftskanal og avtrekkskanal stenges for å stenge røyk og varme inne i branncellen. Illustrasjon: Bygghetjserien 520.352, SINTEF Bygghetj [9]..



Figur 3-2 Prinsippskisse som viser steng-inne-løsningen. Spjeld på tilluftskanal og avtrekkskanal stenges for å stenge røyk og varme inne i branncellen. Illustrasjon: Byggforskserien 520.352, SINTEF Byggforsk [9].

Byggdetaljbladet lister opp noen fordeler og utfordringer med denne løsningen:

- Metoden krever ikke beregninger.
- Med korrekt utførelse og riktige komponenter får man vanligvis god sikring mot at røyk og brann spres i bygningen via ventilasjonskanalene.
- Man behøver vanligvis ikke å brannisolere ventilasjonskanalene.
- Det er ikke behov for bypass og egen vifte for evakuering av branngasser.
- Det er svært viktig at anleggene programmeres og styres korrekt ved brann.
- Løsningen kan medføre behov for mange spjeld med tilhørende behov for automatisk kontroll, overvåking og testing.

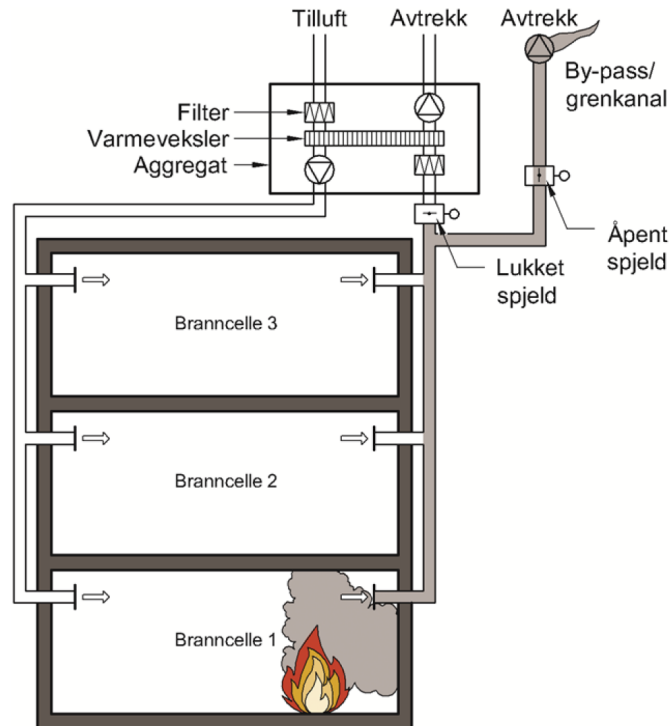
Videre påpeker byggdetaljbladet at man ikke trenger å isolere kanaler dersom EI-klassifiserte brann- og røykspjeld benyttes.

3.3.3 Trekk-ut-løsning

I motsetning til steng-inne-løsningen ønsker man ved trekk-ut-løsningen å trekke røyk og varme ut av branncellen, gjennom avtrekkskanalene ut til det fri. Dette gjøres ved at man øker tillufts- og avtrekksstrømmen, slik at man får transportert mest mulig røyk ut fra cellen, se Figur 3-3

Prinsippskisse som viser trekk-ut-løsningen. Spjeld på

tilluftskanal og avtrekkskanal holdes åpne, samtidig som massestrømmen gjennom anlegget økes for å trekke ut mest mulig røyk. Illustrasjon: Byggforskserien 520.352, SINTEF Byggforsk [9].



Figur 3-3 Prinsippskisse som viser trekk-ut-løsningen. Spjeld på tilluftskanal og avtrekkskanal holdes åpne, samtidig som massestrømmen gjennom anlegget økes for å trekke ut mest mulig røyk. Illustrasjon: Byggforskserien 520.352, SINTEF Byggforsk [9].

Byggdetaljbladet påpeker følgende forhold ved bruk av trekk-ut-løsningen:

- Spjeld må være av typen brann- og røykspjeld.
- Metoden kan kreve at både tillufts- og avtrekkskanaler brannisoleres.
- Det må ofte brukes avtrekksvifte som tåler høye temperaturer.
- Det må dokumenteres at vifte, motor og komponenter tåler aktuelle temperaturer ved brann.
- Ved bruk av VAV-system (Variable Air Volume) skal VAV-spjeldene ved brann åpne til en forhåndsbestemt stilling og stå fast i denne stillingen. Systemet fungerer dermed som et CAV-anlegg (Constant Air Volume) ved brann.

Byggdetaljbladet beskriver at kanaler og tilhørende komponenter i ventilasjonsanlegget må være av materialer som tilfredsstiller klassifiseringen A2-s1,d0 (ubrennbare materialer). Det er imidlertid et unntak for små komponenter, som ikke bidrar til brannspredning. Kanalene må også ha tilfredsstillende styrke og tetthet i henhold til standardene NS-EN 12237 (sirkulære kanaler) [35] og NS-EN 1506 (rektangulære kanaler) [36].

Når det gjelder isolering av tilluftskanaler, sier byggdetaljbladet at kanalene i utgangspunktet må isoleres i sin fulle lengde. Dette for å beskytte kanalene mot utvendig brannpåkjenning, det sies at «Kanalveggene kan bli så varme at det er fare for antenning av nærliggende brennbart materiale i nabobranncella.»

Man åpner derimot for å begrense isolasjonslengden på hver side av brannskillet, men at det krever særskilt analyse i hvert enkelt tilfelle. Videre står det at «I brannklasse 1 er brannisolering i $5 \times$ kanalens diameter på hver side av brannskillet normalt tilstrekkelig. I brannklasse 2 og 3 er det nødvendig med $6 \times$ kanalens diameter. Ved endeventiler hvor man kun kan brannisolere på én side anbefales $7 \times$ kanalens diameter. Nødvendig tykkelse på kanalisolasjon, oppheng, branntetting og liknende for å oppnå forutsatt brannmotstand, skal gå fram av produktdokumentasjonen til isolasjonsproduktet. Brannisolasjon skal være dokumentert og testet etter NS-EN 1366-1 for røyk- og brannspredning.»

Når det gjelder avtrekkskanaler, sier byggdetaljbladet at de må isoleres i hele lengden, med mindre beregninger eller analyse i det enkelte tilfellet viser noe annet. Dette begrunnes med at kanalgodset som blir utsatt for utvendig brann kan lede varme og antenne nærliggende brennbare materialer i nabobranncella. I tillegg til utvendig oppvarming kan kanalen også varmes opp av røykgasser i kanalsystemet. For å beregne behovet for kanalisolasjon, viser byggdetaljbladet til ligning (3.1) for å beregne blandingstemperaturer T_{bl} på luft og røykgasser i kanalsystemet. Det vises også til at man kan beregne blandingstemperaturer basert på massetettheter.

$$T_{bl} = \frac{(q_b T_b + q_n T_n)}{q_b + q_n} \quad (3.1)$$

Der

T_{bl}	er temperaturen på blandingen av luft og røykgasser [°C]
T_b	er temperatur på røykgasser i brannrommet [°C]
T_n	er lufttemperatur i øvrige rom (normalt 20 °C) [°C]
q_b	er volumstrøm fra brannrommet [m ³ /h]
q_n	er kald volumstrøm som røykgassene fra brannrommet blandes med [m ³ /h]

Ut fra blandingstemperaturene man kommer fram til, kan Tabell 3-1 benyttes til å bestemme hvilke branntekniske krav man skal stille til isolasjonen.

Tabell 3-1 Sammenheng mellom temperatur på røykgasser og branntekniske krav til kanalisolasjon [9].

Temperatur [°C]	Brannteknisk krav til isolering
< 160	Ingen krav
≤ 738	EI 15
≤ 842	EI 30
≤ 945	EI 60

Byggdetaljbladet påpeker videre at avtrekkskanaler som går via andre brannceller også kan eksponeres for utvendig brann, og derfor må brannisoleres, selv om beregnet blandingstemperatur er lav.

Når det gjelder kanaler over nedføret himling, sier byggdetaljbladet at disse kan være uisolerte dersom det ikke er brennbare materialer over himlingen og himlingen har brannmotstand EI 30 A2-s1,d0 i brannklasse 1 og EI 60 A2-s1,d0 i brannklasse 2 og 3.

3.3.4 Kombinert steng-inne- og trekk-ut-løsning

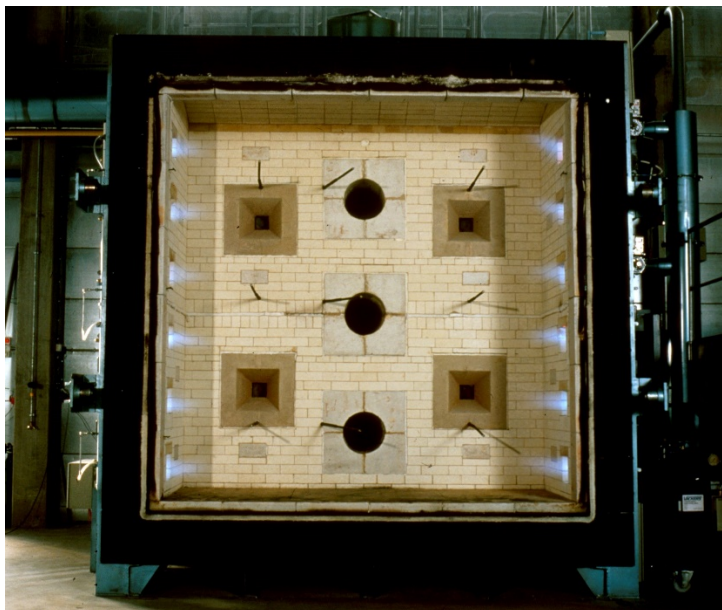
Når man kombinerer steng-inne- og trekk-ut-løsningen, stenger man spjeldene på tillufts- og avtrekkskanalen til branncellen. Samtidig holder man spjeldene på kanalene til de øvrige branncellene åpne for å trekke ut røyk som eventuelt har trengt gjennom utettheter i konstruksjonen.

3.4 BV Nett – Veileder for brannsikker ventilering

BV Nett er en sammenslutning av fagpersoner fra brann- og ventilasjonsmiljøene i Norge. I 2012 publiserte de *Veileder for brannsikker ventilering* [10]. Veilederen anbefaler løsninger for ventilasjon i bygg som vil tilfredsstille VTEK. Løsningene som anbefales skal være verifisert i henhold til angitte NS-EN-standarder. Disse løsningene skal bidra til å opprettholde brannmotstanden i brannskille som blir penetrert av ventilasjonskanaler. Veilederen omfatter prosjektering, dokumentasjon, utførelse, kontroll og vedlikehold av ventilasjon i henhold til forskrifter for brann sikkerhet i bygg. Etter at den første utgaven forelå i 2012, har det vært flere revisjoner, og versjon 4 ble publisert i november 2015.

4 Teststandarder

Brannmotstanden til ventilasjonskanaler og tilhørende komponenter som benyttes i bygg, blir testet i standardiserte testoppsett. I grove trekk blir testobjektet montert i en vegg som utgjør en av veggene i en testovn. Ovnens varmes opp i henhold til en predefinert tid-temperatur-kurve [37], og det stilles krav til maksimum temperaturøkning på ikke-eksponert side av testveggen.



Figur 4-1 Vertikal testovn for test av konstruksjoners brannmotstand. Prøvestykket som skal testes bygges inn i en ramme, som monteres på ovnen. Temperaturen i ovnen styres automatisk etter definerte tid-temperatur-kurver ved å justere pådraget fra propanbrennere og mengde friskluft som tilføres ovnen.

Tabell 4-1 lister opp seks relevante test- og klassifiseringsstandarder, samt en standard for utvidet av anvendelse av resultater fra brannmotstandstester, for denne typen produkter. Dette er standarder som gjelder for hele EU og EØS-området. NS-EN 1366-1 [38] definerer testoppsett og krav til ventilasjonskanaler, NS-EN 1366-2 [28] definerer det samme for brannspjeld, mens NS-EN 1366-3 [39] definerer testoppsett og krav til gjennomføringstettinger. Videre legger NS-EN 13501-3 [40] og NS-EN 13501-4 [41] føringer for hvordan resultatene fra brannmotstandstestene kan brukes for å klassifisere produktene med hensyn til isoleringsevne og integritet.

I de følgende underkapitlene er testprosedyrene gitt i NS-EN 1366 del 1 til 3 presentert.

Tabell 4-1 Test- og klassifiseringsstandarter relevante for ventilasjonskanaler og tilhørende komponenter.

Standard	Tittel
NS-EN 1366-1: 2014	Prøving av brannmotstanden til tekniske installasjoner - Del 1: Ventilasjonskanaler
NS-EN 1366-2: 2015	Prøving av brannmotstanden til tekniske installasjoner - Del 2: Brannspjeld
NS-EN 1366-3: 2009	Prøving av brannmotstanden til tekniske installasjoner - Del 3: Gjennomføringstetninger
NS-EN 13501-3: 2005 + A1:2009	Brannklassifisering av byggevarer og bygningsdeler - Del 3: klassifisering ved bruk av resultater fra brannmotstandsprøving av produkter og deler brukt i ventilasjonsanlegg: kanaler og spjeld med brannmotstand.
NS-EN 13501-4: 2007 + A1:2009	Brannklassifisering av byggevarer og bygningsdeler - Del 4: Klassifisering ved bruk av data fra brannmotstandsprøving av komponenter i røykkontrollsystemer
NS-EN 15882-1:2011 + A1:2017	Utvidet anvendelse av resultater fra prøving av brannmotstanden til tekniske installasjoner - Del 1: Kanaler

4.1 NS-EN 1366-1: 2014 - Prøving av brannmotstanden til tekniske installasjoner - Del 1: Ventilasjonskanaler

Denne standarden beskriver hvordan brannmotstanden for horisontale og vertikale kanaler med isolasjon skal testes.

Testoppsett

To scenarier skal testes. En kanal som er tett (simulerer brann utenfor kanalen), og en kanal som har åpninger på den delen av kanalen som er inne i ovnen (simulerer brann i kanalen). Kanalene monteres i en testvegg, som utgjør en av veggene i en testovn. Temperaturer på ueksponert del av kanalene måles med termoelementer, og lufttrykk og luftstrømhastigheter måles ved hjelp av trykkmålere.

Brann utenfor kanal

Kanalen er isolert på utsiden og er tettet igjen i begge ender. En slange forbinder enden av røret på utsiden av ovnen og en vifte, som sørger for at det er et undertrykk i kanalen på 300 ± 15 Pa gjennom hele testen.

Kanalen skal ha et maksimalt tverrsnitt på 800 mm for sirkulær kanal, og 1000 mm × 500 mm for rektangulær kanal.

Brann i kanal

Kanalen er isolert på utsiden og er tettet igjen i begge ender. Det er to åpninger på kanalen inne i ovnen med samlet areal lik $50 \% \pm 10 \%$ av kanalens tverrsnitt. En fleksibel slange er festet til enden av kanalen på utsiden av ovnen. En vifte sørger for å trekke luft gjennom kanalen. Under testen skal det være en kontinuerlig luftstrøm med hastighet på minst 3 m/s gjennom kanalen.

Kanalen skal ha et maksimalt tverrsnitt på 630 mm for sirkulær kanal, og 1000 mm × 250 mm for rektangulær kanal.

Kravene for bestått test:

- **Isolasjon (I):**

Det stilles krav til at overflatetemperaturen på ventilasjonskanalens ueksponerte side ikke skal øke med mer enn 180 °C i noen punkter. I tillegg skal

gjennomsnittstemperaturen for gitte termoelementet ikke stige med mer enn 140 °C.

Dersom det er brukt brennbare pakninger i kanalen, er det et krav om at temperaturen på innsiden av kanalgodset ikke øker mer enn 140 °C i gjennomsnitt, eller 180 °C i et punkt.

- **Integritet (E):**

Det stilles også krav til kanalens integritet (tetthet). Kravet innebærer at en bit bomull, som holdes 25 mm fra kanalen på ueksponert side, ikke antenner i løpet av 30 sekunder. I tillegg er det krav til at eventuelle sporadiske flammer har en maksimal varighet på 10 sekunder.

- **Røyklekkasje**

Volumstrømmen gjennom kanalen skal ikke overstige $10 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$, omregnet til normale temperaturer og trykk, og relatert til kanalens tverrsnitt i ovnen.

4.2 NS-EN 1366-2: 2015 – Prøving av brannmotstand til tekniske installasjoner – Del 2: Brannspjeld

Denne standarden beskriver hvordan brannmotstanden for brannspjeld skal testes.

Testoppsett:

Brannspjeldet monteres på et kanalstykke som går gjennom en testvegg som utgjør en av veggene i en testovn. Enden av kanalen som befinner seg i ovnen er åpen, mens enden utenfor ovnen er lukket. En slange forbinder enden av kanalen på utsiden av ovnen til en påkoblet vifte, som sørger for at det er et undertrykk i kanalen gjennom hele testen. Brannspjeldet installeres i åpen posisjon, og skal lukke seg innen to minutter etter teststart. Fra spjeldet er lukket skal det være et kontinuerlig undertrykk på 300 ± 15 Pa i kanalen. Temperaturer på ueksponert del av kanalene måles med termoelementer, og lufttrykk og luftstrømhastigheter måles ved hjelp av trykkmålere.

Krav for bestått test:

- **Isolasjon (I):**

Det stilles krav til at overflatetemperaturen på ventilasjonskanalens ueksponerte side ikke skal øke med mer enn 180 °C i noen punkter. I tillegg er skal ikke gjennomsnittstemperaturen for noen punkter stige med mer enn 140 °C .

- **Integritet (E):**

Det stilles også krav til spjeldets integritet (tetthet). Kravet innebærer at en bit bomull, som holdes 25 mm fra kanalen på ueksponert side ikke antenner i løpet av 30 sekunder. I tillegg er det krav til at eventuelle sporadiske flammer har en maksimal varighet på 10 sekunder.

Lekkasjerate gjennom spjeldet, måles ved hjelp av trykkmålere, og skal ikke overstige $360\text{ m}^3/(\text{h m}^2)$ (korrigert til luft ved 20 °C).

- **Lekkasje:**

Før test og til 5 minutter etter teststart skal lekkasjeraten ikke overstige $200\text{ m}^3/(\text{h m}^2)$ (korrigert til luft ved 20 °C). Etter 5 minutter etter teststart er det kravet til integritet (ovenfor) som gjelder.

4.3 NS-EN 1366-3: 2009 – Prøving av brannmotstand til tekniske installasjoner – Del 2: Gjennomføringstetninger

Denne standarden beskriver hvordan brannmotstanden for gjennomføringstetninger skal testes.

Testoppsett:

Avhengig av gjennomføringstetningens bruksområde, monteres kabler, rør og/eller kanaler i en testvegg som utgjør en av veggene i en testovn. Rundt kablene eller rørene påføres tetningsmassen som skal testes.

Krav for bestått test:

- **Isolasjon (I):**

Det stilles krav til at overflatetemperaturen på prøvestykkets ueksponerte side ikke skal øke med mer enn 180 °C i noen punkter.

- **Integritet (E):**

Det stilles også krav til tetningsmassens integritet (tetthet). Kravet innebærer at en bit bomull, som holdes 25 mm fra prøvestykket på ueksponert side ikke antenner i løpet av 30 sekunder. I tillegg er det krav til at eventuelle sporadiske flammer har en maksimal varighet på 10 sekunder.

5 Ventilasjonsanlegg som har medført brann- og røykspredning

Det finnes en rekke branner som ofte trekkes fram som eksempler der ventilasjonsanlegget skal ha bidratt i stor grad til at brann og røyk har spredt seg i en bygning [42]. Når man imidlertid går gjennom granskningsrapporter for disse brannene, kommer det fram at i de fleste tilfellene har ventilasjonsanlegget ikke bidratt til brann- og røykspredning, mens i et fåtall av brannene har ventilasjonsanlegget kun bidratt i mindre grad. I de tilfellene der ventilasjonsanlegget har spilt en rolle, har i hovedsak ventilasjonsanlegget blitt avstengt, og på den måten vært trykkløst. I andre tilfeller har det blitt dratt røyk inn i tilluftsanlegget, eksempelvis under brann på taket, uten at det var installert røykdetektor i tilluftsinntaket som kunne ført til at inntaket ble stengt.

5.1 Passasjerfergen Scandinavian Star, 1990

I brannen om bord på passasjerfergen Scandinavian Star i 1990, hvor 159 personer omkom, ble 99 av de omkomne funnet i lugarene sine. Lugarer og oppholdsrom hadde installert ventilasjonsanlegg etter overtrykksprinsippet, det vil si at luftmengden inn i rommet var større enn den som ble trukket ut. Ventilasjonsanlegget var laget slik at det skulle stanses ved brann, og brannspjeld skulle stenges på strategiske steder for å hindre røykspredning. Ingen av brannspjeldene ble stengt som de skulle.

Det har blitt hevdet at dette var på grunn av at røyk ble trukket inn i friskluftsinntaket til ventilasjonsanlegget og spredt til lugarene. En granskningsrapport fra SINTEF NBL [43] konkluderer derimot med at siden det ikke var sotavsetninger i kanalene, har tilluftskanalene ikke spredt røyk til lugarene mens anlegget var i drift. Røykspredningen til lugarene skal ha skjedd via lekkasjer gjennom utettheter rundt dører og i himling.

Det antatte arnestedet var i en korridor på styrbord side. Brannen ble sannsynligvis anlagt med bar ild mot brennbart materiale. Åpne trappeløp, både på styrbord og babord side, samt en åpen brannør mellom bildekket og trappeløpet på babord side, bidro til at røyken spredte seg mye i innledende fase av brannen.

5.2 Alstadhaug sykehjem, Sandnessjøen, 1974

I 1979 omkom 14 personer ved Alstadhaug sykehjem i Sandnessjøen. Denne brannen har blitt trukket fram som et eksempel på at røyk ble spredt av ventilasjonsanlegget [42]. Ved gjennomgang av analyse av brannforløpet og granskningen som ble gjennomført av SINTEF NBL i etterkant, kommer det imidlertid fram at helt andre faktorer bidro til at så mange omkom [44,45]:

- Røyken spredte seg i hovedsak gjennom åpne dører mellom brannrom og andre rom.
- Bruk av meget brennbare og sterkt røykutviklende materialer på pasientrommene
- Manglende brannvarslingsanlegg
- Manglende brannøvelser

Man kunne ikke påvise at ventilasjonsanlegget hadde hatt noen betydning for brannforløpet i dette tilfellet [45].

5.3 Gullhella sykehjem, Asker, 1979

6. november 1979 brant det i Gullhella sykehjem i Asker. Sykehjemmet var en toetasjes trebygning, og fem personer omkom. En rapport fra SINTEF NBL slår fast at åpne dører var en viktig årsak til røykspredning [45,46]. Røykspredning skjedde også via avtrekkskanaler etter at viftene stoppet, og kanalnettet ble trykkløst. Røykspredningen via avtrekkskanalene var imidlertid vesentlig mindre enn røykspredningen via åpne dører.

5.4 MGM Grand Hotel, USA, 1980

21. november 1980 brant det i et hotell i Las Vegas, USA [47]. 85 personer omkom, og mer enn 600 personer ble skadd. Det spesielle med denne brannen var at de aller fleste omkomne ble funnet i høyereliggende etasjer, langt unna der brannen befant seg. Hotellet var kun delsprinklet, og brannen oppsto i et restaurantområde som ikke var sprinkler. Brannen spredte seg raskt til nærliggende områder som ikke var sprinklet. Røyken spredte seg raskt inn til vertikale sjakter (heis, og jordskjelvfiger), og ble ledet helt opp til øverste etasje opp til et teknisk rom. Fire aggregater hentet luft fra dette tekniske rommet og fordelte lufta til gjesteromsdelen av hotellet. Røyk ble dermed spredt til korridorer fra utette sjakter og via ventilasjonsanlegget. En NFPA³-rapport peker på flere grunner til at brannen fikk så katastrofale følger:

- Ekstremt rask brann- og røykutvikling.
- Kun delsprinklet.
- Mangel på brannalarmanlegg.
- Manglende utstyr til brannslukking i den tidlige fasen av brannen.
- Ubeskyttede vertikale åpninger/sjakter.
- For dårlig tetting av trapperom og korridorer.
- Vertikal røykspredning i heissjaktene.
- Røykspredning til hotellrom via ventilasjonsanlegget.
- Brannspjeld var satt ut av drift eller fungerte ikke.

³ National Fire Protection Association, USA.

- Ventilasjonsanlegget fungerte slik at mye av lufta ble resirkulert for å unngå å måtte avkjøle all ny luft. Dette førte til at røykfylt luft som hadde blitt sendt ut til hotellrom sirkulerte, og i liten grad ble byttet ut,

I dette tilfellet var ventilasjonsanlegget medvirkende til røykspredningen. Røykspredningen via ventilasjonsanlegget er en del av det store bildet, og skyldes i stor grad mangelfull prosjektering ved at det ikke var installert røykdetektor i tilluftsanlegget. En slik detektor kan stenge tilluften dersom røyk detekteres.

5.5 Hotell Caledonien, Kristiansand, 1986

I 1986 brant det på hotell Caledonien i Kristiansand, og 14 personer omkom. Brannen startet i underetasjen. Mange av de omkomne ble funnet i områder et godt stykke unna brannen, og alle de omkomne døde av røykforgiftning. Dette har av flere blitt brukt som et argument for at ventilasjonsanlegget har spredt røyk. Ventilasjonsanlegget var utformet som et avtrekksanlegg med tilluft gjennom ventiler på vinduer. Ventilasjonsanlegget i de tre nederste etasjene der brannen befant seg, var ikke koblet til ventilasjonsanlegget i gjesteromsdelen. Faktorene som imidlertid spilte en stor rolle for utviklingen og konsekvensene av brannen var [48]:

- Manglende seksjonering i første og andre etasje.
- Svært brennbare materialer i startbranncellen.
- Utette dører til trapperom og heissjakter førte til at røyk spredte seg fra første etasje og opp til andre etasjer.
- Overtrykket i brannsonen medførte at røyk ble presset inn i heissjaktene. I første etasje stod heisen med døren åpen, og dette bidro spesielt til at røyken fikk spre seg. Hoveddelen av røyken som spredte seg til korridorene i gjesteromsdelen skyldtes utvilsomt røykspredning gjennom heissjaktene.
- Utettheter rundt et nedløp for vann fra taket bidro til brannspredning til tredje etasje.
- Dører til trapperom var ikke laget for å hindre røykgjennomtrenging. Trapperommene ble derfor fylt med røyk, og evakuering via trappene ble umulig. Ingen av gjestene ble evakuert gjennom trappen.
- Dører fra korridorer og inn til gjesterom var ikke røyktette, og overtrykk i korridor presset røyk inn i gjesterommene.
- Vinduene på gjesterommene kunne ikke åpnes.
- Det ble gitt beskjed om at gjester skulle oppholde seg på rommene sine inntil ny beskjed ble gitt. Fem minutter senere forsvant strømmen, og muligheten for evakuering ble ytterligere forverret.

Ventilasjonsanlegget kan tenkes å ha bidratt i noen grad til røykspredning gjennom en ventil som var plassert i hver korridor utenfor heisen. Uansett er det vurdert at ventilasjonsanleggets bidrag til røykspredning har vært minimal i forhold til andre

faktorer, som nevnt over. I følge myndighetenes granskningsrapport kunne det ikke påvises at større mengde røyk var spredt gjennom ventilasjonsanlegget i gjesteromsetasjene [48].

5.6 Domus kjøpesenter, Narvik, 2000

I 2000 oppsto det brann i Domus kjøpesenter i Narvik. Brannen oppsto etter stengetid, og hele kjøpesenteret ble etter hvert fylt med røyk. Ettersom kjøpesenteret hadde et ventilasjonsanlegg med omluft, er det grunn til å tro at ventilasjonsanlegget bidro til å spre røyk rundt om i bygget. Granskningsrapporten utarbeidet av Direktoratet for brann- og eksplosjonsvern (nåværende DSB) peker imidlertid på at store åpne områder har også hatt en avgjørende betydning på graden av røykspredning [49]. I tillegg påpekes det at brannen trolig kunne vært slokket tidligere om det automatiske slokkeanlegget ikke hadde vært frakoblet på det aktuelle tidspunktet.

5.7 Kvartal i Nordre gate, Trondheim, 2002

I 2002 begynte det å brenne i en frityrgrype i en restaurant i Nordre gate i Trondheim. Brannen spredte seg deretter videre til andre deler av bygget, og videre til hele kvartalet. Fra en granskningsrapport [50] utarbeidet av DSB trekkes det fram tre mulige måter brannen spredte seg fra frityrgrypen og til resten av bygget på. En mulig forklaring er at brannen spredte seg gjennom kjøkkenavtrekkskanalen, og at den varme kanaloverflaten har antent brennbart materiale i direkte kontakt. En annen forklaring er at det har vært åpninger i avtrekkskanalen, slik at fett har kunnet samle seg på utsiden. Dette fett har så begynte å brenne når kanalen ble varm. En siste forklaring går ut på at det har vært et hulrom mellom avtrekkskshette og veggen på kjøkkenet, slik at flammer har antent brennbart materiale her.

Videre pekes det på flere uheldige forhold under rehabilitering av bygget som har bidratt til at brannen fikk utvikle seg videre fra startbrannen. Den viktigste grunnen er at ventilasjonsrommet ikke ble bygget som en egen branncelle etter forskriften.

5.8 Sveio omsorgssenter, 2007

I 2007 brant det ved Sveio omsorgssenter i Sveio. To pasienter omkom. Avdelingen der det brant hadde et ventilasjonsanlegg som var atskilt fra de andre avdelingene. Brannen startet i totiden på natten inne på et lintøylager i første etasje. Dette rommet var utformet som en egen branncelle med brannmotstand EI 60. Rapporten fra myndighetenes granskning [51] beskriver at brannen i løpet av kort tid ble ventilasjonskontrollert, det vil si at det ble for lite oksygen i rommet til at brannen kunne brenne optimalt. Det ble dermed

produsert en rekke uforbrente brennbare gasser. Brannalarmen gikk, og pleierne undersøkte hvor alarmen kom fra. Døren inn til lintøylageret ble åpnet, men ble lukket like etterpå på grunn av at det var store mengder røyk i rommet. Like etterpå ble både dør og karm blåst ut av rommet. Dette skyldtes trolig at åpningen av døren har sluppet inn tilstrekkelig oksygen til at de brennbare gassene har spontanantent med en påfølgende temperatur- og trykkøkning. Røyk strømmet deretter ut i korridoren, som raskt ble overtent. Evakueringen gjennom korridoren ble etter dette umulig. Korridoren var i utgangspunktet delt i to med en røykskilledør. På den aktuelle natten ble denne døren holdt oppe av en trekile, som førte til at både røyken og brannen kunne spre seg uhindret. Ventilasjonsanlegget var normalt avslått på natten for å hindre forstyrrende støy og trekk fra anlegget. Sotavsetninger rundt ventilene viser at røyk har blitt spredt til flere rom gjennom ventilasjonsanlegget. Dette har skjedd ved at overtrykket som har oppstått i brannen har presset røyk gjennom det avslåtte, trykkløse anlegget. Dersom anlegget hadde vært aktivt, ville røykspredningen til pasientrommene vært redusert. Dersom anlegget hadde vært i drift, er det også mulig at brannen som oppsto på lintøylageret ikke så raskt hadde blitt ventilasjonskontrollert, og uforbrente, brennbare gasser ikke hadde blitt produsert i samme omfang. Sotavsetninger rundt dørkarmer viser imidlertid at røyk har lekket fra korridoren og inn til pasientrommene gjennom utettheter rundt dører. Rapporten vurderer også at kun et automatisk sløkkeanlegg kunne ha begrenset eller stoppet brannforløpet.

5.9 Thorvald Meyers gate, Oslo, 2014

I 2014 brant det i Thorvald Meyers gate på Grünerløkka i Oslo, og ifølge avisoppslag [52] «*spredte flammene seg gjennom ventilasjonsanlegget*». Dette er imidlertid ikke helt riktig. Brannen startet i en restaurant i første etasje av en bygård, og antente senere fett i kjøkkenavtrekket [53]. Avtrekkskanalen gikk gjennom en bod hvor det var stablet bunker med papir direkte oppå kanalen. Kanalen var uisolert i dette området, og brannen inne i kanalen førte til at overflaten ble så varm at papiret begynte å brenne. I tillegg til lagring av brennbart materiale direkte inntil kanal, var det flere grunner til røyk- og brannspredning i bygget. I restauranten hadde avtrekkskanalen falt ned på grunn av mangelfull innfesting i tak. Det var installert termiske brannspjeld (brannspjeld som lukker automatisk ved varme) i veggjennomføringen. Undersøkelser i ettertid viste imidlertid at brannspjeldet på kjøkkenavtrekket var fastlåst i åpen posisjon av et stag.

Referanser

- [1] Direktoratet for byggkvalitet, *Veiledning om tekniske krav til byggverk (VTEK)*. 2017.
- [2] *Byggeforskrift 1985*, bd. FOR 1985-11-15 nr 1892. 1984.
- [3] *Byggeforskrift 1987*, bd. FOR 1987-05-27 nr 0458. 1987.
- [4] Kommunal- og moderniseringsdepartementet, Klima- og miljødepartementet, *Forskrift 22. januar 1997 nr. 33 om krav til byggverk og produkter til byggverk (Forskrift om krav til byggverk, TEK97)*. 1997.
- [5] Kommunal- og moderniseringsdepartementet, *Forskrift 26. mars 2010 nr. 489 om tekniske krav til byggverk (Byggteknisk forskrift, TEK10)*. 2010.
- [6] «Rett og slett en veiledning til Byggeforskrift 1987». Statens bygningstekniske etat.
- [7] Statens bygningstekniske etat, *REN - Veiledning til teknisk forskrift til plan- og bygningsloven 1997. 2. utgave*. 1999.
- [8] Statens bygningstekniske etat, *REN - Veiledning til teknisk forskrift til plan- og bygningsloven 1997. 3. utgave*. 2003.
- [9] S. Andersson, «Brannsikring og røysikring av balanserte ventilasjonsanlegg», SINTEF Byggforsk, Byggdetaljer 520.352, apr. 2018.
- [10] «Veileder for brannsikker ventilering versjon 4 (BV Nett veileder)». 12 nov. 2015.
- [11] «NFPA 72 - National Fire Alarm and Signaling Code». National Fire Protection Association (NFPA), 1999.
- [12] M. J. Hurley mfl., *SFPE handbook of fire protection engineering*, 5. utg. USA: Springer, 2016.
- [13] N. Olsson, «Brandgassspredning via ventilationssystem», Lund Universitet, Lund, Sverige, Rapport 5038, 1999.
- [14] H. Prétrel, W. Le Saux, og L. Audouin, «Pressure variations induced by a pool fire in a well-confined and force-ventilated compartment», *Fire Saf. J.*, bd. 52, s. 11–24, aug. 2012.
- [15] S. Hostikka, R. K. Janardhan, U. Riaz, og T. Sikanen, «Fire-induced pressure and smoke spreading in mechanically ventilated buildings with air-tight envelopes», *Fire Saf. J.*, bd. 91, s. 380–388, 2017.
- [16] P. Gordonova, «Spread of smoke and fire gases via the ventilation system», Lund University, TABK-97/1011, jan. 1997.
- [17] S. E. Magnusson, «Rökspridning i byggnader: Kunnskapsöversikt och forskningsbehov», Lund Brandteknik, LTH, mar. 1983.
- [18] G. Heskestad, «Volume expansion pressures and global heat transfer in compartment fires», *Twenty-Fourth Symp. Combust.*, bd. 24, nr. 1, s. 1753–1760, jan. 1992.
- [19] R. Kallada Janardhan og S. Hostikka, «Experiments and Numerical Simulations of Pressure Effects in Apartment Fires», *Fire Technol.*, bd. 53, s. 1353–1377, 2017.
- [20] H. Prétrel og J. M. Such, «Effect of ventilation procedures on the behaviour of a fire compartment scenario», *Nucl. Eng. Des.*, bd. 235, nr. 20, s. 2155–2169, sep. 2005.
- [21] Klote, J.H., «Smoke Control», i *The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, 5. utg., Springer Science+Business Media LLC New York, 2016, s. 1785–1823.

- [22] J. P. Stensaas og P. A. Hansen, «Røykspredning i bygninger (Røykspredningsmekanimer – røykkontroll)», SINTEF NBL as, Trondheim, STF25 A93044, sep. 1993.
- [23] J. H. Klote og H. Nelson, «Smoke movement in buildings», i *NFPA Fire Protection Handbook, 18th Edition*, National Fire Protection Association, 1997, s. 7–93 to 7–104.
- [24] L. Jensen, «Spridning av rök och brandgaser i ventilationssystem», Lund tekniska högskola, Institut för bygnadskonstruktionslära, jan. 1993.
- [25] L. Jensen, «Brandgasspridning via ventilationssystem för flerrumsbrandceller», Lunds universitet, Sverige, TVIT--06/7007, 2006.
- [26] B. Backvik, T. Fagergren, og L. Jensen, *Installationsbrandskydd: ventilation, rör, el*. Brandskyddslaget, 2008.
- [27] J.-Ø. Hauken, «Risiko for spredning av flammer og røyk gjennom brannskiller ved endringer i bruk av sprinkler og røykkontroll i boligkvarter på petroleumssinnretninger», Masteroppgave, Universitet i Bergen, 2016.
- [28] «NS-EN 1366-2:2015 - Prøving av brannmotstanden til tekniske installasjoner - Del 2: Brannspjeld». Standard Norge, 2015.
- [29] Standard Norge, «NS-EN 1634-1:2014, Prøving av brannmotstand og røyktetthet til dører, porter og luker, åpningsbare vinduer og deler av bygningsbeslag - Del 1: Brannmotstandsprøving for dører, porter, luker og åpningsbare vinduer». Standard Norge, 2014.
- [30] «NS-EN 13501-2:2016 Brannklassifisering av byggevarer og bygningsdeler - Del 2: Klassifisering ved bruk av resultater fra brannmotstandsprøving, unntatt ventilasjonssystemer». Standard Norge, 2016.
- [31] Standard Norge, «NS-EN 1634-3:2004, Prøving av brannmotstand og røyktetthet til dører, porter og luker, åpningsbare vinduer og deler av bygningsbeslag - Del 3: Prøving av røyktetthet av dører, porter og luker». Standard Norge, 2004.
- [32] Standard Norge, «NS 3701:2012 Kriterier for passivhus og lavenergibygninger – Yrkesbygninger». Standard Norge, 2012.
- [33] K. M. Collett og M. R. Gallala, «Masteroppgave - Brannsikkerhet i ventilasjonssystemer - En analytisk gjennomgang av røykspredning i ventilasjonsanlegg», Trondheim, 2015.
- [34] S. Aastorp-Tangen og J. R. Gjendem, «Brannsikring av ventilasjonskanaler - Mastergradoppgave i teknologi», Universitetet i Tromsø, Tromsø, 2016.
- [35] «NS-EN 12237:2003. Ventilasjon i bygninger - Kanalsystem - Styrke og lekkasje for sirkulære kanaler av metallplater.» Standard Norge, 2003.
- [36] «NS-EN 1506:2007. Ventilasjon i bygninger - Ventilasjonskanaler og kanaldelar av metall med sirkulært tverrsnitt - Dimensjoner.» Standard Norge, 2007.
- [37] Standard Norge, «NS-EN 1363-1:1999, Prøving av brannmotstand - Del 1: Generelle krav.» Standard Norge, 1999.
- [38] «NS-EN 1366-1:2014 - Prøving av brannmotstand til tekniske installasjoner - Del 1: Ventilasjonskanaler». Standard Norge, 2014.
- [39] «NS-EN 1366-3:2009 - Prøving av brannmotstanden til tekniske installasjoner - Del 3: Gjennomføringstettinger». Standard Norge, 2009.
- [40] «NS-EN 13501-3:2005 Brannklassifisering av byggevarer og bygningsdeler - Del 3: Klassifisering ved bruk av resultater fra brannmotstandsprøving av produkter og deler brukt i ventilasjonsanlegg: kanaler og spjeld med brannmotstand». Standard Norge, 2005.

- [41] «NS-EN 13501-4:2007 Brannklassifisering av byggevarer og bygningsdeler - Del 4: Klassifisering ved bruk av resultater fra brannmotstandsprøving av komponenter i røykkontrollsystemer». Standard Norge, 2007.
- [42] S. Andersson, «Prinsippløsninger for brannsikker ventilasjon», presentert på Seminar om ventilasjon og brannsikkerhet i regi av Brannvernforeningen, Gardermoen, 30 mai. 2017.
- [43] Ø. Meland, «Brannen ombord i Scandinavian Star. En vurdering av ventilasjonsanleggets betydning i det tidlige brannforløpet», SINTEF NBL, STF25 A91018, 1991.
- [44] S. Lundberg, «Brannsikring av sykehus. Bygningstekniske løsninger; Seksjonering, varslings og sprinkleranlegg sett i relasjon til personalets muligheter for slokking og redning», SINTEF NBL, STF25 A81006, 1981.
- [45] Pedersen, Kjell Schmidt og L. Steinar, «Branner; systematisering og analyse. Delrapport 3. Analyse av 16 branner. Bind 1», SINTEF NBL, STF25 A81005, 1981.
- [46] Pedersen, Kjell Schmidt og L. Steinar, «Branner; systematisering og analyse. Delrapport 3. Analyse av 16 branner. Bind 2», SINTEF NBL, STF25 A81005, 1981.
- [47] R. Best og D. P. Demers, «Investigation Report on the MGM Grand Hotel Fire Las Vegas, Nevada November 21, 1980», National Fire Protection Association, LS-4, 1982.
- [48] Direktoratet for brann- og eksplosjonsvern og Statens bygningstekniske etat, «Rapport om brannen ved hotell Caledonien, Kristiansand 05.09.1986», jan. 1987.
- [49] «Granskningsrapport etter brannen i Domus Kjøpesenter i Narvik, 5. september 2000», Direktoratet for brann- og eksplosjonsvern, des. 2000.
- [50] «Granskningsrapport: brannen i kvartalet Thomas Angells gate, Nordre gate og Dronningens gate i Midtbyen i Trondheim», Direktoratet for brann- og elsikkerhet, 2003.
- [51] «Evalueringsrapport av brann 9. juni 2007 i Sveio Omsorgssenter», Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap og Statens bygningstekniske etat, 978-82-7768-117-7, 2007.
- [52] «30 evakuert etter brann på Grünerløkka i Oslo», 09 feb. 2014. [Online]. Tilgjengelig på: <https://www.vg.no/a/10129093>. [Åpnet: 31 okt. 2018].
- [53] A. M. Jacobsen, «Masteroppgave: Drift av ventilasjonsanlegg under brann i multiromsbygg», Høgskolen i Oslo og Akershus, Oslo, 2014.
- [54] E. Stamper og R. Koral, *Handbook of Air Conditioning Heating and Ventilation 3rd edition*. .
- [55] «Emissivity Coefficients Materials». [Online]. Tilgjengelig på: https://www.engineeringtoolbox.com/emissivity-coefficients-d_447.html. [Åpnet: 01 sep. 2018].
- [56] «Table of Total Emissivity». [Online]. Tilgjengelig på: <https://www.omega.com/temperature/Z/pdf/z088-089.pdf>. [Åpnet: 01 sep. 2018].
- [57] «Emissivity Table». [Online]. Tilgjengelig på: https://www.thermoworks.com/emissivity_table. [Åpnet: 01 sep. 2018].
- [58] Howell, John R, «SECTION B Factors From Differential Elements to Finite Areas B-29», *www.thermalradiation.net*. [Online]. Tilgjengelig på: <http://www.thermalradiation.net/sectionb/B-29.html>. [Åpnet: 01 sep. 2018].
- [59] Howell, John R, «SECTION B Factors From Differential Elements to Finite Areas B-31», *www.thermalradiation.net*. [Online]. Tilgjengelig på: <http://www.thermalradiation.net/sectionb/B-31.html>. [Åpnet: 01 sep. 2018].

Through our international collaboration programmes with academia, industry, and the public sector, we ensure the competitiveness of the Swedish business community on an international level and contribute to a sustainable society. Our 2,200 employees support and promote all manner of innovative processes, and our roughly 100 testbeds and demonstration facilities are instrumental in developing the future-proofing of products, technologies, and services. RISE Research Institutes of Sweden is fully owned by the Swedish state.

Gjennom internasjonalt samarbeid med akademi, næringsliv og offentlig sektor bidrar vi til et konkurransekraftig næringsliv og bærekraftig samfunn. RISEs 2 200 medarbeidere driver og støtter alle typer innovasjonsprosesser. Vi tilbyr et hundretalls test- og demonstrasjonsmiljø for framtidssikre produkter, teknikker og tjenester. RISE Research Institutes of Sweden eies av den svenske staten.



Research Institutes of Sweden AB
Postboks 4767 Torgarden, 7465 TRONDHEIM
Telefon: 464 18 000
E-post: post@risefr.no, Internett: www.risefr.no

RISE Fire Research
RISE-rapport 2019:11
ISBN: 978-91-88695-97-0