



Høgskulen på Vestlandet

Bacheloroppgave

Brannteknikk

ING3037

Predefinert informasjon

Startdato:	31-03-2020 09:00	Termin:	2020 VÅR
Sluttdato:	07-05-2020 14:00	Vurderingsform:	Norsk 6-trinns skala (A-F)
Eksamensform:	Bacheloroppgave med muntlig presentasjon/eksaminasjon		
SIS-kode:	203 ING3037 1 PRO-1 2020 VÅR HAUGESUND		
Intern sensor:	Ruben Dobler Strand		

Deltaker

Kandidatnr.: 319

Informasjon fra deltaker

Tittel *:	Brann og røykspredning som funksjon av endrede forskriftskrav for bolighus i tre		
Engelsk tittel *:	Fire and smoke spread as a function of modernized regulatory requirements for wooden single family houses		
Navn på veileder *:	Ruben Dobler Strand		
Sett hake dersom besvarelsen kan brukes som eksempel i undervisning?:	Ja	Egenerklæring *:	Ja
Jeg bekrefter at jeg har registrert oppgavetittelen på norsk og engelsk i StudentWeb og vet at denne vil stå på vitnemålet mitt *:	Ja	Inneholder besvarelsen konfidensielt materiale?:	Nei

Gruppe

Gruppenavn: (Anonymisert)
Gruppenummer: 6
Andre medlemmer i gruppen: 311

Jeg godkjenner avtalen om publisering av bacheloroppgaven min *

Ja

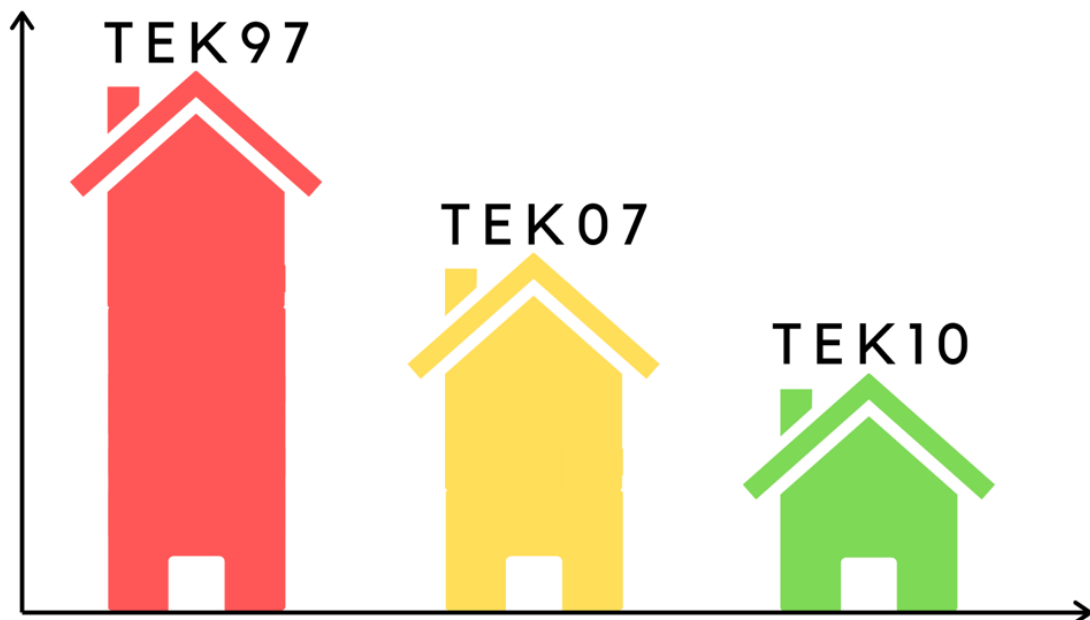
Er bacheloroppgaven skrevet som del av et større forskningsprosjekt ved HVL? *

Nei

Er bacheloroppgaven skrevet ved bedrift/virksomhet i næringsliv eller offentlig sektor? *

Ja, Kripos

Brann og røykspredning som funksjon av endrede forskriftskrav for bolighus i tre



Kim-Eirik O. Skjervold
Ådne Lunestad

Kandidatnummer: 319
Kandidatnummer: 311

BACHELORPROSJEKT

Studenten(e)s navn: Kim-Eirik O. Skjervold, 572151
Ådne Lunestad, 572148

Linje & studieretning: Ingeniør, brannsikkerhet

Oppgavens tittel: *Brann og røykspredning som funksjon av endrede forskriftskrav for bolighus i tre*

Oppgavetekst:

Oppgaven har til hensikt å vurdere branntekniske utfordringer som følge av den byggtekniske utviklingen gjennom TEK97 og TEK10. Det vektlegges de stadig strengere energikravene som medfører tettere hus med krav til balansert ventilasjon og et tykkere klimaskall.

Parametere som vektlegges i oppgaven er flamme- og røykspredning via vindu, dører og ventilasjon, samt overtenning. Det fokuseres videre på innredning og i hvilken grad ulike typer inventar bidrar til brannspredning.

Oppgaven drøftes med bakgrunn i litteraturstudie.

Endelig oppgave gitt: 04.03.20
Innleveringsfrist: Torsdag 7.mai 2020 kl. 12.00

Intern veileder: Ruben Dobler Strand, Høgskulen på Vestlandet
Ekstern veileder: Håvard Haftor Arntzen, Kripos
emailadresse ekstern veileder: havard.arntzen@politiet.no

Godkjent av studieansvarlig:



Dato: 16.04.2020

Oppgavens tittel: Brann og røykspredning som funksjon av endrede forskriftskrav for bolighus i tre		Rapportnummer:
Utført av: Kim-Eirik O. Skjervold Ådne Lunestad		
Linje: Sikkerhet, Brannteknikk	Studieretning: Ingeniør	
Gradering: Åpen	Innlevert dato: 20.05.2020	Veiledere: Ruben Dobler Strand (intern) Håvard Haftor Arntzen (ekstern)

Ekstrakt

Dagens forskriftskrav krever at energieffektiviseringen i nye norske bygg er strengere enn noen gang før. Gjennom systematiske endringer i byggereglene og kompensasjonsordninger fra myndighetene bygges nå hus som er robuste, tette og utrustet med tekniske system som sørger for et sunt innklima.

Endringene i forbindelse med økt energieffektivitet fremstår å endre det typiske brannforløpet for en rombrann. Grad av tetthet og tilgangen på oksygen bestemmer hvorvidt brannen blir underventilert i utviklingsfasen. Videre kan det forventes en større branneffekt og en hurtigere brannutvikling som følge av økte isolasjonsmengder og bruk av moderne møblement. Dersom vinduer eller dører ikke ødelegges som følge av de termiske påkjenningene og/eller overtrykket, vil ventilasjonsforholdene resultere i at brannen får en ufullstendig forbrenning i tillegg til en økt produksjon av røykgasser.

Forord

Rapporten er en avsluttende oppgave for en treårig bachelor i brannsikkerhet ved Høgskulen på Vestlandet, avd. Haugesund. Oppgaven utgjør 20 studiepoeng og består av en teknisk rapport, plakat, produkt og presentasjon. Problemstillingen ble presentert høsten 2019 av åstedsgransker i Kripos Håvard Haftor Arntzen.

I forbindelse med oppgaven skal de som har bidratt i prosessen takkes:

Intern veileder Ruben D. Strand som gjennom hele prosjektet har vært fleksibel og bistått oss ved alle døgnets timer med en upåklagelig veiledning.

Ekstern veileder Håvard H. Arntzen fra KRIPOS som med sin faglige tyngde og lange erfaring har gitt oss gode svar der det trengtes.

Bjarne C. Hansen, Reidar Skrunes, Andreas S. Bøe, Trond Ramstad og Knut I. Edvardsen for gode og utfyllende svar relatert til alt fra byggeregler til brannteori.

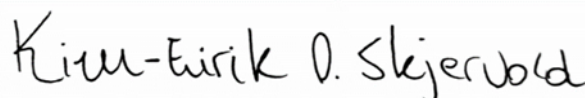
Sturla Ingebrigtsen, Geir I. Rimmereide og Haugesund blikk AS for gode svar på spørsmål relatert til boligventilasjon.

En stor takk til Gründerloftet og Ingvar Gjerland som har bistått med lokaler i den tiden høgskolen har vært stengt.

Haugesund 16.05.2020



Ådne Lunestad



Kim-Eirik Skjervold Olsen

Sammendrag

Med dagens strenge krav er nye norske bygg mer energieffektive enn før. Gjennom systematiske endringer i byggereglene og kompensasjonsordninger fra myndighetene bygges nå hus som er robuste, tette og utrustet med tekniske system som sørger for et sunt inn klima. De drastiske endringene som har skjedd i løpet av de siste 20 årene viser hvor stor innsats som legges ned i kampen mot klimautslipp.

Avhengig av når boligen er oppført, vil kravene i byggteknisk forskrift påvirke utrustningen til et bolighus. Hus oppført etter TEK97 vil ha visse egenskaper som skiller seg ut fra hus oppført etter TEK10. Spesielt relevant for tilfellet av en rombrann er utformingen av de ulike rommene: Rom oppført etter TEK10 vil gjerne ha vinduer med 3-lags isolerruter, vegger som tilhører klimaskallet vil bestå av en større mengde isolasjon i tillegg til at luftutskiftningene kun er avhengig av lufttilførselen fra ventilasjonsanlegget. Tilgjengelige åpninger i et lukket rom vil da normalt være spalteåpninger under dører og eventuelle tillufts- og/eller avtrekksventiler. Møblene er gjerne polstret, og inneholder en viss andel av syntetiske stoffer. De innvendige veggene vil normalt være konstruert av bindingsverk i tre med gips, trepanel eller trebaserte plater som materialkledning.

I et branntilfelle vil disse endringene i byggekroppen ha en stor innvirkning på utviklingen og spredningen av flammer og røykgass. Etterhvert som varm luft utvider seg og tar mer plass, vil vegger, lukkede dører og vinduer opptre som en hindring – herunder forhindret termisk ekspansjon. Etterhvert som luften krever mer plass for volumøkningen, vil trykket i rommet øke til en størrelse som hovedsakelig er avhengig av ventilasjonsforholdene, branneffekten og brannvekst i det omliggende området.

Endringene i forbindelse med økt energieffektivitet fremstår å endre det typiske brannforløpet for en rombrann. Graden av tetthet og tilgangen på oksygen bestemmer hvorvidt brannen blir underventilert i utviklingsfasen. Videre kan det forventes en større branneffekt og en hurtigere brannutvikling som følge av økte isolasjonsmengder og bruk av moderne møblement. Dersom vinduer eller dører ikke ødelegges som følge av de termiske påkjenningene og/eller overtrykket, vil ventilasjonsforholdene resultere i at brannen får en ufullstendig forbrenning i tillegg til en økt produksjon av røykgasser.

Summary

With today's strict requirements, new Norwegian buildings are more energy-efficient than ever before. Through systematic changes in the building requirements and compensation schemes from the authorities, houses being built now are robust, airtight and equipped with technical components which aim to ensure a healthy indoor climate. The drastic changes that has happened over the last 20 years show how much effort is put into fighting greenhouse gas emissions.

Depending on when the house is built, the requirements in the building regulations will differ: houses built according to TEK97 will have certain characteristics that stand out from houses built according to TEK10. Particularly relevant in the case of a room fire is the design of the various rooms: Rooms listed after TEK10 use windows with 3-layer insulation, a larger amount of insulation in the buildings clima shell, in addition to the wind and vapor barrier which will ensure that the exchange of air only depends on the air supply from the ventilation system. Available openings in a closed room will then normally be openings under doors and any supply air and / or exhaust valves. The furniture is often padded and contains a certain amount of plastic materials. The interior walls will normally be constructed of timber with plaster, wood paneling or wood-based boards as material cladding.

In case of a fire, these changes throughout the building will have a major impact on the development and spread of flames and smoke gases. As warm air expands and takes up more space, walls, closed doors and windows will act as a barrier and prevent the air's thermal expansion. As the air requires more space for the volume increase, the pressure in the room will increase to a size dependent on the ventilation conditions, the fire effect and the fire growth in the surrounding area.

The changes associated with increased energy efficiency appear to change the typical fire course of a compartment fire. The degree of density and the supply of oxygen determine whether the fire will be under-ventilated during the development phase. Furthermore, a greater fire effect and faster fire development can be expected as a result of increased insulation quantities and the use of modern furniture. If neither windows or doors are destroyed as a result of the thermal stresses and / or overpressures, the ventilation conditions will result in an incomplete combustion of the fire followed by an increased production of smoke gases.

Innholdsfortegnelse

Innholdsfortegnelse	VI
Figurliste	VIII
Tabelliste	IX
Terminologi.....	X
1. Innledning.....	1
1.1. Bakgrunn	1
1.2. Problemstilling	1
1.3. Formål	2
1.4. Avgrensninger.....	2
2. Metode.....	3
2.1.1. Validitet.....	3
3. Brannteori.....	4
3.1. Varmeoverføring.....	4
3.1.1. Varmeledning (Konduksjon).....	4
3.1.2. Varmegjennomgangskoeffisient/U-verdi	5
3.1.3. Varmestrømning (Konveksjon).....	5
3.1.4. Varmestråling	5
3.2. Rombrann	5
3.2.1. Antennelsesfase	6
3.2.2. Vekstfase	6
3.2.3. Overtenning.....	7
3.2.4. Fullt utviklet brann	8
3.2.5. Utbrenning.....	8
3.2.6. Overmetting.....	8
3.2.7. Backdraft	8
3.3. Røykspredning	9
3.3.1. Trykkoppbygning ved forhindret termisk ekspansjon	10
3.3.2. Termisk oppdrift.....	11
3.4. Flammespredning	12
4. Byggteknisk forskrift	14
4.1. Generelt	14
4.2. Tetthet	15

4.3.	<i>Isolasjon</i>	15
4.4.	<i>Ventilasjon</i>	16
4.5.	<i>Vinduer</i>	19
4.6.	<i>Utviklingen av forskriftskrav</i>	20
4.6.1.	<i>Energieffektivisering</i>	21
4.6.2.	<i>Prinsipp for dokumentasjon av tilfredsstilte energikrav</i>	22
4.7.	<i>Passivhus</i>	27
5.	Innredning	29
6.	Relevante forskningsstudier	31
6.1.	<i>Tetthet & isolasjon</i>	31
6.2.	<i>Ventilasjonsforhold</i>	32
6.3.	<i>Vinduenes effekt i et brannforløp</i>	33
7.	Diskusjon	36
7.1.	<i>Tette hus</i>	36
7.2.	<i>Ventilasjon</i>	39
7.3.	<i>Vinduer</i>	41
8.	Konklusjon	42
9.	Videre arbeid	44
10.	Referanser	45

Figurliste

Figur 1: Varmeoverføringsmekanismer	4
Figur 2: Fasene i rombrann	6
Figur 3: Overtenning	7
Figur 4: Overmetting	8
Figur 5: Dannelse av røyklag i en rombrann.....	9
Figur 6: Termisk ekspansjon	11
Figur 7: Termisk oppdrift	12
Figur 8: Brannspredning som funksjon av materialets orientering	13
Figur 9: Byggelovenes hierarki	14
Figur 10: Fra venstre: naturlig og mekanisk avtrekksventilasjon samt balansert ventilasjon..	17
Figur 11: Prinsipp for ventilasjonsluftens gang i bolig med avtrekksventilasjon	17
Figur 12: Prinsippiell skisse for SFP-verdien	18
Figur 13: Prinsippskisse for ulike brannsikringskonfigurasjoner	19
Figur 14: Prinsipp for passivt energidesign.....	21
Figur 15: Utvikling av TEK-krav mot minstekrav i NS 3700:2010	28
Figur 16: Eksempel på oppbygning av et stoppet møbel. Hentet fra [45] med oversettelse i [44]	29
Figur 17: Størrelsen på konteineren brukt i forsøket ved Lund universitetet. Hentet fra [51].	32
Figur 18: De ulike konfigurasjonene for avtrekksanlegget. Hentet fra [52]	32
Figur 19: Oppsett av forsøk. Hentet fra [56]	34
Figur 20: Langsom brannutvikling. Hentet fra [59]	35
Figur 21: Enkel modell over mulige hendelser ved brann i tette rom.....	36
Figur 22: Illustrasjon om hvordan en backdraft kan resultere i en fullt utviklet brann.....	38

Tabelliste

Tabell 1: Faktorer som påvirker flammehastighet [6].....	12
Tabell 2: Flammespredningsrate avhengig av orientering	13
Tabell 3: Beskrivelse av energiltakene tilhørende byggeteknisk forskrift	22
Tabell 4: Energikrav TEK97, 1.-3.utgave. Hentet fra [24]	23
Tabell 5: Energikrav TEK97, 4.utgave. Hentet fra [40].....	24
Tabell 6: Energikrav TEK10, 1.-2.utgave. Hentet fra [28]	25
Tabell 7: Energikrav TEK10, 3.utgave2. Hentet fra [41].....	26
Tabell 8: Minstekrav til byggkomponenter i passivhus iht. NS 3700:2010 og NS 3700:2012	27
Tabell 9: Eksempel på utvalgte energiltak for passivhus-bolig > 250 m ² samt TEK-krav	28
Tabell 10: Energifrigjøring som funksjon av luftmengde fra balansert ventilasjon	39
Tabell 11: Energifrigjøring i rom med avtrekk	40

Terminologi

Faguttrykksdatabasen til Kollegiet for brannfaglig terminologi (KBT) [1] er benyttet som hovedkilde for tabellen under.

Begrep	Forklaring
Begrenset flammebrann	Brann som er begrenset til del av et objekt.
Brenselskontrollert brann	En brann der tilgangen på brensel og brenselets egenskaper er bestemmende for brannens videre utvikling.
BRA (oppvarmet bruksareal)	Alle bruksareal som tilføres varme fra byggets varmeanlegg og er omsluttet av byggets klimaskjerm.
Fullt utviklet brann	Tilstand der alle brennbare materialer bidrar i en brann.
HRR	Energifrigjøring
Kuldebro	Representerer varmetapet som forekommer mellom ulike bygningsdeler
Lekkasjetall	Hvor mange ganger lufta blir skiftet ut ila. en time når det er forskjell i trykket inne og ute med 50 pascal
TEK	Forkortelse for Forskrift om tekniske krav til bygg, herunder byggteknisk forskrift
Varmestrømning	Transport av varmeenergi når væsker eller gasser strømmer.
Varmeledning	Transport av varmeenergi i stoffer.
Varmefluks	Mengde varmeenergi avgitt, transmittert eller mottatt per arealenhet og per tidsenhet.
Varmestråling	Overføring av varme ved elektromagnetisk stråling.
Ventilasjonskontrollert brann	En brann der tilgangen på luft er bestemmende for brannens videre utvikling.
VTEK	Forkortelse for Veiledning til byggteknisk forskrift

1. Innledning

1.1. Bakgrunn

Norge har hatt fungerende bygningsregler siden starten av 1800-tallet. Reglene baserte seg rundt fem prinsipper, som siden da har vært retningsgivende i norsk bygningslovgivning:

- Brannsikring
- Kommunikasjon
- Hygieniske krav
- Byggeteknisk kvalitet
- Estetiske spørsmål

Siden den tid har byggereglene utviklet seg i takt med samfunnet, og i dag står plan- og bygningsloven nr. 77 à 27.06 2008 [2] sentralt i utbyggingen av det nye og moderne Norge. Formålet med loven er å «*fremme bærekraftig utvikling til beste for den enkelte, samfunnet og fremtidige generasjoner.*» - Plan- og bygningsloven (pbl.) §1-1.

Det har siden 80-tallet vært et økende politisk fokus på miljø i Norge. Med det store energikonsumet byggemassen her til lands står for årlig, har myndighetene sett potensialet i å redusere det. Gjennom forskriftene (byggteknisk forskrift) tilhørende Plan- og bygningsloven underbygges de nasjonale energimålsettingene, og siden 1997 har krav til energieffektive bygg blitt satt på dagsordenen. Gjennom stadige revideringer har kravene blitt strengere, og myndighetene har ytret mål om at bygg skulle nå en passivhus-standard iløpet av 2015 [3]. En direkte konsekvens av dette er at det nå bygges boliger som er tettere i klimaskallet enn noen gang før. Tykkelsen på isolasjon i vegger, himling og gulv har økt markant i tillegg til at vinduer nå gjerne består av 3-lags ruter. I tillegg er nye hus nærmest pålagt å bruke energieffektive ventilasjonsanlegg som baserer seg på gjenbruk av luft. Ved å holde husene tette og mindre avhengig av fjernvarme er de store energipostene blitt kraftig redusert. Ettersom disse kravene går utover bygningskroppen, er det et behov for å kartlegge ulike momenter som representerer en risiko ved et branntilfelle.

På samme tid som den tekniske utformingen av bygningskroppen reguleres gjennom forskriftskrav, er det i hovedsak pris og estetikk som bestemmer byggets inventar. Samlet sett vil de ulike komponentene tilføre en stor brannenergi for de ulike rommene.

1.2. Problemstilling

Oppgaven vurderer utviklingen av norske bolighus oppført etter de byggetekniske forskriftene TEK97 og TEK10, og ønsker å kartlegge mulige branntekniske utfordringer som følger med disse.

Det legges vekt på de stadig strengere energikravene som medfører tettere hus med krav til balansert ventilasjon og et tykkere klimaskall. Parametere som vektlegges i oppgaven er flamme- og røykspredning via vindu og ventilasjon, samt overtenning. Det fokuseres videre på innredning og i hvilken grad nyere typer inventar bidrar i brannutviklingen.

Oppgaven drøftes med bakgrunn i litteraturstudie.

1.3. Formål

Formålet med oppgaven er å bestemme i hvilken grad utviklingen av de byggtekniske forskriftene påvirker utviklingen av en husbrann. Rapporten vil sette relevante forskriftskrav i kontekst med parametere som røykspredning og overtenning.

Hensikten med dette er å diskutere hvorvidt branner i boliger bygd etter nyere forskrifter har andre utviklingstrekk enn hus bygd etter de eldre forskriftene (TEK97). Gjennom kartlegging av krav i de ulike utgavene av forskriften har en prøvd å skaffe en oversikt over hvilke løsninger som i størst grad blir benyttet. Dette kan gi en indikasjon på hvordan ulike branner utvikler seg.

1.4. Avgrensninger

Av praktiske årsaker avgrenses oppgaven til kun å omhandle de mest relevante utviklingstrekkene i den norske boligmassen for et brannforløp. Rapporten er avgrenset til å omhandle bolighus i tre og de endringene i byggeforskriftene som innvirker på de parameterne som er relevante for brann og røykspredning. Andre endringer i den byggtekniske forskriften som ikke har direkte innvirkning er ikke tatt til betraktning. Selve brannforløpet er avgrenset til et lukket rom i et bolighus med ventilasjonsåpninger som dører og vinduer i lukkede posisjoner.

Det har vært nødvendig å avgrense tidsperioder da utviklingstrekkene for bolighus gjennom 1900-tallet har vært svært varierende. Av den grunn fokuserer oppgaven på bygg oppført etter forskriftene TEK97 og fram til TEK10 utgave 3.

2. Metode

Hensikten med metodekapittelet er å gi leseren et innblikk i prosessen rundt informasjonsinnhenting og arbeidet med rapporten. Etter tidlige diskusjoner ble det bestemt at rapporten skulle utarbeides i tråd med en kvalitativ metode og er derav et metastudie.

En kvalitativ metode beskriver data i form av tekst. I startfasen av arbeidet ble denne metoden brukt for å få et overblikk over tilgjengelige studier relatert til problemstillingen for å forme oppgaven og identifisere grunnlaget den kunne bygges opp på. Ved å gå i dybden på de ulike parameterne kunne deres rolle i et brannforløp kartlegges, og det kunne fastslås i hvilken grad de ville påvirke utviklingen av en brann. Videre kunne det med bakgrunn i brannteori gjøres visse antagelser på hvordan disse ville fungere i samspill med hverandre. Under gjennomgangen av rapporter og studier har det vært viktig å være kritisk til innholdet og presentere det som har vært relevant for problemstillingen.

En del av slutningene i rapporten kan til en viss grad være tentative ettersom mye er basert på ny forskning som ikke har vært etterprøvd eller gjenskapt. Muligheten for å validere resultatene av forskningen kan da bli vanskelig. Som nevnt ser forskningsartiklene på enkelte faktorer av hva som påvirker et brannforløp innenfor de rammene som er satt i problemstillingen. Et helhetlig brannforløp hvor alle disse elementene inngår kan dermed ha en annen utvikling enn det som fremstilles i rapporten. Dette kan være en svakhet i rapporten. Andre deler vil være mer sikre ettersom resultatene kan støttes av brannteorien og forskningsartikler med lignende resultater.

2.1.1. Validitet

En mulig feilkilde er at hypotesen om utfallet av rapporten har påvirket utvalget av forskning som er lagt til grunn for slutningene i rapporten. Relevant informasjon og resultater som motstrider antagelsene gjort på forhånd kan ha blitt prioritert bort. Dette har vært kjent gjennom arbeidet med rapporten og har blitt unngått etter beste evne for å holde feilkildene på et minimum.

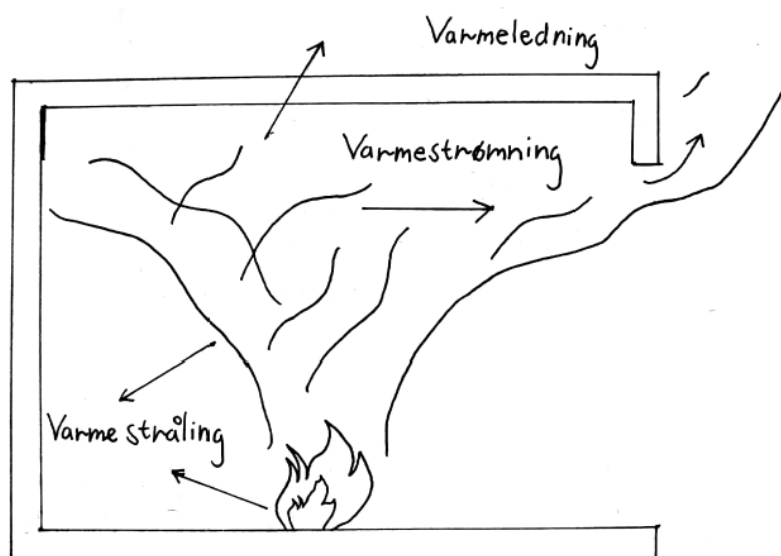
I enkelte av forsøkene som rapporten baserer seg på er parameterne ulike fra det som er typisk for et branntilfelle i en bolig oppført etter TEK 10. En del av forskningsstudiene er av passivhus, som er en tilnærming til bolighus oppført etter TEK 10. Det er derfor rimelig å anta at det vil være noen forskjeller mellom disse.

3. Brannteori

Dette kapittelet tar for seg den grunnleggende teorien som inngår i en rombrann med røyk- og flammespredning som hovedfokus. Teorien er i stor grad basert på informasjon hentet fra Grunnleggende brannteknikk av Bjarne C. Hagen og Enclosure Fire Dynamics av Björn Karlsson & James G. Quintiere [4] [5].

3.1. Varmeoverføring

Varmeoverføring er overføringen av energi fra varme til kalde områder og kan skje gjennom tre ulike mekanismer: varmeledning, varmestrømning eller varmestråling. Type varmeoverføring avhenger av hvilken aggregattilstand det er på stoffet som energien beveger seg gjennom. Mekanismene vil være fremtredende til ulike tider i brannforløpet avhengig av hvilken fase brannen befinner seg i. Energimengden som transporteres ved en varmeoverføring kalles varmemengde. Varmestrøm er varmemengde per tidsenhet. Varmefluks er varmestrøm per arealenhet [4]. Figur 1 illustrerer de ulike varmeoverføringsmekanismene.



Figur 1: Varmeoverføringsmekanismer

3.1.1. Varmeledning (Konduksjon)

Varmeledning beskriver transporten av varmeenergi i faste stoffer. Prosessen innebærer atomer og molekyler som med forskjellig kinetisk energi vil påvirke hverandre. Varmeledningsevnen til et stoff forteller hvor effektivt det leder energi, og en høy varmeledningsevne tilsier at materialet leder varme godt. I startfasen av en brann er varmeledning dominerende [4]. Figur 1 illustrerer varmeledningen der røyken varmer opp taket som leder varmen videre gjennom konstruksjonen. Dette kan gjøre at brannen sprer seg til nye materialer og områder.

3.1.2. Varmegjennomgangskoeffisient/U-verdi

Varmegjennomgangskoeffisienten er et mål på den varmeisolerende evnen til en bygningsdel, og beskrives uttrykkes gjerne gjennom en U-verdi. Dersom verdien for koeffisienten er lav betyr det at lite varme gjennomtrenger materialene og varmeisoleringen er god. Benevnningen for U-verdien ($W/m^2 K$) angir varmestrømmen gjennom en kvadratmeter av en bygningsdel ved 1 kelvin temperaturforskjell mellom inne og ute. Bygningsdeler er ofte sammensatt av ulike materialer som tre og isolasjon, og varmemotstanden til de forskjellige sjiktene i bygningsdelen blir da lagt sammen for å regne ut U-verdien.

3.1.3. Varmestrømning (Konveksjon)

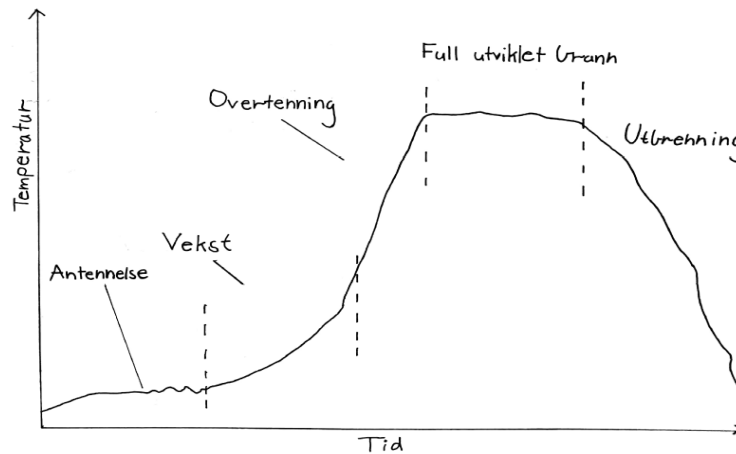
Varmestrømning er transport av varmeenergi når væsker eller gasser strømmer over et fast materiale hvor temperaturforskjellen mellom væsken og det faste materialet medfører transport av energi. Denne varmeoverføringen er vanlig i startfasen av brannen før varmestrålingen blir dominerende. Varmestrømningen fører til at omliggende brennbare materialer blir forvarmet og lettere antenner når de blir eksponert for flammer [4]. Som vist i Figur 1 går røykstrømmen over takoverflaten slik at det blir forvarmet og senere kan antenne.

3.1.4. Varmestråling

Varmestråling er overføring av varme ved elektromagnetisk stråling. Denne varmeoverføringsmekanismen trenger ikke et fluid eller faste stoffer for å overføre energi. Mengden stråling som blir avgitt er proporsjonal med den absolutte temperaturen opphøyd i 4. potens. Varmestrålingen er dominerende i branner hvor det har blitt dannet et røyklag og ved større branner. Det er hovedsakelig sotpartiklene dannet i forbrenningen som forårsaker strålingen fra branner, og stråling fra både røyklag og flammene fører til at materialer kan forvarmes og spontanantenne [4]. Dette illustreres i Figur 1 hvor veggen og gulvet inntil brannen forvarmes av strålingen fra både røyken og flammene.

3.2. Rombrann

En brann i et rom starter ved en antennelse som utvikler og sprer seg til brennbart materiale gjennom ulike typer varmeoverføring. Brannen kan utvikle seg ulikt på bakgrunn av geometri, ventilasjon, type og mengde brensel samt de omliggende overflaters egenskaper. En rombrann går gjennom fire ulike faser fra antennelse til utbrenning: antennelse, vekstfase, fullt utviklet brann og utbrenning (se Figur 2), og fasenes varighet avhenger av mengden brennbart materiale og tilgang på oksygen [5].



Figur 2: Fasene i rombrann

3.2.1. Antennelsesfase

I antennelsesfasen starter brannen ved at et fast stoff, gass eller væske blir antent. For at dette skal skje må det frigjøres tilstrekkelig med energi fra en kjemisk reaksjon til at den kan fortsette uten ekstern energitilførsel. Antennelse kan forekomme ved pilotantennelse, spontanantennelse eller selvantennelse: ved en pilotantennelse starter brannen ved en tennkilde. Dette kan være flamme, gnister eller glør. En spontanantennelse skjer ved at et materiale blir varmet opp av en ytre varmekilde til sin spontanantennelsestemperatur før den antenner. En selvantennelse oppstår når et materiale selv produserer energi og energien produseres i større grad enn den transporteres bort [5].

3.2.2. Vekstfase

I vekstfasen utvikler og vokser brannen. En videre vekst er hovedsakelig avhengig av tilgangen på brennbart materiale og oksygen. I tillegg vil rommets geometri og type forbrenning ha noe å si på brannutviklingen. Brannen kan utvikle seg på tre forskjellige måter: den kan vokse, slukke eller brenne konstant. Dersom brannen utvikler seg til en ulmebrann vil den ha svært lav energiproduksjon. Ulmebranner kan dø ut før de utvikler seg videre til neste fase. En flammebrann kan ha rask vekstfase med tilstrekkelig oksygen og brennbart materiale. Ved tilstrekkelig tilgang på oksygen er flammebrannen brenselkontrollert [5]. Ligning 1 forklarer generelt hvordan massetapsraten av brennbar gass avhenger av tilført varmefluks og energien det kreves for å omgjøre faste stoffer til gass.

$$\dot{m}'' = \frac{\dot{Q}_F'' - \dot{Q}_L''}{\Delta H_g} \quad (1)$$

Der:

\dot{m}'' er brenselsraten $\left[\frac{g}{m^2s} \right]$

$\dot{Q}_F'' - \dot{Q}_L''$ er netto varmefluks avgitt av flammen til brenselet $\left[\frac{kW}{m^2} \right]$

ΔH_g er energien som kreves for å omdanne faste stoffer til gass $\left[\frac{kJ}{g} \right]$

Energifrigjøringen fra en brann kan estimeres hvis hastigheten på luftinnstrømningen er kjent. Forutsatt at alt oksygen forbrukes i brannen, er energifrigjøringen [6] :

$$\dot{Q}_c = \dot{m}_{luft} \cdot \Delta H_{c,luft} \quad (2)$$

Der:

\dot{Q}_c er energifrigjøringen [kW]

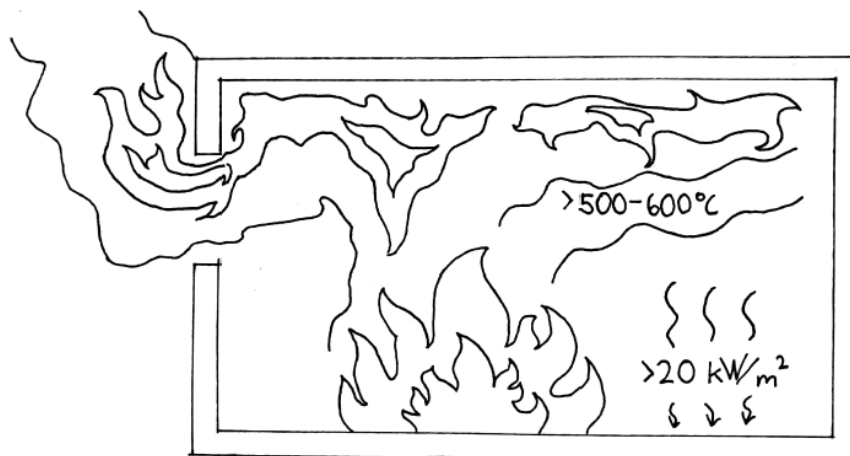
\dot{m}_{luft} er massestrøm av luft $\left[\frac{g}{s}\right]$

$\Delta H_{c,luft}$ er forbrenningsvarmen til luft $\left[\frac{kJ}{g}\right]$

Energifrigjøringen er avhengig av materialets forbrenningsvarme. Forbrenningsvarmen kan bestemmes ut ifra dannelsesvarmen til reaktantene og produktene i reaksjonen.

3.2.3. Overtenning

Overtenning beskriver overgangen fra en begrenset flammebrann i utviklingsfasen til en fullt utviklet brann hvor alle brennbare overflater i et rom deltar i brannen. For at en overtenning skal inntreffe må alle brennbare overflater nå sin antennelsestemperatur. Overtenning kan utløses på fem mulige måter: Spontanantennelse, overflatespredning, branngassantennelse, backdraft og branneeksplosjon [7]. Kjentegnene på en overtenning er at temperaturen i røyklaget overstiger 500-600 °C, varmestrålingen fra røyklaget til gulvflaten overstiger 20 kW/m² og flammer kommer ut av åpningene på brannrommet [4]. Dette er illustrert i Figur 3. Den hurtige brannutviklingen skjer på bakgrunn av at uforbrent brensel i røyklaget antenner og forbrenner. Overtenning er ikke en fase i rombrann, men er et fenomen som ofte oppstår når tilgangen på oksygen er tilstrekkelig [5].



Figur 3: Overtenning

3.2.4. Fullt utviklet brann

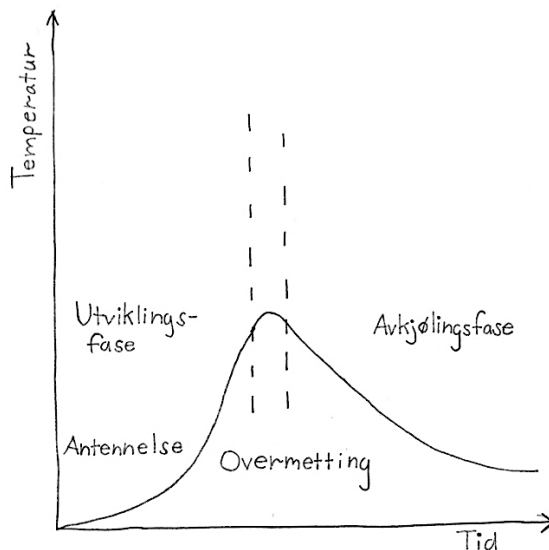
I denne fasen involveres alt brennbart materiale i rommet. Brannen går fra å være brenselskontrollert i vekstfasen til å bli ventilasjonskontrollert. Størrelsen på brannen blir begrenset av tilgangen på oksygen og det forekommer en ufullstendig forbrenning. De uforbrente gassene som strømmer ut av rommet innehar så høye temperaturer at de antenner i kontakt med oksygen på utsiden [5].

3.2.5. Utbrenning

Utbrenning er fasen der mengden brennbar gass er såpass redusert at brannens omfang ikke kan opprettholdes. Brannen blir igjen brenselskontrollert ettersom det meste av det brennbare materiale er forbrent. Energiproduksjonen og temperaturen i rommet reduseres [5].

3.2.6. Overmetting

Overmetting beskriver overgangen fra en begrenset flammebrann til brannen har slokket på grunn av mangel på oksygen [1]. Mangelen på oksygen sørger for at røyken i rommet kommer over den øvre brennbarhetsgrensen i utviklingsfasen. Oksygenkonsentrasjonen vil være nærmere 10% eller mindre for at dette skal inntreffe. Røyken vil erfaringsmessig fylle store deler av rommet ved en overmetting og rommet får økt trykk som følge av økende temperaturer og svært lite trykkavlastning [7]. Når brannen kveles og slokner vil temperaturen og trykket avta. Et mindre rom med lite lufttilførsel vil raskere fylles opp med røyk og bruke oksygenet mens et større rom vil bruke lengre tid på å oppnå overmetting. Temperaturkurven vil øke fram til brannen får for lite lufttilførsel, som illustrert i Figur 4:



Figur 4: Overmetting

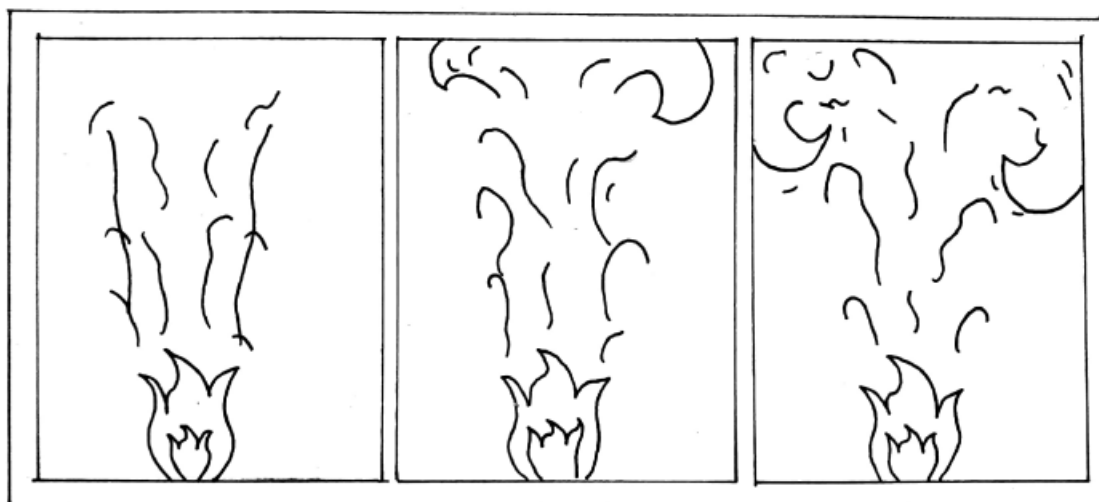
3.2.7. Backdraft

I tilfellet av en overmetting vil en økt produksjon av brennbar gass og lite oksygen sørge for dannelsen av en brennbar gassluftblanding. Ved introduksjon av større mengder oksygen gjennom åpningen av et vindu eller en dør kan denne brennbare gassluftblandingen antenne forutsatt at temperaturen er tilstrekkelig. På grunn av trykket som allerede befinner seg i

rommet, vil denne blandingen presses ut av rommet i form av en ildkule. Dette fenomenet kalles backdraft. Etter en backdraft vil det forkomme en overtenning som resulterer i en fullt utviklet brann ettersom ildkulen antenner alt brennbart materiale i rommet [4].

3.3. Røykspredning

Etter antennelse vil brannen være brenselskontrollert, og forbrenningsreaksjonene som tar plass avgir energi som varmer opp den omliggende lufta. Ved blanding av denne lufta og forbrenningsprodukter fra reaksjonen, vil det dannes en røyksøyle som stiger ut fra flammen. Brannens videre utvikling er i stor grad avhengig av området rundt. I tilfellet av en rombrann vil røyksøylen treffe et tak hvor den brer seg ut i alle retninger i et relativt tynt lag, til den treffer veggene og brer seg nedover som illustrert i Figur 5 [4]:



Figur 5: Dannelse av røyklag i en rombrann

Oppdriftskreftene fører til at den kontinuerlige produksjonen av røyk fra flammen føres til røyklaget under taket, som med tiden øker i volum og dermed presses ned mot gulvhøyde. De betydelige energimengdene som utvikles i brannrommet fører til en trykkoppbygning ettersom den termiske ekspansjonen ikke kan skje fritt. Trykkoppbygningen fører til at røyken presses ut i de åpningene den møter på. Inntrufne hendelser viser at røykgasser selv i store bygg har mulighet til å spre seg med stor hastighet og utgjøre en fare for inhalering av giftige gasser samt reduksjonen av sikt i rømningsveier. For at spredningen av røyk skal forekomme, må tre faktorer være tilstede [8]:

- Røykproduksjon pga. en brann
- Lekkasjeåpninger mellom rommene i bygget
- Trykkdifferanser som forårsaker røykspredning

Røykgasser strømmer fra områder med høyt trykk til områder med lavt trykk. Hastigheten og omfanget av røykspredningen er dermed avhengig av størrelsen på trykkforskjellene mellom disse områdene. Lekkasjeåpninger kan være alt fra døråpninger til spalter rundt dører rør eller kabelgjennomføringer. Utettheter ved møtepunkt mellom vegger, tak eller gulv kan også føre

til røykspredning [9]. I mindre sprekker vil det kun spres små mengder røyk om gangen, som fort vil bli nedkjølt av den omkringliggende luften. Dersom røyken derimot strømmer gjennom større åpninger som dører og vinduer vil det føre til en langt mindre luftinnblanding og en tregere avkjøling av røyken. Dette øker den videre effekten røyken vil ha på de omliggende områdene [10].

Inhaleringen av giftige røykgasser står for omtrent 60-75% av dødsfallene i en brann, og den vanligste gassen som personer dør av er karbonmonoksid (CO) [11]. Disse tallene viser til at det heller er røykgassene som er farlig mennesker som befinner seg i brennende bygg. De fleste omkomne i brann, og spesielt de som dør som følge av inhaleringen av giftige røykgasser, har oppholdt seg i rom som er relativt langt unna arnestedet.

3.3.1. Trykkoppbygning ved forhindret termisk ekspansjon

I ethvert branntilfelle vil varmen fra forbrenningen sørge for at den omliggende luften utvider seg i volum. I de tilfellene brannen befinner seg i rom, vil vegger, tak og gulv forhindre denne utvidelsen, og sørge for at trykket i rommet øker (se Figur 6). Trykkoppbygningen er et forhold mellom brannutviklingens hurtighet, volumet på rommet og lekkasjearealet. Under brannens utviklingsfase vil det oppstå en periode med høyt trykk hvor varigheten normalt vil være i noen få minutter, men maksimaltrykket i stor grad kan variere. For at det skal forekomme en trykkøkning av betydning må det være dårlige ventilasjonsforhold for brannen (små lekkasjeareal), en rask brannutvikling og en tilfredsstillende størrelse på rommet i forhold til brannen [9]. I svært tette rom vil det reduserte lekkasjearealet kunne resultere i svært høye størrelser på trykket.

Etterhvert som den termiske ekspansjonen fører til et overtrykk i brannrommet vil det oppstå en bevegelse i røyken. Ligning 2 kan bestemme trykkøkningen ved forhindret termisk ekspansjon:

$$\Delta p = \left(\frac{Q}{c_p \cdot T_b \cdot A} \right)^2 \cdot \frac{1}{2\rho_e} \quad (3)$$

Der:

Δp er trykkøkning forårsaket av forhindret termisk ekspansjon

Q er hastigheten for varmeavgivelsen i rommet på grunn av brannen [kW]

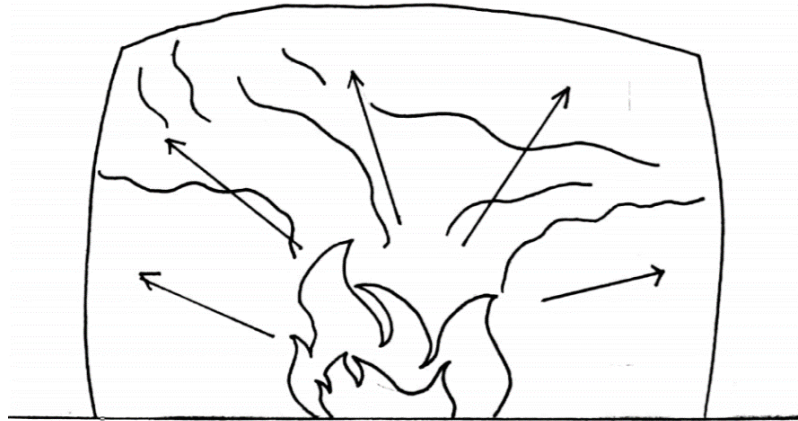
c_p er spesifikk varmekapasitet for luft $\approx 1 \left[\frac{kJ}{kg K} \right]$

T_b er temperaturen på røykgassene som forlater rommet [K]

A er rommets totale lekkasjeareal [m^2]

ρ_e er tetthet til røykgassene som forlater rommet $\left[\frac{kg}{m^3} \right] = 352,17/T_b$ (fra ideell gasslov)

Som det framkommer av likningen øker overtrykket proporsjonalt med kvadratet av energiutviklingen og er omvendt proporsjonal med kvadratet av rommets totale lekkasjerate. Dersom lekkasjearealet for rommet avtar øker overtrykket raskt. I et meget tett rom med rask brannutvikling kan overtrykket bli av en høyere størrelsesorden som følge av forhindret termisk ekspansjon [9].



Figur 6: Termisk ekspansjon

3.3.2. Termisk oppdrift

Etterhvert som røyk varmes opp vil den utvide seg og få en redusert tetthet som gjør den lettere enn omgivende og romtemperert luft. Røykgassens temperatur kan bli høy som videre fører til stor oppdrift i brannrommet [9]. Trykkdifferansen mellom brannrommet og de omliggende rommene som følge av oppdrift kan uttrykkes ved Ligning 4:

$$\Delta p = K \cdot \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_g} \right) \cdot d \quad (4)$$

Der:

Δp er trykkdifferansen [Pa]

K er $gp_0/R \approx 3460$

g er tyngdens akselerasjon $\left[\frac{m}{s^2} \right] = 9,81 \left[\frac{m}{s^2} \right]$

p_0 er atmosfæretrykket [Pa] $\approx 1,01 \cdot 10^5$ Pa

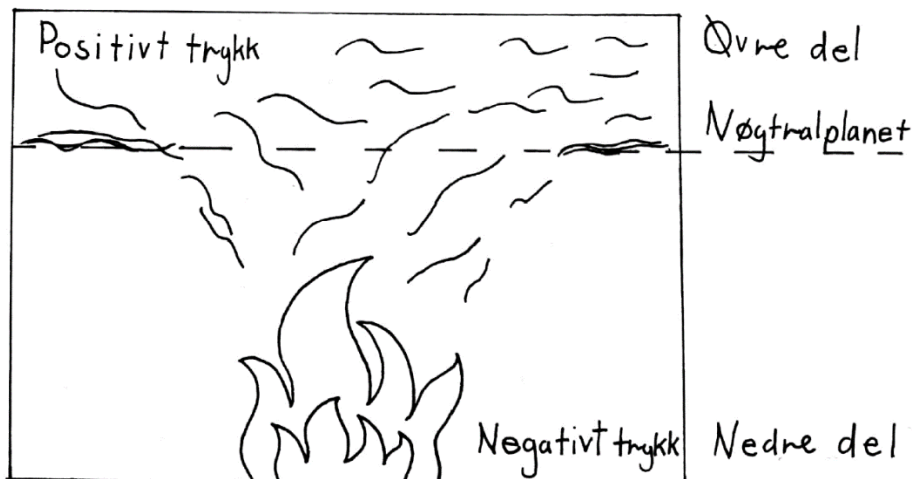
R er den spesifikke gasskonstanten $\left[\frac{kJ}{kg K} \right] = 0,2871 \left[\frac{kJ}{kg K} \right]$

T_0 er uteluftens temperatur [K]

T_g er temperaturen på røykgassene i brannrommet [K]

d er avstanden over nøytralplanet i rommet [m]

Den termiske oppdriften og ekspansjonen fører til at røykgassene presses ut av åpninger i øvre del av rommet mens frisk luft trekkes inn i nedre del av rommet. Trykket er positivt i øvre del av rommet mens trykket er negativt i den nedre. I et plan over gulvet ved brann i rom er trykkdifferansen null. Dette kalles nøytralplanet, og delen over nøytralplanet defineres som øvre del mens delen under er nedre del. Inndelingen av brannrommet er illustrert i Figur 7.



Figur 7: Termisk oppdrift

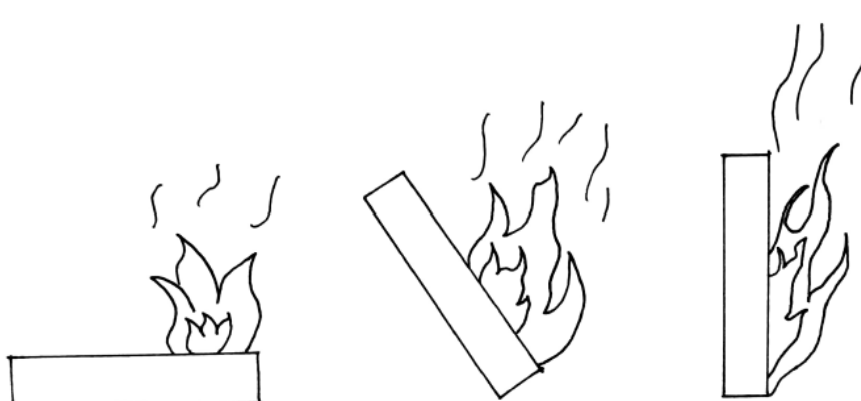
3.4. Flammespredning

Etter en antenning vil spredningen av flammer foregå via overflater dersom forholdene ligger til rette. Hastigheten på spredningen kan være like avhengig av de fysiske som de kjemiske egenskapene til de materialene det brenner i (se Tabell 1).

Tabell 1: Faktorer som påvirker flammehastighet [6]

Materielle faktorer		Omkringliggende faktorer
Kjemiske egenskaper	Fysiske egenskaper	
<ul style="list-style-type: none"> • Brenselets sammensetning • Grad av flammehemmende stoffer 	<ul style="list-style-type: none"> • Starttemperatur • Tykkelse • Termisk kapasitet • Termisk konduktivitet • Tetthet • Geometri • Overflateretning • Propageringsretning • Kontinuitet 	<ul style="list-style-type: none"> • Atmosfærens sammensetning • Omliggende trykk • Omgivelses-temperatur • Påført varmefluks • Lufthastighet

Et viktig grunnlag for flammespredning i en rombrann er produksjonen av røykgasser. Røyklaget som befinner seg under taket vil holde en høy temperatur og avgi en kraftig varmestråling som vil varme opp andre objekter i rommet. Flammer spres enten ved at objektene selv antenner eller ved at flammene fra de allerede brennende objektene antenner de forvarmede objektene.



Figur 8: Brannspredning som funksjon av materialets orientering

Til forskjell fra væsker, kan faste materialer befinne seg i ulike retninger som i stor grad vil kunne ha noe å si for utviklingen av brannen (se Figur 8). En tommelfingerregel er at det brenner sekunder oppover, minutter til side og timer nedover. Dette kan understøttes med resultater funnet av Mcavely og Magee [12] gjengitt i Tabell 2:

Tabell 2: Flammespredningsrate avhengig av orientering

Orientering	Flammespredningsrate (mm/s)
0° (horisontal)	3,6
+22,5°	6,3
+45°	11,2
+75°	29,2
+90° (vertikalt, oppreist)	47-74 (tildels uberegnelig)

Årsaken til den hurtige vertikalspredningen er de naturlige oppdriftskreftene som gjelder for den varmere luften i og rundt flammestoppen. Når varm luft stiger over flammen, vil den sammen med stråling fra flammen varme opp de overliggende materialene, og sørge for at pyrolyseringen skjer raskere. Hvordan forskjellen på retningen til faste materialer påvirker utviklingen i brann er illustrert i Figur 8. Objektet til venstre er mest dominert av varmeledning mens det objektet høyre i figuren er mer dominert av varmestrømning og varmestråling.

Flammespredningen er drevet av en syklus av følgende faktorer [10]:

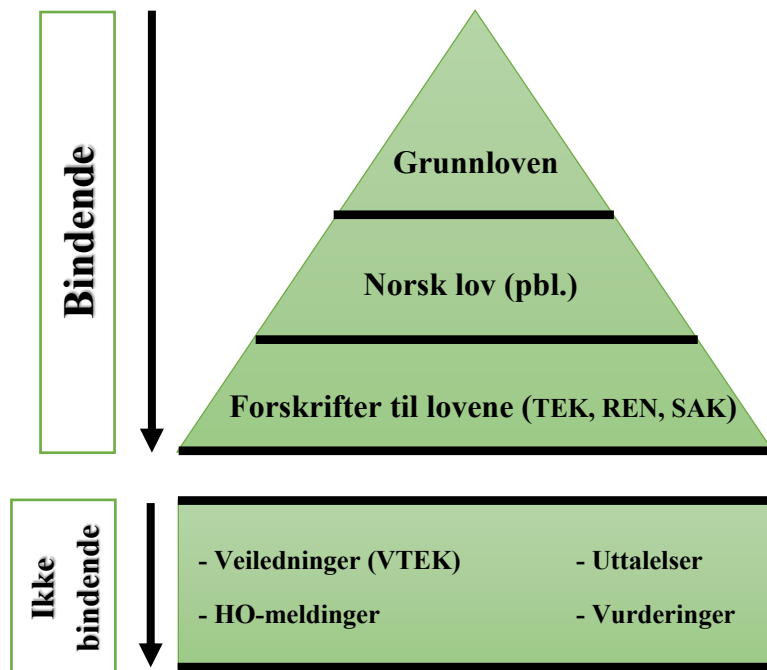
- *Smelting, fordamping og sublimering* av materiale i fast form eller væskeform som følge av varmeoverføringen fra flammen
- *Blanding* av de pyrolyserte gassene og oksygen ved brenselets overflate
- *Forbrenning* av de pyrolyserte gassene og dannelsen av diffusjonsflamme
- *Oppvarming* av brenselets overflate fram til nedre brennbarhetsgrense nås og den antenner

4. Byggteknisk forskrift

I dette kapittelet presenteres det informasjon om den byggtekniske forskriften samt en kort gjennomgang av forskriftens utvikling hvor fokuset ligger på de skjærpede energikravene. I tillegg ser en på ulike komponenter som blir direkte påvirket av dette.

4.1. Generelt

De byggtekniske forskriftene (TEK) som behandles i denne rapporten er hjemlet i de to siste plan- og bygningslovene (pbl) à 14.06.1985 nr. 77 [13] og 01.07.2009 nr. 71 [2]. Plan- og bygningsloven har enkelte bestemmelser som legger til rette for ytterlige spesifikasjoner, som står beskrevet i de ulike forskriftene (se Figur 9). Byggteknisk forskrift har som formål «å trekke grensen for det minimum av egenskaper et byggverk må ha for å kunne oppføres lovlig i Norge» - VTEK17 [14]. Dagens forskrift trådte i kraft 01.07.17, og stiller bla. krav til god visuell kvalitet, universell utforming, sikkerhet mot brann samt inneklimate, helse og energi. Anvendelsesområdet til de byggtekniske forskriftene er søknadspliktige tiltak og ikke den faktiske bruken av bygget. Det vil si oppføring, riving eller vesentlige endringer [14].



Figur 9: Byggelovens hierarki

Et viktig aspekt med forskriftene er at de siden revideringen i 1997 hovedsakelig har vært funksjonsbasert. Selv om forskriften består av bestemte krav, er det nå lagt opp til at disse kan løses ved å velge alternative, etterprøvbare ytelser. Norsk standard og byggdetaljer i byggforskserien er tidsskrifter det henvises til i forskriften som vil være til hjelp for å oppfylle funksjonskravene. Ved valg av de preaksepterte ytelsene gitt i veiledningen til forskriften (VTEK), er kravet tilfredsstilt. Hensikten med dette er å gjøre forskriften mer anvendbar og mindre avhengig av den nye og kontinuerlige teknologiske utviklingen [15].

Fra 1997 har forskriftene gjennomgått en rekke endringer - mens det enkelte ganger kun har vært snakk om nye formuleringer og presiseringer, har det andre ganger kommet omfattende endringer som i stor grad har påvirket det norske boligmarkedet. Fra TEK97 og fram til dagens forskrifter har kravene til boliger blitt kraftig skjerpet både på det som gjelder energibehov og tilgjengelighet.

4.2. Tetthet

For alle tiltakene som omhandler energieffektivisering er det en forutsetning at et godt inneklima oppnås. Ved å bygge tette konstruksjoner bidras det til en god energiøkonomi samtidig som det sikrer inneklimate mot trekkubehag, nedkjøling av konstruksjoner samt fukt og mugg [16]. I byggt teknisk forskrift defineres tetthetskravet med et lekkasjetall og en normalisert kuldebroverdi: Lekkasjetallet er definert som målt luftlekkasje i m³ pr. time dividert på husets innvendige volum. Det angis som antall luftutskiftninger per time ved en trykkforskjell på 50 pascal mellom inne og ute ved en lukket klimaskjerm. Den normaliserte kuldebroen beskriver det samlede varmetapet som forekommer gjennom ulike bygningsdeler. Det største grunnlaget for strengere krav rundt lufttetthet i byggt teknisk forskrift er å redusere varmetap. Utettheter krever et større oppvarmingsbehov og energiforbruk av flere grunner [16]:

- Luftlekkasjer fører med seg et større luftskifte, og dermed et større ventilasjonstap enn nødvendig
- Lekkasjeluften strømmer utenom ventilasjonsanleggets varmegjenvinner, slik at mindre varme blir gjenvunnet
- Isolasjonens varmemotstand reduseres når kald uteluft får sirkulere fritt inne i vegger og tak.

4.3. Isolasjon

Isolasjon er en uvurderlig komponent i enhver bygningsstruktur, og det kalde klimaet i Norge gjør at varmeisolerings er blitt en særdeles viktig del av landets byggt teknikk. Bruksområdet er stort og formålet avhenger av hvilke typer som tas i bruk. Isolasjon er oftest forbundet med sine gode termiske egenskaper som forhindrer varmetap til omgivelsene, men kan også bidra til en bedre romakustikk samt forebygging av fukt og råte i konstruksjonen. Felles for isolasjonsområdet er de økte kravene til termisk isolering i moderne bygg som krever mer av isolasjonen. Dette tvinger frem behovet for nye isolasjonstyper med bedre termiske egenskaper enn sine forgjengere [17].

I Norge bruker boliger i stor grad mineralull (herunder glass- og steinull) for varmeisolerings av ytterkonstruksjoner. Mineralullen leveres hovedsakelig som plater og matter, og produseres med forskjellige densiteter og i en rekke formater tilpasset sine respektive anvendelsesområder. Mens lette, myke produkter med lav densitet brukes i bindingsverk og diverse hulromskonstruksjoner, blir det benyttet tyngre og hardere plater med høy densitet hvor isolasjonen skal bære last – for eksempel i grunnen og på flate tak. Mineralullfibrene er ikke brennbare, men bindemidlene avgir brennbare gasser ved overopphetning. Disse bindemidlene utgjør midlertidig en så liten andel at mineralullen anses som ikke-brennbar og blir vanligvis klassifisert som ubrennbar [18].

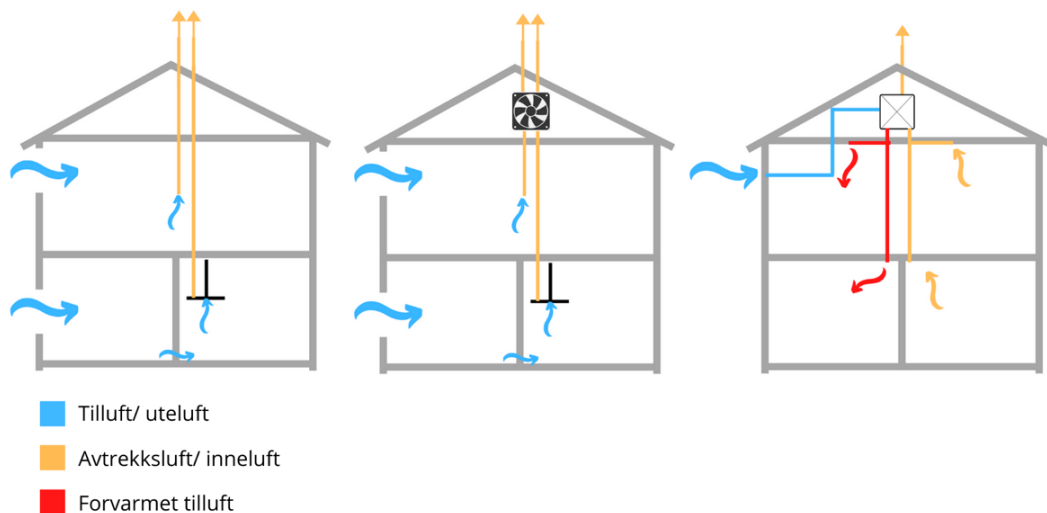
4.4. Ventilasjon

Med tanke på den andelen av tid som brukes inne i bygg, er kvaliteten på inneluften svært viktig for egen helse og trivsel. Et usunt inneklima vil også kunne forverre plager hos personer med astma, allergi og andre overfølsomheter [19]. Av den grunn er det en nødvendighet å ha et system som kan tilføre frisk uteluft inn i konstruksjonen for å fortynne de forurensningene innelufta tilføres. Ved bruk av ventilasjonsanlegg oppnås dette effektivt. Ventilasjonsanlegg i boliger operer primært for å [20]:

- Oppnå god luftkvalitet. Dvs. at luften skal oppleves som frisk og behagelig, og ikke bidra til helseplager
- Unngå fuktskader i bygningene i form av mugg og soppskader, eller andre ugunstige forhold

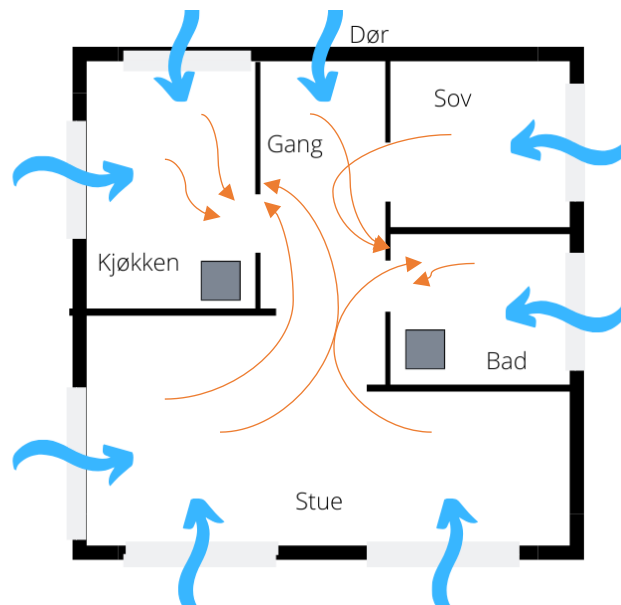
Selv om formålet med et ventilasjonsanlegg er likt, er det i hovedsak tre ulike typer ventilasjon som brukes i norske boliger (se Figur 10):

- **Naturlig ventilasjon:** Vanlig fram til 1980-tallet. Vind og naturlige oppdriftskrefter er de viktigste drivkreftene, og systemet er dermed i stor grad væravhengig. Varm inneluft stiger ut gjennom kanaler over tak og skaper et undertrykk i bygget. Undertrykket sørger videre for at friskluft blir tilført bygget via ulike utettheter og ventiler i konstruksjonen [21].
- **Mekanisk ventilasjon**
 - *Med avtrekk:* Fram til innføringen av de nye byggeforskriftene i 2007 var mekaniske ventilasjonsanlegg i stor grad det som ble brukt i norske bolighus. Anlegget baserer seg rundt et naturlig undertrykk i bygget som skapes gjennom elektriske vifter som ventilerer inneluften ut via avtrekkskanaler. Undertrykket sørger for at uteluft blir tilført via utettheter og ventiler i konstruksjonen [21].
 - *Balansert ventilasjon:* Dette anlegget sørger for både avtrekk og tilluft ved hjelp av innvendige kanaler som fordeler frisk og forvarmet luft gjennom bygget. Utelufta hentes inn via en felles friskluftskanal, før den forvarmes i en varmegjenvinner og sendes ut gjennom tilluftskanalene. Tilluften fordeles deretter rundt i bygget før den trekkes ut gjennom avtrekksventiler i de ulike rommene [22].



Figur 10: Fra venstre: naturlig og mekanisk avtrekksventilasjon samt balansert ventilasjon

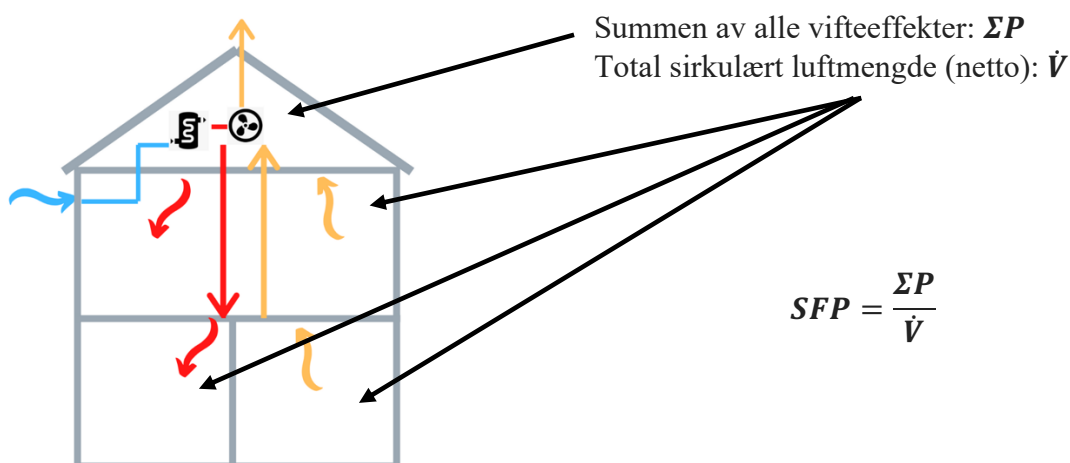
Uavhengig av type, vil et riktig konstruert ventilasjonsanlegg ha de ulike ventilene for tilluft og avtrekk plassert i henhold til de ulike rommenes bruk: Oppholdsrom har ventiler/ åpninger for tilluft mens kjøkken, våtrom og eventuelle boder har avtrekkskanaler (se Figur 11). Dette prinsippet oppnår to ting: Den samme luftmengden brukes til flere ventilasjonsmål og ventilasjonseffekten kan oppnås med mindre luftmengder. I tillegg vil det forhindre at lukt fra rom med størst luftforurensning spres til andre deler av huset [23].



Figur 11: Prinsipp for ventilasjonsluftens gang i bolig med avtrekksventilasjon

I tillegg til å påvirke inneklimate til en konstruksjon, kan et ventilasjonsanlegg i stor grad påvirke det totale energiforbruket gjennom temperaturreguleringen. Når kald uteluft slippes inn i konstruksjonen, kreves det energi for å varme den opp til en behagelig romtemperatur. Her går skillet mellom avtrekksanleggene og et balansert ventilasjonsanlegg: Mens samtlige typer anlegg har muligheten til å operere med samme typer luftmengde, er de balanserte ventilasjonsanleggene utrustet med en varmegjenvinner som forvarmer friskluften før den

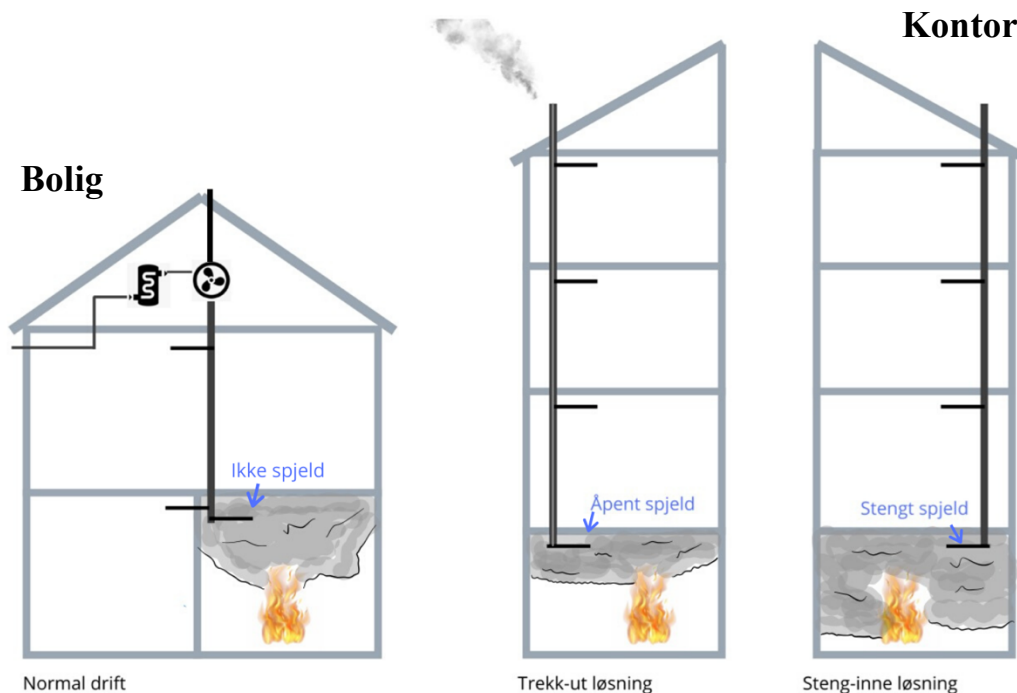
slippes inn i boligen. Skiftet fra mekanisk avtrekksanlegg til mekanisk balansert anlegg skjedde i forbindelse med den 4. revideringen av TEK97 (TEK07) [24]. Med de nå strengere energikravene, ville balanserte ventilasjonssystem med varmegjenvinner være det beste alternativet for å holde temperaturen på et normalt nivå, uten at energibehovet ble for stort. I tillegg kom det krav om spesifikk varmekapasitet (SFP) og årsmidlere temperaturvirkningsgrad for varmegjenvinner i ventilasjonsanlegget ved valg av tiltaksmetoden (se Tabell 4-7). Disse kravene sørger for at ventilasjonsanlegget er energieffektivt.



Figur 12: Prinsipiell skisse for SFP-verdien

Mens den årsmidlere temperaturvirkningsgraden for varmegjenvinneren stiller krav til virkningsgraden for varmegjenvinneren, er SFP-verdien et mål på hvor mye elektrisk effekt viftene bruker på å transportere luft gjennom ventilasjonsanlegget (se Figur 12) [25]. Det fins flere måter å redusere SFP-verdien: Bruk av lavere luftmengder, oppgradering av viften, eller ved å styre ventilasjonen etter behov siden lavere luftmengder krever mindre energi til bruk av vifter, oppvarming av friskluft og romoppvarming. Dette resulterer midlertidig i at anleggene til visse tider går på et lavt turtall med lave luftstrømmer og trykkdifferanser og/eller slås helt av i perioder [26].

Brannsikringen av ventilasjonsanlegg i boliger skiller seg ut fra større bygg. Ettersom en bolig normalt vil bestå av en enkelt branncelle (se Figur 13) er det ikke hensiktsmessig å benytte noen form for brannsikring, og anlegget vil fortsette driften under hele brannforløpet.



Figur 13: Prinsippskisse for ulike brannsikringskonfigurasjoner

I den grad det fins prinsipper for brannsikring av balansert ventilasjon i bolighus, vil dette gå ut på bruk av brannspjeld eller at det installeres en røykdetektor i tilluftskanalen som slår av anlegget dersom det registreres røyk. Dette installeres i så fall etter ønske fra bruker/ huseier.

4.5. Vinduer

Vinduer i bolighus ble vanlig på starten av 1700-tallet i Norge. Vinduene var håndlaget og små siden de var kostbare å produsere. Glassene var ofte satt i sprosser med bly og avstivere av jern eller tre. Disse vindustypene var vanlige til midten av 1800-tallet da metoden for å håndlage glassene ble endret. Maskinlagde glass kom først på 1900-tallet og har utviklet seg videre til de glassene som brukes i boliger i dag. Floatglass ble utviklet i 1950 som brukes for å lage isolerglass som er vanlig i de fleste boliger [27].

Vinduers funksjon i boliger var opprinnelig å slippe inn dagslys og gi utsyn, i tillegg til beskyttelse fra vær og vind. Den byggtekniske forskriften krever at «rom for varig opphold skal ha tilfredsstillende tilgang på dagslys» - TEK10, §13-12, annet ledd [28]. Vinduet kan også ha funksjoner som åpen karm, men noen vinduer har også lukket karm. I henhold til forskriften skal også rom med varig opphold ha minst ett vindu eller dør som kan åpnes til det fri. De skal være sikre i bruk og slippe inn solinnstråling som kan redusere oppvarmingsbehovet samtidig som det skal reflektere strålingen som fører til overoppvarming [29].

Glass er et uorganisk materiale som blir framstilt ved å størkne smeltet sand, soda og kalk. Krystallisering inntreffer ikke. Derfor er glass ikke et fast stoff, men en underkjølt tregtflytende væske. Glasset blir hardt og sprøtt ved avkjøling til romtemperatur [29]. Floatglass er ubehandlet glass som typisk er vanlig vindusglass. De fremstilles ved at råmaterialene mates inn i et smeltekar ved meget høy temperatur for å så flyte inn i et kar med flytende tinn. Etterpå

avkjøles glasset og strekkes til floatglass [29]. Isolerruter er en samlebetegnelse på to- eller flerlags ruter som består av floatglass. Innsiden av det innerste glasset har metallbelegg og hulrommet mellom glassene er fylt med argon eller en annen gass som er bedre isolerende enn luft [30]. De fleste boliger i Norge har isolerruter med 2- eller 3-lags ruter. Store deler av varmetapet fra boliger skjer gjennom vinduer og har ført til strengere krav for u-verdi. Vinduers totale u-verdi regnes gjennom en formel for de ulike komponentene: Rutens senterområde, vinduets karm/ ramme og rutens kanttillegg. Dette er fordi karmen, senterområde og kantene på vinduet vil ha forskjellige verdier for varmegjennomgang [31].

4.6. Utviklingen av forskriftskrav

22. 01.1997 trådte 1. utgave av TEK97 i kraft. Målet med den nye forskriften var bla. å få bedre bygg i tillegg til å redusere den totale driftskostnaden gjennom hele byggets levetid. Mens det i de tidligere forskriftene lå et fokus på byggets oppvarmingsbehov, var det nå byggets totale energiytelse som stod i hovedfokus. Den generelle bestemmelsen om energibruk i VTEK97, 1. utgave sa at bygg skulle vært utført på en måte som «*fremmer lavt energi- og effektbehov som ikke overskrider de rammer satt i dette kapittel. Energibruk og effektbehov skal være slik at krav til forsvarlig innemiljø sikres*» - §8-2 [32]. De nye energikravene medførte en skjerpelse av kravet om varmeisolasjon i konkrete bygningsdeler. Energibestemmelsene bygde i tillegg på at byggets totale energibehov ikke skulle overskride en viss rammeverdi. Ved å beregne ut det totale energibehovet for bygget opp mot en energiramme, kunne en dokumentere at kravet er tilfredsstilt. Dette gjaldt samtlige energiposter i bygget (romoppvarming, belysning, og lignende). Energirammen til bygget var basert på utregning hvor verdien for de enkelte byggene framkom etter en beregning og ved bruk av gitte konstanter avhengig av bygningskategori og geometri.

Etter to revideringer med like kravsnivå som 1. utgaven, ble kravene skjerpet 1. februar 2007 da den fjerde utgaven av TEK97 (TEK07) ble publisert. Formålet med revideringen var å oppnå [33]:

- Gjennomsnittlig 25% mindre energibehov i alle bygg
- Ca. 40% innskjerpelse av kravsnivå i forskriften
- Min. 40% av energibehovet til romoppvarming og varmtvann skal kunne dekkes av alternativ varmforsyning

Med de nye kravene økte nivået for isolasjon i vegger, gulv og himling igjen. Videre økte isolasjonsverdien for vinduer samtidig som det skulle bygges med moderate andeler glassarealer. Revisjonen i 2007 stilte i tillegg enkelte krav rundt det som angikk energieffektive ventilasjonsanlegg og temperaturregulering, samt regulering av byggets energiforsyning til oppvarming og varmtvann. Prinsippet rundt energirammen endret seg, og nå var det fastsatte verdier avhengige av byggets brutto romareal. Dette for at kravet skulle være like strengt for store boliger som små [34].

26. Mars 2010 trådte forskrift om tekniske krav til byggverk nr. 489 – TEK10 i kraft. I hovedsak gjaldt endringene vedrørende boliger en videre innstramning av energirammen og vindusareal. Den 3. og siste utgaven av TEK10 kom 01. januar 2016 og inneholdt hovedsakelig kun en videre innstramning av energikravene.

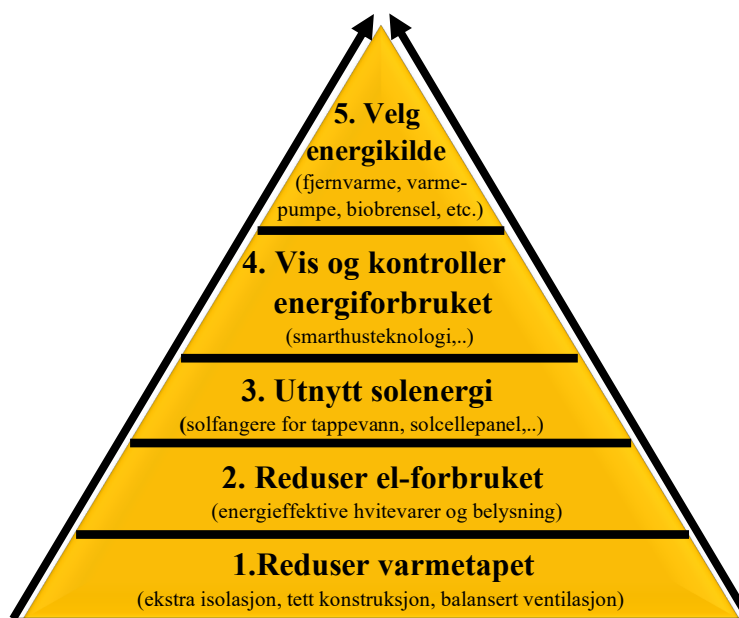
4.6.1. Energieffektivisering

Bærekraftig utvikling er et grunnleggende prinsipp i samfunnsutviklingen hvor «*dagens behov blir møtt uten å ødelegge for kommende generasjoners mulighet til å møte sine*». Det var Brundtlandskommisjonen (FNs verdenskommisjon for miljø og utvikling) som først brukte uttrykket i rapporten *Vår felles framtid* fra 1987 [35].

I 2012 sto byggebransjen i Norge for omlag 40% av den totale energibruken. Hele 85% av energibruken gikk til drift og oppvarming, mens ca. 15% gikk til bygging og rivning [18]. Gjennom EØS-avtalen er EU-kommisjonens bygningsdirektiv innlemmet i norsk rett. Det er herfra de stadig strengere kravene for energiforbruk i norske bygg har sitt opphav. Direktivet bestemmer i hovedsak energikrav til bygninger, krav til ordning for energimerking, samt krav rundt tekniske anlegg i bygninger. Energibruken til boliger fordeler seg i hovedsak rundt tre poster [18]:

- Oppvarming av tappevann
- Elektrisitet til belysning, utstyr og apparater
- Romoppvarming

Romoppvarming vil si netto varmebehov for å opprettholde en ønsket innetemperatur når solinnstråling og interne varmetilskudd er trukket fra det samlede varmetapet til boligen. Som et snitt for boliger i landet er det anslått at ca. 60% av energibruken går til romoppvarming, 20% til belysning, utstyr og elektriske apparater samt 20% til varmt tappevann [18]. Gjennom å følge prinsippene for et passivt energidesign (se Figur 14), legges det til rette for å oppnå et lavere energibehov. Her legges det vekt på å redusere varmetap mest mulig ved hjelp av robuste, bygningstekniske tiltak som for eksempel bedre varmeisolering, mindre luftlekkasjer gjennom klimaskjermen (skallet) og kompakt bygningsform [36].



Figur 14: Prinsipp for passivt energidesign

4.6.2. Prinsipp for dokumentasjon av tilfredsstilte energikrav

Ved å beregne bygningens årlige netto energibehov iht. NS 3031 opp mot energirammen i TEK, dokumenteres det at energikravene er oppfylt. Beregningene gir utslag i forhold til hvor kompakt eller utflytende bygningskroppen er. For boliger fins det også en alternativ måte å oppfylle energikravene: Gjennom å tilfredsstille kravene som stilles til de ni ulike energiltakene beskrevet i Tabell 3:

Tabell 3: Beskrivelse av energiltakene tilhørende byggt teknisk forskrift

Energiltak	Kommentar
1. U-verdi yttervegg 2. U-verdi tak 3. U-verdi gulv 4. U-verdi vindu og dører	Varmegjennomgangskoeffisienten for de ulike bygningsdelene. Nærmere beskrevet i kapittel 2.1.1.
5. Andel vindus- og dørareal av oppvarmet BRA	Angir maks størrelse på summen av vindus- og dørareal i forhold til oppvarmet bruksareal (BRA).
6. Årsgjennomsnittlig temperaturvirkningsgrad for varmegjenvinner i ventilasjonsanlegg	Beskriver hvor stor del av avtrekksluften som kan gjenvinnes ved hjelp av en varmegjenvinner [37].
7. Spesifikk vifteeffekt i ventilasjonsanlegg (SFP)	Forholdet mellom elektrisk effekt nødvendig for drift av vifter i et ventilasjonsanlegg, og luftmengden som viftene bidrar med å skifte ut i de ventilerte rommene [25].
8. Luftlekkasjetall pr. time ved 50 Pa trykkforskjell	Beskriver tettheten til bygget. Avhenger bla. av alder og kvalitet på utførelser av tettedetaljer (dampsperre, vindtetting) [38].
9. Normalisert kuldebroverdi	Summen av samtlige kuldebroer gjennom konstruksjonen dividert på BRA [38].

Forskriften legger opp til en omfordeling av de gitte kravene (unntatt SFP-verdi) så langt en tilfredsstillende oppgitte minimumskravene. Dette er for å sikre en akseptabel bygningskropp [39]. Fra Tabell 4-7 beskrives de ulike verdiene som kreves for å tilfredsstille energiltakene etter de ulike forskriftene.

Tabell 4: Energikrav TEK97, 1.-3.utgave. Hentet fra [24]

TEK97, 1.-3.utgave				
Energirammen				
Totalt energibehov bolighus		Formelbasert – avhengig av byggets formål samt geometri		
Energiltaksmetoden				
Bygningsdel	U-verdi W/m²K	Isolasjonstykkelse (mm)	Minstekrav	Isolasjonstykkelse (mm)
Yttervegg	≤ 0,22	Ca. 200	≤ 0,3 (samlet gjennomsnittlig verdi)	
Tak	≤ 0,15	Ca. 250-300		
Golv på grunnen og mot det fri	≤ 0,15	Ca. 200-250		
Gjennomsnittlig vindu, dører og glassareal	≤ 1,6 (2-lags isolerruter)		≤ 2,0 (2-lags ruter)	
Årsmidlere temperaturvirkningsgrad for varmegjenvinner i ventilasjonsanlegg			Ingen krav for bolig uten varmegjenvinnings-anlegg	
Andel vindus- og dørareal av oppvarmet BRA			≤ 20 %	
Spesifikk vifteeffekt i ventilasjonsanlegg (SFP)			≤ 2,5 kW/m ³ s	
Luftlekkasjetall pr. time ved 50 Pa trykkforskjell			≤ 4,0 luftvekslinger/time	
Normalisert kuldebroverdi (W/m² K)			Inkl. I u-verdien for ytterveggen ifht. BRA	

Tabell 5: Energikrav TEK97, 4.utgave. Hentet fra [40]

TEK97, 4. utgave (TEK07)				
Energirammen				
Totalt energibehov bolighus		125kWh+1600/BRA		
Energiltaksmetoden				
Bygningsdel	U-verdi W/m²K	Isolasjonstykkelse (mm)	Minstekrav	Isolasjonstykkelse (mm)
Yttervegg	≤ 0,18	Ca. 250	≤ 0,22	Ca. 200
Tak	≤ 0,13	Ca. 300-350	≤ 0,18	Ca. 250
Golv på grunnen og mot det fri	≤ 0,15	Ca. 200-250	≤ 0,18	Ca. 250
Gjennomsnittlig vindu, dører og glassareal	≤ 1,2 (Vinduer m/ 3-lags ruter eller 2-lags ruter m/ isolert karm/ramme)		≤ 1,6 (2-lags isolerruter)	
Årsmidlere temperaturvirkningsgrad for varmegjenvinner i ventilasjonsanlegg			≥ 70%	
Andel vindus- og dørareal av oppvarmet BRA			≤ 20 %	
Spesifikk vifteeffekt i ventilasjonsanlegg (SFP)			≤ 2,5 kW/m ³ s	
Luftlekkasjetall pr. time ved 50 Pa trykkforskjell			≤ 2,5 luftvekslinger/time	
Normalisert kuldebroverdi (W/m² K)			≤ 0,03 ifht. BRA	

Tabell 6: Energikrav TEK10, 1.-2.utgave. Hentet fra [28]

TEK10, 1.-2. utgave				
Energirammen				
Totalt energibehov bolighus		120kWh+1600/BRA		
Energiltaksmetoden				
Bygningsdel	U-verdi W/m²K	Isolasjonstykkelse (mm)	Minstekrav	Isolasjonstykkelse (mm)
Yttervegg	≤ 0,18	Ca. 250	≤ 0,22	Ca. 200-250
Tak	≤ 0,13	Ca. 300-350	≤ 0,18	Ca. 300-350
Golv på grunnen og mot det fri	≤ 0,15	Ca. 200-300	≤ 0,18	Ca. 200-250
Gjennomsnittlig vindu, dører og glassareal	≤ 1,2 (Vinduer m/ 3-lags ruter eller 2-lags ruter m/ isolert karm/ramme)		≤ 1,6 (2-lags isolerruter)	
Årsmidlere temperaturvirkningsgrad for varmegjenvinner i ventilasjonsanlegg			≥ 70 %	
Andel vindus- og dørareal av oppvarmet BRA			≤ 20 %	
Spesifikk vifteeffekt i ventilasjonsanlegg (SFP)			≤ 2,5 (kW/m ³ s)	
Luftlekkasjetall pr. time ved 50 Pa trykkforskjell			≤ 2,5 luftvekslinger/time	
Normalisert kuldebroverdi (W/m² K)			≤ 0,03 ifht. BRA	

Tabell 7: Energikrav TEK10, 3.utgave2. Hentet fra [41]

TEK10, 3. utgave				
Energirammen				
Totalt energibehov bolighus		100kWh+1600/BRA		
Energiltaksmetoden				
Bygningsdel	U-verdi (W/m²K)	Isolasjonstykkelse (mm)	Minstekrav	Isolasjonstykkelse (mm)
Yttervegg	≤ 0,18	Ca. 250	≤ 0,22	Ca. 250
Tak	≤ 0,13	Ca. 300-350	≤ 0,18	Ca. 200-250
Gulv på grunnen og mot det fri	≤ 0,10	Ca. 300-350	≤ 0,18	Ca. 200-250
Gjennomsnittlig vindu, dører og glassareal	≤ 0,8 (3-isolerglass m/ belagt glass, argongass)		≤ 1,2 (Vinduer m/ 3-lags ruter eller 2-lags ruter m/ isolert karm/ramme)	
Årsmidlere temperaturvirkningsgrad for varmegjenvinner i ventilasjonsanlegg			≥ 70 %	
Andel vindus- og dørareal av oppvarmet BRA			≤ 25 %	
Spesifikk vifteeffekt i ventilasjonsanlegg (SFP)			≤ 1,5 (kW/m ³ s)	
Luftlekkasjetall pr. time ved 50 Pa trykkforskjell			≤ 0,6 luftvekslinger/time	
Normalisert kuldebroverdi (W/m² K)			≤ 0,05 ifht. BRA	

4.7. Passivhus

Passivhus er bygninger med et veldig lavt energibehov sammenlignet med konvensjonelle hus. Gjennom et passivt energidesign sørger passivhus til et drastisk kutt i byggets netto energibehov. Opprinnelig fra Tyskland, har passivhus-konseptet nå fått et godt fotfeste i Norge, og en egen norsk standard (NS 3700) som regulerer de ulike kravene et bygg i Norge må inneha for å kunne klassifiseres som et passivhus. Det ble i klimaforliket fra mars 2012 og meldingen til Stortinget om bygningspolitikk signalisert at passivhusnivå skulle være norsk standard i løpet av 2015, og nesten nullenergi i 2020 [3]. Det presiseres ikke hva som menes med passivhusnivå og nær nullenergi, annet enn at kravet settes med bakgrunn i utredninger om konsekvenser for samfunnsøkonomi og helse, og kompetanse i byggenæringen.

Den norske passivhus-standarden ble først lansert i 2010 med krav til varmetap, oppvarmingsbehov og energiforsyning i passivhus og lavenergihus. Beregningene for de ulike postene følger egne standarder, og i alt stilles det fire hovedkrav [42]:

- Krav til maksimalt spesifikt oppvarmingsbehov
- Minstekrav til varmetapstall
- Minstekrav til bygningsdeler og komponenter
- Krav til energiforsyning

I 2012 ble passivhus-standarden revidert, noe som fulgte med seg omformuleringer, men ingen større kravsendringer. I Tabell 8 framstilles de ulike minstekravene for bygningsdeler og komponenter:

Tabell 8: Minstekrav til byggkomponenter i passivhus iht. NS 3700:2010 og NS 3700:2012

Passivhus (NS 3700:2010)			Passivhus (NS 3700:2012)	
Bygningsdel	Minstekrav U-verdi (W/m ² K)	Isolasjonstykkelse (mm)	Minstekrav U-verdi (W/m ² K)	Isolasjonstykkelse
Yttervegg	≤ 0,15	Ca. 200-300	Ikke formulert	
Tak	≤ 0,13	Ca. 300-350		
Golv på grunn	≤ 0,15	Ca. 200-300		
Vindu og dør	≤ 0,8 (3-isolerglass m/ belagt glass, argongass)		≤ 0,8 (3-isolerglass m/ belagt glass, argongass)	
Spesifikk viftekapasitet (SFP)		≤ 1,5 (kW/m ³ s)		
Luftlekkasjetall pr. time ved 50 Pa trykkforskjell		≤ 0,6 luftvekslinger/time (uendret)		
Normalisert kuldebroverdi (W/m² K)		≤ 0,03 pr m ² BRA (uendret)		

I likhet med byggt teknisk forskrift, vil også energikravene i NS 3700 oppfylles med omfordelingsprinsippet, og utgangspunktet for kravene til de ulike bygningskomponentene er at bygget ikke skal overstige oppvarmingskravet. Den norske standarden tar utgangspunkt i det tyske oppvarmingskravet på 15 kWh/ m², men ettersom klimaet i Norge er noe kaldere enn i

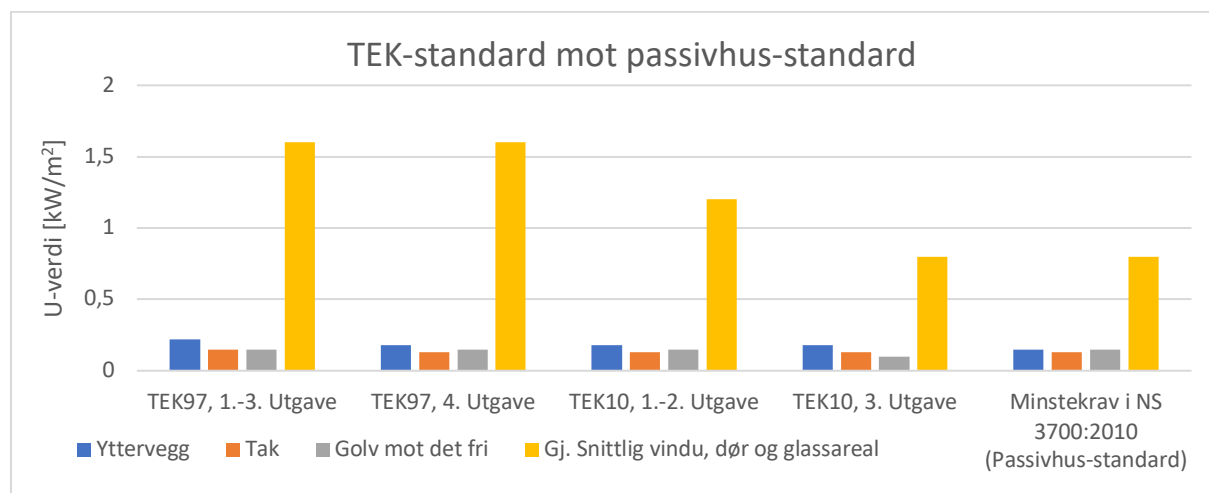
Tyskland, var det nødvendig å gjøre kravet avhengig av årsmiddeltemperaturen samt arealet på boligen [42].

For boliger over 250 m², og som befinner seg i et område hvor årsmiddeltemperaturen overstiger 6,3 °C (tilsvarer ca. Oslo-klima) gjelder oppvarmingskravet på 15 kWh/m². For boliger som befinner seg i et område med mindre årsmiddeltemperatur og/ eller er mindre enn 250 m² i oppvarmet BRA, er kravet formelbasert. I SINTEF's egen veileder for prosjektering av passivhus – småhus [42] blir det beskrevet aktuelle tiltak en kan benytte seg av for å tilfredsstille oppvarmingskravet med et kompakt boligbygg på 250 m² oppvarmet BRA. I Tabell 9 presenteres et utdrag av tiltakene som er brukt med omfordelingsprinsippet, sammenslått med tilsvarende krav i byggeforskriften fra 2016 (TEK10, 3. utgave):

Tabell 9: Eksempel på utvalgte energitiltak for passivhus-bolig > 250 m² samt TEK-krav

Energitiltak	Passivhus-standard	TEK10, 3. Utgave
	Kravsnivå/ isolasjonstykkelse	Kravsnivå/ isolasjonstykkelse
Yttervegg	≤ 0,11 (W/m ² K) / Ca. 400 mm	≤ 0,18 (W/m ² K) / Ca. 250 mm
Skrå isolert tak	≤ 0,1 (W/m ² K) / Ca. 400 mm	≤ 0,13 (W/m ² K) / Ca. 300-350 mm
Golv på grunnen	≤ 0,11 (W/m ² K) / Ca. 350 mm EPS	≤ 0,10 (W/m ² K) / Ca. 200-300 mm
Vinduer og dører	≤ 0,75 (W/m ² K) / 3-lags ruter m/ isolert karm	≤ 0,8 (W/m ² K) /
Lekkasjetall	≤ 0,6 luftveksling/ time / Tilsvarende minstekrav i TEK10, 3. utgave	≤ 0,6 luftveksling/ time
Varmegjenvinning ventilasjon	≥ 82%	≥ 80%

Ved en sammenligning av de ulike kravene fra byggteknisk forskrift, kommer det fram hvordan utviklingen har ført forskriftskravene nærmere passivhusstandarden (se Figur 15):

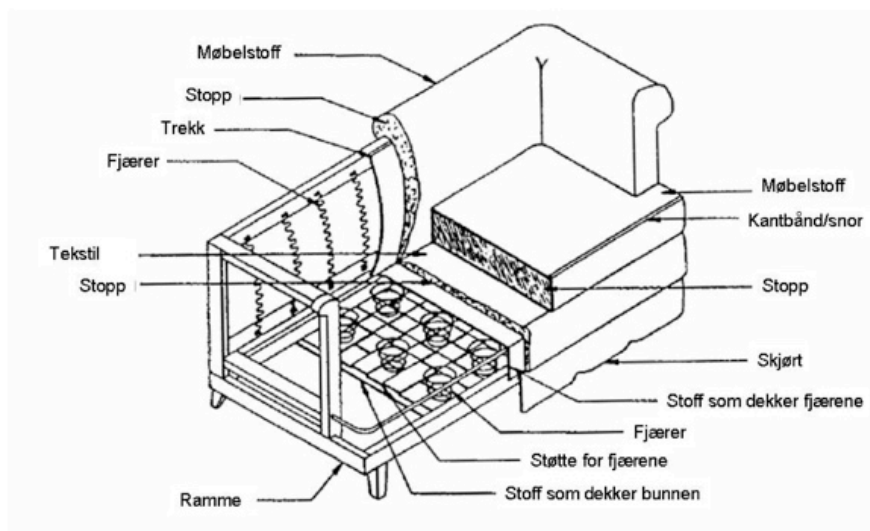


Figur 15: Utvikling av TEK-krav mot minstekrav i NS 3700:2010

5. Innredning

Utviklingen av en brann er i stor grad avhengig av de branntekniske egenskapene til det omliggende. På samme måte som det har vært en klar endring i utformingen av boliger, har typen inventar som brukes også gått gjennom en endring. Markedet introduseres stadig for nye produkter - både for selve bygningskonstruksjonen og til innredningen. Nyere typer møblement representerer en hurtigere brannutvikling, da de ofte inneholder syntetiske stoffer som bidrar til et raskere brannforløp, stor røykutvikling og en kortere rømningstid [43]. Utformingen av møblene vil være svært variert fra produkt til produkt, men hovedsakelig vil komponentene i møbelet bestå av flere lag med ulike stoffer (se Figur 16) [44]:

- Trekk (bomull, ull, akryl, polyester, vinyl, m.m.)
- Mellomsjikt (skum, tekstil, gummi)
- Stopping (polyester)
- Ramme (tre, metall, plast)
- Armlene (tre, metall, plast)
- Avstivning av rygg og sider



Figur 16: Eksempel på oppbygning av et stoppet møbel. Hentet fra [45] med oversettelse i [44]

Vanlige antennelseskilder for møbler og madrasser er elektrisk utstyr, glødende sigaretter samt brennende objekter. I den sammenheng kom *Forskrift om antennelighet av madrasser og stoppede møbler* [46] i 1999 med hjemmel i Produktkontrolloven [47]. Forskriftens formål er å "forebygge helseskader forårsaket av at madrasser og stoppede møbler antennes av ulmende sigarett" - § 1 [46]. Med bakgrunn i forskriften må samtlige møbler og madrasser solgt på det norske markedet gjennom branntester hvor antennelseskilden er en ulmende sigarett.

Et amerikansk forsøk fra 2012 [48] utført ved et forskingsinstitutt for brann sammenlignet brann i eldre og moderne møblement i en rombrann med gode ventilasjonsforhold (Ca. 2,5 m x 2 m åpning). Det ble konstruert tre ulike oppsett hver for moderne og eldre møblement: Mens de moderne møblene var fra mellom 2000 og 2010 var det eldre møblementet fra mellom 1950 og

1970. Forsøket konkluderte med at branner i moderne hjem vil kunne nå overtenning raskere enn i eldre hjem. Den raskeste overtenningen som ble observert for det moderne oppsettet var på under 5 minutter mens for det eldre oppsettet var den raskeste tiden på 29 minutter. Varmeavgivelsen fra de naturlige materialene i de eldre møblene stod for en mindre varmeavgivelse, mens de syntetiske materialene i de moderne møblene førte til en raskere varmeavgivelse.

6. Relevante forskningsstudier

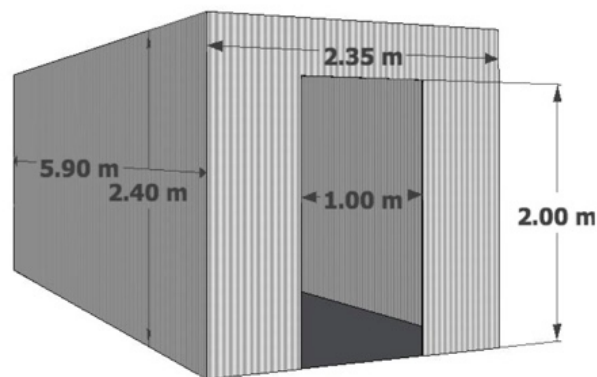
Ettersom utviklingen av tette og energieffektive bygg er et relativt moderne konsept, er det et begrenset omfang av forskning relatert til brann som er gjort på området. En gjennomgang av publisert forskning viser at flere rapporter tar for seg temaet gjennom numeriske beregninger (simuleringer), mens enkelte har gjennomført fullskala-forsøk. Det følgende kapittelet vil presentere forskningen som er gjort på de ulike tiltakenes effekt i forskjellige brannforløp. Gjennom å studere resultatene til de ulike forsøkene er det mulig å se hvorvidt enkelte momenter relatert til tiltakene går igjen i en brannutvikling.

6.1. Tetthet & isolasjon

I en fransk rapport [49] blir trykkendringer i tette omgivelser studert for å kartlegge brannfaren relatert til atomindustrien hvor konstruksjonene ofte er robuste og svært tette. Gjennom en hydrokarbon-brann ble fullskala forsøkene utført individuelt i to ulike rom av betong på 400 m³ og 120 m³ utstyrt med tillufts- og avtrekkskanaler. Resultatene viste et generisk og gjentagende mønster for trykkendring; Selv om maksimaltrykket varierte avhengig av flammens effekt, befant det seg i samtlige av de 12 utførelsene en trykkøkning i brannens utviklingsfase som varte mellom 150 s - 280 s før trykket utlignet seg.

En belgisk rapport [50] ser på forskjellen mellom utviklingen av en brann i et konvensjonelt hus kontra et passivhus ved hjelp av to-sone modellering i programmet Argos. Rapporten tar kun for seg ett brannscenario – brann i en polyuretan-sofa i ett to-etasjers hus med ca. 100 m² grunnareal. I konklusjonen vises det til at røykgasstemperatur samt HCN- og CO-konsentrasjonen er tilnærmet lik for begge husene under brannens utviklingsfase, og at lekkasjearealene ikke vil påvirke utviklingen i denne fasen. Dette på grunn av at brannen i begge forsøkene forbruker oksygenet og skaper et overtrykk som forhindrer videre inntrenging av oksygen. Heller ikke isolasjonstykkelsen påvirker røykgasstemperaturen siden varmefronten ikke har rukket inn til isolasjonen før simuleringen er over. De største forskjellene kommer etter at brannen er fullt utviklet – da vil tettheten til passivhuset sørge for en nedsatt varmeavgivelse fra brannen ved å forhindre tilgangen på oksygen. Den nedsatte varmeavgivelsen fører følgelig til en høyere andel av uforbrente gasser (CO, HCN).

En svensk studie utført ved Lund universitetet i 2012 [51] ser på hvilken effekt økte isolasjonsmengder har på et brannforløp. Forsøket gikk ut på å kle en typisk 20-fots stålkonteiner i 95 mm tykk Rockwool-isolasjon (mineralull) (se Figur 17). I alle fire gjennomføringene, uavhengig av brenselstype (heptan og trekrybbe), viste resultatene en gjennomsnittlig høyere røykgass-temperatur når konteineren var isolert. Det ble også målt en 13% større HRR, og en dobbelt så rask brannvekstrate for heptanbrannen. For trekrybbe-brannen var verdiene omtrentlig det samme under isolerte og uisolerte forhold. Et interessant aspekt med disse funnene er at brenselet med en større følsomhet for tilbakestrålende varme (heptan) har en mye høyere og raskere brannvekstrate enn trekrybben. Studiet konkluderer med at det er en større risiko for å nå overtennings-stadiet tidligere i godt isolerte omgivelser.



Figur 17: Størrelsen på kontaineren brukt i forsøket ved Lund universitetet. Hentet fra [51]

6.2. Ventilasjonsforhold

I et finsk fullskala-forsøk utført i regi av R. Janardhan og S. Hostikka [52] ble det forsket på effekten av ulike typer brannutvikling i en konvensjonell finsk leilighet fra 70-tallet med et grunnareal på ca. 58 m². Veggene var av betong med en tykkelse på 160 og 200 mm. I tillegg var leiligheten utrustet med nylig installerte 3-lags ruter. Formålet med forsøket var å dokumentere trykkoppbygninger ved en brann i tette omgivelser og under ulike ventilasjonsforhold. Det ble benyttet et mekanisk avtrekksanlegg med tre ulike konfigurasjoner (se Figur 18): Åpent (avtrekksventil fjernet), lukket (avtrekket teipet igjen) og normalt (avtrekksventil påmontert). Bakgrunnen var rapporter om innsatspersonell i Finland som ikke fikk åpnet innadgående rømmingsdører i et brannrom pga. høy trykkoppbygning. Gjennom 13 ulike forsøk og to typer brensel (3 liter heptan og 3 kg PUR-madrass) ble det sett på verdier av bla. gasstrykk, gass temperatur samt O₂-, CO₂- og CO-konsentrasjonen gjennom leiligheten.

Lukket

Åpen

Normal



Figur 18: De ulike konfigurasjonene for avtrekksanlegget. Hentet fra [52]

I de forsøkene brenselet bestod av en 3-liters heptanbrann, nådde trykket i leiligheten opp mot 900 pascal ved en lukket ventilasjon. Når det ble tent på en PUR-madrass under normale ventilasjonsforhold, ble det målt en trykkprofil opp mot 1650 pascal, og ved ett av forsøkene ble en hel vinduskarm blåst ut. Samtlige av overtrykkene skjedde under 50 sekunder etter antennelse av brenselet. Forsøket konkluderer med at heptan- og polyuretan-branner kan forårsake svært høye over- og undertrykk i tette omgivelser, i tillegg til at ventilasjonsforhold og brenselstype i stor grad vil bestemme trykkstørrelsen. Høye overtrykk vil kunne forhindre åpningen av innadvendte dører (>100 Pa), samt forårsake ødeleggelse på materielle strukturer. Samtidig pekes det på at dette i stor grad er avhengig av ventilasjonsforholdene og brannvekstraten: Ved et raskt brannforløp var faren for ødeleggelse på materielle strukturer forutsatt at ventilene var stengt, mens ved et ultra-raskt brannforløp var det stor fare for ødeleggelse uavhengig av ventilasjonsforholdene [52].

Svensk forskning fra SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut [53] vurderte trykkøkningen i en rombrann med naturlig og mekanisk ventilasjon ved hjelp av simuleringer i CFD (Computational Fluid Dynamics) og PRS (Pressure Rise Simulator). Brenselet er heptan, og veggene består konstruert av 150 mm betong. Resultatene sammenlignes med fullskala-forsøk utført av det svenske forsvaret i 1996. Rapporten vektlegger ulike parametere som romstørrelse, brannstørrelse, veggmateriale, åpninger, mekanisk ventilasjon og kartlegger i hvilken grad de har påvirkning for trykkøkningen som skjer i rommet. Simuleringene har en del feilkilder som påvirker resultatet til en viss grad – spesielt etter utviklingsfasen. Likevel ser en store likhetstrekk i sammenligningen med fullskala-forsøkene fra 1996, og enkelte deler av brannutviklingen har en god korrelasjon med virkeligheten. Konklusjonen er at den største påvirkningsfaktoren for trykket i rommet er størrelsen på åpningene. Større åpninger fører til at luft siver ut raskere og trykket i brannrommet synker dermed dramatisk. Det pekes også på at en raskere brannvekstrate fører til et høyere trykk - ved sammenligning av en medium og en høy brannvekstrate er størrelsesforholdet på trykkoppbygningen 1,5:3.

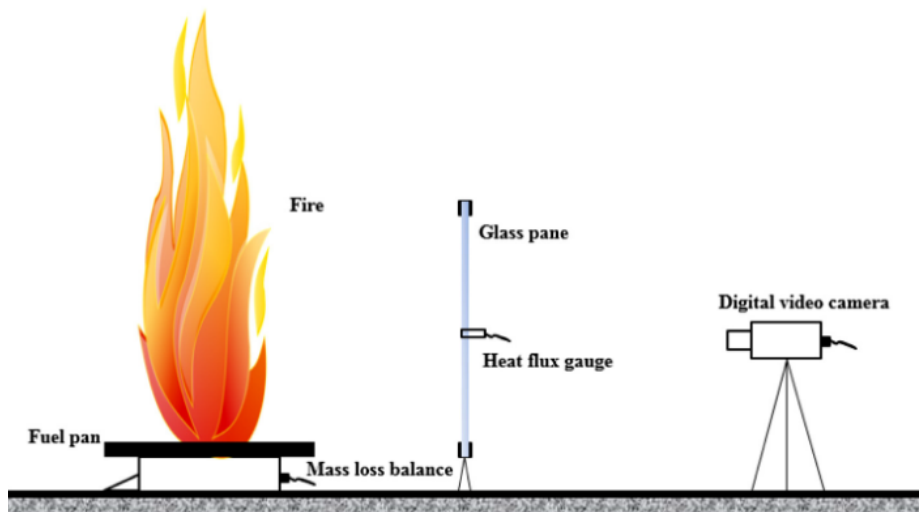
6.3. Vinduenes effekt i et brannforløp

En rapport fra 1998 oppgir at termisk spenning forårsaker brudd i glass. Sprekkdannelse i vinduer oppstår som følge av spenninger dannet av kritiske temperaturdifferanser over glassets overflate. Endene av glasset er skjermet av karmen og utsettes ikke for samme varmeeksponering som resten av ruta. Temperaturen stiger da fortere i midten av vinduet enn kantene skjermet av karmen. Området sentralt i ruta vil da utvide seg mer enn kantene av ruta der det er kaldere. Varmeutvidelsen for rammen vil være annerledes fra glasset og danner spenninger. Det oppstår sprekker i kantene av ruta da vinduet er sprøtt og de blir utsatt for strekkpåkjenning. Sprekningen går da fra yttersiden av glasset og innover mot midten. Videre kan flere sprekker dannes og vinduet deles opp i flere deler til det tilslutt faller ut [54].

I en kinesisk rapport fra 2016 er formålet å bestemme kritiske bruddtilstander for 2-lags ruter vinduer i brann. Ni forsøk med 2-lags ruter eksponert for en væskebrann med n-heptane på 50 cm² x 50 cm² ble gjennomført. Vinduene bestod av glass med dimensjonene 60 cm² x 60 cm² og tykkelsen 6 mm. Vinduene og brannen hadde en avstand som varierte mellom 75 cm til 45 cm mellom seg. Studien konkluderte med at ruta som ikke blir direkte eksponert for brannen kan opprettholde integriteten sin tre eller fire ganger lengre enn den eksponerte i 2-lags ruter.

Kritiske tilstander for at den eksponerte ruta knuser er at varmekraften mot vindu er på 6 kW/m^2 og temperaturdifferansen innad i glasset er på $60 \text{ }^\circ\text{C}$. Det ytterste glasset trenger derimot en påkjenning av 25 kW/m^2 i varmekraft og høyere temperaturdifferanse [55].

En annen rapport utarbeidet året etter med deler av samme forskningsteam underbygger mange av de samme resultatene og konklusjonene. Et forsøk på termisk brudd og varmeoverføringer på vinduer med samme oppsett og forutsetninger ble gjennomført. (se Figur 19). Vinduene som ble testet var 1-lags rute, 2-lags rute og laminert 2-lags rute. Den kritiske temperaturdifferansen innad i glasset og den kritiske varmekraften ble lik for det første glasslaget. Det ytterste glasslaget hadde lik temperaturdifferanse for brudd som det første laget og en varmekraft på 13 kW/m^2 [56].



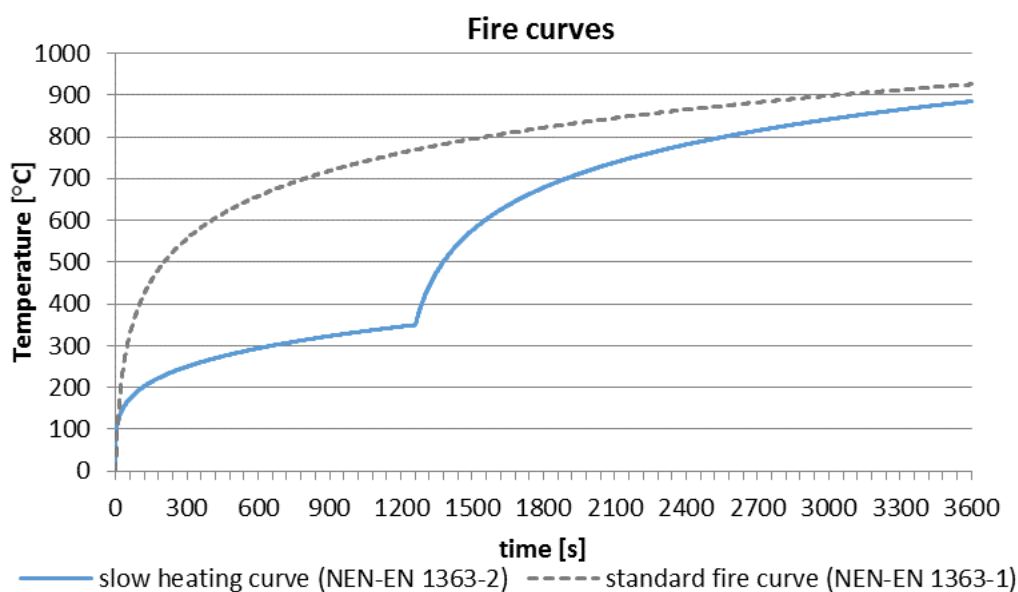
Figur 19: Oppsett av forsøk. Hentet fra [56]

I en rapport med samling av studier for brudd i glass ved brann utført av Dr. Vytenis Babrauskas konkluderes det med at glass på 3 mm tykkelse knuser ved en gasstemperatur på rundt $360 \text{ }^\circ\text{C}$. For tykkere glass på 4-6 mm tykkelse knuser glasset ved gjennomsnittstemperaturen $450 \text{ }^\circ\text{C}$. Doble vinduer med 6 mm tykkelse kan forventes å knuse ved en temperatur på $600 \text{ }^\circ\text{C}$ [57].

En studie fra 2006 gjennomført i USA tar for seg brudd på flerglassruter grunnet strålingseksponering. 7 ulike glasstyper innenfor 2-lags ruter og 3-lags ruter ble testet med dimensjonene $30,5 \text{ cm}^2 \times 30,5 \text{ cm}^2$, $60,9 \text{ cm}^2 \times 121,9 \text{ cm}^2$ eller $121,9 \text{ cm}^2 \times 243,8 \text{ cm}^2$. Tykkelsen på glasslagene var 6,35 mm. Strålingskildene som ble brukt i forsøket var et strålingspanel og strålingsenergi fra en jet fuel væskebrann i en 1 diameters panne. Varmefluksene vinduene ble eksponert for var 30 kW/m^2 eller lavere. Resultatene av forsøket viste at 3-lags ruter hadde lavere total varmestrøm gjennom glassene, lavere temperatur på ytterste glass og lavere varmekraft enn 2-lags rutene. For 3-lags rutene ble overflatetemperaturen for ytterste glass ikke høyere enn $100 \text{ }^\circ\text{C}$ og varmekraften ikke høyere enn 4 kW/m^2 mens overflatetemperaturen for ytterste glass i 2-lags rutene oversteg ikke $220 \text{ }^\circ\text{C}$ og varmekraften 5 kW/m^2 . For 3-lags rutene knuste det innerste glasset raskere enn for 2-lags rutene ved varmeeksponeringen. Dette skjedde fordi den innerste ruten var isolert fra de

andre glasslagene med en luftspalte, noe som førte til at spenninger oppstod raskere og glasset brøt sammen. I de fleste testene brøt ikke det ytterste glasslaget [58].

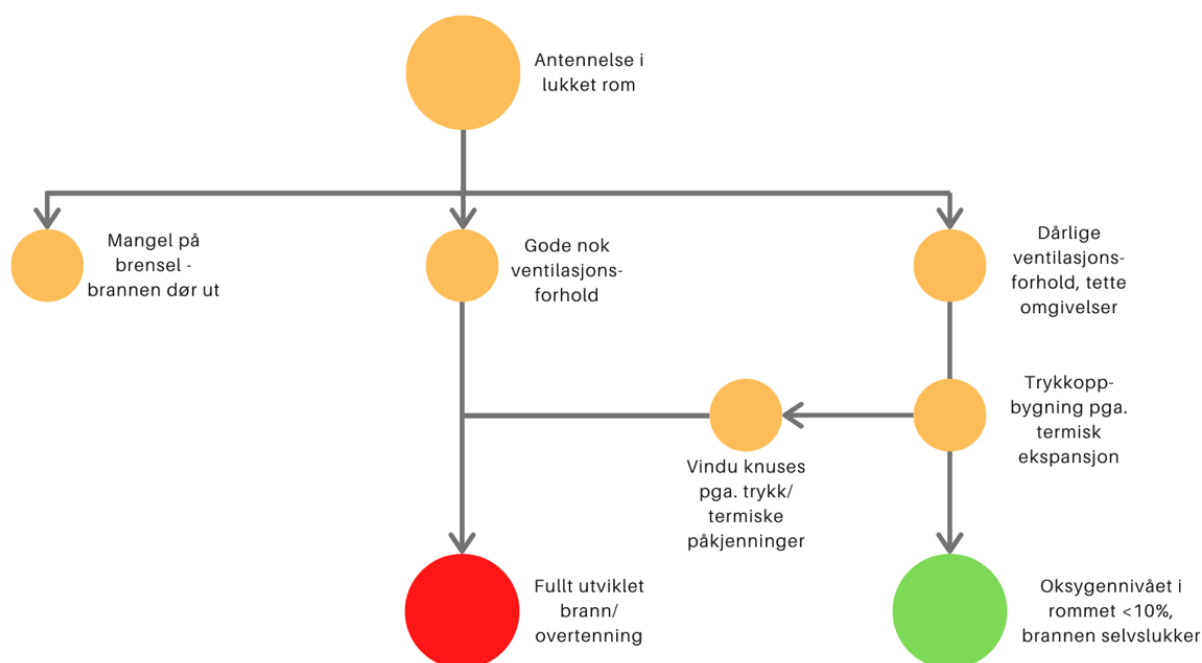
Effekten av 3-lags ruter av lavenergibygging for brannsikkerhet ble utredet i en nederlandsk rapport fra 2017. To forsøk ble gjennomført, der glass ble eksponert for en brannovn etter ISO-834 standard. I forsøkene ble en kurve for langsom brannutvikling brukt for oppvarmingen av glassene for å simulere temperaturene som vanligvis oppstår i en lukket rombrann (Se Figur 20). Forsøkene ble utført på en vindusramme med 4 vinduer med størrelse på $92,4 \text{ cm}^2 \times 92,4 \text{ cm}^2$ og 4 på $189,7 \text{ cm}^2 \times 92,4 \text{ cm}^2$. Det ene forsøket med 2-lags ruter i rammen og det andre med 3-lags ruter. Tykkelsen på alle glasslagene i forsøket var 4 mm. Resultatet av forsøket viser at 3-lags rutene holdt seg intakt lengre enn 2-lags rutene. 2-lags ruten hadde noe brudd på glass etter 10 minutter mens 3-lags ruten hadde ikke brudd før etter 19 minutter. Temperaturdifferansen for glassene var høye uten brytning og brøt i noen tilfeller ved lave differanser. Det ble derfor ikke funnet noen sammenheng mellom temperaturdifferansen og når glasset falt ut. Temperaturdifferansen er her forskjellen på temperaturen i endene av glasset som er skjermet av karmen og temperaturen i sentre av glasset. 2-lags rutene hadde ingen store glassutfall før temperaturen fra gassene var $375 \text{ }^\circ\text{C}$. 3-lags rutene fikk ikke store glassutfall før gass temperaturen var på $475 \text{ }^\circ\text{C}$ [59].



Figur 20: Langsom brannutvikling. Hentet fra [59]

7. Diskusjon

Forskningen presentert i kapittel 6 viser hvordan utviklingen av en rombrann er avhengig av omgivelsene sine, og at det er flere parametere som legger til rette for videre spredning av brann og røyk. Felles for forskningen relatert til energieffektive hus er at det hovedsakelig fokuseres på effekten byggene har ved en allerede antent brann. Parametere som av varierende grad vil påvirke en brannutvikling er ventilasjonssystem samt tettheten og tykkelsen på bygningskroppen. Det er også disse områdene som i hovedsak blir påvirket av de fornyede energikravene i den byggtekniske forskriften. Sammenhengen av de ulike tiltakene kan sørge for et annet type brannforløp som skiller seg ut fra tradisjonelle rombranner. Figur 20 viser en enkel oversikt over ulike tilfeller av brannutvikling en kan få i et tett og lukket rom:



Figur 21: Enkel modell over mulige hendelser ved brann i tette rom

7.1. Tette hus

Gjennom kravsendringene presentert i kapittel 3 det hvordan dagens boliger er tettere og bedre isolerte enn sine forgjengere som følge av de stadig strengere kravene til byggets netto energiforbruk. Det fremstår av studiene presentert i kapittel 5 at endringene vil ha en påvirkning på eventuelle brannforløp.

Gjennom en reduksjon av lekkasjearealet i vegger, tak, gulv og vinduer vil luften i mindre grad strømme gjennom konstruksjonens ytre. I tilfellet av en brann vil dette begrense forbrenningsprosessen ved å redusere tilgangen på oksygen i tillegg til å forhindre en fri ekspansjon av den varme lufta, dersom det ikke er tilstrekkelig med åpninger. Denne forhindrede termiske ekspansjonen sørger for en trykkoppbygning som vil finne plass i brannens utviklingsfase, og som er å regne med i enhver brann som forekommer i avlukkede omgivelser.

Størrelsen på dette trykket er avhengig av flere faktorer:

- Brannutviklingen – En raskere brannutvikling gjør at trykket øker raskere over et mindre tidsintervall
- Størrelsen på rommet – I større rom og åpne arealer vil brannen bruke lengre tid på å oppnå et overtrykk ettersom luften får ekspandere i større grad
- Ventilasjonsforhold – Gode ventilasjonsforhold tillater luften å ekspandere fritt uten en større trykkøkning

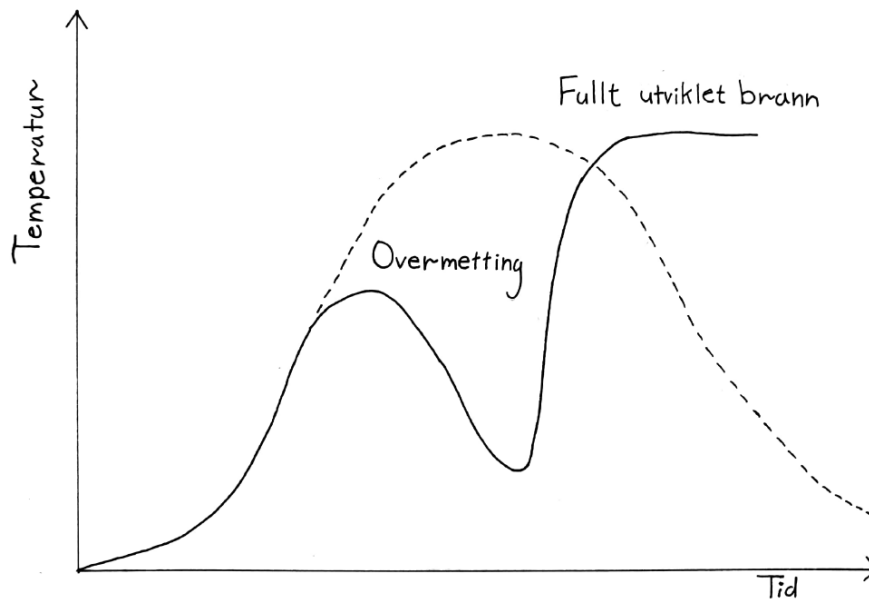
Ved en hurtig brannutvikling i tette omgivelser kan det oppstå større maksimaltrykk som uavhengig av ventilasjonsforholdene kan føre til ødeleggelser på de omliggende konstruksjonene (hovedsakelig vinduer og dører). Dette legger forholdene til rette for en full overtenning og en videre brannspredning. Den forhindrede termiske ekspansjonen vil dermed også være en potensiell drivkraft for spredning av røyk til andre deler av bygget. Dette underbygges av studiene til Hostikka og Janardhan [52] som fant at dersom brannutviklingen er tilstrekkelig rask, vil trykket kunne ødelegge konstruksjoner.

I tillegg til å være tette, inneholder også nye boliger større mengder med isolasjon i yttervegger, gulv mot det fri og tak for å effektivt forhindre varmetap til omgivelsene. Dette resulterer i at varmeoverføringen fra en brann til omgivelsene vil reduseres kraftig. I rom hvor det er omliggende materialer som evner å holde på varmen effektivt, kan det oppnås en hurtigere brannutvikling ved at energien holdes i rommet og sørger for høyere temperaturer. I tillegg kan akkumuleringen av varme i materialene, sørge for en forsterket varmestråling tilbake til brannen. I forsøket til Back [51] ble denne effekten dokumentert, og temperaturprofilen i isolerte omgivelser var generelt høyere enn i de uisolerte. Forsøket bygger på funn fra tidligere studier, som bla. sier at høyere temperaturer nås i isolerende omgivelser [60] [61], samt at tid til overtenning nås raskere i bygg hvor omgivelsene har gode isolerende egenskaper [62]. I tillegg til omgivelsene vil brenselet være av en stor betydning for hvordan brannen utvikler seg. Ved brann i møbler med en høy brannenergi vil dette kunne bidra til en hurtigere brannutvikling. På tross av at det er lovverk som skal forhindre antenningen av stoppete møbler og madrasser fra ulmende sigarett, vil det være andre objekter i rommet som kan antenne og spre varme til møblementet.

For at en brann skal utvikle seg til full overtenning må branntrekanten tilfredsstilles gjennom hele brannutviklingen. Det må være tilstrekkelig med varme, brensel samt gode ventilasjonsforhold. Basert på informasjon presentert i brannteorien forventes det at ventilasjonsforholdene er en begrensende faktor som bidrar til at brannen blir underventilert i utviklingsfasen. For at brannen skal oppnå gode nok ventilasjonsforhold i et lukket og tett rom er det under den forutsetning at trykkoppbygningen som følge av den forhindrede termiske ekspansjonen er stor nok til å ødelegge et vindu eller andre strukturer som vil introdusere luft til rommet. I de tilfellene hvor effekten fra brannen ikke er stor nok til dette, vil det bli et underskudd av oksygen i rommet og brannen når et overmettings-punkt hvor deler av den brennbare gassen ikke vil forbrenne fullstendig. Ved en slik brann er varigheten på den videre forbrenningen avhengig av formen og størrelsen på de ulike ventilasjonsåpningene.

En underventilert brann med et underskudd av oksygen fører til en ufullstendig forbrenning som medfører en høyere konsentrasjon av giftige røygasser som CO og HCN. Videre vil temperaturen i rommet avta som følge av den begrensende produksjonen av varme fra brannen. Avhengig av hvorvidt temperaturen er høy nok, vil brannvesenets slokkeinnsats innebære en risiko ved entring av rom, eller knusing av vinduer da dette endrer ventilasjonsforholdene.

Dersom temperaturen er høy nok vil luftblandingen tillate den uforbrente røykgassen å reantenne. Trykkforskjeller vil sørge for at de antente røykgassene presses ut av rommet i form av en ildkule (backdraft). Det har forekommet tilfeller hvor personer uvitende har åpnet dører og gjenintrodusert en rombrann for oksygen (se Figur 22), noe som videre har ført til en reantennelse etterfulgt av en fullt utviklet brann og en brann- og røykspredning til andre deler av bygget.



Figur 22: Illustrasjon om hvordan en backdraft kan resultere i en fullt utviklet brann

7.2. Ventilasjon

Etterhvert som den byggtekniske forskriften har stilt strengere krav til byggenes tetthet, har bruken av kombinerte tillufts- og avtrekksanlegg vært nødvendig for å opprettholde et tilfredsstillende innklima. En reduksjon av åpningene i konstruksjonens klimaskall legger et dårligere grunnlag for brannutviklingen og gjør forbrenningsprosessen fullstendig avhengig av ventilasjonsforholdene i de ulike rommene. Uavhengig av brannutviklingens hastighet vil reduserte mengder med oksygen sørge for at brannen blir ventilasjonskontrollert og forhindre at det oppstår full overtenning. I hurtige brannutviklinger vil forbrenningsprosessen redusere oksygennivået i et større tempo og sørge for at det tidlig blir et underskudd av oksygen i rommet.

Som det ble påpekt i forrige delkapittel vil hurtige brannforløp bety et større overtrykk og i de tilfellene trykket er tilstrekkelig, vil røyk presses inn i kanalnettet. Dersom dette skjer, vil røyken blandes med luften som allerede befinner seg i kanalen, noe som fører til en fortykning og avkjøling av røyken. Derav vil en røykspredning til andre rom foregå i et relativt rolig tempo [9]. Etter at overtrykket har avtatt vil brannens effekt videre reguleres av tilluften fra ventilasjonsanlegget. Luftstrømmen og trykket i kanalnettet til balanserte ventilasjonsanlegg vil variere fra bolig til bolig, og en videre innstramming av SFP-kravene i henhold til tiltaksmetoden i TEK vil kunne føre til at en opererer med lavere luftstrømmer og trykk i kanalnettet. Ved bruk av et lavere trykk, gjør en kanalnettet mer sårbar for inntrengingen av røykgasser under en trykkøkning ved brannens utviklingsfase.

I tilfellet av en langsom brannutvikling vil det tilgjengelige oksygenet forbrukes over en lengre tid, og ved hjelp av tilluften fra ventilasjonsanlegget vil det kunne oppstå en forlenging av forbrenningsprosessen. Likevel vil branneffekten ikke overstige nivået hvor forbrenningsprosessen bruker mer oksygen enn det ventilasjonen tilfører.

Romstørrelser og åpenhet vil også spille en rolle i brannutviklingen, da det bestemmer mengden med oksygen som allerede befinner seg i rommet. Større mengder med oksygen tillater brannutviklingen å bestå lengre og dermed oppnå en høyere branneffekt.

Ved å bruke formel 2 presentert i kapittel 3.2.2 kan energifrigjøringen som oppnås av lufttilførselen fra balanserte ventilasjonsanlegg beregnes:

Tabell 10: Energifrigjøring som funksjon av luftmengde fra balansert ventilasjon

Kanaldiameter og dimensjon for ventiler [mm] ¹	Maks hastighet, $\dot{m}_{luft} \left[\frac{L}{s} \right]$ ¹	Maks hastighet, $\dot{m}_{luft} \left[\frac{g}{s} \right]$	Forbrenningsentalpi for luft $-\Delta H_{c,luft} \left[\frac{kJ}{g} \right]$ ²	\dot{Q}_c [kW]
100	15	18	3,0	54
125	25	30		90
160	42	50		150

¹ (SINTEF, Byggforskerien 552.303 – Balansert ventilasjon i småhus, 2015)

² (D. Drysdale – An Introduction to Fire Dynamics – pp. 25-30, 2011)

I de tilfellene det brenner i rom utstyrt med avtrekk vil romløsningen bestemme hvorvidt det fins en tilstrekkelig tilgang på oksygen: I de tilfellene rom med avtrekk er kombinert med oppholdsrom gjennom en åpen løsning (f.eks. stue og kjøkken), vil tilluften supplere begge rommene med luft. I slike rom vil forbrenningsprosessen ha tilgang på store mengder med oksygen, noe som fører til en brannutvikling som er tilsvarende for rom utstyrt utelukkende med tilluft.

For rom med avtrekk hvor det ikke er vanlig med åpne løsninger (våtrom, bod) vil den eneste lufttilførselen skje gjennom luftspalter under dører. Denne sterkt reduserte tilgangen på oksygen sørger for at brannen blir underventilert tidlig i utviklingsfasen. For at det skal oppstå gode nok ventilasjonsforhold må integriteten til omliggende dører og vinduer brytes.

Etter krav i forskriften skal det utføres tiltak som sikrer en tilfredsstillende ventilasjon for rom hvor det er forventet en stor forurensingsbelastning. Dermed er det gitt minimumskrav for avtrekksvolum i disse rommene. Avtrekket baserer seg på tilluften som tilføres fra oppholdsrom gjennom luftspalter under dørene. De ulike mengdene med tilluft kan føre til følgende energifrigjøring:

Tabell 11: Energifrigjøring i rom med avtrekk

Rom	Avtrekksvolum $\dot{m}_{luft} \left[\frac{l}{s} \right]^3$	Maks hastighet, $\dot{m}_{luft} \left[\frac{g}{s} \right]$	Forbrennings- entalpi for luft $-\Delta H_{c,luft} \left[\frac{kJ}{g} \right]^4$	$\dot{Q}_c [kW]$
Kjøkken	10-30	12-36	3,0	36-108
Bad				
Toalett	10	12		36
Vaskerom	10-20	12-24		36-72

En energifrigjøring på rundt 100 kW tilsvarer en brann i en søppelbøtte. Videre vil energifrigjøringen være svært avhengig av tilgangen på brensel, noe som varierer sterkt for de ulike rommene.

En ulempe med en fortsatt drift av balanserte anlegg under en rombrann er at tilluftsventiler vil gi brannen en kontinuerlig tilgang på oksygen. I de tilfellene brannen blir underventilert og produserer en større mengde røykgasser, vil tilluften kunne sørge for at forbrenningsprosessen varer lengre. Dette er under den forutsetning at de tykke lagene med røykgass og sot ikke forhindrer oksygenet fra å nå brannen.

³ (Statens Byggtekniske Etat (DiBK), VTEK10, §13-2 tabell 1, 2010)

⁴ (D. Drysdale – An Introduction to Fire Dynamics – pp. 25-30, 2011)

7.3. Vinduer

Endringene av ytelseskravene til u-verdi for vinduer i byggt teknisk forskrift er gjort på bakgrunn av energiforbruk i boliger. Vinduenes motstandsevne for temperaturøkning og varmpåkjenninger er vesentlig for utviklingen av en rombrann. Forskningen presentert i kapittel 6.3 viser at antall lag og tykkelse på glasset har innvirkning på når og hvordan et vindu kolliderer ved en brann. Graden av motstandsevne til vinduer kan føre til to ulike scenarier i en brann: Dersom integriteten opprettholdes begrenses oksygentilførselen, røykspredning og flammespredning som videre kan føre til en overmetting av brannen. Dersom vinduet sprekker kan vinduet bli en ventilasjonsåpning og mer luft blir tilført brannen som igjen kan føre til overtenning og større brannvekst.

Et vindu med 3-lags rute vil holde seg intakt lengre enn en 2-lags rute. Vinduer med flere lag har større motstandsdyktighet mot påkjenninger av gasstemperatur. I et brannforløp som går til overmetting kan vinduer opprettholde integriteten sin uten å knuse. Dette kommer frem i forskningsstudiene fra både Nederland [59] og USA [58] som viser at 3-lags ruter har høyere brannmotstand. Gasstemperaturen for store glassutfall av 3-lags ruter var 100 °C høyere enn for 2-lags ruter. I få av forsøkene med 2-og 3-lags ruter knuste det ytterste glasslaget. Temperaturene som er kritiske for at alle lagene i 3-lags ruter knuser og mister integriteten sin kan antas å være meget høye ettersom gasstemperaturen for at begge lagene i en 2-lags ruter knuste var 600 °C. Slike temperaturer er det uvanlig at oppstår ved en underventilert brann i et lukket rom uavhengig av om det er rask, middels eller langsom brannutvikling. Dermed kan det antas at 3-lags ruter først går til brudd dersom rommet opplever overtenning. I et slikt tilfelle må det være andre forhold som tillater tilstrekkelig tilgang på oksygen til brannen.

Tykkelsen på glassene har mye å si for varmegjennomgangen. Et tykt glass vil ha mindre varmegjennomgang enn et tynnere. Dette kommer også fram i rapporten til Dr. Vytienis Babrauskas [57] der økt tykkelse på glass fører til økt nødvendig gasstemperatur for knusing av glasset.

Trykkoppbyggingen i rombrann som følge av en underventilert brann med termisk ekspansjon kan ha innvirkning på om rutene knuser som følge av trykk. I et slikt tilfelle vil ikke gasstemperatur og temperaturdifferanse i vinduet ha noe innvirkning. Dersom en brann i et lukket rom har en ultrarask brannutvikling som i forsøket til Janardhan og Hostikka [52] kan vinduer miste integriteten sin. Brannen blir ventilasjonskontrollert og kan gå til overtenning.

8. Konklusjon

Det er i de tidligere kapitlene blitt presentert informasjon med den hensikt å kartlegge branntekniske utfordringer knyttet til kravsendringene i de byggtekniske forskriftene. Siden den 1. utgaven av TEK97 har kravet knyttet til boligers totale energibruk gått gjennom flere endringer, hvor de viktigste energiltakene relateres til husets tetthet, bruken av mer isolasjon i klimaskallet, bedre vinduer, samt bruk av energieffektive ventilasjonsanlegg med varmegjenvinner. Selv om det kun er enkelte krav i tiltaksmetoden fra TEK som tilfredsstiller dagens passivhus-standard, har regjeringen forpliktet seg til en kontinuerlig revidering av de byggtekniske forskriftene hvert 5. år. Med bakgrunn i dette, er det å forvente at nivået ikke bare vil møte passivhus-standard, men også etter hvert overstige kravsnivået.

Bygg oppført etter eldre forskrifter har et større energibehov og bruken av en mer åpen konstruksjon med avtrekksventilasjon samt reduserte mengder med isolasjon krever mer energi til romoppvarming. Siden avtrekksventilasjon baserer seg på en utveksling av friskluft gjennom åpninger og ventiler i konstruksjonens klimaskall, vil eldre bygg ha bedre trekkforhold i de ulike rommene. De små åpningene vil samlet sett gjøre opp for et større lekkasjeareal som i tilfellet av en brann vil bidra med betydelige mengder oksygen til forbrenningsprosessen. Avtrekket som skjer via vifter eller ved hjelp av naturlige oppdriftskrefter, sørger for at det kreves store trykkøkninger for at det skal forekomme en røykspredning via kanalnettet. Med reduserte mengder isolasjon i vegger, tak og gulv vil brannens varmetap til omgivelsene være større, noe som resulterer i langsommere brannutviklinger. I tilfellet av en trykkoppbygning vil lekkasjearealet fra de ulike åpningene i klimaskallet fungere som trykkavlastningsflater, og det er ikke rimelig å forvente trykk som er store nok til å ødelegge omliggende vinduer eller dører. Samlet sett forventes det at bygg oppført etter eldre forskrifter vil oppleve et typisk brannforløp, hvor ingen fysisk inngripen i brannutviklingen resulterer i en full overtenning og en videre brannspredning.

For boliger oppført etter nyere forskrifter, vil forskriftskravet for luftvekslinger sørge for en svært tett konstruksjon hvor utvekslingen av luft innad i konstruksjonen er begrenset til ventilasjonsanlegget. Dette sørger for at forbrenningsprosessen i en rombrann vil utvikle seg forskjellig avhengig av de ulike rommenes ventilasjonsforhold: I rom med tilluft vil den kontinuerlige tilgangen på friskluft bistå forbrenningsprosessen og bidra til en viss energifrigjøring avhengig av luftmengdene som tilføres rommet. I tilfeller hvor brannen har nådd et overmettingspunkt, kan denne oksygentilgangen tillate forbrenningen å vedvare i mindre grad. Dermed er det sannsynlig at forholdene for en backdraft består over en lengre periode.

I rom med avtrekksventiler vil romløsningen i stor grad bestemme hvorvidt ventilasjonsforholdene er tilstrekkelige for brannutviklingen: I rom med åpne løsninger hvor det er en kombinert tillufts- og avtrekksventilasjon vil brannutviklingen være tilsvarende som i rom med kun tilluft. I avlukkede rom skjer utvekslingen av luft gjennom spalteåpninger under dører. Et slikt rom vil ha en overmetting tidlig i brannutviklingen som følge av den sterkt reduserte tilgangen på oksygen. Samtidig som ventilasjonskonfigurasjonen for de ulike rommene bestemmer hvorvidt forbrenningen vil få et tilskudd av luft under brannutviklingen, vil romstørrelsen bestemme hvor mye oksygen det befinner seg i rommet fra før. I større rom

med åpne arealer vil den store mengden med oksygen sørge for forbrenningsprosessen varer lengre før det eventuelt blir et underskudd av oksygen i rommet.

Videre vil det tette klimaskallet forhindre den termiske ekspansjonen av luft og sørge for en trykkøkning innad i brannrommet. I de få minuttene dette skjer, vil maksimaltrykket i stor grad være avhengig av hurtigheten til brannutviklingen og rommets volum. Gjennom økte mengder med isolasjon i tak, yttervegger og gulv samt bruk av moderne møbler konstruert av syntetiske materialer bidras det til en hurtigere brannutvikling og en større branneffekt. Med disse faktorene tilstede er det rimelig å forvente at bygg oppført etter nyere forskrifter vil oppleve større trykkøkninger i rombranner. På samme tid som større trykkøkninger er en konsekvens av forskriftsendringene, vil strengere krav til vinduers varmegjennomgang sørge for tykkere vinduer med flerlagsruter som i større grad beholder integriteten mot slike påvirkninger. For selv om en hurtig brannutvikling tilsier at rommet får en raskere overtenning, er det under den forutsetningen at et vindu eller en dør ødelegges slik at forbrenningsprosessen får tilstrekkelig med oksygen.

Samlet sett vil de branntekniske utfordringene relatert til kravsendringene i byggt teknisk forskrift resultere i uforutsigbare brannforløp, hvor brannutviklingen vil være avhengig av ventilasjonsforhold, størrelsen på trykkoppbygningen samt integriteten til omliggende vinduer og dører. Romstørrelser og åpenhet blir dermed to svært avgjørende forhold som bestemmer hvorvidt det er tilstrekkelig med luft tilstede for å løfte brannen til en viss effekt og trykk.

9. Videre arbeid

Som det er blitt belyst i oppgaven vil brannforløp i bygg oppført etter nyere forskrifter være uforutsigbare. Å forutse hvordan alle faktorene i en typisk rombrann fungerer sammen er tilnærmet umulig gjennom en teoretisk rapport. Gjennomføringen av et forsøk på brann i rom som tilfredsstiller de ulike kravene i forskriften vil være en bedre tilnærming på problemstillingen. I tillegg kan det avdekke eventuelle faremomenter som til nå ikke er kartlagt. Slike forsøk vil gjerne se på det store bildet istedenfor å gå i dybden på de ulike bygningsdelene og komponentene. Av den grunn vil også forsøk som ser på de individuelle komponentene være av stor nytte. Aktuelle problemstillinger relatert til dette er:

- Vinduer av flere lag og deres integritet mot ulike trykkpåkjenninger
- Energifrigjøring i rom som en funksjon av tilført luft fra balanserte ventilasjonsanlegg
- Tilluften fra balanserte ventilasjonsanlegg og dens påvirkning på en ufullstendig forbrenning – vil forbrenningen og temperaturen bestå lengre?
- Konsentrasjon av giftige røykgasser som en funksjon av brann i tette omgivelser
- Verdier for maksimaltrykk som en funksjon av brannutviklinger med forskjellige hastigheter

Det vil også være aktuelt å se på komponenter som ikke/ i liten grad inngår i kravene til TEK:

- Innvendig struktur, herunder innvendige dører og vegger, og deres integritet mot termiske påkjenninger og/ eller trykkpåkjenninger
- Brennbarhet til ulike materialkledninger
- Nye elektriske komponenter og deres bidrag til en brannutvikling
- Romstørrelser og deres påvirkning på utviklingen av en brann i tette omgivelser

En avdekking av faremomenter knyttet til moderne bygg er med på å dekke kunnskapshullet som oppstår når utviklingen går så fort som den gjør. En slik informasjon vil være til stor hjelp for brannmannskap, som da eventuelt måtte endre sin tilnærming ved slokkeinnsats.

10. Referanser

- [1] «Kollegiet for brannfaglig terminologi,» [Internett]. Available: <http://www.kbt.no>.
- [2] Kommunal- og moderniseringsdepartementet, «Lov om planlegging og byggesaksbehandling (plan- og bygningsloven) nr. 71,» Kommunal- og moderniseringsdepartementet, 01.07.2009.
- [3] Det Kongelige Miljøverndepartementet, *Meld. St. 21 (2011-2012) - Norsk klimapolitikk*, Miljøverndepartementet, 2012.
- [4] B. C. Hagen, *Grunnleggende brannteknikk*, Haugesund, 2016.
- [5] B. Karlsson og James G. Quintiere, *Enclosure Fire Dynamics*, CRC Press, 1999.
- [6] D. Drysdale, *An introduction to fire dynamics*, Wiley, 2013.
- [7] Norges brannskole, *Grunnkurs for brannteknikk*, Gyldendal norsk forlag, 2011.
- [8] J. P. Stensaas og P. A. Hansen, «Røykspredning i bygninger,» SINTEF NBL, Trondheim, 1993.
- [9] C. S. o. J. P. S. A. S. Bøe, «BRAVENT - Delrapport 1 - Teori og kunnskapssamenstilling,» RISE Research Institutes of Sweden, Trondheim, 2019.
- [10] M. J. Hurley, *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, New York, NY: Springer New York, 2016.
- [11] J. P. Stensaas, «Røykproduksjon ved branner offshore - rev. 1,» SINTEF NBL as, 7465, 2007.
- [12] R. F. McAlevy og R. S. Magee, «The investigation of flame spreading over the surface of igniting solid propellants,» National Aeronautics and Space Administration (NASA), 1971.
- [13] Miljøverndepartementet, «Lov om plan- og bygningslov (plan- og bygningsloven) nr. 77,» Miljøverndepartementet, 17.08.1985.
- [14] Direktoratet for byggkvalitet (DiBK), «Byggteknisk forskrift (TEK17) med veiledning,» DIBK, 2017.
- [15] N. E. Forsén, J. Korff og M. J. Røsjø, «Evaluering av funksjonsbaserte regler,» Multiconsult, 2019.
- [16] P. Blom og S. Uvsløkk, «Bygg tett!,» SINTEF byggforsk, 0314, 2012.

- [17] R. F. Mikalsen, A. S. Bøe, K. Glansberg, C. Sesseng, K. Storesund, R. Stølen og A. W. Brandt, «RISE-rapport 2019:02 - Energieffektive bygg og brannsikkerhet,» RISE Research Institutes of Sweden, 2019.
- [18] T. R. K. I. Edvardsen, Trehus, SINTEF byggforsk, 2014.
- [19] Astma- og allergiforbundet, «Inneklima i bolig,» 16 06 2011. [Internett]. Available: <https://www.naaf.no/fokusomrader/inneklima/fakta-om-inneklima/>.
- [20] Systemair, «Boligventilasjon - planlegging, montasje, bruk og vedlikehold,» p. 13, Mars 2019.
- [21] E. Skåret og P. Blom, «Ventilasjon av boliger - Prinsipper og behov - Byggforskserien A 552.301 (Utgått 2015-5),» Byggforsk, 1994.
- [22] Tekna, «Balansert ventilasjon med gjenvinning,» 28 12 2018. [Internett]. Available: <https://www.tekna.no/fag-og-nettverk/bygg-og-anlegg/byggbloggen/balansert-ventilasjon-med-varmegjenvinning.> [Funnet 05 05 2020].
- [23] SINTEF, «Ventilasjon av småhus - System og komponenter, 552.304 (utgått),» SINTEF, 1984.
- [24] Statens byggt tekniske etat, «Veiledning til teknisk forskrift til plan- og bygningsloven 1997 (4. utgave mars 2007),» Statens byggt tekniske etat (nå DiBK), Oslo, 2007.
- [25] M. Mysen, «Energieffektiv ventilasjon - innføring av SFP,» Norges byggforskningsinstitutt 1999, Oslo, 1999.
- [26] H. Winterseth, «Brannsikring av ventilasjon - Firesafe (Frokostseminar),» [Internett]. Available: https://www.firesafe.no/sites/default/files/private_188/brannsikring_av_ventilasjon_-_frokostmote.pdf.
- [27] Byggeskikksenteret, *Vinduer gjennom tidene*, Byggeskikksenteret og Fylkeskonservatoren i Vest-Agder.
- [28] Direktoratet for byggkvalitet (DiBK), Veiledning til forskrift om tekniske krav til byggverk (byggt teknisk forskrift), 1. Utgave (TEK10), Oslo: DiBK, 2010.
- [29] SINTEF Byggforsk, 571.951 Bygningsglass, Oslo: SINTEF Byggforsk, 2016.
- [30] S. Byggforsk, Isolerruter. Typer og konstruksjoner, Oslo: SINTEF Byggforsk, 2016.
- [31] H. Arnesen, J. Holme, B. Risholt, S. Uvsløkk, S. Grynning, B. P. Jelle, B. Time og S. Wærp, «Moderne trevinduer – funksjonalitet, levetid og design,» SINTEF Byggforsk, Oslo, 2009.

- [32] Statens Byggtekniske Etat (nå DiBK), «REN veiledning til teknisk forskrift til plan- og bygningsloven 1997 (1. utgave),» Statens byggtekniske etat (nå DiBK), Oslo, 1997.
- [33] Statens Byggtekniske Etat (nå DiBK), *Presentasjon: Revisjon av Teknisk Forskrift 2007 - Nye energikrav*, Statens Byggtekniske Etat.
- [34] SINTEF, «Hvordan oppfylle energikravene i TEK,» 12 12 2008. [Internett]. Available: <https://www.sintef.no/siste-nytt/hvordan-oppfylle-energi-kravene-i-tek/>.
- [35] World Commision on Enviroment and Development, «Our Common Future,» Oxford University Press, 1987.
- [36] Gaia Arkitekter, «Absolutt passiv energidesign - Passivhusnivå ved utnyttelse av hygrottermiske egenskaper i trevirke,» 12 2014. [Internett]. Available: https://www.gaiaarkitekter.no/images/gaia_lista/boker_og_artikler/pdf_artikler/hTE_DELRAPPORT_15_des_2014_R.pdf.
- [37] IV Produkt, «Ecodesign 2018 - slik blir ventilasjonsbransjen påvirket,» 28 12 2018. [Internett]. Available: <https://www.ivprodukt.no/nyheter/ecodesign-2018>. [Funnet 01 05 2020].
- [38] Norconsult, «Praktisk veileder for energimerking,» Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE), Oslo, 2013.
- [39] Direktoratet for byggkvalitet (DIBK), «Dette er energikravene i byggteknisk forskrift,» 13 02 2018. [Internett]. Available: <https://dibk.no/verktoy-og-veivisere/energi/dette-er-energi-kravene-i-byggteknisk-forskrift/>.
- [40] Statens byggtekniske etat (nå DiBK), «Revisjon av teknisk forskrift 2007 - Nye energikrav (presentasjon),» [Internett]. Available: <http://docplayer.me/10967306-Revisjon-av-teknisk-forskrift-2007.html>. [Funnet 05 05 2020].
- [41] Direktoratet for Byggkvalitet (DiBK), «Byggteknisk forskrift (TEK10), (3. Utgave),» DiBK, Oslo, 2016.
- [42] P. G. S. T. D. P. P. B. o. L. G. L. Myhre, «Veileder for prosjektering av passivhus - småhus,» Sintef Akademisk Forlag, 0314, 2012.
- [43] Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap (DSB), «Arbeidsgruppe boligbrannsikkerhet 2010 - En gjennomgang av dagens ordninger for informasjon, tilsyn og kontroll med brannsikkerhet i boliger,» Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap (DSB), Oslo, 2011.
- [44] A. Steen-Hansen og B. Kristoffersen, «Hvor brannsikre er stoppete møbler og madrasser?,» SINTEF NBL, Trondheim, 2007.

- [45] J. Krasny, W. Parker og V. Babrauskas, «Fire Behaviour of Upholstered Furniture and Mattresses,» William Andrew Publishing, Norwich, NY, 2001.
- [46] «Forskrift om antennelighet av madrasser og stoppede møbler,» Utstedt av Kommunal- og regionaldepartementet - Produkt- og Elektrisitetstilsynet, Oslo, Ikrafttredelse 01.07.1999.
- [47] «LOV-1976-06-11 nr. 79: Lov om kontroll med produkter og forbrukertjenester (produktkontrollloven),» Miljøverndepartementet, Ikrafttredelse 01.09.1977.
- [48] UL Firefighter safety research institute (FSRI), «www.ulfirefightersafety.org,» 2009. [Internett]. Available: <https://ulfirefightersafety.org/research-projects/comparison-of-modern-and-legacy-home-furnishings.html>.
- [49] H. Pretrel, W. L. Saux og L. Audouin, «Pressure variations induced by a pool fire in a well-confined and force-ventilated compartment,» Fire Safety Journal, 2014.
- [50] C. Fourneau, N. Cornil, C. Delvosalle, H. Breulet, S. Desmet og S. Brohez, «Comparison of fire Hazards in Passive and Conventional Houses,» AIDIC, Associazione Italiana Di Ingegneria Chimica, 2012.
- [51] A. Back, «Fire Development in Insulated Compartments: Effects From Improved Thermal Insulation,» Brandteknik och Riskhantering, Lunds tekniska högskola, 2012.
- [52] S. Hostikka og R. K. Janardhan, «Pressure management in compartment fires,» Aalto University, School of Engineering, 2017.
- [53] Y. Z. Li, "CFD Modelling of Pressure Rise in a Room Fire," SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut, 2015.
- [54] P. J. Pagni og B. R. Cuzzillo, «Thermal Breakage of Double-Pane Glazing By Fire,» Journal of Fire Protection Engineering, 1998.
- [55] Y. Wang, K. Li, Y. Su, W. Lu, Q. Wang, J. Sun, L. He og K. Liew, «Determination of critical breakage conditions for double glazing in fire,» Science Direct, 2017.
- [56] Y. Wang, Q. Wang, J. X. Wen, J. Sun og K. Liew, «Investigation of thermal breakage and heat transfer in single, insulated and laminated glazing under fire conditions,» ScienceDirect, Hefei, 2017.
- [57] D. V. Babrauskas, «Glass breakage in fires,» Fire Science and Technology Inc., 2010.
- [58] M. S. Klassen, J. A. Sutula, M. M. Holton, R. J. Roby og T. Izbicki, «Transmission Through and Breakage of Multi-Pane Glazing Due to Radiant Exposure,» SpringerLink, 2006.

- [59] W. Zeiler, R. van Herpen og R. Huizinga, «THE EFFECT OF TRIPLE GLAZING OF NEARLY ZERO ENERGY BUILDINGS ON THEIR FIRE SAFETY,» IFireSS, Napels, 2017.
- [60] D. J. Latham, B. R. Kirby og G. Thomson, «The Temperatures Attained by Unprotected Structural Steelwork in Experimental natural fires,» Fire Safety journal Vol. 12, pp. 139-152, 1987.
- [61] O. Petersson, S. E. Magnusson og J. Thor, «Fire Engineering Design of Steel Structures,» Swedish Institute of Steel Construction, Stockholm, 1976.
- [62] B. Sundström, P. V. Hees og P. Thureson, «Results and analysis from fire tests of building products in ISO 9705, the room/ corner test,» Swedish National Testing and Research Institute, 1998.