

Risikovurdering og dimensjonering av gipsplater som passiv brannsikring av trekonstruksjoner

Herman Knoop

Bygg- og miljøteknikk

Innlevert: juni 2013

Hovedveileder: Harald Landrø, BAT

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for bygg, anlegg og transport



| | | | |
|--|---------------------------------|---|-----------------|
| Oppgavens tittel: Risikovurdering og dimensjonering av gipsplater som passiv brannsikring av trekonstruksjoner | Dato: 10.06.2013 | | |
| | Antall sider (inkl. bilag): 136 | | |
| | Masteroppgave | X | Prosjektoppgave |
| Navn: Stud.techn. Herman Knoop | | | |
| Faglærer/veileder: Harald Landrø | | | |
| Eventuelle eksterne faglige kontakter/veiledere: Björn Magnusson, Rambøll | | | |

Ekstrakt:

Innføringen av funksjonsbaserte forskrifter åpnet for store muligheter for bruk av tre i bygg, som f.eks. å bygge fleretasjes trehus med tre i bære- og skillende konstruksjoner. Uavhengig av valgte løsninger må brannsikkerheten ivaretas og dokumenteres. En måte å ivareta brannsikkerheten for trekonstruksjoner er å bruke branngipsplater som passiv brannsikring. Alle branngipsplater er godkjent iht. NS-EN 520:2004, men tester avdekker at platene har forskjellig brannmotstand. Det finnes også flere metoder for å dimensjonere branngipsplater, men resultatene varierer mellom de ulike metodene.

Denne rapporten kartlegger hvilke materialeegenskaper og eksterne faktorer som påvirker brannmotstanden til en gipsplate, hvilke metoder som kan brukes for å dimensjonere branngipsplater og hvordan en kan gjennomføre risikovurdering med NS 3901:2012 av brannmotstanden til en trekonstruksjon med gipsplater.

Rapporten har funnet ut at følgende materialeegenskaper og eksterne faktorer påvirker brannmotstanden til en branngipsplate og en trekonstruksjon med branngipsplater: densitet, glassfiberforsterkning, diverse tilsetningsstoffer som vermikulitt og leire, vanninnhold, mikrostruktur, prosentandel kalsiumsulfat, type trevirke, lagvis plassering, innfesting, isolering av tomrom, festemidler (hullavstand, kantavstand og skruelengde) og plassering i rommet.

Avhandlingen har kartlagt følgende metoder for å dimensjonere branngipsplater: NS-EN 1995-1-2:2004, Improved design method av ETH Zürich, metoder basert på testresultater fra database, Component additive method og tabellverdier fra New Zealand og Nord-Amerika. Resultatene viser at starttid til forkulling varierte fra 53,3 til 61,6 minutter, mens tid med nødvendig brannmotstand varierte fra 85,2 til 105 minutter for en trestendervegg bak platene.

Casestudien ble gjennomført som en komparativ analyse av en bærende trestendervegg mot en bærende betongvegg. Resultatene påviser at trestenderveggen gir samme brannmotstand som betongveggen med tre lag gipsplater.

Avhandlingen anbefaler at gipsplater type F i større grad bør differensieres etter materialeegenskaper som påvirker brannmotstand og at metoder for dimensjonering av branngips bør ta mer hensyn til materialeegenskaper og eksterne faktorer som påvirker brannmotstand. Data på yteevnen til gipsplatene bør bli tilgjengelig for brannrådgivere.

Stikkord:

| |
|--|
| 1. Brannmotstand til gipsplater |
| 2. Dimensjonering av branngips |
| 3. Bærende trekonstruksjoner i BKL 3 |
| 4. Risikovurdering av trestendervegg med branngips |

(sign.)

FORORD

Denne masteroppgaven på 30 studiepoeng er det avsluttende arbeidet på masterprogrammet Bygg- og miljøteknikk på NTNU og er utarbeidet i tiende semester. Oppgaven er skrevet individuelt og er laget for institutt for Bygg, Anlegg og Transport, med fordypning i Brannsikkerhet.

Utgangspunktet for oppgaven var en forespørsel fra Rambøll om å se på bruk av branngipsplater i fleretasjes trehus, da det er behov for videre forskning på området. Avhandlingen har hatt fokus på bruk av gipsplater som passiv brannsikring i trehus og på risikovurdering av brann i byggverk. Fokuset på risikovurdering av brann i byggverk var et ønske fra undertegnede, da det var temaet for prosjektoppgaven høst 2012.

Jeg vil takke professor II Harald Landrø (NTNU/Tresenteret) som har vært faglig veileder til oppgaven.

Jeg vil også takke alle bidragsytere som har hjulpet til med råd og innspill underveis i arbeidet med oppgaven.

Björn Magnusson (Rambøll)

Anders Harald Arnhus (NTNU)

Jon Ivar Belghaug Knarud (NTNU)

Dag Hamre (Gyproc) og Johan Arvidsson (Norgips).

Opgaven er utført i tidsrommet 14. Januar 2013 til 10. Juni 2013.

Trondheim, 10. Juni 2013.

Herman Knoop

SAMMENDRAG

De siste årene har det blitt satt fokus på bruk av trekonstruksjoner når det gjelder bygningsdesign. Med funksjonsbaserte forskrifter kan en nå bygge bygg i brannklasse 3, med et bærende hovedsystem i tre, hvis det verifiseres med analyse. For å ivareta krav til brannsikkerhet kan en bruke branngipsplater som innkledning av treverket. I Norge klassifiseres branngipsplater i henhold til NS-EN 520:2004, men testresultater viser at det er store forskjeller på brannmotstanden til plater med samme klassifisering. For dimensjonering av gipsplater finnes en rekke ulike metoder, men resultatene varierer stort etter hvilke kilder som er brukt.

Denne rapporten tar for seg hvilke materialegenskaper og eksterne faktorer som påvirker brannmotstanden til gipsplater og hvilke metoder finnes for dimensjonering av branngipsplater. I tillegg gjennomføres det en risikovurdering av brannmotstanden til en bærende trestendervegg for å belyse begrensninger og muligheter med denne analysemetoden.

Rapporten er begrenset til å omhandle bruk av gipsplater som innkledning av bærende trekonstruksjoner i brannklasse 3 og bruk av NS 3901:2012 for gjennomføre en risikovurdering av brann i byggverk.

Avhandlingen består av en litteraturstudie og analyser. Litteraturstudiet inkluderer teori om prosjekteringsmodeller, risikovurdering, regelverk, trekonstruksjoner og gipsplater. Analysene består av en sammenligning av ulike metoder for å dimensjonere branngipsplater og en casestudie med en risikovurdering av brannmotstanden til en bærende trestendervegg i et boligbygg i brannklasse 3.

Rapporten har funnet at følgende materialegenskaper påvirker brannmotstanden til en branngipsplate: densitet, glassfiberforsterkning, diverse tilsetningsstoffer som vermikulitt og leire, vanninnhold, mikrostruktur og prosentandel kalsiumsulfat.

Videre har rapporten funnet at følgende eksterne faktorer påvirker brannmotstanden til en trekonstruksjon innkledd med branngips: type trevirke, lagvis plassering, innfesting, isolering av tomrom, festemidler (hullavstand, kantavstand og skruelengde) og plassering i rommet.

Avhandlingen har kartlagt følgende metoder for å dimensjonere branngipsplater:

- NS-EN 1995-1-2:2004
- Improved design method av ETH Zürich
- Metode basert på testresultater fra database
- Component additive method
- Tabellverdier fra New Zealand og Nord-Amerika

Metodene ble brukt for å beregne starttid til forkulling og tid med nødvendig brannmotstand for en bærende trestendervegg med to lag gipsplater som brannbeskyttelse. Resultatene viser

at starttiden til forkulling i trestender varierer fra 53,3 til 61,6 minutter. For tid med nødvendig brannmotstand varierte tiden fra 82,5 til 105 minutter.

Casestudien i rapporten ble gjennomført på et boligbygg i tre med fem etasjer. Byggverket ble klassifisert til risikoklasse 4 og brannklasse 3 og ble utformet med et bærende hovedsystem i tre. I casen ble det gjennomført en komparativ analyse av en bærende trestendervegg mot en bærende betongvegg mht. på brannmotstand. I risikovurderingen blir det påvist at trestenderveggen opprettholder brannmotstand REI 90, med bruk av tre lag gipsplater.

Rapporten kommer med følgende anbefalinger:

- Det bør i større grad tas hensyn til materialeegenskaper som påvirker brannmotstand, ved klassifisering av gipsplater type F med NS-EN 520:2004.
- Metodene for dimensjonering av branngipsplater bør justeres, slik at de i større grad tar hensyn til materialeegenskaper og eksterne faktorer som påvirker brannmotstanden til gipsplatene.
- Det anbefales at det utvikles flere metoder for å dimensjonere branngips, som er gyldige for tre lag med gipsplater.
- Data på yteevnen til gipsplater bør i større grad bli tilgjengelig for brannrådgivere for analytisk prosjektering. Dataen bør oppgis av plateprodusenter og forskningsmiljøer.

ABSTRACT

Building design has for the last years taken the use of timber structures into a higher consideration. Performance-based building codes make it possible to construct buildings in fire class 3, with load bearing timber structures, if the fire safety is verified by analysis. To meet the requirements for fire safety, fire protective gypsum plasterboards can be used as cladding on timber frame assemblies. In Norway gypsum plasterboards are classified in NS-EN 520:2004, but based on test results, the fire resistance of the plasterboards vary considerably. There are a bunch of different design procedures for fire protective gypsum plasterboards, but the results differ depending on the chosen source.

This report deals with the material properties and external factors influencing the fire resistance and methods for the design of fire gypsum plasterboards. In addition there will be a risk assessment of the fire resistance of a load bearing timber stud wall, to illustrate the possibilities and limitations with this method.

The report is limited to concern the use of gypsum plasterboards as cladding on load bearing timber structures in fire class 3 and the use of NS 3901:2012 for risk assessment of fire in constructions.

The thesis includes a literature study and analysis. The literature study include theory on fire safety engineering models, risk assessment, rules and regulations, timber structures and gypsum plasterboards. The analysis consist a comparison between different design procedures for fire protective gypsum plasterboards and a case study with a risk assessment of the fire resistance of a load bearing timber stud wall in a dwelling in fire class 3.

The report gives a summary of the material properties to have the largest influence on the fire resistance of fire protective gypsum plasterboards, i.e. the density, glass fibre reinforcing, several additives like vermiculite and clay, water content, microstructure and percentage calcium sulphate.

Regarding the external factors influencing the fire resistance for timber structures with fire protective gypsum plasterboards, the report identifies several factors, i.e. type of timber, order of different types of layers, fixings, isolation of void cavities, fasteners (spacing, edge distance and screw length) and placement in room.

The thesis has identified following design procedures for fire protective gypsum plasterboards:

- NS-EN 1995-1-2:2004
- Improved design method by ETH Zürich
- Method based on test results from data base
- Component additive method
- Values in tables from New Zealand and North-America

The design procedures was used for calculation of start of charring time and time with required fire resistance, for a load bearing timber stud wall with two layers of gypsum plasterboards as fire protection. The results show that the time to start of charring time varied from 53,3 to 61,6 minutes. The time with required fire resistance varied from 82,5 to 105 minutes.

The case study was carried out on a wooden dwelling with five floors. The building was classified to risk class 4 and fire class 3 and developed with a main load bearing structure in timber. The case was carried out as a comparative analysis of the fire resistance of a load bearing timber stud wall against a load bearing concrete wall. The risk assessment concluded that the timber stud wall maintained fire resistance REI 90, with three layers of gypsum plasterboards.

The report results in the following recommendations:

- Material properties which affect the fire resistance should be considered in a greater range, when classifying gypsum plasterboards type F according to NS-EN 520:2004.
- Existing design procedures for gypsum plasterboards should be adjusted, so that they consider the material properties of the gypsum plaster and external factors which affect the fire resistance in a greater extent.
- It is recommended that there is developed more design procedures for gypsum plasterboards, which is suitable for timber structures with three layers of gypsum plasterboards.
- Data on the performance of gypsum plasterboards should be available for fire safety consultants in a greater amount. The data should be given by producers and research institutes.

Innhold

| | |
|--|----|
| 1. INNLEDNING | 1 |
| 1.1 Bakgrunn | 1 |
| 1.2 Problemstillinger | 2 |
| 1.3 Målsetting | 3 |
| 1.3.1 Resultatmål | 3 |
| 1.3.2 Effektmål..... | 3 |
| 1.3.3 Suksesskriterier | 3 |
| 1.4 Omfang og begrensninger | 3 |
| 1.5 Rapportens oppbygning..... | 4 |
| 1.6 Definisjoner | 4 |
| 1.7 Forkortelser..... | 4 |
| 2. METODE | 5 |
| 2.1 Litteraturstudium | 5 |
| 2.2 Korrespondanse med produsenter | 6 |
| 2.3 Sammenligning av metoder for å dimensjonere gipsplater | 6 |
| 2.4 Casestudie..... | 7 |
| 3. LITTERATUR OG TEORI..... | 8 |
| 3.1 Prosjekteringsmodeller for brannsikkerhet..... | 8 |
| 3.1.1 Prosjekteringsmodeller generelt..... | 8 |
| 3.1.2 Risikoklasse | 10 |
| 3.1.3 Brannklasse | 10 |
| 3.1.4 Forenklet prosjektering | 11 |
| 3.1.5 Analytisk prosjektering | 12 |
| 3.1.6 Blandingsmodell | 13 |
| 3.1.7 Analysemetoder | 13 |
| 3.2 Risikovurdering – en introduksjon | 14 |
| 3.2.1 Hva er risiko? | 14 |
| 3.2.2 Risikoanalyse | 15 |
| 3.2.3 Risikoevaluering | 16 |
| 3.2.4 Risikovurdering..... | 17 |
| 3.2.5 Risikovurdering av brann..... | 18 |
| 3.3 Myndighetskrav for risikovurdering av brann..... | 18 |
| 3.3.1 Generelt..... | 18 |

| | |
|--|----|
| 3.3.2 Overordnede myndighetskrav | 19 |
| 3.3.3 Lover og forskrifter som styrer byggefasen | 20 |
| 3.3.4 Lover og forskrifter som styrer bruksfasen | 21 |
| 3.4 Trehus i brannklasse 3 | 21 |
| 3.4.1 Generelt | 21 |
| 3.4.2 Myndighetskrav | 22 |
| 3.4.3 Klassifisering av materialeegenskaper og brannmotstand | 22 |
| 3.5 Tre og brann | 23 |
| 3.5.1 Tre som konstruksjonsmateriale | 23 |
| 3.5.2 Pyrolyse og forkulling | 24 |
| 3.5.3 Beskyttelsesmetoder mot brann | 26 |
| 3.6 Gips – en introduksjon | 27 |
| 3.6.1 Hva er gips? | 27 |
| 3.7 Gipsplater | 27 |
| 3.7.1 Generelt | 27 |
| 3.7.2 Platetyper | 28 |
| 3.7.3 Termiske egenskaper | 29 |
| 3.7.4 Brannmotstand | 29 |
| 3.8 Trekonstruksjoner med branngipsplater | 32 |
| 3.8.1 Starttid til forkulling | 32 |
| 3.8.2 Nedfallstid | 33 |
| 3.8.3 Eksterne faktorer som påvirker brannmotstand | 33 |
| 3.9 Metoder for dimensjonering av branngips | 34 |
| 3.9.1 Generelt | 34 |
| 3.9.2 NS-EN 1995-1-2:2004 | 34 |
| 3.9.3 Improved design method av ETH Zürich | 37 |
| 3.9.4 Metode basert på testresultater fra database | 39 |
| 3.9.5 Component additive method | 41 |
| 3.9.6 Tabellverdier fra New Zealand og Nord-Amerika | 42 |
| 3.10 NS 3901:2012 | 42 |
| 3.10.1 Generelt | 43 |
| 3.10.2 Definere rammebetingelser | 43 |
| 3.10.3 Mandat og organisering | 44 |

| | |
|---|----|
| 3.10.4 Problem- og målformulering..... | 44 |
| 3.10.5 Valg av analysemodell | 45 |
| 3.10.6 Valg av analysemetoder, beslutningskriterier, forenklinger og datagrunnlag | 45 |
| 3.10.7 Beskrivelse av analysebyggverket og ev. referansebyggverket..... | 46 |
| 3.10.8 Fareidentifikasjon, analyse av årsaker og sannsynlighet | 47 |
| 3.10.9 Beskrivelse av brannscenarioer..... | 47 |
| 3.10.10 Analyse av konsekvenser | 47 |
| 3.10.11 Usikkerhets- og sensitivitetsanalyse | 48 |
| 3.10.12 Beskrivelse av risiko | 48 |
| 3.10.13 Sammenligning av risiko og risikoakseptkriterier | 48 |
| 3.10.14 Risikoevaluering | 48 |
| 3.10.15 Beskrivelse av risiko | 49 |
| 3.10.16 Oppsummering..... | 50 |
| 3.11 Temperatur-tidkurver..... | 51 |
| 3.11.1 Parametriske temperatur-tidkurver | 51 |
| 4. RESULTATER | 55 |
| 4.1 Materialeegenskaper og eksterne faktorer som påvirker brannmotstand | 55 |
| 4.1.1 Materialeegenskaper | 55 |
| 4.1.2 Eksterne faktorer | 56 |
| 4.2 Sammenligning av metoder for dimensjonering av branngips | 56 |
| 4.2.1 Beskrivelse av trekonstruksjon | 56 |
| 4.2.2 NS-EN 1995-1-2:2004 | 57 |
| 4.2.3 Improved design method av ETH Zürich | 57 |
| 4.2.4 Metode basert på testresultater fra database | 58 |
| 4.2.5 Component additive method | 59 |
| 4.2.6 Tabellverdier fra New Zealand og Nord-Amerika..... | 59 |
| 4.2.7 Sammenligning | 60 |
| 4.3 Risikovurdering av branngips i et trehus i brannklasse 3 | 61 |
| 4.3.1 Definere rammebetingelser | 61 |
| 4.3.2 Mandat og organisering | 61 |
| 4.3.3 Problem- og målformulering..... | 62 |
| 4.3.4 Valg av analysemodell | 62 |
| 4.3.5 Valg av analysemetoder, beslutningskriterier, forenklinger og datagrunnlag | 63 |

| | |
|---|-----|
| 4.3.6 Beskrivelse av analysebyggverk og ev. referansebyggverk..... | 64 |
| 4.3.7 Fareidentifikasjon, analyse av årsaker og sannsynlighet | 68 |
| 4.3.8 Beskrivelse av brannscenarier..... | 68 |
| 4.3.9 Analyse av konsekvenser | 71 |
| 4.3.10 Usikkerhets- og sensitivitetsanalyse | 81 |
| 4.3.11 Beskrivelse av risiko | 85 |
| 4.3.12 Sammenligning av risiko og risikoakseptkriterier | 85 |
| 4.3.13 Risikoevaluering | 85 |
| 4.3.14 Beskrivelse av risiko | 86 |
| 5. DISKUSJON | 87 |
| 5.1 Materialeegenskaper og eksterne faktorer som påvirker brannmotstand | 87 |
| 5.1.1 Materialeegenskaper | 87 |
| 5.1.2 Eksterne faktorer | 89 |
| 5.2 Sammenligning av metoder for dimensjonering av branngips | 90 |
| 5.2.1 Generelt | 90 |
| 5.2.2 NS-EN 1995-1-2:2004 | 91 |
| 5.2.3 Improved design method av ETH Zürich | 91 |
| 5.2.4 Metode basert på testresultater fra database | 91 |
| 5.2.5 Component additive method | 92 |
| 5.2.6 Tabellverdier fra New Zealand og Nord-Amerika..... | 92 |
| 5.3 Risikovurdering av branngips i et trehus i brannklasse 3 | 92 |
| 5.3.1 Risikovurdering med NS 3901:2012 | 92 |
| 5.3.2 Parametriske temperatur-tidkurver | 94 |
| 5.3.3 Resultater fra risikovurderingen..... | 95 |
| 6. KONKLUSJON | 98 |
| 6.1 Materialeegenskaper og eksterne egenskaper som påvirker brannmotstand..... | 98 |
| 6.1.1 Materialeegenskaper | 98 |
| 6.1.2 Eksterne faktorer | 98 |
| 6.2 Sammenligning av metoder for dimensjonering av branngips | 99 |
| 6.3 Risikovurdering av branngips i et trehus i brannklasse 3 | 100 |
| 6.4 Anbefalinger | 101 |
| 6.4.1 Materialeegenskaper og eksterne egenskaper som påvirker brannmotstand | 101 |
| 6.4.2 Sammenligning av metoder for dimensjonering av branngips | 101 |

| | |
|--|-----|
| 6.4.3 Risikovurdering av branngips i et trehus i brannklasse 3 | 101 |
| 7. VIDERE ARBEID | 103 |
| 8. REFERANSELISTE | 104 |
| VEDLEGG | i |

FIGURLISTE

| | |
|--|----|
| Figur 1: Prosjekteringsmodeller | 8 |
| Figur 2: Risikoanalyse [18] | 16 |
| Figur 3: Risikoevaluering [18] | 17 |
| Figur 4: Sammenheng mellom lover og forskrifter mht. brann [22]..... | 18 |
| Figur 5: Brannmotstand (Gjengitt fra [2])..... | 22 |
| Figur 6: Konvensjonell gipsplate 13mm (Privat bilde)..... | 28 |
| Figur 7: Spesifikk varmekapasitet GtX (Gjengitt fra [33]) | 29 |
| Figur 8: Termisk konduktivitet GtX (Gjengitt fra [33])..... | 29 |
| Figur 9: Risikovurdering etter NS 3901:2012 [4][44] | 43 |
| Figur 10: Planlegging NS 3901:2012 [4][44] | 44 |
| Figur 11: Analyse NS 3901:2012 [4][44] | 46 |
| Figur 12: Risikoevaluering NS 3901:2012 [4][44] | 48 |
| Figur 13: Snitt trekonstruksjon..... | 56 |
| Figur 14: Plantegning 1 til 5 etasje..... | 65 |
| Figur 15: Plantegning leilighet | 65 |
| Figur 16: Analyseobjekt – stue i leilighet | 65 |
| Figur 17: Brannscenario 1 - Verste troverdige brannscenario | 69 |
| Figur 18: Brannscenario 2 - Representativt brannscenario 1 | 70 |
| Figur 19: Brannscenario 3 - Representativt brannscenario 2 | 71 |

TABELLISTE

| | |
|---|----|
| Tabell 1: Kapittelinnndeling..... | 4 |
| Tabell 2: Risikoklasser [9] | 10 |
| Tabell 3: Brannklasser [9] | 11 |
| Tabell 4: Definisjonen av risiko | 14 |
| Tabell 5: Norske Standarder for risikovurdering | 17 |
| Tabell 6: Risikovurdering av brann..... | 18 |
| Tabell 7: Temperaturer for start av forkulling og antennelse..... | 25 |
| Tabell 8: Forkullingshastighet..... | 26 |
| Tabell 9: Materialeegenskaper som påvirker brannmotstanden til en branngipsplate..... | 31 |

| | |
|--|-----|
| Tabell 10: Eksterne faktorer som påvirker brannmotstanden til en branngipsplate..... | 34 |
| Tabell 11: Start forkulling bak gipsplate i veggkonstruksjon [2]..... | 40 |
| Tabell 12: Nedfallstid for gipsplater på veggkonstruksjon [2]..... | 40 |
| Tabell 13: Verdier Component additive method [33] | 41 |
| Tabell 14: Minimum platetykkelse (mm) for brannmotstand i vegg [33]..... | 42 |
| Tabell 15: Oppsummering av prosessen for risikovurdering | 50 |
| Tabell 16: Sammenligning av tid til start av forkulling | 60 |
| Tabell 17: Sammenligning av brannmotstand..... | 60 |
| Tabell 18: Underlagsmateriale for beregning av brannmotstand i konstruksjonsdel..... | 63 |
| Tabell 19: Termiske egenskaper | 64 |
| Tabell 20: Areal og virksomhet..... | 66 |
| Tabell 21: Personbelastning | 66 |
| Tabell 22: Oppbygning av trestendervegg | 72 |
| Tabell 23: Tid til temperaturøkning på uekspontert side..... | 75 |
| Tabell 24: Oppsummering av brannscenario 1 | 76 |
| Tabell 25: Oppsummering av brannscenario 2..... | 78 |
| Tabell 26: Oppsummering av brannscenario 3..... | 80 |
| Tabell 27: Usikkerhet i risikovurdering | 81 |
| Tabell 28: Sensitivitetsanalyse av forkullingshastighet | 84 |
| Tabell 29: Beskrivelse av risiko | 85 |
| Tabell 30: Oppsummering av resultater | 86 |
| Tabell 31: Sammenligning av starttid til forkulling | 100 |
| Tabell 32: Sammenligning av brannmotstand..... | 100 |
| Tabell 33: Risikovurdering av trestendervegg med branngips..... | 100 |

1. INNLEDNING

Dette kapittelet vil presentere bakgrunnen for arbeidet, problemstillingene og målsetting til oppgaven. Kapittelet presenterer rapportens oppbygning, omfang, begrensninger, definisjoner og forkortelser.

1.1 Bakgrunn

Tre er et byggemateriale med sterke tradisjoner i Norge. I disse dager opplever vi en trerenessanse, grunnet en miljøbevissthet fra byggebransjen og fokus på lavere energibruk og mindre forurensning. Med funksjonsbaserte forskrifter er det nå mulig å bygge trehus i brannklasse 3 med bærende trekonstruksjoner. Trehus i brannklasse 3 vil som regel være bygninger med mer en fire etasjer, hvor konsekvensen av brann er stor. Forskrift om tekniske krav til byggverk (heretter TEK10) krever at bygg i brannklasse 3 skal dimensjoneres til å opprettholde bæring og stabilitet gjennom et fullstendig brannforløp. Veiledningen til forskrift om tekniske krav til byggverk (heretter VTEK) gir preaksepterte løsninger for det bærende hovedsystemet i brannklasse 3 i betong og stål, men ikke for tre. Dermed må en dokumentere at sikkerhetsnivået er tilfredsstillende ved analyse. En mulig fremgangsmåte er å modellere det fullstendige brannforløpet etter NS-EN 1991-2:2002 «*Allmenne laster – Laster på konstruksjoner ved brann*» og å verifisere at bæresystemet opprettholder tilfredsstillende bæreevne og stabilitet gjennom hele brannforløpet. Verifiseringen kan f.eks. gjøres med en risikovurdering etter NS 3901:2012 «*Krav til risikovurderinger av brann i byggverk*». For trekonstruksjoner med lavere brannklasse enn 3 vil dimensjoneringen være enkel, da kravene til brannmotstand er lav. Dette gjelder f.eks. for å brannsikre et bærende hovedsystem for bygg i brannklasse 2, der de preaksepterte løsningene angir brannmotstand R 60. For brannklasse 3 gir VTEK brannmotstand R 90 (forutsatt stål/betong) som preaksepterte løsninger. For å oppnå tilsvarende brannmotstand med trekonstruksjoner stilles det store krav til brannrådgiverne som prosjekterer byggverket. Tre er et brennbart materiale, men kravene kan ivaretas med aktive og passive brannsikringstiltak. Et eksempel på passiv brannsikring er innkledning av treverk med branngipsplater, som kan brukes på blant annet vegger og tak.

Alle branngipsplater er godkjent iht. til de samme standardene. I Norge klassifiseres branngipsplater (Type F) i henhold til NS-EN 520:2004 «*Gipsplater – Definisjoner, krav og prøvingsmetoder*». Mange av platene har likevel forskjellig brannmotstand og det er vanskelig å skille mellom om en god og en dårlig plate. En av årsakene er at termomekaniske egenskaper er ikke en del av klassifiseringen, slik at forskjellene mellom platene er store. Ifølge en rapport [1] fra Svensk Provnings- og Forskningsinstitutt (heretter SP) har noen av platene opp mot 30 minutter forskjell i nedfallstid ved en standard ISO 834-brann. En ISO 834-brann er en uendelig lang temperatur-tidkurve, som benyttes ved branntesting. Det er dermed et behov for at produsenter og brannrådgivere skal differensiere egenskapene til platene og undersøke hva som er den fysiske forskjellen mellom platene. Grunnen til at det bør gjennomføres en differensiering av platene, er for å øke påliteligheten til platene, samt å utvikle regler og fremgangsmåter for sikker brannprosjektering med branngips. Det er ikke bare de fysiske forskjellene mellom platene som påvirker kvaliteten på de brannbeskyttende

egenskapene til branngipsplatene. Det er dermed også et behov for å kartlegge hvilke eksterne faktorer, og i hvilket omfang de eksterne faktorene påvirker de brannbeskyttende egenskapene til platene.

For å dimensjonere mengde branngips som innkledning av treverk beskriver NS-EN 1995-1-2:2004 «*Prosjektering av trekonstruksjoner – Brannteknisk dimensjonering*» en metode for dette. Metoden går ut på å beregne tid til forkulling av tre. ETH Zürich beskriver en lignende metode [1][2], men denne gir betydelige avvik i forhold til metoden i Norsk Standard. I oppgaven kartlegges og sammenlignes ulike metoder for dimensjonering av branngips, pga. resultatene varierer i forhold til hvilke kilder som er brukt.

En risikovurdering inngår som ett av elementene i en systematisk risikostyring, og kan brukes som beslutningsgrunnlag innen brannsikkerhet, for eksempel i forbindelse med prosjektering og valg av tekniske løsninger. Et konkret eksempel kan være knyttet til bruk av branngipsplater i et bygg med bærende trekonstruksjoner, i brannklasse 3. Det finnes lite anvisninger på bruk av branngipsplater i trehus i brannklasse 3, som gir et behov for å dokumentere bruken med analyse. I tillegg presiserer TEK10 at dersom det brukes bærende trekonstruksjoner i bygg i brannklasse 3, skal dette dokumenteres utførlig. En måte å dokumentere dette er å gjennomføre en risikoanalyse eller en risikovurdering. Prinsippet for risikoanalyse og risikovurdering er beskrevet i flere steder i norsk og internasjonal litteratur. Et eksempel er å gjennomføre risikovurdering etter NS 3901:2012 «*Krav til risikovurdering av brann i byggverk*» som ble revidert juni 2012.

1.2 Problemstillinger

Det som er beskrevet i kapittel 1.1 Bakgrunn gir opphav for en del spørsmål rundt utfordringer knyttet til bruk av branngips som innkledning av trekonstruksjoner i brannklasse 3.

- I Norge blir alle branngipsplater (Type F) klassifisert iht. NS-EN 520:2004 «*Gipsplater – Definisjoner, krav og prøvingsmetoder*», men branngipsplatene har store forskjeller i brannmotstand. Hvilke materialegenskaper og eksterne faktorer påvirker brannmotstanden til en branngipsplate?
- Det finnes forskjellige metoder for å dimensjonere og prosjektere med bruk av branngips, med betydelige variasjoner i resultater. Hvilke metoder for dimensjonering av branngips finnes og hvilken forskjell i antall minutter gir en sammenligning av disse?
- Ved bruk av branngipsplater på trekonstruksjoner i brannklasse 3, må en dokumentere at det bærende hovedsystemet i trekonstruksjonen opprettholder bæring og stabilitet gjennom et fullstendig brannforløp. Hva slags resultater gir en risikovurdering av brannmotstanden til en bærende trestendervegg med branngipsplater i et boligbygg i brannklasse 3, med bruk av NS 3901:2012 «*Krav til risikovurdering av brann i byggverk*»?

1.3 Målsetting

1.3.1 Resultatmål

Gjøre rede for hva som er sentralt innen temaene branngips som passiv brannsikring i trehus og risikovurdering av brann i byggverk, samt gjennomføre en risikovurdering av en bærende trestendervegg i et trehus i brannklasse 3 og sammenligne ulike beregningsmetoder for dimensjonering av branngips innen 10. juni 2013.

1.3.2 Effektmål

Innføre mer kunnskap om brannmotstand til branngipsplater og hvordan gipsplatene kan dimensjoneres og dokumenteres utførlig for å gi nødvendig brannsikring av trekonstruksjoner i Norge.

1.3.3 Suksesskriterier

1. Litteraturstudie i regelverk, standarder og annen litteratur for å få oversikt over branngips som passiv brannsikring for å identifisere materialegenskaper, eksterne faktorer som påvirker brannmotstand, tilgjengelig data og dimensjoneringsmetoder.
2. Innhenting av tilgjengelig data om branngips slik at det er mulig å gjennomføre en risikovurdering av branngips som innkledning av trekonstruksjoner i brannklasse 3.
3. Kommunikasjon med veiledere for å sikre at litteraturen er relevant og minimere sjansen for avsporing og feiltolkninger.

1.4 Omfang og begrensninger

Oppgaven fokuserer på bruk av gipsplater som innkledning av bærende trekonstruksjoner i et boligbygg i brannklasse 3. Byggverk med andre virksomheter og i andre brannklasser vil ikke bli vurdert. Gipsplater kan brukes som innkledning for andre materialer enn tre, blant annet for stålsøyler og vegger med stålstendere. I denne avhandlingen vil det kun fokuseres på gipsplater som innkledning av trekonstruksjoner.

Oppgaven fokuserer også på risikovurdering av brann i byggverk. Nærmere bestemt en risikovurdering av brannmotstanden til gipsplater som brukes som innkledning av en bærende trestendervegg. Det er mange måter å gjennomføre en risikovurdering, men i denne avhandlingen skal det gjennomføres en risikovurdering med NS 3901:2012, da det var tema for prosjektoppgaven til undertegnede. Risikovurderingen skulle originalt bli gjennomført som en ren risikoanalyse, hvor en sammenlignet med data for branngipsplater. På bakgrunn av tilgjengelig data og tid, er det i stedet gjennomført en komparativ analyse mot et preakseptert bærende hovedsystem i betong.

1.5 Rapportens oppbygning

Denne rapporten er bygd opp etter kapittelinnndelingen i tabell 1.

Tabell 1: Kapittelinnndeling

| Kapittel | Beskrivelse |
|----------|---|
| 1 | Bakgrunn og målsetting for oppgaven, begrensninger, definisjoner og forkortelser. |
| 2 | Metoder som er valgt for å løse oppgaven. |
| 3 | Presentasjon av relevant litteratur og teori som brukes til å svare på problemstillingene i avhandlingen. |
| 4 | Presentasjon av resultatene i oppgaven. |
| 5 | Diskusjon rundt resultatene som er funnet i avhandlingen. |
| 6 | Presentasjon av oppgavens konklusjon og svar på problemstillinger. |
| 7 | Forslag til videre arbeid innen fagområdet i oppgaven. |
| 8 | Referanseliste i Vancouversystem. |

1.6 Definisjoner

Definisjoner som er ukjente for legfolk vil bli forklart i teksten første gang de brukes.

1.7 Forkortelser

| | |
|--------|--|
| BF87 | Byggeforskrifter 1987 |
| BKL | Brannklasse |
| DiBK | Direktoratet for byggkvalitet |
| DSB | Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap |
| ETH | Eidgenössische Technische Hochschule |
| FNO | Finansnæringens Fellesorganisasjon |
| GOF | Forskrift om godkjenning av foretak for ansvarsrett |
| GtA | Gipsplate, type A |
| GtF | Gipsplate, type F |
| GtX | Gipsplate, type X |
| ISO | International Organization of Standardization |
| MSB | Myndigheten för samhällsskydd och beredskap |
| NFPA | National Fire Protection Association |
| PBL | Plan og bygningsloven |
| RIB | Rådgivende ingeniør bygg |
| RIBr | Rådgivende ingeniør brann |
| RKL | Risikoklasse |
| ROS | Risiko og sårbarhetsanalyse |
| SAK | Forskrift om saksbehandling, ansvar og kontroll i byggesaker |
| SINTEF | Stiftelsen for industriell og teknisk forskning ved Norges tekniske høyskole |
| SP | Svensk Provnings- och Forskningsinstitut |
| TEK10 | Forskrift om tekniske krav til byggverk |
| VTEK | Veiledning om tekniske krav til byggverk |

2. METODE

Metodikken i avhandlingen blir presentert i dette kapitlet. Metodene som brukt i avhandlingen er en litteraturstudie, korrespondanse med produsenter, sammenligning av metoder og verktøy for å dimensjonere gipsplater og en casestudie med en risikovurdering med bruk av NS 3901:2012.

2.1 Litteraturstudium

En metode er beskrevet av Dalland i boken «*Metode og oppgaveskriving*» som [3]:

«Metoden forteller oss noe om hvordan vi bør gå til verks for å fremskaffe eller etterprøve kunnskap. Begrunnelsen for å velge én bestemt metode er at vi mener den vil gi oss gode data og belyse spørsmålet vårt på en faglig og interessant måte».

Den første metoden som er brukt i avhandlingen er et litteraturstudium. Litteraturstudiet er gjennomført for å søke på litteratur for å løse valgte problemstillinger. Metoden er svært relevant for denne avhandlingen, for å bidra til å løse problemstillingene og gi grunnlag for en utdypende diskusjon.

Litteraturen i oppgaven er funnet på følgende måter:

- Nettsøk på aktuelle standarder, via NTNU sitt nettbibliotek.
- Nettsøk i BIBSYS, Google Scholar og artikler, via NTNU sitt nettbibliotek.
- Nettsøk i søkemonitoren Google.
- Nettsøk i rammeverk, som lovdata og direktoratet for byggkvalitet.
- Nettsøk i den vitenskapelige databasen ScienceDirect (Fire Safety Journal)
- Gjennomgang av anerkjent litteratur innen fagfeltene risikovurdering, gipsplater og trekonstruksjoner.
- Nettsøk i hjemmesider til produsenter av gipsplater.
- Gjennomgang av SINTEF rapporter.
- Andre kilder i referanselisten.

Det er gjennomført nettsøk med ulike kombinasjoner av søkeord som f.eks.: «*gipsplater, branngipsplater, dimensjonering av gipsplater, bærende trekonstruksjoner, passiv brannbeskyttelse, brannmotstand, forkulling, naturlig brannforløp, risikovurdering av brann.*»

Kvaliteten på kildene er vurdert når de ble funnet. Det er valgt å fokusere mest på anerkjent litteratur som kan defineres gyldige, holdbare og relevante for valgt problemstilling. Slik litteratur er hentet fra kilder som: universiteter, forskningsinstitusjoner, vitenskapelige databaser og fra anerkjente forfattere. Litteratur som er funnet fra mindre troverdige kilder, som nettsøk i Google har fått mindre fokus.

2.2 Korrespondanse med produsenter

Den andre metoden som er valgt er korrespondanse med produsenter av gipsplater. Det ble sendt epost til kontaktpersoner i Gyproc og Norgips, som er to av landets største gipsplateprodusenter, for å se om de har noen innspill på hvilke materialegenskaper som påvirker brannmotstanden til en branngipsplate.

Metoden er svært relevant for å svare på den første problemstillingen i avhandlingen, da produsentene er blant de med mest kunnskap på dette området. Produsentene gav generelle svar, da de ikke ønsker å beskrive eksakt hvordan sine plater er bygd opp (se Vedlegg 2 og 3).

2.3 Sammenligning av metoder for å dimensjonere gipsplater

Den tredje metoden som er valgt er en sammenligning av metoder og verktøy for å dimensjonere gipsplater. På bakgrunn av hvilke metoder og verktøy som ble funnet i litteraturstudiet, ble det gjennomført en kvantitativ analyse av brannmotstanden til gipsplater som passiv brannsikring i trekonstruksjoner.

Brannmotstanden til gipsplatene ble beskrevet i metodene som: starttid til forkulling i treverk, nedfallstid til gipsplate og tid med tilstrekkelig brannmotstand.

Det ble sammenlignet tre metoder for starttid til forkulling i treverk og tre metoder for tid med tilstrekkelig brannmotstand. Det er ikke sammenlignet metoder for nedfallstid. Grunnen til det var at den ene metoden gjaldt for nedfall ved utdragning av festemidler, mens den andre metoden gjaldt for nedfall generelt.

I beregningene ble det analysert en trestendervegg som ble tegnet i AutoCAD.

Metodene som er funnet er alle hentet fra litteratur som er vurdert til troverdige. Andre metoder og verktøy fra kilder som ikke er vurdert til troverdige, eller relevante for problemstilling, er ikke tatt med i avhandlingen.

2.4 Casestudie

Den fjerde metoden som er valgt er en casestudie. Nærmere bestemt er casestudien en risikovurdering for bruk av gipsplater som passiv brannsikring på en bærende trestendervegg i et boligbygg i brannklasse 3. Risikovurderingen ble gjennomført med bruk av NS 3901:2012 «*Risikovurdering av brann i byggverk*», fordi dette var tema for prosjektoppgaven til undertegnede og fordi standarden er egnet for risikovurderinger i forbindelse med [4]:

«Prosjektering, valg og verifikasjon av krav, ytelser og tekniske løsninger.»

Risikovurderingen ble gjennomført som en komparativ analyse, da det ble funnet lite tilgjengelig data på branngips, for å kunne gjennomføre en ren risikoanalyse. Analysen i risikovurderingen fokuserer på en bærende trestendervegg i et boligbygg i brannklasse 3. Da det er en bygningsdel og ikke hele bygget som er hovedfokuset i risikovurderingen, er det valgt å bruke et fiktivt byggverk.

Risikovurderingen ble gjennomført kvalitativt, med unntak av en kvantitativ analyse av bæreevne (R), integritet (E) og isolasjon (I) ved bruk av følgende metoder i Norsk Standard:

- NS-EN 1991-1-2:2002 Tillegg A og E
- NS-EN 1995-1-2:2004 Annex C og E

Data for materialeegenskaper til gips og tre som ble funnet i litteraturen, ble hentet etter beskrivelsen i kapittel 2.1. Det er valgt kilder som er vurdert til relevante og pålitelige.

I casen ble det analysert et trehus som ble tegnet i Google SketchUp.

Metoden er relevant for denne avhandlingen, for å bidra til å svare på den siste problemstillingen og gi grunnlag for en utdypende diskusjon.

3. LITTERATUR OG TEORI

I dette kapitlet presenteres relevant litteratur og teori som brukes til å svare på problemstillingene i avhandlingen.

3.1 Prosjekteringsmodeller for brannsikkerhet

I dette kapitlet blir det presentert hva som menes med en prosjekteringsmodell for brannsikkerhet. Først presenteres det prosjekteringsmodeller generelt, samt en innføring i begrepene brannklasse og risikoklasse. Kapitlet fortsetter med å utrede for de ulike prosjekteringsmodellene, samt en forklaring på de ulike analysemetodene.

3.1.1 Prosjekteringsmodeller generelt

Funksjonskravene til en bygning er beskrevet i TEK10 til plan og bygningsloven. Et funksjonskrav er definert som [5]:

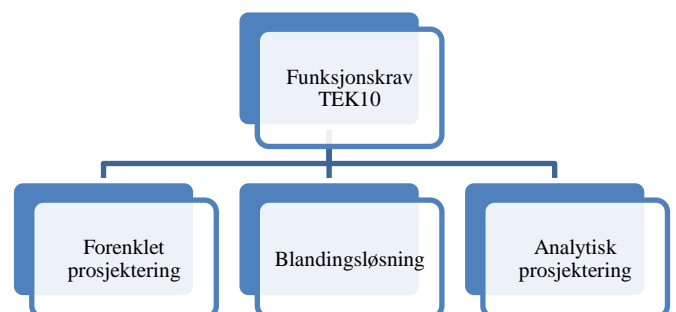
«Påbudt, allment minimumskrav til bygninger gitt i «Forskrift om krav til byggverk og produkter til byggverk». I tillegg kan bruker stille egendefinerte funksjonskrav der forskriften ikke stiller noe krav, eller dersom en ønsker andre eller strengere krav enn de som er gitt i forskriften.»

Det er ikke mulig å prosjektere direkte fra funksjonskravene, når disse er generelle krav. Funksjonskravene må gjøres om til ytelsesnivå. Et ytelsesnivå er definert som [5]:

«Teknisk, bruksmessig og miljømessig kvalitet, standard og kapasitet for bygninger og bygningsdeler, utledet av funksjonskravene i forskriften. Ytelsesnivået må være tilpasset rammebetingelsene.»

Funksjonskravene i TEK10 må verifiseres og dokumenteres. Det finnes tre prosjekteringsmodeller for å gjøre dette [5], som vist i figur 1:

1. Forenklet prosjektering, ved bruk av de preaksepterte ytelsene i VTEK blir lagt til grunn.



Figur 1: Prosjekteringsmodeller

2. Analytisk prosjektering, ved at funksjonskravene i TEK10 blir verifisert ved analyse.
3. En blandingsløsning, ved en kombinasjon av den første og andre modellen

Tidligere var både funksjonskravene og ytelseskravene beskrevet i et regelverk kalt byggeforskrifter. Den siste versjonen av byggeforskriftene ble utgitt i 1987 og var forkortet BF87 [6]. BF87 var utarbeidet av kommunal- og arbeidsdepartementet. Kapittel tre i byggeforskriften beskriver regler for brannvern og allerede i 1987 hadde man omfattende føringer for brannsikkerheten [6].

I 1997 ble ytelseskravene flyttet til veiledningsnivå, som førte til at de ikke lenger var bindende [7]. Dette førte til en ny arena for en spesialisert rådgivertjeneste innen brannsikkerhet. 1 januar 2013 ble det i tillegg innført et utvidet kontrollregime med obligatorisk uavhengig kontroll av flere kritiske områder i en byggesak. Et av kontrollområdene omfatter brannsikkerhet i bygg med tiltaksklasse 2 og 3. Et bygg klassifiseres i tiltaksklasse basert på vanskelighetsgrad og konsekvens av mangler og feil [8].

Uavhengig av valgt prosjekteringsmodell, må forutsetningene for den branntekniske prosjekteringen bestemmes og dokumenteres. I henhold til VTEK [9] omfatter dette:

- *Byggverkets bruk eller virksomhet*
- *Antall mennesker eller husdyr*
- *Arealer og antall etasjer*
- *Brannenergi og ev. spesiell risiko (aktiviteter eller lagring av brannfarlige varer etc.)*
- *Plassering i forhold til nabobebyggelse*
- *Tilgjengelighet og atkomst for brannvesenets høydeegenskaper*
- *Ev. spesielle lokale rammebetingelser*

Dokumentasjonen for brannprosjekteringen skal være bygd opp systematisk og enkelt, slik at den er tilgjengelig og forståelig for alle interessentene i prosjektet.

Brannklasser og risikoklasser er to sentrale begrep innen valg av prosjekteringsmodell og brannprosjektering generelt. For ordens skyld vil begrepene bli forklart i de to neste delkapitlene.

3.1.2 Risikoklasse

I TEK10 § 11-2 finner man følgende beskrivelse av en risikoklasse [10]:

«Ut fra den trussel en brann kan innebære for skade på liv og helse skal byggverk, eller ulike bruksområder i et byggverk, plasseres i risikoklasser etter tabellen. Risikoklassene skal legges til grunn for prosjektering og utførelse for å sikre redning ved brann.»

Tabell 2 er gjengitt fra TEK10 og viser hvordan man kan klassifisere et byggverk i risikoklasse. I VTEK § 11-2 tabell 1 [9] finner man en oversikt over ulike virksomheter med tilhørende risikoklasse, så det enkleste er å finne risikoklassen som tilhører virksomheten der. Risikoklasse er ofte forkortet til RKL i faglitteratur.

Tabell 2: Risikoklasser [9]

| <i>Risikoklasser</i> | <i>Byggverk kun beregnet for sporadisk personopphold</i> | <i>Personer i byggverk kjenner rømningsforhold, herunder rømningsveier, og kan bringe seg selv til sikkerhet</i> | <i>Byggverk beregnet for overnatting</i> | <i>Forutsatt bruk av byggverk medfører liten brannfare</i> |
|----------------------|--|--|--|--|
| 1 | <i>Ja</i> | <i>Ja</i> | <i>Nei</i> | <i>Ja</i> |
| 2 | <i>Ja/nei</i> | <i>Ja</i> | <i>Nei</i> | <i>Nei</i> |
| 3 | <i>Nei</i> | <i>Ja</i> | <i>Nei</i> | <i>Ja</i> |
| 4 | <i>Nei</i> | <i>Ja</i> | <i>Ja</i> | <i>Ja</i> |
| 5 | <i>Nei</i> | <i>Nei</i> | <i>Nei</i> | <i>Ja</i> |
| 6 | <i>Nei</i> | <i>Nei</i> | <i>Ja</i> | <i>Ja</i> |

3.1.3 Brannklasse

I TEK10 § 11-3 Brannklasser finner vi følgende beskrivelse av en brannklasse [10]:

«Ut fra den konsekvens en brann kan innebære for skade på liv, helse, samfunnsmessige interesser og miljø, skal byggverk, eller ulike deler av et byggverk, plasseres i brannklasser etter tabellen nedenfor. Brannklassene skal legges til grunn for prosjektering og utførelse for å sikre byggverkets bæreevne mv. ved brann.»

Tabell 3: Brannklasser [9]

| <i>Brannklasse</i> | <i>Konsekvens</i> |
|--------------------|--------------------|
| <i>1</i> | <i>Liten</i> |
| <i>2</i> | <i>Middels</i> |
| <i>3</i> | <i>Stor</i> |
| <i>4</i> | <i>Særlig stor</i> |

Brannklasse forkortes ofte til BKL i faglitteratur. Konsekvensen av en brann for ulike brannklasser er vist i tabell 3.

For brannklasse 1 til 3 er det tilstrekkelig å bruke de preaksepterte ytelsene i VTEK. Et eksempel på et slikt bygg kan være et næringsbygg med fem etasjer, som typisk vil defineres til brannklasse 3.

Byggverk med særlig stor konsekvens ved brann, klassifiseres til brannklasse 4. Slike byggverk må i utgangspunktet verifiseres med analyse. Eksempler på byggverk med brannklasse 4 er [9]:

- *Byggverk med mer enn 16 etasjer*
- *Byggverk der brann utgjør stor fare for vesentlige samfunnsinteresser*
- *Byggverk under terreng*
- *Byggverk med spesifikk brannenergi over 400 MJ/m²*
- *Byggverk for kjemisk industri og miljøfarlig produksjon*
- *Byggverk hvor det lagres særlig brann- eller miljøfarlige stoffer*

Den branntekniske prosjekteringen av byggverk i brannklasse 4 skal som hovedregel verifiseres med analyse, men de preaksepterte ytelsene som er gitt i veiledningen kan benyttes i den grad ansvarlig prosjekterende påviser at de er relevante og tilstrekkelige [9].

3.1.4 Forenklet prosjektering

Forenklet prosjektering er når de preaksepterte ytelsene i VTEK følges. VTEK viser prinsippløsninger som kan brukes uten at det trengs verifisering ved analyse og utfyllende dokumentasjon. Bruk av preaksepterte ytelser må gjøres uten fravik fra ytelseskravene i forskriften og skal bekreftes av ansvarlig prosjekterende [9]. Enkelte steder i VTEK gir de preaksepterte løsningene valgmuligheter, som gir brannrådgiveren frihet til å velge de ytelsene som er best egnet til prosjektet [9]. Ofte er det er gitt flere preaksepterte ytelser til ulike bygningstyper, dvs. bygg med ulike brannklasser og risikoklasser. I et slikt tilfelle må man velge de preaksepterte ytelsene som tilhører sitt eget byggverk sin brannklasse og risikoklasse. Forenklet prosjektering brukes hovedsakelig ved enkle byggverk.

3.1.5 Analytisk prosjektering

Analytisk prosjektering er når funksjonskravene i TEK10 blir verifisert ved analyse. Omfanget av analysen med tilhørende dokumentasjon varierer etter hvor store fravik det er fra de preaksepterte ytelsene. Likevel skal det alltid gjennomføres en konsekvensvurdering av hvert fravik [9].

For å verifisere med analyse trenger man en analysemetode og et akseptkriterium. Analysemetoder vil bli gjennomgått i kapittel 3.1.7. Et akseptkriterium er definert i Temarettlegging HO-3/2007 som [5]:

«Et nivå på en egenskap som avgjør om en teknisk eller administrativ løsning kan aksepteres. Et akseptkriterium er fastsatt på grunnlag av oppsatte mål og kan uttrykkes med ord eller være tallfestet.»

Et akseptkriterium kan enten være komparativt eller absolutt. Et komparativt akseptkriterium måles relativt. Det vil si at man sammenligner sikkerhetsnivået i sitt eget analysebyggverk, i forhold til sikkerhetsnivået i et referansebyggverk, som er utført i henhold til VTEK. Et referansebyggverk beskrevet i NS 3901:2012 som [4]:

«Byggverk som er sammenlignbart med et analysebyggverk, og som er utformet med risikoreduerende tiltak som anses å tilfredsstillere kravene til brannsikkerhet.»

Et referansebyggverk vil som regel være basert på de preaksepterte ytelsene i VTEK.

Et absolutt akseptkriterium måles absolutt. Det vil si at man sammenligner med en bestemt verdi, som for eksempel personrisiko for kritiske forhold eller sannsynlighet for bygningskollaps [5].

Det er viktig at analysemetoden er egnet og gyldig for formålet. Eksempler på tilfredsstillende dokumentasjon kan være [11]:

- *Veiledning til TEK10 § 2-1*
- *NS 3901:2012 Krav til risikovurdering av brann i byggverk*
- *Veiledning for tilsyn – Brannsikkerhetsstrategi, HO-3/2007*
- *Byggforskserien 321.025-026*
- *Annen veiledning, standarder mv: Boverket, INSTA, CEN, ISO*

3.1.6 Blandingsmodell

Det er mulig å kombinere forenklet og analytisk prosjektering med en blandingsmodell. Den går ut på å bruke de preaksepterte ytelsene så langt det er mulig, samt å verifisere ved analyse der det er fravik. Behovet for dokumentasjon ved en blandingsmodell, avhenger av størrelse på fravik og kompensierende tiltak [9]. Et eksempel på kompensierende tiltak kan være totalsprinkling av et byggverk, som et kompensierende tiltak for økt seksjoneringsareal.

3.1.7 Analysemetoder

Risikoanalyser skal dokumenteres kvalitativt og kan i tillegg utføres kvantitativt [4].

En kvalitativ analyse er en beskrivende analyse og skal alltid gjennomføres [12]. Formålet med en kvalitativ analyse er å få et overordnet overblikk over brannkonseptet og vurdere om det behov for å gjennomføre en kvantitativ analyse. I mange tilfeller vil en kvalitativ analyse være tilstrekkelig, samt det eneste mulige [5]. Ofte vil interessenter kun ha bruk for den kvalitative analysen.

En brannteknisk analyse kan følge NS 3901:2012, som skal/kan brukes på både kvalitative og kvantitative analyser. Fremgangsmåten på analysen avhenger av hva som skal vurderes.

En kvantitativ analyse er en tallfestet analyse og skal gjennomføres ved behov [12]. Etter en kvalitativ analyse, må ansvarlig prosjekterende vurdere analysebehovet og avgrense omfanget av den kvantitative analysen. Blant annet må det velges aktuelle brannscenarier som skal analyseres [5]. Et brannscenario er definert i NS 3901:2012 som [4]:

«Kvalitativ beskrivelse av forløpet av en brann med hensyn til tid, med angivelse av spesifikke hendelser som karakteriserer den analyserte brannen og skiller den fra andre mulige branner».

Ifølge melding HO-3/2007 Prosjektering – brannsikkerhetsstrategi [5] finnes det tre typer kvantitative analyser:

- Probabilistisk analyse
- Deterministisk analyse
- Semi-kvantitativ analyse

Probabilistisk analyse er definert av kollegiet for brannfaglig terminologi [13] som en analyse av sannsynlighet og konsekvens for et større antall scenarier som kan inntreffe. Dette innebærer som regel bruk av et hendelsestre (Engelsk: *Event tree*), som er mye brukt i blant

annet risikoanalyse av brann. Et hendelsestre er et logisk diagram som viser mulige hendelseskjeder etter en uønsket hendelse [14].

Deterministisk analyse er definert av kollegiet for brannfaglig terminologi [13] som en analyse av ett eller et begrenset antall brannscenario med formål å undersøke konsekvensene. Ved utgangspunkt i et hendelsestre fokuserer man nå kun på noen av grenene. Eksempler på deterministiske metoder er simulering av røykutvikling og nødvendig rømningstid [5], med verktøy som f.eks. henholdsvis Fire Dynamics Simulator og Pathfinder.

Semi-kvantitativ analyse eller en såkalt kombinasjonsmetode er helt eller delvis basert på kvalitative vurderinger [5]. Eksempler på slike analyser er indeksmetoder og risikomatriser.

3.2 Risikovurdering – en introduksjon

I dette kapittelet blir det presentert hva som menes med en risikovurdering.

3.2.1 Hva er risiko?

Risiko er et begrep de fleste har kjennskap til. Det kan være risiko ved kjøp av aksjer, risiko for en lekkasje fra en oljerigg eller risiko for en boligbrann. Ordet risiko (Engelsk: *Risk*) kommer fra det italienske ordet «*risicare*» som betyr å våge [14]. Det er ingen enighet om definisjonen av risiko [15] og det finnes mange definisjoner på hva risiko er. En klassisk definisjon på risiko er produktet av sannsynlighet og konsekvens. Andre eksempler på definisjonen av risiko er vist i tabell 4.

Tabell 4: Definisjonen av risiko

| Definisjon av risiko |
|--|
| En usikker konsekvens av en hendelse eller en aktivitet om noe som mennesker verdsetter [16]. |
| Et forventet tap [15]. |
| Et forventet ugunstig utfall [15]. |
| Et uttrykk for kombinasjonen av sannsynligheten for og konsekvensen av en uønsket hendelse [14]. |
| Muligheten for at noe uønsket skal skje og hvilke følger dette kan få [17]. |
| Muligheten for at hendelser eller menneskelige aktiviteter og beslutninger påvirker (negativt) aspekter som mennesket verdsetter [14]. |

Til tross for ulike definisjoner, er risiko knyttet til noe som kan skje i fremtiden. I noen situasjoner kan det være aktuelt å se på risiko i historisk perspektiv, men ifølge Rausand [14] er det sjelden interessant. Siden man ikke vet om en uønsket hendelse vil inntreffe eller ikke, bruker en ofte sannsynlighet eller frekvens for å beskrive risikoen. En sannsynlighet kan beskrives med tall eller ord, mens en frekvens beskriver hyppigheten til en hendelse per tidsenhet.

Fare og uønskede hendelse er to begreper som ofte går igjen i litteratur om risiko. For ordens skyld blir begrepene definert. I NS 3901:2012 er en fare er beskrevet som [4]:

«Handling eller forhold som kan føre til en uønsket hendelse».

Standarden har videre følgende definisjon på en uønsket hendelse [4]:

«Hendelse som kan medføre tap av verdier».

3.2.2 Risikoanalyse

Evnen til å håndtere risiko er viktig i mange virksomheter [14] og en måte å gjøre det er å gjennomføre en risikoanalyse (Engelsk: *Risk Analysis*). En risikoanalyse kan beskrives som [4]:

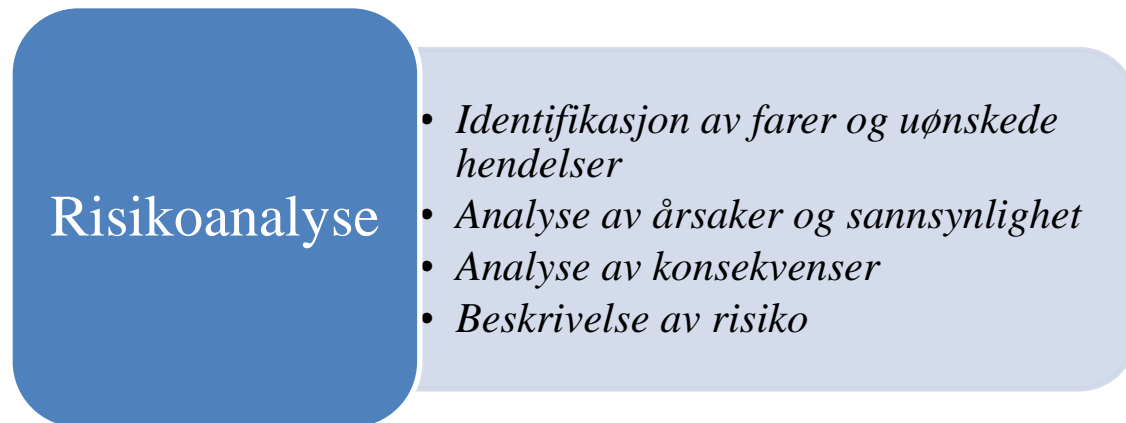
«Systematisk fremgangsmåte for å beskrive eller beregne risiko. Risikoanalysen utføres ved kartlegging av uønskede hendelser samt årsaker og konsekvenser av disse».

Det finnes svært mange måter å gjennomføre en risikoanalyse og det eksisterer flere standarder og retningslinjer på hvordan dette kan gjøres. Terminologien for risikoanalyse er ikke entydig og begrepet brukes med ulik betydning. Risikoanalyse og risikovurdering (Engelsk: *Risk Assessment*) er et eksempel på to begreper som brukes om hverandre i litteraturen. I denne rapporten er en risikovurdering definert til prosessen ved å gjennomføre både en risikoanalyse og en risikoevaluering (Engelsk: *Risk Evaluation*). Hva som menes med en risikoevaluering og en risikovurdering vil bli beskrevet senere i rapporten.

Ifølge Rausand [14] gjennomfører man en risikoanalyse ved å svare på tre grunnleggende spørsmål:

1. *Hva kan gå galt?*
2. *Hva er sannsynligheten for at de uønskede hendelsene inntreffer?*
3. *Hvilke konsekvenser kan hver av de uønskede hendelsene medføre?*

Proessen for å gjennomføre en risikoanalyse varierer blant annet av type risiko og valgt fremgangsmåte. NS 5814:2008 «*Krav til risikovurderinger*» beskriver momenter som kan inngå i en risikoanalyse [18]:



Figur 2: Risikoanalyse [18]

Til tross for at prosessen for en risikoanalyse ofte følger en bestemt fremgangsmåte (se figur 2), vil det forekomme subjektive valg situasjoner i analysearbeidet. Da er det viktig at de blir identifisert og synliggjort for dem som skal bruke analysen eller analyseobjektet. Eksempler på subjektive valg situasjoner kan være forutsetninger for analyser og tolkning av resultater.

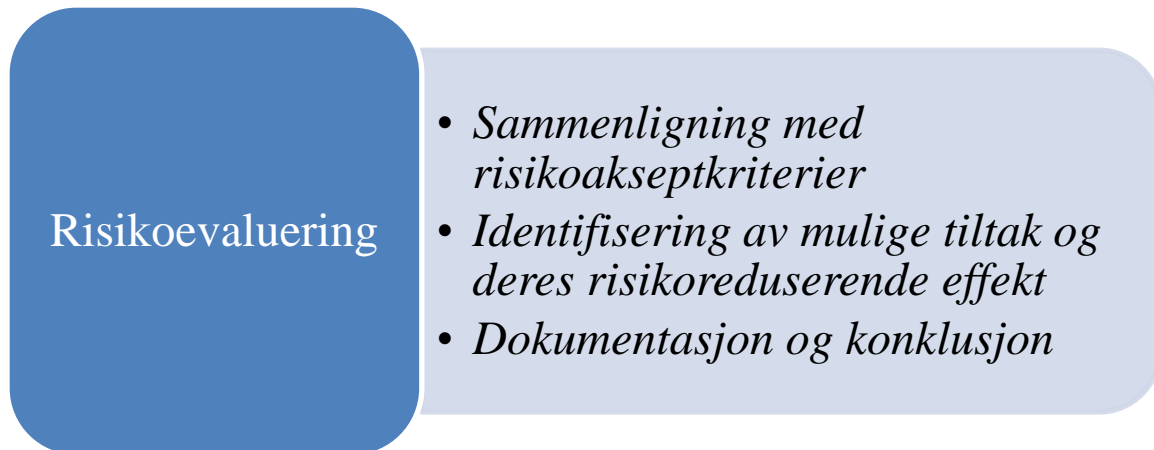
En risikoanalyse er tilgjengelig for personer med begrenset kunnskap innen fagfeltet. Derfor bør risikoanalysen være systematisk bygd opp og enkelt skrevet, slik at den kan f.eks. brukes som et beslutningsgrunnlag for sikkerhetstiltak.

3.2.3 Risikoevaluering

En risikoevaluering går i all hovedsak ut på å sammenligne beskrevet risiko med krav til akseptabel risiko. En vanlig beskrivelse på risikoevaluering er [4]:

«Prosess for å sammenligne beskrevet eller beregnet risiko med gitte risikoakseptkriterier».

Et risikoakseptkriterium er det som legges til grunn for å avgjøre om en risiko er akseptabel eller ikke [4]. Risikoevalueringen kan være en del av en helhetlig risikostyringsprosess og kan blant annet brukes som grunnlag for å finne mulige risikoreduserende tiltak. Eksempler på momenter som kan inngå i en risikoevaluering kan være [18]:



Figur 3: Risikoevaluering [18]

3.2.4 Risikovurdering

Ifølge Rausand [14] og Norsk Standard [18] er en risikovurdering når vi gjennomfører både en risikoanalyse og en risikoevaluering. Bruken av risikovurderinger spenner over mange anvendelsesområder og det er utviklet mange standarder og retningslinjer. Noen av standardene er generelle, mens andre er spesielt tilpasset for et bestemt område. Dette gjelder for blant annet Norsk Standard som har utarbeidet en rekke standarder for risikovurderinger. Noen av standardene er vist i tabell 5.

Tabell 5: Norske Standarder for risikovurdering

| Norsk Standard |
|--|
| NS 5814:2008 « <i>Krav til risikovurderinger</i> » [18] |
| NS 5815:2006 « <i>Krav til risikovurdering av anleggsarbeid</i> » [19] |
| NS 3901:2012 « <i>Krav til risikovurdering av brann i byggverk</i> » [4] |

Når en gjennomfører en risikovurdering, er det viktig å tenke over hva man vil oppnå. Et eksempel kan være å bruke risikovurderingen som beslutningsgrunnlag for sikkerhetsrelaterte spørsmål.

3.2.5 Risikovurdering av brann

Risikovurderinger er en viktig del av fagfeltet for brann og sikkerhet. Prinsippene som gjelder for risikovurderinger generelt, gjelder også for brann. Men nå ser man kun på brann som uønsket hendelse. En risikovurdering av brann kan inngå som en del av en risikostyring innen sikkerhet, men kan også gi støtte til beslutninger innen brannsikkerhet. Ifølge Norsk Standard [4] kan en risikovurdering av brann gi støtte til følgende beslutninger innen brannsikkerhet:

- strategiske valg eller prioriteringer;
- planprosesser;
- prosjektering, valg og verifikasjon av krav, ytelser og tekniske løsninger;
- gjennomføringer av aktiviteter;
- prioritering av tiltak ved drift og vedlikehold av systemer eller tjenester;
- prioritering av brannberedskap.

Det finnes mange standarder og retningslinjer på hvordan en kan gjennomføre en risikovurdering av brann. Noen eksempler er vist i tabellen under.

Tabell 6: Risikovurdering av brann

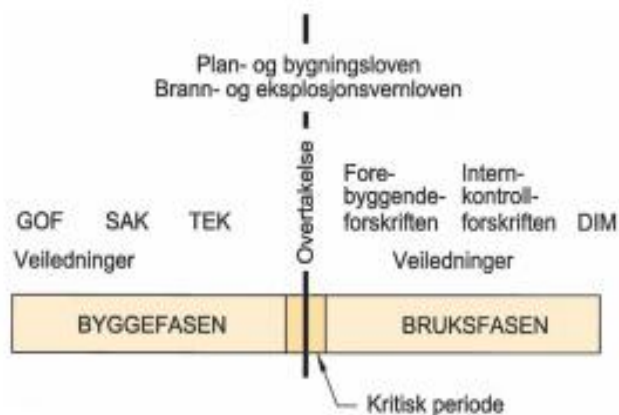
| Risikovurdering av brann |
|---|
| NS 3901:2012 – Krav til risikovurdering av brann [4] |
| ISO 16732-1 – Fire safety engineering – Fire risk assessment [20] |
| Fire safety in timber buildings – Technical guideline for Europe – fire risk assessment [2] |
| HMG Fire Safety Risk Assessment [21] |

3.3 Myndighetskrav for risikovurdering av brann

I dette kapittelet blir det presentert hvilke myndighetskrav som gjelder for risikovurdering av brann.

3.3.1 Generelt

For å vite hvordan bruk av risikovurderinger er hjemlet i lover og forskrifter tar vi en titt på de regulerende kravene for brannsikkerhet. Figur 4 viser en oversikt av lover og forskrifter som styrer bygge- og bruksfasen med hensyn til brann [22]. Figuren er ofte brukt av brannrådgivere, blant annet i brannsikkerhetsstrategier og er derfor valgt



Figur 4: Sammenheng mellom lover og forskrifter mht. brann [22]

som et utgangspunkt for å kartlegge myndighetskrav for risikovurderinger av brannsikkerhet.

3.3.2 Overordnede myndighetskrav

Plan- og bygningsloven regulerer overordnede krav i byggefasen, samt tilrettelegging for vedlikehold i bruksfasen. Ved prosjektering av bygninger er man juridisk bundet til å følge PBL. I § 29-5 står det [23]:

«Ethvert tiltak skal prosjekteres og utføres slik at det ferdige tiltaket oppfyller krav til sikkerhet, helse, miljø og energi, og slik at vern av liv og materielle verdier ivaretas.»

En risikovurdering kan være en del av brannprosjekteringen for å oppfylle disse kravene.

Brann og eksplosjonsvernloven stiller krav til forebyggende arbeid, internkontroll og regelmessig tilsyn. Formålet med loven er å verne liv, helse, miljø og verdier for brann og eksplosjon, farlig gods og ulykker. § 6 i loven sier [24]:

«Eier av byggverk, område, transportmiddel, produksjonsutstyr, annen innretning eller produkt plikter å sørge for nødvendige sikringstiltak for å forebygge og begrense brann, eksplosjon eller annen ulykke.»

En mulighet for å tilfredsstille denne paragrafen kan være å leie inn en brannrådgiver, som kan gjennomføre en risikovurdering av byggverket. Eier vil dermed få en oversikt over risiko og kan iverksette risikoreducerende tiltak.

I § 9 andre ledd står det [24]:

«Kommunen skal gjennomføre en risiko- og sårbarhetsanalyse slik at brannvesenet blir best mulig tilpasset de oppgaver det kan bli stilt overfor.»

Det betyr at kommunen må sørge for at brannvesenet er tilstrekkelig bemannet og kan løse nødvendige oppgaver på en tilfredsstillende måte. Kommunen er pålagt å gjennomføre en risikoanalyse for at brannvesenet blir dimensjonert til de oppgavene som skal løses. For å hjelpe kommunene har DSB utviklet en veileder for kommunale ROS-analyser, som blant annet kan brukes i dette tilfellet [25].

3.3.3 Lover og forskrifter som styrer byggefasen

Forskrift for godkjenning av foretak for ansvarsrett er nå underlagt SAK som kom ut i 2010.

SAK inneholder krav og en ramme for byggeprosessen, uavhengig kontroll, entrepriser og tiltaksklasser. SAK og GOF skal sikre effektiv saksbehandling og gjennomføring i byggefasen av et prosjekt. Forskriftene sier derimot lite om bruken av risikovurderinger og risikoanalyser.

Teknisk forskrift angir funksjonskravene som er minimumskravet for bygget og beskriver kravene til tekniske tiltak for brannsikkerheten i bygget. Den nyeste versjonen av teknisk forskrift trådte i kraft i juni 2010 og forkortes til TEK10. Veiledning til teknisk forskrift angir ytelsesnivå utledet av forskriftenes funksjonskrav. I VTEK § 2-1 (2) står det [9]:

«Der ytelsesnivå ikke er gitt i forskriften, skal oppfyllelse av forskriftens funksjonskrav verifiseres enten

a. ved at byggverk prosjekteres i samsvar med preaksepterte ytelsesnivå, eller

b. Ved at byggverk prosjekteres i samsvar med ytelsesnivå verifisert ved analyse som viser at forskriftens funksjonskrav er oppfylt.»

Her beskrives to alternative metoder for å oppfylle funksjonskravene i TEK10, som beskrevet i kapittel 3.1 i avhandlingen.

Neste ledd i paragrafen, dvs. § 2-1 (3) sier [9]:

«Dersom oppfyllelse av forskriftens funksjonskrav verifiseres ved analyse, skal det påvises at anvendt analysemetode er egnet til og gyldig for formålet. Forutsetninger som legges til grunn skal være beskrevet og begrunnet. Analysen skal angi nødvendige sikkerhetsmarginer.»

Anvendte analysemetoder kan være en risikoanalyse eller risikovurdering. Ved en gjennomføring av risikoanalyser anbefaler VTEK å bruke NS 3901 [9]. Den nyeste versjonen av standarden er NS 3901:2012 «*Krav til risikovurdering av brann i byggverk*».

I tillegg sier VTEK noe om bruken av standarder i § 2-2 (1) [9]:

«Oppfyllelser av ytelser kan verifiseres ved bruk av metoder i samsvar med Norsk Standard eller likeverdig standard.»

Risikovurderinger innen brannprosjektering blir beskrevet i NS 3901:2012 *«Krav til risikovurdering av brann i byggverk»*.

Kapittel elleve i TEK10 beskriver sikkerhet ved brann. I § 11-1 (1) står det [10]:

«Byggverk skal prosjekteres og utføres slik at det oppnås tilfredsstillende sikkerhet ved brann for personer som oppholder seg i eller på byggverket, for materielle verdier og for miljø- og samfunnsmessige forhold.»

TEK10 krever ikke eksplisitt en risikovurdering, men det kan likevel være aktuelt for å verifisere brannsikkerheten med tanke på kravene til sikkerhet, helse og miljø og ved vern av liv og materielle verdier.

3.3.4 Lover og forskrifter som styrer bruksfasen

Dette regelverket styrer det ferdige bygdemiljøet og virksomheten som drives i bygningen. Det er lite relevant for å prosjektere og dokumentere brannmotstanden til bærende trekonstruksjoner med branngipsplater og vil ikke bli belyst nærmere her.

3.4 Trehus i brannklasse 3

I dette kapitlet blir det presentert hva som menes med et trehus i BKL 3, hvilke myndighetskrav som gjelder og klassifisering av materialeegenskaper og brannmotstand.

3.4.1 Generelt

Ut ifra risiko og konsekvens for brann plasseres byggverk i risikoklasser og brannklasser [9]. Dette er beskrevet i kapittel 3.1.2 og 3.1.3 og vil ikke bli gjentatt her. I denne oppgaven er trehus definert til boligbygg med bærende trekonstruksjoner. Boliger er klassifisert av VTEK til risikoklasse 4 [9]. For å falle inn under brannklasse 3 i boliger, må boligen ha fem eller flere etasjer, i henhold til § 11-3 tabell 1 i VTEK [9].

3.4.2 Myndighetskrav

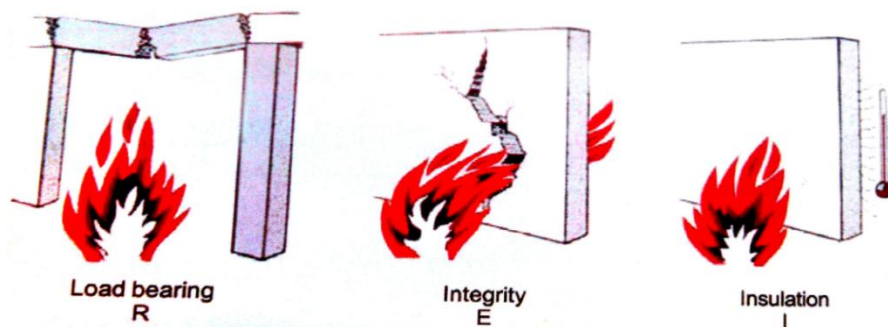
Etter innføringen av funksjonsbaserte forskrifter i 1997, åpnet det for store muligheter for bruk av tre i bygg, og spesielt i fleretasjes trehus [26]. Ytelseskravene gir grunnlaget for en komparativ analyse og har en styrende effekt på sikkerhetsnivået. Det stilles som regel ikke spesifikke krav til blant annet materialer og konstruksjoner [26]. For eksempel er det lovlig å bygge fleretasjes trehus med tre i bærende og skillende konstruksjoner. I denne avhandlingen er fleretasjes bygg definert til bygg med flere en tre etasjer. Uavhengig av valgte løsninger må brannsikkerheten dokumenteres. Det finnes tre måter å gjøre dette, som ble presentert i kapittel 3.1 og vil ikke bli gjentatt her.

Ved bruk av løsninger og materialer som fraviker fra de preaksepterte løsningene, må dette kompenseres med aktive og/eller passive tiltak som øker sikkerheten [26].

TEK10 gir ingen begrensninger på bruk av tre i byggverk i brannklasse 3. TEK10 krever det bærende hovedsystemet skal bevare sin stabilitet og bæreevne gjennom et fullstendig brannforløp [26]. Dette gjelder uavhengig av valgte konstruksjonsmateriale. Forskjellen er at det finnes preaksepterte løsninger for et bærende hovedsystem i betong og/eller stål. For tre må funksjonskravene verifiseres med analyse, når det ikke finnes preaksepterte løsninger. Begrepet fullstendig brannforløp er ikke definert i hverken TEK10 eller VTEK, men SINTEF [26] forutsetter et fullstendig brannforløp til å være i samsvar med en naturlig brann i NS-EN 1991-1-2:2004 «Allmenne laster – Laster på konstruksjoner ved brann».

3.4.3 Klassifisering av materialegenskaper og brannmotstand

Bygningsmaterialer klassifiseres etter materialenes egenskaper og brannmotstanden til bygningsdelene [26]. Materialegenskapene klassifiseres etter Euroklasse systemet og inneholder to deler. Den ene gjelder for konstruksjonsmaterialer ekskludert gulvmaterialer, mens den andre gjelder kun for gulvmaterialer. Begge systemene har klassene A1, A2, B, C, D, E og F, hvor klasse A er ubrennbare materialer. I tillegg benyttes det klasser for røykproduksjon (s0, s1 og s2) og brennende dråper (d0, d1 og d2) [2]. Et eksempel på bruk av klassebetegnelse kan være limtre, som klassifiseres til D-s2, d0 [26].



Figur 5: Brannmotstand (Gjengitt fra [2])

Bygningsmaterialer klassifiseres også etter brannmotstand. Prinsippet går ut på å klassifisere bygningsdelene etter evnen til å motstå en fullt utviklet brann og tilfredsstillende bestemte ytelseskriterier [2]. Ytelseskriteriene er bæreevne (R), integritet (E), isolasjon (I) og mekanisk motstandsevne (M) [2] og er illustrert i Figur 5. Bokstavkoden etterfølges av motstandstiden, som for eksempel 60 min [2]. Et eksempel er bygninger i brannklasse 3 hvor det bærende hovedsystemet har brannmotstand R 90 med materialeegenskaper A2-s1, d0 som en preakseptert ytelse [9]. Ytelser i klammeparentes angir de gamle kravene i henhold til NS 3919, som nå er utgått [7]. Blant annet bokstaven A som står for bærende ubrennbare bygningsdeler og B som står for bærende bygningsdeler [7]. For eksempel en bærende trekonstruksjon med REI 90 [B 90].

3.5 Tre og brann

I dette kapitlet blir det presentert problemer med tre og brann, samt kort om hvilke muligheter en har for å beskytte trekonstruksjoner mot brann.

3.5.1 Tre som konstruksjonsmateriale

Tre har lenge vært et foretrukket konstruksjonsmateriale pga. god stivhet, styrke i forhold til vekt og enkelhet ved bruk [2]. I disse dager er det et stort miljøfokus i byggebransjen, som gjør at tre som konstruksjonsmateriale blir valgt ofte [2]. I Norge har vi sterke tradisjoner for å bruke tre som konstruksjonsmateriale, spesielt i småhus i en til to etasjer [27]. Gjennom forskning og utvikling kan det nå prosjekteres og bygges fleretasjes trehus med bærende trekonstruksjoner [27]. Blant annet er det gjennomført en mulighetsstudie på et trehus i Bergen på 14 etasjer [28].

For å bygge fleretasjes trehus med bærende trekonstruksjoner, kreves det spesielle byggemetoder. Rapporten «*Fleretasjes trehus*» beskriver fire aktuelle metoder [27]:

- *Precut-system*
- *Elementer*
- *Volumseksjon eller moduler*
- *Massivtreelementer*

Skal man bygge høye trehus, kreves det også et egnet bæresystem. Rapporten «*Fleretasjes trehus*» beskriver følgende bæresystemer for fleretasjes trehus [27]:

- *Bindingsverk*
- *Bjelke-/søylesystem*

- *Volumelementer/seksjoner*
- *Massivtreelementer*
- *Fagverkskonstruksjoner*

3.5.2 Pyrolyse og forkulling

Tre er et brennbart materiale, men utviklingen under en brann er forutsigbar [26]. I tre kan varmeoverføring skje ved konveksjon, ledning og stråling [26]. Ved en brann kan varmeoverføringen føre til både pyrolyse og forkulling [29].

Pyrolyse er en irreversibel kjemisk spaltning av et stoff under varmpåkjønning [13] som for treverk starter ved temperaturer rundt 160-180 °C [29]. Prosessen fører til at treverket blir spaltet opp til en blanding av flyktige bestanddeler, tjære og kull [29].

Ved temperaturer over 300 °C starter tre å forkulle [29] og det blir dannet et forkullende lag som vil beskytte det resterende tverrsnittet [26]. Ifølge Norsk Standard [30] har materialet tett mot forkullingslinjen null styrke og stabilitet, mens det resterende upåvirkede tverrsnittet har full styrke og stabilitet. Laget med null styrke og stabilitet har en tykkelse på syv mm. [30]. Ifølge SP [2] gir tilnærmingen med $d_0 = 7$ mm usikre resultater, da det er behov for å justere verdien med bruk av korrekte termiske og mekaniske egenskaper for tre.

Temperaturkriteriet på 300 °C er en vanlig tilnærming for temperatur for start av forkulling innen brannprosjektering. Den kritiske verdien på 300 °C går igjen i standarder og faglitteratur. Blant annet i NS-EN 1995-1-2:2004 «*Prosjektering av trekonstruksjoner – Brannteknisk dimensjonering*» [30]. I USA er det derimot vanlig å bruke 288 °C som temperatur for start av forkulling for tre [33]. Ifølge Friquin [29] er en temperatur på 288-300 °C mye brukt innen brannprosjektering.

Det finnes store avvik i antennelsestemperaturen til trevirke. I en studie gjennomført av Babrauskas [31] ligger antennelsestemperaturen for tre mellom 200-510 °C. Babrauskas konkluderer med at 250 °C er det beste anslaget for antennelsestemperatur for tre, uavhengig av testmetode [31]. Ifølge Næringslivets sikkerhetsorganisasjon [32] vil ubeskyttet trevirke antenne ved temperaturer mellom 250-350 °C. Antennelsestemperaturen kan variere med kjemisk sammensetning, densitet, fuktinnhold, eksponeringstemperatur etc. [29]. En oppsummering av forskjellige temperatur for start av forkulling og antennelse er vist i tabell 7.

Tabell 7: Temperaturer for start av forkulling og antennelse

| Kilde | Temperatur for start av forkulling [°C] |
|---|---|
| NS 1995-1-2 [30] | 300 |
| Buchanan A.H. [33] | 288 |
| Friquin K.L. [29] | 288-300 |
| Kilde | Antennelsestemperatur (T_{ig}) [°C] |
| Babrauskas V. [31] | 200-510 |
| Næringslivets sikkerhetsorganisasjon [32] | 250-350 |

En annen viktig faktor for tre og brann er forkullingshastigheten. Forkullingshastighetene til tre tilnærmet konstant og er beskrevet i blant annet tabell 3.1 i NS-EN 1995-1-2:2004 [30]. Her varierer forkullingshastigheten fra 0,50 til 0,80 mm/min [30]. For limtre ligger forkullingshastigheten på 0,50-0,65 mm/min [30]. Ifølge Friquin [29] ligger en vanlig forkullingsrate på 0,60 mm/min. Forkullingshastigheten blir derimot påvirket av både materialeegenskaper og eksterne faktorer [29]. Følgende materialeegenskaper i treet vil påvirke forkullingsraten [29]:

- *Densitet*
- *Fuktinnhold*
- *Kjemisk sammensetning*
- *Fiberretning og permeabilitet*
- *Sammentrekningsrate for kull*
- *Oksideringsrate for kull*
- *Skaleringseffekter*

Følgende eksterne faktorer vil påvirke forkullingsraten i treet [29]:

- *Termisk eksponering*
- *Oksygenkonsentrasjon*
- *Åpningsfaktor*

Den tekniske veiledningen «*Fire safety in timber buildings*» [2] oppgir 0,65 mm/min for myke tresorter i Europa. Treteknisk oppgir en innbrenningshastighet på 0,70-0,80 mm/min for massivtreelementer [34].

En oppsummering av forskjellige forkullingsrater er oppgitt i tabell 8:

Tabell 8: Forkullingshastighet

| Kilde | Forkullingshastighet (β) [mm/min] |
|-------------------------------------|---|
| NS-EN 1995-1-2:2004 [30] | 0,50-0,80 |
| Friquin [29] | 0,60 (generelt) |
| Fire safety in timber buildings [2] | 0,65 (myke tresorter) |
| Treteknisk [34] | 0,70-0,80 (massivtre) |

3.5.3 Beskyttelsesmetoder mot brann

Det finnes hovedsakelig tre måter å beskytte trevirke mot brann:

- Trykkimpregnering [35]
- Overflatebehandling [35]
- Innkledning med andre materialer [30]

Ved impregnering blir diverse kjemikalier ført inn i trevirke ved overtrykk eller vakuum [35]. Trykkimpregnering er vanlig for å hindre sopp og råte, men kan også brukes for å øke brannsikkerheten med bruk av kjemikalier som tiltrekker vann [35].

Overflatebehandling mot brann er som regel maling eller lakk [35]. Dette virker brannhemmende ved at det sveller ved oppvarming og bidrar dermed til å minske pyrolysen [35]. Det finnes også lakk som ikke sveller, som virker brannhemmende ved at det beskytter overflaten mot antennelse en viss tid.

Treverk kan også oppnå beskyttelse mot brann med innkledning med andre materialer. Et eksempel på dette kan være å bruke ett eller flere lag med branngipsplater. Materialene som virker som innkledning virker på den måten at de utsetter forkullingen av treverket [36].

3.6 Gips – en introduksjon

I dette kapittelet blir det presentert hva som menes med gips.

3.6.1 Hva er gips?

Gips er et mineral som består av kalsiumsulfat dihydrat, dvs. to vannmolekyler per kalsiumsulfat molekyl. Den kjemiske formelen for gips er $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ [1]. Gips som mineral finnes naturlig i store mengder over hele verden og er enkel å produsere [1].

Produksjonsprosessen starter ved å drive vannet ut av gipsstein for å lage kalsiumsulfat halvhydrat $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$, ved følgende kjemiske prosess [1][33]:



Denne prosessen skjer ved en endotermisk reaksjon som kalles kalsinering, som er en dehydreringsprosess ved ca. 100-120 °C i gips [1]. Når vannet er drevet ut sitter man igjen med hvitt pulver, populært kalt «*Plaster of Paris*» [33]. For å produsere gips reverseres den kjemiske ligningen igjen, ved en hydrert reaksjon [1][33]:



På grunn av reaksjonsligningene i (3.1) og (3.2) kan gips resirkuleres enkelt. Gips betraktes derfor som et miljøvennlig materiale [33].

Det skilles gjerne mellom industriell og naturlig gips [1]. Naturlig gips finnes naturlig som et mineral, mens industriell gips er fremstilt som et biprodukt av forbrenningsgass ved rensing av kraftstasjoner [1]. Forskjellen mellom naturlig og industriell gips er krystallstørrelsen [1]. Ifølge SP [1] gir ikke produsenter av gipsplater informasjon om hva slags type gips som brukes i gipsplatene, til tross for at det kan påvirke egenskapene ved en brann.

3.7 Gipsplater

I dette kapittelet blir det presentert hva som menes med en gipsplate, hvilke typer gipsplater som finnes, samt de termiske og branntekniske egenskapene til platene.

3.7.1 Generelt

Gips brukes ofte til å lage gipsplater, som kan brukes som bygningsmaterialer [33]. Gipsplater brukes hovedsakelig som innvendig kledning i blant annet vegger og tak [33]. Platene består av en gipskjerne mellom to lag papir, for å oppnå tilstrekkelig strekkstyrke [36]. For å oppnå

ønskede egenskaper brukes det små mengder med diverse tilsetningsstoffer i gipskjernen. Eksempler på mye brukte tilsetningsstoffer er sand, perlitt, vermikulitt og glassfiber [1][36]. Med ulike sammensetninger oppnår gipsplatene egenskaper som er egnet for brannbeskyttelse, lyd- og varmeisolasjon [36]. En viktig egenskap for gipsplatene er innholdet av vann, blant annet med hensyn på brannmotstand. Ifølge SP [1] består gipsplater av 21 vektprosent vann. Typiske platetykkelser varierer fra 9-30 mm [36].



Figur 6: Konvensjonell gipsplate 13mm (Privat bilde)

3.7.2 Platetyper

I Norge blir gipsplater klassifisert etter NS-EN 520:2004 «Gipsplater – Definisjoner, krav og prøvingsmetoder» [37]. Standarden klassifiserer gipsplatene til type A, D, E, F, H, I og P, etter hvilke ytelseskriterier som skal tilfredsstilles [37]. I denne avhandlingen vil det fokuseres på type A og type F, så de andre typene vil ikke bli presentert.

Gipsplate klasse A (GtA) er konvensjonelle gipsplater til bruk som f.eks. kledningsmaterialer [37]. En konvensjonell gipsplate på 13 mm er vist i figur 6.

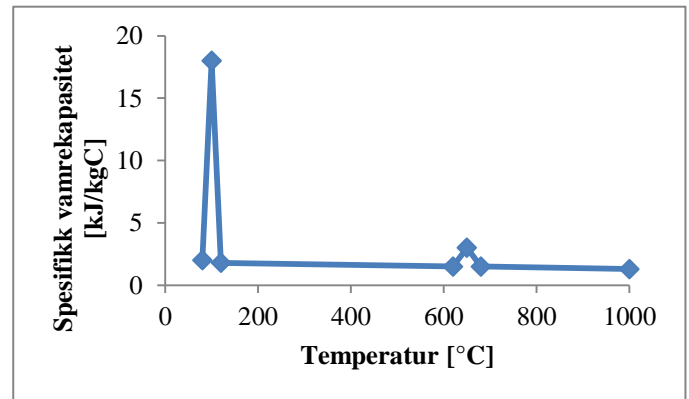
Gipsplate klasse F (GtF) er gipsplater med forbedret sammenhengskraft ved høye temperaturer [37]. Klasse F betyr ikke nødvendigvis at det er en branngipsplate, når denne klassen kun sier noe om stabilitet [37]. I denne avhandlingen blir alle gipsplater i klasse F, definert som branngipsplater. Platene inneholder glassfiber og/eller andre tilsetningsstoffer i gipskjernen [37]. Innholdet av glassfiber gir bedre brannmotstand, ved at det blir dannet mange små sprekker i stedet for få store sprekker ved høye temperaturer [37]. På denne måten tar det lengere tid før gipsplaten faller ned, dvs. at den får en økt nedfallstid [1]. GtF er tilsvarende gipsplate type X (GtX) i Nord-Amerika, som ofte brukes i faglitteratur [33].

En alternativ gipsplate er gips-fiberplater, som er gipsplater med cellulose forsterkning [1]. Platene består av ca. 80-85 % industriell gips og ca. 15-20 % cellulose fra resirkulert avisepapir [1].

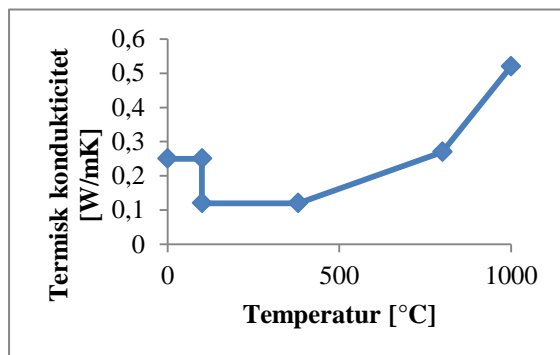
3.7.3 Termiske egenskaper

I denne avhandlingen blir termiske egenskaper definert til termisk konduktivitet og spesifikk varmekapasitet.

Spesifikk varmekapasitet er varmeenergien som kreves for å øke temperaturen i gipsplaten med en Kelvin per masseenheter [13]. Figur 7 [33] viser hvordan den spesifikke varmekapasiteten varierer ved økende temperaturer. Toppene på grafen viser dehydrering av vannet i gipskjernen, som vil gi en forsinkelse til den videre temperaturøkningen [33]. Vanninnholdet i gips ligger som regel på rundt 21 % og er en viktig faktor for å oppnå brannsikker gips [33].



Figur 7: Spesifikk varmekapasitet GtX (Gjengitt fra [33])



Figur 8: Termisk konduktivitet GtX (Gjengitt fra [33])

Termisk konduktivitet er et mål for et materials evne til å lede varme [34]. Figur 8 [33] viser hvordan den termiske konduktiviteten varierer ved økende temperatur. Konduktiviteten er avhengig av densiteten til gipsplaten [33][36]. Ved høyere temperaturer enn ca. 380 °C øker konduktiviteten fordi det dannes sprekker i gipsplaten, hvor varmen slipper igjennom [33].

3.7.4 Brannmotstand

Gips er et ubrennbart materiale [1], så konvensjonelle gipsplater (GtA) og branngipsplater (GtF) vil ikke gi noen tilførsel til et brannforløp.

Brannmotstanden til konstruksjoner med gipsplater som innkledning er hovedsakelig avhengig av fire korrelerende faktorer [33]:

1. Termisk isolasjonsevne
2. Evne til å motvirke oppløsning og nedfall etter uttørking

3. Evne til å motvirke krymping
4. Evne til å motvirke nedsmelting

Det finnes mange materialeegenskaper som påvirker disse fire faktorer og blir beskrevet i dette kapittelet.

Ifølge Buchanan [33] vil økt densitet øke brannmotstanden til en gipsplate. Høy densitet vil gi lav porøsitet og økt varmeabsorberingskapasitet. Effekten av dette er at det tar lengere tid å drive ut vannet av gipskjernen [33].

For at en gipsplate skal klassifiseres til klasse F i henhold til NS-EN 520:2004, må platene ha forsterket sammenhengskraft [37]. Ifølge Keertan [36] vil innholdet av glassfiber i gipskjernen gi økt brannmotstand ved høye temperaturer, fordi det blir dannet mange små sprekker i stedet for få store sprekker i gipsplaten. Den samme effekten blir beskrevet av SP [1], Buchanan [33], Just [40] og Arvidsson [Vedlegg 2]. Ifølge SP [1] og Buchanan [33] er glassfiberens evne til å holde gipsplate sammen etter dehydrering en av de viktigste egenskapene for brannmotstanden til gipsplater.

En annen måte å øke brannmotstanden til en gipsplate er å bruke små mengder med diverse tilsetningsstoffer. Ifølge SP [1], Buchanan [33], Manzello [39] og Arvidsson [Vedlegg 2] vil tilsetningsstoffet vermikulitt (Engelsk: *Vermiculite*) motvirke krymping. Vermikulitt er en gruppe leirminerale [38]. Krymping av gipsplatene fører til oppsprekking i platen og glipper mellom platene [33], slik at å motvirke dette øker brannmotstanden til gipsplatene. Keertan [36] nevner i sin artikkel at vermikulitt øker bestandigheten til gipsplatene.

Ifølge Arvidsson i Norgips [Vedlegg 2] vil innholdet av leire påvirke brannmotstanden i gipsplatene. Bruk av leire er brannhemmende og gjør at gipsplaten blir mer motstandsdyktig mot varme over tid [Vedlegg 2].

For å oppnå bedre brannmotstand kan også andre tilsetningsstoffer brukes i gipskjernen, som blir nevnt i litteraturen til SP [1], Buchanan [33], Manzello [39] og Wakili [42]. Hvilke tilsetningsstoffer som brukes for å øke brannmotstanden (bortsett fra vermikulitt og leire) beskrives ikke i litteraturen som er funnet. Buchanan [33] nøyer seg med å nevne at sand og perlitt er vanlige tilsetningsstoffer i gips.

På grunn av gipsplatenes høye vanninnhold, oppnår gipsplatene gode brannbeskyttende egenskaper [33]. Effekten av det høye vanninnholdet er at det virker som en innebygd sprinkler. Vannet hindrer brannen i å penetrere platen ved fordamping og forsinker temperaturøkningen i platen før kalsineringsprosessen er ferdig [1]. Når alt vannet er drevet ut av platene er det minimalt med styrke igjen, fordi gipsen er forandret til usammenhengende hvitt pulver [33]. Ifølge SP [1] gir vannet i gipsplatene opp mot 90 % av brannmotstanden. Manzello [39], Bénicho [41] og Hamre [Vedlegg 3] påpeker også at vanninnholdet i gipskjernen er kritisk for brannmotstanden til gipsplatene.

Den termiske konduktiviteten til gipsplaten blir påvirket av mikrostrukturen til materialet [42]. Mikrostrukturen til materialet er blant annet mineralsammensetning, kornstørrelse, porøsitet osv. Økt termisk konduktivitet vil øke varmeledningen gjennom gipsplaten, som igjen vil redusere brannmotstanden til gipsplaten. Gipsplater kan ha betydelige forskjeller i mikrostrukturen, til tross for at de er klassifisert til samme klasse i NS-EN 520:2004 [37]. Blant annet som beskrevet i kapittel 3.6.1 oppgir ikke produsentene om de har brukt industriell eller naturlig gips ved produksjon av gipsplatene. En annen ting som påvirker mikrostrukturen er produksjonskvaliteten av platene. Ifølge Buchanan [33] er produksjonskvaliteten av gipsplatene en av de mest kritiske faktorene som påvirker brannmotstanden.

Ifølge Wakili [42] er prosentandelen kalsiumsulfat en svært viktig faktor for brannmotstanden for branngips i de første 30 minuttene i en standard ISO 834-brann. Grunnen er at kalsiumsulfat er sterkt endotermisk [39] og vil absorbere noe av varmen.

En oppsummering av de viktigste materialegenskapene til gipsplatene, som påvirker brannmotstanden er vist i tabellen under.

Tabell 9: Materialelegenskaper som påvirker brannmotstanden til en branngipsplate

| Materialelegenskaper som påvirker brannmotstanden til en branngipsplate |
|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Densitet - Høy densitet gir god brannmotstand [33]. • Glassfiberforsterkning - Bruk av glassfiber i gipskjernen gir forbedret brannmotstand [1][33][36][37][40][Vedlegg 2]. • Vermikulitt - Vermikulitt som tilsetningsstoff i gipskjernen [1][33][36][39]. [Vedlegg 2] • Leire - Bruk av leire som tilsetningsstoff i gipskjernen er brannhemmende [Vedlegg 2]. • Diverse tilsetningsstoffer - Ulike tilsetningsstoffer i gipskjernen øker brannmotstanden [1][33][39][42]. • Vanninnhold - Vanninnhold i gipsplaten forsinker den videre oppvarmingen av gipsplaten [1][33][36][39][Vedlegg 3]. • Mikrostruktur - Mikrostrukturen i gipsmaterialet påvirker den termiske konduktiviteten [41][33]. • Kalsiumsulfat - Prosentandel kalsiumsulfat i gipskjernen påvirker brannmotstanden, da kalsiumsulfat er sterkt endotermisk. [42] |

3.8 Trekonstruksjoner med branngipsplater

Dette kapittelet gir en innføring i starttid til forkulling, nedfallstid og brannmotstand, i forbindelse med trekonstruksjoner med branngipsplater.

3.8.1 Starttid til forkulling

Forkulling av ubeskyttet tre er beskrevet i kapittel 3.5.2 og vil ikke bli gjentatt her. Forkulling av beskyttet tre har et litt annet forløp og vil presenteres i dette kapittelet.

Forkullingshastigheten til beskyttet treverk er beskrevet i NS-EN 1995-1-2:2004 figur 3.4-3.6 [30]. Det beskrives tre tilfeller av forkullingsrater igjennom et brannforløp [30]:

1. $t_{ch} = t_f$ og $t_a \geq 25\text{min}$: Forkulling starter når beskyttelseslaget faller ned.
2. $t_{ch} = t_f$ og $t_a < 25\text{min}$: Raskt nedfall. Forkulling starter når beskyttelseslaget faller ned.
3. $t_{ch} < t_f$: Forkulling starter før beskyttelseslaget faller ned.

Hvor:

t_{ch} = tid til start av forkulling

t_f = nedfallstid

t_a = tid til kullet overskrider 25 mm

For figurer og utfyllende beskrivelser av de tre tilfellene vises det til NS-EN 1995-1-2:2004 [30] og «Fire safety in timber buildings» [2].

Starttid til forkulling (Engelsk: *Start of charring time*) er definert til tid til forkulling bak kledning [1]. I denne avhandlingen er forkullingen satt til å starte ved en temperatur på over 300 °C. Dette er en vanlig konservativ tilnærming som stemmer overens med Norsk Standard [30] og SP [1][2], men treverk kan starte forkullingen også ved lavere temperaturer [29], blant annet avhengig av type treverk. Forkullingsratene vil også variere etter blant annet type treverk. Dette er beskrevet i kapittel 3.5.2.

Det er viktig å være klar over at forkullingen av tre bak et beskyttelseslag, kan starte før beskyttelseslaget faller ned [30]. I tillegg er det et viktig moment at det største bidraget til brannmotstanden for flere lag med gips, kommer fra det laget nærmest brannen. Med andre ord legges alltid branngipsplatene som ytterste lag mot en brann, hvis det brukes forskjellige plater med ulik klassifisering [1]. For eksempel et lag GtA innerst og med et lag GtF ytterst. I tillegg er det billigere og lettere å skifte plater, med flere tynne lag i stedet for en tykk plate [33].

Ifølge Buchanan [33] er innfestingen av platene viktig for å oppnå god brannmotstand og for å unngå rask forkulling av treverket. Gipsplatene krymper ved uttørking, så det er viktig at platene er godt festet i stenderne og i platene. Glippene mellom platene er også kritiske. Ifølge Buchanan vil tid til start av forkulling i stenderne reduseres med åtte minutter, hvis det er en glippe mellom platene (f.eks. ved innfestingen i en stender i et trebindingsverk) [33].

3.8.2 Nedfallstid

Nedfallstid (t_f) er et viktig begrep i forbindelse med branngipsplater. Nedfallstid (Engelsk: *Failure time* eller *fall-off time*) er definert til [1]:

«Tid fra start av test til minst 1 % av platen har falt av.»

Ifølge SP [1] vil konvensjonelle gipsplater (type A) falle ned, når vannet i gipskjernen er dehydrert.

Materialeegenskaper som påvirker nedfallstiden er beskrevet i kapittel 3.7.4.

Ifølge SP [1] vil tilstedeværelsen av isolasjon påvirke nedfallstiden, ved at isolerte hulrom vil gi kortere nedfallstid enn uisolerte hulrom. Type isolasjon vil også påvirke brannmotstanden [32]. Ifølge Buchanan [33] vil steinull gi bedre brannbeskyttende egenskaper enn glassull (se kapittel 3.9.6).

Festemidlene har stor påvirkning på nedfallstiden til gipsplatene. Ifølge SP [1][2] og Buchanan [33] vil kantavstand, hullavstand og skruelengde til festemidler påvirke nedfallstiden.

Ifølge SP [1] er nedfallstiden for gipsplater under gulv kortere enn for nedfallstiden for gipsplater på vegger, pga. gravitasjon. Dette er det ikke tatt hensyn til i blant annet formelen for nedfallstid (pga. utdragsfeiling av festemidler), som er beskrevet i NS-EN 1995-1-2:2004 [30]. Formelen er også beskrevet i kapittel 3.9.2.

Ifølge den tekniske veiledningen i «*Fire safety in timber buildings*» [2] vil avstanden mellom lekt og gulvbjelke påvirke nedfallstiden. I et trebindingsverk vil senteravstanden mellom stenderne påvirke brannmotstanden til gipsplatene [33] (se kapittel 3.9.5). Kort senteravstand vil gi økt nedfallstid, hovedsakelig fordi det er mulig å feste platene bedre [33].

3.8.3 Eksterne faktorer som påvirker brannmotstand

I kapittel 3.8.1 og 3.8.2 er det beskrevet hva som menes med nedfallstid og tid til start av forkulling. Det blir også beskrevet hvilke eksterne faktorer som påvirker brannmotstanden til en branngipsplate. Tabell 10 viser en oppsummering av faktorene.

Tabell 10: Eksterne faktorer som påvirker brannmotstanden til en branngipsplate

| Eksterne faktorer som påvirker brannmotstanden til en branngipsplate |
|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Type trevirke - Type trevirke vil påvirke forkulling og antennelse av tre, og dermed effekten av gipsplaten som brannbeskyttelse [29][33]. • Lagvis plassering – Lagvis plassering av gipsplater med ulike egenskaper påvirker hvor raskt treverket bak starter å forkulle [33]. • Innfesting – Innfestingen av treverket mht. å motvirke krymping, senteravstand stender/lekter/spikerslag, glipper mellom platene og avstand mellom lekt og gulvbjelke vil påvirke brannmotstanden [2][33]. • Isolering og tomrom – Type isolasjon og om tomrommet er isolert vil påvirke brannmotstanden i et trebindingsverk [1][33] • Festemidler – Hullavstand, kantavstand og skruelengde til festemidlene påvirker nedfallstiden til gipsplatene [1][2][33]. • Plassering i rommet – Nedfallstiden for gipsplater under gulv og i himling er kortere enn for på vegger pga. gravitasjon [1]. |

3.9 Metoder for dimensjonering av branngips

Dette kapittelet vil presentere fem ulike metoder for å dimensjonere branngips. De tre første metodene brukes for å beregne tid til start av forkulling i treverk bak gipsplater og nedfallstid til gipsplater. Den fjerde og femte metoden brukes for å beregne brannmotstand for trekonstruksjoner med branngips.

3.9.1 Generelt

Nedfallstid og starttid til forkulling er viktige parametere for brannmotstanden til gipsplater og kan brukes for å dimensjonere branngipsplater. Nedfallstid og starttid til forkulling er forklart i kapittel 3.8 og vil ikke bli gjentatt her. Det finnes mange måter å regne ut nedfallstid, starttid til forkulling og brannmotstand, blant annet metodene som er beskrevet i kapittel 3.9.2-3.9.6.

I tillegg til metodene i 3.9.2-3.9.6 har produsenter av gipsplatene og forskere egne testresultater, hvor de tester yteevnen til gipsplater på ulike konstruksjoner. For eksempel oppgir den tekniske veiledningen «*Fire safety in timber buildings*» en nedfallstid på 65 min for en 15 mm branngipsplate [2]. I rapporten «*Post-Flashover Fires in Timber Construction Compartments*» [43] av T. Hakkarainen, er det gjennomført forsøk med trekonstruksjoner og gipsplater. Ifølge Hakkarainen [43] vil ett lag GtA (12,5 mm) forsinke starttiden til forkulling med 20 min. Ved å legge på ett lag GtF (15,4 mm) på utsiden, vil starttiden til forkulling forsinkes til 40 min [43].

3.9.2 NS-EN 1995-1-2:2004

NS-EN 1995-1-2:2004 «*Prosjektering av trekonstruksjoner – Brannteknisk dimensjonering*» beskriver brannteknisk dimensjonering og prosjektering av trekonstruksjoner. Standarden gir føringer for beregning av start av forkulling bak gipsplater og nedfallstid for gipsplater. Det

mangler formler for en del tilfeller, som f.eks. for nedfallstid for gipsplater mht. termomekaniske egenskaper. Den generelle regelen er at hvis det ikke finnes en egnet formel for tid til start av forkulling eller nedfallstid, må dimensjoneringen gjøres på bakgrunn av testresultater [30].

Kapittel 3.4.3.3 (2) i standarden beskriver følgende formler for å beregne start av forkulling for et tretverrsnitt bak en kledning bestående av gipsplater type A, F og H klassifisert etter NS-EN 520:2004 [30]:

Hvis hulrom mellom platene er $\geq 2\text{mm}$ gjelder:

$$t_{ch} = 2,8 * h_p - 23 \quad (3.3)$$

I alle andre tilfeller gjelder:

$$t_{ch} = 2,8 * h_p - 14 \quad (3.4)$$

Hvor:

t_{ch} = start til forkulling [min]

h_p = platetykkelse [mm]

For kledninger med to lag gipsplater av type A eller H, skal formel 3.3 brukes. Platetykkelsen skal beregnes til å være tykkelsen av det ytterste laget, pluss 50 % av tykkelsen for det innerste laget [30].

For kledninger med to lag gipsplater av type F, skal formel 3.3 brukes. Platetykkelsen skal beregnes til å være tykkelsen av det ytterste laget, pluss 80 % av tykkelsen for det innerste laget [30].

For kledninger med to lag gipsplater av ulik kvalitet hvor det ytterste laget er GtF, gjelder samme regel som i forrige avsnitt. Hvis GtF er det innerste laget, kan en konservativt regne som om begge gipsplatene er type A eller H [1].

Kapittel 3.4.3.4 i standarden beskriver føringer for nedfallstider for brannbeskyttende kledninger [30]. Nedfallstiden for brannbeskyttende kledninger blir hovedsakelig påvirket av [30]:

- *Forkulling eller mekanisk nedbrytning av materialet eller kledningen;*
- *Utilstrekkelig penetreringslengde for festemidler i tre som ikke er forkullet;*
- *Utilstrekkelig bruk av festemidler mht. hull- og kantavstand.*

For gipsplater type A og H og brannbeskyttende kledninger i tre skal nedfallstiden generelt beregnes slik [30]:

$$t_f = t_{ch} \quad (3.5)$$

Hvor:

$$t_f = \text{nedfallstid [min]}$$

Nedfallstiden til branngipsplater (GtF) skal bestemmes mht. [30]:

- Termomekanisk nedbrytning av kledning;
- Utdragningsfeiling av festemidler pga. utilstrekkelig penetreringslengde for festemidler i tre som ikke er forkullet.

Formlene i standarden tar ikke hensyn til termomekaniske egenskaper, slik at disse nedfallstidene må finnes ved testing eller ved å kontakte produsenter av platene [2].

Nedfallstiden for gipsplater mht. utdraging av festemidler er gitt i Annex C [30]:

$$t_f = t_{ch} + \frac{I_f - I_{a,min} - h_p}{k_s * k_2 * k_n * k_j * \beta_0} \quad (3.6)$$

Hvor:

$$I_f = \text{lengde festemidler [mm]}$$

$$I_{a,min} = \text{minimum penetreringslengde av festemidlet i tre som ikke er forkullet [mm]}$$

$$k_s = \text{tverrsnittsfaktor [-]}$$

$$k_2 = \text{isolasjonsfaktor [-]}$$

$$k_n = \text{konverteringsfaktor [-]}$$

$$\beta_0 = \text{fokullingsrate [mm/min]}$$

3.9.3 Improved design method av ETH Zürich

ETH Zürich har utviklet en metode for å vurdere brannbeskyttende egenskaper for en rekke ulike materialer [1]. Metoden blir beskrevet i detalj i kapittel 5.5 i «*Fire safety in timber buildings*» [2]. Det vises dit for utfyllende litteratur.

Metoden kan blant annet brukes på ulike trematerialer, isolasjon, gipsplater type A, H og F, samt gipsfiberplater. Prinsippet til metoden går ut på å summere bidragene til brannmotstanden fra de ulike lagene i konstruksjonen [2].

For å beregne tid til start av forkulling i tre beskyttet av gipsplater må en regne ut beskyttelsestiden med følgende formel [1]:

$$t_{ch} = \sum t_{prot,i} \quad (3.7)$$

Hvor:

$$\sum t_{prot,i} = \text{sum beskyttelsestid for lag i konstruksjon [min]}$$

Beskyttelsestiden for hvert lag kan beregnes slik [2]:

$$t_{prot,i} = (t_{prot,0,i} * k_{pos,exp,i} * k_{pos,unexp,i} + \Delta t_i) * k_{j,i} \quad (3.8)$$

Hvor:

$$t_{prot,i} = \text{beskyttelsestid for lag i medregnet faktorer [min]}$$

$$t_{prot,0,i} = \text{beskyttelsestid for lag i [min]}$$

$$k_{pos,exp,i} = \text{posisjonskoeffisient som medregner forrige lag [-]}$$

$$k_{pos,unexp,i} = \text{posisjonskoeffisient som medregner neste lag [-]}$$

$$\Delta t_i = \text{korreksjonstid [min]}$$

$$k_{j,i} = \text{forbindelseskoeffisient [-]}$$

For gipsplater og gipsfiberflater er beskyttelsestiden for et lag gitt ved [2]:

$$t_{prot,0,i} = 30 * \left(\frac{h_i}{15}\right)^{1,2} \quad (3.9)$$

Hvor:

$h_i = \text{tykkelse lag [mm]}$

Posisjonskoeffisientene medregner posisjonen til lagene i konstruksjonen, fordi de foregående og neste lagene påvirker brannmotstanden til konstruksjonen. Utregningen av posisjonskoeffisientene er avhengig av hva slags materialer som brukes. For gipsplater og gipsfiberplater gjelder [2]:

$$k_{pos,exp,i} = 1 - 0,6 * \frac{\sum t_{prot,i-1}}{t_{prot,0,i}} \quad \text{hvis} \quad \sum t_{prot,i-1} \leq \frac{t_{prot,i-1}}{2} \quad (3.10)$$

$$k_{pos,exp,i} = 0,5 * \sqrt{\frac{\sum t_{prot,i-1}}{\sqrt{t_{prot,0,i}}}} \quad \text{hvis} \quad \sum t_{prot,i-1} > \frac{t_{prot,i-1}}{2} \quad (3.11)$$

$$k_{pos,unexp,i} = 0,5 * h_i^{0,15} \quad \text{hvis lag er understøttet av isolasjon} \quad (3.12)$$

$$k_{pos,unexp,i} = 1,0 \quad \text{hvis lag er understøttet av kledning} \quad (3.13)$$

Hvor:

$\sum t_{prot,i-1} = \text{sum beskyttelsestid foran gjeldene lag [min]}$

Korreksjonstiden er avhengig av type materiale og om platene monteres i en vegg- eller gulvkonstruksjon. For en veggkonstruksjon med gipsplater beregnes korreksjonstiden slik [2]:

$$\Delta t_i = 0,03 * t_{prot,i-1} + 0,9 * t_{prot,0,i} - 2,3 \quad \text{hvis } t_{pr,0,i} < 12 \text{min} \quad (3.14)$$

$$\Delta t_i = 0,22 * t_{prot,i-1} - 0,1 * t_{prot,0,i} + 4,7 \quad \text{hvis } t_{pr,0,i} \geq 12 \text{min} \quad (3.15)$$

Hvor:

$t_{prot,i-1} = \text{beskyttelsestid foran gjeldene lag [min]}$

Den siste faktoren er forbindelseskoeffisienten og finnes på følgende måte for gipsplater [2]:

$$k_{j,i} = 0,8 \quad \text{hvis lag er understøttet av tomt hulrom og har } > 2 \text{mm mellomrom i skjøt} \quad (3.16)$$

$$k_{j,i} = 1,0 \quad \text{ellers} \quad (3.17)$$

Hvor:

$k_{j,i}$ = forbindelseskoeffisient [-]

Når det gjelder nedfallstiden til gipsplatene er det ikke beskrevet i denne beregningsmetoden [2].

3.9.4 Metode basert på testresultater fra database

SP har utarbeidet en konfidensiell database med testresultater for mer enn 340 fullskala branntester av trekonstruksjoner med gipsplater. I testene er det hovedsakelig brukt GtA og GtF i vegg- og gulvkonstruksjoner. Hensikten med databasen er å utvikle metoder for dimensjonering av trekonstruksjoner med gipsplater, samt å gi konservative data for nedfallstid og starttid for forkulling [1].

Testresultatene viser store spredninger i både starttid for korkulling og nedfallstid. På grunn av at databasen er konfidensiell er den eneste dataen tilgjengelig, ulike figurer vist i rapporten «*Gypsum plasterboards used as fire protection – Analysis of a database*» [1].

Ifølge SP [2] skyldes dataspredningen følgende årsaker:

- *Variasjon i mekaniske egenskaper*
- *Variasjon i termiske egenskaper*
- *Isolasjon eller tomrom bak kledning*
- *Stål- eller trestender*
- *Kant- og hullavstand på festemidler*
- *Skruelengde på festemidler*
- *Avstand mellom lekt og gulvbjelke*

På bakgrunn testresultatene er det laget konservative verdier for starttid av forkulling og nedfallstid for vegg- og gulvkonstruksjoner [1][2]. Verdiene er basert på de dårligste testresultatene i databasen [1]. I kapittel 4.2 i avhandlingen skal det blir gjort beregninger for en veggkonstruksjon. Derfor blir kun verdiene for veggkonstruksjoner gitt. For utfyllende litteratur vises det til litteratur av SP [1][2].

I den tekniske veiledningen «*Fire safety in timber buildings*», tabell 6.1, blir det oppgitt formler og verdier for å beregne start av forkulling bak gipskledning for veggkonstruksjoner [2]:

Tabell 11: Start forkulling bak gipsplate i veggkonstruksjon [2]

| Kledning | Ligning | |
|------------------------------|--|---|
| Type A, F Ett lag | $1,8 * h_p - 7$ | <i>hvis</i> $9 \text{ mm} \leq h_p \leq 18 \text{ mm}$ |
| | 25,5 | <i>hvis</i> $h_p > 18 \text{ mm}$ |
| Type F To lag | $\min \begin{cases} 2,1 h_{p,tot} - 7 \\ 3,5 h_p + 7 \end{cases}$ | <i>hvis</i> $25 \text{ mm} \leq h_{p,tot} \leq 31 \text{ mm}$ |
| Type F + type A To lag | | <i>og</i> $9 \text{ mm} \leq h_p \leq 18 \text{ mm}$ |
| Type A To lag | $\min \begin{cases} 2,1 h_{p,tot} - 7 \\ 1,6 h_p + 13 \end{cases}$ | <i>hvis</i> $25 \text{ mm} \leq h_{p,tot} \leq 31 \text{ mm}$ |
| | | <i>og</i> $9 \text{ mm} \leq h_p \leq 18 \text{ mm}$ |

I likhet med forrige avsnitt blir det oppgitt formler og verdier for nedfallstider for gipsplater i veggkonstruksjoner i tabell 6.2 i den tekniske veiledningen «*Fire safety in timber buildings*» [2]:

Tabell 12: Nedfallstid for gipsplater på veggkonstruksjon [2]

| Kledning | Ligning | |
|-----------------------------|----------------------|--|
| Type F Ett lag | $4,5 h_p - 24$ | <i>hvis</i> $9 \text{ mm} \leq h_p \leq 18 \text{ mm}$ |
| | 57 | <i>hvis</i> $h_p > 18 \text{ mm}$ |
| Type F To lag | $4 h_{p,tot} - 40$ | <i>hvis</i> $25 \text{ mm} \leq h_{p,tot} \leq 31 \text{ mm}$ |
| | 84 | <i>hvis</i> $h_{p,tot} > 31 \text{ mm}$ |
| Type F+ Type A To lag | 81 | <i>hvis</i> $h_p > 15 \text{ mm}$ <i>og</i> $h_{p,tot} > 27 \text{ mm}$ |
| Type A Ett lag | $1,9 h_p - 7$ | <i>hvis</i> $9 \text{ mm} \leq h_p \leq 15 \text{ mm}$ |
| | 21,5 | <i>hvis</i> $h_p > 15 \text{ mm}$ |
| Type A To lag | $2,1 h_{p,tot} - 14$ | <i>hvis</i> $25 \text{ mm} \leq h_{p,tot} \leq 30 \text{ mm}$ |
| | 49 | <i>hvis</i> $h_{p,tot} > 30 \text{ mm}$ |
| Type A Tre lag | 55 | <i>hvis</i> $h_{p,tot} \geq 37,5 \text{ mm}$ |

Det er verdt å bemerke at uttrykkene i tabell 11 og 12 vil gi konservative resultater [2].

3.9.5 Component additive method

Component additive method er beskrevet i den Canadiske byggeforskriften [33]. Noen av verdiene er gitt i tabell 11.2 i boken «*Structural Design for Fire Safety*»[33]:

Tabell 13: Verdier Component additive method [33]

| <i>Beskrivelse</i> | <i>Brannmotstand [min]</i> |
|--|----------------------------|
| <i>Gipsplate</i> | |
| <i>12,7 mm Type X Gipsplate</i> | 25 |
| <i>15,9 mm Type X Gipsplate</i> | 40 |
| <i>Trekonstruksjon</i> | |
| <i>Trestendere, senteravstand 400 mm</i> | 20 |
| <i>Trestendere, senteravstand 600 mm</i> | 15 |
| <i>Isolasjon</i> | |
| <i>Steinull</i> | 15 |
| <i>Glassull</i> | 5 |

Metoden brukes for å beregne brannmotstand i antall minutter for en gitt trekonstruksjon. Metodikken i beregningsmetoden går ut på å legge sammen verdiene etter hvordan konstruksjonen som skal analyseres er bygd opp.

3.9.6 Tabellverdier fra New Zealand og Nord-Amerika

I boken «*Structural Design for Fire Safety*» tabell 11.1 [33] er det samlet standardverdier for brannmotstand fra New Zealand og Nord-Amerika. Verdiene gir nødvendig platetykkelse (mm) for gipsplater for å oppnå nødvendig brannmotstand (min). Verdiene gjelder for gulv og tak, for materialene stål og tre. Noen av verdiene for vegger i tre er gjengitt i tabellen under [33]:

Tabell 14: Minimum platetykkelse (mm) for brannmotstand i vegg [33]

| Brannmotstand [min] | New Zealand | | Nord-Amerika | |
|--------------------------------|----------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|-----------------------------|
| | <i>Tre, ikke lastbærende</i> | <i>Tre, lastbærende</i> | <i>Tre, ikke lastbærende</i> | <i>Tre, lastbærende</i> |
| 30 | 9,5 | 9,5 | - | - |
| 45 | - | - | 12,7 | 12,7 |
| 60 | 12,5 | 12,5 | 15,9 | 15,9 |
| 90 | 16,0 | 16,0 | 25,4 | 25,4 |
| 120 | 19,0 | 32,0 | 31,8 | 31,8 |

Et eksempel på bruk av tabellen kan være å finne nødvendig platetykkelse for 60 min brannmotstand for en ikke-bærende trestendervegg. I henhold til tabell 14 kreves det 12,5 mm etter verdiene i New Zealand, mens det kreves 15,9 mm etter verdiene i Nord-Amerika, som er vanlige tykkelser for en enkelt gipsplate.

3.10 NS 3901:2012

I dette kapitlet blir det beskrevet en metode for å gjennomføre en risikovurdering av branngips som passiv brannsikring. Det blir presentert fremgangsmåten i NS 3901:2012 «*Krav til risikovurdering av brann i byggverk*», da det er den metoden som brukes i risikovurderingen i denne avhandlingen. Standarden beskriver to alternative analysemodeller: risikoanalyse og komparativ analyse. I dette kapitlet blir det kun beskrevet hvordan en gjennomfører en komparativ analyse. Deler av kapitlet er basert på arbeidet som ble gjennomført i prosjektoppgaven til undertegnede høst 2012 [44].

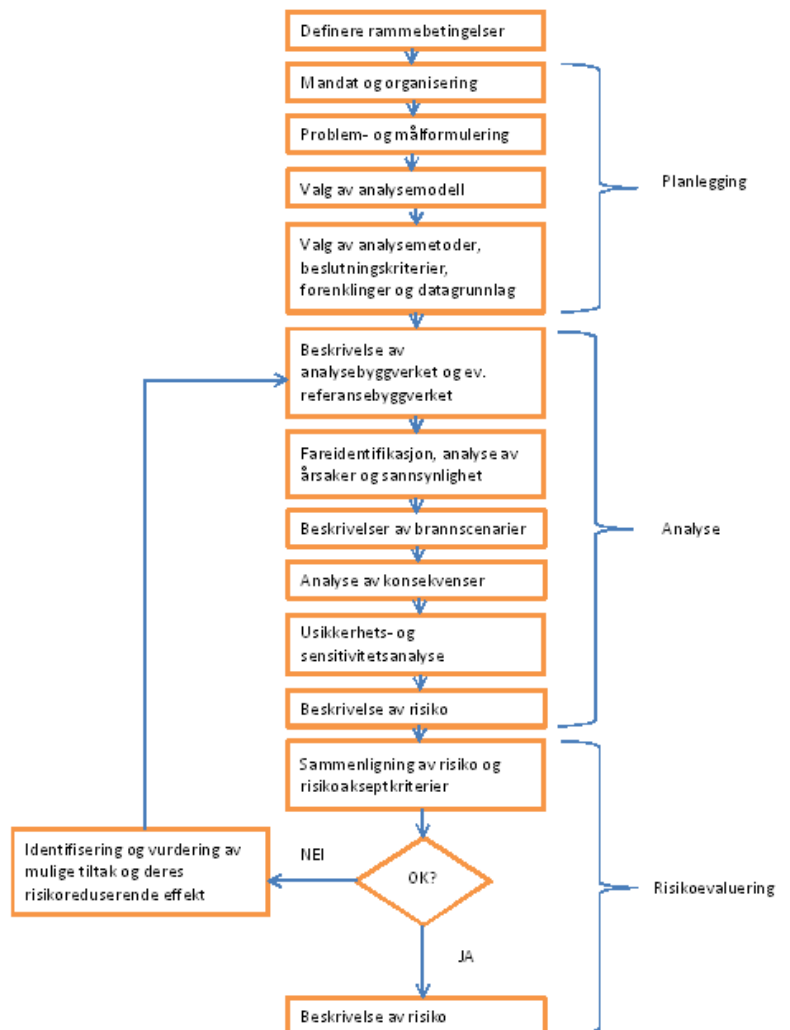
3.10.1 Generelt

NS 3901:2012 «*Krav til risikovurdering av brann i byggverk*» ble fastsatt i juni 2012 og erstattet NS 3901:1998 «*Risikoanalyse av brann i byggverk*». Standarden står på egen ben uavhengig av andre veiledninger og kan brukes som et hjelpemiddel for brannteknisk prosjektering [4].

Bruken av standarden gjelder både for nye og eksisterende byggverk, gjennom hele livssyklusen til byggverket [4].

Et av formålene med standarden er å bruke den som hjelpemiddel ved beslutningsprosesser knyttet til risiko, som f.eks. beslutninger om løsning av spesifikke risikoproblemer [4]. Koblet mot bruk av branngips, kan det være f.eks. valget mellom ulike passive brannsikringstiltak.

Risikovurderingen gjennomføres etter flytskjemaet vist i figur 9.



Figur 9: Risikovurdering etter NS 3901:2012 [4][44]

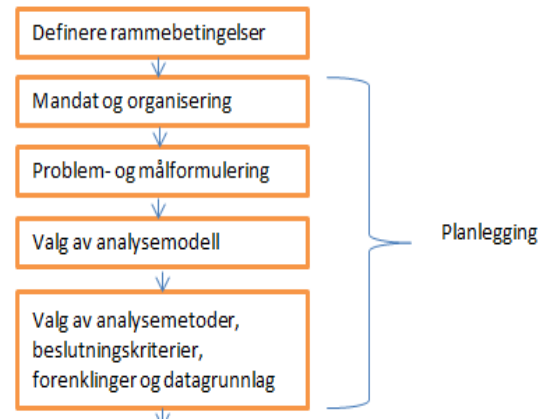
3.10.2 Definere rammebetingelser

Rammebetingelsene som gjelder for risikovurdering av brann er beskrevet i kapittel 3.3 og vil ikke bli gjentatt her.

3.10.3 Mandat og organisering

Det skal utarbeides et mandat, som skal inneholde en del praktisk informasjon. I henhold til standarden skal det inneholde minst [4]:

- *Navn på oppdragsgiver og lederen for gjennomføring av risikovurderingen;*
- *Grunnlaget for risikovurderingen og målsetningen med denne;*
- *Overordnet beskrivelse av analysebyggverket (hvilket eller hvilke byggverk vurderingen omfatter);*
- *Omfanget av risikovurderingen;*
- *Relevante rammebetingelser;*
- *Andre forutsetninger for arbeidet;*



Figur 10: Planlegging NS 3901:2012 [4][44]

Det skal organiseres en arbeidsgruppe som skal gjennomføre risikovurderingen. I organiseringen skal nødvendig kompetanse bli kontrahert og ansvar fordelt. Kravet til antall personer og nødvendig kompetanse avhenger av brannklasse og størrelse på fravik fra preaksepterte ytelser. For bygg i brannklasse 3 skal arbeidsgruppen bestå av to eller tre personer [4].

3.10.4 Problem- og målformulering

I problem- og målformuleringen skal bakgrunnen og målsetningen med risikovurderingen beskrives [4]. Aktuelle avklaringer kan være:

Hvorfor gjennomfører vi denne risikovurderingen? Hva slags resultater forventes og hva kan de brukes til [14]? Hvilke parter blir berørt av risikovurderingen? Hvilke typer risiko skal avdekkes [4]?

En risikovurdering kan være en del av en brannsikkerhetsstrategi. Hvis det er tilfelle, må problem- og målformuleringen relateres til denne [4].

3.10.5 Valg av analysemodell

Standarden gir valget mellom to ulike analysemodeller; en risikoanalyse og en komparativ analyse [4]. I denne avhandlingen blir det kun beskrevet fremgangsmåten for en komparativ analyse, da det er den metoden som skal brukes i analysen.

En komparativ analyse er beskrevet som [4]:

«...en sammenligning mellom brannsikkerheten i analysebyggverket og i et tilsvarende referansebyggverk utført i henhold til ett sett av preaksepterte ytelser.»

3.10.6 Valg av analysemetoder, beslutningskriterier, forenklinger og datagrunnlag

Valg av analysemetoder og beslutningskriterier gjøres på grunnlag av bl.a. [4]:

«...analysens mål, aktuelle problemstillinger, verifikasjonsbehov (ved prosjektering) og tilgang på data.»

Det kan være greit å se på anerkjent litteratur for å se om det finnes aktuelle analysemetoder. For eksempel i bøkene «Risikoanalyse – metoder og teorier» [14] og «The SFPE Handbook Of Fire Protection Engineering» [45]. Ved en komparativ analyse vil valg av analysemetoder også bestemmes av hvilke fravik som er gjort fra de preaksepterte ytelsene [4].

Hvis det skal gjennomføres en kvantitativ risikoanalyse, må en definere risikoakseptkriteriene før risikoanalysen starter. Kriteriene skal formuleres enkelt, slik at en beslutningstaker kan fatte beslutninger. Ved komparative analyser vil risikoakseptkriteriet være risikoen i referansebyggverket [4].

Generelt skal hele standarden følges, men det er tillat å gjøre forenklinger i risikovurderingen. Hvis risikovurderingen gjennomføres uten deler av standarden, skal dette begrunnes [4].

Valg av datagrunnlag vurderes med hensyn til [4]:

- *Relevans*
- *Aktualitet*
- *Alder (på data)*
- *Mengde*
- *Underrapportering*
- *Tilpasning*
- *Nøyaktighet*

Statistisk data for branner kan for eksempel hentes på internett fra:

- DSB – Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap
- MSB – Myndigheten för samhällsskydd och beredskap
- FNO – Finansnæringens Fellesorganisasjon
- Statistikk fra politiet

Datagrunnlaget som er brukt i analysen skal identifiseres, f.eks. med referanser. På den måten vil de gjøres sporbare [4].

3.10.7 Beskrivelse av analysebyggverket og ev. referansebyggverket

Proessen for en komparativ analyse er beskrevet i kapittel 7 i standarden [4].

I komparative analyser skal det beskrives et analysebyggverk og et referansebyggverk [4].

Analysebyggverket er det byggverket som skal vurderes med hensyn på brannrisiko. Det skal beskrives i detalj og kategoriseres i henhold til risikoklasse og brannklasse [4].

Referansebyggverket er et sammenlignbart byggverk med analysebyggverket.

Referansebyggverket skal beskrives med ett sett av preaksepterte ytelser og skal være fysisk mulig å bygge. Det skal være beregnet for samme type virksomhet med lik risikoklasse og ikke lavere brannklasse enn analysebyggverket [4].



Figur 11: Analyse NS 3901:2012 [4][44]

3.10.8 Fareidentifikasjon, analyse av årsaker og sannsynlighet

Før en starter på fareidentifikasjonen må det fastsettes beslutningskriterier. Beslutningskriteriene vil være avhengig av hvilke analysemetoder som er valgt i planleggingen [4].

For en komparativ analyse skal det vurderes om det finnes farer i analysebyggverket som ikke finnes i referansebyggverket. Dersom dette er tilfelle skal det vurderes om en komparativ analyse er gyldig [4].

Kapittel 7.6 i standarden beskriver analyse av årsaker og sannsynlighet. Her skal det kartlegges og beskrives årsakskjeder som kan føre til brannforløp. For komparative analyser skal det vurderes om det finnes årsaker til og sannsynligheter for brann i analysebyggverket som ikke finnes i referansebyggverket. I slike tilfeller skal det vurderes om en komparativ analyse er gyldig [4].

3.10.9 Beskrivelse av brannscenarier

Hvert brannscenario representerer en unik kombinasjon av hendelser og forhold, som påvirker utfallet for en brann i byggverket [4].

Ved brannprosjektering der analysen inngår som grunnlag for en brannsikkerhetsstrategi, er det obligatorisk å vurdere følgende brannscenarier [4]:

1. Verste troverdige brannscenarioet i byggverket.
2. Brann i rom som normalt er uten personer, og som kan true et større antall personer i andre deler i byggverket.
3. Langsom brannutvikling som ikke utløser automatisk sløkkeanlegg.
4. Representative brannscenarier som skal avdekke robustheten.

For komparative analyser kan brannscenarioene i analysebyggverket og referansebyggverket gi forskjellige utfall. Derfor skal alle brannscenarier som forventes å gi forskjellige resultater for både referansebyggverket og analysebyggverket analyseres [4].

3.10.10 Analyse av konsekvenser

Konsekvensanalysen skal gjøres på valgte brannscenarier. Analyseomfanget skal bestemmes på grunnlag av en dokumentert vurdering. Ved store fravik fra analysebyggverket øker usikkerheten i analysene. Dermed må detaljeringsgraden for analysene økes. Konsekvensene av brannscenarioene i både analysebyggverket og referansebyggverket, må presenteres slik at det er mulig å sammenligne dem [4]. Dette kan f.eks. gjøres med et hendelsestre.

3.10.11 Usikkerhets- og sensitivitetsanalyse

En usikkerhetsanalyse er en vurdering av usikkerheten for risikoanalysen og gjøres normalt kvalitativt. Formålet med den er å beskrive usikkerheten knyttet til f.eks. forenklinger og målinger. Et eksempel på et usikkert forhold effekten av passive brannverntak [4].

En sensitivitetsanalyse er en analyse hvor man justerer en variabel og ser på utfallet av det. De viktigste resultatene fra sensitivitetsanalysen skal drøftes i evalueringen [4].

3.10.12 Beskrivelse av risiko

Ved en komparativ analyse skal risikoen beskrives relativt. Relativ risiko er risiko som skiller analysebyggverket fra referansebyggverket [4].

3.10.13 Sammenligning av risiko og risikoakseptkriterier

Standarden presiserer at risiko skal evalueres isolert, men andre verdier skal også ta del i den helhetlige evalueringen. Disse verdiene er økonomi, vedlikehold, estetikk og brukervennlighet [4]. Denne presiseringen åpner i stor grad for valg av løsninger.



Første punket i risikoevalueringen er å sammenligne risiko med risikoakseptkriter. For en komparativ analyse vil risikoakseptkriteriet være risikoen i referansebyggverket. Det er viktig at risikoevalueringen beskrives forståelig for alle mottakere av risikovurderingen, slik at alle som har mulighet til å påvirke resultatet forstår innholdet.

Figur 12: Risikoevaluering NS 3901:2012 [4][44]

3.10.14 Risikoevaluering

Etter sammenligningen må en konkludere med om risikoen er akseptabel eller uakseptabel (se figur 12). Dersom risikoevalueringen viser at risikoen er akseptabel, vil videre tiltak være unødvendig. Ved en uakseptabel risiko, skal det iverksettes identifisering og vurdering av mulige tiltak og deres risikovurderende effekt. Identifiseringen av tiltak skal gjøres systematisk, sammen med relevante interessenter [4].

Effekten av tiltakene som identifiseres, skal vurderes kvalitativt mht. risikoreducerende effekt. Tiltakene skal vurderes mht. [4]:

- *Funksjonalitet;*
- *Integritet;*
- *Robusthet;*
- *Vedlikehold og drift;*
- *Andre mulige effekter.*

3.10.15 Beskrivelse av risiko

Etter evalueringen skal risikoen beskrives. Dette er beskrevet tidligere og vil ikke bli gjentatt her.

Når hele risikovurderingen er ferdig, skal det utarbeides en konklusjon og nødvendig dokumentasjon. Konklusjonen er et sammendrag av de viktigste resultatene i risikovurderingen. Dokumentasjonen skal inneholde planleggingen og analysen i risikovurderingen [4].

3.10.16 Oppsummering

En oppsummering av hele prosessen for risikovurdering etter NS 3901:2012 er vist i tabell 15.

Tabell 15: Oppsummering av prosessen for risikovurdering

| Prosess | Kort beskrivelse |
|---|---|
| Planlegging: <ul style="list-style-type: none"> - Definere rammebetingelser - Mandat og organisering - Problem- og målformulering - Valg av analysemodell - Vag av analysemetoder, beslutningskriterier, forenklinger og datagrunnlag | <ul style="list-style-type: none"> - Definerings av interne og eksterne rammebetingelser. - Utarbeidelse av et dokumentert mandat og utpeking av arbeidsgruppe med en formell leder. - Risikoanalyse eller komparativ analyse. - Valg av analysemetoder med tilhørende beslutningskriterier. Valg av forenklinger og datagrunnlag med begrunnelse. |
| Analyse: <ul style="list-style-type: none"> - Beskrivelse av analysebyggverk og ev. referansebyggverk - Fareidentifikasjon, analyse av årsaker og sannsynlighet - Beskrivelse av brannscenarier - Analyse av konsekvenser - Usikkerhets- og sensitivitetsanalyse - Beskrivelse av risiko | <ul style="list-style-type: none"> - Detaljert beskrivelse av analyse- og referansebyggverk. - Identifisering av farer og uønskede hendelser i analysebyggverket, som ikke finnes i referansebyggverket. Kartlegging og beskrivelser av årsakskjeder som kan føre til brannforløp. - Vurdering av fire obligatoriske brannscenarier. - Konsekvensanalyse av valgte brannscenarier. - Kvalitativ (ev. kvantitativ) usikkerhets- og sensitivitetsanalyse av usikre forhold. - Beskrive risikoen i analysebyggverket relativt. |
| Risikoevaluering: <ul style="list-style-type: none"> - Sammenligning av risiko og risikoakseptkriterier - Risikoevaluering - Beskrivelse av risiko | <ul style="list-style-type: none"> - Sammenligne risikoen i analysebyggverket mot risikoen i referansebyggverket. - Konkludere om risikoen er akseptabel eller uakseptabel. - Beskrive risikoen relativt, samt konkludere og dokumentere risikovurderingen. |

3.11 Temperatur-tidkurver

I dette kapittelet vil det bli beskrevet fremgangsmåten for å beregne en parametrisk temperatur-tidkurve etter NS-EN 1991-1-2:2002 Tillegg A, da kurvene er relevante for risikovurderingen i avhandlingen.

3.11.1 Parametriske temperatur-tidkurver

Ifølge SINTEF [26] er begrepet fullstendig brannforløp i samsvar med en naturlig brann i NS-EN 1991-1-2:2002 «*Allmenne laster – Laster på konstruksjoner ved brann*». En forenklet brannmodell for en naturlig brann er beskrevet i tillegg A i standarden [46]. Fremgangsmåten for metoden blir beskrevet i dette kapittelet.

Åpningsfaktor O

Det første en må gjøre er å beregne åpningsfaktoren etter følgende formel [46]:

$$O = \frac{A_v \cdot \sqrt{h_{eq}}}{A_t} \quad (3.18)$$

Hvor:

O = åpningsfaktor [$m^{1/2}$]

A_v = samlet areal for vertikale åpninger [m^2]

h_{eq} = vektet gjennomsnitt av vindushøyden for alle vegger [m]

A_t = samlet areal av omsluttende bygningsdeler [m^2]

Åpningsfaktoren har følgende grenser: $0,02 \leq O \leq 0,20$ [46]

Termisk treghet b

Faktor b beskriver termiske treghet for omsluttende bygningsdeler i branncellen og beregnes med formel [46]:

$$b = \sqrt{\rho * c * \lambda} \quad (3.19)$$

Hvor:

$b =$ termisk treghet [$\text{J}/\text{m}^2\text{s}^{1/2}\text{K}$]

$\rho =$ massetetthet [kg/m^3]

$c =$ spesifikk varmekapasitet [J/kgK]

$\lambda =$ varmekonduktivitet [W/mK]

For å ta hensyn til omhyllingsflater med forskjellige materialer og ulike faktorer i vegger, tak og gulv, brukes en rekke tilleggsformler. For utregningen av disse vises det til NS-EN 1991-1-2:2002 [46].

Termisk treghet har følgende grenser: $100 \leq b \leq 2200$ [46]

Den parametriske kurven var originalt utviklet for en standard branncelle, med termisk treghet til gjennomsnittet av mur, betong og lett-betong [43]. Ifølge Hakkarainen [43] vil den termiske tregheten for tre og gipsplater ha store avvik fra den originale termiske tregheten.

Tidsfaktorfunksjon Γ

Neste steg er å beregne Γ med bruk av formel [46]:

$$\Gamma = \left(\frac{\theta}{b}\right)^2 / \left(\frac{0,04}{1160}\right)^2 \quad (3.20)$$

Hvor:

$\Gamma =$ Tidsfaktorfunksjon [-]

Maksimumstemperatur θ_{\max}

Maksimumstemperaturen i oppvarmingsfasen beregnes etter formelen [46]:

$$\theta_g = 20 + 1325(1 - 0,324e^{-0,2t^*} - 0,204e^{-1,7t^*} - 0,472e^{-19t^*}) \quad (3.21)$$

når $t^* = t_{\max}^*$

$$t_{\text{maks}}^* = t_{\text{maks}} * \Gamma \quad (3.22)$$

$$\text{når } t_{\text{maks}} = \max[(0,2 * 10^{-3} * \frac{q_{t,d}}{0}); t_{\text{lim}}] \quad (3.23)$$

Hvor:

θ_g = temperatur [°C]

t = tid [h]

$q_{t,d}$ = dimensjonerende verdi av spesifikk brannenergi relatert til det samlede arealet av omhyllingsflaten A_t , der $q_{t,d} = q_{f,d} * (A_f/A_t)$ [MJ/m²]

Spesifikk brannenergi

Den dimensjonerende verdien av den spesifikke brannenergien relatert til overflatarealet A_f av gulvet ($q_{f,d}$) kan beregnes etter Tillegg E «Spesifikk brannenergi» [46]:

$$q_{f,d} = q_{f,k} * m * \delta_{q1} * \delta_{q2} * \delta_n \quad (3.24)$$

Hvor:

$q_{f,k}$ = den karakteristiske spesifikke brannenergien per enhet gulvareal [MJ/m²]

m = forbrenningsfaktor (tabell E.2)

δ_{q1} = faktor avhengig av brannaktiveringsrisiko basert på branncellens størrelse (tabell E.1)

δ_{q2} = faktor avhengig av brannaktiveringsrisiko basert på typen bruk av branncelle (tabell E.2)

δ_n = Faktor avhengig av de forskjellige aktive brannbekjempelsestiltakene (tabell E.4)

$$\delta_n = \prod_{i=1}^{10} \delta_{ni} \quad (3.25)$$

Det nasjonale tillegget til standarden presiserer at δ_n normalt settes lik 1, men ved brannteknisk analyse kan verdiene for δ_{ni} reduseres til 0,6 [46].

$q_{f,k}$ skal beregnes for variabel og permanent karakteristisk spesifikk brannenergi. Variabel karakteristisk spesifikk brannenergi finnes i tabell E.4 i standarden [46]. Permanent spesifikk karakteristisk brannenergi finnes ved formel [46]:

$$q_{f,k} = \frac{Q_{fi,k}}{A} \quad (3.26)$$

Hvor:

$Q_{fi,k}$ = karakteristisk brannenergi [MJ]

Temperatur-tidkurve i avkjølingsfase

NS-EN 1991-1-2:2002 beskriver tre forskjellige kurver for avkjølingsfasen av brannen [46]:

$$\theta_g = \theta_{\max} - 625 * (t^* - t_{\max}^* * x) \quad \text{for} \quad t_{\max}^* \leq 0,5 \quad (3.27)$$

$$\theta_g = \theta_{\max} - 250 * (3 - t_{\max}^*)(t^* - t_{\max}^* * x) \quad \text{for} \quad 0,5 < t_{\max}^* < 2,0 \quad (3.28)$$

$$\theta_g = \theta_{\max} - 250 * (t^* - t_{\max}^* * x) \quad \text{for} \quad t_{\max}^* \geq 2,0 \quad (3.29)$$

I avkjølingsfasen brukes følgende verdi for t_{\max}^* [46]:

$$t_{\max}^* = \left(0,2 * 10^{-3} * \frac{q_{t,d}}{\sigma}\right) * \Gamma \quad (3.30)$$

Fullstendig brannforløp

Når all data er hentet og beregninger er utført, kan en plote det fullstendige brannforløpet ved hjelp av formel (3.21) og (3.27), (3.28) eller (3.29). Dette kan for eksempel gjøres i et Excelark.

Ifølge tester gjort av Hakkarainen [43] vil gasstemperaturen som blir beskrevet i den parametriske brannkurven i NS-EN 1991-1-2:2002 ligge 300-500 °C over det reelle brannforløpet. De parametriske brannkurvene er med andre ord konservative.

Det finnes også alternative parametriske temperatur-tidkurver. Zehfuss og Hosser [47] beskriver i rapporten «*A parametric natural fire model for the structural fire design of multi-storey buildings*» en såkalt iBMB parametriske brannkurve. I forhold til kurven i NS-EN 1991-1-2:2002, vil iBMB kurven modellere en mer reel ventilasjon og varmeavgivelse [47].

4. RESULTATER

I dette kapitlet presenteres resultatene i avhandlingen.

4.1 Materialeegenskaper og eksterne faktorer som påvirker brannmotstand

I litteraturen som er funnet og ved mailkorrespondanse med plateprodusenter er resultatene i kapittel 4.1.1 og 4.1.2 blitt funnet. Resultatene i 4.1.2 gjelder for branngips som innkledning av trekonstruksjoner.

4.1.1 Materialeegenskaper

- **Densitet** - Høy densitet gir god brannmotstand [33].
- **Glassfiberforsterkning** - Bruk av glassfiber i gipskjernen gir forbedret brannmotstand [1][33][36][37][40][Vedlegg 2].
- **Vermikulitt** - Vermikulitt som tilsetningsstoff i gipskjernen øker brannmotstanden [1][33][36][39][Vedlegg 2].
- **Leire** - Bruk av leire som tilsetningsstoff i gipskjernen er brannhemmende [Vedlegg 2].
- **Diverse tilsetningsstoffer** - Ulike tilsetningsstoffer i gipskjernen øker brannmotstanden [1][33][39][42].
- **Vanninnhold** - Vanninnhold i gipsplaten forsinker den videre oppvarmingen av gipsplaten [1][33][36][39][Vedlegg 3].
- **Mikrostruktur** - Mikrostrukturen i gipsmaterialet påvirker den termiske konduktiviteten [33][41].
- **Kalsiumsulfat** - Prosentandel kalsiumsulfat i gipskjernen påvirker brannmotstanden, da kalsiumsulfat er sterkt endotermisk [42].

4.1.2 Eksterne faktorer

- **Type trevirke** - Type trevirke vil påvirke forkulling og antennelse av treet, og påvirker dermed effekten til gipsplaten som brannbeskyttelse [29][33].
- **Lagvis plassering** – Lagvis plassering av gipsplater med ulike egenskaper påvirker hvor raskt treverket bak starter å forkulle [33].
- **Innfesting** – Innfestingen av treverket mht. å motvirke krymping, forskjeller i senteravstand på stender/lekt, glipper mellom platene og avstand mellom lekt og gulvbjelke vil påvirke brannmotstanden [2][33].
- **Isolering og tomrom** – Type isolasjon og om tomrommet er isolert eller ikke, vil påvirke brannmotstanden i et trebindingsverk [1][33]
- **Festemidler** – Hullavstand, kantavstand og skruelengde til festemidlene påvirker nedfallstiden til gipsplatene [1][2][33].
- **Plassering i rommet** – Nedfallstiden for gipsplater under gulv og i himling er kortere enn for på vegger pga. gravitasjon [1].

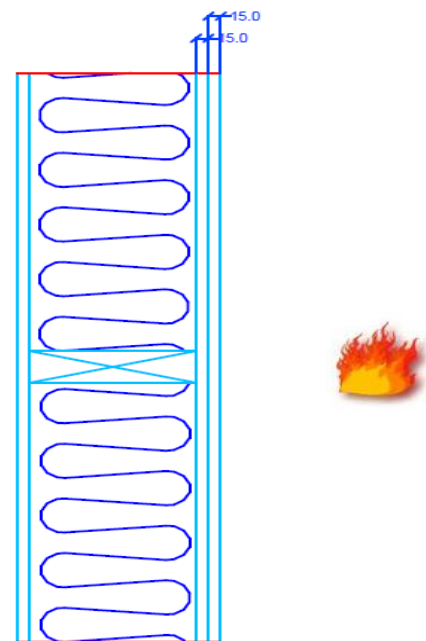
4.2 Sammenligning av metoder for dimensjonering av branngips

I dette kapitlet presenteres resultatene fra en sammenligning av ulike metoder for dimensjonering av branngips. Metodene som er med i sammenligningen er beskrevet i 3.9.2-3.9.6. De tre første metodene brukes for å beregne tid til start av forkulling. Metodene i 3.9.5-3.9.6 brukes for å finne tid med nødvendig brannmotstand.

4.2.1 Beskrivelse av trekonstruksjon

I beregningene brukes trekonstruksjonen i figur 13, som er et horisontalsnitt av en trekonstruksjon. Figuren er tegnet i AutoCAD. Konstruksjonen er en bærende bindingsverkvegg med to lag gips som brannbeskyttende kledning. Den første gipsplaten nærmest brannen i figuren er en 15 mm gipsplate type F. Innenfor ligger en 15 mm gipsplate type A. Stenderne i konstruksjonen har en senteravstand på 400 mm, mens hulrommet er isolert med steinull.

I de påfølgende delkapitlene blir det beregnet starttid til forkulling og brannmotstand med fem ulike metoder. Deretter blir det gjennomført en sammenligning av resultatene.



Figur 13: Snitt trekonstruksjon

4.2.2 NS-EN 1995-1-2:2004

Platene i konstruksjonen har ulik kvalitet (GtA og GtF), slik at platetykkelsen h_p beregnes til [30]:

$$h_p = 1,8 * 15 = 27 \text{ mm}$$

Tid til start av forkulling i trestenderen er gitt i formel 3.4 i kapittel 3.9.2 [30]:

$$t_{ch} = 2,8 * h_p - 14 = (2,8 * 27) - 14 = 61,6 \text{ min}$$

Ifølge NS 1995-1-2, tar det 61,6 min. til start av forkulling i trestenderen bak gipsplatene.

4.2.3 Improved design method av ETH Zürich

For å finne tid til forkulling av trestenderen brukes følgende formler [1]:

$$t_{ch} = \sum t_{prot,i}$$

$$t_{prot,i} = (t_{prot,0,i} * k_{pos,exp,i} * k_{pos,un exp,i} + \Delta t_i) * k_{j,i}$$

Først må en først beregne for det første laget, som er en 15 mm GtF [2]:

$$t_{prot,0,1} = 30 * \left(\frac{h_i}{15}\right)^{1,2} = 30 * \left(\frac{15}{15}\right)^{1,2} = 30 \text{ min}$$

$$k_{pos,exp,1} = 1,0 \quad (\text{ingen foregående lag})$$

$$k_{pos,un exp,1} = 1,0 \quad (\text{understøttet av gipsplate})$$

$$\Delta t_1 = 0 \quad (\text{ingen foregående lag})$$

$$k_{j,1} = 1,0 \quad (\text{understøttet av gipsplate})$$

$$t_{prot,1} = (t_{prot,0,1} * k_{pos,exp,1} * k_{pos,un exp,1} + \Delta t_1) * k_{j,1} = ((30 * 1 * 1) + 0) * 1 = 30 \text{ min}$$

Det neste laget som er en 15 mm GtA, som beregnes på samme måte [2]:

$$t_{\text{prot},0,2} = 30 * \left(\frac{h_i}{15}\right)^{1,2} = 30 * \left(\frac{15}{15}\right)^{1,2} = 30 \text{ min}$$

$$k_{\text{pos,exp},2} = 0,5 * \sqrt{\frac{\sum t_{\text{prot},2-1}}{\sqrt{t_{\text{prot},0,2}}}} = 0,5 * \sqrt{\frac{30}{30}} = 0,5$$

$$\text{(fordi } \sum t_{2-1} > \frac{t_{\text{prot},2-1}}{2} = \frac{30}{2} = 15)$$

$$k_{\text{pos,unexp},2} = 1,0 \quad \text{(understøttet av trestender)}$$

$$\Delta t_2 = 0,22 * t_{\text{prot},2-1} - 0,1 * t_{\text{prot},0,2} + 4,7 = (0,22 * 30) - (0,1 * 30) + 4,7 = 8,3 \text{ min}$$

$$\text{(fordi } t_{0,2} = 30 \geq 12 \text{ min)}$$

$$k_{j,2} = 1,0 \quad \text{(understøttet av trestender)}$$

$$t_{\text{prot},2} = (t_{\text{prot},0,2} * k_{\text{pos,exp},2} * k_{\text{pos,unexp},2} + \Delta t_2) * k_{j,2} = (30 * 0,5 * 1 + 8,3) * 1 = 23,3 \text{ min}$$

$$t_{ch} = \sum t_{\text{prot},i} = 30 \text{ min} + 23,3 \text{ min} = 53,3 \text{ min}$$

Ifølge Improved design method, tar det 53,3 min. til start av forkulling i trestenderen bak gipsplatene.

4.2.4 Metode basert på testresultater fra database

For å finne tid til forkulling i trestenderen henter man formelen i tabell 11 for to lag gipsplater, hvor den ene platen er GtA og den andre er GtF. Platetykkelsen er 15 mm, mens den totale platetykkelsen er 30 mm. Dette er innenfor gyldighetsområdet og formelen kan brukes. Følgende utregning gjelder [1][2]:

$$t_{ch} = \min \left\{ \begin{array}{l} 2,1h_{p,tot} - 7 \\ 3,5h_p + 7 \end{array} \right. = \min \left\{ \begin{array}{l} (2,1 * 30) - 7 = 56 \\ (3,5 * 15) + 7 = 59,5 \end{array} \right. = 56 \text{ min}$$

Ifølge metoden basert på testresultater fra database, tar det 56 min. til start av forkulling i trestenderen bak gipsplatene.

4.2.5 Component additive method

Denne metoden er beregnet for gipsplater type X. Det antas i beregningene at gipsplater type X og type F har tilsvarende brannmotstand. Metoden beskriver ikke brannmotstand for gipsplater type A. Det antas i beregningen at en 15 mm GtA vil gi 20 min i bidrag til brannmotstanden.

Med trekonstruksjonen som er beskrevet i kapittel 4.2.1 får man følgende brannmotstand [33]:

Ett lag GtF 15 mm – 40 min

Ett lag GtA 15 mm – 20 min

Senteravstand stendere, 400 mm – 20 min

Steinull, isolasjon – 15 min

Totalt – 95 min

Ifølge metoden Component additive method, holder trekonstruksjonen med gipsplater 95 min mht. nødvendig brannmotstand.

4.2.6 Tabellverdier fra New Zealand og Nord-Amerika

Tabellverdiene gir nødvendig platetykkelse for å oppnå krav til brannmotstand. Metoden forutsetter branngipsplater. Antar derfor at en GtA har halvparten av brannmotstanden til en GtF. Trekonstruksjonen i 4.2.1 får følgende brannmotstand [33]:

På grunn av antakelsen om at en GtA har halvparten av brannmotstanden til en GtF, regner en om den effektive platetykkelsen som om den var en GtF, slik at $15 \text{ mm GtA} = 7,5 \text{ mm GtF}$.

Effektiv platetykkelse mht. brannmotstand: $15 \text{ mm} + 7,5 \text{ mm} = 22,5 \text{ mm}$

Tabell 14 i kapittel 3.9.3 gir brannmotstanden for trestenderveggen.

Basert på verdier fra New Zealand får man en brannmotstand på tilnærmet 105 min.

Basert på verdier fra Nord-Amerika får man en brannmotstand på tilnærmet 82,5 min.

Ifølge metoden med tabellverdier, tar det 82,5 og 105 min til trekonstruksjonen med gipsplater mister nødvendig brannmotstand.

4.2.7 Sammenligning

Tabell 16: Sammenligning av tid til start av forkulling

| Metode | Tid til start forkulling (t_{ch}) [min] |
|--|---|
| NS-EN 1995-1-2:2004 | 61,6 |
| Improved design method av ETH Zürich | 53,3 |
| Metode basert på testresultater fra database | 56,0 |

Tabell 16 viser beregningene for tid til start av forkulling av trestenderen i konstruksjonen med to lag gips (GtA + GtF), som er beskrevet i kapittel 3.9.

Resultatene viser at det er en spredning på opp mot 8,3 minutter mellom de ulike metodene og at metoden til NS-EN 1995-1-2:2004 gir lengst tid til start av forkulling i trestenderen.

Tabell 17: Sammenligning av brannmotstand

| Metode | Brannmotstand [min] |
|----------------------------|---------------------|
| Component additive method | 95,0 |
| Tabellverdi – New Zealand | 105,0 |
| Tabellverdi – Nord-Amerika | 82,5 |

Tabell 17 viser beregningene for tid trekonstruksjonen opprettholder tilfredsstillende brannmotstand, etter beregningsmetodene i kapittel 3.9.

Resultatene viser at det er en spredning opp mot 22,5 minutter mellom de ulike metodene og at metoden med tabellverdier fra New Zealand gir lengst tid med nødvendig brannmotstand.

4.3 Risikovurdering av branngips i et trehus i brannklasse 3

I dette kapittelet blir det gjennomført en risikovurdering med bruk av NS 3901:2012 av brannmotstanden til en bærende trestendervegg innkledd med branngips. Prosessen vil følge beskrivelsen i kapittel 3.10. De parametriske kurvene vil bli beregnet som beskrivelsen i kapittel 3.11.

4.3.1 Definere rammebetingelser

Følgende rammebetingelser legges til grunn for risikovurderingen:

Eksterne rammebetingelser

- Plan- og bygningsloven, gyldig fra 10.8.2012 [23]
- Brann og eksplosjonsvernloven, gyldig fra 10.6.2009 [24]
- Forskrift om saksbehandling, ansvar og kontroll i byggesaker, gyldig fra 1.7.2011 [8]
- Forskrift om tekniske krav til byggverk med veiledning, gyldig fra 1.7.2010 [7]
- NS-EN 520:2004 «Gipsplater – definisjoner, krav og prøvingsmetoder», gyldig fra 2009 [37]
- NS-EN 1991-1-2:2002 «Allmenne laster - Laster på konstruksjoner ved brann», gyldig fra 2008 [46]
- NS-EN 1992-1-2:2004 «Prosjektering av betongkonstruksjoner – Brannteknisk dimensjonering», gyldig fra 2010 [48]
- NS-EN 1995-1-2:2004 «Prosjektering av trekonstruksjoner – Brannteknisk dimensjonering», gyldig fra 2010 [30]

Interne rammebetingelser

- Prosjekteier ønsker å vurdere mulighetene for å bygge det bærende hovedsystemet i tre.
- Langsiktig mål om en miljøvennlig profil for bedriften til prosjekteier.

4.3.2 Mandat og organisering

Herman Knoop er engasjert av NTNU som leder for gjennomføringen av en risikovurdering av et fem etasjes bolighus, som er bygd opp av volumseksjoner/moduler. Risikovurderingen skal gjennomføres for å vurdere mulighetene for å bruke et bærende hovedsystem i tre, med bruk av gipsplater som passiv brannsikring. Nærmere bestemt skal risikovurderingen vurdere om en trestendervegg kan oppnå brannmotstand REI 90 i det bærende hovedsystemet. Den branntekniske dimensjoneringen gjennomføres for en enkelt bygningsdel, fordi den branntekniske dimensjoneringen av bærende og brannskillende konstruksjoner som regel utføres på elementnivå [49]. Risikovurderingen skal gjennomføres som en komparativ

analyse. Målsettingen med risikovurderingen er å dokumentere at en bærende trestendervegg, er like brannsikker som en bærende REI 90 betongvegg, hvis en har tatt de nødvendige forhåndsreglene. Blant annet med bruk av både aktiv og passiv brannsikring.

Analysebyggverket er et boligbygg i tre med fem etasjer. Bygget består av ti identiske leiligheter på 72 kvadratmeter. I henhold til VTEK blir bygget klassifisert til risikoklasse 4 og brannklasse 3 [9]. Analysebyggverket har et bærende hovedsystem i tre. Analysebyggverket skal hovedsakelig bruke sprinkleranlegg og gipsplater, for å oppfylle kravene til brannsikkerhet.

Alle gipsplatene som skal brukes skal være klassifisert etter NS-EN 520:2004 [37]. TEK10 krever at det bærende hovedsystemet i et bygg i BKL3 skal dimensjoneres for å opprettholde tilfredsstillende bæreevne og stabilitet igjennom et fullstendig brannforløp [10]. Modellering av et fullstendig brannforløp er angitt i NS-EN 1991-1-2:2002 [46]. Det fullstendige brannforløpet i denne risikovurderingen modelleres etter Tillegg A «*Parametriske temperatur-tidkurver*» [46].

4.3.3 Problem- og målformulering

Bakgrunnen for risikovurderingen er at VTEK ikke gir noen preaksepterte løsninger for et bærende hovedsystem i tre i BKL 3. Den branntekniske prosjekteringen må dermed gjennomføres som analytisk prosjektering, ved at funksjonskravene i TEK10 blir verifisert ved analyse.

Funksjonskravet som skal verifiseres er beskrevet i TEK10 § 11-4, punkt 3 [10]:

«Bærende hovedsystem i byggverk i brannklasse 3 og 4 skal dimensjoneres for å opprettholde tilfredsstillende bæreevne og stabilitet gjennom et fullstendig brannforløp.»

4.3.4 Valg av analysemodell

I denne risikovurderingen blir det gjennomført en komparativ analyse. Det er valgt en komparativ analyse, fordi det finnes lite tilgjengelig data på gipsplater. Et slikt datagrunnlag er nødvendig for å kunne gjennomføre en ren risikoanalyse. Risikovurderingen følger kapittel syv i NS 3901:2012 [4].

4.3.5 Valg av analysemetoder, beslutningskriterier, forenklinger og datagrunnlag

Risikoakseptkriterium

- Trestenderveggene i det bærende hovedsystemet skal tilfredsstillende minimum brannmotstand REI 90, tilsvarende en R 90 preakseptert bærende betongvegg, pluss brannskillende funksjon EI 90.

Analysemetoder

Risikovurderingen skal gjennomføres kvalitativt, med unntak av en kvantitativ analyse av bæreevne (R), integritet (E) og isolasjon (I) med bruk av aktuelle metoder i Norsk Standard-Euro Norm, som vist i tabellen under.

Tabell 18: Underlagsmateriale for beregning av brannmotstand i konstruksjonsdel

| Kvantitativ analyse av brannmotstand |
|---|
| NS-EN 1991-1-2:2002 Tillegg A – “ <i>Parametriske temperatur tid-kurver</i> ” [46] |
| NS-EN 1995-1-2:2004 Annex C – “ <i>Load-bearing floor joists and wall studs in assemblies whose cavities are completely filled with insulation</i> ” [30] |
| NS-EN 1995-1-2:2004 Annex E – “ <i>Analysis of the separating function of wall and floor assemblies</i> ”[30] |

Beslutningskriterier

Hvis det verifiseres at et bærende hovedsystem i tre har lik eller høyere brannmotstand enn et bærende hovedsystem i betong, skal det velges et bærende hovedsystem i tre.

Forenklinger

- Det blir ikke gjennomført kapasitetsberegninger for aksialkrefter og eventuelle horisontallaster på det gjenværende tretverrsnittet, når dette er beregninger som vanligvis gjennomføres av rådgivende ingeniør bygg (RIB) og ikke av rådgivende ingeniør brann (RIBr). I risikovurderingen blir det antatt at hvis det resterende upåvirkede tverrsnittet er $\geq 90\%$ av det opprinnelige tverrsnittet, opprettholder konstruksjonen sin bæring og stabilitet. I denne avhandlingen er et upåvirket tverrsnitt definert til gjenværende tverrsnitt etter forkulling, minus lag med null styrke og stabilitet (d_0).
- Hver boenhet/leilighet er en egen branncelle. Ved beregning av parametriske temperatur tid-kurver skal en analysere en enkelt branncelle. I denne risikovurderingen

forenkles beregningen av parametriske temperatur tid-kurver, ved at en kun analyserer et rom i branncellen, dvs. stuen.

- NS-EN 1995-1-2:2004 Annex C [30] gjelder for analyser med branneksponeering opp til 60 minutter. Det antas i denne risikovurderingen at Annex C gjelder for analyser gjennom et fullstendig brannforløp, da det i henhold til SP [2] er gjennomført tester med denne modellen med en branneksponeering over 90 minutter.
- NS-EN 1995-1-2:2005 Annex C [30] gjelder for analyser med standard branneksponeering (ISO 834-brann). Den antas i denne risikovurderingen at en parametrisk brannkurve er gyldig, hvis kurvene viser tilnærmet lik temperaturutvikling som en ISO 834-kurve.
- NS-EN 1995-1-2:2004 Annex E del 2.2 [30] inneholder verdier for å verifisere brannmotstand opp til 60 minutter. Det antas i denne risikovurderingen at verdiene gjelder for å verifisere brannmotstand over 60 minutter.
- Ved utløsning av sprinkleranlegget vil ikke brannforløpet følge den parametriske brannkurven i NS 1991-1-2:2002. Det antas derfor sprinklersvikt i beregning av brannkurven i avkjølingsfasen. I oppvarmingsfasen vil verdien δ_n reduseres til 0,6 og 0,8 for å redusere brannenergien pga. automatisk slukkeanlegg.

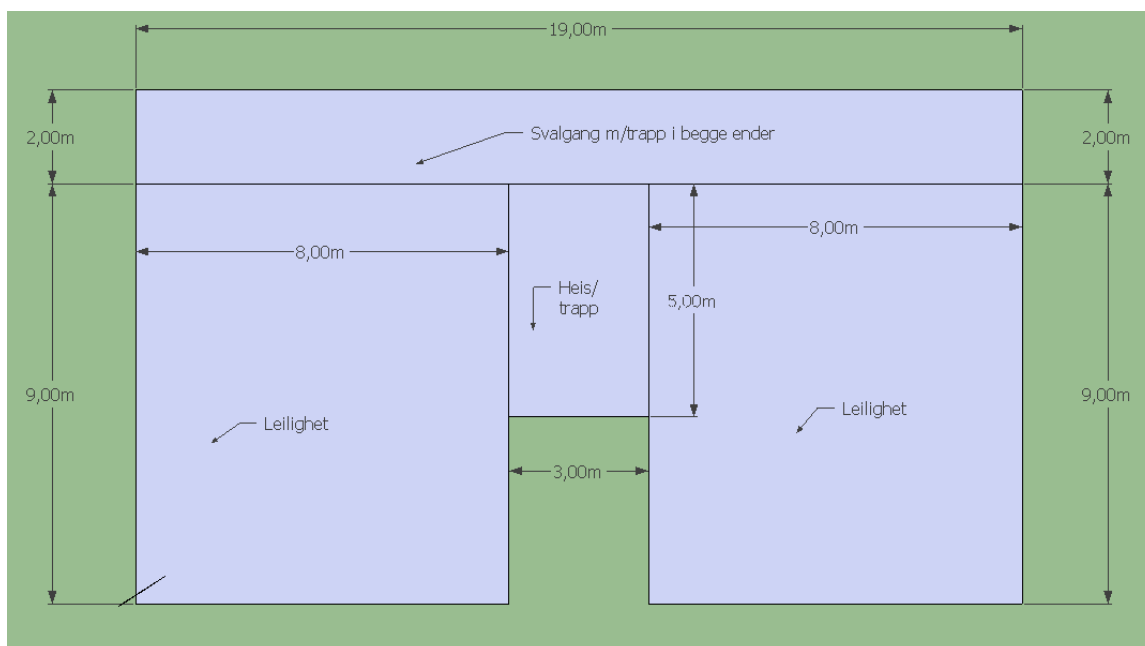
Datagrunnlag

Tabell 19: Termiske egenskaper

| Verdi | Gips | Tre |
|--|-----------|-----------|
| Densitet [kg/m^3] | 963 [39] | 500 [34] |
| Spesifikk varmekapasitet [J/kgK] | 743 [39] | 1900 [33] |
| Termisk konduktivitet [W/mK] | 0,25 [39] | 0,12 [33] |
| Kritisk temperatur forkulling [$^{\circ}\text{C}$] | - | 300 [30] |
| Forkullingsrate [mm/min] | - | 0,65 [30] |
| Lag med null styrke og stivhet [mm] | - | 7 [30] |

4.3.6 Beskrivelse av analysebyggverk og ev. referansebyggverk

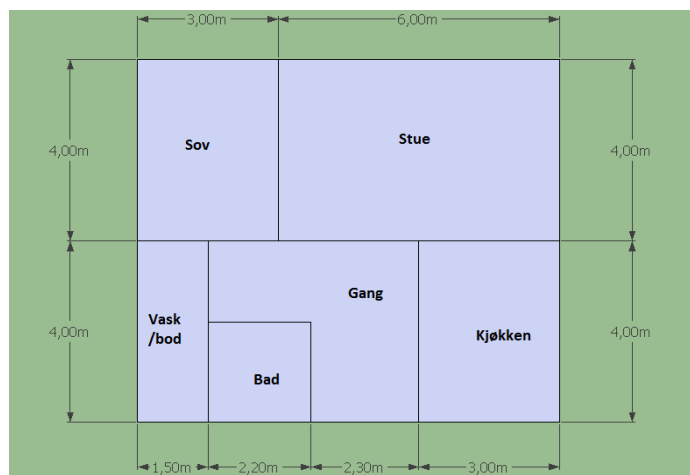
Analysebyggverk - Analysebyggverket er et nytt bolighus med ti leiligheter, fordelt på fem tellende etasjer. Det er to leiligheter i hver etasje (se figur 14).



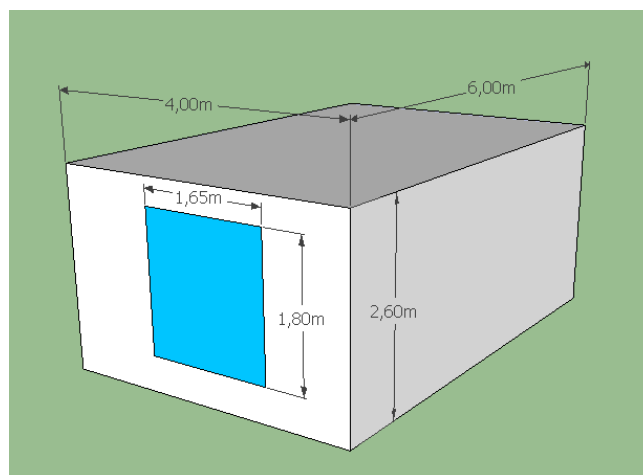
Figur 14: Plantegning 1 til 5 etasje

Alle leilighetene er identiske og består av seks rom (se figur 15), som til sammen utgjør 72 m². Rommene er stue, soverom, kjøkken, vaskerom/bod, bad og gang/entre. Romhøyden er 2,6 m i alle rom. Mellom leilighetene er det en trapp, en heis, samt hovedinngangen i første etasje. I dette rommet finner en også inngangen til gang/entre i leilighetene. På baksiden av bygget er det en svalgang med en trapp i begge ender, for å sikre gode rømningsmuligheter ved en eventuell brann.

I henhold til VTEK klassifiseres boligbygget til risikoklasse 4 og brannklasse 3 [9]. Alle plan er like og klassifiseres til samme risikoklasse og brannklasse.



Figur 15: Plantegning leilighet



Figur 16: Analyseobjekt – stue i leilighet

Figur 16 viser analyseobjektet i beregningene, som er stuen i leilighetene. Stuen har et vindu med et areal på 2,97 m².

Tabell 20: Areal og virksomhet

| Etasje | Areal | Virksomhet | Tellende etasje |
|--------------------|------------------------------|------------|-----------------|
| Plan 1 | Ca. 197 m ² | Bolig | Ja |
| Plan 2 | Ca. 197 m ² | Bolig | Ja |
| Plan 3 | Ca. 197 m ² | Bolig | Ja |
| Plan 4 | Ca. 197 m ² | Bolig | Ja |
| Plan 5 | Ca. 197 m ² | Bolig | Ja |
| Totalt bygg | Ca. 985 m² | - | - |

For beregning av personantall antas det 20 m² per person, når det ikke er oppgitt persontetthet for boliger i VTEK.

Tabell 21: Personbelastning

| Etasje | Dimensjonerende persontall |
|--------------------|----------------------------|
| Plan 1 | 10 personer |
| Plan 2 | 10 personer |
| Plan 3 | 10 personer |
| Plan 4 | 10 personer |
| Plan 5 | 10 personer |
| Totalt bygg | 50 personer |

Analysebyggverket skal ha et bærende hovedsystem i tre og skal være satt sammen av moduler. Hver leilighet vil bestå av fire moduler. Hver modul skal ha bærende bindingsverkvegger med brannmotstand REI 90. Veggene skal være bygd opp med trestenderverk og skal være innkledd med gipsplater. Etasjeskillene skal være i tre med gulvbjelker. Himling skal bli innkledd med gipsplater og det skal legges parkett på gulv.

Brannvesenet er lokalisert ca. 500 m unna bygget. Innsatstiden forutsettes å være mindre enn 10 min.

Den dimensjonerende spesifikke brannenergien relatert til det samlede arealet av omhyllingsflaten i bygningen beregnes etter NS-EN 1991-1-2:2002 Tillegg E [46], som blir beskrevet i kapittel 3.11.

$$q_{f,d} = q_{f,k} * m * \delta_{q1} * \delta_{q2} * \delta_n \quad [46]$$

Variabel spesifikk karakteristisk brannenergi hentes fra tabell E.4 i standarden [46]:

$$q_{f,k} = 948 \text{ MJ/m}^2$$

Permanent spesifikk karakteristisk brannenergi beregnes etter formel 3.26 i kapittel 3.11.1.

$$q_{f,k} = \frac{Q_{f,i,k}}{A} \quad [46]$$

$$Q_{f,i,k} = \sum M_{k,i} * H_{ui} * \Psi_i \quad [46]$$

Antar at summen av $M_{k,i}$ er 1750 kg trevirke i branncellen. Gipsplatene forkuller ikke og tas ikke med i beregningene.

$$H_{ui} = H_{uo} * (1 - 0,01 * u) - 0,025 * u \quad [46]$$

H_{uo} finnes i tabell E.3 i standarden [46]. Antar fuktinnhold $u = 16 \%$.

$$H_{ui} = 17,5 * (1 - (0,01 * 16)) - (0,025 * 16) = 14,3 \text{ MJ/kg}$$

Antar faktor for vurdering av beskyttet brannenergi $\Psi_i = 0,2$.

$$Q_{f,i,k} = 1750 \text{ kg} * \frac{14,3 \text{ MJ}}{\text{kg}} * 0,2 = 5005 \text{ MJ}$$

$$q_{f,k} = \frac{5005 \text{ MJ}}{24 \text{ m}^2} = 208,54 \text{ MJ/m}^2$$

$$q_{f,d} = (948 + 208,54) * 1 * 1,1 * 1 * 1 = 1272,19 \text{ MJ/m}^2$$

$$q_{t,d} = 1272,19 \text{ MJ/m}^2 * (24/100) = 305,32 \text{ MJ/m}^2$$

Den dimensjonerende spesifikke brannenergien ($q_{t,d}$) er beregnet til 305,32 MJ/m².

Boligbygget skal utformes med automatisk brannsløkkeanlegg i henhold til VTEK § 11-12, første ledd, bokstav a [9].

Referansebyggverk – Referansebyggverket skal bygges opp med et bærende hovedsystem i betong, i samsvar med VTEK sine preaksepterte løsninger. Her skal boligbygget bygges opp med prefabrikkerte betongdekker understøttet av betongsøyler og bærende betongvegger med brannmotstand REI 90. Himlingen skal være eksponert betong. Gulvet skal være et lydisolerende, lett, flytende golv (25 mm trinnlydplate, 22 mm sponplate og 14 mm parkett) for å overholde lydkravene [50].

4.3.7 Fareidentifikasjon, analyse av årsaker og sannsynlighet

Følgende farer er identifisert i analysebyggverket, som ikke finnes i referansebyggverket:

- Økt brannfare fordi det bærende hovedsystemet er bygd opp av brennbare materialer. Dette gjelder både i bygge- og bruks-fasen (F.eks. ved varmearbeid under oppføring av bærende trekonstruksjoner).
- Økt brannbelastning og smittefare ved bruk av tre i det bærende hovedsystemet.
- Kritisk temperatur ved 300 °C (tre forkuller ved $T \geq 300$ °C).
- Trekonstruksjoner med gipsplater er sårbare for dårlig detaljering og utførelse (F.eks. glipper mellom plater og dårlig tetting).
- Trekonstruksjoner med gipsplater er mindre robuste (F.eks. beboer kan ta hull i en vegg eller bygge om, som kan svekke brannmotstanden)

Det er ikke identifisert noen årsakskjeder til brannforløp i analysebyggverket, som ikke finnes i referansebyggverket.

4.3.8 Beskrivelse av brannscenarioer

I denne risikovurderingen blir de ulike brannscenarioene beskrevet i form av parametriske temperatur-tidkurver. Dette detaljeringnivået er valgt, fordi det er i samsvar med risikoanalysens formål, som er å vurdere om en trestendervegg opprettholder bæring og stabilitet gjennom et fullstendig brannforløp.

NS 3901:2012 beskriver fire obligatoriske brannscenarioer [9], som beskrevet i kapittel 3.10.9 i avhandlingen. Brannscenarioet i et rom som normalt er uten personer utelates, da bygget er utformet med et heldekkende brannslukkeanlegg. Brannscenarioet som utvikler seg langsomt utelates også, fordi bygget er utformet med et heldekkende brannalarmanlegg. Det er kun beregnet parametriske temperatur tid-kurver for et bærende hovedsystem i tre, fordi det kun skal gjennomføres beregninger for analysebyggverket. For referansebyggverket finner en tabellverdier for dimensjonene til REI 90 betongvegger i NS-EN 1992-1-2:2002 [48]. VTEK [9] angir krav til R 90. Derfor blir det antatt at Direktoratet for byggkvalitet (DiBK) har vurdert et fullstendig brannforløp til denne tiden for et bærende hovedsystem i stål/betong.

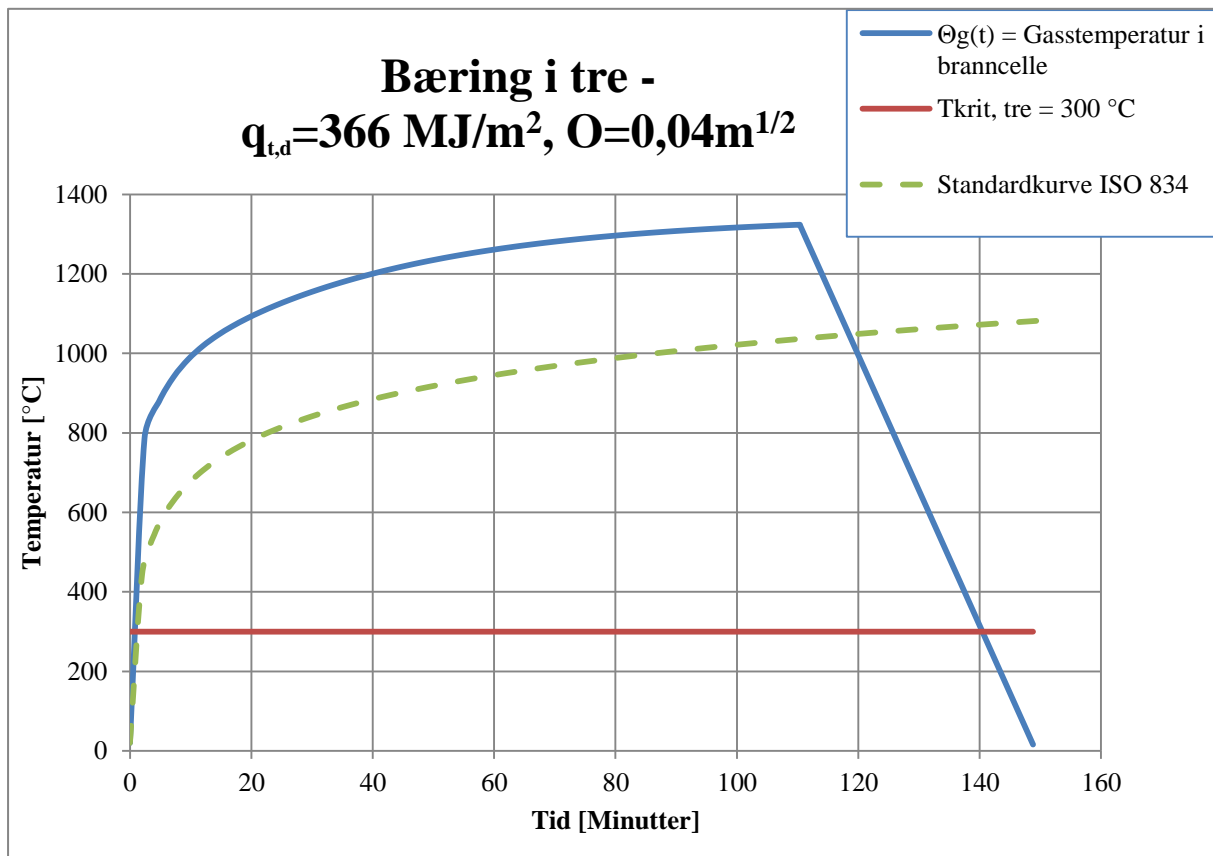
Beregningen av de parametriske kurvene er gjort etter beskrivelsen i kapittel 3.11.1 i avhandlingen. Standard temperatur-tidkurven (ISO 834) i figur 17-19 er beregnet etter NS-EN 1991-1-2:2004 kapittel 3.2.1 (1) [48]. Verdiene for beregningene er vist i vedlegg 4.

Brannscenario 1: Verste troverdige brannscenario

I det verste troverdige brannscenarioet er den dimensjonerende spesifikke brannenergien relatert til det samlede arealet av omhyllingsflaten i bygningen økt med 20 %.

$$q_{t,d} = 305,32 * 1,2 = 366,38 \text{ MJ/m}^2$$

I tillegg er det antatt rask brannutvikling ved beregning av den parametriske temperatur-tidkurven. Ifølge studier gjort av Bukowski [51] har et automatisk slokkesystem en pålitelighet på 95-97 %. I studier gjennomført av NFPA [52] har et automatisk slokkesystem en pålitelighet på 81-99,5 %. Ifølge boken «*Fire safety in timber buildings*»[2] hevder forsikringsselskaper at en sprinkler har en pålitelighet på 99 %. Da verdiene for pålitelighet er ned mot 81 % regnes det med sprinklersvikt, og avkjølingsfasen følger utregningen av den parametriske temperatur-tidkurven i NS-EN 1991-1-2:2002 [46].



Figur 17: Brannscenario 1 - Verste troverdige brannscenario

Figur 17 viser tre kurver. Den blå kurven viser temperaturutviklingen i branncellen (stuen) for det verste troverdige brannscenarioet. Den røde kurven viser den kritiske grensen for forkulling av tre på 300 °C. Den grønne stiplede kurven viser en standard temperatur-tidkurve (ISO 834).

Brannscenario 2: Representativt brannscenario 1

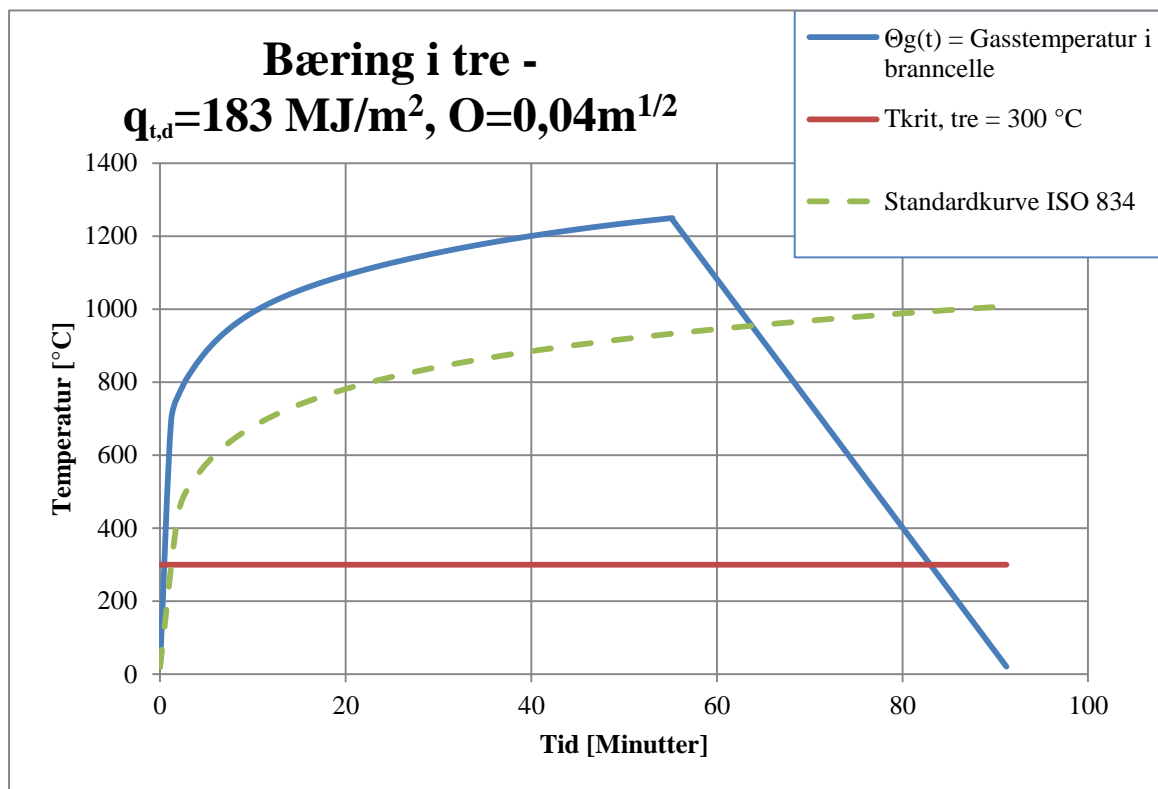
For dette brannscenarioet er den dimensjonerende spesifikke brannenergien relatert til det samlede arealet av omhyllingsflaten i bygningen senket til 183,19 MJ/m².

$$q_{f,d} = q_{f,k} * m * \delta_{q1} * \delta_{q2} * \delta_n \quad [46]$$

$$q_{f,d} = (948 \text{ MJ/m}^2 + 208,54 \text{ MJ/m}^2) * 1 * 1,1 * 1 * 0,6 = 763,31 \text{ MJ/m}^2$$

$$q_{t,d} = 763,31 \text{ MJ/m}^2 * (24/100) = 183,19 \text{ MJ/m}^2$$

Grunnen til dette er at faktor avhengig av aktive brannsikringstiltak (δ_n) i NS-EN 1991-1-2:2002 Tillegg E er senket til 0,6, fordi en antar de beste aktive brannsikringstiltakene. I avkjølingsfasen regner en med sprinklersvikt og kurven følger utregningen av den parametriske temperatur-tidkurven i NS-EN 1991-1-2:2002 [46].



Figur 18: Brannscenario 2 - Representativt brannscenario 1

Figur 18 viser tre kurver. Den blå kurven viser temperaturutviklingen i branncellen (stuen) for det første representative brannscenarioet. Den røde kurven viser den kritiske grensen for forkulling av tre på 300 °C. Den grønne stiplede kurven viser en standard temperatur-tidkurve (ISO 834).

Brannscenario 3: Representativt brannscenario 2

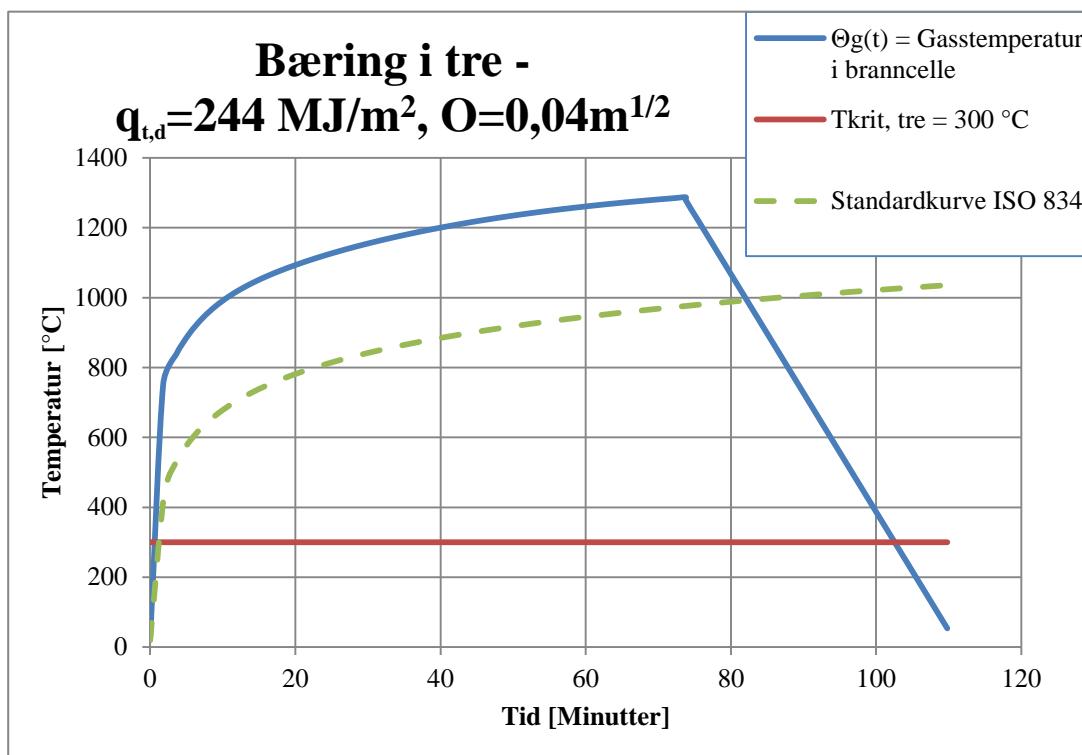
For dette brannscenarioet er den dimensjonerende spesifikke brannenergien relatert til det samlede arealet av omhyllingsflaten i bygningen senket til 200 MJ/m².

$$q_{f,d} = q_{f,k} * m * \delta_{q1} * \delta_{q2} * \delta_n \quad [46]$$

$$q_{f,d} = 948 \text{ MJ/m}^2 * 1 * 1 * 1 * 0,8 = 834,24 \text{ MJ/m}^2$$

$$q_{t,d} = 625,68 \text{ MJ/m}^2 * (24/100) = 200,21 \text{ MJ/m}^2$$

Grunnen til dette er at faktor avhengig av aktive brannsikringstiltak (δ_n) i NS-EN 1991-1-2:2002 Tillegg E er senket til 0,8, fordi en antar gode aktive brannsikringstiltak. I avkjølingsfasen regner en med sprinklersvikt og kurven følger utregningen av den parametriske temperatur-tidkurven i NS-EN 1991-1-2:2002 [46].



Figur 19: Brannscenario 3 - Representativt brannscenario 2

Figur 19 viser tre kurver. Den blå kurven viser temperaturutviklingen i branncellen (stuen) for det andre representative brannscenarioet. Den røde kurven viser den kritiske grensen for forkulling av tre på 300 °C. Den grønne stiplede kurven viser en standard temperatur-tid kurve (ISO 834).

4.3.9 Analyse av konsekvenser

Konsekvensene av brannforløpene som er beskrevet i parametriske temperatur tid-kurver er redusert bærende (R) og brannskillende funksjon (EI) i det bærende hovedsystemet.

For betong vil armeringsjernet miste ca. halvparten av sin styrke ved 500 °C som blir kritisk temperatur [33]. Betongveggen har også kritisk temperatur for trykk som vist i tabeller i NS-

EN 1992-1-2:2004 «*Prosjektering av betongkonstruksjoner – Brannteknisk dimensjonering*» [48]. For tre vil tverrsnittet starte å forkulle ved 300 °C [30]. Det er altså en vesentlig forskjell i hvordan materialstyrken til tre og betong utvikler seg ved en brann. For en betongkonstruksjon i en brann vil materialstyrken reduseres over tid, mens brannbelastningen vil være konstant [33]. For en trekonstruksjon i en brann vil materialstyrken være konstant, mens brannbelastningen vil øke over tid pga. et redusert tverrsnitt [33]. De syv første mm av tverrsnittet under det forkullede laget vil ha ingen styrke igjen i henhold til NS-EN 1995-1-2:2004 [30].

Veggene i analysen skal dimensjoneres mot ensidig brannpåkjenning. Noen av veggene i analysebyggverket vil være utsatt for tosidig brannpåkjenning, men det vurderes ikke i denne risikovurderingen.

Betongvegg REI 90 A2-s1,d0 [A90]

En R 90 betongvegg er en preakseptert løsning for det bærende hovedsystemet i henhold til VTEK [9]. Tabellverdier for ulike betongvegger kan hentes rett fra standarden NS-EN 1992-1-2:2004 «*Prosjektering av betongkonstruksjoner – Brannteknisk dimensjonering*» [48].

Minimum dimensjoner for en bærende REI 90 armert betongvegg er beskrevet i tabell 5.4 i standarden [48].

Antar reduksjonsfaktor, $\mu_{fi} = 0,7$.

Betongveggen må dermed minimum ha veggtykkelse 140 mm og overdekning på 35 mm.

Trestendervegg - REI 90 [B90]

Trestenderveggen i analysebyggverket er bygd opp som vist i tabell 22.

Tabell 22: Oppbygning av trestendervegg

| Bærende trekonstruksjon | |
|-------------------------|--------------------------|
| Type | Dimensjon |
| Stenderverk (limtre) | 48 mm*248 mm, C/C 600 mm |
| Steinull | 248 mm |
| Festemiddel til plate | 40+48+70 = 168 mm |
| Gipsplate, type A | 13 mm |
| Gipsplate, type F | 15+15 = 30 mm |

Brannscenario 1: Verste troverdige brannscenario

Betongvegg REI 90 A2-s1,d0 [A90]

Den bærende betongveggen opprettholder brannmotstand REI 90, med veggtykkelse 140 mm og overdekning på 35 mm [48].

Trestendervegg - REI 90 [B90]

Påvisning av bærende funksjon (R):

Påvisning av bærende funksjon for en bærende trestendervegg kan gjennomføres ved bruk av NS-EN 1995-1-2:2004 Annex C «*Load-bearing floor joists and wall studs in assemblies whose cavities are completely filled with insulation*» [30].

Starttid til forkulling i stender:

Det er ikke angitt regneregler for tre lag med gipsplater. Beregner for 2*15mm GtF og antar at et lag GtA gir 10 min i bidrag til å forsinke forkullingen.

$$t_{ch} = 2,8h_p - 14 \quad [30]$$

$$h_p = (1,8 * 15) = 27 \text{ mm}$$

$$t_{ch} = (2,8 * 27) - 14 = 61,60 \text{ min}$$

$$t_{ch} = 61,6 \text{ min} + 10 \text{ min} = 71,60 \text{ min}$$

Nedfallstid pga. festemidler:

Nedfallstiden for festemidler beregnes for alle tre lagene med $h_p = 43 \text{ mm}$.

$$t_f = t_{ch} + \frac{I_f - I_{a,min} - h_p}{k_s * k_2 * k_n * k_j * \beta_0} \quad [30]$$

$$k_2 = 1,05 - 0,0073 h_p \quad [30]$$

$$k_2 = 1,05 - (0,0073 * 43) = 0,7361$$

$$t_f = 71,6 + \frac{168 - 27 - 43}{1,3 * 0,7361 * 1,5 * 1 * 0,65} = 176,6 \text{ min}$$

Nedfallstid pga. termomekaniske egenskaper:

Utrekning for dette er ikke beskrevet i standarden. Velger å bruke konservative verdier fra SP, basert på testresultater (se kapittel 3.9.4). Det er ikke angitt verdier for tre lag, men bruker verdien for to lag, dvs. GtF + GtF (se tabell 11). Verdiene forutsetter de dårligste platene som er klassifisert til en gipsplate type F i henhold til NS-EN 520:2004, som vist i tabell 10 i rapporten «*Gypsum plasterboards used as fire protection – Analysis of a database*» [1]. Antar at et lag GtA gir 10 min forsinkelse på nedfallstiden.

Lag 1-2 – GtF-GtF: $4h_{p,tot} - 40 = (4 \cdot 30) - 40 = 80$ min

Lag 3 – GtA: 10 min

Totalt: 90 min

$$\beta_n = k_s * k_2 * k_n * \beta_o \quad \text{for } t_{ch} \leq t \leq t_f \quad [30]$$

$$\beta_n = 1,3 * 0,7361 * 1,5 * 0,65 = 0,93 \text{ mm/min}$$

$$\beta_n = k_s * k_3 * k_n * \beta_o \quad \text{for } t \geq t_f \quad [30]$$

$$\beta_n = 1,3 * ((0,036 * 90) + 1) * 1,5 * 0,65 = 5,37 \text{ mm/min}$$

Parametrisk temperatur tid-kurve:

Den parametriske temperatur tid-kurven for brannscenarioet er vist i figur 17. Det totale brannforløpet varer i 149 minutter. Forkulling i treet skjer ved temperaturer over 300 °C. Temperaturen er over 300 °C i 137 minutter.

Forkullingsdybden i perioden før kledningen faller ned er gitt ved [30]:

$$d_{char,n} = \beta_n * t \quad [30]$$

$$d_1 = 0,93 \text{ mm/min} * (90 \text{ min} - 71,60 \text{ min}) = 17,11 \text{ mm}$$

Forkulling etter nedfall er gitt ved:

$$d_2 = 5,37 \text{ mm/min} * (137 \text{ min} - 90 \text{ min}) = 252,39 \text{ mm} > 248 \text{ mm}$$

Hele tverrsnittet er forkullet ved et fullstendig brannforløp. Trestenderveggen opprettholder ikke sin bærende kapasitet etter et fullstendig brannforløp med verste troverdige brannscenario.

En kan likevel vurdere om trestenderveggen opprettholder bæring i 90 minutter (R 90).

Forkullingsdybden i perioden før kledningen faller ned er gitt ved:

$$d_1 = 0,93 \text{ mm/min} * (90 \text{ min} - 71,60 \text{ min}) = 17,11 \text{ mm}$$

Platene faller ned ved $t \geq 90$ minutter, så forkullingen etter nedfall neglisjeres.

Gjenværende tverrsnitt etter 90 minutters branneksporing er $48 * 230,89 \text{ mm}^2$. Gjenværende upåvirkede tverrsnitt er $48 * 223,89 \text{ mm}^2$ som tilsvarer 90,27 % av originalt stendertverrsnitt.

Trestenderveggen opprettholder sin bærende kapasitet etter en 90 minutters branneksporing.

Påvisning av brannskillende funksjon – EI 90

Påvisning av brannskillende funksjon for en bærende trestendervegg kan gjennomføres ved bruk av NS-EN 1995-1-2:2004 Annex E - «*Analysis of the separating function of a wall and floor assemblies*» [30].

$$t_{ins} \geq 149 \text{ minutter}$$

$$t_{ins} = \sum_i t_{ins,0,i} * k_{pos} * k_j \quad [30]$$

I denne risikovurderingen regner man på varmestrømmen gjennom isolasjonen i bindingsverket. Det er ikke oppgitt posisjonskoeffisienter for trestendervegger med tre lag med gipsplater. I denne risikovurderingen forenkler man og bruker reglene som gjelder for to lag i tabell E.5 i standarden [30]. Tabell 23 viser tid til temperaturøkning på ueksponert side i brannscenario 1.

Tabell 23: Tid til temperaturøkning på ueksponert side

| Sjikt nummer | Type | Tykkelse [mm] | $t_{ins,0,i}$ | k_{pos} | k_j | Bidrag t_{ins} [min] |
|---------------------|-------------------|----------------------|---------------------------------|-----------------------------|-------------------------|--|
| 1 | Gipsplate, type F | 15,0 | 21,0 | 0,7 | 1,0 | 14,7 |
| 2 | Gipsplate, type F | 15,0 | 21,0 | 0,6 | 1,0 | 10,9 |
| 3 | Gipsplate, type A | 13,0 | 18,2 | 0,6 | 1,0 | 10,9 |
| 4 | Steinull | 248,0 | 50,0 | 1,0 | 1,0 | 50,0 |
| 5 | Gipsplate, type A | 13,0 | 18,2 | 1,0 | 1,0 | 18,2 |
| 6 | Gipsplate, type F | 15,0 | 21,0 | 1,0 | 1,0 | 21,0 |
| 7 | Gipsplate, type F | 15,0 | 21,0 | 1,5 | 1,0 | 31,5 |
| - | - | - | - | - | Sum | 157,2 |

$t_{\text{ins}} \geq 149$ minutter

157 minutter > 149 minutter

Trestenderveggen opprettholder sin brannskillende funksjon gjennom hele brannforløpet for dette brannscenarioet.

En oppsummering av brannscenario 1 er vist i tabell 24.

Tabell 24: Oppsummering av brannscenario 1

| Trestendervegg | |
|---|--------------------|
| Tid til forkulling (t_{ch}) | 71,6 min |
| Nedfallstid pga. festemidler (t_f) | 176,6 min |
| Nedfallstid pga. termomekaniske egenskaper (t_f) | 90,0 min |
| Totalt brannforløp | 149,0 min |
| Totalt brannforløp m/ $T > 300$ °C | 137,0 min |
| Bærende kapasitet (R) igjennom et fullstendig brannforløp | Opprettholdes ikke |
| Bærende kapasiten (R) igjennom 90 minutters branneksponeering | Opprettholdes |
| Brannskillende kapasitet (EI) igjennom et fullstendig brannforløp | Opprettholdes |
| Påvist ytelse | REI 90 [B90] |
| Betongvegg | |
| Ytelse basert på tabellverdi [48] | REI 90 [A90] |

Totalt oppfyller trestenderveggen brannmotstand REI 90 for brannscenario 1, tilsvarende en REI 90 betongvegg.

Brannscenario 2: Representativt brannscenario 1

Betongvegg REI 90 A2-s1,d0 [A90]

Den bærende betongveggen opprettholder brannmotstand REI 90, med veggykkelse 140 mm og overdekning på 35 mm [48].

Trestendervegg REI 90 [B90]

Påvisning av bærende funksjon (R):

Trestenderveggen er lik i alle brannscenarioene. Verdiene for starttid til forkulling, nedfallstid og forkullingshastigheter før og etter nedfall av gipsplatene er dermed identiske.

Parametrisk temperatur tid-kurve:

Den parametriske temperatur tid-kurven for brannscenarioet er vist i figur 18. Det totale brannforløpet varer i 91 minutter. Forkulling i treet skjer ved temperaturer over 300 °C. Temperaturen er over 300 °C i 82 minutter.

Forkullingsdybden i perioden før kledningen faller ned er gitt ved [30]:

$$d_{char,n} = \beta_n * t$$

$$d_1 = 0,93 \text{ mm/min} * (90 \text{ min} - 71,60 \text{ min}) = 17,11 \text{ mm}$$

Forkulling etter nedfall er gitt ved:

$$d_2 = 5,37 \text{ mm/min} * (91 \text{ min} - 90 \text{ min}) = 5,37 \text{ mm}$$

Gjenværende tverrsnitt etter et fullstendig brannforløp er $48 * 225,52 \text{ mm}^2$. Gjenværende upåvirkede tverrsnitt er $48 * 218,52 \text{ mm}^2$ som tilsvarer 88,11 % av originalt stendertverrsnitt. Trestenderveggen opprettholder ikke sin bærende kapasitet etter et fullstendig brannforløp med en representativ brann.

En kan likevel vurdere om trestenderveggen opprettholder bæring i 90 minutter (R 90).

Forkullingsdybden i perioden før kledningen faller ned er gitt ved:

$$d_1 = 0,93 \text{ mm/min} * (90 \text{ min} - 71,60 \text{ min}) = 17,11 \text{ mm}$$

Platene faller ned etter $t \geq 90$ minutter, så forkullingen etter nedfall neglisjeres.

Gjenværende tverrsnitt etter 90 minutters branneksponeering er $48 * 230,89 \text{ mm}^2$. Gjenværende upåvirkede tverrsnitt er $48 * 223,89 \text{ mm}^2$ som tilsvarer 90,27 % av originalt stendertverrsnitt. Trestenderveggen opprettholder sin bærende kapasitet etter en 90 minutters branneksponeering.

Påvisning av brannskillende funksjon – EI 90

$$t_{ins} \geq 91 \text{ minutter}$$

$$t_{ins} = \sum_i t_{ins,0,i} * k_{pos} * k_j \quad [30]$$

Verdien for tid til temperaturøkning på ueksponert side er lik for alle brannscenarioene. Beregning av t_{ins} er vist i tabell 23.

$$t_{ins} \geq 91 \text{ minutter}$$

157 minutter > 91 minutter

Trestenderveggen opprettholder sin brannskillende funksjon i gjennom hele brannforløpet for dette brannscenarioet.

En oppsummering av brannscenario 2 er vist i tabell 25.

Tabell 25: Oppsummering av brannscenario 2

| Trestendervegg | |
|---|--------------------|
| Tid til forkulling (t_{ch}) | 71,6 min |
| Nedfallstid pga. festemidler (t_f) | 176,6 min |
| Nedfallstid pga. termomekaniske egenskaper (t_f) | 90,0 min |
| Totalt brannforløp | 91,0 min |
| Totalt brannforløp m/ $T > 300\text{ °C}$ | 82,0 min |
| Bærende kapasitet (R) igjennom et fullstendig brannforløp | Opprettholdes ikke |
| Bærende kapasiten (R) igjennom 90 minutters branneksporing | Opprettholdes |
| Brannskillende kapasitet (EI) igjennom et fullstendig brannforløp | Opprettholdes |
| Påvist ytelse | REI 90 [B90] |
| Betongvegg | |
| Ytelse basert på tabellverdi [48] | REI 90 [A90] |

Totalt oppfyller trestenderveggen brannmotstand REI 90 for brannscenario 3, tilsvarende en REI 90 betongvegg.

Brannscenario 3: Representativ brannscenario 2

Betongvegg REI 90 A2-s1, d0 [A90]

Den bærende betongveggen opprettholder brannmotstand REI 90, med vegtykkelse 140 mm og overdekning på 35 mm [48].

Trestendervegg REI 90 [B90]

Påvisning av bærende funksjon (R):

Trestenderveggen er lik i alle brannscenarioene. Verdiene for starttid til forkulling, nedfallstid og forkullingshastigheter før og etter nedfall av gipsplatene er dermed identiske.

Parametrisk temperatur tid-kurve:

Den parametriske temperatur tid-kurven for brannscenarioet er vist i figur 19. Det totale brannforløpet varer i 111 minutter. Forkulling i treet skjer ved temperaturer over 300 °C. Temperaturen er over 300 °C i 100 minutter.

Forkullingsdybden i perioden før kledningen faller ned er gitt ved [30]:

$$d_{char,n} = \beta_n * t$$

$$d_1 = 0,93 \text{ mm/min} * (90 \text{ min} - 71,60 \text{ min}) = 17,11 \text{ mm}$$

Forkulling etter nedfall er gitt ved:

$$d_2 = 5,37 \text{ mm/min} * (100 \text{ min} - 90 \text{ min}) = 53,70 \text{ mm}$$

Gjenværende tverrsnitt etter et fullstendig brannforløp er $48 * 177,19 \text{ mm}^2$. Gjenværende upåvirkede tverrsnitt er $48 * 170,19 \text{ mm}^2$ som tilsvarer 71,44 % av originalt stendertverrsnitt. Trestenderveggen opprettholder ikke sin bærende kapasitet etter et fullstendig brannforløp med en representativ brann.

En kan likevel vurdere om trestenderveggen opprettholder bæring i 90 minutter (R 90).

Forkullingsdybden i perioden før kledningen faller ned er gitt ved [30]:

$$d_{char,n} = \beta_n * t$$

$$d_1 = 0,93 \text{ mm/min} * (90 \text{ min} - 71,60 \text{ min}) = 17,11 \text{ mm}$$

Platene faller ned etter $t \geq 90$ minutter, så forkullingen etter nedfall neglisjeres.

Gjenværende tverrsnitt etter 90 minutters branneksponeering er $48 * 230,89 \text{ mm}^2$. Gjenværende upåvirkede tverrsnitt er $48 * 223,89 \text{ mm}^2$ som tilsvarer 90,27 % av originalt stendertverrsnitt. Trestenderveggen opprettholder sin bærende kapasitet etter en 90 minutters branneksponeering.

Påvisning av brannskillende funksjon – EI 90

$$t_{ins} \geq 111 \text{ minutter}$$

$$t_{ins} = \sum_i t_{ins,0,i} * k_{pos} * k_j \quad [30]$$

Verdien for tid til temperaturøkning på uekspontert side er lik for alle brannscenarioene. Beregning av t_{ins} er vist i tabell 23.

$t_{ins} \geq 111$ minutter

157 minutter > 111 minutter

Trestenderveggen opprettholder sin brannskillende funksjon i gjennom hele brannforløpet for dette brannscenarioet.

En oppsummering av brannscenario 3 er vist i tabell 26.

Tabell 26: Oppsummering av brannscenario 3

| Trestendervegg | |
|---|--------------------|
| Tid til forkulling (t_{ch}) | 71,6 min |
| Nedfallstid pga. festemidler (t_f) | 176,6 min |
| Nedfallstid pga. termomekaniske egenskaper (t_f) | 90,0 min |
| Totalt brannforløp | 111,0 min |
| Totalt brannforløp m/ $T > 300$ °C | 100,0 min |
| Bærende kapasitet (R) igjennom et fullstendig brannforløp | Opprettholdes ikke |
| Bærende kapasiten (R) igjennom 90 minutters branneksponeering | Opprettholdes |
| Brannskillende kapasitet (EI) igjennom et fullstendig brannforløp | Opprettholdes |
| Påvist ytelse | REI 90 [B90] |
| Betongvegg | |
| Ytelse basert på tabellverdi [48] | REI 90 [A90] |

Totalt oppfyller trestenderveggen brannmotstand REI 90 for brannscenario 3, tilsvarende en REI 90 betongvegg.

4.3.10 Usikkerhets- og sensitivitetsanalyse

Usikkerhetsanalysen i denne risikovurderingen gjennomføres kvalitativt og er vist i tabell 27.

Tabell 27: Usikkerhet i risikovurdering

| Usikkerhet | Aktuelle kilder til usikkerhet |
|---|--|
| Pålitelighet til gipsplater | <ul style="list-style-type: none"> • Materialelegenskaper. • Eksterne faktorer. • Valg av metode for dimensjonering av branngips. |
| Parametrisk temperatur-tidkurve | <ul style="list-style-type: none"> • Tillegg A [46] forutsetter at alle gasser brenner i branncellen og at forbrenningen ikke kan skje raskere en tilgang på oksygen. • Materialelegenskaper ved romtemperatur, men disse varierer ved økt temperatur [53]. • Urealistisk med lineær avkjølingsfase [53]. • Vekstraten er høyere enn ved en reel brann [53]. • Maksimaltemperatur er høyere enn ved en reel brann [43]. • Analyseobjekt er en del av en branncelle. • Kurven er utviklet for en «standard branncelle» [43]. |
| Spesifikk variabel karakteristisk brannenergi | <ul style="list-style-type: none"> • Spesifikk variabel karakteristisk brannenergi $q_{f,k}$ for boliger er veldig høy (948 MJ/m^2). Ifølge SP [2] kan verdiene være for høye ved små brannceller. |
| Kapasitetsberegninger | <ul style="list-style-type: none"> • Det blir ikke gjennomført kapasitetsberegninger, men det blir antatt at hvis det resterende upåvirkede tverrsnittet er $\geq 90\%$ av det opprinnelige tverrsnittet, opprettholder konstruksjonen sin bæring og stabilitet. |
| Beregning av bærende funksjon (R) | <ul style="list-style-type: none"> • Annex C [30] gjelder for analyser med branneksponeering opp til 60 minutter. |
| Beregning av brannskillende funksjon (EI) | <ul style="list-style-type: none"> • Annex E [30] gjelder for analyser med branneksponeering opp til 60 minutter. |

Usikkerhetene blir diskutert i kapittel 5 i avhandlingen.

I denne risikovurderingen vil det bli gjennomført en sensitivitetsanalyse av forkullingshastigheten β_0 [mm/min]. Forkullingshastigheten i sensitivitetsanalysen er $\beta_0 = 0,65$ mm/min $\pm 0,05$ mm/min. I sensitivitetsanalysen blir kun brannscenario 1 vurdert, dvs. verste troverdige brannscenario (se figur 17). Sensitivitetsanalysen gjelder kun for trestenderveggen, når betongveggen er preakseptert med brannmotstand R 90 og verdier for en betongvegg med REI 90 finnes i tabeller i NS-EN 1992-1-2:2004 [48].

Økt forkullingshastighet - $\beta_{0, \text{maks}}$

$$\beta_{0, \text{maks}} = 0,70 \text{ mm/min}$$

Økt forkullingshastighet påvirker størrelsen på det reduserte tverrsnittet og dermed bæreevnen til trestenderveggen (se tabell 22).

Påvisning av bærende funksjon (R):

Trestenderveggen er lik i alle brannscenarioene. Verdiene for starttid til forkulling og nedfallstid er dermed identiske.

$$\beta_n = k_s * k_2 * k_n * \beta_0 \quad \text{for } t_{\text{ch}} \leq t \leq t_f \quad [30]$$

$$\beta_n = 1,3 * 0,7361 * 1,5 * 0,70 = 1,00 \text{ mm/min}$$

$$\beta_n = k_s * k_3 * k_n * \beta_0 \quad \text{for } t \geq t_f \quad [30]$$

$$\beta_n = 1,3 * ((0,036 * 90) + 1) * 1,5 * 0,70 = 5,79 \text{ mm/min}$$

Parametrisk temperatur tid-kurve:

Den parametriske temperatur tid-kurven for brannscenarioet er vist i figur 17. Det totale brannforløpet varer i 149 minutter. Forkulling i treet skjer ved temperaturer over 300 °C. Temperaturen er over 300 °C i 137 minutter.

Forkullingsdybden i perioden før kledningen faller ned er gitt ved [29]:

$$d_{\text{char},n} = \beta_n * t \quad [30]$$

$$d_1 = 1,00 \text{ mm/min} * (90 \text{ min} - 71,60 \text{ min}) = 18,40 \text{ mm}$$

Forkulling etter nedfall er gitt ved:

$$d_2 = 5,79 \text{ mm/min} * (137 \text{ min} - 90 \text{ min}) = 272,13 \text{ mm} > 248 \text{ mm}$$

Hele tverrsnittet er forkullet etter et fullstendig brannforløp. Trestenderveggen opprettholder ikke sin bærende kapasitet etter et fullstendig brannforløp med den verste troverdige brannen.

En kan likevel vurdere om trestenderveggen opprettholder bæring i 90 minutter (R 90).

Forkullingsdybden i perioden før kledningen faller ned er gitt ved:

$$d_1 = 1,00 \text{ mm/min} * (90 \text{ min} - 71,60 \text{ min}) = 18,4 \text{ mm}$$

Platene faller ned etter $t \geq 90$ minutter, så forkulling etter nedfall neglisjeres.

Gjenværende upåvirkede tverrsnitt etter 90 minutters branneksponeering er $48 * 222,6 \text{ mm}^2$, som tilsvarer 89,75 % av originalt stendertverrsnitt. Trestenderveggen opprettholder ikke sin bærende kapasitet etter en 90 minutters branneksponeering.

Senket forkullingshastighet - $\beta_{0, \text{min}}$

$$\beta_{0, \text{min}} = 0,60 \text{ mm/min}$$

Senket forkullingshastighet påvirker størrelsen på det reduserte tverrsnittet og dermed bæreevnen til trestenderveggen (se tabell 22).

Påvisning av bærende funksjon (R):

Trestenderveggen i er lik i alle brannscenarioene. Verdiene for starttid til forkulling og nedfallstid er dermed identiske.

$$\beta_n = k_s * k_2 * k_n * \beta_o \quad \text{for } t_{\text{ch}} \leq t \leq t_f \quad [30]$$

$$\beta_n = 1,3 * 0,7361 * 1,5 * 0,60 = 0,86 \text{ mm/min}$$

$$\beta_n = k_s * k_3 * k_n * \beta_o \quad \text{for } t \geq t_f \quad [30]$$

$$\beta_n = 1,3 * ((0,036 * 90) + 1) * 1,5 * 0,60 = 4,96 \text{ mm/min}$$

Parametrisk temperatur tid-kurve:

Den parametriske temperatur tid-kurven for brannscenarioet er vist i figur 17. Det totale brannforløpet varer i 149 minutter. Forkulling i treet skjer ved temperaturer over 300 °C. Temperaturen er over 300 °C i 137 minutter.

Forkullingsdybden i perioden før kledningen faller ned er gitt ved:

$$d_{char,n} = \beta_n * t \quad [30]$$

$$d_1 = 0,86 \text{ mm/min} * (90 \text{ min} - 71,60 \text{ min}) = 15,82 \text{ mm}$$

Forkulling etter nedfall er gitt ved:

$$d_2 = 4,96 \text{ mm/min} * (137 \text{ min} - 90 \text{ min}) = 233,12 \text{ mm}$$

Hele tverrsnittet er forkullet ved et fullstendig brannforløp. Trestenderveggen opprettholder ikke sin bærende kapasitet ved et fullstendig brannforløp med den verste troverdige brannen.

En kan likevel vurdere om trestenderveggen opprettholder bæring i 90 minutter (R 90).

Forkullingsdybden i perioden før kledningen faller ned er gitt ved:

$$d_1 = 0,86 \text{ mm/min} * (90 \text{ min} - 71,60 \text{ min}) = 15,82 \text{ mm}$$

Platene faller ned etter $t \geq 90$ minutter, så forkullingen etter nedfall neglisjeres.

Gjenværende upåvirkede tverrsnitt etter 90 minutters branneksponeering er 48*225,16 mm, som tilsvarer 90,80 % av originalt stendertverrsnitt. Trestenderveggen opprettholder sin bærende kapasitet etter en 90 minutters branneksponeering. Tabell 28 viser en oppsummering av sensitivitetsanalysen.

Tabell 28: Sensitivitetsanalyse av forkullingshastighet

| Forkullingshastighet [mm/min] | Gjenværende tverrsnitt ved et fullstendig brannforløp [mm ²] | Gjenværende tverrsnitt ved 90 minutters branneksponeering [mm ²] |
|----------------------------------|--|--|
| $\beta_{0, \text{min}} = 0,60$ | 0 | 48*225,2 |
| $\beta_0 = 0,65$ | 0 | 48*223,9 |
| $\beta_{0, \text{maks}} = 0,70$ | 0 | 48*222,6 |

4.3.11 Beskrivelse av risiko

I denne risikovurderingen er risiko beskrevet som produktet av sannsynlighet og konsekvens. Konsekvensen er at det bærende hovedsystemet kollapser ved en brann. Sannsynligheten for konsekvensen er avhengig av hvor god brannmotstand som blir beregnet i antall minutter for den bærende trestenderveggen. Risikoen blir beskrevet relativt, dvs. i forhold til referansebyggverket. Det er verdt å merke seg at risikobeskrivelsen er basert på tre ulike brannscenarier og kan ikke betraktes som reel risiko.

Tabell 29: Beskrivelse av risiko

| Brannscenario | Brannmotstand trestendervegg | I forhold referansebyggverk |
|---------------|------------------------------|-----------------------------|
| 1 | REI i 90 minutter | Lik brannmotstand |
| 2 | REI i 90 minutter | Lik brannmotstand |
| 3 | REI i 90 minutter | Lik brannmotstand |

4.3.12 Sammenligning av risiko og risikoakseptkriterier

Risikoakseptkriteriet i kapittel 4.3.5 er oppfylt for alle brannscenariene. Brannmotstanden i trestenderveggene i det bærende hovedsystemet oppfyller minimum brannmotstand REI 90, for alle brannscenariene.

4.3.13 Risikoevaluering

Risikovurderingen verifiserer at et bærende hovedsystem i tre har lik brannsikkerhet som et bærende hovedsystem i betong, ved bruk av tre lag gipsplater som passiv brannsikring. På bakgrunn av dette skal det velges et bærende hovedsystem i tre.

Risikoen i det bærende hovedsystemet er akseptabel, så ytterligere tiltak er unødvendige.

4.3.14 Beskrivelse av risiko

Risikoen er beskrevet i tabell 29 og vil ikke bli gjentatt her.

Sammendrag av de viktigste resultatene er vist i tabell 30:

Tabell 30: Oppsummering av resultater

| Trestendervegg | |
|---|---|
| Tid til forkulling (t_{ch}) | 71,6 min |
| Nedfallstid pga. festemidler (t_f) | 176,6 min |
| Nedfallstid pga. termomekaniske egenskaper (t_f) | 90,0 min |
| Bærende kapasitet (R) igjennom et fullstendig brannforløp | Opprettholdes ikke i noen brannscenarioer |
| Bærende kapasitet (R) igjennom en 90 minutters branneksporing | Opprettholdes i brannscenario 1,2 og 3 |
| Brannskillende kapasitet (EI) igjennom et fullstendig brannforløp | Opprettholdes i brannscenario 1,2 og 3 |
| Påvist ytelse | REI 90 [B90] |
| Betongvegg | |
| Ytelse basert på tabellverdi [48] | REI 90 [A90] |

Den bærende trestenderveggen er påvist til å ha tilsvarende bærende (R) og brannskillende (EI) egenskaper som en bærende REI 90 betongvegg. Den alternative utformingen med et bærende hovedsystem i tre gir minst samme brannsikkerhet som om bygget var prosjektert fullt ut i samsvar med preaksepterte ytelser. Forskriftskravene i TEK10 anses dermed å være oppfylt [10]. Alternativet med et bærende hovedsystem i tre skal derfor velges.

5. DISKUSJON

I dette kapittelet vil resultatene i avhandlingen diskuteres.

5.1 Materialeegenskaper og eksterne faktorer som påvirker brannmotstand

I dette kapittelet blir materialeegenskaper og eksterne faktorer som påvirker brannmotstanden til en branngipsplate diskutert.

5.1.1 Materialeegenskaper

Densitet - Høy densitet vil gi lav porøsitet og økt varmeabsorberingskapasitet, som fører til en forbedret brannmotstand. Densiteten vil endre de termiske egenskapene (se kapittel 3.7.3) til gipsplatene. Spesielt den termiske konduktiviteten er avhengig av platens densitet.

Varmekonduktiviteten synker ved økt densitet, så økt densitet vil øke brannmotstanden til en branngipsplate. På en annen side øker massen til gipsplatene ved økt densitet. Dette kan være negativt, fordi hvis platene f.eks. festes i en himling, vil gravitasjonskrefter føre til kortere nedfallstid for gipsplatene pga. økt vekt.

Glassfiberforsterkning - En av de viktigste egenskapene for å øke brannmotstanden til en gipsplate er å holde platene sammen, samt å forsinke utviklingen av sprekker etter dehydrering av vannet i gipskjernen. Denne egenskapen kan ofte bli dimensjonerende i en branntest. For å forsterke sammenhengskraften til gipsplatene brukes det svært ofte glassfiberarmering i gipskjernen. Bruk av glassfiber i gipskjernen er beskrevet i NS-EN 520:2004 og finnes i nesten alle gipsplater type F. Glassfiberarmeringen vil øke brannmotstanden i gipsplaten, men vil i liten grad gi store forskjeller i brannmotstand blant platene som er klassifisert til type F, når nesten alle GtF inneholder glassfiberarmering. På en annen side sier litteraturen lite om hvor mye glassfiber som brukes og hvordan dette plasseres i gipskjernen.

Vermikulitt - For å øke brannmotstanden til branngipsplatene, brukes ofte vermikulitt som tilsetningsstoff. Vermikulitt utvider seg ved oppvarming og fyller tomrommet etter vannet som blir dehydrert. På den måten motvirker det krymping og øker brannmotstanden. På samme måte som glassfiberforsterkning brukes vermikulitt i nesten alle gipsplater som er klassifisert til type F (GtF). På en annen side sier litteraturen lite om hvor mye vermikulitt som brukes, slik at det vil være forskjeller på brannmotstanden til platene selv om mange inneholder vermikulitt. Produsenter er heller ikke villige til å oppgi eksakt hvordan platene er satt sammen, blant annet på grunn av konkurransefortrinn.

Leire - Etter å ha kontaktet Norgips (Vedlegg 2), ble det klart at leire kan brukes som tilsetningsstoff i gipskjernen. Ved bruk av leire vil gipsplatene oppnå gode brannbeskyttende egenskaper, pga. leirens brannhemmende egenskaper. Det blir det ikke oppgitt mengde av tilsetningsstoffet, så dette vil nok variere fra produsent til produsent. På en annen side er det heller ikke sikkert alle produsenter bruker leire i sine plater.

Diverse tilsetningsstoffer - Det brukes også andre tilsetningsstoffer enn vermikulitt og leire for å øke brannmotstanden til gipsplatene. I litteraturen blir det svært ofte nevnt at bruk av tilsetningsstoffer vil ha positiv effekt på brannmotstanden, men det nevnes sjelden hvilke tilsetningsstoffer som brukes. Sand og perlitt blir nevnt som vanlige tilsetningsstoffer i gips, men effekten på brannmotstand blir ikke beskrevet. Igjen blir det ikke nevnt noe om mengden av tilsetningsstoffene.

Vanninnhold - Vanninnholdet blir beskrevet som en svært viktig faktor for å oppnå en brannsikker gipsplate og at vannet gir opp mot 90 % av brannmotstanden. Vanninnholdet i gipskjernen er kritisk, fordi når gipsen er fullstendig dehydrert er det minimalt med styrke igjen i platen. Litteraturen sier lite om hvor mye vann som finnes i gipsplatene, men det blir nevnt at gipsplater kan innehold 21 vekt % vann. Dermed kan det argumenteres for at vanninnholdet vil påvirke brannmotstanden i liten grad innad blant branngipsplattene (GtF). På en annen side vil ulik mengde med andre tilsetningsstoffer, føre til en ulik vannmengde i gipskjernen. Dermed kan vanninnholdet kan gi forskjeller i brannmotstanden innad blant branngipsplatene.

Mikrostruktur - Mikrostrukturen til gipsmaterialet påvirker den termiske konduktiviteten til gipsplaten og dermed brannmotstanden til gipsplaten. Økt termisk konduktivitet gir lavere brannmotstand for gipsplaten. Det finnes lite informasjon om mikrostrukturen (mineralsammensetning, kornstørrelse, porøsitet ol.) til gipsplatene. For eksempel blir det ikke oppgitt om det er brukt naturlig eller industriell gips, til tross for at kornstørrelsen kan variere. Det vil være svært vanskelig å fastslå mineralsammensetning og kornstørrelse uten å kontakte produsentene av gipsplatene. I tillegg er dette informasjon som produsenter kanskje ønsker å holde skjult pga. konkurransefortrinn og patentbeskyttelser.

En annen ting som påvirker mikrostrukturen er produksjonskvaliteten til gipsplatene. Produksjonskvaliteten blir beskrevet i litteraturen som en de mest kritiske faktorene som påvirker brannmotstanden til en gipsplate. Forskjeller i mikrostrukturen differensieres ikke i klassifiseringen etter NS-EN 520:2004, slik at det kan være en av årsakene til forskjellene på yteevnen til gipsplater som er klassifisert til samme type. På en annen side er det en korrelasjon mellom mikrostrukturen og innholdet av ulike materialer og tilsetningsstoffer, slik at mikrostrukturen isolert sett vil ha liten påvirkning på forskjellen på brannmotstanden mellom ulike plater som er klassifisert til type F.

Kalsiumsulfat - Prosentandelen kalsiumsulfat blir beskrevet i litteraturen som kritisk for brannmotstanden i gipsplatene. Hva som er den ideelle mengden, blir derimot ikke beskrevet. Kalsiumsulfat er noe som finnes i alle gipsplater (se formel 3.1 og 3.2), så det er naturlig å anta at det har store utslag på brannmotstanden til gipsplatene. I litteraturen blir det presisert at prosentandelen kalsiumsulfat er svært viktig for brannmotstanden pga. sterkt endotermiske egenskaper. På en annen side vil økt mengde kalsiumsulfat, føre til redusert mengde av vann og andre tilsetningsstoffer.

5.1.2 Eksterne faktorer

Type trevirke - En viktig ekstern faktor som påvirker brannmotstanden til en branngipsplate er type trevirke i underliggende konstruksjon. Ulike tresorter har forskjellige temperaturer for start av forkulling og forkullingsrater (se kapittel 3.5.2). Blant annet vil temperaturen for start av forkulling variere fra 288 til 300 grader °C. Dermed vil effekten av branngips som passiv brannbeskyttelse variere etter hva slags trevirke som brukes. Et eksempel kan være at en får tidlig nedfall på en gipsplate, fordi treet forkuller raskere rundt festemiddelet. Denne effekten er mulig med treverk som har lav temperatur for start av forkulling eller rask forkullingsrate.

Lagvis plassering - Den andre faktoren som påvirker brannmotstanden til en gipsplate er lagvis plassering av gipsplater med ulike egenskaper. For eksempel ett lag GtA og ett lag GtF. Ved et slikt tilfelle vil brannmotstanden være ulik, avhengig av hvilket lag som plasseres ytterst. En generell regel er at det ytterste laget gir størst bidrag til brannmotstanden. En legger derfor alltid branngipsplatene (GtF) ytterst, hvis man ønsker å oppnå best mulig brannmotstand. På en annen side er de ytterste platene mest utsatt for skader, f.eks. under bygging. Et slag mot en branngipsplate, kan gi en brist i platen, som igjen kan føre til redusert nedfallstid.

Innfesting - Innfestingen av platene vil påvirke brannmotstanden. Gipsplatene burde festes direkte på stendere og bjelker, hvis avstanden ikke er for stor. Ellers kan platene festes på lekter på tvers. Måten bindingsverket er bygd opp, vil påvirke hvordan gipsplatene kan monteres. På den måten vil det også påvirke brannmotstanden. Ved varmpåvirkning vil platene krympe, så det er viktig å ha god innfesting i både treverk og gipsplater for å unngå tidlig nedfall og glipper mellom platene. Ved glipper mellom platene kan brannmotstanden senkes drastisk. Senteravstanden mellom de ulike delene i en bindingsverksvegg vil også ha betydning for brannmotstanden (se tabell 12). Det kan være viktig å bruke liten senteravstand på f.eks. stendere og lekter for å oppnå god brannmotstand. På en annen side vil redusert senteravstand på bygningsdelene, gi økte kostnader, økt brannlast og fare for brannsmitte.

Isolering og tomrom - Tilstedeværelsen av isolasjon vil påvirke nedfallstiden. I trebindingsverk med isolerte hulrom vil nedfallstiden være kortere enn for trebindingsverk

med tomme hulrom. Effekten vil være avhengig av type isolasjon. For eksempel vil glassull gi bedre brannmotstand i forhold til steinull. Den største negative effekten med isolerte hulrom mht. brannmotstand, er at gipsplatene får en mye raskere temperaturstigning. På en annen side er isolerte hulrom nødvendig for å oppnå andre krav i TEK10, som f.eks. krav til energibruk og lydisolering.

Festemidler - Festemidlene er dokumentert til å ha stor innvirkning på kvaliteten på en branngipsplate, spesielt mht. nedfallstiden. Hullavstanden, kantavstanden og skruelengden er viktige faktorer som påvirker brannmotstanden. Gipsplatene krymper ved oppvarming, slik at festemidler med kort kantavstand er i fare for å få tidlig nedfall. Ved stor hullavstand vil en oppnå samme effekt, fordi det brukes færre festemidler. Skruelengde vil også påvirke brannmotstanden til gipsplaten, fordi skruene slipper treverket der de er festet i raskere ved oppvarming med kort skruelengde. På en annen side har store produsenter av gipsplater, som f.eks. Gyproc og Norgips egne detaljerte anvisninger for montering av gipsplater. I veiledningene blir avstander og dimensjoner presisert, slik at hvis en følger anvisningene vil festemidlene gi liten påvirkning på brannmotstanden.

Plassering i rommet - Nedfallstiden for gipsplater under gulv er kortere enn for på vegger, pga. gravitasjon. Det er logisk at nedfallstiden påvirkes av gravitasjonen, men dette blir det ikke tatt hensyn til i beregninger for nedfallstid. F.eks. i beregningene for nedfallstid ved utdragsfeiling av festemidler (NS-EN 1995-1-2:2004). På en annen side vil nok ikke gravitasjonskreftene gi de største utslagene på brannmotstanden, da gipsplater veier lite.

5.2 Sammenligning av metoder for dimensjonering av branngips

I dette kapittelet blir resultatene og sammenligningen fra de ulike metodene diskutert.

5.2.1 Generelt

Resultatene viser at starttid til forkulling i trestenderen varierer fra 53,3 til 61,6 minutter, som vist i tabell 16. Avvikene er såpass store at det er naturlig å sette spørsmålsteget ved kvaliteten til de ulike beregningsmetodene. Det er bekymringsverdig at NS-EN 1995-1-2:2004 gir den lengste tiden til forkulling, fordi det er den som sannsynligvis blir brukt mest. Hvis det viser seg de andre metodene er mer pålitelige, kan det være en risiko for brannsikkerheten i bygninger, som er dimensjonert etter standarden. På en annen side ligger det nok store sikkerhetsmarginer i alle metodene, som gjør at en får sikker brannprosjektering uavhengig av metode.

Resultatene i metodene for brannmotstand varierer fra 82,5 til 105 minutter, som vist i tabell 17. Blant disse beregningsmetodene er det også store avvik. Noe av avviket kan forklares med at det er gjort en del forenklinger. Blant annet ved å anta at gipsplater type F og X, har

tilsvarende brannmotstand. Likevel blir det avslørt at det er store avvik mellom metodene for å dimensjonere brannmotstanden til branngips.

De fleste metodene baserer seg på at gipsplatene er klassifisert etter NS-EN 520:2004. I denne standarden klassifiseres gipsplatene uten å ta hensyn termomekaniske egenskaper, som kan være en av årsakene til usikkerhet i resultatene. På en annen side vil gipsplater med samme klassifisering ofte være bygd opp og produsert like, slik at de termomekaniske egenskapene vil variere lite. Det er vanlig å bruke kritisk temperatur for forkulling i tre til $T \geq 300$ °C. Dette er en konservativ tilnærming og brukes i alle beregningsmetodene i denne avhandlingen. I realiteten kan forkulling i treverk starte ved lavere temperaturer, som presentert i kapittel 3.5.2. I litteraturen ligger temperaturen for start av forkulling i intervallet 288-300 °C. Buchanan presiserer at 288 °C brukes mye i USA. Dette kan øke usikkerheten i resultatene. På en annen side er nok beregningsmetodene utviklet med forutsetningen om at forkulling starter ved $T \geq 300$ °C som også er et allment akseptert kriterium for tre, slik at den kritiske forkullingstemperaturen vil gi lite usikkerhet i resultatene.

5.2.2 NS-EN 1995-1-2:2004

Første metode som ble brukt er NS-EN 1995-1-2:2004 med tid til start av forkulling til 61,6 minutter. Dette resultatet er det minst konservative i dette tilfellet. Standarden presiserer at der det ikke er gitt formler for tid til start av forkulling, skal yteevnen til materialet finnes ved testing (f.eks. i et brannteknisk laboratorium). Dette kan tolkes til at tilgjengelig informasjon og data er noe mangelfull på dette området. Metoden tar ikke hensyn til hvilken konstruksjonsdel som analyseres, dvs. om det er en vegg, et gulv osv. Dette kan være en svakhet da det sannsynligvis vil påvirke resultatene. På en annen side vil en generell beregningsmetodikk, gjøre metoden rask og enkel å bruke.

5.2.3 Improved design method av ETH Zürich

Den andre metoden som ble brukt er Improved design method av ETH Zürich, med tid til start av forkulling til 53,3 minutter. Dette resultatet er det mest konservative i dette tilfellet. En av grunnene til dette kan være alle koeffisientene som inngår i beregningene. Det er sannsynlig at alle koeffisientene inneholder sikkerhetsmarginer, slik at den totale sikkerhetsmarginen vil bli stor. Dette kan føre til et konservativt resultat. På en annen side er beregningsmetodikken differensiert etter om det er en vegg- eller gulv-konstruksjon, som vil være med på å gi et mindre konservativt resultat. Metoden er også differensiert etter om det er ett, to eller tre lag og hva slags type gipsplater som brukes i lagene.

5.2.4 Metode basert på testresultater fra database

Den tredje metoden som ble brukt er en metode basert på testresultater fra en database, med tid til start av forkulling til 56,0 minutter. Resultater ligger litt under gjennomsnittet av resultatene fra alle metodene. Denne metoden oppgir konservative formler og uttrykk basert

på mer en 340 testresultater. Den store mengden med testresultater burde gi et godt grunnlag for å utvikle gode beregningsmetoder, men dataspredningen i testresultatene er svært store, grunnet ulike årsaker. Formlene er basert på de platene med dårligst yteevne i testresultatene, så metoden er svært konservativ. Likevel gir denne metoden mindre konservative resultater enn metoden til ETH Zürich. Metoden har også svakheter med begrensninger på lagvis og total platetykkelse. På en annen side er de fleste gipsplatene og branngipsplatene mellom 13 og 15mm, som ligger innenfor gyldighetsområdet til formelene.

5.2.5 Component additive method

Den fjerde metoden som ble brukt er Component additive method fra de Canadiske byggeforskriftene, med en brannmotstand på 95 min. Resultatet er konservativt, da det er gjort en del forenklinger i utregningene. Blant annet ved å anta at GtF og GtX har samme brannmotstand. Metoden tar ikke hensyn til forskjeller mellom platene, annet enn tykkelsen. Det tas heller ikke hensyn til festemidlene i gipsplatene i beregningene, slik at metoden gir konservative resultater. På en annen side er metoden systematisk bygd opp, slik at hvis en går kritisk igjennom de ulike verdiene kan en komme frem til et brukbart resultat. Metoden er også svært enkel å bruke og vil vise hvor en får de største bidragene mht. på å oppnå god brannmotstand i en bindingsverkvegg.

5.2.6 Tabellverdier fra New Zealand og Nord-Amerika

Den femte og siste metoden som ble brukt er tabellverdier fra New Zealand og Nord-Amerika, med en brannmotstand på 82,5 og 105 min. I dette tilfellet ble metoden brukt til å se hvor mye brannmotstand en gitt konstruksjon ville få. Det er store forskjeller på resultatene mellom landene, som tyder på at det kan være forskjeller i standard branntesting og i materialeegenskaper mellom landene. Resultatene viser også at platene fra New Zealand gir bedre brannmotstand per mm gipsplate. På en annen side kan avvikene skyldes forskjell i størrelsen på sikkerhetsmarginen som er brukt.

5.3 Risikovurdering av branngips i et trehus i brannklasse 3

I dette kapitlet blir resultatene og deler av prosessen fra risikovurderingen diskutert. En viktig del av risikovurderingen og for å finne resultatene, er beregning og bruk av parametriske temperatur-tidkurver, som blir diskutert i eget kapittel.

5.3.1 Risikovurdering med NS 3901:2012

Forenklinger – For å kunne gjennomføre en risikovurdering av en bærende trestendervegg, blir man nødt til å ta noen forutsetninger og gjøre noen antakelser, som blant annet beskrevet i kapittel 4.3.5. Forenklingene som gjelder parametriske temperatur-tidkurver er lagt i kapittel 5.3.2.

Den første forenklingen er at det ikke blir gjennomført kapasitetsberegninger for det gjenværende tverrsnittet. Det blir antatt at hvis det resterende upåvirkede tverrsnittet er $\geq 90\%$ av det opprinnelige tverrsnittet, opprettholder konstruksjonen sin bæring og stabilitet. Bakgrunnen for denne forenklingen er at dette er beregninger som vanligvis gjennomføres av RIB, og ikke av RIBr. Kriteriet på $\geq 90\%$ kan variere etter hva slags laster konstruksjonen blir påvirket av og kan variere fra byggverk til byggverk. Forenklingen kan påvirke validiteten til resultatene, men er valgt for å begrense omfanget av avhandlingen.

Den andre forenklingen er forutsetningene for bruk av NS-EN 1995-1-2:2004 Annex C [30]. Beregningen her gjelder for analyser branneksponeering opp til 60 minutter. I risikovurderingen blir metoden brukt for en branneksponeering gjennom et brannforløp på mer enn 60 minutter. På en annen side er det beskrevet i den tekniske veiledningen «*Fire safety in timber buildings*», at metoden i Annex C originalt ikke hadde noen begrensning på 60 minutter. Til tross for begrensningen er det valgt å bruke metoden i Annex C, da det ikke er identifisert andre standardiserte metoder for en bærende trestendervegg i et brannforløp på over 60 minutter. Forutsetningen kan være med på å gi usikre resultater.

Den tredje forenklingen er bruk av verdier i NS-EN 1995-1-2:2004 Annex E [30]. Verdiene gjelder for å verifisere brannmotstand opp til 60 minutter, men i risikovurderingen blir verdiene brukt for å verifisere brannmotstand opp til 90 minutter. Forenklingen kan gi økt usikkerhet i resultatene. På en annen side er det ingen grunn til å tro at verdiene vil gi store avvik i resultater for å verifisere brannmotstand opp til 90 minutter.

Datagrunnlag – Valg av datagrunnlag er en subjektiv valgsituasjon, som kan føre til usikkerhet i resultatene. Data for materialegenskapene til gips er hentet fra rapporten «*Measurement of thermal properties of gypsum board at elevated temperatures*» [39]. Det er funnet flere andre rapporter som beskriver lignende data [36][41][42]. Det er valgt å bruke rapporten til Manzello [39], fordi den gir verdier for gipsplater type X og ikke for gipsplater generelt. På en annen side er det ikke sikkert at GtX og GtF vil ha de samme materialegenskapene, så det kan gi usikkerhet i resultatene.

Materialegenskapene for tre er hentet fra flere kilder. Det er valgt å bruke NS-EN 1995-1-2:2004 [30] og boken «*Structural Design for Fire Safety*» [33] som kilder, fordi de blir ansett som svært troverdige. Densiteten er hentet fra en rapport om massivtre [34].

Temperatur for start av forkulling og forkullingsraten er valgt etter verdiene i NS-EN 1995-1-2:2004 [30]. På en annen side er det funnet andre temperaturer for start av forkulling og forkullingsrater, som beskrevet i kapittel 3.5.2. Blant annet har Friquin [31] funnet i sin rapport med at 288-300 °C er det beste anslaget på temperatur for start av forkulling til tre. Dermed kan det tyde på at det ligger store sikkerhetsmarginer inne i NS-EN 1995-1-2:2004, som kan gi konservative resultater. På en annen side er metodene og verdiene, basert på mange testresultater, slik at verdiene er troverdige.

Usikkerhets- og sensitivitetsanalyse – Usikkerheter er beskrevet i kapittel 4.3.10. Alle usikkerhetene som går på parametriske temperatur-tidkurver blir diskutert i kapittel 5.3.2. Usikkerhetene som er diskutert i kapittel 5.3.1, vil ikke bli gjentatt her.

Den første usikkerheten er påliteligheten til gipsplatene. Aktuelle kilder til usikkerhet er materialeegenskaper, eksterne faktorer valg av metode for dimensjonering av branngips. Dette er diskutert i kapittel 5.1 og 5.2 og vil ikke bli gjentatt her.

Den neste usikkerheten er den variable karakteristiske spesifikke brannenergien for boliger på $q_{f,k} = 948 \text{ MJ/m}^2$, som er hentet fra tabell E.4 i NS-EN 1991-1-2:2002 [46]. Den variable karakteristiske spesifikke brannenergien for boliger er den nest største verdien etter bibliotek, med en verdi som er to og en halv gang så stor som verdien for hotell (rom). Det kan tyde på den variable karakteristiske spesifikke brannenergien for boliger er konservativ, da det virker usannsynlig at det er så stor forskjell med f.eks. et hotell. I tillegg påpeker SP [2] at verdien kan være for høy ved små brannceller. På en annen side finnes verdiene i tabeller i både standarder og rapporter fra SINTEF, så verdiene kan antas å være troverdige.

I risikovurderingen ble det gjennomført en sensitivitetsanalyse av forkullingshastigheten β_0 . Forkullingshastigheten ble justert $\pm 0,05 \text{ mm/min}$. Resultatet fra sensitivitetsanalysen viser at β_0 er en kritisk variabel ved beregning av brannmotstanden. Små justeringer på β_0 , vil gi store utslag på det gjenværende upåvirkede tverrsnittet. På en annen side blir det beregnet en teoretisk forkullingshastighet (β_n) på opp mot 6 mm/min , som er en forkullingshastighet som er svært usannsynlig for reel forkulling av tre.

5.3.2 Parametriske temperatur-tidkurver

Forenklinger – En av forenklingene for beregning av parametriske temperatur-tidkurver er at en analyserer en enkelt branncelle. I analysebyggverket er hver boenhet/leilighet en egen branncelle. I risikovurderingen forenkles beregningen av parametriske temperatur-tidkurver, ved at en kun analyserer et rom i branncellen, dvs. stuen. Forutsetningen kan gi usikkerhet i de parametriske kurvene, men på en annen side vil de vise effekten av bruk av gipsplater, da det er i dette rommet det skal brukes flest gipsplater.

Den andre forenklingen er at NS-EN 1995-1-2 Annex C gjelder for analyser med en standard brannekspnering (ISO 834-brann). I denne risikovurderingen blir det brukt parametriske temperatur-tidkurver i stedet. De parametriske temperatur-tidkurvene blir sammenlignet med ISO-834 kurven for å vurdere om en kan forvente valide resultater. De parametriske temperatur-tidkurvene i denne risikovurderingen har store avvik fra ISO 834 kurvene og ligger ca. $300\text{-}400 \text{ }^\circ\text{C}$ over. Ifølge Hakkarainen [43] ligger temperaturutviklingen til parametriske brannkurver $300\text{-}500 \text{ }^\circ\text{C}$ over en reel brann, som kan være en av grunnene til avvikene. Dermed kan de tyde på at de parametriske kurvene inneholder mye sikkerhet og er konservative. På en annen side er de parametriske kurvene og ISO-834 kurven svært forskjellige i beregning og bruk, slik at en kan forvente at de vil gi forskjellige resultater.

Den tredje forutsetningen for de parametriske temperatur-tidkurvene er effekten av et automatisk sløkkeanlegg. For å justere kurven i oppvarmingsfasen er faktor for aktive brannsikringstiltak δ_n i NS-EN 1991-1-2:2002 Tabell NA.E.2 [46], justert etter hvor bra sløkkesystem som brukes. Justeringen er tiltatt ved brannteknisk analyse, hvis valgt verdi for δ_n inngår som en del av brannsikringsstrategien. På en annen side angir ikke standarden hva som ligger i «del av brannsikringsstrategien», slik at justeringen kan gi usikre resultater. For kjølefasen til de parametriske kurvene er det valgt å bruke temperatur-tidkurvene i NS-EN 1991-1-2:2002 Tillegg A [46]. Ved utløsning av sprinkleranlegg, vil ikke brannforløpet følge en parametriske temperatur-tidkurve. Dermed regnes det med sprinklersvikt i avkjølingsfasen, som kan gi usikre resultater. Friquin [53] nevner blant annet i sitt arbeid at en lineær avkjølingsfase i de parametriske temperatur-tidkurvene er urealistisk. I tillegg burde det muligens vært tatt hensyn til effekten av sprinkler, da det er krav til automatisk brannsløkkeanlegg i henhold til VTEK [9]. På en annen side kan det være vanskelig å beregne effekten av sprinkleranlegg, da det finnes mange typer sprinkleranlegg (f.eks. boligsprinkler og vanntåke) og effekten vil i stor grad variere fra branncelle til branncelle.

Usikkerhetsanalyse – Usikkerheter som er nevnt tidligere i forutsetninger og antakelser vil ikke bli gjentatt her. Den første usikkerheten er at NS-EN 1991-1-2:2002 Tillegg A forutsetter at alle gasser brenner i branncellen og at forbrenningen ikke skjer raskere enn tilgangen på oksygen. En overtent brann brenner utenfor vinduet, men ikke i henhold til kurvene. De parametriske temperatur-tidkurvene kan dermed vurderes som konservative og kan gi usikre resultater.

Den neste usikkerheten er at materialegenskapene spesifikk varmekapasitet, varmekonduktivitet og massetetthet antas på grunnlag av den omgivende temperaturen. For eksempel for gips vil materialegenskapene være sterkt temperaturavhengige, som vist i figur 7 og 8 i kapittel 3.7.3. På en annen side kan det være vanskelig å ta hensyn til varierende materialegenskaper ved utregning av parametriske temperatur-tidkurver.

Den tredje usikkerheten er hvordan kurven er utviklet. Den parametriske kurven var originalt utviklet for en standard branncelle, med mur og betong. Ifølge Hakkarainen [43] vil den termiske tregheten for tre og gipsplater ha store avvik fra den originale termiske tregheten. Dermed kan det være knyttet stor usikkerhet til troverdigheten til de parametriske kurvene i risikovurderingen. På en annen side gir NS-EN 1991-1-2:2002 Tillegg A ingen begrensninger på bruk av materialer i branncellen som skal analyseres.

5.3.3 Resultater fra risikovurderingen

Starttid til forkulling - Resultatene i risikovurderingen viser at forkulling i trestenderen starter etter $t_{ch} = 71,60$ min. Starttiden til forkulling er beregnet etter NS-EN 1995-1-2:2004, som beskrevet i kapittel 3.9.2. I risikovurderingen er det gjennomført en analyse av en trestendervegg med tre lag gipsplater. Standarden [30] angir ikke regneregler for tre lag med gipsplater. I resultatene er det beregnet for to lag GtF, mens man antar at et lag GtA gir 10

minutter i bidrag til å forsinke forkullingen. Ifølge Hakkarainen [43] vil et lag GtA forsinke forkullingen med 20 min, så antakelsen kan undervurdere bidraget fra den ene gipsplaten. På en annen side er verdien til Hakkarainen [43] ved kun ett lag beskyttelse, så effekten gipsplaten vil forandres etter hvor mange andre gipsplater som brukes i konstruksjonen. Den finnes også alternative metoder for å beregne starttid til forkulling, som beskrevet i kapittel 3.9.3 og 3.9.4. På en annen side viser resultatene av sammenligningen i kapittel 4.2.7 at metodene generelt vil gi kortere starttid til forkulling, enn metoden i NS-EN 1995-1-2:2004. Dermed kan det tyde på at det er store sikkerhetsmarginer i metodene og stor usikkerhet i resultatet på 71,60 min. Dermed kan det være et behov for å teste yteevnen til gipsplater ved branneksporing. Eventuelt kan det kan det være aktuelt å kontakte produsentene av gipsplatene for verdier.

Nedfallstid - Resultatene i risikovurderingen viser at nedfallstiden til gipsplatene er t_f (festemidler) = 176,60 min og t_f (termomekaniske egenskaper) = 90 min. Nedfallstiden mht. til termomekaniske egenskaper ble beregnet etter kapittel 3.9.4, da NS-EN 1995-1-2:2004 [30] ikke gir metoder for å beregne nedfallstid mht. termomekaniske egenskaper til gipsplatene. Metoden basert på testresultater fra database angir ikke regneregler for tre lag med både type A og type F gipsplater. Det blir antatt i resultatene at et lag GtA vil forsinke nedfallstiden med 10 minutter, når det ligger på innsiden av to lag GtF. Antakelsen kan gi usikkerhet i resultatene. I tillegg er denne metoden for å beregne nedfallstid basert på de dårligste tyde F platene i databasen, så det vil gi svært konservative resultater. Et annet moment er definisjonen på nedfallstid, som er «*tid til minst 1 % av platen har falt av*» [1]. Beregningsmetodene som er funnet antar at ved nedfall, har trekonstruksjonen ingen beskyttelse. Ifølge tester av Hakkarainen [43] vil en gipsplate fortsatt gi beskyttelse, selv med sprekker og uttørket gips. Dermed kan det tolkes at gipsplaten gir brannbeskyttelse lenger enn de beregnede 90 minuttene. Gipsplater type F har heller ikke med termomekaniske egenskaper i klassifiseringen, slik at nedfallstiden mht. termomekaniske egenskaper kan variere fra plate til plate.

Påvist ytelse for trestendervegg – Resultatene fra risikovurderingen viser at den påviste ytelsen for trestenderveggen er REI 90 [B 90], som er tilsvarende en REI 90 [A 90] betongvegg. Resultatene er beregnet for tre ulike brannscenarier og kan derfor ikke betraktes som reel risiko i trestenderveggen. Resultatene viser at trestenderveggen opprettholder brannmotstand REI 90 for alle brannscenariene. Det er dermed påvist at det er mulig å oppnå god brannmotstand for en bærende trestendervegg. På en annen side er brannmotstanden i trestenderveggen sårbar for dårlig detaljering og utførelse. For eksempel med glipper mellom plater og dårlig tetting. REI 90 hjelper lite hvis det er mye svakheter på detaljnivå. Noe som kanskje gjelder spesielt for trekonstruksjoner, fordi de er mer sårbar og mindre robuste i forhold til en betongkonstruksjon. I tillegg vil fagarbeidere kanskje være mer vant til å bygge et bærende hovedsystem i stål og betong, slik at det er økt fare for utførelsesfeil. På en annen side blir gipsplatene ofte festet på trestenderveggene på fabrikk, slik at det er liten sjanse for

utførelsesfeil. I tillegg er en trestendervegg med gipsplater, en enkel konstruksjon mht. utførelse.

En REI 90 bærende betongvegg vil også hovedsakelig belastes med trykk, slik at det er betongen og ikke armeringen som sannsynligvis blir dimensjonerende ved en brann. Dermed vil betongveggen kanskje opprettholde REI 90 lengere enn 90 minutter, da betong er ubrennbar og kan ha gode egenskaper i en brann.

Et annet moment med brannmotstanden at det ikke er krav til belastning for å oppnå krav til bæring (R), slik at en produsent selv velger hvor mye last som skal påføres. En REI 90 vegg kan dermed variere fra produsent til produsent. Dette gjelder kanskje spesielt trekonstruksjoner der forkulling spiller en stor rolle.

Brannmotstanden er beregnet med bruk av et lag med null styrke (d_0) på 7 mm, som er i samsvar med NS-EN 1995-1-2:2004. Ifølge SP [2] kan denne tilnærmingen gi usikre resultater, da det er et behov for en mer detaljert studie av termiske og mekaniske egenskaper til treverk som ikke er forkullet. På en annen side kan en detaljert studie av laget med null styrke dokumentere at laget med null styrke er mindre en syv millimeter.

6. KONKLUSJON

I dette kapittelet blir konklusjonen til avhandlingen presentert.

6.1 Materialeegenskaper og eksterne egenskaper som påvirker brannmotstand

I dette kapittelet blir det konklusjonen til den første problemstillingen presentert.

6.1.1 Materialeegenskaper

Denne avhandlingen har funnet følgende materialeegenskaper som påvirker brannmotstanden til en branngipsplate/gipsplate type F:

- **Densitet** – Høy densitet vil i de fleste tilfeller gi økt brannmotstand.
- **Glassfiberforsterkning** – Glassfiberarmering gir økt sammenhengskraft ved høye temperaturer og økt brannmotstand.
- **Vermikulitt** – Vermikulitt som tilsetningsstoff i gipskjernen gir økt brannmotstand, fordi det utvider seg ved oppvarming og fyller tomrommet etter vannet som blir dehydrert i gipskjernen.
- **Leire** – Bruk av leire som tilsetningsstoff i gipskjernen virker brannhemmende.
- **Diverse tilsetningsstoffer** – Tilsetningsstoffer som f.eks. sand og perlitt vil påvirke brannmotstanden til en branngipsplate.
- **Vanninnhold** – Økt vanninnhold gir økt brannmotstand, fordi vannet forsinker den videre oppvarmingen av gipsplaten.
- **Mikrostruktur** – Mikrostrukturen i gipsen påvirker den termiske konduktiviteten, som påvirker brannmotstanden. Produksjonskvaliteten er kritisk for god brannmotstand.
- **Kalsiumsulfat** – Økt mengde kalsiumsulfat øker brannmotstanden, da kalsiumsulfat er sterkt endotermisk.

6.1.2 Eksterne faktorer

Denne avhandlingen har funnet følgende eksterne faktorer som påvirker brannmotstanden til en branngipsplate/gipsplate type F som er brukt som innkledning av treverk:

- **Type trevirke** – Type trevirke vil påvirke når treet starter å forkulle og forkullingshastigheten, og dermed effekten til gipsplaten som brannbeskyttelse.
- **Lagvis plassering** – Lagvis plassering av gipsplater med ulike egenskaper påvirker brannmotstanden. Ved å legge gipsplatene med størst brannmotstand ytterst, vil en få økt brannmotstand, fordi det ytterste laget vil gi det største bidraget.

- **Innfesting** – Innfestingen av gipsplatene på treverket er viktig for å oppnå god brannmotstand. Liten senteravstand mellom stendere/lekter (i en bindingsverksvegg) og få glipper mellom platene vil gi økt brannmotstand.
- **Isolering og tomrom** – Isolerte tomrom gir redusert brannmotstand, fordi en får en rask temperaturstigning i gipsplatene. Glassull vil gi bedre brannmotstand enn steinull i en bindingsverksvegg.
- **Festemidler** – Redusert hullavstand, økt kantavstand og skruelengde til festemidlene vil gi redusert nedfallstid for gipsplatene og dermed bedre brannmotstand.
- **Plassering i rommet** – Nedfallstiden og dermed brannmotstanden til gipsplatene påvirkes av hvor de er plassert pga. gravitasjonskrefter.

6.2 Sammenligning av metoder for dimensjonering av branngips

I dette kapittelet blir det konklusjonen til den andre problemstillingen presentert.

Følgende metoder for å dimensjonere branngips er kartlagt i avhandlingen:

Starttid til forkulling

- NS-EN 1995-1-2:2004
- Improved design method av ETH Zürich
- Metode basert på testresultater fra database

Nedfallstid

- NS-EN 1995-1-2:2004
- Metode basert på testresultater fra database

Brannmotstand

- Component additive method
- Tabellverdier fra New Zealand og Nord-Amerika

I avhandlingen ble det sammenlignet metoder for å beregne starttid til forkulling og tid med nødvendig brannmotstand.

Tabell 31: Sammenligning av starttid til forkulling

| Metode | Tid til start forkulling (t_{ch}) [min] |
|--|---|
| NS-EN 1995-1-2:2004 | 61,6 |
| Improved design method av ETH Zürich | 53,3 |
| Metode basert på testresultater fra database | 56,0 |

Resultatene viser at starttid til forkulling i trestenderen varierer fra 53,3 til 61,6 minutter, som vist i tabell 31. Avvikene skyldes blant annet store sikkerhetsmarginer, forenklinger og at det er store forskjeller i data på yteevnen til gipsplatene.

Tabell 32: Sammenligning av brannmotstand

| Metode | Brannmotstand [min] |
|----------------------------|---------------------|
| Component additive method | 95,0 |
| Tabellverdi – New Zealand | 105,0 |
| Tabellverdi – Nord-Amerika | 82,5 |

Resultatene i metodene for brannmotstand varierer fra 82,5 til 105 minutter, som vist i tabell 32. Avvikene skyldes sikkerhetsmarginer, forenklinger, forskjell i gipsplatenes yteevne og at noen av metodene er beregnet for gipsplater type X.

6.3 Risikovurdering av branngips i et trehus i brannklasse 3

I dette kapittelet blir det konklusjonen til den tredje problemstillingen presentert.

De viktigste resultatene fra risikovurderingen er oppsummert i tabellen under.

Tabell 33: Risikovurdering av trestendervegg med branngips

| Trestendervegg | |
|---|---|
| Tid til forkulling (t_{ch}) | 71,6 min |
| Nedfallstid pga. festemidler (t_f) | 176,6 min |
| Nedfallstid pga. termomekaniske egenskaper (t_f) | 90,0 min |
| Bærende kapasitet (R) igjennom et fullstendig brannforløp | Opprettholdes ikke i noen av brannscenarioene |
| Bærende kapasitet (R) igjennom en 90 minutters branneksponeering | Opprettholdes i brannscenario 1,2 og 3 |
| Brannskillende kapasitet (EI) igjennom et fullstendig brannforløp | Opprettholdes i brannscenario 1,2 og 3 |
| Påvist ytelse | REI 90 [B90] |
| Betongvegg | |
| Ytelse basert på tabellverdi [48] | REI 90 [A90] |

Resultatene fra risikovurderingen viser at den påviste ytelsen for trestenderveggen er REI 90 [B 90], er tilsvarende en REI 90 A2-s1,do [A 90] betongvegg. Resultatene er beregnet for tre ulike brannscenarioer og kan derfor ikke betraktes som reel risiko i trestenderveggen. Resultatene viser at trestenderveggen opprettholder brannmotstand REI 90 for alle brannscenarioene. For et brannforløp over 90 minutter opprettholder trestenderveggen brannskillende kapasitet (EI), men ikke bæreevne (R) for alle brannscenarioene. Den komparative analysen påviser analysebyggverket gir minst samme brannsikkerhet som referansebyggverket. Kravene i TEK10 anses dermed å være oppfylt. Det er dermed dokumentert ved analytisk prosjektering at en trestendervegg i et bærende hovedsystem i et trehus i BKL 3 opprettholder bæring og stabilitet i gjennom et fullstendig brannforløp.

6.4 Anbefalinger

I dette kapittelet blir det presentert anbefalinger på bakgrunn av rapportens konklusjon.

6.4.1 Materialeegenskaper og eksterne egenskaper som påvirker brannmotstand

Det anbefales at materialeegenskaper og eksterne faktorer som påvirker brannmotstand, bør gis et større fokus ved klassifisering av gipsplater NS-EN 520:2004 og ved videre utvikling av regler og metoder for brannprosjektering med gipsplater. Klassifiseringen av gipsplater type F, bør bli gjort mht. termomekaniske egenskaper, da det er identifisert mange materialeegenskaper som vil påvirke brannmotstanden. Ved en bedre differensiering av gipsplatene mht. til brannmotstand kan, kan man få en økt nytte-kostnads effekt ved at man unngår både overdimensjonering og underdimensjonering av passiv brannsikring med gipsplater.

6.4.2 Sammenligning av metoder for dimensjonering av branngips

Det anbefales at det videreutvikles metoder for dimensjonering av branngips, som i større grad tar hensyn til materialeegenskaper og eksterne faktorer som påvirker brannmotstanden, slik at en unngår store sprik i resultatene. I tillegg anbefales det at det utvikles flere metoder som er gyldige for tre lag gips. F.eks. NS-EN 1995-1-2:2004 gir ingen regneregler for tre lag gips, som gjør at brannrådgivere må finne andre metoder.

6.4.3 Risikovurdering av branngips i et trehus i brannklasse 3

På bakgrunn at det i denne rapporten ble dokumentert ved analyse at en kan bruke bærende trestendervegger i byggverk i brannklasse 3, anbefales det at data for yteevnen til gipsplater i større grad blir tilgjengelig til bruk for brannprosjektering. Dette er mulig hvis plateprodusenter oppgir yteevne for gipsplater, eller ved at databaser med testresultater for trekonstruksjoner med gipsplater blir tilgjengelige for brannrådgivere.

Det anbefales at det videreutvikles metoder for å dimensjonere trekonstruksjoner med branngips igjennom et fullstendig brannforløp, da det finnes få standardiserte metoder for dette.

7. VIDERE ARBEID

I dette kapitlet blir det presentert forslag til videre arbeid på temaene i avhandlingen.

For videre arbeid kan det være interessant å gjennomføre branntester på trekonstruksjoner med gipsplater med brannmotstand REI 90, for å se i praksis hva som påvirker brannmotstanden.

Relevante problemstillinger kan være:

- Hva må til for å oppnå brannmotstand REI 90 for en trestendervegg?
- Hvilke krav stilles til utførelse for å oppnå brannmotstand REI 90?

På bakgrunn at det i denne rapporten ble funnet lite tilgjengelig data på branngips, kan det være aktuelt å kartlegge om det finnes dataprogrammer som kan brukes til simulering av trekonstruksjoner innkledd med gipsplater.

Mulige problemstillinger kan være:

- Hvilke dataprogrammer kan brukes for å simulere forkulling i trekonstruksjoner med gipsplater?
- Hvordan blir egenskapene til gipsplatene simulert?

8. REFERANSELISTE

- [1] Just A. et al. Gypsum plasterboard used as fire protection – Analysis of a database. Stockholm: SP Technical Research Institute of Sweden; 2010. SP Report 2010:29.
- [2] Östman B. et al. Fire safety in timber buildings – Technical guideline for Europe. SP Träteknik; 2010.
- [3] Dalland O. Metode og oppgaveskriving. 5. utgave. Oslo: Gyldendal Norsk Forlag AS; 2012.
- [4] Norsk Standard. NS 3901:2012 Krav til risikovurdering av brann i byggverk. Standard Norge; 2012.
- [5] Statens bygningstekniske etat. Rettleiing for tilsyn i byggjesaker. Prosjektering – brannsikkerhetsstrategi. Oslo: Norsk byggtjenestes forlag; 2007. HO-3/2007.
- [6] Byggeforskrift 1987 [Internett]. Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap [oppdatert 3.5.2013; hentet 3.5.2013]. Tilgjengelig fra <http://oppslagsverket.dsb.no/content/arkiv/plan-bygg/byggeforskrift-1987/>
- [7] Kristoffersen B. og Mostue B.A. Brannsikkerhet i bygg: Sammenligning av alternative branntekniske strategier. Trondheim: SINTEF; 2001. NBL A05102.
- [8] Forskrift om byggesak (byggesaksforskriften) [Internett]. Lovdata [oppdatert 9.4.2010; sitert 6.3.2013]. Tilgjengelig fra <http://www.lovdata.no/ltavd1/filer/sf-20100326-0488.html#9-3>
- [9] Veiledning om tekniske krav til byggverk [Internett]. Direktoratet for byggkvalitet [oppdatert 1.07.2012; sitert 27.1.13]. Tilgjengelig fra <http://byggeregler.dibk.no/dxp/content/tekniskekrav/11/3/>
- [10] Forskrift om tekniske krav til byggverk [Internett]. Direktoratet for byggkvalitet [oppdatert 9.12.2012; sitert 27.01.13]. Tilgjengelig fra <http://www.lovdata.no/cgi-wift/ldles?doc=/sf/sf/sf-20100326-0489.html>
- [11] Stenstad V. Fravik fra preaksepterte ytelser. Presentasjon presentert på Forebyggende Forum, Drammen. 2012, september.
- [12] Stenstad V. Brannsikkerhetsstrategi – Dokumentasjon og kontroll. Trondheim: SINTEF Byggforsk; 2003. Byggforskserien. 321.026.
- [13] Faguttrykk [Internett]. Kollegiet for brannfaglig terminologi [oppdatert 5.3.2013; sitert 5.3.2013]. Tilgjengelig fra <http://www.kbt.no/faguttrykk.asp>
- [14] Rausand M. og Utne I.B. Risikoanalyse – teori og metoder. Trondheim: Tapir Akademiske Forlag; 2009.

- [15] Aven T. og Renn O. Risk Management and Governance. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2010.
- [16] An introduction to the IRGC Risko Governance Framework [Internett]. IRGC [oppdatert 2008; sitert 18.2.2013] Tilgjengelig fra http://www.irgc.org/IMG/pdf/An_introduction_to_the_IRGC_Risk_Governance_Framework.pdf
- [17] Veiledning til forskrift om brannforebyggende tiltak og tilsyn [Internett]. Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap [oppdatert 6.9.12; sitert 27.1.13]. Tilgjengelig fra <http://www.dsb.no/Global/Publikasjoner/2004/Veiledning/Fobtotlav.pdf>
- [18] Norsk Standard NS 5814:2008 Krav til risikovurderinger. Standard Norge; 2008.
- [19] Norsk Standard NS 5815:2006 Risikovurdering av anleggsarbeid. Standard Norge; 2006.
- [20] International Standard ISO 16732-1 Fire safety engineering – Fire risk assessment – Part 1: General. ISO; 2012.
- [21] Furness A. og Mucket M. Introduction to Fire Safety Management. Første utgave. Slovenia: MKT print; 2007.
- [22] Spets A. og Mittet T.O. Dokumentasjon av brannsikkerhet i bruksfasen. Trondheim: SINTEF Byggforsk; 2002. Byggforskserien. 626.102
- [23] Plan og bygningsloven [Internett]. Lovdata [oppdatert 10.8.2012; sitert 27.1.13]. Tilgjengelig fra <http://www.lovdata.no/all/nl-20080627-071.html>.
- [24] Brann og eksplosjonsvernloven [Internett]. Lovdata [oppdatert 19.6.2009; sitert 27.1.13]. Tilgjengelig fra <http://www.lovdata.no/all/nl-20020614-020.html>
- [25] Veileder for kommunale risiko- og sårbarhetsanalyser [Internett]. Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap [oppdatert 30.6.2009; sitert 12.02.13]. Tilgjengelig fra http://www.dsb.no/Global/Publikasjoner/Tidligere/Andre/risiko_saarb-analyse.pdf
- [26] Glasø G. og Landrø H. Tre og Brann. Trondheim: Trefokus AS, Tret teknisk og Tresenteret; 2012. FOKUS på tre Nr. 37.
- [27] Glasø G. Fleretasjes trehus. Trondheim: Trefokus AS og Tret teknisk; 2008. Fokus på tre Nr. 32
- [28] Verdens høyeste trehus bygges i Bergen [internett]. Sweco [oppdatert 2012; sitert 11.3.2013]
- [29] Friquin K.L. Material properties and external factors influencing the charring rate of solid wood and glue-laminated timber. Trondheim: Wiley Online Library; 2010. FIRE AND MATERIALS.

- [30] Norsk Standard 1995-1-2:2004 Prosjektering av trekonstruksjoner – Brannteknisk dimensjonering. Standard Norge; 2008.
- [31] Babrauskas V. Ignition of Wood: A Review of the State of the Art. Issaquah, USA: SFPA; 2002. Journal of Fire Protection Engineering.
- [32] Næringslivets sikkerhetsorganisasjon. Brannvern. Norge: NSO; 2011. Faghefte fra NSO.
- [33] Buchanan A.H. Structural Design for Fire Safety. Chichester: Wiley; 2002.
- [34] Treteknisk. Veiledning – bygge med Massivtreelementer. Trondheim: Treteknisk; 2006. Håndbok nr.1 – bygge med Massivtreelementer.
- [35] Evans G. F. Brannbeskyttet trevirke. Trondheim: Trefokus AS og Treteknisk; 2003. FOKUS på tre Nr.31.
- [36] Keerthan P. og Mahendran M. Numerical studies of gypsum plasterboard panels under standard fire conditions. Brisbane: Elsevier; 2012. Fire Safety Journal.
- [37] Norsk Standard 520:2005 Gipsplater Definisjoner, krav og prøvingsmetoder. Standard Norge; 2004.
- [38] Norsk nettleksikon [Internett]. Store Norske Leksikon [oppdatert 2013; sitert 21.3.2013]. Tilgjengelig fra <http://snl.no/>
- [39] Manzello S.L. et al. Measurement of thermal properties of gypsum board at elevated temperatures. Gaithersburg: Building and Fire Research Laboratory – NIST; 2008. International Conference on Structures in Fire (SiF'08).
- [40] Just A. et al. Fire protection abilities provided by gypsum plasterboards. Stockholm: SP Wood Technology; 2012. World Conference on Timber Engineering.
- [41] Bénichou N. og Sultan M.A. Thermal Properties of lightweight-framed construction components at elevated temperatures. Ottawa: Wiley; 2005. FIRE AND MATERIALS.
- [42] Wakili K.G. og Hugi E. Four Types of Gypsum Plaster Boards and their Thermophysical Properties Under Fire Condition. Duebendorf: SAGE; 2008. Journal of FIRE SCIENCES, VOL. 27 – January 2009.
- [43] Hakkarainen T. Post-Flashover Fires in Light and Heavy Timber Construction Components. Finland: SAGE; 2002. Journal of Fire Sciences.
- [44] Knoop H. Risikovurdering av brann i byggverk [Prosjektoppgave]. Trondheim: NTNU; 2012.
- [45] NFPA. The SFPE Handbook Of Fire Protection Engineering. Fourth edition. Quincy: National Fire Protection Association; 2008.
- [46] Norsk Standard 1991-1-2:2002 Allmenne laster – Laster på konstruksjoner ved brann. Standard Norge; 2008.

- [47] Zehfuss J. og Hosser D. A parametric natural fire model for the structural fire design of multi-storey buildings. Berlin: Elsevier; 2006.
- [48] Norsk Standard 1992-1-2:2004 Prosjektering av betongkonstruksjoner. Brann teknisk dimensjonering. Standard Norge; 2010.
- [49] Trefokus [Internett]. Dimensjonering av bærende/brannskillende konstruksjoner [oppdatert 12.09.2006; sitert 15.05.2013] Tilgjengelig fra <http://www.trefokus.no/fullstory.aspx?m=524&amid=966>
- [50] Hveem S. Lydisolerende tunge etasjeskillere – Konstruksjonseksempler. Trondheim: SINTEF Byggforsk; 1998. Byggforskserien. 522.514.
- [51] Bukowski R.W. Estimates of the Operational Reliability of Fire Protection Systems. Gaithersburg, USA: MST Building and Fire Research Laboratory; 1999.
- [52] NFPA [Internett]. Reliability of Automatic Sprinkler Systems [oppdatert 1.1.2005; sitert 22.05.2013] Tilgjengelig fra http://www.nfpa.org/assets/files/pdf/proceedings/reliability_of_automatic_sprinkler_systems-w.koffel_paper.pdf
- [53] Friquin K.L. Charring rates of heavy timber structures for Fire Safety Design [Doctoral thesis], Trondheim: NTNU 2010

VEDLEGG

Vedlegg 1 – Oppgavetekst

MASTEROPPGAVE

(TBA4905 Bygnings- og materialteknikk, masteroppgave)

VÅREN 2013
for
Herman Knoop

Risikovurdering og dimensjonering av gipsplater som passiv brannsikring av trekonstruksjoner

BAKGRUNN

I Norge klassifiseres gipsplater type F (branngipsplater) i henhold til klassifiseringen i NS-EN 520:2004. Likevel har platene stor forskjell i brannmotstand, til tross for at platene er klassifisert til samme type. Det er dermed et behov for å differensiere egenskapene til gipsplatene, som f.eks. materialeegenskaper og eksterne faktorer som påvirker brannmotstanden.

Gipsplater som skal beskytte trekonstruksjoner dimensjoneres ofte etter tid til start av forkulling av treverk og nedfallstiden til gipsplatene. Det finnes en rekke ulike metoder for en slik dimensjonering, men resultatene varierer etter hvilke kilder som blir brukt. Det er dermed et behov for å kartlegge og sammenligne metoder for å dimensjonere gipsplater som innkledning av trekonstruksjoner.

Blant annet pga. funksjonsbaserte forskrifter og et miljøfokus i byggebransjen, bygges det flere trehus i brannklasse 3 med bærende trekonstruksjoner med gipsplater som passiv brannsikring. VTEK gir preaksepterte løsninger for et bærende hovedsystem i stål og betong, men ikke i tre. Dermed må brann sikkerheten i det bærende hovedsystemet verifiseres med analyse, f.eks. med en risikovurdering med NS 3901:2012.

OPPGAVE

Beskrivelse av oppgaven

Oppgaven skal vurdere hvilke materialeegenskaper og eksterne faktorer som påvirker en branngipsplate, da testresultater viser store avvik i brannmotstand i gipsplater med samme klassifisering iht. NS-EN 520:2004. Det finnes flere ulike beregningsmetoder for dimensjonering av branngips. Rapporten vil videre sammenligne tid i antall minutter for ulike beregningsmetoder for dimensjonering av branngips. I tillegg vil det gjennomføres en risikovurdering med bruk av NS 3901:2012 av brannmotstanden til en bærende trestendervegg i en bolig i brannklasse 3.



Målsetting og hensikt

Resultatmål:

Gjøre rede for hva som er sentralt innen temaene branngips som passiv brannsikring i trehus og risikovurdering av brann, samt gjennomføre en risikovurdering av en bærende trestendervegg i et trehus i brannklasse 3 og sammenligne ulike beregningsmetoder for dimensjonering av branngips innen 10. juni 2013.

Effekt mål:

Innføre mer kunnskap om brannmotstand til branngipsplater og hvordan gipsplatene kan dimensjoneres og dokumenteres utførlig for å gi nødvendig brannsikring av trekonstruksjoner i Norge.

Deloppgaver og forsknings spørsmål

- Hvilke materialeegenskaper og eksterne faktorer påvirker brannmotstanden til en branngipsplate?
- Hvilke metoder for dimensjonering av branngips finnes og hvilken forskjell i antall minutter gir en sammenligning av disse?
- Hva slags resultater gir en risikovurdering av brannmotstanden til en bærende trestendervegg med branngipsplater i et boligbygg i brannklasse 3, med bruk av NS 3901:2012
«Krev til risikovurdering av brann i byggverk?»



GENERELT

Oppgaveteksten er ment som en ramme for kandidatens arbeid. Justeringer vil kunne skje underveis, når en ser hvordan arbeidet går. Eventuelle justeringer må skje i samråd med faglærer ved instituttet.

Ved bedømmelsen legges det vekt på grundighet i bearbeidningen og selvstendigheten i vurderinger og konklusjoner, samt at framstillingen er velredigert, klar, entydig og ryddig uten å være unødige voluminøs.

Besvarelsen skal inneholde

- standard rapportforside (automatisk fra DAIM, <http://daim.idi.ntnu.no/>)
- tittelside med ekstrakt og stikkord (mal finnes på siden <http://www.ntnu.no/bat/skjema/bank>)
- sammendrag på norsk og engelsk (studenter som skriver sin masteroppgave på et ikke-skandinavisk språk og som ikke behersker et skandinavisk språk, trenger ikke å skrive sammendrag av masteroppgaven på norsk)
- hovedteksten
- oppgaveteksten (denne teksten signert av faglærer) legges ved som Vedlegg 1.

Besvarelsen kan evt. utformes som en vitenskapelig artikkel for internasjonal publisering. Besvarelsen inneholder da de samme punktene som beskrevet over, men der hovedteksten omfatter en vitenskapelig artikkel og en prosessrapport.

Instituttets råd og retningslinjer for rapportskrivning ved prosjektarbeid og masteroppgave befinner seg på <http://www.ntnu.no/bat/studier/oppgaver>.

Hva skal innleveres?

Rutiner knyttet til innlevering av masteroppgaven er nærmere beskrevet på <http://daim.idi.ntnu.no/>. Trykking av masteroppgaven bestilles via DAIM direkte til Skipnes Trykkeri som leverer den trykte oppgaven til instituttkontoret 2-4 dager senere. Instituttet betaler for 3 eksemplarer, hvorav instituttet beholder 2 eksemplarer. Ekstra eksemplarer må bekostes av kandidaten/ eksternt samarbeidspartner.

Ved innlevering av oppgaven skal kandidaten levere en CD med besvarelsen i digital form i pdf- og word-versjon med underliggende materiale (for eksempel datainnsamling) i digital form (f. eks. excel). Videre skal kandidaten levere innleveringsskjemaet (fra DAIM) hvor både Ark-Bibl i SBI og Fellestjenester (Byggsikring) i SB II har signert på skjemaet. Innleveringsskjema med de aktuelle signaturene underskrives av instituttkontoret før skjemaet leveres Fakultetskontoret.

Dokumentasjon som med instituttets støtte er samlet inn under arbeidet med oppgaven skal leveres inn sammen med besvarelsen.

Besvarelsen er etter gjeldende reglement NTNUs eiendom. Eventuell benyttelse av materialet kan bare skje etter godkjenning fra NTNU (og eksternt samarbeidspartner der dette er aktuelt). Instituttet har rett til å bruke resultatene av arbeidet til undervisnings- og forskningsformål som om det var utført av en ansatt. Ved bruk ut over dette, som utgivelse og annen økonomisk utnyttelse, må det inngås særskilt avtale mellom NTNU og kandidaten.

(Evt) Avtaler om eksternt veiledning, gjennomføring utenfor NTNU, økonomisk støtte m.v. Beskrives her når dette er aktuelt. Se <http://www.ntnu.no/bat/skjema/bank> for avtaleskjema.



Fakultet for ingeniørvitenskap og teknologi
Institutt for bygg, anlegg og transport

Page 4 of 4 pages

Helse, miljø og sikkerhet (HMS):

NTNU legger stor vekt på sikkerheten til den enkelte arbeidstaker og student. Den enkeltes sikkerhet skal komme i første rekke og ingen skal ta unødige sjanser for å få gjennomført arbeidet. Studenten skal derfor ved uttak av masteroppgaven få udelte brosjyren "Helse, miljø og sikkerhet ved feltarbeid m.m. ved NTNU".

Dersom studenten i arbeidet med masteroppgaven skal delta i feltarbeid, tokt, befarings, feltkurs eller ekskursjoner, skal studenten sette seg inn i "Retningslinje ved feltarbeid m.m.". Dersom studenten i arbeidet med oppgaven skal delta i laboratorie- eller verkstedarbeid skal studenten sette seg inn i og følge reglene i "Laboratorie- og verkstedhåndbok". Disse dokumentene finnes på fakultetets HMS-sider på nettet, se <http://www.ntnu.no/vt/adm/hms/>. Alle studenter som skal gjennomføre laboratoriearbeid i forbindelse med prosjekt- og masteroppgave skal gjennomføre et web-basert TRAINOR HMS-kurs. Påmelding på kurset skjer til sonja.hammer@ntnu.no

Studenter har ikke fall forsikringsdekning gjennom sitt forhold til NTNU. Dersom en student ønsker samme forsikringsdekning som tilsatte ved universitetet, anbefales det at han/hun tegner reiseforsikring og personskadeforsikring. Mer om forsikringsordninger for studenter finnes under samme lenke som ovenfor.

Oppstart og innleveringsfrist:

Oppstart og innleveringsfrist er i henhold til informasjon i DAIM.

Faglærer ved instituttet: Harald Landrø

Veileder(eller kontaktperson) hos ekstern samarbeidspartner: Björn Magnusson, Rambøll

Institutt for bygg, anlegg og transport, NTNU

Dato:

Underskrift
Faglærer

Vedlegg 2 – Epost med Johan Arvidsson i Norgips

Sendt 15.04.2013:

«Hei

Mitt navn er Herman Knoop og er student på NTNU.

Jeg skriver for tiden masteroppgave om temaet branngips og trekonstruksjoner.

Jeg jobber blant annet med å finne ut hva som skiller en god og en dårlig branngipsplate type F mht. brannmotstand.

Med andre ord ønsker jeg å finne ut om fysiske forskjeller mellom platene, faktorer som påvirker kvaliteten osv.

I den sammenheng lurte jeg på om dere i Norgips kunne gi noen innspill på faktorer som påvirker brannmotstanden til en branngipsplate type F.

mvh

Herman Knoop, student NTNU»

Svar 16.04.2013:

«Hej Herman!

Intressant att du skriver om gipsskivor och träkonstruktioner och jag hoppas vi kan vara till lite hjälp här.

Gipsskivor typ F, Norgips Brand 15 mm, är producerade enligt EN 520 som du säkert vet och typen "F" får skivan när man klarar en av provningarna i standarden som heter "Core Cohesion" under 15 min och utan nedfall.

Det som händer när en gipsskiva utsätts för ett brandprov är att det bundna vattnet i gipsen, 2H₂O, dunstar och kyles ner skivan en kort stund. När vattnet är borta bildas luftbubblor och gipsen börjar krackelera och spricka och både värme och rökgas kan komma igenom. Det är detta skede man vill fördröja med en typ F skiva.

Detta gör man med några olika tillsatser:

- Vermikulit, en mineral som expanderar under värme och funktionen i gipsskivan är att fylla utrymmet som blir efter att vattnet dunstar och bidrar till att skivan är intakt längre.

- Lera, är brandhämmande och gör skivan värmetålig en längre tid.
- Glasfiber armering, armerar gipsskärnan och håller samman och fördröjer sprickbildningen som oftast är den avgörande faktorn i ett brandtest.

Jag hoppas att denna generella beskrivning kan hjälpa dig, vi kan inte lämna ut exakt hur skivan är sammansatt och fördelningen av de olika ingående ämnena i skivan.

Om du önskar mer hjälp är du välkommen att ta kontakt igen och det vore intressant att få veta mer om vad din masteroppgave skall leda till och om det är något mer vi kan bistå med.

*Med vänliga hälsningar / Med vennlig hilsen / Best regards / Mit freundlichen Grüßen
Johan Arvidsson
Technical & Development Manager»*

Vedlegg 3 – Epost med Dag Hamre i Gyproc**Sendt 15.04.2013:***«Hei**Mitt navn er Herman Knoop og er student på NTNU.**Jeg skriver for tiden masteroppgave om temaet branngips og trekonstruksjoner.**Jeg jobber blant annet med å finne ut hva som skiller en god og en dårlig branngipsplate type F mht. brannmotstand.**Med andre ord ønsker jeg å finne ut om fysiske forskjeller mellom platene, faktorer som påvirker kvaliteten osv.**I den sammenheng lurte jeg på om dere i Gyproc kunne gi noen innspill på faktorer som påvirker brannmotstanden til en branngipsplate type F.**mvh**Herman Knoop, student NTNU»***Svar 01.05.2013***«Hei!**Beklager sent svar!**I utgangspunktet er branngipsplater produsert i samsvar NS-EN 520 standarden. De viktigste fysiske forskjellene vil vel først og fremst fremkomme i branntester ved at de gir ulike resultater i brannmotstand. Prinsippet med disse platene er at de er tilsatt ekspanderende stoffer som kompenserer for volumet av vann som fordamper ved varmepåvirkningen og normalt ville forårsake sprekkdannelse i platene. Dette ser vi skjer på normalgipsplater. Det er jo vannet i platene som gir platene en brannbeskyttende egenskap ved at temperaturen holdes jevn så lenge vannet gir en avkjølende effekt ved fordampningen. I en normalgipsplate er bundet ca 2 liter vann pr m².**Med vennlig hilsen / Best regards,**Dag Hamre**Teknisk sjef*

Vedlegg 4 – Beregning av parametriske temperatur-tidkurver

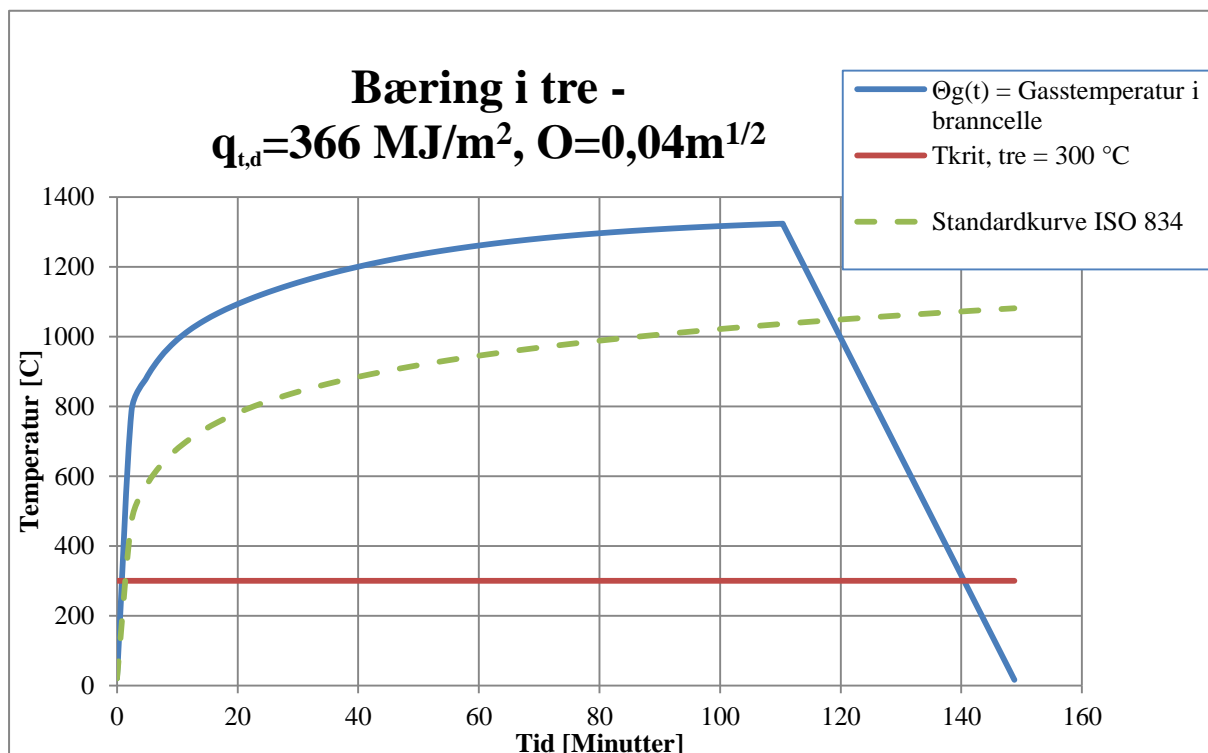
I dette vedlegget ligger det Excel ark, som ble bruk for å beregne figur 17,18 og 19 i avhandlingen. Figurene er også lagt ved i vedlegget. Kurvene er beregnet etter NS-EN 1991-1-2:2002 Tillegg A [46].

| Beskrivelse | Verdi | Brannscenario 1 | Brannscenario 2 | Brannscenario 3 | Enhet |
|---|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------------------------------|
| Samlet areal av omsluttende bygningsdeler | A_t | 100,00 | 100,00 | 100,00 | m ² |
| Samlet areal av vertikale åpninger | A_v | 2,97 | 2,97 | 2,97 | m ² |
| Areal vegg | $A_{vegg,1}$ | 15,60 | 15,60 | 15,60 | m ² |
| Areal vegg | $A_{vegg,2}$ | 10,40 | 10,40 | 10,40 | m ² |
| Areal vegg | $A_{vegg,3}$ | 15,60 | 15,60 | 15,60 | m ² |
| Areal vegg | $A_{vegg,4}$ | 7,43 | 7,43 | 7,43 | m ² |
| Areal gulv | A_{gulv} | 24,00 | 24,00 | 24,00 | m ² |
| Areal tak | A_{tak} | 24,00 | 24,00 | 24,00 | m ² |
| Vektet gjennomsnitt av vindushøyden for alle vegger | h_{eq} | 1,80 | 1,80 | 1,80 | m |
| Åpningsfaktor | O | 0,04 | 0,04 | 0,04 | m ^{1/2} |
| Termisk treghet gips | b_{gips} | 426 | 426 | 426 | J/m ² s ^{1/2} K |
| Termisk treghet tre | b_{tre} | 338 | 338 | 338 | J/m ² s ^{1/2} K |
| Termisk treghet betong | b_{betong} | - | - | - | J/m ² s ^{1/2} K |
| Termisk treghet totalt | b_{totalt} | 404 | 404 | 404 | J/m ² s ^{1/2} K |
| Tidsfaktorfunksjon | Γ | 8,17 | 8,17 | 8,17 | - |
| Karakteristisk spesifikk brannenergi per enhet gulvareal | $q_{f,k}$ | 1388 | 1157 | 1157 | MJ/m ² |
| Dimensjonerende verdi av spesifikk brannenergien relatert til overflatereale A_f av gulvet | $q_{f,d}$ | 1527 | 763 | 1018 | MJ/m ² |
| Dimensjonerende verdi av spesifikk brannenergi relatert til det samlede arealet av omhyllingsflaten A_t | $q_{t,d}$ | 366 | 183 | 244 | MJ/m ² |
| Tid for brannens utviklingshastighet | t_{lim} | 0,25 | 0,33 | 0,33 | h |
| Tid ved høyeste temperatur | t_{max} | 1,84 | 0,92 | 1,23 | h |
| $t_{max} \cdot \Gamma$ | t^*_{max} | 15,02 | 7,51 | 10,01 | h |
| Maksimal gasstemperatur i branncelle | $\Theta_{g,max}$ | 1324 | 1249 | 1287 | °C |
| $t_{max} \cdot \Gamma$ i avkjølingsfase | $t^*_{max,a}$ | 15,02 | 7,51 | 10,01 | h |

Brannscenario 1 – Verste troverdige brannscenario

| Bæring i tre | | | | |
|---------------------|----------------|--|----------------------------------|--------------------------------|
| t [h] | t [min] | Θg(t) = Gasstemperatur i branncelle | Standardkurve ISO 834 | Tkrit, tre = 300 °C |
| 0 | 0 | 20 | 20,0 | 300 |
| 0,04 | 2 | 786 | 470,3 | 300 |
| 0,08 | 5 | 879 | 570,4 | 300 |
| 0,12 | 7 | 941 | 629,9 | 300 |
| 0,16 | 10 | 985 | 672,4 | 300 |
| 0,2 | 12 | 1018 | 705,4 | 300 |
| 0,24 | 14 | 1045 | 732,5 | 300 |
| 0,28 | 17 | 1068 | 755,4 | 300 |
| 0,32 | 19 | 1087 | 775,3 | 300 |
| 0,36 | 22 | 1105 | 792,8 | 300 |
| 0,4 | 24 | 1121 | 808,5 | 300 |
| 0,44 | 26 | 1135 | 822,7 | 300 |
| 0,48 | 29 | 1149 | 835,7 | 300 |
| 0,52 | 31 | 1161 | 847,6 | 300 |
| 0,56 | 34 | 1173 | 858,7 | 300 |
| 0,6 | 36 | 1184 | 869,0 | 300 |
| 0,64 | 38 | 1194 | 878,6 | 300 |
| 0,68 | 41 | 1204 | 887,7 | 300 |
| 0,72 | 43 | 1213 | 896,2 | 300 |
| 0,76 | 46 | 1221 | 904,3 | 300 |
| 0,8 | 48 | 1229 | 912,0 | 300 |
| 0,84 | 50 | 1236 | 919,3 | 300 |
| 0,88 | 53 | 1243 | 926,2 | 300 |
| 0,92 | 55 | 1249 | 932,9 | 300 |
| 0,96 | 58 | 1255 | 939,2 | 300 |
| 1 | 60 | 1261 | 945,3 | 300 |
| 1,04 | 62 | 1266 | 951,2 | 300 |
| 1,08 | 65 | 1271 | 956,8 | 300 |
| 1,12 | 67 | 1276 | 962,3 | 300 |
| 1,16 | 70 | 1280 | 967,5 | 300 |
| 1,2 | 72 | 1285 | 972,6 | 300 |
| 1,24 | 74 | 1288 | 977,5 | 300 |
| 1,28 | 77 | 1292 | 982,3 | 300 |
| 1,32 | 79 | 1295 | 986,9 | 300 |
| 1,36 | 82 | 1298 | 991,3 | 300 |
| 1,4 | 84 | 1301 | 995,7 | 300 |

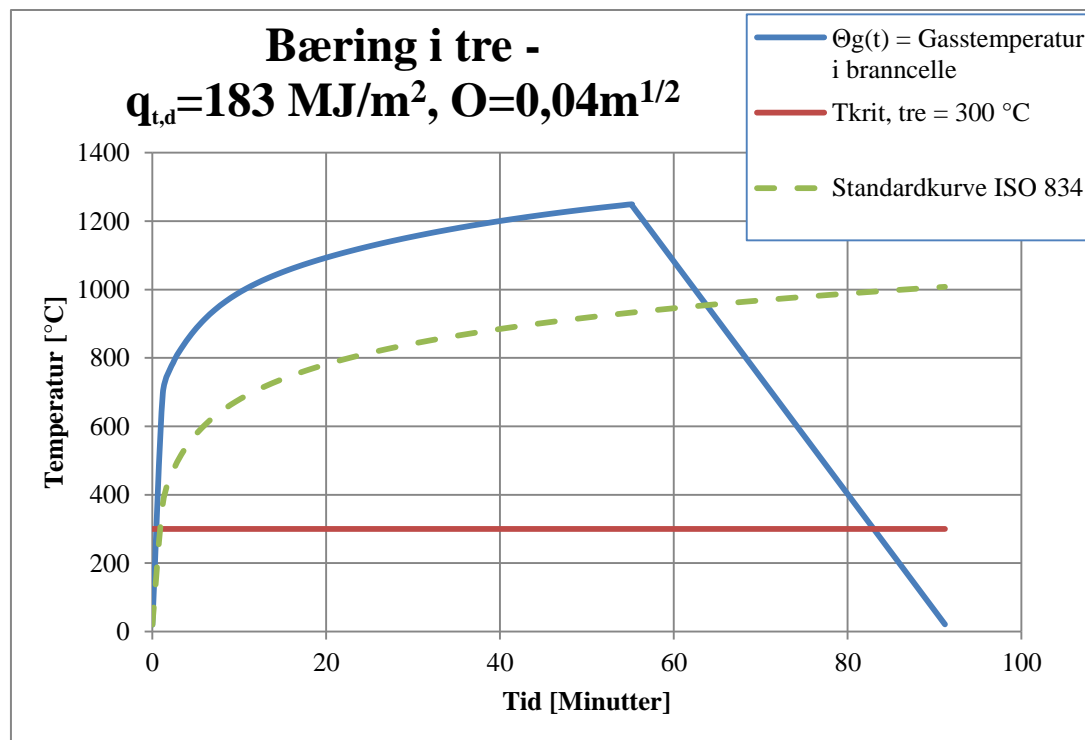
| | | | | |
|------|-----|------|--------|-----|
| 1,44 | 86 | 1304 | 999,9 | 300 |
| 1,48 | 89 | 1307 | 1004,0 | 300 |
| 1,52 | 91 | 1309 | 1008,0 | 300 |
| 1,56 | 94 | 1311 | 1011,9 | 300 |
| 1,6 | 96 | 1314 | 1015,6 | 300 |
| 1,64 | 98 | 1316 | 1019,3 | 300 |
| 1,68 | 101 | 1317 | 1022,9 | 300 |
| 1,72 | 103 | 1319 | 1026,5 | 300 |
| 1,76 | 106 | 1321 | 1029,9 | 300 |
| 1,8 | 108 | 1322 | 1033,3 | 300 |
| 1,84 | 110 | 1324 | 1036,6 | 300 |
| 1,84 | 110 | 1323 | 1036,6 | 300 |
| 1,88 | 113 | 1241 | 1039,8 | 300 |
| 1,92 | 115 | 1159 | 1042,9 | 300 |
| 1,96 | 118 | 1078 | 1046,0 | 300 |
| 2 | 120 | 996 | 1049,0 | 300 |
| 2,04 | 122 | 914 | 1052,0 | 300 |
| 2,08 | 125 | 833 | 1054,9 | 300 |
| 2,12 | 127 | 751 | 1057,8 | 300 |
| 2,16 | 130 | 669 | 1060,6 | 300 |
| 2,2 | 132 | 588 | 1063,3 | 300 |
| 2,24 | 134 | 506 | 1066,0 | 300 |
| 2,28 | 137 | 424 | 1068,7 | 300 |
| 2,32 | 139 | 343 | 1071,3 | 300 |
| 2,36 | 142 | 261 | 1073,8 | 300 |
| 2,4 | 144 | 179 | 1076,3 | 300 |
| 2,44 | 146 | 98 | 1078,8 | 300 |
| 2,48 | 149 | 16 | 1081,2 | 300 |



Brannscenario 2 – Representativt brannscenario 1

| Bæring i tre | | | | |
|------------------------|--------------------------|--|--|--------------------------------------|
| t [h] | t [min] | Θg(t) = Gasstemperatur i branncelle | Standardkurve ISO 834 | Tkrit, tre = 300 °C |
| 0 | 0 | 20 | 20,0 | 300 |
| 0,02 | 1 | 697 | 373,7 | 300 |
| 0,04 | 2 | 786 | 470,3 | 300 |
| 0,06 | 4 | 838 | 528,6 | 300 |
| 0,08 | 5 | 879 | 570,4 | 300 |
| 0,1 | 6 | 913 | 603,1 | 300 |
| 0,12 | 7 | 941 | 629,9 | 300 |
| 0,14 | 8 | 965 | 652,7 | 300 |
| 0,16 | 10 | 985 | 672,4 | 300 |
| 0,18 | 11 | 1003 | 689,8 | 300 |
| 0,2 | 12 | 1018 | 705,4 | 300 |
| 0,22 | 13 | 1033 | 719,6 | 300 |
| 0,24 | 14 | 1045 | 732,5 | 300 |
| 0,26 | 16 | 1057 | 744,4 | 300 |
| 0,28 | 17 | 1068 | 755,4 | 300 |
| 0,3 | 18 | 1078 | 765,7 | 300 |
| 0,32 | 19 | 1087 | 775,3 | 300 |
| 0,34 | 20 | 1096 | 784,3 | 300 |
| 0,36 | 22 | 1105 | 792,8 | 300 |
| 0,38 | 23 | 1113 | 800,9 | 300 |
| 0,4 | 24 | 1121 | 808,5 | 300 |
| 0,42 | 25 | 1128 | 815,8 | 300 |
| 0,44 | 26 | 1135 | 822,7 | 300 |
| 0,46 | 28 | 1142 | 829,4 | 300 |
| 0,48 | 29 | 1149 | 835,7 | 300 |
| 0,5 | 30 | 1155 | 841,8 | 300 |
| 0,52 | 31 | 1161 | 847,6 | 300 |
| 0,54 | 32 | 1167 | 853,3 | 300 |
| 0,56 | 34 | 1173 | 858,7 | 300 |
| 0,58 | 35 | 1178 | 863,9 | 300 |
| 0,6 | 36 | 1184 | 869,0 | 300 |
| 0,62 | 37 | 1189 | 873,9 | 300 |
| 0,64 | 38 | 1194 | 878,6 | 300 |
| 0,66 | 40 | 1199 | 883,2 | 300 |
| 0,68 | 41 | 1204 | 887,7 | 300 |
| 0,7 | 42 | 1208 | 892,0 | 300 |
| 0,72 | 43 | 1213 | 896,2 | 300 |

| | | | | |
|------|----|------|--------|-----|
| 0,74 | 44 | 1217 | 900,3 | 300 |
| 0,76 | 46 | 1221 | 904,3 | 300 |
| 0,78 | 47 | 1225 | 908,2 | 300 |
| 0,8 | 48 | 1229 | 912,0 | 300 |
| 0,82 | 49 | 1232 | 915,7 | 300 |
| 0,84 | 50 | 1236 | 919,3 | 300 |
| 0,86 | 52 | 1240 | 922,8 | 300 |
| 0,88 | 53 | 1243 | 926,2 | 300 |
| 0,9 | 54 | 1246 | 929,6 | 300 |
| 0,92 | 55 | 1249 | 932,9 | 300 |
| 0,92 | 55 | 1246 | 932,9 | 300 |
| 0,94 | 56 | 1205 | 936,1 | 300 |
| 0,96 | 58 | 1164 | 939,2 | 300 |
| 0,98 | 59 | 1123 | 942,3 | 300 |
| 1 | 60 | 1083 | 945,3 | 300 |
| 1,02 | 61 | 1042 | 948,3 | 300 |
| 1,04 | 62 | 1001 | 951,2 | 300 |
| 1,06 | 64 | 960 | 954,1 | 300 |
| 1,08 | 65 | 919 | 956,8 | 300 |
| 1,1 | 66 | 878 | 959,6 | 300 |
| 1,12 | 67 | 838 | 962,3 | 300 |
| 1,14 | 68 | 797 | 964,9 | 300 |
| 1,16 | 70 | 756 | 967,5 | 300 |
| 1,18 | 71 | 715 | 970,1 | 300 |
| 1,2 | 72 | 674 | 972,6 | 300 |
| 1,22 | 73 | 633 | 975,1 | 300 |
| 1,24 | 74 | 593 | 977,5 | 300 |
| 1,26 | 76 | 552 | 979,9 | 300 |
| 1,28 | 77 | 511 | 982,3 | 300 |
| 1,3 | 78 | 470 | 984,6 | 300 |
| 1,32 | 79 | 429 | 986,9 | 300 |
| 1,34 | 80 | 388 | 989,1 | 300 |
| 1,36 | 82 | 348 | 991,3 | 300 |
| 1,38 | 83 | 307 | 993,5 | 300 |
| 1,4 | 84 | 266 | 995,7 | 300 |
| 1,42 | 85 | 225 | 997,8 | 300 |
| 1,44 | 86 | 184 | 999,9 | 300 |
| 1,46 | 88 | 143 | 1001,9 | 300 |
| 1,48 | 89 | 103 | 1004,0 | 300 |
| 1,5 | 90 | 62 | 1006,0 | 300 |
| 1,52 | 91 | 21 | 1008,0 | 300 |



Brannscenario 3 – Representativ brannscenario 2

| Bæring i tre | | | | |
|--------------|---------|---|-----------------------|--|
| t [h] | t [min] | $\Theta_g(t)$ = Gasstemperatur i branncelle | Standardkurve ISO 834 | $T_{krit, tre} = 300 \text{ }^\circ\text{C}$ |
| 0 | 0 | 20 | 20,0 | 300 |
| 0,03 | 2 | 752 | 429,7 | 300 |
| 0,06 | 4 | 838 | 528,6 | 300 |
| 0,09 | 5 | 897 | 587,7 | 300 |
| 0,12 | 7 | 941 | 629,9 | 300 |
| 0,15 | 9 | 975 | 662,8 | 300 |
| 0,18 | 11 | 1003 | 689,8 | 300 |
| 0,21 | 13 | 1026 | 712,7 | 300 |
| 0,24 | 14 | 1045 | 732,5 | 300 |
| 0,27 | 16 | 1062 | 750,0 | 300 |
| 0,3 | 18 | 1078 | 765,7 | 300 |
| 0,33 | 20 | 1092 | 779,9 | 300 |
| 0,36 | 22 | 1105 | 792,8 | 300 |
| 0,39 | 23 | 1117 | 804,7 | 300 |
| 0,42 | 25 | 1128 | 815,8 | 300 |
| 0,45 | 27 | 1139 | 826,1 | 300 |
| 0,48 | 29 | 1149 | 835,7 | 300 |
| 0,51 | 31 | 1158 | 844,8 | 300 |

| | | | | |
|------|-----|------|--------|-----|
| 0,54 | 32 | 1167 | 853,3 | 300 |
| 0,57 | 34 | 1176 | 861,4 | 300 |
| 0,6 | 36 | 1184 | 869,0 | 300 |
| 0,63 | 38 | 1192 | 876,3 | 300 |
| 0,66 | 40 | 1199 | 883,2 | 300 |
| 0,69 | 41 | 1206 | 889,9 | 300 |
| 0,72 | 43 | 1213 | 896,2 | 300 |
| 0,75 | 45 | 1219 | 902,3 | 300 |
| 0,78 | 47 | 1225 | 908,2 | 300 |
| 0,81 | 49 | 1231 | 913,8 | 300 |
| 0,84 | 50 | 1236 | 919,3 | 300 |
| 0,87 | 52 | 1241 | 924,5 | 300 |
| 0,9 | 54 | 1246 | 929,6 | 300 |
| 0,93 | 56 | 1251 | 934,5 | 300 |
| 0,96 | 58 | 1255 | 939,2 | 300 |
| 0,99 | 59 | 1260 | 943,8 | 300 |
| 1,02 | 61 | 1264 | 948,3 | 300 |
| 1,05 | 63 | 1268 | 952,6 | 300 |
| 1,08 | 65 | 1271 | 956,8 | 300 |
| 1,11 | 67 | 1275 | 960,9 | 300 |
| 1,14 | 68 | 1278 | 964,9 | 300 |
| 1,17 | 70 | 1281 | 968,8 | 300 |
| 1,2 | 72 | 1285 | 972,6 | 300 |
| 1,23 | 74 | 1287 | 976,3 | 300 |
| 1,23 | 74 | 1278 | 976,3 | 300 |
| 1,26 | 76 | 1217 | 979,9 | 300 |
| 1,29 | 77 | 1156 | 983,4 | 300 |
| 1,32 | 79 | 1095 | 986,9 | 300 |
| 1,35 | 81 | 1033 | 990,2 | 300 |
| 1,38 | 83 | 972 | 993,5 | 300 |
| 1,41 | 85 | 911 | 996,7 | 300 |
| 1,44 | 86 | 850 | 999,9 | 300 |
| 1,47 | 88 | 788 | 1003,0 | 300 |
| 1,5 | 90 | 727 | 1006,0 | 300 |
| 1,53 | 92 | 666 | 1009,0 | 300 |
| 1,56 | 94 | 605 | 1011,9 | 300 |
| 1,59 | 95 | 544 | 1014,7 | 300 |
| 1,62 | 97 | 482 | 1017,5 | 300 |
| 1,65 | 99 | 421 | 1020,2 | 300 |
| 1,68 | 101 | 360 | 1022,9 | 300 |
| 1,71 | 103 | 299 | 1025,6 | 300 |
| 1,74 | 104 | 237 | 1028,2 | 300 |
| 1,77 | 106 | 176 | 1030,8 | 300 |

| | | | | |
|------|-----|-----|--------|-----|
| 1,8 | 108 | 115 | 1033,3 | 300 |
| 1,83 | 110 | 54 | 1035,7 | 300 |

