

ENTRÉ – energieffektive trekonstruksjoner

Delrapport 2 – Yttervegger i tre som kan tilfredsstille passivhuskrav

ENTRÉ – Energy Efficient Timber Structures

Saksbehandlere: Christoffer Aas Clementz, Kristine Nore,
Ylva Steiner, Geir Glasø, Sigurd Eide,
Kristian Bysheim og Jørn T. Brunsell
Prosjekteier: Norsk Treteknisk Institutt
Finansiering: Innovasjon Norge ved Trebasert Innovasjonsprogram,
Treindustrien og Fondet for Treteknisk Forskning
Dato: Juli 2011

Sammendrag

Denne rapporten tar utgangspunkt i vår økende bruk av energi i bygg og tiltak som kan redusere dette. Det er fokusert på valg av ytterveggløsninger i tre som kan tilfredsstille kravene til passivhus i Norge. To hovedløsninger er valgt:

- Gjennomgående yttervegg
- Todelt yttervegg

Det er i rapporten utarbeidet detaljtegninger som viser overganger mot grunn, vindu/dør og tak for begge hovedløsninger. Detaljtegningene er i rapporten presentert i A4-format, men ligger tilgjengelig for nedlasting på www.treteknisk.no i A3-format, både som PDF og DAK-filer.

Det er foretatt beregninger av U-verdier og kuldebroer. I tillegg er det foretatt statistiske analyser av de forskjellige løsningene.

Resultater fra et eneboligprosjekt i passivhusutførelse vises i rapporten. I dette eneboligprosjektet er det foretatt logging av trefuktighet, relativ luftfuktighet og temperatur inne i ytterveggkonstruksjonen. Dette er gjort med forskjellig veggoppbygging og i forskjellige himmelretninger (nord/sør) siden byggestart. Loggingene viser at det er en viss fordel å benytte konveksjonssperre, selv om bidraget er på under 1 °C i gjennomsnitt etter at bygget er tatt i bruk. Det er i tillegg foretatt prøvetaking av eventuell biologisk vekst ett år etter byggestart. Analysene av disse viste ingen eller liten mikrobiell vekst.

Det er i rapporten gitt en oversikt over utvalgte passivhus i Norge og deres oppbygging.

Det er foretatt en økonomisk betraktning som ser på kostnadene ved bygging av passivhus sammenlignet med gjeldende standardkrav i teknisk forskrift (TEK10).

Summary

This report is concentrating on our increasing use of energy in buildings and actions to reduce this. The focus has been on the external wall and timber solutions that can satisfy the requirements for passive houses in Norway. Two main solutions has been chosen:

- Continuous exterior wall
- Two-piece timber frame wall

This report presents detailed drawings showing the transitions to ground, window/door and ceiling for the main solutions. Detailed drawings are presented in A4-format, but is available for download on www.treteknisk.no in A3-format, both as PDF and CAD-files.

Calculations are made for finding U-values and thermal bridges. In addition, there has been static analysis of the different solutions.

Results from a passive house project is shown in the report. In this house, moisture content of wood, relative humidity and temperature inside the cavity of the exterior wall frame has been carried out since construction start. This is done with different wall structures and in different directions (facing north/south). The measurements indicate that there is some advantage in using a convection barrier, but the contribution is less than 1 °C in average after the residents has moved in. Sampling of biological growth one year after construction has also been carried out. These analysis showed no or almost no biological growth.

This report provides an overview of selected passive houses in Norway and their structure.

There has been conducted an economical study that looks at the cost of construction of a passive house compared with current standard requirements in the Norwegian technical building regulations (TEK10).

Forord

Denne rapporten er andre del av et tre år langt prosjekt. I prosjektet er det sett på løsninger for yttervegger i tre med overganger til tilstøtende konstruksjonsdeler som tilfredsstillende passivhuskrav.

Etter initiativ fra trelastbransjen i Norge, og med Norsk Treteknisk Institutt som prosjekteier, ble prosjektet *ENTRÈ – Energieffektive trekonstruksjoner* igangsatt. Prosjektet har hatt som mål å utvikle hensiktsmessige løsninger for byggesystemer i tre som tilfredsstillende kommende strenge energikrav.

Følgende personer har sittet i styringsgruppen:

- Knut E. Fjulsrud, Treindustrien
- Sverre Kværner, Moelven Wood AS
- Jostein Byhre Baardsen, Norsk Treteknisk Institutt
- Jørn T. Brunsell, Norsk Treteknisk Institutt

Prosjektet har hatt en dynamisk referansegruppe der de involverte i prosjektet har samarbeidet med en rekke forskjellige aktører i industrien innenfor de aktuelle fagfelt prosjektet berører.

Innhold

Sammendrag	3
Summary	4
Forord	5
1 Innledning	9
1.1 Utvikling i energibruk	9
1.2 Nasjonal klimastrategi	10
1.3 Formål og avgrensninger i rapporten	13
2 Teoretisk underlag	14
2.1 Teknisk forskrift	14
2.2 Norsk standard	15
2.2.1 NS 3700	15
2.2.2 NS 3031	17
3 Ytterveggløsninger	18
3.1 Generelt	18
3.2 Gjennomgående ytterveggløsninger	19
3.2.1 Stender med I-profil	19
3.2.2 Stender av sammenlimte lameller	20
3.2.3 Isolert laminert stender	21
3.2.4 Isolert stender med spikerplate	22
3.2.5 Massivtrevegg	23
3.3 Todelte ytterveggløsninger	24
3.3.1 Generelt	24
3.3.2 Todelt bærende heltrestender	25
3.3.3 Todelt bærende massivtreelement og heltrestender	29
3.4 Bakgrunn for valg av byggemetode i passivhus	30
3.4.1 Valg av byggemetode med tradisjonelle løsninger	30
3.4.2 Valg av byggemetode med utradisjonelle løsninger	31
3.5 Fra idé til bygg	32
4 Detaljtegninger av ytterveggløsninger	34
4.1 Generelt	34
4.2 Gjennomgående ytterveggløsninger	35
4.2.1 Stender med I-profil	35
4.2.2 Stender av sammenlimte lameller	37
4.2.3 Isolert laminert stender	39
4.2.4 Isolert stender med spikerplate	41
4.2.5 Massivtrevegg	43
4.3 Todelte ytterveggløsninger	45
4.3.1 Todelt ytterveggløsning med utvendig bæring	45
4.3.2 Todelt ytterveggløsning med kombinert bæring	47
4.3.3 Todelt ytterveggløsning med innvendig bæring	49

4.3.4	Todelt ytterveggløsning med innvendig bærende massivtreelement	51
5	Beregning av bæreevne til de ulike ytterveggløsninger	53
5.1	Generelt	53
5.2	Gjennomgående ytterveggløsninger	54
5.2.1	I-profil	54
5.2.2	Sammenlimte lameller	55
5.2.3	Isolert stender	56
5.2.4	Todelt stender sammensatt med spikerplater	57
5.2.5	Massivtre	58
5.3	Todelte ytterveggløsninger	59
5.3.1	Todelt yttervegg med utvendig bæring	59
5.3.2	Todelt yttervegg med kombinert bæring	60
5.3.3	Todelt yttervegg med innvendig bæring	60
6	Beregning av U-verdi til de ulike ytterveggløsninger	62
6.1	Generelt	62
6.2	Forutsetninger	64
6.3	Gjennomgående ytterveggløsninger	64
6.3.1	I-profil	64
6.3.2	Sammenlimte lameller	65
6.3.3	Isolert stender	65
6.3.4	Todelt stender sammensatt med spikerplater	66
6.3.5	Massivtre	66
6.4	Todelte ytterveggløsninger	67
6.4.1	Todelt yttervegg med utvendig bæring	67
6.4.2	Todelt yttervegg med kombinert bæring	67
6.4.3	Todelt yttervegg med innvendig bæring	68
6.4.4	Tabell over alle løsningene	68
7	Beregning av kuldebroverdi for de ulike ytterveggløsninger	69
7.1	Generelt	69
7.2	Forutsetninger og begrensinger for beregninger	70
7.3	Kuldebro overgang yttervegg etasjeskille	72
7.4	Kuldebro overgang yttervegg mot gulv på grunn	72
7.5	Kuldebro overgang yttervegg tak	74
7.6	Gjennomgående ytterveggløsninger	75
7.6.1	Stendere av I-profil	75
7.6.2	Stendere av sammenlimte lameller	76
7.6.3	Isolert stender	76
7.6.4	Isolert stender med spikerplate	76
7.6.5	Massivtre	76
7.7	Todelte ytterveggløsninger	77
7.7.1	Todelt ytterveggløsning med utvendig bæring	77
7.7.2	Todelt ytterveggløsning med kombinert bæring	77
7.7.3	Todelt ytterveggløsning med innvendig bæring	77

8	Utfordringer med høyisolerte veggkonstruksjoner i tre	78
8.1	Generelt.....	78
8.2	Fuktforhold i trevirke	78
8.3	Tetthet	80
8.4	Eventuell oppfukting i byggeperioden	80
8.5	Konveksjon i høyisolerte konstruksjonsdeler	81
8.6	Innetemperatur	82
9	Temperatur- og fuktlogging i et passivhus	83
9.1	Generelt.....	83
9.2	Metode og materiale	83
9.2.1	Måling av temperatur, RF og trefuktighet	83
9.2.2	Prøvetaking av biologisk vekst	87
9.3	Resultater.....	88
9.3.1	Generelle forløp i vegg	88
9.3.2	Betydning av konveksjonssperre.....	90
9.3.3	Sammenligning av temperaturfall gjennom isolasjonstykkelsen.....	93
9.3.4	Prøvetaking av biologisk vekst	93
9.4	Diskusjon	94
9.5	Konklusjon	95
10	WUFI-beregninger av forsøkshus i Bodø	96
10.1	Generelt.....	96
10.2	Resultater.....	98
11	Eksempler på utvalgte passivhus i Norge.....	101
11.1	Enebolig i Bodø.....	101
11.2	Enebolig i Oslo.....	104
11.3	Barnehage i Drammen.....	107
11.4	Boligfelt i Oslo.....	109
12	Økonomiske betraktninger.....	111
12.1	Innledning	111
12.2	Tidligere resultater	111
12.3	Sammenligning kostnader passivhus og konvensjonelle bygg.....	112
12.4	Oppsummering av økonomiske betraktninger	125
13	Isolasjonstyper og -metoder	126
13.1	Generelt.....	126
13.2	Mineralull	126
13.3	Plastisolasjon.....	126
13.4	Celluloseisolasjon	127
13.5	Vakuumpaneler	127
13.6	Andre typer isolasjonstyper	128
13.7	Dynamisk isolasjon	128
13.8	Fremtiden	130
14	Referanser.....	131

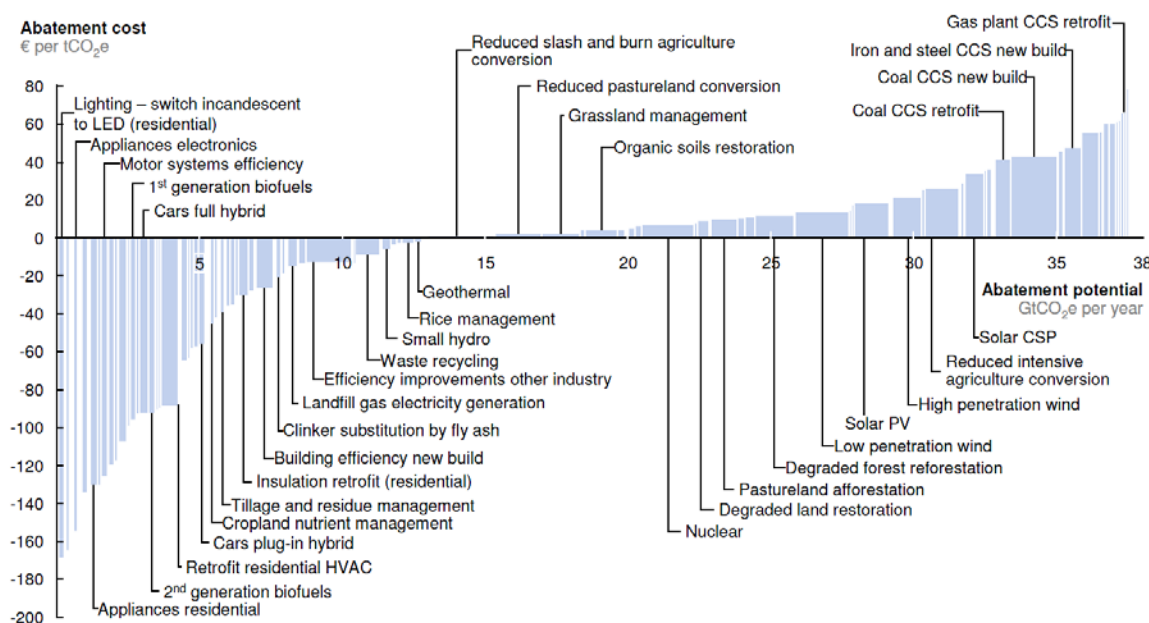
1 Innledning

1.1 Utvikling i energibruk

Energiforbruket i verden er i sterk vekst, og det vil bli stadig vanskeligere å dekke etterspørselen etter energi. Samtidig står vi overfor en utfordring i forhold til å redusere de globale klimagassutslippene. FNs klimapanel la i 2007 frem dokumentasjon (Pachauri, 2007) på at det globale klimaet blir varmere, og at mesteparten av klimaendringene de siste 50 årene er menneskeskapte. Den stadige veksten av klimagassutslipp må iht. den nevnte rapporten, globalt snus til en reduksjon ned mot 50-85 % innen 2050 for å stoppe den globale oppvarmingen. Et av de viktigste bidragene for å møte disse problemstillingene er å fokusere på effektiv energibruk, også innen bygningssektoren. IEA angir i sitt scenario frem mot 2030 at 54 % av klimagassreduksjonene må skje innenfor energieffektivisering.

Videre har konsulentselskapet McKinsey & Company (McKinsey & Company, 2010) gjort en stor studie der de har sett på tiltakskostnader for ulike klimagass-tiltak, se Figur 1. Tiltakene til venstre i figuren er de mest lønnsomme og billigste tiltakene, og de til høyre de minst lønnsomme og dyreste. Som vi ser av figuren, er veldig mange av energitiltakene både for boliger og yrkesbygg vurdert å være de billigste og mest lønnsomme tiltakene.

V2.1 Global GHG abatement cost curve beyond BAU – 2030



Note: The curve presents an estimate of the maximum potential of all technical GHG abatement measures below €80 per tCO₂e if each lever was pursued aggressively. It is not a forecast of what role different abatement measures and technologies will play.
Source: Global GHG Abatement Cost Curve v2.1

Figur 1. McKinseys kurve for tiltakskostnader for ulike klimagassreduksjonstiltak frem mot 2030.

Verdens energiforbruk har vokst med 2 % årlig i perioden 1970 til 2005. Om lag 85 % av forbruket dekkes av fossile brensler. Dersom veksten i energiforbruket fortsetter i samme takt, vil forbruket fordobles i 2042 og tredobles i 2062.

Det internasjonale energibyrået IEA forventer at energiforbruket skal øke med ca. 55 % frem mot 2030, og at den fossile andelen vil holde seg stabil (IEA, 2008). Det vil kreve enorme investeringer å dekke det fremtidige energiforbruket. Det vil også kunne føre til en kamp om tilgjengelige energiressurser.

Samtidig som verden står overfor en stor utfordring med å skaffe til veie tilstrekkelige mengder energi til akseptabel pris, har FNs klimapanel forsterket sitt budskap om at menneskeskapte klimagassutslipp forårsaker global oppvarming. For å bremse utviklingen til et bærekraftig nivå, som er definert som maksimalt to grader global temperaturøkning, har FNs klimapanel beregnet at verdens samtlige klimagassutslipp må kuttes med 50-80 % frem mot 2050.

Store deler av de menneskeskapte klimautslippene er knyttet til energiproduksjon og bruk av fossil energi. Frem mot 2050 vil det bli vanskelig å dekke det økende behovet for energi og samtidig redusere de menneskeskapte klimagassutslippene. Grunnen til det er at fossil energi fremdeles vil være hovedkilde til verdens energiproduksjon frem til 2050.

Det er viktig å understreke at det ikke er mangel på energi generelt som er utfordringen. Det finnes mer enn nok vind, vann, sol, biomasse og kjernekraft til å dekke fremtidens behov etter hvert som de fossile ressursene gradvis brukes opp. Utfordringen er å bygge ut alternativer til fossil energi raskt nok, og til en konkurransedyktig pris.

Et av de viktigste bidragene for å løse de globale energi- og klimautfordringene vil være å utnytte potensialet som ligger i energieffektivisering. Redusert bruk av energi fører til redusert bruk av fossil energi og dermed også reduserte klimagassutslipp. En hovedpilar i EUs klima- og energipolitikk er å oppnå 20 % energisparing fra økt energieffektivitet innen 2020, i forhold til det en normal utvikling av energibruket skulle tilsi.

1.2 Nasjonal klimastrategi

Utslipp av klimagasser er direkte avhengig av energiforbruket. For Norge sin del står byggmassen for ca. 40 % av den samlede energibruken (Dokka T. H., 2009). I Norge er det *Forskrift om krav til byggverk og produkter til byggverk (TEK)* (Statens bygningstekniske etat, 2007) som styrer energibruken i bygg. Denne forskriften kom i en omfattende revidert utgave i 2007 (TEK-07), og ble på nytt revidert i 2010. En stor endring er reduksjonen av tillatt energibruk i bygninger på ca. 25 %. Dette medfører økt isolasjonstykkelse, strengere krav til lufttetthet og økt fokus på kuldebroer.

Dette er bare et steg i retning mot enda strengere krav til energieffektive bygg. I april 2010 ble NS 3700 *Kriterier for passivhus og lavenergihus – Boligbygninger* (Standard Norge, 2010) fastsatt. Denne gir definisjoner av og kriterier for sertifisering av passivhus og lavenergibygg i Norge.

Passivhus er opprinnelig et tysk begrep som internasjonalt har blitt brukt siden tidlig 90-tall. Generelt sett er et passivhus et hus med mye lavere energibehov enn normale hus. Det totale energibehovet til et passivhus er omtrent en fjerdedel av minstekravet i forhold til gjeldende teknisk forskrift. Energiforbruket reduseres gjennom passive tiltak som ytterligere isolasjon, ekstra god tetthet og krav til varmegjenvinning.

Blant de krav i NS 3700 (Standard Norge, 2010) som er aktuelle for denne rapporten, er begrensingen av energibruk til romoppvarming å betrakte som overordnet. Maksimalt energibruk til romoppvarming er satt til 15 kWh/m²år. Dette er samme krav som er brukt i definisjonen av passivhus i de fleste andre land. Kravet er imidlertid tilpasset norske forhold ved en faktor som tillater høyere energibruk i kaldere klima og mindre hus.

Det er også stilt krav til maksimal U-verdi for alle konstruksjonsdeler, deriblant yttervegger. Det vil imidlertid sjelden bli aktuelt å prosjektere passivhus med så "dårlig" isolerte vegger, siden det da blir vanskelig å oppfylle det overordnede kravet til maksimalt energibruk.

I EUs nylig reviderte bygningsenergidirektiv (Bygningsenergidirektivet, 2010), ble det fastslått at alle nye bygg skal være "nesten nullenergibygg" i 2020 og at alle offentlige nye bygg skal være "nesten nullenergibygg" i 2018. Alle nye eller nyrenovert bygg skal ha intelligente energimålere, og det skal fastsettes mål for når nye og eksisterende bygg skal være energinøytrale. I tillegg stilles det energikrav til bygningselementer og tekniske komponenter.

Bygningsenergidirektivet vil være premissgivende for Norges politikk på dette området fremover. I desember 2009 oppnevnte Kommunal- og regionalminister Liv Signe Navarsete en arbeidsgruppe som har gitt innspill til en handlingsplan for energieffektive bygg. Rapporten, som heter "Energieffektivisering av bygg – en ambisiøs og realistisk plan mot 2040" (KRDs arbeidsgruppe for energieffektivisering av bygg, 2010), ble overlevert august 2010.

Begrepet "nesten nullenergibygg", som brukes i bygningsenergidirektivet, er ikke tallfestet. Det er opp til de enkelte land å komme med en definisjon, og det er behov for en norsk offisiell definisjon. I rapporten "Energieffektivisering av bygg – en ambisiøs og realistisk plan mot 2040", blir begrepet "nesten nullenergibygg" tolket å tilsvare et bygg på passivhusnivå, dvs. et energinivå på 70-80 kWh/m²år i levert energi, der en betydelig andel av varmebehovet er dekket med fornybar energi.

Menneskene står overfor store utfordringer på energi- og klimaområdet. Drift av bygg bidrar til ca. 40 % av den samlede energibruken i så vel Norge som i resten av Europa. Bygninger er derfor et viktig fokusområde i håndteringen av energi- og klimautfordringene.

Nybygg har kun 1-2 % tilvekst per år (SSB-tall 1990-2004: 1,33 % for boliger. Prognosesenteret 1993-2007: 1,92 % for yrkesbygg), men i 2040 er ca. 1/3 av bygningsmassen bygget etter 2010. I og med at bygg har lang levetid er det viktig å bygge energieffektivt allerede nå.

Dagens energibruk til drift av bygg er 80 TWh pr. år. Rapporten viser at det er realistisk å redusere energibruken til drift av bygg med netto 10 TWh pr. år innen 2020, dvs. fra 80 TWh pr. år til 70 TWh pr. år. Da er det tatt hensyn både til antatt bygge- og riverate.

Innen 2040 mener samme rapport det er mulig å halvere dagens energibruk til drift av bygg til netto 40 TWh pr. år. Av besparelsen på netto 10 TWh pr. år innen 2020, må hoveddelen hentes i eksisterende bygningsmasse. Det vil derfor være nødvendig med ytterligere forskning på dette i årene som kommer. Energieffektivisering ved rehabilitering og gjennomføring av forskjellige enøk-tiltak (energiøkonomiserende tiltak) vil være avgjørende for å nå målet i 2020.

Rapporten trekker frem seks hovedgrep for energieffektivisering:

1. Utvikling av trygge og robuste løsninger
2. Tilskuddsordning for eksisterende bygningsmasse
3. Strengt nybyggkrav
4. Nasjonalt måleverktøy for å følge utvikling i energibruk
5. Systematisk etter- og videreutdanning og kompetanse
6. Samordning av virkemiddelapparatet

Forskningsprosjektet *ENTRÉ – Energieffektive trekonstruksjoner*, som denne rapporten er en del av, er ment å bidra til å utvikle trygge og robuste løsninger slik det er nevnt i det første tiltakspunktet. Det vil være viktig at det også i fremtiden satses på forskning for fortløpende å utvikle gode løsninger.

Tall fra Statistisk sentralbyrå og Prognosesenteret viser at boliger utgjør 67 % av eksisterende bygningsmasse, og den største utfordringen er få utløst tiltak i nettopp boligmarkedet. Det betyr at det vil være behov for gode forbildeprosjekter i fremtiden. Våren 2010 inngikk OBOS og Mesterhus kontrakt om oppføring av 17 passivhus på Mortensrud i Oslo. Forskningsprosjektet *ENTRÉ* har vært med å utvikle løsninger sammen med både utførende og industri i forbindelse med disse boligene.

I rapporten "Energieffektivisering av bygg – en ambisiøs og realistisk plan mot 2040", blir det foreslått følgende konkrete forskriftskrav til nybygg:

1. Krav om passivhusnivå i 2015
2. Krav om "nesten nullenergibygg" med tilnærmet 100 % fornybar varmforsyning i 2020
3. Krav til dokumentasjon av totale miljøbelastninger
4. Økt fokus på arealeffektivitet i forskriften i 2015
5. Krav til individuell energimåling og avregning av enkeltleiligheter og leietakere fra 2015

For rehabilitering foreslås følgende forskriftskrav:

1. Krav om lavenerginivå i 2015 ved totalrehabilitering
2. Krav om passivhusnivå i 2020 ved totalrehabilitering
3. Krav om bruk av energieffektive komponenter og bygningsdeler ved alle tiltak fra 2015
4. Krav til kompetanse hos byggforetak generelt og til energieffektiviseringskompetanse spesielt
5. Krav til individuell energimåling og avregning av enkeltleiligheter og leietakere fra 2015

Det offentlige må tilfredsstille forskriftskravene før private, og det foreslås følgende krav for nybygg:

1. Krav om passivhusnivå i 2014
2. Krav om "nesten nullenergibygg" med tilnærmet 100 % fornybar varmforsyning i 2018

For totalrehabilitering av offentlige bygg:

1. Krav om lavenerginivå i 2014
2. Krav om passivhusnivå i 2018

1.3 Formål og avgrensninger i rapporten

Formålet med denne rapporten er å gi en oversikt over løsninger for yttervegger i tre med overganger til tilstøtende konstruksjonsdeler som tilfredsstiller passivhuskrav. Dette gjøres gjennom beskrivelser, tegninger, beregninger, logging og måling.

Det er først og fremst yttervegger med overgang til tak og fundament som er behandlet i denne rapporten.

2 Teoretisk underlag

2.1 Teknisk forskrift

Byggteknisk forskrift er forskrift til Plan- og bygningsloven. Denne blir revidert jevnlig, men hyppigheten på revideringer har økt de senere årene. Byggteknisk forskrift blir som regel omtalt som TEK og med årstallet den er gjeldende. Byggteknisk forskrift og Veiledning til byggteknisk forskrift kan man finne på hjemmesidene til Statens bygningstekniske etat, www.be.no.

Energikravene i TEK07 ble gjeldende februar 2007 og hadde en overgangsperiode frem til august 2009. Målet var å redusere totalt energibehov i nye bygninger med 25 % sammenlignet med tidligere TEK (fra 1997).

I 2010 ble energikravene i TEK revidert på nytt (TEK10). Det er likevel små endringer som skiller TEK10 fra TEK07. Noen av endringene er skjerpede krav til årsgjennomsnittlig temperaturvirkningsgrad, strengere krav til bruk av glassareal og forbud mot å installere oljefyrkjel.

Minstekravene slik de fremstår i TEK10 er:

- U-verdi yttervegg 0,22 W/m²K
- U-verdi tak 0,18 W/m²K
- U-verdi gulv på grunn 0,18 W/m²K
- Fritidsboliger < 150 m² reguleres kun ved minstekravene
- Fritidsboliger > 150 m² betraktes som småhus
- Fritidsboliger < 50 m² omfattes ikke av energikravene

2.2 Norsk standard

2.2.1 NS 3700

Passivhus er et begrep som er lansert av Passivhusinstituttet i Tyskland, som står bak en sertifiseringsordning for byggeprodukter og bygninger.

Passivhus har fått stor utbredelse og suksess i Tyskland, Østerrike og etter hvert også en rekke andre europeiske land. Strengt krav til utførelse og prosjektering i disse landene har ført til at passivhus anerkjennes som miljøvennlige boliger av meget høy kvalitet, med godt inneklima og lavt energibehov.

Behovet for å gi en offisiell norsk definisjon av passivhus og lavenergihus begrunnes i følgende:

- Begrepene er ikke entydig definert for norske forhold og gis ulikt innhold
- Begrepene brukes i søknader om offentlige tilskudd
- Myndighetene ønsker å påvirke etterspørselen av boliger med lavt energibehov og har behov for en avklart begrepsbruk i kommunikasjonen
- Begrepene kan brukes i fremtidige forskriftskrav og i energi- og miljømerkeordninger

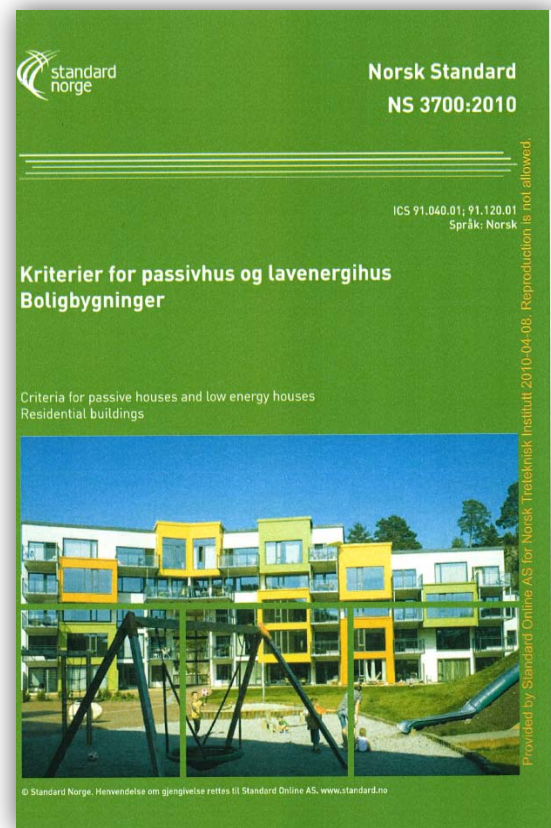
På grunn av forskjeller i klima, konstruksjonsløsninger og byggeskikk er det i standarden gjort nasjonale tilpasninger til den tyske passivhusdefinisjonen.

Standarden er utarbeidet av Standard Norges komité SN\K34 Energi i bygninger med støtte fra ENOVA SF og Husbanken.

Standarden omfatter definisjoner, krav til varmetap, oppvarmingsbehov og energiforsyning samt minstekrav til bygningskomponenter og lekkasjetall m.m.

Standarden angir tre nivåer av energieffektive boligbygg:

- Passivhus
- Lavenergihus klasse 1
- Lavenergihus klasse 2



Figur 2. Passivhusstandarden NS 3700.

Standarden kan brukes til å:

- Vurdere om bygningen tilfredsstiller kravene til passivhus og lavenergihus
- Stille krav til produkter og bygningselementer som benyttes i passivhus og lavenergihus
- Stille utførelseskrav til bygningstekniske arbeider for passivhus og lavenergihus

Standarden kan videre danne grunnlag for forskriftskrav og energi- og miljømerkeordninger.

Standarden bygger på energibehovsberegninger etter NS 3031 og er gjeldende fra 2010. Bruk av standarden er frivillig og er ikke et myndighetskrav, men den gir byggherre mulighet til å redusere energibruken i bygget. Standarden er tilpasset norske forhold, og et hovedprinsipp er at det maksimale netto energibehovet til oppvarming skal være 15 kWh (m²/år). Utviklingen fra krav i TEK til passivhus er vist i Tabell 1.

Tabell 1. Yttervegg i bolighus. Utvikling av krav til U-verdi og isolasjonstykkelse ved ulike forskriftskrav og standarder.

Egenskap	TEK 97	TEK07	TEK10	TEK10 Min. krav	Passivhus (NS 3700)
U-Verdi [W/m ² K]	0,22	0,18	0,18	0,22	< 0,15
Tykkelse isolasjon [cm]	20	25	25	20	35-40

Passivhusnivå er ment å uttrykke et energinivå som kan oppnås på ulike måter og gjennom ulike bygningskonsepter. Det er viktig å ikke bare ha fokus på beregnet forbruk, men også brukeradferd, teknisk utstyr, energiledelse m.m. som slår ut på byggets virkelige energiforbruk.

I Tabell 2 er U-verdikravene i NS 3700 og TEK10 vist.

Tabell 2. Sammenligning av U-verdikravene gitt i NS 3700 og i TEK10.

Egenskap	NS 3700/Passivhusstandarden			TEK10
	Passivhus	Lavenergihus		
		Klasse 1	Klasse 2	
U-verdi yttervegg	≤ 0,15 W/(m²K)	≤ 0,18 W/(m²K)	≤ 0,22 W/(m²K)	≤ 0,18 W/(m²K)
U-verdi tak	≤ 0,13 W/(m²K)	≤ 0,13 W/(m²K)	≤ 0,18 W/(m²K)	≤ 0,13 W/(m²K)
U-verdi gulv	≤ 0,15 W/(m²K)	≤ 0,15 W/(m²K)	≤ 0,18 W/(m²K)	≤ 0,15 W/(m²K)
U-verdi vindu	≤ 0,80 W/(m²K)	≤ 1,2 W/(m²K)	≤ 1,6 W/(m²K)	≤ 1,2 W/(m²K)
U-verdi dør	≤ 0,80 W/(m²K)	≤ 1,2 W/(m²K)	≤ 1,6 W/(m²K)	≤ 1,2 W/(m²K)
Normalisert kuldebroverdi	≤ 0,03 W/(m²K)	≤ 0,04 W/(m²K)	-	≤ 0,03 W/(m²K)

2.2.2 NS 3031

NS 3031:2007 erstatter 4. utgave fra mai 1987. Standarden erstatter også reglene i NS 3032 for å sette opp et energibudsjett.

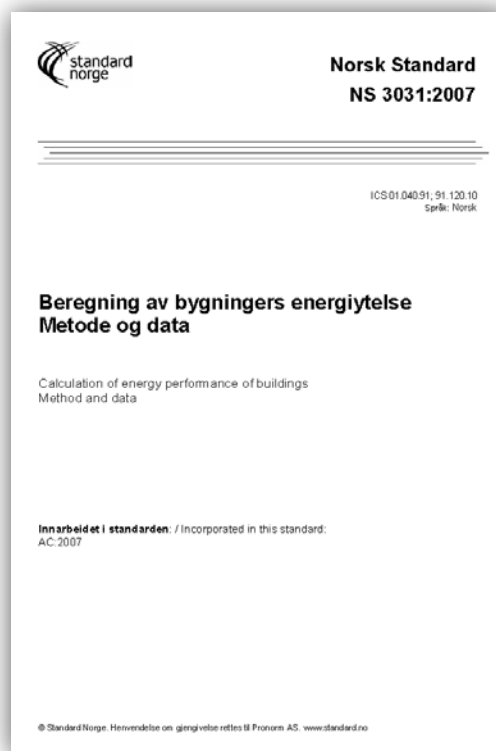
Revisjonen av standarden er gjennomført av flere grunner. Det har kommet en serie europeiske standarder for å kunne beregne bygningens samlede totale energibehov, behovet for levert energi, primærenergi behov og det resulterende CO₂-utslipp. NS 3031 kompletterer de europeiske standardene ved å benytte reglene som er beskrevet i de normative referansene og legger til grunn nasjonale valg og verdier for beregningene.

I forbindelse med revisjon av standarden er det lagt vekt på at denne nye utgaven skal være tilpasset energikravene i Forskrift om krav til byggverk til Plan- og bygningsloven (TEK) og en ordning med energisertifikat for bygninger. Oppføring av bygninger med lavt energibehov fordrer også større oppmerksomhet rundt bygningers innneklimakvaliteter. TEK benytter metodikken i NS 3031 ved kontrollberegning av bygningers netto energibehov.

Andre krav, som for eksempel krav til god luftkvalitet, termisk komfort og tilgang til dagslys, må også kunne ivaretas.

Standarden omfatter tre beregningsalternativer:

1. Månedsberegning (stasjonær metode) etter NS-EN ISO 13790
2. Forenklet timeberegning (dynamisk metode) etter NS-EN ISO 13790
3. Detaljerte beregningsprogrammer (dynamisk metode) etter NS-EN 15265



Figur 3. NS 3031:2007.

3 Ytterveggløsninger

3.1 Generelt

Frem til i dag har det vært vanlig å bygge ytterveggen ved hjelp av bindingsverk i heltre. Med fremtidens strengere krav til energibruk blir en naturlig konsekvens at veggene bygges tykkere for å få plass til mer isolasjon. Bygg som skal tilfredsstille passivhuskrav vil ha en veggtykkelse på 350-400 mm, avhengig av ønsket U-verdi og type isolasjon. Det betyr at vi ikke lenger har det råstoffet som er nødvendig for å produsere gjennomgående stendere til bindingsverk av heltre. I Treteknisk rapport nr. 77 (Clementz, m.fl., 2009) ble det konkludert med at råstoffknapphet kan inntreffe allerede ved 250 mm brede stendere. Det er selvsagt mulig å foreta utlekting på utvendig og/eller innvendig side, men dette er både material- og arbeidskrevende.

For å kunne bygge veggløsninger med tykkelser opp mot 400 mm, er det derfor i prinsippet kun to hovedalternativer som gjenstår; gjennomgående yttervegg-løsninger (som ikke benytter heltre) og todelte løsninger.

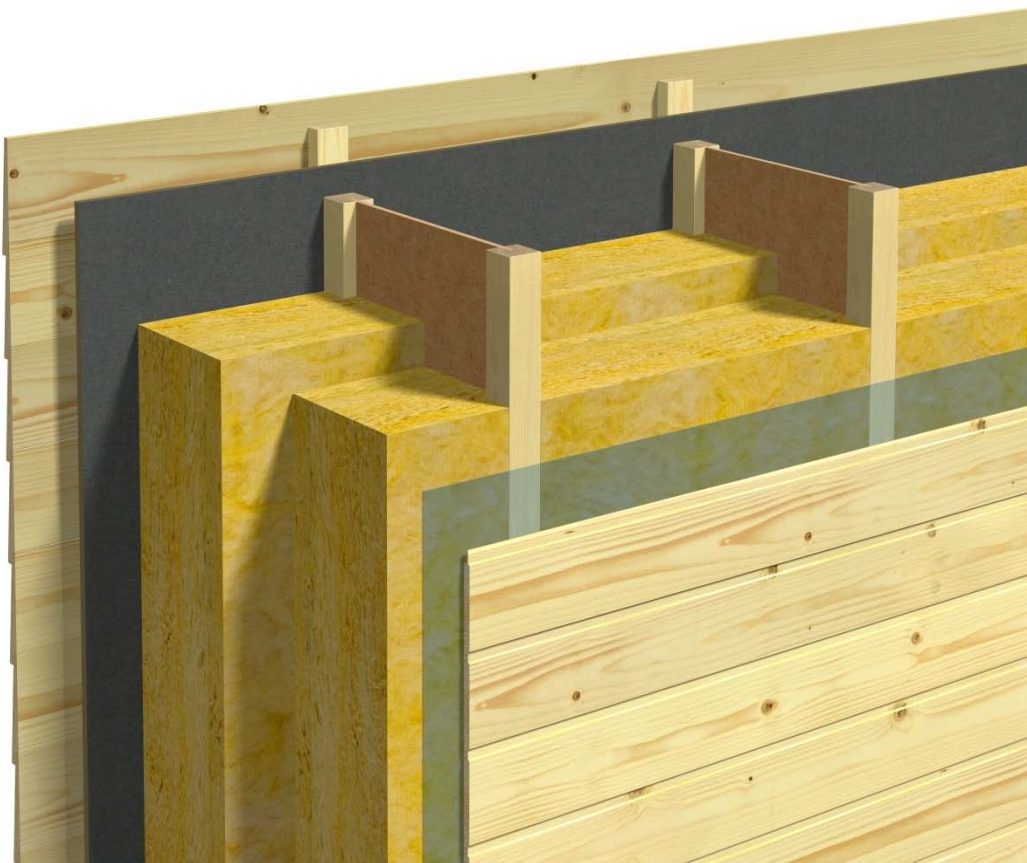
3.2 Gjennomgående yttervegløsninger

3.2.1 Stender med I-profil

I USA ble det eksperimentert med limte I-bjelker med flenser av trevirke og steg av trebaserte plater så tidlig som på 1920-tallet. Det første kommersielle I-bjelkeproduktet kom på markedet (USA) i 1968. Senere har bruken av I-bjelker blitt vanlig i små og mellomstore konstruksjoner, så vel i USA som i Europa.

I-profiler kan brukes på nesten samme måte som vanlige heltrestendere. I-profiler er normalt rettere og mer dimensjonsstabile enn stender i heltre. Stender av I-profiler fins i en rekke forskjellige bredder, noe som muliggjør store isolasjonstykkelser uten utforing dersom det er ønskelig. Isolering og tetting rundt åpninger er noe mer omfattende.

Flensene består av konstruksjonstrevirke, og stegene er av spon- eller trefiber-plater. Figur 4 viser eksempel på en gjennomgående stender i I-profil.



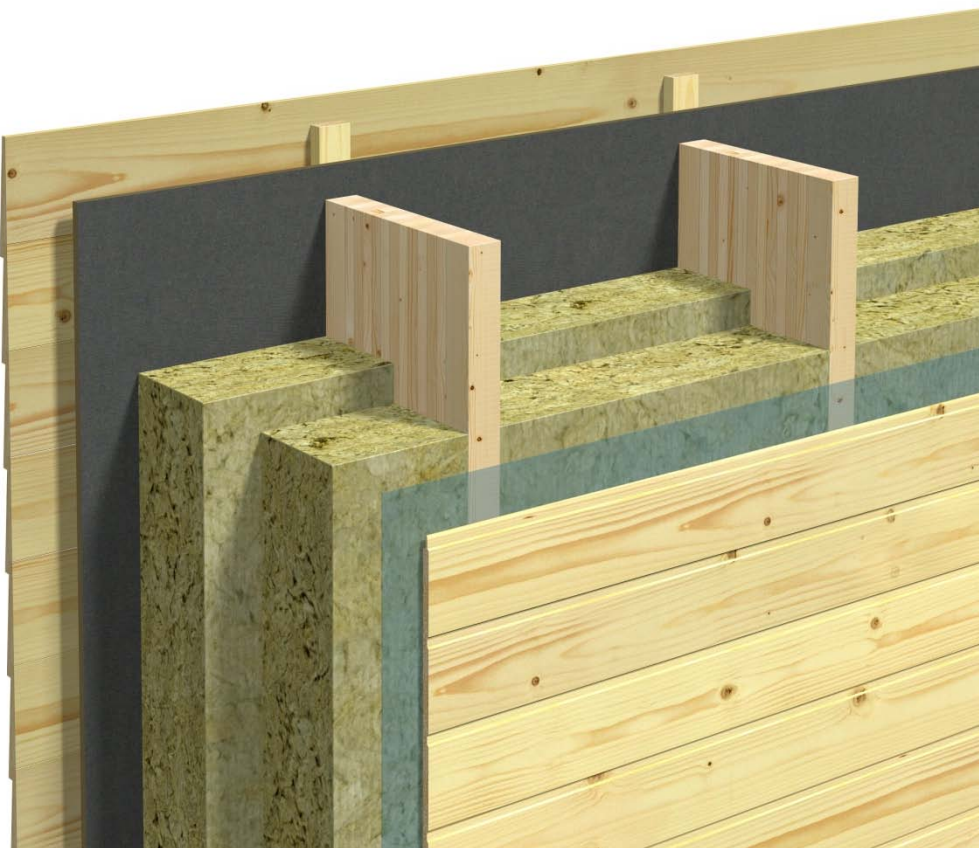
Figur 4. Oppbygging av vegg med gjennomgående stender i I-profil.

3.2.2 Stender av sammenlimte lameller

Det finnes i dag en rekke sammenlimte produkter som kan benyttes som stendere ved tradisjonell byggemetode, og nye produkter blir utviklet.

Sammenlimte trekonstruksjoner ble brukt allerede på slutten av 1800-tallet (Russland og Tyskland), og her hjemme kom norsk limtreindustri i gang for fullt rundt 1960. Limtre kan teoretisk sett produseres i hvilken som helst ønsket størrelse, både våt- og tørrlimt. Det finnes flere limtreprodusenter som tilbyr splittet limtre, som kan være et alternativ til gjennomgående stender. I tillegg er det flere som holder på å utvikle produkter basert på sammenliming av lameller. Stendere av sammenlimte lameller gi et rettere og mer dimensjonsstabilt produkt sammenlignet med heltre.

Det finnes også norske produsenter som har utviklet spesialprodukter til denne type bruk. Figur 5 er et eksempel på et slikt spesialprodukt med sammenlimte lameller.

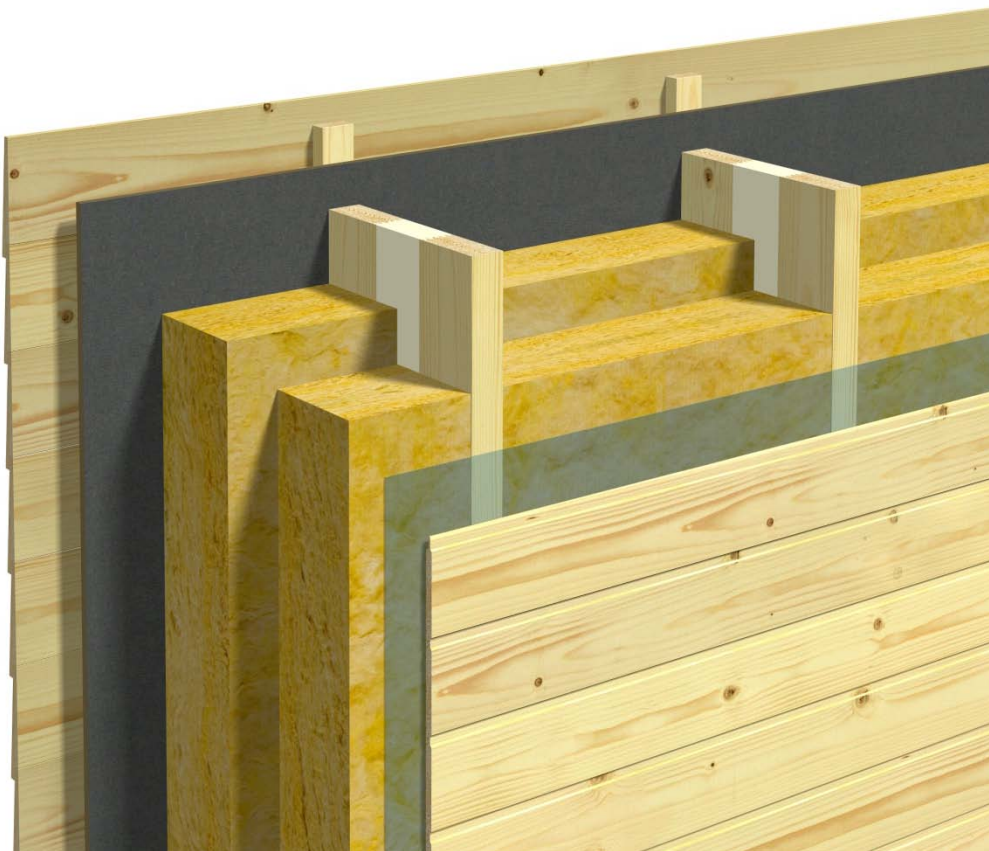


Figur 5. Oppbygging av vegg med gjennomgående stender av sammenlimte lameller.

3.2.3 Isolert laminert stender

Det kommer stadig produkter som kan erstatte, evt. supplere stender i heltre. Et produkt som er utviklet i senere tid er en stender som består av to trevirkedeler med isolasjon av polyuretanskum (PUR) i mellom. Dette er et produkt som minimerer kuldebroer i vegger og gjør at man kan bygge en tynnere vegg enn hva en ville gjort med heltre. Dersom ytterveggen kan bygges tynnere betyr det mulighet for mer areal innvendig.

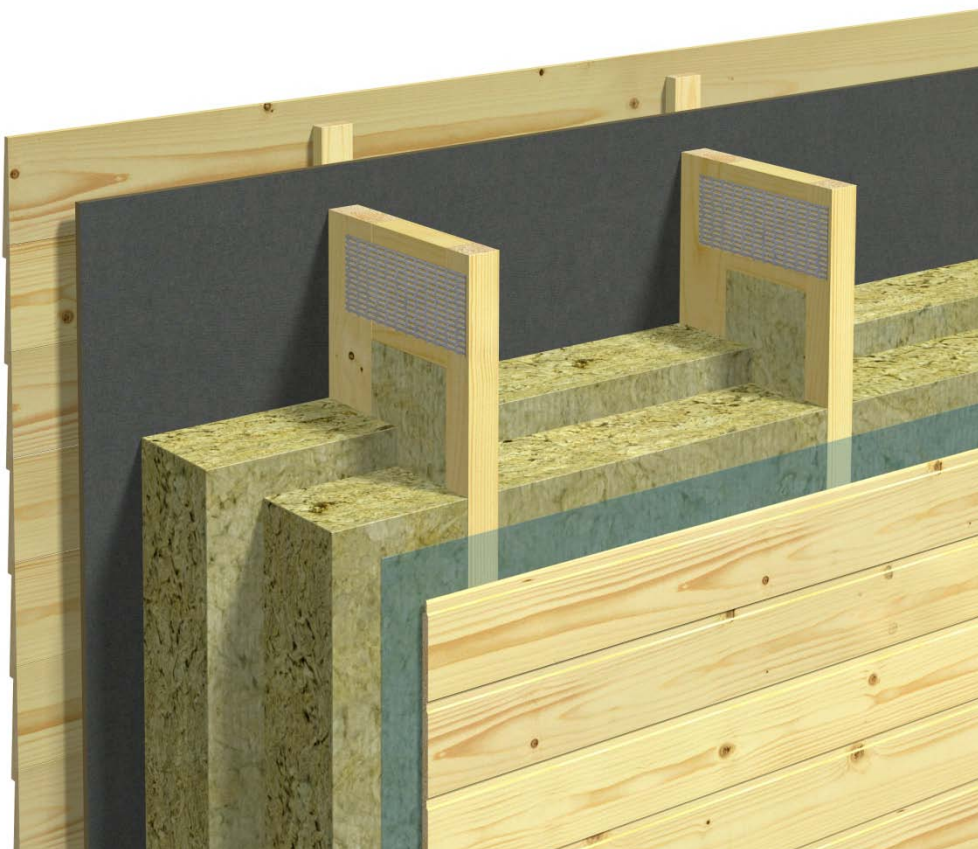
I likhet med stender av sammenlimte lameller vil også denne typen laminert stender gi et rettere og mer dimensjonsstabilt produkt. Figur 6 viser en norsk-produsert isolert stender med polyuretanskum i midten.



Figur 6. Oppbygging av vegg med gjennomgående isolert laminert stender.

3.2.4 Isolert stender med spikerplate

Dette er på mange måter en type isolert stender, men den er ikke limt sammen som lameller. Her blir de to trevirkedelene holdt sammen ved hjelp av spikerplater, som vist på Figur 7. Dette er samme prinsipp som benyttes ved tilvirkning av takstoler.



Figur 7. Oppbygging av vegg med gjennomgående isolert stender med spikerplate.

3.2.5 Massivtrevegg

Konseptet med innvendige bærevegger i massivtre er blitt brukt flere steder i Norge. Blant annet i passivhusprosjektet Ladeveien (Stoknes, 2009), som også er omtalt i kapittel 11.

En innvendig bærende massivtrevegg kan lektes ut med trykkfast isolasjon som blir holdt på plass med lange spesialskruer, slik som vist på Figur 8. Det er i dette eksempelet ikke benyttet dampsperre, ettersom det benyttes et krysslåst massivtreelement med tette teipede skjøter og en tykkelse på 100 mm. For massivtreelement med tykkelser fra 80 mm og oppover, vil dampdiffusjonen gjennom selve elementet normalt sett ikke være en kritisk faktor for bruk av dampsperre (Treteknisk, 2006).

Med en slik løsning unngår man doble fundamenteringspunkter, og det innvendige massivtreelementet tar vindkreftene. Ettersom all isolering blir på utvendig side av veggen, blir dette i prinsippet en meget fuktsikker konstruksjon som også gir en tilfredsstillende tetthet.



Figur 8. Massivtreelement med utenpåliggende trykkfast isolasjon.

3.3 Todelte ytterveggløsninger

3.3.1 Generelt

Det er lite som er publisert vedrørende dobbeltvegger i Norge. Konseptet er brukt i lavblokkprosjektet Løvåshagen i Bergen, det første av sitt slag i Norge, der det er publisert en rapport (Dokka T. H., 2008, ss. 283-190). I dette prosjektet har man oppnådd svært lave U- og kuldebroverdier i ytterveggen. Det er benyttet bindingsverkkonstruksjon med 98 mm bredde både innvendig og utvendig. Disse dobbeltveggene er imidlertid bare brukt som utfyllende bindingsverk i en bærende betongkonstruksjon.

Våren 2010 inngikk OBOS og Mesterhus kontrakt om oppføring av 17 passivhus på Mortensrud i Oslo. Rudshagen borettslag er Norges første eneboligfelt som består utelukkende av passivhus. Også i dette prosjektet ble det valgt å bygge opp ytterveggene som en bindingsverkkonstruksjon med 98 mm bredde, men her er veggene bærende. De to stenderveggene er satt opp med 150 mm mellomrom, og dette mellomrommet er fylt med mineralull.

I en omfattende amerikansk studie fra 2009 (Straube, 2009) sammenlignes to typer dobbeltvegger med 10 andre veggøsninger. Inkludert i studiet er også en tradisjonell bindingsverkvegg, utført med et ytre stenderverk som isoleres med polyuretan (PUR) i sprayform. Det er gjort kvalitative sammenligninger vedrørende isolasjonsevne, robusthet i forhold til fukt, rasjonalitet i byggeprosessen, kostnad og materialbruk. Totalt sett kommer dobbeltveggene i denne sammenligningen middels godt ut. Løsningen får, etter en totalvurdering, 15 poeng av 25 mulige. En tradisjonell bindingsverkvegg får til sammenligning 17 poeng. Det er i studien gjort fratrekk for et høyt materialforbruk. Kostnadmessig kommer dobbeltveggene heller ikke noe godt ut. Økonomiske betraktninger foretatt i dette prosjektet, se kapittel 12, viser imidlertid at forskjellene ikke blir store når totalkostnaden til prosjektet blir beregnet.

Hvis det ikke brukes inntrukket dampspærre, hevdes det videre at en stor fordel med dobbeltveggøsninger er å kunne bruke innblåst isolasjon. På den måten er det mulig å få isolert hele veggen i en rask og enkel operasjon.

3.3.2 Todelt bærende heltrestender

Det er valgt fire forskjellige todelte løsninger som benytter stenderer i heltre. Figur 9 viser prinsipiell oppbygging av dette. Dimensjoner på utvendig og innvendig bindingsverk vil variere avhengig av valgt løsning. Dette blir gått nærmere inn på i kapittel 5.3.

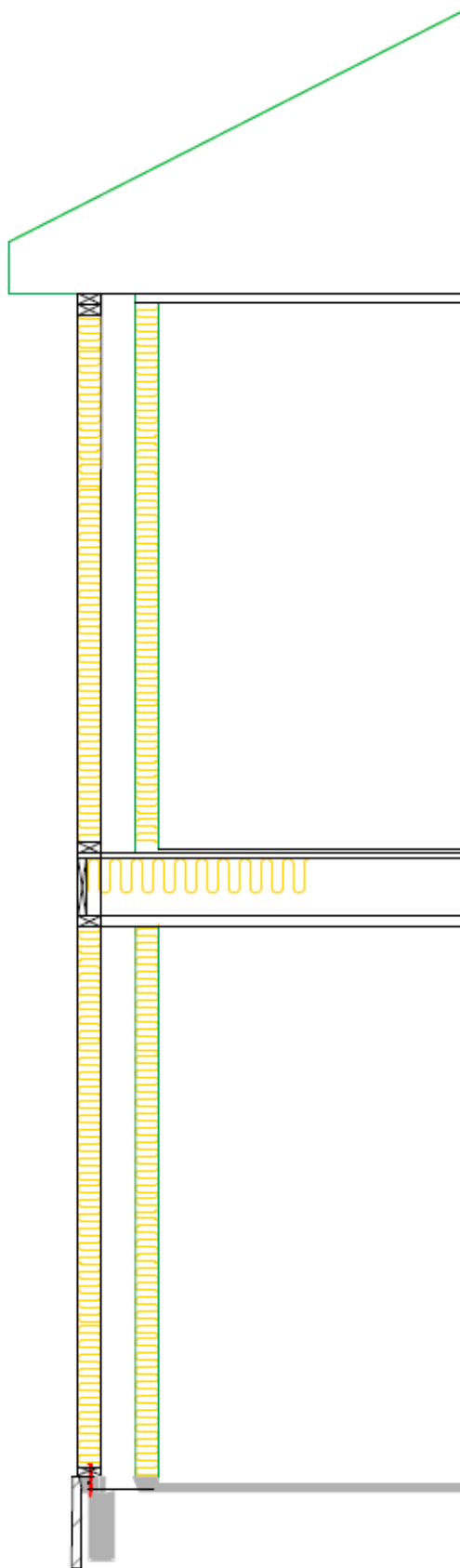
Den første vegg løsningen, Figur 10, benytter utvendig bæring. Innerveggene betraktes som ordinære ikke-bærende innervegger.

Den andre vegg løsningen, Figur 11, kombinerer bæringen slik at innerveggen bærer etasjeskiller, mens ytterveggen bærer tak, snølast, vindlast og påført egenlast.

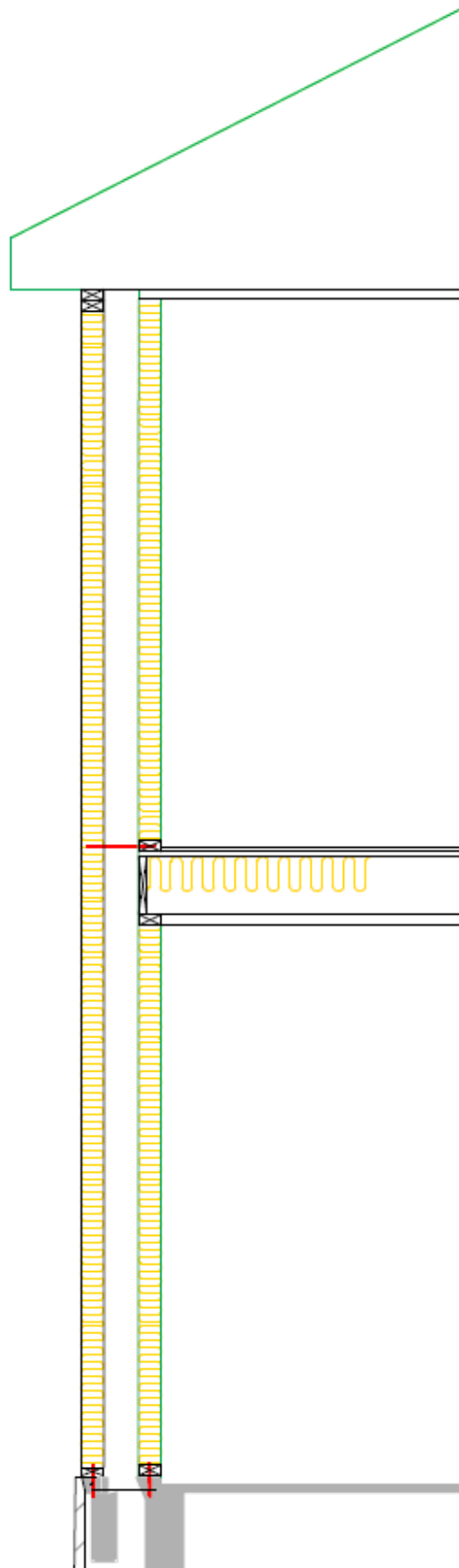
Den tredje vegg løsningen, Figur 12, benytter innvendig bæring. Det betyr at innerveggen i utgangspunktet tar alle vertikale laster, mens ytterveggen tar vindlasten.



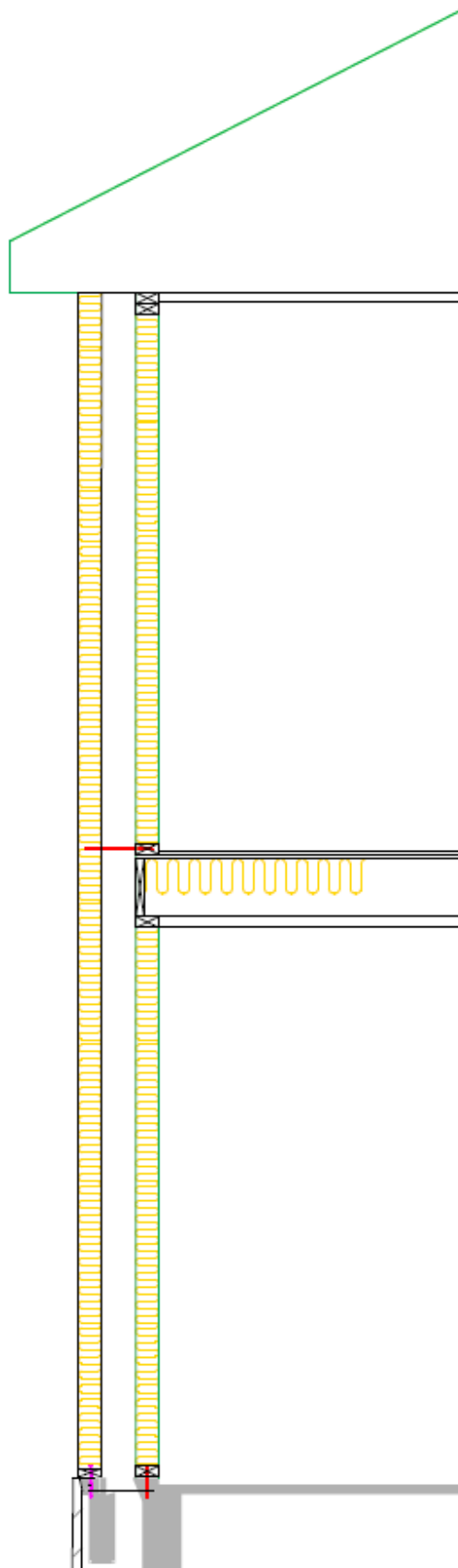
Figur 9. Prinsipiell oppbygging av todelte vegg med stender i heltre.



Figur 10. Todelt veggøsning med utvendig bærer.



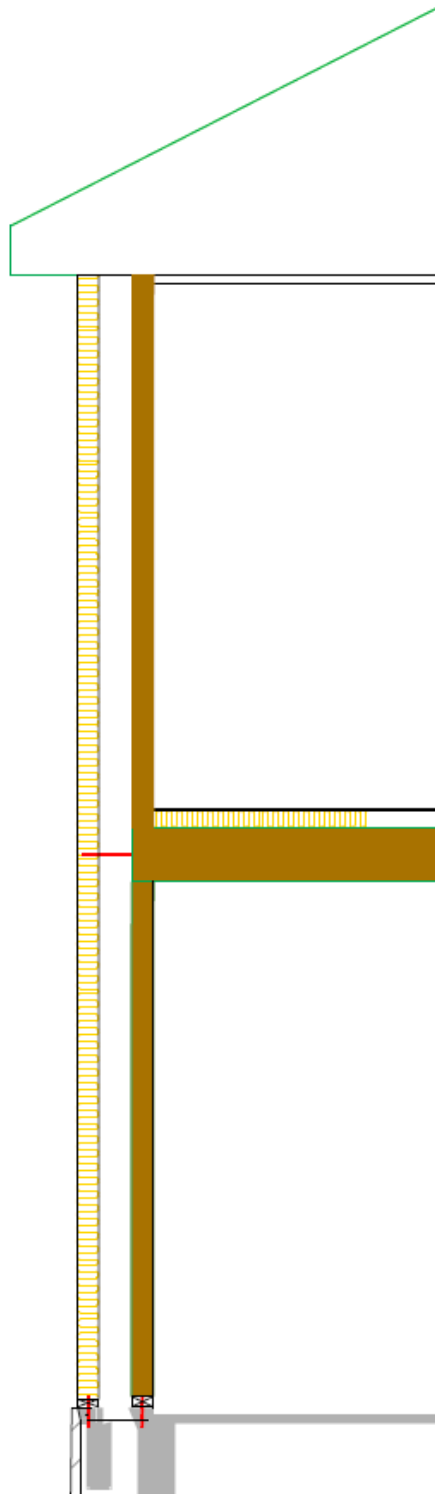
Figur 11. Todelt veggøsning med kombinert bærer.



Figur 12. Todelt veggøsning med innvendig bæring.

3.3.3 Todelt bærende massivtreelement og heltrestender

Denne veggløsningen, Figur 13, er i prinsippet lik den tredje løsningen vist på Figur 12, det vil si at innerveggen bærer vertikale laster og ytterveggen tar vindlast.



Figur 13. Todelt veggløsning med innvendig bærende massivtre og stender.

3.4 Bakgrunn for valg av byggemetode i passivhus

3.4.1 Valg av byggemetode med tradisjonelle løsninger

I 2008 startet Mesterhus et prosjekt i Bodø (se også kapittel 11.1) med sikte på å utvikle og bygge en enebolig etter passivhuskriterier. Det var et ønske om å tilby passivhus tilpasset massemarkedet til en akseptabel pris. Det var fra Mesterhus sin side ikke noe ønske om å utvikle nye løsninger i forbindelse med byggingen av passivhuset. Tanken var at man skulle kunne benytte kjente løsninger, og i samarbeid med den lokale byggmesteren ta i bruk den kompetansen og kunnskapen som fantes i området. Planen var med andre ord å bygge passivhuset med samme metode som et helt vanlig hus. Det ble derfor valgt å benytte en gjennomgående yttervegg-løsning ved bruk av I-profiler, se Figur 12. Ettersom byggmesteren i dette prosjektet normalt bygger med elementer, var det naturlig å velge denne byggemetoden også i dette prosjektet. Dette bidro til å sikre minimalt med fuktpåkjenning under selve byggingen av veggene. Det ble lagt ned store ressurser for å vurdere hvilke løsninger som skulle benyttes til dette bygget, da det var begrenset erfaring rundt bygging av passivhus i Norge. Mye tid gikk med til å vurdere ulike forhold i tilknytning til oppfyllelse av energikrav. Dette innebærer både valg av løsninger (passive og aktive), kjennskap til løsninger hos håndverkerne og ikke minst økonomi i prosjektet.

Det ble i planleggingsfasen noe merarbeid i forbindelse med projekteringen med bruk av I-profil i bærende yttervegger og stegflate på bærende komponenter. Det ble også noe ekstra planlegging i forhold til VVS, siden dette var det første passivhuset som ble prosjektert. Det eneste usikkerhetsmomentet ved videreføring av passivhuskonseptet er bruken av I-profiler, som førte til noe ekstraarbeid og økt tidsbruk.

I prosjektet var det også utfordringer knyttet til å finne tekniske løsninger som ligger innenfor akseptable økonomiske rammer for å oppfylle kravet til fornybar energi for kunden. En erfaring var at løsninger som fungerer for tradisjonelle boliger, kanskje ikke er like godt egnet for passivhus. For eksempel ble vannbåren varme vurdert i prosjektet, men på grunn av kostnader og komfort er det vanskelig å regulere dette når varmebehovet er såpass lavt.

Bygging etter passivhusstandard er lite utbredt i Norge per i dag. Men Mesterhus har gjennom dette prosjektet i Bodø vist at det er fullt mulig å gjennomføre. De har gjennom erfaringene fra dette prosjektet og arbeid i ettertid utviklet tre kataloghus som er klassifisert og prosjektert etter passivhusstandarden.

For å gjennomføre et bygg etter passivhusstandarden er det viktig at alle som er med i prosjektet er klar over hvor avgjørende detaljer er i slike bygg. Det kreves mye kompetanse blant de involverte i prosjektet og er helt avhengig av en veldig godt håndverksmessig utført jobb for at bygget skal få de kvaliteter som forutsatt.

Det ble vurdert ulike kilder for oppvarming til boligen. Både solfangere og luft-til-vann-varmepumper ble vurdert. På grunn av beliggenhet og det værharde området, samt det arkitektoniske uttrykket til bygget, var bruk av solfangere uaktuelt i dette prosjektet. Når det gjelder luft-til-vann-varmepumper, ble dette ansett for kostbart sett i forhold til privatøkonomi.

3.4.2 Valg av byggemetode med utradisjonelle løsninger

På Skøyen i Oslo (se også kapittel 11.2) ble det i 2009 oppført et passivhus med bæresystem i massivtre. Dette prosjektet bærer preg av utradisjonelle løsninger, og det er derfor lagt ned mye arbeid i å tilknytte seg nødvendig kompetanse og inngå samarbeid med ulike leverandører som hadde produkter som egnet seg til bygging av passivhus. Siden det ikke er utarbeidet standardløsninger for passivhus eller for kombinasjonen massivtre og passivhus, ble det lagt ned mye arbeid i forkant og underveis i prosjektet. I tillegg ble mange av løsningene utviklet underveis i byggeprosjektet. En av hovedutfordringene i prosjektet var å utvikle løsninger som kombinerte massivtre med et isolasjonssjikt som minimerte kuldebroer, se Figur 8. Dette for å oppnå kostnads-, areal- og energieffektive løsninger.

Siden dette prosjektet er en nyskapning i forhold til både byggemetode og løsninger, dukket det opp mange utfordringer underveis i byggeprosjektet. Prosjektet hadde imidlertid bred støtte fra alle involverte og mye leverandørhjelp underveis. I tillegg viste de involverte i prosjektet stort engasjement, og alle hadde ønske om å løse utfordringene i prosjektet på en best mulig måte. Prosjektet har hatt tilgang til god kompetanse innenfor alle fagområder og har derfor lyktes veldig bra.

Massivtreelementene er produsert i en byggehall i Valdres, mens montering og bygging har skjedd på Skøyen i Oslo. Alle sammenstillinger av elementer og seksjoner fulgte samme prinsipp, noe som ga kontinuerlige overflater i hele byggets lengde og høyde. Elementene var ferdig tilpasset med hulltaking for åpninger/vinduer og sammenføyning med andre elementer. Den bærende massivtrekonstruksjonen ble satt opp først (dvs. det bærende skallet for hele bygget). Deretter ble det lagt på utvendig vindsperre før utvendig isolasjon med utlekting ble festet til massivtreskallet. Utvendig kledning ble festet inn gjennom isolasjonssjiktet til massivtrekonstruksjonen. Takelementene i massivtre kom som ferdige saltakselementer til byggeplass, og ble heist på plass og festet til toppen av ytterveggene i massivtre. På øverste del av taket ble det benyttet ekstra trykkfast isolasjon for å hindre deformasjoner i takflaten på grunn av snølast. Hele byggeprosessen frem til bygget var tett foregikk under telt. På denne måten unngikk man fukt i konstruksjonene. Bruken av prefabrikkerte elementer reduserte også avfallet under byggeprosessen.

3.5 Fra idé til bygg

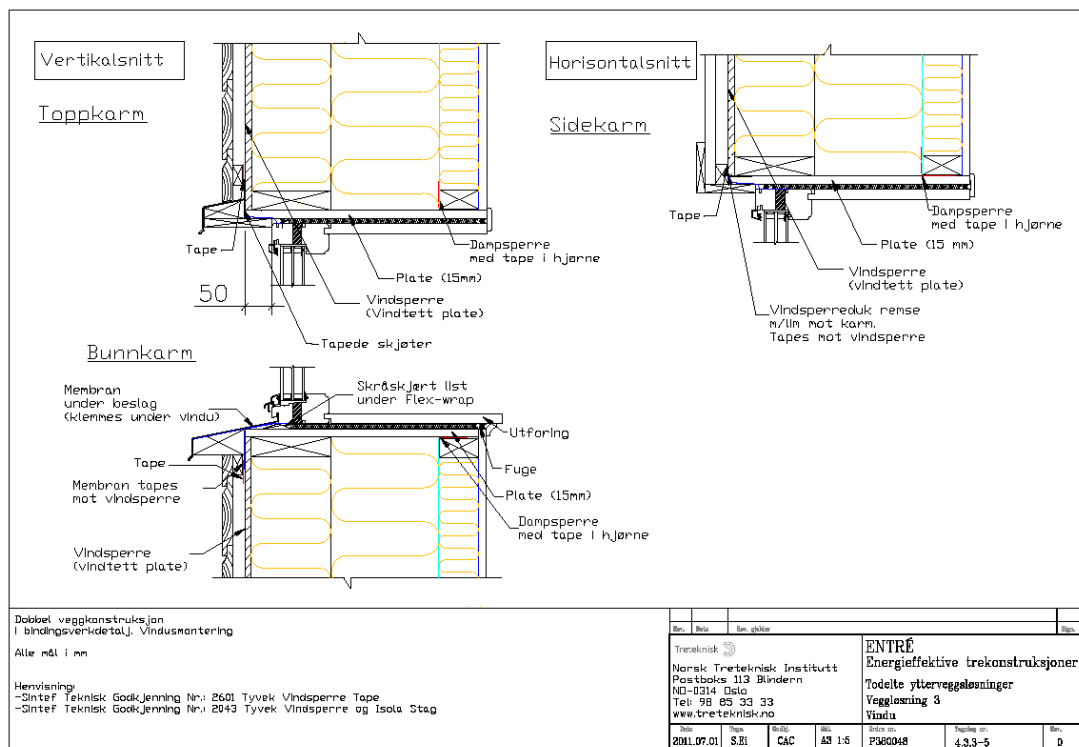
Et eksempel som viser at forskningsidéer kan føre til noe konkret er de 17 passivhusene på Rudshagen borettslag på Mortensrud i Oslo som OBOS og Mesterhus har oppført (se også kapittel 11.4). Veggene her er bygget som såkalte todelte vegger, basert på tegninger og innspill fra Treteknisk gjennom dette forskningsprosjektet, i tillegg til industrideltakere og utbygger.

Dobbeltveggen er utformet slik at den innerste delen av bindingsverket bærer lastene fra selve huset, mens den ytre delen kun bærer sin egen vekt i tillegg til vindlasten, se Figur 12. To adskilte vegger gir en stor fleksibilitet i forhold til ønsket veggtykkelse. Den totale veggtykkelsen vil dermed kunne varieres avhengig av ønsket varmegjennomgang (U-verdi) og type isolasjon. Den valgte byggemetoden krever imidlertid at man bygger innenifra og ut, hvilket igjen krever at det tas spesielt hensyn til beskyttelse av konstruksjonen under byggeperioden, frem til bygget er tett. Det ble i dette prosjektet benyttet telt for å hindre uønsket oppfukning i denne perioden.

For å sikre en god løsning, spesielt ved overganger, ble det utarbeidet byggetegninger i DAK-format som enkelt kunne justeres underveis i prosessen. Det ble også bygget en 1:1 modell av veggen (basert på Figur 15) i Treteknisk sitt laboratorium. I forbindelse med denne byggingen ble det arrangert en workshop der tekniske utfordringer ble løst i samarbeid med de utførende og materialleverandører, dette for å sikre at de forskjellige løsningene som var tegnet opp faktisk lar seg bygge. Figur 14 viser deltagere foran prøvebygging av veggen.



Figur 14. Bygging av 1:1 modell av dobbeltvegg i samarbeid med industri og utførende.



Figur 15. Snitt av todelte vegglesing ved vindu benyttet i passivhus på Mortensrud i Oslo.

4 Detaljtegninger av ytterveggløsninger

4.1 Generelt

Det er utarbeidet detaljtegninger for forskjellige oppbygginger som alle tilfredsstiller kravene til U-verdi, kuldebroer og statikk.

I dette kapitlet er det vist både gjennomgående og todelte ytterveggløsninger. Kapitlet har samme inndeling som kapittel 3 mht. veggtyper.

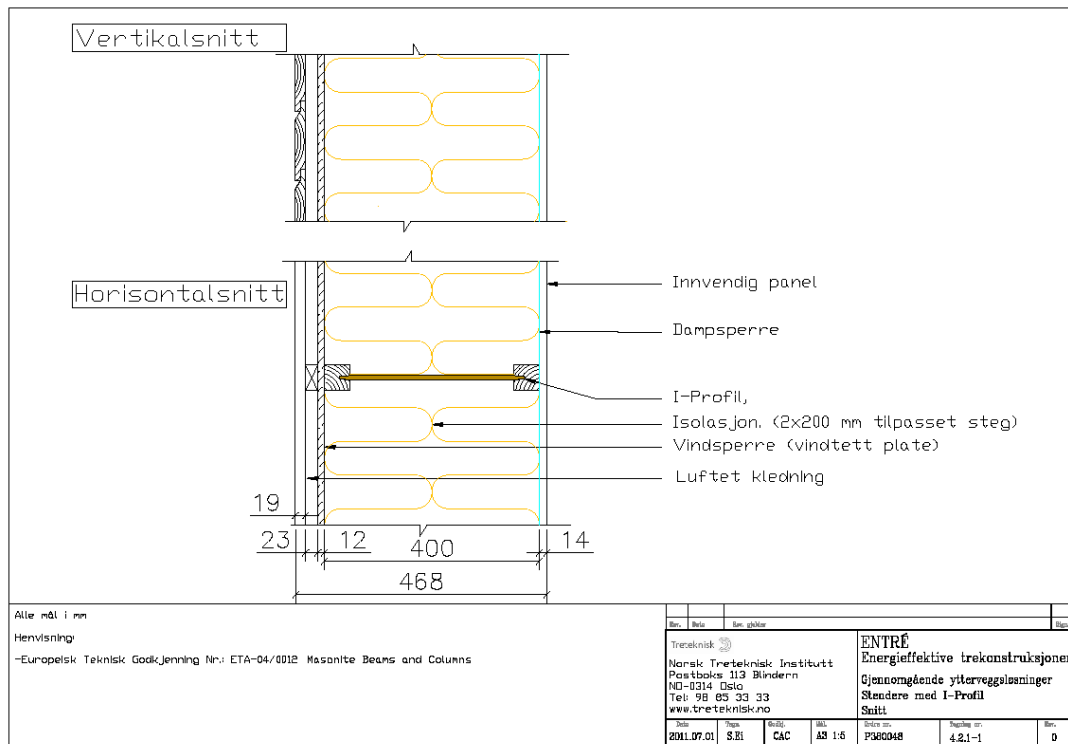
Det er tatt utgangspunkt i fire forskjellige tegningsdetaljer for veggen:

1. Snitt av vegg
2. Snitt mot fundament
3. Snitt etasjeskiller
4. Snitt mot tak

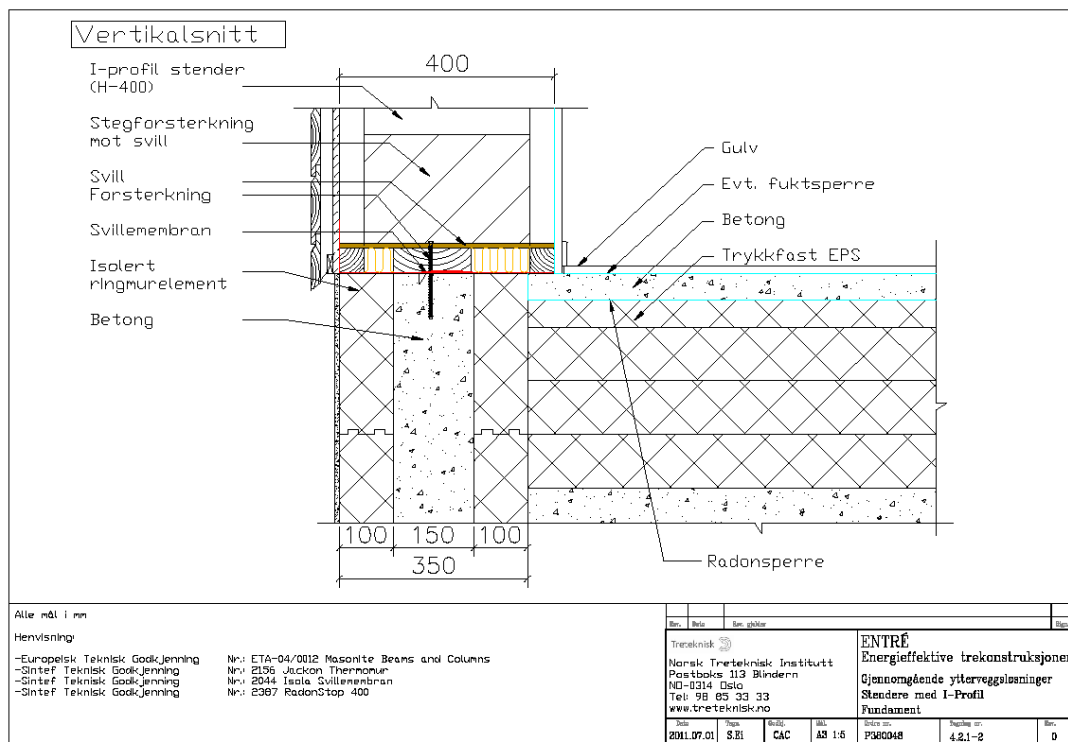
Tegningene i rapporten vises i et A5-format. Dette for at det skal være enkelt å få oversikt over de forskjellige veggmodellene, men alle tegninger ligger tilgjengelig for nedlasting i A3 format på Treteknisk sine hjemmesider, www.treteknisk.no, både som PDF og DAK-filer (dwg).

4.2 Gjennomgående ytterveggsløsninger

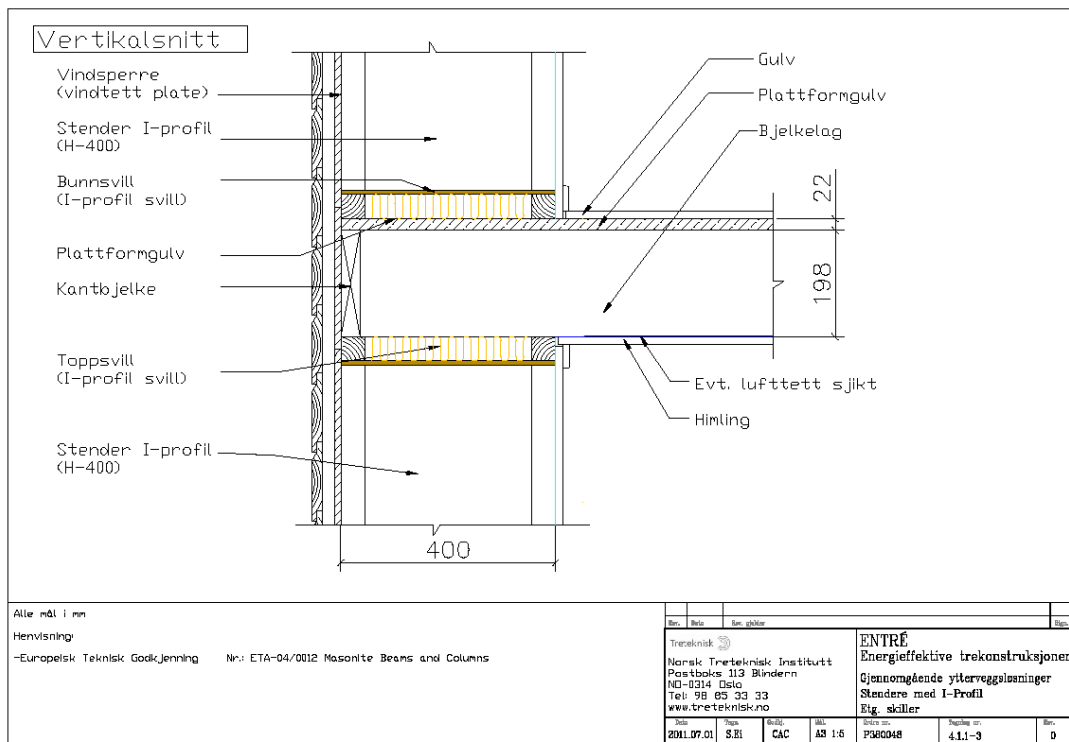
4.2.1 Stender med I-profil



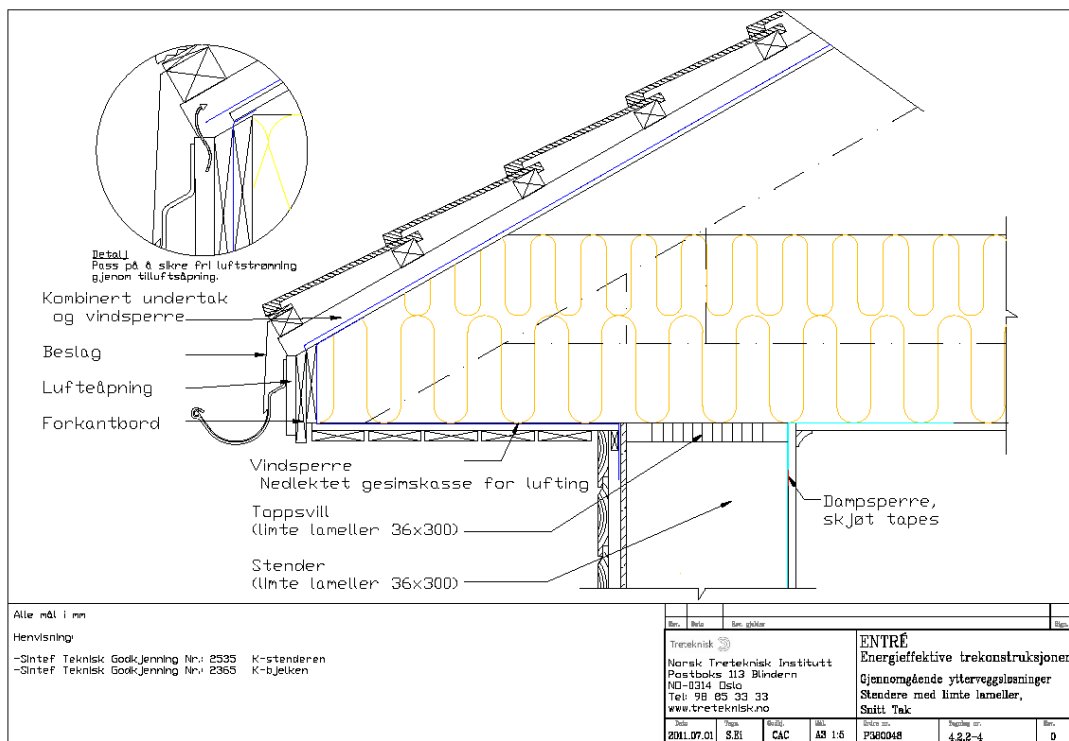
Figur 16. Stender med I-profil – Snitt (4.2.1-1).



Figur 17. Stender med I-profil – Fundament (4.2.1-2).

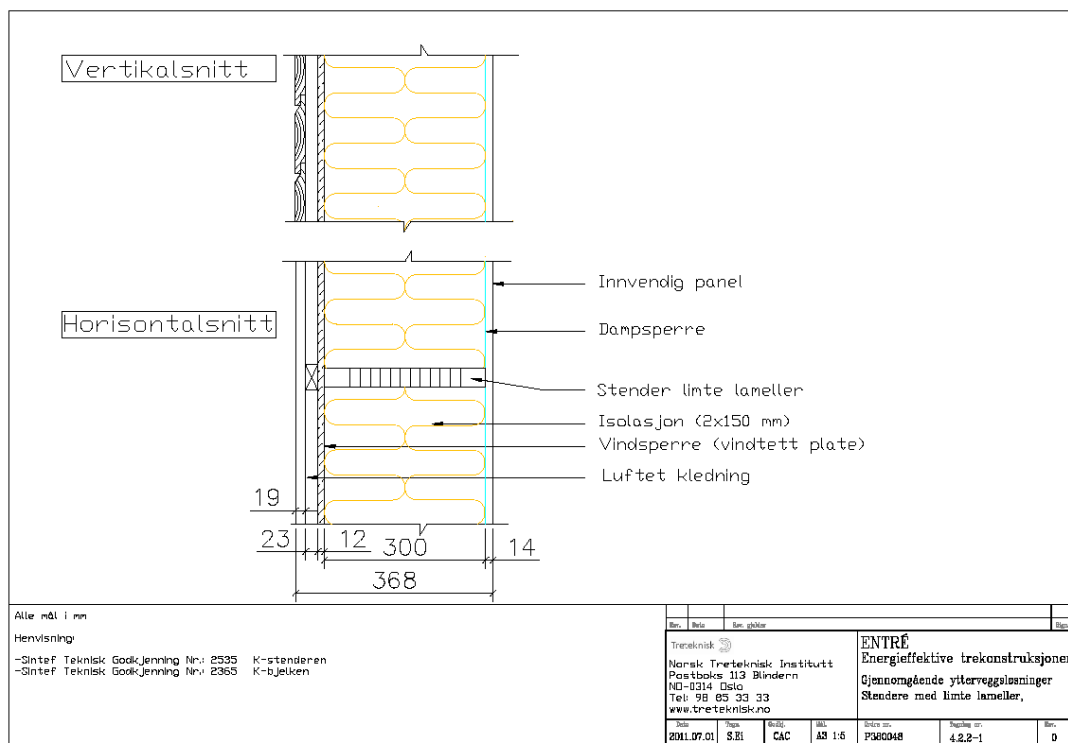


Figur 18. Stender med I-profil – Etasjeskiller (4.2.1-3).

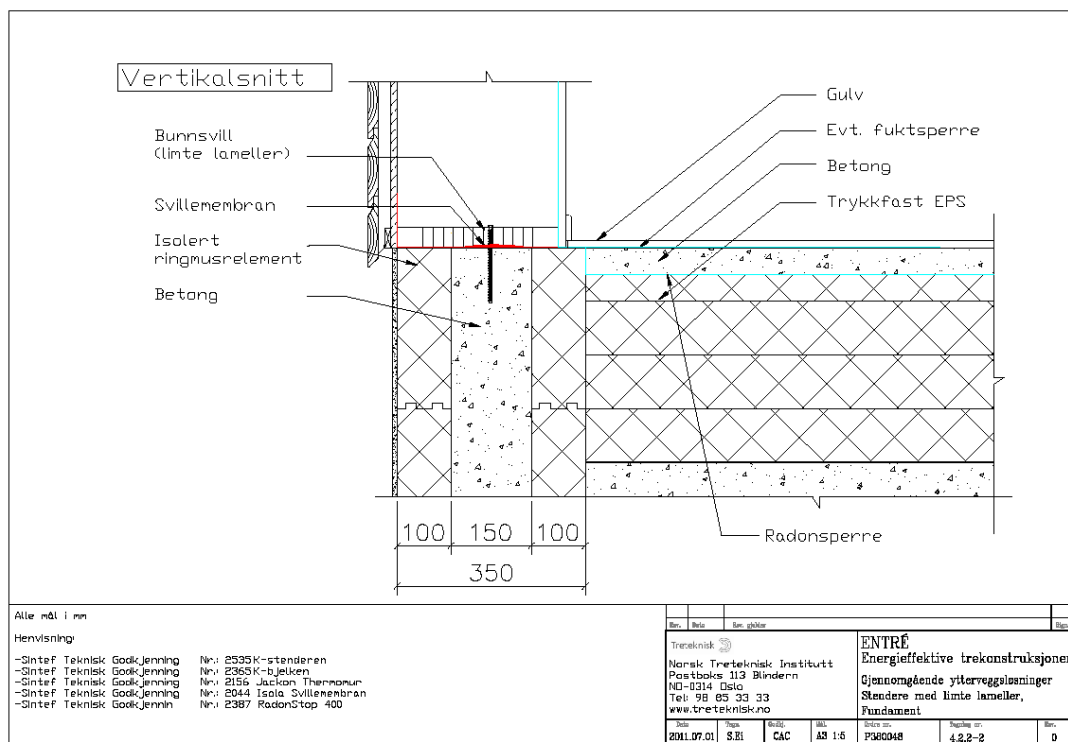


Figur 19. Stender med I-profil – Tak (4.2.1-4).

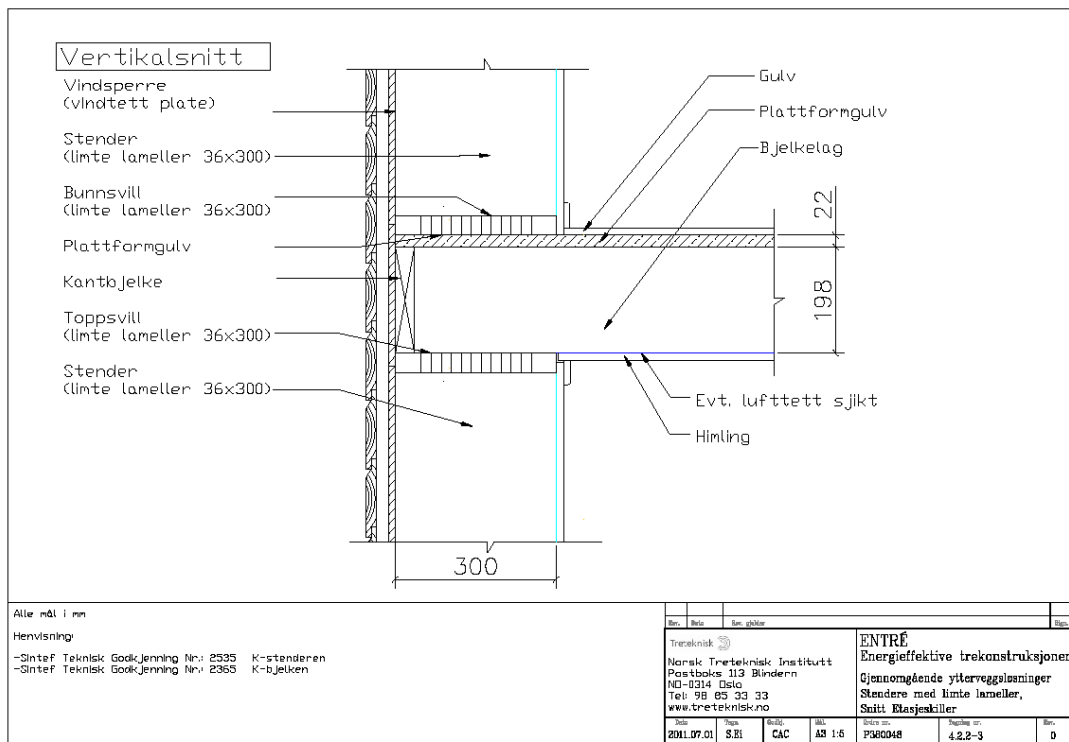
4.2.2 Stender av sammenlimte lameller



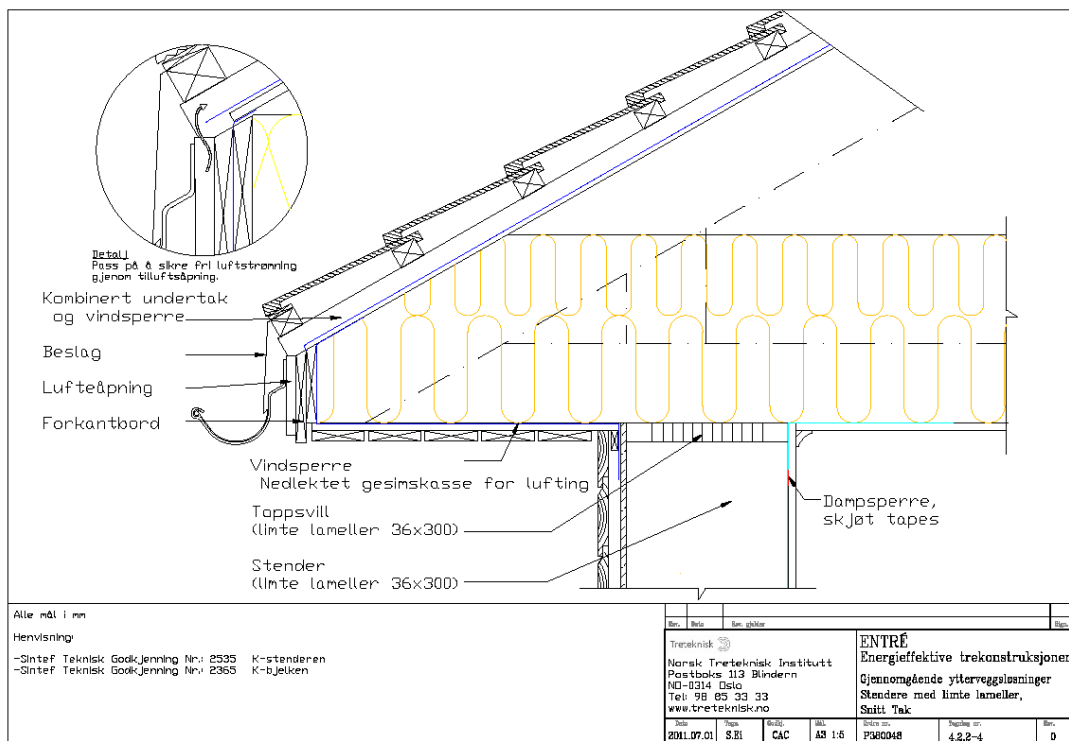
Figur 20. Stender av sammenlimte lameller – Snitt (4.2.2-1).



Figur 21. Stender av sammenlimte lameller – Fundament (4.2.2-2).

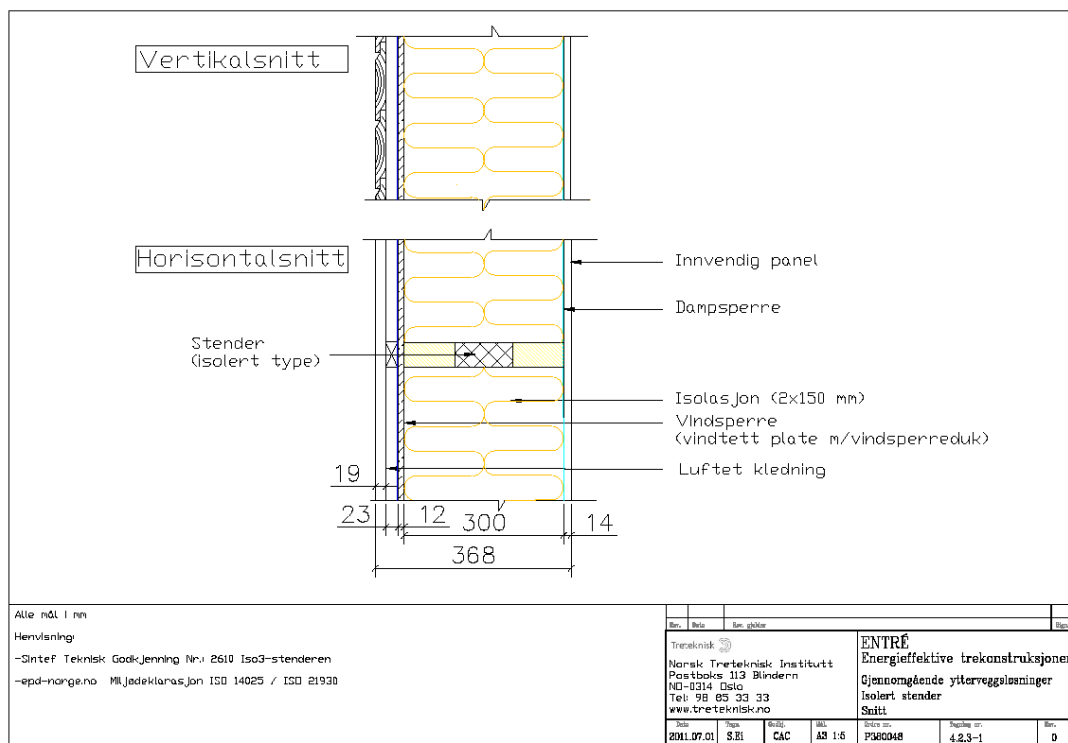


Figur 22. Stender av sammenlimte lameller – Etasjeskiller (4.2.2-3).

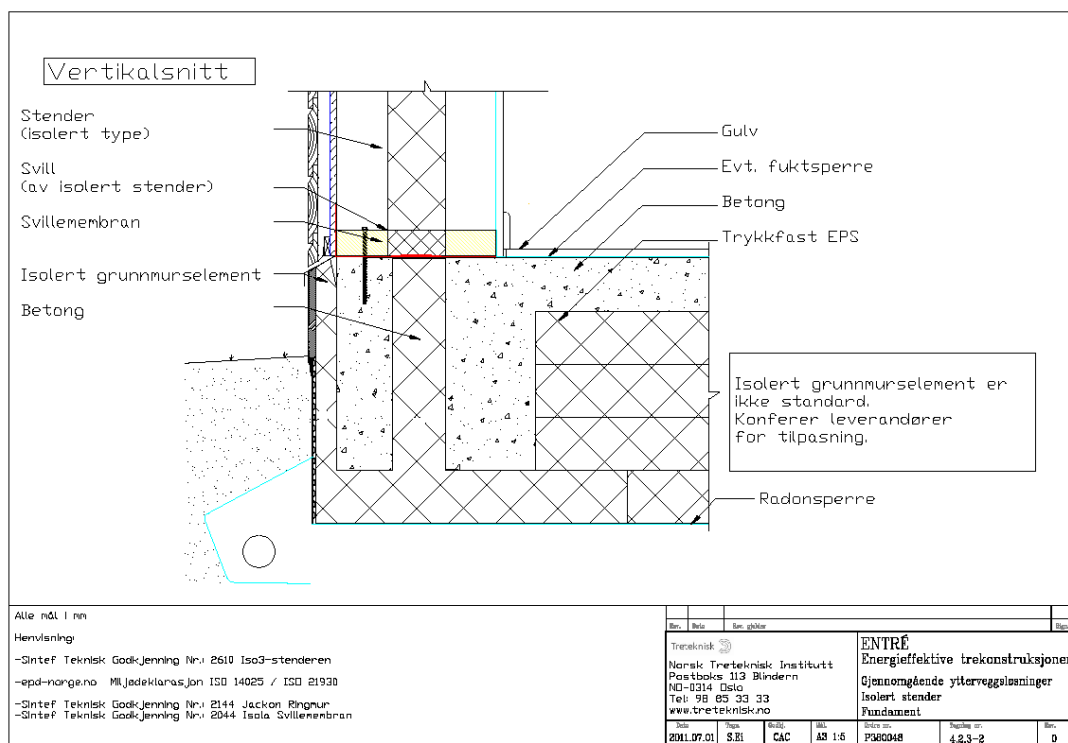


Figur 23. Stender av sammenlimte lameller – Tak (4.2.2-4).

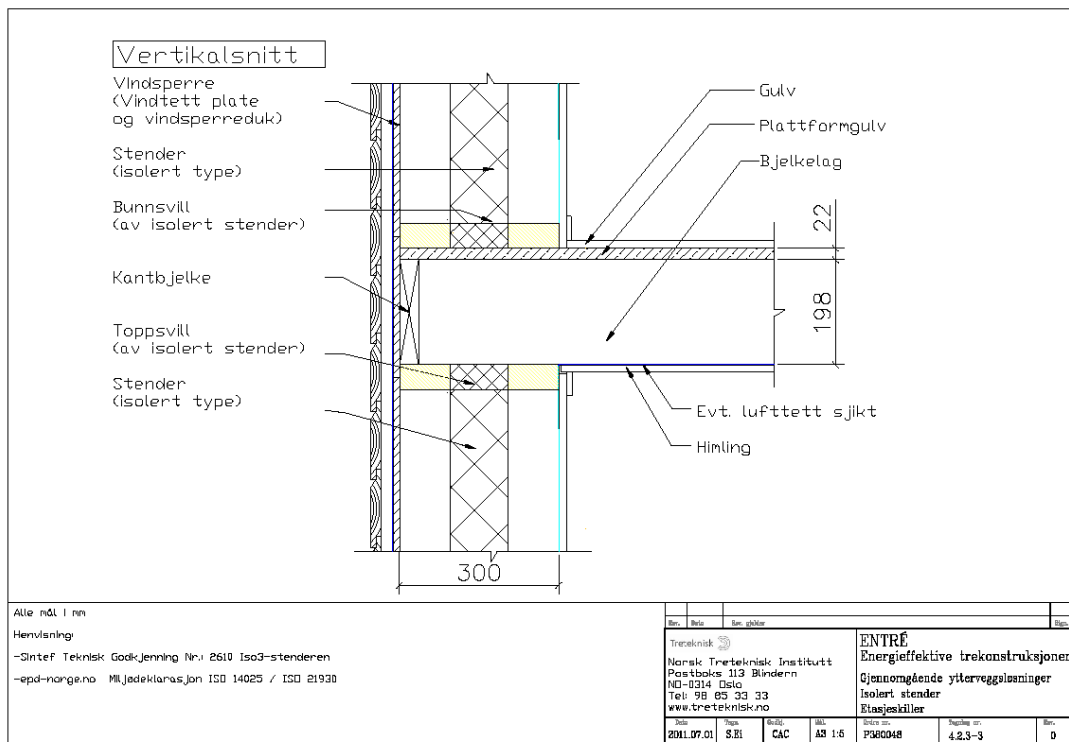
4.2.3 Isolert laminert stender



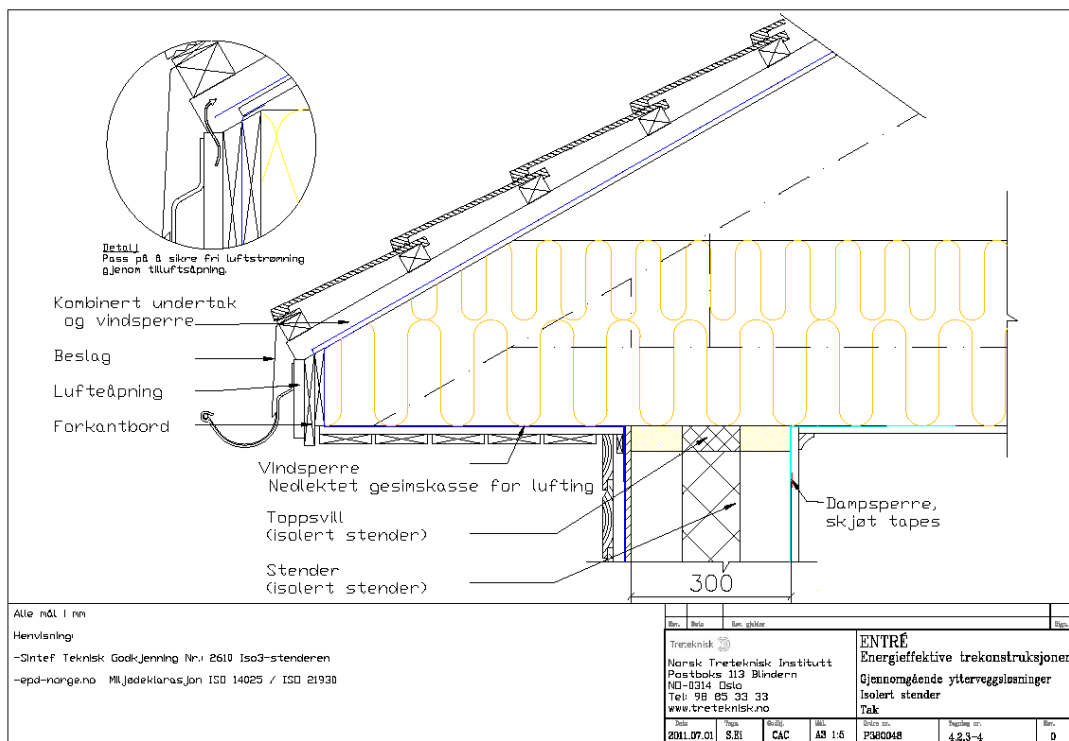
Figur 24. Isolert laminert stender – Snitt (4.2.3-1).



Figur 25. Isolert laminert stender – Fundament (4.2.3-2).

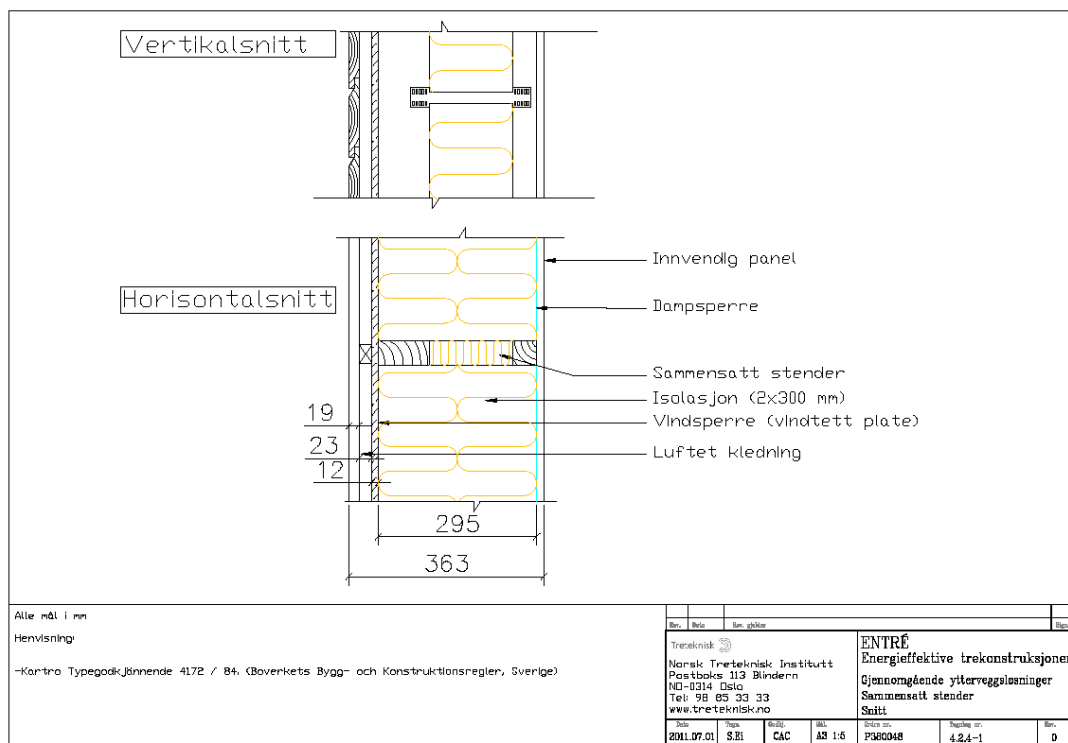


Figur 26. Isolert laminert stender – Etasjeskiller (4.2.3-3).

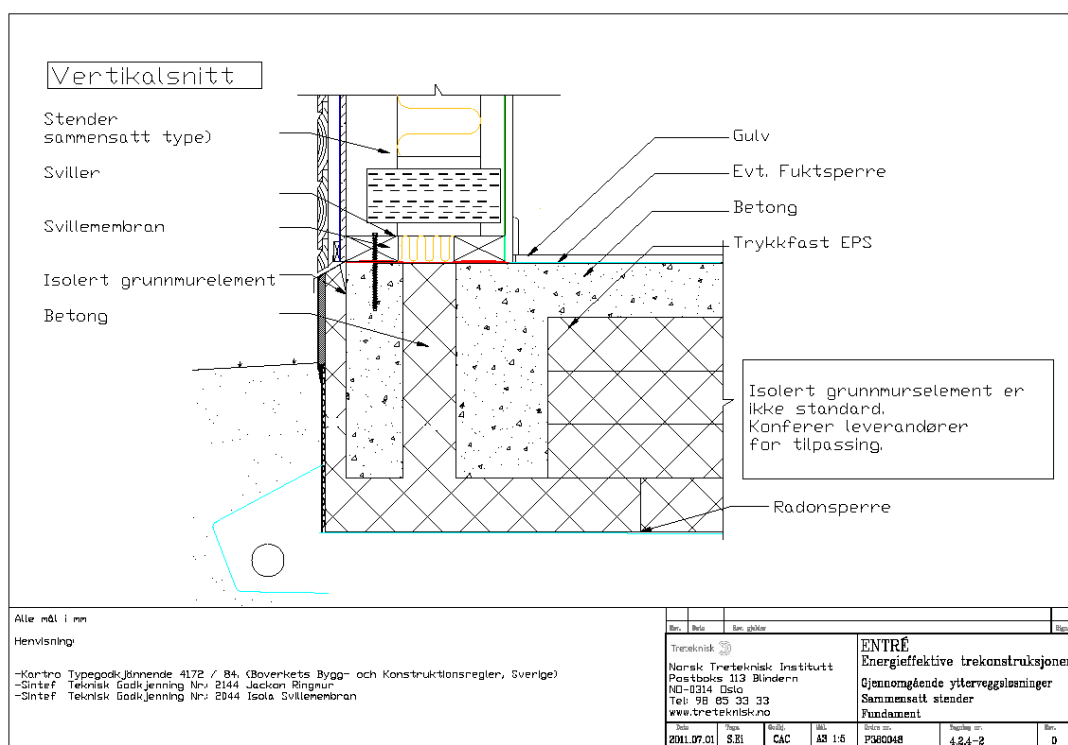


Figur 27. Isolert laminert stender – Tak (4.2.3-4).

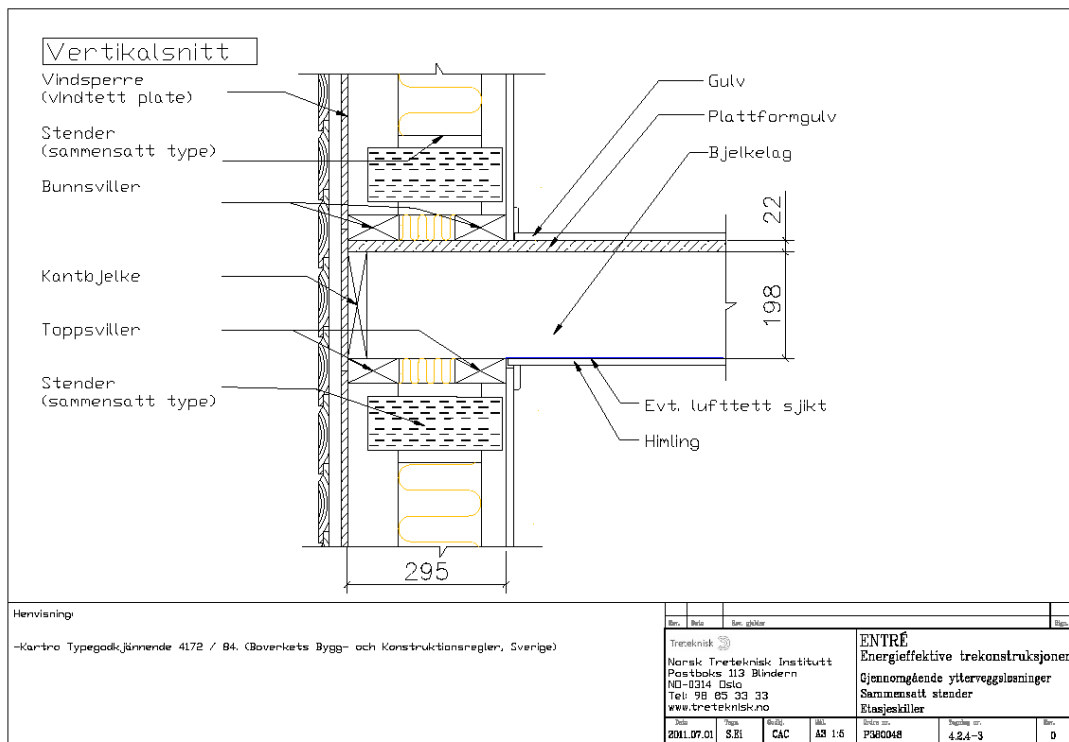
4.2.4 Isolert stender med spikerplate



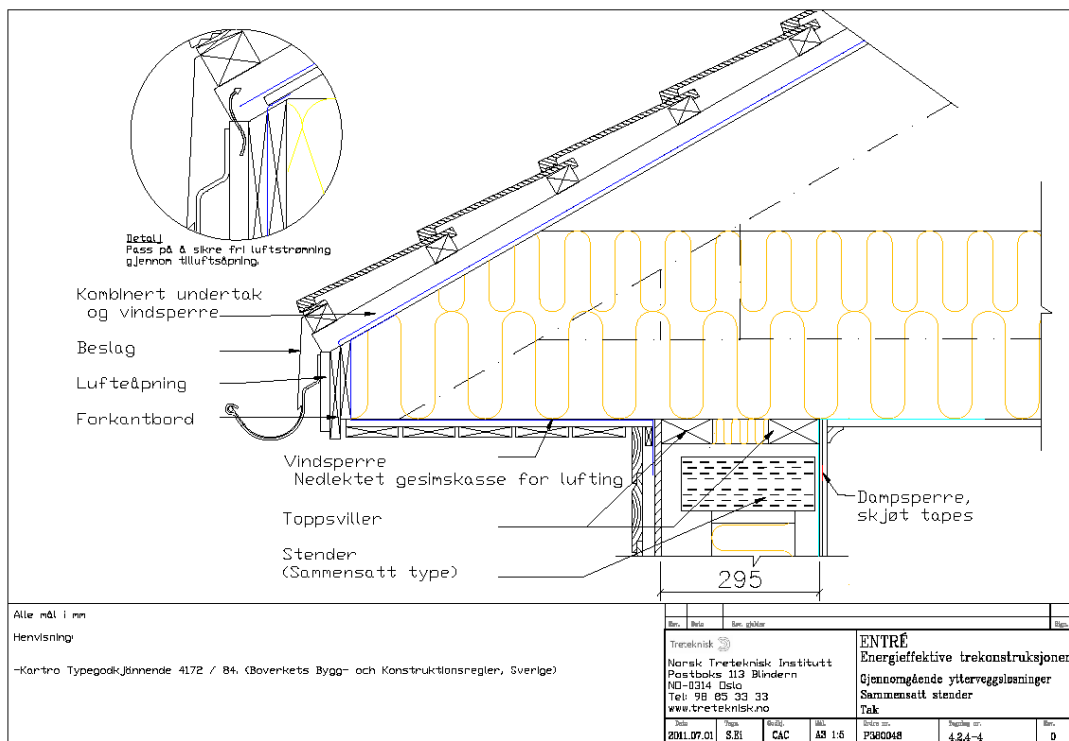
Figur 28. Isolert stender med spikerplate – Snitt (4.2.4-1).



Figur 29. Isolert stender med spikerplate – Fundament (4.2.4-2).

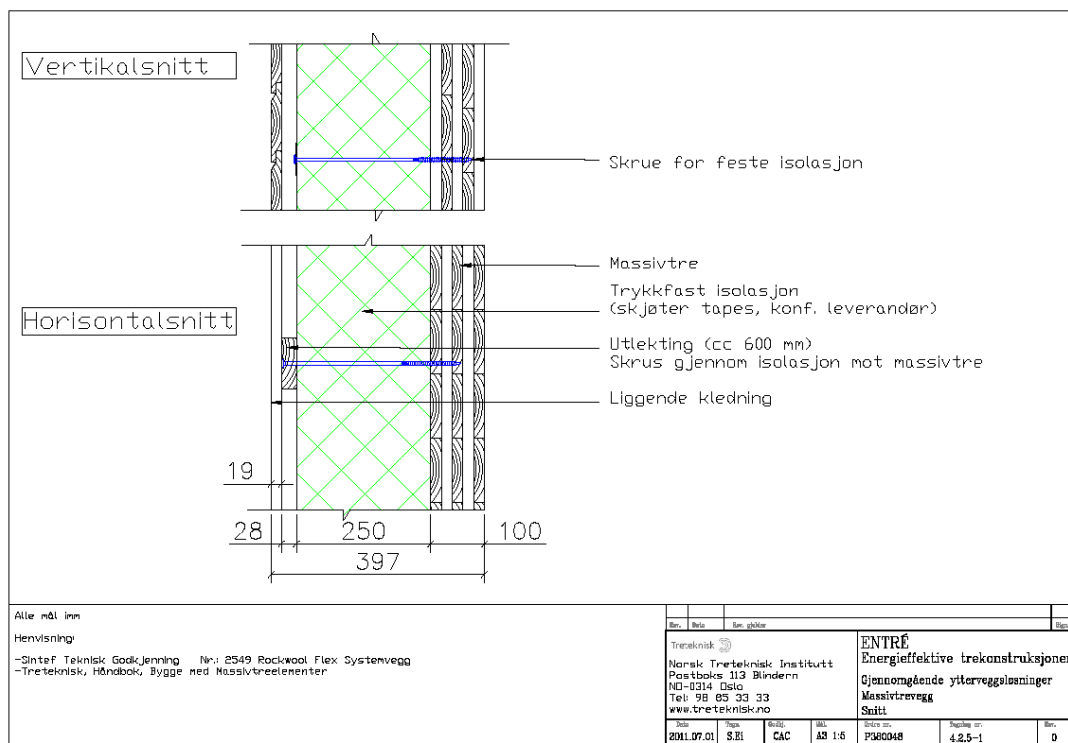


Figur 30. Isolert stender med spikerplate – Etasjeskiller (4.2.4-3).

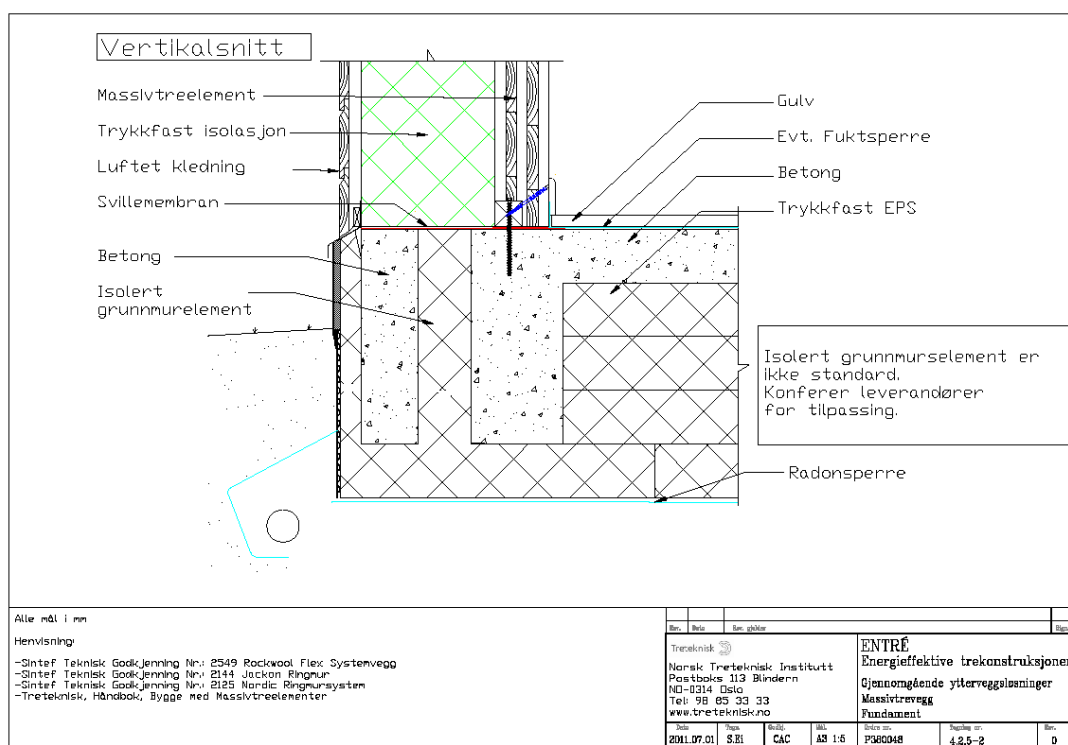


Figur 31. Isolert stender med spikerplate – Tak (4.2.4-4).

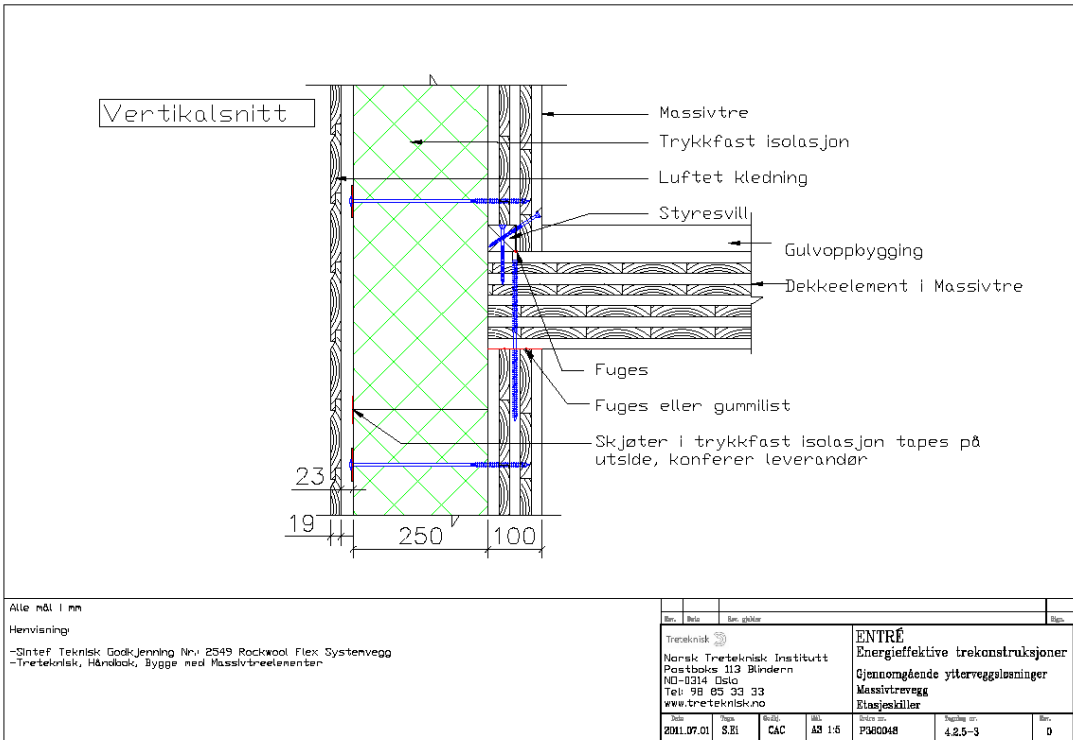
4.2.5 Massivtrevegg



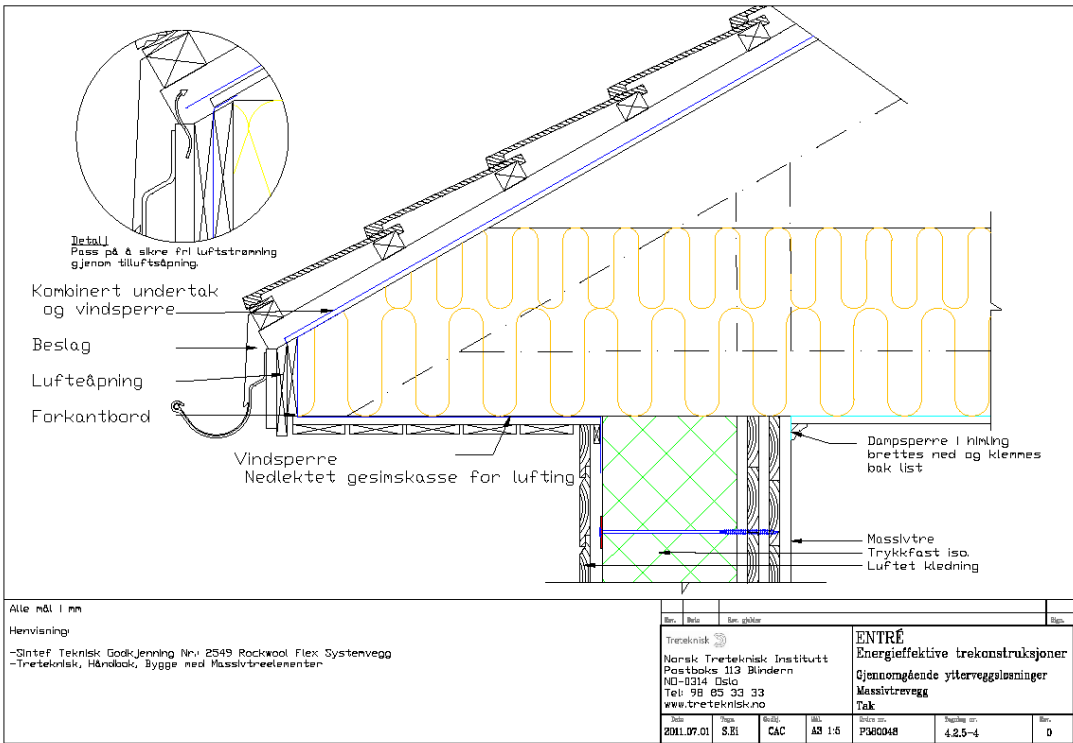
Figur 32. Massivtrevegg – Snitt (4.2.5-1).



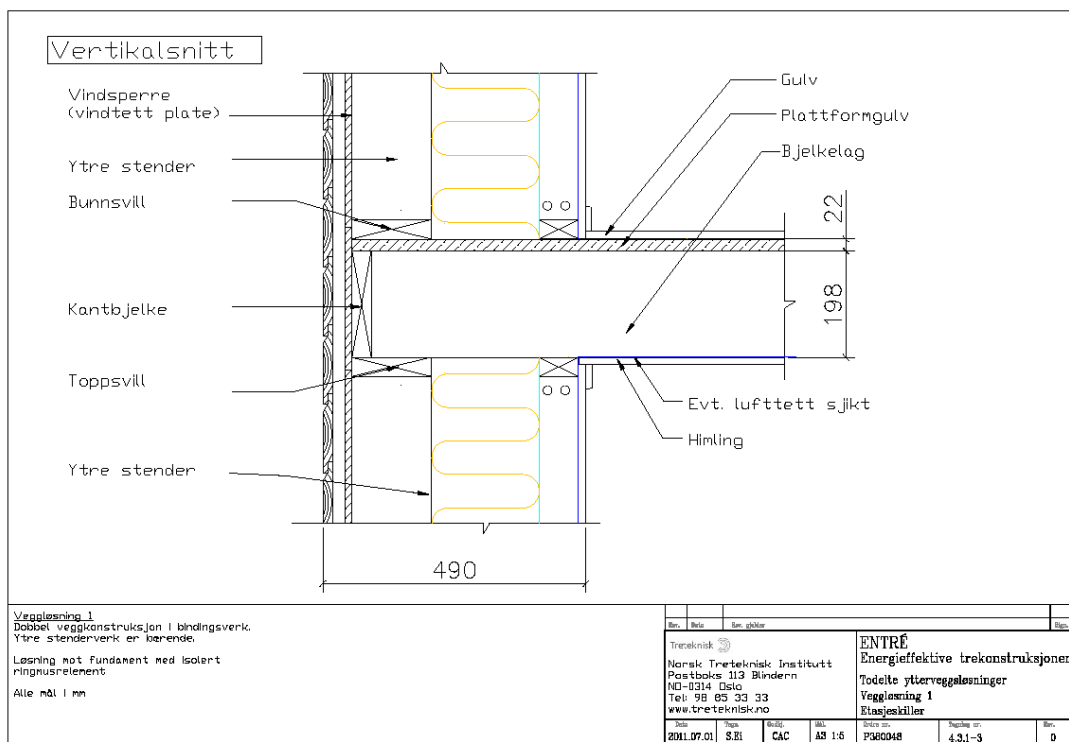
Figur 33. Massivtrevegg – Fundament (4.2.5-2).



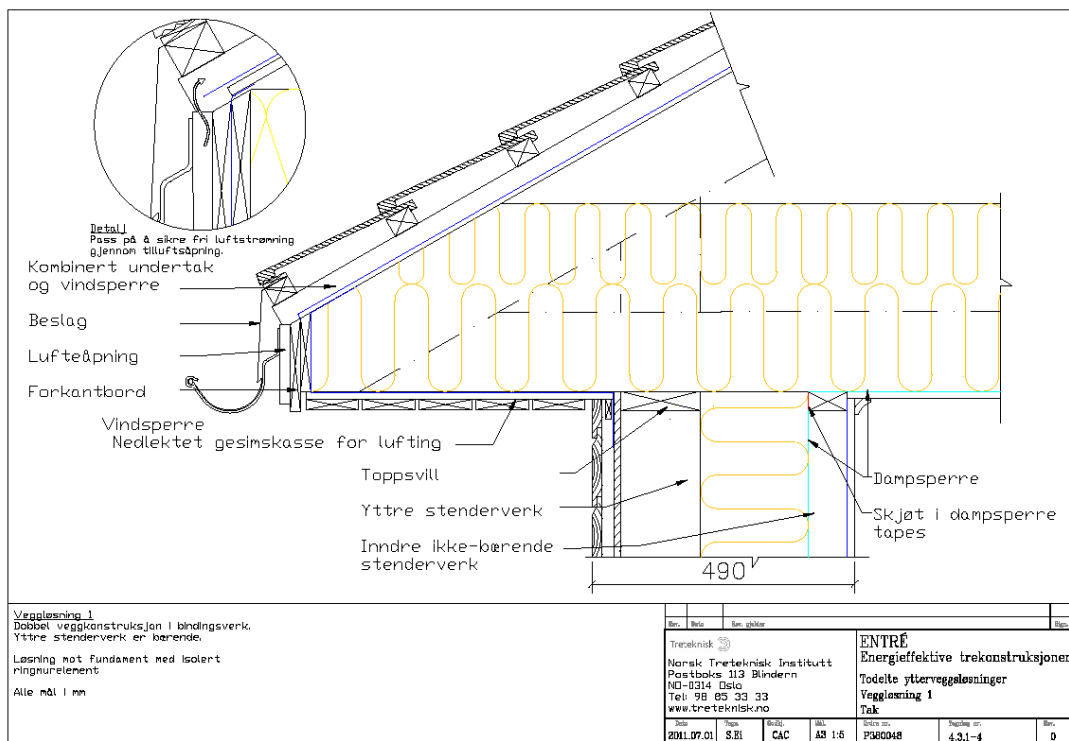
Figur 34. Massivtrevegg – Etasjeskiller (4.2.5-3).



Figur 35. Massivtrevegg – Tak (4.2.5-4).

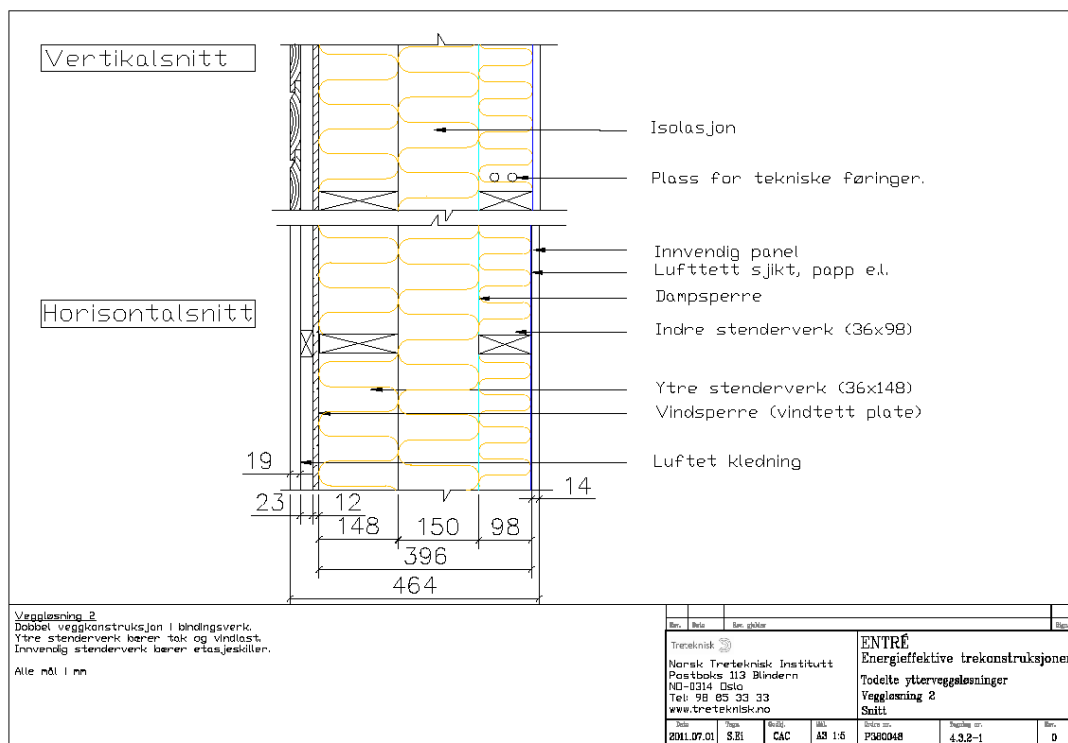


Figur 38. Todelt vegg med utvendig bæring – Etasjeskiller (4.3.1-3).

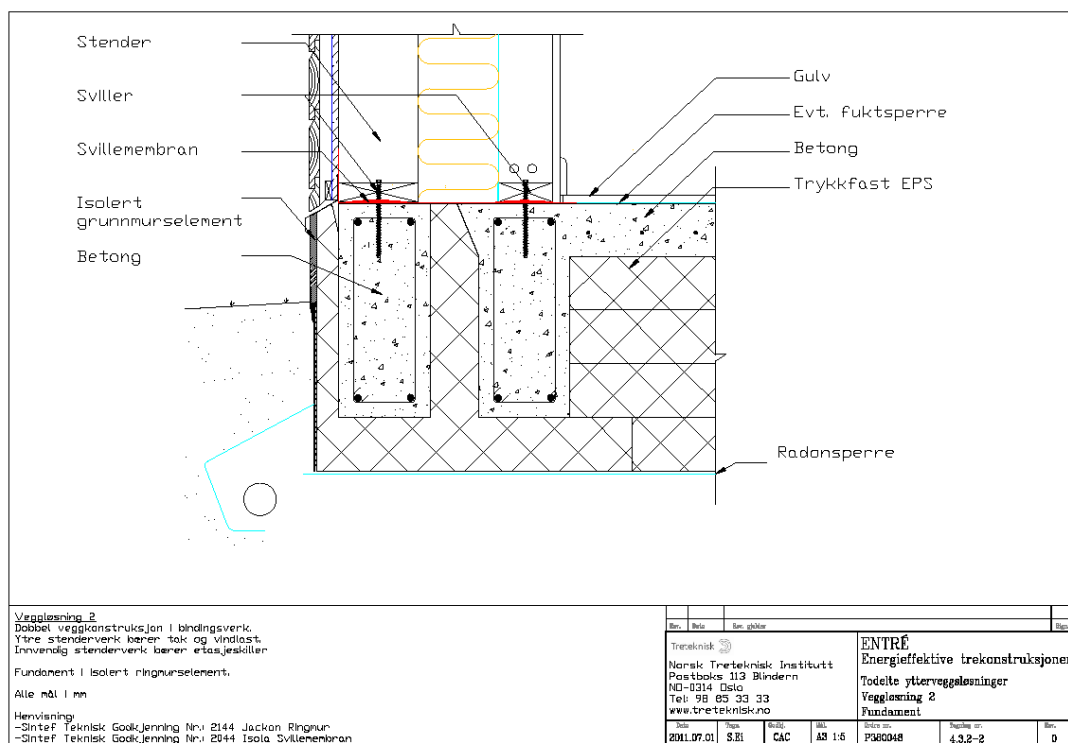


Figur 39. Todelt vegg med utvendig bæring – Tak (4.3.1-4).

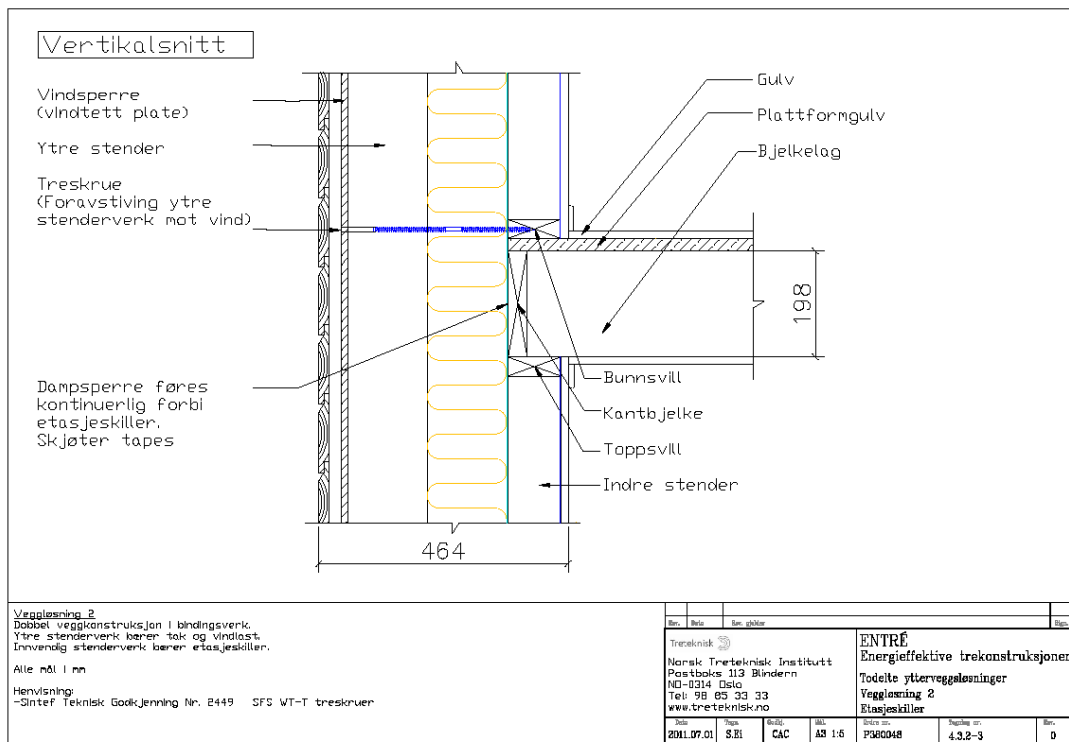
4.3.2 Todelt ytterveggeløsning med kombinert bæring



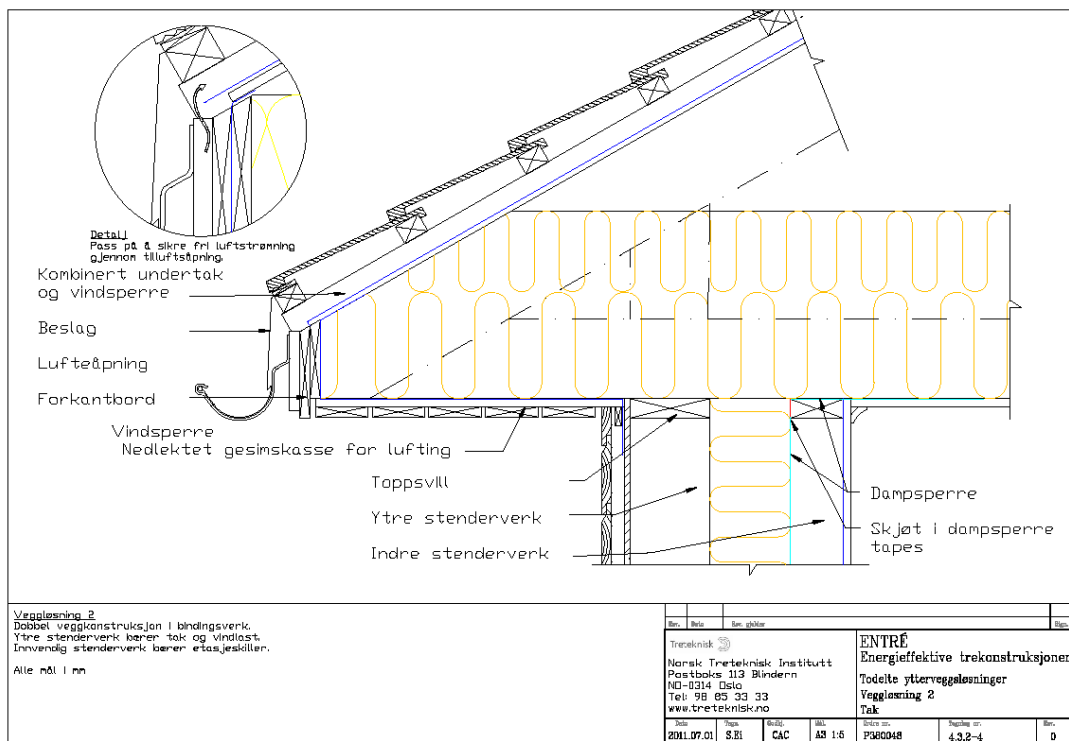
Figur 40. Todelt vegg med kombinert bæring – Snitt (4.3.2-1).



Figur 41. Todelt vegg med kombinert bæring – Fundament (4.3.2-2).

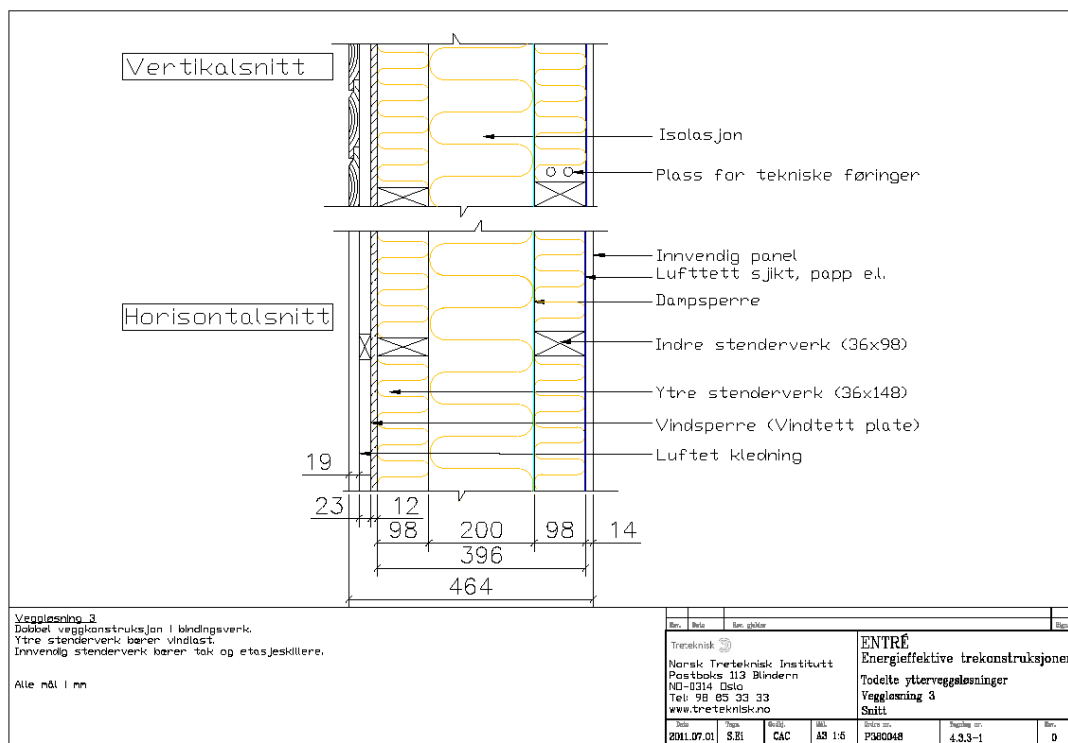


Figur 42. Todelt vegg med kombinert bæring – Etasjeskiller (4.3.2-3).

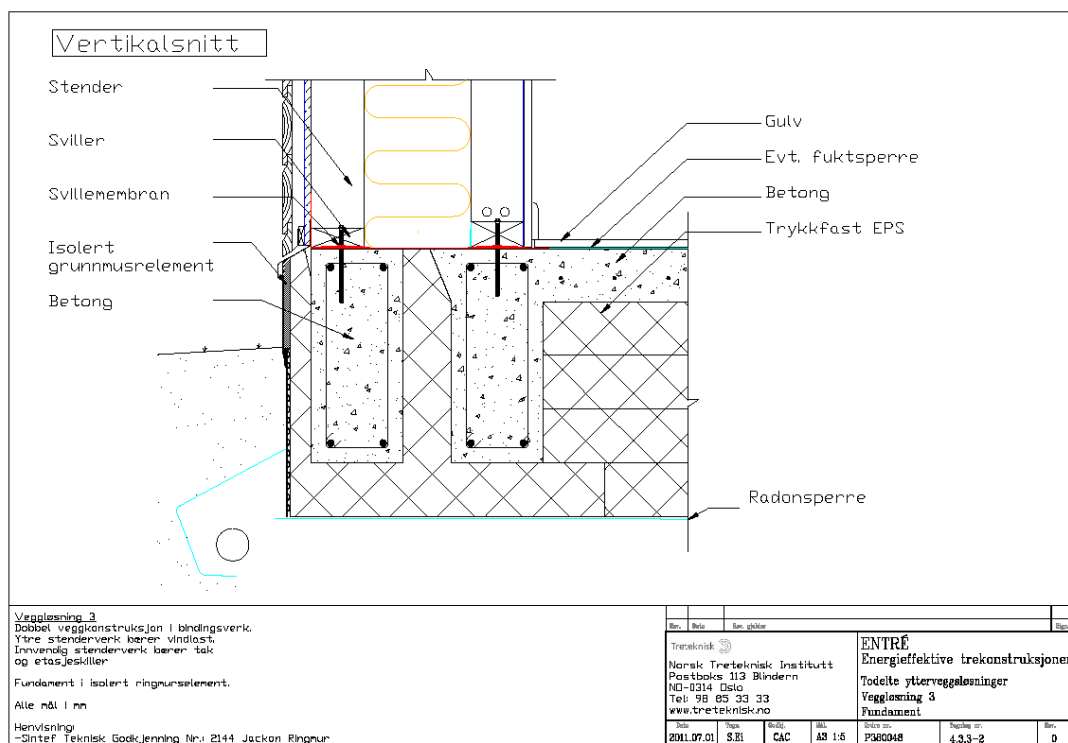


Figur 43. Todelt vegg med kombinert bæring – Tak (4.3.2-4).

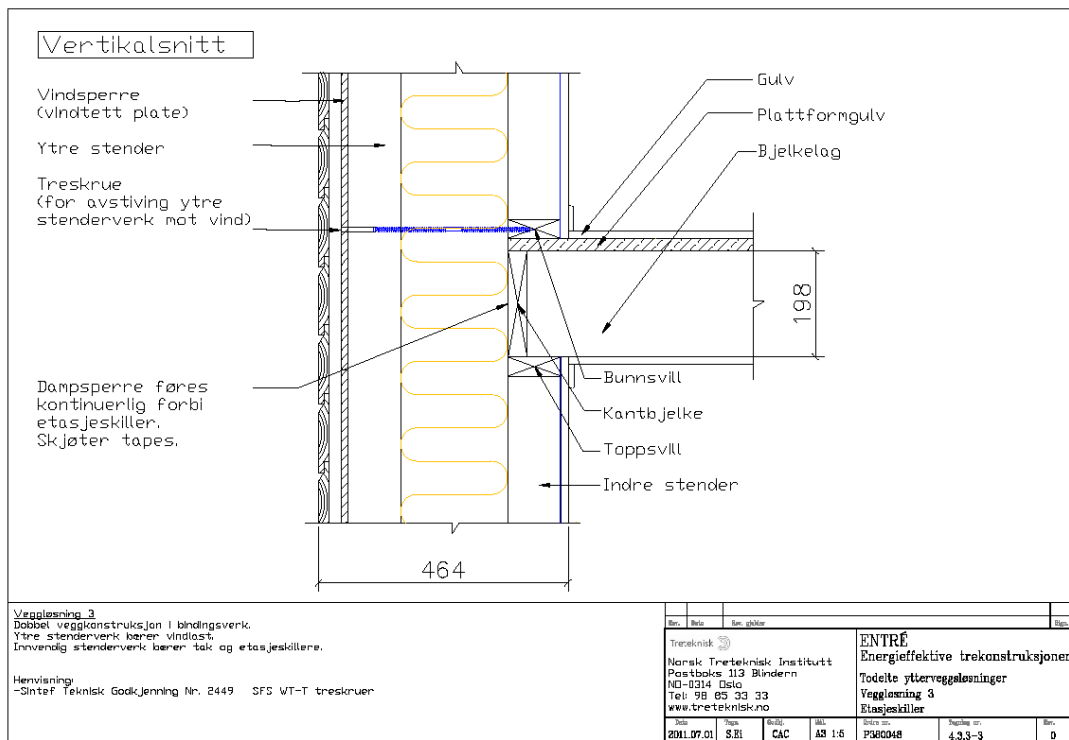
4.3.3 Todelt ytterveggeløsning med innvendig bæring



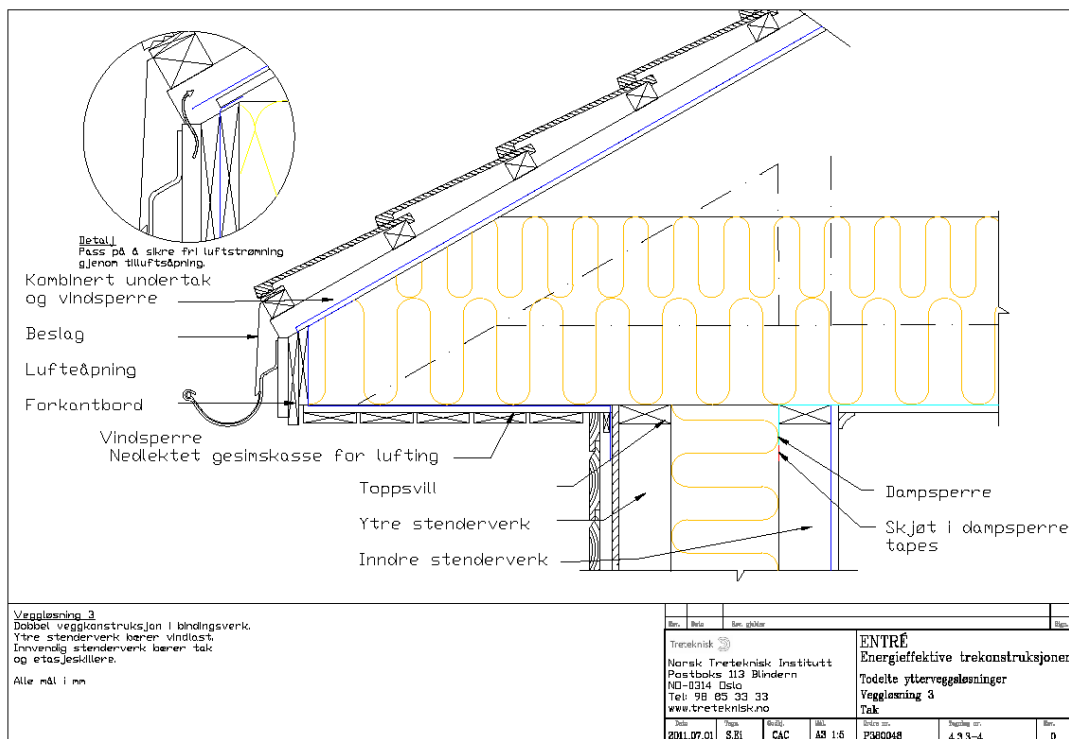
Figur 44. Todelt vegg med innvendig bæring – Snitt (4.3.3-1).



Figur 45. Todelt vegg med innvendig bæring – Fundament (4.3.3-2).

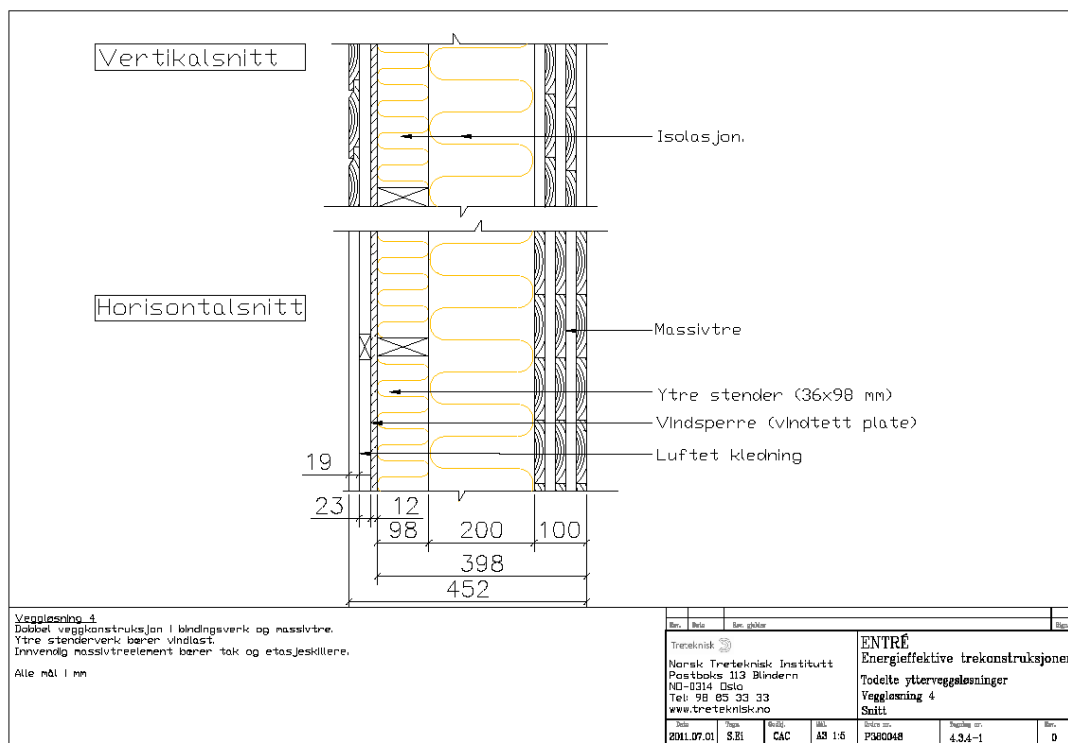


Figur 46. Todelt vegg med innvendig bæring – Etasjeskiller (4.3.3-3).

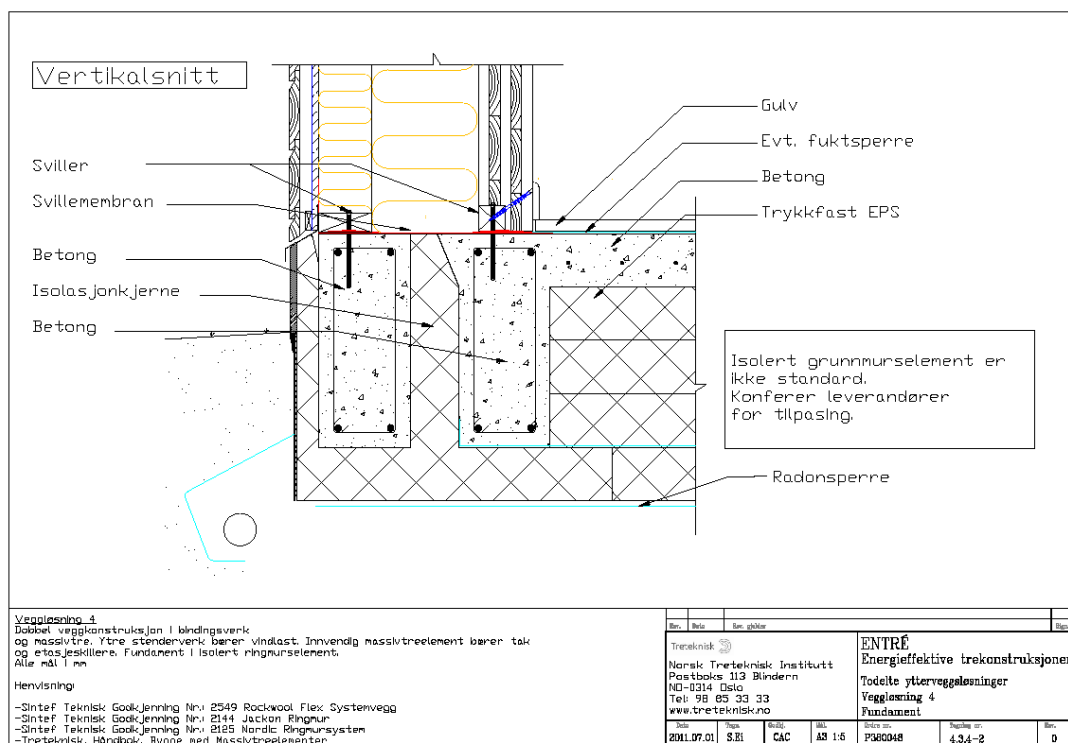


Figur 47. Todelt vegg med innvendig bæring – Tak (4.3.3-4).

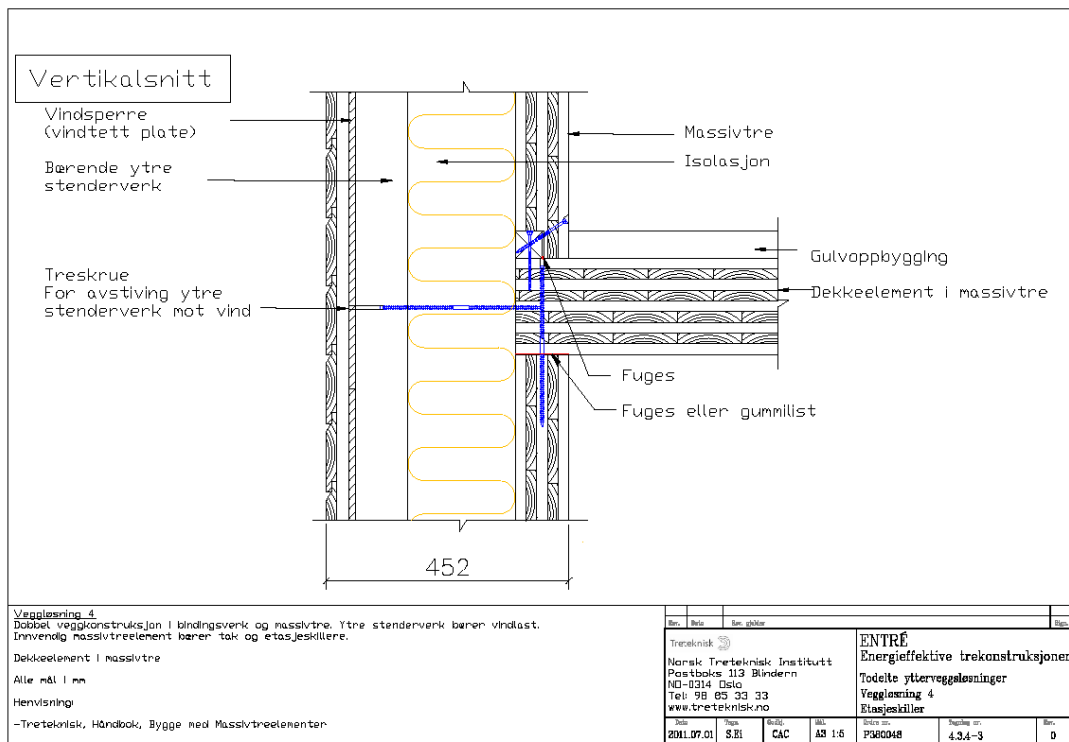
4.3.4 Todelt ytterveggeløsning med innvendig bærende massivtreelement



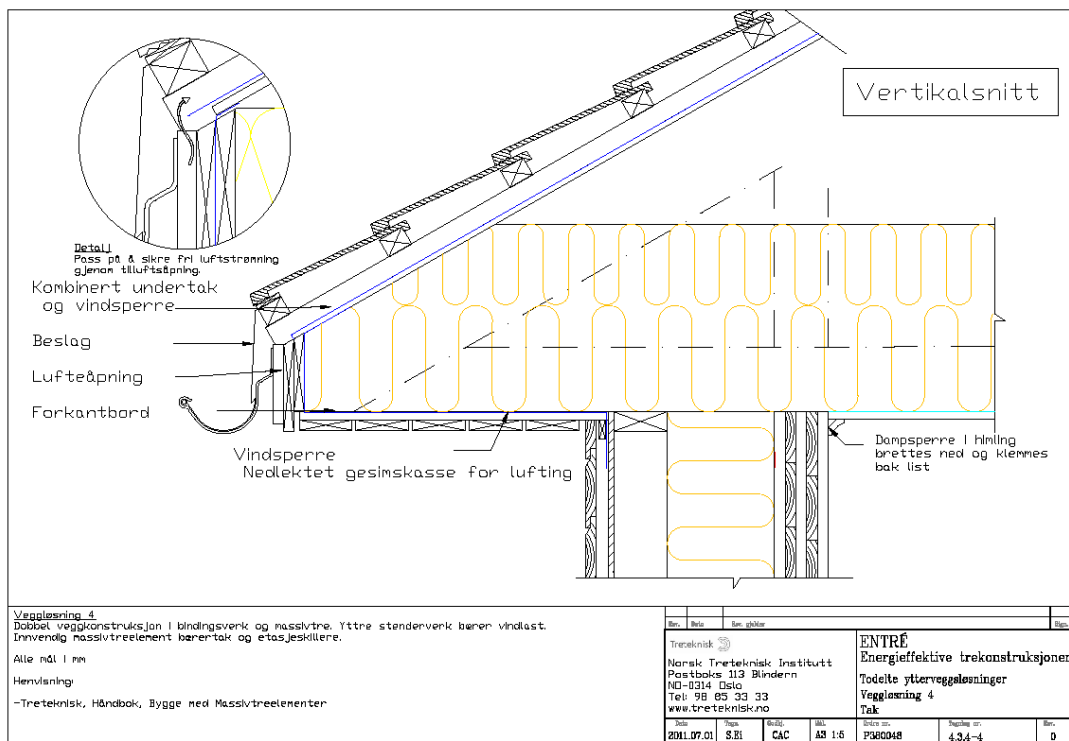
Figur 48. Todelt vegg med innvendig bærende massivtreelement – Snitt (4.3.4-1).



Figur 49. Todelt vegg med innvendig bærende massivtreelement – Fundament (4.3.4-2).



Figur 50. Todelt vegg med innvendig bærende massivtreelement – Etasjeskiller (4.3.4-3).



Figur 51. Todelt vegg med innvendig bærende massivtreelement – Tak (4.3.4-4).

5 Beregning av bæreevne til de ulike ytterveggløsninger

5.1 Generelt

Ulike bærende stendere i yttervegg må oppfylle krav til bæreevne etter NS-EN 1995-1-1. De ulike veggstenderne kontrolleres i bruddgrensetilstand.

Stendere må oppfylle følgende krav:

- Stabilitet/utknekking for enten rent trykk eller kombinasjon trykk og bøyning
- Svilletrykk i overgang mellom stendere og svill

Stenderne modelleres som en trykkpåkjent søyle som er fritt opplagt med vertikal last fra etasjeskille og horisontal last fra vindpåkjenning. I løsninger med doble stendere bærer den indre stenderen kun vertikale laster, og horisontal last fra vindpåkjenning settes lik 0.

Knekkklengde på stenderne settes lik etasjehøyde. Det er lagt til grunn etasjehøyder på 2,4 m, 2,7 m og 3,0 m.

Det er forutsatt et karakteristisk hastighetstrykk lik $1,75 \text{ kN/m}^2$ for vindlast. Formfaktor for innvendig overtrykk er satt lik 1,2 og innvendig sug er satt lik 0,3. Dette gir en total formfaktor lik 1,5. Lastfaktor for vind er satt lik 1,5.

Dette representerer en vindlast som skulle dekke de fleste steder i Norge.

Dimensjonerende kapasitet er oppgitt i kN per stender, bortsett fra for massivtreelementer, hvor den er oppgitt per meter bredde.

Etter overgang til Eurokode 5 er beregning av svilletrykk i bruksgrensetilstand ikke lenger med. Det er kun beregning av svilletrykk i bruddgrensetilstand som nå er med. Dette medfører at en del løsninger som tidligere oppfylte bruksgrensekravet i NS 3470, ikke lenger oppfyller bruddkriteriumet i NS-EN 1995-1-1. Det er for tiden under utarbeidelse et forslag til nasjonalt kriterium som ivaretar bruksgrensebetraktningen som tidligere var med i nasjonal standard.

Beregning av svilletrykk er derfor ikke med i denne rapporten, siden det ikke foreligger et godkjent utkast til nye beregningsregler ennå.

5.2 Gjennomgående yttervegløsninger

5.2.1 I-profil

Der er lagt til grunn følgende forutsetninger:

- Fasthetsklasse i flenser er L17 etter EN 14081-4:2005
- Stegmateriale er av type hard trefiberplater HB.HLA1 i henhold til NS-EN 13986 med minimum densitet lik 900 kg/m^3
- Stegtykkelse er lik 6,7 mm

Karakteristiske fastheter og midlere stivhetsmodul er gitt i Tabell 3.

Tabell 3. Karakteristiske fastheter.

Egenskap	Fasthetsverdi
f_{mk}	14,1
f_{t0k}	11,0
f_{c0k}	16,4
f_{v0k}	14,0
f_{v90k}	2,4
$E_{0,5}$ (flenser aksialt)	9 000
$E_{0,05}$ (flenser aksialt)	$0,7 \cdot 9000 = 6\,300$
E (stegplate aksialt)	5 300
G (stegplate)	2 100

Stivheter og treghetsradius er oppgitt i Tabell 4.

Tabell 4. Beregnede stivheter.

Profil	Bøystivhet kNm^2	Aksialstivhet $\text{kN} \cdot 10^3$	Skjærstivhet $\text{kN} \cdot 10^3$	Treghetsradius mm
	EI	EA	GA	i
45x300	618	43,5	2,89	119,5

I-profil 45x300 mm basert på de foregående forutsetningene har dimensjonerende kapasitet ut i fra knekk lengde (vegghøyde) som vist i Tabell 5. Det er forutsatt en k_{mod} lik 0,9 og γ_m lik 1,25.

Tabell 5. Dimensjonerende trykkapasitet til I-profil, utsatt for en kombinasjon av vindlast og trykkbelastning.

	Knekk lengde		
I-profil	2,4 m	2,7 m	3,0 m
45x300	141,6 kN	137,4 kN	132,9 kN

5.2.2 Sammenlimte lameller

Det er lagt til grunn følgende forutsetninger:

- Oppbygd av ytterlameller som utgjør minimum 1/6 av totalbredden
- Ytterlameller har en strekkstyrke på minimum 22 N/mm² (LS22)
- Midtlamellene har en strekkstyrke på minimum 15 N/mm² (LS15)

Karakteristiske fastheter og midlere stivhetsmodul er gitt i Tabell 6.

Tabell 6. Karakteristiske fastheter.

Egenskap	Fasthetsverdier
f_{mk}	28,0
f_{t0k}	14,0
f_{t90k}	0,4
f_{c0k}	21,0
f_{vk}	2,5
$E_{0,5}$	13 000
$E_{0,05k}$	7 400
G_{0m}	410

Stivheter og treghetsradius er oppgitt i Tabell 7.

Tabell 7. Beregnede stivheter.

Profil	Bøyestivhet kNm ²	Aksialstivhet kN*10 ³	Treghetsradius mm
	EI	EA	i
45x400	3 120	43,5	119,5

Limtre 45x400 mm basert på de foregående forutsetningene har dimensjonerende kapasitet ut i fra knekkklengde (vegghøyde) som vist i Tabell 8. Det er forutsatt en k_{mod} lik 0,9 og γ_m lik 1,15.

Tabell 8. Dimensjonerende trykkapasitet til sammenlimte lameller, utsatt for en kombinasjon av vindlast og trykkbelastning.

	Knekkklengde		
Sammenlimte lameller	2,4 m	2,7 m	3,0 m
45x400	215,4 kN	209,6 kN	203,4 kN

5.2.3 Isolert stender

Det er lagt til grunn følgende forutsetninger:

- Polyuretanskummet mellom de to tredelene har en minimumsdensitet lik 125 kg/m³.
- Det er også forutsatt at polyuretanskum er limt til tredelene med fingerprofil
- Heltredelene i stender har fasthetsklasse C24

Karakteristiske fastheter og midlere stivhetsmodul er gitt i Tabell 9.

Tabell 9. Karakteristiske fastheter.

Egenskap	Fasthetsverdier
f_{mk} (trevirke)	24,0
f_{t0k} (trevirke)	14,0
f_{t90k}	0,4
f_{c0k}	21,0
f_{t90k} (PUR)	0,50
f_{vk} (PUR)	0,60
$E_{0,05k}$	7 400
$E_{0,5}$	11 000
G_k (PUR)	35

Stivheter og treghetsradius er oppgitt i Tabell 10.

Tabell 10. Beregnede stivheter.

Profil	Bøyestivhet kNm ²	Aksialstivhet kN*10 ³	Treghetsradius mm
	EI	EA	i
47x300	3 120	43,5	119,5

Isolert stender 47x300 mm basert på de foregående forutsetningene har dimensjonerende kapasitet ut i fra knekk lengde (vegg høyde) som vist i Tabell 11. Det er forutsatt en k_{mod} lik 0,9 og γ_m lik 1,25.

Tabell 11. Dimensjonerende trykkapasitet til isolert stender, utsatt for en kombinasjon av vindlast og trykkbelastning.

	Knekk lengde		
Limtre	2,4 m	2,7 m	3,0 m
47x300	169,0 kN	154,0 kN	138,0 kN

5.2.4 Todelt stender sammensatt med spikerplater

Det er forutsatt følgende:

- Heltredelene (flensene) er i fasthetsklasse C18 eller bedre
- Det er benyttet spikerplate som holder tredelene sammen på begge sider
- Minst 52 mm bredde på spikerplate og minst 38 mm forankringslengde, der tannlengden er på 8 mm og platetykkelsen er lik 1,0 mm
- Flytestyrken på stålplaten er minst 350 MPa og med bruddstyrke på minst 420 MPa

Karakteristiske fastheter og midlere stivhetsmodul for tredelene i tverrsnittet er gitt i Tabell 12.

Tabell 12. Karakteristiske fastheter.

Egenskap	Fasthetsverdier
f_{mk}	18,0
f_{t0k}	14,0
f_{t90k}	0,4
f_{c0k}	16,0
$E_{0,05k}$	7 400
$E_{0,5}$	6 000

Stivheter og treghetsradius er oppgitt i Tabell 13.

Tabell 13. Beregnede stivheter.

Profil	Bøyestivhet kNm ²	Aksialstivhet kN*10 ³	Treghetsradius mm
	EI	EA	i
45x295	660	56,7	152,7

Sammensatt stender 45x295 mm basert på de foregående forutsetningene har dimensjonerende kapasitet ut i fra knekk lengde (vegghøyde) som vist i Tabell 14. Det er forutsatt en k_{mod} lik 0,9 og γ_m lik 1,25.

Tabell 14. Dimensjonerende trykkapasitet til todelte stender sammensatt med spikerplater, utsatt for en kombinasjon av vindlast og trykkbelastning.

	Knekk lengde		
Sammensatt stender	2,4 m	2,7 m	3,0 m
45x295	54,5 kN	51,5 kN	48,2 kN

5.2.5 Massivtre

Det er lagt til grunn følgende forutsetninger:

- Elementet består av tre sjikt med tykkelser lik 33 mm i yttersjikt og 34 mm i innersjikt
- Yttersjiktene er orientert med fiberretning vertikalt
- Yttersjikt har fasthetsklasse tilsvarende C24
- Innersjikt har fasthetsklasse tilsvarende C14

Bare de to sjiktene som er orientert vertikalt i veggens høyderetning er tatt med i beregning av bøyestivhet og aksialstivhet.

Karakteristiske fastheter og midlere stivhetsmodul er gitt i Tabell 15.

Tabell 15. Karakteristiske fastheter.

Egenskap	Fasthetsverdier
f_{mk}	24,0
f_{t0k}	14,0
f_{t90k}	0,4
f_{c0k}	21,0
$E_{0,05k}$	7 400
$E_{0,5}$	11 000

Stivheter og treghetsradius er oppgitt i Tabell 16.

Tabell 16. Beregnede stivheter.

Profil	Bøyestivhet kNm ² /m	Aksialstivhet kN/m*10 ³	Treghetsradius mm/m
	EI	EA	i
1200x100	880	1 386	2 967

Massivtre 1000x100 mm basert på de foregående forutsetningene har dimensjonerende kapasitet ut i fra knekk lengde (vegghøyde) som vist i Tabell 17. Det er forutsatt en k_{mod} lik 0,9 og γ_m lik 1,25.

Tabell 17. Dimensjonerende trykkapasitet til massivtre, utsatt for en kombinasjon av vindlast og trykkbelastning.

	Knekk lengde		
Massivtre	2,4 m	2,7 m	3,0 m
1000x100	109,0 kN/m	108,9 kN/m	108,9 kN/m

5.3 Todelte ytterveggløsninger

5.3.1 Todelt yttervegg med utvendig bæring

Det forsettes at den utvendige stenderen bærer alle vertikale laster (snølast, etasjeskille og vegger fra ovenforliggende etasje) samt at den tar opp horisontal vindlast på veggen.

Det forutsettes at utvendige stendere av heltre består av fasthetsklasse C24 og har karakteristiske fastheter og midlere stivhetsmodul som angitt i Tabell 18.

Tabell 18. Karakteristiske fastheter.

Egenskap	Fasthetsverdier
f_{mk}	24,0
f_{t0k}	14,0
f_{t90k}	0,4
f_{c0k}	21,0
$E_{0,05k}$	7 400
$E_{0,5}$	11 000

Stivheter og treghetsradius er oppgitt i Tabell 19

Tabell 19. Beregnede stivheter.

Profil	Bøvestivhet kNm ²	Aksialstivhet kN*10 ³	Treghetsradius mm
	Elx	EA	ix
36x147	107	58,6	42,72

Heltre 36x147 mm basert på de foregående forutsetningene har dimensjonerende kapasitet ut i fra knekk lengde (vegg høyde) som vist i Tabell 20. Det er forutsatt en k_{mod} lik 0,9 og γ_m lik 1,25.

Tabell 20. Dimensjonerende trykkapasitet til todelte stender med utvendig bæring, utsatt for en kombinasjon av vindlast og trykkbelastning.

	Knekk lengde		
Heltre	2,4 m	2,7 m	3,0 m
36x147	38,0 kN	28,6 kN	20,2 kN

5.3.2 Todelt yttervegg med kombinert bæring

Ved kombinert bæring forutsettes det at den utvendige stenderen bærer tak, taklaster (snø) og utvendig vindlast.

Den innvendige stenderen bærer etasjeskille og evt. andre vegger fra en eller flere overliggende etasjer. Dvs. at den kun tar aksialkrefter og ikke blir momentbelastet, bortsett ifra eventuelle eksentrisiteter, noe det er sett bort i fra her.

Dimensjonerende kapasitet til den utvendige stenderen vil være lik den i kapittel 5.3.1, hvor den todelte ytterveggen har all bæring i yttervegg. Eneste forskjell vil være at ved en kombinert bæring vil den utvendige stenderen bli mindre belastet.

Ved å forutsette fasthetsklasse C24 til den innvendige stenderen, og med den samme materialfasthet som angitt over, vil den innvendige heltrestenderen ha en dimensjonerende kapasitet ut i fra knekk lengde (vegg høyde) som angitt i Tabell 21. Det er også her forutsatt k_{mod} lik 0,7 og γ_m lik 1,25.

Tabell 21. Dimensjonerende trykkapasitet til todelt stender med kombinert bæring, der den indre stender er utsatt for trykkbelastning. Den indre stenderen har dimensjonerende kapasitet som oppgitt i tabellen.

	Knekk lengde		
Heltre	2,4 m	2,7 m	3,0 m
36x98	16,9 kN	13,8 kN	11,4 kN

5.3.3 Todelt yttervegg med innvendig bæring

Ved todelt yttervegg med innvendig bæring er det forutsatt at de innvendige stenderne bærer både tak, taklaster (snølast) og last fra etasjeskiller.

Den utvendige stenderen bærer kun utvendig horisontal vindlast.

Det forutsettes at både de utvendige og innvendige stenderne er i fasthetsklasse C24.

Dimensjonerende kapasitet per stender for de innvendige stenderne er gitt i Tabell 22. Det er forutsatt k_{mod} lik 0,9 ved kombinasjon av lastvarigheter (snø, nyttelast, egenlast) og γ_m er satt lik 1,25.

Tabell 22. Dimensjonerende trykkapasitet til todelt stender med innvendig bæring, der den indre stender er utsatt for trykkbelastning. Den indre stenderen har dimensjonerende kapasitet som oppgitt i tabellen.

	Knekk lengde		
Heltre	2,4 m	2,7 m	3,0 m
36x98	21,7 kN	17,7 kN	14,6 kN

De utvendige stenderne får en belastning i % av dimensjonerende kapasitet (utnyttelse) som gitt i Tabell 23, når de er utsatt for en dimensjonerende vindlast lik $2,63 \text{ kN/m}^2$. Det er forutsatt k_{mod} lik 1,0 for vindlast på vegg og γ_m er satt lik 1,25.

Tabell 23. Utnyttelsesgrad i % av dimensjonerende kapasitet for vindlast.

	Knekk lengde		
Heltre	2,4 m	2,7 m	3,0 m
36x98	80 %	100 %	125 %

For vegghøyder større enn 2,7 meter, må altså dimensjonen på den utvendige stenderen økes. Hvis den dimensjonerende vindlasten er mindre enn forutsatt her, kan denne dimensjonen likevel benyttes. Største dimensjonerende vindlast ved 3,0 meter vegghøyde kan være $2,1 \text{ kN/m}^2$ for at dimensjon 36x98 mm kan benyttes.

6 Beregning av U-verdi til de ulike yttervegløsninger

6.1 Generelt

Beregning av U-verdi er gjort i henhold til NS-EN ISO 6946:2007 Bygningskomponenter og -elementer, varmemotstand og varmegjennomgang, beregningsmetode.

Termisk motstand til homogene sjikt kan beregnes som:

$$R = \frac{d}{\lambda}$$

der

d er tykkelsen til materialsjiktet

λ er dimensjonerende termisk konduktivitet til materialsjiktet

For noen materialer er termisk konduktivitet oppgitt direkte.

Materialer/materialsjikt som ligger på utsiden av godt ventilerte luftsjikt skal ikke tas med i beregning av varmemotstand.

Total termisk motstand til en sammensatt konstruksjon bestående av homogene sjikt kan uttrykkes som:

$$R_T = R_{si} + R_1 + R_2 + \dots R_n + R_{se}$$

der

R_{si} er den indre overgangsmotstanden

$R_1, R_2, \dots R_n$ er dimensjonerende termisk motstand til hvert sjikt

R_{se} er den utvendige overgangsmotstanden

Overflatemotstand, dvs. overgangsmotstand mellom materiale og luft i henhold til NS-EN ISO 6946, er vist i Tabell 24.

Tabell 24. Overgangsmotstander etter NS-EN ISO 6946.

Overflate motstand m ² K/W	Retning på varmestrøm		
	Oppover	Horisontalt	Nedover
R_{si}	0,10	0,13	0,17
R_{se}	0,04	0,04	0,04

I og med at vi ser på varmestrømmen horisontalt gjennom veggkonstruksjonen, er det overgangsmotstand horisontalt som er relevant for de videre beregninger.

For godt ventilerte luftsjikt som oppfyller:

- 1 500 mm² per meter lengde (horisontalt) for vertikale luftsjikt
- 1 500 mm² per m² overflate areal for horisontale luftsjikt

benyttes utvendig varmeovergangsmotstand lik $R_{se} = R_{si} = 0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$.

Det forsettes at ytterveggkonstruksjonene beskrevet her har større luftsjikt enn det forutsetningen over krever.

For en ytterveggkonstruksjon i tre, som består av både homogene sjikt og uhomogene sjikt, beregnes den totale varmemotstanden som aritmetrisk gjennomsnitt av øvre og nedre grenseverdi. Den er gitt som:

$$R_T = \frac{R'_T + R''_T}{2}$$

der

R'_T er øvre grenseverdi til den totale varmemotstanden

R''_T er nedre grenseverdi til den totale varmemotstanden

Øvre grenseverdi beregnes som:

$$\frac{1}{R'_T} = \frac{f_a}{R_{Ta}} + \frac{f_b}{R_{Tb}} + \dots + \frac{f_q}{R_{Tq}}$$

der

$R_{Ta}, R_{Tb}, \dots, R_{Tq}$ er total varmemotstand fra enkeltseksjoner i veggoppbyggingen

$f_a, f_b, \dots, f_q$ er delarealer til hver seksjon i vegg

6.2 Forutsetninger

Det er forutsatt at hver av de beregnede løsningene er bygd opp iht. tegningsunderlag som angitt i kapittel 4.

Varmekonduktivitet og varmemotstand til de ulike delkomponenter i vegg-løsninger som vist i Tabell 25 er benyttet i beregningene.

Tabell 25. Varmekonduktivitet og varmemotstand som er benyttet i beregningene.

Material	Varmekonduktivitet, λ W/(mK)	Varmemotstand, R m ² K/W
Trevirke	0,12	
Isolasjon	0,037	
Polyuretan	0,030	
Asfalt vindtett		0,24
Trepanel	0,12	
Dampsperre		0,03

6.3 Gjennomgående yttervegg-løsninger

6.3.1 I-profil

Det er forutsatt følgende oppbygging fra varm side og ut (i henhold til tegningsunderlag i kapittel 4):

- 14 mm trepanel
- Dampsperre
- I-profil 45x400 mm med isolasjon mellom
- Vindtett plate 12 mm
- Luftet kledning

Det er forutsatt varmekonduktivitet lik 0,12 W/(mK) for treet og 0,037 W/(mK) for isolasjonen.

Dette gir en total varmemotstand for løsningen lik $R = 10,43 \text{ m}^2\text{K/W}$, som gir en U-verdi lik $0,10 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Denne U-verdien er uten evt. tillegg for festemidler. Denne kan normalt settes lik $0,008 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ etter NS-EN ISO 6946. Dette medfører at total U-verdi blir lik $U + \Delta U_f = 0,10 + 0,008 = 0,11 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

6.3.2 Sammenlimte lameller

Det er forutsatt følgende oppbygging fra varm side og ut (i henhold til tegningsunderlag i kapittel 4):

- 14 mm trepanel
- Dampsperre
- Stender 36x300 mm med isolasjon mellom
- Vindtett plate 12 mm
- Luftet kledning

Det er forutsatt varmekonduktivitet lik $0,12 \text{ W/(mK)}$ for treet og $0,037 \text{ W/(mK)}$ for isolasjonen.

Dette gir en total varmemotstand for løsningen lik $R = 7,75 \text{ m}^2\text{K/W}$, som gir en U-verdi lik $0,14 \text{ W/(m}^2\text{K)}$. Denne U-verdien er uten evt. tillegg for festemidler. Denne kan normalt settes lik $0,008 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ etter NS-EN ISO 6946. Dette medfører at total U-verdi blir lik $U + \Delta U_f = 0,14 + 0,008 = 0,15 \text{ W/(m}^2\text{K)}$.

6.3.3 Isolert stender

Det er forutsatt følgende oppbygging fra varm side og ut (i henhold til tegningsunderlag i kapittel 4):

- 14 mm trepanel
- Dampsperre
- Stender 47x300 mm med isolasjon mellom
- Vindtett plate 12 mm
- Luftet kledning

Det er forutsatt varmekonduktivitet lik $0,12 \text{ W/(mK)}$ for treet og $0,037 \text{ W/(mK)}$ for isolasjonen. Det er forutsatt at den isolerte delen av stenderen er av polyuretan med varmekonduktivitet lik $0,030 \text{ W/(mK)}$.

Dette gir en total varmemotstand for løsningen lik $R = 8,03 \text{ m}^2\text{K/W}$, som gir en U-verdi lik $0,13 \text{ W/(m}^2\text{K)}$. Denne U-verdien er uten evt. tillegg for festemidler. Denne kan normalt settes lik $0,008 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ etter NS-EN ISO 6946. Dette medfører at total U-verdi blir lik $U + \Delta U_f = 0,13 + 0,008 = 0,14 \text{ W/(m}^2\text{K)}$.

6.3.4 Todelt stender sammensatt med spikerplater

Det er forutsatt følgende oppbygging fra varm side og ut (i henhold til tegningsunderlag i kapittel 4):

- 14 mm trepanel
- Dampsperre
- Stender 47x295 mm med isolasjon mellom
- Vindtett plate 12 mm
- Luftet kledning

Det er forutsatt varmekonduktivitet lik $0,12 \text{ W}/(\text{mK})$ for tredelen og $0,037 \text{ W}/(\text{mK})$ for isolasjonen.

For denne løsningen er det benyttet følgende varmemotstand for stenderen ved beregning av øvre og nedre grenseverdi:

- $R_{\text{stender}} = 4,775 \text{ W}/(\text{mK})$
- $R_{\text{stender}} = 6,831 \text{ W}/(\text{mK})$

Dette gir en total varmemotstand for løsningen lik $R = 8,06 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$, som gir en U-verdi lik $0,13 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Denne U-verdien er uten evt. tillegg.

For denne typen stender kan det benyttes følgende korreksjoner for U-verdien.

- Korreksjon for luftspalter, $\Delta U_g = 0,02 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

6.3.5 Massivtre

Det er forutsatt følgende oppbygging fra varm side og ut (i henhold til tegningsunderlag i kapittel 4):

- 100 mm massivtreelement
- 250 mm trykkfast isolasjon
- Luftet kledning

Det er forutsatt varmekonduktivitet lik $0,12 \text{ W}/(\text{mK})$ for massivtreelementet og $0,037 \text{ W}/(\text{mK})$ for den trykkfaste isolasjonen.

Dette gir en total varmemotstand for løsningen lik $R = 6,53 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$, som gir en U-verdi lik $0,153 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. I henhold til NS-EN ISO 6946 skal det legges til ΔU_f for festemidler. Dette medfører at total U-verdi blir lik $U + \Delta U_f$. Det legges til $0,008 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ for festemidler i denne løsningen.

Den totale U-verdien for løsningen blir da lik $0,16 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

6.4 Todelte ytterveggløsninger

6.4.1 Todelt yttervegg med utvendig bæring

Det er forutsatt følgende oppbygging fra varm side og ut (i henhold til tegningsunderlag i kapittel 4):

- 14 mm trepanel
- Stender 36x73 mm med isolasjon mellom
- Dampsperre
- Isolasjon 200 mm
- Stender 36x148 mm med isolasjon mellom
- Vindtett plate 12 mm
- Luftet kledning

Det er forutsatt varmekonduktivitet lik $0,12 \text{ W/(mK)}$ for treet og $0,037 \text{ W/(mK)}$ for isolasjonen.

Dette gir en total varmemotstand for løsningen lik $R = 11,23 \text{ m}^2\text{K/W}$, som gir en U-verdi lik $0,10 \text{ W/(m}^2\text{K)}$. Denne U-verdien er uten evt. tillegg for festemidler. Denne kan normalt settes lik $0,008 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ etter NS-EN ISO 6946. Dette medfører at total U-verdi blir lik $U + \Delta U_f = 0,10 + 0,008 = 0,11 \text{ W/(m}^2\text{K)}$.

6.4.2 Todelt yttervegg med kombinert bæring

Det er forutsatt følgende oppbygging fra varm side og ut (i henhold til tegningsunderlag i kapittel 4):

- 14 mm trepanel
- Stender 36x98 mm med isolasjon mellom
- Dampsperre
- Isolasjon 150 mm
- Stender 36x148 mm med isolasjon mellom
- Vindtett plate 12 mm
- Luftet kledning

Det er forutsatt varmekonduktivitet lik $0,12 \text{ W/(mK)}$ for treet og $0,037 \text{ W/(mK)}$ for isolasjonen.

Dette gir en total varmemotstand for løsningen lik $R = 10,47 \text{ m}^2\text{K/W}$, som gir en U-verdi lik $0,10 \text{ W/(m}^2\text{K)}$. Denne U-verdien er uten evt. tillegg for festemidler. Denne kan normalt settes lik $0,008 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ etter NS-EN ISO 6946. Dette medfører at total U-verdi blir lik $U + \Delta U_f = 0,10 + 0,008 = 0,11 \text{ W/(m}^2\text{K)}$.

6.4.3 Todelt yttervegg med innvendig bæring

Det er forutsatt følgende oppbygging fra varm side og ut (i henhold til tegningsunderlag i kapittel 4):

- 14 mm trepanel
- Stender 36x98 mm med isolasjon mellom
- Dampsperre
- Isolasjon 200 mm
- Stender 36x98 mm med isolasjon mellom
- Vindtett plate 12 mm
- Luftet kledning

Det er forutsatt varmekonduktivitet lik $0,12 \text{ W/(mK)}$ for treet og $0,037 \text{ W/(mK)}$ for isolasjonen.

Dette gir en total varmemotstand for løsningen lik $R = 10,67 \text{ m}^2\text{K/W}$, som gir en U-verdi lik $0,10 \text{ W/(m}^2\text{K)}$. Denne U-verdien er uten evt. tillegg for festemidler. Denne kan normalt settes lik $0,008 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ etter NS-EN ISO 6946. Dette medfører at total U-verdi blir lik $U + \Delta U_f = 0,10 + 0,008 = 0,11 \text{ W/(m}^2\text{K)}$.

6.4.4 Tabell over alle løsningene

I Tabell 26 er U-verdi for alle de ulike veggøsningene, både gjennomgående ytterveggøsninger og todelt ytterveggøsninger, samlet.

Tabell 26. Sammenstilling av alle veggøsningene med tykkelse på isolasjonssjikt og tilhørende U-verdi.

Veggøsning	Tykkelse veggøsning (isolasjonsfelt) mm	U-verdi $\text{W/(m}^2\text{K)}$
I-profil	400	0,10
Limtre	300	0,14
Isolert stender	300	0,13
Isolert stender med spikerplate	295	0,13
Massivtre	350	0,16
Todelt vegg (utvendig bæring)	421	0,10
Todelt vegg (kombinert bæring)	396	0,10
Todelt vegg (innvendig bæring)	396	0,10

7 Beregning av kuldebroverdi for de ulike yttervegløsninger

7.1 Generelt

Kuldebroverdier for alle detaljløsninger er beregnet i henhold til NS-EN ISO 10211:2007. Kuldebroverdier er basert og beregnet på detaljtegninger for de ulike stenderløsningene gitt i kapittel 4. Byggdetaljblad 471.016 (1999) og Prosjektrapport 25 fra SINTEF Byggforsk (2008) er benyttet som støttelitteratur for beregning av kuldebroverdier.

Det er fire ulike metoder å beregne kuldebroverdier på:

1. Grovestimering
2. Tabelloppslag
3. Manuell beregning
4. Numerisk beregning

Det er benyttet numerisk beregning vha. Therm 5.2 i den videre beregning under hvert enkelt delkapittel.

NS 3031 (Standard Norge, 2007) gir varmetapet for bygningsdeler som:

$$H_D = \sum_i U_i A_i + \sum_k \psi_k l_k$$

ψ_k er den lineære kuldebroverdien til bygningsdel k med lengde l_k . Lineære kuldebroer representeres ved den lineære varmegjennomgangskoeffisienten Ψ og måles i W/(mK). De angis med to desimaler. Kuldebroer mindre enn 0,01 W/(mK) inngår normalt sett ikke i energiregnskapet.

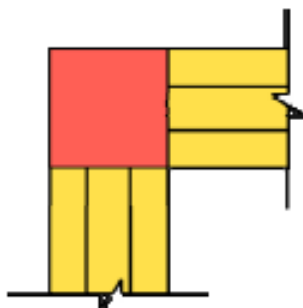
Kuldebroer generelt representerer det tilleggstapet pga. endringer i materiale og geometri som oppstår når varmetap gjennom konstruksjoner beregnes ved hjelp av U-verdier.

I tillegg til lineære kuldebroer, finnes det også repetitive kuldebroer og punkt-kuldebroer. Repetitive kuldebroer kan være for eksempel stendere i trevegger. Men disse regnes iht. metode i NS-EN ISO 6946 inn i U-verdier til bygningsdelene og er derfor ivaretatt ved den beregningsmessige treandelen i veggen.

Punktkuldebroer er ikke sett på videre i denne rapporten. Ett eksempel på punktkuldebro kan være føring av en søyle gjennom et gulv på grunn.

I detaljtegningene som er utarbeidet i dette prosjektet er det flere lineære kuldebroer.

For eksempel vil det i en hjørneløsning oppstå forskjell i innvendig og utvendig areal. I en hjørneløsning vil det oppstå økt varmetransmisjon både pga. økt treandel i hjørnet (ekstra stendere) og pga. forskjellen av innvendig og utvendig areal. Dette er vist i Figur 52.



Figur 52. Geometrisk kuldebro ved hjørne i yttervegg pga. forskjell i innvendig og utvendig areal.

I tillegg til kuldebroer i hjørnene, er aktuelle kuldebroer som her er beregnet og som vises på detaljtegningene:

- Overgang yttervegg mot etasjeskille
- Overgang yttervegg mot gulv på grunn
- Overgang yttervegg mot opplegg av etasjeskille på ringmur
- Overgang yttervegg tak

7.2 Forutsetninger og begrensinger for beregninger

I beregningen er beregningsprogrammet Therm 5.2 benyttet for simuleringer. Dette programmet er utarbeidet på University of California og ligger ute på nettet for gratis nedlastning.

Beregningene er gjennomført etter metode gitt i NS-EN ISO 10211 iht. NS-3031. Det er i beregningene brukt varmeovergangsmotstander i henhold til NS-EN ISO 6946. Det er benyttet en temperaturdifferanse på 20 °C mellom inne- og utetemperatur, men i praksis har dette ingen innvirkning på resultatene.

Det er benyttet varmeovergangsmotstander gitt i henhold til NS-EN ISO 6946. Disse er vist i Tabell 27.

Tabell 27. Overgangsmotstander i henhold til NS-EN ISO 6946.

	Oppover	Horisontalt	Nedover
Innvendig, R_{si}	0,10	0,13	0,17
Utvendig, R_{se}	0,04	0,04	0,04

Sjikt tynnere enn 1 mm er ikke tatt hensyn til i beregningene. Dette gjelder vind- og dampspærre. Det er forutsatt ventilerte hulrom (luftet kledning) og benyttet en utvendig overgangsmotstand lik $R_{se} = R_{si} = 0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$.

For de ulike materialer er det benyttet varmekonduktivitet som gitt i Tabell 28.

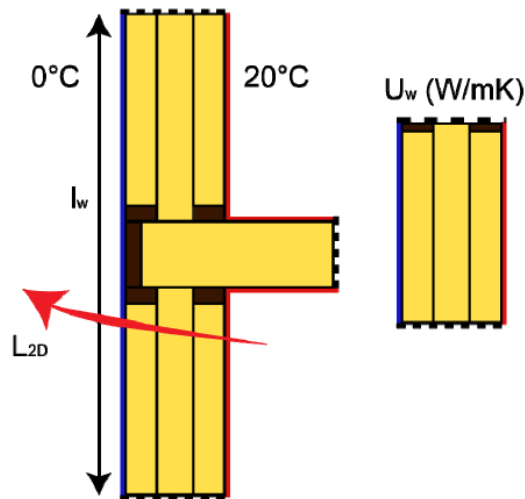
Tabell 28. Varmekonduktivitet for ulike materialer.

Materiale	γ W/(mK)	Referanse
Trevirke	0,12	ENTRÈ - Delrapport 1 (Clementz, 2009)
Mineralull (vegg)	0,037	Byggforskserien: Byggdetaljblad 573.344
Mineralull (tak)	0,034	Tabell 214a: Mineralull - fuktbeskyttet bygningsdel (SINTEF Byggforsk, 2004)
Innvendig kledning	0,2	
Betong	2,5	Byggforskserien: Byggdetaljblad 471.010, Tabell 22: Betong med høy densitet, armert
Markisolasjon, XPS	0,037	Byggforskserien: Byggdetaljblad 521.112
Gulvisolasjon, XPS	0,038	Tabell 214a: XPS - Horisontalt i grunnen, drenert (SINTEF Byggforsk, 2004)
Jord	2,0	NS-EN ISO 10211 (Standard Norge, 2007)
Fiberpuss	0,8	Byggforskserien: Byggdetaljblad 471.010, Tabell 22
Gulvbelegg, parkett	0,13	Byggforskserien: Byggdetaljblad 573.205
Parkettunderlag, polyetylen	0,036	Byggforskserien: Byggdetaljblad 571.803
Undergulv, sponplate	0,14	Byggforskserien: Byggdetaljblad 471.010
Vindspærre, asfalt vindtett	0,24	TG nr. 2002 (SINTEF Byggforsk Teknisk Godkjenning)
Kledning	0,12	ENTRÈ - Delrapport 1 (Clementz, 2009)
Jackon Thermomur	0,035	TG nr. 2156 (SINTEF Byggforsk Teknisk Godkjenning)

I simuleringene i Therm 5.2 lages det en todimensjonal modell av konstruksjonsdeler, inkl. kuldebroen som skal beregnes. Alle bygningsdelene som inngår defineres med dimensjon og varmekonduktivitet. Det defineres kald og varm side og grensebetingelser med varmeovergangsmotstand og adiabatisk grenser. Adiabatisk grenser er definert som en grense med null varmetransport.

7.3 Kuldebro overgang yttervegg etasjeskille

En modell for beregning av kuldebro for yttervegg mot etasjeskille er vist i Figur 53.



Figur 53. Modell av overgang etasjeskille og yttervegg. Kuldebrofritt referansetilfelle for modellen er vist til høyre.

L_{2D} er varmetransport per meter Kelvin gjennom hele den todimensjonale konstruksjonen.

U_w er U-verdien til veggen og l_w er referanselengde vist i Figur 53.

Beregning av den lineære kuldebroverdien ψ er gitt som:

$$\psi = L_{2D} - \sum_i U_w l_w$$

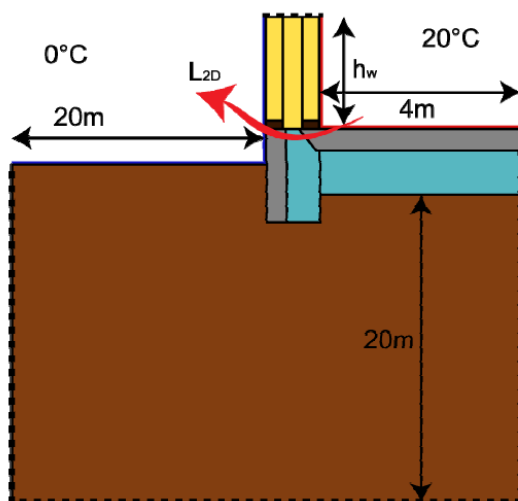
7.4 Kuldebro overgang yttervegg mot gulv på grunn

Modellering av overgang yttervegg mot gulv på grunn modelleres etter NS-EN ISO 10211. Varmekonduktiviteten til jord settes lik 2,0 W/(mK).

For et generelt tilfelle når husets dimensjoner ikke er kjent, regnes det med adiabatisk grenser i en avstand lik minst 2,5 ganger husbredden og 20 m fra yttervegg og gulvisolasjon. Det er tatt utgangspunkt i at halve husbredden er 4,0 m i beregningene. Vegg høyden h_w er satt til 1,2 m (når etasjehøyde er 2,4 m).

Kuldebroverdien finnes som:

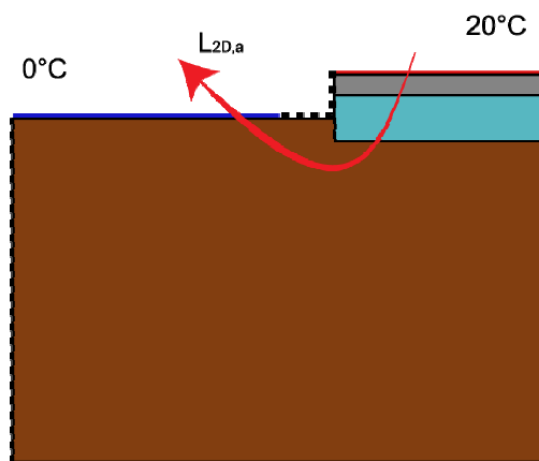
$$\psi = L_{2D} - U_w h_w - L_{2D,a}$$



Figur 54. Modell for beregning av kuldebroverdi ved overgang yttervegg mot gulv på grunn.

Varmestrømmen gjennom hele konstruksjonen, L_{2D} og $L_{2D,a}$, er todimensjonal varmestrøm gjennom kuldebrofri situasjon som vist i Figur 55. Disse to situasjonene beregnes som separate simuleringer.

Ved kuldebrofri situasjon benyttes metode B i NS-EN ISO 10211, og alt materiale under terrengnivå unntatt gulvisolasjon erstattes av jord. De adiabatiskene legges inn som vist med stiplede linjer i Figur 55.

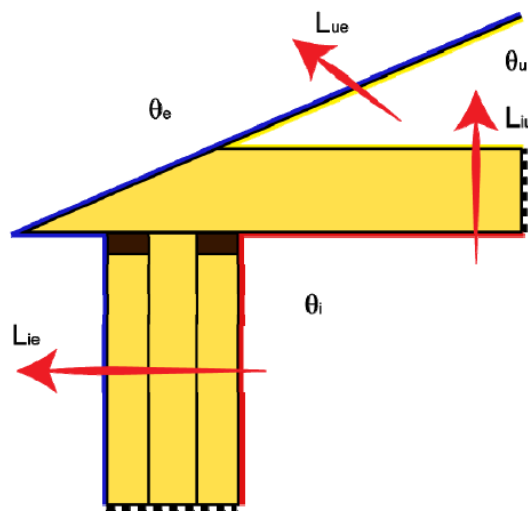


Figur 55. Modell av kuldebrofritt referansetilfelle for beregning av kuldebroverdi ved overgang yttervegg mot gulv på grunn.

7.5 Kuldebro overgang yttervegg tak

Når varmemstrømmen går gjennom et uoppvarmet rom, benyttes metode gitt i NS-EN ISO 10211. I tillegg til inne- og utetemperatur, må det tas hensyn til temperatur i det uoppvarmede rommet (for eksempel loft).

Modellen gitt i Figur 56 benyttes.



Figur 56. Modell for de ulike varmemstrømmer som benyttes for å beregne kuldebroverdi gjennom uoppvarmede rom. Her vist som kaldt uventilert tak.

For å finne L_{ie} , L_{iu} og L_{ue} benyttes NS-EN ISO 10211, Tabell C.5. Det settes på enhetstemperatur på hvert rom, hvor de andre settes lik null. Med tre rom innebærer dette tre separate simuleringer.

Dette gir følgende lineære ligningssystemer:

$$L_1 = L_{ie} + L_{iu}$$

$$L_2 = L_{ie} + L_{ue}$$

$$L_3 = L_{iu} + L_{ue}$$

Løst mht. de tre varmemstrømmen vist i Figur 56 gir dette:

$$L_1 = 0,5 \cdot (L_1 + L_2 - L_3)$$

$$L_2 = 0,5 \cdot (L_1 - L_2 + L_3)$$

$$L_3 = 0,5 \cdot (-L_1 + L_2 + L_3)$$

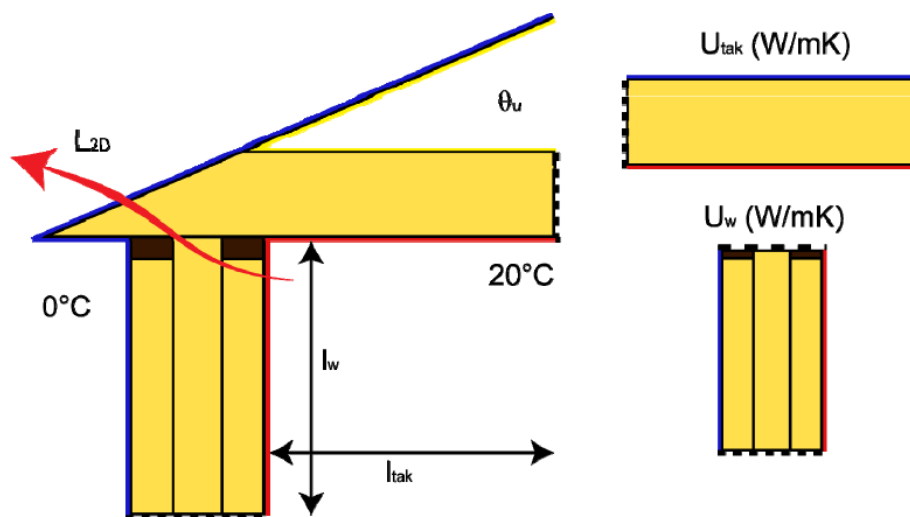
NS-EN ISO 13789 angir en metode for å finne varmemstrømmen per meter Kelvin:

$$L_{2D} = \frac{L_{iu} \cdot L_{ue}}{L_{iu} + L_{ue}} + L_{ie}$$

Kuldebroverdien beregnes da som:

$$\psi = L_{2D} - U_w h_w - U_{tak} l_{tak}$$

Der $U_w l_w$ er U-verdien til vegg multiplisert med l_w som angitt i Figur 57. U_{tak} finnes ved en separat simulering hvor adiabatisk grenser ved symmetri linjer. U_{tak} multipliseres med l_{tak} som angitt i Figur 57.



Figur 57. Modell for beregning av varmestrøm og kuldebrofritt referansesystem.

Det er ikke gjort nærmere beregning av kuldebroverdi for de ulike vegg-løsningene mot tak. Men på bakgrunn av tilsvarende løsninger som er beregnet, antas det at de fleste løsningene beskrevet i kapittel 4 har en kuldebroverdi ψ mellom 0,01 W/(mK) og 0,03 W/(mK).

7.6 Gjennomgående yttervegg-løsninger

7.6.1 Stendere av I-profil

Beregning av kuldebroverdier for yttervegg av I-profil.

Tabell 29. Kuldebroverdier for stendere av I-profil.

I-profil	L_{2D}	$U_1 \cdot L_1$	$U_2 \cdot L_2$	ψ
	W/(mK)	W/(mK)	W/(mK)	W/(mK)
Yttervegg mot etasjeskille	0,210	0,080*2,63	-	0,00
Yttervegg mot grunn	0,551	0,084*1,18	0,342	0,11

7.6.2 Stendere av sammenlimte lameller

Beregning av kuldebroverdier for yttervegg av sammenlimte lameller og bord. Det er tatt utgangspunkt i limtre med varmekonduktivitet lik 0,12 W/(mK) og isolasjon med varmekonduktivitet lik 0,037 W/(mK). Dimensjoner er i samsvar med detaljtegninger gitt i kapittel 4.

Tabell 30. Kuldebroverdier for stendere av sammenlimte lameller.

Sammenlimte lameller	L_{2D}	$U_1 \cdot L_1$	$U_2 \cdot L_2$	Ψ
	W/(mK)	W/(mK)	W/(mK)	W/(mK)
Yttervegg mot etasjeskille	0,333	0,125*2,63	-	0,00
Yttervegg mot grunn	0,550	0,271*1,18	0,340	0,11

7.6.3 Isolert stender

Beregning av kuldebroverdier for yttervegg av isolert stender.

Tabell 31. Kuldebroverdier for isolert stender.

Isolert stender	L_{2D}	$U_1 \cdot L_1$	$U_2 \cdot L_2$	Ψ
	W/(mK)	W/(mK)	W/(mK)	W/(mK)
Yttervegg mot etasjeskille	0,306	0,116*2,63	-	0,00
Yttervegg mot grunn	0,497	0,232*1,18	0,343	0,12

7.6.4 Isolert stender med spikerplate

Beregning av kuldebroverdier for yttervegg av isolert stender med spikerplate.

Tabell 32. Kuldebroverdier for isolert stender med spikerplate.

Isolert stender med spikerplate	L_{2D}	$U_1 \cdot L_1$	$U_2 \cdot L_2$	Ψ
	W/(mK)	W/(mK)	W/(mK)	W/(mK)
Yttervegg mot etasjeskille			-	0,00
Yttervegg mot grunn	0,560	0,286*1,18	0,343	0,12

7.6.5 Massivtre

Beregning av kuldebroverdier for yttervegg av massivtreelement.

Tabell 33. Kuldebroverdier for massivtreelement.

Massivtre	L_{2D}	$U_1 \cdot L_1$	$U_2 \cdot L_2$	Ψ
	W/(mK)	W/(mK)	W/(mK)	W/(mK)
Yttervegg mot etasjeskille	0,334	0,127*2,63	-	0,00
Yttervegg mot grunn	0,509	0,107*1,18	0,342	0,04

7.7 Todelte ytterveggløsninger

7.7.1 Todelt ytterveggløsning med utvendig bæring

Beregning av kuldebroverdier for todelte yttervegg med utvendig bæring.

Tabell 34. Kuldebroverdier for todelte ytterveggløsning med utvendig bæring.

Todelt ytterveggløsning med utvendig bæring	L_{2D}	$U_1 \cdot L_1$	$U_2 \cdot L_2$	Ψ
	W/(mK)	W/(mK)	W/(mK)	W/(mK)
Yttervegg mot etasjeskille	0,222	0,084*2,63	-	0,00
Yttervegg mot grunn	0,481	0,083*1,18	0,342	0,04

7.7.2 Todelt ytterveggløsning med kombinert bæring

Beregning av kuldebroverdier for todelte yttervegg med kombinert bæring.

Tabell 35. Kuldebroverdier for todelte ytterveggløsning med kombinert bæring.

Todelt ytterveggløsning med kombinert bæring	L_{2D}	$U_1 \cdot L_1$	$U_2 \cdot L_2$	Ψ
	W/(mK)	W/(mK)	W/(mK)	W/(mK)
Yttervegg mot etasjeskille	0,219	0,218*2,63	-	0,00
Yttervegg mot grunn	0,547	0,083*1,18	0,341	0,11

7.7.3 Todelt ytterveggløsning med innvendig bæring

Beregning av kuldebroverdier for todelte yttervegg med innvendig bæring.

Tabell 36. Kuldebroverdier for todelte ytterveggløsning med innvendig bæring.

Todelt ytterveggløsning med innvendig bæring	L_{2D}	$U_1 \cdot L_1$	$U_2 \cdot L_2$	Ψ
	W/(mK)	W/(mK)	W/(mK)	W/(mK)
Yttervegg mot etasjeskille	0,212	0,806*2,63	-	0,00
Yttervegg mot grunn	0,546	0,083*1,18	0,341	0,11

8 utfordringer med høyisolerte veggkonstruksjoner i tre

8.1 Generelt

Nytt regelverk fører til endringer i boligbyggingen i Norge. Passivhus vil fremover bli mer og mer vanlig. Kritikkk har blitt rettet mot denne utviklingen pga. frykt for helseskader disse tykkere og tettere veggene kan medføre, som for eksempel større risiko for oppblomstring av mugg. Det har også vært kritisert at det finnes for lite kunnskap om fuktforholdene i slike tykke veggøsninger.

Passivhusløsninger har forskjellige måter å redusere energibruken i en bolig, men alle vil i prinsippet innebære tykkere vegger med mer isolasjon.

En konstruksjons varmetap bestemmes hovedsaklig av konstruksjonens isolasjonsevne og temperaturforskjellen mellom inne og ute. Varmetap kvantifiseres til vanlig i bygningssammenheng ved å benytte begrepet varmegjennomgangskoeffesient, U-verdi (med enhet $W/(m^2K)$). Denne beskriver hvor stor varmestrøm som går gjennom en kvadratmeter stor flate avhengig av temperaturforskjellen.

I tillegg til numeriske beregninger blir ofte laboratorieeksperimenter benyttet for å finne varmetapet i forskjellige veggkonstruksjoner, men dette er ofte forholdsvis kostbart og krever riktig utstyr. Et enklere oppsett med temperaturloggere kan verifisere beregninger og laboratorieresultater til en langt lavere pris.

En sammenligning av varmetapet til forskjellige passivhusløsninger vil bidra til å finne optimal oppbygging av yttervegger mht. veggens varmeisolerende egenskaper.

8.2 Fuktforhold i trevirke

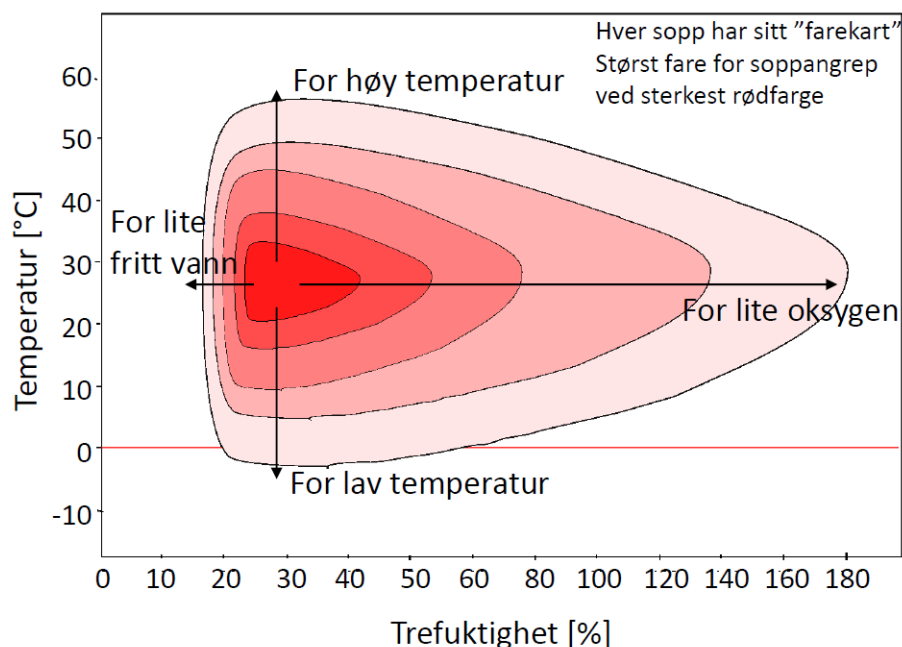
I trevirke vil det alltid være et visst vanninnhold, en såkalt trefuktighet. Fuktigheten i trevirke er definert som vekt vann i forhold til vekt tørt trevirke, gitt i prosent. Når stokken kommer inn på sagbruket er det ikke uvanlig at fuktigheten er opp mot 130 %, dvs. vekten av vannet er større enn vekten av den tørre tresubstansen. Under prosessen for å produsere trelast blir trevirket tørket for å redusere vekten og forbedre egenskaper, som for eksempel styrke, dimensjonsstabilitet og bestandighet mot soppangrep.

Trevirke innstiller seg på en bestemt fuktighet avhengig av den omgivende luftens relative fuktighet og temperatur. Denne fuktigheten blir kalt trevirkets likevektsfuktighet ved det bestemte klimaet.

Sopp bryter i skogen ned trevirket, slik at næringen kan tas opp i nye vekster. Men i konstruksjoner er sopp trevirkets verste fiende og kan føre til misfarging og nedbrytning av trevirket hvis forholdene ligger til rette for det. De sopper som

kan angripe trevirket kan klassifiseres i tre grupper: Muggsopper, blåvedsopper og råtesopper. Felles for alle sopper er at de krever visse betingelser for å kunne utvikle seg og vokse. Foruten at de må ha et vekstmedium å vokse på (i dette tilfelle trevirke), krever soppene at det er fritt vann tilstede, at temperaturen ligger innen et visst område og at det er luft (oksygen) til stede. Hver enkelt soppart har sine spesielle vekstområder med et bestemt optimum for de tre vekstbetingelsene.

Størst fare for soppangrep er det når temperaturen er omkring 30 °C og trefuktigheten er 30-40 %, se farekart i Figur 58. Da er det optimal temperatur, tilstrekkelig fritt vann til stede i cellehulrommene og rikelig med luft (oksygen). Da trevirke har et bruksområde som stort sett ligger mellom -10 °C til +25 °C vil det i praksis være minimal fare for soppangrep hvis man holder trevirket under 20 % fuktighet (Tronstad, 2003).



Figur 58. Typisk farekart for soppangrep i trevirke (Tronstad, 2003).

Tre til konstruksjonsformål blir produsert med en trefuktighet på 17-20 %. I bruk vil dette trevirket tørke ut, men hvor mye, og hvilke forskjeller i trefuktighet det vil være mellom ytre og indre deler av stenderne vet en lite om i så tykke vegger det er ønskelig å ha i passivhus.

Relativ fuktighet (RF) i uteluften varierer mye fra sted til sted og over døgnet. RF ute er høyest om vinteren og lavest om sommeren. Innvendig RF får et omvendt forløp sammenlignet med uteklimaet. Da uteluften i de lave temperaturer på vinterstid inneholder lite vanndamp, kan denne luften, når den blir oppvarmet til 20 °C, bli veldig tørr, med RF helt ned i 15 %. På sommerstid, når det er liten eller ingen oppvarming, vil RF i inneluften nærme seg uteluftens fuktighet, men vil ligge litt lavere, da gjennomsnittlig døgntemperatur inne ennå ligger høyere

enn uteluftens. Fuktigheten i trevirket vil tilpasse seg likevektsfuktigheten og variere i takt med den, men grunnet de sykliske svingninger over året, vil trefuktigheten ligge faseforskjøvet i forhold til likevektsfuktigheten. Når temperatur og RF er høy nok vil det være fare for muggvekst på tre selv med trefuktighet under 20 %. Over 5 °C og 85 % RF er tilstrekkelig for at det kan være fare muggvekst. I tillegg må det være et visst tidsperspektiv for å initiere muggvekst. Rask opptørking etter f.eks. en lekkasje gir liten fare for muggvekst. Måling av temperatur, RF og trefuktighet vil vise om klimaet er gunstig for soppvekst i lengre perioder.

8.3 Tetthet

I alle vegger og tak er det viktig med dampsperre mot innervegg. Hvis varm, fuktig inneluft kommer ut i veggkonstruksjonen vil den bli kjølt ned gjennom veggen, og ved kaldt uteklima vil fukten i denne luften før eller siden kondensere. Kondensasjon av fuktig luft innebærer at vanndampen i luften går over til væskeform. I tynne vegger hvor isolasjonsevnen er dårlig vil dette kondensasjonspunktet ofte ligge utenfor veggen. Med passivhusløsninger vil isolasjonsevnen til veggen være så god at dette kondensasjonspunktet vanligvis vil være inne i veggkonstruksjonen. Denne kondensasjonen kan føre til gunstige forhold for soppvekst. Dampsperre mot innervegg sikrer mot ugunstige forhold inne i veggen.

På samme måte er det et stort problem hvis luft innenfra lekker ut i takkonstruksjonen. Denne luften vil stige opp og kjøles ned mot kald side, hvilket igjen kan føre til kondensering av fukt og gunstige forhold for muggvekst.

8.4 Eventuell oppfukting i byggeperioden

Tradisjonell bygging av småhus er å sette opp bindingsverket, sette på vindspærren, isolere og sette på dampspærren. I byggeperioden er innvendige konstruksjoner meget utsatt frem til værhuden (vindsperre og tak) har kommet på. Til tider er det fare for at huset vil stå åpent mot vær og vind, som kan føre til oppfukting av byggematerialer.

En studie av effekten av lavere temperatur og økt RF i ytre del av stendervegger ble utført av Uvsløkk og Gustavsen (2006). De konkluderte med at økningen av isolasjonstykkelse fra 150 mm til 250 mm vil gi noe økt risiko for muggvekst bak vindspærren. Videre konkluderte de med at risikoen var størst rett etter byggeperioden. Dette skyldes i hovedsak økte mengder av tre (dvs. mer innebygd fuktighet). Etter tørkeperioden konkluderte de med at den økte risikoen for muggvekst, på grunn av kaldere ytre deler, var av liten betydning. Studien var basert på simulering av vanndampdiffusjon, men ble senere også gjennomført med simuleringer der luftlekkasjer fra inneluften var sammenfallende med vanndampdiffusjon (Uvsløkk, 2008). Simuleringer viste at den positive effekten av mindre luftlekkasje og bedre ventilasjon (på grunn av strengere krav i revidert

Teknisk Forskrift, TEK10) sannsynligvis var større enn den negative effekten av økt isolasjonstykkelse.

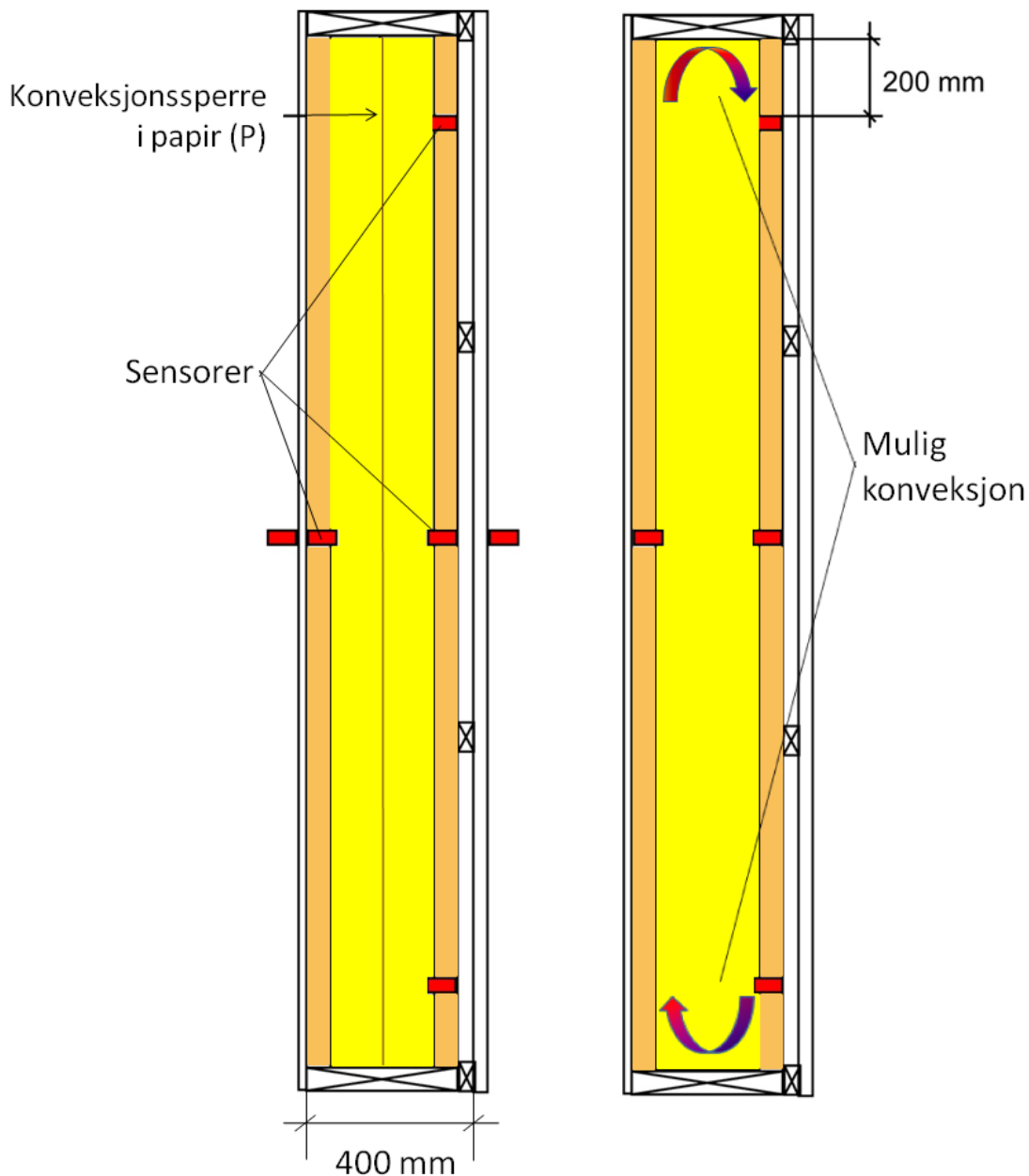
Geving og Holme (2010) har ved hjelp av både beregninger og laboratoriemålinger vist at det tar lenger tid å tørke ut høye nivåer av byggfukt (og eventuelle tilfeldige, mindre lekkasjer) når isolasjonstykkelsen øker. Det ble funnet opptil en fordobling av uttørkingstiden ned til fuktnivåer hvor det ikke lenger var risiko for muggvekst.

Ved å måle temperatur, RF og trefuktighet i en tidlig fase av byggeprosessen vil boligprodusenter og deres samarbeidspartnere ha en god dokumentasjon på om deres byggeprosess er tilfredsstillende når det gjelder skjerming av materialer mot fukt. Da er det også mulig å vurdere hvordan eventuell innebygget fukt påvirker fuktutviklingen i veggen over tid.

8.5 Konveksjon i høyisolerte konstruksjonsdeler

Konveksjon er strømninger som forårsaker energioverføring. I bygningskonstruksjoner er det luftsirkulasjon som gir konveksjon, enten forårsaket av oppdrift (fri) eller av vind (tvungen). I porøse materialer inne i veggkonstruksjonen kan det oppstå fri konveksjon når luften blir oppvarmet mot innervegg og stiger, for siden å bli avkjølt mot yttervegg og synke, se Figur 59. Økt isolasjonstykkelse gir mulighet for økt konveksjon i isolasjonssjiktet og mulig større grad av intern fuktomfordeling i en vegg eller et tak. For en vegg vil det si at øvre og ytre del av bindingsverksveggen blir fuktigere (mens nedre og ytre del blir tørrere), spesielt i uttørkingsfasen. I tillegg til fuktomfordelingen øker varmetapet (Uvsløkk, 1996). Det kan være større konveksjon i tykkere vegger, slik som i passivhus. Forskjellige vegg-løsninger og -tykkelser kan gi forskjellig grad av konveksjon.

Økt isolasjonstykkelse gir økt intern luftsirkulasjon i isolasjonssjiktet og større grad av intern fuktomfordeling i en vegg eller et tak. For en vegg vil det si at øvre og ytre del av bindingsverksveggen blir fuktigere (mens nedre og ytre del blir tørrere), spesielt i uttørkingsfasen. I tillegg til fuktomfordelingen, øker varmetapet gjennom veggen (Geving & Holme, 2010). Denne konveksjonen kan reduseres ved å ha en konveksjonssperre midt i isolasjonstykkelsen. SINTEF Byggforsk (2008) anbefaler at det i vegger med tykkelse over 200 mm monteres en slik konveksjonssperre.



Figur 59. Plassering av sensorer i yttervegg samt antatt konveksjon og retning på denne i veggfakk uten konveksjonssperre.

8.6 Innetemperatur

Mange passivhus er bygget spesielt med tanke på å utnytte solenergien. Dette gjøres ved å plassere størstedelen av vindusarealet mot sør. Dette vil i perioder kunne gi en utfordring med for høy innetemperatur. På konferansen *Passivhus Norden* som ble arrangert i Aalborg, Danmark i oktober 2010 ble det uttrykt bekymring for akkurat dette. Solskjerming og god kontroll på ventilasjonssystemet vil her være avgjørende. Norges Astma og Allergiforbund anbefaler en innetemperatur på 20-22 °C i fyringssesongen (naaf.no, 2010). På soverom kan den være lavere.

9 Temperatur- og fuktlogging i et passivhus

9.1 Generelt

I ENTRÉ-prosjektet ble det montert måleutstyr inne i veggkonstruksjoner tidlig i byggefasen av et passivhus. I dette kapittelet vises analyser av passivhusvegger med I-profilstendere, med og uten konveksjonssperre og med nord og sør orientering i byggeperiode og i bruksfase. Det aktuelle bygget er beskrevet mer i detalj i kapittel 11. Det er utarbeidet en artikkel som skal presenteres under den internasjonale konferansen *Passivhus Norden 2011*.

Huset ligger i Bodø (breddegrad 67,26 og lengdegrad 14,36). Byen har et moderat kystklima, med gjennomsnittstemperatur på 5,3 °C, 1140 mm nedbør i gjennomsnitt de 10 siste årene og en del vind, i gjennomsnitt fra 4,2 m/s til 8,8 m/s hver måned (eklima.no).

Loggere som måler temperatur, RF og trefuktighet ble plassert forskjellige steder i og utenfor veggkonstruksjonen. Loggerne ble montert i uke 50 i 2009. I midten av januar ble huset lukket og varmen satt på. I mai 2010 flyttet beboerne inn. Det kom lite utilsiktet fukt inn i bygget i byggeprosessen.

Loggerresultatene presentert i denne rapporten er for en periode på i underkant av ett år etter montering. Det er imidlertid bestemt at sensorene fortsatt skal foreta loggninger i ytterligere år fremover, slik at resultater foretatt over en lengre tidsperiode kan presenteres ved en senere anledning

Tabell 37. Tegnforklaring av forkortelser som benyttes.

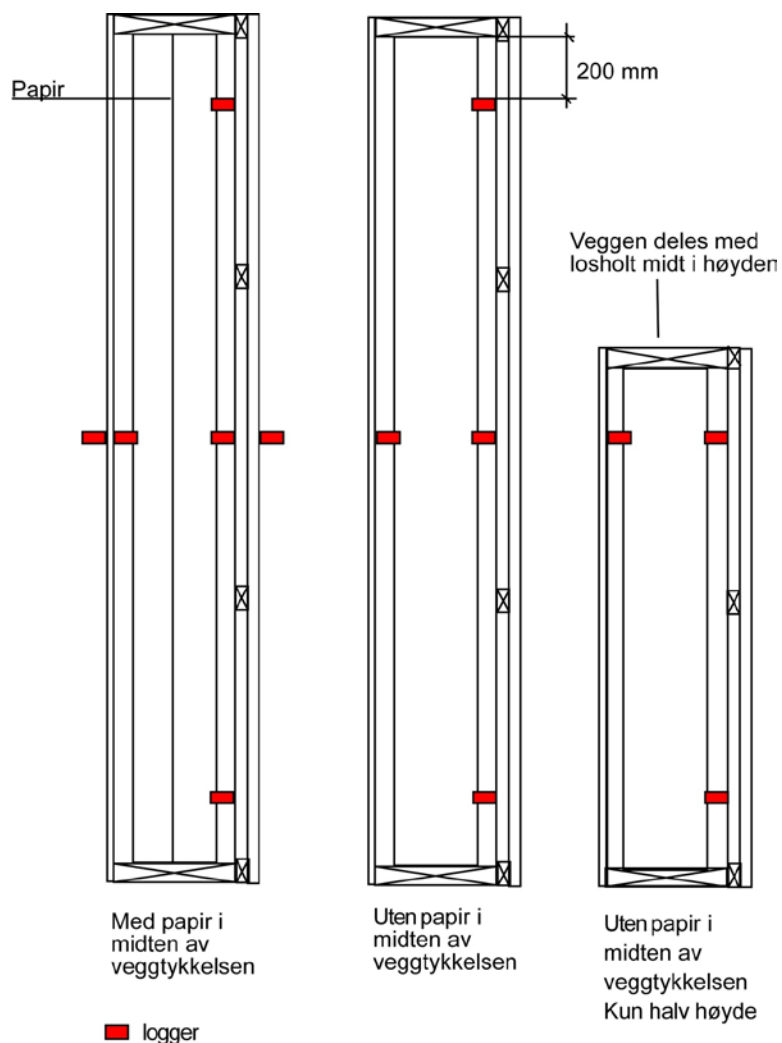
Tegn	Forklaring
T	Temperatur [°C]
RF	Relativ luftfuktighet [%]
MC	Trefuktighet [%]
P	Papir som konveksjonssperre

9.2 Metode og materiale

9.2.1 Måling av temperatur, RF og trefuktighet

Loggerne i veggene ble montert i treverket i stenderen rett utenfor dampspærren midt i etasjehøyden, rett innenfor vindspærren midt i etasjehøyden og 200 mm henholdsvis over og under bunnsvill og taksvill. Loggere ble også plassert utenfor dørs bak kledningen, mellom vindspærre og kledning. Mot slutten av perioden ble det også lagt en temperatur- og RF-måler inne i huset.

For å studere problematikken rundt konveksjon i isolasjonssjiktet ble det konstruert tre typer veggfakkløsninger; en med konveksjonssperre midt i veggtykkelsen, en med losholt midt i etasjehøyden og en “vanlig” vegg, se Figur 60.



Figur 60. Vertikalsnitt over de tre veggtypene med plassering av loggere.



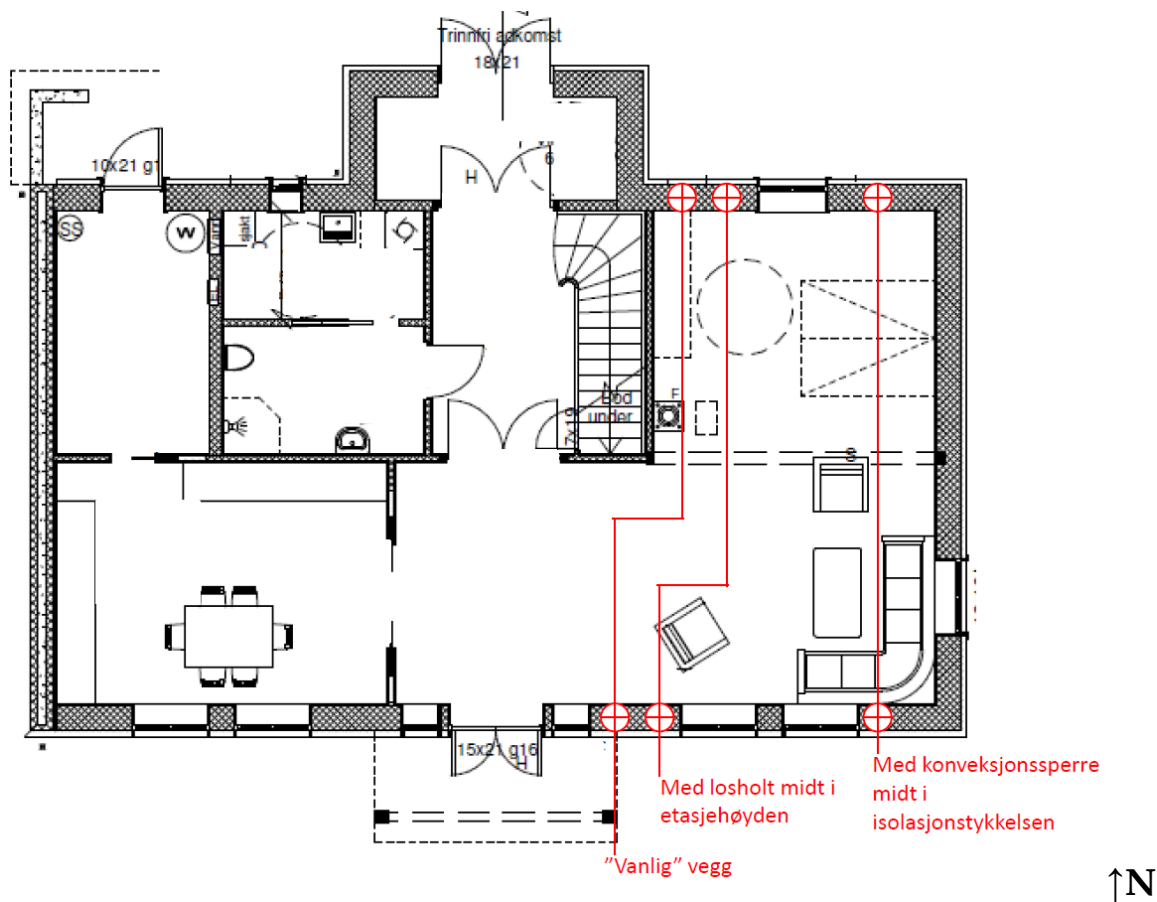
Figur 61. Loggere montert inne i veggen.



Figur 62. Eksempel på en logger brukt i studien.

Figur 61 viser et veggfakk med oppmonterte loggere som er festet i I-profilens flenser mot varm og kald side av konstruksjonen. Loggerne, som er av typen HygroTrac (www.gehygrotrac.com), er vist på Figur 62, og monteres med to skruer inn i trevirket. Disse skruene fungerer også som elektroder til trefuktighetsmålingene. Temperatur og RF måles i et hull på undersiden av måleren. Det logges hver time og loggingen leses av via internett.

De forskjellige fakk-løsningene ble plassert på samme vegg i nordlig og sørlig retning, se Figur 63.



Figur 63. Plantegning med plassering av de utvalgte fakkene med konveksjonssperre midt i isolasjonstykkelsen, med losholt midt i etasjehøyden og "vanlig" vegg.

Temperaturen måles med en termistor. RF måles med en kapasitiv føler. Trefuktigheten måles ved elektrisk motstandsmåling. Trefuktigheten er angitt etter kalibreringstabell for furu basert på Protimeter sine data (GE Protimeter, 2006).

Målingene ble korrigert etter formelen:

$$\begin{aligned} \%MC_{gran} = & -0,504256 + (1,1386808 \times \%MC_{furu}) \\ & + (0,0111586 \times (\%MC_{furu} - 16,5)^2) \\ & - (0,0010783 \times (\%MC_{furu} - 16,5)^3) \end{aligned}$$

9.2.2 Prøvetaking av biologisk vekst

For å kontrollere forekomsten av mugg og sopp inne i veggen ble luftprøver, i tillegg til teipprøver av overflaten til stenderen, tatt fra inne i et isolert hulrom i ytterveggkonstruksjonen. Prøvene ble tatt nederst i veggen på nordsiden, ca. ett år etter lukking av bygningen.

Luftprøven ble tatt ved at et kledningsbord ble fjernet og det ble tatt et hull i vindsperren. Gjennom hullet ble det sugd ut $\times 1$ luft med en hastighet på $\times 1$ /min. Denne luften ble trukket gjennom et filter. Dette filtret ble analysert for å vise evt. forekomst av mugg eller sopp. For sammenligning ble luftprøver også tatt i ute-luft og i en innervegg.



Figur 64. Oppsett for luftmåling av biologisk vekst.

I tillegg til luftmålinger ble det foretatt prøving av mugg- og soppvekst i overflaten på stenderen inne i veggen ved hjelp av teipprøver.

Metodene er utviklet av Mycoteam AS, som også utførte analysene.

9.3 Resultater

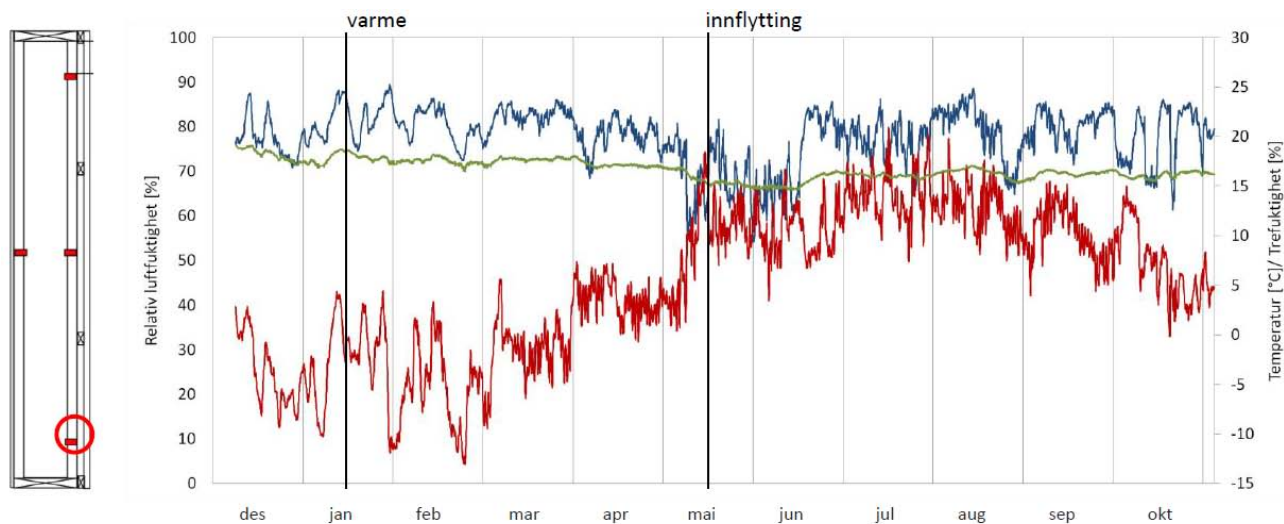
9.3.1 Generelle forløp i vegg

Ute bak kledning varierer temperaturen fra $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ til $30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Fra mars til oktober er det noe varmere på sørsiden enn nordsiden, og RF er noe lavere på sørsiden. Det bemerkes at nord/sør-forskjellen vil avhenge av fargen på kledningen. Dette huset har hvit kledning, noe som gir liten forskjell. Mørk kledning ville gitt større forskjell.

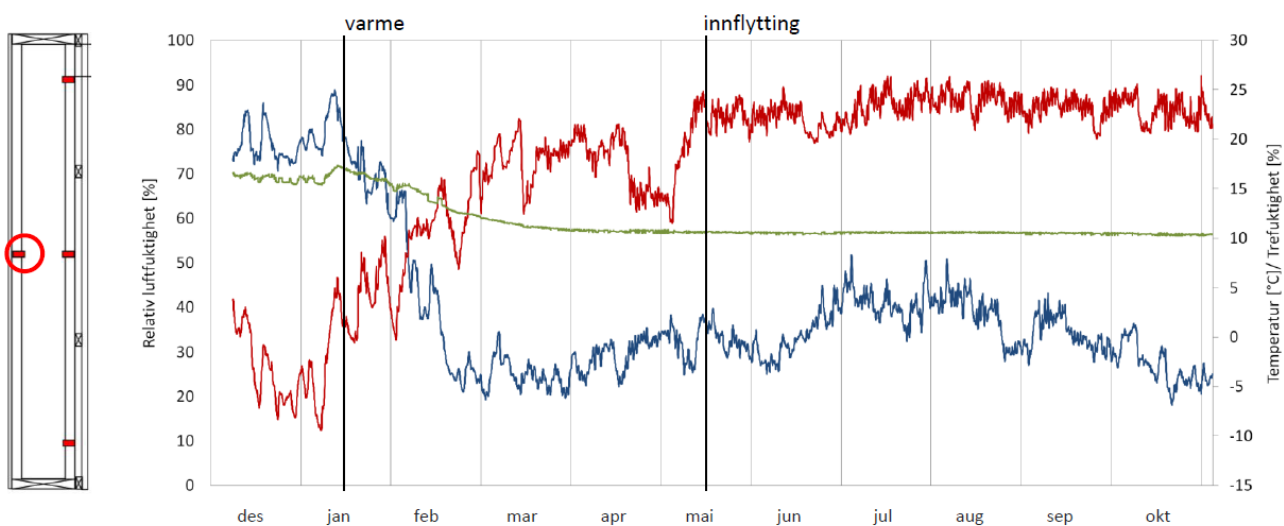
Trefuktigheten i starten av loggeperioden ligger mellom 15 % og 20 % for alle målepunktene. Figur 58 og 59 viser utviklingen av T, RF og MC på kald og varm side i måleperioden for et utvalgt veggfakk. Perioden før varmen settes på er ikke med i analysen.

På varm side er forløpet svært likt, uavhengig om det er på nord- eller sørside, med eller uten konveksjonssperre eller om det er halv etasjehøyde. Temperaturen varierer fra $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ til drøyt $25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Det er et tydelig skille da varmen ble slått på i januar 2010. Det forventes at temperaturen på varm side vil ligge mellom $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ og $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ så lenge det bor noen i huset. RF følger utviklingen i T til stor grad. MC på varm side tørker ned til ca. 10 % uavhengig av startfuktighet. Mye av uttørkingen skjer i februar og mars, noe som er naturlig siden varmen ble slått på i januar.

Når det gjelder loggerne som er plassert mot kald side i veggen, viser de at T varierer mellom ca. $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ og $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ på nordsiden og ca. $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ til $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ på sørsiden. RF følger stort sett temperaturutviklingen. MC på kald side synker sakte og ligger i slutten av perioden mellom 13 % og 17 %, generelt noe lavere på sørsiden enn nordsiden. Trenden viser altså et tørrere forhold ved orientering mot sør.



Figur 65. Utvikling i T (rød), RF (blå) og MC (grønn) for loggeren plassert i stenderen nærmest yttervegg, nederst i etasjehøyden på nordsiden og uten konveksjonssperre midt i isolasjonstykkelsen.



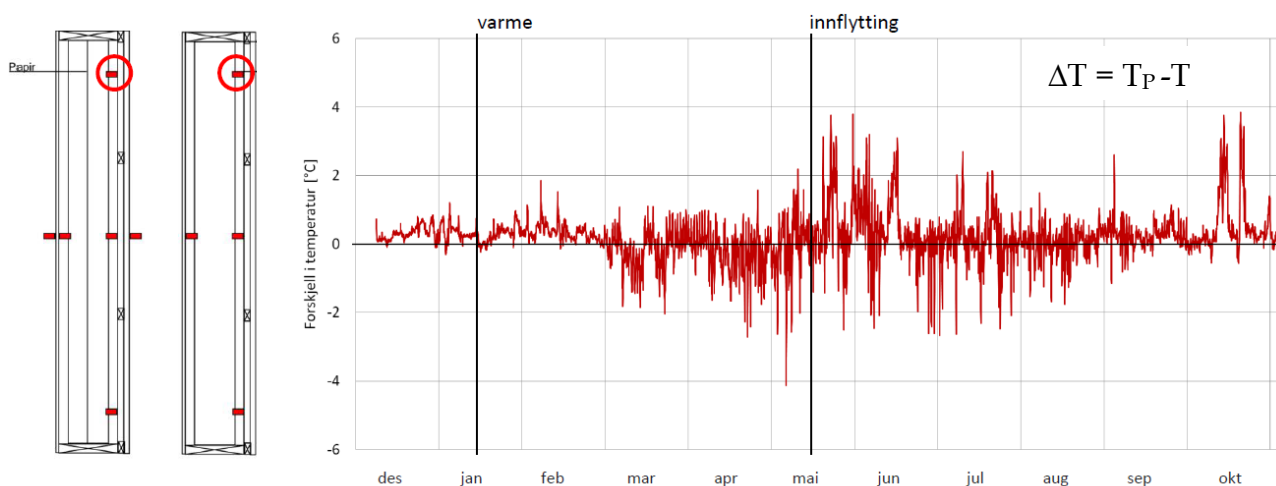
Figur 66. Utvikling i T (rød), RF (blå) og MC (grønn) for loggeren plassert i stenderen nærmest innervegg, midt i etasjehøyden på nordsiden og uten konveksjonssperre midt i isolasjonstykkelsen.

9.3.2 Betydning av konveksjonssperre

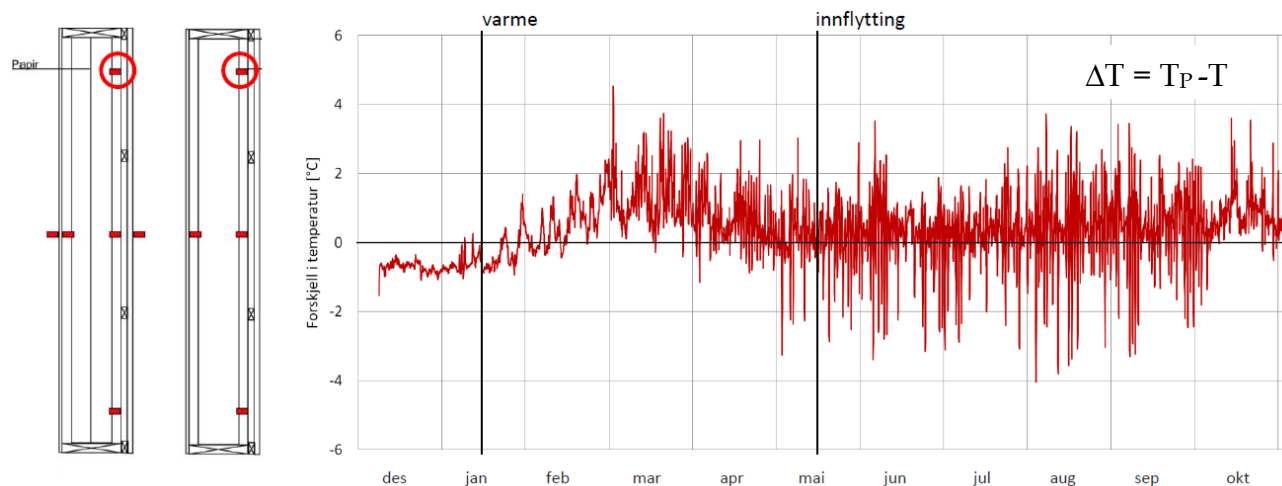
Det er ønskelig med høyest mulig temperaturfall igjennom isolasjonssjiktet. Geving og Uvsløkk (2006) hevder at øverst på kald side er verste punkt på veggen i forhold til konveksjon og mulig kondens.

Ved sammenligning av temperaturene på nordsiden øverst på kald side, viser målingene at det i mars til april ikke er noen klar forskjell, men i mai til oktober er det varmere uten konveksjonssperre. På sørsiden er det fra februar til oktober høyere temperatur uten konveksjonssperre.

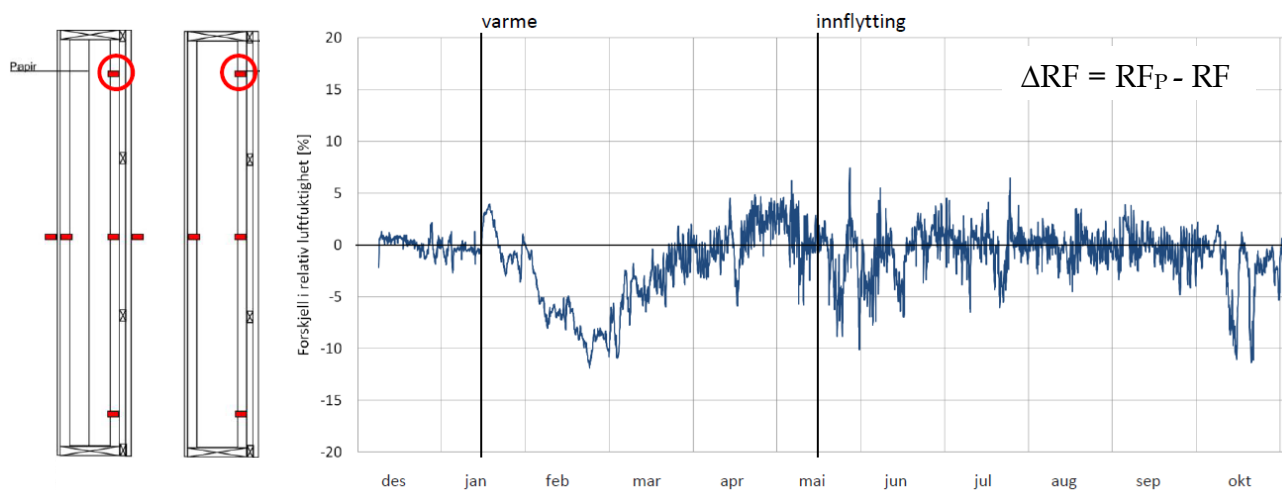
På nordsiden i februar til mars viser loggingene at RF er klart lavere uten konveksjonssperre, men dette kan være forårsaket av et avvik på grunn av byggeprosessen. På sørsiden er også RF stort sett lavere uten konveksjonssperre, men motsatt i RF i februar til april, noe som antakeligvis henger sammen med uttørking av veggen. I dette tilfellet har temperatur et korresponderende forløp hvor temperaturen uten konveksjonssperre er høyere enn med, dvs. motsatt av hva som ville være forventet.



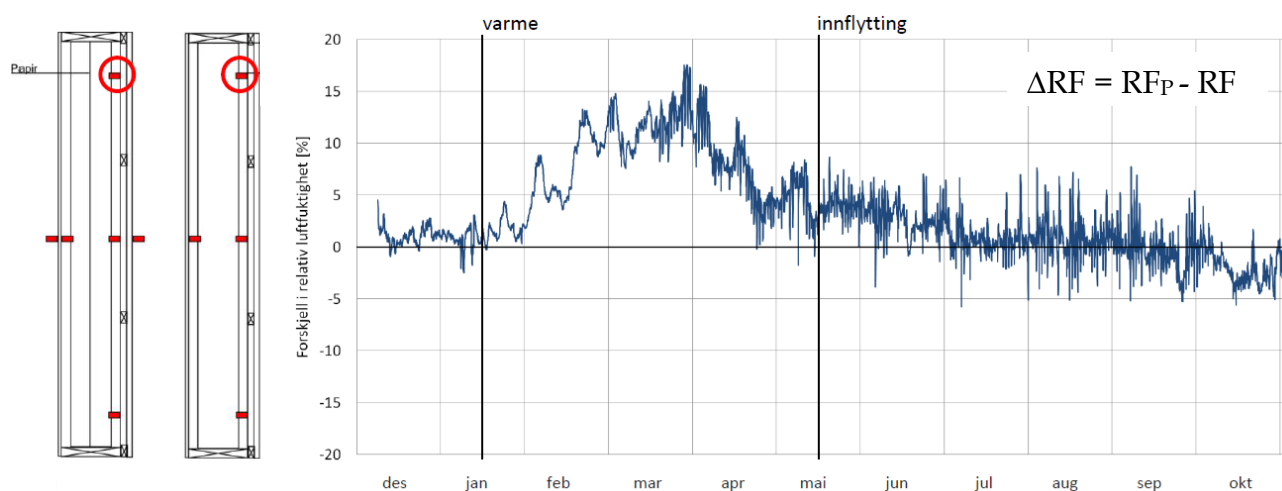
Figur 67. Differanse ΔT for loggerne plassert i stenderen nærmest yttervegg, øverst i etasjehøyden på **nordsiden**, med og uten konveksjonssperre.



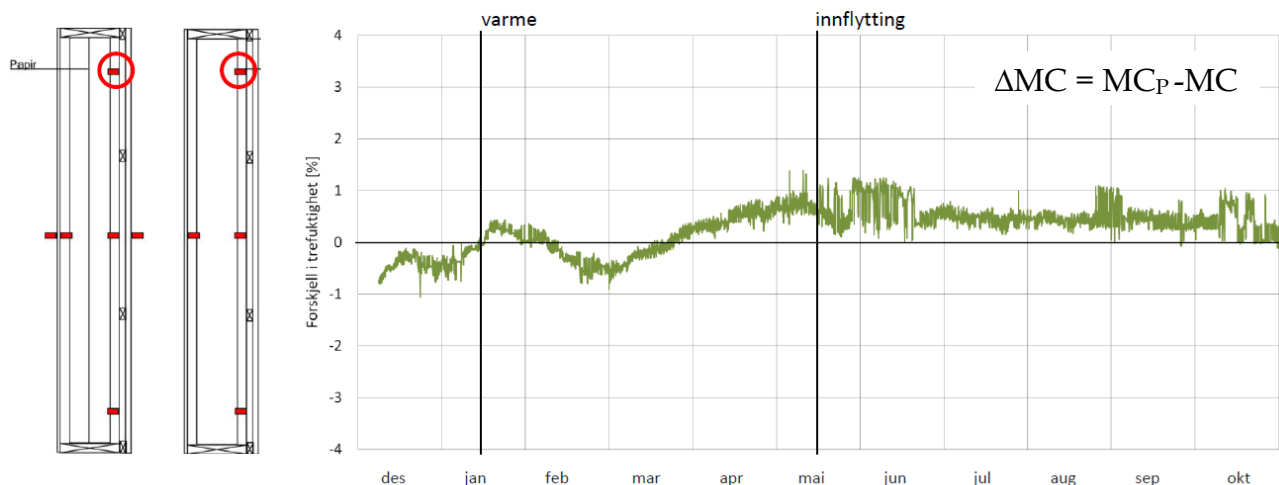
Figur 68. Differanse ΔT for loggerne plassert i stenderen nærmest yttervegg, øverst i etasjehøyden på **sørsiden**, med og uten konveksjonssperre.



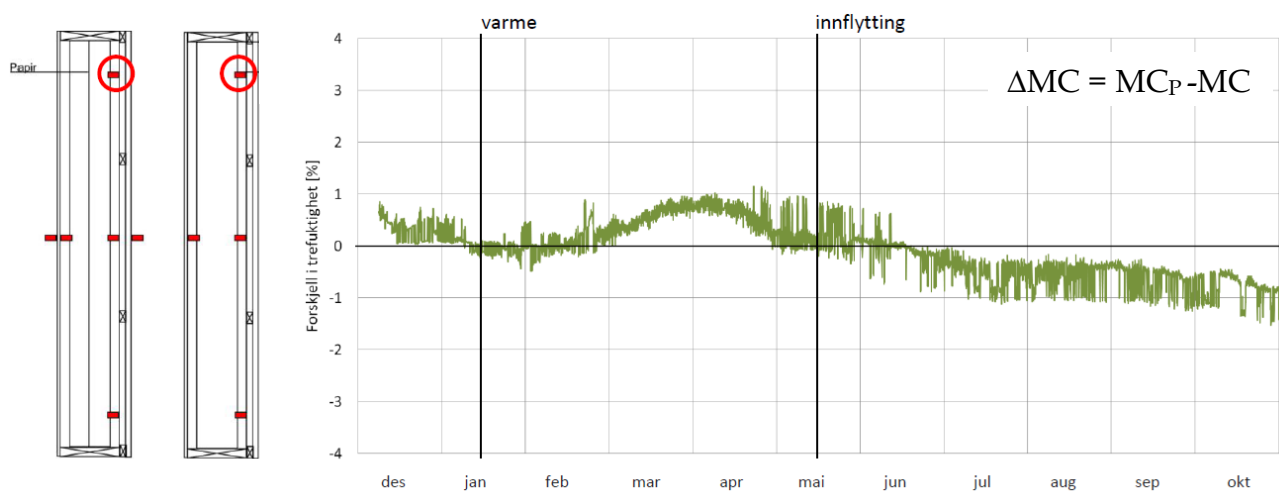
Figur 69. Differanse ΔRF for loggerne plassert i stenderen nærmest yttervegg, øverst i etasjehøyden på **nordsiden**, med og uten konveksjonssperre.



Figur 70. Differanse ΔRF for loggerne plassert i stenderen nærmest yttervegg, øverst i etasjehøyden på **sørsiden**, med og uten konveksjonssperre.



Figur 71. Differanse ΔMC for loggerne plassert i stenderen nærmest yttervegg, øverst i etasjehøyden på **nordsiden**, med og uten konveksjonssperre.

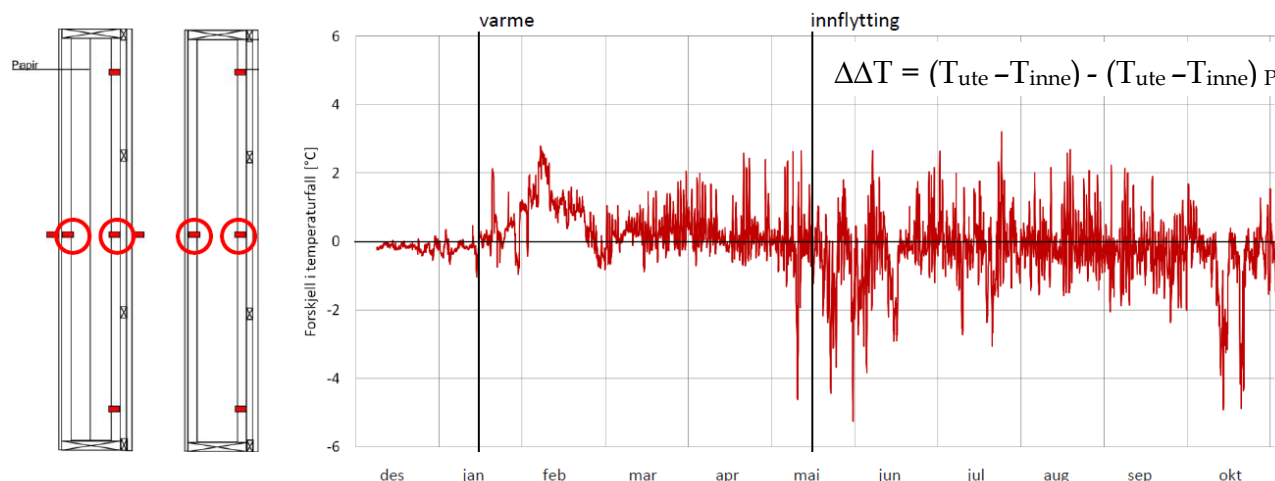


Figur 72. Differanse ΔMC for loggerne plassert i stenderen nærmest yttervegg, øverst i etasjehøyden på **sørsiden**, med og uten konveksjonssperre.

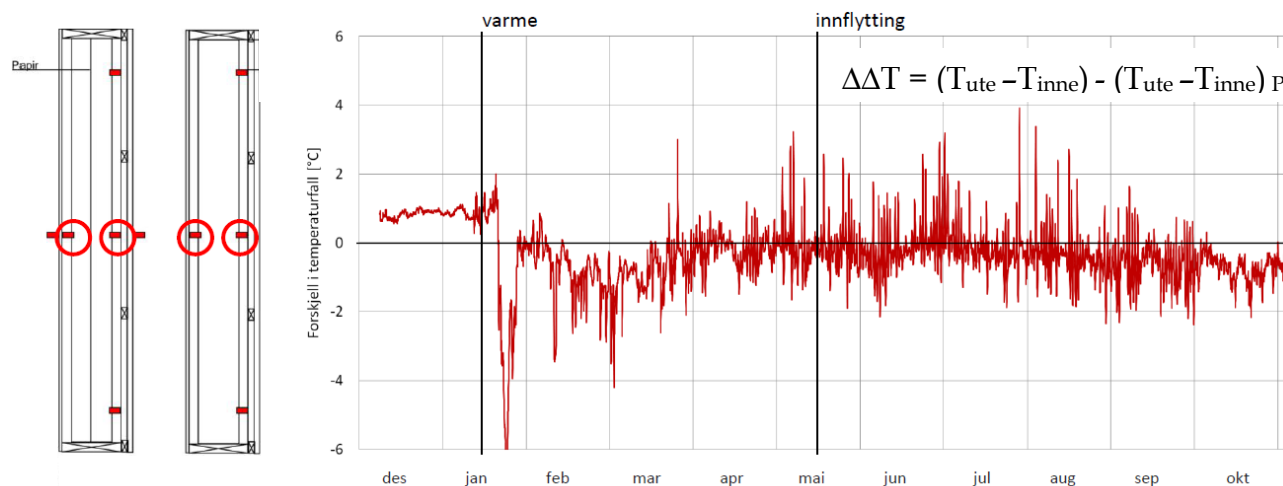
9.3.3 Sammenligning av temperaturfall gjennom isolasjonstykkelsen

Ved sammenligning av temperaturfall gjennom vegg med og uten konveksjonssperre, viser loggingene at i sør er temperaturfallet størst uten konveksjonssperre og omvendt i nord i byggeperioden.

I bruksfasen, fra mai, har begge veggene noe større temperaturfall i veggene med konveksjonssperre enn uten. I snitt er temperaturfallet 0,67 °C større på nordveggen og 0,14 °C større på sørveggen.



Figur 73. Forskjell i temperaturfall på **nordsiden** for vegg med og uten konveksjonssperre.



Figur 74. Forskjell i temperaturfall på **sørsiden** for vegg med og uten konveksjonssperre.

9.3.4 Prøvetaking av biologisk vekst

Analysene av luftprøver og teipprøver viste ingen eller liten mikrobiell vekst. Anbefalingen fra Mycoteam, var ingen videre tiltak.

9.4 Diskusjon

Mye av kritikken rettet mot passivhus gjelder fuktproblematikken som kan oppstå når veggene blir tykkere og tettere. Loggingene i denne studien viser at temperatur og RF under større del av byggeprosessen og brukstiden er under nivåer som forbindes med risiko for vekst av mugg og sopp. Analysene av luft og teipprøver bekrefter at det i denne veggkonstruksjonen ikke er biologisk vekst.

Tykkere vegger inneholder mer treverk og derfor også mer fukt. Denne fukten kan bli sperret inne når bygget blir lukket. Målingene av trefuktighet viser at trefuktigheten for nytt materiale ligger mellom 15 % og 20 %. Når varmen slås på i januar, er det tydelig hvordan treverk på varm side av veggen tørker ut. Uttørkingsfasen for disse delene av veggen varer i ca. to måneder. På kald side derimot er uttørkingen ikke like stor og like skarp. Graden av uttørking gjennom veggen er generelt stor nok til å unngå opphopning av fukt på kald side i uttørkingsfasen.

Geving & Holme (2010) konkluderer med at ved tykkere vegger vil konveksjon føre til at RF øker øverst mot kald side i veggen, spesielt under uttørkingsfasen. Loggingene i denne rapporten viser at mye av uttørkingen, spesielt i indre del av stenderen, skjer kort tid etter at varmen ble slått på. Det vil derfor være forventet at RF skal være høyere i veggfaket uten konveksjonssperre i denne perioden. Ved sammenligning av RF 200 mm under taksvill rett innenfor vindspærren, viser loggingene at RF er høyere uten konveksjonssperre enn på sørsiden, men på nordsiden er det motsatt; uten konveksjonssperre gir lavere RF enn med.

Den omfordelingen av luft som skjer ved konveksjon vil også føre til et større varmetap gjennom veggen i uttørkingsfasen (Geving & Holme, 2010). Ved sammenligning av temperaturfallet gjennom veggene med konveksjonssperre og de uten, viser loggingene at i februar til mars er temperaturfallet større med konveksjonssperre enn uten på sørsiden, men motsatt på nordsiden. Et større temperaturfall indikerer lavere varmetap gjennom veggen og lavere grad av konveksjon. Dvs. på sørsiden indikerer loggingene større konveksjon uten konveksjonssperre, mens det på nordsiden er mindre konveksjon uten konveksjonssperre.

9.5 Konklusjon

Logger av temperatur, RF og trefuktighet viser at veggene i et passivhus oppført i Bodø ikke er utsatt for temperatur- og fuktforhold som er gunstige for biologisk vekst. Da mye av fuktproblematikken er knyttet til byggefasen, er det ikke grunn til bekymring i fremtiden, såfremt veggkonstruksjonen forblir intakt.

Det er ut fra denne studien ikke mulig å trekke noen konklusjoner ang. plassering av konveksjonssperre midt i isolasjonstykkelsen. Loggingene gir indikasjoner på at det er større konveksjon i vegg uten konveksjonssperre, men kun på sørsiden av huset. På nordsiden tyder loggingene på at bildet er motsatt. Montering av en slik konveksjonssperre kan innebære økt tidsforbruk og økte materialekostnader, og det er ikke noe i denne rapporten som tyder på at disse kostnadene veies opp av at bygget i noen avgjørende grad blir mer fuktsikkert og isolerende.

Flere studier vil vise gyldigheten denne studien har for passivhus generelt. Det kan også være et trinn videre i utviklingen av passivhus at utformingene av vegger for eksempel tilpasses mer himmelretning eller terreng og beplantning.

10 WUFI-beregninger av forsøkshus i Bodø

10.1 Generelt

WUFI 5.1 Pro (WUFI, 2011) er et en-dimensjonalt beregningsprogram for koblet ikke-stasjonær varme- og fukttransport. Fukttransporten kan både være vann-dampdiffusjon og kapillær (flytende vann) i materialene. Det er ikke enkelt å inkludere luftlekkasjer i beregningen, men et luftskifte i for eksempel luftespalten bak kledningen er mulig å definere.

Testveggens oppbygning er beskrevet i kapittel 9.2. Det er gjort beregninger på veggen innenfor kledningen, sør- og nordvendt, se Figur 63. Tidsperioden studert er etter innflytting og etter temperatur- og RF-måling startet opp inne, 3 ½ måned. Denne perioden er lang nok til å få verifisert en beregningsmodell som kan benyttes til å beregne ytelse av tilsvarende veggkonstruksjon med annet inne- og uteklima. I dette prosjektet er det ikke gjort videre beregninger, bare diskutert hva slike beregninger kan bidra med.

I beregningen er det brukt standard materialparametere som finnes i materialdatabasen i WUFI. Disse er målt i ulike europeiske laboratorier, og verdiene fra materialer målt ved Norges teknisk-, naturvitenskapelige universitet (NTNU) er foretrukket i denne beregningen. Tabell 38 viser materialparametrene som er benyttet. Overgangsmotstanden er 0,125 m²K/W mot innvendig overflate og det samme på overflaten mot vindsperren i luftespalten. Malingslaget innvendig har fått tilordnet en S_d-verdi på 3 m. S_d-verdi er diffusjonsekvivalent luftlagstykkelse, som er tykkelsen av et luftlag med samme vandampsmotstand som det aktuelle materialsjiktet. Med dampsperre (PE-folie) og med den korte perioden dette gjelder, er det viktigst å se at omfordelingen av fukten, samt mulig uttørking utover i konstruksjonen, stemmer med målinger. Veggens U-verdi er 0,091 W/m²K.

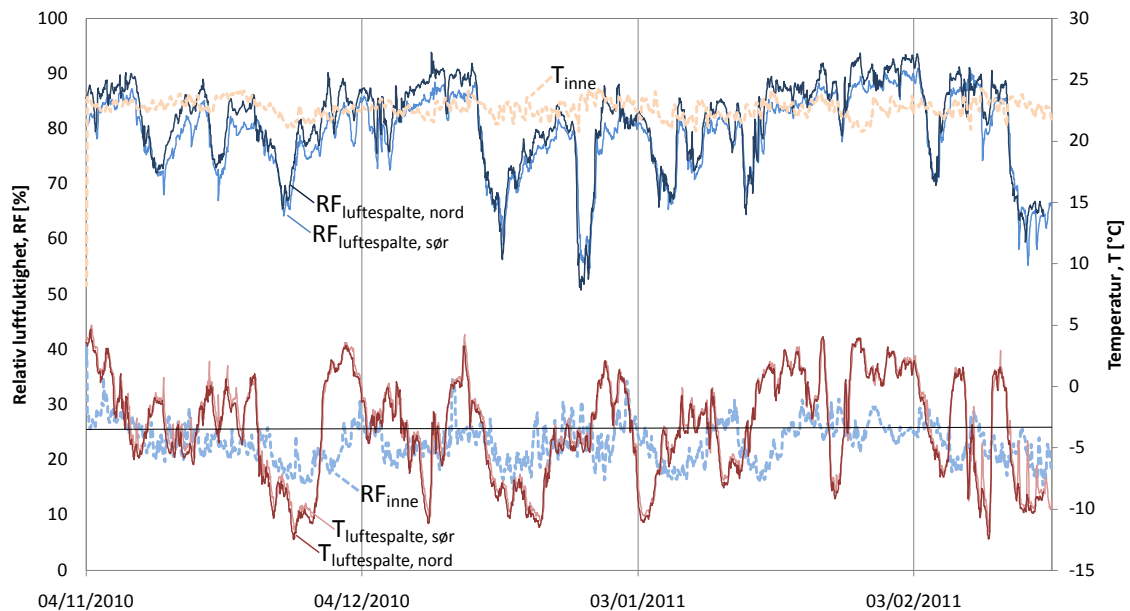
Tabell 38. Materialparametre benyttet i beregningene.

Materiale	Tykkelse mm	Densitet kg/m ³	Fuktgjennomgang S _d -verdi m	Varmelednings- evne (tørt) W/mK	Varmekapasitet (tørt) J/kgK
Vindsperre	1*	130	0,14	3	1500
Gips - GU	9	675	0,11	0,2	850
Glava A 37	400	60	0,52	0,037	850
PE-folie	1*	130	70	2,2	2200
Gips innvendig	12	850	0,1	0,2	850

* Tykkelsen til vindsperre og dampsperre settes til 1 mm, selv om den i realiteten er lavere for å passe inn i det numeriske nettet det beregnes i. S_d-verdien er redusert for å tilpasses.

Som klima bruker vi logget klima i luftespalte og innvendig. Siden luftespalten har et visst luftskifte som kan kjøle temperatursensoren, må det defineres stråling på utvendig overflate for å få med hele varmebalansen. Til dette har vi hentet global stråling, stråling målt på horisontal flate uten skjerming, for Bodø, målt på Vågønes meteorologiske stasjon (eklima.no). I vårt tilfelle ser vi på klima-

forholdene i vertikal flate og beskyttet bak kledningen. Vi har valgt å bruke 25 % av målt global stråling, for å ta høyde for strålingsmotstanden til kledning og luftespalte, og evt. tilliggende vegetasjon samt til takutstikket og strålingsutvekslingen med jordbakken utenfor huset.



Figur 75. Klima i luftespalten og innvendig i huset, gitt som relativ fuktighet (RF) og temperatur (T). Disse verdiene er brukt som input i beregningene.

Figur 75 viser målt klima innvendig og i kledningens luftespalte på sør- og nordvendt vegg. Vi ser at høy temperatur inne gir en relativt lav RF, fordi inneluften ikke er oppfuktet av for eksempel matlaging eller dusjing ennå. De to luftespaltene har, som forventet, lavere temperatur på nordsiden grunnet mindre soloppvarming. Nordsiden har dermed også litt høyere RF. Men delvis er det også kaldere på nordsiden i timer med stor utstråling (om natten), som kan skyldes mindre vegetasjon på nordsiden eller at sørsiden får varmestråling fra havet. I snitt er det 2,2 °C forskjell på nord- og sørside.

Veggoppbygningen har gips på begge sider, malt på innvendig side og ekstra vindsperre på utvendig side. Det er valgt startfukt på 80 % RF i materialene, utenom i isolasjonslaget som har fått 0,8 kg/m³ i fukttilskudd. I isolasjonslaget er ikke I-profilene inkludert i beregningene, fordi beregninger viser at verste punkt for muggvekst er midt i isolasjonslaget på kald side (bakside av vindsperre) (Oustad, 2004), og vi ser kun på én dimensjon. I-profilflensene gir noe startfukt i veggen. Ved 15 % trefuktighet i utgangspunktet, og en potensiell uttørking og omfordeling av fukt ned til 7 % trefuktighet, blir det ca. 0,8 kg/m³ fukt tilgjengelig i isolasjonshulrommet. Indre flens vil tørke mer enn ytre flens på I-profilen.

10.2 Resultater

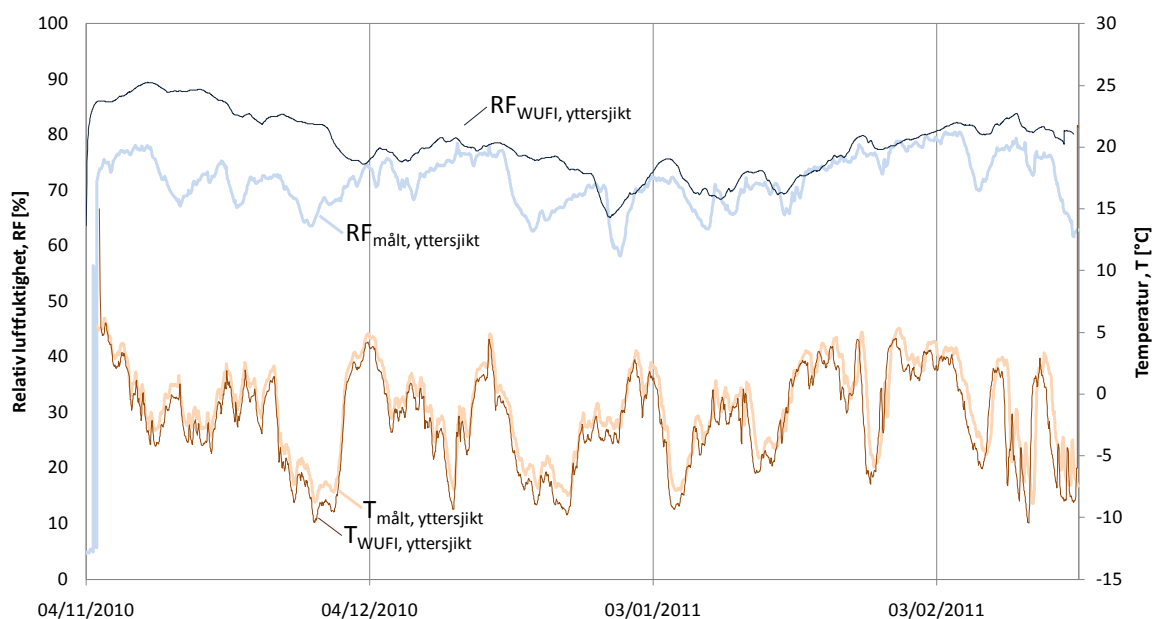
Figur 69, 70, 71 og 72 viser målt og beregnet RF og temperatur mot innerkant og ytterkant av isolasjonslaget på sør- og nordvendt vegg. Det er versjonen uten papir som er beregnet. Ikke uventet har vi svært god sammenheng mellom målte og beregnede verdier, siden målt klima (som er brukt i beregningene) ligger nært opptil beregnet.

Det tar noe tid før fuktigheten i isolasjonslaget fordeler seg i beregningene og varierer som målt. Dette ser vi på tiden det tar før kurven når fuktnivået som er målt. Vi har også noe faseforskyvning pga. for stort tidsintervall på noen målinger.

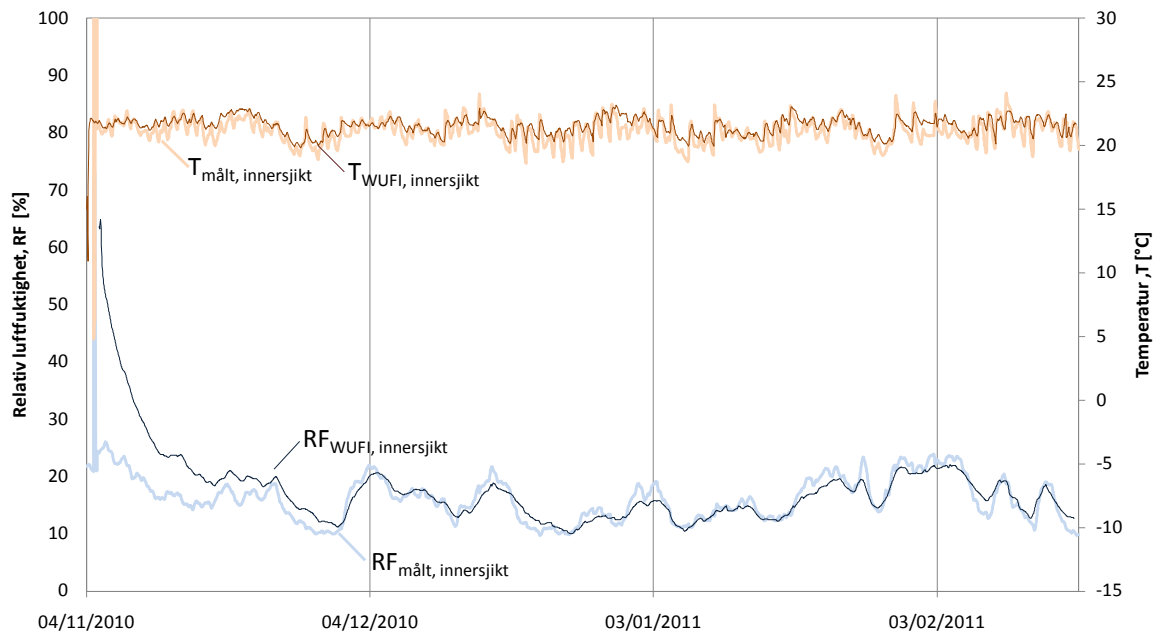
Amplituden til RF-svingningene klarer ikke modellen å regne tilfredsstillende. Det er tydelig at endringene skjer raskere enn modellen kan predikere. Dette kan også henge sammen med klimadatainput, som gis for hver time, og vil ha større oppløsning ved for eksempel 10 minutters verdier. Ved flere målinger ville kanskje de raske endringene blitt beregnet.

Dette viser at WUFI også kan predikere passivhus godt. Modellen kan brukes videre til å finne veggens respons i andre klimaer, til å vurdere sårbarhet ved andre materialer eller risiko for fuktskader dersom noen av materialene har en høyere startfukt.

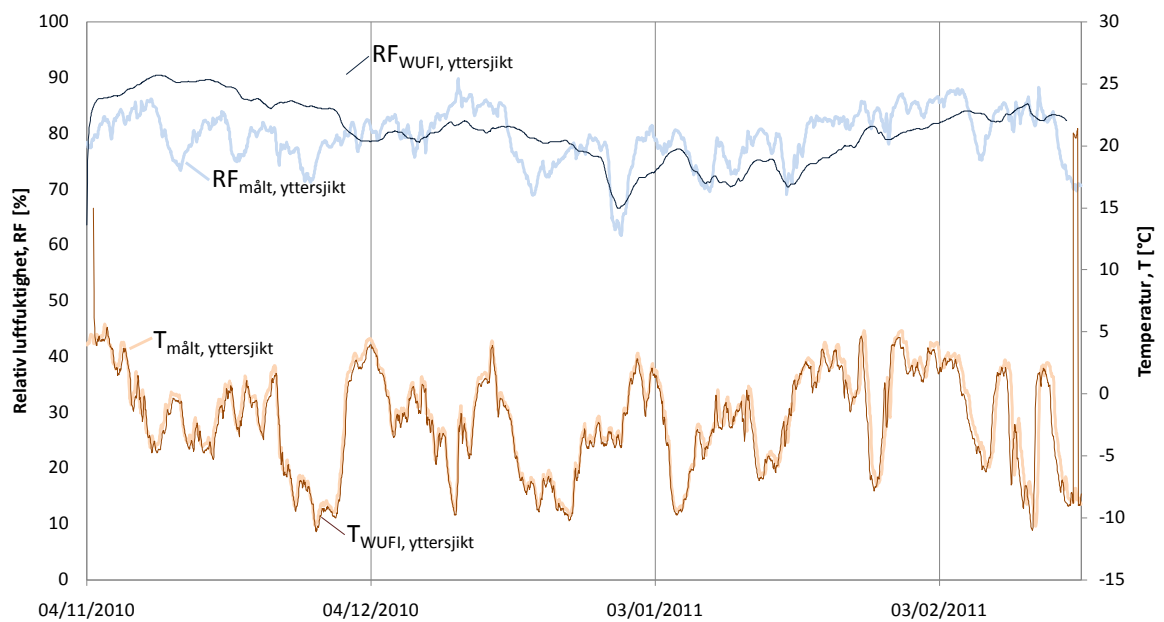
Beregningen viser videre at konstruksjonen fungerer godt. Det er en uttørking i løpet av perioden på $0,3 \text{ kg/m}^2$ mot utvendig side av konstruksjonen. Det er ingen fare for muggvekst med så lite fukt i byggeperioden.



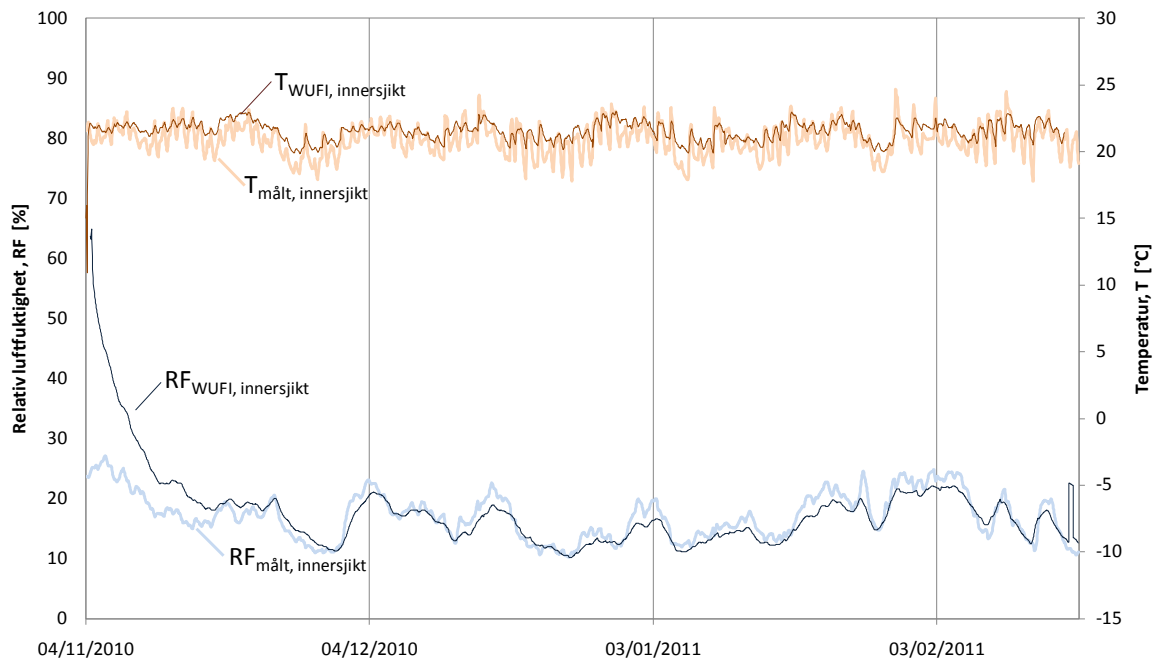
Figur 76. Beregnet temperatur- og fuktforhold i sørveggen i yttersjikt, gitt som relativ fuktighet (RF) og temperatur (T).



Figur 77. Beregnet temperatur- og fuktforhold i sørveggen i innersjikt, gitt som relativ fuktighet (RF) og temperatur (T).



Figur 78. Beregnet temperatur- og fuktforhold i nordveggen i yttersjikt, gitt som relativ fuktighet (RF) og temperatur (T).



Figur 79. Beregnet temperatur- og fuktforhold i nordveggen i innersjikt, gitt som relativ fuktighet (RF) og temperatur (T).

11 Eksempler på utvalgte passivhus i Norge

11.1 Enebolig i Bodø

Sted	Bodø
Prosjektttype	Enebolig i passivhusutførelse
Byggetid	Oktober 2009 - mai 2010
BRA	172 kvm
Prosjektkostnad	-
Entrepriseform	Totalentreprise
Byggherre	-
Prosjektledelse	-
Arkitekt	Mesterhus
Prosjekterende	Byggmester Erling Skipnes
Hovedentreprenør	Moelven Byggmodul
Rådgivere	Byggma, Glava
Prosjektstøtte	Innovasjon Norge

Eneboligen er prosjektert og beregnet etter passivhusstandarden NS 3700. Etter denne standarden er maksimalt tillatt energibehov 20,0 kWh/m² BRA. Beregnet energibehov for eneboligen er 14,1 kWh/m² BRA og tilfredsstiller dermed kravet med god margin. Det brukes omtrent dobbelt så mye isolasjon i et passivhus som i en bolig etter norske forskrifter i 2009. Et hus bygget etter passivhusstandard bruker omtrent 25 % av energibehovet til et vanlig hus. Boligens areal er fordelt på to etasjer, med 17 % vindus- og dørareal i forhold til gulvareal, noe som er typisk for småhus. Huset har en enkel og kvadratisk form, noe som er godt egnet i forhold til de strenge kravene som stilles til et passivhus. Andel vindusareal mot sør er 72 %, 20 % er mot nord, mens de resterende 8 % er mot øst.

Bygget er plassbygd, og det er benyttet ferdige elementer som ble produsert under kontrollerte og tørre forhold i fabrikk. Veggelementene kom ferdig med vinduer, dører og utvendig vindsperre til byggplass. Isolasjon ble ettermontert innvendig på byggplassen. Utvendig kledning, inklusive utlektning, ble ettermontert på byggeplass. Takkonstruksjonen består av prefabrikkerte takstoler levert til byggeplassen. Tetting, isolering og legging av takbelegg ble utført på byggeplassen.



Figur 80. Passivhus i Bodø. Utenpå er det lite som tyder på at dette er et spesielt hus.



Figur 81. Innvendig er det god plass til å sette blomsterpotten i vinduskarmen.

Tabell 39. Kort beskrivelse av oppbygging av enebolig i Bodø.

Bygningsdel	Utførelse
Grunnmur	Det ble valgt å benytte en ringmur fra Jackon, som har svært gode isolasjonsegenskaper og som i tillegg var godt kjent for håndverkerne fra før. Det ble benyttet Jackon ringsmurelementer med en U-verdi på 0,17 W/m ² . I tillegg ble det lagt 100 mm isolasjon på utsiden av disse elementene for å redusere kuldebroer ytterligere.
Bærekonstruksjoner	Den bærende konstruksjonen i yttervegger og etasjeskiller består av I-bjelker i tre.
Yttervegg	I ytterveggen mot terrenget ble det benyttet et EPS-basert 350 mm elementsystem, og veggen ble i tillegg lektet ut med 50 mm som ble isolert. Stegene ble isolert mellom hvert element for å unngå kuldebroer. Tykkere vegger og mer isolasjon fører til at det blir kaldere på den utvendige siden av veggene. Ytterveggene består av to lag med 200 mm isolasjon, dvs. totalt 400 mm isolasjon. Isolasjonen som ble brukt i veggene er plater som ble tilpasset I-profilen.
Taktekking	I takkonstruksjonen ble det benyttet takstoler av tre. I taket ble det brukt 600 mm mineralull som isolasjon. I taket over 2. etasje (kaldt loft) er det lagt inn 600 mm isolasjon. I dette prosjektet er det benyttet isolasjon med forbedret isolasjonsevne (Glava Extrem 33), som isolerer omtrent 10 % bedre enn standard isolasjon (A37) i ytterveggene.

Kilder

Blog Mesterhus.no: <http://blogg.mesterhus.no/category/passivhuset-karita/> ;

Glava: www.glava.no/proff/bygg/folg-bygging-av-passivhus-i-bodo/ ;

Møter med involverte parter fra Treteknisk og Mesterhus

11.2 Enebolig i Oslo

Sted	Skøyen, Oslo
Prosjektttype	Enebolig
Byggetid/ferdigsilt	12 mnd/høsten 2009
BRA	186 kvm
Prosjektkostnad	Ca. 19 000,- kvm/BRA eks. mva
Entrepriseform	-
Byggherre	Stein Stoknes
Prosjektledelse	Medplan Arkitekter AS/Stein Stoknes
Hovedentreprenør	Byggmester Jo Toftdal
Rådgivere	Nils Ivar Bovim, Brucon, SINTEF Byggforsk
Prosjektstøtte	Innovasjon Norge, Enøk-etaten Oslo, Husbanken, Enova

Det overordnede målet med prosjektet har vært å utvikle et helhetlig, energi- og klimaeffektivt boligkonsept basert på massivtre som byggemetode. Bruken av massivtre skal kombineres med isolasjonssjikt uten kuldebroer. Det har vært et ønske å optimalisere bruken av massivtre slik at man kan oppnå både kostnads-/areal- og energieffektive løsninger. I prosjektet ønsket man å finne gode løsninger for integrering av massivtre og tekniske installasjoner som rør, elektriske føringer og ventilasjon som er påkrevd i et passivhus. Eneboligen er prosjektert etter passivhusstandarden. Dette medfører at årlig energibehov til oppvarming ikke skal overstige 15 kWh/m² per år, og at maksimalt effektbehov til oppvarming ikke skal overstige 10 kWh/m².

Målene for huset er 16 m langt og 6,5 m bredt over to og en halv etasje, der det er brukt massivtre i vegger, tak, hemser og etasjeskillere. Elementene hadde en fuktighet på 10 % og ble lagret frem til montering. Elementene ble lagret innpakket i plast for å hindre at UV-stråling og annen forurensing skulle forringe kvaliteten på elementene.



Figur 82. Passiohus i Oslo.



Figur 83. Her er det benyttet et bæresystem i massivtre. Foto: Stein Stoknes.

Tabell 40. Kort beskrivelse av oppbygging av enebolig i Oslo.

Bygningsdel	Utførelse
Grunnmur	Grunnmur består av ringmurelementer med et ekstra ytre isolasjonssjikt (totalt 35 cm utenfor ringmur). Gulv mot grunnen er isolert med 40 cm isolasjon under betongplate. Over betongplaten er fuktsperre og lufttetthet sikret av en (asfalt) sveisemembran. Det er lagt særlig vekt på å få til en god og lufttett løsning ved overgangen grunnmur/vegg. Her er benyttet en svillemembran med oppkant som overlapper med tett sjikt på vegg. Det er også benyttet et dobbelt sett grunnmursvill. Den nederste for å klemme svillemembran mot sveisemembran. Den andre for å avrette underlaget for massivtreelementene. Alle gjennomføringer er tettet med mansjetter.
Bærekonstruksjoner	Massivtre er brukt i konstruksjonen, kombinert med et isolasjonssjikt uten kuldebroer. Det er ikke brukt lim i massivtrekonstruksjonen, som er eksponert som innvendige flater. Massivtrekonstruksjonen fungerer også som festeunderlag for det utvendige skallet (isolasjonssjikt og ytterkledning). Den trimmede massivtrekonstruksjonen medførte at ytterveggene kun består av 88 mm massivtreelement i tre sjikt.
Yttervegg	Veggene i bygget er diffusjonsåpne for å respondere på klimaet inne i bygget. Tekniske installasjoner som rør, elektriske føringer og ventilasjon er integrert i veggene. Veggene er bygd opp av tre og fire lags overlappende elementer i gran med en bredde på 120 mm, hvor elementene er synlige. Ytterkledningen er festet gjennom isolasjonssjiktet og til massivtrekonstruksjonen med lange konstruksjonsskruer, noe som reduserer kuldebroeffekten. Den utvendige kledningen består av 100 % ubehandlet malmfuru. Det ble benyttet 350 mm isolasjon i yttervegger.
Innervegg	Innvendig er massivtreelementene behandlet med linolje. Dette gir massivtreelementene et lyst preg, samtidig som dette er en diffusjonsåpen behandling som medfører at treets naturlige fuktregulerende egenskaper beholdes.
Taktekking	Taket har en vinkel på 41 grader, der deler av huset har full romhøyde uten stag eller bjelker på tvers i rommet. Det er brukt kontinuerlige flater av massivtre i prosjektet. Etasjeskillerne er 223 mm og spenner over 5,8 meter. Til sammen 38 elementer á 400 mm hver ble produsert og pakket i plast. Tak, hemser og etasjeskillere er selvbærende med 48 mm synlig panel. Det ble benyttet 380 mm isolasjon i tak.

Kilder

Prosjektpresentasjon Norsk Massivtre:

www.landsbyarkitektene.no/div/prosjektpresentasjon%20massivpassiv.pdf

Artikkel Ecobox: www.arkitektur.no/?nid=177584

Intervju med Stein Stoknes (EcoBox)

11.3 Barnehage i Drammen

Sted	Fjell, Drammen
Prosjektttype	Skole og barnehage
Byggetid/ferdigstilt	13 mnd/2010
BRA	740 kvm
Prosjektkostnad	Total budsjettramme 28,4 mill. kr.
Entrepriseform	
Byggherre	Drammen Eiendom KF
Prosjektledelse	Code arkitektur AS, Hindhamar Landskapsarkitekter AS
Hovedentreprenør	Holtefjell Entreprenør AS
Rådgivere	EM teknikk AS, Tor Helge Dokka, Helge Lunde, Sigurd Eide
Prosjektstøtte	

Barnehagen er den første i Norge som ble utført med passivhusstandard i massivtre.



Figur 84. Hele elementer heises på plass og sikrer en rask og effektiv montering, men det er likevel viktig med tildekking hvis det er nedbør.



Figur 85. Oppføring av Fjell barnehage.

Tabell 41. Kort beskrivelse av oppbygging av barnehage i Drammen.

Bygningsdel	Utførelse
Grunnmur	I grunnmuren ble det benyttet Jackon-plater, 150 mm isolasjon og 250 mm Leca-blokker. Fundamentet er oppbygd av 200 mm betong og 800 mm isolasjon.
Bærekonstruksjoner	Massivtreelementer ble brukt som bærende konstruksjon i bygget, og ivaretar både horisontal og vertikal bæring over terreng.
Yttervegg	Massivtreelementene som ble brukt i den bærende konstruksjon. All overflatebehandling ute ble utført med diffusjonsåpne produkter. I 1. etasje og kjeller består veggelementene av 60-100 mm massivtre, åpen diffusjonssperre og vindspærreduk.
Innervegg	Innvendig i bygget er alle de bærende elementene eksponert på veggene og i himlingsoverflatene, og all overflatebehandling innendørs ble utført med diffusjonsåpne produkter. Innerveggene består av massivtreelementer med 60-100 mm tykkelse og 100 mm isolasjon, 13 mm gipsvegger og 100 mm stenderverk/isolasjon.
Taktekking	Takflatene var hovedsaklig planlagt oppført som sedumtak, men ut fra økonomiske hensyn ble vanlig takpapp benyttet på en stor del av takene. Taktekkingen består av 25 mm undertak, 100-150 mm krysslekting, diffusjonsåpen, vanntett duk, 600 mm isolasjon/ribber, 100 mm massivtre og 50 mm akustisk himling.

Kilder

Futurebuilt.no: www.futurebuilt.no/?nid=206284&projectid=204300

Ecobox Prosjektdatabase: www.futurebuilt.no/?nid=204300

www.sivingtt.no/nyheter/fjell-barnehage-drammen

Arbeidstegninger for prosjektet

11.4 Boligfelt i Oslo

Sted	Rudshagen, Oslo
Prosjekttype	Borettslag/boliger, 17 eneboliger
Byggetid/ferdigstilt	Høsten 2010 - sommer 2011
BRA	116 kvm
Prosjektkostnad	-
Entrepriseform	-
Byggherre	OBOS Nye Hjem AS
Prosjektledelse	-
Hovedentreprenør	Mesterhus Håndverksbygg
Rådgivere	Spor Arkitekter AS
Prosjektstøtte	

OBOS og Mesterhus inngikk våren 2010 kontrakt om oppføring av inntil 17 passivhus på Mortensrud i Oslo. Rudshagen borettslag vil bli Norges første eneboligfelt bestående utelukkende av passivhus. Husene har en streng og enkel kubisk huskropp, der en del av stuen er fremskutt og danner en skjermet uteplass på terreng og en terrasse i andre etasje.

Det ble valgt å bygge opp ytterveggene med en plassbygget dobbel bindingsverkkonstruksjon med 150 mm mellomrom mellom ytre og indre stender. Dette mellomrommet ble fylt med isolasjon. Isolasjon som ble benyttet er Glava Extrem 33, som har en varmekonduktivitet på 0,033 W/(mK).

Tabell 42. Kort beskrivelse av oppbygging av boligfelt i Oslo.

Bygningsdel	Utførelse
Grunnmur	Husene er fundamentert med isolerte grunnmurelementer og støpt plate på mark.
Bærekonstruksjoner	Den bærende konstruksjonen er en todelt bindingsverksvegg. Det er benyttet I-profil bjelker i etasjeskiller og tak.
Yttervegg	Det ble valgt å bygge opp ytterveggene med en plassbygget todelt bindingsverkkonstruksjon med 98 mm brede stendere. Denne ble bygget opp med to separate isolerte stendervegger satt opp med 150 mm mellomrom. Dette mellomrommet ble fylt med isolasjon. Vindlaster tas opp av den ytterste veggen, som er forankret til fundament, etasjeskiller og tak.
Innervegg	Bindingsverk, kledt med gips. Dampsperren er inntrukket bak den innerste veggkonstruksjonen, slik at denne kan benyttes for føringsveier for EL-installasjoner uten fare for punkteringer. Innerveggen bærer etasjeskiller og tak.
Taktekking	Taket er flatt og kompakt. Både etasjeskiller og tak er bygget opp av I-profiler.



Figur 86. For å sikre de plassbygde konstruksjonene mot fukt under byggeperioden, ble det bygget under telt.



Figur 87. Slik ser det ferdige resultatet ut rett før innflytting.

12 Økonomiske betraktninger

12.1 Innledning

Formålet med studien er å se nærmere på forskjeller i kostnadsstruktur for passivhus og konvensjonelle bygg. Denne analysen er basert på kostnader for tre typer konvensjonelle bygg og seks typer passivhus.

12.2 Tidligere resultater

Jakob (2006) beregnet marginal- og gjennomsnittskostnader for energibesparende tiltak i bygg, inkludert ekstra isolering, forbedrede vindussystemer, ventilasjon og oppvarmingssystemer og arkitektoniske konsepter. Beregningene var basert på tall fra en undersøkelse av den sveitsiske boligsektoren. Kost-/ nytteanalysen inkluderte flere typer ny teknologi, som viste store prisvariasjoner grunnet kostnader forbundet med å være tidlig ute på markedet, prøving og feiling og økt risiko. De økonomiske fordelene knyttet til økt bokomfort, forbedret innendørs luftkvalitet, bedre beskyttelse mot støy og mer, ble funnet å være tilnærmet like store som potensielle økonomiske fordeler knyttet til energisparing.

Audenaert m.fl. (2008) gjennomgikk kostnader for passivhus, lavenergi boliger og konvensjonelle boliger, hvor formålet med studien var å undersøke kostnadsstruktur knyttet til de ulike bygningsmetodene. Det ble identifisert syv ulike kategorier med ekstra kostnader knyttet til å bygge boliger med passivhus-standard kontra lavenergi boliger og standardhus:

1. Kostnader til oppvarming
2. Behov for mer ventilasjon
3. Ekstra isolering av vegger
4. Høyere krav til lufttetthet
5. Ekstra kostnader i forbindelse med grunnarbeid
6. Forskjeller i grunnflate grunnet tykkere vegger i passivhus
7. Diverse andre kostnader knyttet til tilpasninger til ny byggemetode

Kostnader knyttet til isolering og ventilering var de største ekstra kostnadsfaktorene for passivhus, henholdsvis 64 % og 27 % av totalkostnadene. Det ble beregnet at bygging med passivhusstandard totalt ble fem prosent dyrere enn konvensjonelle bygninger. De viktigste bidragsyterne til de høyere kostnadene var ventilasjonssystemet, bedre vinduer og isolering av ytterveggene.

Dokka m.fl. (2009) estimerte merkostnader for bygging av passivhus, basert på realiserte lavenergi- og passivhus i Norge, Sverige og delvis Tyskland og Østerrike. Estimerte merkostnader var 1200 kr og 1500 kr per kvadratmeter oppvarmet bruksareal (BRA). Tallene er oppgitt for boliger med passivhusnivå for henholdsvis 2017 og 2022. I disse estimatene ble det ikke inkludert tall fra de mest kostnadseffektive byggeprosjektene.

12.3 Sammenligning kostnader passivhus og konvensjonelle bygg

Resultatene som presenteres her er basert på data for kostnader og tidsbruk knyttet til bygging av konvensjonelle boliger og boliger med passivhusstandard.

Grunnlagsdataene er levert av et norsk boligbyggerfirma, og tallene inkluderer kostnader knyttet til innkjøp av materialer og tidsbruk knyttet til byggingen av de ulike hustypene. Husene tar utgangspunkt i tre ulike modeller av standardhus, som så er tegnet om til tilsvarende modeller med passivhusstandard. I alle beregninger er det antatt en timepris for håndverkerne på 500 kr per time.

Tabell 43 viser merkostnader knyttet til bygging av passivhus ved bruk av de to ulike veggløsningene som er benyttet av boligprodusenten i disse prosjektene. Merkostnaden for å bygge et tilsvarende hus med passivhusstandard varierer fra 717 kr til 1073 kr per kvadratmeter bruksareal. Totalt utgjør dette 12-17 % økning i de totale kostnadene (netto 5-10 %).

Enova, www.enova.no, støtter inntil 40 % av merkostnadene inntil 450 kr per kvadratmeter for nye passivhusboliger. Dette gjør at netto merkostnad per kvadratmeter bruksareal knyttet til å bygge et passivhus varierer fra 267-623 kr for de ulike passivhustypene og veggløsningene.

Tabell 44 viser kostnadsoversikt knyttet til bygging av passivhus sammenlignet med tilsvarende modell uten passivhusstandard for ulike husmodeller og vegg-løsninger. Tallene er fordelt på ulike bygningsdeler. De største merkostnadene er forbundet med bygging av ytterveggene; henholdsvis primærkonstruksjoner, vinduer og ytterdører.

Tabell 45 og Tabell 46 viser en oversikt over kalkulert tidsbruk for oppsetting av henholdsvis gjennomgående og todelte vegg-løsninger. Følgende forkortelser er benyttet:

Yvegg	Yttervegg
Db1	Todelte yttervegg-løsninger (dobbelvegg)
98	98 millimeter bred stender i vegg
X33	Isolasjonstype Glava Xtrem 33
LDD	Yttervegg med liggende dobbelfalset kledning, mot dekke betong
LDBj	Yttervegg med liggende dobbelfalset kledning, mot bjelkelag
MU	Mur

Eksempelvis vil *Yvegg DBL 98X33 LDD* indikere dobbel yttervegg med 98 mm tykke stendere, der det er benyttet Glava Xtrem 33 isolasjon i veggen, med dobbelfalset kledning som er oppbygget på betong (1. etasje).

Yvegg DBL98X33 indikerer at det er brukt dobbel yttervegg med 98 mm tykke stendere og Glava Xtrem 33 isolasjon, liggende dobbelfalset kledning som er bygd opp på et bjelkelag (2. etasje).

Figur 88 viser en oversikt over de relative størrelsene på de ulike utgiftspostene knyttet til bygging av ulike bygningsløsninger og forskjellige bygningsdeler for de respektive hustypene og vegg-løsningene. Figuren viser material- og arbeidskostnader summert for de ulike bygningsdelene, fordelt på hoved- og underkategorier. Kostnadene er angitt på en fargeskala fra rød, via gul, til grønn. Rød angir de høyeste utgiftspostene, og grønn angir de minste utgiftspostene. De største kostnadene forbundet med materialer og arbeid er knyttet til bygging av yttervegger, og da spesielt primærkonstruksjonen og vinduer i passivhusløsningene.

Tabell 43. Kostnadsoversikt for hus med passivhusstandard.

Modell	Type A			Type B			Type C		
Hustype	Standard	Passiv		Standard	Passiv		Standard	Passiv	
Vegløsning		Todelt vegg	I-bjelke		Todelt vegg	I-bjelke		Todelt vegg	I-bjelke
Merkostnad i % av standardhus		16 %	18 %		16 %	17 %		14 %	12 %
Bruksareal m ²	172	172	172	157	157	157	127	127	127
Merkostnad kr per m ² bruksareal		940	1071		967	1073		831	717
Netto merkostnad kr per m ² bruksareal		490	621		517	623		381	267
Total netto merkostnad kr		84335	106857		81205	97766		48395	33871
Netto merkostnad i % av standardhus		8 %	10 %		8 %	10 %		6 %	5 %

Tabell 44. Kostandsoversikt for passivhus fordelt på bygningsdeler¹ (tall i hele kroner).

		Type A		Type B		Type C	
		Todelt vegg	I-bjelke	Todelt vegg	I-bjelke	Todelt vegg	I-bjelke
Fast inventar	Badinnredning	0	0	0	0	0	0
	Garderobe	0	0	0	0	0	0
	Kjøkkeninnredning	0	0	0	0	0	0
	Trapper, luker	0	0	0	0	0	0
Innervegger	Innerdører	48	48	7,5	7,5	13,5	13,5
	Primærkonstruksjoner	210	210	91,5	91,5	133,5	133,5
Trapper, balkonger	Balkonger	163,5	163,5	82,5	82,5		
Yttertak	Primærkonstruksjoner	26	26	20	20	-3114	-3114
	Taktekking	471	471	524	524	587	587
	Utv. himlinger	12	12	26	26	3161	3161
Yttervegger	Primærkonstruksjoner	60641	79144	49946	49946	39367	24842
	Vinduer	69629	73061	55545	55545	37010	37010
	Ytterdører	13971	14559	27995	27995	4225	4225

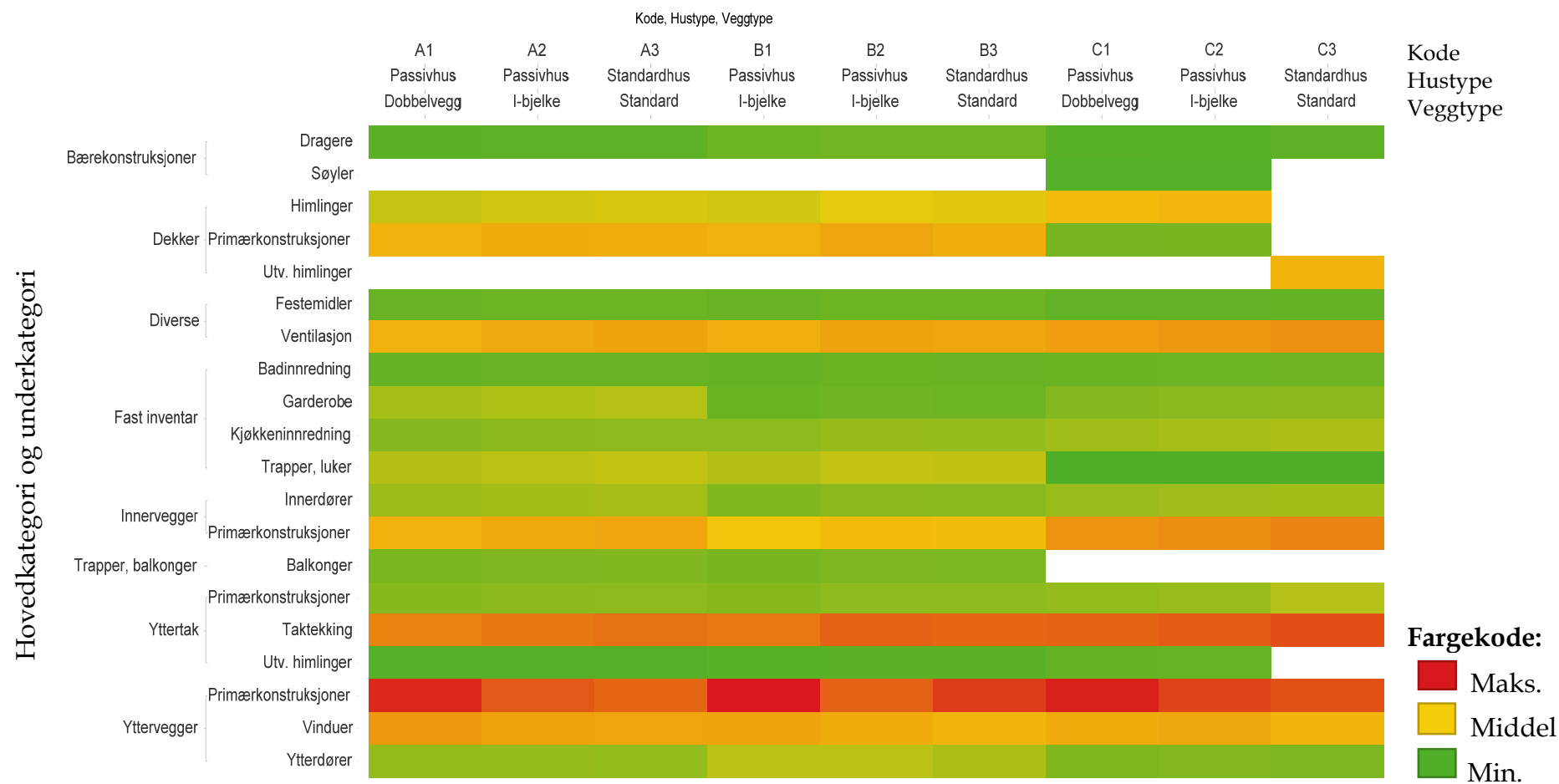
¹ Negativ verdi indikerer lavere kostnader for passivhus sammenlignet med standardhus.

Tabell 45. Kalkyler for tidsbruk for montering av todelte ytterveggløsninger.

Betegnelse	Mengde	Enhet	Enhetstid	Total tid
Yvegg DbI98X33 LDD	41,20	Lengdemeter	01:38	67:33
Yvegg DbI98X33 LDB	41,20	Lengdemeter	01:38	67:33
Hjørne IB350X33 LD	8,00	Stykk	00:34	04:32
Sum yttervegger				139:38

Tabell 46. Kalkyler for tidsbruk for montering av I-profil-løsning.

Betegnelse	Mengde	Enhet	Enhetstid	Total tid
Yvegg IBX350X33 LDD	41,20	Lengdemeter	01:01	42:30
Yvegg IBX350X33 LDB	41,20	Lengdemeter	00:58	40:30
Hjørne IB350X33 LD	8,00	Stykk	00:33	04:27
Sum yttervegger				87:27

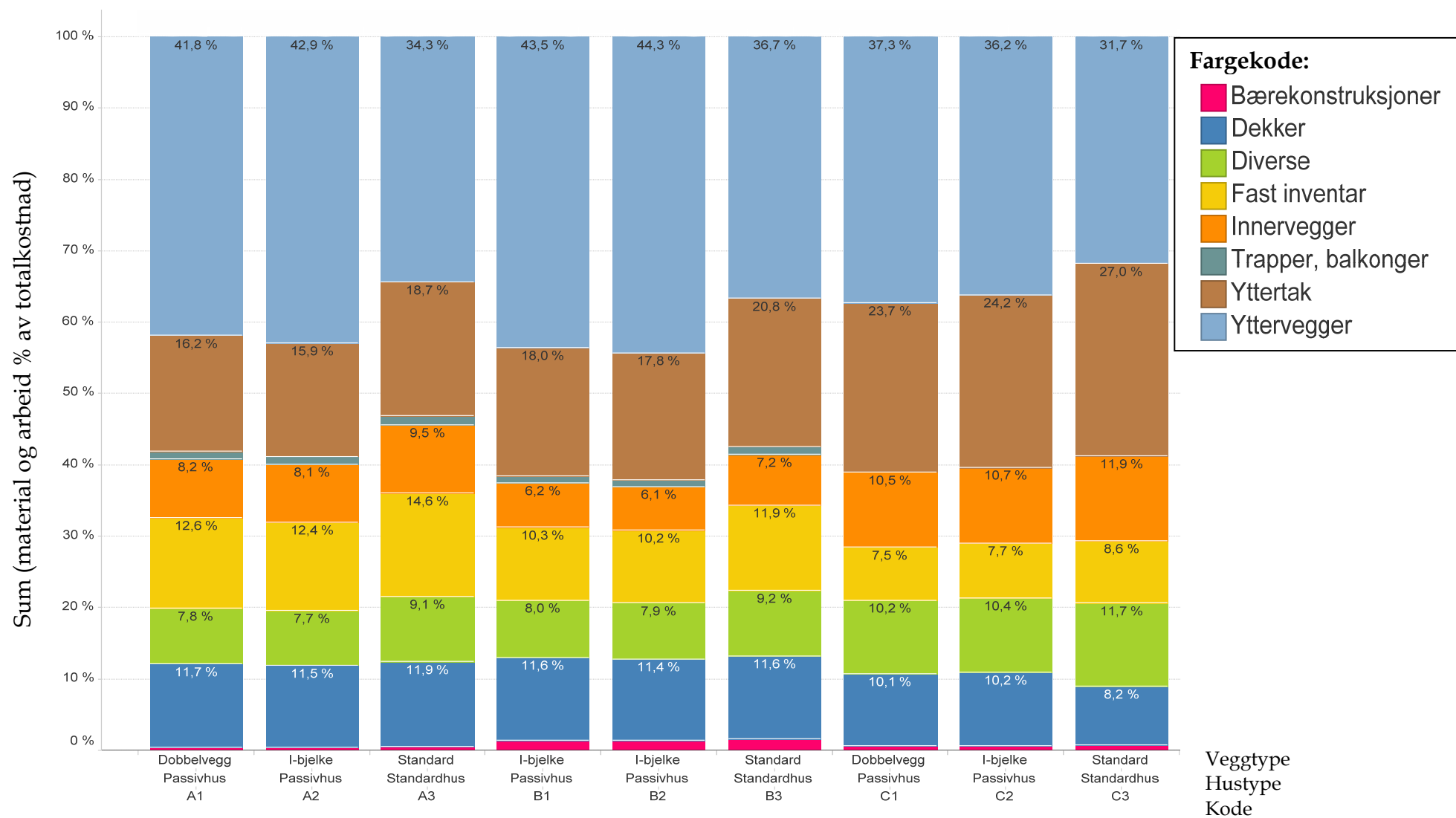


Figur 88. Relative utgiftsposter for ulike hustyper.

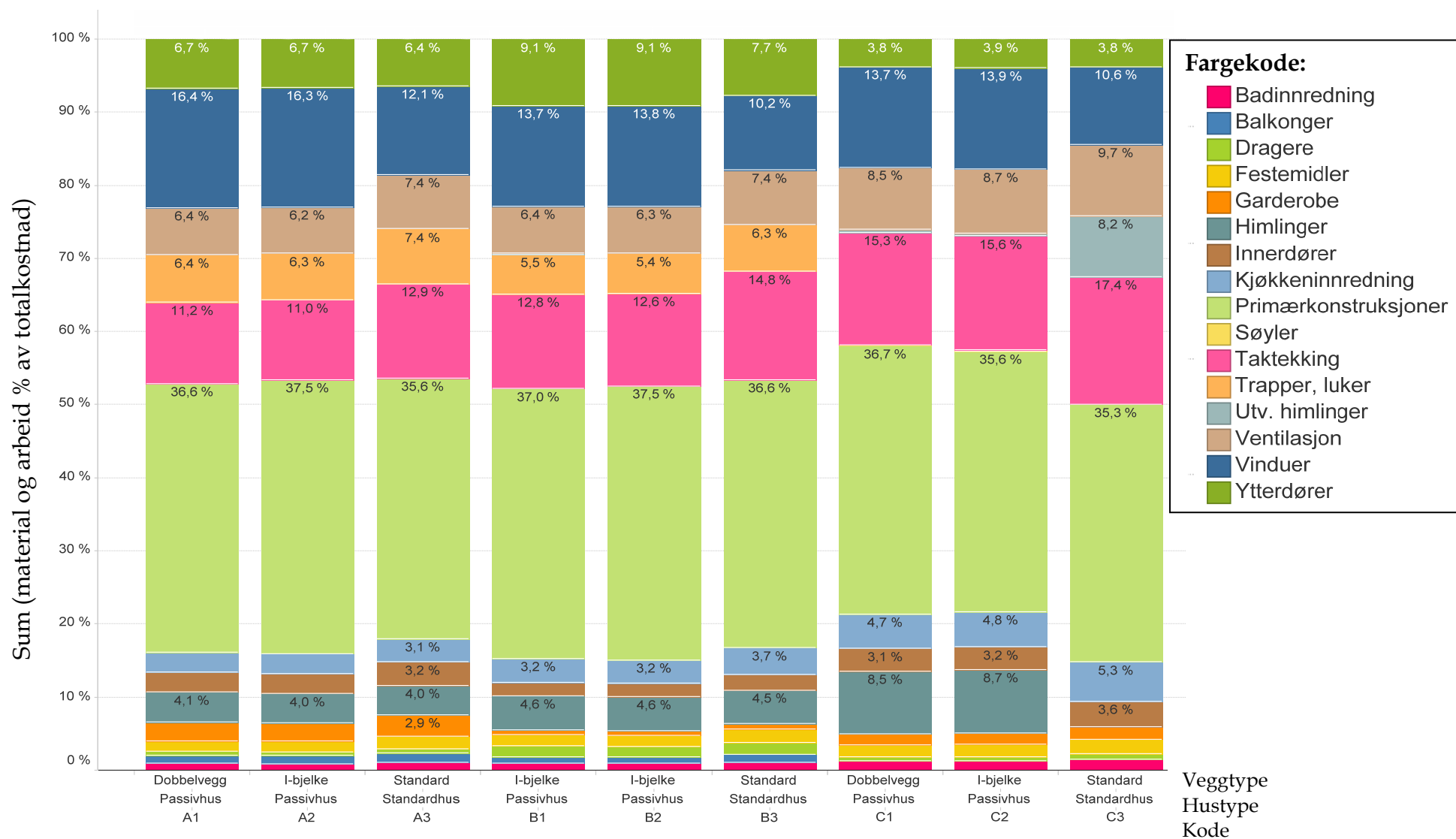
Figur 82 og Figur 83 viser en oversikt over de ulike bygningsdelenes andel av totalkostnadene for å oppføre de ulike byggene. Størstedelen av utgiftene er knyttet til bygging av yttervegger og yttertak, som utgjør mer enn 60 % av totalkostnadene for passivhusvariantene. Primærkonstruksjoner, taktekking og vinduer utgjør de største utgiftspostene for byggene som helhet.

Figur 84 og Figur 85 viser de ulike bygningsdelenes andel av de totale materialkostnadene knyttet til oppføringen av de ulike hustypene. Størstedelen av materialkostnadene kommer i forbindelse med oppsetting av yttervegger og yttertak, rundt 60 % av de totale materialkostnadene. De største utgiftspostene for materialer er knyttet til bygging av primærkonstruksjoner, taktekking og vinduer.

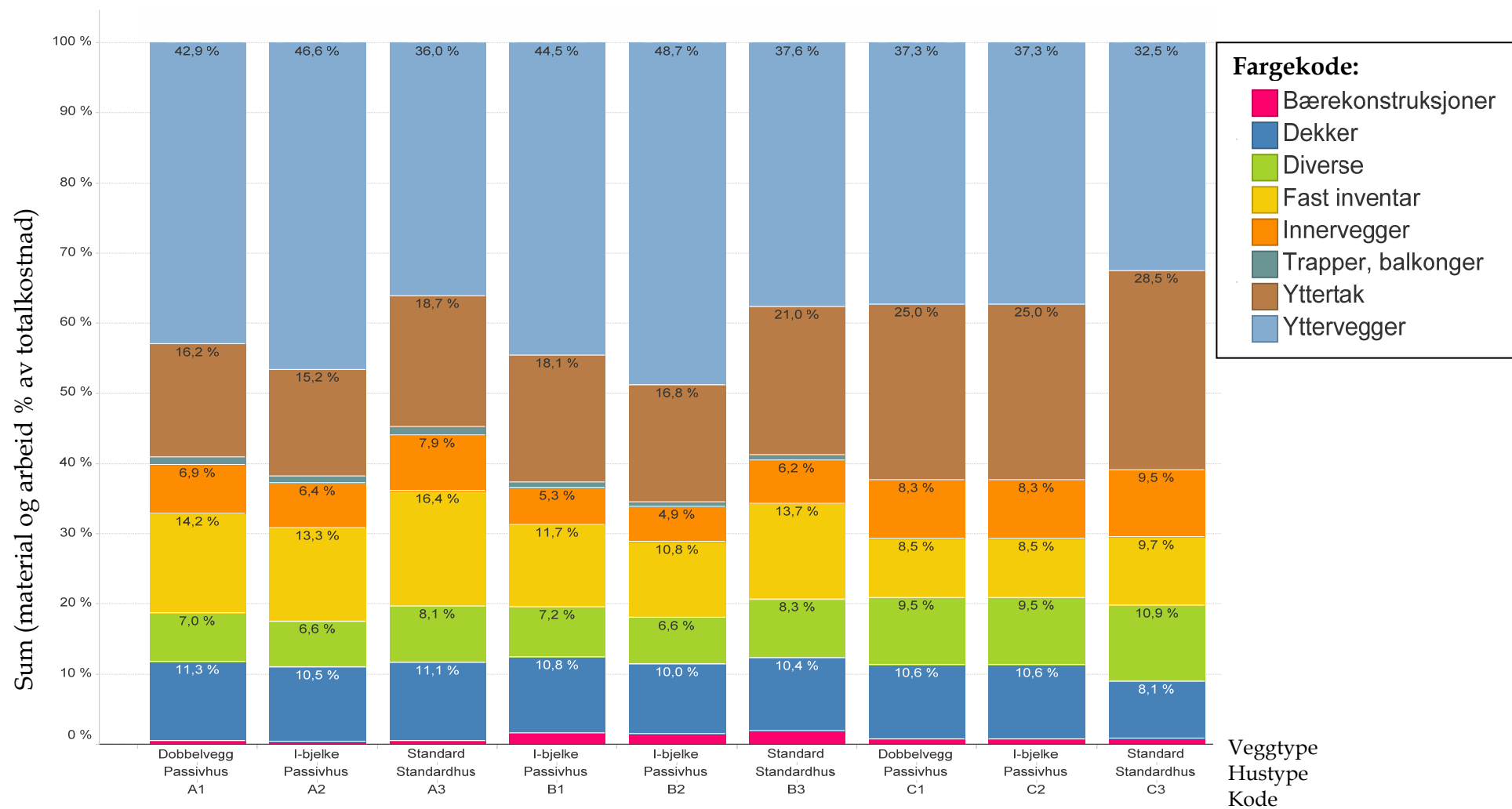
I Figur 86 og Figur 87 presenteres de ulike bygningsdelenes andel av de totale arbeidskostnadene knyttet til oppføringen av de ulike hustypene. Rundt 60 % av arbeidskostnadene er knyttet til oppføring av yttervegger og yttertak. Fordelt på underkategori utgjør primærkonstruksjoner, taktekking og vinduer nesten 80 % av de totale arbeidskostnadene for de ulike prosjektene.



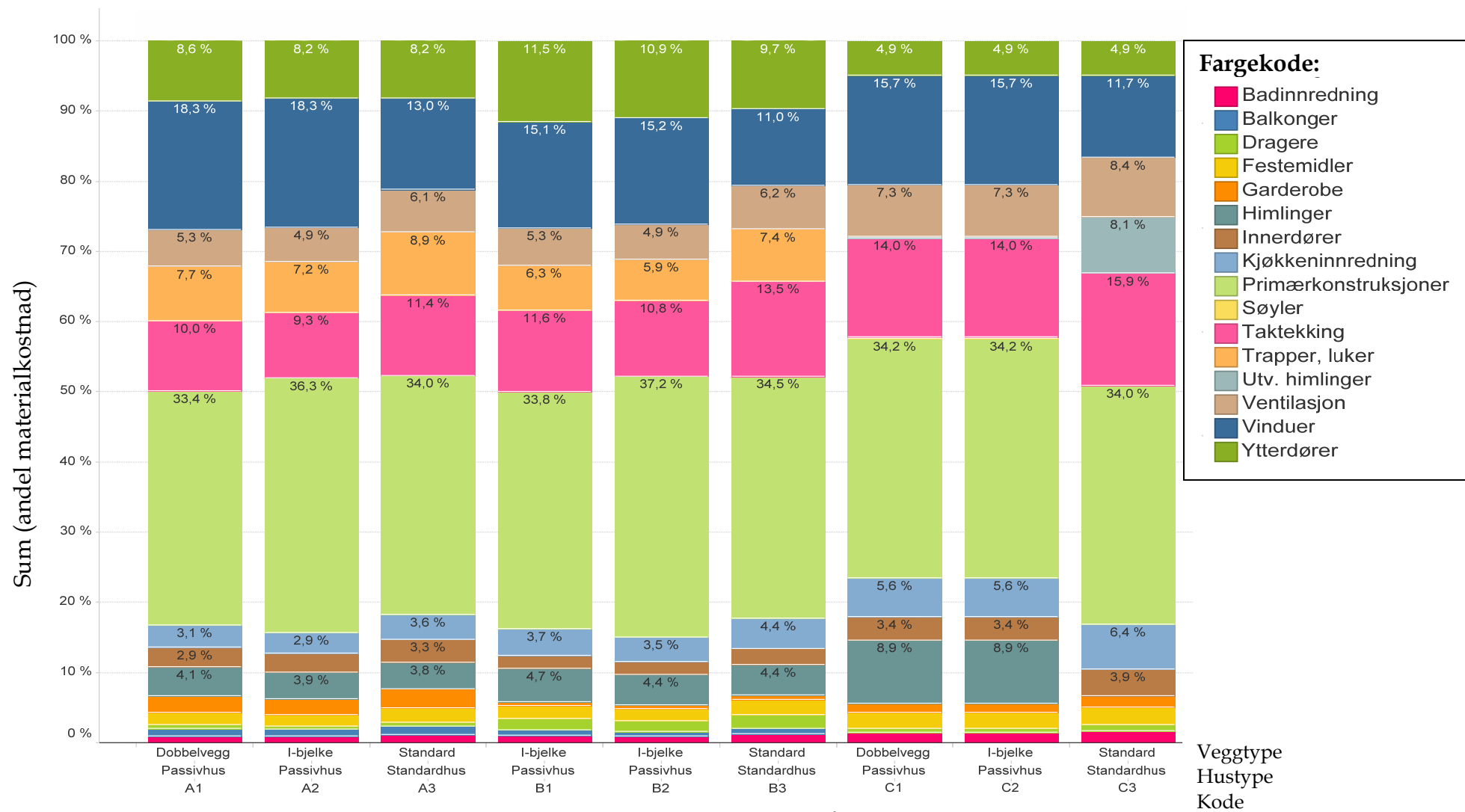
Figur 89. Andel av totalkostnader, fordelt på hovedkategori.



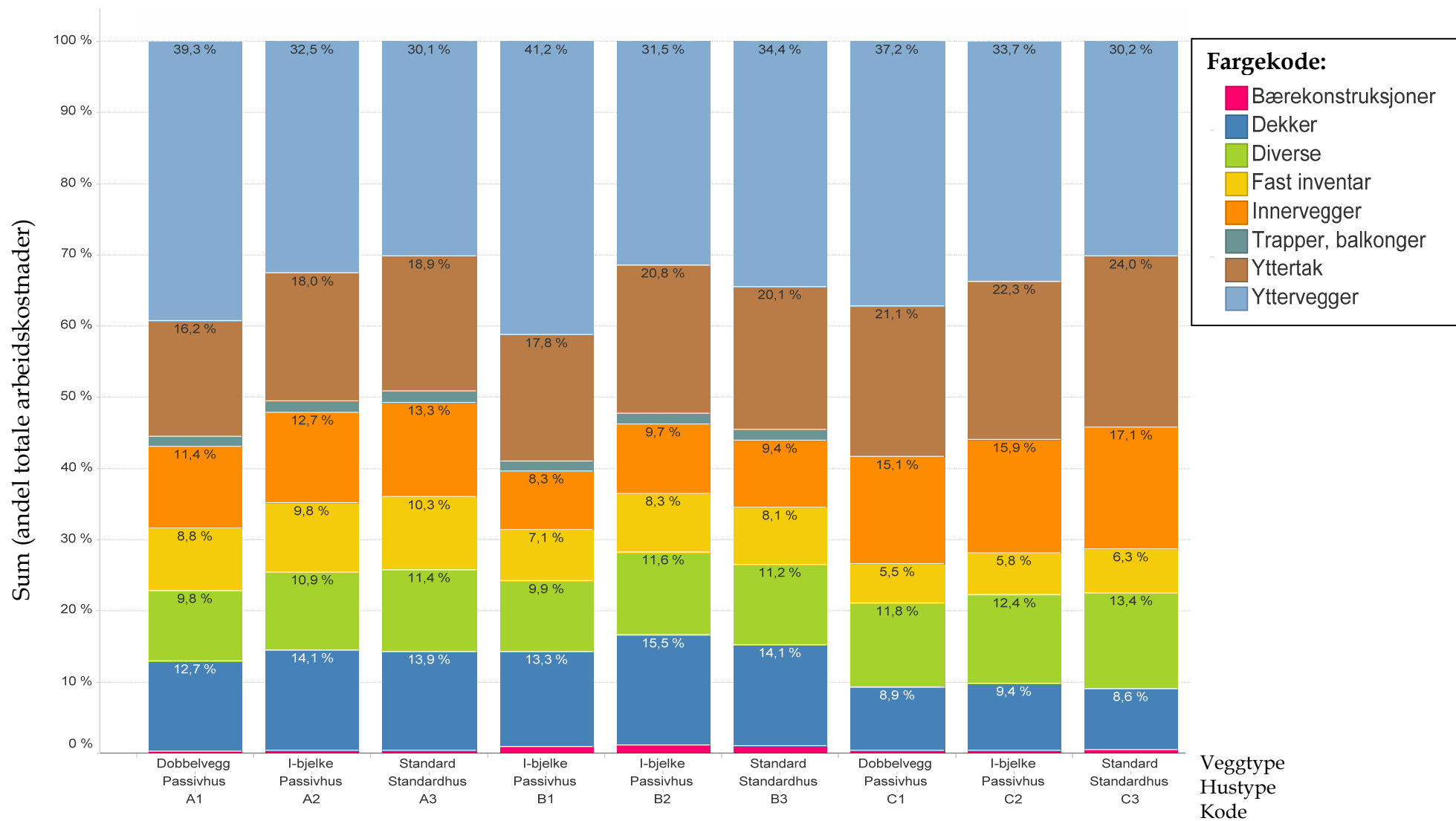
Figur90. Andel av totale arbeidskostnader, fordelt på underkategori.



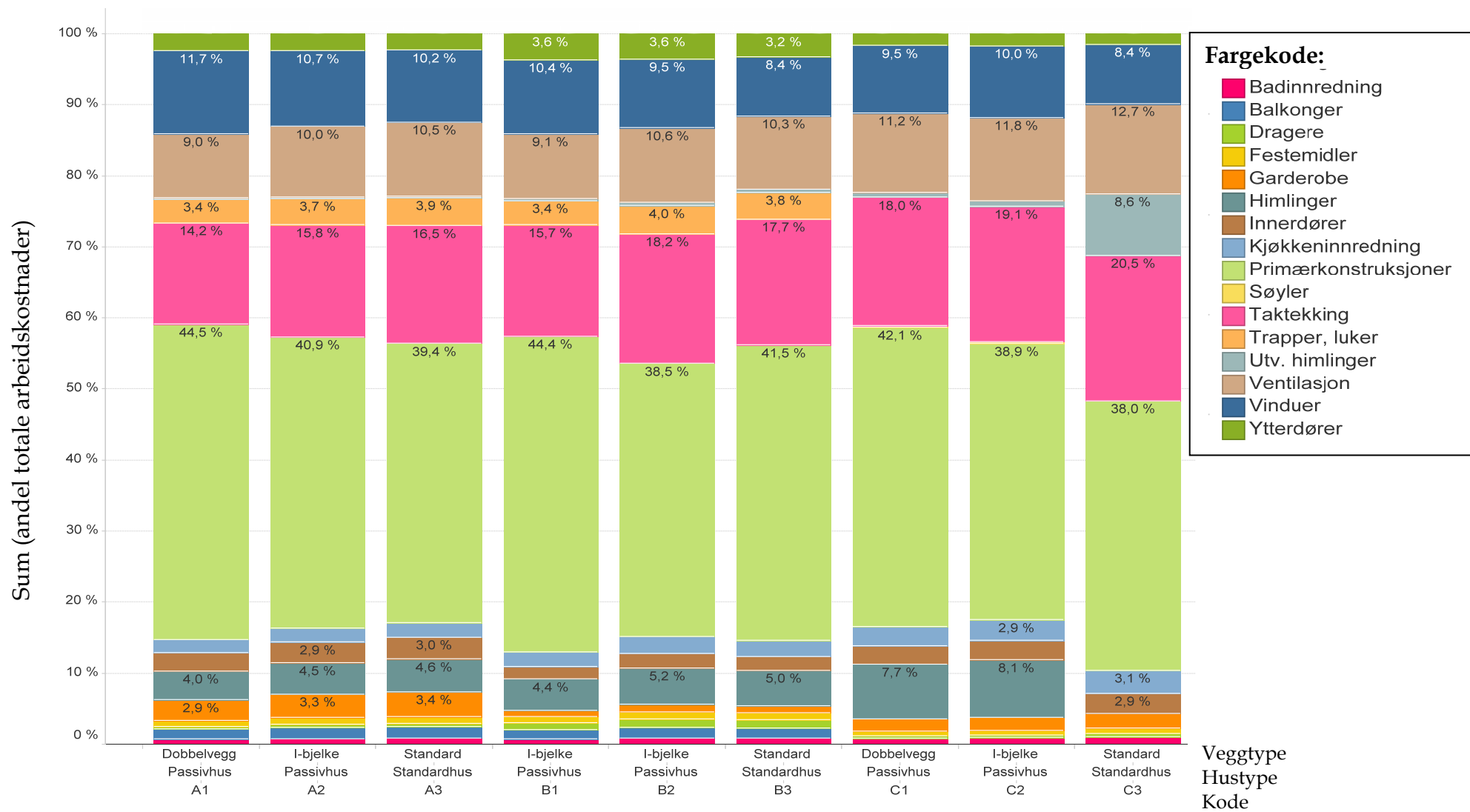
Figur 91. Andel av materialkostnader, fordelt på hovedkategori.



Figur 92. Andel av materialkostnader, fordelt på underkategori.



Figur 93. Andel av arbeidskostnader, fordelt på hovedkategori.



Figur 94. Andel av arbeidskostnader, fordelt på underkategori.

12.4 Oppsummering av økonomiske betraktninger

Merkostnadene for å bygge passivhus er i all hovedsak knyttet til bygging av yttervegger, herunder primærkonstruksjoner (vegger), vinduer og ytterdører.

I de konkrete eksemplene som er kalkulert i denne rapporten utgjør merkostnaden for passivhus omtrent 13-16 % av de totale byggekostnadene før subsidier. Etter subsidier fra Enova utgjør merkostnadene 4-7 % av totalkostnadene. Netto merkostnader per kvadratmeter varierer fra 197 kr til 346 kr for de ulike passivhus-typene og vegg-løsningene.

Kalkulasjonene viser at det er forholdsvis små kostnadsforskjeller mellom de ulike vegg-løsningene som er brukt i de forskjellige passivhus-løsningene. Et interessant moment som fremkom i kalkylene fra husprodusenten, var at i modellene hvor det i vegg-løsningen ble benyttet I-bjelke, ble monterings-tiden redusert med opptil 50 timer i forhold til modellene med todelte yttervegg-løsninger. Dette kan gjøre det attraktivt å bygge vegg-løsninger med I-bjelker, siden tidsbesparelsene over tid vil kunne gi et økonomisk fortrinn for denne løsningen.

13 Isolasjonstyper og -metoder

13.1 Generelt

Varmetransport gjennom en bygningskonstruksjon skjer på tre forskjellige måter:

- Stråling
- Ledning
- Konveksjon (luftstrømming)

Varmeisolasjon som benyttes i bygninger i dag, er i hovedsak materialer som inneholder store andeler luft. Det er luften som i de fleste materialene står for det meste av isolasjonsevnen. Derfor er det viktig at luften i isolasjonen står mest mulig stille. Noen isolasjonsmaterialer, som f.eks. mineralull og celluloseisolasjon, er permeable (luftgjennomslippelige). I konstruksjoner der permeable materialer benyttes, er det viktig at de omsluttet av et lufttett sjikt på begge sider.

13.2 Mineralull

Mineralull, som er en fellesbetegnelse for glassull og steinull, leveres i ulike kvaliteter med ulik densitet og varmekonduktivitet beregnet for forskjellig type anvendelse. I trekonstruksjoner over grunnen benyttes kvaliteter med deklarererte λ -verdier på 0,033 W/mK, 0,037 W/mK og 0,040 W/mK. Produksjonsmetodene, kvaliteten og bruken av mineralull har ikke endret seg nevneverdig de siste to tiårene. Det er heller ikke grunn til å tro at det vil skje store endringer i fremtiden. Et unntak er imidlertid metoden for ilegging av mineralull i konstruksjoner. Ved stadig større volumer og ønske om mer rasjonelle byggemetoder, er det sannsynlig at metoder for innblåsing av løsull og påspraying av ull og lim på byggeplass vil bli utviklet videre. Disse metodene kan være med på å styre valg av konstruksjonsprinsipp, som er tatt opp i kapittel 3.

13.3 Plastisolasjon

Det finnes to hovedtyper plastisolasjon til bruk i bygninger i dag:

Polystyren. Dette er et produkt som lages av olje og som kan fremstilles på to forskjellige måter:

- *Ekspandert polystyren* med en minimum deklarerert λ -verdi på 0,035 W/mK
- *Ekstrudert polystyren* med en minimum deklarerert λ -verdi på 0,034 W/mK

Polyuretanskum. Dette produktet har tette porer der luften i isolasjonsmaterialet er erstattet av en annen type gass som isolerer bedre enn luft – f.eks. HFC (Hydrofluorkarboner) eller CO₂. Polyuretanskum har en minimum deklarerert λ -verdi på 0,022 W/mK.

Det er lite som tyder på at plastisolasjonsmaterialene kan utvikles videre til en lavere λ -verdi, slik at konstruksjonene kan bli vesentlig tynnere. Men det er også her en mulighet for at innsprøyting eller påspraying kan bli en konkurransedyktig metode for å isolere bygningskonstruksjoner. Spesielt gjelder dette for polyuretan-skum, som i dag også leveres på sprayflasker som kan brukes til bl.a. å isolere og tette rundt dører og vinduer.

13.4 Celluloseisolasjon

Celluloseisolasjon er som regel fremstilt av returpapir som blir hakket og malt i flere trinn til det får en ull-lignende konsistens. Materialet tilsettes de brannhemmende kjemikaliene borsyre og boraks, som også reduserer faren for sopp og muggvekst i isolasjonen.

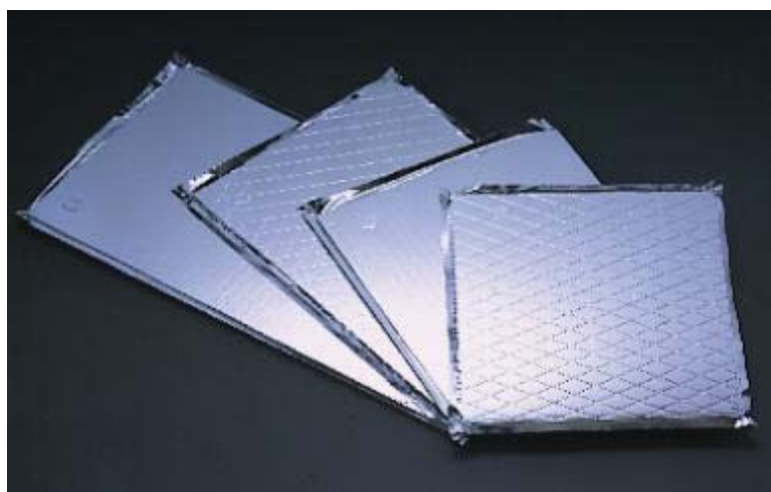
Den deklarerte λ -verdien ligger mellom 0,039 W/mK og 0,043 W/mK.

Celluloseisolasjon fås som løsull, plater og matter. Den vanligste formen å isolere på er ved innblåsing av løsull. Det er også utviklet et effektivt verktøy for påspraying av løsull og bindemiddel på vertikale konstruksjoner.

Det er grunn til å tro at λ -verdien for celluloseisolasjon kan forbedres ytterligere ved en optimalisering av fremstillingsprosessen. Dette kan maksimalt gi ca. 15 % reduksjon av varmetapet fra bygningskonstruksjonene. Videre vil antakelig selve isoleringsprosessen på byggeplass spesialiseres og industrialiseres ytterligere.

13.5 Vakuumpaneler

I vakuumpaneler benyttes en kjerne av et porøst materiale som omsluttet av en svært lufttett folie. Luften i den porøse kjernen pumpes ut for å redusere varme-gjennomgangen. Målinger har vist λ -verdier ned mot 0,004 W/mK på nye paneler. I tillegg kommer det et ekstra varmetap i randsonen pga. folien.



Figur 95. Eksempler på vakuumpaneler.

Resultater fra aldringstester antyder en dobling av λ -verdien etter 25 år pga. diffusjon av luft inn i elementene.

Utfordringen er å benytte disse panelene i trekonstruksjoner der det er fare for en perforering av folien – f.eks. i vegger og tak. I gulvkonstruksjoner, og spesielt under et betonggulv i eksisterende bygninger, kan de ha sin berettigelse for å spare høyde i forhold til andre isolasjonsmaterialer.

Vakuumpaneler er i bygningskonstruksjoner så langt bare benyttet i pilotprosjekter. For andre anvendelsesområder, som i kjøleskap, fryserer, varmtvannsberedere o.l., er panelene i kommersielt bruk.

13.6 Andre typer isolasjonstyper

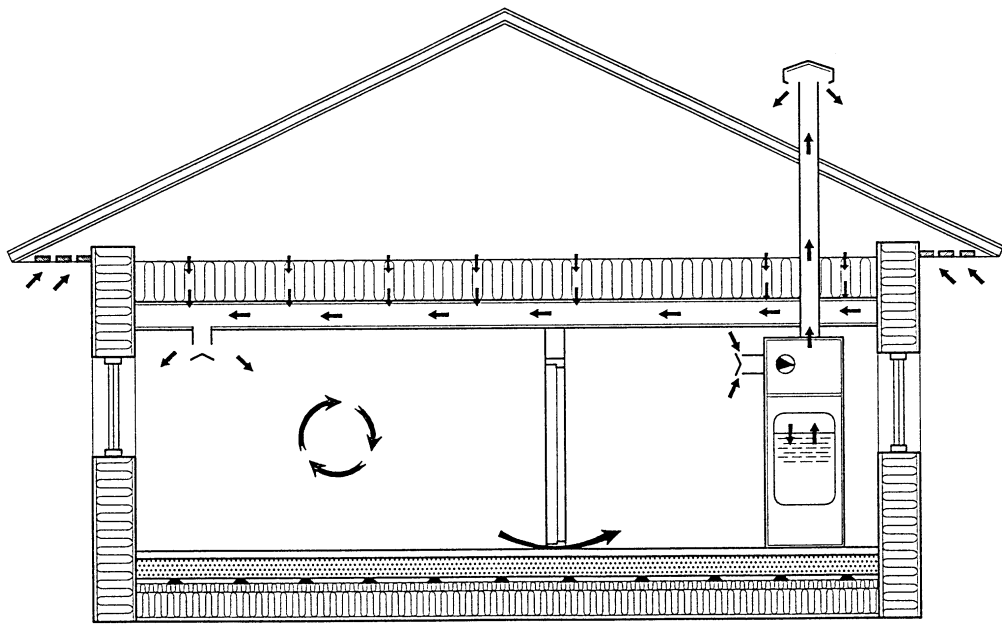
Det finnes også andre isolasjonsmaterialer som kan bli interessante i fremtiden, som f.eks. aerogeler. Dette materialet produseres fra en gel der den flytende komponenten er erstattet med en gass. Den mest vanlige produktet er silica aerogel.

Aerogeler har en svært lav λ -verdi – ned mot 0,005 W/mK. Utfordringen så langt har vært å produsere materialet i de riktige dimensjoner og til en fornuftig pris for bruk i bygninger.

På veien mot et “biobasert samfunn” er tanninbasert skum et interessant produkt. Det produseres med i hovedsak fornybare materialer og kan bli et økonomisk godt alternativ til eksisterende produkter. λ -verdien er foreløpig for høy på det materialet som er produsert til nå, men her er det et stort potensiale for forbedring.

13.7 Dynamisk isolasjon

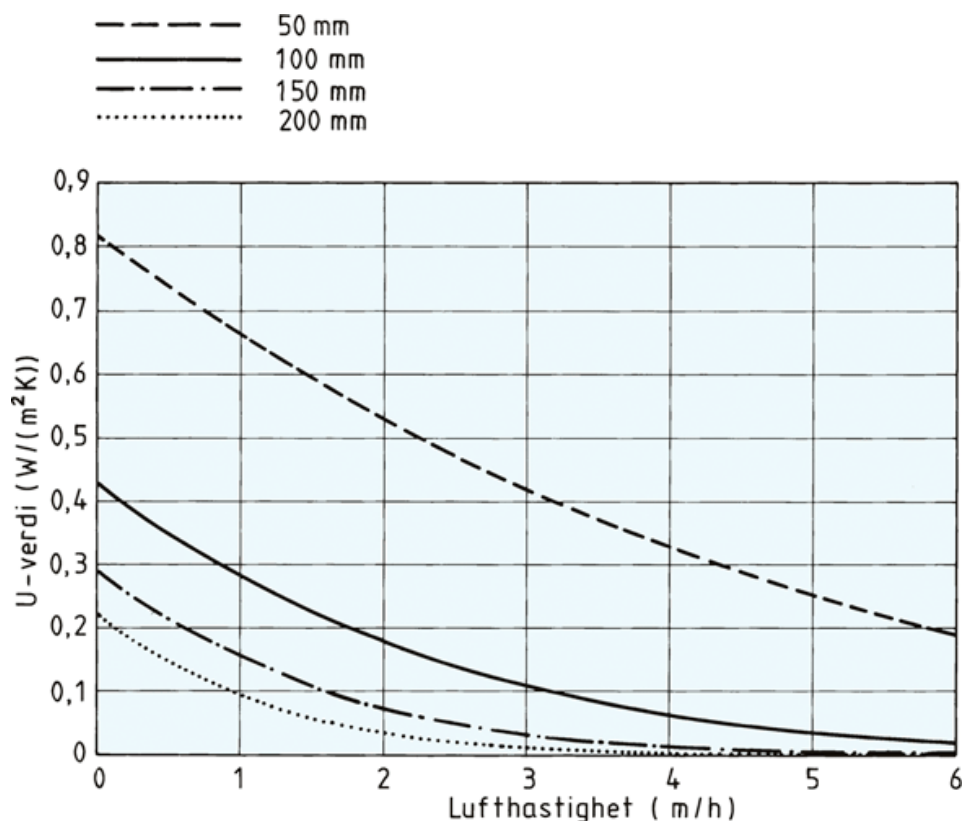
Det finnes også andre metoder for å redusere varmetapet fra en bygning. Under forutsetning av at det er behov for ventilasjon av bygningen, kan prinsippet *dynamisk isolasjon* benyttes. Det er et godt alternativ til økte isolasjonstykkelser og reduserte luftmengder. Med dynamisk isolasjon menes her at man benytter en permeabel varmeisolasjon som har en påtvunget luftstrøm i motsatt retning av varmestrømmen. På denne måten kan den isolerte konstruksjonen virke som en slags varmegjenvinner. Luften som kommer inn gjennom isolasjonen “tar med seg” varmen som er på vei ut gjennom isolasjonen. Prinsippet er vist i Figur 96.



Figur 96. Dynamisk isolasjon brukt i himlingen mot et kaldt loft.

I figureksempelen (Brunsell, 1996) strømmes luften fra loftet, gjennom isolasjonen og inn i bygningen på grunn av en trykkdifferanse mellom bygningen og loftet. Energien i den brukte luften gjenvinnes i dette eksemplet i en varmepumpe som overfører energien til varmt forbruksvann.

På denne måten kan varmetapet fra konstruksjonen reduseres svært effektivt også ved lave lufthastigheter. I Figur 97 (Byggforsk, 1995) er den såkalte dynamiske U-verdi beregnet for ulike isolasjonstykkelser og lufthastigheter.



Figur 97. Dynamisk U-verdi for ulike isolasjonstykkelser og som funksjon av lufthastigheten gjennom isolasjonen.

Figuren viser at varmetapet reduseres for en konstruksjon med for eksempel 200 mm isolasjon til det halve, fra $U = 0,22 \text{ W/m}^2\text{K}$ ved stillestående luft, til $U = 0,10 \text{ W/m}^2\text{K}$ ved en lufthastighet på 1 m/h.

Ved en lufthastighet gjennom isolasjonen på 2,4 m/h i en toetasjers bolig med etasjehøyde 2,4 m vil dette gi en luftveksling på 0,5 oms/h, som er i størrelsesorden ønsket ventilasjonsgrad. Da reduseres varmetapet fra konstruksjonen ned til ca. $0,03 \text{ W/m}^2\text{K}$. For å oppnå et så lavt varmetap med en konvensjonell konstruksjon må man benytte ca. 1 m isolasjonstykkelse.

13.8 Fremtiden

Dagens isolasjonsmaterialer baserer seg på stillestående luft og har en begrensning på hvor lav varmekonduktiviteten kan bli. I praksis er den laveste deklarererte λ -verdien for disse materialene $\lambda = 0,033 \text{ (W/mK)}$.

Utfordringen fremover blir å finne frem til isolasjonsmaterialer og metoder som kan redusere varmetapet fra bygninger til et minimum uten ekstreme isolasjonstykkelser.

14 Referanser

Audenaert A., m.fl. (2008). *Economic analysis of passive houses and low-energy houses compared with standard houses*. [Energy Policy, Volume 36, Issue 1](#).

Brunsell, J. T. (2006), *Dynamisk isolasjon i småhus*. Doktor ingeniøravhandling 1996: 121, NTNU, Trondheim.

Byggforsk (1995). Byggforskserien, Byggetal 472.451. *Dynamisk isolasjon. Teori og prinsippbeskrivelse*. SINTEF Byggforsk Kunnskapssystemer.

Byggforsk (1999). Byggforskserien, Byggetal 471.016. *Kuldebroer. Metoder for å bestemme kuldebroverdi*. SINTEF Byggforsk Kunnskapssystemer.

Bygningsenergidirektivet (2010). www.europalov.no.

Clementz C. A., m.fl. (2009). *ENTRÉ Energieffektive trekonstruksjoner Delrapport 1 – TEK-07*. Norsk Treteknisk Institutt

Core Writing Team, m.fl. (2007). *IPCC, 2007: Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC.

Dokka T. H. (2008). *Løvåshagen: Norges første lavblokkprosjekt med passivhusstandard*. 1st Nordic passive house conference - Passivhus Norden, Göteborg, Sverige.

Dokka T. H., m.fl. (2009). *Energieffektivisering i bygninger - mye miljø for pengene*. Prosjektrapport 40.

Eklima (2011). www.eklima.no. Nettside med tilgang til meteorologiske data målt av Norges Meteorologiske Institutt.

Enova (2011). Statsforetak som eies av Olje og energidepartementet, gir bl.a. støtte til bygging av passivhus: <http://hjemme.enova.no/sitepageview.aspx?articleID=4013>.

Geving, S. og Holme J. (2010). *Høyisolerte konstruksjoner og fukt. Analyse av fukttekniske konsekvenser av økt isolasjonstykkelse i yttervegger, tak, kryperom og kalde loft*. Prosjektrapport 53, SINTEF Byggforsk, Trondheim.

Gustavsen A., m.fl. (2008). *Kuldebroer – Beregning, kuldebroverdier og innvirkning på energibruk*. Prosjektrapport 25, SINTEF Byggforsk, Trondheim.

IEA (2008). *World Energy Outlook 2008*.

Jakob M. (2006). *Marginal costs and co-benefits of energy efficiency investments: The case of the Swiss residential sector*. [Energy Policy, Volume 34, Issue 2](#).

KRDs arbeidsgruppe for energi-effektivisering av bygg (2010). *Energieffektivisering av bygg – en ambisiøs og realistisk plan mot 2040*.

McKinsey & Company (2010). *Impact of the financial crisis on carbon economics, Version 2.1 of the Global Greenhouse Gas Abatement Cost Curve.*

Naaf, Norges Astma- og Allergiforbund (2010). *Fakta om inneklime*.
www.naaf.no/no/inneklime/Fakta-om-inneklime/.

Oustad, M. (2004). *Eksperimentell verifisering av numeriske beregninger av koblet fukt- og varmetransport i kompakte tak*. Hovedoppgave ved Institutt for bygg, anlegg og transport, NTNU, Trondheim.

GE Protimeter (2006), *Kalibreringstabell for trevirke*.
www.ge-mcs.com/download/moisture-humidity/woodcalv2.pdf

SINTEF Byggforsk. (2008). Byggforskserien, Byggdetaljer 523.002. *Yttervegger over terreng. Egenskaper og konstruksjonsprinsipper. Krav og anbefalinger*. SINTEF Byggforsk Kunnskapssystemer.

Standard Norge (2010). *NS 3700:2010 Kriterier for passivhus og lavenergihus Boligbygninger*.

Statens bygningstekniske etat (2007). *Forskrift om krav til byggverk og produkter til byggverk (TEK)*.

Stoknes S. (2009). *massivpassiv - utvikling av forbildeprosjekt i Ladeveien, Oslo*. Ferdigrapport.

Straube, J., Smegal, J. (2009). *Building America Special Research Project: High-R Walls Case Study Analysis*, Research Report – 0903.

Treteknisk (2006). *Håndbok – bygge med Massivtreelementer, Hefte 3 – Dimensjonering*, Teknisk håndbok nr. 1.

Tronstad, S. (2003). *Tre og fuktighet – fra produsent til forbruker*. Teknisk småskrift 35, Norsk Treteknisk Institutt.

Tronstad, S. (2006). *Tre og fuktighet – fra produsent til forbruker*. Teknisk håndbok nr. 2, Norsk Treteknisk Institutt.

Uvsløkk S. (2008). *Ny TEK - mer isolasjon – mindre fuktskader? Resultater fra en teoretisk parameterstudie*, Norsk bygningsfysikkdag, 25. november 2008, Thon Hotell Vika Atrium, Oslo.

Uvsløkk S. og Gustavsen A. (2006). *Vurdering av sammenheng mellom isolasjonstykkelse og risiko for fuktskader i lette yttervegger*. Rapport 50105900. SINTEF Byggforsk, Trondheim.

Uvsløkk, S. m.fl. (1996). *Natural convection in timber frame walls with thick thermal insulation layer*. Proceedings of the 4th Symposium on Building Physics in the Nordic Countries. Helsinki.

WUFI (2011). www.wufi-pro.com. Dataprogram for beregning av koblet varme- og fukttransport i bygningskomponenter. Fraunhofer Institut für Bauphysik i Tyskland.