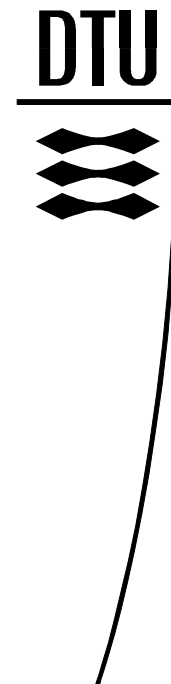


UDVIKLING AF KLIMASKÆRMSKONSTRUKTIONER



**RAPPORT
R-042
2000**

ISSN 1396-4011
ISBN 87-7877-044-0

**INSTITUT FOR BYGNINGER OG ENERGI
DANMARKS TEKNISKE UNIVERSITET**



Copyright © Institut for Bygninger og Energi,
Danmarks Tekniske Universitet, 2000.

Genoptryk, aug. 2000. Enkelte fejl rettet.

Institut for Bygninger og Energi,
Danmarks Tekniske Universitet
Bygning 118, Brovej
2800 Kgs. Lyngby
Telefon: 45 25 18 55

Forfattere:
Henrik Monefeldt Tommerup, Danmarks Tekniske Universitet
Jørgen Munch-Andersen, Statens Byggeforskningsinstitut
Peter Kjær Esbensen, Danmarks Tekniske Universitet

Tegninger: Ove Nesdam og Annette Juul Muusfeldt,
Statens Byggeforskningsinstitut.

Eftertryk i uddrag er tilladt, men kun med kildeangivelsen:
Rapport R-042: Udvikling af klimaskærmskonstruktioner.
Institut for Bygninger og Energi, Danmarks Tekniske Universitet.

Forord

Projektet "Klimaskærm til fremtidens nybyggeri - 2. fase" (ENS journal nr. 1213/98-0012) skal fremme yderligere varmebesparelser i nybyggeri og eksisterende bygninger ved en teknologisk udvikling af klimaskærme (ydervægge, fundamenter, gulv- og tagkonstruktioner).

Denne rapport er en varmeteknisk, statisk, byggeteknisk og økonomisk beskrivelse og vurdering af en række forslag til ydervægløsninger til fremtidens byggeri med vægt på løsninger der kan udføres af eksisterende materialer og komponenter. Foruden selve ydervæggen behandles de tilhørende fundamenter indgående, da det er særdeles vigtigt at væg og fundament passer sammen.

Aspekter omkring brand- og lydmæssige forhold er ikke behandlet eksplicit, men de viste løsninger forventes at kunne bringes til at opfylde de relevante krav, hvis samlingerne udføres hensigtsmæssigt.

Udnyttelse af solindfald gennem vinduer i ydervægge, reduktion af ventilationstabet og andre forhold der sammen med varmetabet påvirker behovet for tilført energi er ikke behandlet.

Vedligehold og levetid af konstruktioner er ikke behandlet. Der er ligeledes ikke taget stilling til æstetiske og byggepolitiske aspekter. Det er det typiske enfamilieshus/parcelhus der betragtes, men enkelte aspekter omkring etagebyggeri omtales.

Projektet har fokuseret på normalsnit og der er derfor behov for en detailprojektering før forslagene kan omsættes i praksis, for eksempel som forsøgsbyggerier. Såvel detailprojektering som forsøgsbyggeri vil være væsentlige elementer i eftervisningen af den praktiske anvendelighed af forslagene og vil kunne fremme deres udbredelse.

Arbejdet er foregået i to parallelle forløb, der har behandlet henholdsvis tunge og lette ydervægskonstruktioner. Der har været nedsat to følgegrupper med følgende sammensætning:

Tunge vægge

Torben Henriksen, VIF - Dansk Forening af Fabrikanten af Varmeisoleringsmaterialer

Søren Bøgh, MURO - Murfagets Oplysningsråd

Erik Fredborg Nielsen, BIH - Betonindustriens Helvægsgruppe

Erik Busch, Danske Porebetonproducenters Brancheforening

Hans Nielsen, Erik Aggerholm, VSO - Vinduesproducenternes SamarbejdsOrganisation
Gøsta Knudsen, Arkitektskolen i Århus, senere Designskolen København
Torben Dahl, Kunstakademiets Arkitektskole

Lette vægge

Søren Meyer, TOP - Træbranchens Oplysningsråd
Vagn Nygaard og Per-Olof Mattsson, Gyproc A/S
Torben Hansen, Danogips
Simon Bordinggaard, Roust Spær A/S
Per Bo Larsen, Tåsinge Træ A/S
Poul Olsen, Chr. Jensens Sønner A/S

Opdelingen i lette og tunge vægge afspejler den traditionelle opdeling, der blandt andet findes i bygningsreglementerne, hvor der har været stillet forskellige varmetekniske krav til de to typer. I rapporteringen vælges det imidlertid at samle arbejdet fra de to grupper i én rapport, da resultatet af arbejdet i grupperne skal ses i en helhed. Endvidere antages kravet til varmeisolering i det kommende bygningsreglement udelukkende at være baseret på en energiramme, hvilket betyder at der ikke er nogen grund til at skelne mellem lette og tunge løsninger. De fordele der kan være ved en tung væg, som følge af større varmekapacitet, tages der hensyn til ved beregning af energiforbrug.

Projektet er udført i samarbejde mellem Institut for Bygninger og Energi, DTU og Statens Byggeforskningsinstitut. Desuden har medlemmerne af følgegruppen vedrørende lette vægge samt Gøsta Knudsen aktivt medvirket ved udarbejdelse af forslag til udmøntning af de tanker og ideer der er blevet udviklet i projektforløbet.

Rapportens forfattere er:

Henrik Monefeldt Tommerup, forskningsassistent, DTU
Jørgen Munch-Andersen, seniorforsker, Ph.D., SBI
Peter Kjær Esbensen, forskningsassistent, DTU

Professor Svend Svendsen, DTU, har været projektleder.

Danmarks Tekniske Universitet, Kgs. Lyngby, Maj 2000.

Resumé

Nærværende rapport afslutter arbejdet med udvikling af klimaskærmskonstruktioner, der kan danne grundlag for nybyggeri med væsentligt mindre varmebehov end i det nuværende bygningsreglement (BR95 [3])

Det er sandsynliggjort, at det er teknisk muligt at opføre ydervægge med mindre varmetab end de der netop opfylder kravene i de nuværende bygningsreglementer uden væsentligt øget materialeforbrug, bortset fra isoleringsmængden. En del af de viste konstruktioner minder i deres opbygning om typer, der anvendes i dag, mens andre forudsætter, at den ene vægdel ophænges i den anden eller eventuelt i spærrene.

Det er påvist, at linietabet ved fundamentet fortsat er betydeligt, når fundamentet i form af to skifter letklinkerblokke (de øverste 40 cm af fundamentet) gennembryder isoleringen. Udvikling af nye komponenter til den øverste del af fundamenter vil derfor være ønskelig. En mulighed kunne være lidt større elementer af letklinkerbeton med passende udsparinger udfyldt med isoleringsmateriale.

Vinduesfalsenes bidrag til varmetabet er ret beskedent for de viste løsninger, da isoleringstykkelsen i vinduesfalsen er relativt stor. De forholdsvis store linietab, der er beregnet, skyldes overvejende bidrag fra den todimensionale varmestrøm forårsaget af sammenbygningen mellem vindue og væg. Linietabet kan reduceres ved at udvikle vinduestyper, der forårsager mindre todimensionale varmestrømme, og ved at stræbe efter en vinduesplacering omkring midten af isoleringen i vinduesfalsen – det vil sige trukket forholdsvis langt tilbage i facaden sammenlignet med normal dansk byggeskik. Sidstnævnte tiltag har dog væsentlige arkitektoniske og æstetiske konsekvenser. Desuden reduceres solindfaldet, hvorved varmetabsbesparelsen til dels udlignes af et mindre varmetilskud.

Der er foretaget beregninger af varmekapacitetens betydning for et ca. 100 m² enfamiliehus, der bekræfter at besparelsen i opvarmningsbehov ved at benytte tunge fremfor lette klimaskærmskonstruktioner er forholdsvis lille. Dette betyder, at en optimering af isoleringsniveauet kan udføres separat på bygningsdelene.

Der er udviklet en metode til vurdering af det optimale isoleringsniveau for de enkelte bygningsdele i klimaskærmen ud fra en totaløkonomibetragtning. Metoden er baseret på opgørelse af ændringer i driftsenergiudgifter/opvarmningsudgifter samt anlægsudgifterne ved ændret isoleringstykkelse i en periode på 30 år. Levetiden af klimaskærmens primære bestanddele er sat til 100 år. Det antages at bruttoenergiforbruget til dækning af

opvarmningsbehov og transmissionstab (bestemt ved en simpel graddøgnsberegning) ændrer sig lige meget, når isoleringstykkelsen ændres, hvilket er dokumenteret som en rimelig tilnærmelse.

De totaløkonomiske beregninger foretaget for et ca. 100 m² eksempelhus er udført for to forskellige energiprisscenarier: 0,60 kr/kWh (inkl. afgifter og moms), som cirka svarer til det nuværende gennemsnitlige prisniveau, samt for 1,20 kr/kWh. Beregningerne viser, at for det nuværende energiprisniveau, er de økonomisk optimale isoleringstykkelser 25 - 100 % større end de der netop opfylder kravene i bygningsreglementet. Forøgelsen er størst for ydervægge og mindst for loftkonstruktionen. For den høje energipris på 1,20 kr/kWh er forøgelsen 100 - 150 %. Det skal i denne forbindelse bemærkes, at isoleringstykkelsen svarende til samme totaløkonomi (neutral investering / en nuværdi på nul) som bygningsreglementets niveau er endnu større.

Energiforbruget til opvarmning for de to beregnede optimale scenarieløsninger for eksempelhuset reduceres årligt med ca. 15 og 22 kWh pr. m² opvarmet etageareal for tilfældet med skalmurede ydervægge med porebetonbagvæg. Meranlægsudgiften for disse optimale scenarieløsninger udgør i størrelsesordenen 20000 kr og 50000 kr svarende til ca. 2 og 5 % af den samlede byggeudgift. Det er således muligt for en beskedent merudgift at fremtidssikre et hus energimæssigt. Samlet set er der meget der peger i retning af, at det vil være hensigtsmæssigt med en stramning af kravene til isoleringsniveauet i det nye bygningsreglement.

Summary

Report R-042: Development of building envelope structures.

The present report concludes the work concerning the development of building envelope constructions, which can form the basis of new buildings with considerably less heat demand than in the present building regulations.

It has been made probable that it is technically possible to build exterior walls with less heat loss than those just complying with the requirements of the current building regulations with no considerably added use of material apart from insulation. In their structure many of the shown constructions resemble types that are used today, while others presuppose that one part of the wall is attached to the other part or possibly to the rafters.

It has been pointed out that line loss at the foundation is still considerable when the foundation, in the form of two lightweight aggregate concrete (LWAC) blocks (the upper 40 cm of the foundation), penetrates the insulation. Development of new components for the upper part of the foundation will therefore be desirable. One possible solution might be bigger elements of LWAC with suitable recesses filled with insulation material.

The contribution of the window rabbets to the heat loss is fairly small for the shown solutions since the insulation thickness of the window rabbet is relatively large. The comparatively large line losses that are calculated are mainly due to the two-dimensional heat flow caused by the joining between window and wall. The line loss can be reduced by development of window types that cause less two-dimensional heat flows and by aiming at a window placement around the middle of the window-rabbet-insulation – in other words, relatively far back in the façade compared to traditional Danish architectural tradition. However, the last-mentioned proposal has great architectural and aesthetical consequences. In addition, the solar energy transmission through the window will be reduced whereby the heat loss saving to some extent will be counterbalanced by a smaller solar heat contribution.

Calculations concerning the importance of heat capacity for a 100 m² single-family house have been made which confirm that by using heavy rather than light envelope constructions the reduction of the heating requirements is relatively small. Therefore optimisation of the insulation level can be carried out separately on the building components.

A method has been developed for the evaluation of the optimum insulation level for the individual building components of the building envelope based on life cycle cost analysis. The method is based on making up the changes in the operational energy costs / heating-costs and the cost of construction due to a change in the insulation thickness over a 30-year period. The life span of the primary parts of the building envelope is estimated at 100 years. It is assumed that the gross energy consumption that covers the heating requirements and the heat loss (determined by a simple calculation of degree days) changes concurrently with the change in the insulation thickness, which has been proved to be a reasonable approximation.

The life cycle cost analysis has been carried out for a test-house of about 100 m² and with two different energy price scenarios: 0.60 dkk/kWh (including taxes and VAT) which roughly corresponds to the present energy price level, and 1.20 dkk/kWh. Calculations show that based on the present energy price level the economically optimum insulation thicknesses are 25 to 100 % larger than those which just comply with the requirements of the building regulations. The increase is largest for exterior walls and smallest for the ceiling construction. The high energy price of 1,20 ddk/kWh results in an increase of 100 to 150 %. In this connexion it should be pointed out that the insulation thickness that corresponds to the same life cycle cost (neutral investment or a net present value of zero) as the level of the building regulations is even larger.

The energy consumption for heating concerning the two optimum scenario solutions for the test-house is reduced yearly by about 15 and 22 kWh per m² heated floor space in the case of the traditional cavity wall with aerated lightweight-concrete back-wall. The incremental cost of construction for these optimum scenario solutions amounts to 20,000 and 50,000 ddk, which corresponds to 2 and 5 % of the total construction cost. Consequently, it is possible to insure a house in the future as far as energy consumption is concerned. All in all there are many aspects which point to the fact that it would be appropriate to tighten the requirements concerning the level of insulation in the new building regulations.

Indholdsfortegnelse

Forord	1
Resumé	3
Summary	5
1 Introduktion	9
1.1 Baggrund	9
1.2 Formål	10
2 Baggrund for valg af løsninger	11
2.1 Tung væg (Bærende massiv væg/kombinationsvæg)	11
2.1.1 Traditionel tung væg (figur 1a)	11
2.1.2 Reducerede kuldebroer (figur 1b)	12
2.1.3 Øget isoleringstykkelse (figur 1c)	13
2.1.4 Vægge med én tung vange (figur 1d-e)	13
2.2 Let væg (bærende skelet)	14
2.2.1 Traditionel let væg (figur 2a)	14
2.2.2 Reducerede kuldebroer (figur 2b)	15
2.2.3 Dobbelt skelet (figur 2c)	16
2.2.4 Indvendigt bærende skelet (figur 2d)	16
2.2.5 Udvendigt bærende skelet (figur 2e-f)	16
2.3 Typedefinitioner	17
3 Baggrund for beskrivelse	19
3.1 Metode til optimering	19
3.2 Varmetekniske beregningsforudsætninger	24
3.3 Beskrivelsesprocedure	25
4 Beskrivelser af bygningsdele	26
4.1 Terrændæk	27
4.2 Loftkonstruktion	29
4.3 Tagfod	31
4.4 Vinduesfals	33
4.5 Fundamenter	34
4.5.1 Type F1, to vanger	35
4.5.2 Type F2, indvendig bærende vange	35
4.5.3 Type F3, udvendig bærende vange	36
4.6 Ydervægge	36
4.6.1 Type T1, to vanger	37
4.6.2 Type T2, indvendig bærende tung vange	44
4.6.3 Type T3, udvendig bærende tung vange	50
4.6.4 Type L2, indvendigt bærende skelet	51
4.6.5 Type L3, udvendigt bærende skelet	58

5	Varmekapacitetens betydning for opvarmningsbehov og indeklima ..	62
5.1	<i>Beregningsforudsætninger</i>	62
5.2	<i>Beregningsresultat mht. opvarmningsbehov</i>	65
5.3	<i>Beregningsresultater mht. indetemperatur</i>	67
5.4	<i>Validering af sammenhæng mellem transmissionstab og opvarmningsbehov</i>	68
6	Varmeteknisk sammenligning af forskellige vægtyper	70
7	Sammenfatning/konklusion	71
8	Fremtidigt arbejde	75
9	Referencer	77
	 Bilag A: Forudsætninger for fastsættelse af anlægspriser	 78
	Bilag B: Specificering af varmebelastninger og systemer i Tsbi3- beregningsmodel af eksempel-huset	83
	Bilag C: Grundlag for bestemmelse af CO₂-skyggepriser	86
	Bilag D: Eksempel-hus	91

1 Introduktion

1.1 Baggrund

I 1996 fremlagde den danske regering handlingsplanen Energi 21 [1], som beskriver hvorledes Danmark kan opfylde de krav til energibesparelser som FN's klimapanel anbefaler. Det fremgår at en væsentlig del af disse besparelser skal opnås gennem mindsket energiforbrug i nyt byggeri, og i den forbindelse er de vigtigste punkter i energiplanens målsætning følgende (iht. Energiforskningsprogram 1998, EFP 98 [2]):

- I følge Energi 21 skal der arbejdes for at nybyggeriets energibehov fra år 2005 reduceres med 33% i forhold til det nuværende niveau, der for etplans-huse årligt ligger på 250 MJ pr. m² svarende til ca. 70 kWh pr. m² opvarmet etageareal til rumopvarmning og ventilation. Forud for skærpelsen af kravene til nybyggeriet i år 2005, lægges der vægt på løsning af de nødvendige forsknings- og udviklingsopgaver i tilknytning til klimaskærm, ventilation, vinduesteknologi og installationer.
- CO₂-udledningen skal halveres inden år 2030. Nybyggeri og bestående byggeri skal samlet bidrage tilfredsstillende til at nå denne målsætning. Der lægges på langt sigt vægt på at understøtte den forskning der skal gøre dette muligt.

Nogle af de højt prioriterede indsatsområder i Energi 21 er ifølge EFP 98:

- Systematisk analyse og udvikling af klimaskærmens komponenter, ydervægge, solvægge, fundamentsdetaljer, gulvkonstruktioner og tagkonstruktioner til fremtidigt højisoleret byggeri.
- Tilvejebringelse af et anvendeligt projekteringsgrundlag for minimering af det samlede energiforbrug og de samlede energirelaterede miljøpåvirkninger ved nybyggeri, byfornyelse og renovering.

En følge af de øgede miljømæssige hensyn er, at der ud over energibesparende foranstaltninger lægges vægt på et miljøvenligt valg af materialer og konstruktionsform. Et redskab til at træffe de rigtige valg er livscyklusvurderinger, hvor energiforbrug og miljøbelastning for et givet produkt vurderes i hele dets levetid.

I en svenske undersøgelse af energianvendelsen i småhuse henholdsvis etagehuse ud fra et livscyklusperspektiv [11] vises det dog at energianvendelsen til driften (opvarmning, varmt brugsvand og el i husholdningen) udgør langt hovedparten (ca. 85 %) af det sam-

lede energiforbrug i husets levetid (sat til 50 år). Derfor ses der i dette projekt bort fra energiforbrug med relation til opførelse og bortskaffelse.

En konsekvens af de opstillede mål i energiplanen er, at kravene til bygningers varmeisoleringssevne bliver skærpet. Det er oplagt at de skærpede krav vil komme til udtryk i et nyt bygningsreglement, som sandsynligvis træder i kraft i år 2005. En af metoderne til at nedbringe behovet for tilført energi til boliger er bedre isolering af bygningen.

På baggrund af de stadig stigende krav til energibesparelser, er det nødvendigt med forskning og udvikling, således at det også i praksis er muligt at opfylde de krav der stilles fra politisk side. Dette projekt er en del af denne forskning og udvikling. Målet er at det skal føre til konkrete forslag til løsninger på de skærpede krav der lægges op til i Energi 21.

1.2 Formål

Nærværende projekt skal medvirke til realiseringen af Energi 21. Projektet har tre formål:

1. Systematisk analyse af klimaskærmskonstruktioners termiske egenskaber.
2. Udvikling af det videnskabelige grundlag for karakterisering og samlet vurdering samt optimering af klimaskærmskonstruktioners termiske egenskaber.
3. Udvikling af klimaskærmskonstruktioner, der kan danne grundlag for nybyggeri med 33 % mindre varmebehov end i BR95 [3].

I denne rapport behandles projektets tredje delmål, som vedrører udvikling af nye energirigtige klimaskærmskonstruktioner.

Ved udviklingen af løsninger lægges der særlig vægt på at reducere betydningen af kuldebroer, da de relativt set får en større betydning ved øgede isoleringstykkelser.

Der udarbejdes en beskrivelse af de forskellige udviklede bygningsdele, hvor der indledningsvis redegøres for formålet med den pågældende bygningsdel. Efterfølgende fremgår de overordnede løsningsprincipper og en egentlig beskrivelse af bygningsdelene. I forlængelse af beskrivelsen af hver enkelt løsningstype foretages en vurdering af dens egenskaber.

2 Baggrund for valg af løsninger

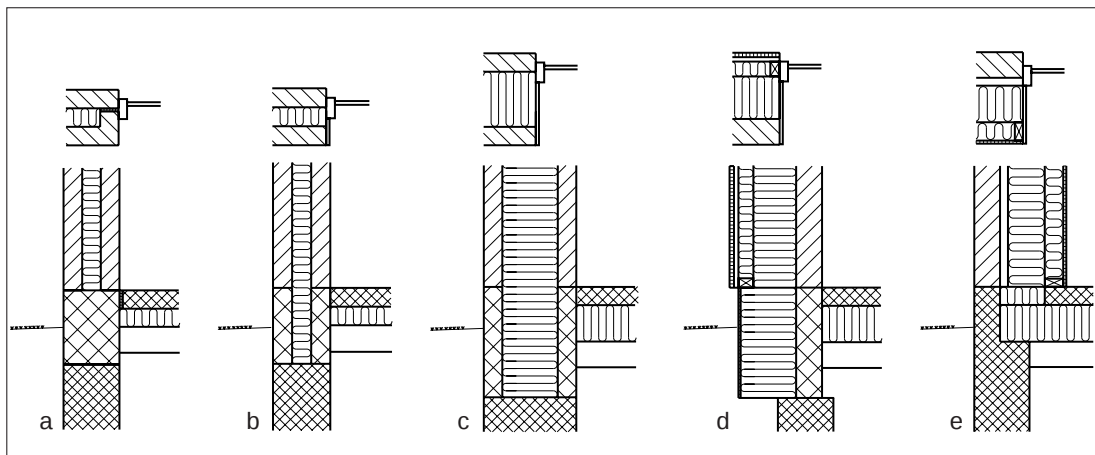
Udgangspunktet for udviklingsarbejdet er de traditionelle tunge og lette ydervægskonstruktioner. Arbejdet er udført i to parallelle forløb, hvilket medførte at udviklingen af de tunge og de lette konstruktioner forløb forskelligt. Det viste sig imidlertid at løsningerne får mange lighedspunkter, som det vil fremgå af det følgende. Udviklingsforløbene skildres ved at tage udgangspunkt i en typisk tung og en typisk let ydervægskonstruktion.

'Tung' og 'let' skal i høj grad forstås som 'massiv' og 'skelet', idet det ikke er væggenes masse der primært adskiller dem, men snarere om det bærende element er en massiv væg eller en skeletkonstruktion.

2.1 Tung væg (Bærende massiv væg/kombinationsvæg)

2.1.1 Traditionel tung væg (figur 1a)

Tunge konstruktioner bygget efter BR95 består typisk af en formur i tegl og en bærende bagmur i letbeton, beton eller tegl. U-værdi kravet på 0,30 kan normalt opfyldes med 125 mm isolering mellem for- og bagmur, forudsat at væggens masse er over 100 kg/m². Figur 1a viser typiske snit ved fundament og sidefals ved vindue.



Figur 1a-e. Forskellige tunge vægtyper.

Ved fundamentet anvendes normalt to skifter massive letklinkerblokke samt 10 mm kantisolering mellem fundament og betonplade. Kuldebroafbrydelsen ved vinduesfalsene er ofte kun 10 – 30 mm. Der er derfor mere eller mindre betydende kuldebroer ved såvel fundament som vinduestilslutning.

Transmissionstabet fra betonpladen til fundamentet kan reduceres ved at anbringe en del af isoleringen i terrændækket over betonpladen. Dette er specielt hensigtsmæssigt når betondækket hviler af på fundamentet og der derfor ikke kan anbringes kantisolering. Dette reducerer dog ikke tabet via bagvæggen og den praktiske udførelse af isoleringen over pladen vanskeliggøres af installationer og gulvunderlag. Samtidig hindrer isolering over betonpladen i realiteten udnyttelse af dens varmekapacitet til udjævning af døgnvariationer, således at dens effektive varmekapacitet bliver lille. Tilsvarende gælder for formuren, da dens masse ligger udenfor isoleringen.

2.1.2 Reducerede kuldebroer (figur 1b)

Ved udviklingen af forbedrede konstruktioner er det oplagt at fokusere på at nedbringe betydningen af kuldebroerne som vist på figur 1b.

Ved fundamentet kan bedre løsninger opnås ved i den øverste del at anvende to smalle letklinkerblokke med isolering imellem eller letklinkerblokke med indstøbt isoleringslag ('Termblokke'). Betonpladen kan da også hvile af på fundamentets indre vange uden nævneværdig forøgelse af linietabet.

Ved vinduestilslutningen kan kuldebroen mindskes ved at anvende et smallere falselement / mindre ommuring. Dette kræver at vinduet har en bredere karm eller at der anvendes vinduestilsætninger til at dække over den større isoleringstykkelse ved falsen.

For bagvægge af såvel porebeton som murværk har falselementet / ommuringen en statisk funktion som afstivning omkring vindueshullet. Denne afstivning skal derfor tilvejebringes på en anden måde.

Det er undersøgt om man kan forbinde formur og bagvæg på en måde så der kan overføres forskydningskræfter mellem dem og derved øge samvirkningen. Dette kan for eksempel ske med skråtstillede bindere. Det viser sig imidlertid at tvangskræfterne fra årsvariationerne i fugtindhold og temperatur giver ekstra lastbidrag af samme størrelse som den opnåede styrkeforøgelse, uanset hvilken samvirkningsgrad der vælges. (Graden af samvirken kan reguleres med antallet af bindere). Dette skyldes at det for uarmerede vægge ikke kan accepteres at der forekommer træk over hele tværsnittet af den ene vange.

Hvis man ønsker at fjerne falselementerne / ommuringen ved vinduesfalsen fuldstændigt syntes en egentlig armering af bagvæggen omkring vindueshullerne derfor at være den mest realistiske løsning.

2.1.3 Øget isoleringstykkelse (figur 1c)

Ønskes varmetabet yderligere reduceret vil det næste skridt naturligt være at øge isoleringstykkelsen, med en forøget samlet vægtykkelse til følge, se figur 1c. Linietabet ved fundamentet reduceres nogenlunde proportionalt med isoleringstykkelsen. Den primære, om end beskedne, kuldebro udgøres nu af letklinkerbetonen i fundamentets indre vange.

Ved vinduestilslutningen giver den øgede isoleringstykkelse mulighed for en betydelig kuldebroisolering ved vinduesfalsen samtidig med at man kan bibeholde falselementet / ommuringen. Den øgede isoleringstykkelse giver derfor ingen nye tekniske problemer. Den øgede afstand mellem vangerne er formentlig til gunst for bindernes funktion, da den øgede længde kompenseres af at drejningen som følge af temperaturforskelle mellem vangerne bliver mindre. Herved reduceres den excentricitet under trykpåvirkning, der ofte er dimensionsgivende for binderne. På samme måde som ovenfor er der behov for en bredere karm eller tilsætninger ved vinduet til at dække over den større isoleringstykkelse.

Den øgede isoleringstykkelse betyder at fundamentsbredden må øges tilsvarende, da såvel den bærende bagvæg som formuren skal understøttes. Dette påvirker naturligvis merprisen for at øge isoleringstykkelsen og den øgede betonmængde øger yderligere den i forvejen ret høje miljøbelastning fra fundamentet.

2.1.4 Vægge med én tung vange (figur 1d-e)

Den nødvendige fundamentbredde bestemmes af jordens bæreevne og er normalt kun 250 – 300 mm for sædvanlige ét-planshuse. Denne bredde er kun nødvendig for de nederste ca. 300 mm (fundamentsklodsen), ovenover denne kan fundamentet være smalle - hvis det er praktisk muligt.

Konstruktionstyper, hvor fundamentsbredden ikke øges med isoleringstykkelsen kan derfor være interessante. En sådan tung konstruktion med smalt fundament og næsten ubegrænset mulighed for at øge isoleringstykkelsen beskrives i det følgende, se figur 1d. Der anvendes en bærende bagvæg i tegl, beton eller letbeton, kombineret med en let regnskærm (f.eks. skærmtegl, træbeklædning eller eventuelt puds på isoleringen). Regnskærmen kan ophænges i spærene og/eller forbindes punktvis til den bærende bagmur.

Den udvendige isolering af fundamentet skal på den øvre del afdækkes med plader eller puds, eventuelt med fiberbeton sammenstøbt med isoleringen. Der er behov for indsamling af erfaringer med sådanne afdækninger.

Som alternativ kan tænkes anvendt en bærende forvæg i tegl, beton eller letbeton med isoleringen anbragt på indersiden som vist på figur 1e. Herved bevares muligheden for at have et smalt fundament, samtidig med at der er en meget effektiv kuldebroafbrydelse ved fundamentet, og soklen kan udgøres af fundamentets letklinkerblokke. I dette tilfælde kan den øverste del af fundamentet også udføres i beton uden nævneværdig forøgelse af linietabet.

Isoleringen og den indvendige beklædning må bæres af en skeletvæg, men der er formentlig behov for et ventileret hulrum mellem den bærende væg og isoleringen. Skal dampspærren yderligere anbringes beskyttet, altså trukket ca. 50 mm ind i konstruktionen bliver der tale om en ret kompliceret konstruktion, der vil være meget følsom for udførelsesfejl.

En bærende formur betyder at tagkonstruktionen vil bevæge sig lidt op og ned i forhold til de indvendige vægge over året. Det må overvejes om disse bevægelser er acceptable, specielt om den statisk vigtige loftskive kan forbindes forsvarligt til de indvendige vægge der skal fungere som afstivende overfor vandret vindlast.

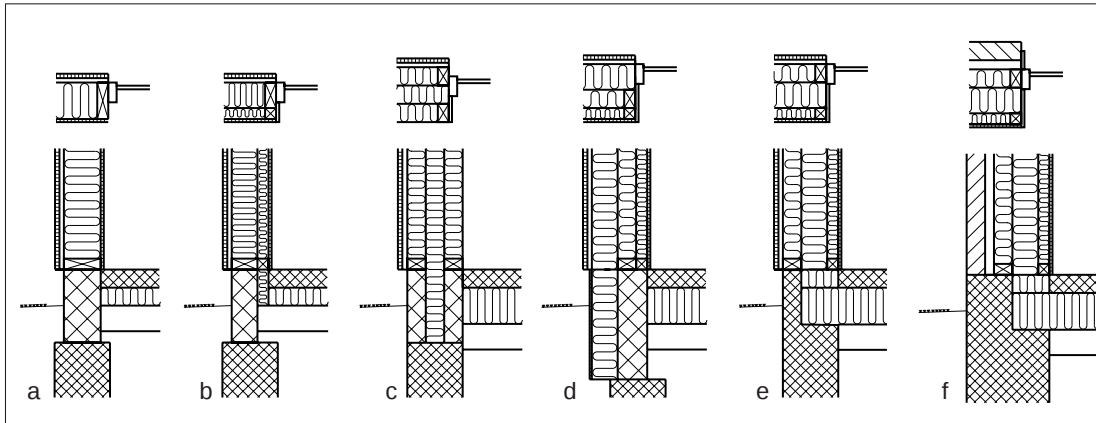
Endelig vil det ikke være muligt at lade betonpladen hvile af på fundamentet, ligesom typen ikke kan anvendes til huse i flere etager da dæk vil skulle gennembryde isoleringen.

Typen syntes alt i alt ikke at være attraktiv og behandles derfor ikke yderligere.

2.2 Let væg (bærende skelet)

2.2.1 Traditionel let væg (figur 2a)

I lette ydervægskonstruktioner anvendes der i dag typisk 200 mm isolering for at opfylde bygningsreglementernes U-værdikrav på 0,2. Der anvendes ofte gennemgående træstolper eller stålprofiler som vist på figur 2a. Lette vægge er kendetegnet ved forholdsvis lille samlet vægtykkelse i forhold til isoleringstykkelsen og lille effektiv varmekapacitet.



Figur 2a-f. Forskellige lette vægtyper.

De gennemgående stolper resulterer i nogen kuldebro. Bæreevnen af skelettet vil oftest være betydeligt større end nødvendigt da dimensionen bestemmes af isoleringstykkelsen og andre praktiske forhold. I den traditionelle udformning kan der også være en betydelig kuldebro ved fundamentet, der øverst normalt består af to skifter letklinkerblokke. Isolering ovenpå betonpladen vil dog reducere linietabet ved fundamentet betydeligt.

2.2.2 Reducerede kuldebroer (figur 2b)

En væsentlig bedre løsning med samme vægtykkelse som i figur 2a er vist i figur 2b. Skelettet er delt i en lidt smallere bærende stolpe, der stadig har rigelig bæreevne, og en indvendig lægtning. Herved kan dampspærren placeres beskyttet, ca. 50 mm inde i konstruktionen. For stålskeletløsninger kan kuldebroen ved stolperne reduceres ved at anvende krydslægtning, mens det har ringe betydning for træstolper om lægtningen går på tværs eller fores direkte på stolperne.

Statisk er stående pladebeklædning på lodret underlag væsentligt stivere i væggen plan end andre kombinationer. I stålskeletvægge som skal optage store skivekræfter kan der eventuelt placeres et pladelag mellem stolperne og lægtningen. Dette beskytter samtidig dampspærren ekstra godt.

Fundamentbredden kan også reduceres uden bæreevnmæssige problemer. Udover en mulig økonomisk besparelse giver det mulighed for at have nogen isolering på indersiden af fundamentet og dermed opnå en effektiv kuldebroafbrydelse, uden at skulle anbringe isolering over betonpladen og derved forhindre udnyttelse af dens varmekapacitet. Det vil ikke være hensigtsmæssigt at lade betonpladen hvile af på fundamentet når denne løsning anvendes.

2.2.3 Dobbelt skelet (figur 2c)

Som for de tunge konstruktioner er det naturligt som det næste skridt at øge isoleringstykkelser ved ønsket om at nedbringe transmissionstab. Det er da hensigtsmæssigt at opdele skeletkonstruktionen i en indre og en ydre del, adskilt af et (næsten) ubrudt isoleringslag, da der herved kan opnås en væsentlig reduktion af kuldebroerne i væggen. Væggen kan opbygges som to skeletter placeret på hvert sit fundament, men isoleringen i fundamentet vil da få en ret beskedent tykkelse i forhold til i væggen, se figur 2c.

Det er derfor af flere årsager ønskeligt at bevare det smalle fundament når isoleringstykkelser forøges. Der er to muligheder for dette. Den ene mulighed er at lade den indvendige del af skeletkonstruktionen være bærende, den anden at lade den udvendige del være det. De to muligheder indebærer begge fordele og ulemper.

2.2.4 Indvendigt bærende skelet (figur 2d)

Figur 2d viser en skeletvæg med indvendigt bærende skelet. Det indvendige og det udvendige skelet kan forbindes med f.eks. tynde plader eller punktvis forbindelser. Herved kan opnås en forskydningsstiv forbindelse, der sikrer væggen en meget stor stivhed. For at beskytte dampspærren må der opsættes lægter på indersiden. Den udvendige beklædning kan fastgøres til det udvendige skelet, men der er en risiko for blivende deformationer af forbindelserne mellem skeletdelene, afhængigt af fugtforholdene og forbindelsernes krybeegenskaber. Afdækningen af isoleringen ved soklen giver samme problemer som omtalt for en tung indvendig bærende væg (figur 1d).

I visse tilfælde vil det være muligt at anbringe dampspærren på den udvendige side af det indvendige skelet. Herved kan den indvendige lægtning spares. Løsningen vil minde meget om løsningen for en tung indvendig bærende væg (figur 1d).

2.2.5 Udvendigt bærende skelet (figur 2e-f)

En løsning med udvendigt bærende skelet er vist på figur 2e. Denne løsning giver mulighed for en særdeles effektiv afbrydelse af kuldebroen ved fundamentet. Samtidig vil den øverste smalle del af fundamentet kunne støbes i beton uden nævneværdigt bidrag til kuldebroen ved fundamentet, hvilket betyder at den lodrette forankring af huset for blandt andet vindsug på taget kan ske direkte. Med letklinkerblokke øverst i fundamentet er det nødvendigt at føre forankringer forbi disse ned til det støbte fundament.

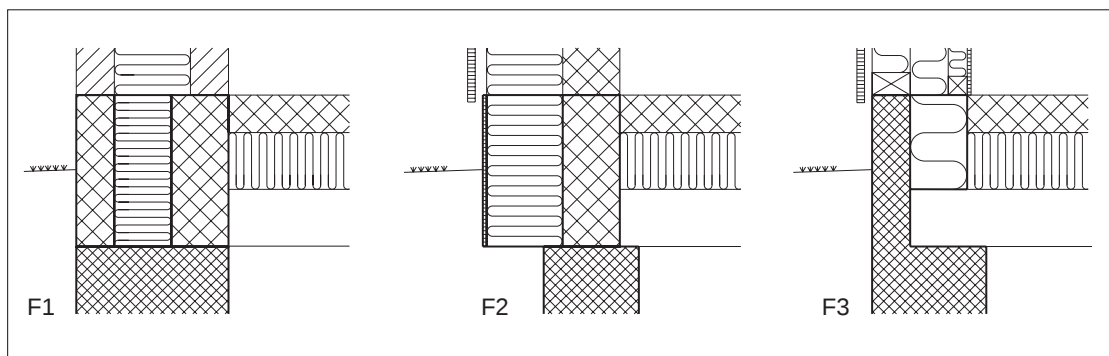
Konstruktionen kan udformes med to forbundne delskeletter som beskrevet ovenfor samt indvendig lægtning for at beskytte dampspærren. Den indvendige beklædning vil da hænge i det udvendige skelet. Dette kan blive problematisk hvis der ophænges tunge

reoler på væggen og der samtidigt optræder krybning i forbindelserne. Der er også mulighed / risiko for at en del af reollasten kan optages af spærene eller langs kanten af betondækket. Det må vurderes om spær / dæk kan tåle de påvirkninger de kan blive udsat for.

Udvendigt bærende skelet er ikke egnet til fleretagers huse, men det er muligt at skal-mure denne type uden forøgelse af kuldebroen ved fundamentet, dog eventuelt med en beskeden forøgelse af fundamentsbredden, se figur 2f.

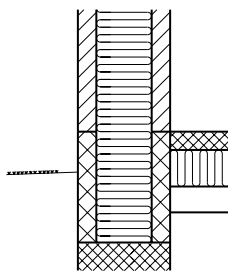
2.3 Typedefinitioner

Der ses af være tre hovedtyper af fundamenter, der er af interesse for fremtidens ydervægge. De tre typer, der betegnes F1 – F3, er vist i figur 3.



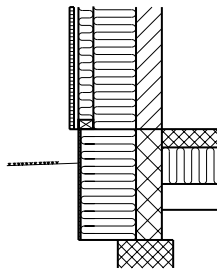
Figur 3. Tre typer fundamentsløsninger

Ydervæggene kan opdeles i fem hovedtyper, tre 'tunge' og to 'lette' (se figur 4). Typerne betegnes T1 – T3 henholdsvis L2 – L3 idet tallet refererer til den relevante fundamenterstype. Der ses at være mange lighedspunkter mellem T2 og L2 henholdsvis T3 og L3. (Der kunne også være en type L1, dvs. to skeletter, der begge er funderede som vist i figur 2c, men denne type er næppe attraktiv). Typerne er vist i figur 4 med resumé af fordele og ulemper.



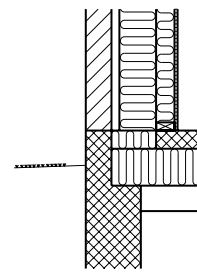
Tung dobbeltvæg, T1

- | | |
|--|---|
| <p>+</p> <p>Velkendt byggeteknik</p> <p>Robust</p> | <p>–</p> <p>Fundaments-bredde øges med isoleringstykkelse</p> <p>Del af massen uden for isoleringen</p> |
|--|---|



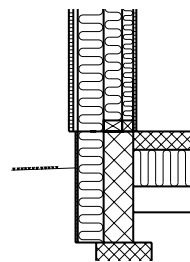
Tung bærende bagvæg, T2

- | | |
|--|---|
| <p>+</p> <p>Statisk simpel</p> <p>Mange mulige regnskærme</p> <p>Regnskæmens skelet kan evt. optage vindlast</p> | <p>–</p> <p>Problem med afdækning af sokkel</p> <p>Regnskærm skal hænge i tag eller bagvæg</p> <p>Vindtæt afdækning skal være meget diffusionsåben</p> <p>Vanskeligt at isætte døre</p> |
|--|---|



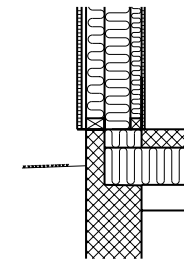
Tung bærende formur, T3

- | | |
|---|---|
| <p>+</p> <p>Minimalt linietaf ved fundamenet</p> <p>Robust yderside</p> | <p>–</p> <p>Vanskelig at placere dampspærre beskyttet</p> <p>Statisk kompliceret</p> <p>Indvendig vægdel inkl. reollast skal ophænges eller stå på kanten af dæk</p> <p>Dæk kan ikke hvile af på fundament</p> <p>Masse udenfor isoleringen</p> |
|---|---|



Indvendigt bærende skelet, L2

- | | |
|--|---|
| <p>+</p> <p>Statisk simpel</p> <p>Mange mulige regnskærme</p> <p>Regnskæmens skelet kan evt. optage vindlast</p> | <p>–</p> <p>Problem med afdækning af sokkel</p> <p>Regnskærm skal hænge i tag eller bagvæg</p> <p>Vanskeligt at isætte døre</p> <p>Ringe varmekapacitet</p> |
|--|---|



Udvendigt bærende skelet, L3

- | | |
|---|---|
| <p>+</p> <p>Minimalt linietaf ved fundamenet</p> <p>Kan skalmures uden at øge fundamentsbredden</p> | <p>–</p> <p>Beskyttelse af dampspærre kræver ekstra lægtelag</p> <p>Statisk kompliceret</p> <p>Indvendig vægdel inkl. reollast skal ophænges eller stå på kanten af dæk</p> <p>Dæk kan ikke hvile af på fundament</p> <p>Ringe varmekapacitet</p> |
|---|---|

Figur 4. Oversigt over hovedvægtyper med angivelse af fordele og ulemper.

3 Baggrund for beskrivelse

3.1 Metode til optimering

Da reduktionen af energibehovet på 33 % ikke er rationelt begrundet, bør det overvejes om det er det rette mål for fremtidige energibesparelser. Derfor vælges det at anlægge en totaløkonomisk synsvinkel til vurdering af hvilke isoleringsniveauer, der er de optimale for de udviklede løsningsforslag. Den totaløkonomiske vurdering indgår i beskrivelsen og vurderingen af de forskellige typer løsninger. Proceduren i optimeringen og sammenligningen er følgende:

- For hver enkelt af de udviklede bygningsdele undersøges en række forskellige isoleringstykkelser. U-værdierne for de enkelte isoleringsniveauer bestemmes, ligesom betydningen af de vigtigste kuldebroer bestemmes (i form af Ψ - og κ -værdier) på baggrund af detaljerede beregninger, udført vha. 2- og 3-dimensionale beregningsprogrammer [6].

Det skal bemærkes, at de europæiske standarder omkring beregning af bygningers varmetab foreskriver metoder, der i højere grad tager hensyn til kuldebroer end DS418 [4]. Disse krav udmøntes i et tillæg til DS418 om kuldebroer [5], der er en opdatering af de generelle regler for beregning af kuldebroer. Dette tillægs retningslinier for beregning af kuldebroer har naturligvis været anvendt ved de varmetekniske beregninger i nærværende rapport.

En kuldebros Ψ -værdi defineres i det kommende DS418-tillæg om kuldebroer som effekten af de 2-dimensionale varmestrømme. I dette projekt indeholder Ψ -værdien for vinduestilslutninger dog også den ekstra 1-dimensionale varmestrøm den aktuelle kuldebro giver anledning til (ift. en konstruktion uden vanger/ribber omkring vinduer). For stolper i skeletvægge defineres en κ -værdi, der dækker det varmetab profilet / stolpen forårsager sammenlignet med en tilsvarende væg uden stolper (altså inklusiv den 1-dimensionale varmestrøm). U-værdier og Ψ -værdier samt evt. κ -værdier angives som grundlæggende data for en bygningsdel, ligesom den effektive U-værdi for et typisk udsnit (dvs. hvor betydningen af kuldebroer er indregnet i U-værdien).

- Sammenhængen mellem energiforbrug til dækning af opvarmningsbehov og transmissionstab er vigtig for optimeringen. Forholdet mellem dem afhænger af vinduesareal og -orientering samt bygningens varmekapacitet. Det antages i det følgende at de to størrelser ændrer sig lige meget når isoleringstykkelsen ændres, hvilket ved et luftskifte som foreskrevet i BR95 er fundet at være en rimelig tilnærmelse (på baggrund af en række parametervariationer af isoleringstykkelserne i de forskellige byg-

ningsdele i eksempel-huset vist i bilag D - der henvises til [8]). Disse beregninger viser, at ændringer i transmissionstabet slår igennem med cirka en faktor 0,9 på opvarmningsbehovet (nettoenergiforbrug). Med en fyringsvirkningsgrad på 0,9 vil en given ændring i transmissionstabet give den samme ændring i energiforbrug til dækning af opvarmningsbehovet (bruttoenergiforbrug). På denne baggrund kan optimeringen af isoleringstykkelsen i de forskellige bygningsdele (ydervægge, gulv- og loftkonstruktion) foretages hver for sig ved en totaløkonomisk betragtning. Det vil sige at optimeringen foretages ud fra transmissionskoefficienter under antagelse af at der er en veldefineret sammenhæng mellem ændringer i transmissionstab og energiforbrug til opvarmning. Ved de enkelte isoleringsniveauer bestemmes altså den effektive transmissionskoefficient for den pågældende bygningsdel, hvorefter denne anvendes ved en simpel graddøgnsberegning (baseret på 20°C som indetemperatur) til fastlæggelse af opvarmningsbehovet. Det forudsættes at alle løbende udgifter til vedligehold, renhold m.v. er det samme ved alle isoleringsniveauer, så det for en given konstruktionstype kun er energiforbruget, som giver en økonomisk forskel.

- Anlægsudgifterne pr. m² bestemmes for de enkelte løsningstyper ved de forskellige isoleringsniveauer på basis af detaljerede priskalkulationer samt nettopriser angivet i V&S priser, Husbygning-netto [7]. Ved at anvende nettopriser antages det at usikkerheden omkring prissætningen kan nedbringes, idet disse formelt ikke påvirkes af markedsforhold. Erfaringsmæssigt ligger V&S priser for højt ift. virkeligheden, hvorfor V&S nettopriser kan antages at svarer omtrentligt til markedspriser. En nærmere redegørelse for hvordan anlægsudgifterne er bestemt, findes i bilag A. Ved de forskellige isoleringstykkelser antages ved såvel bestemmelse af anlægsomkostninger som bestemmelse af U-, Ψ - og κ -værdier at der kan anvendes de samme typer konstruktioner og at f.eks. stolpedimensioner ikke øges.
- På baggrund af ændringer i udgifter til opvarmning (driftsenergiudgifter) og anlægsudgifter ved ændret isoleringstykkelse bestemmes ved en nuværdibetragtning de samlede udgiftsændringer over en periode på 30 år. På grund af de store usikkerheder i forbindelse med fremtidig rente og energipriser er det her relevant at betragte flere forskellige scenarier. Når dette gøres ved samtlige undersøgte isoleringstykkelser kan der skabes overblik over hvilken isoleringstykkelse der for den enkelte løsningstype er den optimale ud fra en totaløkonomisk betragtning.

De mest betydende kuldebroer i et typisk parcelhus er ved fundament, vinduestilslutninger og tagfod. For lette konstruktioner kan endvidere den bærende træ- eller stålkonstruktion give anledning til betydelige kuldebroer. Af hensyn til behandlingen af hver bygningsdel for sig er det nødvendigt at fordele linietabet i samlingerne. Halvdelen

af linietafet ved tagfoden medregnes under væggen, den anden halvdel under loftkonstruktion. Da væg og fundament i øvrigt må behandles under ét og linietafet i væg-gulv samling mest afhænger af fundamentets udformning tillægges væggen hele linietafet for væg-gulv samlingen. Man kunne også udfra fordelingen ved tagfoden argumentere for at væg og gulv hver tillægges 50 % af linietafet ved fundament. Dette vil dog ikke ændre resultatet af de totaløkonomiske beregninger væsentligt.

Ved bestemmelse af størrelsen af de vigtigste kuldebroers bidrag til U-værdien anvendes eksempel-huset i bilag D til at kvantificere forholdet mellem linietafslængden og konstruktionsdelens areal. Der anvendes afrundede værdier, hvor der således er nået frem til følgende tillæg til U-værdien:

$$\begin{aligned} \text{Ydervæg:} & \quad 0,6 \text{ m/m}^2 \cdot \Psi_{\text{fundament}} + 0,75 \text{ m/m}^2 \cdot \Psi_{\text{vinduestilslutning}} + \\ & \quad 0,5 \cdot 0,6 \text{ m/m}^2 \cdot \Psi_{\text{tagfod}} + 1,6 \text{ m/m}^2 \cdot \kappa_{\text{stolpe}} \text{ (stolpeafs. på 0,6 m)} \\ \text{Loftkonstruktion:} & \quad 0,5 \cdot 0,5 \text{ m/m}^2 \cdot \Psi_{\text{tagfod}} \end{aligned}$$

Effekten af spærfod og murbindere medregnes i de relevante fladers U-værdi.

Ved beregning af linietaf for vinduestilslutninger er der kun regnet på sidefalsdetaljen. Denne detalje er dog ikke altid repræsentativ for tilslutninger i hele omkredsen af vinduer. Dette gælder specielt ydervægge med porebetonbagvæg. Derfor antages det, for enkelthedens skyld, at de 0,75 m vinduestilslutning pr. m² ydervæg, der er regnet med, multipliceret med sidefals-linietafet dækker hele varmetabet pga. samlinger omkring vinduer og døre.

Vægtningen af kuldebroernes betydning afhænger naturligvis af husets geometri. Haves et konkret hus hvor metoden skal anvendes, er det relativt nemt ud fra en anden vægtning at bestemme en ny effektiv U-værdi for det pågældende tilfælde.

I beskrivelsen indgår en række forskellige isoleringstykkelser for hhv. terrændæk, ydervægge og loftkonstruktion. Det betyder at isoleringsniveauerne for de forskellige bygningsdele kan kombineres på mange måder. I princippet skal der derfor foretages linietafberegninger for samtlige kombinationsmuligheder, men for at begrænse datamængden og beregningsarbejdet vælges det kun at beregne linietaf ved følgende kombinationer af isoleringsniveauer (se tabel 1).

Tabel 1. Kombinationer af isoleringsniveauer der beregnes linietaf.

Isoleringstykkelse, ydervæg mm	Isoleringstykkelse, terrændæk mm	Isoleringstykkelse, loftkonstruktion mm
125/200	100	300
250	150	350
300	200	400
350	250	450
400	300	500

Ved bestemmelse af driftsenergiudgifterne anvendes en nuværdibetragtning efter følgende princip:

$$\text{Driftsenergiudgifter} = \text{Transmissionstab} \cdot \text{Energipris} \cdot \text{Nuværdifaktor}$$

Transmissionstab (kWh pr. m²) bestemmes ud fra produktet af den effektive U-værdi og det årlige gradtimetal, hvor antallet af gradtimer er baseret på en indetemperatur på 20°C. Data for udetemperaturen i fyringssæsonen er hentet fra det danske design reference år, DRY [9]. Gradtimetallet for terrændæk er baseret på en jordtemperatur på 8°C. Opgjort i kKh (tusinde gradtimer) pr. år fås følgende gradtimeværdier for de enkelte klimaskærmsdele:

- Terrændæk: 65 kKh
- Vægge: 90 kKh
- Loft: 90 kKh + 15 % = 104 kKh

(forøgelsen skyldes udstråling til rummet i klart vejr, jf. DS418 [4])

Energiprisen antages at være konstant i beregningsperioden. Dette stemmer overens med Energistyrelsens prognoser hvor der antages at ske en fordobling af energiprisen (ekskl. afgifter og moms) frem til år 2005, hvorefter den antages at blive konstant (i hvert fald frem til år 2030). Ud fra nuværende forbrugerpriser for de væsentligste opvarmningsformer (fjernvarme, private olie- og gasfyr samt elvarme) og deres andel af det samlede opvarmningsforbrug kan beregnes en gennemsnitlig forbrugerpris (dvs. inkl. afgifter og moms) på ca. 0,55 kr/kWh. Samlet set må energiprisen 0,60 kr/kWh derfor betragtes som et rimeligt bud på et energiprisniveau i beregningsperioden. Da energiprisen er afgørende for resultatet af de økonomiske beregninger, betragtes også et scenarie hvor energiprisen er fordoblet, svarende til 1,20 kr/kWh.

Nuværdifaktoren f for en række årlige konstante beløb afhænger af den reale kalkulationsrente r_r og beregningsperioden n , og sammenhængen er:

$$f = (1 - (1 + r_r)^{-n}) / r_r$$

Der regnes med en real kalkulationsrente (realrente efter skat) på 2.5 % baseret på en effektiv, skattekorrigeret rente på 5 % og en inflation på 2.5 %. Realrenten efter skat har siden 1990 ligget konstant mellem 2 og 3 %. Der henvises til rapporten: Realisering af Lavenergihuse [17], for en nærmere redegørelse for forudsætningerne bag den valgte realrente.

Levetiden for klimaskærmen sættes til 100 år, hvilket tilnærmelsesvis vil gælde for isoleringen og det bærende element i klimaskærmen. Det er dog valgt at betragte en 30 års beregningsperiode. Denne tidshorisont svarer til den normale låneperiode ved byggeinvesteringer. Derudover vil den beregningsmæssige usikkerhed stige betydeligt ved længere perioder og desuden har driftsenergiudgifter langt ude i fremtiden kun ringe indflydelse på nuværdien.

Som det fremgår ovenfor er produktet af driftsenergipris og nuværdifaktor afgørende for størrelsen af driftsenergiudgifterne. Det vælges at skildre to scenarier (to forskellige energipriser betragtes), hvor der gælder sammenhænge mellem energipris, realrente og beregningsperiode som anført i tabel 2.

Tabel 2. Sammenhæng mellem energipris, rente og beregningsperiode.

Scenarie	Energipris Kr/kWh	Realrente r_r %	Beregnings- periode, n år	Nuværdifaktor f	Energipris · nuværdifaktor
1	0,60	2,5	30	21	12,6
2	1,20	2,5	30	21	25,2

Idet levetiden af investering i bedre isolerede klimaskærmskonstruktioner er større end den 30 års beregningsperiode, regnes der med en restværdi (scrapværdi) ved beregningsperiodens udløb. Der regnes med lineær afskrivning, hvilket betyder at 30 % af investeringen regnes afskrevet over beregningsperioden, og at restværdien er 70 % af investeringen. Nuværdien for enkeltbeløb afhænger af den reale kalkulationsrente r_r , enkeltbeløbets størrelse a_i og det år (i) enkeltbeløbet afholdes, og sammenhængen er:

$$\text{Nuværdi} = a_i / (1 + r_r)^i$$

Ud fra ovenstående fås:

$$\text{Nuværdi af restværdi efter 30 år} = (0,70 \cdot a_{30}) / (1+0,025)^{30} = 0,334 \cdot a_{30}$$

De totaløkonomiske beregninger præsenteres for hver bygningsdel i et oversigtsskema, der bl.a. indeholder oplysning om energibesparelse og meranlægspris ift. BR95-isoleringsniveau for forskellige isoleringstykkelser. Deruden er nuværdien af restværdi af merpris efter 30 år og nuværdi af energibesparelse over 30 år angivet. Besparelsen over 30 år er herefter opgjort. Den isoleringstykkelse, der giver den største besparelse, er den optimale, og er markeret med fed skrift. Merudgiften for de øvrige isoleringstykkelser er også anført. Herudfra kan man aflæse merudgiften ved andre isoleringstykkelser end den optimale. Hvis optimum er større end BR95-niveau, kan man finde den omtrentlige isoleringstykkelse, der giver samme totaløkonomi som BR95. Denne isoleringstykkelse vil være større end den optimale og koster totaløkonomisk set det samme som dagens isoleringsniveau (nuværdi = 0). Man kunne kalde denne tykkelse for isoleringstykkelsen svarende til neutral investering.

I den økonomiske oversigt er også anført en simpel tilbagebetalingstid og en CO₂-skyggepris. Grundlag for bestemmelse af CO₂-skyggepriser er omtalt i bilag C.

3.2 Varmetekniske beregningsforudsætninger

De varmetekniske beregninger er foretaget ved brug af værdier for varmeledningsevnen som anført i nedenstående tabel 3.

Tabel 3. Materialedata.

Materiale	Varmeledningsevne [W/mK]
Stål	60
Rustfrit stål	17
Jord	2
Beton, uarmeret	1,6
Tegl, udv., 1800 kg/m ³	0,78
Tegl, indv., 1800 kg/m ³	0,68
Letklinkerbeton, 1200 kg/m ³	0,45
Letklinkerblokke, 600 kg/m ³	0,26 ¹⁾
Porebeton, 645 kg/m ³	0,20
Gipsplader, 900 kg/m ³	0,20
Træ, 600 kg/m ³	0,15
Masonit	0,10
Løse letklinker	0,090 ²⁾
Isolering (kl.39), 30 kg/m ³	0,039

1) Værdien er et gennemsnit af skalaværdier for betegnelserne 'mod jord' og 'udvendigt i mur', som anført i varmeisoleringskontrollens (VIK) produktoversigt fra marts 1999.

2) Værdien er et gennemsnit af skalaværdier for betegnelserne 'kapillarbrydende lag' og 'tør konstruktion', som anført i VIK's produktoversigt.

3.3 Beskrivelsesprocedure

I kapitel 4 gennemgås et antal konstruktioner i flere detaljer. For hver konstruktionsdel beskrives først funktionskravene til den pågældende del. Derefter karakteriseres den pågældende konstruktion kort og opbygningen beskrives lag for lag, inklusive forskellige varianter. Der defineres også egentlige undertyper, der ikke blot kan opfattes som varianter.

Den statiske virkemåde beskrives, og der gives eksempler på dimensioner, der normalt vil være tilstrækkelige til typiske etplanshuse.

De varmetekniske forhold beskrives med vægt på kuldebroernes betydning og muligheden for at udnytte varmeakkumuleringsevnen af tunge materialer. For en typisk udformning af den pågældende bygningsdel er beregnet U-værdier og linietaf.

Forhold omkring byggeteknik beskrives. Dette omfatter dels mulighederne for den praktiske udførelse af konstruktionstypen, dels eventuelle særlige krav af hensyn til risiko for fugtophobning i væggen.

4 Beskrivelser af bygningsdele

I dette kapitel beskrives opbygningen og egenskaberne ved de enkelte bygningsdele. Først beskrives de bygningsdele som forudsættes givet, hvorefter de forskellige vægtyper gennemgås i detaljer, inklusive deres tilslutning til de øvrige bygningsdele.

Behandlingen af væggene omfatter beskrivelse af opbygningen, statiske forhold, og byggeteknik samt beregninger vedrørende varmetab og økonomi. Også afsnittene vedrørende terrændæk og loftkonstruktion behandler varmetab og økonomi med henblik på at anskueliggøre de økonomiske konsekvenser af at ændre isoleringstykkelserne.

Ved udformningen af de forskellige bygningsdele er der lagt vægt på de relevante funktionskrav er opfyldt. De overordnede funktionskrav er:

- Optage naturlaster, nyttelaster og egenlaster
- Reducere varmetab til luft og jord.
- Hindre skadelig indtrængning af regnvand og fugt
- Hindre adgang for insekter og skadedyr
- Begrænse udbredelsen af brand
- Være lyddæmpende

De mere specifikke krav er omtalt i forbindelse med hver enkelt bygningsdel.

I forbindelse med lastoptagelse gælder at det også skal sikres at lasterne ikke forårsager uacceptable deformationer. Dette er omtalt nærmere for de konstruktionsdele, hvor det ikke uden videre kan anses for opfyldt.

Et lille varmetab forudsætter altid, foruden et passende isoleringsniveau, at kuldebroerne er reduceret mest muligt samt at isoleringen ikke gennemblæses. Det sidste sikres dels af en vindafdækning på ydersiden af isoleringen, dels af et lufttæt lag på indersiden. Lufttætheden af skeletkonstruktioner er i det følgende sikret med en beskyttet dampspærre, se også side 12. Konstruktioner med massive bagvægge anses for tilstrækkeligt lufttætte i sig selv. Lufttæthed er ikke beskrevet specifikt for de enkelte konstruktioner.

Det samme gælder opfyldelse af brand- og lyd krav, idet alle de behandlede konstruktions typer vil kunne opfylde de relevante krav med normale beklædningstyper.

4.1 Terrændæk

Terrændækkets formål er at

- overføre lasten på gulvet til jorden
- reducere varmestrømmen fra huset til jorden
- hindre indtrængning af fugt (og radon) fra jorden

Desuden skal terrændækket ofte optage laster fra indvendige vægge uden selvstændigt fundament, der medvirker til at føre den vandrette vindlast ned til jorden.

Terrændækket består af tre primære dele: en trykfordelende plade, et isoleringslag og et kapillarbrydende lag. Dertil kommer en gulvbelægning.

Det kapillarbrydende lag kan udgøre et selvstændigt lag, typisk 150 mm sten, eller kombineres med isoleringslaget efter sædvanlig praksis. Isoleringen kan f.eks. være trykfast mineraluld, polystyrenskum eller løse letklinker, men valget har kun forsvindende betydning for varmetabet og kuldebroerne. Med stigende isoleringstykkelse er det dog væsentligt at sikre sig at sammentrykningen af isoleringen ikke bliver for stor, heller ikke på lang sigt.

Den trykfordelende plade består normalt af ca. 100 mm beton med en let armering, der udstøbes ovenpå isoleringen. Den trykfordelende plade kan udføres på andre måder, men det vil ikke have nævneværdig indflydelse på varmetabet. Projektets resultater kan derfor også anvendes for andre løsninger, herunder løsninger der er mindre CO₂-belastende end betonpladen. Sådanne løsninger er ikke undersøgt.

Tykkelsen af gulvbelægningen (f.eks. klinkegulv eller trægulv på strøer), har betydning for placeringen af pladen i højden, hvilket påvirker linietabet ved fundamentet i beskednen grad. I visse konstruktioner kan noget af isoleringen med fordel placeres mellem betonpladen og trægulvet, idet linietabet ved fundamentet herved reduceres.

Valget af materialer har for fastholdt U-værdi ringe indflydelse på de forhold der betragtes, herunder linietabet ved fundamentet. I det følgende betragtes derfor kun følgende konstruktion:

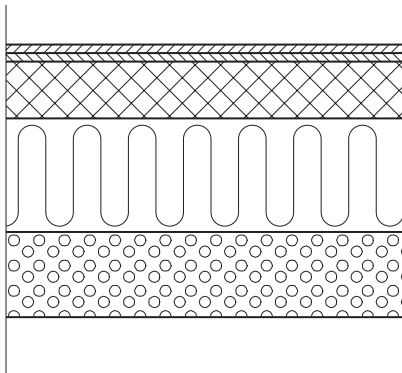
Klinker lagt i mørtel direkte på betonpladen

100 mm beton 15 med armeringsnet af 5 mm kamstål pr. 150 mm

100 – 300 mm isolering

150 mm løse letklinker (kapillarbrydende lag)

Konstruktionen er vist i figur 5.



Figur 5. Terrændækkonstruktion.

Varmeisolering og økonomi

Idet der iht. DS418 regnes med en jordisolans på 1,5 m²K/W fås for de forskellige isole-ringstykkelse U-værdier som anført i tabel 4.

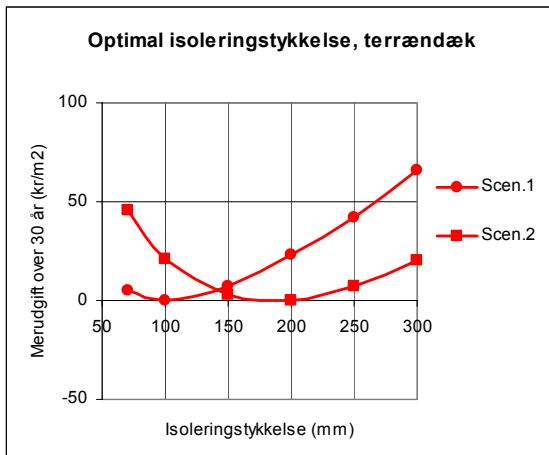
Tabel 4. U-værdier for forskellige isoleringsniveauer i terrændæk.

Type	Navn	Isol. tyk. mm	U W/m ² K
-	Terrændæk	70 ¹⁾	0,199
		100	0,173
		150	0,142
		200	0,120
		250	0,104
		300	0,092

1) 70 mm isolering svarer til U-værdikrav i BR95 (0,20).

Tabel 5. Økonomisk oversigt for terrændæk.

Isol. tyk. mm	Energi- besparelse kWh/m ² /år	Mer- anlægs- pris kr/m ²	Nuværdi af restværdi af merpris efter 30 år / nuværdi af energibe- sparelse i 30 år kr/m ²		Besparelse over 30 år / merudgift ift. største besparelse kr/m ²		Simpel tilbage- beta- lingstid år	CO ₂ - skyggepris kr/ton-CO ₂
			Scen.1	Scen.2	Scen.1	Scen.2	Sc.1/Sc.2	
70	0,0	0	0/0	0/0	0/5	0/46	-	0
100	1,7	25	8/21	8/42	5/0	26/21	25/12	4020
150	3,7	74	25/47	25/93	-3/7	44/3	33/17	6010
200	5,1	124	41/64	41/129	-18/23	46/0	40/20	7920
250	6,2	173	58/78	58/155	-38/42	40/7	47/23	10161
300	7,0	223	74/87	74/175	-61/66	26/20	53/27	12388



Figur 6. Merudgift ift. største besparelse som funktion af isoleringstykkelse for terrændæk.

Der er ikke regnet med gulvvarme, hvilket alt andet lige vil forrykke optimalt isoleringsniveau opad på grund af højere temperatur og dermed større varmetab.

4.2 Loftkonstruktion

Loftkonstruktionens formål er at

- optage vandrette laster og ved skivevirkning videreføre dem til de afstivende vægge
- optage nyttelast på oversiden (specielt ved udnyttet tagrum)
- reducere varmestrømmen til tagrummet.

Loftkonstruktionen består af en indvendig beklædning, isolering og et bærende system. I det følgende antages det primære bærende system at udgøres af træspær. Der kan naturligvis også anvendes dækelementer af beton eller letbeton. Den konkrete udformning har kun mindre betydning for varmetabet, såvel gennem fladen som ved tilslutningen til facaden, men konstruktionshøjden bliver større med dækelementer. En anden mulighed er træbaserede elementer.

Loftkonstruktionen forudsættes opbygget som følger:

13 mm gipsplade fastgjort langs alle kanter pr. 200 mm og pr. 400 mm ved mellemunderstøtninger. Lasker indlægges ved stød i gipspladerne.

45 × 45 mm lægter pr. 400 mm som forskalling, fastgjort til 50 x 100 mm spærfødder med 1 søm 38/100

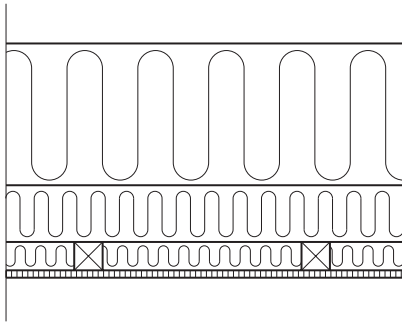
45 mm isolering

Dampspærre

100 mm isolering mellem spærfødder

Øvrige isolering over spærfødder

Konstruktionen er vist i figur 7.



Figur 7. Loftkonstruktion

Skivevirkningen sikres i dette eksempel ved hjælp af gipsplader og lægter. Den kunne også opnås på mange andre måder, men indflydelsen på varmetabene vil være forsvindende.

Varmeisolering og økonomi

Tabel 6. Oversigt over beregnede U- og ψ -værdier samt effektiv U-værdi.

Type	Navn	Isol. tyk. mm	U W/m ² K	$\Psi_{\text{spærfod}}^{1)}$ W/mK	$\Psi_{\text{tagfod}}^{3)}$ W/mK	U _{effektiv} W/m ² K
-	Loft- konstruktion	250 ²⁾	0,144	0,009	0,039	0,163
		300	0,122	0,006	0,036	0,137
		350	0,105	0,005	0,034	0,119
		400	0,093	0,004	0,032	0,105
		450	0,083	0,003	0,031	0,094
		500	0,075	0,002	0,030	0,085
		550	0,068	0,002	0,030	0,078
		600	0,063	0,002	0,030	0,073

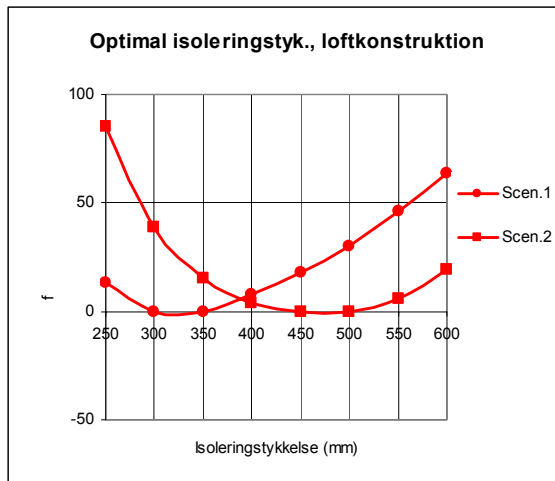
1) Der regnes med 1 m spærfod (50 x 100 mm) pr. m² loftkonstruktion

2) 250 mm isolering svarer til U-værdi-krav i BR95 (0,15), når effekt af spærfod (men ikke tagfod) medregnes.

3) Er beregnet for en vægtype T1a (bagvæg af porebeton).

Tabel 7. Økonomisk oversigt for loftkonstruktion.

Isol. tyk. mm	Energi- besparelse kWh/m ² /år	Mer- anlægs- pris kr/m ²	Nuværdi af restværdi af merpris efter 30 år / nuværdi af energibesparelse i 30 år kr/m ²		Besparelse over 30 år / merudgift ift. største besparelse kr/m ²		Simpel tilbage- beta- lingstid år	CO ₂ - skyggepris kr/ton-CO ₂
			Scen.1	Scen.2	Scen.1	Scen.2	Sc.1/Sc.2	
250	0,0	0	0/0	0/0	0/13	0/85	-	0
300	2,7	31	10/34	10/67	13/0	47/39	19/10	3040
350	4,6	68	23/58	23/116	13/0	70/15	25/12	4326
400	6,0	105	35/75	35/151	5/8	81/4	29/15	5453
450	7,2	143	48/90	48/180	-5/18	85/0	33/17	6549
500	8,1	179	60/102	60/204	-17/30	85/0	37/18	7841
550	8,9	216	72/111	72/223	-33/46	79/6	41/20	9266
600	9,4	254	85/118	85/236	-51/64	67/19	45/23	10961


Figur 8. Merudgift ift. største besparelse som funktion af isoleringstykelse for loftkonstruktion.

4.3 Tagfod

Tagfodens formål er at

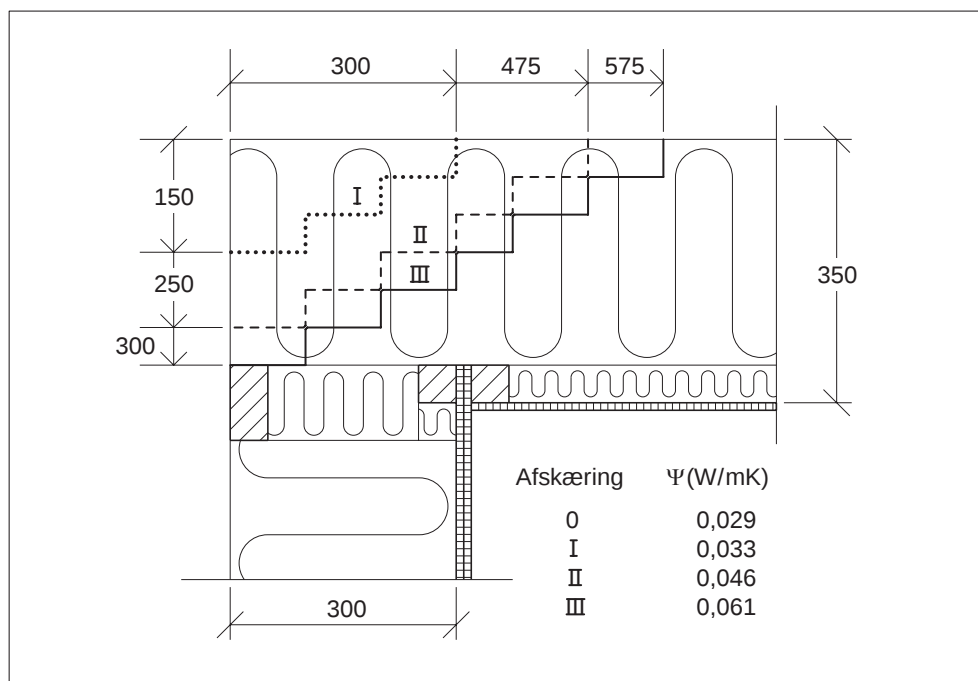
- føre laster fra tag og loftskive til ydervæggen
- hindre indtrængen af regnvand og fugt
- sikre ventilation af tagkonstruktion
- hindre adgang for skadedyr
- reducere linietabet

Tagfoden forudsættes udført traditionelt med træspær, der hviler af på en rem på væggen. Spærafstanden er sat til 1000 mm og spærfoden, der gennembyder isoleringen antages at have dimensionen 50 × 100 mm. Linietabet afhænger af om og hvor meget iso-

leringstykkelsen er reduceret ved tagfoden. Det forudsættes i de følgende afsnit at tykkelsen ikke er reduceret.

Betydningen af tre forskellige afskæringer/reduceringer af isoleringstykkelsen i tagfoden er undersøgt - se figur 9. Beregningerne er foretaget for en let væg (type L3) ved isoleringsniveauet 300 mm. De tre forskellige typer afskæringer forøger varmetabet med i størrelsesordenen 0,4 %, 1,5 % og 2,5 % ift. det samlede transmissionstab for hele eksempel-huset i bilag D (ekskl. vinduer).

Specielt for skeletkonstruktioner vil remme og lignende reducere isoleringstykkelsen ved toppen af væggen og derved øge linietafet. Denne effekt er medtaget i beregningerne for de konkrete vægløsninger.



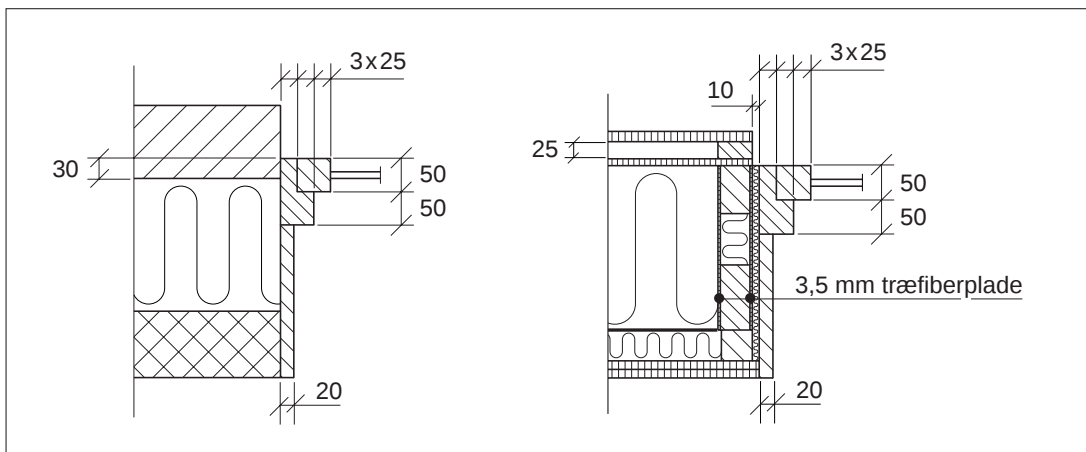
Figur 9. Forskellige afskæringer af tagfodsisolering.

4.4 Vinduesfals

Vinduesfalsens formål er at

- hindre indtrængen af regnvand ved fugen
- hindre rumluft i at trænge ind i væggen
- reducere linietafet
- overføre vindlasten på vinduet til væggen

I det følgende forudsættes vinduerne at være oplukkelige trævinduer med tolags termoruder. Vinduets resulterende U-værdi er sat til $1,5 \text{ W/m}^2\text{K}$. Placeringen i henholdsvis en muret og en let facade er vist i figur 10.



Figur 10. Placering af vindue i en muret facade og en let facade.

Linietafet afhænger dels af hvor god kuldebroafbrydelsen ved vinduesfalsen er, dels af vinduets placering i forhold til isoleringen i vinduesfalsen.

For den valgte type vindue vil linietafet ikke kunne komme under de i tabel 8 angivne værdier (sidste kolonne). En vægkonstruktion uden vanger omkring vindueshullet er undersøgt (vægtype T1b, bagvæg af letklinkerbeton). Tabellen viser linietafet for en idealplacering ift. isoleringen (midt for isoleringslaget) for isoleringstykkelser på 125-400 mm samt linietafets andel i procent af U_{effektiv} for væggen, der er anført i parentes. Der er regnet på eksempel-huset, og med et forhold mellem antal meter fals og m^2 væg på $0,75 \text{ m/m}^2$. Til sammenligning er anført linietafet for en normalplacering (se figur 10).

En reduktion i linietafet kræver anvendelse af vinduer med flere lag glas og større afstand således at tykkelsen svarer bedre til isoleringstykkelsen.

Tabel 8. Linietab ved vinduesfals for en normal- og idealplacering af vindue i en vægtype T1b (bagvæg af letklinkerbeton). Linietabets andel (%) af U_{effektiv} er anført i parentes.

Isol. Tyk. Mm	$\Psi_{\text{vind.tilsl.}}$ normal placering W/mK	$\Psi_{\text{vind.tilsl.}}$ idealplacering W/mK
125	0,020 (4)	0,002 (~0)
200	0,027 (7)	0,003 (1)
250	0,032 (9)	0,005 (2)
300	0,035 (12)	0,006 (2)
350	0,039 (14)	0,008 (3)
400	0,042 (16)	0,009 (4)

4.5 Fundamenter

Fundamentets formål er at

- føre nedadrettet last fra ydervæggen til jorden
- optage opadrettede kræfter (vindsug på taget)
- føre vandret forskydningslast på langs og på tværs til jorden
- hindre indtrængning af fugt og regnvand
- hindre adgang for skadedyr
- reducere varmemstrømmen fra huset til omgivelserne

Desuden vil fundamentet ofte skulle danne vederlag for terrændækkets betonplade eller egentlige dæk ved kælder eller krybekælder. Dæk, der hviler af på fundamentet behandles ikke nærmere i det følgende.

Fundamentet består af en fundamentsklods af beton, ført til frostfri dybde, hvis bredde afgøres af lasten fra huset og jordens bæreevne. For normale funderingsforhold vil en fundamentsbredde på 250 mm være tilstrækkeligt for mindre huse. Lidt større og tungere huse vil ofte kræve 300 – 350 mm. Bredden vil i praksis ofte være bestemt af ydervæggens bredde i stedet for bæreevnen.

Betonen afløses i den øvre del af fundamentet ofte af letklinkerblokke og egentlig isolering for at reducere varmetabet. For 150 mm brede letklinkerblokke vil forskydningslasterne ikke være dimensionsgivende i praksis, ligesom trykstyrken af letklinkerblokkene ikke vil være det for huse i 2-3 etager. Forankring for opadrettede kræfter kan normalt, ligesom i dag, ikke ske i letklinkerblokkene, men må ske i selve fundamentsklodsen. Forankringen skal derfor føres gennem letlinkerskifterne eller isoleringen.

De tre fundamentstyper behandlet nedenfor er illustreret i figur 3, side 17.

4.5.1 Type F1, to vanger

Fundamentets bredde skal svarer til bredden af ydrevæggen og er derfor normalt væsentligt bredere end nødvendigt af styrkemæssige grunde. Den øvre del kan opbygges af to smalle letklinkerblokke hvorimellem der placeres isolering, eller der kan anvendes 'termblokke', to vanger af letklinkerbeton støbt omkring en kerne af polystyrenskum.

Termblokke eksistere i dag kun i 350 mm bredde, hvoraf 70 mm er isolering. Vangerne er hver 140 mm brede, men kunne være smallere uden bæreevneproblemer, f.eks. 125 mm. (Der markedsføres nu også 390 mm termblokke med 150 mm vanger.)

Isoleringen i fundamentets øvre del er beskyttet af den ydre letklinkervange og ydersiden kan pudses som fugtsikring, på samme måde som i dag.

Varmestrømmen ned gennem den indre vange udgør det væsentligste bidrag til linietabet. Dette kan reduceres ved at anvende flere skifter letklinkerblokke.

Type F1 antages opbygget af:

To skifter letklinkerblokke hver bestående af 100 mm blok udvendigt og 150 mm blok indvendigt. Afstand afpasses med væggen ovenover, hulrummet udfyldes med isolering og der indlægges bindere over hvert skifte.

Fundamentsklods med bredde som væggen.

Hvis betonpladen hviler af på fundamentet er der behov for at føre letklinkerdelen længere ned under jordoverfladen hvis linietabet skal være sammenligneligt.

4.5.2 Type F2, indvendig bærende vange

Bredden af de bærende dele af fundamentet kan tilpasses styrkekravene, med skyldig hensyntagen til at konstruktionen skal være robust, også i byggeperioden.

Isoleringen anbringes udenpå den bærende del af fundamentet og skal derfor beskyttes mod nedbrydning, herunder skadedyr.

Varmestrømmen ned gennem letklinkerblokkene udgør også her den primære årsag til linietabet, der vil kunne reduceres ved at anvende flere skifter blokke. Man kan også reducere varmemestrømmen ved at anvende letklinkerblokke med lavere varmelednings-ejne. Beregninger for det ideelle tilfælde, hvor de to skifter letklinkerblokke har samme varmeledningsevne som isoleringen, viser at for vægtype T2a (300 mm isolering) reduceres linietabet fra 0,115 W/mK til 0,057 W/mK. Linietabet reduceres altså med 50 %.

Type F2 antages opbygget af:

Udvendig isolering, trykfast, beskyttet af f.eks. puds eller fiberbeton

To skifter 150 mm letklinkerblokke

Fundamentsklods med bredde afhængig af jordens styrkeforhold

4.5.3 Type F3, udvendig bærende vange

Bredden af de bærende dele af fundamentet kan igen tilpasses styrkekravene. Isoleringen er godt beskyttet af letklinkerblokkene.

Linietabet er meget nær det optimale da hele den bærende del af fundamentet er placeret udenfor isoleringen. Dette betyder også at den øvre del kan støbes i beton hvis det ønskes. Dette letter forankringen af vægge og tag for vindkræfter, da trækforbindelser kan fastgøres direkte. Den varmestrømsmæssige effekt af at udføre den øvre del i beton, er beregnet til et linietastillæg i størrelsesordenen 0,002 W/mK (for vægtype L3 ved 300 mm isolering) eller svarende til en 0,2 % forøgelse af det samlede transmissionstab for eksempel-huset (ekskl. vinduer).

Type F3 antages opbygget af:

To skifter 150 mm letklinkerblokke

Indvendig isolering i kontakt med isolering i terrændæk og væg

Fundamentsklods med bredde afhængig af jordens styrkeforhold

4.6 Ydervægge

Ydervæggens formål er at

- være regnskærm
- beskytte mod vind
- reducere varmestrømmen til omgivelserne
- føre lodret last fra f.eks. tag til fundamentet
- føre vindlast vinkelret på væggen plan til dens understøtninger (fundament, loftskive og tværgående vægge)
- føre vandrette laster i væggen plan (fra vind) ned til fundamentet

Desuden skal væggen kunne optage tilfældige vandrette påvirkninger fra begge sider samt laster fra reoler mv. ophængt i væggen uden uacceptable deformationer. I følge SBI's ydeevnebeskrivelse [16] bør en vandret linielast på 500 N/m anbragt midt på væggen indvendigt aldrig give udbøjninger over 10 mm. Reollasten er samme sted ansat til 2 kN/m², hvilket dog erfaringsmæssigt er ret højt sat.

Om dampspærre

Dampspærrens formål er at sikre at konstruktionen er såvel lufttæt som diffusionstæt, for at hindre dels infiltration gennem utætheder, dels fugtig indeluft i at trænge ud i konstruktionen og kondensere. Gennemgående stolper eller profiler betyder også at dampspærren er særlig udsat ved denne løsning, for eksempel i forbindelse med udførelse af elinstallationer. Dampspærren bør derfor placeres beskyttet, f.eks. ved at trække den en lægtetykkelse ind i konstruktionen. Der er meget der tyder på at dampspærren kan undværes hvis blot det på anden måde sikres at der er et lufttæt lag nær væggens inderside, og at diffusionsmodstanden af den udvendige beklædning er noget lavere end af den indvendige. Lufttætheden vil ofte kunne opnås ved hjælp af pladebeklædningen, forudsat korrekt forbindelse til loft og gulv samt at elinstallationerne udføres med lufttætte dåser og rør. (Ofte anvendes dåser og rør beregnet til tunge vægge også i lette vægge. Der findes dog systemer, der kan sikre en større lufttæthed.) Muligheden for at udelade dampspærren er ikke udnyttet i det følgende da eftervisningen af at den kan undværes endnu ikke er fuldt dokumenteret.

Om ventileret hulrum

Umiddelbart bag regnskærmen etableres et ventileret hulrum. Hulrummet virker som kapillarbrydende/drænende lag, der sikre at vand, der måtte trænge igennem regnskærmen ikke fylder den øvrige del af vægkonstruktionen. I Danmark er der dog tradition for ikke at etablere ventileret hulrum i konstruktioner af type T1 med to tunge vanger. Dette har erfaringsmæssigt ikke givet problemer og traditionen videreføres derfor i det følgende.

Ydervæggene opdeles i 5 hovedtyper som vist i figur 4, side 18. Tunge og lette vægge betegnes med henholdsvis T og L. Det følgende ciffer refererer til den fundamenttype væggen passer til og underopdelingen af hovedtyperne refererer til varianter i opbygningen. En let og en tung væg med ligheder i opbygningen har derfor samme nummer efter det første bogstav.

4.6.1 Type T1, to vanger

Denne vægtype er opbygget af to vanger, der er forbundet med bindere og hvor hulrummet udfyldt med isolering. Bagvæggen (den indre vange) kan være udført af murværk, porebeton eller helvægselementer i letklinkerbeton eller beton. Formuren (den ydre vange) er normalt opmuret af teglsten. Formuren fungerer som regnskærm og beskytter desuden isoleringen mod gennemblæsning.

Opbygning og undertyper

De typer T1-vægge der behandles består alle af:

108 mm formur af teglsten,
fastholdt til bagvæggen med 8 stk. $\varnothing 4$ mm rustfri bindere pr. m^2 .
125 - 400 mm isolering

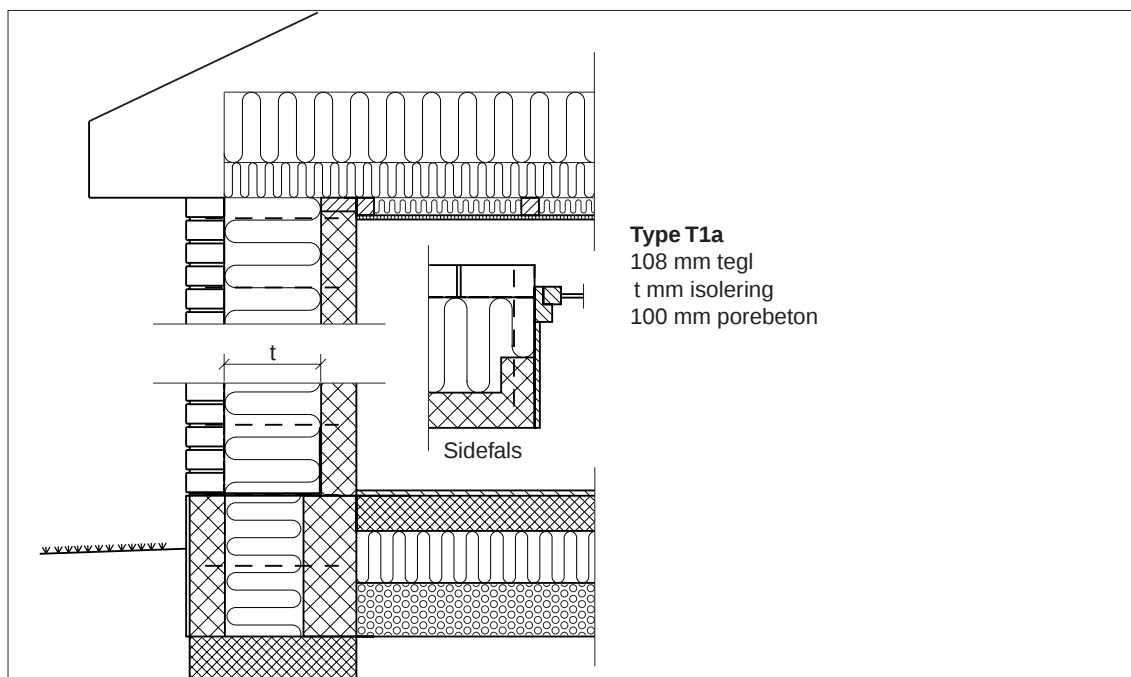
Undertyperne adskiller sig ved bagvæggens type:

T1a: 100 mm porebetonelementer

T1b: 100 mm letklinkerbeton

T1c: 108 mm teglsten

Figur 11 viser type T1a, hvor der i alle tilfælde er regnet med et 200 mm falselement. For type T1b er ikke regnet med false da disse ikke er statisk nødvendige. I stedet er der medtaget tilsætninger omkring vinduet i alle beregningerne. For muret bagvæg, type T1c, er der regnet med ommuring af en hel sten (230 mm) i falsen. Beregning af linieta-bet for en ommuring på $\frac{3}{4}$ sten (170 mm) er for sammenligningens skyld foretaget ved 125 mm isolering.



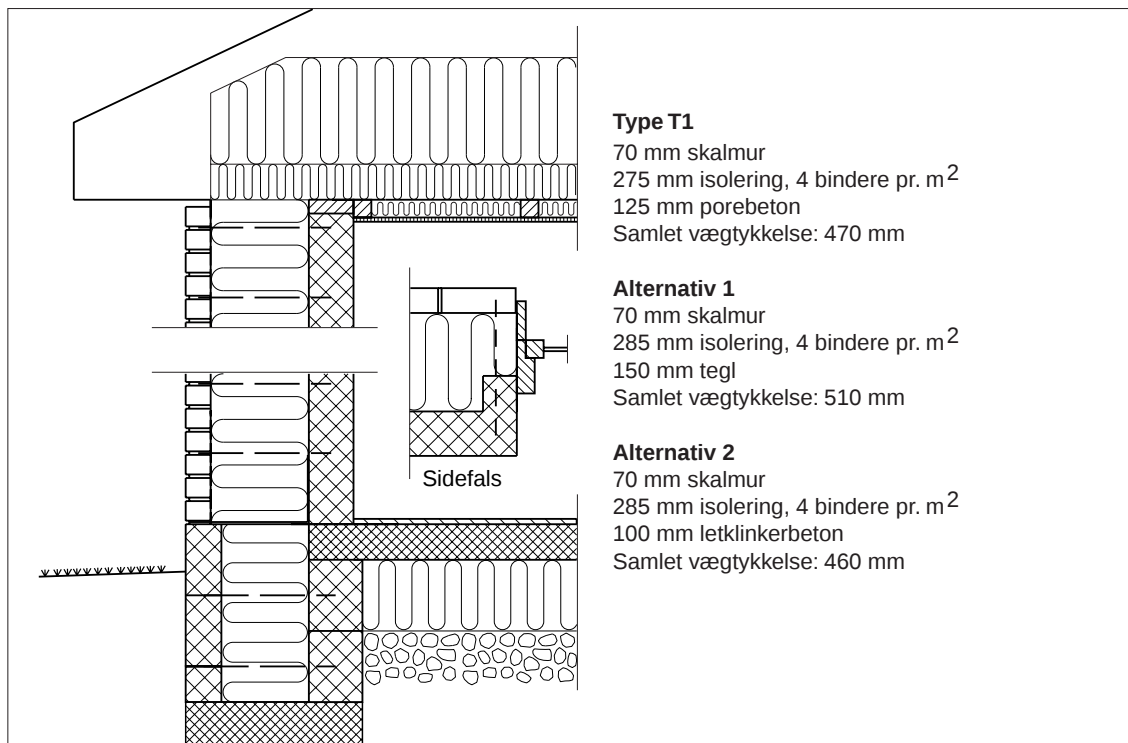
Figur 11. Vægtype T1a.

Statik

Lodret last og vandret last i væggen plan forudsættes optaget alene af bagvæggen mens vindlasten vinkelret på væggen kan overføres mellem de to vanger via binderne. Sådanne vægge kaldes kombinationsvægge (eller hulmure hvis begge vanger er af murværk).

Formurens bæreevne udnyttes ofte kun i beskeden grad i en kombinationsvæg, især når der er store stivhedsforskelle mellem forvæg og bagmur. F.eks. vil en ½-stens formur i kombination med helvægselementer ofte være så slap at den i praksis ikke bidrager til bæreevnen og derfor bliver til en ren skalmur.

De statiske konsekvenser af at øge afstanden mellem vangerne er meget beskeden når tykkelsen af de ribber omkring vinduerne, der er nødvendige for bæreevnen, bibeholdes. Binderne må naturligvis være længere, men da dette reducerer excentriciteten ved tryk-påvirkning er den øgede afstand normalt til gunst. Vægge med to tunge vanger med større indbyrdes afstand end normalt kan altså udformes på samme måde som i dag. Bæreevnen afhænger naturligvis fortsat af bagvæggens type, åbningernes placering og størrelse samt afstanden mellem de tværgående vægge, der understøtter vægfeltet. For et givet materialeforbrug vil det ofte være en fordel at øge bagvæggens tykkelse og reducere forvæggens tilsvarende. Herved bliver forvæggen til en ren skalmur, der f.eks. kunne være 70 mm tyk i stedet for 108 mm som en ½-stensmur. Udviklingen af en smallere sten til skalmuring er også umiddelbart interessant i de tilfælde hvor formuren kun fungerer som skalmur, idet isoleringstykkelsen så kan øges uden ændring i den samlede vægtykkelse. Vægge med denne udformning er vist i figur 12. Varmetab og kuldebroer vil ikke være væsentligt anderledes end for de ovenfor beskrevne vægge.



Figur 12. Vægtype T1 med smallere sten til skalmuring.

Bæreevnen af dels en hulmur med to ens teglstensvanger, dels en kombinationsvæg med teglstensformur og bagvæg af porebetonelementer er bestemt efter den nye murværksnorm [14]. Væggene er 4 m lange, 2,4 m høje, har en lodret fri rand og er simpelt understøttet langs de tre øvrige rande. Derefter er det bestemt, hvor tyk bagvæggen skal være hvis den alene skal have samme bæreevne som dobbeltvæggene. Beregningerne og deres forudsætninger er nærmere omtalt i [15].

Beregningerne viser at for én-etages bygninger med lodret last 0-10 kN/m skal tykkelsen af en bagvæg af teglsten øges fra 108 mm til 147 mm, mens porebetonens tykkelse skal ændres fra 100 mm til 113 mm. Disse forøgelser vil naturligvis afhænge af den valgte sten/mørtel-kombination samt af den konkrete geometri og de aktuelle belastningsforhold, men viser størrelsesordenen. Væggene med porebeton kan i øvrigt optage noget større last end teglstensvæggen med den valgte sten/mørtel kombination.

Det ses at der ikke er nogen umiddelbar fordel for teglstensvæggen, idet den samlede tykkelse bliver uændret ($108 + 108 = 216$ mod $70 + 147 = 217$). En tykkere bærende bagvæg vil imidlertid give bedre mulighed for at styre angrebepunktet for den lodrette last og dermed reducere den excentricitet, der væsentligt medvirker til at reducere bæreevnen af murværk. Dette er ikke udnyttet i beregningerne.

For en porebetonbagvæg kan den samlede vægtykkelse reduceres ca. 25 mm ($108 + 100 = 208$ mod $70 + 113 = 183$). At ændringen her har en effekt på den samlede tykkelse skyldes at de to forskellige materialer i kombinationsvæggen arbejder mindre effektivt sammen og forvæggenes bæreevne derfor ikke udnyttes optimalt.

Forstærkning ved muråbninger

Ved større vægfelter eller store vinduesåbninger kan der være brug for lodrette forstærkninger for at optage vindlasten. Ommuringer ved vinduesfalsen eller opsætning af falselementer virker som forstærkninger. Undertiden opsættes stålbjælker i isoleringslaget for at sikre den fornødne styrke.

Det er undersøgt om man i stedet kunne forbinde forvæg og bagvæg således at der kan overføres forskydning imellem de to vanger og derved etablere en slags I-bjælke ved falsene. Forbindelsen kan udføres i rustfrit stål på samme måde som bindere, således at forbindelsen kun udgør en meget beskeden kuldebro. Det viser sig imidlertid at tillægsspændingerne fra temperaturforskelle mellem de to vanger bliver af mindst samme størrelse som styrkegevinsten, uanset hvilken stivhed man giver forskydningsforbindelsen, når man antager at formurens trækstyrke er lig bøjningstrækstyrken. Da trækspændingerne vil optræde over hele tværsnittet af den ene vange vil sikkerheden altså samtidig

være reduceret da et svagt område ikke kan kompenseres af større spændinger i et nabo-område med mindre udnyttelse, se [15].

Varmeisolering og økonomi

U-værdien afhænger primært af isoleringstykkelsen, men der er også et mindre bidrag fra vangerne ved vinduerne.

En forøgelse af isoleringstykkelsen i væggen giver umiddelbart mulighed for også at øge isoleringstykkelsen i fundamentet og vinduesfalsene. Det vil forbedre linieta-bene ved fundament og vinduesfalsene relativt mere end det en-dimensionelle varmetab gennem væggen idet isoleringstykkelserne øges relativt mest, hvor der nu er små isoleringstykkelser.

I tabel 9 er vist en oversigt over flade- og linieta-b samt den effektive U-værdi (beregnet iht. kap.3.1) for type T1a-c. Efterfølgende er i tabel 10 - tabel 12 vist de totaløkonomiske beregninger for type T1a-c.

Tabel 9. Oversigt over beregnede U- og ψ -værdier samt effektiv U-værdi for vægtype T1a-c.

Type	Navn	Isol. tyk. mm	U W/m ² K	$\Psi_{\text{fundament}}$ W/mK	$\Psi_{\text{vind.tilsl.}}$ W/mK	Ψ_{tagfod} W/mK	U _{effektiv} W/m ² K
T1a	Traditionel tung dobbeltvæg (bagvæg af porebeton)	125	0,249 ¹⁾	0,210 ²⁾	0,059	0,039	0,436
		200	0,168	0,138	0,036	0,036	0,292
		250	0,138	0,121	0,036	0,034	0,251
		300	0,118	0,112	0,038	0,032	0,226
		350	0,102	0,106	0,040	0,031	0,207
		400	0,090	0,102	0,043	0,030	0,194

1) 125 mm isolering svarer til U-værdikrav i BR95 (0,30), når der medregnes ekstra varmetab pga. vinduesfalsene (30 mm kuldebroyisolering) samt murbindere (8 stk. 4 mm rustfast stålbindere pr. m²).

2) Fundamentssokkel bestående af massiv letklinkerblokke.

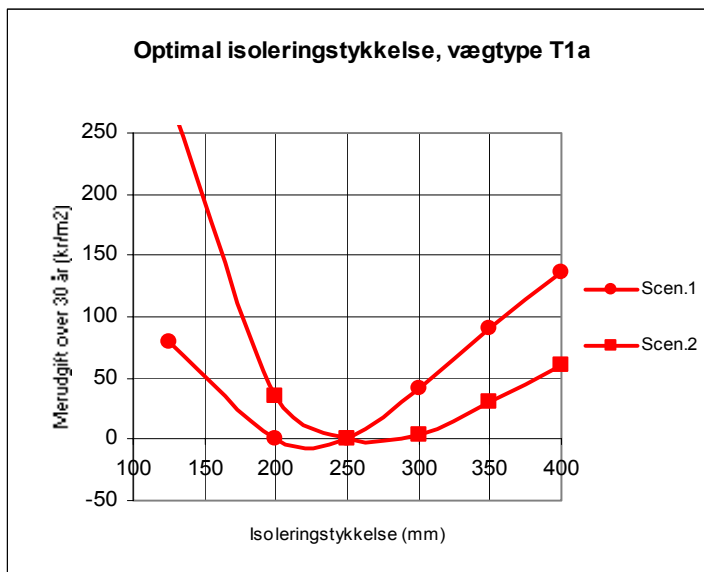
Type	Navn	Isol. tyk. mm	U W/m ² K	$\Psi_{\text{fundament}}$ W/mK	$\Psi_{\text{vind.tilsl.}}$ W/mK	Ψ_{tagfod} W/mK	U _{effektiv} W/m ² K
T1b	Traditionel tung dobbeltvæg (bagvæg af letklinkerbeton)	125	0,268	0,219 ²⁾	0,020	0,042	0,432
		200	0,177	0,142	0,027	0,037	0,297
		250	0,144	0,124	0,032	0,035	0,256
		300	0,122	0,114	0,035	0,033	0,229
		350	0,105	0,107	0,039	0,032	0,210
		400	0,093	0,103	0,042	0,031	0,197

Type	Navn	Isol. tyk. mm	U W/m ² K	$\Psi_{\text{fundament}}$ W/mK	$\Psi_{\text{vind.tilsl.}}$ W/mK	Ψ_{tagfod} W/mK	U _{effektiv} W/m ² K
T1c	Traditionel tung dobbeltvæg (bagvæg af teglsten)	125	0,272	0,224 ²⁾	0,168 ³⁾	0,043	0,551
		200	0,179	0,143	0,046	0,039	0,315
		250	0,145	0,125	0,039	0,036	0,263
		300	0,122	0,115	0,039	0,034	0,233
		350	0,106	0,108	0,041	0,033	0,214
		400	0,093	0,103	0,043	0,031	0,198

3) En ommuring med $\frac{3}{4}$ sten (70 mm kuldebroafbrydelse fremfor 10 mm) reducerer linietafet til 0,038 W/mK.

Tabel 10. Økonomisk oversigt for vægtype T1a (bagvæg af porebeton).

Isol. tyk. mm	Energi- besparelse kWh/m ² /år	Mer- anlægs- pris kr/m ²	Nuværdi af restværdi af merpris efter 30 år / nuværdi af energibesparelse i 30 år kr/m ²		Besparelse over 30 år / merudgift ift. største besparelse kr/m ²		Simpel tilbage- beta- lingstid år	CO ₂ - skyggepris kr/ton-CO ₂
			Scen.1	Scen.2	Scen.1	Scen.2	Sc.1/Sc.2	
125	0	0	0/0	0/0	0/79	0/278	-	0
200	13,0	126	42/163	42/326	79/0	242/36	16/8	1455
250	16,7	211	70/209	70/418	69/10	278/0	21/11	2641
300	18,9	301	100/237	100/475	37/42	274/3	27/13	4070
350	20,6	406	135/259	135/518	-12/90	247/30	33/16	5730
400	21,8	496	166/274	166/547	-57/136	217/61	38/19	7992



Figur 13. Merudgift ift. største besparelse som funktion af isoleringstykkel for vægtype T1a (bagvæg af porebeton).

Tabel 11. Økonomisk oversigt for vægtype T1b (bagvæg af letklinkerbeton).

Isol. tyk. mm	Energi- besparelse kWh/m ² /år	Mer- anlægs- pris kr/m ²	Nuværdi af restværdi af merpris efter 30 år / nuværdi af energibesparelse i 30 år kr/m ²		Besparelse over 30 år / merudgift ift. største besparelse kr/m ²		Simpel tilbage- beta- lingstid år	CO ₂ - skyggepris kr/ton-CO ₂
			Scen.1	Scen.2	Scen.1	Scen.2	Sc.1/Sc.2	
125	0,0	0	0/0	0/0	0/69	0/258	-	-580
200	12,2	126	42/153	42/305	69/0	221/37	17/9	1529
250	15,8	211	70/199	70/398	58/10	257/1	22/11	2746
300	18,3	301	100/229	100/459	29/40	258/0	27/14	4180
350	20,0	406	135/251	135/502	-20/88	231/27	34/17	5886
400	21,2	496	166/266	166/531	-65/134	201/58	39/20	8147

Tabel 12. Økonomisk oversigt for vægtype T1c (bagvæg af tegl).

Isol. tyk. mm	Energi- besparelse kWh/m ² /år	Mer- anlægs- pris kr/m ²	Nuværdi af restværdi af merpris efter 30 år / nuværdi af energibesparelse i 30 år kr/m ²		Besparelse over 30 år / merudgift ift. største besparelse kr/m ²		Simpel tilbage- beta- lingstid år	CO ₂ - skyggepris kr/ton-CO ₂
			Scen.1	Scen.2	Scen.1	Scen.2	Sc.1/Sc.2	
125	0,0	0	0/0	0/0	0/190	0/524	-	-*
200	21,2	117	39/267	39/533	189/1	456/68	9/5	2167
250	25,9	203	68/326	68/651	190/0	516/8	13/7	3165
300	28,6	293	98/359	98/719	164/26	524/0	17/9	4582
350	30,3	397	132/381	132/762	116/74	497/26	22/11	6410
400	31,8	488	163/399	163/798	74/116	473/51	26/13	8608

*forøget CO₂-udledning ift. referencen*Byggeteknik*

Der er ingen betydende hindringer af teknisk art for at øge isoleringstykkelsen i den traditionelle hulmur / kombinationsvæg og samtidig reducere kuldebroerne meget væsentligt.

Den væsentligste ændring er at vinduerne skal udformes så de kan dække kuldebroisoleringen, f.eks. ved at benytte tilsætninger. De tykkere vægge vil også reducere lysindfaldet, især gennem små vinduer. Der er derfor behov for en arkitektonisk bearbejdning af forholdene omkring vinduer.

En eventuel ændring af konstruktionen til en smallere formur, der kun fungerer som skalmur og en lidt tykkere bagvæg betyder dels at en større del af massen vil ligge in-

denfor isoleringen, dels er det muligt at bruge forskellige typer regnskærm uden statiske konsekvenser. Væggen vil herved komme til at ligne type T2, bortset fra at regnskærmen opstilles på fundamentet.

Typen kan anvendes til huse i flere etager.

4.6.2 Type T2, indvendig bærende tung vange

I denne løsning benyttes også en tung, bærende bagmur, men i stedet for formur benyttes puds eller en let regnskærm, i form af eksempelvis træbeklædning eller skærmtegl. Regnskærmens understøttende skelet må fastholdes enten til bagvæggen eller ophænges i spærene og fastholdes for tryk og sug forneden.

Opbygning og undertyper

Hvis regnskærmen fastgøres til bagvæggen i mange punkter vil hele den udvendige vindlast blive overført til bagmuren idet regnskærmens skelet normalt vil have ringe stivhed i forhold til bagvæggen. Denne type betegnes T2.1. Regnskærmens egenvægt kan optages ved at skelettet fastgøres enten til spærene eller til bagvæggen, via forbindelser svarende til forstøbningens bærebøjler i betonsandwichelementer.

Type T2.1 vægge kan være opbygget som følger:

Regnskærm, f.eks. skærmtegl eller træbeklædning

25 mm afstandslister pr 600 mm / ventileret hulrum

9 mm gipsplade udvendig

Lodrette 45 x 45 mm lægter pr. 600 mm fastholdt til bagvæggen med ø4 mm rustfri

bindere pr. 400 mm / 45 mm isolering

80 – 355 mm fastholdt isolering

Undertyperne adskiller sig ved typen af den bærende væg:

T2.1a: 125 mm porebetonelementer

T2.1b: 100 mm letklinkerbeton

T2.1c: 150 mm teglblokke

Figur 14 viser den konstruktion som er anvendt ved varmetabsberegningerne for type T2.1a. De to øvrige typer adskiller sig udelukkende ved tykkelsen af den bærende væg. Figur 15 viser en lidt anden udformning, der vil have praktisk taget samme varmetab.

Hvis regnskærmens skelet kun fastholdes foroven og forneden kan regnskærmen optage og videreføre den ydre vindlast direkte til fundament og loftskive, uanset om skelettet er mindre stift end bagmuren. Typen kaldes T2.2. Forbindelsen foroven skal kunne optage

såvel egenlasten som en del af vindlasten, forbindelsen fornedet skal alene optage vindlasten vinkelret på væggen.

Type T2.2 vægge kan være opbygget som følger:

Regnskærm, ventileret hulrum og vindtæt afdækning integreres i en kassette, der op hænges i spær og fastholdes til fundament.

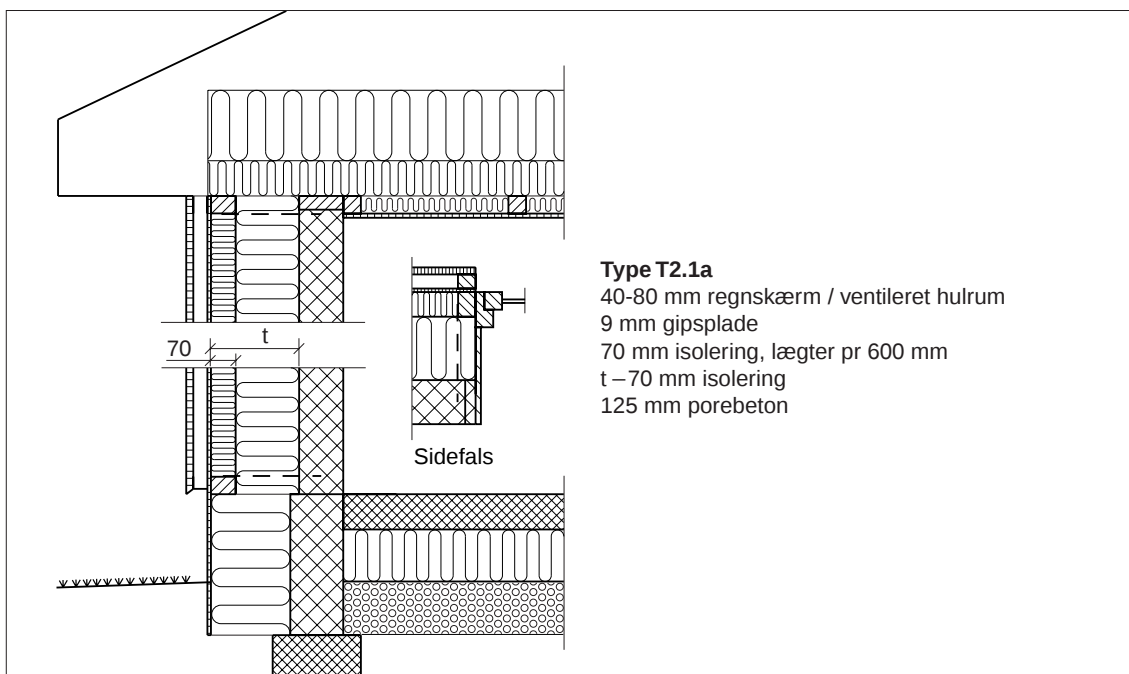
150 – 400 mm fastholdt isolering

Undertyperne adskiller sig ved typen af den bærende væg:

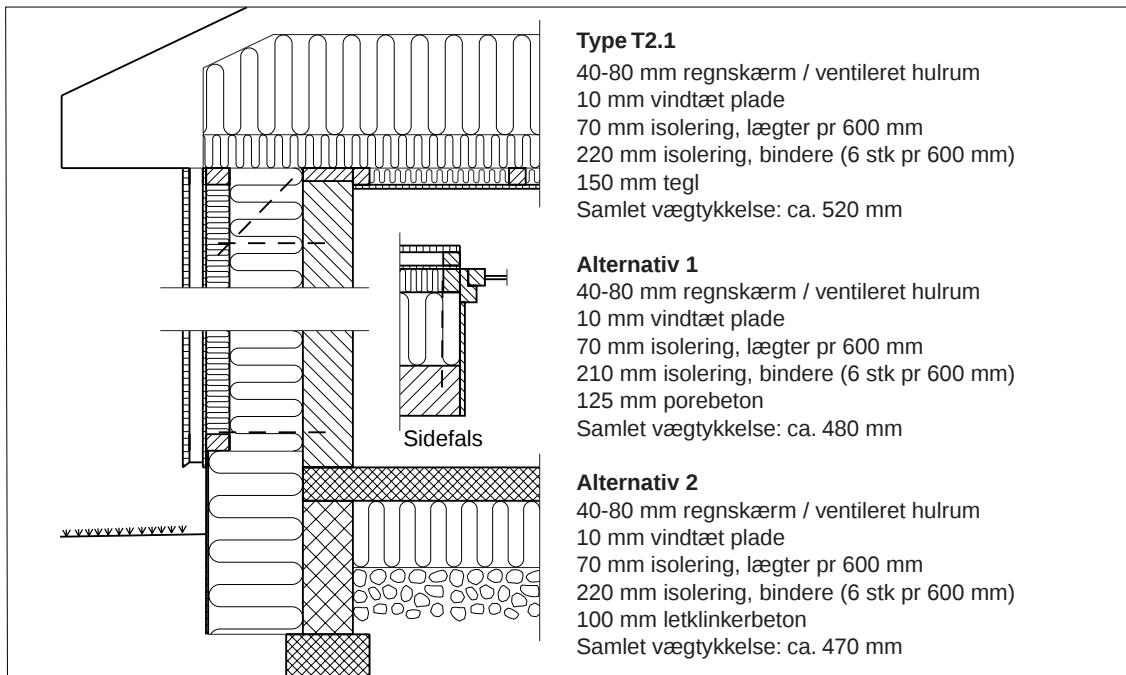
T2.2a: 125 mm porebetonelementer

T2.2b: 100 mm letklinkerbeton

T2.2c: 150 mm teglblokke



Figur 14. Vægtype T2.1a.



Figur 15. Vægtype T2.1, alternative udformninger.

Statik

Bæreevnen for de forskellige vægtyper afhænger af åbningernes placering og understøtningsforholdene. Murværk med tykkelsen 150 mm vil give mulighed for rimeligt store feltstørrelser. I mange tilfælde vil en mindre tykkelse kunne anvendes. For letklinkerbeton er bæreevnen af vægge med mindstetykkelsen 100 mm tilstrækkelig i de fleste tilfælde. Vægge af 100 mm porebetonelementer vil ofte være tilstrækkelige i småhuse.

Vægtykkelsen afhænger imidlertid også betydeligt af vindlastens størrelse. Type T2.2 med kassette løsningen udvendigt betyder at bagmuren aflastes, hvis følgende to forudsætninger er opfyldt. For det første må kassetens udbøjning ved udvendigt vindtryk ikke medfører at vindlasten alligevel overføres til bagvæggen, f.eks. via tryk i isoleringen. For det andet skal det sikres at den ydre vindlast ikke kan forårsage væsentlige over- eller undertryk imellem bagvæggen og kassetten, idet bagvæggen så alligevel vil blive påvirket af den udvendige vindlast. Det sidste er svært at sikre i praksis, men fluktuationerne i det vindtryk, der optræder i isoleringslaget vil være udjævnet betydeligt i forhold til det udvendige tryk, hvis kassetens funktion som vindtæt afdækning er opfyldt. Vindlasten på bagvæggen vil blive reduceret til ca. $\frac{2}{3}$ af den udvendige last hvis man benytter peakfaktoren for indvendig vindlast til bestemmelsen. (Peakfaktoren er et begreb, der er indført i den nye lastnorm, DS 410:1998, og som beskriver størrelsen af fluktuationerne i vindlasten omkring middelvinden).

Varmeisolering og økonomi

U-værdien afhænger primært af isoleringstykkelsen, men der er også et mindre bidrag fra bagvæggen. Der vil ikke være nævneværdig forskel på de varmetekniske egenskaber for type T2.1 og T2.2. Massen er placeret indenfor isoleringen, til gunst for varmekapaciteten.

En forøgelse af isoleringstykkelsen i væggen muliggør også en forbedring af kuldebroafbrydelsen ved fundamentet. Væggens bidrag til kuldebroen ved vinduerne vil også være minimal hvis vinduerne placeres udfor isoleringen.

I tabel 13 er vist en oversigt over flade- og linietaf samt den effektive U-værdi for type T2.1a-c. Efterfølgende er i tabel 14 - tabel 16 vist de totaløkonomiske beregninger for T2.1a-c.

Optimum for T2-vægge ligger højere end for vægtype T1. Dette skyldes primært, at følgeudgifter ved en mere isolering af T2 er mindre end for T1, idet fundamentet til T2 ikke bliver bredere. Energibesparelsen ved at gå fra et isoleringsniveau til et andet er stort set den samme for de to vægtyper.

Tabel 13. Oversigt over beregnede U- og ψ -værdier samt effektiv U-værdi for vægtype T2.1a-c.

Type	Navn	Isol. tyk. mm	U W/m ² K	$\Psi_{\text{fundament}}$ W/mK	$\Psi_{\text{vind.tilsl.}}$ W/mK	Ψ_{tagfod} W/mK	U _{effektiv} W/m ² K
T2.1a	Tung bærende bagvæg porebeton	125	0,238	0,163	0,010	0,044	0,361
		200	0,163	0,143	0,017	0,038	0,276
		250	0,135	0,125	0,021	0,035	0,239
		300	0,115	0,115	0,024	0,034	0,215
		350	0,100	0,109	0,027	0,032	0,197
		400	0,089	0,105	0,030	0,031	0,186

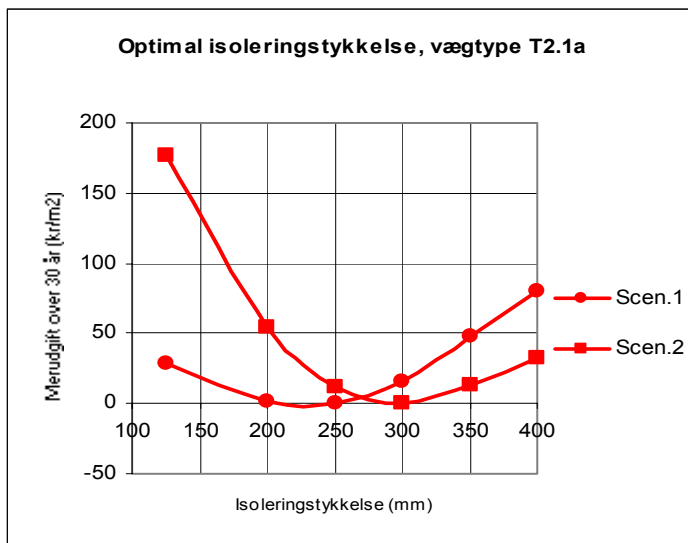
Type	Navn	Isol. tyk. mm	U W/m ² K	$\Psi_{\text{fundament}}$ W/mK	$\Psi_{\text{vind.tilsl.}}$ W/mK	Ψ_{tagfod} W/mK	U _{effektiv} W/m ² K
T2.1b	Tung bærende bagvæg af letklinkerbeton	125	0,262	0,178	0,007	0,049	0,394
		200	0,174	0,150	0,015	0,040	0,291
		250	0,142	0,130	0,019	0,037	0,248
		300	0,120	0,119	0,023	0,035	0,222
		350	0,104	0,112	0,026	0,033	0,203
		400	0,092	0,108	0,029	0,032	0,190

Type	Navn	Isol. tyk. mm	U W/m ² K	$\Psi_{\text{fundament}}$ W/mK	$\Psi_{\text{vind.tilsl.}}$ W/mK	Ψ_{tagfod} W/mK	U _{effektiv} W/m ² K
T2.1c	Tung bærende bagvæg af tegl- blokke	125	0,262	0,165	0,008	0,056	0,389
		200	0,174	0,147	0,015	0,047	0,291
		250	0,142	0,129	0,019	0,043	0,249
		300	0,120	0,120	0,023	0,040	0,224
		350	0,104	0,114	0,026	0,038	0,205
		400	0,092	0,110	0,029	0,036	0,192

Tabel 14. Økonomisk oversigt for vægtype T2.1a (bagvæg af porebeton).

Isol. tyk. mm	Energi- besparelse kWh/m ² /år	Mer- anlægs- pris kr/m ²	Nuværdi af restværdi efter 30 år / nuværdi af energibe- sparelse i 30 år kr/m ²		Besparelse over 30 år / merudgift ift. billigste løsning kr/m ²		Simpel tilbage- beta- lingstid år	CO ₂ - skygge- pris ¹⁾ kr/ton-CO ₂
			Scen.1	Scen.2	Scen.1	Scen.2	Sc.1/Sc.2	
125	0	0	0/0	0/0	0/28	0/177	-	-1990
200	7,7	104	35/96	35/192	27/1	123/55	23/11	-504
250	11,0	165	55/138	55/276	28/0	166/12	25/13	118
300	13,1	229	76/165	76/330	12/16	177/0	29/15	660
350	14,8	309	103/185	103/371	-21/48	165/13	35/17	1189
400	15,8	375	125/198	125/396	-52/80	146/32	40/20	1766

1) Vægtype T1a (125 mm) er generel reference. Negative CO₂-skyggepriser fremkommer, idet anlægsprisen er mindre (billigere fundament) end for T1-løsninger med tilsvarende isoleringstykkelse.


Figur 16. Merudgift ift. største besparelse som funktion af isoleringstykkelse for vægtype T2.1a (bagvæg af porebeton).

Tabel 15. Økonomisk oversigt for vægtype T2.1b (bagvæg af letklinkerbeton).

Isol. tyk. mm	Energi- besparelse kWh/m ² /år	Mer- anlægs- pris kr/m ²	Nuværdi af restværdi efter 30 år / nuværdi af energibe- sparelse i 30 år kr/m ²		Besparelse over 30 år / merudgift ift. billigste løsning kr/m ²		Simpel tilbage- beta- lingstid år	CO ₂ - skygge- pris ¹⁾ kr/ton-CO ₂
			Scen. 1	Scen. 2	Scen. 1	Scen. 2	Sc. 1/Sc. 2	
125	0,0	0	0/0	0/0	0/55	0/236	-	-2624
200	9,3	104	35/116	35/233	47/8	164/73	19/9	-555
250	13,1	165	55/165	55/330	55/0	220/16	21/10	80
300	15,5	229	76/194	76/389	42/13	236/0	25/12	647
350	17,2	309	103/216	103/432	10/45	226/10	30/15	1191
400	18,4	375	125/231	125/461	-19/74	211/25	34/17	1761

Tabel 16. Økonomisk oversigt for vægtype T2.1c (bagvæg af tegl).

Isol. tyk. mm	Energi- besparelse kWh/m ² /år	Mer- anlægs- pris kr/m ²	Nuværdi af restværdi efter 30 år / nuværdi af energibe- sparelse i 30 år kr/m ²		Besparelse over 30 år / merudgift ift. billigste løsning kr/m ²		Simpel tilbage- beta- ingstid år	CO ₂ - skygge- pris ¹⁾ kr/ton-CO ₂
			Scen. 1	Scen. 2	Scen. 1	Scen. 2	Sc. 1/Sc. 2	
125	0	0	0/0	0/0	0/48	0/220	-	-2326
200	8,8	105	35/111	35/222	41/7	152/68	20/10	-421
250	12,6	165	55/158	55/316	48/0	207/13	22/11	202
300	14,9	230	77/186	77/373	33/15	220/0	26/13	774
350	16,6	310	103/208	103/416	1/47	209/10	31/16	1320
400	17,7	376	125/223	125/445	-28/76	195/25	35/18	1897

Byggeteknik

Isoleringstykkelsen ses at kunne øges uden andre betydende omkostninger end prisen for isoleringen samt omkostningerne ved et større tag. Den statiske påvirkning af spærene kan dog blive forøget hvis regnskærmen hænger i disse.

Det skal sikres at regnskærmens bevægelser i forhold til bagvæggen kan optages uden problemer. Vinduerne vil normalt fastgøres til bagvæggen. Udvendigt skal regnskærm og vinduer derfor forbindes under hensyntagen til de mulige differensbevægelser mellem regnskærmen og bagmuren. Desuden skal ophængte kassetter ved deres vandrette fastgørelse foruden sikres en bevægelsesmulighed i lodret retning, uden at der åbnes for gennemblæsning af isoleringen. Det er vigtigt at den vindtætte afdækning (her gipsplade udvendig) har en diffusionsmodstand der er væsentligt lavere end den indvendige væg. For letbeton bør Z-værdien af den vindtætte afdækning ikke være over 2-3. Typen kan anvendes til huse i flere etager.

4.6.3 Type T3, udvendig bærende tung vange

I denne løsning benyttes en tung bærende formur, der isoleres indvendigt. Dette giver et ideelt forløb af isoleringen, men kan være fugtteknisk uheldigt medmindre der etableres et ventileret hulrum mellem isolering og formur. Etableringen af hulrum og opsætning af indvendig beklædning kan eventuelt ske ved at opstille en skeletvæg på terrændækket. Løsningen vil som nævnt i afsnit 2.1 være problematisk også angående forbindelsen mellem indvendige og udvendige vægge. Løsningen omtales kun som en teoretisk reference.

Opbygning

Type T3 kan opbygges som følger (se figur 17):

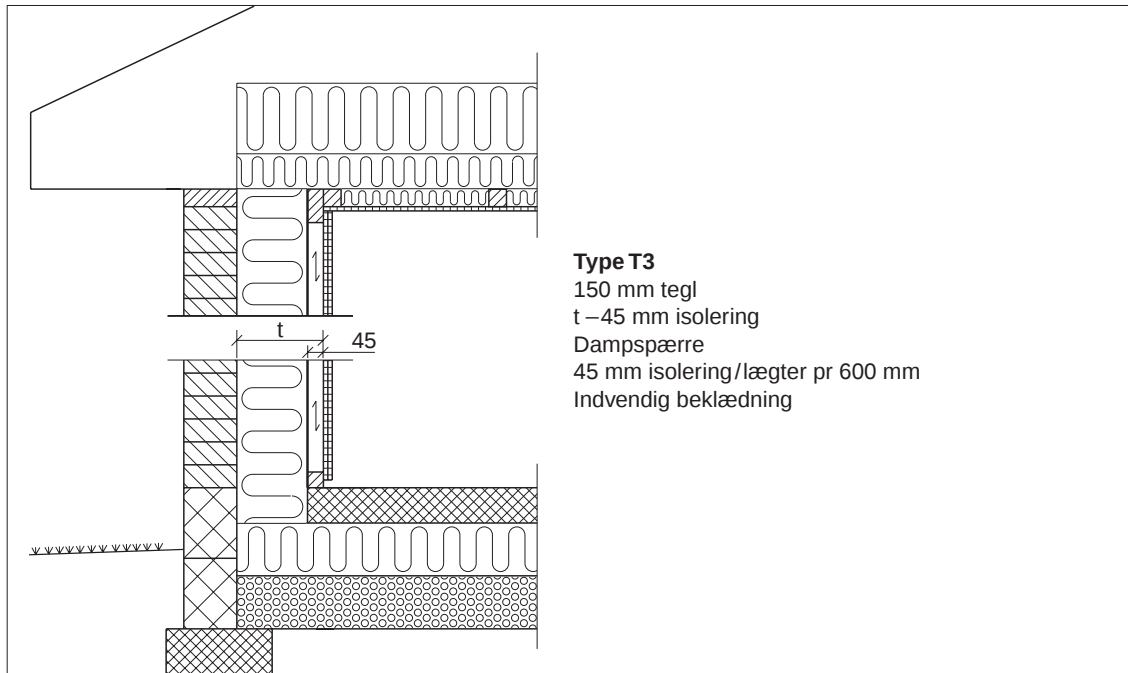
150 mm teglstensvæg

50 mm ventileret hulrum (ikke vist i figuren)

Skeletvæg opstillet på terrændæk, opbygget af gipsplade udvendig og 125-400 mm skelet / isolering

Varmeisolering

I tabel 17 er vist U-værdier og linietaf for type T3. Linietafet ved fundamentet er reduceret til nær det mindst teoretisk mulige. Ved sammenligning med type T2 ses at linietafene der fortsat er noget større end det ideale. Ved beregning af linietafet ved fundamentet er set bort fra 50 mm ventileret hulrum i væggen. Medtages det ventilerede hulrum (hvorved isoleringstykkelsen i fundamentet øges) viser beregninger, at linietafet reduceres med ca. 11 % ved 125 mm isoleringstykkelse og ca. 5 % ved 400 mm isoleringstykkelse.



Figur 17. Vægtype T3.

Tabel 17. Oversigt over beregnede U- og Ψ -værdier samt effektiv U-værdi.

Type	Navn	Iso. tyk. mm	U W/m ² K	$\Psi_{\text{fundament}}$ W/mK	$\Psi_{\text{vind.tilsl.}}$ W/mK	Ψ_{tagfod} W/mK
T3	Tung bærende formur (teglblokke)	125	0,276	0,133	-	0,040
		200	0,180	0,106	-	0,033
		250	0,147	0,081	-	0,031
		300	0,123	0,066	-	0,029
		350	0,107	0,056	-	0,028
		400	0,094	0,049	-	0,027

4.6.4 Type L2, indvendigt bærende skelet

Til denne type konstruktion benyttes et skelet af træ eller stålprofiler hvis indvendige del understøttes af fundamentet. Type L2 kan opdeles i to undertyper. Type L2.1 har gennemgående eller forbundne stolper, der bærer såvel den indvendige beklædning som regnskærmen. Type L2.2 har et selvstændigt indvendigt skelet og en regnskærm der kun er fastholdt til den øvrige konstruktion foroven og forneden.

Type L2.1

Opbygning

Stolperne kan opbygges af to lægter af træ eller stålprofil, hvor den indvendige understøttes af fundamentet. Lægterne forbindes så der kan overføres forskydningskræfter mellem dem, f.eks. via tynde plader eller klodser fastgjort med tandplader. Dette øger

dels stivheden af stolperne, dels muliggør det at regnskærmen umiddelbart kan fastgøres i skelettet. Man kan også benytte gennemgående stolper, der blot kun understøttes indvendigt.

Type L2.1 er i princippet opbygget som følger:

Regnskærm, f.eks. skærmtegl eller træbeklædning

25 mm afstandslister pr. 600 mm / ventileret hulrum

9 mm gipsplade udvendig

95-355 mm gennemgående eller forbundne stolper / isolering

Dampspærre

45 mm lægter / isolering

Indvendig pladebeklædning

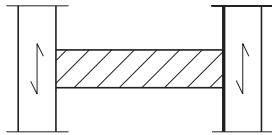
Statik

De nødvendige lægtedimensioner afhænger primært af hvor effektiv forskydningsforbindelsen er mellem de to lægtelag. Ofte vil stolper opbygget af 2 stk. forbundne 45 × 45 mm trælægter eller 45 mm stållægter være tilstrækkelige. Af praktiske hensyn er det ofte ikke muligt at placere forskydningsforbindelserne helt ude ved stolpernes ender. Dette kan medføre at det er spændinger i de frie ender af den indvendige lægte, der er dimensionsgivende. Forbindelsers placering er især et problem ved pladsbyggeri, hvor der skal være mulighed for at fastgøre remme og forankringer til de sammensatte stolper. De statiske forhold er nærmere behandlet i [15].

Varmeisolering og økonomi

Isoleringsevnen afhænger, foruden vægtykkelsen, især af hvorledes forskydningsforbindelsen mellem lægterne etableres og hvor tæt stolperne placeres. Dertil kommer effekten af de vandrette lægter, der normalt er nødvendige når stolpeafstanden overstiger 600 mm.

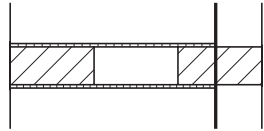
I figur 18 er vist en række udformninger af stolperne samt det varmetab (κ) de forårsager sammenlignet med en tilsvarende væg uden stolper. Værdien κ dækker altså den samlede varmestrøm gennem profilet inklusiv den éndimensionale varmestrøm. Det er forudsat at stålfilerne er slidsede, men ved stor profilafstand kan også anvendes massive stålfiler uden særlig forøgelse af linietabet.



Dobbelt krydslægning

45x220 med 45x45
vandret på begge side
pr. 600
*inkl krydslægning

$t = 290$
 $U = 0,130^*$
 $\kappa = 0,0090$



Pladeforbundne stolper

45x100 + 45x50 med 2 stk 3,2 mm
hård træfiberplade samt
indvendig 45x50 lodret

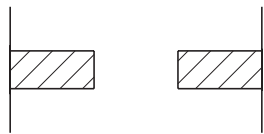
$t = 300$
 $U = 0,124$
 $\kappa = 0,0088$



Delt stolpe

2 stk 45x100

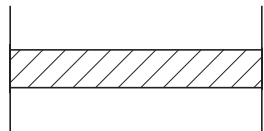
$t = 400$
 $U = 0,094$
 $\kappa = 0,0029$



Delt stolpe

2 stk 45x100

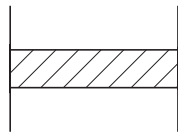
$t = 300$
 $U = 0,124$
 $\kappa = 0,0054$



Masiv stolpe

45x300

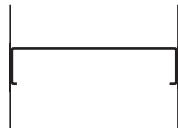
$t = 300$
 $U = 0,124$
 $\kappa = 0,0104$



Masiv stolpe

45x200

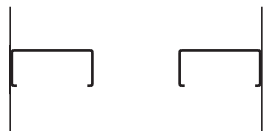
$t = 200$
 $U = 0,182$
 $\kappa = 0,0143$



Gennemgående

200 mm slidset profil
(0,7 mm gods)

$t = 200$
 $U = 0,182$
 $\kappa = 0,0129$



Delt stolpe

2 stk 100 mm slidset profil
(0,7 mm gods)

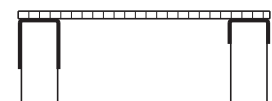
$t = 300$
 $U = 0,124$
 $\kappa = 0,0065$



Delt stolpe

2 stk 100 mm slidset profil
(0,7 mm gods)

$t = 400$
 $U = 0,093$
 $\kappa = 0,0036$



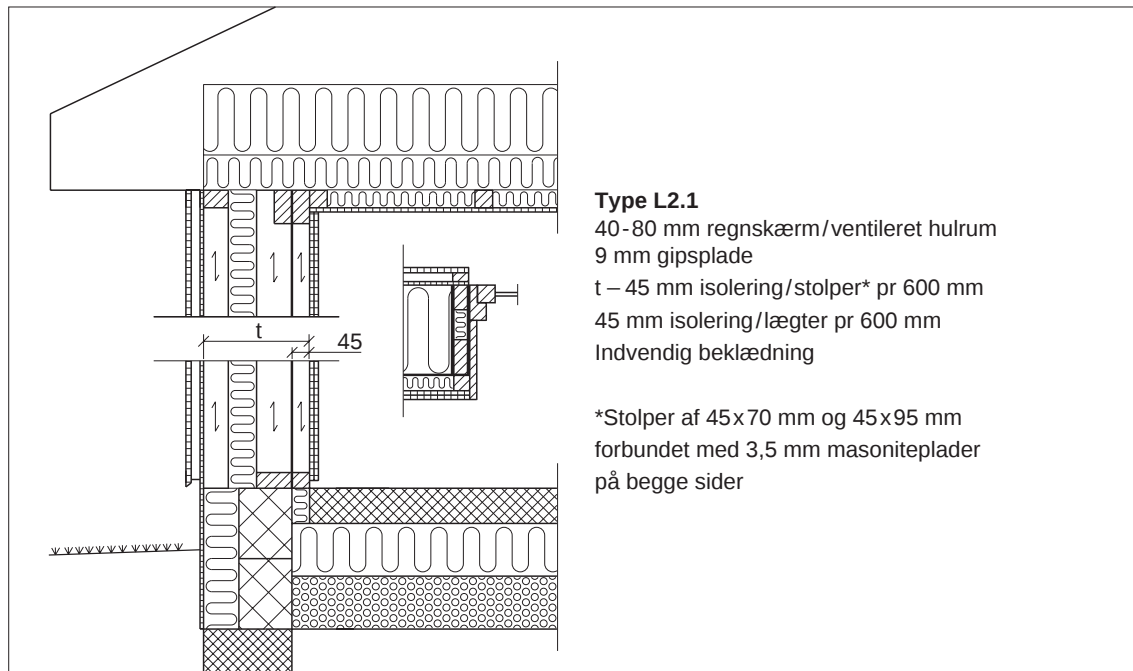
Pladeforbundne skeletter

Udv: 45x60 mm profil
(1,5 mm gods)
Indv: 45x30 mm profil
(0,56 mm gods)
Forbindelse: 12 mm krydsfiner
*inkl vandrette løsholter pr 600

$t = 300$
 $U = 0,132^*$
 $\kappa = 0,0081$

Figur 18. Stolpetab (κ) for stolper i træ hhv. stålprofiler. Værdier for slidsede stålprofiler gælder kun specifikt produkt.

Figur 19 viser den konstruktion, der er regnet på for type L2 (L2.1 med stolper forbundet med træfiberplader). Figur 20 viser en alternativ udformning af type L2.1 (stolper forbundet med lægstestykker og tandplader).

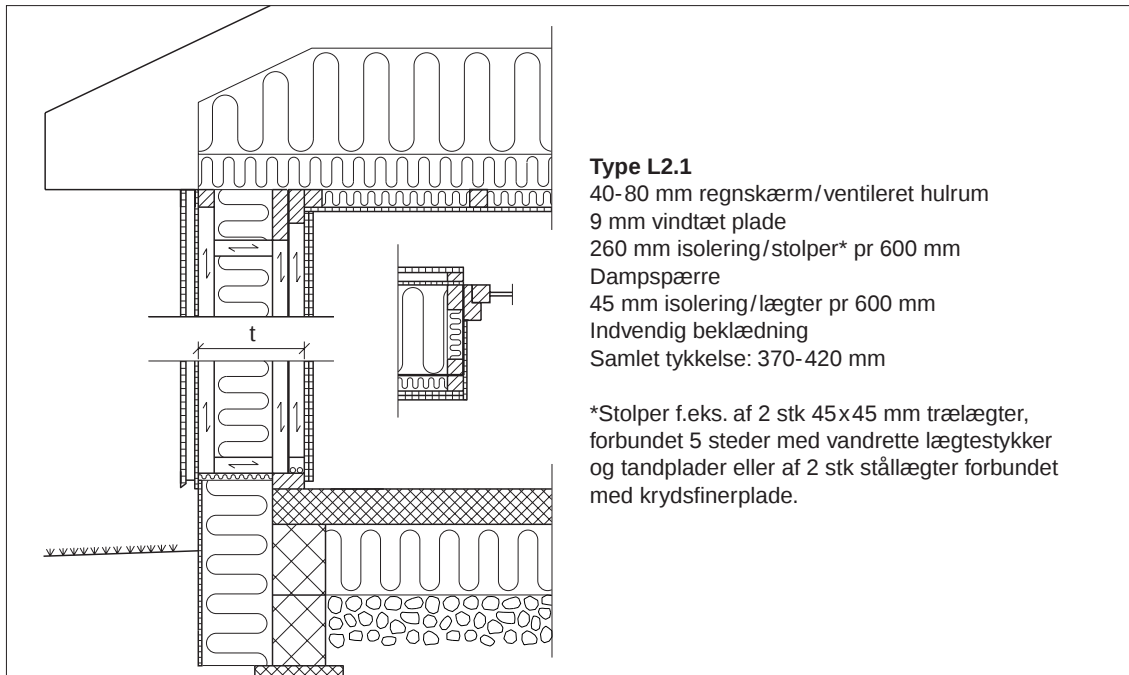


Figur 19. Vægtype L2.1.

I tabel 18 er vist en oversigt over flade- og linietab samt den effektive U-værdi. Efterfølgende er i tabel 19 vist de totaløkonomiske beregninger.

Tabel 18. Oversigt over beregnede U-, ψ - og κ -værdier samt effektiv U-værdi.

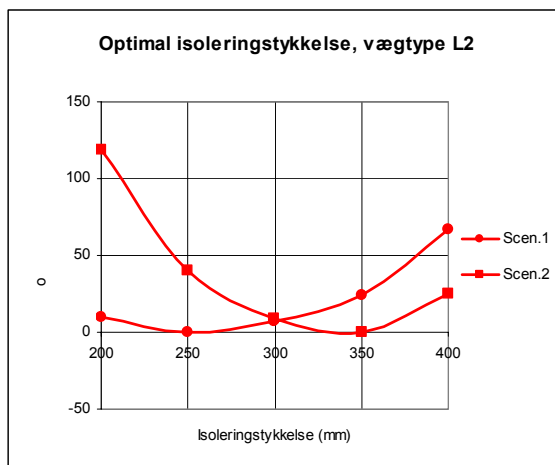
Type	Navn	Isol. tyk. mm	U W/m ² K	κ_{stolpe} W/mK	$\Psi_{\text{fundament}}$ W/mK	$\Psi_{\text{vind.tilsl.}}$ W/mK	Ψ_{tagfod} W/mK	U _{effektiv} W/m ² K
L2	Let væg m. indv. bærende skelet	200	0,173	0,018	0,147	0,015	0,038	0,313
		250	0,142	0,012	0,110	0,019	0,034	0,252
		300	0,120	0,009	0,094	0,024	0,031	0,218
		350	0,104	0,006	0,086	0,028	0,030	0,195
		400	0,092	0,005	0,080	0,032	0,028	0,180



Figur 20. Vægtype L2.1, alternativ udformning.

Tabel 19. Økonomisk oversigt for vægtype L2.1.

Isol. tyk.	Energi-besparelse	Mer-anlægs-pris	Nuværdi af restværdi efter 30 år / nuværdi af energibesparelse i 30 år		Besparelse over 30 år / merudgift ift. billigste løsning		Simpel tilbagebetalingstid	CO ₂ -skyggepris
mm	kWh/m ² /år	kr/m ²	kr/m ²		kr/m ²		År	kr/ton-CO ₂
			Scen. 1	Scen. 2	Scen. 1	Scen. 2	Sc. 1/Sc. 2	
200	0,0	0	0/0	0/0	0/10	0/119	-	0
250	5,5	88	29/69	29/138	11/0	80/40	27/13	2535
300	8,5	156	52/107	52/214	3/7	111/9	30/15	3600
350	10,6	220	73/133	73/265	-13/24	120/0	35/17	4775
400	11,9	309	103/149	103/299	-56/67	94/26	43/22	6161



Figur 21. Merudgift ift. største besparelse som funktion af isoleringstykkelse for vægtype L2.1.

Byggeteknik

Isoleringstykkelsen kan øges blot ved at øge afstanden mellem stolperne. Dette kan, foruden den mere isolering og det større tag, kræve at forbindelsen mellem stolperne gøres stivere med en lille ekstra merudgift til følge.

Med gennemgående eller forbundne stolper er det kun muligt at placere dampspærren beskyttet hvis der suppleres med en indvendig lægtning. Statisk er stående pladebeklædning på lodret underlag væsentligt stivere i væggen plan end andre kombinationer. Hvis der anvendes vandret lægtning og der skal optages store skivekræfter kan der med fordel placeres et pladelag mellem stolperne og lægtningen. Dette beskytter samtidig dampspærren ekstra godt. Vandret lægtning vil kun kunne være en væsentlig varmeteknisk fordel i forbindelse med stålprofiler. Vandret lægtning kan dog også benyttes til at øge stolpeafstanden, hvilket kan reducere varmetabet fra stolperne.

Typen er velegnet til elementproduktion og kan anvendes til huse i flere etager.

Type L2.2

Opbygning

Væggen opbygges af et indvendigt bærende skelet, der isoleres udvendigt og beskyttes af en regnskærm, der f.eks. kan ophænges i tagkonstruktionen. Typen minder meget om Type T2.2, blot er den bærende tunge væg udskiftet med en skeletvæg.

Type L2.2 er i princippet opbygget som følger:

Regnskærm, ventileret hulrum og vindtæt afdækning integreres i en kassette, der op-
hænges i spær og fastholdes til fodrem.

200 – 300 mm fastholdt isolering

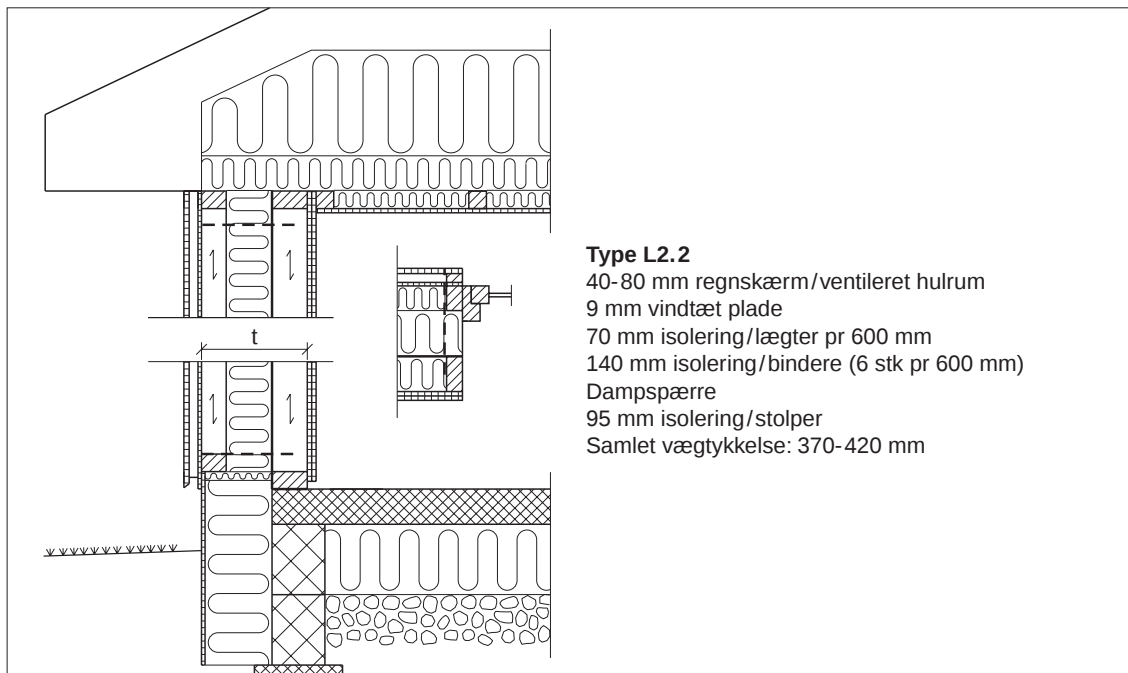
Gipsplade

Dampspærre

95 - 120 mm stolpeskelet / isolering

Indvendig pladebeklædning

En mulig udformning er vist i figur 22.



Figur 22. Mulig udformning for type L2.2.

Statik

Den nødvendige stolpedimension til optagelse af såvel den vandrette vindlast som den lodrette last vil ofte være ca. 100 mm. Bliver den større kan man, som omtalt i forbindelse med type T2.2, udforme regnskærmen og dens skelet således at den udvendige vindlast føres udenom det indvendige stolpeskelet, der herved aflastes delvist for den udvendige vindlast.

Varmeisolering og økonomi

De varmetekniske egenskaber vil være omtrent som for type L2.1. Økonomien er ikke vurderet.

Byggeteknik

Dampspærren kan placeres på ydersiden af det primære skelet, eventuelt beskyttet af en gipsplade, der også kan lukke bygningen midlertidigt. Herved kan det indvendige lægtag spares, men løsningen forudsætter at der anbringes mindst dobbelt så meget isolering udenfor dampspærren som i det primære skelet.

Med pladebeklædning på begge sider vil den primære vægdel være særdeles stiv overfor vandrette laster, såvel i væggens plan som vinkelret på dette. Pladernes bidrag til optagelse af den sidstnævnte last medregnes dog normalt ikke.

Isoleringstykkelsen kan øges blot ved at øge tykkelsen af isoleringen opsat uden på det primære skelet. Udgiften er stort set udgiften til isoleringen samt et større tag, med en mulig mindre ekstraudgift som følge af at regnskærmens egenvægt flyttes længere væk fra det primære skelet.

Det primære skelet kan fremstilles som elementer, men typen er ikke egnet til færdige vægelementer, fordi den ydre del forudsættes at hænge i spærene og kun er forbundet til den bærende del med nogle få bindere. Dette element kan ikke håndteres, da det er alt for slattent. Man kunne hænge den ydre del op i bøjler som for type T2.1, så kan man godt lave elementer.

4.6.5 Type L3, udvendigt bærende skelet

I denne løsning anvendes en bærende skeletkonstruktion, hvor det er den udvendige del der understøttes af fundament. Dette giver mulighed for en meget ideel kuldebroafbrydelse ved fundamentet og vinduer kan simpelt fastgøres i den primære konstruktion samtidig med at de er placeret fugtteknisk mest sikkert. Stolperne kan være gennemgående eller sammensatte som for type L2.1, således at den indvendige vægdel hænger i den udvendige.

Type L3 er i princippet opbygget som:

- Regnskærm, f.eks. skærmtegl eller træbeklædning
- 25 mm afstandslister pr 600 mm / ventileret hulrum
- 9 mm gipsplade udvendig
- Gennemgående eller forbundne stolper / isolering
- Dampspærre
- 45 mm lægter / 45 mm isolering
- Indvendig pladebeklædning

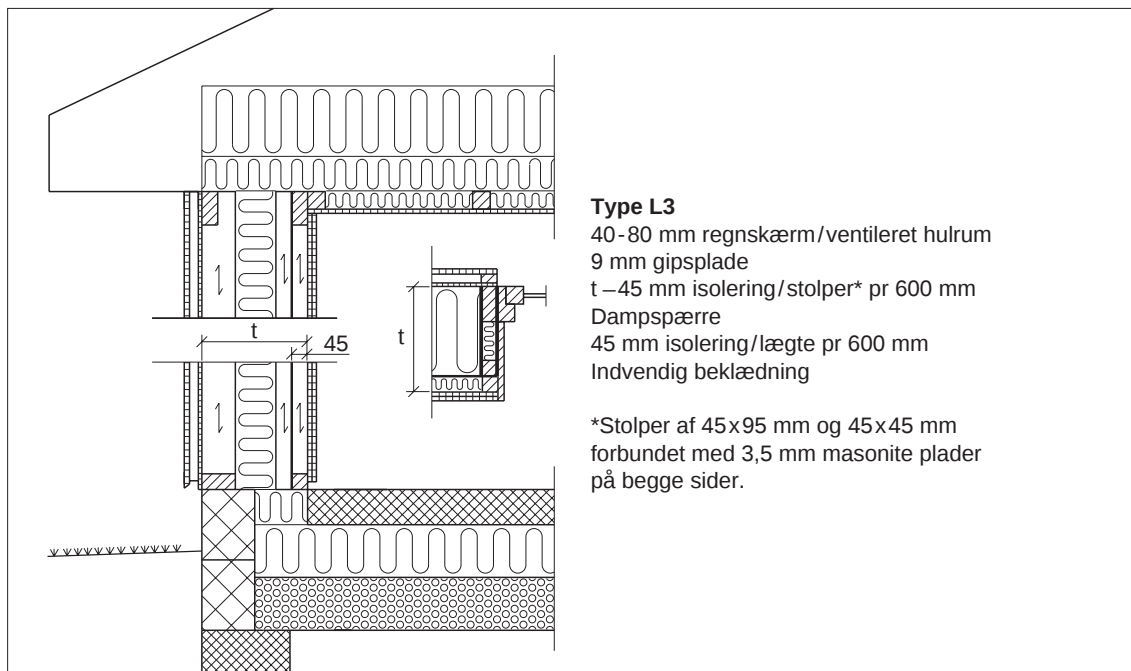
Statik

Hvis man ønsker at væggen skal kunne optage en stor reollast kan det imidlertid være problematisk at etablere en forskydningsstiv samling mellem de to delstolper med tilstrækkeligt gode tidsmæssige egenskaber for de fugtmæssige variationer der kan forekomme. I stedet kan den indvendige vægdel enten ophænges i spærene eller understøttes på kanten af betonpladen. Ophængningen giver ret store påvirkninger af spæret. Væggen kan også understøttes på kanten af betondækket, hvis dette armeres. Man skal imidlertid være opmærksom på at hvis den indvendige vægdel er fastholdt både til den udvendige og til dækket vil selv en beskeden sætning af dækket kunne udløse store tvangskræfter. Man bør derfor vælge kun en understøtningsform. Dette er nærmere behandlet i [15].

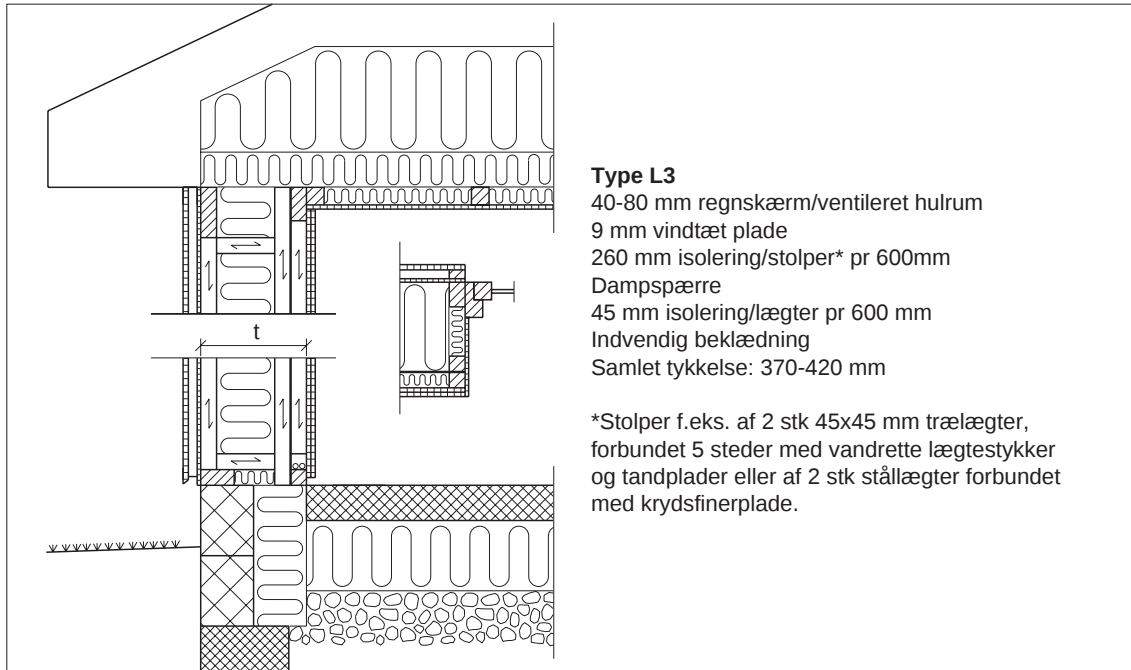
Den vandrette last i væggen plan kommer dels direkte fra taget via remmen, dels fra loftskiven. Det skal sikres at skivevirkningen i loftet også er tilstede på strækningen mellem den indvendige beklædning og det primære skelet. Skivevirkningen skal sikres af den udvendige gipsplade.

Varmeisolering og økonomi

Figur 23 viser den konstruktion, der er regnet på for type L3 (stolper forbundet med træfiberplader). Figur 24 viser en alternativ udformning af denne type (stolper forbundet med lægtestykker og tandplader).



Figur 23. Vægtype L3.



Figur 24. Vægtype L3, alternativ udformning.

I tabel 20 er vist en oversigt over flade- og linietab samt den effektive U-værdi. Efterfølgende er i tabel 21 vist de totaløkonomiske beregninger.

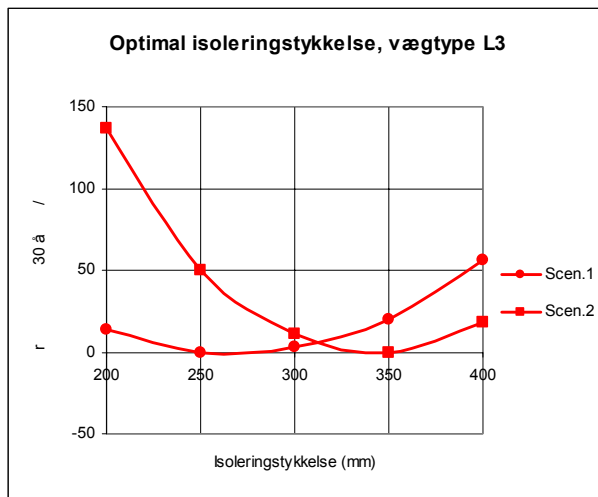
Tabel 20. Oversigt over beregnede U-, ψ - og κ -værdier samt effektiv U-værdi.

Type	Navn	Isol. tyk. mm	U W/m ² K	κ_{stolpe} W/mK	$\Psi_{\text{fundament}}$ W/mK	$\Psi_{\text{vind.tilsl.}}$ W/mK	Ψ_{tagfod} W/mK	U _{effektiv} W/m ² K
L3	Let væg m. udv. bærende skelet	200	0,173	0,016	0,143	0,015	0,038	0,307
		250	0,142	0,010	0,101	0,019	0,034	0,243
		300	0,120	0,007	0,079	0,024	0,031	0,206
		350	0,104	0,005	0,065	0,028	0,030	0,181
		400	0,092	0,004	0,056	0,032	0,028	0,164

Tabel 21. Økonomisk oversigt for vægtype L3.

Isol. tyk.	Energi- besparelse	Mer- anlægs- pris	Nuværdi af restværdi efter 30 år / nuværdi af energibesparelse i 30 år		Besparelse over 30 år / merudgift ift. billigste løsning		Simpel tilbage- beta- lingstid	CO ₂ - skygge- pris ¹⁾
mm	kWh/m ² /år	kr/m ²	kr/m ²		kr/m ²		år	kr/ton-CO ₂
			Scen.1	Scen.2	Scen.1	Scen.2	Sc.1/Sc.2	
200	0,0	0	0/0	0/0	0/14	0/137	-	-14625
250	5,8	87	29/72	29/145	14/0	87/50	25/13	657
300	9,1	154	51/114	51/229	12/3	126/11	28/14	2031
350	11,3	222	74/142	74/285	-6/20	137/0	33/16	3120
400	12,8	305	102/161	102/322	-42/56	119/18	40/20	4287

1) Vægtype L2.1 (200 mm) er reference.

**Figur 25. Merudgift ift. største besparelse som funktion af isoleringstykkelse for vægtype L3.**

Byggeteknik

Det vil formentlig altid være nødvendigt med en indvendig lægtning hvis dampspærren skal beskyttes. Selvom man dimensionerer det udvendige skelet således at det alene kan optage hele lasten vil det være vanskeligt at opsætte den indvendige vægdel med dampspærren på den udvendige side af dette sekundære skelet. Det kan muligvis lade sig gøre hvis den indvendige vægdel udformes som et element. Dette er ikke undersøgt nærmere.

Regnskærmen kan simpelt fastgøres til skelettet. Eventuelt kan den lette regnskærm erstattes af en skalmur hvis fundamentsklodsen rykkes lidt ud og der anvendes lidt bredere letklinkerblokke øverst. I dette tilfælde kan skalmuringen altså ske uden store følgegeomkostninger til fundamentet og uden forøgelse af linietabet ved fundamentet (tabet bliver endda lidt mindre når fundamentet rykkes ud). Med indvendig lægtning er løsningen velegnet til elementproduktion.

5 Varmekapacitetens betydning for opvarmningsbehov og indeklima

I denne rapport er beregning af varmetab gennem klimaskærmen og energiforbrug til opvarmning baseret på varmestrømme under stationære forhold (dvs. at temperaturer ikke ændre sig med tiden), og at transmissionstab og opvarmningsbehov ændrer sig lige meget. Der er altså ikke taget hensyn til de enkelte konstruktioners forskellige varme-lagringsegenskaber.

Formålet med dette kapitel er at undersøge varmekapacitetens betydning for opvarmningsbehov og indeklima samt at eftervise den anvendte sammenhæng mellem ændringer i transmissionstab og opvarmningsbehov.

Tunge konstruktioner kan bedre lagre varme end lette konstruktioner, hvilket alt andet lige vil resultere i et lavere opvarmningsbehov og færre perioder med overtemperatur. I den forbindelse er det primært varmekapaciteten indenfor isoleringen, der har betydning. Det er muligt, ved hjælp af beregningsprogrammet Tsbi3 [10], at medregne betydningen af varmekapaciteten og derved få påvist forskelle mellem lette og tunge konstruktioner.

5.1 Beregningsforudsætninger

Der er regnet på huset vist i bilag D, der er et etplans parcelhus på omkring 100 m². Huset opdeles i en nordzone og en sydzone, der hver især forudsættes ensartet i termisk henseende. Sydzonen består af stue, kammer og soveværelse. Alle relevante og typiske varmebelastninger og systemer modelleres. Omfang, regulering og tidsangivelse for systemerne er beskrevet i bilag B.

Der tages udgangspunkt i en let ydervægskonstruktion med to lag gips indvendigt (type L2). Denne sammenlignes med den tunge vægtype T1 (tung dobbeltvæg) med bagvægge af hhv. porebeton, letklinkerbeton og teglsten. Indvendige skillevægge for tung vægtype antages at bestå af samme materiale som bagvæggen. For tilfældet med let ydervæg består skillevægge af stålskelet og to lag gips på begge sider.

Betydningen af at variere parametre som tyngde af gulvoverflade og solindfald, undersøges.

Isoleringsniveau

Beregninger foretages for et realistisk fremtidigt isoleringsniveau (som benyttet i rapporten), svarende cirka til en forøgelse af isoleringstykkelsen med 100 mm i vægge,

gulv og loft ift. BR95-niveau (se tabel 22). Der er som ovenfor nævnt taget udgangspunkt i en let ydervægskonstruktion.

Tabel 22. Det undersøgte isoleringsniveau, svarende cirka til BR95-niveau + 100 mm.

	Isoleringstykkelse (mm)		
Isol. niveau	Væg	Gulv	Loft
+100 mm	300	200	400

Kuldebroernes betydning er medtaget i Tsbi3 vha. en fiktiv flade (der vender mod udeluften) for hver af de to zoner. Kuldebroernes samlede varmetabsbidrag omregnes til en isolans, der påsættes den enkelte fiktive flade som en ekstra isolans, dvs. som en isolans der ikke afhænger af lagtykkelse eller materialedata. Dermed kan det fiktive materiale som skal defineres, påføres en densitet på 0 kg/m^3 , en varmekapacitet på 0 J/kgK og en solabsorptans på 0, således at der ikke akkumuleres varme i den fiktive flade.

For at kunne sammenligne opvarmningsbehovene er det vigtigt, at det samlede transmissionstab er det samme for både de lette og tunge konstruktioner der sammenlignes. Dette opnås ved at justere på isoleringstykkelsen i den tunge ydervæg.

Gulvoverflade

Det er af afgørende betydning for gulvets varmeakkumulerende egenskaber, om der er isolering over betonpladen. Derfor undersøges de to tilfælde med 50 mm isolering og uden isolering over betonpladen. De to tilfælde benævnes i det følgende let hhv. tung gulvkonstruktion.

Let konstruktion består, udover isolering over betonlag, af 20 mm gulvbrædder på strøer. Hulrum umiddelbart under trægulvet tildeles en isolans på $0,16 \text{ m}^2\text{K/W}$ (iht. DS418). Det skal bemærkes, at trægulv alene (uden isolering over betonen) også vil kunne betragtes som en let konstruktion, idet gulvbrædders isolerende effekt til en vis grad ødelægger muligheden for at udnytte betonens varmekapacitet.

Tung gulvkonstruktion består udover betonpladen af en tynd vinyl- / linoleumsbelægning. (Tung gulvkonstruktion kan også være klinkebelægning.)

Solindfald

Størrelsen af solindfaldet / vinduesarealet er ligeledes af stor betydning. Derfor foretages der beregninger hvor glasarealet i sydfacaden fordobles (fra $7,8 \text{ m}^2$ til $15,6 \text{ m}^2$), svarende til, at solindfaldet for hele huset stiger fra 1609 til 2660 kWh pr. fyringssæson.

Vindues- og dørarealet øges derved fra ca. 22% til ca. 30 % af det opvarmede etageareal.

Fordeling af solindfald

En stor del af det totale solindfald (65%) tilføres overfladerne i huset. Den relative solbestrålingsstyrke på gulv, vægge og loft er sat til 4, 4 og 1. Denne fordeling betyder, at væggene tilføres lige så meget varme fra solindfald som gulvet, hvilket er en sandsynlig fordeling, da solen i størstedelen af fyringssæsonen står forholdsvis lavt på himlen.

Der er i beregningerne ikke taget hensyn til gardiner, persienner, rullegardiner, blomster og pynteting, der mere eller mindre hindrer solindfald gennem vinduerne. Der er ligeledes ikke taget hensyn til møbler, tæpper og andet inventar.

Materialedata

Densitet og specifik varmekapacitet for materialerne i vægge, gulv og loft fremgår af tabel 23.

Tabel 23. Materialedata.

Materiale	Densitet kg/m ³	Varmekapacitet J/kgK
Porebeton	645	1000
Letklinkerbeton	1200	1000
Tegl	1800	880
Gipsplader	900	1000
Betonklaplag	2300	800
Trægulv	600	2500
Gulvtæppe	500	1000
Isolering, mineraluld	30	840

Vinduer er almindelige trævinduer med ramme-karmtykkelse på 100 mm, tolags termoruder med argonfyldning og lavemissionsbelægning på det ene glas. Følgende værdier for U-værdi, transmittans og glasprocent er anvendt:

U-værdi, rude: 1,25 W/m²K

U-værdi, vindue: 1,50 W/m²K

(effekten af rudens afstandsprofil og ramme-karm er indregnet)

Total solenergitransmittans, rude: 0,51

Glasprocent for vinduer: Stuevinduer, 2 stk.: 62 %

Små vinduer, 3 stk.: 65 %

Store vinduer, 3 stk.: 72 %

Tsbi3 medregner ikke vinduers varmekapacitet.

5.2 Beregningsresultat mht. opvarmningsbehov

Det årlige opvarmningsbehov for eksempel-huset med lette ydervægge (referencen) er vist i tabel 24.

Tabel 24. Opvarmningsbehov (kWh/år) for eksempel-huset med lette ydervægge - afhængig af solindfald og gulvoverfladens tyngde.

Vinduesareal	Let væg	
	Let gulv m. trægulv på strøer	Tungt gulv m. linoleum
Alm. vinduesareal	6329	6286
Forøget vinduesareal	6780	6566

I efterfølgende tabel 25 er resultaterne angivet for tilfældet med et vindues- og dørareal på 22% af det opvarmede etageareal, svarende til krav i BR95. Tallene udtrykker forskellen i opvarmningsbehovet i fyringssæsonen (24/9-13/5: 232 dage) i kWh/år, dvs. besparelsen ved at anvende en tung ydervæg fremfor en let, afhængig af gulvoverfladens tyngde.

Tabel 25. Besparelse i opvarmningsbehov (kWh/år) ved brug af en tung ydervæg fremfor en let - afhængig af bagvægsmaterialet og gulvoverfladens tyngde.

		Let gulv m. trægulv på strøer	Tungt gulv m. linoleum
Bagvæg	Porebeton	31	14
	Letkl.beton	83	40
	Tegl	100	54

I tabel 25 er der kun set på ændringer i opvarmningsbehov, når væggenes tyngde er forskellig (samme gulvkonstruktion). Betydning af at have forskellige kombinationer af let/tung væg (LV/TV) og let/tungt gulv (LG/TG) er vist i tabel 26. Tung væg og let væg kan kombineres på 4 forskellige måder. Der ses kun på tung væg med bagvæg af teglsten. Tallene i tabellen angiver besparelsen i opvarmningsbehov for førstnævnte kombination sammenholdt med sidstnævnte.

Det bemærkes, at kombination 1 viser det "ekstreme" tilfælde hvor både vægge og gulv er tunge fremfor lette.

Tabel 26. Besparelse i opvarmningsbehov (kWh/år) for forskellige kombinationer af tung og let væg/gulv.

Kombination af tung og let væg/gulv	Besparelse i opvarmningsbehov kWh/år
1: TV, TG ift. LV, LG	120
2: LV, TG ift. LV, LG	66
3: LV, TG ift. TV, LG	-34
4: TV, TG ift. TV, LG	20

Forøget vinduesareal i sydfacaden

De ovenfor beskrevne analyser er ligeledes foretaget med et større vinduesareal i sydfacaden (omtalt tidligere). Resultaterne fremgår af tabel 27 og tabel 28.

Tabel 27. Besparelse i opvarmningsbehov (kWh/år) ved brug af en tung ydervæg fremfor en let - afhængig af bagvægsmaterialet og gulvoverfladens tyngde. Glasarealet i sydfacaden er øget til det dobbelte.

		Let gulv m. trægulv på strøer	Tungt gulv m. linoleum
Bagvæg	Porebeton	64	41
	Letkl.beton	243	144
	Tegl	323	183

Tabel 28. Besparelse i opvarmningsbehov (kWh/år) for forskellige kombinationer af tung og let væg/gulv. Glasarealet i sydfacaden er øget til det dobbelte.

Kombinationer af tung og let væg/gulv	Besparelse i opvarmningsbehov kWh/år
1: TV, TG ift. LV, LG	420
2: LV, TG ift. LV, LG	237
3: LV, TG ift. TV, LG	-86
4: TV, TG ift. TV, LG	97

5.3 Beregningsresultater mht. indetemperatur

Udover at anvendelse af tunge klimaskærmskonstruktioner fremfor lette vil resultere i et mindre opvarmningsbehov, vil tunge konstruktioner også kunne udjævne indetemperaturen over døgnet med færre perioder med overtemperaturer til følge og alt andet lige en bedre termisk komfort. Omfanget af denne temperaturudjævning fremgår af tabel 29 og tabel 30 nedenfor, hvor overtemperaturfordelingen i sydzonen (antal timer over 21, 22 og 24°C) er angivet for de to kombinationer let væg og let hhv. tungt gulv samt kombinationen tung væg og tungt gulv. Nordzonen anses for uinteressant, da gratisvarmetilførelsen er begrænset. Tabel 30 viser resultaterne for et større vinduesareal i sydfacaden. Overtemperaturfordelingen er angivet for både fyringssæsonen og hele året.

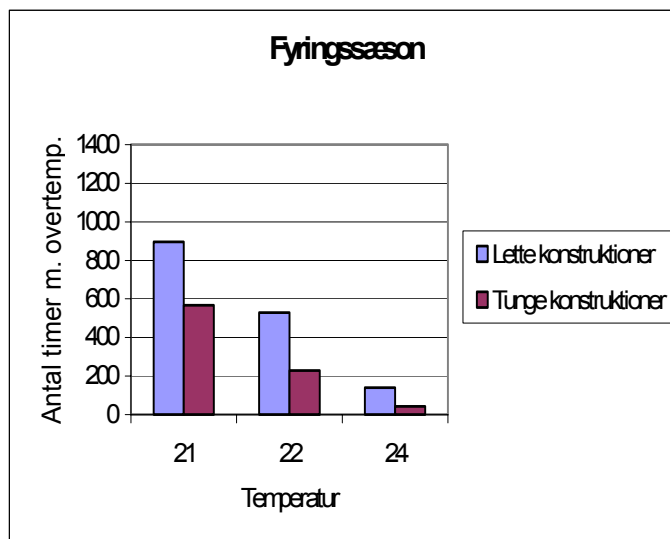
Tabel 29. Temperaturfordeling i den sydlige del af eksempel-huset i fyringssæsonen hhv. hele året for lette og tunge konstruktioner. Tallene i parentes er antallet af timer i % af det samlede antal timer.

	Let ydervæg & Let gulv		Let ydervæg & Tungt gulv		Tung ydervæg (bagvæg af tegl) & Tungt gulv	
	Fyr.sæson	Hele året	Fyr.sæson	Hele året	Fyr.sæson	Hele året
Timer over 21 °C	895 (16)	3520 (40)	797 (14)	3571 (41)	566 (10)	3419 (39)
Timer over 22 °C	529 (9)	2651 (30)	397 (7)	2733 (31)	229 (4)	2700 (30)
Timer over 24 °C	140 (2)	978 (11)	70 (1)	933 (10)	43 (0)	857 (9)

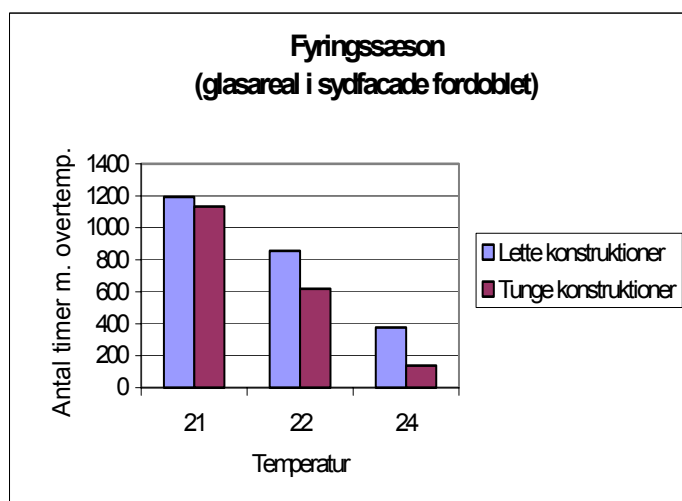
Tabel 30. Temperaturfordeling i den sydlige del af eksempel-huset i fyringssæsonen hhv. hele året for lette og tunge konstruktioner. Glasarealet i sydfacaden er øget til det dobbelte.

	Let ydervæg & Let gulv		Let ydervæg & Tungt gulv		Tung ydervæg (bagvæg af tegl) & Tungt gulv	
	Fyr.sæson	Hele året	Fyr.sæson	Hele året	Fyr.sæson	Hele året
Timer over 21 °C	1194 (21)	3820 (43)	1200 (21)	4054 (46)	1133 (20)	4098 (46)
Timer over 22 °C	856 (15)	3041 (34)	777 (13)	3232 (36)	618 (11)	3296 (37)
Timer over 24 °C	377 (6)	1468 (16)	270 (4)	1453 (16)	138 (2)	1346 (15)

I de to nedenstående figurer er vist en sammenligning af antallet af overtemperaturer i fyringssæsonen for de to "ekstreme" tilfælde: Let væg- og gulvkonstruktion samt tung væg- og gulvkonstruktion.



Figur 26. Overtemperaturfordeling for lette hhv. tunge konstruktioner.



Figur 27. Overtemperaturfordeling for lette hhv. tunge konstruktioner. Vinduesareal i sydfacade er fordoblet.

5.4 Validering af sammenhæng mellem transmissionstab og opvarmningsbehov

Baggrunden for bestemmelse af energiforbruget til opvarmning i denne rapport bygger på antagelsen om at transmissionstab og opvarmningsbehov ændrer sig lige meget når isoleringstykkelsen ændres. Denne antagelse bygger på en række parametervariationer af isoleringstykkelserne i de forskellige bygningsdele i eksempel-huset [8]. For at efter- vise sammenhængen er der foretaget beregning af transmissionstab (graddøgnsberegning) og opvarmningbehovet (Tsb_{i3}-beregning) for eksempel-huset for to isoleringsniveauer, der er benyttet i rapporten (se tabel 31). Da varmekapaciteten har en vis

betydning undersøges tilfældet hvor gulv og vægge er tunge (vægtype T1.c) og tilfældet hvor gulv og vægge er lette (vægtype L2.1).

Tabel 31. De to isoleringsniveauer for hvilke ændringer i transmissionstab og opv. behov beregnes.

Isol. niveau	Isoleringstykkelse (mm)		
	Væg	Gulv	Løft
niveau 1	200	100	300
+ 100 mm	300	200	400

Beregninger viser, at for tunge konstruktioner er ændringen i transmissionstab 1084 kWh/år, mens opvarmningsbehovet ændrer sig med 998 kWh/år, hvilket giver en faktor på 0,92. For tilfældet med lette konstruktioner er tallene 1173 og 1108 kWh/år, der resulterer i en faktor på 0,95. Det ses, at en vis ændring i transmissionstabet omtrentligt vil give den samme ændring i opvarmningsbehovet. Det skal bemærkes, at hvis fyringsvirkningsgraden er 0,92 hhv. 0,95, vil ændringen i energiforbrug til opvarmning svare til ændringen i transmissionstab.

6 Varmeteknisk sammenligning af forskellige vægtyper

I det følgende foretages en sammenligning af de enkelte vægtyper ved at se på hvilken isoleringstykkelse der resulterer i samme effektive U-værdi (betydningen af kuldebroer indregnes), idet der tages udgangspunkt i den lette vægtype L3 ved 300 mm isolering ($U_{\text{effektiv}} = 0,176$). Der ses bort fra linietafet ved vinduetilslutningen, da vinduesplaceringen i forhold til isoleringen er forskellig for de enkelte vægtyper. Det er derfor et normalsnit i ydervæggen der betragtes.

Linietafstillægget beregnes som: $0,45 \cdot \psi_{\text{fundament}} + 0,5 \cdot 0,45 \cdot \psi_{\text{tagfod}} + 1,7 \cdot \kappa_{\text{stolpe}}$, da der ca. er 0,45 m fundament og tagfod samt 1,7 m stolpe pr. m^2 ydervæg (uden vinduer). Linietafet ved fundament og tagfod fordeles med 100 % hhv. 50 % til væggen, hvilket er i overensstemmelse med den fordeling, der ligger til grund for beregning af driftsenergiudgifter og totaløkonomi i rapporten.

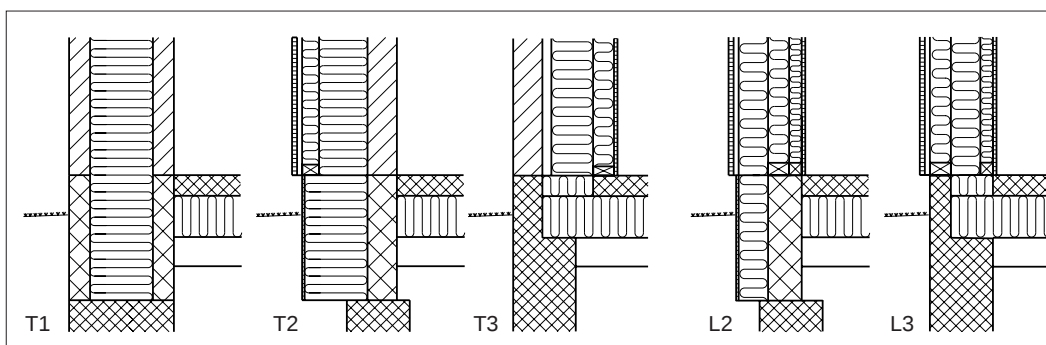
I tabel 32 er den ækvivalente isoleringstykkelse samt den samlede vægtykkelse (inkl. regnskærm) anført for de forskellige vægtyper. Ligeledes er linietafenes andel af den effektive U-værdi angivet.

Tabel 32. Isoleringstykkelse svarende til U_{effektiv} på 0,176, samlet vægtykkelse og linietafsandele for forskellige vægtyper.

Vægtype	Isoleringstykkelse svarende til $U_{\text{effektiv}} = 0,176$ mm	Samlet væg- tykkelse mm	Andel Fundament %	Andel Tagfod %	Andel Stolper %
L3 (reference)	300	375 - 415 ¹⁾	20	4	8
L2	325	400-440 ¹⁾	23	4	7
T1, bagvæg af porebeton	300	510	29	4	-
T2, bagvæg af porebeton	300	470-510 ¹⁾	29	4	-
T3	270	505 ²⁾	19	4	-

1) Der er regnet med en 40-80 mm regnskærm/ventileret hulrum

2) Der er regnet med 50 mm ventileret hulrum



Figur 28. Oversigt over vægtyper (del af figur 4).

7 Sammenfatning/konklusion

Generelt

Det er sandsynliggjort at det er teknisk muligt at opføre ydervægge med mindre varmetab end de der netop opfylder kravene i de nuværende bygningsreglementer uden væsentligt øget materialeforbrug, bortset fra isoleringsmængden. For en del konstruktionsstyper gælder at det er nødvendigt at ændre de hidtil anvendte principper noget, men at omkostningerne ved yderligere forøgelse af isoleringstykkelsen stort set kun er den yderligere isolering.

Linietafet ved fundamentet

Det har vist sig at linietafet ved fundamentet fortsat vil være betydeligt når fundamentet i form af letklinkerblokke gennembryder isoleringen, især når den bærende væg er af et materiale med relativ høj varmeledningsevne. Tabet kan reduceres noget ved at anvende tre eller fire skifter letklinkerblokke, men det vil derfor være ønskeligt at der udvikles nye komponenter til den øvre del af fundamenter. I den forbindelse er det værd at bemærke at styrken af de nu anvendte letklinkerblokke normalt vil være noget større end nødvendigt for lavt byggeri. En mulighed er evt. lidt større elementer af letklinkerbeton med passende udsparringer udfyldt med isoleringsmateriale.

Vinduestilslutning

Vinduesfalsenes bidrag til varmetabet er ret beskedent for de viste løsninger. De ret store linietaf der er beregnet for vinduerne skyldes overvejende den todimensionale varmemestrøm, der opstår når en tynd rude skal tilsluttes den væsentlig tykkere isolering i vinduesfalsen. Den store isoleringstykkelse i vinduesfalsen vil derfor først rigtigt blive udnyttet når der er udviklet bedre vinduestyper, der forårsager mindre todimensional varmemestrøm. Forudsætningen for fuldt udbytte af sådanne vinduer er til gengæld at vinduesfalsens isoleringstykkelse er tilstrækkelig. Da vinduer forventes at blive udskiftet måske flere gange i en bygnings levetid vil en stor isoleringstykkelse i vinduesfalsen også have karakter af en fremtidssikring.

Der er behov for en nærmere bearbejdning af vinduesplaceringen og –udformningen, såvel arkitektonisk som vedrørende fastgørelsen. Vinduerne vil ofte skulle fastgøres i væggens indvendige, bærende del samtidig med at glasset ønskes trukket frem i facaden. Dette kan blandt andet ske ved brug af beslag der minder om de der allerede bruges, men måske også ved hjælp af de tilsætninger, der vil være nødvendige for at dække isoleringen i vinduesfalsen. De større vægtykkelser kræver også overvejelser om lysindfaldet. Disse forhold vil hensigtsmæssigt kunne bearbejdes i forbindelse med forsøgsbyggerier, hvor de foreslåede vægtyper afprøves.

Holdbarhed

En del af konstruktionerne minder i deres opbygning meget om typer, der anvendes i dag, således at forhold omkring levetid og vedligehold er velkendte. Nogle af konstruktionerne forudsætter dog at den ene vægdel ophænges i den anden, eller eventuelt i spærrene. Det er væsentligt ved f.eks. vinduesåbninger at der ikke sker væsentlige differensbevægelser mellem vægdelene. Udformningen af ophængningssystemet skal derfor ofres særlig opmærksomhed og der er behov for forsøg, der kan demonstrere velegnede metoder.

Varmekapacitetens betydning

Det er undersøgt, hvad der kan opnås i besparelse i opvarmningbehov og reduktion i overtemperaturer ved at benytte tunge fremfor lette klimaskærmskonstruktioner. Terminologien omkring tunge hhv. lette konstruktioner henviser til tyngden/massen på den indvendige side af isoleringen, da det er denne del af konstruktionerne, der primært har betydning for varmelagringsegenskaberne. Undersøgelserne er baseret på modellering af et typisk etplans parcelhus (se eksempel-huset - bilag D) med typiske varmebelastninger og systemer. Betydningen af at variere parametre som tyngde af gulvkonstruktion og solindfald, er undersøgt. Beregningerne er foretaget for et realistisk fremtidigt isoleringsniveau, svarende cirka til en forøgelse af isoleringstykkelsen med 100 mm i vægge, gulv og loft ift. BR95-niveau.

Beregningerne viser, at besparelsen i opvarmningsbehov ved at benytte tunge fremfor lette yder- og indervægge er forholdsvis lille. Er bagvæggen og indvendige skillewægge af tegl i stedet for skelet-konstruktioner og gipsplader, er der mulighed for en besparelse i størrelsesordenen 300 kWh på årsbasis, svarende til ca. 5 kWh/m² ydervæg eller omkring 4,5 % af det samlede opvarmningsbehov. Dette gælder for et stort solindfald (fordobling af vinduesarealet i sydfacaden) og en let gulvkonstruktion (50 mm isolering over betonlaget). Er der ikke isolering over betonlaget (tungt gulv), er besparelsen kun omkring det halve.

Antallet af overtemperaturer er et andet aspekt omkring varmekapacitetens betydning, som påvirkes af konstruktionernes varmelagringsegenskaber. Antallet af overtemperaturer (timer over 21, 22 og 24°C) er opgjort for fyringssæsonen og hele året for de tre væg/gulv-kombinationer: Let væg og let gulv, let væg og tungt gulv samt tung væg og tungt gulv.

Generelt kan det ikke overraskende konkluderes, at glasarealet (solindfaldet) påvirker tiden med overtemperaturer væsentligt. Væg/gulv-massen påvirker tiden med overtemperaturer en del, når fyringssæsonen betragtes, men næsten intet set over hele året.

Totaløkonomisk vurdering / optimal isoleringstykkelse

Der er udviklet en metode til vurdering af hvilket isoleringsniveau, der er det totaløkonomisk optimale for en given klimaskærmskonstruktion (ydervægge, gulv- og loftskonstruktion). Metoden er baseret på en opgørelse af meranlægsudgifter ved at øge isoleringstykkelsen samt besparelsen i driftsenergiudgifter (opvarmningsudgifter) i de første 30 år af bygningsdelens levetid, som er sat til 100 år. Da beregningsperioden er mindre end levetiden, har meranlægsinvesteringen en restværdi efter 30 år. Der regnes med lineær afskrivning, svarende til at restværdien udgør 70 % af investeringen. Vedligeholdelsesudgifterne forudsættes at være uafhængige af isoleringstykkelsen. Ved bestemmelsen af driftsenergiudgifter forudsættes, at energiforbrug til dækning af opvarmningsbehov ændrer sig ligesom transmissionstabet når isoleringstykkelsen ændres.

På baggrund af driftsenergi- og anlægsudgifter er de samlede udgiftsændringer i beregningsperioden bestemt ved en nuværdibetragtning. På grund af de store usikkerheder i forbindelse med fremtidig energipris er der undersøgt to sandsynlige scenarier. Herved kan de økonomiske konsekvenser af en ændring i energiprisniveauet i beregningsperioden synliggøres.

Der er i rapporten foretaget en økonomisk optimering af isoleringstykkelsen i de udviklede vægløsningstyper samt i loft- og terrændækkonstruktion for to forskellige scenarier vedrørende energipris og realrente. I tabel 33 er scenarierne resumeret og de økonomisk optimale isoleringstykkelser er vist. Hvor det økonomiske optimum er meget fladt, er der angivet et stort interval, mens det modsatte er tilfældet, når optimum er stejlt (se også grafer i kapitel 4).

Tabel 33. Optimal isoleringstykkelse (mm) for to scenarier vedr. energipris og realrente.

Scenarie	BR95	1	2
Energipris, Kr/kWh	-	0,60	1,2
Realrente, %	-	2,5	2,5
Tung ydervæg	125	200-250	250-325
Let ydervæg	200	250-300	325-350
Loftkonstruktion	250	300-350	425-525
Terrændækkonstruktion ¹⁾	70	100	150-225

1) Der er forudsat kapillarbrydende lag af 150 mm løse letklinker.

For scenarie 1, hvor energiprisen og rente ligger på det nuværende niveau, er de optimale isoleringstykkelser for ydervægge mellem 25 og 100 % større end kravene i BR95 (størst for tung ydervæg). De optimale tykkelser for loft og terrændæk er lidt større end i BR95. For scenarie 2, der adskiller sig fra scenarie 1 ved at energiprisen er fordoblet,

er de optimale isoleringstykkelser for de enkelte bygningsdele i størrelsesordenen 75-200 % større end kravene i BR95. Størst afvigelse fra BR95 er der for tung ydervæg og terrændæk.

Når det økonomiske optimum generelt er større end kravene i BR95, findes der en isoleringstykkelse, større end den optimale, for hvilken totaløkonomien er den samme som for BR95-niveau (dvs. en isoleringstykkelse svarende til neutral investering). Denne isoleringstykkelse fremgår af tabel 34. Det ses af tabellen, at niveauet ligger meget højt.

Tabel 34. Omtrentlig isoleringstykkelse (mm) svarende til neutral investering/samme totaløkonomi som BR95.

Scenarie	BR95	1	2
Energipris, Kr/kWh	-	0,60	1,20
Realrente, %	-	2,5	2,5
Tung ydervæg	125	325 - >400	>400
Let ydervæg	200	350	>400
Loftkonstruktion	250	425	>600
Terrændækkonstruktion ¹⁾	70	150	>300

1) Der er forudsat kapillarbrydende lag af 150 mm løse letklinker.

Det er under alle omstændigheder hensigtsmæssigt nøje at vurdere hvilket isoleringsniveau nybyggeri skal have, da efterisoleringsforanstaltninger oftest er besværlige og dyre. Meranlægudgiften for de beregnede optimale scenarieløsninger for eksempel-huset ligger i størrelsesordenen 20.000 kr for scenarie 1 og 50.000 kr for scenarie 2. Set i lyset af dette, kan man anlægge det synspunkt, at merudgiften er relativt beskeden i forhold til husets samlede byggeudgift på omkring 1 mio. kr. Det er således muligt for en mindre merudgift at fremtidssikre et hus energimæssigt.

Både størrelsen af de optimale isoleringstykkelser og isoleringstykkelsen svarende til samme totaløkonomi som BR95-niveau peger i retning af, at det ville være hensigtsmæssigt med en væsentlig stramning af kravene til isoleringsniveauet i det nye bygningsreglement. Dermed vil fremtidens klimaskærmskonstruktioner være forberedt for den fremtidige energisituation og bidrage til en bæredygtig udvikling.

8 Fremtidigt arbejde

I løbet af projektperioden er fremkommet en række problemer og ideer, der ikke har kunnet bearbejdes inden for projektets rammer, men som det vil være hensigtsmæssigt at bearbejde efterfølgende. Disse emner til fremtidig behandling beskrives kort i det følgende.

- *Varmekapacitet:* Hvorledes kan konstruktioner udformes så deres varmeakkumuleringssevne medvirker til at sikre en effektiv udnyttelse af solindfaldet samtidig med at døgnvariationerne udjævnes tilstrækkeligt.
- *Solenergi:* Mulighederne for at opnå besparelser på driftsenergien gennem anvendelse af dynamiske ydervægskonstruktioner, fx solvægge, er ikke behandlet.
- *Dagslys:* Hvilken indflydelse har de tykkere vægge på dagslysindfaldet og kan effekten modvirkes med fx affasninger i vindueslysningen.
- *Vinduesfastgørelse:* Det bør undersøges nærmere hvordan vinduesfals, tilsætninger og fastholdelser kan udformes for at undgå potentielle byggefejl, når man søger at udnytte fremtidens vinduer optimalt. Forstærkninger ved falsene i form af ommuringer giver kuldebroer. Ommuringer kan undgås hvis man kan udvikle en metode til lokal forstærkning af murede vægge, da de ikke uden videre kan armeres.
- *Fundering:* I det sydlige Sverige anses det for tilstrækkeligt at fundere i dybden 350 mm, hvor man i Danmark går ned til frostfri dybde, 900 mm. I Sverige tillader man desuden at der i fundamentet indgår såvel et kapillarbrydende lag som hård isolering. Mulighederne for at overføre de svenske erfaringer til danske forhold (klimatiske og byggetekniske) bør undersøges da det vil kunne billiggøre byggeriet og reducere resurseforbruget hvis de kan overføres. Man skal specielt være opmærksom på at øget isolering mod jord vil øge den frostfri dybde.
- *Fundament:* En forudsætning for at reducere linietabet ved fundamentet når dette gennembryder isoleringen er at der udvikles en komponent, der kan reducere den lodrette varmestrøm gennem fundamentet. Dette kunne være en komponent baseret på letklinkerbeton med isolerede udsparinger (f.eks. $h \times l \times b = 600 \times 1200 \times 150$ mm).
- *Gulvvarme:* Anvendelse af gulvvarme forøger varmetabet gennem terrændæk og fundament, og forrykker optimalt isoleringsniveau opad. Det bør nærmere undersøges, hvor meget gulvvarme betyder for det optimale isoleringsniveau.

- *Fleretagers huse:* Der er betydelige energimæssige fordele ved fleretagers huse. En mere præcis kortlægning kan medvirke til bevisførelse om dette. Blandt emnerne kan være en sammenligning af traditionelle 1½-plans huse med huse i to fulde plan eller med 1½-plans huse med ensidig taghældning.
- *Kælder:* Kældre er ikke behandlet i projektet. Der er behov for udvikling af samlinger med mindre linietaf, specielt ved overgangen mellem en midterisoleret sokkel og en udvendigt isoleret kældervæg, men også ved samlingen mellem kældergulv og -væg.
- *Bruttoareal / nettoareal:* Større isoleringstykkelse forøger husets bruttoetageareal. Forøges eksempelvis isoleringstykkelsen med 100 mm for et typisk et-plans hus, øges bruttoarealet med ca. 4 %. Der bør derfor arbejdes for at ejendomsvurderinger og bebyggelsesprocenter baseres på nettoareal fremfor bruttoareal for at undgå at forbedring af isoleringsniveauet udover det krævede 'straffes'.
- *Livscyklusanalyse og totaløkonomi:* Der bør foretages en livscyklusvurdering for de foreslåede konstruktionstyper. I forbindelse med vurdering af såvel miljøbelastning som totaløkonomi skal der også tages hensyn til vedligeholdelsesbehovet.
- *Arkitektur:* Der er behov for en bred analyse af de arkitektoniske og æstetiske konsekvenser af de foreslåede konstruktionstyper.

9 Referencer

- [1] Energi21-regeringens energihandlingsplan 1996. Miljø- og energiministeriet 1996.
- [2] Energiforskningsprogram 1998 (EFP98). Energistyrelsen 1997.
- [3] Bygningsreglementet 1995. Bygge- og Boligstyrelsen 1995.
- [4] Dansk Standard DS418: Regler for beregning af bygningers varmetab. Dansk Ingeniørforening. København, 1986.
- [5] DS418 tillæg 4 omhandlende kuldebroer. Høringsudkast, version 1.00. Dansk Standard. København, 1999.
- [6] Heat2 (version 3.01, 1999) og Heat3 (version 3.00, 1998). Pc-programmer til beregning af to- og tredimensionale varmestrømme. Blomberg, Afdelingen for Bygningsfysik, Universitetet i Lund.
- [7] V&S priser: Husbygning-netto. V&S Byggedata. Brønshøj, 1999.
- [8] Optimering af klimaskærmskonstruktioner. Eksamensprojekt af Henrik Tommerup, Institut for Bygninger og Energi, DTU. Januar 1999.
- [9] Design Reference Year, DRY - et nyt dansk reference år. Jensen og Lund, Laboratoriet for Varmeisolering, DTU, 1995.
- [10] Tsb3-brugervejledning. Computerprogram til termisk simulering af bygninger. Johnsen og Grau, Statens Byggeforskningsinstitut, 1994.
- [11] Energy Use and Enviromental impact of New Residential Buildings. Karin Adalberth, Inst. för Bygnadsteknik, Lunds Tekniske Högskola. Rapport TVBH-1012. 2000.
- [12] Generelle forudsætninger for samfundsøkonomiske beregninger. Energistyrelsen, sept. 1999.
- [13] Brændselsprisforudsætninger for samfundsøkonomiske beregninger. Energistyrelsen, juni 1999.
- [14] Norm for murværkskonstruktioner, DS 414, 5. udgave, 1998.
- [15] SBI-publikation med redegørelse for statiske forhold for lette og tunge vægge. Publiceres forår 2000.
- [16] Ikke-bærene indervægge, ydeevnebeskrivelse 1, SBI, 1974.
- [17] Realisering af lavenergihuse. Eksamensprojekt af Søren Pedersen, Institut for Bygninger og Energi, DTU. Januar 2000.

Bilag A: Forudsætninger for fastsættelse af anlægspriser

Priserne for vægtype T1 og T2 er baseret på V&S-priser, husbygning-netto [7] (prisniveau, januar 1999). Priser er i dette bilag angivet ekskl. moms, undtagen priser i skemaer, der er inkl. 25 % moms. Priser på terrændæk og loftkonstruktion er baseret på V&S-nettopriser. Vægtype L2 og L3 er baseret på detaljerede priskalkulationer samt V&S-priser.

Der er regnet med 0,6 m fundament og tagfod pr. m² ydervæg og 0,75 m vinduestilslutning pr. m² ydervæg.

Vægtype T1, tung dobbeltvæg

Isoleringspris: Baseret på m³-pris for mineraluld i tykkelse på 190 mm, m³-pris: 584 kr/m³, undtagen for 125 mm isolering, hvor prisen 616 kr/m³ er anvendt.

For isolering i fundament er brugt førstnævnte m³-pris.

Vinduestilsætninger (fyrretræ i 21 mm tykkelse, ca. 400-700 kr./m² afhængig af bredde) og *ekstra tag* (betontagsten: 130 kr./m², taghældning: 30 grader) som følge af mere isolering i væg.

Betondfundament: Baseret på m³-prisen for et 400 mm tykt fundament, m³-pris: 1105 kr/m³.

Fundamentssokkel, bestående af 100 mm letklinkerblokke + isolering + 150 mm letklinkerblokke: Baseret på m³-prisen for 230 mm tykke letklinkerblokke, m³-pris: 1661 kr/m³. Ved 125 mm isoleringstykkelse er der for fundamentssokkel (massiv letklinker) regnet med prisen for 330 mm tykke letklinkerblokke (m³-pris: 1548 kr/m³). Der er regnet med en sokkelpudspris til 88 kr/m (se nedenfor under let vægtype).

Eksempel på specificering af prisberegning for vægtype T1a (porebetonbagvæg, 100 mm):

Isolerings-tykkelse	Isolering, væg	Vindues-tilsætninger	Tag	Fundament	Samlet m ² -pris
mm	Kr/m ²	Kr/m ²	Kr/m ²	Kr/m ²	Kr/m ²
125	96	0	0	381	477
200	146	33	8	416	603
250	182	43	14	449	688
300	219	56	20	483	778
350	256	85	25	517	883
400	293	99	31	550	973

Specificering af m²-pris på fundament anført i ovenstående tabel:

Isolerings-tykkelse	Beton	Letklinker-sokkel	Isolering	Sokkel-puds	Samlet m-pris	Samlet m ² -pris
mm	Kr/m	Kr/m	Kr/m	Kr/m	Kr/m	Kr/m ²
125	269	256	0	110	635	381
200	332	208	44	110	693	416
250	373	208	58	110	749	449
300	414	208	73	110	805	483
350	456	208	88	110	861	517
400	497	208	102	110	917	550

Vægtype T2, tung bærende bagvæg

Isoleringspris: som for T1. For isolering i fundament: som for T1.

Vinduestilsætninger og ekstra tag som følge af mere isolering i væg: som for T1.

Betonfundament: Baseret på m³-prisen for et 300 mm tykt fundament, m³-pris: 1117 kr/m³.

Fundamentssokkel (150 mm): Baseret på m³-prisen for 230 mm tykke letklinkerblokke, m³-pris: 1661 kr/m³.

Eksempel på specificering af prisberegning for vægtype T2.1a (porebetonbagvæg, 120 mm):

Isolerings-tykkelse	Isolering, væg	Vinduestilsætninger	Tag	Fundament	Samlet m ² -pris
mm	Kr/m ²	Kr/m ²	Kr/m ²	Kr/m ²	Kr/m ²
125	96	0	0	309	405
200	146	33	8	322	509
250	182	43	14	331	570
300	219	56	20	339	634
350	256	85	25	348	714
400	293	99	31	357	780

Specificering af m²-pris på fundament anført i ovenstående tabel:

Isolerings- tykkelse	Beton	Letklinker- sokkel	Isolering	Sokkel- Puds	Samlet m-pris	Samlet m ² -pris
mm	Kr/m	Kr/m	Kr/m	Kr/m	Kr/m	Kr/m ²
125	251	125	28	110	514	309
200	251	125	50	110	536	322
250	251	125	64	110	550	331
300	251	125	79	110	565	339
350	251	125	94	110	579	348
400	251	125	108	110	594	357

Vægtype L2 (indv. bærende skelet) og L3 (udv. bærende skelet)

Prisen på væggen er baseret på detaljerede prisberegninger af Poul H. Olsen (Chr. Jensens Sønner A/S) af isoleringsniveauet 300 mm og 400 mm. Prisen på fundamentssokkel (40 cm høj) er baseret på detaljerede beregninger ved en vægisoleringstykkelse på 300 mm. For de øvrige isoleringstykkelse findes prisen ved isoleringstillæg/-fradrag baseret på isoleringsprisen anført under T1 og T2.

Forudsætninger for facade- og sokkelopmåling: Udført efter skitser og beskrivelser fra de anførte firmaer m.m. Materialepris er vejledende udsalgspris fra samme trælasthandel. Lønnen er almindelig opmåling som udført på byggeplads ekskl. byggepladstillæg men med alle sociale ydelser. Indvendigt er regnet med 2x13 mm gips og udvendigt et lag 9 mm fibergips.

Betonfundament prissættes som for T2. Vinduestilsætninger og ekstra tag prissættes ligeledes som for T2.

Facadeopmåling:

300 mm isolering				
Konstruktion	Materialer Kr	Løn Kr	Samlet Kr	m ² -pris Kr/m ²
L3	35011	39031	74043	768
L2	35363	40105	75468	781
400 mm isolering				
Konstruktion	Materialer Kr	Løn Kr	Samlet Kr	m ² -pris Kr/m ²
L3	39458	42124	81581	845
L2	39809	43198	83006	860

Sokkelopmåling (300 mm vægisolering):

Konstruktion	Materialer Kr	Løn Kr	Samlet Kr	m-pris Kr/m
L3	5289	3365	8654	211
L2	6188	3639	9826	240
Sokkelpuds	beregnet til $275 \text{ kr/m}^2 = 110 \text{ kr/m}$ (puds i hele sokkelhøjden = 40 cm)			

Specificering af fundamentsberegning for L2 / L3:

Isolerings- tykkelse	Beton	Sokkel- puds	Sokkel	Samlet m-pris	Samlet m ² -pris
mm	Kr/m	Kr/m	Kr/m	Kr/m	Kr/m ²
200	251	110	203/174	564/536	339/322
250	251	110	221/192	583/554	350/333
300	251	110	240/211	601/573	361/344
350	251	110	258/229	619/591	372/355
400	251	110	276/247	638/609	383/366

Specificering af prisberegning for vægtype L2:

Isolerings- tykkelse	Væg	Vindues- tilsætninger	Tag	Fundament	Samlet m ² -pris
mm	Kr/m ²	Kr/m ²	Kr/m ²	Kr/m ²	Kr/m ²
200	701	0	0	339	1040
250	741	31	6	350	1128
300	781	43	11	361	1196
350	821	56	17	372	1266
400	860	84	22	383	1349

Specificering af prisberegning for vægtype L3:

Isolerings- tykkelse	Væg	Vindues- tilsætninger	Tag	Fundament	Samlet m ² -pris
mm	Kr/m ²	Kr/m ²	Kr/m ²	Kr/m ²	Kr/m ²
200	690	0	0	322	1012
250	729	31	6	333	1099
300	768	43	11	344	1166
350	806	56	17	355	1234
400	845	84	22	366	1317

Løftkonstruktion

Det er kun isoleringen over spærfoden, der medfører ændringer i anlægsprisen ved de forskellige isoleringstykkelser. Følgende isoleringspriser, for isolering over spærfod, er anvendt for de enkelte isoleringstykkelser:

250 mm (dvs. 100 mm over spærfod):	639 kr/m ³
300 mm (150 mm over spærfod):	593 kr/m ³
350 - 600 mm (200 - 450 mm over spærfod):	Som for 150 mm isoleringstykkelse.

Terrændæk

Det er kun isoleringen, der medfører ændringer i anlægsprisen ved de forskellige isoleringstykkelser. Følgende isoleringspriser er anvendt for de enkelte isoleringstykkelser:

70 mm:	850 kr/m ³
100 mm:	799 kr/m ³
150 mm:	793 kr/m ³
200 - 300 mm:	Som for 150 mm isoleringstykkelse.

Bilag B: Specificering af varmebelastninger og systemer i Tsbi3-beregningsmodel af eksempel-huset

I tabel 1 er vist en oversigt over de modellerede varmebelastninger og systemer. I tilknytning til hvert "system" følger en nærmere beskrivelse.

Tabel Fejl! Ukendt argument for parameter.. Modellerede systemer.

System	Omfang	Regulering	Tidsangivelse
Personlast	0,1 kW (til luft: 50% ; til flader: 50%)	Altid: 100 %	Altid
Udstyr (inkl. belysning)	0,15 kW (til luft: 70% ; til flader: 30%)	Altid: 100 %	Altid
Ventilation (mekanisk udsugning)	0,045 m ³ /s = 0,8 h ⁻¹	Infiltration tilpasses udsuget luftmængde	Altid
Udluftning	Grundluftskifte: 2 h ⁻¹ (max. 6 h ⁻¹) Temp. faktor: 0,5 Vindfaktor: 0,3 Vindhastighed (middel): 4 m/s	Setpunkt: 24 °C	Altid
Opvarmning	Max. 2,5 kW pr. zone Ikke regulerbar effekt: 0% (til luft: 60 % ; til flader: 40 %)	Setpunkt: 20°C T _{u,min. effekt} = 17°C Min. effekt: 0,5 kW	Altid

Personlast

Det antages at der sker varmeafgivelse fra 2 voksne og 2 børn i 14 timer pr. døgn året rundt. En voksen forudsættes at afgive 100 W og et barn 75 W. Omregnet til en jævn varmeafgivelse hele døgnet fås:

$$(2 \cdot 100 + 2 \cdot 75) \cdot 14/24 = 204 \text{ W}$$

Fordeles denne effekt ligeligt på de to zoner, der er næsten lige store, fås ca. 100 W pr. zone.

Udstyr (inkl. belysning)

I SBI-anvisning 184, "Bygningers energibehov", er der anført, at det gennemsnitlige interne varmetilskud i boliger fra personer, belysning og el-udstyr kan sættes til 5 W pr. m² opvarmet etageareal i middel over hele den opvarmede del af boligen og hele døgnet i fyringssæsonen. Fratrækkes det beregnede varmetilskud fra personer, kan varmetilskuddet fra belysning og udstyr findes.

$$\text{dvs.: } (5 \text{ W/m}^2 \cdot 100 \text{ m}^2)/2 - 100 \text{ W} = 250 - 100 = 0,15 \text{ kW pr. zone}$$

Ventilation

Boligheder skal i følge bygningsreglement 1995 ventileres med enten mekanisk udsugning kombineret med udeluftventiler eller et indblæsnings- og udsugningsanlæg. Førstnævnte ventilationsmåde er valgt. Udeluftventiler modelleres i Tsbi3 ved at infiltrationen tilpasses udsuget luftmængde. Udelufttilførelsen skal mindst svare til den største af følgende to ydelser:

- Et luftskifte på 0,5 gange i timen
- Den luftmængde der er angivet i afs. 11.2.2, stk.3.:
 $20 \text{ l/s (køkken)} + 15 \text{ l/s (bad)} + 10 \text{ l/s (bryggers - luften forudsat tilført gennem adgangsrum)} = 45 \text{ l/s}$. Dette svarer til et luftskifte på 0,8 gange i timen, hvilket er større end $0,5 \text{ h}^{-1}$. Derfor benyttes iht. BR95 de 45 l/s.

Den udsugede luftmængde fordeles iht. DS418 på de to zoner efter volumen. Dette giver en udsuget luftmængde fra nord- og sydsonen på henholdsvis $0,022 \text{ m}^3/\text{s}$ og $0,023 \text{ m}^3/\text{s}$.

Udluftning

For at undgå overtemperaturer indendørs, udluftes der når temperaturen overstiger 24°C , svarende til åbne vinduer. Med udgangspunkt i et grundluftskifte på 2 h^{-1} , udluftes med et luftskifte på mellem $3,2$ og 6 h^{-1} , afhængig af differencen mellem inde- og udetemperatur.

Opvarmning

Modellen simulerer en termostatreguleret radiator. Termostatens føler påvirkes dels af indeluften og dels af overfladetemperaturerne, med en indflydelse af indeluften på 50 %. Setpunktet for hvornår opvarmningen skal træde i kraft er sat til 20°C . Reguleringen består af en maksimal til rådighed værende effekt på 2,5 kW (pr. zone) ved en udetemperatur på -12°C og en minimumseffekt på 0,5 kW når udetemperaturen kommer op på 17°C . Den til rådighed værende radiatoreffekt varierer lineært mellem maksimal- og minimalværdierne. Er udetemperaturen højere end 17°C er radiatoreffekten lig 0, idet det antages, at effekten fra "gratisvarmen" er stor nok til at hæve temperaturen de sidste 3 grader.

Andre input-data

- Vejrdata-fil: DRY12U.TRY - indeholder data fra det nye danske referenceår DRY [9].
- Solindfald: Beregnet efter Muneers solalgoritme.
- Fordeling af solindfald:
 - Solstråling, som passerer vinduesruderne, der umiddelbart går tabt: 5 %
 - Solindfald overført konvektivt til luft: 30 %
 - Dvs. 65 % (100-5-30) til konstruktionsflader.
- Solabsorption (udvendige flader):
 - Væg: 0,6
 - Tag: 0,8
- Simulering:
 - Antal tidsstep: 6 pr. time (svarende cirka til det af tsbi3-programmet anbefalede tidsstep)
 - Indsvingning: 0,25 °C
 - Optimeret simulering, mere nøjagtig beregning, idet zonernes varmebalancer beregnes to gange pr. tidsstep.

Bilag C: Grundlag for bestemmelse af CO₂-skyggepriser

Anvisning i og formel til bestemmelse af CO₂-skyggeprisen fremgår af notat fra energistyrelsen [12]. CO₂-skyggeprisen bestemmes ved at opgøre alle investeringer, brændsels, drifts- og vedligeholdelsesomkostninger samt de miljømæssige konsekvenser over en 20 års periode. CO₂-skyggeprisen udtrykker den årlige omkostning ved at reducere CO₂-udledningen med ét ton.

Alle omkostninger og besparelse opgøres til periodens start med en kalkulationsrente på 6 pct. pr. år. Ved samfundsøkonomiske beregninger er alle priser ekskl. moms, afgifter, skatter og tilskud m.v. For anlæg (som f.eks. klimaskærmskonstruktioner) med levetid ud over den 20 årige periode regnes iht. ovennævnte notat med lineær afskrivning og indregning af scrapværdi / restværdi.

Forudsætninger:

Periode:	20 år
Levetid:	100 år
Periodestart:	2000
Kalkulationsrente:	6 %
Prisniveau:	1999

Varmeforsyning (naturgas):

Energipris:	0,119 kr/kWh
CO ₂ -emission:	0,205 kg-CO ₂ /kWh

Miljødata:

Materiale/konstruktion	Bruttoenergiforbrug til fremstilling MJ/kg	CO ₂ -emission kg-CO ₂ /kg
Isolering, stenudd (30 kg/m ³)	14	0,88
Beton (2300 kg/m ³)	0,59	0,074
Letkl.blokke (600 kg/m ³)	3,89	0,38
Tag	47,7 kWh/m ² ydervæg pr. m. merisolering	9,2 kg-CO ₂ /m ² ydervæg pr. m. merisolering

Miljødata for isolering og beton er fra SBI-rapport 279: "Livscyklusbaseret bygningsprojektering", SBI 1997. Data for letklinkerblokke og tag er fra hhv. rapporterne: "Miljøprojekt for letklinkerbeton", DTI (1999) og "Energibesparelser i nybyggeriet 2005", udkast maj 1999.

Bruttoenergiforbruget dækker råstofudvinding, fremstilling af råmaterialer og fremstilling af de færdige byggematerialer. Energiforbruget omfatter også energi til fremstilling af elektricitet og til udvinding og forarbejdning af brændslerne.

Der medgår forskellige brændsler til fremstilling af materialerne, og disse brændsler varierer lidt i pris. Som brændselspris anvendes for enkelhedens skyld et gennemsnit af prisen på kul, olie og naturgas svarende til 0,046 kr/kWh (iht. [13]).

Eksempel på beregning af CO₂-skyggepris: Vægtype T1a og T2.1a.

De nødvendige økonomiske, energi- og CO₂-mæssige investeringer for at øge isoleringstykkelser er opgjort i nedenstående tabeller. Investeringer mht. vinduestilsætninger er der set bort fra i beregningerne (skyldes primært mangel på miljødata). Beregningerne er gennemført med T1a (125 mm) som generel reference.

Det antages at "grundprisen" (dvs. prisen for vægkonstruktion ekskl. isolering) er den samme for de to vægtyper. Denne antagelse er foretaget ud fra den betragtning, at formålet med beregninger ikke er at sammenligne forskellige bagvægge og regnskærmtyper. Det skal bemærkes, at den negative anlægspris for T2.1a (125 og 200 mm) alene skyldes at fundamentet er billigere end for T1a (125 mm).

Negative CO₂-skyggepriser fremkommer ved, at der for en given konstruktion, kan opnås en energibesparelse for en mindre anlægsinvestering end referencekonstruktionen. Dette er tilfældet for bl.a. T2.1a (125 og 200 mm).

I nedenstående tabel er vist investeringer, energibesparelse og CO₂-skyggepris ved forøgelse af isoleringen i vægtype T1a og T2.1a.:

Isoleringstyk. mm	Anlægsfasen			Driftsfasen	
	Pris, ekskl. moms kr/m ²	Energi kWh/m ²	CO ₂ -emission kg-CO ₂ /m ²	Energibesparelse kWh/m ² /år	CO ₂ -skyggepris kr/ton-CO ₂
T1a					
125 (ref.)	0	0	0	0	0
200	74	14,3	3,8	12,9	1455
250	134	30,7	9,0	16,6	2641
300	196	47,1	14,1	18,9	4070
350	256	63,5	19,3	20,6	5730
400	317	79,9	24,5	21,7	7992

T2.1a					
125	-58	-29,4	-11,1	6,7	-1990
200	-1	-15,0	-8,0	14,4	-504
250	40	-5,4	-5,9	17,7	118
300	80	4,2	-3,8	19,8	660
350	121	13,8	-1,7	21,5	1189
400	163	23,5	0,4	22,5	1766

Eksempel på specificering af bidrag fra væg, tag og fundament (anlægsfasen).

Investeringer ved at gå fra 125 mm til 200 mm isolering i vægtype T1a:

	Pris, ekskl. moms kr/m ²	Energi kWh/m ²	CO ₂ -emission kg-CO ₂ /m ²
Ydervæg	40	8,8	2,0
Tag	6	3,6	0,7
Fundament	28	2,0	1,1
I alt	74	14,3	3,8

Investeringer og energibesparelse ved øget isoleringstykkelse for alle vægtyper samt loft- og terrændækkonstruktion

	Anlægsfasen			Driftsfasen
Isoleringstyk. mm	Pris, ekskl. moms kr/m ²	Energi kWh/m ²	CO ₂ -emission kg-CO ₂ /m ²	Energibesparelse kWh/m ² /år
Løftkonstruktion				
250 (ref)	0	0	0	0,0
300	25	5,9	1,3	2,7
350	55	11,7	2,6	4,6
400	84	17,6	3,9	6,0
450	114	23,4	5,2	7,2
500	144	29,3	6,5	8,1
550	173	35,1	7,8	8,8
600	203	41,0	9,2	9,4
Terrændæk				
70 (ref)	0	0	0	0,0
100	20	3,5	0,8	1,7
150	59	9,4	2,1	3,7
200	99	15,2	3,4	5,1
250	139	21,1	4,8	6,1
300	178	26,9	6,1	6,9

	Anlægsfasen			Driftsfasen
Isoleringstyk. mm	Pris, ekskl. moms kr/m ²	Energi kWh/m ²	CO ₂ -emission kg-CO ₂ /m ²	Energibesparelse kWh/m ² /år
T1a				
125 (ref.)	0	0	0	0
200	74	14,3	3,8	12,9
250	134	30,7	9,0	16,6
300	196	47,1	14,1	18,9
350	256	63,5	19,3	20,6
400	317	79,9	24,5	21,7
T1b				
125	0	0	0	0,3
200	74	14,3	3,8	12,5
250	134	30,7	9,0	16,2
300	196	47,1	14,1	18,6
350	256	63,5	19,3	20,3
400	317	79,9	24,5	21,5
T1c				
125	8	2,9	1,2	-10,4
200	79	15,9	4,5	10,8
250	139	32,3	9,7	15,5
300	201	48,7	14,8	18,2
350	261	65,1	20,0	19,9
400	322	81,5	25,2	21,4

	Anlægsfasen			Driftsfasen
Isoleringstyk. mm	Pris, ekskl. moms kr/m ²	Energi kWh/m ²	CO ₂ -emission kg-CO ₂ /m ²	Energibesparelse kWh/m ² /år
T2.1a				
125	-58	-29,4	-11,1	6,7
200	-1	-15,0	-8,0	14,4
250	40	-5,4	-5,9	17,7
300	80	4,2	-3,8	19,8
350	121	13,8	-1,7	21,5
400	163	23,5	0,4	22,5
T2.1b				
125	-61	-30,0	-11,2	3,7
200	-4	-15,5	-8,1	13,0
250	36	-5,9	-6,0	16,9
300	77	3,7	-3,9	19,2
350	118	13,3	-1,8	20,9
400	160	22,9	0,3	22,1

T2.1c				
125	-55	-28,6	-10,9	4,2
200	3	-14,1	-7,8	13
250	43	-4,5	-5,7	16,8
300	84	5,1	-3,6	19,0
350	125	14,7	-1,5	20,7
400	167	24,3	0,6	21,9

	Anlægsfasen			Driftsfasen
Isoleringstyk. mm	Pris, ekskl. moms kr/m ²	Energi kWh/m ²	CO ₂ -emission kg-CO ₂ /m ²	Energibesparelse kWh/m ² /år
L2				
200 (ref)	0	0,0	0,0	0,0
250	46	9,6	2,1	5,5
300	90	19,3	4,2	8,5
350	136	28,9	6,3	10,6
400	180	38,6	8,4	11,9
L3				
200	-22	0,0	0,0	0,5
250	22	9,6	2,1	6,3
300	66	19,3	4,2	9,6
350	110	28,9	6,3	11,9
400	154	38,6	8,4	13,4

Bilag D: Eksempel-hus

Figuren nedenfor viser facader og plan af bygning (etplanshus), der anvendes som regneeksempel. De udvendige mål på plantegningen nedenfor viser det tilfælde, hvor isole-ringstykkelse i ydervægge og vinduesareal svarer til BR95-niveau, hvilket giver et brut-toetageareal på ca. 100 m². Huset har en rumhøjde på 2,35 m og et indvendigt væg- og gulvareal på hhv. ca. 68 m² og 86 m². Vinduer- og døre udgør ca. 22 m². Den indvendi-ge omkreds af huset er 38 m. De lodrette false ved vinduer og døre udgør ca. 31 m, mens den samlede omkreds af vinduer og døre er på 58 m.

