

Energibesparelser i eksisterende og nye boliger

DANMARKS
TEKNISKE
UNIVERSITET



Rapport
BYG • DTU R-080
2004

ISSN 1601-2917
ISBN 87-7877-143-9

Energibesparelser i eksisterende og nye boliger

Department of Civil Engineering
DTU-bygning 118
2800 Kgs. Lyngby
<http://www.byg.dtu.dk>

2004

Indhold

FORORD.....	3
SAMMENFATNING OG KONKLUSION.....	5
1 INDLEDNING	13
1.1 BAGGRUND OG FORMÅL	13
1.2 FREMGANGSMÅDE OG INDHOLD	14
2 ENERGIBESPARENDE TILTAG I DET EKSISTERENDE BYGGERI	17
2.1 YDERVÆG.....	18
2.2 TAG/LOFT	20
2.3 UNDERBYGNING	22
2.4 VINDUER	25
2.5 VENTILATION	28
2.6 TEKNISK ISOLERING.....	31
2.7 EKSEMPELBYGNINGER.....	33
3 ENERGIBESPARENDE TILTAG I NYBYGGERIET	43
3.1 YDERVÆG.....	43
3.2 LOFTKONSTRUKTION	48
3.3 TERRÆNDÆK	49
3.4 VINDUER	50
3.5 VENTILATION	54
3.6 TEKNISK ISOLERING.....	55
3.7 EKSEMPELBYGNINGER.....	57
4 METODER TIL ØKONOMISKE ANALYSER.....	61
4.1 TYPISKE METODER.....	61
4.2 BEREGNINGSMETODE TIL BESTEMMELSE AF CO ₂ -OMKOSTNINGER.....	63
4.3 ALTERNATIV METODE: FREMTIDSSIKRING AF ISOLERINGSMÆSSIG STANDARD	66
5 ØKONOMISKE BEREGNINGER	71
5.1 EKSISTERENDE BYGGERI.....	71
5.2 NYBYGGERIET	78
6 RENTABELT VARMEBESPARELSESPOTENTIALE	81
6.1 UDVIKLING I BOLIGMASSE	82
6.2 UDVIKLING I VARMEBEHOV	87
6.3 RENTABELT ENERGIBESPARELSESPOTENTIALE	88
BILAG 1: LUNDEBJERG (BALLERUP).	89
BILAG 2: BETONELEMENTBYGGERI - KULDEBROER.	91
BILAG 3: TYPISK TYPEHUS FRA 1960'ERNE.	92
BILAG 4: OPTIMALE ISOLERINGSLØSNINGER I NYBYGGERIET.....	93
BILAG 5: DEN DANSKE BOLIGMASSE.....	97

Forord

Denne udredning omhandler bygningsrelaterede energibesparelser i det eksisterende byggeri og nybyggeriet. I forbindelse med opfyldelse af Danmarks Kyoto forpligtigelse vedrørende reduktion af udledningen af drivhusgasser er der fokus på hvor energibesparelser og dermed CO₂ reduktion kan opnås billigst. Bygningsrelaterede energibesparelser udgør et stort potentiale og i mange tilfælde er der tilknyttet en god økonomi. Rapporten viser dette og er derfor en vigtig del af beslutningsgrundlaget for fastsættelse af nye skærpede krav til nye og eksisterende bygningers energiforbrug i forbindelse med nye energibestemmelser i år 2005.

Der er i rapporten redegjort for de energimæssige og økonomiske forhold i forbindelse med typiske energibesparende tiltag i bygninger. Der har især været fokus på at energibesparende tiltag kan udføres billigst i forbindelse med opførelse og større renoveringer.

Rapporten er udarbejdet af BYG•DTU for og i samarbejde med Rockwool International A/S. Fra Rockwool har medvirket Claus Bugge Garn, Anders Ulf Clausen og Preben Riis, og fra BYG•DTU har deltaget forskningsadjunkt Henrik Tommerup (hovedforfatter), forskningsassistent Jesper Kragh og professor Svend Svendsen.

Projektet er udført sideløbende med et relateret projekt omhandlende kortlægning og analyse af det tekniske energibesparelspotentiale og tilknyttede omkostninger i det eksisterende boligbyggeri, der er udført ved By og Byg for Energistyrelsen. Der er foretaget en vis grad af koordinering mellem de to projekter.

BYG•DTU, Danmarks Tekniske Universitet, Kgs. Lyngby, Marts 2004 (revideret juni 2004).

Sammenfatning og konklusion

Formålet med udredningen er, dels at redegøre for de tekniske energibesparelsemuligheder der findes i eksisterende og nye boliger, dels at behandle forskellige økonomiske metoder til vurdering af energibesparelsetiltag og foretage økonomiske beregninger af privat- og samfundsøkonomien i de energibesparende tiltag samt vurdere besparelspotentialet.

Det store umiddelbare energibesparelspotentiale ligger i den eksisterende bygningsmasse, bl.a. på grund af den lange levetid af bygninger. Der er især potentiale for isoleringsmæssige tiltag, hvilket skyldes en for dårlig fremtidssikring af isoleringsniveauet ved opførelsen. Omkring 75 % af boligmassen er opført før 1979, hvor den første betydelige skærpelse af varmeisoleringskravene blev indført. Den sidste fjerdedel vil overvejende have en isoleringsstandard, som vil være mindst 50 % dårligere end den, der vil være gældende i kommende nye energibestemmelser i 2005.

Besparelsetiltag i det eksisterende boligbyggeri

De generelt mest oplagte energibesparelsetiltag ved renovering er udvendig efterisolering af ydervæggsfacader, udskiftning af vinduer til energirigtige vinduer med energirude og ventilation med varmegenvinding.

Der er et stort potentiale for efterisolering af ydervæggsfacader, da velisolerede ydervægge først blev normalt efter en markant skærpelse af varmeisoleringskravene i bygningsreglementet fra 1977. Facadeefterisolering er en naturlig del af facaderenoveringer med ny regnskærm, og udføres for det meste nemmest og varmeteknisk effektivt udvendigt på konstruktionen og kan effektivt løse problemer med skimmelsvamp og kuldebroer. Det typiske isoleringsniveau er i dag 100 mm, men kunne uden problemer forøges til det dobbelte, svarende til forventede energikrav til nybyggeriet i 2005.

Efterisolering af tag- og loftkonstruktioner er relativt nemt, effektivt og overvejende billigt at udføre i etageadskillelser, skunkrum, skråvægge og gitterspær samt flade tage. Mulighederne for efterisolering af underbygningskonstruktioner, der defineres som terrændæk, fundamenter og kælder- og krybekælderkonstruktioner, hæmmes væsentligt af fugttekniske forhold, lang levetid og forholdsvis store etableringsomkostninger. En oplagt, billig og effektiv efterisoleringsmulighed er udlægning af isolering i strøgulve ved udskiftning af eksisterende gulv, især i forbindelse med uisolerede fundamenter.

Varmetransmissionstab fra vinduer med energimæssigt dårlige rudeløsninger (termorude eller et lag glas) udgør ofte en væsentlig del af det samlede transmissionstab (i f.eks. det typiske 60'er parcelhus, der behandles i rapporten, udgør vinduestabet 45 %). Varmetabet kan generelt reduceres væsentlig ved udskiftning til vinduer med energirude og varm rudekant. I forbindelse med gamle bevaringsværdige dannebrogsvinduer er istandsættelse og montering af en forsatsramme med energiglas eller forsatsenergirude oftest den totaløkonomisk mest optimale løsning. Vinduer med endnu bedre varmetekniske egenskaber kan opnås ved brug af ruder med flere lag glas, smallere og isolerende ramme-karm konstruktioner og jernfattigt glas.

Der er potentiale for betydelige varmebesparelser ved brug af mekanisk ventilation med varmegenvinding, da ventilationstab typisk er 35-40 kWh/m², hvoraf 80-90 % vil kunne genvindes. Af hensyn til driftsøkonomien er det vigtigt at fokusere på minimering af elforbruget til ventilatordriften der i dag typisk er omkring 7 kWh/m², men som kan nedsættes til 3

kWh/m² ved brug af kendte løsninger. Det er desuden vigtigt med en god lufttæthed, så det meste af luftskiftet går gennem varmeveksleren. Ekstraomkostningen for etablering af ventilation med varmegenvinding frem for kun udsugning er i etageboliger kun ca. 50 kr/m². I enfamiliehuse kan ventilation med varmegenvinding etableres for ca. 300 kr/m².

I forbindelse med teknisk isolering, er der gode muligheder for efterisolering af uisolerede varmerør og varmevekslere mm og anlæg med tynd og dårlig isolering. Ved udskiftning af varmeanlæg i ældre etageejendomme, er det muligt at vælge et højt isoleringsniveau. I forbindelse med enfamiliehuse er uisolerede fjernvarmeunits et område med store besparelsesmuligheder.

For at undersøge den samlede virkning af de enkelte besparesestiltag i forbindelse med renovering af hele bygninger, er der foretaget beregninger på tre typiske bygninger. Den ene er en muret etageejendom opført i starten af 60'erne og den anden er en etageejendom fra 1970 opført i betonelementer. Den tredje bygning er et typisk parcelhus fra 60'erne. Beregningerne viser at rumopvarmningsbehovet kan nedsættes til ca. 20 kWh/m² for etageboligerne og 40 kWh/m² for parcelhuset ved gennemgribende energirenovering og brug af typiske og rentable besparesestiltag.

Besparesestiltag i nyt boligbyggeri

Der er gode muligheder for udformning af ydervægskonstruktioner med bedre varmetekniske egenskaber, idet eksempelvis ydervægskonstruktioner til enfamiliehuse i dag typisk udføres med en isoleringstykkelse på kun 125 mm og ofte indeholder væsentlige kuldebroer ved vinduesfalse mm. Betonelementer til store bygninger, der typisk udformes med mange ikke-konstruktive ribber, kan forbedres markant ved fjernelse af disse ribber. Generelt kan de varmetekniske egenskaber forbedres ved merisolering, bedre kuldebroisolering og anvendelse af isoleringsmaterialer med mindre varmeledningsevne. Når ydervægges isoleringstykkelse øges, påvirker det fundamentet. Ydervægge og fundamenter skal derfor behandles under ét og det er i øvrigt vigtigt at fundamentet er velisoleret i forbindelse med gulvvarme. Der er ligeledes gode muligheder for at isolere loftkonstruktioner i især enfamiliehuse bedre end i dag, hvor 250-300 mm er den normale tykkelse, og det er forholdsvis nemt og billigt at indbygge isolering i terrændæk. Man skal dog være opmærksom på isoleringens stivhed ved store isoleringstykkelser. Den udstrakte brug af gulvvarme øger betydningen af en god terrændækisolering, der mindsker varmetabet mod jord, men også varmetabet via fundament.

Typiske vinduer har et energitilskud (=varmetilskud fra solen minus varmetabet) på - 40 kWh/m²/år. De mest oplagt tiltag til forbedring af de varmetekniske egenskaber er anvendelse af glas med større soltransmittans, flere glaslag med lavemissionsbelægning, isolerende gas i hulrum, såkaldt varm rudekant samt isolerende og smallere ramme-karm profiler. Benyttes disse tiltag i samlede realistiske løsninger, kan der opnås omtrent et neutralt energitilskud. Man bør generelt benytte vinduer med højisolerende ruder (3 lags eller 1+2), hvor der er meget skygge (f.eks. nordvendt), og ellers vinduer med en god to-lags energirude.

I nybyggeriet er ventilationstabet i takt med at der isoleres bedre og bedre, blevet en betydelig post i der samlede varmeregnskab. El-effektiv mekanisk ventilation med varmegenvinding er en god mulighed for at nedbringe energiforbruget yderligere, og som har en væsentlig sidegevinst i form af et bedre indeklima end traditionel naturlig ventilation. Effektiv mekanisk ventilation med varmegenvinding stiller visse krav til bygningens lufttæthed og en hensigtsmæssig indregulering, betjening og vedligeholdelse.

Teknisk isolering er et forsømt område og en stor del af nybyggeriet lever ikke op til gældende isoleringskrav, hvilket er dokumenteret i en række undersøgelser foretaget for nyligt. Der er derfor muligheder for varmebesparelser ved at leve op til gældende krav eller gøre det endnu bedre, hvilket dog kræver at der tages pladsmæssige hensyn ved projekteringen. Varmerør og ventiler i uopvarmede kældre eller skunk- og loftrum samt små fjernvarmeunits er de primære besparelsesområder.

Man kan opføre enfamiliehuse med et energiforbrug til rumopvarmning, der er reduceret med op til 70 % i forhold til nuværende energiramme. Byggeteknisk, brugsmæssig og økonomisk set er besparelserne forsvarlige at gennemføre. Dette er konklusionen på et større forsøgshusprojekt, der er gennemført over de sidste par år. Merudgifterne er i øvrigt begrænset til kun ca. 5 %.

Økonomiske beregninger

Der er behandlet forskellige økonomiske metoder til vurdering af energibesparende tiltag, herunder energistyrelsen og regeringens brug af økonomiske analyser (CO₂-omkostninger) med henblik på "mest miljø for pengene", som er et godt værktøj til sammenligning af forskellige mulige energibesparende tiltag med kort levetid (op til 15 år), men er mindre velegnet som grundlag for beslutninger om f.eks. isoleringsmæssige tiltag i bygninger, der har konsekvens 50-100 år ind i fremtiden, og som utvivlsomt vil være i brug i en fremtidig energisituation uden fossile brændsler og dermed CO₂ udledning. Da det enten er meget dyrt eller umuligt at ændre en ikke optimal konstruktion på et senere tidspunkt, bør CO₂-omkostninger anvendes varsomt, når der skal træffes beslutninger inden for byggeri. Det mest rationelle vil derfor være at anlægge en betragtning over, hvordan man samlet set billigst når fra det nuværende samfund til et bæredygtigt samfund uden brug af fossile brændsler om ca. 50 år. Derfor vil det være oplagt at anlægge en totaløkonomisk synsvinkel svarende til en optimering af anlægs- og driftsudgifter over f.eks. 30 år (svarende til normal låneperiode ved byggeinvesteringer), hvor der tages hensyn til udviklingen og usikkerheden i rente og energipriser over levetiden.

Beregninger af totaløkonomien i efterisolering af typiske konstruktioner i det eksisterende byggeri (se Tabel 1), viser at tiltagene generelt er totaløkonomisk rentable (nuværdi ≥ 0). Som det ses giver mange af tiltagene anledning til store besparelser over 30 år. Økonomien er dog mindre god ved efterisolering af ydervægsgfacader, forudsat at tiltagets energibesparelse tillægges den fulde anlægsomkostning (ekskl. stilladsomkostninger), dvs. renovering alene for at spare energi. Facaderenoveringer med ny klimaskærm bliver imidlertid ofte iværksat af andre grunde end for at spare energi, og i disse tilfælde kan man argumentere for at energibesparelsen er en sidegevinst, der er gratis. I tilfælde hvor renovering ikke er nært forestående, vil det derfor kunne forsvares at fremskynde renoveringen af hensyn til den gode økonomi i energibesparelser og fremtidssikring af varmeudgifterne.

Tabel 1. Totaløkonomiske besparelser ved forøget isolering i typiske konstruktioner i det eksisterende boligbyggeri.

	Eksist. isol.	Efterisolering	Anlægs- omkostning	Besparelser over 30 år.			
	[mm]	[mm]	[kr/m ²]	[kr/m ²]			
Scenarie				P1	P2	B1	B2
Energipris, kr/kWh				0,6	1,2	0,6	1,2
Realrente, % p.a.				2,5	2,5	0	0
Etageadskillelse	0	150	183	1366	2899	2097	4295
Skunk	50	250	254	366	965	718	1577
Skråvæg	125	225	271	-44	161	144	437
Gitterspær	50	350	280	284	824	620	1395
Terrændæk (strøgulv)	0	50	83	206	488	358	762
Varmerør 1"	0	30	86	1246	2590	1840	3765
Rudeudskiftning	termorude	energirude	300	800	1773	1531	2926
Betonelement (boligblok)	10-50	100	1760	-25	1563	853	3584
	10-50	200	349 ¹⁾	-137	45	17	331
Hulmur (boligblok)	ca. 40	150	1900	-266	1209	1069	3183
	ca. 40	200	194 ¹⁾	-127	-76	-33	40
Hulmur (parcelhus)	75	150	1676	-954	-372	-88	746
	75	200	65 ¹⁾	-30	0	7	49
Massiv letbeton (parcelhus)	0	150	1676	-353	830	774	2469
	0	200	65 ¹⁾	-13	33	30	97

¹⁾ Meromkostninger for ekstra 100 hhv. 50 mm isolering

Totaløkonomien i mekanisk ventilation med varmegenvinding frem for naturlig ventilation og mekanisk udsugning er særdeles fornuftig for etageboliger. Især er der god økonomi i at vælge varmegenvinding ved større renoveringer, hvor man alligevel havde planlagt at etablere et udsugningsanlæg, hvilket ofte er tilfældet. Mekanisk ventilation med varmegenvinding til eksisterende enfamiliehuse er væsentligt dyrere (pr. m²) end i etageboliger, hvilket giver en mindre god totaløkonomi ved nuværende økonomiske forhold. Merudgiften over 30 år set ift. de samlede anlægs- og driftsomkostninger er dog beskeden. Et alt andet lige bedre indeklima skal også tages i betragtning.

I nybyggeriet er de totaløkonomisk optimale isoleringstykkelser generelt betydeligt større end nuværende isoleringstykkelser (se Tabel 2) og hvis blot målet er at sikre samme totaløkonomi som i BR95, kan isoleringstykkelsen øges endnu mere. Når totaløkonomien for forskellige isoleringstykkelser bestemmes, vil der typiske fremkomme en sammenhæng, hvor straffen (meromkostningen) for et ikke-optimalt isoleringsniveau er asymmetrisk, da der er tale om større meromkostninger ved underisolering end ved overisolering for et givet scenarie. Set i lyset af usikkerheder omkring rente og energipris, vil det derfor typisk være rationelt at installere mere isolering end det optimale.

Tabel 2. Optimal isoleringstykkelse (mm) for typiske konstruktioner i ny boligbyggeri.

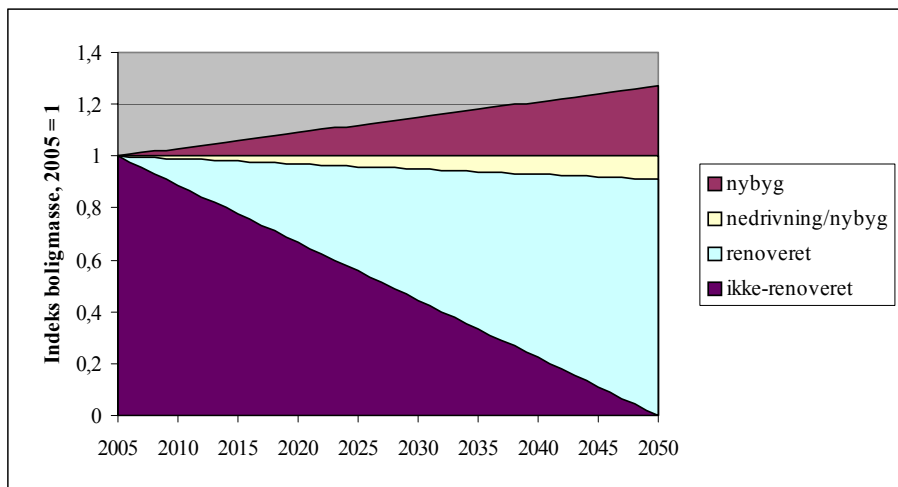
Scenarie	BR95	P1	P2	B1	B2
Energipris, Kr/kWh	-	0,6	1,2	0,6	1,2
Realrente, %	-	2,5	2,5	0	0
Tung ydervæg	125	200-250	250-325	250-325	>400
Let ydervæg	200	250-300	325-350	325-350	>400
Loft (gitterspær)	250	300-350	425-525	500-600	>600
Terrændæk uden gulvvarme	125	150-200	200-250	250-300	>400
Terrændæk med gulvvarme	200	200-250	300-400	>400	>400
Varmerør (1'')	30	75-100	>150	>150	>150
Varmerør (2'')	50	100-150	>150	>150	>150

Vurderinger af økonomien i energimæssigt bedre vinduesløsninger viser generelt at en forbedring af nuværende løsninger (med almindelig energirude) i form af smal ramme-karm, jernfrit glas og varm rudekant, giver anledning til betydelige besparelser, mens økonomien i løsninger med flere lag glas end to ikke umiddelbart er attraktiv med de nuværende priser.

De beregnede CO₂-omkostninger for de enkelt tiltag er meget forskellige og følsomme overfor den anvendte kalkulationsrente. Generelt viser beregningerne at mange af de undersøgte bygningsrelaterede besparelsetiltag umiddelbart er forbundet med CO₂-omkostninger på niveau med besparelsetiltag indenfor andre områder.

Besparelspotentiale

Det rentable potentiale for rumvarmebesparelser i perioden frem til 2050 er vurderet på basis af antagelser om udviklingen i boligmassen og energiforbruget til rumopvarmning. Det er forudsat at hele den eksisterende boligmasse enten skiftes ud med nyt eller energirenoveres gennemgribende i perioden frem til 2050 (se figuren). Tilvæksten i boligarealet er i perioden på 27 %. Energiforbruget til rumopvarmning i nybyggede boliger er forudsat reduceret med 30 % i 2005, 2010, 2015 og 2020, mens renoverede boliger antages opgraderet til gældende energikrav til nybyggeri. Undersøgelser af besparelsemuligheder og varmeøkonomien i disse understøtter at dette er teknisk muligt og økonomisk fornuftigt.



Figur 1. Forudsatte udvikling i boligmassen fra 2005 og frem til 2050.

Hvis den skitserede udvikling gennemføres vil varmebehovet i boligmassen kunne reduceres betydeligt (se Tabel 3). Nettoenergiforbruget til rumopvarmning vil kunne reduceres med 30 % over de næste 15 år og med ca. 80 % over 45 år (frem til 2050).

Tabel 3. Udvikling i boligmassens nettoenergiforbrug til rumopvarmning.

År	PJ/år	reduktion i %
2005	122	0
2020	86	-30
2030	71	-42
2050	22	-82

Konklusioner

Generelt kan man gennem bygningsrelaterede energibesparelser reducere energiforbruget og dermed CO₂-udledningen markant. Et lavere energiforbrug vil samtidig mindske sårbarheden over for stigende energipriser og øge forsyningssikkerheden. Samtidig opnås der en række miljøfordele, og energibesparelsesindsatsen kan endvidere være med til at fremme lovende teknologiske løsninger og bidrage til en bæredygtig udvikling.

Resultaterne viser at det kan betale sig at indføre energibesparelser i både nybyggeriet og det eksisterende byggeri. Der er desuden fornuftig økonomi i at man i forbindelse med større renoveringer, så vidt muligt opdaterer de renoverede bygningsdele til et niveau, der svarer til kravet til nybyggeriet. Meget peger derfor i retning af at det ville være hensigtsmæssigt med væsentlige stramninger af energikravene til bygninger.

Det er dokumenteret at der ikke er væsentlige tekniske eller særlige økonomiske barrierer for at opnå store energibesparelser. Problemet ligger nærmere i virkemidler til gennemførelse af de oplagte og rentable energimæssige forbedringer. Dette bekræftes af erfaringer fra energimærkningsordningen, der viser, at der i 75 % af energimærkede bygninger er fundet oplagte besparelsesmuligheder med tilbagebetalingstid på 8 år eller mindre, men de fleste af disse bliver ikke gennemført. Det er også erfaringen at bygninger oftest ikke bliver opgraderet energimæssigt ved renovering pga. manglende viden eller interesse. Markedet fungerer altså dårligt og folk handler generelt ikke rationelt på energiprisniveauet. For at sikre energibesparelser er det nødvendigt med krav i bygningsreglementet, så individet beskyttes mod store energiudgifter (store afgifter), da de mange gange ikke selv beslutter isoleringsniveau mm, som binder varmeudgifterne langt ud i fremtiden.

Det nye bygningsdirektiv foreskriver fastsættelse af minimumskrav til den energimæssige ydeevne af store bygninger, der skal gennemgå omfattende renoveringsarbejder, og for at sikre at de rentable energibesparelser bliver gennemført, anbefales det at der stilles krav om at store bygningers energimæssige ydeevne bliver opgraderet til gældende niveau for nye bygninger ved renovering og at kravene fastsættes for bygningen som helhed. Det samme bør sikres for øvrige bygninger, herunder småhuse. For småhuse kunne dette f.eks. foregå i forbindelse med salg, hvor rentable energibesparende tiltag blev påvist, realiseret og finansieret (evt. ved forhøjelse af rammen for realkreditlån) inden indflytning af nye ejere.

I nye bygninger er der lagt op til en skærpelse af energikravene i 2005, hvor der forventes en bruttoenergiramme¹ på ca. 75 kWh/m². Bygningsdirektivet kræver revision hvert 5. år, og man

¹ Forventes at omfatte energibehov (varme og el) til rumopvarmning, varmt brugsvand og installationer.

kunne derfor naturligt reducere bruttoenergirammen med 30 % i 2010, 2015 og 2020, så bruttoenergibehovet reduceres til 25 kWh/m² i 2020, hvilket svarer til niveauet i såkaldte passive huse, som der allerede er bygget mange af i andre europæiske lande (særligt Tyskland).

1 Indledning

1.1 Baggrund og formål

Der er store tekniske muligheder for bygningsrelaterede energibesparelser i Danmark generelt. Det rent tekniske energibesparelspotentialt svarer på den sikre side til mellem halvdelen og tre fjerdedele af energiforbruget, og til dette kan knyttes en relativt god økonomi.

Nye bygninger kan for eksempel opføres, så de kun har et varmekonsum til opvarmning på omkring 20 % af hvad der er i nye bygninger i dag. Dette kan opnås for en ekstra anlægsomkostning på ca. 10 % af byggeudgiften. Sådanne huse er allerede i stort antal opført i især Tyskland under Passiv Haus-ordningen² i form af især enfamiliehuse, men også til en vis grad etagehuse. Husene har ikke et egentligt opvarmningssystem, og løsninger ligger primært i en kraftig isolering af klimaskærmen uden væsentlige kuldebroer, avancerede vinduer og et ventilationsanlæg med effektiv varmegenvinding, der sikrer et godt indeklima³.

Det store umiddelbare energibesparelspotentialt ligger imidlertid i den eksisterende bygningsmasse, bl.a. på grund af den lange levetid af bygninger. Der er især rentable besparelser at hente ved isoleringsmæssige tiltag, hvilket skyldes en for dårlig fremtidssikring af isoleringsniveauet ved opførelsen. Cirka halvdelen af den eksisterende bygningsmasse er opført før 1961, hvor det første landsdækkende bygningsreglement kom, og dermed fastsættelsen af krav til isoleringsstandard. Omkring en fjerdedel af bygningsmassen er opført i perioden 1961 til 1979, hvor kravene til isolering i bygningsreglementet ikke blev skærpet ift. BR 1961⁴. Den sidste fjerdedel vil overvejende have en isoleringsstandard, som efter alt at dømme vil være mindst 50 % dårligere end den, der vil være gældende i de kommende nye energibestemmelser i 2005. I Tabel 4 er vist udviklingen i krav til bygningsdeles varmeisolering.

Tabel 4. Bygningsreglementers krav til varmeisolering. Tabellen viser U-værdi krav til bygningsdele omkring opvarmede rum.

	BR 61/72	BR 77/82	BR 95	BR 05 ⁵
Ydervæg, tung	1,00	0,40/0,35	0,30	0,18
Ydervæg, let	0,60	0,30	0,20	0,18
Terrændæk	0,45	0,30	0,20	0,15/0,12
Loft/tag	0,45	0,20	0,15	0,12
Flade tage / skråvægge mod tag	-	-	0,20	0,15
Etageadskillelse mod uopvarmet rum	0,60	0,40	0,30	0,30
Vinduer	2,90	2,90	1,80	1,50

Mange bygninger står over for større renoveringsarbejder og i forbindelse med denne renoveringsproces, vil energibesparende tiltag kunne foretages relativt billigt og lønsomt. Det er dog stadig vigtigt at bygge nye boliger så energioptimalt så muligt, da de i den lidt længere tidshorizont

² Jf. www.passivehouse.com.

³ En varmeaflede i ventilationsanlægget leverer typisk rumopvarmningsbehovet og varmt brugsvand leveres fra et solvarmeanlæg eller varmepumpeanlæg.

⁴ Først i forbindelse med BR 77, blev kravene skærpet væsentligt (krav gældende fra starten af 1979).

⁵ Iht. oplæg til nye energibestemmelser i Bygningsreglement år 2005. By og Byg 2001. U-værdier for terrændæk er hhv. med og uden gulvvarme. Energibestemmelserne i det nye bygningsreglement ændres forventeligt, således at bygninger skal opfylde et krav til bruttoenergiforbruget. U-værdier er derfor blot vejledende.

risont bliver afgørende for energiforbruget og desuden udgør en form for målestok for, hvad der er opnåeligt for den eksisterende bygningsmasse ved renovering.

Det udredningsarbejde, der er udført i nærværende projekt, vedrører bygningsrelaterede energibesparelser, og formålet har været at eftervise økonomien i energibesparelser i eksisterende bygninger og nybyggeriet. For nybyggeriets vedkommende er dette væsentligt i forbindelse med fastsættelse af skærpede energikravene i bygningsreglementet år 2005 på 25 - 30 %⁶ eller de oprindelige 33%. For det eksisterende byggeri er opgaven vigtig i forbindelse med fastsættelse af krav til renovering med baggrund i EU-direktiv om bygningers energimæssige ydeevne.

1.2 Fremgangsmåde og indhold

De enkelte bygningselementer behandles hver for sig og de mest oplagte muligheder sammensættes i samlede beregninger på en række eksempelbygninger. Behandlingen af de enkelte elementer omfatter en beskrivelse af energibesparelsemuligheder, detaljerede beregninger af de energimæssige konsekvenser af typiske tiltag og en opgørelse af de tilknyttede anlægsomkostningerne.

Projektet har naturligt kunne inddeles i fem delopgaver:

1. Beskrivelse af de typiske energibesparende tiltag i det eksisterende byggeri og en detaljeret beregning/indsamling af de tilknyttede energibesparelser og realiserede anlægsomkostninger ved typiske renoveringer.
2. Beskrivelse af typiske energibesparende tiltag i nybyggeriet og en beregning og opgørelse af de tilknyttede energibesparelser og anlægsomkostninger.
3. Beskrivelse af metoder til samfunds- og privatøkonomiske analyser og vurderinger af energibesparelsetiltag. Den nuværende beregningsmetode til bestemmelse af CO₂-omkostninger beskrives og med baggrund i denne redegøres for hvordan der kan tages bedre hensyn til energibesparelsetiltag med lang levetid. Også sideeffekter, dvs. andre væsentlige konsekvenser end de snævre velfærdsøkonomiske, behandles. Desuden beskrives en alternativ metode, baseret på økonomisk optimering. Metoden er velegnet til at fremtidssikre det isoleringsmæssige niveau, hvilket der er fokus på ved beskrivelse og illustration af metoden, men principperne kan naturligvis også benyttes til optimalt valg af f.eks. ventilations- og vinduesløsninger.
4. Økonomiske beregninger af privat- og samfundsøkonomien i energibesparende tiltag i det eksisterende byggeri og nybyggeriet. Desuden beregnes energibalancer og CO₂-omkostninger for huse med nye velisolerede klimaskærmskonstruktioner og ventilationsanlæg med varmegenvinding, svarende til BR2005 energikrav.
5. Vurdering af energibesparelspotentialet.

Hovedvægten i beskrivelsen af energibesparende tiltag og energibesparelspotentiale er koncentreret om boligsektoren, hvor det endelige energiforbrug til opvarmning (inkl. varmt brugsvand) udgør 73 % af det samlede energiforbrug til opvarmning⁷. De mest anvendte

⁶ Energispareredegørelse. Energistyrelsen. Maj 2003

⁷ jf. energistyrelsens energistatistik 2001.

energikilder samlet set for alle bygningskategorier er fjernvarme, olie og naturgas (samlet andel på 87 %), hvoraf fjernvarme dækker ca. halvdelen af det samlede varmeforbrug.

1.2.1 Beregning af energibesparelser

Varmerelaterede energibesparelser er i rapportens kapitel 1 og 2 beregnet i form af sparet nettoenergiforbrug til rumopvarmning⁸. Hvor nettoenergibesparelser, der begrænser varmetransmissionstab, ikke bestemmes ved detaljerede bygningssimuleringer, bestemmes nettoenergibesparelser ud fra en generel antagelse om at en ændring i transmissionstabet slår igennem på nettoenergiforbruget til opvarmning med en faktor 0,90⁹. En ændring i nettovarmebehovet vil virke tilbage gennem energisystemet og influere på mængden af indfyret brændsel i fyret ved olie- eller naturgasforsyning eller i kraftvarmeværket ved fjernvarmeforsyning. Nettoenergibesparelsen kan konverteres til bruttoenergibesparelse ved at tage hensyn til tab i det varmeproducerende system (kedeltab, røggastab, tomgangstab og tab som følge af ufuldstændig forbrænding) og tab i det varmefordelende system (varmetab fra rør mm. som ikke nyttiggøres til opvarmning). Hvis det forudsættes at varmetab i det fordelende system ikke ændres som følge af et tiltag der reducerer rumopvarmningsbehovet, kan bruttoenergibesparelsen bestemmes som nettoenergibesparelsen divideret med årsvirkningsgraden¹⁰ for varme anlægget. Hvis bruttoenergiforbruget er leveret som brændsel, vil der være forbrugt energi til udvinding/høst, håndtering, transport, oparbejdelse, etc. forud for leveringen. Hvis bruttoenergiforbruget er leveret som fjernvarme eller el, vil der desuden være et konverteringstab i produktionsanlægget og et transmissions-/distributionstab forud for leveringen ved bygningen/husstanden. I denne udredning ses der bort fra disse tab fra eksterne forsyningssystemer uden for matrikelgrænsen, idet det antages at en ændring i varmebehovet ikke påvirker disse tab.

1.2.2 Anlægsomkostninger

I forbindelse med behandling af de energibesparende tiltag angives anlægsomkostninger ekskl. moms med mindre andet er anført. Anlægsomkostninger bestemmes delvist ud fra oplysninger fra typiske renoveringssager og håndværksmestre, herunder prisoplysninger på den rene efterisoleringsdel. Desuden baseres priser på oplysninger fra prisbøger og tidligere studier i sammenhængen mellem energibesparelser og anlægsomkostninger.

⁸ Nettovarmebehovet defineres som den varmestrøm/-effekt, der skal tilføres en bygning eller et rum for at sikre den ønskede rumtemperatur, der på normal vis antages at være 20 °C.

⁹ Udnyttelsesgraden afhænger af gratisvarmetilskuddet og dermed vinduesareal og -orientering mm. samt bygningens varmekapacitet, og vil for boliger være ca. 0,9. Ændringer i transmissionstabet bestemmes ud fra et gradtimetal på 90 kWh/år på basis af det danske referenceår DRY. For yderligere dokumentation henvises til rapport om udvikling af klimaskærmskonstruktioner, se fodnote 56.

¹⁰ Årsvirkningsgraden udregnes som et gennemsnit over året. Der tages hensyn til perioder med begrænset varmebehov (overgangsperioder og sommer), hvor der vil være et relativt større tab end om vinteren. En høj årsnyttevirkning kræver bl.a. en velisoleret kedel/veksler, hvilket især er vigtigt i bygninger med lavt varmebehov.

2 Energibesparende tiltag i det eksisterende byggeri

Der er et stort potentiale for energibesparelser i den eksisterende bygningsmasse, herunder især isoleringsmæssige tiltag, hvilket skyldes en for dårlig fremtidssikring af isoleringsniveauet ved opførelsen. Mange bygninger står over for større renoveringsarbejder og i forbindelse med denne renoveringsproces, vil energibesparende tiltag kunne foretages relativt billigt. En væsentlig sidegevinst ved efterisolering af den eksisterende bygningsmasse er et bedre indeklima i form af bedre termisk komfort og sundhed, f.eks. med hensyn til skimmelsvampvækst ved kolde flader ved kuldebroer.

Principielt er der i det nugældende bygningsreglement krav til at isoleringsstandarden opdateres til gældende bygningsreglement for nybyggeri ved større ombygninger/renoveringer. Der er på nogle få områder angivet lempelser i kravene i forbindelse med ombygningsarbejder, men ikke i forbindelse med isoleringskravene. I praksis virker det imidlertid som om, at isoleringskravene håndteres meget lempeligt i forbindelse med renoveringer af etageejendomme.

I eksempelvis den traditionelle byfornyelse fra før 1999, der primært har haft som formål at foretage en opdatering af boligerne med tidssvarende bad og køkken, har der ikke været særlig fokus på energibesparende tiltag. Generelt er isoleringsgraden på niveau med BR 61/72¹¹, hvilket primært skyldes at ydervægfacader (oftest massive) kun er efterisoleret i brystninger og at der er anvendt almindelige termoruder. Københavns borgerrepræsentation vedtog i Dec. 1998 ”miljøprioriteret byggeri”, hvilket har haft en vis positiv betydning for isoleringsgraden for de renoverede bygninger i hovedstaden. Desuden har især udbredelsen af energiruder/energiglas i de sidste par år haft en betydelig effekt.

Der er behov for en opstramning af praksis, så de økonomisk attraktive og teknisk og funktionelt realiserbare energibesparelser gennemføres i forbindelse med større renoveringer, hvilket er vigtigt af hensyn til at fremtidssikre bygningerne energimæssigt. Med baggrund i nyt EU bygningsdirektiv vedr. bygningers energimæssige ydeevne, vil der i forbindelse med de nye energibestemmelser i 2005 blive stillet specifikke mindste krav¹² til gennemførelsen af energibesparende tiltag ved renovering af bygninger over 1000 m². Energibesparende tiltag i mindre bygninger, herunder især de ca. 1,1 mio. enfamiliehuse, bør også sikres i forbindelse med renovering, evt. ved lovkrav. Disse besparelsetiltag kunne f.eks. nemt realiseres i forbindelse med salg, hvor rentable energibesparende tiltag blev påvist, realiseret og finansieret inden indflytning af nye ejere. Finansieringen kunne naturligt foregå via en forhøjelse af rammen for realkreditlån.

Ser man på hvad der tidligere er gennemført af energibesparende tiltag i typiske byfornye gamle etageejendomme, hvor der som nævnt har været fokus på etablering af nyt køkken og bad samt fjernvarme og mekanisk udsugning fra toilet og køkken, så drejer det sig om isolering af lofter, skrå- og skunkvægge, kvistflunker, etageadskillelser mod kælder og uudnyttet loft samt vinduesbrystninger. Desuden er der foretaget istandsættelse af enkeltlagsruder og forsyning med forsatsvinduer eller udskiftning til trævinduer i oprindelig stil med termorude. Typiske gennemførte energibesparende tiltag i enfamiliehuse omfatter primært ekstra loftisolering.

¹¹ Jf. Energirigtig renovering og byfornyelse. Hovedrapport dec. 2002. T.Lindberg. Graden af energibesparende tiltag er generelt ensartet, hvilket kan tilskrives de faste regler, der danner rammerne for offentligt støttede renoveringer.

¹² Forventeligt i form af opgradering af den energimæssig ydeevne til niveau for nye bygninger.

De mest oplagte muligheder for energibesparelser i det eksisterende byggeri er efterisolering af klimaskærmen, energimæssigt bedre vinduer¹³, ventilation med varmegenvinding samt bedre isolering af tekniske installationer.

2.1 Ydervæg

Velisolerede ydervægge blev først normalt efter markant skærpelse af varmeisoleringskravene i bygningsreglementet fra 1977, så potentialet for efterisolering er stort. Efterisolering udføres for det meste nemmest og varmeteknisk effektivt udvendigt på konstruktionen, og kan effektivt løse problemer med skimmelsvamp og kuldebroer. Når ejendomme renoveres vil man kunne sikre en optimal isoleringstykkelse for forholdsvis små ekstraomkostninger. Det typiske isoleringsniveau er i dag 100 mm, mens det optimale vil være omtrent 200 mm.

2.1.1 Tekniske energibesparelsmuligheder

Efterisolering af ydervæggsfacader udgør et stort energimæssigt besparelspotentiale, idet en god isolering af ydervægge først rigtig blev udbredt fra og med indførelse af bygningsreglementet i 1977, hvor f.eks. U-værdi kravet for tunge ydervægge blev skærpet fra 1,00 til 0,40 W/m²K (1982 skærpedes yderligere til 0,35). Byggeteknisk er der mulighed for anvendelse af indvendig og udvendig isolering på samtlige bygninger, mens hulmursisolering naturligvis forudsætter hule mure.

Indvendig efterisolering er forbundet med mange ulemper, bl.a. er det fugt- og varmeteknisk en vanskelig løsning, der reducerer det effektive boligareal og giver problemer med diverse tilslutninger f.eks. ved stuk i loftet ect. En anden ulempe er, at den ofte tunge eksisterende bagvæg ”erstattes” af en let væg med en lavere varmekapacitet, og dermed dårligere egenskaber mht. til lagring af solvarme og udjævning af temperatursvingninger. Desuden er det en dårligere løsning end udvendig efterisolering mht. at eliminere kuldebroer fra vægge og gulve som gennembrøder isoleringslaget. Generelt kan det siges at indvendig efterisoleringens største berettigelse er i de tilfælde hvor facadens udseende er bevaringsværdigt.

Udvendig isolering er som sagt problematisk, hvor specielle bevaringsværdige arkitektoniske forhold gør sig gældende. Efterisolering af f.eks. gårdsiden på etageejendomme i forbindelse med f.eks. påbygning af baderum, er dog relativt uproblematisk, da sådanne forhold ofte ikke er af væsentlig betydning, og det samme gælder vinduesbrystninger. I mange tilfælde er det en fordel at udvendig efterisolering samtidig kan tjene som facaderenovering. Den udvendige efterisolering sikrer et ubrudt varmeisolerende lag og de tunge mure bibeholdes og dermed bibeholdes en høj varmeakkumuleringssevne. Visse typer af ydervægge er lettere at isolere end andre. Jo færre huller til vinduer, der er i muren, som f.eks. gavle i etageejendomme, jo lettere og billigere er det naturligvis at isolere udvendigt.

Udvendig efterisoleringssystemer kan deles op i tre grupper¹⁴: Lette efterisoleringssystemer med og uden ventileret luftspalte samt tunge efterisoleringssystemer med skalmur. De lette systemer er karakteriseret ved at der oftest benyttes et profilsystem (trælægter eller stålprofiler) for at holde de udvendige beklædningsplader på plads og for at overføre vindkræfter fra disse til den bagvedliggende konstruktion.

¹³ Der er et betydeligt behov/potentiale for nye og bedre vinduer. Inspiration kan hentes fra Tyskland, der er langt fremme i udviklingen af energirigtige vinduesløsninger.

¹⁴ Efterisoleringskatalog. Projekt Renovering. Projekt nr. 107. By- og Boligministeriet 1999.

Baggrunden for at efterisolere en bygning er sjældent et ønske om at opnå en energibesparelse. En udvendig efterisolering kommer som oftest på tale på grund af konstateret dårligt indeklima (skimmelsvamp), forårsaget af en kombination af kolde overflader samt en utilstrækkelig ventilation, og/eller af hensyn til at beskytte den oprindelige facade mod klimatisk nedbrydning og forbedre dens udseende. Energibesparelser i forbindelse med facaderenovering kan derfor betragtes som en sidegevinst, der er gratis, da efterisoleringen altså typisk udføres af hensyn til andre forhold end det energimæssige.

Da en efterisolering med udgangspunkt i en uisoleret eller dårligt isoleret mur, er særdeles effektivt energimæssigt set, og det er billigt at etablere ekstra isolering, når renoveringen finder sted, er det oplagt at sørge for en optimal isoleringstykkelse.

Efterisolering vil som regel (bør) blive foretaget samtidig med en udskiftning eller istandsættelse af de eksisterende vinduer¹⁵, og i den forbindelse vil der være behov for nye inddækninger både indvendigt og udvendigt. Denne udgift kan skønmæssigt vurderet antages at være uafhængig af efterisoleringens tykkelse. Det samme gælder byggepladsforanstaltninger og stilladsomkostninger. Meromkostningerne for en efterisolering på f.eks. 200 mm frem for 100 mm vil derfor overvejende kunne henføres til etablering af den ekstra isolering.

Udvendig efterisolering udføres oftest i en isoleringstykkelse på 100 mm, hvorefter den efterisolerede facade opfylder dagens isoleringsstandard for nybyggeri. For at leve op til fremtidens krav (BR2005), er der behov for omkring 175 - 200 mm isoleringstykkelse. Det vil ved efterisolering være oplagt at bruge skærmtegl, især som alternativ til tunge efterisoleringssystemer. Den smalle skærmtegl giver alt andet lige bedre plads til isolering ved udskiftning af den eksisterende regnskærm og ved opsætning af ny regnskærm uden på den eksisterende mur.

Hulmursisolering begrænses af afstanden mellem murene, der typisk er 80 eller 130 mm, og virkningen nedsættes betydeligt pga. typiske ommuringer ved tilslutninger til vinduer/døre og faste bindere. Hulmursisolering er dog nem og billig at udføre og ændre ikke på bygningens udseende eller boligareal, og den kan udføres med få gener for beboerne. Hulmursisolering i enfamiliehuse er allerede gennemført i vidt omfang, så potentialet er begrænset.

En udvendig efterisolering af enfamiliehuse kan umiddelbart være svær at forestille sig i stort omfang. Det er dog blevet populært at pudse det blanke murværk, og pudsløsningen kunne derfor lige så godt bruges på en udvendig efterisolering.

2.1.2 Energibesparelser og anlægsomkostninger

Relevante oplysninger om forskellige efterisoleringssystemer i Danmark, herunder priser og varmetekniske data, forefindes¹⁶. Herudfra kan fastslås at anlægsomkostningen ved etablering af 100 mm udvendig efterisolering er omtrent 1000 kr./m² (ekskl. moms) for en normalfacade. Der er heri ikke taget hensyn til inddækninger omkring vinduer mv.

Et af efterisoleringssystemerne er Rockwool facadesystem. Dette system er varmeteknisk en optimal løsning, da isoleringslaget stort set kun er brudt af gennemgående plastdybler med

¹⁵ Det nye vindue bør helst placeres ude i den nye konstruktion (ud for isoleringen) for at mindske det geometrisk bestemte varmetab i samlingen mellem vindue og vægkonstruktion. Fastholdes den oprindelige placering vil det ekstra varmetab forhøje U-værdien med op til 0,1 – 0,2 W/m²K for en typisk bygning. Ofte vælges af arkitektoniske årsager en vinduesplacering helt fremme i facaden, så problemet er ikke så udbredt.

¹⁶ Efterisoleringskatalog. Projekt Renovering. Projekt nr. 107. By- og Boligministeriet 1999.

stålstift, som sørger for fastholdelse af isoleringen. Varmetabet ved forskellige isoleringstykkelser er vist i Tabel 5 med udgangspunkt i en uisoleret eksisterende ydervægsgfacade.

Tabel 5. Varmetabsmæssige konsekvenser af en udvendig efterisolering af en uisoleret ydervægsgfacade.

Isoleringstykkelser [mm]	U [W/m ² K]	Energibesparelse [kWh/m ² /år]
Uisoleret	1,60	0
50	0,52	88
100	0,32	104
150	0,24	110
200	0,19	114

Det ses at de første 100 mm isolering reducerer varmebehovet med 104 kWh/m², mens de næste 100 mm isolering reducerer med 10 kWh/m². Til gengæld er merudgiften for de sidste 100 mm relativt begrænset.

Diverse prisbøger kan ikke give et realistisk og veldokumenteret bud på hvad det koster at foretage en udvendig efterisolering i forbindelse med større renoveringssager, herunder hvad den marginale merisolering koster. Derfor er de prismæssige konsekvenser søgt belyst via producenter af efterisoleringssystemer og gennem erfaringer fra en række realiserede renoveringssager.

De varmetekniske samt prismæssige konsekvenser af efterisolering af typiske ydervægskonstruktioner belyses gennem detaljerede beregninger på en række eksempelbygninger, som der er redegjort for i dette kapitels sidste afsnit.

2.2 Tag/loft

Det er relativt nemt, effektivt og overvejende billigt at efterisolere tag- og loftkonstruktioner i form af etageadskillelser, skunkrum, skråvægge og gitterspær samt flade tage.

2.2.1 Tekniske energibesparelsmuligheder

Tage og lofter i etageboliger kan efterisoleres i etageadskillelser mod uudnyttet loft samt skrå- og skunkvægge. For uopvarmede loftrum, der udnyttes til f.eks. pulterrum/tørreloft, kan isolering foretages af loft over øverste lejlighed ved indblæsning af isolering i etageadskillelsen. Isoleringstykkelsen er begrænset til ca. mellem 100 og 150 mm afhængigt af om der er lerindskud. Hvis loftrummet er uudnyttet, men tilgængeligt, kan der udlægges isoleringsmåtter på afretningslag. Løsning anvendes også typisk i tilgængelige skunkrum og over hanebånd. Hvis loftet er udnyttet til beboelse, fællesrum mm., foretages der normalt 150 mm isolering mellem spærene.

I enfamiliehuse med sadeltag er der typisk let adgang til at efterisolere loftet eller taget, hvilket også i stor udstrækning allerede er gjort. Huse med et problematisk fladt tag, kan ved konvertering til tag med hældning nemt få efterisolering til høj standard. Ellers kan der foretages en udvendig efterisolering eller efterisolering ved indblæsning via en særlig billig og effektiv metode, hvor man kan nøjes med at afmontere de nederste sternbrædder.

2.2.2 Energibesparelser og anlægsomkostninger

Tabel 6. Typiske tiltag i loft- og tagkonstruktioner samt energibesparelser og anlægsomkostninger.

Eksisterende isolering [mm]	$U_{\text{eksist.}}$ [W/m ² K]	Efter- isolering [mm]	U_{efter} [W/m ² K]	Energi- besparelse [kWh/m ² /år]	Anlægs- omkostning [kr./m ²]
Etageadskillelse ¹⁾					
0	1,59	100	0,40	96	155
0	1,59	150	0,29	105	183
Skunk ²⁾					
0	1,85	300	0,12	140	254
0	1,85	250	0,14	139	210
0	1,85	200	0,17	136	170
50	0,62	250	0,12	41	254
100	0,4	200	0,13	23	254
Skråvæg ³⁾					
0	1,85	125	0,28	127	279
0	1,85	225	0,16	137	550
0	1,85	325	0,11	141	719
125	0,28	225	0,11	14	271
Gitterspær ⁴⁾					
50	0,55	250	0,12	35	180
50	0,55	350	0,09	37	280
100	0,36	300	0,09	22	230
Fladt tag (build-up) ⁵⁾					
50	0,68	130	0,20	39	495

¹⁾ Mod uudnyttet loftrum, uden indskudsler.

²⁾ Skunken vil i nogle tilfælde være fyldt op med arkivalier, og mange steder vil der også være en halvdårlig isolering, hvor det vil være billigere at fjerne isoleringen i stedet for en opretning, da isoleringsarbejdet udføres hen imod åbningen. Priser er derfor forudsat en ryddet skunk uden isolering. Hvor der er regnet med eksisterende isolering, antages denne at være i lige så god stand som efterisoleringen (opretning ikke påkrævet).

³⁾ Der er regnet med et spærhoved på 125 x 50 mm. En isolering udover 125 mm mellem spærene kræver indvendig isolering, da en udvendig isolering kan betyde lukning af ventilationsrummet under tagbeklædningen som skal undgås. I den samlede pris er der regnet med opretning, forskalling, isolering, dampspærre (ellers risiko for kondens på bagsiden af taget) og gipsplade.

⁴⁾ Der er forudsat at efterisoleringen kan lægges oven på spærfoden, at eksisterende gangbro ikke ændres samt et fremkommeligt loftareal.

⁵⁾ Der er regnet på en udvendig efterisolering af en eksisterende ventileret build-up tagkonstruktion, som af fugt-tekniske grunde skal være minimum samme tykkelse som den indvendige isolering. Ved en udvendig isolering kan den eksisterende ventilation lukkes (når den oprindelige konstruktion er tør). Pris er baseret på isolering lagt ud på eksisterende tagpap og afsluttet med to lag tagpap. Der er ikke regnet med at gøre noget ved eksisterende sternbrædder mm. Antal m² er min. 150 og taget forudsættes rengjort. Pris er inkl. diverse inddækninger, ovenlys, etablering af tagfald til eksisterende tagbrønde.

2.3 Underbygning

Underbygningen defineres som terrændæk, fundamenter og kælder- og krybekælderkonstruktioner. Muligheder for efterisolering hæmmes væsentligt af fugttekniske forhold og forholdsvis store etableringsomkostninger. En oplagt og effektiv efterisoleringsmulighed er udlægning af isolering i strøgulve ved udskiftning af eksisterende gulv, især i forbindelse med uisolerede fundamenter.

2.3.1 Tekniske energibesparelsesmuligheder

Terrændæk

I modsætning til lofter og tage er efterisolering af terrændæk vanskeligt at gennemføre. I tilfælde af strøgulve kan der efterisoleres i det ca. 100 mm til 200 mm hulrum, men dette forudsætter en optagning og genudlægning af gulvet. Til svømmende gulvkonstruktioner kan efterisoleres med fugt- og vandafvisende isoleringsplader oven på betonklaplaget, og direkte oven på isoleringspladerne lægges gulvbelægningen. For at undgå kondens på fugtspærrens overside er det dog en forudsætning, at isolansen af de lag som ligger under fugtspærren er mindst lige så stor som de lag, der ligger over fugtspærren. For en konstruktion med kapillarbrydende lag og uden egentlig isolering under betonpladen bør isoleringstykkelsen begrænses til 50 mm.

Fundamenter

I huse opført før 1950 kan et trægulv ofte være udlagt uden fugtspærre og varmeisolering. Fundamenter er typisk udført uden varmeisolering, og der er ikke udført kuldebroafbrydelse i soklen. En oplagt mulighed for at reducere varmetabet og ikke mindst forbedre indeklimaet er en isolering på ydersiden af sokkel og fundament og evt. ydervæg. Dette kræver frigravning af fundamenterne. Den udvendige isolering vil hæve temperaturen væsentligt i den kritiske samling mellem gulv og ydervæg og derved reducere kondensrisikoen.

Kælder-/krybekælderdek

Hvis der er kælder kan kældergulvet isoleres indvendigt, men tykkelsen er typisk begrænset af en lille rumhøjde. Der kan i etageboliger typisk foretages efterisolering af etageadskillelsen over kælder, men det afhænger naturligvis af kældrens anvendelse, etagedækkets konstruktion, lofthøjden i kælderen og fugtforholdene.

Eksisterende krybekældre, som i årevis har fungeret hensigtsmæssigt, bør ikke umiddelbart ændres, da der typisk findes den rette balance imellem fugtafgivelse og ventilation. En efterisolering vil mindske temperaturen i krybekælderhulrummet, hvilket vil reducere luftens evne til at optage fugt. Hvis krybekælderdekke er uisolert – eller dårligt isolert – kan det sandsynligvis efterisoleres op til knap den nuværende standard (f.eks. til en U-værdi på 0,30), hvis blot ventilationen er etableret efter forskrifterne.

Kældervægge

Kælderen under en- og tofamiliehuse er en oplagt mulighed til at forøge opbevarings- og brugsarealet, men kræver at kælderydervæggen er lun og tør. Eksisterende kældre er typisk ikke isoleret, og det vil derfor være oplagt at foretage en indvendig isolering, under forudsætning af at kælderydervæggen er tør og rummet efterfølgende er konstant opvarmet i hele fyrringssæsonen. Ved problemer med jordfugt vil en udvendig kældervægsisolering være hen-

sigtsmæssig, idet væggen derved kan gøres tør. Løsningen kræver frigravning af væggen og er derved væsentligt mere ressourcekrævende end indvendig isolering.

2.3.2 Energibesparelser og anlægsomkostninger

Fundament og terrændæk

Varmetab fra fundament udtrykt ved linietafskoefficienten Ψ_f (de 2-dimensionale varmetabseffekter) afhænger af fundamentets isolering og samtidig af hvor godt ydervæg og terrændæk er isoleret. En efterisolering af f.eks. terrændækket vil reducere varmetabet til jord, men også varmetabet via fundamentet. Det samme gælder til dels for ydervæggen.

Med udgangspunkt i et uisolert ydervægsfundament med tilstødende uisolerede ydervæg og terrændæk, er der foretaget beregninger af linietafskoefficienten for fundamentet¹⁷. Resultaterne fremgår af Tabel 7.

Tabel 7. Varmeteknisk konsekvenser af forskellige efterisoleringstiltag ved fundament og i terrændæk i ældre huse med ingen eller beskedne varmeisolering.

Fundament	Ydervæg		Terrændæk		$\Psi_{\text{fundament}}$ [W/mK]	$U_{\text{ydervæg}}$ [W/m ² K]	$U_{\text{terrændæk}}$ [W/m ² K]
	Uisolert	Isolert ¹⁾	Uisolert	Isolert ²⁾			
Uisolert	+		+		0,77	1,46	0,43
Uisolert		+		+	0,41	0,52	0,28
Uisolert		+	+		0,73	0,52	0,43
Uisolert	+			+	0,47	1,46	0,28
Isolert ³⁾	+		+		0,56	1,46	0,43
Isolert ³⁾		+		+	0,31	0,52	0,28
Isolert ⁴⁾		+		+	0,24	0,22	0,28

¹⁾ Hulfursisolert (13 cm hulrum).

²⁾ 50 mm isolering i gulvets hulrum.

³⁾ 100 mm isolering på yderside af sokkel og fundament.

⁴⁾ 100 mm isolering på yderside af sokkel, fundament og ydervæg.

Det ses af tabellen at fundamentslinietabet er betydeligt afhængig af terrændækkets isolering. Om ydervæggen er hulfursisolert eller ej er ikke afgørende. Det ses at linietafet reduceres fra 0,73 til 0,41 W/mK (0,32 W/mK), hvis strøgulvets hulrum isoleres med 50 mm, når udgangspunktet er en hulfursisolert ydervæg. En samtidig udvendig isolering af fundament og sokkel vil yderligere reducere linietafet 0,10 W/mK. En udvendig isolering af sokkel og fundament alene uden tiltag i terrændækket, vil reducere linietafet med 0,21 W/mK¹⁸.

Ved bestemmelse af energibesparelser¹⁹ regnes der med en typisk fundamentslængde på 0,45 m fundament pr. m² gulvareal. En 50 mm efterisolering mellem eller under gulvstrøer koster

¹⁷ Fundamentet er af beton til en dybde af 90 cm under terræn, ydervæggen er 35 cm hulfur med faste binder (20 % udmuring) og terrændækket er traditionelt med betonklaplag på kapillarbrydende stenlag og gulv på strøer.

¹⁸ En udvendig isolering af ydervæggen med f.eks. 100 mm, vil reducere varmetabet igennem ydervæggen betydeligt, og samtidig reducere fundamentslinietabet fra 0,31 til 0,24 W/mK (23%).

¹⁹ Energibesparelsen beregnes ud fra følgende formel: $(\Delta U_{\text{terrændæk}} \cdot 10/16 + \Delta \Psi_{\text{fundament}} \cdot 0,45) \text{ W/m}^2\text{K} \cdot 90 \text{ kWh/år} \cdot 0,9$. Faktoren 10/16 tager hensyn til at varmetabet gennem terrændækket er mindre end gennem ydervæggen (som fundamentslinietabet henføres til). 10 og 16 er middeltemperaturforskellen mellem inde og hhv. mod jord / udeklima i fyringssæsonen.

ca. 75-90 kr/m² ²⁰, mens etablering af 100 mm isolering af fundament og sokkel koster 500 – 1000 kr/m. I Tabel 8 er vist beregnede besparelser og anlægsomkostninger.

Tabel 8. Terrændæk og fundament. Energibesparelser og anlægsomkostninger.

Eksisterende isolering [mm]	Efter- isolering [mm]	Energi- besparelse [kWh/m ²]	Anlægs- omkostning [kr./m ²]
Terrændæk (gulv på strøer)			
0	50	19,3	83
Fundament/sokkel			
0	100	7,7	225-450

Hvis de to tiltag kombineres kan der beregnes en besparelse på 22,9 kWh/m²/år. Energibesparelsen ved udvendig isolering af fundament og sokkel er derved kan omtrent det halve, når det sker i kombination med isolering af terrændækket (eller hvis terrændækket i forvejen er isoleret). Det er for dyrt at efterisolere soklen af rent energisparemæssige grunde. Efterisolering vil dog kunne betale sig i forbindelse med fugtproblemer der kræver udgravning og f.eks. etablering af dræn.

Kælder

Tabel 9. Kælder. Energibesparelser og anlægsomkostninger.

Eksisterende isolering [mm]	U _{eksist.} [W/m ² K]	Efter- isolering [mm]	U _{efter} [W/m ² K]	Energi- besparelse [kWh/m ²]	Anlægs- omkostning [kr./m ²]
Dæk mod krybekælder ¹⁾					
0	1,50	100	0,30	61	175
Kælderydervæg udvendigt ²⁾					
0	0,90	100	0,27	51	4000 kr/m
Kælderydervæg indvendigt ³⁾					
0	0,9	50	0,40	41	350
0	0,9	90	0,28	50	450

¹⁾ Pris forudsætter efterisolering med isoleringsplader og tillæg for fastholdelse med jerntråd.

²⁾ Prisen for en udvendig efterisolering er høj, og betyder at der skal andre grunde til at udføre opgaven end ønsket om at reducere opvarmningsbehovet, f.eks. en fugtfri kælderydervæg. Der er regnet med en kælderydervæg i beton i indtil 2 m under terræn.

³⁾ Ved en tør kælder, er den umiddelbare løsning en indvendig isolering vha. en stålskeletvæg med 50 eller 90 mm isolering og 25 mm luft mellem væg og stålskelet.

²⁰ Indbefatter isolering, fugtspærre, udskæring for rør og opklodsning mm. Der er set bort fra optagning og genudlægning af gulvbelægningen, som naturligvis skal medregnes hvis udgangspunktet er at gulvet ikke trænger til udskiftning/renovering. Det må antages at mange ældre huse med dårligt isoleret terrændæk er modne for udskiftning af det eksisterende gulv, og i den forbindelse vil det være billigt at opnå en betydelig reduktion af varmetabet. Hvis ikke gulvet trænger til udskiftning kan det næppe betale sig at isolere hulrummet. Et nyt trægulv koster ca. 300-700 kr/m².

2.4 Vinduer

Varmetransmissionstabet fra vinduer med energimæssigt dårlige rudeløsninger (termorude eller et lag glas) udgør ofte en væsentlig del af det samlede transmissionstab. I f.eks. det typiske 60'er parcelhus, der omtales senere i rapporten, udgør vinduestabet 45 %. Varmetabet kan generelt reduceres væsentlig ved udskiftning til vinduer med energirude og varm rudekant. I forbindelse med gamle bevaringsværdige vinduer er istandsættelse og montering af en forsatsramme med energiglas eller forsatsenergirude oftest den totaløkonomisk mest optimale løsning. Vinduer med endnu bedre varmetekniske egenskaber kan opnås ved brug af ruder med flere lag glas, smallere og isolerende ramme-karm konstruktion og jernfattigt glas.

2.4.1 Tekniske energibesparelsesmuligheder

I det eksisterende byggeri består de energimæssigt dårlige løsninger primært af trævinduer med termoruder og gamle vinduer med 1-lag glas. I en periode fra det industrialiserede byggeri for alvor satte ind i 1960'erne og indtil midten af 1990'erne, blev vinduer i stort omfang fremstillet i træ med dårlig holdbarhed (og almindelig termorude), som i dag med fordel kan udskiftes til f.eks. kernetræsvinduer eller trævinduer med aluminiumsbeklædning med energiruder.

I bygninger ældre end 1950-1960, hvor der i stor stil er anvendt kernetræsvinduer med en dokumenteret lang levetid, bør man generelt bevare og istandsætte de gamle vinduer, og anbringe energiglas eller energiruder indvendigt på disse. Beregninger viser at der ved en sådan løsning kan opnås det samme energimæssigt, sammenlignet med udskiftning til nye vinduer med energirude²¹. Forsatsvinduer med energiglas kan også anvendes i ejendomme, hvor der i øvrigt ikke foregår en renovering.

Typiske energiruder med en U-værdi på 1,1 reducerer varmetabet gennem ruden med ca. en faktor 3 set i forhold til traditionelle termoruder. Varmetabet kan reduceres yderligere ved brug af ruder med tre lag glas, der har U-værdier på 0,5 – 0,8 W/m²K afhængig af hvilken belægning og gasfyldning der anvendes. En anden mulighed er et såkaldt 1 + 2 vindue bestående af et lag glas udvendigt og en energiruder indvendigt, der har nogenlunde de samme varmetekniske egenskaber som 3-lags ruden. Tilføjelse af ekstra glaslag og belægninger har desværre den ulempe at den transmitterede solenergi reduceres²².

Varmetabet for ramme-karm konstruktionen, der typisk udgør 20 – 40 % af vinduesarealet, har i Danmark ikke fulgt med udviklingen på rudeområdet. Der er derfor et stort potentiale for at reducere varmetabet gennem ramme-karm konstruktionen. Smalle ramme-karm konstruktioner er en mulighed²³, mens isolerende ramme-karm konstruktioner og afstandsprofiler er andre muligheder.

På BYG-DTU er det forsøgt at kombinere de gode delløsninger i en samlet optimal løsning baseret på anvendelse af en traditionel 2-lags energirude. Vinduet er opbygget af en 50 mm smal ramme-karm konstruktion af træ med aluminiumsbeklædning udvendigt for at minimere vedligeholdelsesomkostningerne. Til den traditionelle energirude er benyttet jernfattigt glas for at opnå en høj solenergitransmittans. Som kantkonstruktion benyttes et såkaldt varmt

²¹ Vinduers varmetab. Raadvad-centeret maj 2002.

²² Der kan kompenseres for dette ved at benytte jernfattigt glas, men med de nuværende priser kan det ikke betale sig (koster ca. 450 kr/m², mens almindeligt glas koster 100 kr/m²).

²³ Reducerer varmetabet da en ramme-karm konstruktion typisk har en højere U-værdi end en energirude, og samtidigt øges solindfaldet.

kantprofil. Herved reduceres både linietabet og risikoen for kondens væsentligt. Det udviklede vindue (NulenergiVinduet) giver et væsentligt bedre energitilskud end traditionelle vinduer og endda et bedre energitilskud end en traditionel ydervægskonstruktion²⁴. De nævnte forbedrede vinduesløsninger med smal rammekarm, 3 lags- og 1+2 rude, behandles i forbindelse med kapitel om nybyggeri.

2.4.2 Energibesparelser

For at belyse energibesparelsesmuligheder redegøres for beregninger af energitilskud for et klassisk dannebrogsvindue²⁵.

Vinduets varmetekniske egenskaber måles i energitilskuddet, der defineres som den tilførte solenergi minus varmetabet gennem vinduet i fyringssæsonen. Energitilskudsligningen for en typisk fordeling af vinduer og normale skyggeforskel er bestemt til følgende udtryk²⁶:

$$E = 196,4 \cdot g - 90,36 \cdot U \text{ ,}$$

hvor g-værdien angiver hvor stor en del af solindfaldet der transmitteres gennem vinduet og U-værdien angiver vinduets samlede varmetab ud gennem vinduet. Denne ligning benyttes til klassificering af vinduesruder i forbindelse med energimærkningsordningen på området. Forskellen i energitilskuddet vil omtrent svare til besparelsen i nettovarmebehovet under forudsætning af at udnyttelsesgraden af den tilførte solenergi er høj.

I Tabel 10 er vist energitilskud for typiske dannebrogsvinduer.

Tabel 10. Energitilskud for dannebrogsvindue med dimensionen 1,163 x 1,834 m (b x h) uden sprosser og med forskellige rudesystemer. Energibesparelsen er opgjort ift. et typisk oprindeligt forsatsvindue.

Vinduestype	U-værdi [W/m ² K]	g-værdi	Energitilskud [kWh/m ² /år]	Energibesparelse [kWh/m ² /år]
Oprindeligt				
- med et lag glas	4,4	0,54	-294	-169
- og oprindeligt forsatsvindue	2,4	0,47	-125	0
- og forsatsramme m. energiglas	1,7	0,44	-66	59
- og forsatsenergirude	1,3	0,33	-51	74
Nyt trævindue med termorude	2,5	0,44	-138	-13
Nyt trævindue med energirude	1,6	0,34	-77	48
Nyt trævindue med energirude og varm kant ¹⁾	1,5	0,34	-68	57
Nyt alubeklædt træ-alu vindue med termorude	2,5	0,43	-140	-15
Nyt alubeklædt træ-alu vindue med energirude	1,7	0,34	-86	39

¹⁾ Afstandsprofil i rustfrit stål.

Det fremgår af Tabel 10 at de varmetekniske egenskaber for oprindelige forsatsvinduer med et lag glas kan forbedres væsentligt ved montering af forsatsenergiglas. Der kan opnå omtrent de samme energibesparelser ved at udskifte de gamle vinduer med nye vinduer med energirude med varm rudekant. Oprindelige vinduer med et lag glas og forsatsenergirude er den bedste af de omtalt løsninger.

²⁴ Dvs. at det resulterende varmetab (tilført solenergi minus varmetab) er mindre end varmetabet fra en traditionel ydervæg.

²⁵ Beregningsresultater er uddrag fra rapporter om de energimæssige egenskaber af renoverede og nye dannebrogsvinduer: Sagsrapport 030 og 109. Karsten Duer BYG-DTU 2001.

²⁶ Jf. Ruder og vinduers energimæssige egenskaber. Vindueskompendium 1: Grundlæggende energimæssige egenskaber. Rapport U-001, Version 6. BYG-DTU, Danmarks Tekniske Universitet, 2003

Som alternativ til ovennævnte forsatsenergirude til oprindelige vinduer, kan man forestille sig brug af to forsatsenergiglas. Foreløbige beregninger viser at der med denne løsning kan opnås et energitilskud på $-20 \text{ kWh/m}^2/\text{år}$ (U-værdi på 1,0). Udover den varmeteknisk fordel ved løsningen vil levetiden være forøget i forhold til energirudens levetid på ca. 20 år. Der vil dog være behov for ventilering af hulrummet imellem de to glaslag for at undgå dug, og eventuelt et filter for at undgå tilsmudsning.

For typiske trævinduer i ældre enfamiliehuse med standard dimensionen $1,2 \times 1,2 \text{ m}$ og 75 % glasareal, hvor de eksisterende termoruder udskiftes til energiruder med varm rudekant, vil vinduets samlede U-værdi typisk blive halveret. Tiltaget vil baseret på ovennævnte energitilskudslingning reducere det årlige varmebehov med omkring 100 kWh pr. m^2 vindue.

2.4.3 Anlægsomkostninger mm.

I den ældre boligmasse står valget ofte mellem bevaring og udskiftning af gamle vinduer. Dette valg bør udover de energimæssige forhold afhænge af hvor mange skader der er på vinduet, om vinduet kan repareres uden at glasset demonteres, levetiden set i forhold til levetiden af nye vinduer, vedligeholdelsesomkostningerne osv. Gamle trævinduer med forsatsløsning har et større vedligeholdelsesbehov (maling, pudsnings af fire glassider mm) end f.eks. nye trævinduer med forsejlet rude og udvendig alu-beklædning, der blot jævnlige skal afvaskes udvendigt for at undgå varig tilsmudsning.

Typisk vil omkostningen ved at istandsætte og montere forsatsenergiglas/-rude være omtrent den samme som udskiftning til et nyt vindue med energirude. Sammenholdes dette med at de varmetekniske egenskaber også er omtrent de samme, bliver de afgørende parametre levetiden og vedligeholdelsesomkostningerne. Levetiden af glasløsninger uden termorude har en meget lang levetid, hvis vinduet vedligeholdes. Det vil være realistisk at antage en restlevetiden på 100 år ved korrekt istandsættelse og vedligeholdelse. Nye vinduers levetid afhænger naturligvis af kvaliteten. Gode kernetræsvinduer kan holde 100 år, dårlige måske kun 10 år, og typisk kan der forventes en levetid på 40 år. Rudedelen har en begrænset levetid på ca. 20 år. Udgifter til løbende vedligeholdelse af renoverede vinduer er typisk omkring 50 % større end for nye vinduer.

I bygninger uden bevaringsværdige vinduer kan man vælge at udskifte til almindelig trævinduer eller ”vedligeholdelsesfrie” vinduer. Anlægsomkostningen ved udskiftning af ikke energirigtige vinduer til nye trævinduer med energirigtige ruder²⁷ fremgår af Tabel 11.

²⁷ Nye vinduer til det eksisterende byggeri leveres efterhånden som standard med energirude. To større vinduesproducenter oplyser at deres markedsandelen er omkring 90 %. Det forholdsvis store salg via byggemarkeder er dog stadig domineret af almindelige termoruder. Endnu er det ikke så udbredt med et kuldebro-reducerende afstandsprofil (fx i plastkomposit), men der forventes stor udbredelse inden for få år. Et dannebrogsvindue (uden sprosser) og med varm rudekant er ca. 10 % dyrere, mens merprisen er omkring 5 % for små et fags vinduer.

Tabel 11. Priser på udskiftning af almindelige ét fags vinduer (1,2 x 1,2 m)²⁸.

Vinduestype	Anlægsomkostninger [kr. pr. vindue]
Trævindue	3925
Trævindue inkl. lysninger	4950
Alu-beklædt trævindue	5625
Alu-beklædt trævindue inkl. lysninger	6650

Omkostningen ved at udskifte en eksisterende traditionel termorude med en energirude omtales i forbindelse beregningseksemplet ”Energirenovering af typisk 60’er hus”.

2.5 Ventilation

Der er potentiale for betydelige varmebesparelser ved brug af mekanisk ventilation med varmegenvinding, da ventilationstabet typisk er 35-40 kWh/m², hvoraf 80-90 % vil kunne genvindes. Af hensyn til driftsøkonomien er det vigtigt at fokusere på minimering af elforbruget til ventilatordriften der i dag typisk er omkring 7 kWh/m², men som kan nedsættes til 3 kWh/m² ved brug af kendte løsninger. Meranlægsomkostningen for ventilation med varmegenvinding frem for udsugning er i etageboliger kun ca. 50 kr/m². I enfamiliehuse kan ventilation med varmegenvinding etableres for ca. 300 kr/m².

2.5.1 Tekniske energibesparelsmuligheder og energibesparelser

I det eksisterende boligbyggeri tilvejebringes ventilationen ofte af naturlige ventilationssystemer eller ved mekanisk udsugning eller en kombination af de to. Varmetabet ved ventilationen af en bolig udgør en væsentlig del af det samlede varmetab (typisk 30 %).

Ved renovering etableres der oftest kun mekanisk udsugning i forbindelse, selvom mekanisk ventilation med varmegenvinding er en særdeles effektiv og energirigtig løsning. Det er dog vigtigt at være opmærksom på elforbruget til drift af anlægget, der nemt kan ødelægge totaløkonomien i løsningen. I den forbindelse vil en god dimensionering og velvalgt behovsstyring kunne hjælpe betydeligt på driftsøkonomien.

Ventilationen af boliger er vigtig dels for at opretholde et sundt indeklima med en god luftkvalitet og dels for at undgå at bygningskonstruktioner hurtigere nedbrydes af fx. råd og svamp. Reduktion af ventilationsmængden kan derfor medføre problemer som ovenfor nævnt. Opfyldes bygningsreglementets krav om et grundluftskifte på 0,5 gang pr. time er det årlige ventilationstab for en bolig ca. 35 - 40 kWh/m² ²⁹. Heri er ikke medregnet energiforbruget til ventilatordriften, der kan variere meget i ældre anlæg.

Naturlig ventilation

Naturlig ventilation af en bygning sker normalt via åbninger i klimaskærmen som fx. vinduer eller trækkanaler gennem taget eller ydervæggen. Luftsiftet drives frem af vind- og temperatursforskelle og reguleres manuelt af brugerne, hvorved energiforbruget til driften normalt er

²⁸ Svarende til udtagning af gamle vinduer, isætning af nye vinduer med 2-lags energiruder inkl. indvendige dæklistes og vinduesplade (pris på vinduer med nye lysninger er vist separat). Priser vil være forskellig fra bygning til bygning, da adgangsforholdene altid vil være forskellige, så der er forudsat en 3 etagers bygning uden tårne og med let adgang, hvor der er mulighed for at anvende lift platform, og det omhandler udskiftning af mellem 50-100 vinduer. Priser er indhentet hos M.T. Højgaard.

²⁹ Beregnet på basis af referencevejrdatabasen DRY for fyringssæsonen 24/9 - 13/5 og ved en rumhøjde på 2,3 – 2,5 m.

nul. I systemer med naturlig ventilation er det svært at benytte varmegenvinding, hvorved energibesparelspotentialer er begrænset. Undersøgelser af luftfugtigheden i etageboliger med naturlig ventilation har vist at denne ofte er for høj, og at det er svært at påvirke beboerne til at lufte tilstrækkeligt ud.

Mekanisk udsugning

Det er meget udbredt at etablere mekanisk udsugning i bad og køkken ved renovering af etageejendomme og ofte i kombination med nye vinduer med friskluftventiler. I den forbindelse forbedres indeklimaet typisk væsentligt (forudsat at friskluftventiler ikke lukkes til), og der kan samtidig spares en del energi ved udformning af en hensigtsmæssig behovsstyring.

Mekanisk ventilation med varmegenvinding

Mekanisk ventilation med varmegenvinding fjerner trækgener fra udeluftventiler, idet indblæsningstemperaturen til boligen normalt kun er et par grader lavere end indetemperaturen. Mekanisk ventilation giver også mulighed for filtrering af den tilførte udeluft. Omvendt kræver mekanisk ventilation en bedre brugervenlighed samt regelmæssig vedligeholdelse af filtre, kanaler, spjæld mm. Desuden er det helt afgørende for effektiviteten at klimaskærmen er så tæt så mulig, så luftskiftet uden om anlægget minimeres. I forbindelse med etageejendomme er der behov for at beboerne instrueres i vigtigheden af en tæt klimaskærm, herunder ingen åbne vinduer. Der er et behov for at udvikle og afprøve balancerede mekaniske ventilations-systemer til etageejendomme og få større erfaring med deres funktion på længere sigt. Udviklingen bør udover virkningsgrad og elforbrug, fokusere på bl.a. økonomi, styringsmuligheder, brugervenlighed og vedligeholdelse. Der findes endnu ikke mange praktiske erfaringer med etablering af mekanisk ventilation med varmegenvinding i eksisterende etageejendomme eller enfamiliehuse. Derfor er også dokumentationen for besparelspotentialer sparsomt.

Ventilationstabet reduceres ved at benytte et såkaldt varmegenvindingsaggregat, der kan overføre ”varmen” fra afkastluften til indblæsningsluften. Der findes på markedet i dag flere forskellige typer af varmevekslere. De mest almindelige vekslere er:

Vekslertype	Typisk temperatureffektivitet
Krydsvarmeveksler	50 – 65 %
Roterende varmeveksler	75 – 85 %
Modstrømsvarmeveksler	80 – 90 %

I boliger hvor overtemperaturer normalt ikke er et problem, er en varmeveksler med en høj effektivitet at foretrække. Omvendt kan et kontorbyggeri med stor intern varmelast have brug for at ”slippe” af med noget af varmen, hvorved effektiviteten af veksleren er af mindre betydning.

Elforbrug

Elforbruget til driften af ventilatorerne i ventilationssystemet er ofte af en betydelig størrelse og bør derfor medregnes i det samlede energiregnskab. I bygningsreglementet stilles en øvre grænse for Specifikt Elforbrug til Lufttransport, der betegnes SEL. For at fremme ventilatorer/motorer med lavt energiforbrug har de danske elselskaber iværksat en kampagne med fokus på ventilatorer. Ventilatorer med høj virkningsgrad kan optages på elselskabernes Spareventilator®-liste og benævnes Spareventilatorer®. Ved at skifte til nye energieffektive spare-

ventilatorer kan der typisk spares op til 30%, hvorved investeringen kan være tjent ind på ganske få år³⁰.

For at kunne reducere elforbruget til driften af ventilatorerne er det desuden afgørende at systemet udføres med mindst muligt tryktab. Ligeledes kan der opnås store besparelser ved indregulering (5-10%) og bedre drift (10 – 25%) af ventilationsanlægget samt regelmæssig vedligeholdelse³¹. Generelt kan der regnes med et elforbrug til driften af ventilatorerne i boliger på 6 - 7 kWh pr. m² boligareal under forudsætning af et SEL tal på maksimalt 2000 J/m³ ved konstant lufttransport og 2200 J/m³ ved variabel lufttransport³². For ventilationsanlæg med et mindre SEL tal, kan det årlige elforbrug til ventilatordriften beregnes af følgende udtryk:

$$\text{Elforbrug} = 0,003 \cdot \text{SEL} \quad [\text{kWh/m}^2 \text{ pr. år}]$$

(Ved et konstant luftskifte på 0,5 h⁻¹ hele året og en rumhøjde på 2,5 m)

Det vil generelt være muligt at mindske SEL-værdien til ca. 1000 J/m³ i boliger, hvilket blandt andet har været konklusionen i et projekt om udvikling af et energieffektivt ventilationsaggregat³³.

Anlægsomkostninger³⁴

Et ventilationsanlæg med varmegenvinding til et enfamiliehuse inkl. installation koster typisk 40.000 til 50.000 kroner ekskl. moms (afhængig af husstørrelse), svarende til ca. 300 kr. pr. m². Driftsudgifterne vil typisk beløbe sig til 500 kr. årligt (skift/rengøring af filtre mm).

I etagebyggeri kan prisen variere meget, men typisk kan der regnes med en pris på 55 – 65 kr. pr. m³ luft, svarende til ca. 125 – 150 kr. pr. m² boligareal. Til sammenligning koster et rent udsugningsanlæg typisk 6.000 til 8.000 kr. pr. lejlighed. For en lejlighed på fx. 80 m² fås således en pris på 75 – 100 kr. pr. m² boligareal. Merudgiften til et anlæg med varmegenvinding er altså kun ca. 50 kr. pr. m². Det antages at elforbruget til et mekanisk udsugningsanlæg er halvdelen af elforbruget til anlæg med både indblæsning og udsugning. Udgiften til drift og vedligeholdelse, der typisk vil bestå af et årligt serviceeftersyn og rensning hvert 5. år, vil årligt udgøre ca. 3 kr./m² for mekanisk ventilationsanlæg og 2 kr./m² for et mekanisk udsugningsanlæg.

Levetiden for ventilationsaggregater er typisk 20 år, mens kanalsystemet kan antages at have en levetid svarende til bygningens levetid, dvs. ca. 100 år. Kanalsystemets andel af investeringen antages for enfamiliehuse at være 60 %, mens andelen for etageboliger antages at være 85 % for udsugningsanlæg og 80 % for anlæg med varmegenvinding.

³⁰ Jf. den lille blå om ventilation, Claus M. Hvenegaard, TI, Elselskabernes Spareventilatorkampagne 1999-2000.

³¹ Byøkologiske løsninger – status for viden og erfaringer, Boligministeriet, Marts 1999.

³² Disse elforbrug svarer til angivelser i oplæg til nye energibestemmelser i Bygningsreglement år 2005 (By og Byg 2001) og svarer også omtrent til niveauet for de bedste nuværende anlæg.

³³ EFP2001-projekt (1213/01-0018). Udvikling og optimering af et energieffektivt straightner ventilationsaggregat med indbygget chopper varmeveksler. Teknologisk Institut 2003.

³⁴ Priserne er gennemsnitsværdier oplyst ved telefonisk kontakt til en række VVS firmaer.

2.6 Teknisk isolering

Nylige stikprøveundersøgelser i nyere eller nyrenoverede etageejendomme har vist at kravene til teknisk isolering ikke er overholdt for to tredjedele vedkommende. Det gælder især varmerør. Det konkluderes at der skal en generel holdningsændring til for at komme problemet til livs. Det store umiddelbare potentiale for varmebesparelser er ved udskiftning af varmeanlæg i ældre etageejendomme, hvor en ekstra god isolering kan etableres for en begrænset merudgift, og i forbindelse med anlæg med tynd og dårlig isolering. I forbindelse med enfamiliehuse er uisolerede fjernvarmeunits et område med store besparelsesmuligheder (jf. også det tilsvarende afsnit i kapitel 3 om nybyggeri). Efterisolering af uisolerede varmerør og varmevekslere mm er naturligvis særdeles energi- og omkostningseffektiv.

2.6.1 Tekniske energibesparelsesmuligheder

I de senere par år er der kommet fokus på problemer med uisolerede varmeinstallationer (varmevekslere, varmerør, ventiler, pumper mm.) i dansk byggeri. For at få et indtryk af problemerne med uisolerede varmeinstallationer er der blevet foretaget en stikprøvekontrol i 61 nyere eller nyrenoverede ejendomme³⁵, taget i brug mellem 1997 og 2000. Undersøgelsen viste, at flertallet af de undersøgte ejendomme ikke overholder kravene i DS 452 til teknisk isolering. Og at den gældende lovgivning på området ikke er overholdt for to tredjedele vedkommende. En af de hyppigst forekommende fejl er manglende isoleringstykkelse på rør for varme og varmt brugsvand.

Efterfølgende er udarbejdet en rapport³⁶, der beskæftiger sig med årsager til fejlene, og som overordnet viser at området ”teknisk isolering” normalt kun har lidt opmærksomhed i en byggesag. Det betyder i praksis, at de projekterende ikke sikrer, at der f.eks. er plads nok til at isolere ordentligt, og at en kontrol af den færdige tekniske isolering ikke indgår i de byggesyn som Byggeskadefonden afholder. Heller ikke den kommunale byggesagsbehandling har hidtil taget sig af dette område. Det konkluderes at der skal en holdningsændring til, hvis det skal lykkes at bryde tendensen til at der bliver flere og flere steder, hvor isoleringskravene ikke overholdes.

Byggeriets parter har primo 2003, på opfordring af Erhvervs- og Boligstyrelsen, udformet en handlingsplan for, hvordan de vil forbedre kvaliteten af den tekniske isolering. Heri tilkendegiver organisationerne at de ønsker at medvirke til at fremme kvaliteten og at fokus primært må rettes mod to forhold: At der i planlægningsfasen afsættes den fornødne plads i bygningen til fremføring af tekniske installationer og at kravene fra de regulerende normer og standarder bør koordineres yderligere (konkret drejer det sig om DS 452³⁷ og DS 1102). Hvad angår kontrol med området har Erhvervs- og Boligstyrelsen skrevet til samtlige kommuner i 2002 og pålagt dem at inddrage området teknisk isolering i deres almindelige byggesagsarbejde, og endelig har Byggeskadefonden i marts 2003 accepteret styrelsens forslag om at inddrage teknisk rørisolering i deres et års eftersyn på alt offentligt støttet byggeri.

Det største potentiale for energibesparelser i eksisterende etageejendomme ligger primært ved udskiftning af varme- og varmtbrugsvandsanlæg og opgradering til isoleringsniveau svarende til DS 452 eller bedre niveau, da det ved renovering af en etageejendom er normalt at der indlægges et nyt centralvarmeanlæg og anlæg for varmt brugsvand. En ekstra god isolering kan i den forbindelse etableres for en begrænset merinvestering.

³⁵ Kvalitet i byggeriet – teknisk rørisolering. Rambøll oktober 2002 for Erhvervs- og Boligstyrelsen.

³⁶ Teknisk isolering. Udredning december 2002. Rambøll for Energistyrelse (ENS j.nr. 750/0017).

³⁷ Termisk isolering af tekniske installationer. DS452, 2. udgave.

Men der er også potentiale i gamle anlæg med tynd og dårlig isolering, og ved helt uisolerede varmerør og i uopvarmede kældre eller skunk- og loftrum. Efterisolering af nyere anlæg, der er udført med for lidt isolering, kan der ikke forventes at være så god økonomi i. Efterisolering af små fjernvarmeunits i enfamiliehuse er også en mulighed for at opnå energibesparelser (behandles under nybyggeri).

2.6.2 Energibesparelser og anlægsomkostninger

Efterisolering af uisolerede varmerør

Varmerør i uopvarmede kældre, krybekældre og skunk- og loftrum kan typisk henføres til klasse 2, hvilket kræver almindelige rørskele med 30 mm isolering for rør med f.eks. en udvendig diameter på 34 mm (indvendig diameter på 1 tomme) og rørskele med 60 mm isolering for rør med f.eks. en diameter på 60 mm (indvendig diameter på 2 tommer). Der tages udgangspunkt i at eksisterende rør er uisolerede stålrør, og at den gennemsnitlige temperaturforskel mellem vandet i rørene og omgivelserne er 35 °C samt at 30 % af varmetabet nyttiggøres (spildfaktor på 0,7), svarende til uisoleret kælder med isoleret etagedæk³⁸. Der er antaget en levetid på 40 år, og at ændringen i konstruktionen ikke påvirker vedligeholdelsesbehovet samt at der er tilstrækkelig plads til efterisoleringen. Varmeanlægget antages kun at være i drift i fyringssæsonen. Anlægsomkostninger er bestemt ud fra V&S prisbog (Renovering og Drift, Brutto 2003), og gælder ved et omfang på 50 meter rør.

Energibesparelser og anlægsomkostninger fremgår af Tabel 12. Det ses at der naturligvis er store besparelser at hente ved at efterisolere uisolerede varmerør. Det vil derfor være relevant at efterisolere også i tilfælde hvor der kun findes relativt korte uisolerede rørstrækninger. Det ses i øvrigt at energibesparelsen er omtrent lige så stor som anlægsomkostningen, hvilket med dagens energipriser indikerer en særdeles god økonomi.

Tabel 12. Energibesparelse og anlægsomkostning ved efterisolering af uisolerede varmerør. Varmeledningsevne 0,043 W/mK

Udvendig rørdiameter mm	Specifikt varmetab W/mK			Energibesparelse kWh/m/år	Anlægsomkostning, kr./m
	0 mm	30 mm	60 mm		
34	0,9	0,2	-	92	86
60	1,4	-	0,2	164	169

Efterisolering af typisk etageejendom

Rambøll har lavet en beregning³⁹ af de energimæssige og økonomiske konsekvenser af at foretage en opgradering af den tekniske isolering i en fiktiv ejendom til nugældende krav i form af efterisolering af varme- og varmtvandsrør (20 mm) samt varmevekslere (50 mm) og øvrige komponenter. Der er regnet på tre boligblokke (46 boliger) med fælles varmecentral og med central produktion af varmt brugsvand. Der er desuden anvendt gennemsnitsbetragtninger for teknisk isolering baseret på undersøgelsen for Erhvervs- og Boligstyrelsen (se fodnote 35) samt foretaget kontrol af priser fra isoleringsentreprenører. Fremløbstemperatur for centralvarmen er baseret på et gennemsnit over fyringssæsonen. Konsekvenserne er opgjort til en

³⁸ Jf. s. 37 i Beregning af bruttoenergiforbrug. SBI meddelelse 129. SBI 2000.

³⁹ Se http://www.ffem.dk/download/gs_ramb_bd03.ppt

omkostning på 230.000 og en energibesparelse på 30 – 40.000 kr. Dette indikerer en god økonomi i teknisk isolering af etageboliger.

2.7 Eksempelbygninger

For at undersøge virkningen af de enkelte besparestiltag i forbindelse med renovering af hele bygninger, er der foretaget beregninger på tre forskellige og typiske eksempelbygninger. Den ene bygning er en muret etageejendom opført i starten af 60'erne og den anden er en etageejendom fra 1970 opført i betonelementer. Den tredje eksempelbygning er et typisk parcelhus fra 60'erne.

2.7.1 Energirigtig facaderenovering af muret boligblok: Lundebjerg (Ballerup)

Som eksempel på efterisolering af en etageejendom med blanke mure er valgt en bebyggelse i Ballerup, opført 1961-1964. Baggrunden for renoveringssagen har været massive problemer med kuldebroer, revner i murværk, enkelte fugtteknisk dårlige løsninger og tillukkede aftrækskanaler, hvilket har medført kondens på indvendig kolde flader og vækst af skimmelsvamp mm. I bilag 1 er renoveringssagen kort omtalt og der er vist billeder/snittegninger af bebyggelsen før og efter renoveringen⁴⁰.

Bebyggelsen facader og gavle er oprindeligt hulmur med faste bindere pr. 60 cm i de større murede arealer på facader og gavle. Formuren er af hulsten, og bagmuren er af lecasten. Der er ved inspektion konstateret isolering i hulmuren og i murværk ved altaner. Isoleringen er dog i dårlig stand og er antaget at have ca. halvdelen af den oprindelige isoleringsværdi. Ved etagedækkene ligger der vandrette gesimselementer af beton. Disse er oplagt på murværk og punktvis forankret i etagedæk og har 30 mm polystyrol som kuldebroisolering. På facaden tæt på gavlhjørnerne er der lodrette pilastre af beton, der er forankrede i etagedækkene, og i gavlene er der muret massivt med lecasten bag formuren, 4 skifter over og 4 skifter under etagedækkelsen.

I forbindelse med renoveringen er der foretaget en udvendige efterisolering af facaden med 150 mm isolering i træskelet og med ny regnskærm af skærmtegl.

Ved bebyggelsens opførelse var alle vinduer trævinduer med koblede rammer og to almindelige glas. I slutningen af 1980'erne blev trævinduerne skiftet til plastvinduer, som i forbindelse med renoveringen blev udskiftet til 1+2 vinduer med energirude (dog er der udskiftet til vinduer med to-lags energiruder i badeværelser).

Det oprindelige varmeanlæg (1-strengsanlæg) er blevet konverteret til et 2-strengsanlæg. Ventilationen i bebyggelsen blev før renoveringen tilvejebragt ved naturligt aftræk i køkken og bad. Disse huller blev i nogle lejemål brugte til tilslutning af emhætte eller udsugning på badeværelse, men i de fleste af lejemålene var de tillukkede. I forbindelse med renoveringen er der, som det er normalt, blevet etableret mekanisk udsugning. Ventilation med varmegenvinding er fravalgt af økonomisk årsager, men ville have været nærliggende at installere for at sikre et tilstrækkeligt luftskifte, især i betragtning af bebyggelsen store dokumenterede problemer med indeklimaet, og det forhold at udsugningsanlægs funktionalitet er stærkt afhængigt af om beboerne sørger for at holde friskluftventiler åbne.

⁴⁰ Renoveringssagen er beskrevet i detaljer i forbindelse med projektet "Energirigtig facaderenovering". Eksamensprojekt udført ved BYG-DTU 2003.

Energibesparelser

Der er foretaget detaljerede varmetabsberegninger af alle klimaskærmselementer. Der er regnet på hhv. en opgang midt i en boligblok og en opgang ved gavlen. De beregnede samlede varmetabskoefficienter er anført i Tabel 13.

Tabel 13. Samlede varmetabskoefficienter for typiske opgange [W/K].

	Midter-opgang	Gavl-opgang
Før efterisolering	465	519
Efter efterisolering	279	296

Det samlede varmetransmissionstab gennem klimaskærmen (inkl. vinduer/døre) er blevet reduceret med ca. 40 % for både midter- og gavlopgang, som følge af den 150 mm udvendige efterisolering og energimæssigt lidt bedre vinduer⁴¹. Facadeefterisoleringen alene giver anledning til en reduktion på 35 %. Energibesparelsen ved den udvendige efterisolering kan regnes til 101 kWh pr. m² facade. Det skønnes at yderligere 50 mm isolering svarende til 200 mm udvendig isolering vil resultere i en energibesparelse på 105 kWh pr. m².

Der er foretaget simuleringer af opvarmningsbehovet før og efter renoveringen⁴². (se Tabel 14). Desuden er der regnet på en situation, hvor der i den renoverede bygning var blevet installeret ventilation med varmegenvinding (90 %). Energirammen for nybyggeri i det nuværende bygningsreglement er 58 kWh/m², mens varmebehovet kan forventes reduceret omkring 30 % svarende til ca. 40 kWh/m² i kommende nye energibestemmelser. Det ses at det beregnede varmebehov før renoveringen kun er ca. 40 % større end den nugældende energiramme til nye etageboliger, hvilket kan tilskrives at facaden til en vis grad har været isoleret og at vinduesarealet er forholdsvis beskedent. Den renoverede bygnings varmebehov er omtrent på niveau med det forventede krav til nybyggeri, mens varmebehovet med varmegenvinding er væsentligt mindre end det skitserede krav i 2005.

Tabel 14. Beregnede rumopvarmningsbehov for en opgang midt i en boligblok.

	Varmebehov [kWh/m ² /år]
Oprindeligt	80
Renoveret	46
Renoveret med VGV ¹⁾	19

¹⁾ Ventilationsanlæg med varmegenvinding på 90 %.

Anlægsomkostninger

Anlægsomkostninger er oplyst af entreprenørens projektleder. Det ses af Tabel 15 at den samlede pris ligger på ca. 2500 kr/m² og at skærmteglen i dette konkrete tilfælde er relativt dyr i forhold til den øvrige konstruktion, idet den udgør over halvdelen af den samlede omkostning. Regnskærmen er dog et arkitektonisk valg, så disse omkostninger er en prioritering af udseendet og kvaliteten. Det ses desuden at isoleringens andel er meget lille. Forudsættes der vlagt

⁴¹ Et større isoleret bundstykke/fyldning i de oprindelige rumhøje vinduer (se billeder før og efter renoveringen i bilag 1) begrænser effekten af den energimæssigt væsentligt bedre rude.

⁴² Beregninger er foretaget i programmet BuildingCalc udviklet på BYG-DTU, der kan simulere opvarmningsbehovet med en detaljeringsgrad svarende til BV98. Der er anvendt standardforudsætninger vedrørende internt varmetilskud (5 W/m²), ventilationsluftmængde (0,5 h⁻¹) osv.

en regnskærmen med en pris på halvdelen af skærmteglen, kan beregnes en pris på ca. 1900 kr/m².

Tabel 15. Anlægsomkostninger for den udvendige facadeisolering. Ekskl. stillads- og byggepladsomkostninger.

	Anlægsomkostning [kr/m ² facade]
1. Lægteskelet	485
2. Isolering (150 mm)	97
3. Beklædning m. gips	108
4. Skærmtegl	1350
5. Aluminiuminddækninger	527
I alt	2567

Såfremt der skulle opsættes mere end de 150 mm isolering, ville meromkostningen udover mere isoleringsmateriale også bestå af udgifter til et større/kraftigere lægteskelet, og et godt skøn er at interpolere prisen for lægteskelet og isolering med den relevante isoleringstykkelse. En isoleringstykkelse på 200 mm ville således samlet set koste 194 kr. mere pr. m².

I Tabel 16 er til orientering vist prisen på udskiftning af de rumhøje vinduer (se evt. billede af facade i bilag 1).

Tabel 16. Anlægsomkostninger for udskiftning af 1 stk. to-fags vindue (rumhøjt)⁴³.

	Anlægsomkostning [kr./vindue]
6. Levering og montering (ekskl. udtagning af det gamle vindue)	9850
7. Lysninger og vinduesplader	1050
8. Gulv ved vinduer	450
9. Udvendig fugning	270
I alt [kr. pr. vindue]	11620

Byggepladsomkostninger er vanskelige at vurdere generelt, da de afhænger af hvor mange aktiviteter der udføres på sagen. For den konkrete renoveringssag har prisen på stillads aktiviteten været 550 kr. pr. facade m² og øvrige byggepladsomkostninger har været 610 kr. pr. m². Disse priser er baserede på en rationel produktion og i mængder som den konkrete renovering. Ved en mindre sag ville billedet være anderledes.

2.7.2 Energirigtig facaderenovering af betonelementbyggeri: Vinkelager (Vanløse)

Som eksempel på udvendig efterisolering af en etageejendom er valgt et typisk betonelementbyggeri, opført i 1970 på adressen Vinkelager 19-29 i Vanløse. Bygningen er ca. 100 meter lang og 11 meter bred. Arealet af vinduer og døre udgør ca. 30 % af facadearealet eller 17 % af bruttoetagearealet. Den samlede renovering af bygningen omfatter påbygning af taglejligheder og altaner, udskiftning af vinduesruder og udvendig facadeisolering (100 mm). Renoveringen er endnu ikke udført, men påbegyndes i nærmeste fremtid.

⁴³ De udvendige inddækninger omkring vinduet er indeholdt i punkt 5 (aluminiumsindækninger) og kan ikke umiddelbart trækkes ud.

De eksisterende betonsandwichelementer er udført med 50 mm isolering⁴⁴ i brystning og i bjælke over vinduer/døre, og omkring vinduer/døre og i elementernes periferi er der udført 10 mm kuldebroisolering. Vinduer og døre sidder fremme i facaden, trukket et par cm tilbage i vindueshullet.

Der er foretaget beregninger af varmebesparelser og anlægsomkostninger forbundet med at udføre en hhv. 100 mm, 150 mm og 200 mm udvendig efterisolering. I forbindelse med beregning af varmebesparelsen er der foretaget detaljerede varmetabsberegninger af effekten af spring i isoleringstykkelse og sammenbygning af vindue og betonelement. Facaden forudsættes efterisoleret med facadebatts ($\lambda_D = 0,038 \text{ W/mK}$) fastgjort med dybel i plast med stålstift og efterfølgende påført facadepuds. Effekten af disse gennembrydninger af isoleringen er minimale.

De planlagte tiltag på vinduesdelen omfatter kun udskiftning af vinduernes ruder, dvs. vinduesplaceringen fastholdes. Da det har en betydelig positiv indvirkning på varmetabet at flytte vinduerne med ud i facaden, er der også regnet på denne situation.

Energibesparelser

I Tabel 17 er gjort rede for beregninger af varmetabet ved vinduestilslutninger. I bilag 1 er vist beregningsmodeller og isothermplots for en typisk samling mellem vindue og ydervæg før og efter efterisolering og med oprindelig og ny vinduesplacering. Stor afstand og ”knæk” på isothermerne er tegn på kuldebro. Beregningerne viser at det har betydelige konsekvenser for varmetabet, hvis man ikke flytter vinduerne med ud i facaden i forbindelse med efterisolering.

Tabel 17. 2-dimensionale varmetabseffekter⁴⁵ [W/mK] omkring vinduestilslutninger som funktion af efterisoleringstykkelse og vinduesplacering.

Vinduesplacering	Linietab	Eksisterende konstruktion	Efterisoleringstykkelse [mm]		
			100	150	200
Flyttes ikke	Ψ_s	0,071	0,193	-	0,248
	Ψ_k	0,038	0,005	-	0,002
	I alt	0,108	0,198	-	0,250
Flyttes	Ψ_s	0,071	0,033	-	0,034
	Ψ_k	0,038	0,005	-	0,002
	I alt	0,108	0,037	-	0,036

Den samlede effekt af en udvendig efterisolering er vist i Tabel 18, og udtrykt som gennemsnitlig effektiv U-værdi for hele bygningen, idet de 2-dimensionale effekter er indregnet. Det ses at hvis der f.eks. efterisoleres med 200 mm, vil forskellen på at flytte og ikke flytte vinduerne være $0,21 \text{ W/m}^2\text{K}$ ved et omfang af vinduestilslutninger på 1 m/m^2 facade, svarende til den konkrete bygning. Det fremgår også at den effektive U-værdi kun reduceres ganske lidt ved isolering med 200 mm frem for 100 mm, når vinduet ikke flyttes med ud i facaden. Dette skyldes de omtalte kuldebroeffekter i samlingen mellem vindue og ydervæg.

⁴⁴ Der er forudsat en varmeledningsevne for den eksisterende isoleringen på $0,040 \text{ W/mK}$, der også medtager effekt af binde- og bærebøjler.

⁴⁵ Ψ_s er linietabet i samlingen mellem vindue og væg, og Ψ_k er linietabet pga. fortykkelse af forstøbning ved vinduer (spring i isoleringstykkelse). Det ses tydeligt at det ekstra varmetab ved vinduestilslutninger forøges væsentligt ved efterisolering, hvis den oprindelige vinduesplacering fastholdes. Modsat kan der opnås en besparelse ved at flytte vinduet med ud i facaden.

Tabel 18. Effektive U-værdier [$\text{W/m}^2\text{K}$] som funktion af efterisoleringstykkelse og vinduesplacering i forhold til placering i eksisterende betonelement.

Vinduesplacering	Eksisterende konstruktion	Efterisoleringstykkelse [mm]		
		100	150	200
Flyttes ikke	1,39	0,48	0,43	0,41
Flyttes	1,39	0,32	0,24	0,20

I Tabel 19 er reduktioner i den effektive U-værdi omregnet til energibesparelse pr. m^2 facade/gavl.

Tabel 19. Energibesparelse [$\text{kWh/m}^2/\text{år}$] som funktion af efterisoleringstykkelse og vinduesplacering.

Vinduesplacering	Eksisterende konstruktion	Efterisoleringstykkelse [mm]		
		100	150	200
Flyttes ikke	-	74	78	79
Flyttes	-	87	93	97

Anlægsomkostninger

I Tabel 20 er opgjort hvad det koster at udføre en efterisolering af facaden. Det fremgår at den samlede pris for efterisolering er lidt over 2000 kr/m^2 , hvoraf håndværksudgifterne udgør ca. 70 %. Pisen for leje af stillads bør derfor strengt taget ikke alene henføres til etablering af den udvendig efterisolering, men også de øvrige renoveringsarbejder (udskiftning af vinduer, tagrenovering mm.), som typisk også vil blive udført i samme forbindelse. Ses der eksempelvis helt bort fra stilladsomkostninger reduceres m^2 -prisen for 100 mm efterisolering fra 2153 kr. til 1760 kr. Det ses også af tabellen at merprisen for 150 og 200 mm efterisolering er relativt begrænset.

Tabel 20. Anlægsomkostninger⁴⁶ i tusinde kr.

	Efterisoleringstykkelse [mm]		
	100	150	200
Håndværksudgifter	2660	2924	3188
Stillads (leje 80 dage)	594	594	594
Subtotal	3254	3518	3782
Byggeplads 7%	228	246	265
Omkostninger (rådgiverhonorar) 15 %	488	528	567
I alt	3970	4293	4616
I alt [kr. m^2 facade]	2153	2328	2502
Meromkostning [kr. m^2 facade]	0	175	349

I den konkrete renoveringssag bibeholdes vinduernes placering. En flytning af vinduerne vil koste omkring 600 tkr.⁴⁷ svarende til 325 kr./m^2 facade, som skal forrentes af den besparelse der opnås, hvilket umiddelbart skønnes at være muligt. Desuden skal indregnes de positive følgevirkninger af at flytte vinduerne, idet byggeskikken bibeholdes (vinduesplacering frem-

⁴⁶ Priser er beregnet af E.K. Jørgensen rådgivende ingeniører A/S. Prisniveau december 2003. Merpris på 150 mm efterisolering er fundet ved at interpolere pris for 100 hhv. 200 mm efterisolering.

⁴⁷ Forudsat 600 kr. pr. vindue for vinduesisætning og -fastgørelse og 200 kr. pr. meter for indvendige tilsætninger. Disse priser er stort set uafhængige af isoleringstykkelsen.

me i facaden), solvarmetilskuddet opretholdes (ville ellers mindskes) og der bliver mere plads i vindueskarmen. I det konkrete tilfælde er der altså meget der taler for at flytte vinduet med ud i facaden. Det bør altid overvejes indgående at isætte nye vinduer i forbindelse med udvendig efterisolering, og dermed automatisk løse problemet med vinduesplaceringen, da merprisen på nye vinduer med energiruder i stedet for isætning af nye energiruder i de eksisterende vinduer i de fleste tilfælde vil være forholdsvis lille.

I den konkrete renoveringssag etableres den nye klimaskærm primært af hensyn til facadens udseende og dernæst varmebesparelsen, hvilket er forholdsvis typisk for mange renoveringssager. På denne baggrund kan de første 100 mm efterisolering derfor betragtes som gratis, og dermed bliver den reelle anlægsomkostning for f.eks. 150 mm facadeisolering kun meromkostningen for 50 mm ekstra isolering svarende til 175 kr./m².

2.7.3 Energirigtig renovering af typehus fra 1960'erne

I starten af 60'erne udvikledes egentlige typehuse, der var gennemtegnet på forhånd, så de kunne fremstilles rationelt. 60'ernes typehus var som regel et længehus i én etage uden kælder og med lavt sadeltag. Byggeteknikken var ny, idet huset ikke længere var fuldmuret, men en let konstruktion med bærende indervægge af letbeton eller lægter og med en halvtens skalmur udenpå. Ofte var der kun muret op til vinduernes overkant, så det øverste stykke af ydervæggen og galvtrekanterne var beklædt med brædder.

I perioden 1960 til 1980 blev der bygget 450.000 nye fritliggende enfamiliehuse, hvilket svarer til 45 % af den samlede bestand, og næsten lige så mange som blev bygget i de foregående 100 år⁴⁸. Isoleringskravene blev først for alvor skærpet fra og med BR 77, og derfor er hovedparten af husene opført med et isoleringsniveau svarende til kravene i det første landsdækkende bygningsreglement fra 1961. Ydervæggen er dog en undtagelse, idet denne typisk havde en noget bedre U-værdi end foreskrevet.

Tressernes typehuse er ikke arkitektonisk det mest spændende, men det er store redelige huse med masser af kvaliteter. Nyere undersøgelser har vist, at de byggeteknisk set er lige så gode som huse fra andre perioder og desuden er nemme at bygge om og reparere. I en undersøgelse af markedet for renovering af parcelhuse fra perioden 1960 til 1980, foretaget under projekt renovering⁴⁹, konkluderes at der ligger et stort marked for renoveringsydelser i parcelhussektoren og især af huse fra 1960'erne og 70'erne. En stor del af disse huse står over for et ejerskifte, hvor de nye ejere typisk har krav om ændringer af husene (f.eks. nyt køkken og badeværelse). Samtidig er det erfaringsmæssigt i ejerskiftesituationen, de større renoveringsopgaver iværksættes. Energibesparende tiltag i denne forbindelse er billige at udføre.

Som typisk eksempel på et typehus fra 1960'erne er valgt at regne på et hus tegnet af arkitekternes typehuskontor i 1966 (se bilag 3). Huset er et meget tidstypisk længehus med sadeltag og et bruttoareal på 135 m². Vinduesarealet er på ca. 30 % af bruttoetagearealet, hvilket er forholdsvis stort, men typisk for perioden, bl.a. fordi der dengang ikke, som det er tilfældet i dag, var krav til vinduesarealets størrelse. Huset er naturligt ventileret med aftrækskanaler og friskluftventiler.

⁴⁸ For eksempel blev der i perioden 1967-1971 opført 45000 boliger om året. Af disse var godt 40% flerfamiliehuse (ca. 19.000), mens knap 60% var fritliggende enfamiliehuse (ca. 26.000).

⁴⁹ Markedet for renovering af den nyere del af parcelhussektoren. Projekt Renovering, Boligministeriet 1998.

Bygningsreglement 1961 (BR61) var gældende i 60'erne, og foreskrev U-værdi krav til ydervæg (tung), terrændæk, loft/tag og vinduer på hhv. 1,0 , 0,45 , 0,45 og 2,9 W/m²K. I Tabel 21 er redegjort for konstruktioner, isoleringstykkelse og U-værdier.

Tabel 21. Oversigt over konstruktioner i typisk enfamiliehus fra 1960'erne (referencehus).

Bygningsdel	Konstruktion	Isoleringstykkelse [mm]	U-værdi [W/m ² K]
Ydervæg	Skalmurede letbetonelementer ¹⁾	75	0,38 ⁵⁰
Terrændæk	Trægulv på strøer i opholdsrum	50	0,29
Loft/tag	Gitterspær / uudnyttet loftrum	100	0,36
Vinduer	Trævinduer m. 2-lags termorude	-	2,50 ⁵¹

¹⁾ Der blev i perioden opført mange huse med massiv porebeton i ydervæggen (U=0,83). Dette tilfælde beregnes ligeledes.

Energibesparelsesmuligheder

De mest oplagte energibesparende tiltag er: ekstra loftisolering, udskiftning af vinduer til nye energirigtige vinduer med energiruder, udvendig efterisolering af facaden samt installation af et mekanisk ventilationsanlæg med varmegenvinding. Der er set bort fra efterisolering af terrændækket (strøgulv med 50 mm isolering i hulrummet), da dette ikke er muligt af fugttekniske grunde⁵².

Der er i en del huse fra den betragtede periode allerede foretaget udskiftning af vinduer/ruder, hvilket dog typisk ikke har medført en energimæssig forbedring, da der er udskiftet til samme energimæssige standard (to-lags termoruder).

I forbindelse med etablering af mekanisk ventilation med varmegenvinding er tætheden af loftkonstruktionen vigtig. Luftventiler kan monteres i eksisterende loftsbeklædninger med tætte samlinger til beklædningen. Ofte vil der være et ønske om ny loftsbeklædning af æstetiske grunde og i den forbindelse er en ekstra tætning af dampspærren en god ide.

Beregningsforudsætninger

De væsentligste kuldebroer er beregnet i programmerne HEAT2 og THERM. Disse kuldebroer er ydervægsfundament, skillevægsfundament, samlinger omkring vinduer og ved tagfod. Energiforbruget til rumopvarmning er beregnet med det detaljerede simuleringsprogram BSIM2002.

Facader antages orienteret nord-syd, og det interne varmetilskud er sat til 5 W pr. m² opvarmet etageareal. Alle rum forudsættes opvarmet til 20 °C, svarende til den normale dimensionerende indetemperatur.

Af hensyn til at foretage en fair sammenligning af betydningen af at etablere balanceret mekanisk ventilation med varmegenvinding fastsættes luftmængden på baggrund af nuværende krav til mekaniske ventilationsanlæg for typisk enfamiliehus, som er 60 l/s. Derudover skal der regnes med en infiltration/eksfiltration via klimaskærmen, som skyldes vind- og tempera-

⁵⁰ Der er tale om U-værdien for et normalsnit i ydervæggen.

⁵¹ Der er forudsat følgende varmetekniske data for de eksisterende traditionelle trævinduer med to-lags termovinduer: $U_g = 2,9$; $U_f = 1,4$; $\Psi_g = 0,07$; $g = 0,76$.

⁵² Som omtalt tidligere. Dårligt isolerede terrændæk med svømmende gulve kan med fordel efterisoleres med særlige gulvisoleringsplader, hvorved ikke mindst træggener kan reduceres.

turpåvirkning. Denne fastsættes til $0,2 \text{ h}^{-1}$ for referencehuset (svarende til et tæt hus iht. DS418), således at luftskiftet samlet set bliver $1,0 \text{ h}^{-1}$. For det varmeteknisk forbedrede hus regnes med en infiltration på $0,1 \text{ h}^{-1}$ (særligt tæt hus iht. DS418), idet det antages at der i forbindelse med etablering af anlægget gøres en særlig indsats for at forbedre tætheden gennem veludførte vinduesfuger og etablering af tæt dampspærre i loftkonstruktionen i forbindelse opsætning af nyt loft. Der foretages udluftning (f.eks. ved at åbne vinduer) ved temperaturer over $24 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (luftskifte på 5 h^{-1}).

Energibesparelser

I Tabel 22 er vist en oversigt over beregnede energibesparelser ved de forskellige undersøgt tiltag. Det ses at der kan opnås betydelige besparelser ved de oplagte tiltag i form af efterisolering af loftet (tiltag 1) og isætning af energiruder (tiltag 2). Hvis der også efterisoleres udvendig med 150 mm isolering (tiltag 3), vil denne alene give en årlige energibesparelse på 2669 kWh, mens besparelsen er 5428 kWh⁵³, hvis udgangspunktet er et hus med ydervægge i massiv porebeton. Det skønnes at yderligere 50 mm isolering (200 mm efterisolering) vil forøge energibesparelsen med 4-5 %. Det ses ligeledes at ventilation med varmegenvinding giver en betydelig varmebesparelse, når der antages en luftmængde svarende til bygningsreglementets krav ($60 \text{ l/s} = \text{luftskifte på } 0,8 \text{ h}^{-1}$).

Hvis alle tiltag etableres (tiltag 4), vil man jf. beregningerne kunne reducere det årlige energiforbrug til rumopvarmning fra 167 kWh/m^2 til 38 kWh/m^2 . Ved ydervægge i massiv porebeton vil referencehusets energiforbrug være 189 kWh/m^2 og rumvarmeforbruget vil kunne reduceres til omtrent det samme som ved skalmuret ydervæg.

Tabel 22. Undersøgte besparelsetiltag og beregnede energibesparelser.

	Ekstra loft-isolering ¹⁾	Bedre ruder ²⁾	Udvendig efterisolering ³⁾	Ventilation med VGV ⁴⁾	Varmebehov [kWh/år]	Varmebehov [kWh/m ² /år]
Referencehus					22487	167
Tiltag 1	+				19405	144
Tiltag 2	+	+			14795	110
Tiltag 3	+	+	+		12126	90
Tiltag 4	+	+	+	+	5721	38

¹⁾ 300 mm, $\lambda_D = 37 \text{ mW/mK}$.

²⁾ Energirude med afstandsprofil i rudekanten af plast eller lign. ($U_g = 1,1$; $\Psi_g = 0,05$; $g = 0,63$).

³⁾ 150 mm udvendig efterisolering med puds fastholdt med plastdybler til eksisterende ydervæg. $\lambda_D = 38 \text{ mW/mK}$.

⁴⁾ Balanceret mekanisk ventilation med varmegenvinding (90 %).

I Tabel 23 er der til orientering vist de enkelte varmetabskoefficienter for referencehuset og for det energirenoverede hus, når alle isoleringstiltag anvendes, og i Tabel 24 er vist varmebalancer for beregningsmodeller svarende til referencehus og tiltag 1-4.

⁵³ Der er forudsat uændrede varmetab fra samlinger mellem bygningsdele.

Tabel 23. Varmetekniske data for de enkelte bygningsdele.

Konstruktioner	Referencehus	Energirenoveret
	U [W/m ² K]	U [W/m ² K]
Ydervæg	0,38	0,15
Terrændæk	0,29	0,29
Loft/tag	0,36	0,09
Vinduer	2,50	1,29
Samlinger	Ψ / L ⁵⁴ [W/mK]	Ψ / L [W/mK]
Fundament	0,27	0,19 ³
Skillevægsgfundament	0,07	0,07
Vinduestilslutninger ¹⁾	0,17	0,03
Tagfod ved mur ²⁾	0,16	0,08
Tagfod ved muråbning	0,10	0,09

¹⁾ side- og underfals.

²⁾ inkl. efterisolering af rem.

³⁾ Isolering af sokkel og 30 cm under terræn.

Tabel 24. Varmebalancer.

Varmebalance	Referencehus	Tiltag 1	Tiltag 2	Tiltag 3	Tiltag 4
qHeating	22487	19405	14795	12126	5721
qCooling	0	0	0	0	0
qInfiltration	-8541	-8507	-8446	-8427	-870
qVenting	-392	-396	-308	-302	-557
qSunRad	4488	4488	3720	3514	3514
qPeople	0	0	0	0	0
qEquipment	3747	3747	3747	3953	3953
qLighting	0	0	0	0	0
qTransmission	-21789	-18738	-13509	-10864	-11028
qMixing	0	0	0	0	118
qVentilation	0	0	0	0	-853
Sum	0	0	0	0	0

Anlægsomkostninger

I Tabel 25 er vist kalkulerede anlægspriser for de enkelte deltiltag. Priser på ekstra loftisolerering og nye vinduer er indhentet hos en tømrermester, mens udvendig isolering er kalkuleret af en facadeentreprenør. Merprisen for 200 mm udvendig facadeisolering er skønnet til ca. 60-70 kr/m² eller ca. 4 %.

⁵⁴ Varmetab ved vinduessamlinger og tagfod er udtrykt ved en L-værdi (det udvide linietab), der udover to-dimensionale effekter indbefatter ekstra én-dimensionale varmetab som følge af f.eks. udmuringer omkring vinduer.

Tabel 25. Anlægsomkostninger og forventede levetider.

Tiltag	Anlægs- omkostninger	Levetid
	[tusinde kr.]	[år]
Loftisolering, 300 mm (inkl. ny gangbro)	40,3	100
Nye trævinduer med energiruder	105,3	40 ²⁾
Nye energiruder	43,8 ¹⁾	20
Udvendig efterisolering, 150 mm	112,3	100
Ventilation med varmegenvinding ³⁾	40,5	20/100

¹⁾ Pris indbefatter udtagning af eksisterende ruder (150 kr/m²) samt levering og isætning af nye energiruder med kuldebroafbrudt rudekant (1300 kr/m²). Merpris for energirigtig rudekant er ca. 60 kr./m² ift. afstandsprofil i stål.

²⁾ Levetiden af rude-delen sættes normalt til 20 år, mens levetiden af nye vinduer typisk sættes til mellem 30 og 50 år.

³⁾ Prisen er baseret på en typisk kvadratmeterpris på 300 kr. (jf. afsnit om ventilation). Kanalsystemets levetid antages lige så lang som husets (100 år), mens aggregatets levetid sættes til 20 år.

3 Energibesparende tiltag i nybyggeriet

Udredningen med titlen ”Energibesparelser i nybyggeriet”⁵⁵ omhandler potentielle muligheder for energibesparelser i nybyggeriet. Denne er en redegørelse for mulige energibesparelser i nybyggeriet ved forbedring af kendte og almindeligt anvendte byggetekniske løsninger. Det konkluderes heri at der er behov for udvikling af nye løsninger for at opfylde kommende skærpede energikrav.

Der er skitseret nye løsninger i forbindelse med Klimaskærmsprojektet på DTU. Efterfølgende er der opført en række forsøgshuse (enfamiliehuse) med et energibehov, der vil kunne leve op til kommende skærpede energikrav, og hvor der i større eller mindre omfang er anvendt helt nye energirigtige løsninger.

Selve beregningseksemplerne i ”Energibesparelser i nybyggeriet” bygger på en marginalbetragtning ud fra BR95 som reference. Derved ser man at økonomien bliver afhængig af om udgangspunktet er godt eller dårligt isoleringsmæssigt. Der bør regnes på en måde så økonomien i den optimale løsning bestemmes uafhængigt af BR95-isoleringsstandard (f.eks. som i rapporten ”Udvikling af klimaskærmskonstruktioner”⁵⁶).

Der foretages i dette afsnit en beskrivelse af de isoleringsmæssige energibesparelsemuligheder og alternative muligheder i form af energimæssigt bedre vinduer, ventilation med varmegenvinding og isolering af varme- og varmtvandsrør. Der redegøres for både besparelsemuligheder, der er tilgængelige på markedet i dag, og muligheder, der som følge af en naturlig udvikling eller særlig indsats, kan forventes realiseret indenfor nærmeste fremtid. Desuden foretages der detaljerede beregninger af de energimæssige konsekvenser for de enkelte typiske tiltag og der indsamles økonomital for investeringer i de typiske tiltag.

Klimaskærmen varmetekniske ydeevne afhænger af især isoleringsniveauet i fladerne loft/tag, ydervægge og gulve samt af udformning og isolering af fundamenter, vinduestilslutninger og øvrige samlinger mellem bygningsdelene. I beskrivelsen af de isoleringsmæssige energibesparelsemuligheder er der naturligvis primært fokus på hvordan de varmetekniske egenskaber kan forbedres. De statiske, fugttekniske og byggetekniske konsekvenser af en forøgelse af isoleringstykkelsen, er behandlet indgående samme med det varmetekniske i en række baggrundsrapporter, som der henvises til.

3.1 Ydervæg

Der er gode muligheder for udformning af ydervægskonstruktioner med bedre varmetekniske egenskaber, idet eksempelvis ydervægskonstruktioner til enfamiliehuse i dag typisk udføres med en isoleringstykkelse på kun 125 mm og ofte indeholder væsentlige kuldebroer ved vinduesfuge mm. Betonelementer til store bygninger, der typisk udformes med mange ikke-konstruktive ribber, kan forbedres markant ved fjernelse af disse ribber. Generelt kan de varmetekniske egenskaber forbedres ved merisolering, bedre kuldebroisolering og anvendelse af isoleringsmaterialer med mindre varmeledningsevne. Når ydervægges isoleringstykkelse øges, påvirker det fundamentet. Ydervægge og fundamenter skal derfor behandles under ét og det er i øvrigt vigtigt at fundamentet er velisoleret i forbindelse med gulvvarme. Dette afsnit afsluttes med en oversigt over typiske energibesparelser og tilhørende meranlægsomkostninger ved bedre isolering af forskellige byggesystemer.

⁵⁵ Energibesparelser i nybyggeriet – status år 2000. By og Byg dokumentation 006. Status år 2000. Søren Aggerholm.

⁵⁶ Udvikling af klimaskærmskonstruktioner. Rapport R-042. Institut for Bygninger og Energi, DTU. År 2000. Beskrivelsen af besparelsemuligheder vedrørende ydervægge er til dels uddrag fra denne rapport.

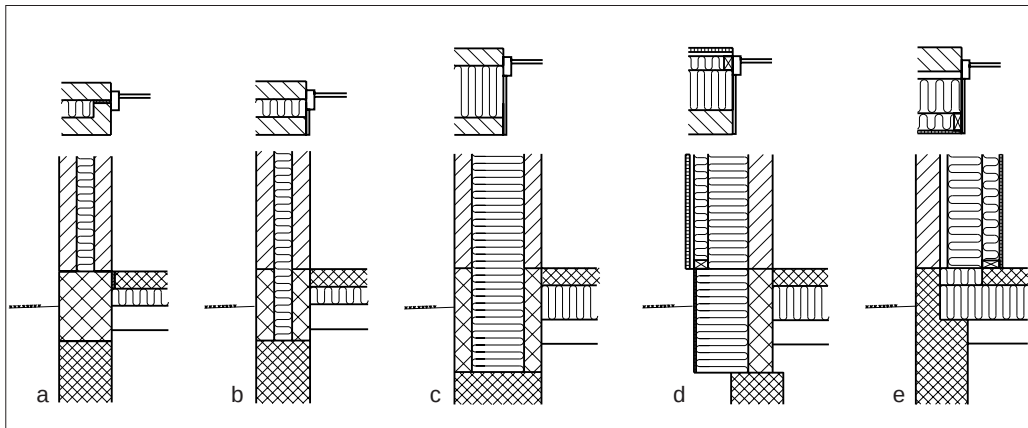
3.1.1 Tekniske energibesparelsesmuligheder

Massive ydervægge

Massive ydervægge skal i nærværende sammenhæng forstås dels som såkaldte kombinationsvægge, hvor isolering placeres mellem to tunge massive vanger, men også som ydervægge med én tung bærende vange. Bagmurens materiale vil typisk være porebeton, letklinkerbeton eller teglsten i form af elementer eller murværk. Disse materialer kan typisk anvendes i huse op til to etager. Skalmurende facadeelementer af beton og betonsandwichelementer til etageboliger beskrives senere.

Det er ikke umiddelbart så nemt at forøge isoleringstykkelsen i ydervægge med en bærende massiv væg, som i f.eks. terrændæk og loft mod uudnyttet tagrum. En forøgelse af isoleringstykkelse betyder typisk at fundamentsbredden må øges tilsvarende, da såvel den bærende bagvæg som formuren skal understøttes, og ved vinduestilslutninger vil der være behov for en bredere karm eller tilsætninger, medmindre kuldebroisoleringen i falsen fastholdes. Taget påvirkes også af en forøget isolering.

Det vil være naturligt og at reducere kuldebroer ved fundament og ved vinduestilslutninger, når isoleringstykkelsen i ydervæggen forøges. I Figur 2 a-c ses, hvordan varmeisoleringen samlet set kan forbedres i en traditionel tung massiv væg, ved isolering af selve væggen, midterisolering af fundament og fjernelse af falselement/ommuring i vinduessamlingen.

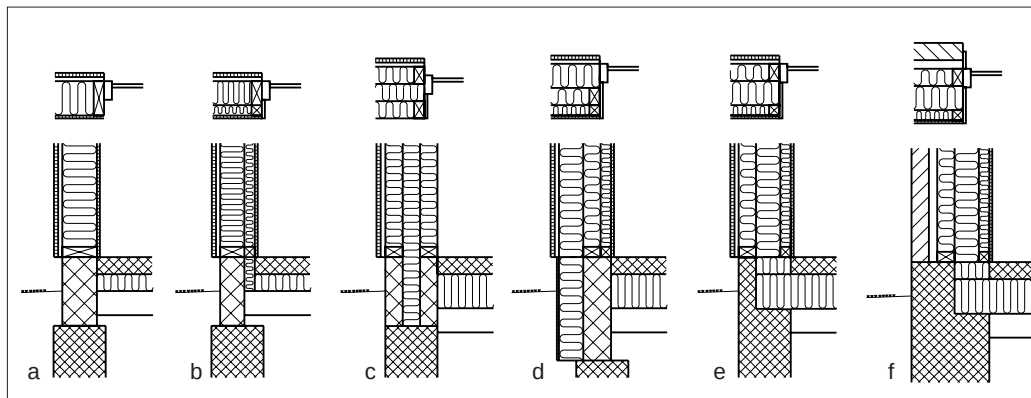


Figur 2. Forskellige tunge vægtyper med en bærende massiv væg

I Figur 2 d er vist en utraditionel men interessant vægtype med én tung vange, hvor isoleringstykkelsen i væggen ikke indvirker på fundamentsbredden (d), idet bredden blot er bestemt af jordens bæreevne. Regnskærmen kan ophænges i spærene og/eller forbindes punktvis til den bærende bagmur. Som alternativ kan tænkes anvendt en tung bærende formur, som vist på Figur 2 e. Herved bevares muligheden for at have et smalt fundament, samtidig med en meget effektiv kuldebroafbrydelse ved fundamentet. Isoleringen og den indvendige beklædning må bæres af en skeletvæg.

Skeletydervægge

Skeletvægge defineres som ydervægskonstruktioner opbygget af træstolper eller stålprofiler. Den traditionelle løsning består af gennemgående træstolper (eller stålprofiler), som vist på Figur 2 a.



Figur 3. Forskellige vægtyper med bærende skelet.

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. En væsentlig bedre løsning med samme vægtykkelse som i Figur 3 a, er vist i Figur 3 b. Skelettet er delt i en lidt smallere bærende stolpe og en indvendig lægning. Herved kan dampspærren placeres beskyttet, ca. 50 mm inde i konstruktionen.

Fundamentbredden kan reduceres uden bæreevнемæssige problemer. Udover en mulig økonomisk besparelse giver det mulighed for at have nogen isolering på indersiden af fundamentet og dermed opnå en effektiv kuldebroafbrydelse.

Som for de massive ydervægge er det naturligt, som det næste skridt, at øge isoleringstykkelsen ved ønsket om at nedbringe varmetransmissionstab. 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 beskeden tykkelse i forhold til i væggen, se figur 2c. Det er derfor af flere årsager ønskeligt at bevare det smalle fundament når isoleringstykkelsen 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.

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

Betonelementer

Betonelementer anvendes i stor stil i forbindelse med større etagebygninger. Betonelementer leveres enten som bagvægselementer, der efterfølgende isoleres og typisk skalmures eller som traditionelle betonsandwichelementer.

Traditionelle betonsandwichelementer til f.eks. etagebyggeri er kendetegnet ved at have ikke-konstruktive ribber omkring vindues- og døråbninger og vandrette samlinger, der udgør væsentlige kuldebroer. Da disse ribber ikke har en statisk funktion kan de umiddelbart fjernes. I de senere år er der derfor arbejdet på at udvikle betonelementer med bedre isolering og mindre kuldebroer med udgangspunkt i en fjernelse af de nævnte ribber⁵⁷. Der er arbejdet med udvikling af nye generelle løsninger til fastgørelse af vinduer, idet disse typisk har været fastgjort i ribberne, samt arbejdet med udvikling af tætte afdækningsløsninger i vinduesfalsen. Samtidig har man kigget nærmere på hvor man kan reducere varmetabet i vinduessamlingen og ved fundament.

Med de nye udviklede løsninger, der er oplagte midler til opfyldelse af de kommende krav til energirammen i BR2005, vil man kunne opnå væsentlige varmetekniske forbedringer med blot en mindre forøgelse af isoleringstykkelsen. De nye (og bedre) løsninger vil betyde forøgede udgifter til indbygning af vinduer i form af tilsætninger, kraftigere beslag mm, men effekten af en standardisering af vindues isætningen, vil kunne begrænse disse meromkostninger betydeligt.

3.1.2 Energibesparelser og anlægsomkostninger

I rapporten omtalt i fodnote 56 er der udviklet energirigtige ydervægskonstruktioner og foretaget beregninger af energibesparelser og anlægsomkostninger ved at merisolere typiske ydervægskonstruktioner i enfamiliehuse og etagehuse (betonelementer). I det følgende er opgjort energibesparelser og anlægsomkostninger for disse typiske ydervægstyper. Alle væsentlige kuldebroeffekter medregnes og fordeles på bygningsdele hvor det er relevant. I forhold til omtalte rapport er U-værdier (men ikke linietaf) korrigeret for nye beregningsregler i ny udgave af DS418 og der er antaget gulvvarme⁵⁸, og anlægspriser er korrigeret for prisniveau⁵⁹. Levetiden for klimaskærmen sættes til 100 år, hvilket tilnærmelsesvis vil gælde for isoleringen og det bærende element i klimaskærmen.

Der er forudsat isolering med en varmeledningsevne på $\lambda_D = 0,037 \text{ W/mK}$. På markedet findes mineraluld med en lidt mindre varmeledningsevne (34 mW/mK), som stort set ikke bruges, selvom prisen er stort set den samme. Isolansen for samme isoleringstykkelse for et normalsnit uden kuldebroer kan med denne bedre isolering forbedres med ca. 8 %. Medregnes kuldebroeffekterne og antages de uændret, kan der f.eks. beregnes ca. 3 % større energibesparelser ved merisolering af en traditionel tung dobbeltvæg med bagvæg af porebeton. Hvis udgangspunktet er 200 mm traditionel isolering, kan samme isolans opnås med 185 mm af den lidt bedre isolering. Den bedre isolering kan også benyttes i tag- og loftkonstruktioner, etageadskillelser, skunk- og skråvægge mm.

⁵⁷ jf. rapporten "Betonelementer svarende til BR2005 energikrav". Rapport R-077. BYG-DTU 2004.

⁵⁸ Har betydning for linietaf gennem fundamentet (samlingen mellem væg og gulv), der 100 % tillægges væggen. Fordelingen er rimelig da væggenes udformning i væsentlig grad afgør fundaments udformning, og dels af hensyn til at linietaf i samlingen afhænger meget af fundamentets udformning. Der anvendes en korrektionsfaktor baseret på en gulvvarmetemperatur på 30 °C, der tager højde for det forøgede varmetab i samlingen.

Tabel 26. Traditionel tung dobbeltvæg med bagvæg af porebeton (125 mm svarer til Figur 2a mens 200-400 mm svarer til Figur 2b/c)

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	Energibesparelse kWh/m ² /år	Meranlægspris kr/m ²
125	0,240	0,21 ¹⁾	0,059 ²⁾	0,039	0,501	0,0	0
200	0,163	0,138	0,036	0,036	0,335	13,4	113
250	0,130	0,121	0,036	0,034	0,285	17,5	189
300	0,111	0,112	0,038	0,032	0,258	19,6	270
350	0,096	0,106	0,040	0,031	0,239	21,2	365
400	0,085	0,102	0,043	0,03	0,226	22,3	445

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

²⁾ Fundamentssokkel bestående af massiv letklinkerblokke.

Tabel 27. Traditionel tung dobbeltvæg med bagvæg af letklinkerbeton.

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	Energibesparelse kWh/m ² /år	Meranlægspris kr/m ²
125	0,263	0,219	0,020	0,042	0,504	0,0	0
200	0,174	0,142	0,027	0,037	0,344	13,0	113
250	0,137	0,124	0,032	0,035	0,292	17,1	189
300	0,116	0,114	0,035	0,033	0,263	19,5	270
350	0,100	0,107	0,039	0,032	0,243	21,1	365
400	0,088	0,103	0,042	0,031	0,229	22,3	445

Tabel 28. Traditionel tung dobbeltvæg med bagvæg af teglsten.

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	Energibesparelse kWh/m ² /år	Meranlægspris kr/m ²
125	0,273	0,224	0,168	0,043	0,630	0,0	0
200	0,183	0,143	0,046	0,039	0,369	21,2	105
250	0,147	0,125	0,039	0,036	0,309	26,0	182
300	0,125	0,115	0,039	0,034	0,277	28,7	263
350	0,110	0,108	0,041	0,033	0,256	30,3	357
400	0,098	0,103	0,043	0,031	0,240	31,6	438

Tabel 29. Tung bærende bagvæg af letklinkerbeton (udvendigt puds eller let regnskærm, jf. Figur 2d).

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	Energibesparelse kWh/m ² /år	Meranlægspris kr/m ²
125	0,261	0,178	0,007	0,049	0,455	0,0	0
200	0,173	0,15	0,015	0,04	0,343	9,1	93
250	0,137	0,13	0,019	0,037	0,289	13,4	148
300	0,115	0,119	0,023	0,035	0,259	15,9	206
350	0,100	0,112	0,026	0,033	0,239	17,5	277
400	0,088	0,108	0,029	0,032	0,225	18,6	337

Tabel 30. Let væg med indvendigt bærende skelet (jf. Figur 3d).

Isol. tyk. mm	U W/m ² K	$\Psi_{\text{fundament}}$ W/mK	$\Psi_{\text{vind.tilsl.}}$ W/mK	L _{stolpe} W/mK	Ψ_{tagfod} W/mK	U _{effektiv} W/m ² K	Energibesparelse kWh/m ² /år	Meranlægspris kr/m ²
200	0,170	0,147	0,015	0,018	0,038	0,366	0,0	0
250	0,138	0,11	0,019	0,012	0,034	0,290	6,2	79
300	0,117	0,094	0,024	0,009	0,031	0,251	9,3	140
350	0,101	0,086	0,028	0,006	0,030	0,225	11,4	198
400	0,089	0,08	0,032	0,005	0,028	0,208	12,8	277

Tabel 31. Let væg med udvendigt bærende skelet (jf. Figur 3e).

Isol. tyk. mm	U W/m ² K	$\Psi_{\text{fundament}}$ W/mK	$\Psi_{\text{vind.tilsl.}}$ W/mK	L _{stolpe} W/mK	Ψ_{tagfod} W/mK	U _{effektiv} W/m ² K	Energibesparelse kWh/m ² /år	Meranlægspris kr/m ²
200	0,170	0,143	0,015	0,016	0,038	0,359	0,0	0
250	0,138	0,101	0,019	0,01	0,034	0,278	6,6	78
300	0,117	0,079	0,024	0,007	0,031	0,233	10,2	138
350	0,101	0,065	0,028	0,005	0,030	0,203	12,6	199
400	0,089	0,056	0,032	0,004	0,028	0,183	14,3	274

Tabel 32. Betonsandwichelementer⁶⁰.

Isolerings -niveau	Løsninger	Isol. tyk. facade mm	U W/m ² K	Ψ_{vindue} W/m ² K	$\Psi_{\text{fundament}}$ W/m ² K	Ψ_{tagfod} W/m ² K	U _{effektiv} W/m ² K	Energi- besparelse ²⁾ kWh/m ² /år	Mer- anlægspris Kr./m ²
BR 1995	Traditionelle	155	0,30	0,030	0,420	0,092	0,390	0	0
BR 2005	Traditionelle	335 ¹⁾	0,18	0,030	0,360	0,063	0,257	-	-
BR 2005	Nye	205	0,18	0,030	0,227	0,076	0,244	11,2	249 ³⁾

¹⁾ Det er urealistiske at benytte denne løsning, og den er blot medtaget for at vise betydningen af at benytte de traditionelle løsninger til opfyldelse af kommende skærpede energikrav.

²⁾ Udnyttelsesgraden ved reduktion af transmissionstab er lidt mindre for betonelementbyggeri (ca. 0,85) end for andre byggesystemer pga. den store varmeakkumuleringsevne.

³⁾ Prisen for facadeelementer ligger på mellem 650 og 1300 kr./m², hvoraf boligfacader hører til i den dyre ende. Merudgiften beløber sig altså til ca. 20 % af den samlede råhus-udgift, som udgør ca. 25 % af den samlede byggeudgift. Den samlede byggeudgift forøges derved med kun 5 %.

3.2 Loftkonstruktion

Der er gode muligheder for at isolere lofikonstruktioner i enfamiliehuse bedre end i dag, hvor 250-300 mm er den normale tykkelse.

3.2.1 Tekniske energibesparelsmuligheder

En loftkonstruktion består af en indvendig beklædning, isolering og et bærende system i form af typisk træspær i enfamiliehuse. Der kan også anvendes dækelementer af beton og letbeton eller træbaserede elementer. Den konkrete udformning har kun mindre betydning for varmetabet, såvel gennem fladen som ved tilslutningen til facaden, men konstruktionshøjden bliver større med dækelementer. I enfamiliehuse er loftrummet typisk uudnyttet, hvilket giver god mulighed for at indbygge isolering.

⁶⁰ Der er regnet på facadeudsnit af 5 etagers bygning med 1 m vinduessamling pr. m² facade. Der er regnet med en isoleringstykkel ud for ribber på 50 mm.

3.2.2 Energibesparelser og anlægsomkostninger

Der er gennemført beregninger for en loftkonstruktion opbygget af 13 mm gipsplade, 45 x 45 mm lægter som forskalling og 50 x 100 mm spærfodder. Isolering placeres mellem lægter, mellem spærfodder og over spærfodder med forskudte samlinger hen over spærfodder og isoleringen mellem spærfodder. Beregningerne er foretaget i henhold til gældende regler i DS418. Betydningen af at øge isoleringstykkelsen er vist i Tabel 33 sammen med anlægsomkostninger, der er baseret på rapport omtalt i fodnote 56, men dog korrigeret for prisniveau.

Tabel 33. Loftkonstruktion med uudnyttet tagrum. Isolering med $\lambda_D = 0,037$ W/mK.

Isol. tyk.	U	$\Psi_{\text{spærfod}}^{1)}$	$\Psi_{\text{tagfod}}^{3)}$	U_{effektiv}	Energi- besparelse	Meranlægs- omkostning
mm	W/m ² K	W/mK	W/mK	W/m ² K	kWh/m ² /år	kr/m ²
250	0,138 ²⁾	0,009	0,039	0,159	0,0	0
300	0,116	0,006	0,036	0,118	3,3	28
350	0,100	0,005	0,034	0,100	4,8	61
400	0,088	0,004	0,032	0,088	5,7	94
500	0,071	0,002	0,030	0,071	7,1	161
600	0,060	0,002	0,030	0,060	8,0	228

¹⁾ Der regnes med 1 m spærfod 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 traditionel dobbeltvæg med bagvæg af porebeton. Halvdelen af linietabet medregnes.

3.3 Terrændæk

Det er forholdsvis nemt og billigt at indbygge isolering i terrændæk. De marginale omkostningerne udgøres primært af selve merisoleringen og naturligvis fjernelse af jord. Man skal dog være opmærksom på isoleringens stivhed ved store isoleringstykkelser. Den udstrakte brug af gulvvarme øger betydningen af en god terrændækisolering. Terrændækisolering mindsker varmetabet mod jord, men også varmetabet via fundament.

3.3.1 Tekniske energibesparelsmuligheder

Terrændækket består af tre primære dele i form af en trykfordelende plade, et isoleringslag og et kapillarbrydende lag. Dertil kommer en gulvbelægning. Der er det forholdsvis nemt og billigt at indbygge isolering i terrændækket. De marginale omkostningerne udgøres primært af selve merisoleringen og naturligvis fjernelse af jord. Med stigende isoleringstykkelse, er det dog væsentligt at sikre at sammentrykningen af isolering ikke bliver for stor, heller ikke på lang sigt. Den store udbredelse af gulvvarme i især enfamiliehus, har betydet at det er blevet mere vigtigt end tidligere at isolere mod varmetab til jord, hvilket også afspejles i kravene til terrændækkets U-værdi ved gulvvarme.

3.3.2 Energibesparelser og anlægsomkostninger

Der er gennemført beregninger for et terrændæk opbygget af en 100 mm betonplade, et isoleringslag og et 150 mm kapillarbrydende stenlag. Over betonpladen forudsættes anvendt et svømmende trægulv. Beregningerne er foretaget i henhold til gældende regler i DS418. Der er regnet med en gennemsnitlig jordtemperatur på 10 °C og en gennemsnitlig temperatur af gulvvarmeslangerne på hhv. 25 og 30 °C. Betydningen af at øge isoleringstykkelsen er vist i

Tabel 34 for hhv. uden og med gulvvarme. Ved gulvvarme medregnes ikke isolanser over varmekildens plan. Anlægsomkostninger er baseret på rapport omtalt i fodnote 56, men er

korrigeret for prisniveau. Det prissatte produkt er almindelige mineraluldsbatts (terrænbatts bolig). Det er forudsat at stivheden af isoleringen er tilstrækkelig.

Tabel 34. Varmetekniske og økonomiske konsekvenser af en forøget isolering i terrændæk uden og med gulvvarme. Isolering med $\lambda_D = 0,038 \text{ W/mK}$.

Isol.- tykkelse mm	Uden gulvvarme		Med gulvvarme 25 °C		Med gulvvarme 30 °C		Meranlægs- omkostning kr/m ²
	U-værdi W/m ² K	Energi- besparelse kWh/m ²	U-værdi W/m ² K	Energi- besparelse kWh/m ²	U-værdi W/m ² K	Energi- besparelse kWh/m ²	
100	0,218	0	0,235	0	0,235	0	0
150	0,169	2,7	0,179	4,7	0,179	6,2	44
200	0,138	4,5	0,145	7,5	0,145	10,0	89
250	0,117	5,6	0,122	9,4	0,122	12,6	132
300	0,101	6,5	0,105	10,9	0,105	14,5	177
400	0,08	7,7	0,082	12,8	0,082	17,0	266

Det skal bemærkes at en bedre terrændækisolering også vil nedsætte fundamentslinietabet. For fundamenter til typiske tunge ydervægge og med sokkel i massiv letklinkerbeton eller midterisoleret letklinkerbeton, vil linietabet reduceres med omtrent 0,04 W/mK, hvis terrændækkets U-værdi reduceres fra 0,20 til 0,10 W/m²K, svarende til en yderligere reduktion på ca. 10 %.

3.4 Vinduer

Typiske vinduer har et energitilskud (= varmetilskud fra solen minus varmetabet) på – 40 kWh/m²/år. De mest oplagt tiltag til forbedring af de varmetekniske egenskaber er anvendelse af glas med større soltransmittans, flere glaslag med lavemissionsbelægning, isolerende gas i hulrum, såkaldt varm rudekant samt isolerende og smallere ramme-karm profiler. Benyttes disse tiltag i samlede realistiske løsninger, kan der opnås omtrent et neutralt energitilskud. Man bør generelt benytte vinduer med højisolerende ruder (3 lags eller 1+2) hvor der er meget skygge (f.eks. nordvendt), og ellers vinduer med en god to-lags energirude.

3.4.1 Tekniske energibesparelsesmuligheder

Typiske vinduesløsninger på det danske marked består af vinduer med to-lags energirude⁶¹ og ramme-karmprofiler i træ, træ beklædt med aluminium, plast, aluminium eller blandede materialer. Sådanne vinduer i ét-fags vinduesformat (uden lod- og tværposter) og med dimensionerne 1,23 x 1,48 m, har samlede U-værdier på 1,4 – 1,6 W/m²K og giver et energitilskud på ca. –40 kWh/m²/år. Ramme-karmprofiler af træ og plast har de laveste U-værdier, men til gengæld er ramme-karmprofiler af aluminium smallere (større solvarmetilskud). Dette er medvirkende til at forskellen i energitilskud er lille.

Nedenfor redegøres for forskellige muligheder for at forbedre vinduers energimæssige egenskaber ved at foretage ændringer i vindueskonstruktionerne eller ved at anvende andre materialer⁶².

⁶¹ Termoruder har stadig en vis markedsandel, men i betragtning af den meget lille merpris for energiruder og meget korte tilbagebetalingstid, anses termoruder ikke for et relevant udgangspunkt i forbindelse med opgørelse af energibesparelsesmuligheder.

⁶² Redegørelsen er baseret på en række vindueskompendier, der er udarbejdet af BYG•DTU i forbindelse med Projekt Vindue. Se <http://www.bvg.dtu.dk/vinduer/>. Især kompendium 9 er relevant: Oversigt over muligheder for udvikling af bedre ruder og vinduer.

Ruder med større energitilskud

Ved at anvende jernfattigt glas kan ruders totale solenergitransmittans øges, idet den i glasset absorberede del af solstrålingen reduceres fra ca. 8 % til 2 %. Tilsvarende reduktioner af den absorberede solstråling kan opnås ved at anvende antirefleksionsbehandlet glas. Ingen af de to tiltag har nævneværdig indflydelse på rudens U-værdi.

Varmetabet kan reduceres, ved at anvende glas med lavemissionsbelægning og f.eks. argon eller krypton i fyldningen mellem glassene. En typisk tre-lags energirude med argonfyldninger og to bløde lavemissionsbelægninger har en U-værdi på 0,6, mens der med koblede ruder i form af ét lag energiglas med hård lavemissionsbelægning yderst og en almindelig to-lags energirude inderst (1+2 løsning) kan opnås en U-værdi på typisk 0,7. Begge løsninger reducerer solenergitransmittansen set i forhold til en to-lags energirude.

Kantkonstruktioner med reduceret kuldebro

Ved at anvende kantkonstruktioner med lavere ækvivalent varmeledningsevne kan vinduets U-værdi reduceres og risikoen for kondensdannelse mindskes. Traditionelle afstandsprofiler er lavet af aluminium eller stål, som har gode styrkemæssige egenskaber, men på grund af aluminium og ståls høje varmeledningsevner betyder det dog at kantkonstruktionerne kommer til at virke som en kuldebro i samlingen mellem rude og ramme. Ved at anvende andre materialer med lavere varmeledningsevner, så som plast eller rustfrit stål, i profiler, som samtidigt er slanke, kan kuldebroeffekten fra kantkonstruktionen nedsættes. Typisk kan linietabet for rudekanten reduceres med 50 % for trævinduer og trævinduer beklædt med aluminium, svarende til en reduktion af vinduets U-værdi på i størrelsesordenen 8 % for et typisk vindue uden sprosser. For vinduer med ramme-karmprofiler af blandede materiale og plast er reduktionen i linietabet væsentligt mindre. Betydningen af den ”varme kant” bliver naturligvis større hvis vinduet har gennemgående ægte sprosser.

Bedre isolerende ramme-karmprofiler

På trods af at der er opnået forholdsvis lave U-værdier for moderne ramme-karmprofiler, er der et stort potentiale i at udvikle ramme-karmprofiler med bedre energimæssige egenskaber. Mulighederne er skitseret i nedenstående tabel.

Tabel 35. Muligheder for forberede ramme-karmkonstruktioner og varmetekniske konsekvenser samt beskrivelse af tiltag.

Vindue	Referencevindue		Forbedret vindue	
	U_f	U	U_f	U
Træ beklædt med alu. ¹⁾	1,40	1,46	0,96	1,30
Plast ²⁾	1,72	1,46	1,06	1,26
Aluminium ³⁾	2,76	1,66	1,57	1,41
Kombinationsvindue ⁴⁾	-	-	1,07	1,23

¹⁾ Den indvendige kerne af både rammen og karmen erstattes med fenolskum med isolerende gas ($\lambda=0,026$) - træet udvendig bibeholdes. Hvis hele træprofilet erstattes af hård isolering (f.eks. purenit $\lambda=0,07$), kan opnås omtrent den samme reduktion.

²⁾ Afstivningsprofiler af stål i både rammen og karmen erstattes af glasfiberarmeret polyester (lavere varmeledningsevne og gode styrkemæssige egenskaber), hulrum udfyldes med isoleringsmateriale ($\lambda = 0,039$ W/mK), og luftspalten mellem ramme og karm inddeles i mindre hulrum.

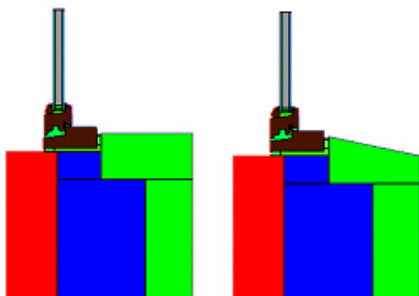
³⁾ Tilsvarende profil lavet af glasfiberarmeret polyester. Skulle kunne opfylde de styrkemæssige krav og samtidig have en væsentlig lavere varmeledningsevne.

⁴⁾ Alternativ ramme-karmkonstruktion udført i glasfiberarmeret polyester og med plads til 3 glas.

Smallere ramme/karmprofiler og montering af vinduer i forskudt fals

Anvendelse af smallere ramme-karmprofiler bevirker, at glasarealet øges, hvorved der opnås en større samlet g-værdi for vinduet. Samtidig minimeres effekten af ramme-karmens normalt dårligere U-værdi i forhold til ruden.

Den største fordel ved at formindske ramme-karmarealet er at solenergitransmittansen øges. Denne effekt kan opnås ved at montere vinduet i en forskudt fals (se Figur 4), idet der herved kan opnås en relativt større solenergitransmittans i forhold til det indre murhul. Samtidig kan varmetabet i samlingen reduceres.



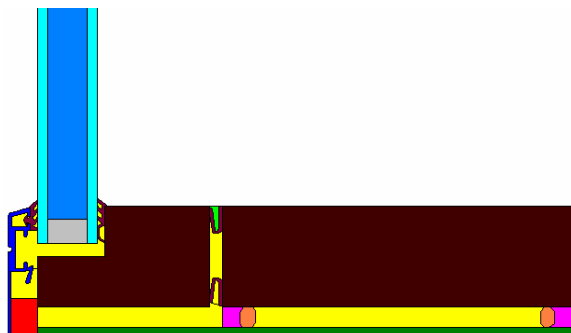
Figur 4. Ramme-karm af træ monteret i forskudt fals, hhv. retvinklet og skrå.

3.4.2 Energibesparelser og anlægsomkostninger

Der er umiddelbart mest realisme i følgende forbedrede løsninger:

1. Energivinduet.
2. Vindue med 3-lags energirude.
3. Vindue med 1+2 energirude.

Ad 1: Med udgangspunkt i et typisk trævindue med en almindelig 2-lags energirude kan sammensættes et energimæssigt bedre vindue ved at kombinere de bedste løsninger for hhv. rude, kantkonstruktion og ramme-karmprofil. I det forbedrede vindue (nulenergivinduet, se Figur 5) er der i rudekanten anvendt et afstandsprofil i plast, jernfattigt glas i det yderste lag glas (som lader mere solenergi passere ind) og ramme-karm bredden er reduceret fra ca. 10 cm til 5 cm.



Figur 5. Energivinduet. Prototype er udviklet og fremstillet på DTU.

Ad 2 og 3: Af hensyn til sammenligning af vinduerne antages det at 3-lags energirude og 1+2 energiruder kan monteres i en ramme-karm med tilsvarende varmetekniske egenskaber som

den viste i Figur 5. Det midterste lag glas i de to ruder antages jernfattigt, mens de øvrige har lavemissionsbelægning.

I Tabel 36 er vist de varmetekniske egenskaber for de enkelte forbedrede vinduesløsninger. Det skal især bemærkes at U-værdien er betydeligt større end for de to andre vinduer, men at g-værdien for vinduet er tilsvarende mindre.

Tabel 36. Varmetekniske data for referencevinduet, der er et typisk træ-alu vindue med energirude, og de tre forbedrede vinduesløsninger. Vinduer med standarddimensionen 1,23 x 1,48 m.

	Vinduestype			
	Reference	1	2	3
U_g [W/m ² K]	1,10	1,10	0,60	0,70
U_f [W/m ² K]	1,42	1,33	1,33	1,33
Ψ_g [W/mK]	0,082	0,034	0,034	0,034
U [W/m ² K]	1,40	1,23	0,81	0,89
Rudeandel [%]	71	85	85	85
g_{rude} [-]	0,63	0,67	0,46	0,51
g_{vindue} [-]	0,45	0,57	0,39	0,43

I Tabel 37 er beregnet de tilhørende energitilskud ved forskellige orienteringer. Det ses at energitilskuddet beregnet på normal vis ("vægtet") er væsentligt bedre for de tre forbedrede vinduesløsninger end for referencevinduet. Med energivinduet (type 1) kan opnås et energitilskud på 0 kWh/m²/år. Der opnås altså en stor forbedring af det samlede energitilskud, hvilket viser at man ved forholdsvis simple ændringer og anvendelse af elementer som er tilgængelige på det danske marked kan lave vinduer med to lag glas som giver et neutralt energitilskud. De forbedrede vinduer giver anledning til omtrent samme energitilskud; 3-lags rude og 1+2 rude er altså ikke bedre end Nulenergivinduet på trods af en væsentlig bedre isoleringsevne. Ser man på energitilskuddet for en nordvendt orientering er vinduerne med 3-lagsrude og 1+2 rude væsentligt bedre end Energivinduet. For en sydvendt placering er situationen omvendt. Vinduer med højisolerende ruder er altså primært fordelagtige at bruge i vinduer med nordlig orientering.

Tabel 37. Energitilskud [kWh/m²/år]. Vinduer med standarddimensionen 1,23 x 1,48 m.

Orientering	Vinduestype			
	Reference	1	2	3
Vægtet ¹⁾	-38	0	4	4
Nord	-79	-51	-32	-35
Syd	68	135	95	105
Øst/Vest	-22	22	18	20

¹⁾ 26 % nord, 41 % syd, 33 % øst/vest svarende til vægtningen ved klassifikation af ruder.

Priser på rudekomponenter og samlede ruder fremgår af hhv. Tabel 38 og Tabel 39. Tabel 39 viser rudepriser med udgangspunkt i to forskellige priser på jernfattigt glas.

Tabel 38. Priser på rudekomponenter⁶³.

Glastype	kr./m ²	Afstandsprofil	kr./m ²	Fyldning	kr./m ²
Alm. 4 mm floatglas	100	Stål	10	Argon	27
4 mm energiglas	343	Plast	67	Krypton	543
4 mm jernfrit glas	477			Arbejdsløn pr. samling	90

Tabel 39. Priser på forskellige rudetyper.

Rudetype	Anlægsomkostning [kr./m ²] ¹⁾	Anlægsomkostning [kr./m ²] ²⁾
2-lags energirude med afstandsprofil i stål	570	570
2-lags energirude med afstandsprofil i plast	630	630
2-lags energirude med jernfrit glas og afstandsprofil i plast	1000	645
3-lags energirude med jernfrit glas og afstandsprofil i plast	1530	1170
1+2 energirude med jernfrit glas og afstandsprofil i plast	1350	985

¹⁾ nuværende pris for jernfattigt glas (477 kr./m²).

²⁾ forventelig fremtidig pris på jernfattigt glas (115 kr./m²).

I Tabel 40 er opgjort energibesparelser for to forskellige orienteringer ("vægtet" og nord) og anlægsomkostninger i forhold til referencevinduet. For at kunne bestemme meranlægsomkostningen skal rudeprisen multipliceres med rudeandelen, som er 71 % for reference-vinduet og 85 % for de tre forbedrede løsninger. Det er forudsat at prisen for ramme-karm delen er den samme for alle vinduestyper.

Tabel 40. Energibesparelser og anlægsomkostninger.

Vinduestype	Energibesparelse [kWh/m ² /år]		Anlægsomkostning [kr./m ²] ²⁾
	Vægtet	Nord	
Reference	-	-	-
1	38	28	144
2	42	47	590
3	42	44	433

3.5 Ventilation

I nybyggeriet er ventilationstabet i takt med at der isoleres bedre og bedre, blevet en betydelig post i der samlede varmeregnskab. Derfor er der oplæg til nye energibestemmelser i Bygningsreglement år 2005 lagt op til at mekaniske ventilationsanlæg skal installeres med et varmegenvindingsaggregat med en temperatureffektivitet på mindst 60 pct. Et mekanisk ventilationssystem udføres typisk således, at der foretages udsugning fra køkken (gennem emhætten), bryggers og wc/bad og indblæsning af friskluft i værelser og andre beboelses rum. Herved sikres det, at der fjernes luft fra de største forureningskilder først.

Næsten alle nye enfamiliehuse bygges i dag med gulvvarme. Undersøgelser af energiforbruget i huse med gulvvarme har vist at disse har et større energiforbrug end forventet bl.a. fordi

⁶³ Priser er engro priser oplyst af en stor vinduesproducent. Jernfattigt glas fremstilles i dag kun til specielle formål og er derfor væsentlig dyrere end almindeligt glas. En mere realistisk merpris ved større udbredelse må forventes at være 10 – 20 %.

det kan være svært at regulere overfladetemperaturen hurtigt nok, således at indetemperaturen kan holdes på den ønskede setpunktstemperatur. For at undgå klager installeres gulvvarme derfor normalt med en meget høj fremløbstemperatur. Er boligens varmetab højt kræves en højere gulvvarmetemperatur, hvorved styringen vanskeliggøres. Udføres boligens ventilationssystem med et effektivt varmegenvindingsaggregat kan gulvvarmetemperaturen sænkes et par grader, hvorved varmetabet gennem fundament og terrændæk mindske samt styringen af rumtemperaturen bliver mere effektivt (kortere reaktionstid).⁶⁴ Ventilation med varmegenvinding gør derved indirekte opvarmning med gulvvarme mere effektiv.

I nye enfamiliehuse med ventilationssystemer dimensioneret efter kravene i bygningsreglementet, er merprisen for et anlæg med varmegenvinding ca. 3-4 % af den samlede byggeudgift. Generelt kan der regnes med, at omkostningerne for et ventilationsanlæg med varmegenvinding til et nybyggeri er stort set de samme som for et anlæg til det eksisterende byggeri. Selve installationsarbejdet kan dog i nogle tilfælde være lettere, hvilket kan reducere omkostningerne til installationen lidt.

3.6 Teknisk isolering

Teknisk isolering er et forsømt område og en stor del af nybyggeriet lever ikke op til gældende isoleringskrav, hvilket er dokumenteret i en række undersøgelser omtalt i forbindelse med teknisk isolering i det eksisterende byggeri. Der er derfor muligheder for varmebesparelse ved at leve op til gældende krav eller gøre det endnu bedre, hvilket dog kræver at der tages pladsmæssige hensyn ved projekteringen. Varmerør og ventiler i uopvarmede kældre eller skunk- og loftrum samt små fjernvarmeunits er de primære besparelsesområder.

3.6.1 Tekniske energibesparelsesmuligheder

I afsnittet om teknisk isolering i det eksisterende byggeri, blev der redegjort for at en stor del af nybyggeriet ikke lever op til gældende varmeisoleringskrav. Der er derfor et besparelеспotentiale, der ikke burde være til stede, i form af isolering af nybyggeriet svarende til gældende regler. Derudover vil der være muligheder for at foretage en ekstra god isolering, forudsat at der tages pladsmæssige hensyn ved projekteringen.

De nuværende krav til isolering af tekniske installationer i bygninger, er angivet i DS452, som nuværende bygningsreglementer henviser til. DS452 foreskriver generelt at installationer isoleres så unødvendigt varmetab undgås, og at varmeafgivelsen fra installationer ikke må forhindre en hensigtsmæssig regulering af rumtemperaturen.

Normale bygningsinstallationer klassificeres i henhold til normen som følger: Fordelingsledninger i centralvarmeanlæg i uopvarmede rum henføres til klasse 2 og til klasse 1 i opvarmede rum. I anlæg for varmt brugsvand, der er i drift hele året og mere end 60 timer pr. uge, henføres fordelingsledninger til klasse 3 i alle rum. Hvis driftstiden er mindre end 60 timer pr. uge er der tale om klasse 2 i alle rum.

De største energibesparelsesmuligheder findes umiddelbart i etageboliger gennem en god isolering af varme- og varmtvandsrør i uopvarmede kældre eller skunk- og loftrum. I enfamiliehuse med fjernvarme er der et væsentligt potentiale i isolering af fjernvarmeunits (og den samlede fjernvarmeinstallation). Undersøgelser viser at så godt som ingen fabrikanter i dag leverer disse små fjernvarmeunits med færdig isolering, bortset fra varmtvandsbeholdere,

⁶⁴ Jf. udformning og styring af energirigtige gulvvarmesystemer, J. Kragh, R-063, BYG-DTU, 2003/.

selvom de er underlagt akkurat samme krav om isolering som f.eks. rørføringerne til centralvarme og varmt vand i et etagebyggeri. Dette skyldes til dels at det vil være besværligt at servicere rør og ventiler. En uisolere fjernvarmeinstallation i et typisk nyere enfamiliehus vil forøge varmebehovet til opvarmning med op til ca. 10 %⁶⁵, mens betydningen øges for fremtidens huse med væsentligt mindre varmebehov. Varmeinstallationer med gas- eller oliefyring er typisk udført med en rimelig isolering af kedel mm. For at undgå ovennævnte varmespild vil det være nærliggende at foretage en isolering af hele varmeinstallationen frem for en isolering af de enkelte units og rør mm, for derved at tage hensyn til servicering af de enkelte dele i installationen. Det vil dog få produktet til at fylde mere, og man skal være opmærksom på om alle komponenter kan tåle temperaturen i kassen. Anvendelse af et solvarmeanlæg til produktion af det varme brugsvand i sommerperioden, så varmeanlægget i denne periode kan slukkes helt, vil ligeledes bidrage væsentligt til at reducere varmetabet. For større anlæg er tabet fra de uisolerede enheder relativt lavere.

3.6.2 Energibesparelser og anlægsomkostninger

Rør

Der er foretaget beregning af varmetab fra isolerede stålrør i typiske størrelser på 1 og 2 tommer (indvendig diameter). Typisk isoleres svarende til klasse 2, hvilket med almindelige rørsåle kan opfyldes med 30 mm isolering på 1 tomme rør og 50 mm på 2 tommer rør. Der er regnet på varmetab fra uisolerede rør og fra rør med en mindste isoleringstykkelse, som opfylder minimumskrav til isoleringsklasse 2. Specifikke varmetab fremgår tabellen.

Tabel 41. Specifikt varmetab [W/mK] i afhængighed af isoleringstykkelse. Der forudsættes almindelige rørsåle (varmeisoleringsevne på 0,043 W/mK).

Udvendig rørdiameter mm	Rørstørrelse tommer	Isoleringstykkelse [mm]							
		0	30	40	50	60	80	100	150
34	1	1,48	0,238	0,207	0,186	0,171	0,150	0,137	0,117
60	2	2,65	-	-	0,257	0,233	0,200	0,179	0,148

Energibesparelser og anlægsomkostninger er opgjort i Tabel 42. Energibesparelser findes med udgangspunkt i gennemsnitlig temperaturforskel mellem vandet i rørene og omgivelserne på 35 °C samt at 30 % af varmetabet nyttiggøres (spildfaktor på 0,7), svarende til uisolere kælder med isoleret etagedæk⁶⁶. Der er antaget en levetid på 40 år, og at ændringen i konstruktionen ikke påvirker vedligeholdelsesbehovet samt at der er tilstrækkelig plads til efterisoleringen. Varmeanlægget antages kun at være i drift i fyringssæsonen.

⁶⁵ Anlægget er typisk i drift i sommerperioden af hensyn til produktion af varmt brugsvand, hvor varmetabet stort set er rent spild. I fyringssæsonen kan en stor del udnyttes til opvarmning (omkring 80 %).

⁶⁶ Jf. s. 37 i ”Beregning af bruttoenergiforbrug”. SBI meddelelse 129. SBI 2000.

Tabel 42. Energibesparelse [kWh/m/år] og anlægsomkostninger⁶⁷ [kr/m/år] ved isolering af lige rør inkl. bøjninger.

Udvendig rørdiameter mm	Rørstørrelse tommer	Isoleringstykkelse [mm]							
		0	30	40	50	60	80	100	150
Energibesparelser									
34	1	0	169	174	177	179	181	183	186
60	2	0	-	-	326	330	334	337	341
Anlægsomkostninger									
34	1	0	130	140	150	160	180	200	250
60	2	0	-	-	160	170	190	210	260

DS 452 tillader mindre isoleringstykkelser på f.eks. ventiler og ved gennemføringer samt udeladelse af isolering hvor den er uhensigtsmæssig af hensyn til funktion eller drift. Man kan imidlertid spare meget varme ved god isolering af ventiler. Isolering af ventiler med støbte isoleringskapper koster ca. 180 kr. pr. stk. og varmetabet kan for en middelstor ventil ækvivaleres med ca. 0,5 m uisolert rørstrækning. Med disse forudsætninger kan beregnes en energibesparelse på 100-200 kWh pr. ventil for normale rørdimensioner.

3.7 Eksempelbygninger

Enfamiliehuse kan opføres med et energiforbrug til rumopvarmning, der er reduceret med op til 70 % og som kan udføres på en byggeteknisk, brugsmæssig og økonomisk forsvarlig måde. Dette er konklusionen på et større forsøgshusprojekt, der er gennemført over de sidste par år. Merudgifterne er i øvrigt begrænset til kun ca. 5 %. Et par af disse forsøgshuse er omtalt i dette afsnit.

3.7.1 Enfamiliehuse svarende til BR2005 energikrav eller bedre.

Der er i de senere år opført forsøgshuse med nye typer klimaskærmskonstruktioner⁶⁸. De indhøstede erfaringer viser bl.a. at forventede energikrav i BR 2005 kan imødekommes for en beskednen meranlægsomkostning. Nedenfor er der redegjort for energibesparende tiltag, beregnede energibesparelser og anlægsomkostninger for to forsøgshuse, hvoraf det ene (hus A opført i Snekkersten) har tunge ydervægge i form af skalmurede porebetonelementer og det andet (hus B opført i Lemvig) har lette ydervægge i stålskelet. Det skal bemærkes at referencheuset for sidstnævnte hus er et typisk fuldmuret hus. For nærmere beskrivelse af de to huse henvises til de omtalte forsøgshusrapporter. I Tabel 43 er vist en oversigt over beregnede varmebalancer med en kort beskrivelse af energibesparende tiltag

⁶⁷ Baseret på enhedspriser fra billigste VVS-entreprenør i forbindelse med etablering af 2 strengs varmeanlæg i typisk byggeri. Oplyst af EK Jørgensen AS rådgivende ingeniører. Merisolering koster ca. 1 kr. pr. mm. pr. løbende meter.

⁶⁸ Rapporten er dels i en sammenfattende rapport (BYG-DTU 2003 R-069) og separate rapporter om beregninger hhv. målinger. Forsøgshus-rapporter kan findes som PDF-filer på hjemmesiden: <http://www.byg.dtu.dk/> (se under publications).

Tabel 43. Beregnede varmetabaler⁶⁹ for to forsøgshuse, angivet i kWh pr. m² bruttoetageareal pr. år. Den nugældende energiramme til rumopvarmning er iht. BR95 280 MJ/m²/år = 78 kWh/m²/år.

Hus	A ¹⁾	B ²⁾
Varmetab via vægge, terrændæk og tag	35	29
Varmetab via vindue og døre	30	26
Varmetab via ventilation og infiltration	11	10
Varmetab ved udluftning (>24 °C)	1	1
Varmetab i alt	77	66
Solindfald	13	12
Internt varmetilskud	28	28
Varmetilskud	41	40
Varmebehov (netto)	36	26
Andel af nuværende energiramme (%)	47	33

¹⁾ De energibesparende tiltag er en mindre merisolering af klimaskærmen, et velisoleret fundamentssystem, varm rudekant og ventilation med varmegenvinding (90%).

²⁾ De energibesparende tiltag er en væsentlig merisolering af klimaskærmen, et højisoleret fundamentssystem, og ventilation med varmegenvinding (90%).

De detaljerede simuleringer af opvarmningsbehovet viser, at det er muligt at opføre typiske enfamiliehuse med et opvarmningsbehov der er reduceret 50-70 %, svarende til ca. 30 – 50 % af den nugældende energiramme⁷⁰. Der er lagt op til at varmebehovet reduceres med 30 % i forbindelse med nye energibestemmelser i 2005, svarende til 70 % af nugældende energiramme. De to eksempelhouses varmebehov er altså noget lavere end forventede kommende energikrav.

Nedenfor redegøres for energibesparelser og anlægsomkostninger for forsøgshusene idet sammenligningsgrundlaget er huse, som de enkelte byggefirmaer typisk opfører.

Tabel 44. Hus A. Energiforbrug for reference- og forsøgshus i kWh/år.

	Referencehus	Forsøgshus	Energibesparelse
Rumopvarmning	12216	4453	7763
Varmt brugsvand	0 ¹⁾	3000	-3000
Varme i alt	12216	7453	4763
Ventilationsanlæg	400	735	-335
Varmepumpe	1000	-	1000
El i alt	1400	735	665

¹⁾ produktionen af varmt brugsvand klares af varmpumpe med effektfaktor på 3 (varmekilde er indeluften via et mekanisk udsugningsanlæg).

⁶⁹ Beregningerne er baseret på detaljerede varmetabsberegninger af alle væsentlig kuldebroer. Simulering af opvarmningsbehov er udført i programmet BSIM (bygningssimuleringsprogram fra By og Byg) for standardforudsætninger vedrørende inde-temperatur (20 °C), vejrdato (design reference year, DRY) og internt varmetilskud (5 W/m²). Der er regnet med en luftinfiltration på 0,1 h⁻¹, svarende til anført værdi i DS418 for særligt tætte huse, og en temperaturvirkningsgrad for ventilationsanlægget på 90 % samt en luftmængde svarende til bygningsreglementets krav (60 l/s).

⁷⁰ Målinger viser at detaljerede simuleringer af varmebehov giver en særdeles fornuftig vurdering af opvarmningsbehovet, idet forskellen mellem beregninger og målinger er meget lille, når alle usikkerheder omkring materialedata etc. tages i betragtning. Det skal bemærkes at der er tendens til et større energiforbrug end forventet, idet komforttemperaturen typisk er lidt større end den forudsatte indetemperatur på 20 °C.

Tabel 45. Hus B. Energiforbrug for reference- og forsøgshus i kWh/år.

	Referencehus	Forsøgshus	Energibesparelse
Rumopvarmning	13490	3747	9743
Varmt brugsvand	3000	3000	0
Varmer i alt	16490	6747	9743
El til vent. anlæg	0	1050	-1050

Tabel 46. Merudgift i tusinde kr. for hus A og B.

Hus A	Referencehus	Forsøgshus	Merudgift	Levetid
Isolering, klimaskærm	0	20,1	20,1	100
Varm rudekant	0	1,4	1,4	20
Vægventiler	1,0	0	-1,0	20
Aggregat	9,3	16,8	7,5	20
Kanalsystem	7,2	14,7	7,5	100
Karnapper ¹⁾	0	-20,0	-20,0	100
I alt			15,6	

¹⁾ Modregnet besparelse på 20 tkr. ved at fjerne karnapper.

Hus B	Referencehus	Forsøgshus	Merudgift	Levetid
Isolering, klimaskærm	0	38,8	38,8	100
Aggregat	0	14,0	14,0	20
Kanalsystem	0	18,0	18,0	100
Vægventiler	1,0	0	-1,0	20
Aftrækskanaler	4,0	0	-4,0	100
			65,8	

Det skal bemærkes at de totale byggeomkostninger (inkl. moms) er 1,3 mio. kr. for hvert af de to huse. Merudgiften for de to forsøgshuse har været 20 tkr. (inkl. moms) for hus A og ca. 82 tkr. for hus B, svarende til en forøgelse af byggeudgiften på 2 og 6 %.

4 Metoder til økonomiske analyser

I dette delafsnit behandles forskellige metoder til økonomiske analyser af energibesparelsetiltag; privatøkonomiske og samfundsøkonomiske. Det undersøges bl.a. hvordan den traditionelle samfundsøkonomiske metode til beregning af CO₂-omkostninger bedre kan tilpasses investeringer i energibesparelsetiltag i bygninger og der redegøres for metode der tager hensyn til den forventede omstilling fra fossile brændsler til energibesparelser og vedvarende energi (VE).

4.1 Typiske metoder

Energibesparende tiltag vurderes ofte på baggrund af en eller flere af de følgende metoder til beregning af rentabilitet:

1. Tilbagebetalingsmetoden
2. Nuværdimetoden
3. Internrentemetoden
4. Annuitetsmetoden

De to sidstnævnte metoder er ikke særlig udbredt i forbindelse med vurdering af energibesparelsetiltag i bygninger, og behandles derfor ikke nærmere i nærværende sammenhæng.

4.1.1 Tilbagebetalingsmetode

Tilbagebetalingsmetode kan bruges til at måle den tid, der forløber indtil investeringen er "tjent hjem", den såkaldte simple tilbagebetalingstid, der er defineret som den samlede investering divideret med den årlige besparelse. Ved investering i energitiltag i bygninger kan det normalt antages, at de årlige besparelser er konstante over bygningsdelens levetid eller indtil større genopretning er påkrævet.

Simpel tilbagebetalingstid er en let forståelig størrelse, der er meget brugt i forbindelse med vurdering af energibesparelsetiltag i bygninger, men metoden er problematisk, da væsentlige faktorer som prisstigning på energi, renteniveau, skatteforhold og levetid ikke inddrages, i modsætning til nuværdimetoden. Simpel tilbagebetalingstid skal altid ses i forhold til levetiden af tiltaget, men der er tendens til at vurdere simpel tilbagebetalingstid ens for tiltag, der har forskellige levetider. Tilbagebetalingsmetoden kan generelt ikke anbefales, medmindre der er tale om tiltag med kort levetid.

4.1.2 Nuværdimetode

Nuværdimetoden kan bruges til at afgøre om et energibesparende tiltag er rentabelt ved at sammenligne den totale værdiforøgelse eller "overskud på investeringen" i dagens kr-værdi (nuværdien) svarende til forskellen mellem energibesparelsen og rente- og afdragsudgifter på lånet til det energibesparende tiltag. Kriteriet for rentabilitet er, at investeringen nuværdi skal være større end 0. Nuværdien afspejler typisk, at omkostninger og besparelser ude i fremtiden, ikke vægtes lige så højt som nutidige værdier.

Nuværdien er det mest betydningsfulde og anerkendte kriterium. En svaghed ved kriteriet er dog at det ikke tager direkte stilling til, hvornår man opnår fortjenesten, men kun hvor meget man totalt opnår. Dette kan være et problem for individet i forbindelse med investeringer med lang levetid (f.eks. isoleringsmæssige tiltag), hvor fortjenesten fremkommer over hele levetiden.

Valg af energibesparende tiltag i bygninger bør som udgangspunkt baseres på et ønske om at minimere summen af anlægs- og driftsudgifter (varmeudgifter) i levetiden, svarende til økonomisk optimering af totaløkonomien. Til værdisættelse af totaløkonomien er det nærliggende at anvende nuværdi kriteriet.

4.1.3 Metoder brugt i Energimærkningsordningerne

En kombination af nuværdimetode og tilbagebetalingsmetode benyttes i energimærkningsordningerne for små hhv. store bygninger til bestemmelse af rentable energibesparende tiltag, der kan forventes at blive gennemført. Cowi har i år 2001 lavet en evaluering af disse ordninger⁷¹, herunder set på ordningernes definition på rentable energibesparende tiltag.

I energimærkningsordningen for små bygninger (EMO) opereres med en rentabilitetsfaktor, der beregnes som energibesparelsen over den teknisk levetid divideret med investeringen (inkl. moms). Tiltag med rentabilitetsfaktorer over 1,33 medtages i energiplanen (energibesparelsen over levetiden skal være 1,33 gange større end investeringen). Andre forslag kan dog medtages, hvis forbedring kan foregå i forbindelse med renovering/vedligeholdelse, der alligevel skal foregå. Ud fra rentabilitetsfaktoren kan beregnes en simple tilbagebetalingstid (ST), der svarer til at et tiltag kan betragtes som rentabelt, svarende til $ST < 0,75 \cdot \text{levetid}$. Mange af de investeringer, der indgår i planerne, har en meget lang løbetid. 80 % af besparelsesforslag har levetid, der er større end 20 år, og 25 % har levetid større end 40 år. Det vil sige at husejere skal kunne acceptere simple tilbagebetalingstider, der for 80 % af forslagene, er over 15 år. Der er i forbindelse med evalueringen af energimærkningsordningen lavet en interviewundersøgelse med huslejere, der viser at den privatøkonomiske horisont sjældent er så lang. 69 % mener at $ST < 7$ år er acceptabelt og kun 6 % mener at $ST > 12$ år er ok.

I energimærkningsordningen for store bygninger (ELO = energiledelsesordningen) opereres der med et prioritetstal P, der beregnes som investering divideret med besparelse over teknisk levetid. Under udarbejdelse af energiplanen aftaler konsulenten med ejendomsrepræsentanten, om en besparelse skal medtages på energiplanen, og prioritetstallet beregnes. Det er erfaringen at dette tal skal være mindre end 0,5, hvis der skal være rimelig sikkerhed for, at investeringer er rentable og dermed kan antages at blive gennemført, svarende til at $ST < 0,5 \cdot \text{levetid}$. Hidtil er de tekniske levetider af indberettede besparelsesforslag koncentreret om 10, 15 og 20 år, og interview med ejere/administratorer, viser at rentable forslag betragtes som forslag der er tjent hjem over ca. 7-10 år. Dette er baggrunden for prioritetstallet 0,5.

Det fremgår af ovenstående beskrivelse af EMO, der primært omfatter enfamiliehuse, at der er et misforhold mellem husejeres opfattelse af rentable energibesparestiltag og hvad der i ordningen defineres som rentable tiltag, hvilket hænger sammen med den enkelte husejers forholdsvis korte privatøkonomiske tidshorisont, der svarer til simple tilbagebetalingstider på maksimalt 10 år.

Der er generelt behov for at rette fokus væk fra simpel tilbagebetalingstid og i stedet for benytte en mere langsigtet og rationel metode, der tydeliggøre fordelene ved energibesparestiltag med lang levetid. En sådan metode er økonomisk optimering og behandling af fremtidssikringsaspekter i form af scenarier for de kommende økonomiske forhold (energipriser og rente).

⁷¹ Evaluering af energimærknings- og energiledelsesordningerne. COWI for Energistyrelsen. Februar 2001.

4.2 Beregningsmetode til bestemmelse af CO₂-omkostninger

Energistyrelsen og regeringens brug af økonomiske analyser (CO₂-omkostninger) er egnet til prioritering af kortsigtede energibesparelser, men er mindre velegnet til f.eks. isoleringsmæssige tiltag med lange levetider, der utvivlsomt vil være i brug i en fremtidig energisituation uden fossile brændsler og dermed CO₂ udledning. Desuden er der et rente problem, idet metoden ikke tager hensyn til det reelle renteniveau for investeringer i bygningsrelaterede tiltag. Den rationelle metode til valg af det langsigtede fremtidssikre niveau for energibesparelser bør baseres på økonomisk optimering.

Der lægges op til beskrivelse af to metoder; nuværende metode og en alternativ metode til fastlæggelse af den fremtidssikrede isoleringstykkel. Der foretages en redegørelse for Energistylens metode til beregning af CO₂-omkostninger, herunder hvorfor den er uegnet til vurdering af energibesparelsetiltag i bygninger med lang levetid. Desuden undersøges hvordan kan der tages bedre hensyn til levetid, afskrivninger og kalkulationsrente, og hvad andre har foreslået samt hvilke sideeffekter/-gevinster, dvs. andre væsentlige konsekvenser end de snævre velfærdsøkonomiske, der rimeligvis kan medtages uden at usikkerheden på de beregnede CO₂-omkostninger bliver for markant.

4.2.1 Nuværende metode

Energistylens metode til beregningen af CO₂-omkostninger ved forskellige reduktionstiltag er ændret i forhold til tidligere udsendt notat⁷². Energistyrelsen arbejder for nærværende på en opdatering af vejledningen. Væsentlige ændringer er konsekvent brug af markedspriser og ingen fastlagt tidshorisont. Den nye metode er brugt ved nyligt udførte beregninger⁷³. I fodnote⁷⁴ er nævnt de rapporter, der danner baggrund for den anvendte metode.

Beregning af CO₂-omkostning

CO₂-omkostninger (oprindeligt benævnt CO₂-skyggepris) ved forskellige tiltag, udtrykker de samfundsøkonomiske omkostninger pr. ton undgået CO₂-udslip. CO₂-omkostningen afspejler dermed også den værdi, der må tillægges CO₂-reduktionen, for at tiltaget lige præcis balancerer. Det er normalt at beregninger af CO₂-omkostninger baseres på et velfærdøkonomisk teorigrundlag (forbrugerpræferencer, betalingsvillighed osv.).

Med udgangspunkt i et tiltag til reduktion af CO₂-udledningen, er ideen, at der ses på de omkostninger og gevinster, der opstår som følge af tiltaget. Disse omkostninger og gevinster har en tidsmæssig profil, som udtrykkes i konsekvenser nu-og-her svarende til den såkaldte nuværdi ved brug af kalkulationsrenten (diskonteringsraten).

Når r udtrykker kalkulationsrenten og T tiltagets tidshorisont, kan formelen til beregning af et tiltags nuværdi (NNV) og CO₂-omkostning udtrykkes således:

$$NNV = \sum_{t=1}^T \frac{B_t - C_t}{(1+r)^t} - \sum_{t=1}^T \frac{\Delta CO_2^t \cdot P^{CO_2}}{(1+r^{CO_2})^t} = 0 \Rightarrow P^{CO_2} = \sum_{t=1}^T \frac{B_t - C_t}{(1+r)^t} \cdot \left[\sum_{t=1}^T \frac{\Delta CO_2^t}{(1+r^{CO_2})^t} \right]^{-1}$$

⁷² Generelle forudsætninger for samfundsøkonomiske beregninger. Energistyrelsen, september 1999.

⁷³ En omkostningseffektiv klimastrategi. Teknisk rapport. Februar 2003.

⁷⁴ Omkostninger ved CO₂-reduktion for udvalgte tiltag (midtvejsrapport, maj 2001), Vejledning i udarbejdelse af samfundsøkonomiske konsekvensvurderinger (Finansministeriet 1999) og Miljøpolitikens økonomiske fordele og omkostninger (Finansministeriet m.fl. 2001).

Hvor

B_t er tiltagets gevinster (udover selve CO₂-reduktionen).

C_t er tiltagets nettoomkostninger i periode t .

ΔCO_2^t er tiltagets medførte ændring i CO₂-udslippet i periode t .

r_{co2} er kalkulationsrenten for CO₂-emissioner.

P_{co2} er værdien af en reduktion i CO₂-udslippet svarende til CO₂-omkostningen.

Som det fremgår af formelen, ses der på CO₂-reducerende tiltag, som er forbundet med omkostninger samt eventuelt nogle sidegevinster, dvs. gevinster, der ligger ud over selve CO₂-reduktionen. CO₂-omkostningen er antaget at være konstant over tid⁷⁵. Hvis der for et tiltag findes en negativ CO₂-omkostning, afspejler det, at tiltagets øvrige gevinster overstiger omkostningerne (B_t større end C_t i formelen), dvs. at tiltaget giver en samfundsøkonomisk gevinst, selv når der ses bort fra den gevinst, der følger af det lavere CO₂-udslip. Hvis omvendt CO₂-omkostningen er positiv, afspejler det, at tiltagets øvrige gevinster ikke er store nok i sig selv at berettiggø afholdelse af tiltagets omkostninger. Tiltaget er i så fald alene samfundsøkonomisk rentabelt, hvis CO₂-omkostningen vurderes ikke at overstige den positive velfærdsvirkning af CO₂-reduktionen.

Generelle beregningsforudsætninger

Anlægs- og driftsomkostninger samt sparede energiudgifter opgøres i basispriser og korrigeres med nettoafgiftsfaktoren (1,17), for at danne de velfærdsøkonomiske beregningspriser. Der anvendes en tidshorisont på 30 år. Denne vurderes at kunne favne alle relevante forskelle mellem de enkelte alternativs fordele og ulemper. Energibesparende tiltag giver anledning til et provenutab for det offentlige pga. mistede indtægter i form af afgifter, når forbruget af høj-afgiftbelagte produkter som olie, naturgas, el og fjernvarme reduceres. I den forbindelse ses bort fra skatteforvridningstab af provenutabet.

For tiltag med en levetid ud over den 30-årige periode, regnes der med lineær afskrivning og indregning af restværdi. For et tiltag med en levetid på f.eks. 100 år er det ensbetydende med, at 30 pct. af investeringen regnes afskrevet over den 30-årige periode, og at restværdien er 70 pct. af investeringen. Dette vurderes umiddelbart at være rimeligt for isoleringsmæssige tiltag, men en mindre god forudsætning for f.eks. vinduer, hvor den teknologiske udvikling sandsynligvis vil betyde at det vil være umuligt at realisere en restværdi. Der regnes dog generelt med lineær afskrivning.

Finansministeriet anbefaler at benytte en samfundsøkonomisk kalkulationsrente (diskonteringsrate) på 6 pct., og som en standard følsomhedsberegning angives også resultater ved 3 pct.

De positive miljømæssige effekter i form af reducerede SO₂- og NO_x-udledninger værdisættes og indregnes.

⁷⁵ Værdien der tilskrives CO₂-reduktioner kan dog alligevel variere ved at anvende en kalkulationsrente for CO₂-reduktioner, der er forskellig fra kalkulationsrenten for nettoomkostningerne ved tiltaget. Hvis f.eks. skadesomkostningerne ved at udlede CO₂ vurderes at stige over tid, kan denne effekt inddrages ved at anvende en lavere kalkulationsrente for CO₂.

4.2.2 Metode tilpasset bygningsrelaterede energibesparelsetiltag

Kalkulationsrenten

Kalkulationsrenten eller diskonteringsraten er afgørende for de samfundsøkonomisk beregninger. Energistyrelsen og andre taler for at der ved vurdering af tiltag med meget lang tidshorisont bør benyttes en diskonteringsrate som aftager mod nul over tid. Årsagen er, at nuværdien af selv en nok så stor fordel bliver omkring lig med nul ved en positiv diskonteringsrate, hvis fordelene falder tilstrækkeligt langt ude i fremtiden. På den måde forbigås hensynet til fremtidige generationer. For eksempelvis investeringer i isoleringsmæssige tiltag med en levetid på 50-100 år, vil en diskonteringsrate på 6 pct. betyde, at nuværdien af en energibesparelse på 100 kr. om 75 år, vil være reduceret til 1 kr. Regnes der med en rente på 3 pct. vil de 100 kr. være reduceret til 11 kr. Som en yderligere følsomhedsberegning regnes med en kalkulationsrente på 0 pct.

I rapporten ”Vindkraft og dansk klimastrategi”⁷⁶ diskuteres om gevindsten ved reduceret CO₂-udledning skal diskonteres med samme faktor som øvrige gevinster og omkostningselementer. Det påpeges at CO₂-problematikken og klimaforandringer er af langsigtet natur, og konsekvenserne er usikre, og at man ud fra et forsigtighedshensyn kan retfærdiggøre en nedjustering af den samfundsøkonomiske diskonteringsfaktor. Da der ikke umiddelbart kan findes et objektivt grundlag for, hvor meget lavere CO₂-udledningen skal diskonteres, regnes med samme kalkulationsrente.

Afskrivning af investering

Normalt regnes der med en lineær nedskrivning af investeringens værdi. Denne afskrivning er dog umiddelbart mindre egnet på bygninger eller på ekstra investeringer, der kun har indflydelse på bygningens varmebehov, fordi blandt andet bygningens pris ikke synes at falde de første mange år af dens levetid, men snarere at stige. I rapporten ”Realisering af lavenergi-huse”⁷⁷ er problemstilling behandlet og det konkluderes på baggrund af udsagn fra forskellige aktører, der har interesse i bygningens værdi, at værdien af investeringer i energibesparelser varierer meget, fra ”næsten uden betydning” til ”ingen afskrivning”. Det konkluderes også at værdien afhænger meget af markedssituationen ved salg. En mellemvej for investeringernes fremtidige værdi synes på denne baggrund at være den lineære afskrivning, men man kunne også retfærdiggøre at regne med, at de isoleringsmæssige investeringer med lang levetid ikke tabte deres værdi i starten, således at der som en følsomhedsberegning regnes med ingen afskrivning de første 30 år.

Sideeffekter

Energibesparende isoleringsmæssige tiltag i det eksisterende byggeri, vil i mange tilfælde medvirke til en væsentlig forbedring af indeklimaet i form af mindre træk, nedsat kondensrisiko på indvendige flader og dermed mindre risiko for råd og svamp. En kapitalisering af denne fordel er imidlertid meget vanskelig. Forskning på området ved Indeklimacenteret på DTU viser at betydningen af et godt indeklima frem for et middelmådigt indeklima generelt er meget markant.

⁷⁶ Vindkraft og dansk klimastrategi. Udarbejdet for Danmarks vindmølleforening af ECON Analyse. Maj 2003.

⁷⁷ Realisering af lavenergi-huse. Eksamensprojekt ved DTU. 2000.

4.3 Alternativ metode: Fremtidssikring af isoleringsmæssig standard

Nye bygninger må formodes at have en levetid (100 år), der strækker sig ud over den forventede afviklingsperiode for brug af fossile brændsler på i størrelsesordenen 50 år (50 år er baseret på en ekstrapolation af den målsatte 21%-reduktion i 2012 og den tilsigtede 50%-reduktion af CO₂-udledningen i 2030⁷⁸. Derfor er CO₂-omkostninger ikke anvendelige til en samfundsmæssig prioritering af isoleringsniveauet i nye bygninger i forhold til andre initiativer (med meget kortere levetid) til reduktion af udledningen af drivhusgasser.

Derimod bør man anlægge en betragtning over, hvordan man samlet set billigst når fra det nuværende samfund til et bæredygtigt⁷⁹ samfund uden brug af fossile brændsler om 50 år. Da det er langt billigere at bygge de nye huse med et højt isoleringsniveau nu end efterisolere dem senere, bør det samfundsmæssigt set optimale isoleringsniveau allerede nu fastlægges ud fra prisen på et vedvarende energisystem, der kan dække opvarmningsbehovet helt, efterhånden som de fossile brændsler udfases over de næste 50 år.

Der er derfor behov for en alternativ metode til valg af optimalt isoleringsniveau på et rationelt grundlag. Dette bør, som nævnt tidligere, gøres ved at anlægge en totaløkonomisk synsvinkel svarende til en optimering af anlægs- og driftsudgifter over f.eks. 30 år (svarende til normal låneperiode ved byggeinvesteringer), og hvor der tages hensyn til udviklingen og usikkerheden i rente og energipriser over levetiden.

4.3.1 Metodens overordnede principper

Den økonomisk optimale løsning er den, der minimerer summen af anlægs- og driftsudgifter (varmeudgifter) i levetiden.

Ved investering i energibesparelser i bygninger kan der normalt antages, at de årlige besparelser er konstante over bygningsdelens levetid eller indtil en større genopretning er påkrævet. Alle investeringer og besparelser opgøres i faste priser på investeringstidspunktet. Værdien på investeringstidspunktet (nuværdien) af årlige lige store energibesparelser, bestemmes ved at multiplicere den årlige energibesparelse b med den såkaldte nuværdifaktor f_{npv} , der afhænger af den reale kalkulationsrente r_r og levetiden n , og sammenhængen er:

$$f_{npv} = \frac{1 - (1 + r_r)^{-n}}{r_r}$$

Den reale kalkulationsrente (realrenten) kan tilnærmet beregnes som:

$$r_r = r_n \cdot (1 - s) - i_e$$

hvor	r_n	er den nominelle kalkulationsrente i pct./år
	i_e	er energiprisens stigningstakt i pct./år
	s	er beskattningen af renter

⁷⁸ Klima 2012 – Status og perspektiver for dansk klimapolitik. Energistyrelsen 2000.

⁷⁹ Bæredygtighed defineres typisk som omtanke i vores daglige handlinger og beslutninger - omtanke i forhold til brug af ressourcer, belastning af naturen og til vores sundhed. Baggrunden for bæredygtighedsbegrebet er Bruntland Rapporten "Vor Fælles Fremtid". Heri omtales/defineres en bæredygtig udvikling som: "...en udvikling som opfylder vore nuværende behov uden at bringe fremtidige generationers muligheder for at opfylde deres behov i fare."

Normalt er grundprincippet ved fastsættelse af en kalkulationsrente en sammenligning med det afkast, men kan få ved andre pengeanbringelser. Men da bygninger typisk opføres med fuld belåning er det mere realistisk at se på optagelse af ekstra lån til dækning af de energibesparende tiltag. I mange tilfælde beskattes renteindtægter, og derfor er der ovenfor korigeret for beskatningen.

Nuværdien af lige store årlige besparelser kan skrives som:

$$B_0 = b \cdot f_{npv}$$

Nuværdifaktoren er i Tabel 47 angivet i afhængighed af levetid og realrente. Nuværdifaktoren er i øvrigt ensbetydende med den privatøkonomiske tilbagebetalingstid i år, der netop svarer til, at investeringen er udgiftsneutral og nuværdien af investeringen er 0 kr. Ved en realrente på 0 pct./år, svarer tilbagebetalingstiden til levetiden. Ved en realrente større end 0 pct./år vil tilbagebetalingstiden være mindre, hvilket udtrykker at investeringen skal tjenes hjem over færre år end levetiden, da der er et mindste krav til investeringens forrentning svarende til den reale kalkulationsrente.

Tabel 47. Nuværdifaktor f_{npv} i afhængighed af levetid og realrente.

Levetid År	Realrente i pct. /år							
	1	2	3	4	5	6	8	10
5	4,9	4,7	4,6	4,5	4,3	4,2	4,0	3,8
10	9,5	9,0	8,5	8,1	7,7	7,4	6,7	6,1
20	18,0	16,4	14,9	13,6	12,5	11,5	9,8	8,5
30	25,8	22,4	19,6	17,3	15,4	13,8	11,3	9,4
50	39,2	31,4	25,7	21,5	18,3	15,8	12,2	9,9
100	63,0	43,1	31,6	24,5	19,8	16,6	12,5	10,0

Levetiden for klimaskærmen sættes til 100 år, hvilket tilnærmelsesvis gælder for isoleringen og det bærende element i klimaskærmen. Der betragtes dog en 30 års beregningsperiode, da denne tidshorisont svarer til den normale låneperiode ved byggeinvesteringer. Derudover vil den beregningsmæssige usikkerhed stige betydeligt ved længere perioder og driftsenergiudgifterne langt ude i fremtiden har kun ringe betydning for nuværdien, hvilket ses af Tabel 47.

Da levetiden af investering i bedre isolerede klimaskærmskonstruktioner er sat til 100 år og dermed er større end beregningsperioden, regnes der med en restværdi R_n 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 af restværdien R_n findes således:

$$R_0 = R_n \cdot (1 + r_r)^{-n}$$

Den samlede nuværdi NPV (net present value) beregnes herefter som:

$$NPV = B_0 - (I_0 - R_0)$$

Hvor I_0 er investeringsbeløbet, mens de to øvrige parametre er forklaret ovenfor. En investering er rentabel, hvis den resulterer i en positiv nuværdi, beregnet med kalkulationsrenten.

Ved at bestemme nuværdien af de nødvendige investeringer og energibesparelsen ved eksempelvis forskellige isoleringstykkelser i forhold til en valgt reference, kan det optimale isoleringsniveau findes. Det optimale niveau findes hvor nuværdien er størst.

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 %⁸⁰. De lave renteniveauer der er set de seneste år og for nuværende kunne retfærdiggøre at der blev regnet med en lavere rente.

Over en beregningsperiode på 30 år er prognoser for energipriser og realrente forbundet med store usikkerheder, blandt andet fordi det tidsmæssige perspektiv er så langt, og derfor er følsomhedsanalyser relevante. Med hensyn til energipriser er der en klar tendens til at disse vil stige i de kommende år.

4.3.2 Økonomiske scenarier

Der betragtes to overordnede energibesparelsesniveauer, svarende til et privatøkonomisk niveau og et bæredygtigt niveau. Det privatøkonomiske niveau tager udgangspunkt i den privatøkonomiske realrente og for det bæredygtige niveau benyttes en rente på nul. Den bæredygtige nul-rente betyder at nuværdien af energibesparelser i hele levetiden tillægges samme værdi, hvilket er rimeligt af hensyn til fremtidige generationer, da nuværdien af energibesparelser bliver omkring lig med nul ved en positiv realrente (diskonteringsrate), hvis besparelsen falder tilstrækkeligt langt ude i fremtiden (jf. også tidligere betragtninger i afsnit 4.2.2).

For hvert af de to energibesparelsesniveauer betragtes to scenarier mht. energiprisen (se Tabel 48). Scenarie 1 svarer omtrent til nuværende energipriser og scenarie 2 svarer til dobbelt så høje energipriser. I en indledende analyse af en fremtidig varmforsyning af nye bygninger udelukkende baseret på vedvarende energi i form af et energieffektivt fjernvarmesystem og en solvarmecentral er der angivet en energipris på 1-1.20 kr/kWh⁸¹. Hvis man skønner det vil være muligt at forsyne en bebyggelse af nye huse totalt med vedvarende energi til en pris af 1.20 kr./kWh svarer det til scenarie 2.

Tabel 48. De økonomiske scenarier der betragtes.

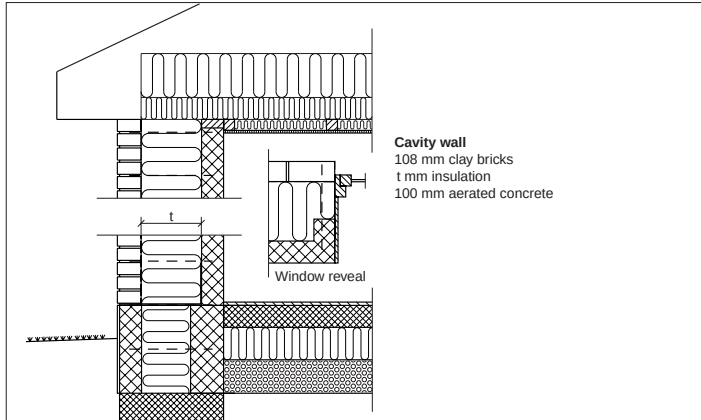
Besparelsesniveau	Scenarie	Realrente [% p.a.]	Varmepris [kr/kWh]	Elpris [kr/kWh]	Beregningsperiode [år]	f_{npv}
Privatøkonomisk	P1	2,5	0,6	1,75	30	21
	P2	2,5	1,2	3,50	30	21
Bæredygtigt	B1	0	0,6	1,75	30	30
	B2	0	1,2	3,50	30	30

⁸⁰ Jf. figur 3.16. i Bygge/Bolig - en erhvervsanalyse. Erhvervsfremmestyrelsen 2000.

⁸¹ A Central Solar heating Plant for New Settlements, Jacob Birck Laustsen, Svend Svendsen, Alfred Heller. Eurosun 2000. Copenhagen.

4.3.3 Illustration af metoden

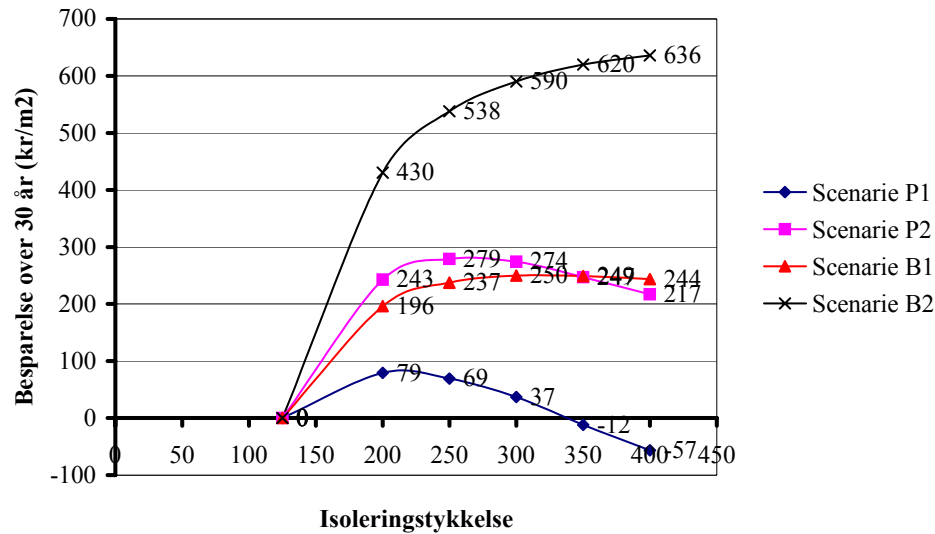
Grundlaget for bestemmelse af det optimale isoleringsniveau er som nævnt en privatøkonomisk analyse baseret på totaløkonomi, d.v.s. en minimering af summen af anlægs- og driftsomkostninger i levetiden. Metoden er beskrevet i detaljer i rapporten omtalt i fodnote 56, hvorfra de energi- og prismæssige data er taget fra. Metoden tager hensyn til følgeudgifter af en større isoleringstykkelse, som for eksempel bredere fundament. Et eksempel på resultater af en sådan optimering er vist nedenfor.



Figur 6. Eksempel på ydervægskonstruktion i typisk enfamiliehus, der kan optimeres energimæssigt.

Tabel 49. Økonomisk oversigt for tre økonomiske scenarier.

Isol. tyk. [mm]	Energi- besparelse [kWh/m ² /år]	Meranlægs- omkostning [kr/m ²]	Nuværdi af besparelse over 30 år [kr/m ²]			
			Scen. P1	Scen. P2	Scen. B1	Scen. B2
125	0	0	0	0	0	0
200	13,0	126	79	243	196	430
250	16,7	211	69	279	237	538
300	18,9	301	37	274	250	590
350	20,6	406	-12	247	249	620
400	21,8	496	-57	217	244	636



Figur 7. Besparelse over 30 år som funktion af isoleringstykkel.

Det overordnede resultat af optimeringsanalysen er at de ekstra anlægsudgifter ved at øge isoleringsniveauet fra det nuværende 125 mm til et optimalt niveau på 200-300 mm (scenarie B2 undtaget) så rigeligt betales af besparelsen på energiforbruget over de første 30 år. Man kunne endda gå endnu længere op i isoleringsniveau og have en bedre totaløkonomi end hvis man holdt fast ved det nuværende isoleringsniveau. Det ses også at straffen (meromkostningen) for et ikke-optimalt isoleringsniveau er asymmetrisk⁸², da der er tale om større meromkostninger ved underisolering end ved overisolering for et givet scenarie. Set i lyset af usikkerheder omkring rente og energipris, vil det derfor typisk være rationelt at installere mere isolering end det optimale.

⁸² Samme konklusion anføres i artiklen: Energy Analysis and Optimal Insulation Thickness (Building and Environment Conference. Paris, June 1997. R.J.Lowe, J.L.Sturges & N.J.Hodgson. Optimalt isoleringsniveau behandles også i rapporten: Towards Sustainable Housing: building regulation for the 21st century (England). Robert Lowe & Malcom Bell, Leeds University.

5 Økonomiske beregninger

I dette afsnit foretages en behandling af pkt. 2, 3 og 4 samlet. Der foretages beregninger af privat- og samfundsøkonomien i energibesparende tiltag i det eksisterende byggeri og nybyggeriet.

5.1 Eksisterende byggeri

5.1.1 Privatøkonomisk

På grundlag af energibesparelserne og anlægsomkostninger beregnes den privatøkonomiske situation set fra individets synspunkt i form af totaløkonomi på basis af den sædvanlige nuværdimetode og forskellige scenarier m.h.t. energipris og rente, som der er redegjort for i forrige kapitel.

Der skal foretages en omregning fra netto- til bruttoenergibesparelser. Denne foretages med udgangspunkt i den fordeling på opvarmningsformer, der var gældende for husholdninger i 2002. I Tabel 50 er det samlede energiforbrug til rumopvarmning fordelt ud på opvarmningsformer. Denne fordeling antages at gælde for alle år i beregningsperioden. Det skal bemærkes at såvel ændringer i virkningsgrader som ændringer i sammensætningen af varmekonsumet på opvarmningsformer kan betyde ændringer i effektiviteten. Effektiviteten kan forventes at stige for enfamiliehuse som følge af udskiftning af gamle naturgas- og oliefyre med dårlig årvirkningsgrad til nye bedre kedler. Etageboliger er i vid udstrækning konverteret til fjernvarme og virkningsgraden er derfor noget bedre end for enfamiliehuse. De beregnede nettoenergibesparelser omregnes til bruttoenergibesparelser ved at dividere med den gennemsnitlige virkningsgrad (0,86).

Tabel 50. Klimakorrigeret energiforbrug til rumopvarmning (inkl. varmt brugsvand), opvarmningsformer og virkningsgrader. Danske husholdninger. Beregnet på basis af energistatistik 2002⁸³.

	Brutto- energiforbrug [PJ]	Netto- energiforbrug [PJ]	Nettoenergiforbrug, fordeling [pct.]	Virkningsgrad [pct.]
Enfamiliehuse				
Olie	29,7	22,8	24	0,77
Naturgas	25,0	20,5	22	0,82
VE ¹⁾	21,5	14,4	15	0,67
EL	6,2	6,0	6	0,97
Fjernvarme	32,7	31,0	33	0,95
I alt	115,1	94,7	100	0,84
Etageboliger				
Olie	2,4	1,9	5	0,78
Naturgas	4,6	3,7	9	0,80
VE ¹⁾	0,2	0,2	0	1,00
EL	0,9	0,9	2	0,97
Fjernvarme	34,9	33,2	83	0,95
I alt	43,0	39,8	100	0,93

⁸³ Jf. energistatistik 2002. Energistyrelsen. Der ses dog bort fra opvarmning med kul og koks samt bygas, da disse opvarmningsformer kun udgør en yderst beskeden andel af det samlede nettoenergiforbrug.

1) VE indeholder solvarme, halm, brænde, træpiller og varmepumper.

Nedenfor redegøres for resultaterne af totaløkonomiske beregninger på de tiltag til reduktion af energiforbruget til rumopvarmning, der er behandlet i rapporten. Metoden til vurdering af økonomien i de forskellige tiltag (jf. kapitel 4), består i at opgøre anlægsomkostninger og sparede energiomkostninger over en periode på 30 år. Kriteriet for økonomisk rentabilitet er at det energibesparende tiltag mindst skal resultere i en neutral totaløkonomi (nuværdi ≥ 0).

I Tabel 51 er vist resultater for forskellige isoleringstiltag. Det ses at tiltagene i overvejende grad er totaløkonomisk rentable for alle økonomiske scenarier (positive nuværdier). Det ses at afkastet på investeringen (besparelsen ift. anlægsomkostningen) ved nuværende privatøkonomiske forhold mht. energipris og realrente (scenarie P1), er betydelig for de fleste tiltag. Ved en dobbelt så høj energipris (scenarie P2) er besparelsen meget markant, hvilket naturligvis også gælder for de bæredygtige scenarier B1 og B2, hvor der er regnet med en real kalkulationsrente på 0.

Tabel 51. Totaløkonomiske besparelser over 30 år ved efterisoleringstiltag.

Eksisterende isolering [mm]	Efterisolering [mm]	Anlægs- omkostning [kr/m2]	Besparelser over 30 år. [kr/m2]			
			P1	P2	B1	B2
Etageadskillelse						
0	100	155	1260	2662	1924	3933
0	150	183	1366	2899	2097	4295
Skunk						
0	300	254	1812	3856	2791	5721
0	250	210	1837	3867	2794	5703
0	200	170	1830	3816	2753	5600
50	250	254	366	965	718	1577
100	200	254	103	439	342	823
Skråvæg						
0	125	279	1599	3453	2505	5163
0	225	550	1497	3497	2565	5432
0	325	719	1400	3459	2556	5507
125	225	271	-44	161	144	437
Gitterspær						
50	250	180	346	857	634	1366
50	350	280	284	824	620	1395
100	300	230	111	432	334	794
Fladt tag						
50	130	495	-132	189	188	649
Krybekælderdek						
0	100	175	730	1621	1180	2457
Kælderydervæg indv.						
0	50	350	278	877	666	1524
0	90	450	318	1048	799	1846
Terrændæk (strøgulv)						
0	50	83	206	488	358	762

Det fremgår af Tabel 52 at der ikke overraskende er god økonomi i efterisolering af uisolerede varmerør og ventiler i uopvarmede kældre. Besparelserne er over 10 gange større end investeringen for scenarie P1, og endnu større for de andre scenarier.

Tabel 52. Totaløkonomiske besparelser over 30 år ved efterisolering af varmerør og reguleringsventiler.

Eksisterende isolering [mm]	Efterisolering [mm]	Anlægs- omkostning [kr/m]	Besparelser over 30 år.			
			P1	P2	B1	B2
Varmerør 1"						
0	30	86	1246	2590	1840	3765
Varmerør 2"						
0	60	169	2802	5796	3264	8412
Reguleringsventil			[kr pr. stk]			
0	Støbt kappe	180	1987	4177	2960	6099

I Tabel 53 er der vist priser på udskiftning af ruder i almindelige 1-fags vinduer uden sprosser. Der er regnet både på det tilfælde hvor ruden skiftes alene af hensyn til at opnå en energibesparelse, og det tilfælde hvor ruden er moden for udskiftning, og hvor det er billigt at vælge en energirude frem for en almindelig termorude. Beregningerne viser at totaløkonomien i en rudeudskiftning er særdeles gunstig i forbindelse med en nødvendig udskiftning, og at en "tvungen" udskiftning kun er rentabel for det bæredygtige scenarie B2.

Tabel 53. Totaløkonomiske besparelser over 30 år ved rudeudskiftning.

Tiltag	Anlægs- omkostning [kr/m ²]	Besparelser over 30 år.			
		P1	P2	B1	B2
Udskiftning af termorude med energirude med "varm" rudekant. (fuld pris)	1510	-1865	-891	-738	657
Udskiftning af termorude med energirude med "varm" rudekant. (kun merpris)	300	800	1773	1531	2926

Ovenstående betragtning gælder også udskiftning af hele vinduer, hvor der for en minimal merpris eller slet ingen kan fås vinduer med energiruder. Bedre rudeløsninger er en mulighed ved vinduesudskiftning, men som markedet ser ud for nuværende, er det ikke økonomisk rentabelt (se i øvrigt under nybyggeri).

Ved renovering af ældre ejendomme med enkeltglasvinduer er spørgsmålet ofte om vinduerne skal bevares og istandsættes og opgraderes energimæssigt med forsatsenergiglas eller om der skal monteres nye energirigtige vinduer i den oprindelige stil. Prisen for renoveringsløsningen afhænger meget af vinduernes stand mm, men typisk koster det det samme at renovere sammenlignet med nye vinduer, og de energimæssige egenskaber vil omtrent være ens. De afgørende parametre bliver dermed levetiden og vedligeholdelsesomkostningerne. Der er for nyligt lavet detaljerede totaløkonomiske beregninger og sammenligninger af istandsatte dannebrogsvinduer og tilsvarende nye vinduer⁸⁴. I beregningerne er medtaget anlægs-, vedligeholdelses- og skrotningsudgifter samt energimæssige forhold, og der er regnet på forskellige scenarier med hensyn til levetider og realrente. Hovedkonklusionen på beregningerne er at de totaløkonomiske omkostninger er betydeligt lavere ved istandsættelse af oprindelige vinduer.

Resultater af beregninger på de tre eksempelbygninger fremgår af Tabel 54. Der er især regnet på økonomien i udvendig efterisolering af ydervægge, der er et effektiv energibesparende tiltag i forbindelse med renovering. En udvendig facadeefterisolering udføres typisk af andre

⁸⁴ jf. artikel skrevet af Thomas Kampmann for Grundejernes Investeringsfond.

grunde end for at spare energi (f.eks. skimmelsvamp og/eller en utidssvarende/nedslidt regnskærm), og til et typisk niveau på 100 mm. Der kan derfor argumenteres for at energibesparelsen er en sidegevinst, der er gratis! Det vil i øvrigt i forbindelse med renovering være forholdsvis billigt at etablere ekstra isolering, men den energimæssige effekt er dog beskeden ift. effekten af de første 100 mm. Det er antaget i beregningerne at energibesparelsen tillægges den fulde anlægsomkostning (ekskl. stilladsomkostninger), hvilket må betragtes som en relativt konservativ forudsætning.

Beregningerne viser at totaløkonomien stort set er neutral for boligblokken i beton (100 mm efterisolering), når det privatøkonomiske scenarie P1 betragtes, mens besparelsen er betydelig ved de tre andre scenarier. Dette vel og mærke under betragtning af at efterisoleringen kun udføres for at spare energi, hvilket som nævnt ikke typisk er den primære årsag til efterisoleringens udførelse. En merisolering er rentabel for alle scenarier med undtagelse af scenarie P1. For økonomien i efterisolering af den murede boligblok, kan konkluderes omtrent det samme.

For parcelhuset er en facadeefterisolering på 150 mm ikke umiddelbart rentabel for de privatøkonomiske scenarier, når udgangspunktet er en isoleret hulmur, men økonomien er naturligvis væsentligt bedre når udgangspunktet er massiv letbeton. Tiltaget er dog stort set rentabelt, når de bæredygtige scenarier betragtes.

Det skal bemærkes at udvendig facadeefterisolering, som en positiv sidegevinst, typisk forøger bygningens værdi betragteligt (arkitektonisk, holdbarhedsmæssigt osv.). Dette gælder f.eks. ikke efterisolering af et loft. Det er umiddelbart meget svært at gøre denne værdi op i kr. og øre, men effekten bør tillægges betydelig værdi ved beslutninger om facaderenovering.

Efterisolering af parcelhusets loft giver anledning til besparelser for alle scenarier. "Tvungen" udskiftning af de eksisterende termoruder med energiruder er ikke rentabelt for scenarie P1 svarende til nuværende privatøkonomiske forhold, men er rentabelt for de øvrige scenarier. Hvis ruderne alligevel skal skiftes ser økonomien væsentligt bedre ud, jf. tidligere. Det fremgår også at det naturligvis ikke er rentabelt at udskifte samtlige vinduer/døre i huset alene af hensyn til at nedbringe varmeregningen. Hvis vinduet alligevel skal skiftes vil det næsten altid være totaløkonomisk fordelagtigt at vælge en bedre energimæssig standard.

Beregninger på efterisolering af installationerne i en typisk boligblok viser en stor besparelse. Investeringen er ved nuværende økonomiske forhold tjent hjem over to gange.

Tabel 54. Totaløkonomiske besparelser over 30 år for eksempelbygninger.

Tiltag	Anlægs- omkostning [kr/m ²]	Besparelser over 30 år. [kr/m ²]			
		P1	P2	B1	B2
Boligblok i betonelementer					
Facadeefterisolering 100 mm	1760	-25	1563	853	3584
Ekstra 50 mm	175	-51	59	29	218
Ekstra 100 mm	349	-137	45	17	331
Boligblok med hulmur					
Facadeefterisolering 150 mm	1900	-266	1209	1069	3183
Ekstra 50 mm	194	-127	-76	-33	40
Parcelhus fra 60'erne					
Facadeefterisolering 150 mm ¹⁾	1676	-954	-372	-88	746
Ekstra 50 mm	65	-30	0	7	49
Facadeefterisolering 150 mm ²⁾	1676	-353	830	774	2469
Ekstra 50 mm	65	-13	33	30	97
Efterisolering gitterspær ³⁾	333	67	439	350	883
Nye energiruder ⁴⁾	995	-662	358	326	1788
Nye trævinduer med energiruder	2393	-2201	-1181	-984	478
Typisk boligblok					
Efterisolering af installationer ⁵⁾	230	530	1263	879	1928

¹⁾ Hulmur med 75 mm isolering.

²⁾ Massiv letbetonmur.

³⁾ 300 mm - eksisterende isolering på 100 mm.

⁴⁾ Eksisterende termoruder.

⁵⁾ Mangelfuld isolering, opdatering til isoleringskrav. Besparelser er i tusinde kr.

I Tabel 55 er vist totaløkonomien i mekanisk ventilation med varmegenvinding. Der er medregnet omkostninger til anlæg, drift- og vedligeholdelse og elforbrug. El-forbruget er afgørende for økonomien, og er normalt 7 KWh/m²/år, men kan omtrent nedsættes til 3 KWh/m²/år ved en hensigtsmæssig udformning og valg af komponenter. Der er regnet med begge elforbrug. Beregningerne viser at det ikke er rentabelt at anvendes varmegenvinding i enfamiliehus ved et typisk elforbrug på 7 kWh/m². Økonomien forbedres dog væsentligt ved et lavere elforbrug. For etageboliger er varmegenvinding overvejende rentabelt, og især er der god økonomi i at vælge varmegenvinding frem for et mekanisk udsugningsanlæg, når der alligevel skal etableres kanaler mm.

Mekanisk ventilation med varmegenvinding vil alt andet lige medføre et bedre indeklima, der er en væsentlig positiv sidegevinst, og som skal med i en samlet vurdering af tiltaget.

Tabel 55. Totaløkonomiske besparelser over 30 år ved mekanisk ventilation med varmegenvinding på 90 % og luftskifte på 0,5 h⁻¹.

Referenceanlæg	Anlægs- omkostning [kr./m ²]	Besparelser over 30 år ved elforbrug på 7 kWh/m ² /år. [kr./m ²]				Besparelser over 30 år ved elforbrug på 3 kWh/m ² /år. [kr./m ²]			
		P1	P2	B1	B2	P1	P2	B1	B2
Enfamiliehus - naturlig vent.	300	-336	-155	-186	75	-190	138	24	495
Etageboliger - naturlig vent.	137,5	-51	131	52	312	96	424	262	732
Etageboliger - mek. udsug.	50	222	531	365	809	295	678	470	1019

5.1.2 Samfundsøkonomisk

Den samfundsøkonomiske situation beregnes for de typiske renoveringstiltag i form af CO₂-omkostninger med udgangspunkt i metoden beskrevet i kapitel 4.

Omregning af varmebesparelser til økonomiske besparelser og reduktion i CO₂ udledning foretages på baggrund af oplysninger om CO₂-indholdet og ressourceindholdet i de forskellige opvarmningsformer. For olie og naturgas er disse oplysninger umiddelbart tilgængelige (energistyrelsens brændselsprisforudsætninger, febr. 2003), mens det er mere kompliceret for el og fjernvarme. Hvis det antages, at energibesparelsen medfører en samtidig reduktion i den danske produktion af el og fjernvarme, er det dog muligt at få et bud på CO₂-indhold og sparede ressourceomkostninger forbrug forbundet med energibesparelsen ud fra modellen RAMSES (energistyrelsen detaljerede model for forsyningssektoren). Dette er gjort i forbindelse med rapport om analyser på energiområdet⁸⁵. Anvendte data for energiforsyningen er vist i Tabel 56.

Tabel 56. Anvendte data for energiforsyningen. CO₂-, SO₂- og NO_x-emissioner og samfundsøkonomiske priser er gennemsnitlige værdier for 30 års perioden (2004-2033)

	Pris	CO ₂ - emission	Virkningsgrad	SO ₂	NO _x
	[kr/kWh]	[kg/kWh]	[-]	[kg/MWh]	[kg/MWh]
Olie	0,186	0,266	0,80	0,083	0,187
Naturgas	0,113	0,206	0,80	0	0,108
Fjernvarme	0,087	0,139	2,00 ⁸⁶	0,26	0,34
EL	0,243	0,691	0,38	0,24	0,83

Sidegevinster i form af reduceret SO₂-udledning og NO_x-udledning er indregnet i forbindelse med regeringens nye klimastrategi, men værdien af gevinsterne er samtidig reduceret i forhold til tidligere beregninger, så de nu er 10 kr/kg for SO₂ og 14,5 kr/kg for NO_x. Den konservative værdifastsættelse betyder højere CO₂-omkostninger. Der er skiftet metode således at værdierne fastsættes til de alternative renseomkostninger (afgifter). Metodeskiftet er ikke uddybende diskuteret i klimastrategien.

Med baggrund i beskrivelsen i kapitel 4 regnes der som udgangspunkt på 3 scenarier mht. rente og indregning af restværdi af investeringer der har en levetid udover de 30 år. De tre scenarier fremgår af Tabel 57. Forudsætningen "ingen afskrivning" i scenarie 3 benyttes kun når der regnes på isoleringsmæssige tiltag.

Tabel 57. Tre samfundsøkonomiske scenarier for hvilke der beregnes CO₂-omkostninger.

	Scenarie 1	Scenarie 2	Scenarie 3
Rente [pct./år]	6	3	0
Afskrivning	lineær	lineær	ingen

⁸⁵ En omkostningseffektiv opfyldelse af DK's reduktionsforpligtigelse – Dokumentation af fremskrivning og analyser på energiområdet. Energistyrelsen / Økonomi- og erhvervsministeriet. Febr. 2003. Jf. tabel 4.3.2 og tabel 4.4.13.

⁸⁶ I 2001 indførtes CO₂ kvoter på elproduktion for de største aktører på markedet, og en strafafgift på 40 kr. pr. ton CO₂ ved overskridelse. Fjernvarmesiden holdes uden for kvoteordningen. For kraftvarmeværker henregnes en vis del af brændslet (og dermed CO₂-udledningen) til varmesiden. Andelen af brændsel til varmeproduktion på et kraftvarmeværk beregnes som varmeproduktionen divideret med 2 (hvilket afspejler en beregningsteknisk virkningsgrad på 200 pct.). Formålet hermed er at bevare incitamentet til kraftvarmelevering.

I Tabel 58 er vist resultater af CO₂-beregninger på efterisoleringstiltag. Under forudsætning af at der fyres med naturgas fås ganske fornuftige reduktionsomkostninger.

Tabel 58. CO₂-omkostninger ved efterisoleringstiltag.

Eksisterende isolering [mm]	Efterisolering [mm]	CO ₂ -omkostning, naturgas [kr/ton]			CO ₂ -omkostning, fjernvarme [kr/ton]		
		Scen. 1	Scen. 2	Scen. 3	Scen. 1	Scen. 2	Scen. 3
Etageadskillelse							
0	150	-117	-348	-651	121	-271	-786
Skunk							
0	300	-97	-337	-651	158	-250	-786
Skråvæg							
0	325	854	205	-651	1833	702	-786
Gitterspær							
50	250	867	202	-651	1855	714	-786
Krybekælderdek							
0	100	209	-163	-651	695	55	-786
Terrændæk (strøgulv)							
0	50	623	73	-651	1426	470	-786
Varmerør 1"							
0	30	-351	-482	-651	-291	-505	-786
Reguleringsventil							
0	Støbt kappe	-275	-438	-651	-156	-429	-786

I Tabel 59 er vis resultater for efterisolering af eksempelbygninger. De beregnede reduktionsomkostninger på 2000 – 5000 kr/ton er beregnet under forudsætning af efterisoleringen alene foretages af hensyn til at opnå en energibesparelse, idet den fulde anlægsomkostning indregnes. Dette er dog, som omtalt tidligere i rapporten, sjældent tilfældet at det primære formål at spare energi. Hvis det antages at udgiften for at etablere 200 mm facadeefterisolering kun er udgiften til at øge isoleringstykkelse fra det normale niveau (normal isoleringstykkelse og de medfølgende energibesparelser er ”gratis”), kan naturligvis beregnes reduktionsomkostninger på et helt andet lavt niveau.

Tabel 59. CO₂-omkostninger for efterisolering af eksempelbygninger.

Tiltag	CO ₂ -omkostning, naturgas [kr/ton]			CO ₂ -omkostning, fjernvarme [kr/ton]		
	Scen. 1	Scen. 2	Scen. 3	Scen. 1	Scen. 2	Scen. 3
Boligblok i betonelementer						
Facadeefterisolering 100 mm ¹⁾	5236	2698	-651	-	-	-
Facadeefterisolering 200 mm ²⁾	420	-43	-651	1067	267	-786
Boligblok med hulmur						
Facadeefterisolering 150 mm ¹⁾	4825	2465	-651	-	-	-
Facadeefterisolering 200 mm ²⁾	-97	-331	-651	175	-334	-786
Parcelhus fra 60'erne						
Facadeefterisolering 200 mm ³⁾	10933	5941	-651	-	-	-
Facadeefterisolering 200 mm ⁴⁾	5155	2653	-651	-	-	-

¹⁾ Indregning af fuld pris for efterisolering (normal isoleringstykkelse).

²⁾ Kun indregning af merudgift for ekstra isolering, (normal isoleringstykkelse er ”gratis”).

³⁾ Hulmur med 75 mm isolering.

⁴⁾ Massiv letbetonmur.

Det fremgår af Tabel 60 at der er små reduktionsomkostninger forbundet med at vælge et mekanisk ventilationsanlæg med varmegenvinding frem for et mekanisk udsugningsanlæg i forbindelse med renovering af etageboliger. Til gengæld er det ikke overraskende forbundet med

betydelige omkostninger at etablere varmegenvinding når referencen er naturlig ventilation, hvilket især skyldes store anlægsomkostninger, som dog sandsynligvis kan reduceres væsentligt ved større udbredelse. Mekanisk ventilation med varmegenvinding sikrer alt andet lige et godt og væsentligt bedre indeklima end naturlig ventilation, men da det er meget vanskeligt at kapitalisere denne effekt, er den ikke indregnet. Der er dog ingen tvivl om at effekten er meget væsentlig og man skal derfor være meget varsom med at sammenligne de to ventilations typer.

Tabel 60. CO₂-omkostninger ved mekanisk ventilation med varmegenvinding på 90 % og luftskifte på 0,5 h⁻¹ samt to forskellige elforbrug.

Referenceanlæg	CO ₂ -omkostning, naturgas [kr/ton]			CO ₂ -omkostning, fjernvarme [kr/ton]		
	Scen. 1	Scen. 2	Scen. 3	Scen. 1	Scen. 2	Scen. 3
Elforbrug på 7 kWh/m ² /år						
Enfamiliehus - naturlig ventilation	10854	7133	3843	-	-	-
Etageboliger - naturlig ventilation	4668	2872	1274	-	-	-
Etageboliger - mekanisk udsugning	301	-6	-295	1666	797	16
Elforbrug på 3 kWh/m ² /år						
Enfamiliehus - naturlig ventilation	4783	3174	1668	-	-	-
Etageboliger - naturlig ventilation	1935	1149	408	-	-	-
Etageboliger - mekanisk udsugning	144	-94	-323	731	265	-173

5.2 Nybyggeriet

5.2.1 Privatøkonomisk

Der er foretaget beregning af totaløkonomien i de optimale isoleringsløsninger. Derudover er beregnet økonomien i energimæssigt bedre vinduer og mekanisk ventilation med varmegenvinding mm.

De totaløkonomiske beregninger præsenteres for hver bygningsdel i et diagram i bilag 4, der viser den totaløkonomiske besparelse over 30 år for forskellige isoleringstykkelser og scenarier for rente og energipris. Besparelsen er opgjort i forhold til det nuværende isoleringsniveau givet ud fra krav til U-værdien i bygningsreglement 1995. Den isoleringstykkelser, der giver den største besparelse, er den optimale. Hvis optimum er større end BR95-niveau, kan man finde den omtrentlige isoleringstykkelser, der giver samme totaløkonomi som BR95. Denne isoleringstykkelser vil være større end den optimale, og koster totaløkonomisk set det samme som dagens isoleringsniveau. Man kan kalde denne isoleringstykkelser for isoleringstykkelser svarende til neutral investering.

Det fremgår af Tabel 61, at den optimale isoleringstykkelser i specielt ydervægge er betydeligt større end dagens isoleringsniveau. Betragter man de bæredygtige scenarier B1 og B2, er de optimale isoleringstykkelser for alle bygningsdele væsentligt større end i dag.

Tabel 61. Optimal isoleringstykkelse (mm) for fire scenarier vedr. energipris og realrente.

Scenarie	BR95	P1	P2	B1	B2
Energipris, Kr/kWh	-	0,6	1,2	0,6	1,2
Realrente, %	-	2,5	2,5	0	0
Tung ydervæg	125	200-250	250-325	250-325	>400
Let ydervæg	200	250-300	325-350	325-350	>400
Løft (gitterspær)	250	300-350	425-525	500-600	>600
Terrændæk uden gulvvarme	125	150-200	200-250	250-300	>400
Terrændæk med gulvvarme	200	200-250	300-400	>400	>400
Varmerør (1'')	30	75-100	>150	>150	>150
Varmerør (2'')	50	100-150	>150	>150	>150

Tabel 62 viser at man generelt skal meget langt op i isoleringstykkelse før totaløkonomien bliver dårligere end svarende til BR95 niveau.

Tabel 62. Omtrentlig isoleringstykkelse (mm) svarende til neutral investering (samme totaløkonomi som BR95).

Scenarie	BR95	P1	P2	B1	B2
Energipris, Kr/kWh	-	0,6	1,2	0,6	1,2
Realrente, %	-	2,5	2,5	0	0
Tung ydervæg	125	350 - >400	>400	>400	>400
Let ydervæg	200	350	>400	>400	>400
Løft (gitterspær)	250	400	>600	>600	>600
Terrændæk uden gulvvarme	125	175	400	>400	>400
Terrændæk med gulvvarme	200	>400	>400	>400	>400
Varmerør (1'')	30	>150	>150	>150	>150
Varmerør (2'')	50	>150	>150	>150	>150

Både størrelsen af de optimale isoleringstykkelser og isoleringstykkelserne svarende til neutral investering 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 (og varmerør) være forberedt for den fremtidige potentielle energisituation og bidrage til en bæredygtig udvikling.

Resultater for beregninger på energimæssigt bedre vinduesløsninger er vist i Tabel 63. Det ses at energivinduet med smal ramme-karm, jernfrit glas og varm rudekant giver anledning til betydelige besparelser, mens økonomien i løsninger med flere lag glas end to ikke er attraktiv med de nuværende priser, selv hvis disse rudeløsninger benyttes mod nord, hvor de er mest effektive.

Tabel 63. Totaløkonomiske besparelser over 30 år for vinduer med bedre varmetekniske egenskaber.

Vinduesløsning	Anlægs- omkostning [kr./m ²]	Besparelser over 30 år.			
		[kr./m ²]			
		P1	P2	B1	B2
Traditionelt trævindue	0	0	0	0	0
Energivinduet	144	161	638	415	1099
Vindue med 3 lags energirude ¹⁾	590	-709	-118	-260	586
Vindue med 1+2 energirude ¹⁾	433	-400	153	-19	773

¹⁾ Vindue antaget nordvendt.

5.2.2 Samfundsøkonomisk

I dette afsnit redegøres for beregninger af CO₂-omkostninger for de to enfamiliehuse med nye typer løsninger, der er omtalt i afsnit 3.7.1, samt bedre vinduer. Det ene hus (hus A) har som nævnt et opvarmningsbehov svarende til ca. 50 % af den nugældende energiramme, mens det andet hus (hus B) har et varmebehov på 33 % af energirammen.

Tabel 64. CO₂-omkostninger for naturgasopvarmede enfamiliehuse med beregnede nettovarmebehov på hhv. 36 og 26 kWh/m² sammenlignet med huse bygget efter nuværende energibestemmelser (78 kWh/m²).

	CO ₂ -omkostning [kr/ton]		
	Scenarie 1	Scenarie 2	Scenarie 3
Hus A, naturgas	597	294	2
Hus A, fjernvarme	851	471	106
Hus B, naturgas	2648	1438	24
Hus B, fjernvarme	4531	2557	268

CO₂-omkostningen er lille for hus A. Dette skyldes primært at referencehuset har brugsvandsvarmepumpe (og dermed et stort elforbrug) samt at der er indregnet et fradrag for fjernelse af referencehusets karnapper. De energibesparende tiltag i Hus B har høje CO₂-omkostninger, dog med undtagelse af scenarie 3.

I Tabel 65 er vist CO₂-omkostninger for energimæssigt bedre vinduer. Ikke overraskende er omkostningerne fornuftige for energivinduet og relativt høje for de andre løsninger.

Tabel 65. CO₂-omkostninger for vinduer med bedre varmetekniske egenskaber.

Vinduesløsning	CO ₂ -omkostning, naturgas [kr/ton]			CO ₂ -omkostning, fjernvarme [kr/ton]		
	Scenarie 1	Scenarie 2	Scenarie 3	Scenarie 1	Scenarie 2	Scenarie 3
Traditionelt trævindue	-	-	-	-	-	-
Energivinduet	1291	832	379	2070	1328	510
Vindue med 3 lags energirude	5715	4215	2866	-	-	-
Vindue med 1+2 energirude	4346	3193	2096	-	-	-

6 Rentabelt varmebesparelspotentiale

Med henblik på opgørelse af det rentable energibesparelspotentiale er der behov for at kende boligmassens stand. I den forbindelse er data stillet til rådighed som aggregerede data fra projektet på By og Byg (omtalt i forordet). Der foreligger data fra BBR og Energimærkningsordningen (EM)⁸⁷. Disse er sorteret på 7 tidsperioder (fastlagt ud fra dels byggeskik og bygningsreglementer), hovedtyper af bygninger mm. Bygningstyper er etageboliger, parcelhuse, rækkehuse, stuehuse og kollegier. Datagrundlag for BBR-data er den samlede boligbestand i DK pr. juni 2003 (1,4 mio. bygninger) og EM-data er baseret på energimærker udstedt i forbindelse med salg af bygninger i perioden januar 1998 til juni 2002 (inkl.). Varmeforbrugsdata er ikke udtrukket, da de utvivlsomt ikke repræsenterer et udsnit, som er generelt dækkende for DK. I stedet for benyttes Energistyrelsens energistatistik som dækker hele landet.

De 7 ovennævnte tidsperioder defineres som følgende:

Periode	År
P1	- 1930
P2	1931 – 1950
P3	1951 – 1960
P4	1961 – 1972
P5	1973 – 1978
P6	1979 – 1998
P7	1998 – 2003

I forbindelse med opgørelse af et varmebesparelspotentiale er det vigtigt at være opmærksom på at daglig adfærd vedrørende indetemperatur, udluftning osv. kan have stor betydning for varmekonsumet. Det samme gælder udviklingen i det samlede bygningsareal. Desuden er renoveringstakten for den eksisterende bygningsmasse af væsentlig betydning, idet det er afgørende om der implementeres en strategi/virkemiddel som stimulerer gennemgribende renoveringer i stedet for spredte tiltag; en satsning på høj fremtidssikret standard for efterisolering og andre varmebesparelser er afgørende. Derudover skal nævnes apparaters elforbrugsbidrag til opvarmning, som må forventes at blive nedsat, da varmebesparelser og elbesparelser hænger sammen.

Vurdering af det rentable varmebesparelspotentiale foregår i 4 trin:

1. Vurdering af tekniske muligheder for rentable varmebesparelser i nye og eksisterende boliger.
2. Opgørelse af boligmassens nuværende stand (volumenmæssigt og varmeteknisk).
3. Vurdering af udviklingen i nybebyggelse, nedrivning og renovering (volumenmæssigt og varmeteknisk).
4. Vurdering af potentialet baseret på pkt. 1, 2 og 3.

De tekniske muligheder for energibesparelser og økonomien i disse er beskrevet i det foregående. I det følgende foretages der derfor først en opgørelse af boligmassens nuværende stand,

⁸⁷ BBR oplysninger er opførelsesår, ombygningsår, ydervægs- og tagtype, varmesystem, varmemiddel, suppleringsvarme, boligareal og bebygget areal, mens EM giver oplysninger om opførelsesår, type bygningsdel (ydervæg, gulv, loft, vindue osv), U-værdi, areal og b-faktor samt en kort beskrivelse af bygningsdele i få ord.

og derefter vurderes udviklingen i nybyggeri, nedrivning og renovering samt varmebehov. Slutteligt vurderes det rentable potentiale for varmebesparelser i perioden frem til 2050.

6.1 Udvikling i boligmasse

Der redegøres for den nuværende boligmasse, nybebyggelse og renovering. På denne baggrund vurderes den fremtidige udvikling i nybyggeri, nedrivning og renovering frem til 2050.

I bilag 5 findes detaljerede data på den eksisterende boligmasse i form af antal bygninger, boligerarealer, væg-/tagtype, varmesystem og varmemiddel mm. I dette afsnit vises udvalgte tabeller og der redegøres for de overordnede tendenser.

6.1.1 Nuværende boligmasse

Udviklingen i boligmassen baseres som udgangspunkt på data for den nuværende boligbestand. Det ses af Tabel 66 nedenfor at der i den danske boligmasse findes 275 mio. etage m² (ekskl. kælderareal), hvoraf etageboliger udgør ca. 25 %, mens enfamiliehuse udgør ca. 75 %. Antallet af boliger er omkring 2,5 mio. og det gennemsnitligt boligareal er ca. 110 m².

Tabel 66. Boligareal fordelt på bygningstype og opførelsesperioder.

	Tidsperiode 1 - 7							I alt/1000
	1 1000-1930	2 1931-1950	3 1951-1960	4 1961-1972	5 1973-1978	6 1979-1998	7 1998-2003	
Etageboliger	23.450	14.082	7.568	13.546	4.317	7.632	877	71.472
Parcelhuse	31.104	15.437	12.373	50.424	21.858	17.340	2.684	151.219
Rækkehuse	3.619	1.827	2.114	4.482	3.679	12.747	1.181	29.648
Stuehuse	16.484	2.153	742	797	634	951	163	21.924
Kollegier	104	61	73	416	98	241	36	1.029
I alt/1000	74760	33561	22869	69665	30586	38910	4940	275292

I Tabel 67 og Tabel 68 er opgjort arealer og antal bygninger for etageboliger og parcelhuse⁸⁸, som udgør den helt overvejende del af danske boliger (80 %). Det fremgår at langt hovedparten af etageboligerne er fra før 1973 (75 % af det samlede boligareal), dvs. fra før den første oliekrise, hvor varmeisoleringen var sparsom. Det ses også at det gennemsnitlige boligareal pr. enhed er markant højere i perioden 61-78, hvilket bl.a. er et udtryk for periodens omfattende ”kransporsbyggeri” af lange boligblokke i betonelementer.

⁸⁸ Gns. boligareal er boligareal ift. antal bygninger, gns. bebygget areal er bebygget areal ift. antal bygninger og antal etager er bolig+erhvervsareal ift. bebygget areal. Antal bygninger er boligareal divideret med gns. boligareal.

Tabel 67. Arealer mm. Etageboliger.

	Tidsperiode 1 - 7							I alt/1000
	1	2	3	4	5	6	7	
	1000-1930	1931-1950	1951-1960	1961-1972	1973-1978	1979-1998	1998-2003	
- Antal bygninger	58	23	6	7	2	7	1	104
- Boligareal	23.450	14.082	7.568	13.546	4.317	7.632	877	71.472
- Gns. Boligareal	403	623	1.272	1.918	2.155	1.071	1.093	659
- Bebygget areal	8.050	4.497	2.474	4.123	1.527	3.051	361	24.083
- Gns. Bebygget areal	165	224	427	596	780	422	423	245
- Etager	2,56	2,55	2,77	2,96	2,73	2,47	2,60	2,59

Det fremgår af Tabel 68 at parcelhusbyggeriet er væsentligt domineret af huse fra 60'erne og 70'erne, hvor der opførtes ca. 450.000 huse svarende til 45 % af samtlige huse. Antallet af huse opført før 1960 er omtrent det samme.

Tabel 68. Arealer mm. Parcelhuse.

	Tidsperiode 1 - 7							I alt/1000
	1	2	3	4	5	6	7	
	1000-1930	1931-1950	1951-1960	1961-1972	1973-1978	1979-1998	1998-2003	
- Antal bygninger	216	120	100	345	139	117	17	1054
- Boligareal	31.104	15.437	12.373	50.424	21.858	17.340	2.684	151.219
- Gns. Boligareal	144	129	124	146	157	148	158	142
- Bebygget areal	23.297	11.527	10.912	48.946	20.727	16.770	2.769	134.948
- Gns. Bebygget areal	109	97	109	141	147	140	153	122
- Etager	1,37	1,37	1,18	1,06	1,09	1,10	1,10	1,21

I Tabel 69 er der kortfattet redegjort for hovedgrupper af parcelhuse med beskrivelse af hus-type og byggesystem mm. Husene fra før 1960 er overvejende murede huse med forsatsvinduer, mens huse opført efter 1960 hovedsageligt har såkaldte kombinationsydervægge og termoruder.

Tabel 69. Parcelhuse – hustyper mm.

Periode	Antal huse	Typer	Byggesystem, varmesystem, isoleringsstandard mm.
1860-1919	120.000	Villaer i større byers omegn, landarbejderboliger, parcelhuse i nye stationsbyer	Fuldmuret, tegltag
1920-1959	320.000	Murermesterhuse, bungalow-huse, funkishuse, statslån-huse mm.	Hulmur, forsatsvinduer, til en vis grad letbeton, kulfyret centralvarme.
1960-1979	450.000	Typehuse	Kombinationsvægge (letbeton/tegl), termoruder, isoleringskrav i 1961, olie-fyr.
1980-2003	140.000	Typehuse	Kombinationsvægge, bedre isolerende ydervægge, lavenergiruder mm., fjernvarme.

Omkring 90 % af danske boliger er opført med mursten i ydervæggen, men der er også mange massive letbetonhuse, hvoraf de fleste er parcelhuse (ca. 41.000) opført i perioden 1950 til 1970. Med hensyn til tagkonstruktioner, er de dominerende tagtyper fibercement, tegl og ce-

mentsten, mens varmesystemet i etageboliger typisk er fjernvarme (70 %), men der er fortsat en del ejendomme fra før 1950, der har eget varmeanlæg, som dog i overvejende grad formodes at have fået skiftet kedel. I enfamiliehuse er eget anlæg (50 %) eller fjernvarme (25 %) det normale.

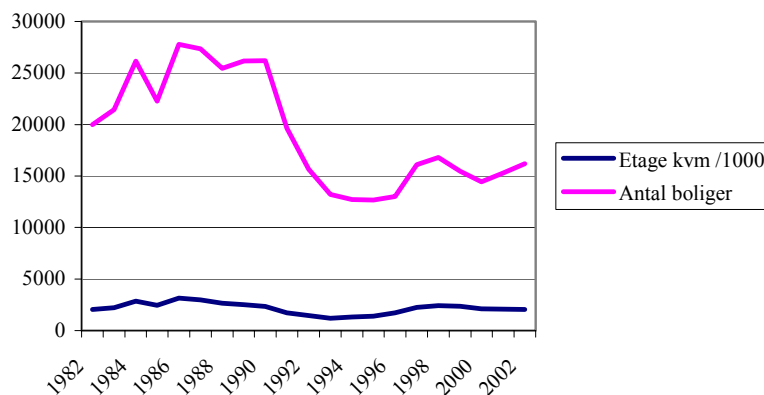
På baggrund af omtalte data fra energimærkningsordningerne, er den overordnede varmeisolering af de enkelte klimaskærmselementer blevet beregnet for de enkelte tidsperioder (se Tabel 70). Det fremgår at bygninger fra efter 1979, hvor energibestemmelserne blev væsentligt skærpet for alle bygningsdele med undtagelse af vinduer, er markant bedre isoleret end øvrige bygninger. Det fremgår også at især bygninger opført før 1950 er dårligt isoleret.

Tabel 70. Gennemsnitlige U-værdier for overordnede klimaskærmselementer.

	Tidsperiode 1 - 7							I alt
	1	2	3	4	5	6	7	
	1000-1930	1931-1950	1951-1960	1961-1972	1973-1978	1979-1998	1998-2003	
Ydervægge	1,05	1,02	0,83	0,68	0,55	0,37	0,37	0,78
Vinduer	2,95	2,98	2,89	2,80	2,78	2,52	1,56	2,79
Gulve	1,34	1,36	1,03	0,91	0,78	0,49	0,25	1,07
Lofter/tage	0,61	0,69	0,42	0,32	0,32	0,17	0,15	0,43

6.1.2 Nyt byggeri

Udviklingen i boligbyggeriet siden 1982 er vist i Figur 8. Det ses at der over de seneste år er opført omkring 16000 nye boliger om året svarende til ca. 2 – 2,4 mio. m² pr. år eller ca. 0,8 % af det samlede boligareal. Fordelingen på m² har de seneste år været 80 % enfamilie og 20 % flerfamilie.



Figur 8. Fuldførte boliger i antal og etage m² (1982 – 2002) omfattende enfamiliehuse, flerfamiliehuse, kollegier og anden helårsbeboelse (kilde: Danmarks Statistiks databank).

Nybyggeriet skal dække nettotilvæksten og den nedrevne bygningsmasse. Boligarealtilvæksten angives af Energistyrelsen til ca. 15 % i perioden 2005 til 2030, hvilket er baseret på tal fra Danmarks statistiks befolkningsprognose 2001 og Landsplanafdelingens skøn for 2001 for udviklingstendenser i befolkning, beskæftigelse og byggeri. Herudfra kan beregnes en gen-

nemsnitlig årlig tilvækst på 1,65 mio. m². Forudsat et årligt nybyggeri på 2,2 mio. m², kan nedrivningen beregnes til 0,55 mio. m².

Markedet for nybyggeri⁸⁹ vil i de kommende år være karakteriseret ved en vækst på 5 % p.a., mere boligbyggeri tilpasset ældre og unge (især mere udlejningsbyggeri til unge) og mere nybyg af enfamiliehuse, idet prisen for gamle huse er høj. Energiforbrug og -afgifter trækker også i denne retning. På trods af dette vurderes der ikke at være belæg for at regne med anden nybygningstakt end den nuværende.

6.1.3 Renovering

Renovering af bygninger består af reparation/opretning og bygningsforbedringer, hvoraf bygningsforbedringer kan opdeles i tiltag vedr. indretning, størrelse, arkitektonisk kvalitet (individuelle behov og præferencer) samt energibesparende og sundhedsfremmende tiltag. Det skal bemærkes at en påtrængende reparations- og opretningsopgave ofte vil være anledning til en samtidig forbedring og omvendt. Ved disse reparationer, udskiftninger og forbedringer, der udføres med et forholdsvis stort tidsinterval, er det vigtigt at der sikres energibesparende tiltag, da der skal ventes lang tid før næste mulighed opstår. I denne forbindelse kan der billigt vælges bedre og energibesparende løsninger end der ellers ville være blevet valgt.

Markedet for boligrenovering var i 2002 på ca. 24 mia. kr. årligt (2002)⁹⁰. I øvrigt investeres der dette år omtrent det samme i nyt boligbyggeri. Ud fra et skøn over omkostninger pr. m² for en typisk renovering kan udregnes antallet af m², der renoveres pr. år. Boligrenoveringens fordeling på forskellige boligtyper fremgår af rapport udarbejdet under Projekt Renovering⁹¹, hvor der findes tal for året 1998 (se Tabel 71). Det ses at eksempelvis renoveringsydelser i parcelhussektoren i 1998, udgjorde 60 % af den samlede boligrenovering. Der antages samme fordeling i 2002 som i 1998. Omsætningen er i øvrigt domineret af ydelser vedr. ombygning, nye vinduer, facaderenovering, tagudskiftning, efterisolering og nyt køkken/bad.

Tabel 71. Renoveringsmarkedet i kr. og m² etageareal. Konverteringen fra kr. til m² er der redegjort for nedenfor.

Boligtype	1998 Mia. kr.	2002 Mia. kr.	2002 Mio. m ²
Parcelhuse	18	14	7,5
Etageboliger	6	5	1,2
Almennyttige	2,5	2	0,5
Byfornyelse	2,5	2	0,23
I alt	29	24	9,4

Markedet for renovering af parcelhuse er påvirket meget af gør-det-selv-arbejde (løbende vedligeholdelse mm), og det er normalt at der først benyttes professionel arbejdskraft, når omfanget er over 25.000 kr. Antages det at 1/5 del af renoveringen er små-opgaver, og at håndværkerandelen for de resterende større renoveringer gennemsnitligt er i størrelsesordenen 1500 kr/m², kan der beregnes et renoveret areal på 7,5 mio. m², svarende til ca. 4 % af det samlede boligareal.

⁸⁹ jf. rapporten "Outlook for the European Construction Sector 2004-2006", The Copenhagen Institute for Futures Studies.

⁹⁰ jf. rapporten omtalt i fodnote 89.

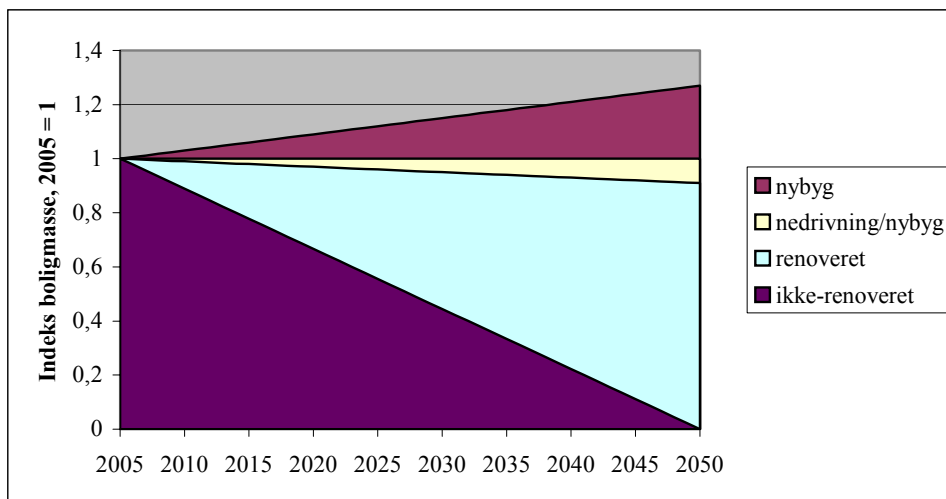
⁹¹ "Analyse af renoveringsmarkedet i DK 1990 – 2008". Projekt Renovering. By- og Boligministeriet 1998.

I udlejningsboliger og mange ejer- og andelboliger i flerfamiliehuse vil den løbende vedligeholdelse i overvejende grad blive foretaget af professionel arbejdskraft og udgør typisk 30 % for udlejningsboliger. Denne udgift fratrækkes markedsværdien før omfanget af større renoveringer bestemmes.

Renoveringsudgiften i den almennyttige boligmasse, hvor der i alt findes omtrent 500.000 boliger (heraf 75 % i flerfamiliehuse), kan man få et indtryk af på baggrund af udførte renoveringer i perioden 1979 til 2000⁹². I hele perioden har i alt ca. 95.000 boliger gennemgået en eller flere renoveringer, og den gennemsnitlige udgift er opgjort til 183.000 kr. pr. bolig (prisniveau 1999) svarende omtrent til 2300 kr/m². Wissenberg rådgivende ingeniører oplyser at en typisk renovering af betonelement-boligbyggeri, hvori de fleste almennyttige boliger findes, koster omtrent 250.000 kr. pr. lejlighed svarende til ca. 3000 kr. pr. m². I den murede bebyggelse Lundebjerg i Ballerup, der blev er omtalt i nærværende rapport, var renoveringsudgiften pr. bolig ca. 230.000 kr. Det årlige renoverede antal m² kan på denne baggrund skønsmæssigt beregnes til 0,5 mio. m², svarende til ca. 2 % af boligarealet. I byfornyelsen er udgiften pr. m² noget større end 2 – 3000 kr. og skønnes at ligge på ca. 6000 kr/m²⁹³, og herudfra vil den renoverede boligmasse udgøre 0,23 mio. m². For øvrige etageboliger skønnes den gennemsnitlige omkostning pr. m² at være som anført for almennyttige boliger. Med disse forudsætninger renoveres der altså ca. 1,2 mio. m².

Det nuværende marked for større renoveringer er ovenfor vurderet til ca. 9 mio. m² årligt, svarende til ca. 3 % af boligmassen. Dette tal er forbundet med en del usikkerhed, især vedrørende parcelhuse, som skal tages i betragtning ved vurdering af hvor stor en del af boligmassen der årligt vil kunne energirenoveres gennemgribende. Det vurderes at man vil kunne nå i størrelsesorden 6 mio. m² årligt. Forudsættes der en renoveringstakt på 5,56 mio. m² årligt (og en nedrivningstakt på 0,55 mio. m²), vil netop hele boligmassen være renoveret i år 2050.

I Figur 9 er vist en sammenfatning på vurderingen af boligmassens udvikling.



Figur 9. Diagrammet viser den skitserede udvikling i boligmassen fra 2005 og frem til 2050. I 2050 er hele den eksisterende boligmasse blevet renoveret, og 9 % er blevet revet ned og erstattet af nyt, mens det resterende nybyggeri der udgør tilvæksten i boligarealet er 27 %. I

⁹² jf. rapporten "Fysisk opretning og forbedring af almene boligafdelinger". Landsbyggefonden marts 2001.

⁹³ jf. rapporten "Bygge- og boligforhold i tal og tekst 1999/2000". By- og Boligministeriet.

2020 er 33 % af den eksisterende boligmasse i 2005 blevet renoveret, 64 % er ikke blevet forbedret, 3 % er revet ned og tilvæksten i boligarealet er 9 %.

En renoveringstakt svarende til at 5,6 mio. m² eller 2 % af boligmassen renoveres årligt, er relativt meget, men ikke usandsynligt i betragtning af at renoveringsmarkedet generelt må antages at være stigende i fremtiden. Dette skyldes især en forholdsvis gammel og utidssvarende boligmasse (f.eks. de 450.000 parcelhuse fra perioden 1960 til 1979). Men også forøgede forbrugsafgifter på energi og i øvrigt generelt større opmærksomhed på bygningers energieffektivitet må antages at få en vis effekt på renoveringsomfanget. Derudover kan nævnes at erfaringer med huseftersynsordningen viser en voksende tendens til at sælger udbedrer påviste skader før salget - eller at køber lader skaderne udbedre, idet arbejdet finansieres på grundlag af det prisnedslag, som han har opnået.

6.2 Udvikling i varmebehov

6.2.1 Eksisterende boligmasse

Det samlede nuværende nettoenergiforbrug til rumopvarmning og varmt brugsvand (nyttiggjort energi, dvs. ekskl. lokale tab), var i 2002 på 135 PJ (jf. energistyrelsens energistatistik 2002). Varmtvandsforbruget kan i gennemsnit sættes til 50 MJ/m² i boliger (svarende til 265 liter/m²/år ved opvarmning fra 10 til 55 °C). Med et samlet boligareal på 275 mio. m², kan beregnes et gennemsnitligt nettoenergiforbrug til rumopvarmning i den danske boligmasse på 123 kWh/m²/år. Det antages at den ikke-renoverede del af boligmassen har dette energiforbrug til rumopvarmning i gennem hele beregningsperioden.

6.2.2 Nybyggeri

Det nuværende bygningsreglements krav til nettovarmebehovet til rumopvarmning er for et typisk enfamiliehuse i ét plan på 280 MJ/m² = 78 kWh/m². Krav til varmebehovet i etageboliger er typisk omkring 75 % af kravet til étplanshuse ved et gennemsnitligt etageantal på ca. 2,6. Det antages at varmebehovet reduceres med 30 % i 2005 (jf. regeringen energispareredegørelse 2003), og at der implementeres yderligere skærper på 30 % i år 2010, 2015 og 2020 (se Tabel 72). Denne udvikling vil altså over 15 år reducere varmebehovet i nybyggeriet til 19 kWh/m², svarende omtrent til det tidligere omtalte "passiv house niveau" (15 kWh/m²).

Tabel 72. Den forudsatte udvikling i nettovarmebehovet til rumopvarmning (kWh/m²) for et typisk enfamiliehus.

Nuværende	2005	2010	2015	2020
78	55	38	27	19

6.2.3 Renovering

Varmebehovet i eksisterende boliger vil kunne reduceres betydeligt og rentabelt ved især udskiftning til varmeteknisk bedre vinduer, mere loftisolering, udvendig facadeeftersisolering og ventilation med varmegenvinding. De detaljerede energi- og økonomiberegninger, der er udført på bl.a. eksempelbygninger, indikerer at det allerede i dag er teknisk muligt og økonomisk rentabelt at reducere varmebehovet i typiske etageboliger fra 60'erne til ca. 20 kWh/m² og til omtrent 40 kWh/m² for et typisk parcelhus fra 60'erne. På denne baggrund og med en naturlig satsning på og udvikling af mere effektive energibesparelsesmetoder og -løsninger i forbindelse med renovering, herunder vinduer med bedre varmetekniske egenskaber, vurderes

det at være muligt at alle renoverede bygninger bringes op til gældende energikrav for nybyggeri.

6.3 Rentabelt energibesparelspotentiale

Potentialet for varmebesparelser i det eksisterende byggeri er stort. Potentialet er også stort ved nybyggeri, men på grund af nybyggeriets lille omfang og den eksisterende boligmasses lange levetid, vil et reduceret varmebehov kun have en ringe effekt på det samlede energiforbrug til rumopvarmning inden for en overskuelig fremtid. Der er foreslået varmebesparelser i den eksisterende boligmasse svarende til gældende krav til nybyggeriet, og de detaljerede varme- og økonomiberegninger understøtter at dette er teknisk muligt og økonomisk fornuftigt. Større renoveringer er som nævnt forestående i en stor del af den danske bygningsmasse, hvor især den volumenmæssigt store del fra 1960/70'erne, står over for renovering af de tunge bygningsdele og opdatering til nutidig standard.

På baggrund af de omtalte antagelser vedrørende udviklingen i boligmassen og energiforbruget til rumopvarmning, kan beregnes, hvor meget boligmassens gennemsnitlige rumvarmebehov kan forventes at blive reduceret i perioden frem til 2050. Resultaterne fremgår af Tabel 73, idet det er antaget at hele den eksisterende boligmasse enten skiftes ud med nyt eller energirenoveres gennemgribende (jf. Figur 9). Tilvæksten i boligarealet er i perioden på 27 %.

Tabel 73. Udvikling i boligmassens nettoenergiforbrug til rumopvarmning⁹⁴.

År	PJ/år	reduktion i %	kWh/m ² /år	reduktion i %
2005 ¹⁾	122	0	123	0
2020	86	-30	80	-35
2030	71	-42	63	-49
2050	22	-82	18	-85

¹⁾ Baseret på energistatistik 2002.

Det ses at varmebehovet i boligmassen vil være reduceret med 42 % i 2030, hvis de foreslåede besparelser gennemføres. Reduktionen i 2050 vil naturligvis være større og varmebehovet på dette tidspunkt vil kun være ca. 20 % af det nuværende.

⁹⁴ Det skal bemærkes at det er reduktionen i nettoenergiforbruget der betragtes, dvs. at der er set bort fra lokale ikke-nyttiggjorte varmetab, som finder sted hos forbrugerne (f.eks. i fyret). Disse tab er i øvrigt blevet reduceret betragteligt de seneste 20 år og udgjorde iht. energistatistikken 14 % af det samlede bruttoenergiforbrug til opvarmning.

Bilag 1: Lundebjerg (Ballerup).

Bebyggelsen Lundebjerg er opført i perioden 1961-1964 og består af 486 boliger i 14 boligblokke, alle med 3 etager. Renovering af bebyggelsen blev udført i årene 2001-2003. Entreprisesummen var kr. 111 mio. kr.

Renoveringen omfattede i hovedtræk følgende:

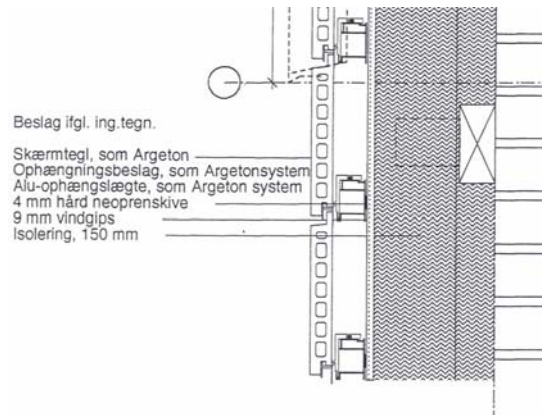
- Isolering på facader med udvendig ny regnskærm.
- Udskiftning af vinduer.
- Altanlukningspartier.
- Udestuer i stueetagelejligheder med terrasse.
- Montering af nye ovenlys i trappeskakte.
- Forstærkning af tagkonstruktion.
- Nye radiatorer og nye forsyningsledninger.
- Udsugningsventilationsanlæg.
- Nye tagrender og afløb inkl. supplerende tagdækning.



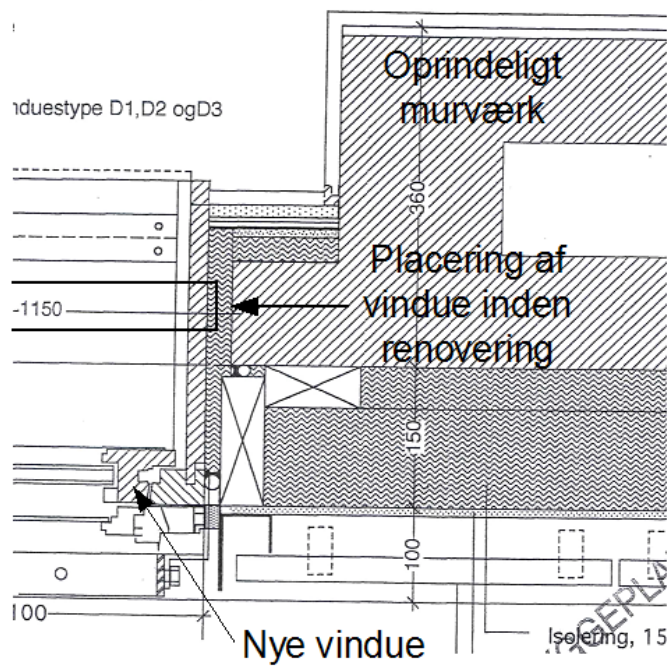
Lundebjerg inden renoveringen.



Lundebjerg efter renoveringen.

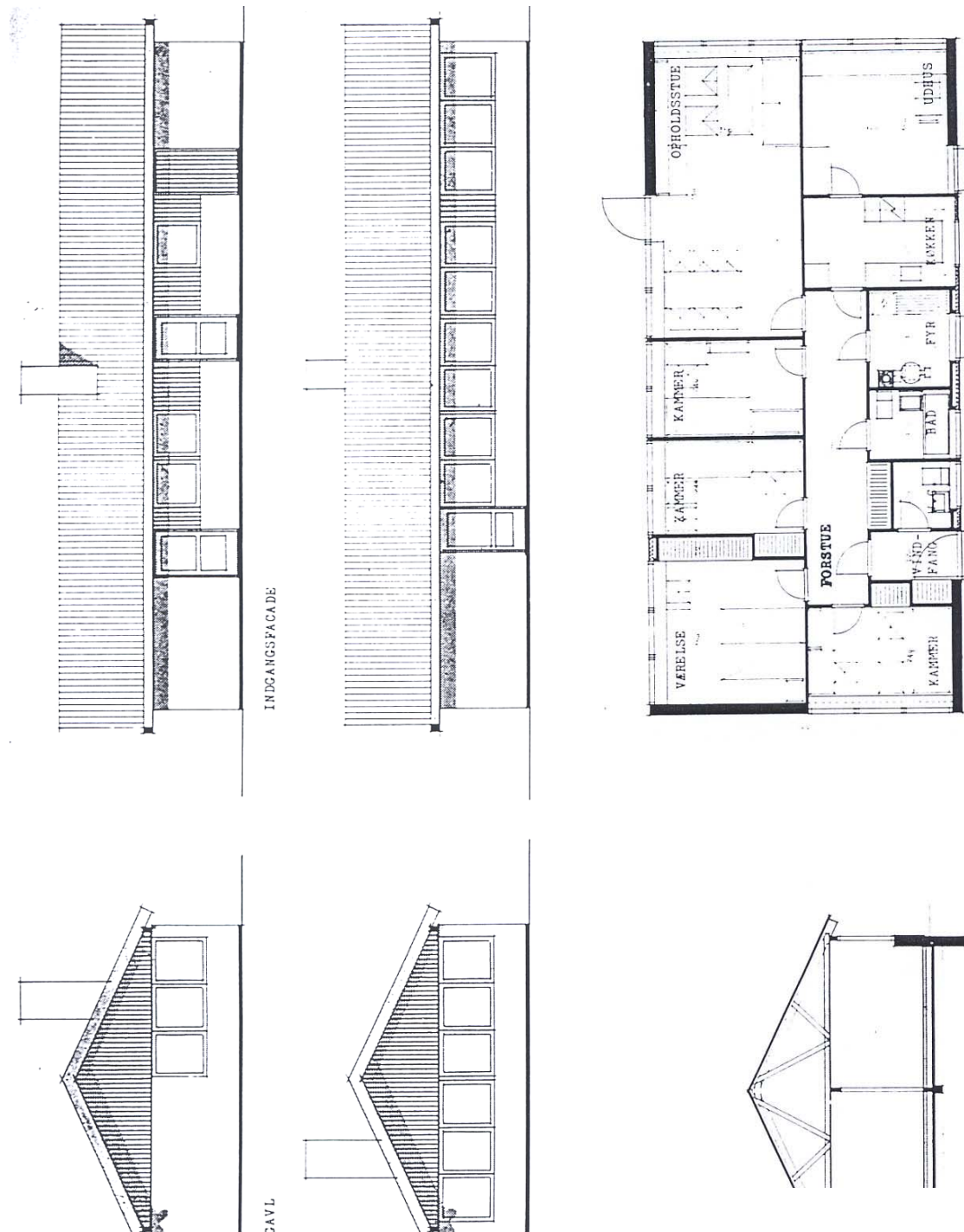


Lodret snit igennem ny facadebeklædning. Til højre er vist skærmtegl og skinnesystem.

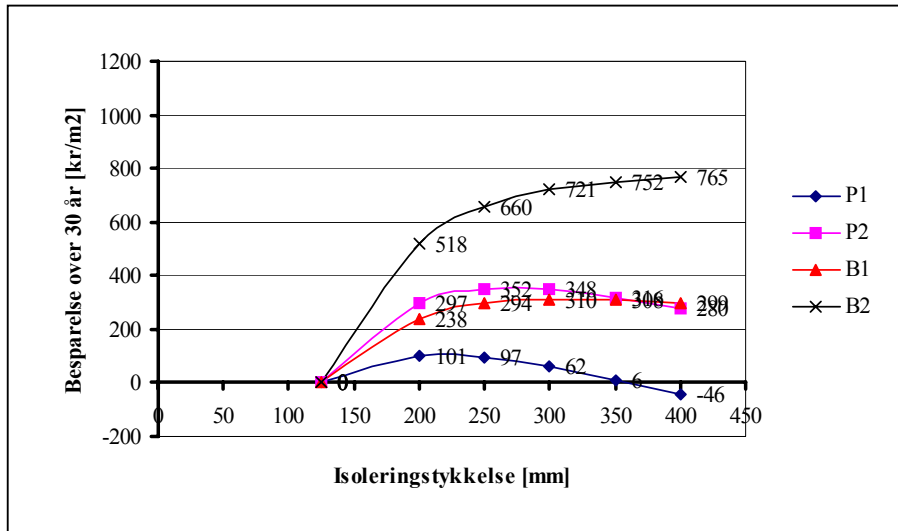


Vandret snit ved facademur og etagehøjt vindue.

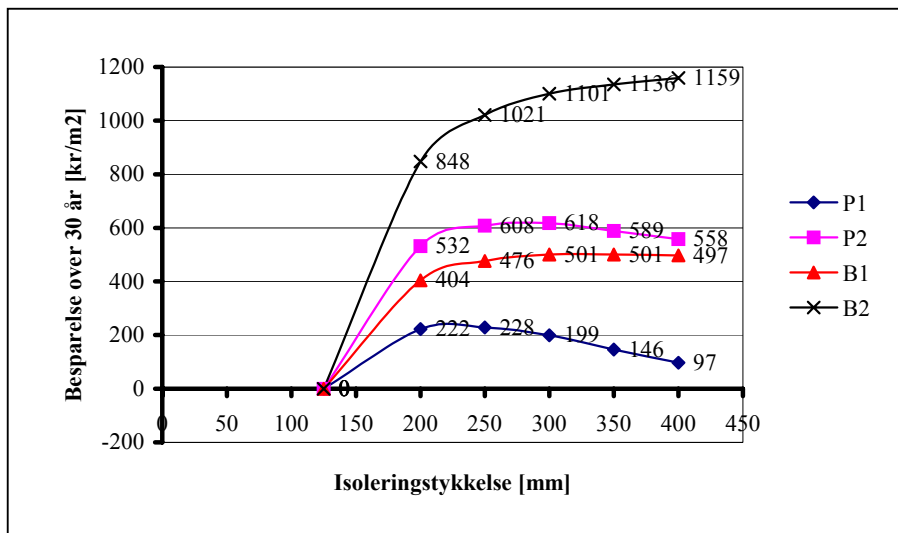
Bilag 3: Typisk typehus fra 1960'erne.



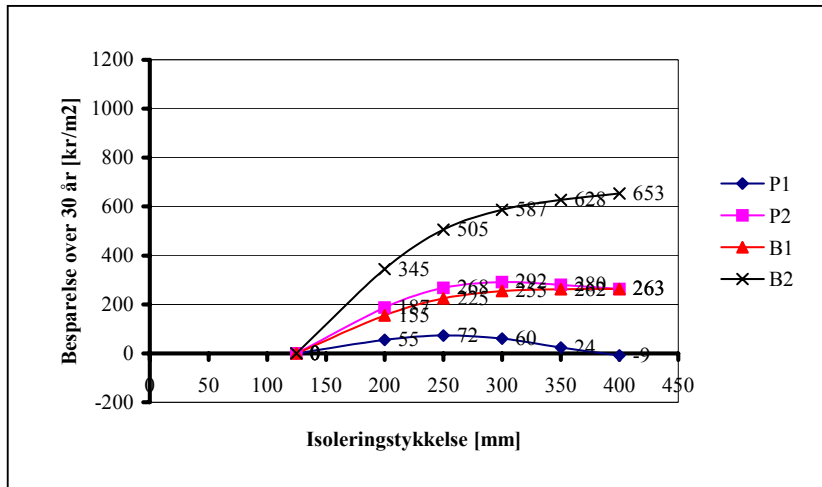
Bilag 4: Optimale isoleringsløsninger i nybyggeriet



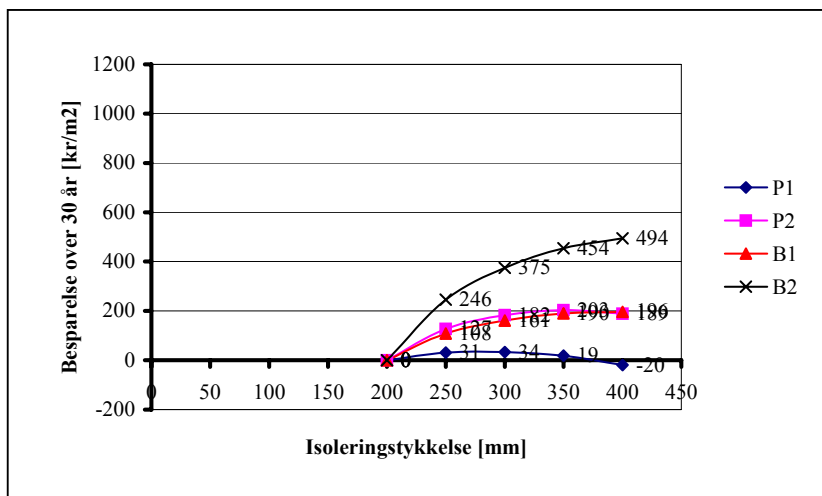
Traditionel tung dobbeltvæg med bagvæg af porebeton.



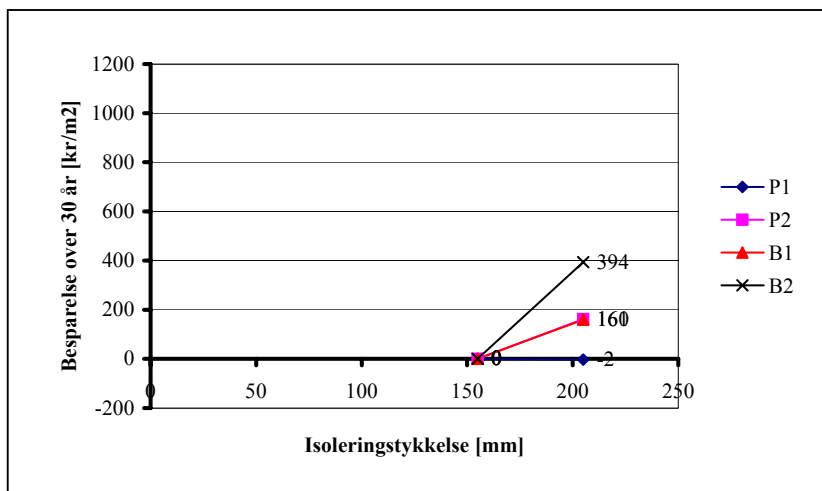
Traditionel tung dobbeltvæg med bagvæg af teglsten (fuldmuret).



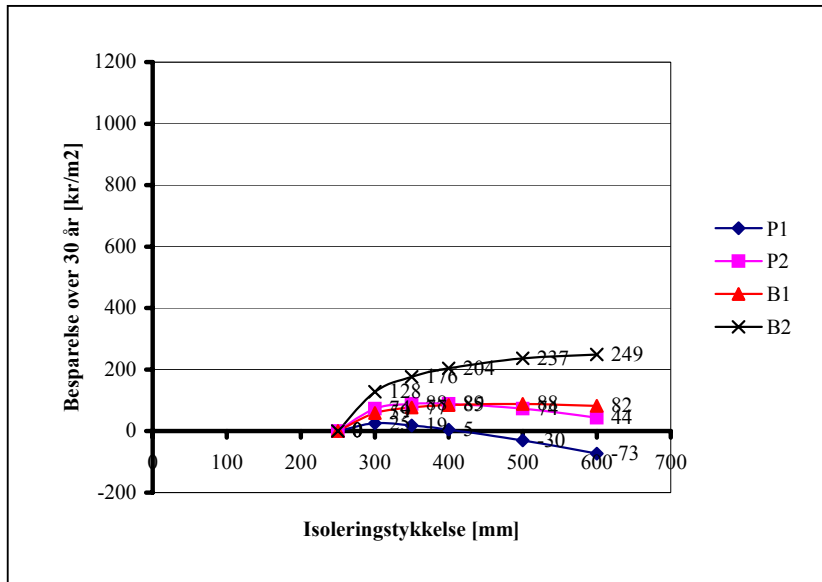
Tung bærende bagvæg af letklinkerbeton med puds eller let regnskærm udvendigt.



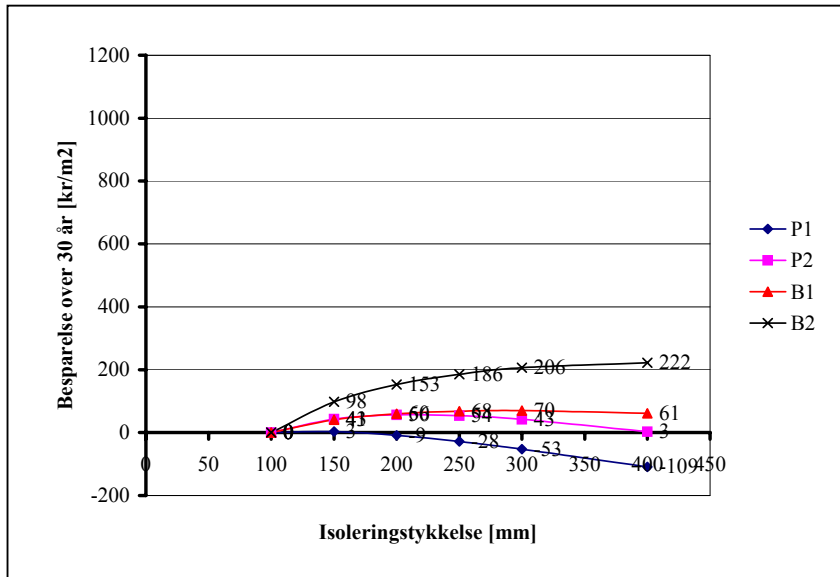
Let skeletvæg med udvendigt bærende skelet.



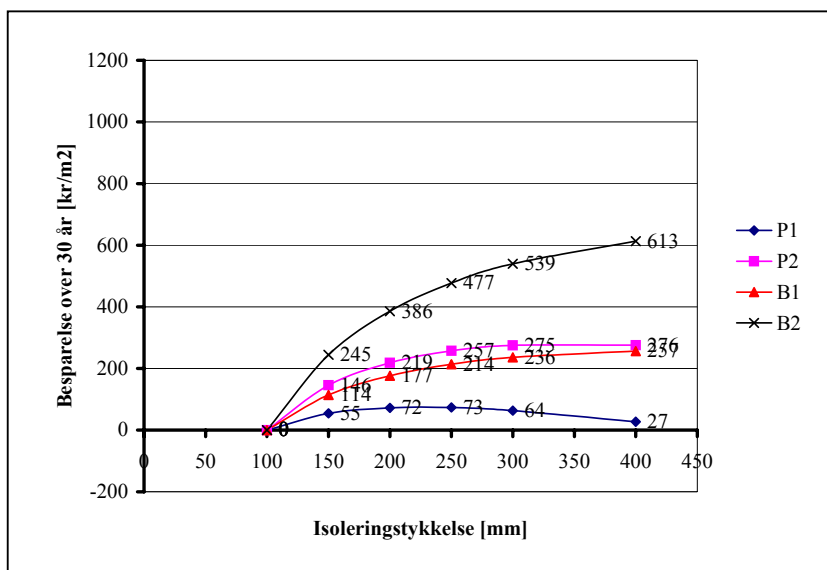
Betonsandwichelementer.



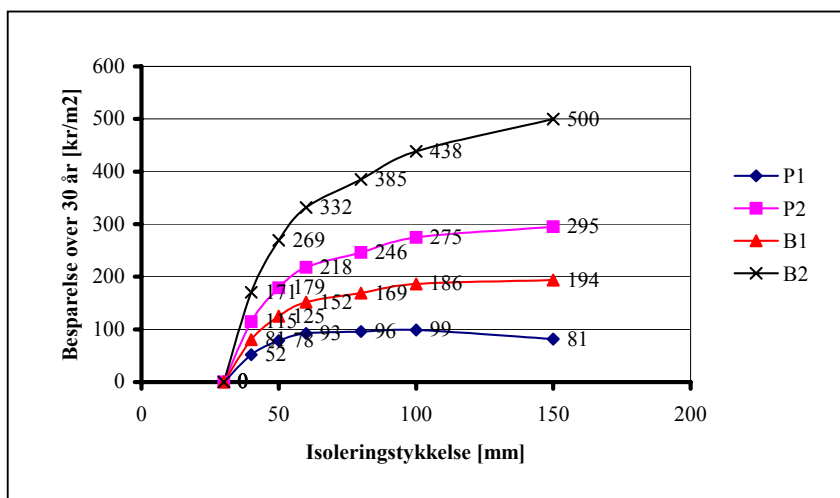
Loftkonstruktion (gitterspær).



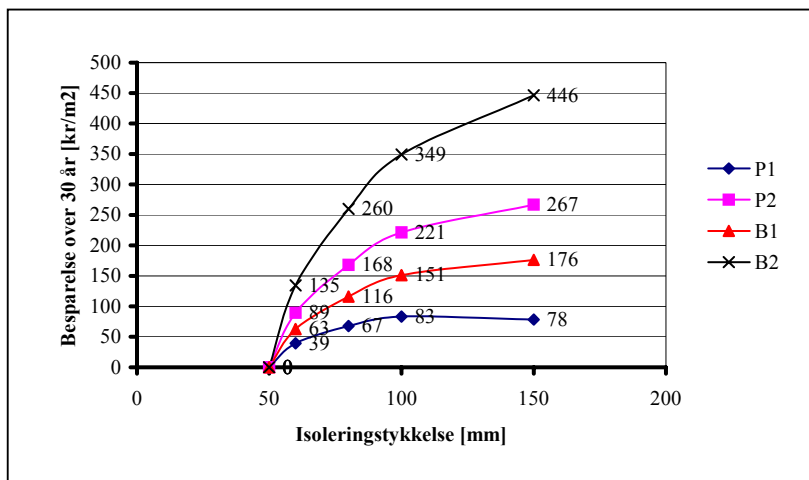
Terrændæk uden gulvvarme.



Terrændæk med gulvvarme.



Varmerør (1 tomme) i uisoleret kælder (med isoleret etagedæk).



Varmerør (2 tommer) i uisoleret kælder (med isoleret etagedæk).

Bilag 5: Den danske boligmasse.

Arealer mm.

Arealer. Etageboliger								
Tidsperiode 1 - 7								
	1	2	3	4	5	6	7	I alt/1000
- Antal	58	23	6	7	2	7	0,8	104
- Boligareal	23.450	14.082	7.568	13.546	4.317	7.632	877	71.472
- Gns. Boligareal	403	623	1.272	1.918	2.155	1.071	1.093	659
- Bebygget areal	8.050	4.497	2.474	4.123	1.527	3.051	361	24.083
- Gns. Bebygget areal	165	224	427	596	780	422	423	245
- Etager	2,56	2,55	2,77	2,96	2,73	2,47	2,60	2,59

Arealer. Parcelhuse								
Tidsperiode 1 - 7								
	1	2	3	4	5	6	7	I alt/1000
- Antal	216	120	100	345	139	117	17	1054
- Boligareal	31.104	15.437	12.373	50.424	21.858	17.340	2.684	151.219
- Gns. Boligareal	144	129	124	146	157	148	158	142
- Bebygget areal	23.297	11.527	10.912	48.946	20.727	16.770	2.769	134.948
- Gns. Bebygget areal	109	97	109	141	147	140	153	122
- Etager	1,37	1,37	1,18	1,06	1,09	1,10	1,10	1,21

Arealer. Rækkehuse								
Tidsperiode 1 - 7								
	1	2	3	4	5	6	7	I alt/1000
- Antal	29	13	15	28	22	67	5	179
- Boligareal	3.619	1.827	2.114	4.482	3.679	12.747	1.181	29.648
- Gns. Boligareal	126	136	141	161	170	190	218	153
- Bebygget areal	2.390	1.249	1.638	3.852	2.933	10.931	1.116	24.110
- Gns. Bebygget areal	86	96	113	146	148	166	208	123
- Etager	1,58	1,48	1,34	1,17	1,24	1,18	1,14	1,37

Arealer. Stuehuse								
Tidsperiode 1 - 7								
	1	2	3	4	5	6	7	I alt/1000
- Antal	93	13	5	5	3	5	1	124
- Boligareal	16.484	2.153	742	797	634	951	163	21.924
- Gns. Boligareal	177	163	158	175	200	195	202	176
- Bebygget areal	13.523	1.591	550	677	517	769	135	17.762
- Gns. Bebygget areal	145	120	117	149	163	157	167	143
- Etager	1,25	1,38	1,38	1,21	1,26	1,28	1,27	1,29

Arealer. Kollegier								
	Tidsperiode 1 - 7							
	1	2	3	4	5	6	7	I alt/1000
- Antal	0,171	0,069	0,061	0,308	0,086	0,494	0,073	1,262
- Boligareal	104	61	73	416	98	241	36	1.234
- Gns. Boligareal	606	890	1.183	1.353	1.146	487	487	801
- Bebygget areal	54	30	30	238	54	158	23	586
- Gns. Bebygget areal	310	443	482	725	989	300	291	447
- Etager	2,21	2,17	2,50	1,98	1,38	1,61	1,65	1,90

Ydervægstype

Antal bygninger. Total. Fordeling på vægtyper								
Vægtype	Tidsperiode 1 - 7							
	1	2	3	4	5	6	7	I alt
- Tegl	281.479	103.047	58.681	168.202	60.818	73.214	7.665	753.106
- Letbeton	4.285	2.836	14.789	19.781	2.486	804	63	45.044
- Træbeklædning	1.398	2.534	1.638	7.113	3.043	3.686	1.955	21.367
- Betonelementer	147	174	1.039	3.574	1.009	496	34	6.473
- Øvrige	29.152	2.399	1.872	2.097	768	557	89	36.934
- I alt	316.461	110.990	78.019	200.767	68.124	78.757	9.806	862.924

Antal bygninger. Etageboliger. Fordeling på vægtyper								
Vægtype	Tidsperiode 1 - 7							
	1	2	3	4	5	6	7	I alt
- Tegl	32.639	10.023	2.768	2.482	567	3.218	454	52.151
- Letbeton	80	54	166	123	21	26	6	476
- Træbeklædning	37	17	2	9	18	34	16	133
- Betonelementer	7	13	96	504	254	250	18	1.142
- Øvrige	682	66	29	63	37	73	12	962
- I alt	33.445	10.173	3.061	3.181	897	3.601	506	54.864

Antal bygninger. Enfamiliehuse. Fordeling på vægtyper								
Vægtype	Tidsperiode 1 - 7							
	1	2	3	4	5	6	7	I alt
- Tegl	248.678	92.963	55.859	165.583	60.215	69.718	7.189	700.205
- Letbeton	4.205	2.782	14.621	19.654	2.463	777	57	44.559
- Træbeklædning	1.360	2.517	1.636	7.104	3.025	3.632	1.928	21.202
- Betonelementer	140	160	939	3.046	751	239	14	5.289
- Øvrige	28.470	2.332	1.842	2.024	730	482	76	35.956
- I alt	282.853	100.754	74.897	197.411	67.184	74.848	9.264	807.211

Tag

Antal bygninger. Total. Fordeling på tagtyper								
Tagtype	Tidsperiode 1 - 7							
	1	2	3	4	5	6	7	I alt
- Build-up	577	983	2.075	20.739	4.590	1.163	84	30.211
- Tagpap	4.314	9.792	3.877	6.721	1.208	1.494	543	27.949
- Fibercement	150.643	34.902	42.967	124.805	37.772	22.388	155	413.632
- Cementsten	37.438	15.205	4.541	12.499	12.452	31.247	4.576	117.958
- Tegl	87.362	46.736	22.007	28.355	10.514	19.540	3.668	218.182
- Øvrige	36.142	3.373	2.557	7.661	1.591	2.943	790	55.057
- I alt	316.476	110.991	78.024	200.780	68.127	78.775	9.816	862.989

Antal bygninger. Etageboliger. Fordeling på tagtyper								
Tagtype	Tidsperiode 1 - 7							
	1	2	3	4	5	6	7	I alt
- Build-up	124	153	138	740	271	134	26	1.586
- Tagpap	1.273	1.186	223	318	94	199	93	3.386
- Fibercement	13.765	2.232	1.185	1.457	357	699	10	19.705
- Cementsten	2.429	600	49	68	50	853	84	4.133
- Tegl	14.744	5.832	1.410	525	96	1.526	204	24.337
- Øvrige	1.113	170	59	82	31	197	92	1.744
- I alt	33.448	10.173	3.064	3.190	899	3.608	509	54.891

Antal bygninger. Enfamiliehuse. Fordeling på tagtyper								
Tagtype	Tidsperiode 1 - 7							
	1	2	3	4	5	6	7	I alt
- Build-up	452	827	1.935	19.933	4.305	1.013	55	28.520
- Tagpap	3.027	8.602	3.645	6.393	1.111	1.270	439	24.487
- Fibercement	136.821	32.660	41.756	123.291	37.396	21.572	144	393.640
- Cementsten	35.007	14.605	4.492	12.429	12.402	30.356	4.489	113.780
- Tegl	72.533	40.862	20.573	27.793	10.414	17.927	3.457	193.559
- Øvrige	35.025	3.199	2.498	7.575	1.557	2.720	686	53.260
- I alt	282.865	100.755	74.899	197.414	67.185	74.858	9.270	807.246

Varmesystem

Antal bygninger. Total. Fordeling på varmesystem								
Varmesystem	Tidsperiode 1 - 7							
	1	2	3	4	5	6	7	I alt
- Fjernvarme	76.910	36.708	27.858	74.601	24.104	28.323	3.797	272.301
- Central, eget anlæg	179.769	61.918	42.741	103.240	28.549	27.684	4.874	448.775
- Elovne	29.518	6.291	4.341	15.204	12.746	18.978	495	87.573
- Øvrige	30.263	6.069	3.081	7.733	2.729	3.784	649	54.308
- I alt	316.460	110.986	78.021	200.778	68.128	78.769	9.815	862.957

Antal bygninger. Etageboliger. Fordeling på varmesystem								
Varmesystem	Tidsperiode 1 - 7							
	1	2	3	4	5	6	7	I alt
- Fjernvarme	22.603	6.863	2.174	2.435	700	2.884	420	38.079
- Central, eget anlæg	8.275	2.926	823	686	140	554	85	13.489
- Elovne	1.365	225	37	48	53	156	3	1.887
- Øvrige	1.202	158	29	21	7	14	0	1.431
- I alt	33.445	10.172	3.063	3.190	900	3.608	508	54.886

Antal bygninger. Enfamiliehuse. Fordeling på varmesystem								
Varmesystem	Tidsperiode 1 - 7							
	1	2	3	4	5	6	7	I alt
- Fjernvarme	54.188	29.800	25.634	72.031	23.383	25.221	3.357	233.614
- Central, eget anlæg	171.458	58.975	41.908	102.516	28.392	27.064	4.780	435.093
- Elovne	28.149	6.065	4.303	15.156	12.688	18.802	486	85.649
- Øvrige	29.057	5.911	3.052	7.709	2.722	3.765	647	52.863
- I alt	282.852	100.751	74.897	197.412	67.185	74.852	9.270	807.219

Varmemiddel

Antal bygninger. Total. Fordeling på varmemiddel								
Varmemiddel	Tidsperiode 1 - 7							
	1	2	3	4	5	6	7	I alt
- Elektricitet	64.090	15.774	9.027	18.579	13.796	20.705	803	142.774
- Gasværksgas	14.078	5.643	3.232	66	14	86	7	23.126
- Flydende brændsel	133.331	39.860	24.310	50.026	13.873	10.766	1.626	273.792
- Fast brændsel	22.612	4.080	1.681	2.487	934	1.281	501	33.576
- Naturgas	31.711	16.572	15.752	54.190	14.994	16.642	2.914	152.775
- Øvrige	8.675	1.344	475	781	409	832	127	12.643
- I alt	274.497	83.273	54.477	126.129	44.020	50.312	5.978	638.686

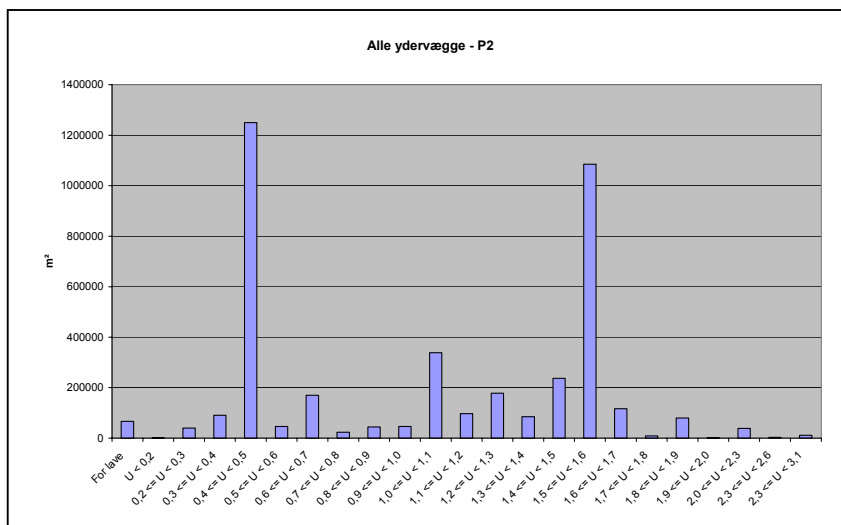
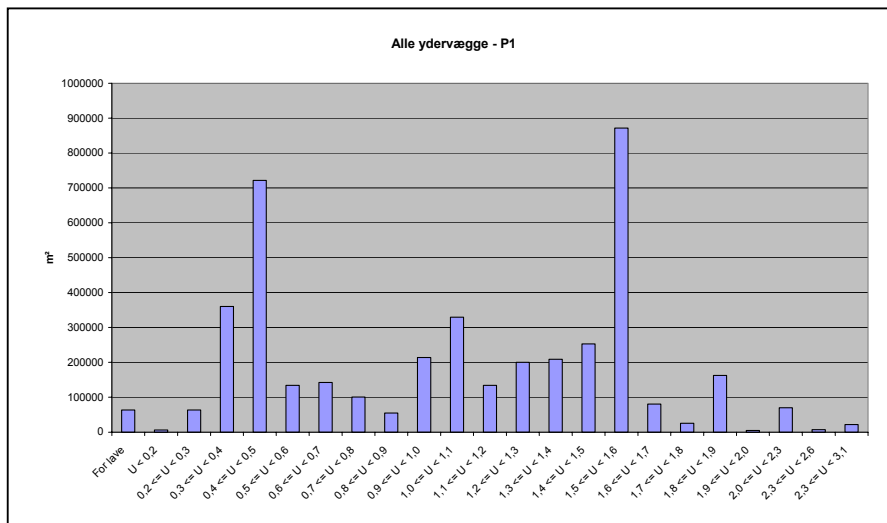
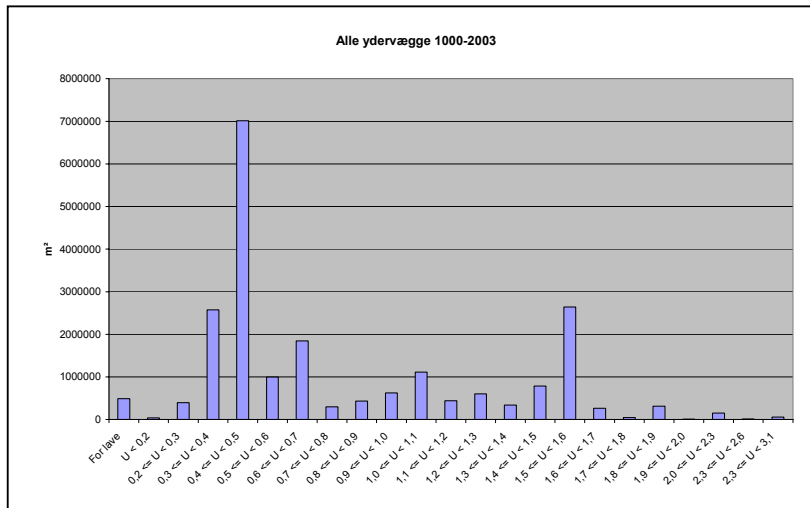
Antal bygninger. Etageboliger. Fordeling på varmemiddel								
Varmemiddel	Tidsperiode 1 - 7							
	1	2	3	4	5	6	7	I alt
- Elektricitet	22.603	6.863	2.174	56	55	163	3	31.917
- Gasværksgas	8.275	2.926	823	0	0	12	0	12.036
- Flydende brændsel	940	91	10	361	74	87	5	1.568
- Fast brændsel	0	0	0	7	1	5	0	13
- Naturgas	1.365	225	37	328	65	443	80	2.543
- Øvrige	146	37	11	2	5	13	0	214
- I alt	33.329	10.142	3.055	754	200	723	88	48.291

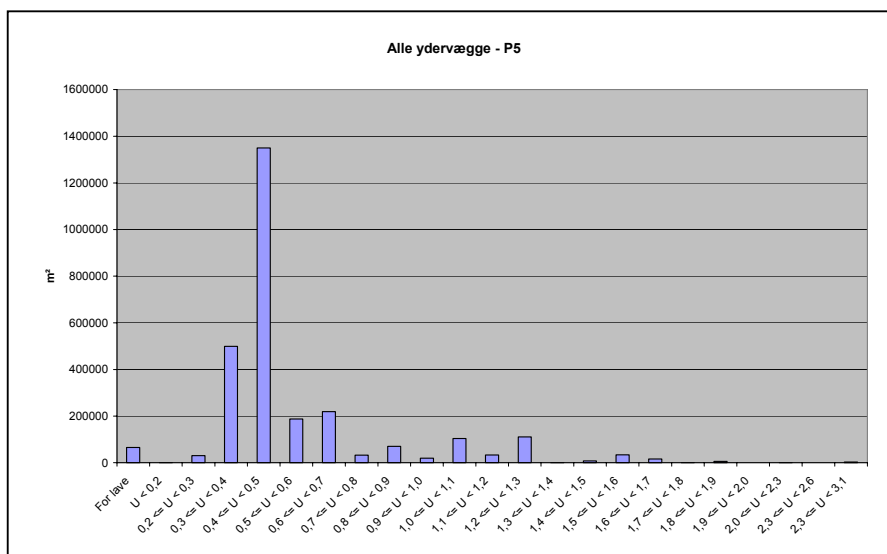
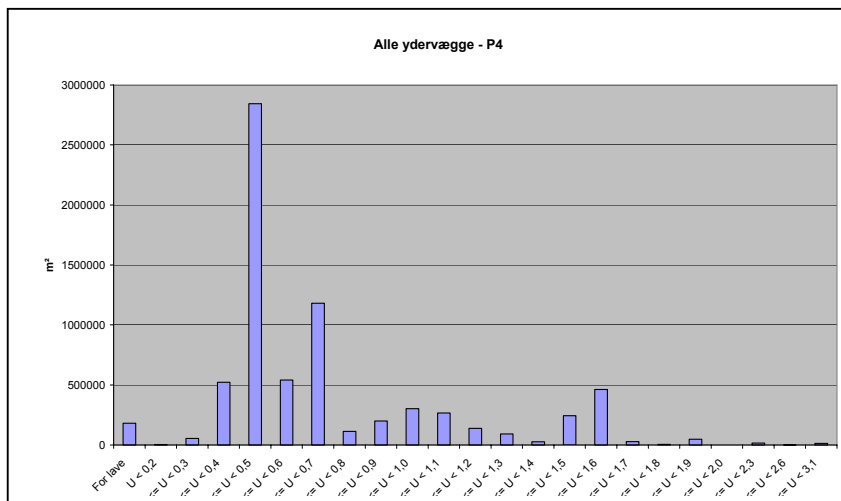
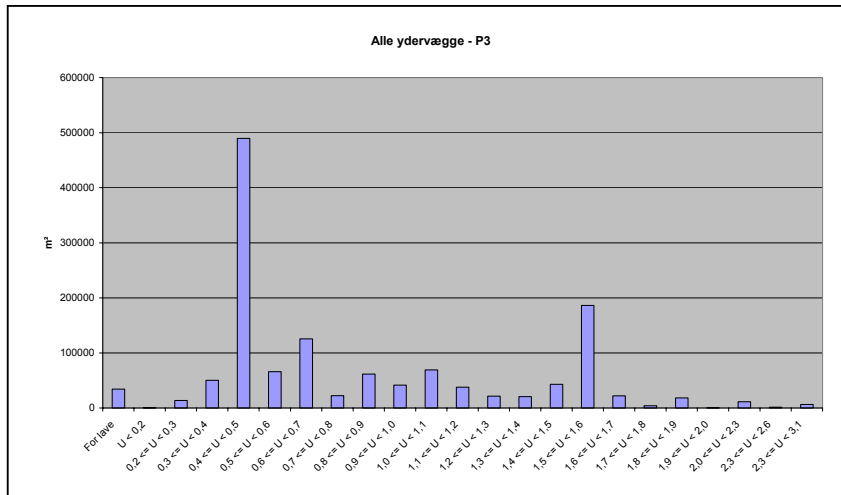
Antal bygninger. Enfamiliehuse. Fordeling på varmemiddel								
Varmemiddel	Tidsperiode 1 - 7							
	1	2	3	4	5	6	7	I alt
- Elektricitet	41.368	8.866	6.803	18.523	13.736	20.522	795	110.613
- Gasværksgas	5.767	2.700	2.399	66	14	73	7	11.026
- Flydende brændsel	132.388	39.769	24.300	49.653	13.792	10.665	1.620	272.187
- Fast brændsel	22.612	4.080	1.681	2.476	930	1.267	499	33.545
- Naturgas	30.342	16.346	15.714	53.838	14.923	16.156	2.827	150.146
- Øvrige	8.528	1.307	464	778	403	815	126	12.421
- I alt	241.005	73.068	51.361	125.334	43.798	49.498	5.874	589.938

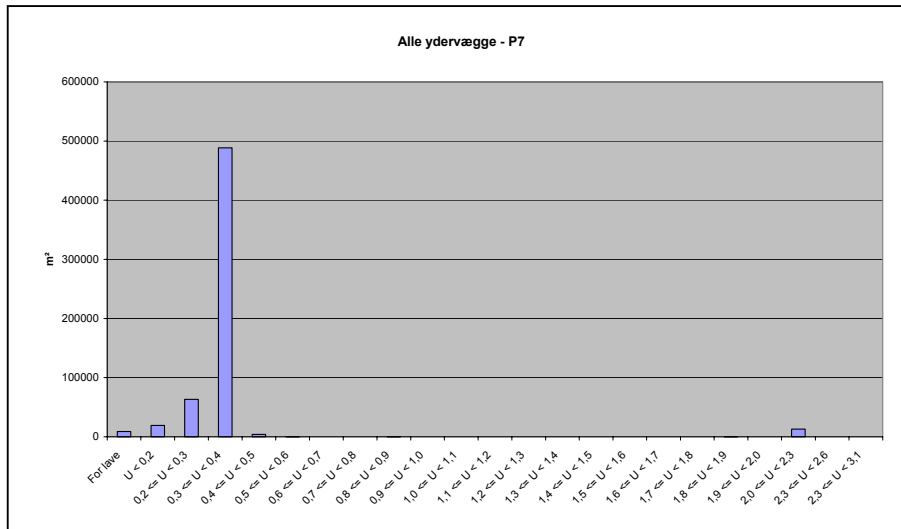
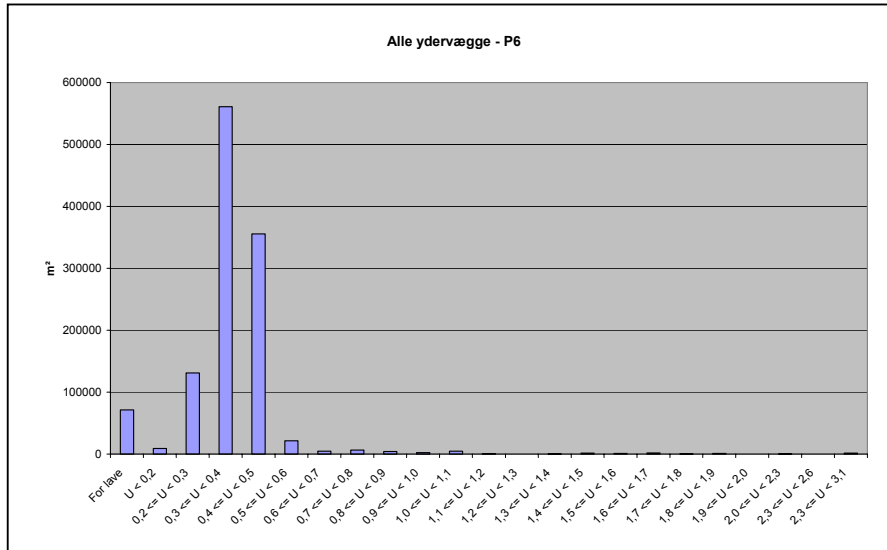
U-værdier

Ydervægge

Gennemsnitlige U-værdier for perioder.								
	Tidsperiode 1 - 7							
	1	2	3	4	5	6	7	I alt
Ydermur	1,03	1,02	0,81	0,67	0,55	0,36	0,33	0,77
Ydervæg mod uopvarmet rum	1,52	1,53	1,30	1,05	0,70	0,77	2,01	1,31
Kælderydervæg over jord	1,23	1,17	1,09	1,05	0,80	0,52	0,39	1,07
Kælderydervæg under jord	0,87	0,84	0,86	0,78	0,70	0,52	0,36	0,78
Kælderydervæg mod uopvarmet rum	2,25	2,31	2,33	2,11	1,60	1,74	0,66	2,16
Gennemsnit af alle	1,05	1,02	0,83	0,68	0,55	0,37	0,37	0,78







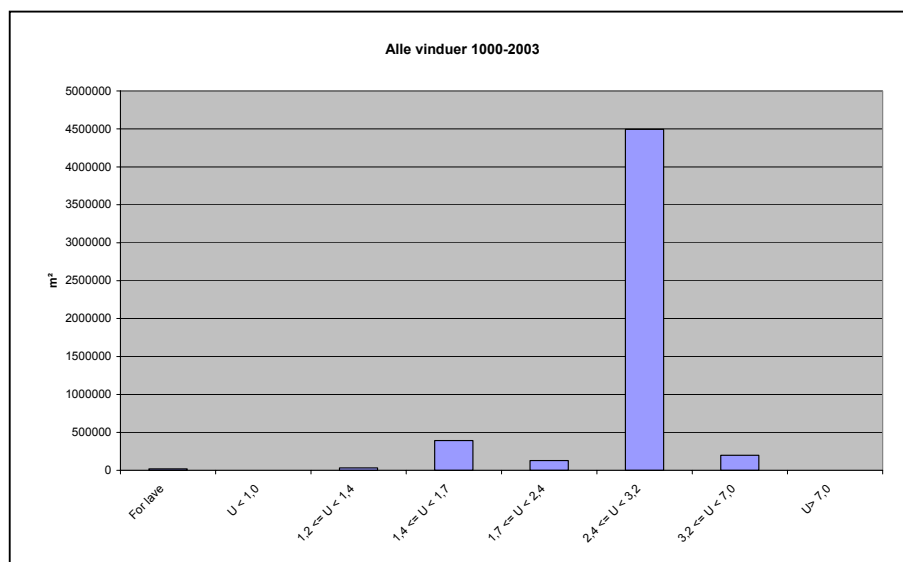
Vinduer

Gennemsnitlige U-værdier for perioder.

	Tidsperiode 1 - 7							I alt
	1	2	3	4	5	6	7	
Vinduer/glasdøre mod vest og øst	2,87	2,91	2,84	2,76	2,78	2,56	1,58	2,78
Vinduer/glasdøre mod nord	2,92	3,04	2,84	2,86	2,76	2,57	1,68	2,85
Vinduer/glasdøre mod syd	2,88	2,96	2,76	2,77	2,71	2,54	1,64	2,76
Vinduer/glasdøre mod nø-nv	3,13	3,22	2,85	2,82	2,70	2,49	1,53	2,45
Vinduer/glasdøre mod sø-sv	2,99	2,87	2,60	2,73	2,69	2,46	1,52	2,47
Yderdøre	3,90	3,91	4,07	3,62	3,05	2,06	1,51	3,46
Ovenlys mod vest & øst	2,78	2,79	2,92	2,79	2,61	2,56	1,63	2,72
Ovenlys mod nord	2,80	2,76	2,87	2,71	2,74	2,63	1,78	2,75
Ovenlys mod syd	2,80	2,71	2,82	2,61	2,66	2,65	1,89	2,72
Ovenlys mod nø-nv	2,84	2,57	2,79	2,79	2,75	2,67	1,92	2,76
Ovenlys mod sø-sv	2,73	2,85	2,70	2,59	2,62	2,50	2,00	2,65
Ovenlys vandret	2,37	3,05	2,72	2,86	2,66	2,38	1,80	2,70
I alt	2,95	2,98	2,89	2,80	2,78	2,52	1,56	2,79

Gennemsnitlige U-værdier for perioder.

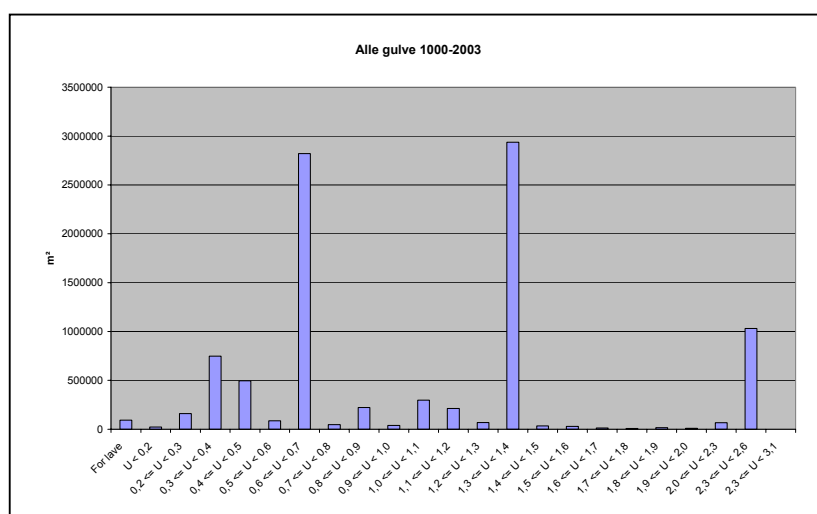
	Tidsperiode 1 - 7							I alt
	1	2	3	4	5	6	7	
Vinduer/glasdøre	2,89	2,94	2,81	2,77	2,77	2,55	1,56	2,76
Yderdøre	3,90	3,91	4,07	3,62	3,05	2,06	1,51	3,46
Ovenlysvinduer	2,77	2,77	2,87	2,75	2,65	2,60	1,71	2,72
I alt	2,95	2,98	2,89	2,80	2,78	2,52	1,56	2,79



Gulve

Gennemsnitlige U-værdier for perioder.

	Tidsperiode 1 - 7							I alt
	1	2	3	4	5	6	7	
Gulv mod kælder	1,20	1,34	1,14	0,97	0,83	0,55	0,27	1,07
Gulv mod krybekælder	1,68	1,61	0,85	0,76	0,46	0,34	0,12	1,28
Terrændæk	0,55	0,90	1,01	0,47	0,42	0,21	0,20	0,48
Gulv mod det fri	0,83	0,85	0,65	0,56	0,59	0,49	0,15	0,70
Kældergulv	0,42	0,41	0,39	0,36	0,35	0,29	0,23	0,38
Gennemsnit af alle	1,34	1,36	1,03	0,91	0,78	0,49	0,25	1,07



Lofter/tage

Gennemsnitlige U-værdier for perioder.

	Tidsperiode 1 - 7							I alt
	1	2	3	4	5	6	7	
Hanebånd og vandret loft	0,53	0,60	0,45	0,27	0,24	0,19	0,14	0,47
Skråvæg	0,46	0,57	0,48	0,32	0,26	0,18	0,15	0,43
Lodret skunk	0,56	0,64	0,53	0,34	0,27	0,18	0,15	0,53
Vandret skunk	0,90	0,74	0,72	0,36	0,28	0,18	0,15	0,74
Væg mod uopvarmet luftsrum	0,79	1,05	0,67	0,67	0,29	0,21	0,15	0,73
Etageadskillelse mod uopvarmet loftsrum	0,75	0,78	0,37	0,30	0,26	0,16	0,15	0,40
Fladt tag	0,39	0,56	0,36	0,36	0,40	0,22	0,15	0,36
Kvistflunke	0,73	0,85	0,77	0,43	0,33	0,29	0,24	0,73
Gennemsnit af alle	0,61	0,69	0,42	0,32	0,32	0,17	0,15	0,43

