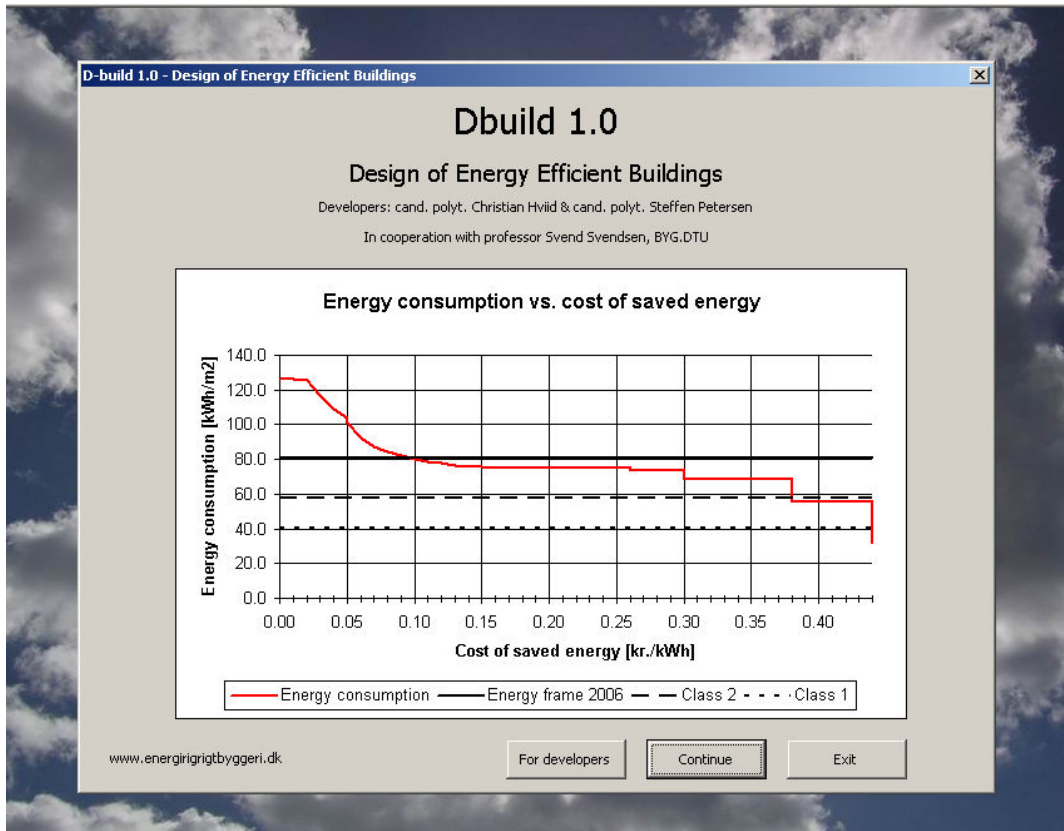


Metode til optimering af nyt lavt boligbyggeri til lavenerginiveau – Del A: Udvikling af optimeringsmodel



Eksamensprojekt ved Danmarks Tekniske Universitet,
BYG•DTU

Vejleder: professor Svend Svendsen

Christian A. Hviid, s991170

Steffen Petersen, s001384

Dato: d. 29.07.2005

Indholdsfortegnelse

Del A: Udvikling af optimeringsmodel.....	3
1 Det lovmæssige krav – energirammen	4
2 Økonomisk model til energioptimering af bygninger.....	6
2.1 Generelle begreber i totaløkonomiske modeller	6
2.2 Forskellige totaløkonomiske modeller	8
2.3 Diskussion af totaløkonomiske modeller	13
2.4 Samlet økonomisk model.....	14
3 Fastlæggelse af reference.....	15
3.1 Matematisk argument for fast reference	15
3.2 Fastsættelse af reference til beregning af energibesparelser	18
4 Delkonklusion for del A.....	18

Figurliste

Figur 3.1. Varmestrømmen Q beregnet ud fra fast reference (venstre side) og variabel reference (højre side). Q 's indeks refererer til antallet af lige tykke materialelag i konstruktionen. Q_0 er varmemstrømmen gennem konstruktionen svarende til den mindste isoleringstykkelse. I efterfølgende eksempel regnes der med et antal lag som alle har en tykkelse, der giver dem en isolans, der svarer til $1/Q_0$ 16

Figur 3.2. Energibesparelse i % af referencen som funktion af antal isoleringslag.. 17

Del A: Udvikling af optimeringsmodel

Principielt kunne man udføre et byggeri med et energiforbrug på 0 kWh ved at benytte alle de ressourcer, der skal til. Dette vil give en meget høj engangsinvestering; så høj, at den energimæssige besparelse realistisk set aldrig nogensinde vil kunne tilbagebetale den merinvestering, der er foretaget.

Omvendt er det let at udføre et byggeri med et minimalt forbrug af ressourcer, men med et meget stort energibehov til opvarmning. Dette anses også for urealistisk, da energiudgiften er uacceptabelt høj. Spørgsmålet er derfor:

- Hvad er den økonomisk optimale løsning i afvejningen af investering og energiforbrug?

For at besvare dette spørgsmål bliver man nødt til at anskue byggeriet som mere end en engangsinvestering; der er tale om et byggeri (en investering), der efter endt opførelse skal være i brug i en længere årrække med dertil hørende driftsudgifter (bl.a. varme, vand og el). Den økonomisk optimale løsning findes blandt en række alternativer, hvor der for hvert alternativ er sket en vægtning af investeringsomkostningerne i forhold til det tilhørende energiforbrug – en såkaldt totaløkonomisk optimering.

I forbindelse med overholdelsen af de kommende krav i (Tillæg 9, 2005) er det med en totaløkonomisk optimering muligt at udvælge løsninger, der imødekommer disse krav, enten på økonomisk rentabel vis eller med den mindst mulige merinvestering. For at kunne foretage en totaløkonomisk optimering må der foreligge en økonomisk model, der siger noget om alternativets rentabilitet i forhold til den energibesparelse, den medfører. Energibesparelsen kan kun beregnes, hvis der foreligger en reference, som alternativets energiforbrug kan holdes op imod. Derfor er fastsættelse af reference, og måden hvorpå energibesparelserne beregnes, vigtig for modellen.

”Del A: Udvikling af optimeringsmodel” omhandler:

- En beskrivelse af det lovmæssige krav; energirammerne
- Diskussion og udarbejdelse af en økonomisk model til totaløkonomisk optimering af bygninger
- Beregning af energibesparelser og fastsættelse af et rimeligt referenceniveau
- En redegørelse for den samlede optimeringsmodel

1 Det lovmæssige krav – energirammen

Afsnittet om bygningers varmeisolering i ”Bygningsreglement for småhuse” (BR-S 98, 1998) afsnit 5 står over for en udskiftning i løbet af 2006. Dette medfører skærpede krav til bygningers energiforbrug. For nybyggeri vil lovkravet blive, at en bygnings samlede energiforbrug skal overholde en *energiramme*.

Udregning af energirammen efter kravene i henholdsvis (BR-S 98, 1998) og (Tillæg 9, 2005) ses i Tabel 1.1.

Tabel 1.1. Beregnede energirammer for nuværende og fremtidige krav.

<i>Krav</i>	<i>Udtryk for energiramme</i> <i>[kWh/m² pr. år]</i>
BR-S 98 ¹	$\left(160 + \frac{140}{e}\right) \cdot 0,278$
(Tillæg 9, 2005) Det maksimale energiforbrug	$70 + \frac{2200}{A}$
(Tillæg 9, 2005) Lavenergiklasse 2	$50 + \frac{1600}{A}$
(Tillæg 9, 2005) Lavenergiklasse 1	$35 + \frac{1100}{A}$

Selvom sænkningen af kravet til maksimalt energiforbrug i (Tillæg 9, 2005) i forhold til BR-S 98 er minimal for et typisk parcelhus, forstærkes det nye krav ved, at bruttoenergiforbruget skal omfatte det samlede behov for tilført energi til dækning af varme- og ventilationstab, køling, drift af installationer og opvarmning af varmt brugsvand.

Ved beregningen af det samlede energiforbrug indgår el-forbrug med en faktor 2,5. Varme- og el-produktion fra vedvarende energi som eksempelvis solfanger og/eller solceller modregnes (elproduktion indgår med en faktor 2,5). Kriteriet for overholdelse af energirammen er som følger:

$$\text{Energiforbrug} = 2,5 \text{ el} + \text{varme} - \text{vedvarende energi} \leq \text{Energirammen}$$

¹ Energirammen kan jf. BR-S 98 maksimalt være 280 MJ/m² pr. år = 77,8 kWh/m² pr. år. Desuden indeholder denne energiramme kun energi til dækning af varme- og ventilationstab.

1 DET LOVMÆSSIGE KRAV – ENERGIRAMMEN

Beregninger af energiforbrug til opvarmning skal ske jf. DS 418 ved beregning af varmetabet for de enkelte bygningsdele. Luftsiftet gennem utætheder i klimaskærmen må ikke overstige 1,5 l/s pr. m² ved trykprøvning med 50 Pa².

For at undgå gener i form af kondens og skimmelsvamp på kolde flader ved normal brug stilles der krav til en mindste varmeisolering. Disse krav ses i Tabel 1.2.

Tabel 1.2. Krav til mindste varmeisolering jf. (Tillæg 9, 2005) for de forskellige konstruktionsdele.

<i>Konstruktion</i>	<i>U-værdi [W/m² K]</i>
Ydervægge og kældervægge mod jord.	0,40
Skillevægge mod rum, der er uopvarmede eller opvarmet til en temperatur, der er mere end 8°C lavere end temperaturen i det aktuelle rum.	0,50
Etageadskillelser mod rum, der er uopvarmede eller opvarmet til en temperatur, der er mere end 8°C lavere end temperaturen i det aktuelle rum.	0,40
Terrændæk, kældergulve mod jord og etageadskillelser over det fri eller ventileret kryberum.	0,30
Loft- og tagkonstruktioner, herunder skunkvægge, flade tage og skråvægge direkte mod tag.	0,25
Vinduer og yderdøre, herunder ovenlys, glasvægge, porte og lemme mod det fri eller mod rum, der er uopvarmede eller opvarmet til en temperatur, der er mere end 8°C lavere end temperaturen i det aktuelle rum.	2,30
	<i>Linietaf [W/mK]</i>
Fundamenter omkring rum, der opvarmes til mindst 5°C	0,40
Fundamenter omkring gulve med gulvvarme	0,20
Samling mellem ydervæg og vinduer eller yderdøre, glasvægge, porte og lemme	0,06
Samling mellem tagkonstruktion og vinduer i tag eller ovenlys	0,20

Desuden gælder det for bygninger op til 3 etager, at det dimensionerende transmissionstab ikke må overstige 6 W pr. m² klimaskærm eksklusiv døre og vinduer.

² Kommunalbestyrelsen kan stille krav om dokumentation af luftsiftet. Prøvningsresultatet anvendes ved beregning af energiforbruget ved ventilation. Foreligger dokumentation ikke benyttes 1,5 l/s pr. m² ved 50 Pa, svarende til 0,13 l/s pr. m² (Be05, 2005).

2 Økonomisk model til energioptimering af bygninger

Et væsentligt kriterium for indførelsen af en energimæssig forbedring i et byggeri er, at løsningen er totaløkonomisk rentabel. For at kunne udtale sig om en løsnings rentabilitet er man nødt til at have en økonomisk model, der beskriver denne. Ud over at beskrive en enkeltløsnings rentabilitet bør modellen også kunne benyttes til at foretage en økonomisk vurdering af to (evt. flere) alternative løsninger, hvor fordelingen af etableringsudgifter og driftsudgifter er forskellig.

I det følgende forklares de generelle termer, der indgår i økonomiske modeller. Derefter beskrives en række relevante totaløkonomiske modeller, og deres fordele og ulemper diskuteres. Til sidst beskrives den egentlige økonomiske model til energioptimering af bygninger.

2.1 Generelle begreber i totaløkonomiske modeller

Dette afsnit beskriver begreber og størrelser, der indgår i annuitets- og nuværdimetoden og energispareprisen:

- Energipris
- Realrente (kalkulationsrente)
- Anlægsomkostninger
- Økonomisk og teknisk levetid

2.1.1 Energipris

Ved beregning af energibesparelser bør energiprisen være en ren energipris, dvs. en energipris eksklusiv faste omkostninger, såsom abonnement og tilslutningsomkostninger. Energiprisen bør være en pris, der alene er afhængig af forbruget.

Alternativt kan man vælge at lade energiprisen afspejle de faste udgifter ved at fordele disse udgifter ud på den rene energipris. I praksis gøres dette ved at fordele de faste (kendte) udgifter ud på et estimeret energiforbrug.

2.1.2 Realrente (kalkulationsrente)

Når der investeres i en energirenovering, f.eks. gennem optagelse af et lån i banken, skal lånet tilbagebetales med en vis rente. Når der foretages en energirenovering

2 ØKONOMISK MODEL TIL ENERGIOPTIMERING AF BYGNINGER

opnår man en besparelse i energiomkostninger. Det er ønskeligt, at denne besparelse over tid *minimum* er af samme størrelsesorden som investeringen adderet med den rente, som lånet skal afdrages med.

Med andre ord kan energibesparelsen som følge af investeringen betragtes som et afkast for investeringen. Dette afkast bør være større end afkastet for en alternativ investering.

I økonomisk sammenhæng er et afkast på en investering betegnet som en nominel rente – en rentesats udtrykt i nominelle termer, dvs. i løbende priser. Afkastet fra den nominelle rente er en økonomisk indkomst, som der, ligesom af andre indkomster, skal betales skat af. Derudover er rentegevinsten påvirket af den generelle inflation i samfundet.

Den nominelle rente skal derfor korrigeres for skat og inflation. Tilbage er den reelle rente – realrenten – der er et udtryk for den egentlige økonomiske gevinst. Energirenteroveringen skal derfor som minimum give samme afkast, som realrenten giver.

Realrenten kan udtrykkes matematisk som følger:

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

hvor

r_n er den nominelle rente

i_e er energiprisens stigningstakt i %/år

s er beskatningen af renter som decimalbrøk

Realrenten er fastlagt til 2,5% på baggrund af, at den siden 1990 har ligget konstant mellem 2 og 3% pr. år (Tommerup, 2002).

Alternativt kan realrenten fastsættes til 0% ud fra den betragtning, at tiltag med en meget lang tidshorizont bør tilknyttes en kalkulationsrente, der aftager mod nul. Derved undgås det, at fordele, der falder langt ude i fremtiden ved en positiv realrente, får en nuværdi omkring lig med nul.

Fordelen ved en kalkulationsrente fastsat til 0% er, at alle fremtidige besparelser i levetiden/beregningsperioden tillægges den samme værdi, hvilket svarer til en ”bæredygtig” nuværdibetragtning (Tommerup, 2002)³.

2.1.3 Anlægsomkostninger

En anden parameter, der indgår i beregning af energibesparelser er anlægsomkostningerne. Anlægsomkostningerne er det beløb i kr. det pågældende energitiltag koster i anlæg. Dette beløb er en sum af materialeomkostninger, transport og ar-

³ Hensynet til fremtidige generationer forbigås i den økonomiske beregning, idet der som regel kun ses på investeringerne over 30 år, hvor investeringens levetid typisk kan være op til 100 år. Desuden vil der i en nuværdiberegning med en kalkulationsrente større end nul tillægges mindre værdi til fremtidige udgifter.

2 ØKONOMISK MODEL TIL ENERGIOPTIMERING AF BYGNINGER

bejds løn – i princippet alle de omkostninger, der er forbundet med udførelsen af energitiltaget.

2.1.4 Økonomisk og teknisk levetid

Økonomisk levetid er perioden hvori investeringen til anlægsomkostningerne afskrives. Levetiden bør fastsættes som det antal år driften er totaløkonomisk forsvarlig. Den økonomiske levetid fastsættes imidlertid som regel til 30 år, hvis man som indikator tager de boliglån, der har længst løbetid i Danmark.

Teknisk levetid er det tidsrum, hvor den enkelte bygningskomponent forventes at kunne fungere hensigtsmæssigt og opfylde de brugsmæssige krav. Efter dette tidsrum skal komponenten udskiftes, hvilket kræver en ny investering.

For anlæg med en teknisk levetid, der overstiger den økonomiske, kan der ifølge (Energistyrelsen, 2005) regnes med lineær afskrivning og indregning af restværdi. For en bygningsdel med en levetid på 100 år er det ensbetydende med, at 30% af investeringen regnes afskrevet over den økonomiske levetid, og at restværdien udgør 70% af investeringen opgjort i nutidskroner.

2.2 Forskellige totaløkonomiske modeller

Der findes flere forskellige økonomiske modeller, der er relevante i forhold til energioptimering af bygninger:

- Simpel tilbagebetalingstid
- Nuværdibetragtning
- Annuitetsbetragtning
- Energisparepris

I det efterfølgende beskrives de enkelte modeller og deres anvendelse.

2.2.1 Simpel tilbagebetalingstid

Simpel tilbagebetalingstid er et overslag, der kan give en idé om hvorvidt et energitiltag kan tilbagebetales af besparelsen i driftsomkostninger – og i givet fald efter hvor mange år. Simpel tilbagebetalingstid defineres som følger:

$$\text{Simpel tilbagebetalingstid [år]} = \frac{\text{Investering [kr.]}}{\text{Driftsomkostninger [kr./år]}}$$

Simpel tilbagebetaling giver et overslag over investeringens tilbagebetalingstid uden at tage højde for en evt. ønsket forrentning af investeringen.

2.2.2 Nuværdibetragtning

Nuværdibetragtning kan benyttes til en økonomisk vurdering af et energitiltags rentabilitet ved at opstille totalomkostningerne for energitiltaget og sammenligne størrelsen med en referenceløsnings totalomkostninger. Metoden kan benyttes til at vurdere både rentabilitet af alternative enkelttiltag og rentabilitet af samlede løsninger.

For at kunne sammenligne alternative løsningers totalomkostning skal alle forbundne udgifter omregnes til en nuværdi, dvs. at alle udgifter over levetiden skal tilbageføres til samme tidspunkt (nuværdi).

Udgifterne over levetiden kan deles op i anlægsudgifter (engangsinvestering) og i driftsudgifter (evt. inklusiv vedligehold). Den samlede beregning for totalomkostningen bliver da:

$$\text{Totalomkostning} = \text{anlægsudgifter} + \text{nuværdi af driftsudgifter}$$

Nuværdier af driftsudgifter beregnes som de årlige driftsudgifter multipliceret med en nuværdifaktor $f(n,r)$:

$$\text{Totalomkostning} = \text{Anskaffelsespris} + \text{årlige driftsudgifter} \cdot \alpha(n,r)$$

Nuværdifaktoren, eller kapitalindvindingsfaktoren, $f(n,r)$ er afhængig af realrenten og komponentens levetid:

$$f(n,r) = \frac{[1 - (1+r)^{-n}]}{r}$$

hvor
 r er realrenten
 n er levetid.

Med dette udtryk for nuværdifaktoren antages det, at driftsudgifterne udvikler sig sammen med inflationen. Hvis driftsudgifterne udvikler sig anderledes end inflationen, bør der korrigeres for dette:

$$f(n,r) = \frac{[1 - (1+(r-e))^{-n}]}{(r-e)}$$

hvor
 e er realudviklingen i driftsudgifterne.

2 ØKONOMISK MODEL TIL ENERGIOPTIMERING AF BYGNINGER

I nuværdibetragtningen kan forholdet mellem økonomisk og teknisk levetid medtages som beskrevet i afsnit 2.1.4.

Nuværdien beregnes som en references totalomkostninger fratrukket en alternativ løsnings totalomkostning:

$$NU = T_{ref} - T_{alt}$$

hvor

NU er nuværdien, kr.

T_{ref} er totalomkostningerne for referencen, kr.

T_{alt} er totalomkostningerne for den alternative løsning, kr.

T_{ref} og T_{alt} kan udtrykkes som:

$$T_{ref} = I_{ref} + f(n, r) \cdot D_{ref} \quad \text{og} \quad T_{alt} = I_{alt} + f(n, r) \cdot D_{alt}$$

hvor

I_{ref} er referencens anlægsomkostninger, kr.

D_{ref} er driftsomkostningerne for referencen, kr./år.

I_{alt} er alternativets anlægsomkostninger, kr.

D_{alt} er driftsomkostningerne for alternativet, kr./år.

Dermed er nuværdien lig med:

$$NU = (I_{ref} + f(n, r) \cdot D_{ref}) - (I_{alt} + f(n, r) \cdot D_{alt}) = I_{ref} - I_{alt} + f(n, r) \cdot (D_{ref} - D_{alt})$$

Man kan med fordel sætte $I_{ref} = 0$ og $I_{alt} =$ merinvesteringen til anlæg i forhold til referencen og dermed få:

$$NU = f(n, r) \cdot (D_{ref} - D_{alt}) - I_{alt}$$

Dermed undgår man at beregne hele referencebygningens anlægs- og driftsudgifter. Er nuværdien positiv er den aktuelle løsnings merinvestering forrentet mindst med realrenten og er dermed rentabel. Er nuværdien negativ, er den aktuelle investering ikke rentabel.

2.2.3 Annuitetsbetragtning

Et annuitetslån er et lån, der tilbagebetales med en fast ydelse pr. termin (typisk et halvt år eller et kvartal), dvs. ydelse på lånet = afdrag + forrentning, hvor afdraget for hver termin tilpasses, så ydelserne er konstante og lånet netop afdrages over lånets løbetid.

Annuitetsbetragtningen i relation til energitiltag er baseret på en beregning af de årlige sparede omkostninger ved et energitiltag. De årlige sparede omkostninger er

2 ØKONOMISK MODEL TIL ENERGIOPTIMERING AF BYGNINGER

en sum af de årlige anlægsomkostninger og de årlige drifts- og vedligeholdelsesomkostninger fratrukket den årlige energibesparelse. Er summen positiv er der tale om en årlig gevinst. Er den negativ er der tale om et tab, og dermed er energitiltaget ikke rentabelt.

Ved brug af annuitetsmetoden omregnes anlægsomkostningerne til en konstant årlig omkostning. Dette sker ved at multiplicere anlægsomkostningerne med en ækvivalent årlig omkostningsfaktor, annuitetsfaktoren, som er baseret på investeringens økonomiske levetid, realrenten samt en evt. stigning i driftsudgifter:

$$a(n,r) = \frac{(r - e)}{[1 - (1 + (r - e))^{-n}]}$$

hvor

a er annuitetsfaktor, -

e er realudviklingen i driftsudgifterne, -

r er realrenten, -

n er den økonomiske levetid, år

Annuitetsfaktoren a svarer til den reciproke værdi af nuværdifaktoren f i afsnit 2.2.2. Den årlige sparede omkostning kan dermed beregnes som:

$$TSO_{\text{årlig}} = \Delta E - a(n,r) \cdot I_{\text{tiltag}}$$

hvor

$TSO_{\text{årlig}}$ er de totale sparede omkostninger ved det energibesparende tiltag, kr.

ΔE er de årlige energibesparelse svarende til de nuværende energipriser, kr.

I_{tiltag} er anlægsomkostningen for et energitiltag, kr.

Tages der hensyn til *økonomisk* og *teknisk* levetid (se afsnit 2.1.4), kan der i annuitetsbetragtningen regnes med en restværdi som følger:

$$TSO_{\text{årlig}} = \Delta E - a(n,r) \cdot \left(\frac{n}{n_t} \cdot I_{\text{tiltag}} \right)$$

hvor

n er økonomisk levetid, år

n_t er teknisk levetid, år

2.2.4 Energisparepris

Nedbringelse af energiforbruget for en bygning opnås som regel ved en kombination af forbedrede delkonstruktioner og -løsninger, specielt for lavenergiklasserne. Ud-

2 ØKONOMISK MODEL TIL ENERGIOPTIMERING AF BYGNINGER

fordringen ligger i at finde den optimale kombination af deltiltag, der billigst muligt sikrer en overholdelse af energirammen. Derfor indføres begrebet *energisparepris*, på engelsk Cost of Conserved Energy (CCE) eller Cost of Saved Energy (CSE), som er prisen for at spare 1 kWh [kr./kWh].

Fordelen ved energisparepris er, at man ved at kombinere løsninger med samme energisparepris netop har drevet det enkelte tiltag lige så langt som de andre mht. økonomi. Dette vil være den optimale løsning, da man ikke kan anvende mere af et tiltag og dermed få en billigere løsning.

Desuden er det samtidigt muligt at se forløbet med stadig dyrere energitiltag og sammenligne deres energisparepris med prisen på at købe den. Principielt bør et energitiltag medtages i den samlede løsning og så længe dennes energisparepris er mindre end den aktuelle energipris i kr./kWh.

Metoden er anvendelig til økonomisk optimering af bygninger i lavenergiklasserne. For at opnå disse lavenergiklasser *kan* der være behov for energitekniske løsninger med en energisparepris højere end den aktuelle energipris. Ud fra en rangordning af de energitekniske løsningers energisparepris er det muligt at udvælge den mængde af ”dyre” løsninger, der lige netop skal til for at opnå lavenergiklasserne.

En simpel definition af CSE (uden hensyntagen til udgifter til at låne pengene til energitiltaget) defineres som følger:

$$CSE = \frac{I_{\text{tiltag}}}{n_t \cdot \Delta E_{\text{årlig}}}$$

hvor

CSE er energispareprisen, kr./kWh

I_{tiltag} er investeringsomkostningen (anlægsudgiften) for et energitiltag, kr.

n_t er den tekniske levetid, år

$\Delta E_{\text{årlig}}$ er den årlige energibesparelse, kWh/år

Da investeringen for energibesparelsen er knyttet til boliglånet, som tilbagebetales med årlige afdrag plus renter, annuiseres investeringsomkostningerne som i afsnit 2.2.1 med en annuitetsfaktor, $a(n,r)$. Energispareprisen udregnes nu som en årlig investering divideret med en årlig energibesparelse som følge af investeringen:

$$CSE = \frac{a(n,r) \cdot I_{\text{tiltag}}}{\Delta E_{\text{årlig}}}$$

Ligesom for annuitetsberegninger i afsnit 2.2.1 kan der for investeringen regnes med en restværdi, der er afhængig af investeringens *tekniske* og *økonomiske* levetid, se afsnit 2.1.4. Dette fører til en CSE udtrykt som:

2 ØKONOMISK MODEL TIL ENERGIOPTIMERING AF BYGNINGER

$$CSE = \frac{\frac{n}{n_t} \cdot a(n, r) \cdot I_{\text{tiltag}}}{\Delta E_{\text{årlig}}}$$

hvor

n er den økonomiske levetid, år

Dermed er der en restværdi på:

$$\text{Restværdi} = \left(1 - \frac{n}{n_t}\right) \cdot I_{\text{tiltag}} \cdot$$

For energitiltag, der kræver et vist vedligehold eller bruger en vis mængde energi under drift (f.eks. et ventilationsanlæg), beregnes CSE som følger:

$$CSE = \frac{\frac{n}{n_t} \cdot a(n, r) \cdot I_{\text{tiltag}} + VO_{\text{årlig}}}{\Delta E_{\text{årlig}} - 2,5 \cdot E_{\text{drift,el,årlig}}}$$

hvor

$VO_{\text{årlig}}$ er de årlige vedligeholdelsesomkostninger, kr.

$E_{\text{drift,el,årlig}}$ er det årlige elforbrug til drift, kWh

Ved beregning af $E_{\text{drift,el,årlig}}$ kan man evt. medregne noget af den tilførte el som et varmetilskud. F.eks. vil cirkulationspumper af vådløbertypen typisk afgive næsten hele den optagne elektriske effekt til væsken og dermed varme den op, hvilket kan udnyttes lidt som en varmekilde (men kun med en faktor 1).

2.3 Diskussion af totaløkonomiske modeller

Simpel tilbagebetalingstid giver et hurtigt overslag over den forventede tilbagebetalingstid for en investering uden hensyntagen til eventuelle energiprisstigninger og ønsket forrentning af investeringen. I forhold til langsigtede investeringer, som der er tale om i forbindelse med byggeri, er simpel tilbagebetalingstid derfor utilstrækkelig og for upræcis en metode til at udvælge energimæssige tiltag.

En nuværdibetragtning er især anvendelig for langsigtede investeringers rentabilitet, idet det er muligt at medtage såvel energiprisstigninger som forrentningsforhold. Derudover kan den benyttes til at sammenligne alternative energiforbedringer. Ulempen ved metoden er, at rentabiliteten først er synlig, når hele investeringen er tilbagebetalt, efter f.eks. 30 år. Desuden er vurderingen baseret på en nuværdi, og hvis den er positiv, er investeringen rentabelt. Ved sammenligning af små og store investeringer, er det dog ikke umiddelbart muligt at rangordne dem. Ydermere baserer den sig på en forudsætning om energiprisudviklingen, som måske bliver betvivlet. Metoden kan derfor virke uigennemsigtig og upædagogisk.

2 ØKONOMISK MODEL TIL ENERGIOPTIMERING AF BYGNINGER

Et alternativ til nuværdibetragtninger er annuitetsbetragtninger, hvor investeringen annuiteres, så investeringens årlige afdrag, drift og den årlige energibesparelse er umiddelbart sammenlignelige. Metoden minder derfor om nuværdibetragtningen, men i stedet for at beregne den samlede besparelse over en årrække, beregnes besparelsen *pr. år*.

Annuitetsmetoden kan, ligesom nuværdibetragtningen, medtage stigende energipriser og forrentning og kan ligeledes benyttes til sammenligning af alternative energiforbedringer med forskellige levetider. Ulempen ved både nuværdibetragtning og annuitetsbetragtning er usikkerhederne om forudsætningerne for den ønskede forrentning, inflationstakt, finansieringsomkostninger og energiprisstigning. Fordelen ved metoderne er, at man med brug af teknisk levetid lig lånets løbetid umiddelbart får en likviditetsmæssig vurdering af energitiltagets økonomi allerede det første år.

Energispareprisen (CSE) er en økonomisk model, der med baggrund i en annuitetsbetragtning, indregning af levetider og energibesparelser, bestemmer *prisen for at spare 1 kWh*. Med prisen for at spare 1 kWh bliver energispareprisen et redskab til at rangordne delløsninger af vidt forskellig karakter i forhold til deres totaløkonomi.

Ved at sammenligne energispareprisen på et energitiltag med den aktuelle energipris fås et mål for tiltagets lønsomhed. Principielt bør alle tiltag med en energisparepris mindre end den aktuelle energipris medtages, da disse er rentable.

Desuden er opstillingen af scenarier for udviklingen af den aktuelle energipris fleksibel og gennemskuelig, da energispareprisen og energiprisen kan sammenlignes direkte.

Forventer man, at prisen på energi stiger, kan der være energimæssige tiltag, hvis energisparepris er højere end den nuværende energipris, der bliver aktuelle i forbindelse med fremtidssikring af bygningen (den samlede investering).

2.4 Samlet økonomisk model

Den samlede totaløkonomiske model har til formål at frembringe et byggeri, der overholder den valgte energiklasse på totaløkonomisk mest forsvarlig vis. For at opnå dette, skal det være muligt at vurdere et energimæssigt tiltags rentabilitet; tiltagets energibesparelse afvejes med tiltagets anlægsomkostning.

Til at foretage denne afvejning er det fundet hensigtsmæssigt at benytte en økonomisk model bygget på energispareprisen (CSE), som den er beskrevet i afsnit 2.2.4. For at kunne benytte energispareprisen kræves der oplysninger om to ting:

- *Tiltagets investeringsomkostning*; beror på oplysninger fra f.eks. producenter og/eller prisbøger.
- *Tiltagets energibesparelse*; beror på en beregning af tiltagets energimæssige besparelse i forhold til en referenceløsning.

Når den samlede totaløkonomiske løsning er fremkommet vha. energispareprisen, foretages der en nuværdibetragtning, se afsnit 2.2.2, til bedømmelse af den samlede løsnings rentabilitet i forhold til referencebygningen.

3 Fastlæggelse af reference

I den økonomiske model til energioptimering af bygninger beskrevet i afsnit 2.4 er det vigtigt *ikke* at betragte den marginale pris for at spare yderligere 1 kWh (variabel reference), men i stedet betragte den gennemsnitlige pris for at spare 1 kWh ved et energimæssigt tiltag i forhold til referenceniveauet (fast reference):

- Ved fast reference ses der på energibesparelsen ved at øge isoleringstykkelsen fra mindste isoleringstykkelse op til det aktuelle niveau. I beregning af CSE er det prisen på dette samlede ekstra isoleringslag der indgår.
- Ved variabel reference ses der på energibesparelsen ved at øge isoleringstykkelsen marginalt fra en lidt mindre tykkelse til aktuelle tykkelse. I energispareprisen indgår kun prisen på det lille ekstra lag.

Det er umiddelbart klart, at energibesparelsen opgjort ud fra en fast reference svarende til et mindste isoleringsniveau, er større, end hvis den opgøres som den marginale. Det er desværre nærliggende at benytte den marginale betragtning, idet man tager udgangspunkt i isoleringstykkelsen svarende til det gamle isoleringskrav, eller svarende til typehusets nuværende isoleringstykkelse. Derved begås der imidlertid en fejl, idet man ikke får den første del af den ekstra isolering med i beregningen.

Det rationelle argument er, at man benytter den mindste isoleringstykkelse som reference, da den svarer til en isolering af klimaskærmen, der er nødvendig for at opfylde krav om at undgå kolde indvendige flader, der kunne føre til kondens- og trækproblemer. Derefter isoleres der yderligere for at spare ekstra energi. Denne ekstra isoleringstykkelse kan derfor optimeres ud fra energispareprisen.

I det efterfølgende beskrives:

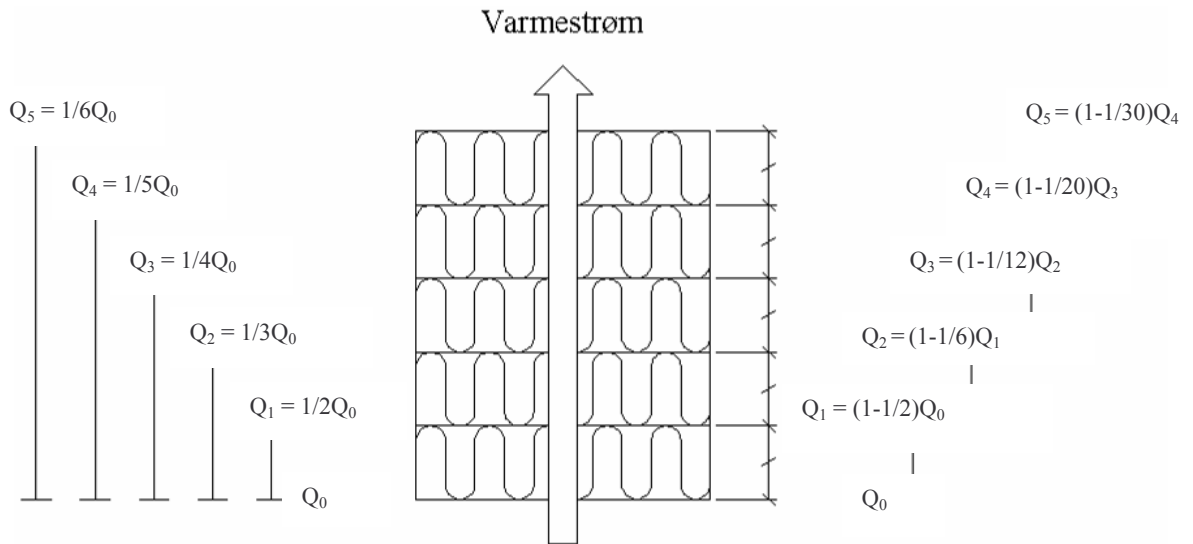
- Det matematiske argument for at beregne energibesparelser med fast reference.
- Fastsættelse af rimelige referenceværdier til beregning af energibesparelser.

3.1 Matematisk argument for fast reference

Varmestrømmen som funktion af isoleringstykkelsen er illustreret i Figur 3.1.

3 FASTLÆGGELSE AF REFERENCE

Der er i Figur 3.1 tale om varmemstrømme beregnet ud fra hhv. *fast reference* og *variabel reference*. Der er i figuren valgt en isoleringstykkelse, der for det første lag lige netop halverer Q_0 (venstre side af Figur 3.1). Figur 3.1 kommenteres i de efterfølgende afsnit.



Figur 3.1. Varmestrømmen Q beregnet ud fra fast reference (venstre side) og variabel reference (højre side). Q 's indeks refererer til antallet af lige tykke materialelag i konstruktionen. Q_0 er varmemstrømmen gennem konstruktionen svarende til den mindste isoleringstykkelse. I efterfølgende eksempel regnes der med et antal lag som alle har en tykkelse, der giver dem en isolans, der svarer til $1/Q_0$.

Fast reference

Ved "fast reference" (venstre side af Figur 3.1) beregnes varmemstrømmen altid fra samme udgangspunkt uanset isoleringstykkelse; hvis n er antallet af lige tykke isoleringslag er varmemstrømmen gennem lagene:

$$Q_n = (n + 1)^{-1} \cdot Q_{n-n} = (n + 1)^{-1} \cdot Q_0$$

Energibesparelsen ΔQ_n , hvor n er antal lige tykke isoleringslag, kan beregnes som:

$$\Delta Q_n = Q_n - Q_{n-n}, \text{ hvor } Q_{n-n} \text{ altid er lig } Q_0, \text{ dvs. } \Delta Q_n = Q_n - Q_0$$

Variabel reference

Ved variabel reference ændres udgangspunktet for beregningen af varmemstrømmen ved en forøgelse af antallet af lige tykke isoleringslag (højre side af Figur 3.1). Dermed reduceres varmemstrømmen med den brøkdelen af varmemstrømmen, der spares ved at tilføje et ekstra isoleringslag i forhold til den variable reference (Q_1, Q_2, \dots, Q_n).

3 FASTLÆGGELSE AF REFERENCE

Matematisk kan varmemstrømmen Q_n , hvor n er antallet af lige tykke isoleringslag, for variabel reference beskrives som følger:

$$Q_n = \left[1 - \left[\frac{1}{n} - \frac{1}{(n+1)} \right] \right] \cdot Q_{n-1} = \left(1 - \frac{1}{n(n+1)} \right) \cdot Q_{n-1} = \prod_{i=1}^n \left(1 - \frac{1}{i(i-1)} \right) \cdot Q_0$$

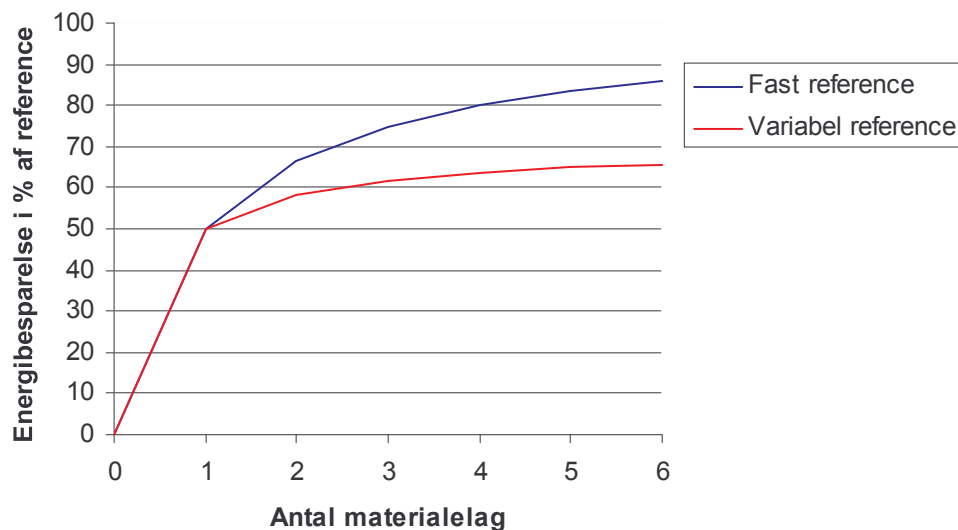
for $n > 0$. For $n = 0$ er $Q_n = Q_0$.

Energibesparelsen ΔQ_n , hvor n er antal lige tykke isoleringslag, kan beregnes som:

$$\Delta Q_n = Q_n - Q_{n-1} \text{ for } n > 0.$$

3.1.1 Den reelle energibesparelse

På Figur 3.2 ses den procentvise energibesparelse i forhold til referencen (en varmemstrøm på 100 kWh) som funktion af antallet af lige tykke isoleringslag, beregnet ud fra hhv. fast og variabel reference. Der er i figuren valgt en isoleringstykkelse, der for det første lag lige netop halverer referencen.



Figur 3.2. Energibesparelse i % af referencen som funktion af antal isoleringslag.

Ved benyttelse af fast reference kan der aflæses en højere energibesparelse end for den variable reference. Beregning af energibesparelse ud fra en variabel reference giver et misvisende billede af den energibesparelse, der reelt opnås over n antal isoleringslag. Den faste reference giver et korrekt billede af den energibesparelse, der opnås.

3.2 Fastsættelse af reference til beregning af energibesparelser

I afsnit 3.1 påvises det, at energibesparelsen beregnet ud fra en fast reference giver det korrekte billede af energibesparelsen. Derfor er det i praksis vigtigt, at referencens størrelse er baseret på rimelige overvejelser. En urimeligt lav reference vil betyde, at energibesparelserne vil være kunstigt høje, og omvendt fås der en kunstigt lav energibesparelse, hvis referencen er urimeligt høj.

I forbindelse med beregning af energibesparelser er størrelsen af referencen derfor afgørende for størrelsen af besparelsen.

For bygningens konstruktioner vil den teoretisk korrekte reference være en helt uisolere konstruktion. Dette vil dog ikke være rimeligt, da der i de kommende energibestemmelser, som beskrevet i kapitel □, er opstillet en række krav til mindste varmeisolering for en bygnings konstruktionsdele (Tabel 1.2). Derfor er det mest logisk at tage udgangspunkt i disse værdier og benytte dem som referenceværdier i beregning af energibesparelser.

Ventilationen vil referencemæssigt være naturlig ventilation, da dette er en normal situation og ligeledes anses for at være et mindstemål for opretholdelse af bygningens funktion og opfyldelse af de krav, der stilles til den i bygningsreglementet (luftskifte på $0,5 \text{ h}^{-1}$).

Referencen for andre installationer vælges efter behov. Referencerne bør være almindelige, velkendte produkter, der kan betragtes som en standardløsning. F.eks. er cirkulationspumpen en Grundfos Alpha 15-60, som er en generelt anvendt pumpe til cirkulation i gulvvarme. Pumpen indtræder kun i referencen, hvis den aktuelle bygning kræver en pumpe.

4 Delkonklusion for del A

I del A er det lovmæssige grundlag, i form af bruttoenergirammen og lavenergi-klasserne, beskrevet. Som forslag til optimeringsmodeller er der opstillet en række økonomiske optimeringsalternativer, som er alment kendte og benyttes i praksis. Disse inkluderer simpel tilbagebetalingstid, nuværdimetoden, annuitetsmetoden og energisparepris. Efter en diskussion af alternativerne er energispareprismetoden valgt som økonomisk model for den totaløkonomisk optimering af bygningen. I forbindelse med energispareprismetoden er det relevante referenceniveau diskuteret og fastsat.