INSTITUTTET FOR HUSBYGNING

Rapport nr. 137

SIGURD ANDERSEN

DET AKKUMULEREDE ENERGIFORBRUG TIL FREMSTILLING AF BOLIGER

Den polytekniske Læreanstalt, Danmarks tekniske Højskole
Lyngby 1980

FORORD

Denne rapport sammenfatter et arbejde, der er udført af undertegnede ved Instituttet for Husbygning, Danmarks tekniske Højskole, fra september 1977 til marts 1980, finansieret ved et licentiatstipendium. Emnet har været "Energiforbrug til fremstilling af boliger" og er behandlet gennem litteraturstudier, udviklingsarbejde, og et studium af gennemførte byggerier med henblik på materialeforbrug og opførelsesmetoder.

Litteraturstudierne har især drejet sig om energianalysers teori, energiforbruget på byggepladsen og energiforbruget i forbindelse med fremstilling af de mest forekommende byggematerialer og er foruden i denne rapport nærmere beskrevet i to rapporter: Rapport nr. 134 "Det akkumulerede energiforbrug til fremstilling af byggematerialer" og rapport nr. 135 "Energiforbruget på byggepladsen".

Udviklingsarbejdet beskæftiger sig dels med energianalysemetoder og dels med materiale- og energibesparelser i utraditionelle råhuskonstruktioner. Det sidste er beskrevet i rapport nr. 136 "Isostatdæk".

Disse tre rapporter må betragtes som bilag til denne rapport, men kan dog læses særskilt, hvis man er specielt interesseret i disse delemner.

Som faglærere for licentiatstudiet har
professor, arkitekt m.a.a. Knud Peter Harboe og
lektor, civilingeniør Erik Reitzel
ydet et væsentligt bidrag igennem inspiration og vejledning, og der skal til alle ansatte på Instituttet for Husbygning rettes en tak for positiv, kritisk hjælp.

Lyngby, maj 1980

Sigurd Andersen

RESUMÉ

Rapporten er en energianalyse af fremstillingsprocessen af boliger fra råstofudvinding til afslutningen af boligens benyttelse.

Hovedvægten er lagt på en grundig beskrivelse af energianalysers og specielt denne analyses nødvendige forudsætninger samt en anvendelse af energianalyseredskabet på boligens råhuskonstruktioner.

Baggrunden for rapporten er i høj grad tre tidligere rapporter fra Instituttet for Husbygning:

Rapport nr. 134: "Det akkumulerede energiforbrug til fremstilling af byggematerialer".

Rapport nr. 135: "Energiforbruget på byggepladsen".

Rapport nr. 136: "Isostatdæk".

Til yderligere uddybning af baggrunden og detaljer henvises der til disse rapporter.

Der er i denne rapport udviklet nogle udbyggede energianalysemetoder til brug ved sammenligninger af totalenergiforbrug over bygningers levetid. Energianalysens øvrige grundlag er inspireret af tidligere arbejder på dette felt, dog centreret om danske forhold.

Der er foretaget modelberegninger over materialeforbrug og energiforbrug til fremstilling af råhuse for forskellige bygningsformer og statiske systemer.

Disse undersøgelser er suppleret med analoge beregninger for eksisterende bygninger.

Dette danner grundlag for en bestemmelse af materialevalgets, konstruktionsvalgets og bebyggelsesartens indflydelse på energiforbruget til fremstilling af boligens råhuskonstruktioner.

Rapporten afsluttes med en række eksempler på de udviklede energianalysers anvendelse ved belysning af

det totale energiforbrugs afhængighed af energibesparende foranstaltninger. Der angives da nogle grænseværdier for energibesparende foranstaltningers omfang, bestemt ved at totalenergiforbruget er minimum inden for foranstaltningernes forventede levetid.

Med hensyn til resultaterne refereres til konklusionen og rapportens indhold i øvrigt.

SUMMARY:

This report is an energy analysis of the production process of buildings, from the extraction of the raw material until the occupation of the building has ended.

The main stress is laid on a thorough description of the conventions necessary for energy analyses, and especially for this energy analysis, which is dealing with the basic structures of buildings.

The basis for this report is to a high degree three previous reports published by the Institute of Building Design (Instituttet for Husbygning). These are:

Report No. 134: Det akkumulerede energiforbrug til fremstilling af bygningsmaterialer.
(The Accumulated Energy Consumption for the Production of Building Materials)

Report No. 135: Energiforbruget på byggepladsen.
(Energy Consumption on Building Site)

Report No. 135: Isostatdæk (Isostatic Plates)

I refer to these reports for more detailed information about the background.

In this report I have developed some energy analysis methods to be used when comparing total energy consumptions during the lifetime of buildings. The rest of the energy analysis is based on inspirations from previous studies into this field, though I have concentrated on Danish conditions.

I have made some model calculations of material consumption and energy consumption for the production of main building structures, regarding building shape and static system.

These investigations are supplementet with analogous calculations of existing buildings, which gives a basis for determining the influence of choice of material, the choice of structure and the influence of the building shape on the energy consumption for production of main building structures.

At the end of the report are given a series of examples of the use of the developed energy analysis methods in order to enlighten the dependence of energy saving measures on the total energy consumption in lifetime. There are given some limit values for the dimensions of the energy conservation measures, determined by the total energy consumption being minimum within the expected lifetime of the saving measures.

Regarding the results I refer to the conclusion and the further content of this report.

INDHOLDSFORTEGNELSE: side

FORORD

RESUMÉ

SUMMARY

INDHOLDSFORTEGNELSE

FORTEGNELSE OVER ANVENDTE FORKORTELSER

0 ENERGIANALYSER 1

0.1 Energi 1

0.1.1 Hvad er energiforbrug ? 3

0.1.2 Energiens forsvinden eller exergien 4

0.2 Analyseområdets afgrænsning 8

0.2.1 Geografisk afgrænsning 8

0.2.2 Energiproduktionens afgrænsning 9

0.2.3 Afgrænsning af analyseobjektets produktion 11

0.2.4 Tidsmæssig afgrænsning 13

0.3 Beregningsmetoder for energianalyser 18

0.3.1 Driftsenergiforbruget 18

0.3.2 Forbrugsmetoden 18

0.3.3 Besparelsesmetoden 21

0.3.4 Regneregler for energianalyser 23

Litteratur 25

1 ENERGIFORBRUGET I BYGGESEKTOREN I DANMARK, STATISTISK BELYST 28

Litteratur 31

2 TRANSPORTENS ENERGIFORBRUG 32

2.0 Godstransport 32

2.1 Naturens love 34

2.2 Transportarbejde 35

2.3 Persontransport 36

2.4 Arbejdskraftforbrug 38

Litteratur 39

3 ENERGIFORBRUGET TIL FREMSTILLING AF BYGGE-MATERIALERNE I BOLIGEN 40

3.1 Sammenligningsgrundlag 41

3.2 Beregninger af materialeenergiforbruget 42

3.3 Potentielle besparelser 43
3.4 Niveau og fordeling 45
Litteratur 47

4 ENERGIFORBRUGET PÅ BYGGEPLADSEN 48
4.1 Beregningsmetode 48
4.2 Beregnede energiforbrug 49
Litteratur 52

5 ANLÆGSENERGIFORBRUGETS STØRRELSE 53
5.1 Tidligere undersøgelser 53
5.2 Minimering af anlægsenergiforbruget 55
5.3 Råhusets overordnede geometri 58
5.4 Materialeforbrug 63
Litteratur 65

6 ENERGIFORBRUGET TIL DE PRIMÆRE KONSTRUKTIONER 67
6.1 Analyserede byggerier 67
6.2 Bygningsbasis 68
6.3 Råhusets primære dele 70
6.4 Beklædninger 73
6.5 Totalt forbrug over boligens levetid 74
6.6 Materialevalget til eenfamiliehuse 76
Litteratur 79

7 MINIMERING AF RÅHUSETS PRIMÆRE KONSTRUKTION 80
7.1 Modelberegning 80
7.2 Besparelser 81
Litteratur 82

8 ANLÆGSENERGIFORBRUG TIL DE SEKUNDÆRE KONSTRUKTIONER 83
8.1 Kompletterende dele 83
8.2 VVS-anlæg 86
8.3 Vedligeholdelse 88
8.4 Akkumulerede anlægsenergiforbrug over 100 år 89
Litteratur 93

9 GRÆNSETILFÆLDE FOR FORHOLDET MELLEM ANLÆGS- OG DRIFTSENERGIFORBRUG 94
9.1 Isoleringstykkelser 95
9.2 Vinduets isoleringsevne 98
9.3 Varmegenvinding 99
9.4 Solfangere 100
9.5 Lavenergihuse 101
9.6 Energibesparelser i den ældre boligmasse 103
9.7 Grænseværdier i praksis 105
Litteratur 106

10 KONKLUSION 108
Litteratur 114

BILAG I B-1
Litteratur B-13

FORTEGNELSE OVER ANVENDTE FORKORTELSER

Forkortelse		Er def. Side
AER	Accumulated Energy Requirement	24
AES	Accumulated Energy Spare	24
ASF	Aktuelt Specifikt energiForbrug	44
EL	Elektricitet	40
ERB	Energy Requirement on Building Site	40
ERC	Energy Requirement for Construction	23+40
ERM	Energy Requirement of Materials	40
ERO	Energy Requirement of Operation	23
ERR	Energy Requirement of Renewals	23
ERS	Energy Requirement for Services	40
FB	Fast Brændsel	40
FSF	Fysisk-teoretisk minimalt Specifikt	44
GB	Gasformigt Brændsel	40
GER	Gross Energy Requirement	B1
MSF	Minimalt Specifikt energiforbrug i praksis.	44
PBT	Pay-Back Time	24
T	Levetid	24
TCR	Time Curve of Requirement	23
TCS	Time Curve of Spare	23
VB	Væskeformigt Brændsel	40

Se endvidere side 13

0. ENERGIANALYSER

Energianalyse kan defineres som en beregning af det totale energiforbrug til produktion af et givet objekt inden for et givet analyseområde, afgrænset dels med hensyn til energiproduktion, objektproduktion, geografisk udstrækning og tid.

Objektet kan være en vare, en tjeneste, en foranstaltning eller en løbende fastholdelse af en bestemt tilstand af omgivelserne.

Energianalysernes formål er at afdække de energimæssige konsekvenser af en bestemt handling.

I næsten alle tilfælde, og især inden for boligens område, bliver energianalysen da en afvejning mellem et anlægsenergiforbrug og et løbende driftsenergiforbrug, hvor tidsfaktoren, som tidligere nævnt, får en væsentlig betydning.

Dette fænomen kendes allerede fra økonomiske beregningsmetoder for energibesparelsers virkning (se f.eks. [74.0]).

Den allervæsentligste faktor i energianalysen er imidlertid det, man kalder energi eller energiforbrug.

0.1 Energi

Som vor civilisation har udviklet sig, har værdien af forbrug været genstand for mere og mere intensiv vurdering. Man har gennem tiderne prøvet at måle værdi i f.eks. korn eller ædel-metaller, og idag er værdimålet penge. Alt er omsat i penge: En times arbejde på et postkontor, en flyverejse til Mallorca, en æske tændstikker o.s.v. En anden værdimåler kunne være arbejdskraft. F.eks. kan en flyverejse til Mallorca omregnes til et vist antal mandtimer. Man vil kunne omregne denne værdi til penge ved hjælp af arbejdslønnen. Arbejdskraft er

en ressource, hvorved man kan skabe værdi i form af penge. Denne værdi er, som brugsværdi, af kvalitativ art, men som mængde af kvantitativ art.

Foruden arbejdskraften anvendes også de fra naturen givne ressourcer ved fremstillingen af håndgribelige værdier. Disse ressourcer har ingen værdi, før de bliver udnyttet; man kan kun tale om, at de har potentiel værdi, som mulighed for udnyttelse. Sammenfattende kan det siges, at den materielle civilisation, som vi har oparbejdet her i Europa, er et kompliceret system af værdiskabelse på mange forskellige stader med udnyttelse af mange forskellige ressourcer og tilsvarende forbrug.

En af de vigtigste ressourcer er energi*. Mennesket har evnen til at få andre til at gøre arbejdet for sig - ikke blot andre mennesker, men også dyr og i de sidste 200 år også maskiner. Udnyttelsen af maskiner til arbejde kræver energiressourcer i form af forskellige energibærere. Energibærere er ressourcer, som i kemiske, elektriske og mekaniske processer kan frigøre energi. Energibærere deles op i flere kategorier, de primære og de sekundære, tertiære o.s.v. Primære energibærere er f.eks. uran, kul, olie, gas, træ, solstråling, vind og beliggenhedsenergi, vandløb, mens sekundære energibærere kan være damp, varmt vand, varm luft eller elektricitet.

De primære energikilder, som med dagens teknologi kan udnyttes i større målestok, er genstand for stor opmærksomhed, idet man har kunnet forudsige en mangel på disse med en fortsat udvikling som den nuværende. Endvidere betyder en udnyttelse af energibærere olie, kul, gas og fossilt brændsel med den anvendte teknologi en forurening af vore omgivelser med affaldsstoffer, kultveilte og varme.

* Ordet energi er afledt af det græske ord for arbejde, ERGON.

Samfundet er interesseret i dels at nedsætte forureningen, d.v.s. forbruget af fossilt brændsel, dels at erstatte disse primære energibærere med alternative energiformer som solstråling, vind, uran og vandkraft m.m. Disse kan imidlertid ikke udnyttes i stort målestoksforhold med den teknologi, vi har idag.

0.1.1 Hvad er energiforbrug

Energi, energiforbrug og energiøkonomi er ord, der bruges ofte og angives i mange måleenheder.

Hvad er energiværdien af en liter olie, af en skive brød, af en bil eller af en lægekonsultation ? Umiddelbart siger man sig selv, at det kan da ikke sammenlignes. Man kan rent videnskabeligt måle forbrændingsenergien af en liter olie (ca. 10 kWh/ℓ). Det samme kan man gøre for en skive brød, og får derved et mål for den energimængde, et menneske udnytter ved fordøjelsen af en skive brød. Man kan også betragte de mængder energiressourcer, der er medgået til fremstillingen af en skive brød på en brødfabrik, på et landbrugssted, på en mølle, på en fabrik o.s.v. Man får så et mål for den mængde energiressourcer, en skive brød repræsenterer.

En bil kan vurderes på samme måde. Ved en lægekonsultation kan man ikke forestille sig nogen energiværdi umiddelbart. Man kan imidlertid med en vis ret ækvivalere en time af lægens arbejde med hans gennemsnitlige totale energiforbrug over en lang periode, analogt f.eks. en arbejdshest og dens foderforbrug.

Det ses, at det er svært at sammenligne energiværdier, og der må på en eller anden måde skabes en betragtningsmåde, som er fornuftig for at kunne sammenligne.

Det er da nødvendigt at definere et system, eller et område hvori en analyse af energiforbrug kan foregå. Dette system må afgrænses så klart som muligt, for at resultaterne af analysen kan vurderes korrekt.

Men først: Hvad siger videnskaben om energi ?

0.1.2 Energiens forsvinden eller exergien

Energi, og teorien om dens udnyttelse, behandles i den videnskab, som kaldes termodynamik. Denne videnskab, der især blev udviklet i perioden forud for industrialiseringens begyndelse, beskæftiger sig med energiens former og sammenhængen mellem energi, arbejde og stoffers tilstandsform.

En af grundsætningerne i termodynamikken er termodynamikkens 1. hovedsætning:

$$\Delta E - Q + W = 0$$

hvor

ΔE er ændringen i indre energi af et system,
Q er den tilførte varme, og
W er det udførte arbejde,

som ofte bliver udlagt som loven om energiens bevarelse. I energidebatten idag bruges imidlertid hele tiden udtrykket "energiforbrug", som indicerer, at energien gradvis reduceres. Dette hænger sammen med, at de to udsagn gælder henholdsvis for isolerede energisystemer og energisystemer, der udveksler energi med hinanden.

Den klassiske termodynamik, som hovedsagelig udvikledes med henblik på maskiners energiomsætning, kan kun dårligt forklare de lovmæssigheder, der gælder for "læren om energiens husholdning" i vores samfund. Hertil er J.N. Brøndsteds reviderede termodynamik, [60.0], energetikken, bedre egnet. Kemikeren Brøndsted udviklede sine teorier om energetikken i 1930'erne og indførte mere almengyldige begreber, der ifølge [78.1] også kan anvendes i andre videnskaber.

Energetikkens grundbegreber er "kvantitet", "potentiale" og "arbejde". I en proces flyttes der kvantitet fra et potentiale til et andet potentiale. Brøndsted opstiller fem grundprocesser, som foregår i systemer indeholdende forskellige typer af kvantitet:

Grundproces	Kvantitet	Potentiale
mekanisk	masse	mekanisk potentiale
spatisk	rumfang	tryk
kemisk	stofmængde	kemisk potentiale
thermisk	entropi	temperatur
elektrisk	elektricitetsmængde	elektrisk potentiale

Disse grundprocesser er næsten altid kombinerede i en virkelig proces, men fælles for dem alle gælder, at det system, de foregår i, arbejdsreservoiret, har en potentiel energi. I de reversible processer, som foregår i isolerede systemer, vil den potentielle energi være konstant. Denne lovmæssighed svarer således til loven om energiens bevarelse.

Der skal herefter ikke kommes dybere ind på Brøndsteds energetik, men gives en beskrivelse af, hvad hans teorier betyder i forbindelse med "energihusholdningen".

Som Smith Sørensen skriver, [78.1], kan de relevante fysiske hændelser beskrives som irreversible processer, d.v.s. processer, der forløber i én retning resulterende i en bestemt tilstandsændring og et bestemt arbejdstab. Systemet, arbejdsreservoiret, kræver da et større arbejde tilført end det førnævnte arbejdstab, for at blive ført til den oprindelige tilstand. Retningen af procesforløbet er altid fra et højere potentiale til et lavere potentiale, og arbejdstabet i arbejdsreservoiret er samtidig et tab af potentiel energi. Begrebet potentiel energi er ikke begrænset til den klassiske betydning som f.eks. i forbindelse med tyngdeloven.

I Brøndsteds energetik betyder potentiel energi: Muligheden for at udføre arbejde. Idag har barnet fået et andet navn i termodynamikken, nemlig exergi. Med "exergi" har man et ideelt videnskabeligt værktøj til benyttelse i energihusholdningen.

I den irreversible proces opstår der samtidig med exergitabet en entropitilvækst. Brøndsted kalder entropien for den termiske kvantitet, hvilket kan forklares som en temperaturtilstand af et udbredt stof eller den "fordelte temperatur". Populært forklaret er entropien exergiens modsætning eller dens forureningsprodukt.

De systemer, eller arbejdsreservoirer, der kommer på tale i forbindelse med energihusholdning, vil alene indeholde irreversible processer og kan derfor beskrives ved hjælp af exergi og entropi.

Begreberne kan anskueliggøres gennem følgende eksempler:

A: Der betragtes et vandfald, der løber ned i en sø. Retningen af den irreversible proces følger af vandets strømning eller jordens tyngdefelt. Under vandets fald tabes der en exergimængde svarende til vandets tab i beliggenhedsexergi, men samtidig udvikles der entropi i vandet i form af en stigning i vandtemperatur, som derefter udveksles med søens vand. Processen er en kombination af mekaniske og thermale grundprocesser.

B: Opvarmning af et hus ved hjælp af oliefyr består næsten udelukkende af termiske grundprocesser, hvorved hele exergien omdannes til entropi, som derefter udveksles med husets omgivelser. I forbrændingen omdannes exergien, i dette tilfælde kemisk bundet exergi, til entropi ved høj temperatur, der f.eks. ved hjælp af et radiatorsystem flyttes til en entropireservoire ved lav temperatur, rumluften.

På denne måde kan energihusholdningen behandles med eksakt definerede begreber ved hjælp af Brøndsteds energetik. Derigennem kan de normalt benyttede størrelser defineres.

Energiressourcer bliver da synonym for exergi. Varme bliver synonym for entropi, således at højtemperaturvarme svarer til entropi ved høj temperatur, og lavtemperaturvarme svarer til entropi ved lav temperatur. Energiforbrug svarer til forbrug af exergi og energitab til tab af exergi. Endelig er energibærere da håndtérbare medier, der indeholder exergi.

Når der derfor i det følgende tales om energiforbrug og energitab m.m., kan disse størrelser netop forklares med en reduktion af exergien ud fra Brøndsteds energetik.

0.2 Analyseområdets afgrænsning

Afgrænsning og definition af det grundlag, hvorpå man udtalte sig om energiforbruget, var i tidligere tider meget forskellig fra analyse til analyse.

I 1974 fik man en slags vejledning i energianalysemetoder fra en IFIAS-workshop [74.1], hvor det anbefales at følge konventioner, der definerer afgrænsninger for energiproduktion og produktion af analyseobjekt, de to vigtigste faktorer.

To andre faktorer, som er næsten lige så væsentlige, er analyseområdets geografiske udstrækning og analysens tidshorisont.

De valgte områdegrænser på disse fire niveauer er for denne rapports vedkommende beskrevet i de følgende afsnit.

0.2.1 Geografisk afgrænsning

Det har i arbejdet været svært at afgøre, hvilke hensyn der skulle tages til geografisk afgrænsning af dataindsamlingen. Der er ting, der taler for at anlægge en global betragtningsmåde, hvilket først og fremmest skyldes, at en masse indirekte energiforbrug tilføres gennem importerede byggematerialer m.m. På den anden side er en hel del andre forbrug og forbrugsmønstre ret specielle for Danmark dels på grund af klimaforhold og på grund af teknologisk udvikling. F.eks. er energiforbruget på byggepladsen i Danmark betydeligt større end i Sydeuropa på grund af vinterforanstaltningerne.

For at give så ensartede forudsætninger som muligt er dataindsamlingen forsøgt tillempet danske forhold i så høj grad som muligt, dog tages de energiforbrug, som tilføres indirekte ved import af byggematerialer, med i regning, således at selve den geografiske afgrænsning er global, men centreret om danske forhold.

0.2.2 Energiproduktionens afgrænsning

Det er kendt, at ikke alle energiformer er kvalitativt lige gode, både ud fra et produktionssynspunkt og ud fra et miljøsynspunkt. Man taler populært om hård kontra blød energi eller højværdienergi kontra lavværdienergi. F.eks. er 1 kWh elektricitet egnet til udførelse af langt flere typer af arbejde end 1 kWh varmeenergi ved sædvanlige temperaturer.

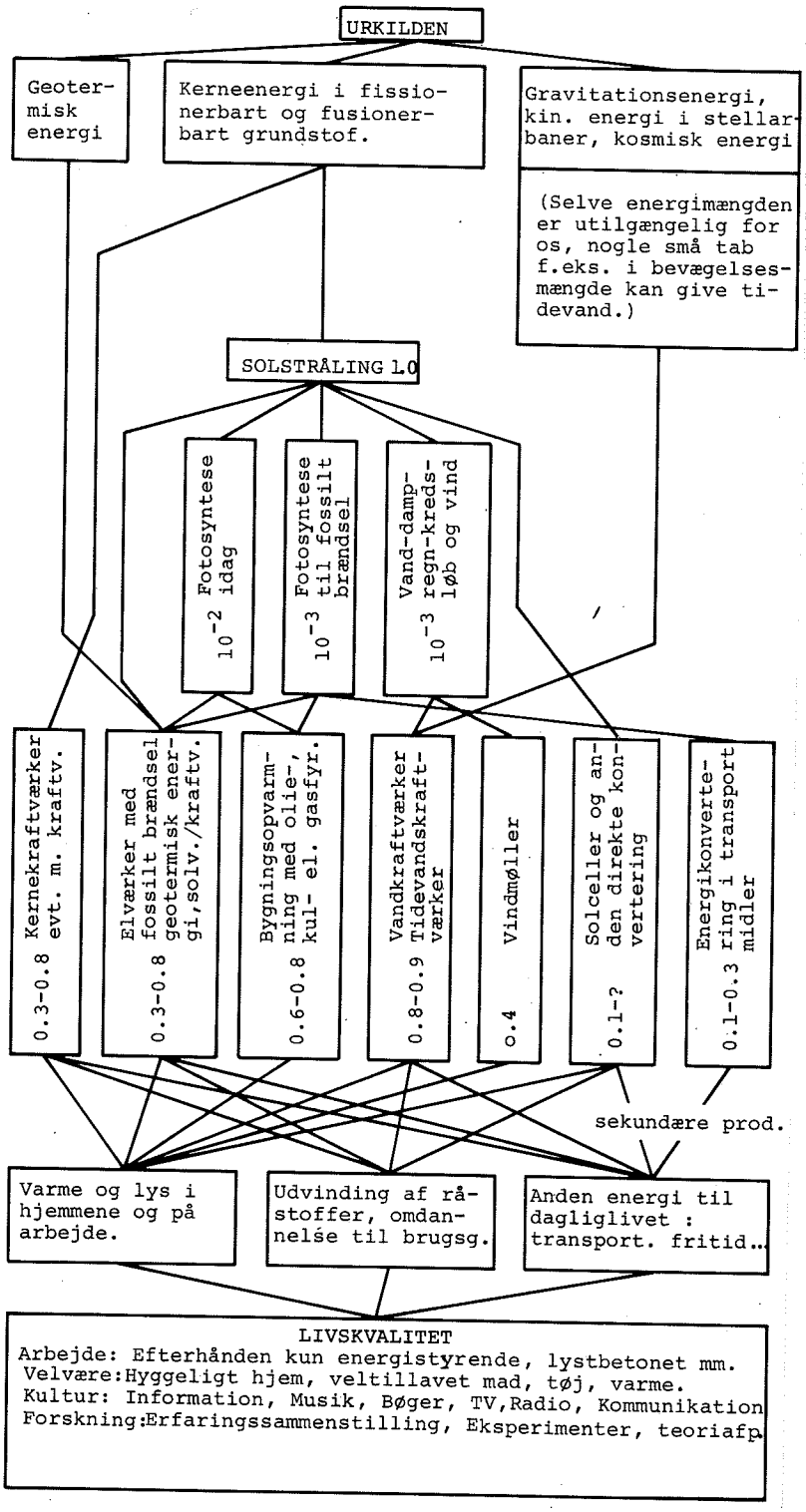
Man kan omdanne elektrisk energi til varme med en udnyttelse på 100%, men man kan med de processer, vi kender idag, som f.eks. bruges i dampturbiner og generatorer kun udvikle elektricitet af varme med en meget lavere udnyttelse 25-40%. Dette hænger sammen med processernes termodynamiske begrænsninger. For omdannelse af varmeenergi til bevægelsesenergi, som det sker i dampturbiner, også kaldet Carnot processen, kan nyttevirkningen ikke overstige værdien $\frac{T_o - T_u}{T_o}$, hvor T_o og T_u er indgangs og udgangsværdier af damptemperaturen.

Hvert energiforvandlingstrin, energikonvertering, er derfor i praksis behæftet med et tab af energi i form af varmestrømme. Varmestrømmene kan igen udnyttes og konverteres til ønskede energiformer, men også her er der forskel på varmeenergiens kvalitet, idet højtemperaturenergi meget lettere end lavtemperaturenergi kan udnyttes.

Man kan altså evaluere energiens kvalitet efter dens tilstandsform.

Al energi konverteres til slut til lavtemperaturvarme. Denne varme kan kun bruges til opvarmningsbehov, altså komfort for det enkelte menneske, men meget vanskeligt til procestekniske formål i produktionen.

Denne forskel i energikvalitet vælges det at tilgodese ved at regne alle energiforbrug af kemisk



Figur 0.2.2.1:

Energiens vej fra urkilden til brugeren. I denne analyse regnes energiforbruget tilbage til de primære energiformer. Kilde [77.3].

bundet energi ved hjælp af de aktuelle virkningsgrader for konverteringsprocesserne.

Drejer det sig om en økologisk analyse, må man måske tage hensyn til endnu flere trin tilbage til energiens urkilde, jvf. figur 0.2.2.1.

Interne definitioner

Ved energiforbrug - hvor ikke andet er angivet - menes forbrug af kemisk bundet energi i form af primært brændsel*

Den kemisk bundne energi omregnes ved hjælp af brændslets nedre brændværdi til energiforbrug.

Brændsel, som indgår i det færdige objekt (materiale) medregnes ikke i energiforbrug.

Det er indlysende, at for at udvinde og raffinere brændsel kræves også energi, men det er valgt at lægge grænsen ved det brugsklare brændsel. Dette er muligt inden for det danske område, hvor praktisk taget hele energiforsyningen idag er baseret på fossilt brændsel.

I de tilfælde, hvor der benyttes ikke-fossile energibærere, f.eks. uran, vandkraft eller solenergi, bliver det ikke muligt at bruge ovenstående afgrænsninger, men da vil den i [74.1] givne størrelse GER**være den rigtige regneværdi.

De detaljerede forudsætninger for afgrænsning af energiproduktionen og en omregningsmetode til GER-værdier er givet i BILAG 1.

Enheden for energimængder er i denne undersøgelse kWh og alle andre enheder er SI-enheder eller multipla af SI-grundenheder.

* Primært brændsel defineres som raffinerede olieprodukter, naturgas eller kul.
**GROSS ENERGY REQUIREMENT

Egentlig skulle der anvendes Joule (J), men da denne enhed i mange tilfælde vil give store og uhåndterlige tal, vælges det at anvende kWh (1 kWh = 3600 J = 3600000 J).

1 Wh	= 3600 J = 860 cal.	
1 kWh	= 10^3 Wh	(kilo)
1 MWh	= 10^6 Wh	(Mega)
1 GWh	= 10^9 Wh	(Giga)
1 TWh	= 10^{12} Wh	(Tera)

Tabel 0.2.2.1:

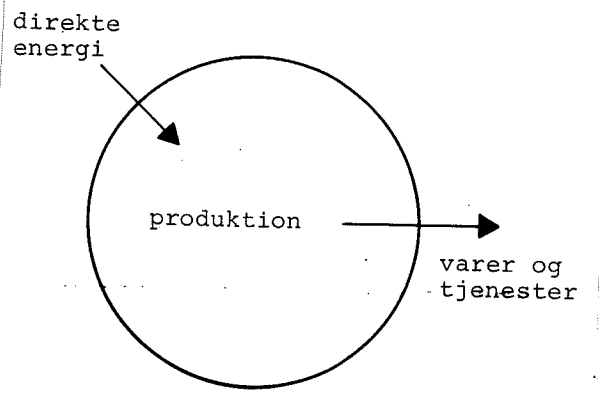
Omregning mellem energienheder.

0.2.3 Afgrænsning af analyseobjektets produktion

Produktion af materialer m.m. foregår i industrilandene med en teknologi, der ofte kræver en meget stor kontaktflade til andre områder og sektorer.

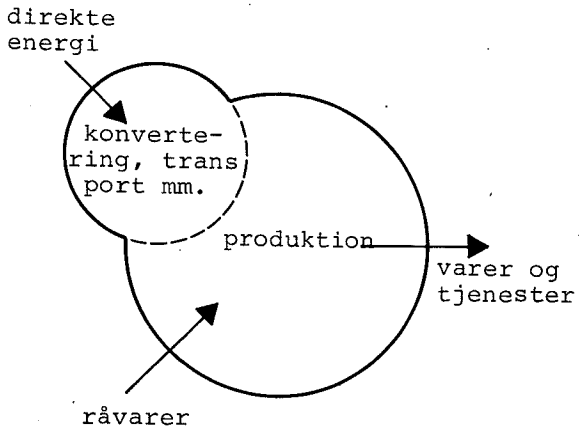
Mange forskellige af samfundets funktioner inddrages således i produktionen af en given ting, både direkte og indirekte.

I [77.0] angives der forslag til fire forskellige analyseniveauer, som på forskellig måde tager hensyn til andre faktorer i en produktion, som ikke direkte berører energiomsætningen.



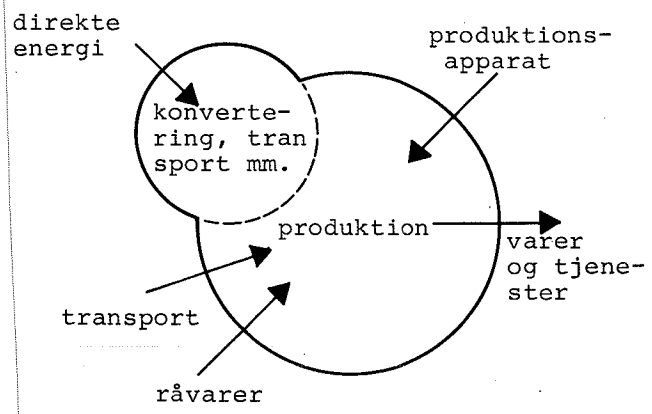
Analyseniveau 1:

I denne analyse vælges grænserne således, at kun det direkte eller primære energiforbrug til produktionen medtages.



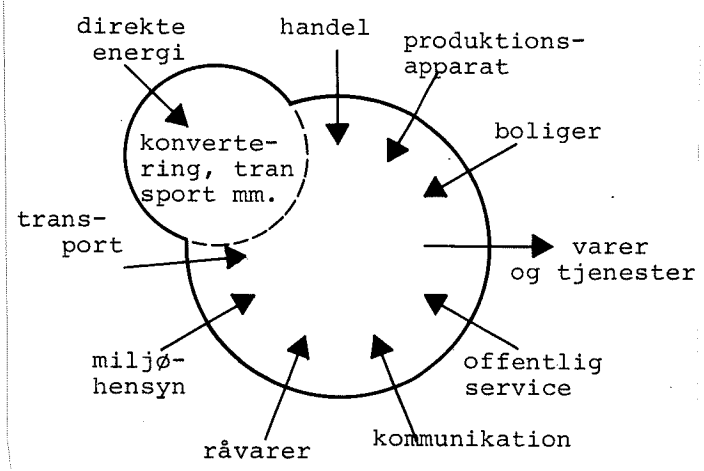
Analyseniveau 2:

I niveau 2 udvides grænserne, så også energikonvertering og transport af energi medtages. Samtidig tillægges de anvendte råstoffer et energiforbrug.



Analyseniveau 3:

Ved en yderligere udvidelse af grænserne medtages energiforbrug, der er forbundet med fremstilling af systemets produktionsapparat.



Analyseniveau 4:

Endelig er der med det 4. niveau taget alle mulige faktorer i betragtning, som resulterer i energiforbrug, og som kan relateres til den analyserede produktion.

I det følgende vælges det at benytte en modifikation af analyseniveau 4, idet den eksakte afgrænsning er nærmere beskrevet i BILAG I.

Definition:
Grænserne for energianalysen vælges således, at der medtages

DF - Det direkte energiforbrug i produktionen.

KF - Det tilhørende energiforbrug til komfort (opvarmning, ventilation m.m.) i produktionslokaler, byggepladser og administrationsbygninger.

RF - Det skjulte energiforbrug i de anvendte råmaterialer.

TF - Transportens energiforbrug i forbindelse med produktion eller levering.

AF - Afskrivning af energiforbruget til produktion af produktionsapparatet.

MF - Miljøbestemte ekstraenergiforbrug.

SSF - Det samlede specifikke energiforbrug

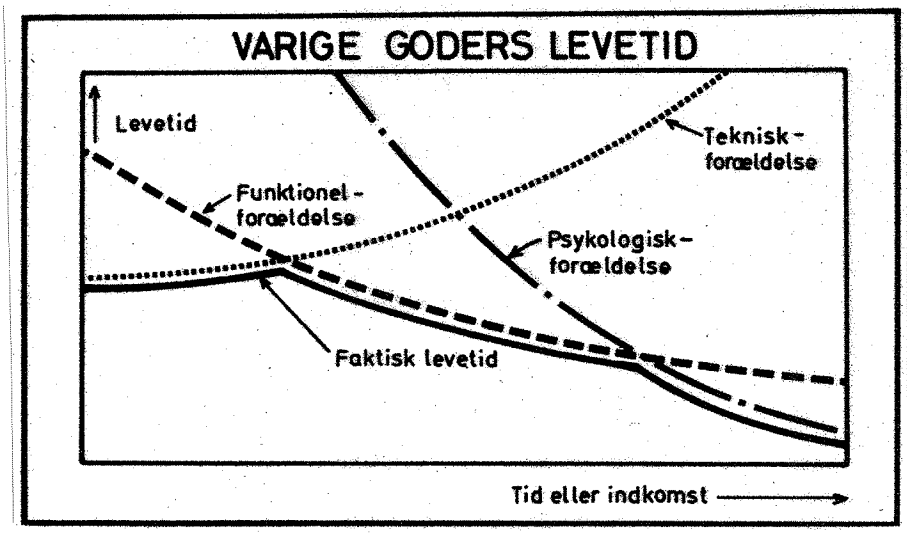
$$= \frac{(DF + KF + RF + TF + AF + MF)}{\text{produktionsmængde}}$$

I den del af energianalysen, der drejer sig om energiforbruget på byggepladsen, sættes AF og MF imidlertid lig 0.

0.2.4 Tidsmæssig afgrænsning

Tidsfaktoren kommer ind i energianalysen, så snart man ønsker at sammenligne energianalyser af forskellige objekter, eller i de tilfælde hvor der er tale om at anvende energi til oprettelse af et gode, der kun funktionerer ved en løbende tilførsel af energi.

Begge disse ting gør sig gældende i boligen, hvor energiforbruget består netop af en eengangsudgift



Figur 0.2.4.1:

Principiel udvikling af de tre forældelseskriterier. Kilde [79.1].

og en efterfølgende løbende udgift, og som kun kan vurderes ved sammenligning med andre boligers energiforbrug.

I sådanne sammenligninger må det gælde, at den tidsmæssige afgrænsning for analysen må være den længste af objekternes levetid, og alle energiforbrug i dette tidsrum bør medtages.

Definition: Ved levetid af en bygningskomponent forstås her tidsrummet mellem to udskiftninger af bygningskomponenten.

Man kan imidlertid ikke bestemme levetiden af det enkelte materiale uden at se på konstruktionen, som materialet indgår i. Konstruktionens opbygning bestemmer først og fremmest, hvor store ødelæggende belastninger materialet kommer ud for. Den næstvigtigste faktor, som er bestemmende for levetiden, er vedligeholdelsen af konstruktionen. De gængse materialer kan i teorien have en tilstrækkelig lang levetid, hvis de får den nødvendige vedligeholdelse. Gennemfører man en sådan vedligeholdelse, er det meget ofte helt andre kriterier end nedbrydningsgrad og holdbarhed, der bestemmer konstruktionens levetid. Det er i sådanne tilfælde ønsker om forbedret miljø, ønsker om andet anvendelsesområde for bygningen eller ønsker om ændring af rumopdelinger, der fører til udskiftning af konstruktioner eller konstruktionsdele.

Et aktuelt eksempel er den udbredte modernisering af boligen, som følger i kølvandet af energibesparelsesforanstaltningerne. Ofte udskiftes da konstruktioner, f.eks. vinduer, allerede før de egentlig er udslidt, alene for at spare energi.

Endnu mere udtalt er disse mekanismer for boligens inventar. [79.1] angiver da tre levetidskriterier, hvoraf altid den korteste er afgørende.

Den tekniske forældelse skyldes slid og benyttelse og begrænses af objektets holdbarhed.

Levetider af facadekonstruktioner

	Minimums-levetid	Middel-levetid	Maximums-levetid
ubeh.murstensfacade	40 år	100 år	1000 år
ubeh.gasbetonfacade	-	(5 år)	-
beh. gasbetonfacade	5 år	-	100 år
ubeh.lecabetonfacade	-	(5 år)	-
beh. lecabetonfacade	5 år	-	100 år
ubeh.betonfacade	15 år	-	100 år
beh. betonfacade	10 år	-	100 år
ubeh.kalksandsten	-	(5 år)	-
beh. kalksandsten	10 år	-	100 år
ubeh.pudslag	1 år	15 år	100 år
beh. pudslag	1 år	-	100 år
ubeh.træfacade	(5 år)	10 år	20 år
beh. træfacade	10 år	-	1000 år

Tabel 0.2.4.1:

Erfaringsværdier for levetiden af facadekonstruktioner efter Konow & Raben. Værdierne skal ikke tillægges nogen vægt, men betragtes som retningslinier.

Levetider af tagbeklædninger.

	Minimums-levetid	Middel-levetid	Maximums-levetid
betontegIsten	20 år	25 år	30 år
gule teglsten	20 år	25 år	30 år
røde teglsten	50 år	70 år	300 år
skifer tagsten	50 år	100 år	150 år
asbestbetonplader	15 år	25-30 år	40 år
tagpap	10 år	15 år	20 år
underbygning	5 år	10 år	15 år

Tabel 0.2.4.2:

Erfaringsværdier for levetiden af tagbeklædninger efter Konow & Raben. Værdierne skal ikke tillægges nogen vægt, men betragtes som retningslinier.

Den funktionelle forældelse skyldes den tekologiske udvikling og begrænses af nye objekters større funktionsduelighed (funktionsudvidelse).

Den psykologiske forældelse skyldes det, man populært kalder moden, og afgøres oftest af design, farver og reklame.

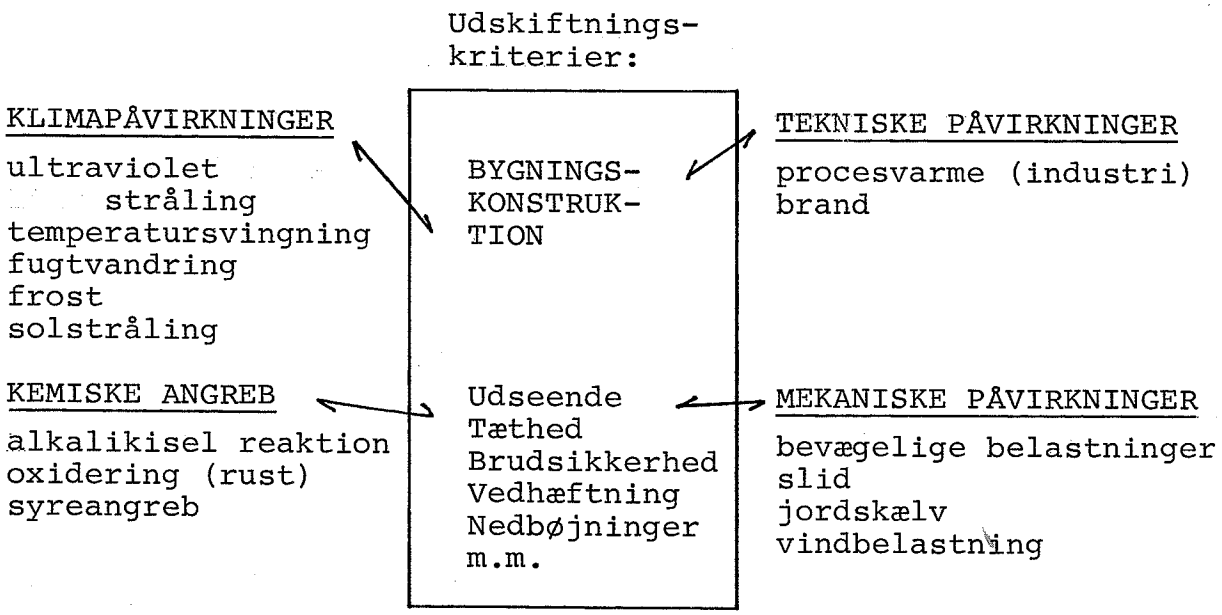
Desuden kommer der helt andre parametre ind i billedet, så som naturkatastrofer, stormskader m.m., der kan beskrives statistisk, og endelig ganske uforudsigelige faktorer, som f.eks. krigsødelæggelser.

Det er derfor sjældent, at et materiale "får lov til" at udnytte hele sin holdbarhed eller materialegivne levetid, og en bestemmelse af konstruktionernes teoretiske levetid vil derfor enten blive urealistisk, hvis man vil blive nødt til at eliminere for mange parametre, eller den vil blive for subjektiv.

Som en subjektiv tilnærmelse til levetider, som forekommer i praksis for facade og tagbeklædninger, kan vises tabel 0.2.4.1 og .2, som er fremkommet ved rådføring med et entreprenør-ingeniørfirma inden for vedligeholdelsesbranchen, som har angivet erfaringsværdier.

Der vil i det følgende blive forudsat, at en vedligeholdelse udøves på alle materialer og konstruktioner, og at det derfor er de sidst skitserede kriterier, der er afgørende for bygningsdelenes levetid.

Statens Råd för Byggnadsforskning, Stockholm, har igennem flere publikationer gjort rede for en metode til at drage funktion og levetid af bygningsdele med ind i projekterings- og programmeringsfasen. Dele af denne er refereret i [69.0].



Figur 0.2.4.2:

Bygningskonstruktioner og de faktorer, der bestemmer levetiden.

Gruppe af konstruktioner	Samfundsknyttede	Bygningsknyttede	Funktionsknyttede	Vedligeholdelsesknyttede
Eksempler på konstruktioner	Veje Fælles anlæg Distributionsanlæg m.m.	Bygningsbasis Råhusets primære dele	Beklædning VVS-faste dele) Indvendige lette skillevægge	Overflader Fuger Tætninger VVS-maskineri
Levetid angivet af [69.0]	Mange generationer	få generationer	få årtier	
Levetid angivet af [71.0]	Mere end 100 år	25 - 100 år	Mindre end 25 år	
Her benyttes flg. levetider		100 år	20-30 år	5-15 år

Tabel 0.2.4.3:

Levetidskategorier.

Metoden deler konstruktionerne ind i 3 konstruktionsgrupper, der fra bygherrens side tillægges en typisk levetid ud fra gruppens fælles funktionskrav. Disse tre grupper benævnes (oversat fra svensk):

- samfundsknyttede konstruktioner
- bygningsknyttede konstruktioner
- funktionsknyttede konstruktioner.

I skemaet i tabel 0.2.4.3 er disse begreber yderligere beskrevet og levetider angivet for grupperne. For at få inddraget vedligeholdelsen i billedet, idet vedligeholdelsen jo er en forudsætning for opnåelse af de angivne levetider, må levetiden af vedligeholdelsen og energiforbruget ved vedligeholdelsen medtages. Levetiden af vedligeholdelsen vælges her at inddrages ved at indføre en fjerde gruppe - vedligeholdelsesknyttede konstruktioner, som ligeledes er beskrevet i tabel 0.2.4.3.

Energiforbruget ved vedligeholdelsen vil blive beskrevet i senere afsnit.
Valget af denne betragtningsmåde er fremkommet efter en gennemgang af litteratur om bygningers levetid og bygningsdeles levetid. Meget få steder i den gennemgåede litteratur har man vovet at angive levetiden af bygningskonstruktioner bare nogenlunde præcist. Dette hænger sammen med det store antal faktorer, der har betydning for levetiden, dels for holdbarheden og dels for bedømmelsen, der resulterer i udskiftning/ikke udskiftning (se figur 0.2.4.2).

Fastlæggelsen af levetider for bestemte konstruktioner/konstruktionsdele falder ikke ind under denne rapports rammer og kan af tidsmæssige grunde ikke behandles grundigere.

For at kunne foretage realistiske energianalyser er levetiden imidlertid en uundværlig parameter, også når det gælder økonomiske beregninger.

Der ligger således et stort forskningsarbejde i denne opgave, som kun er delvis løst gennem de forsøg, der er gjort på at systematisere og planlægge vedligeholdelsen. (Se f.eks. [78.3], [76.0] og [77.2].)

I de energianalyser, der foretages i denne rapport, er der da anlagt en formalistisk betragtningsmåde, som består i:

- at vedligeholdelse foretages regelmæssigt, så det er den funktionelle forældelse, der er afgørende for levetiden,
- at energiforbruget til vedligeholdelse negligeres,
- at levetiden af en bygningskomponent rubriceres, som vist i tabel 0.2.4.3.

Energiforbruget til vedligeholdelse kan ved denne grove beregningsmetode med god tilnærmelse negligeres, idet vedligeholdelsen normalt er en meget arbejdskrævende og energiextensiv proces.

(Der henvises til afsnit 8.3.)

Af tabel 0.2.4.1.ses det, at tagbeklædningerne "røde teglsten" og "skifertagsten" har en uforholdsmæssig høj levetid i forhold til de andre. Senere vil beklædninger blive rubriceret under funktionsknyttede konstruktioner og for at tage hensyn til denne markante forskel i levetid, korrigeres energiforbruget til fremstilling af konstruktionen ved at dividere med den aktuelle levetid/20 år. Dette kan være nødvendigt i enkelte andre tilfælde, hvor levetiden af konstruktion er relativt veldefineret og ligger betydeligt over den levetid, der svarer til rubriceringen. Der vil i hvert enkelt tilfælde blive gjort opmærksom på dette i fodnoter.

0.3 Beregningsmetoder for energianalyser

0.3.1 Driftsenergiforbruget

Det, denne rapport handler om, er først og fremmest anlægsenergiforbruget. Forudsætningerne herfor er udførligt beskrevet i de tidligere afsnit.

Det er klart, at når man skal foretage en sammenligning af anlæg og drift, må samme betragtningsmåde anvendes i begge situationer.

For driftsenergiforbruget betyder det, at energiforbruget må beregnes tilbage til samme udgangspunkt, hvilket i denne rapport svarer til definitionerne i afsnit 0.2.2.

Det er også vigtigt, at man ved sammenligninger mellem forskellige alternativer får alle energiforbrugsmæssige virkninger med i beregningerne.

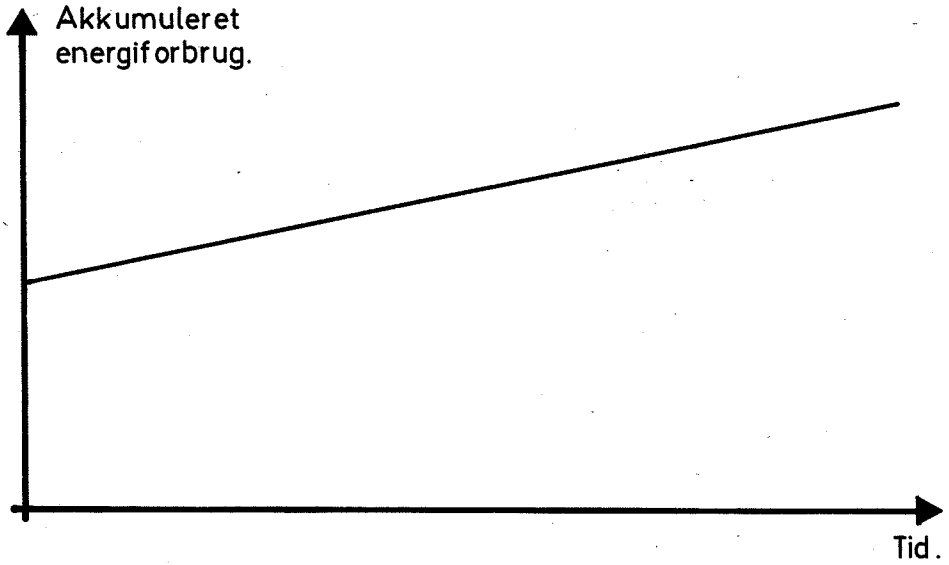
Netop afvigende fastlæggelser af disse sidste to faktorer er med til at øge usikkerheden på energianalysens resultater allermest.

Energianalyser kan deles op i to forskellige metoder, når det drejer sig om boligen. De vil her blive kaldt forbrugsmetoden og besparelsesmetoden.

0.3.2 Forbrugsmetoden

Forbrugsmetoden baserer sig på et energiforbrug, akkumuleret, d.v.s. summeret op inden for analysens område fra starttidspunktet af aktivitetens iværksættelse til dens afslutning. Der akkumuleres kun energiforbrug (heraf navnet), således at slutresultatet altid vil være et positivt forbrug.

I figur 0.3.2.1 vises en principiel tidsmæssig forbrugsprofil og det tilsvarende akkumulerede energiforbrug.



Figur 0.3.2.2:

Det principielle udseende af det akkumulerede energiforbrug ved den tilnærmede forbrugsmetode.

Ofte kan den akkumulerede kurve gives en tilnærmet form, der består af retlinede stykker.

Anlægsprocessen antages da at være en forudgående proces, og energiforbruget hertil afsættes til starttidspunktet.

I driftsperioden antages der at være et konstant løbende energiforbrug, idet man ikke tager hensyn til klimavariationer gennem tiden eller ændringer af klimaskærmens og energileveringssystemets effektivitet.

Denne afbildning vil være brugbar i de situationer, hvor man ikke forventer nogen udskiftning af konstruktionsdele, eller hvor en sådan udskiftning i ringe grad influerer på det akkumulerede energiforbrug.

Denne analysemetode vil i det følgende blive kaldt den tilnærmede forbrugsmetode.

Metoden har den fordel, at man ikke behøver at kende objektets levetid, idet man let kan sammenligne forskellige objekters akkumulationskurve (figur 0.3.2.2) og træffe et valg ud fra disse kurver ved forskellige levetider.

Til illustration af dette gives et kort eksempel:

Eksempel 0.3.2.1:

Lad os antage, at der ved en energianalyseberegning er fundet følgende sammenhørende beregninger af anlægsforbruget og driftsforbruget:

	Anlæg kWh/m^2	Drift kWh/m^2/år
A: Boblehal m.enkelt dug	600	725
B: Boblehal m.dobbelt dug	700	425
C: Betonelement-hal	1300	250
D: Limtræs-hal	1100	275

De tilhørende akkumulationskurver bliver da, som vist i figur 0.3.2.3, idet tidshorisonten sættes til maksimalt 15 år.

Det ønskes at bestemme den mulighed, der giver det laveste akkumulerede energiforbrug.
Det ses, at hvis den ønskede levetid er 2 år, må man vælge mulighed B. Er den ønskede levetid 4 år, bliver det D, og er den ønskede levetid 12 år, bliver det C. □

Kendes den ønskede levetid, $T_{ø}$, kan man træffe sit valg alene ud fra værdien for det akkumulerede energiforbrug ved tiden $T_{ø}$. Denne værdi kan da enten være fundet ved hjælp af forbrugsmetoden eller ved den tilnærmede forbrugsmetode.

Ved at afbilde værdierne i et koordinatsystem, hvor der ud ad abscisseaksen afsættes anlægsforbruget, og der op ad ordinataksen afsættes det akkumulerede energiforbrug til tiden $T_{ø}$, fås en kurve, som kan se ud som figur 0.3.2.4.

Sådanne kurver kan benyttes til marginalbetragtninger, idet man da kan bestemme de marginale besparelser ved at bevæge sig ud ad abscisseaksen. Disse kurver vil i det følgende blive benævnt marginalkurver.

I dette tilfælde kan man bestemme, hvor stor en total energibesparelse, man vil få ved at forbedre hus B og hus D ved anvendelse af samme mængde energi (samme intervallængde på abscisseaksen).

Dette kan være af nationaløkonomisk interesse, idet man netop der er stillet i den situation, at man skal afveje en maksimal merimport af olie med anbringelsen af en besparelsesindsats.

0.3.3 Besparelsesmetoden

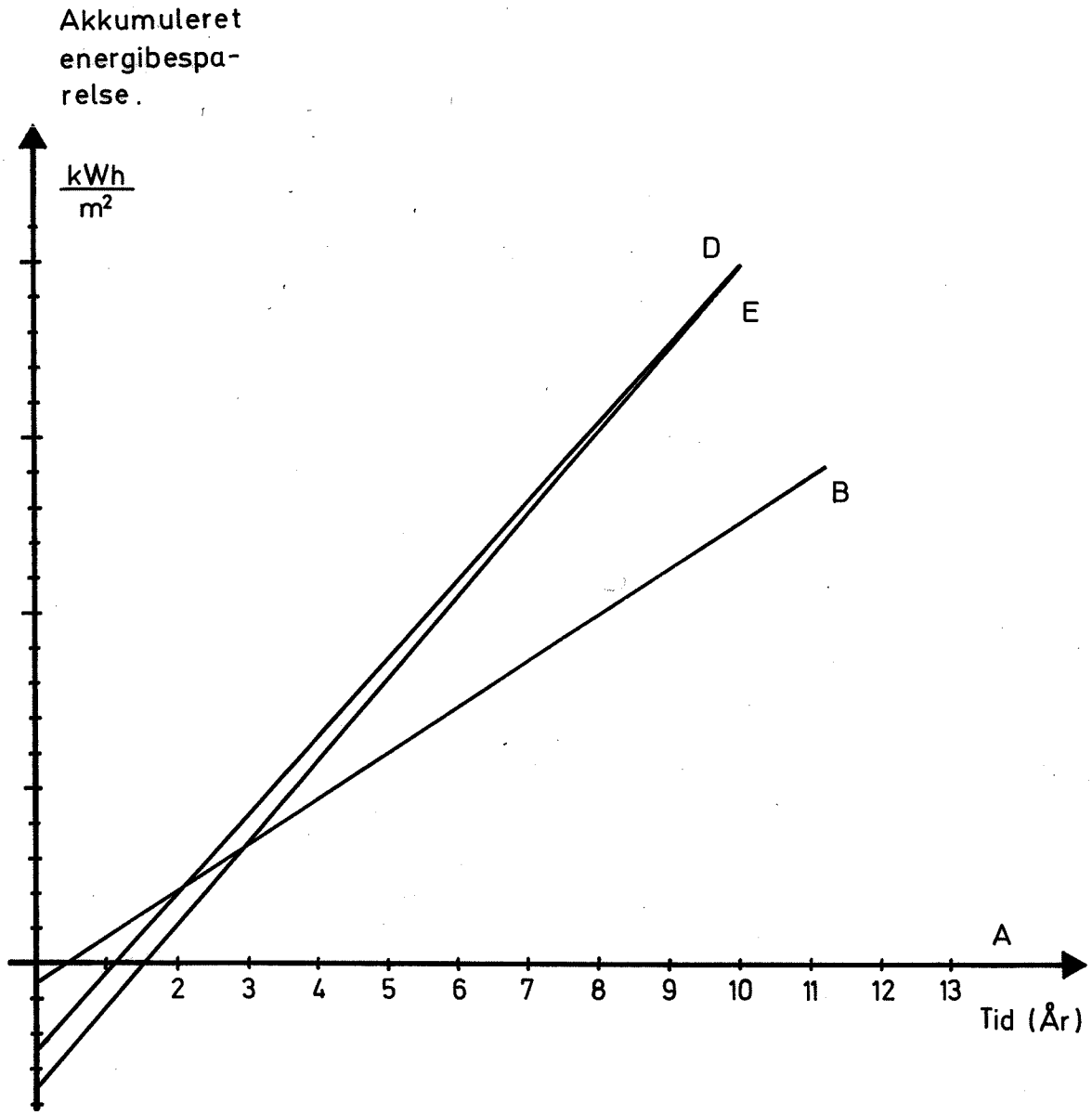
Besparelsesmetoden baserer sig på en behandling af alternativer til et fast objekt i besparelsesøjemed (heraf navnet). Da det som regel er i driftsenergiforbruget, man søger besparelserne, vil slutresultatet, den akkumulerede energibesparelse, som regel være positiv, men kan undertiden blive negativ.

Grundideen er altså, at man betragter en række alternativer til et givet objekt og sammenligner den akkumulerede besparelse for alle alternativer. Besparelsen består dels af et merforbrug til iværksættelse af alternativet og en løbende besparelse i forhold til det faste objekt.

I mange tilfælde er det faste objekt en 0-handling, d.v.s. dét intet at foretage. Det faste objekt kan også være en udvalgt mulighed fra en forbrugsmetodeberegning. Ved at betragte de andre som alternativer kan man da gøre forbrugsmetodeberegning til en besparelsesmetodeberegning.

Ofte står man overfor et problem, hvor der er tale om at udvinde energi. Dette problem kan da udmærket behandles ved hjælp af besparelsesmetoden, selv om der ikke er tale om en besparelse.

Den tilsvarende kurve til forbrugsakkumulationskurverne vil principielt se ud som i figur 0.3.3.1.



Figur 0.3.3.3 : Akkumulerede besparelses kurver for de i eksempel 0.3.3.1 behandlede tilfælde.

I den tilnærmede form får kurverne igen et enkelt retlinet udseende.

Som et eksempel på denne betragtningsmetode skal værdierne fra eksempel 0.3.2.1 nu behandles efter besparelsesmetoden.

Eksempel 0.3.3.1:

Værdierne fra eksempel 0.3.2.1 tænkes at være resultater af en energianalyseberegning.

A, boblehal m.enkelt dug betragtes nu som det faste objekt. Merenergiudgifter og besparelser bliver da:

	Anlæg kWh/m^2	Drift kWh/m^2/år
B	-100	300
C	-700	475
D	-500	450

D.v.s. at akkumulationskurverne får udseende som vist i figur 0.3.3.3.

Imellem de fire muligheder A-D kan med denne metode gøres nøjagtig de samme konklusioner og sammenligninger, blot er energiforbrugsniveauet ikke oplyst, således at man ikke umiddelbart kan sammenligne mulighederne A-D med en femte eller sjette mulighed, uden at kende udgangsværdierne fra forbrugsmetodeberegningen.

Som et eksempel på en sammenligning af energiudvindingsmulighederne kan nævnes [79.2], tabel 7. Der er dér benyttet en såkaldt energigevinst, forholdet mellem energibesparelse og energiudgift for en given periode (20 år), som mål for den energimæssige godhed af mulighederne. Andre steder ser man den

fra økonomiske betragtninger kendte tilbagebetalingstid anvendt. Denne fremkommer som skæringspunktet af akkumulationskurven med abscisseaksen (se f.eks. [79.3]).

Begge disse størrelser har den svaghed, at de ikke i sig selv giver et udsagn om de forskellige muligheders godhed ved andre levetider eller om selve energiforbrugets tidsmæssige forløb.

0.3.4 Regneregler for energianalyser

Med alle de nye begreber, der nu er indført, kan det være svært at holde rede på demme alle, og hvordan de skal anvendes.

Der skal derfor forsøges at give de forskellige begreber nogle forkortelser, som i det lange løb kan gøre det nemmere at behandle disse ting.

Idet der er forsøgt at holde notationen i samme stil som i [74.1],gøres følgende forkortelser af de indførte størrelser.

Anlægsenergiforbrug - Energy Requirement for Construction - ERC

Driftsenergiforbrug - Energy Requirement of Operation - ERO

Akkumuleret energiforbrug - Accumulated Energy Requirement - AER

Akkumuleret energibesparelse - Accumulated Energy Spare - AES

Energiforbrug til udskiftning af konstruktionsdele - Energy Requirement for Renewals - ERR

Forbrugsakkumulationskurve - Time Curve of Requirement - TCR

Besparelsesakkumulationskurve - Time Curve of Spare - TCS

Driftsenergibesparelse - Energy Spare of Operation - ESO

Tilbagebetalingstiden - Pay-Back-Time - PBT

Levetid - Lifetime - T

Der kan da opstilles følgende ligninger til bestemmelse af de ønskede størrelser:

Forbrugsmetoden (AER-metoden):

$$AER(T) = ERC + \sum_{T} ERR + \sum_{T} ERO$$

Den tilnærmede forbrugsmetode (AER-metoden):

$$AER(T) = ERC + ERO \cdot T$$

Besparelsesmetoden (AES-metoden):

$$AES(T) = \sum_{T} ESO - \sum_{T} ERR - ERC$$

Den tilnærmede besparelsesmetode (AES-metoden):

$$AES(T) = ESO \cdot T - ERC$$

$$PBT: AES(T) = 0 \Rightarrow PBT = \frac{ERC}{ESO}$$

Af de i [74.1] givne konventioner kan direkte overføres størrelserne GER, NER eller PER* som synonym for ERC, alt efter hvilket analyseniveau der anvendes. De andre størrelser er ikke navngivet i [74.1].

* GER: Gross Energy Requirement
NER: Net Energy Requirement
PER: Process Energy Requirement

LITTERATUR

[60.0] J.N. Brøndsted:
"LÆREBOG I FYSISK KEMI"
3. ændrede udgave,
Enjar Munksgaard
Danmark 1960.

[69.0] "NORDISK KONTAKT OM STATSBYGGERI"
2. Rundbordskonferens, Stockholm 1969
NKS-Rapport nr. 3,
Sverige 1969.

[71.0] Hans H. Karnov, Åge D. Rasmussen:
"BYGNINGSPLANLÆGNING, SYSTEMATIK
OG SAMARBEJDE"
SBI-anvisning nr. 88
Teknisk Forlag
Danmark 1971.

[74.0] "RETROFITTING EXISTING HOUSING FOR
ENERGY CONSERVATION: AN ECONOMIC ANALYSIS"
Building Science Series 64
U.S. Department of Commerce,
U.S.A. 1974.

[74.1] "ENERGY ANALYSIS"
IFIAS-Workshop Report,
Report No. 6,
Sverige 1974.

[74.2] Bent Elbæk:
"ENERGI, ENERGI, ENERGIKRISE"
Munksgaard
Danmark 1974.

[75.0] Erik Reitzel, H.F. Mathiassen:
"ENERGI, BOLIGER, BYGGERI"
Fremad
Danmark 1975.

[76.0] Reginald Lee:
"BUILDING MAINTENANCE MANAGEMENT"
Crosby Lockwood Staples
England 1976.

[77.0] "ANALYS AV ENERGIINSATSER I PRODUKTER
OCH FUNKTIONER"
IVA-rapport nr. 95
Sverige 1977.

[77.1] Torben Smith Sørensen:
"BRØNDSTEDIAN ENERGETICS, CLASSICAL THERMODYNAMICS AND EXERGY"
og
"EXERGY LOSS, DISSIPATION AND ENTROPY PRODUCTION"
fra artikelserie i Acta Chemica Scandinavica,
A30 1976 og A31 1977:
"TOWARDS A RATIONAL THERMODYNAMICS, I+II+III"
Danmark 1977.

[77.2] "PILOTPROJEKT: SYGEHUSVÆSENETS VEDLIGE-HOLDELSESFUNKTION"
Dansk Sygehus Institut,
Pilotprojekt 77.05
Danmark 1977.

[77.3] J.Chr. Knutzen, Bjørn Qvale:
"ENERGITEKNIK"
Bind 1
Laboratoriet for Energiteknik, DTH, NE77-5
Danmark 1977.

[78.0] Torben Smith Sørensen:
"ENERGI OG ENERGI ER MANGE TING"
Information den 10.2.78
Danmark 1978.

[78.1] Torben Smith Sørensen:
"TERMODYNAMIKKEN SOM HJÆLPEDISCIPLIN I ØKONOMI OG HISTORIEVIDENSKAB"
Historie og Samtidsorientering nr. 1
Danmark 1978.

[78.2] E.N. Morris:
"HOUSING ENERGY ECONOMICS"
Building and Environment, Vol. 13
Edinburgh 1978.

[78.3] Stig Hedin:
"UNDERHÅLLSPLANEN FÖRETAGETS VIGTIGSTE STYRINSTRUMENT"
Byggmästaren nr. 11, 1978
Sverige 1978.

[79.0] Sigurd Andersen:
"ENERGIFORBRUG VED FREMSTILLING AF BETONKONSTRUKTIONER"
Publikation nr. 7, p. 15-34,
Dansk Betonforening,
Danmark 1979.

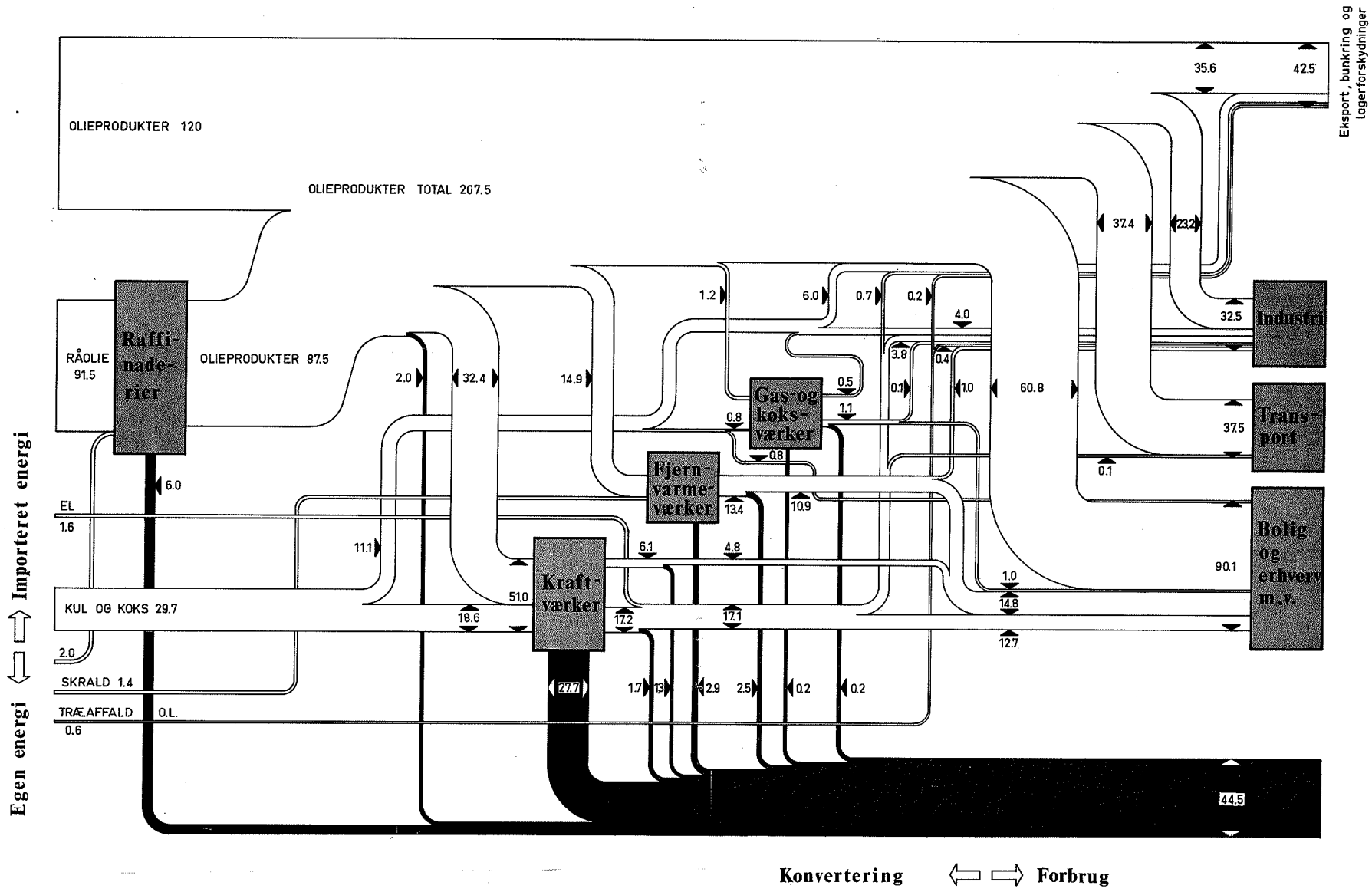
[79.1] Jørgen S. Nørgård:
"HUSHOLDNINGER OG ENERGI"
Demo-projektet v.Fysisk Laboratorium III,
DTH, p. 216-220
Danmark 1979.

[79.2] Bent Elbek:
"ENERGIANALYSE AF ENERGISYSTEMER"
VVS nr. 9, 1979
Danmark 1979.

[79.3] Henrik Lawaetz, Simon Furbo:
"ENERGIFORBRUG TIL FREMSTILLING
AF SOLVARMEANLÆG"
Laboratoriet for Varmeisolering, DTH,
Medd. nr. 87
Danmark 1979.

DANMARKS ENERGIBALANCE 1975

målt i TWh



Figur 1.0. : Sankey-flwdiagram af Danmarks energibalance 1975.
Dansk Kedelforening og DEFU.

© DANSK KEDELFORENING/ DEFU

1. ENERGIFORBRUGET I BYGGESEKTOREN I DANMARK, STATISTISK BELYST

Danmarks Energibalance 1975 (afbildet i figur 1.0) viser, at der i 1975 blev forbrugt 247 TWh, hvoraf de 243 TWh var importerede. 42.5 TWh heraf blev enten igen eksporteret eller brugt til lagerforøgelse. Yderligere 44.5 TWh gik tabt i indenlandske energikonverteringsanlæg. Effektivt har der altså været et forbrug hos konsumenterne på 160 TWh, hvoraf forbruget fordeler sig på

Industrien	32.5 TWh	(20%)
Bolig	50.9 TWh	(32%)
Erhverv i øvrigt	39.2 TWh	(25%)
Transport	37.5 TWh	(23%)

Prøver man inden for industrien at opdele forbruget i produktionsforbrug og opvarmningsforbrug, angiver [76.0], at 84% af forbruget i 1974 gik til produktion og 17% til opvarmning af bygninger, heraf 1% egenproduceret el. Overføres dette til 1975, svarer det til et produktionsforbrug på 27.3 TWh og et opvarmningsforbrug på 5.2 TWh. Fra samme kilde ses det, at "Erhverv", d.v.s. handel, håndværk, landbrug, fiskeri og mindre fremstillingsvirksomhed havde et samlet energiforbrug på 39.6 TWh, hvoraf 14.0 TWh til produktion og 25.6 TWh til opvarmning. Overføres også disse tal til 1975, idet det viser sig, at der ikke er store ændringer (i 1976 var forbruget til "Erhverv" 39.4 TWh), kan energiforbruget deles op i opvarmnings- og komfortforbrug og et produktionsforbrug.

1975 TWh	produktion	opvarmning privat komfort	
Industri	27.3	5.2	
Erhverv	14.0	25.2	
Boliger	0	50.9	
Transport			37.5

Tabel 1.1:

Fordeling af Danmarks nettoenergiforbrug.

Ved skønsmæssigt at udvælge de industrigrene, der leverer til byggeri i [76.0], kan man nå frem til, at man her i 1974 anvendte 13.3 TWh, hvoraf de 11.5 TWh er produktionsforbrug. Heraf var elektriciteten ca. 10%, altså 1.1 TWh. Tages der hensyn til tabene i elproduktionen, må disse 1.1 TWh forøges med 2.1 TWh, og det samlede forbrug i byggesektoren bliver 13.6 TWh. [74.0] og [73.0] angiver et tilsvarende forbrug for bygge- og anlægssektoren i 1966 til $1.15 \cdot 10^6$ tons olie, svarende til 13.3 TWh. [74.1] angiver, at råhusproduktionen andrager ca. 50% af den samlede produktion i bygge- og anlægssektoren. Ser man på bruttoinvesteringerne i Danmark inden for denne sektor 1972-1974, fordeler de sig således:

Boligbyggeri	35%
Andet byggeri	30%
Anlæg	15-20%
Vedligeholdelse	15-20%

Antages det, at energiforbruget følger investeringerne nogenlunde, kan man heraf slutte, at lige godt halvdelen af energiforbruget i bygge- og anlægssektoren anvendes til fremstilling af bygninger og omtrent en tredjedel til fremstilling af boliger, d.v.s. 4.8 TWh i 1975. Det er 3.0% af det effektive forbrug eller 1.9% af den totale energiomsætning.

Det må siges at være en mindre del i forhold til den energi, vi bruger til drift af boligerne hvert år, netto ca. 50 TWh. Forsøger man at sammenligne det med den boligmasse, som bygges hvert år, fås et lidt andet billede.

I 1975 fuldførtes 9 400 000 etage m^2 byggeri, heraf 5 400 000 m^2 boliger, fortrinsvis enfamiliehuse. Her til svarer et energiforbrug på 890 kWh/m^2. Det aktuelle energiforbrug til drift af nye huse udført efter BR77 ligger i størrelsesordenen:

Opvarmning	110 kWh/m²/år
Varmt vand	40 kWh/m²/år
*Elektricitet	90 kWh/m²/år
	240 kWh/m²/år

Med en gennemsnitlig levetid på eksempelvis 100 år for boligen fås ialt til driften af huset 24000 kWh/m². Heri er imidlertid ikke medregnet det importerede energitilskud, som ligger skjult i de materialer, vi må importere til vor byggeindustri, hovedsagelig i form af stål, aluminium, plast og træ.

Transportenergiforbruget i forbindelse med produktion af byggematerialer m.m. er heller ikke medregnet. For at kunne udføre boligerne efter BR77 kræves større materialemængder til isolering, hvilket skønsmæssigt vil hæve energiforbruget til fremstilling af boligen med 15% i forhold til forholdene i 1975. Skønsmæssigt vil disse faktorer forøge de 4.8 TWh med 30% til ialt 6.0 TWh og 1110 kWh/m². Dette svarer til 4.6% af driftsforbruget over 100 år for et enfamiliehus.

[74.2] angiver for en svensk pilotundersøgelse et tilsvarende tal på 3.1% over 100 år, hvoraf de 2.2% skyldes fremstillingen af materialerne.

Forholdet mellem fremstillingsforbruget og driftsforbruget vil forøges endnu mere i lavenergihuse, hvor der ofte benyttes udbyggede og indviklede opvarmningssystemer og eventuelt relativt meget materiale, og hvor til gengæld driftsforbruget sænkes kraftigt.

De delforbrug, som man ved en projektering kan påvirke kraftigst, er energiforbruget til opvarmning og energiforbruget til fremstilling af boligen. I nyere lavenergihuse vil disse to forbrug være af

* 31 kWh elektricitet svarer til 90 kWh energi.

samme størrelsesorden, sammenlignet over en 100 års periode, og det vil derfor være ønskeligt, at den projekterende under projekteringen har en bevidst holdning også over for ressource- og energiforbruget til fremstillingsprocessen af boligen.

I de følgende afsnit skal det forsøges at belyse energiforbruget i forbindelse med fremstilling af boliger mere detaljeret i modsætning til de ovenstående gennemsnitsbetragtninger. De gennemsnitsværdier, som er opstillet her, kan da bruges som en slags kontrol på størrelsesordenen på de senere beregnede totale forbrug, som er beregnet på grundlag af delenergiforbrug til materialer, transport, opførelse og servicevirksomhed.

Litteratur:

[73.0] Hans S. Andersen:
"BYGGESEKTORENS PLACERING I SAMFUNDETS PRODUKTIONSSTRUKTUR"
Byggeindustrien nr. 5,
Danmark 1973.

[74.0] Hans S. Andersen:
"DYRERE OLIE HAR KUN RELATIV LILLE BETYDNING FOR BYGGERIET"
Byggeindustrien nr. 2,
Danmark 1974.

[74.1] Erik Reitzel:
"RÅHUS OG RÅSTOFFER"
DIF-pjece nr. 8,
Danmark 1974.

[74.2] "ENERGIFORSKNING, BYGGESEKTORENS ENERGIANVÄNDNING"
Särtryck ur SOU 1974:74 och SOU 1974:76,
Industridepartementet,
Sverige 1974.

[76.0] Søren Klokhøj:
"KORTLÆGNING AF ERHVERVSLIVETS ENERGIFORBRUG"
Dansk Kedelforening,
Danmark 1976.

2. TRANSPORTENS ENERGIFORBRUG

Den del af transporten, der beskrives i dette afsnit, er den eksterne godstransport, som foregår uden for produktionsområderne og byggepladserne.

I bygge- og anlægssektoren og de tilknyttede industrier, foregår transporten i dag i overvejende grad mekaniseret ved hjælp af dieseldrevne lastbiler, jernbane eller skibe af forskellig størrelse.

Transporten optræder utallige steder i byggeprocessen og kan have afgørende betydning for energiforbruget i meget energiekstensive dele af byggeriet, som f.eks. råstofudvinding. I de fleste tilfælde udgør transportenergiforbruget ikke mere end ca. 10% af de samlede energiforbrug til fremstilling af materialer.

2.0 Godstransport

Godstransport, der er det væsentligste transportarbejde, måles som et produkt af transportlængde og transportvægt, her med enheden ton × km.

I det følgende betragtes størrelsen af energiforbrug pr.transportarbejde i enheden kWh/ton × km, det specifikke energiforbrug i godstransporten.

Det specifikke forbrug afhænger af transportmidlet og dets effektivitet samt af lastudnyttelsen. Lastudnyttelsen er meget svingende i godstransporten, lige fra nogle få % for transporten af en glemt reservedel til 100% for intensiv transport inden for fragtskibsbranchen. For en stor del af godstransporten gælder imidlertid, at man fylder lasten helt op den ene vej og kører tom den anden vej. Dette gælder især for den leverancetransport, der foregår med lastbil.

Til grund for transportarbejdets sammenhæng med energiforbruget ligger de fysiske begrænsninger for dieselmotorer, gnidningsmodstanden og dens afhængighed af hastigheden af transportmidlet. Be-

	[74.1] lasteevne t	[74.1] % udnyttelse	[74.1] kWh/t·km	[76.2] kWh/t·km	[76.2] minimums forbrug kWh/t·km
Varebil	1	30	3.8		
Lastbil	5	50	0.9	0.61	0.02-0.04
	38	50	0.25		
Godstog	670	32	0.15	0.13	0.004
Skib (coaster)	1000	50	0.17		
(fragt)	8000	50	0.16	0.14	0.004
(tanker)	34000	50	0.06		
(supertanker)	250000	50	0.02		
Fly DC-9-33	15.5	54	4.95	(9.15)	0.07
Pipe-line			0.07	0.08	

Tabel 2.0.1:

Energiforbrug pr.transportarbejde for godstransportens forskellige transportmidler. De givne udnyttelsesgrader af lasteevnen, gældende for tur/retur transport, er basis for beregning af de specifikke energiforbrug i kolonne 3-5.
Kilde [74.1] og [76.2].

grænsningen for motorernes udnyttelse af den kemisk bundne energi i den såkaldte dieselproces kan beskrives ved hjælp af termodynamikkens love, men i praksis vil forbrændingen i motorerne aldrig være ideel, se [76.2].

Den øvre virkningsgrad for en dieselmotor ligger ved 40%, men i praksis udnyttes sjældent mere end 20%.

Sammenhængen mellem hastighed og det specifikke energiforbrug hænger sammen med, at effektpræstationen W er lig hastigheden v gange luftmodstanden k. Luftmodstanden $k = \frac{1}{2} \rho v^2 A c$, hvor

ρ = luftens rumvægt
A = frontarealet af transportmidlet
c = formfaktor for transportmidlet.

d.v.s.

$$W = \frac{1}{2} \rho v^3 A c$$

og energiforbruget

$$E = W t = \frac{1}{2} \rho v^3 A c t = \frac{1}{2} \rho v^3 A c \ell,$$

hvor

ℓ = den tilbagelagte vejlængde og
t = tidsrummet, der betragtes, hvor fartøjet har en konstant hastighed.

Det specifikke forbrug

$\frac{E}{M\ell} = \frac{1}{2} \rho v^2 \frac{A}{M} c$. M er transportsmidlets masse.

For konstant last ses, at det specifikke forbrug er proportionalt med $v^2 A c$.

Formfaktoren ligger normalt mellem 0.25 og 0.50, således at den dominerende faktor bliver hastigheden.

For skibe gælder en lignende sammenhæng, hvor

$$W = \frac{v^3 D^{\frac{2}{3}}}{A}$$

Bygningsdel	kWh/m^2
Bygningsbasis	4.9
Råhus, primære dele	36.5
Kompletterende dele	6.3
Overflader	2.4
VVS-anlæg	2.5
Ialt	52.6

Tabel 2.0.2:

Godstransportens andel af energiforbruget til fremstilling af boligens byggematerialer, leveret på byggepladsen. Ved at trække transportenergibidragene ud af ASF-værdierne i [79.0], kan godstransportens energibidrag for hvert materiale bestemmes, og disse værdier er grundlag for ovenstående tabel.

Dette energiforbrug indgår i energiforbruget som beregnet i afsnit 3. og 8. Det undersøgte byggeri er her ligeledes Grantoften, se afsnit 3.4.

D = deplacement (d.v.s. den fortrængte vandmængde i t)
A = formfaktoren, 150-400.

Da hastigheden af transportmidlerne varierer meget, kan man ikke sige noget enkelt om energiforbruget ud over ovenstående lovmæssigheder.

Statistiske registreringer af det specifikke energiforbrug ved godstransport er det ret sparsomt med, men som retningslinier angives der værdier, som vist i tabel 2.0.1. Af disse værdier ses det, at energiforbruget afhænger betydeligt af lastens størrelse.

I undersøgelser, hvor transportenergiforbruget er det væsentlige, er det nødvendigt at tage højde for denne faktor ved at lade det specifikke energiforbrug være afhængig af lasteevnen og måske også af transportmidlernes hastighed.

Det vil imidlertid føre for vidt i denne undersøgelse, hvor en noget simplere metode er påkrævet.

Angivelserne fra [74.1] og [76.2] er stort set enslydende.

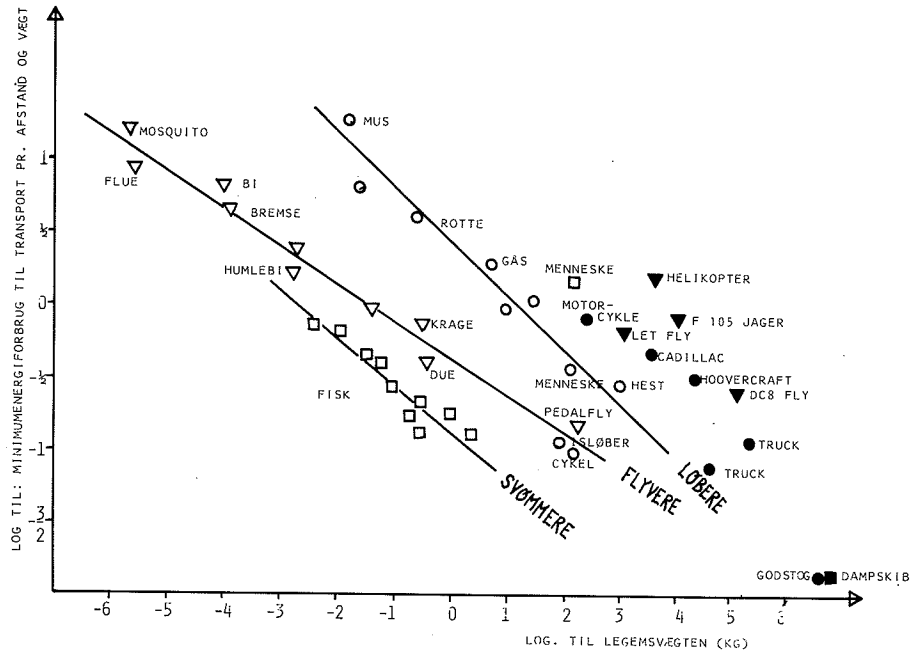
Det vælges at benytte følgende tal for det specifikke forbrug:

Lastbil	0.60 kWh/ton km
Godstog	0.15 kWh/ton km
Skib	0.15 kWh/ton km

Fly og pipe-line forekommer meget sjældent som transportmiddel i denne sammenhæng.

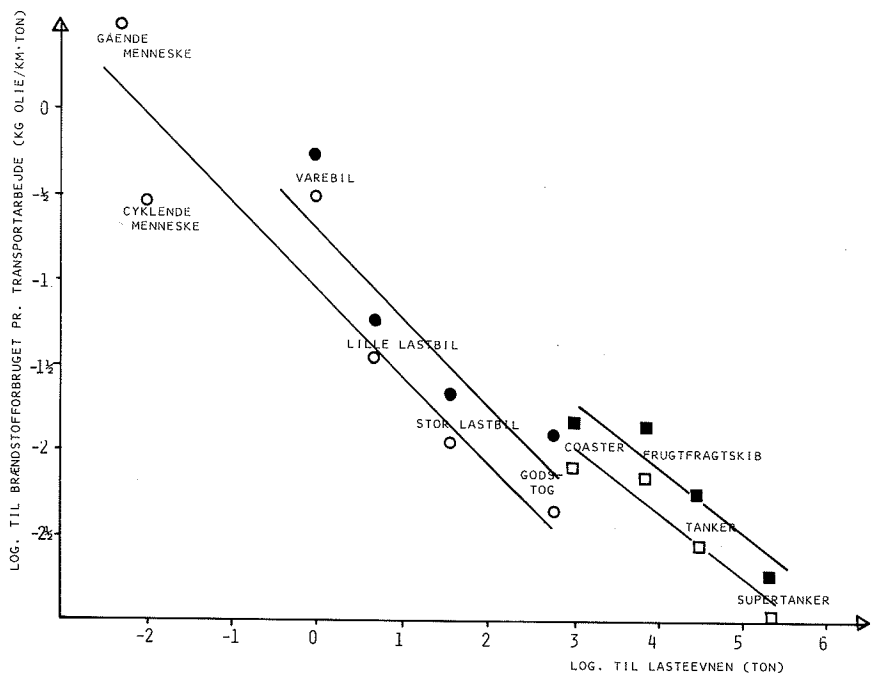
2.1 Naturens love

Som et kuriosum vises en figur fra [76.2], figur 2.1.1, der viser det minimale specifikke energiforbrug for dyrenes og maskinernes transport, afhængigt af legemsvægten.



Figur 2.1.1:

Minimum specifikt energiforbrug som funktion af egenvægten for transportarbejde.
Kilde [76.2].



Figur 2.1.2:

Det specifikke energiforbrug for transportarbejde som funktion af transportmateriellets lasteevne.
Mørke signaturer: 50% udnyttelse.
Lyse signaturer : 100% udnyttelse.

Det ses, at der for hver gruppe af dyr er en tilnærmet retlinet sammenhæng i det dobbeltlogaritmiske koordinatsystem, som kan omskrives til en formel af formen

$$E' = a\,M^{-b}$$

hvor E' er det specifikke energiforbrug, og M er legemsvægten. Figuren er grundlag for den sidste kolonne i tabel 2.0.1.

Gøres samme optegnelse af tallene fra kolonne 3 i tabel 2.0.1 , er sammenhængen ikke helt så udpræget. De indtegnede linier i figur 2.1.2 repræsenterer linierne

landtransport (100% udn.) $E' = 0.1\ M^{-0.51}$
vandtransport (100% udn.) $E' = 0.2\ M^{-0.41}$
landtransport (50% udn.) $E' = 0.2\ M^{-0.51}$
vandtransport (50% udn.) $E' = 0.3\ M^{-0.41}$

E' = kg olie/km·ton, M = ton.

Disse formler er imidlertid ikke tilstrækkeligt efterviste og kan ikke bruges i denne sammenhæng, men kurverne viser tendenserne i sammenhæng mellem energiforbrug og transportmidlets lasteevne.

2.2 Transportarbejde

Transportarbejdet, der skal udføres i de forskellige trin af byggeprocessen og i leverance-industrien er belyst i en rapport fra t-ATV, ATV gruppens trafikforskningsgruppe [77.1].

Den giver en modelopstilling, baseret på statistiske oplysninger af industriens godstransport i form af et såkaldt modalsplit, hvor transportarbejdet i ton·km er fordelt på de tre transportmåder: Skib, jernbane og lastbil. Desuden er den gennemsnitlige turlængde angivet.

Tur typer Forarbejdet kalk	mængder mio.t	bil mio.t.	bane mio.t	skib mio.t	længde km	Transport arbejde mio.t.km
Samlet/samlet national	0.018	-	-	0.018	221.0	3.98
samlet/spredt interregional	0.117	0.102	0.015	-	105.5	12.34
eksport	(0.015)			(0.015)		
ialt	0.135	0.102	0.015	0.018	150.8	16.32

Tabel 2.2.1:

Skema over transportarbejdets fordeling for forarbejdet kalk.

Branche-tilknytning / Hovedtransportmiddel	Fremstillingsvirksomhed	Bygge- og anlæg	Handel, service, admin.	Transport	Landbrug	Andet
Bil 1 pers.	4.24	6.60	7.31	7.36	3.18	1.23
Bil 2 pers.	1.54	1.36	0.69	0.85	0.35	0.64
Bil 3 pers.	0.16	0.64	0.33	0.24	0.23	0.10
Bil 4 pers.	0.53	0.18	0.15	0	0.29	0.05
Bil 5 pers.	0.05	0.10	0.05	0	0	0
Taxa	0.01	0.01	0	0	0	0
Motorcykel/knallert	0.34	0.62	0.25	0.05	0.23	0.85
Tog/bus	1.07	1.18	1.72	1.27	0	2.31
Gang/cykel	0.81	0.56	0.90	0.57	0.69	1.15
Andet	0	0.01	0.01	0.24	0.06	0
Totalt	8.75	11.25	11.41	10.58	5.02	6.33

Tabel 2.3.1:

Bolig-arbejdsstedstrafikken angivet ved gennemsnitstransportarbejdet efter branchetilknytning og hovedtransportmiddel. Værdierne angiver antallet af passagerkilometer pr.tur pr.person, fordelt over de forskellige hovedtransportmidler. Grundlaget for denne tabel er ca. 5400 svar.
(Gælder kun for fremturen)

En sammenstilling af kildens forskellige tabeller kan f.eks. se ud som tabel 2.2.1.

Tabel 2.2.1 kan benyttes til at udregne transportarbejdet ved distributionen af forarbejdet kalk.

Distributionen af 1 tons forarbejdet kalk skal tillægges følgende energiforbrug, jvnf. tabel 2.2.1. :

$$\text{bil}: \quad 0.6 \cdot \left(\frac{0.102}{0.135}\right) \cdot 105.5 = 47.8 \text{ kWh}$$

$$\text{bane}: \quad 0.15 \cdot \left(\frac{0.015}{0.135}\right) \cdot 105.5 = 1.8 \text{ kWh}$$

$$\text{skib}: \quad 0.15 \cdot \left(\frac{0.018}{0.135}\right) \cdot 221 = 4.4 \text{ kWh}$$

$$\text{ialt} \qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad 54.0 \text{ kWh}$$

Disse modalsplittabeller ligger til grund for det indenlandske transportarbejdes beregning.

Er der tale om import af varer sker transportarbejdet hovedsagelig med bane og skib, og det tillades at skønne afstande for transporten.

Ved at tilknytte transportenergiforbruget til det færdige produkt, råmateriale eller mellemprodukt tages der hensyn til de væsentligste transportforbrug, der optræder.

Det sikres dermed, at godstransportarbejdet inkluderes efter ethvert fremstillingstrin, men det må påpeges, at det kun er et groft skøn på det virkelige transportarbejde. Den væsentligste usikkerhed hidrører fra fastsættelsen af de specifikke energiforbrug for de tre transportmidler.

2.3 Persontransport

Som nævnt i afsnit 0.1 tillægges arbejdskraften ikke noget energiforbrug i denne undersøgelse. Det har da også vist sig, at f.eks. transporten af arbejdere til og fra arbejdspladsen resulterer i et mindre væsentligt energiforbrug. Det synes at være uoverkommeligt at bestemme arbejdskraftforbruget

Transport-middel	Energiforbrug pr. passager-km kWh/pass.km	Bygge- og anlægssektorens transportarbejde pass.km/tur pers.	Energiforbrug $\frac{\text{kWh}}{\text{pers.tur}}$
Bil 1 pers.	0.90	6.60	5.94
Bil 2 pers.	0.45	1.36	0,61
Bil 3 pers.	0.30	0.64	0.19
Bil 4 pers.	0.22	0.18	0.04
Bil 5 pers.	0.18	0.10	0.02
Taxa	0.60	0.01	0.005
Motorcykel/knallert	0.45	0.25	0.11
Tog/bus	0.32	1.72	0.55
Gang/cykel	0	0.90	0
Andet	0.6	0.01	0.005
Ialt	0.66	11.25	7.46

Tabel 2.3.2:

Det vægtede energiforbrug til bolig-arbejdsstedstransporten i bygge- og anlægssektoren i 1975. Regnes der med en arbejdsdag på 8 timer, vil det ovenfor anførte tal svare til ½·8 mandtimer eller 4 mandtimer. Det gennemsnitlige energiforbrug til bolig-arbejdsstedstrafikken i bygge- og anlægssektoren er dermed 1.865 ~ 1.85 kWh/mandtime

ved fremstilling af byggematerialer. Da arbejdskraftforbruget i bygge- og anlægssektoren er fastlagt med nogenlunde nøjagtighed, og da det nævnte transportarbejde må siges at have stor grad af tilknytning til fremstillingen af boliger set ud fra et samfundsøkonomisk synspunkt, vil der i det følgende blive vist nogle beregninger over energiforbruget til transport og arbejdskraft.

I den landsdækkende trafikundersøgelse fra 1975, foretaget af ATV's trafikforskningsgruppe, blev oplysninger om de adspurgtes transportafstand og hovedtransportmiddel indhentet specielt for bolig-arbejdsstedtrafikken. Sammensætningen af netop disse oplysninger findes kun i ganske summarisk form i et tillæg til den endelige rapport fra t-ATV. Det var derfor nødvendigt at hente oplysningerne frem fra det lagrede materiale og sammensætte oplysninger til det ønskede resultat.

Med bistand fra Vejdatalaboratoriet ved Vejdirektoratet har det været muligt at tabellere de adspurgtes bolig-arbejdstrafik, som vist i tabel 2.3.1.

Det har ikke været muligt at splitte bygge- og anlægssektoren yderligere op, men det antages, at de givne tal med rimelighed vil være repræsentative for byggesektoren alene, under de indskrænkninger en sådan undersøgelse generelt giver.

I tabel 2.3.2 er der beregnet et gennemsnitligt energiforbrug pr.mandtime i bygge- og anlægssektoren, idet energiforbrugene for de enkelte transportmidler bl.a. er hentet fra Elbek [74.3].

Bolig-arbejdsstedstransporten i undersøgelsen omfatter den transport, der er udover en kortvarig gåtur (mindre end 2 min) til busser eller andre offentlige transportmidler og gælder kun fremturen til arbejdsstedet.

Boligtype	Enfamiliehuse	Etageboliger montagebyggeri	Offentligt og erhvervsbyggeri	Gennemsnit
1979 håndværkerudgifter ekskl.moms	2850 $\frac{kr}{m^2}$	2300 $\frac{kr}{m^2}$	2700 $\frac{kr}{m^2}$	2760 $\frac{kr}{m^2}$
Direkte arbejdskraft	19.7	5.9	12.8	18.1
Industriens arbejdskraft	4.6	6.5	6.0	4.9
Servicefagenes arbejdskraft	4.8	4.8	5.6	5.2
Indenlandsk arbejdskraft	5.7	5.4	6.0	5.8
Ialt	34.8	22.6	30.4	34.0

Tabel 2.4.1:

Arbejdskraftforbruget i mandtimer til fremstilling af bygninger beregnet på grundlag af input-output tabellerne fra 1966.
Der er anvendt følgende lønkvoter

direkte arbejdskraft	50.6 kr/time
industriens arbejdskraft	49.2 kr/time
servicefagenes arbejdskraft	52.9 kr/time
udenlandsk arbejdskraft	45.0 kr/time

	Transportenergiforbrug $\frac{kWh}{mandt.}$	Enfamiliehus	Etagebolig montagebyggeri	Offentligt og erhvervsbyggeri
Byggepladsen	1.85	36.4	10.9	23.7
Industrien	1.30	6.0	8.5	7.8
Servicefagene	1.90	9.1	9.1	10.6
Udenlandsk	~1.2	6.8	6.5	7.2
Ialt		~60	~35	~50

Tabel 2.4.2:

Energiforbrug til fremstilling af boliger som resultat af bolig-arbejdsstedstrafikken. kWh/m^2 etageareal.

Analogt til beregningen i tabel 4.2.2 kan energiforbruget i de andre sektorer udregnes. De vil da i en samlet vurdering svare til et gennemsnit på 1.55 kWh/mandtime for hele Danmarks arbejdsstyrke.

2.4 Arbejdskraftforbrug

Arbejdskraftforbruget til fremstilling af boliger angives normalt som det arbejdskraftforbrug, der er på byggepladsen. Dette forbrug kan svinge meget betydeligt, men vil i langt de fleste tilfælde være mellem 4 og 15 mandtimer pr.m^2 etageareal.

For etageboliger angives der i [76.1] følgende typiske arbejdskraftforbrug på byggepladsen:

Traditionelt byggeri 1950 : 1440 mandt.pr.lejl.
Delvis montagebyggeri 1965: 900 mandt.pr.lejl.
Rent montagebyggeri 1970 : 370 mandt.pr.lejl.

Et mere objektivt billede opnås ved også at inddrage arbejdskraftforbruget i byggeindustrien og i den indirekte leverende industri. Sådanne oplysninger findes ikke umiddelbart tilgængelige. Skifter Andersen, SBI, har dog gennemført en input-output-analyse, som kan give brugbare tal for disse faktorer. På grundlag af input-output-tabellerne fra 1966 har Skifter Andersen udarbejdet en tabel, der viser arbejdslønnens andel af håndværkerudgifterne for forskellige boligtyper. Disse gennemsnitsværdier kan da benyttes til at beregne en gennemsnitlig arbejdskraftfordeling ved at benytte løntarifferne for de forskellige sektorer. Med den indskrænkning, at fordelingen overføres fra 1966 til at gælde også for 1979, hvilket er en tilnærmelse, får man værdierne i tabel 2.4.1.

Med de i tabel 2.4.1 valgte kvadratmeterpriser vil man få energiforbrug til transport af arbejdskraft, som vist i tabel 2.4.2.

Det ses, at energiforbruget ikke er afgørende for den samlede fremstillingsproces. Der må dog kunne opnås mindre besparelser ved en bevidst påvirkning af bolig-arbejdsstedstrafikken enten ved valg af transportmiddel eller ved en nytænkning med hensyn til arbejdsstedernes placering i forhold til boligen.

Det kan til slut nævnes, at med den byggeaktivitet, som Danmark havde i 1977, svarer de ovenfor nævnte tal til et samlet energiforbrug på 0.59 TWh/år eller ca. 1% af vort opvarmningsforbrug i boligsektoren.

Skaleres tallene fra tabel 2.3.2 op, bliver det samlede energiforbrug til bolig-arbejdsstedstrafikken 6.5 TWh/år eller 5% af transportenergiforbruget i Danmark.

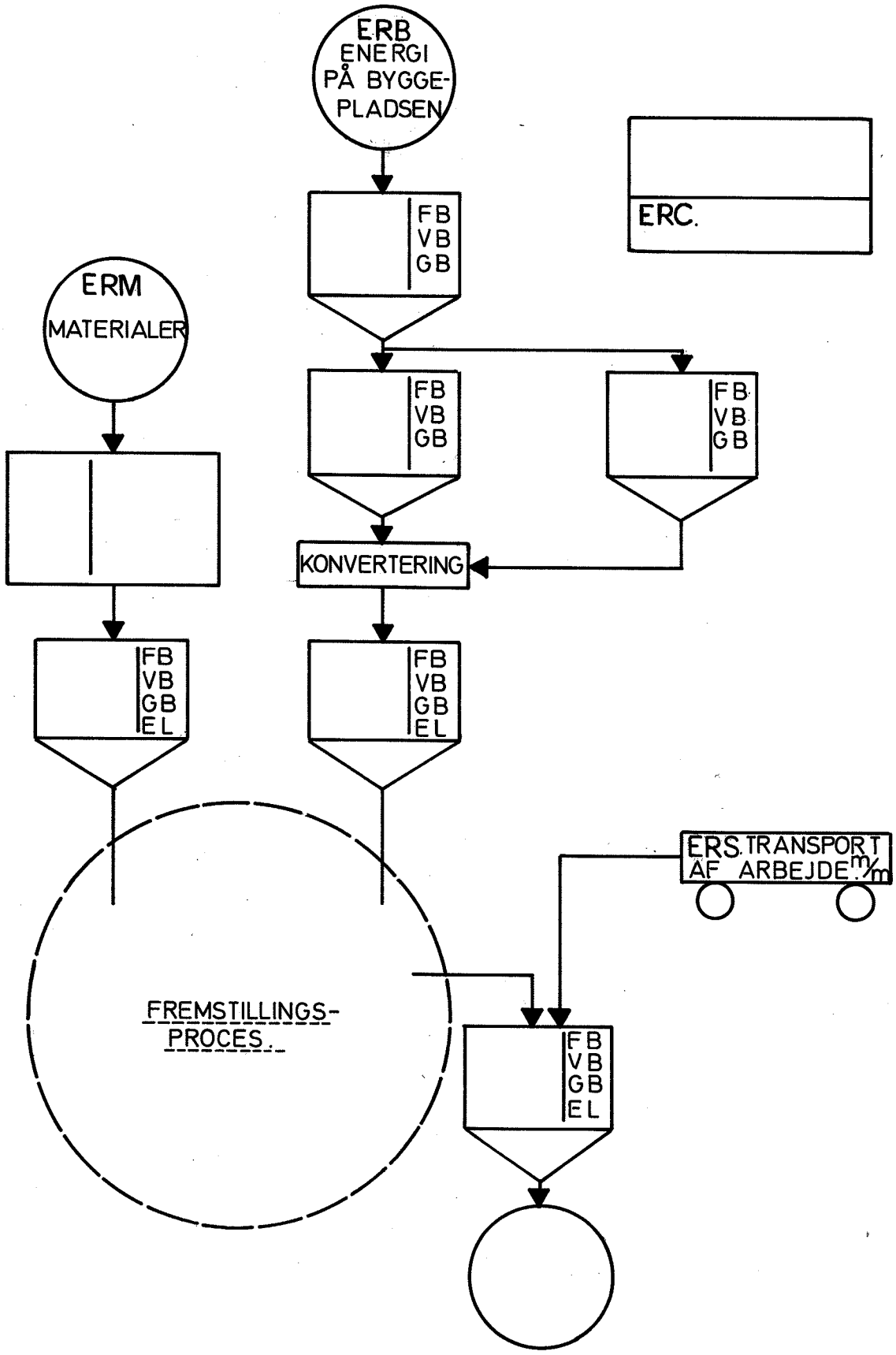
LITTERATURLISTE

[74.1] Bent Elbek:
"ENERGI, ENERGI, ENERGIKRISE"
Munksgård
Danmark 1974

[76.1] Johs.F.Munch-Petersen:
"HUSLEJEN = f(PRIS, POLITIK, PRODUKTIVITET, PRIORITERING)"
IFH-forelæsningsnotat nr. 46,
Instituttet for Husbygning, DTH
Danmark 1976.

[76.2] Eugene Goodson:
"ENERGY UTILIZATION BY VARIOUS MODES OF TRANSPORTATION"
SAE-Special Publ. No. 406: Energy and Transportation,
U.S.A. 1976.

[77.1] Jens Bonke m.fl.:
"GODSTRANSPORT - SEKTORBESKRIVELSE"
t-ATV-rapport,
Danmark januar 1977.



Figur 3.0.1:

Energiforbrug til fremstilling af en bolig, beskrevet ved hjælp af et flowdiagram (se [79.0], afsnit 3.1).

3. ENERGIFORBRUGET TIL FREMSTILLING AF BYGGEMATERIALERNE I BOLIGEN

Dette afsnit støtter sig udelukkende til en indledende analyse af energiforbruget i forbindelse med produktion af byggematerialer, som er dokumenteret i [79.0].

Energiforbruget til fremstilling af en bolig kan opdeles efter samme system, som er anvendt for de enkelte materialer i [79.0], d.v.s. at det kan beskrives ved det skematiserede flowdiagram, som er vist i figur 3.0.1.

I hovedtrækkene er der tale om tre typer af energiforbrug:

A) Et energiforbrug, som ligger bundet i de materialer, der bruges til boligens konstruktioner m.m., jvf. RF i [79.0].

B) Et direkte energiforbrug, som er nødvendigt til at opføre boligens konstruktioner på byggepladsen, jvf. DF i [79.0].

C) Et energiforbrug til udøvelse af servicevirksomhed i forbindelse med opførelsen af boligen, f.eks. projektering, tilsyn, arbejdskrafttransport m.m.

Disse tre størrelser vil af praktiske grunde blive benævnt ved forkortelserne:

ERM = Energy Requirements for Materials
ERB = Energy Requirements on Building Site
ERS = Energy Requirements for Services

og summen af de tre energiforbrug vil blive anlægsenergiforbruget, forkortet til ERC*.

* Energy Requirement for Construction

Når man skal udtale sig om energiforbruget til fremstilling af boligen, må det være ved hjælp af størrelsen ERC, når det skal have nogen mening.

Bidragene fra ERM, ERB og ERS er ikke indbyrdes uafhængige, når man vil sammenligne forskellige bygningers anlægsenergiforbrug, ERC*. Det vil ofte være således, at man ved en sådan sammenligning vil konstatere relative besparelser i ERM på bekostning af merforbrug i ERB eller ERS.

Der skal her i afsnit 3 fokuseres på størrelsen ERM og i afsnit 4 vil størrelsen ERB.

En egentlig sammenligning af forskellige bygningers akkumulerede energiforbrug vil blive givet senere i afsnit 8 på grundlag af størrelsen ERC, og i afsnit 9 inddrages endvidere driftsenergiforbruget ERO*.

3.1 Sammenligningsgrundlag

For at kunne sammenligne energiforbruget til fremstilling af forskellige boligtyper er det nødvendigt at henføre energiforbrugets størrelse til en enhed, som så godt som muligt beskriver boligens brugsværdi.

Sammenligningen kan foretages på basis af boligens volumen, dens bruttoetageareal, dens nettoetageareal, antallet af boliger m.m.

Teoretisk set kan ingen af disse enheder fuldt beskrive boligens brugsværdi. I praksis viser det sig, at bruttoetagearealet, også blot kaldet etagearealet, er den mest anvendte enhed, hvis beregning er defineret i bygningsreglementet.

Der er derfor valgt at bruge bruttoetagearealet som det ene grundlag i normaliseringen.

* Se afsnit 0.3.4.

Bygningsbasis

1 Forberedelser i terræn
2 Udgravning under bygning
3 Boring under bygning
4 Terrændæk
5 Kældervægge og kælderdæk
6 Fundamenter, borede pæle
7 Fundamenter, render
8 Fundamenter, rammede pæle
9 Øvrigt
10 Fællesgruppe 1-9

Råhus, primære dele

11 Primære dele i terræn
12 Ydervægge
13 Indervægge
14 Etagedæk
15 Trapper og ramper
16 -
17 Balkondæk og -brøstning
18 Tagværker (ekskl.beklædn.)
19 Øvrigt råhus
20 Fællesgruppe 11-19

Kompletterende dele

21 Kompletterende dele i terr.
22 Ydervægskomplettering
23 Indervægskomplettering
24 Etagedækskomplettering
25 Trappe- og rampekomplett.
26 Nedhængte lofter
27 Balkonkomplettering
28 Tagkomplettering
29 Øvrige kompletterende dele
30 Fællesgruppe 21-29

Overflader

31 Belægninger i terræn
32 Facadebeklædning
33 Indvendig vægbeklædning
34 Gulvbeklædning
35 Trappe- og rampebeklædning
36 Loftsbeklædning
37 Balkonbeklædning
38 Tagdækning
39 Øvrige overflader
40 Fællesgruppe 31-39

VVS

41 VVS i jord
42 VVS centraler (udeladt)
43 Afløb og affald
44 Vand, koldt
45 Vand, varmt
46 Køling
47 Varme
48 Ventilation
49 Sanitet
50 Fællesgruppe 41-49

Tabel 3.2.1

Rubricering af bygningsdele (se GB73, [73.0]).
Nummereringen af bygningsdelene er af praktiske grunde ændret, så numrene kan benyttes direkte i en EDB-behandling. Desuden er der tilføjet enkelte betegnelser.

Svagheden ved bruttoetagearealet er, at sammenligninger mellem normale huse og huse med meget tykke vægge vil forfordele denne type huse med et relativt lavere energiforbrug i forhold til brugsarealet.

For at kunne tage højde herfor og for merforbrug på grund af forøgede rumstørrelser er energiforbrugene også beregnet pr.bolig. De er angivet pr.boligenhed, som kan være en lejlighed eller et enfamiliehus.

Denne normalisering kan kun bruges som supplement til den førnævnte eller til en historisk sammenligning af energiforbruget.

3.2 Beregninger af materialeenergiforbruget, ERM

Energiforbruget til fremstilling af boligens materialer, ERM, er beregnet ved hjælp af et EDB-program, jvf. appendix A.1.

Materialerne er deri beskrevet, som vist i [79.0], afsnit 3.2, mens bygningsdelene er rubriceret, som vist i tabel 3.2.1.

Begge rubriceringsmåder er afledt af GB73, Generelle beskrivelsesdispositioner, og egner sig til en datamatisk behandling.

Selve beregningen foregår i to faser, først en mængdeberegning af materialerne i bygningen og derefter en multiplikation og summation af mængder og specifikke energiforbrug.

Grænserne for mængdeberegningen er lagt således, at alt i boligen med undtagelse af varmeforsyningsmaskinel, elektriske installationer, malerarbejde, inventar, møbler, udendørs belægninger og beplantninger er taget med i beregning.

Materialeforbruget beskrives ved hjælp af en matrix $\bar{\bar{M}}$, som maksimalt bliver en 50×120 matrix.

Omsætningen til denne matrix er dels foregået ved aflæsning, måling og kontrol af tegninger og beskrivelser og dels ved direkte overførsel af datamateriale givet i oversigter fra CBC*

For at tage hensyn til materialespildet på byggepladsen, jvf. [80.1], afsnit 4.4, er alle mængder multipliceret med faktoren 1.04.

Beregningerne udføres i EDB-programmet som multiplikationer af matricer og vektorer.

$$\bar{\bar{E}}_1 = \frac{1.04}{n} \cdot \bar{\bar{M}} \cdot \bar{E}'$$

$$\bar{\bar{E}}_2 = \frac{1.04}{n} \cdot \bar{E}'_T \cdot \bar{\bar{M}}$$

$$ERM = \bar{\bar{E}}_2 \cdot \bar{e} = \bar{e}_T \cdot \bar{\bar{E}}_1$$

hvor

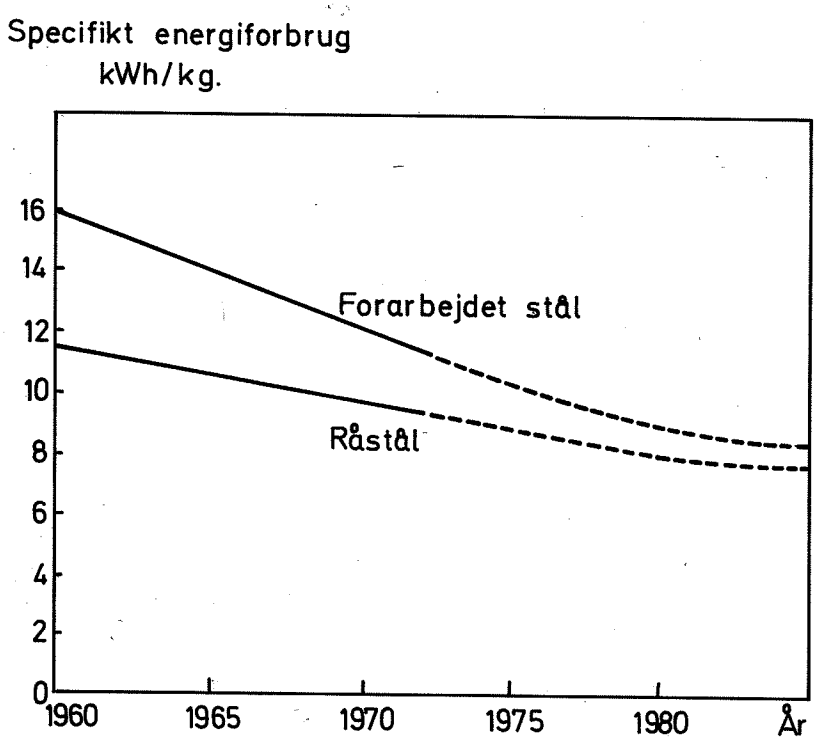
$\bar{\bar{M}}$ er mængdematricen, (50×120),
$\bar{E}'$ er de specifikke energiforbrug, 120,
n er antal normaliseringsenheder,
$\bar{\bar{E}}_1$ er det normaliserede MEF fordelt på materialegrupperne, 120,
$\bar{\bar{E}}_2$ er det normaliserede MEF fordelt på bygningsdelene, 50, og
$\bar{e}$ er en enhedsvektor.

I bilag II er koncentrerede matricer og vektorer for $\bar{\bar{M}}$, $\bar{\bar{E}}_1$ og $\bar{\bar{E}}_2$ samt ERM vist for en række undersøgte byggerier. Disse er med til at danne grundlag for sammenligningerne i afsnit 6 og 8.

3.3 Potentielle besparelser

Bestemmelsen af energiforbruget til fremstilling af byggematerialer har i [79.0] fundet sted på tre niveauer med hensyn til nyttevirkning i energiudnyttelsen.

* CBC A/S er et firma, som har specialiseret sig i at udarbejde datamatiserede mængdefortegnelser af byggerier.



Figur 3.3.1:

Udviklingen af det specifikke energiforbrug til fremstilling af råstål, kilde [75.0].

Der er beregnet værdier for energiforbrugene i den nuværende industri, ASF*, grænseværdier for minimerede energiforbrug i den nuværende industri, MSF*, og endelig værdier for det fysisk minimale energiforbrug, FSF*, når man forestiller sig, at produktionen foregår isoleret fra omverdenen.

De to størrelser, MSF og FSF, angiver således grænseværdier for minimumsenergiforbruget til fremstilling af byggematerialer i det praktiske, henholdsvis det teoretiske tilfælde.

I tabel 3.3.1 er de fundne værdier fra [79.0] for ASF, MSF, FSF og GER* (jvf. afsnit 1) angivet.

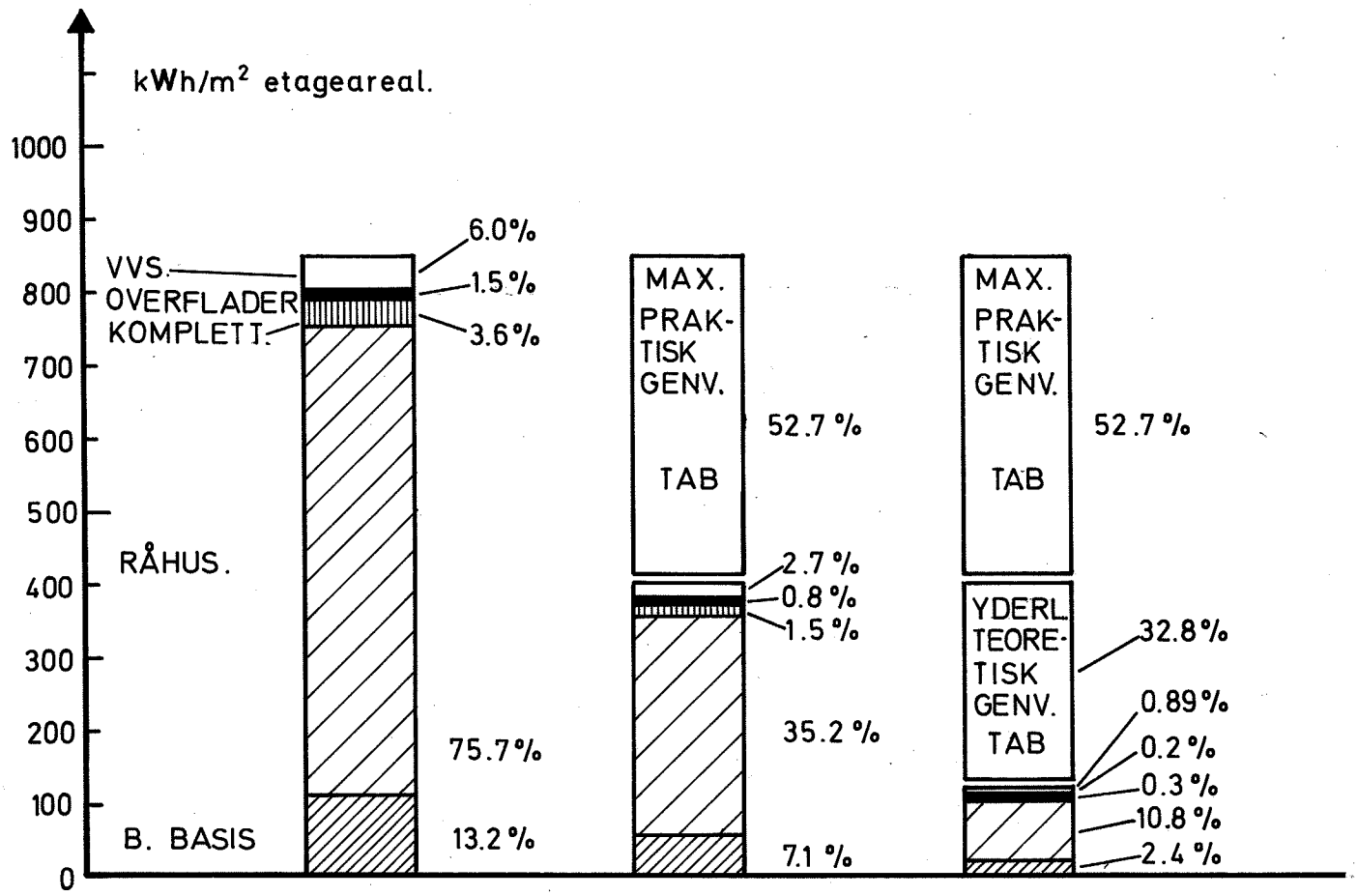
De potentielle besparelser i det praktiske og teoretiske tilfælde vil da være udtrykt ved størrelserne ASF ÷ MSF og ASF ÷ FSF.

Det er indlysende, at de værdier, der er givet ved ASF og GER og til dels også MSF, vil ændre sig, som tiden går.

Det er svært at spå om, i hvilken retning denne ændring vil ske. Det er karakteristisk, at teknologiens videreudvikling effektiviserer energianvendelsen i de enkelte delprocesser, se f.eks. figur 3.3.1. På den anden side foregår der stadig en generel udvikling mod en udskiftning af menneskelig arbejdskraft med energikrævende maskineri. Dette gælder i høj grad de mekaniske operationer i produktionen.

På den ene side gøres de enkelte processers nyttevirkning altså bedre og bedre, men samtidig inddrages flere og flere energikrævende operationer i produktionen. Man må dog formode, at den nyeste energi-

* ASF - Aktuelt Specifikt Forbrug
MSF - Minimeret Specifikt Forbrug
FSF - Fysisk minimalt Specifikt Forbrug
GER - Gross Energy Requirement



Figur 3.4.1:

Stavdiagram over energiforbruget til fremstilling af materialerne til boligerne i Grantoften I på grundlag af en ASF-, MSF- og FSF-beregning.

forsyningskrise medvirker til, at det specifikke energiforbrug totalt set vil reduceres i fremtiden.

3.4 Niveau og fordeling

Fordelingen af energiforbrugene til fremstilling af husets materialer er i figur 3.4.1 vist ved eksemplet Grantoften I*. På grund af det relativt høje antal etager er råhusets andel større end normalt, og det samlede energiforbrug ligger en smule lavere end gennemsnittet for husene i afsnit 8.

Derudover er eksemplet rimeligt repræsentativt for boligen generelt.

Det ses, at fordelingen af energiforbrugene på bygningsdelene ikke ændres væsentligt ved en beregning af ASF, MSF eller FSF. Det er nærmest hele niveauet, der sænkes, i dette tilfælde således at de potentielle besparelser i praksis og teoretisk bliver 52.7%, henholdsvis 85.5%.

Den dominerende bygningsdel er råhuset, mens de andre bygningsdele har betydelig mindre indflydelse på energiforbruget.

Til sammenligning kan nævnes, at energiforbruget til opvarmning af rum og varmt vand og elektricitet var af størrelsesordenen 275 kWh/år m^2 bruttoetageareal i 1974-77 (heraf 165 varme).

Som illustration af energiberegningens afvigelse fra økonomiske beregninger er der i tabel 3.4.1 vist fordelingen på bygningsdelen af henholdsvis håndværkerudgifterne, energiforbruget til fremstilling af bygningen samt materialeforbruget (på vægtbasis).

*Grantoften I består af 3 otte-etagers boligblokke på ialt 69600 m^2. Det bærende system består af betonelementtværvægge og huldækelementer. Facaderne består af en kombination af tunge betonsandwichelementer og lette træskeletelementer. Grantoften I blev færdiggjort i 1967 (se endvidere appendix [80.0]).

Det ses, at de flygtige dele af bygningen, d.v.s. de kompletterende dele, overfladerne og VVS-anlægget får en langt mindre betydning i energi- og materialeopgørelsen end i det økonomiske regnskab. Desuden ses det, at sekundære dele i bygningen som overfladebehandling, elektriske installationer m.m. udgør en uvæsentlig del af det samlede energiforbrug til fremstilling af bygningerne, mens forskellige former for grundmodning kan udgøre væsentlige bidrag hertil.

Hvis man betragter grundmodnings forskellige afskygninger samt belægnings- og beplantningsarbejdet som noget separat, begås der altså ikke store fejl ved ikke at tage de sekundære dele med. Fejlen er i dette tilfælde mindre end 5%.

Samtidig kan der konkluderes, at man med god tilnærmelse kan indskrænke sig til at behandle bygningsbasis og råhusets primære dele (jvf. tabel 3.2.1), når man vil udtale sig om energiforbruget til fremstilling af etageboliger i beton. Andelen udgør mere end 85%. Dette er benyttet i afsnit 6 og 7.

Forsøger man at drage levetiden af boligens konstruktionsdele ind i billedet, ændres både niveauet og fordelingen, som vist i figur 3.4.1 betydeligt. (Se tabel 8.4.1).

Litteraturliste

[73.0] "GENERELLE BESKRIVELSESDISPOSITIONER, GB73"
+ supplement
DAL,
Danmark 1973

[75.0] R.F. Chapman:
"THE ENERGY COST OF MATERIALS"
Energy Policy,
England, marts 1975

[79.0] Sigurd Andersen:
"DET AKKUMULEREDE ENERGIFORBRUG TIL FREMSTILLING AF BYGGEMATERIALER"
Rapport nr. 134, Instituttet for Husbygning, DTH
Danmark 1980

[80.0] Appendix A2 til
"DET AKKUMULEREDE ENERGIFORBRUG TIL FREMSTILLING AF BOLIGER"
Findes på biblioteket, Instituttet for Husbygning,
Danmark 1980.

	JORDARBEJDE		
1	Alment	—	
2	Udgravning (Gravemaskine)	2.5	kWh/vfm^3
3	Påfyldning/afgravning (Dozer 10 m)	1.1	kWh/vfm^3
4	Grundudjævning (Dozer 60 m/scraper 100)	3.3	kWh/vfm^3
5	Lokal bortkørsel (Dumpers 1000 m)	5.0	kWh/vfm^3
6	Bortkørsel fra byggeplads (5000 m)	6.0	kWh/vfm^3
7	Efterudjævning (Dozer 30 m)	2.2	kWh/vfm^3
8	Tromling (2 gange)	0.05	kWh/m^2
9	Afstivning af byggegrube	200	kWh/m^2 væg
10	Fællesgruppe	—	
	ANDRE BYGGEPLADSOPERATIONER OG -INDRETNINGER		
11	Alment	—	
12	Vibrering af beton	0.45	kWh/ton
13	Blanding af beton	3	kWh/ton
14	Pumpning af beton	5	kWh/ton
15	Pæleramning	5	kWh/m^2 pæloverfl.
16	Formarbejde	10	kWh/m^2 form
17	Stilladser *	40	Wh/døgn m^3 still.
18	Mandskabsskure	0.8	kWh/m^2 etageareal
19	Kranløft	3.0	kWh/ton
20	Klæbning af tagpap	0.85	kWh/m^2
	VINTERFORANSTALTNINGER		
21	Tørring af tagflader før klæbning	0.6	kWh/m2
22	Belysning	2	kWh/m^2 etage
23	Mandskabsskure	1.6	kWh/mandtime
24	Vinterudstøbning: Lodrette dele in situ	11	kWh/ton
25	Vandrette dele in situ	28	kWh/ton
26	Vandrette dele præfab	3.7	kWh/ton
27	Vinteropmuring, normalt murværk	13.5	kWh/ton tegl
28	højstyrkemurværk	27	kWh/ton tegl
29	Vintertelte	0.5	kWh/døgn m^2 telt
30	Opvarmning p.g.a. færdiggørelse	26	kWh/m^2 etage
	UDTØRRING AF RÅHUSET		
31	Alment	—	
32	In situ beton, standard	45	kWh/ton
33	In situ beton, super	10	kWh/ton
34	Kalksandsten	45	kWh/ton
35	Kalkmørtel	135	kWh/ton
36	Cementmørtel	85	kWh/ton
37	Gasbetonsten/elementer	115	kWh/ton
38	Lecabetonsten/elementer	45	kWh/ton
39	Præfabrikerede betonelementer	25	kWh/ton
40	Bygningstømmer	15	kWh/m^3

Tabel 4.1.1. :
De specifikke energiforbrug på byggepladsen efter [80.1].

m^3 hentyder til det volumen, der ligger inden for stilladsets ydre begr.

4. ENERGIFORBRUGET PÅ BYGGEPLADSEN

Dette hovedafsnit er baseret på undersøgelserne i rapport nr. 135 "Energiforbruget på byggepladsen", [80.1], og der henvises til denne med hensyn til detaljer og yderligere uddybning af emnet.

I dette afsnit summeres de vigtigste resultater af denne undersøgelse.

4.1 Beregningsmetode

Der angives i [80.1] et beregningsgrundlag til bestemmelse af forskellige bygningstypers energiforbrug på byggepladsen. Beregningsgrundlaget kan bruges til en vurdering af energiforbruget for et gennemsnitligt omfang af de forskellige byggeaktiviteter, d.v.s. at omfanget af kunstig udtørring og vinterforanstaltninger er fastlagt på forhånd ud fra statistiske fordelinger af byggeaktiviteten over året.

Derimod er energiforbrugets afhængighed af materialevalg og byggemetode forsøgt bibeholdt, således at besparelser ved f.eks. at vælge én byggemetode frem for en anden vil kunne aflæses af beregningerne.

Beregningsgangen er analog til den i afsnit 3 skitserede, hvor de specifikke energiforbrug for en beregning efter de aktuelle forhold er givet i tabel 4.1.1.

Der er ikke i [80.1] gennemført undersøgelser af de minimale specifikke energiforbrug, som skitseret i afsnit 3 (MSF- og FSF-værdier, jvf. side 44).

Da det imidlertid kunne være interessant at gennemføre en lignende sammenligning på et sådant grundlag for energiforbruget på byggepladsen foreslås følgende tilnærmede beregningsmetode for "MSF-" og "FSF-værdier" for byggepladsen.

kWh/m^2	"ASF"*	"MSF"*	"FSF"*
Jordarbejde	3.9	2.0	0.8
Byggepladsoperationer	9.8	4.9	2.0
Vinterforanstaltninger	40.6	28.6	0
Udtørring	31.3	18.6	0
IALT	85.6	54.1	2.8

* ASF = Aktuelt Specifikt Forbrug
  MSF = Minimalt Specifikt Forbrug i praksis
  FSF = Fysisk-teoretisk minimalt Specifikt Forbrug

Tabel 4.2.1:

Energiforbruget på byggepladsen for Grantoften I.

For jordarbejde bestemmes MSF og FSF af ASF-værdierne som for transportarbejde, d.v.s. MSF = 0.5·ASF og FSF = 0.2·ASF.

For byggepladsoperationer, der også hovedsagelig er baseret på dieseldrevne aggregater, vælges samme beregningsmetode, som under jordarbejde. For operationerne 15-18 i tabel 4.1.1, der er baseret på et materialeforbrug, er dette en acceptabel tilnærmelse, jvf. side 18 i [79.1].

For vinterforanstaltninger og udtørring bestemmes MSF efter det i [80.1] betegnede tilfælde (-1), dog regnes energiforbruget for aktivitet 30 i tabel 4.1.1 generelt halveret for MSF, hvilket svarer til en reduceret anvendelse af kunstig udtørring og vinterforanstaltninger. For FSF sættes energiforbruget til vinterforanstaltninger og udtørring lig 0, svarende til at byggeriet kun gennemføres i de gunstigste perioder af året (jvf. afsnit 4.8 i [80.1]).

4.2 Beregnede energiforbrug

Som i afsnit 3 skal et beregningsresultat vises for byggeriet Grantoften I.

Idet værdierne i tabel 4.1.1 betragtes som ASF-værdier, er det samlede energiforbrug på byggepladsen og dets fordeling, som vist i tabel 4.2.1 for Grantoften I.

Beregningen af "MSF" for vinterforanstaltninger svarer til, at sæsonudjævningen for byggeriets arbejdskraft vedligeholdes gennem en planlægning af byggeaktiviteterne, så 90% af byggearbejderne i vinterperioden er færdiggørelse, og at energiforbruget til opvarmning under færdiggørelsen kan halveres i forhold til de aktuelle forhold.

Som det også fremgår af konklusionen i [80.1] , er der teoretisk betragtelige energimængder at spare på byggepladsen, men de vil nok være svære at opnå

Tabel 4.2.2:

Energiforbrugsfordelinger beregnet efter modellerne givet i tabel 4.1.1. (Se appendix A1 og A2, [80.2])

kWh/m^2 etageareal	Nordhus AB	Udstillingshus	Boligmin.index	Montageb.index.
	0	0	0	0
Jordarbejder	1.1	1.6	10.9	12.8
Byggepladsarbejder + indretning	1.3	2.4	15.8	4.8
Vinterforanstaltninger	47.5	69.3	92.9	40.4
Udtørring	8.9	36.8	47.8	15.8
Ialt	58.8	100.1	167.3	73.8
	Eenfamiliehus i 1½ etage uden kælder. Bærende konstruktion af masonitbjælker, beklædning er træfiberplader og og brædder.	Traditionelt etplanshus i tegl. Vægge som murværk og tagkonstruktion af tømmer.	Traditionelt 3-etagers boligblok. Murværk, in situ støbte betondæk, tagværk som trægitre. Kælder under hele bygningen.	Montagebyggeri i 3 etager + fuld kælder. Bærende tværvægge og dæk er præfab betonelementer. Facader både tunge og lette. Tag som trægitterspær.

i praksis. I forhold til de potentielle, absolutte sparemuligheder ved fremstillingen af byggematerialerne, afsnit 3, er de energibesparelser, der kan aflæses som forskellen mellem "ASF" og "MSF", henholdsvis "ASF" og FSF" i tabel 4.2.1 dog mindre væsentlige.

Også de besparelser, der kan forudses ved at vælge andre konstruktionsmaterialer eller -metoder, er væsentligere end vist i tabel 4.2.1. Dette kan uddrages af de afsluttende sammenligninger i [80.1] eller af de i afsnit 6 viste beregninger, der er dokumenteret i appendix A-1 og A-2, [80.2].

Sammenligningen fra [80.1] er vist i tabel 4.2.2. Disse værdier kan naturligvis kun vurderes, når de holdes sammen med energiforbruget til fremstilling af materialerne, idet der er tale om forskellige grader af præfabrikation i de viste byggerier.

Energiforbruget er flyttet fra byggepladsen til fabrikken, d.v.s. materialerne, i større eller mindre omfang.

Der skal derfor henvises til de næstfølgende afsnit med hensyn til denne vurdering og her gives enkelte kommentarer.

Det er tydeligt, at de primære byggepladsarbejder, som jordarbejde, montage, støbning m.m., som er de "skabende" operationer, resulterer i mindre energiforbrug end de tilknyttede foranstaltninger som f.eks. skuropvarmning, udtørring og vinterforanstaltninger. Ved fremstilling af byggematerialerne er det lige omvendt.

Af de enkelte delforbrug influeres energiforbruget til jordarbejdet kraftigt af udgravning til kældre og det deraf følgende jordarbejde med overskudsjorden. Der vil desuden for større enkeltbebyggelser være en tendens til større jordarbejde til P-pladser,

stianlæg og en overordnet planering af grunden end for énfamiliehuse, hvor grundmodningen mange gange er begrænset til veje uden en overordnet terrænregulering. Disse forhold afhænger dog meget af den aktuelle grund og bygherrens ønsker.

Byggepladsarbejdets energiforbrug påvirkes i højere grad af byggemetoden, d.v.s. in situ støbning kontra præfabrikation, traditionel opmuring kontra elementmontage m.m. Det ses af tabel 4.2.2, at energiforbruget for den traditionelle 3-etagers blok er betydeligt større end for de andre byggerier på denne post. Det skyldes først og fremmest formarbejdet og stilladser til opmuring. For de præfabrikerede blokke er det især støbning af beton i kælderen og kranløft, der påvirker energiforbruget, der dog er behersket af størrelse.

Energiforbruget til vinterforanstaltninger består af et nogenlunde fast bidrag fra belysning, opvarmning af skurvogne og opvarmning af bygningen under færdiggørelsen, samt et meget varierende bidrag fra vinterudstøbning og vinteropmuring. Idet det "konstante" bidrag er af størrelsen 30-40 kWh/m^2, varierer det resterende energiforbrug fra 5-10 kWh/m^2 til 50 kWh/m^2. Det store energiforbrug for den traditionelle 3-etagers boligblok er beregnet på grundlag af den nuværende byggeskik.

På byggetidspunktet, 1951, var der imidlertid tradition for at afbryde de primære råhusarbejder, netop de som giver den store variation i energiforbruget til vinterforanstaltninger. Man ville kunne opnå lidt af samme virkning ved en planmæssig omfordeling af aktiviteterne til færdiggørelsesarbejder i vintertiden, kombineret med mere effektive opvarmningsmetoder, som det er forudsat ved beregning af "MSF", tabel 4.2.1.

Endelig kan der om energiforbruget til udtørring siges, at det varierer endnu kraftigere end energiforbruget til vinterforanstaltninger. Der er ret stor forskel på energiforbruget for de traditionelle opførelsesmetoder og "montage"byggerierne. Samme bemærkning som ovenfor med hensyn til byggeskik gælder også her.

I konkrete byggerier kan energiforbruget på byggepladsen og især energiforbruget til vinterforanstaltninger og udtørring afvige betragteligt fra de hidtil nævnte gennemsnitsbetragtninger.

For specielt dårlige klimaforhold kombineret med ugunstige placeringer af byggeperioden kan energiforbruget til vinterforanstaltninger blive helt op til 200 kWh/m^2. For et muret kirkebyggeri blev der således for vinteren 1978-79 målt et samlet forbrug til vinterforanstaltninger på 69 kWh/m^3 bygningsvolumen.

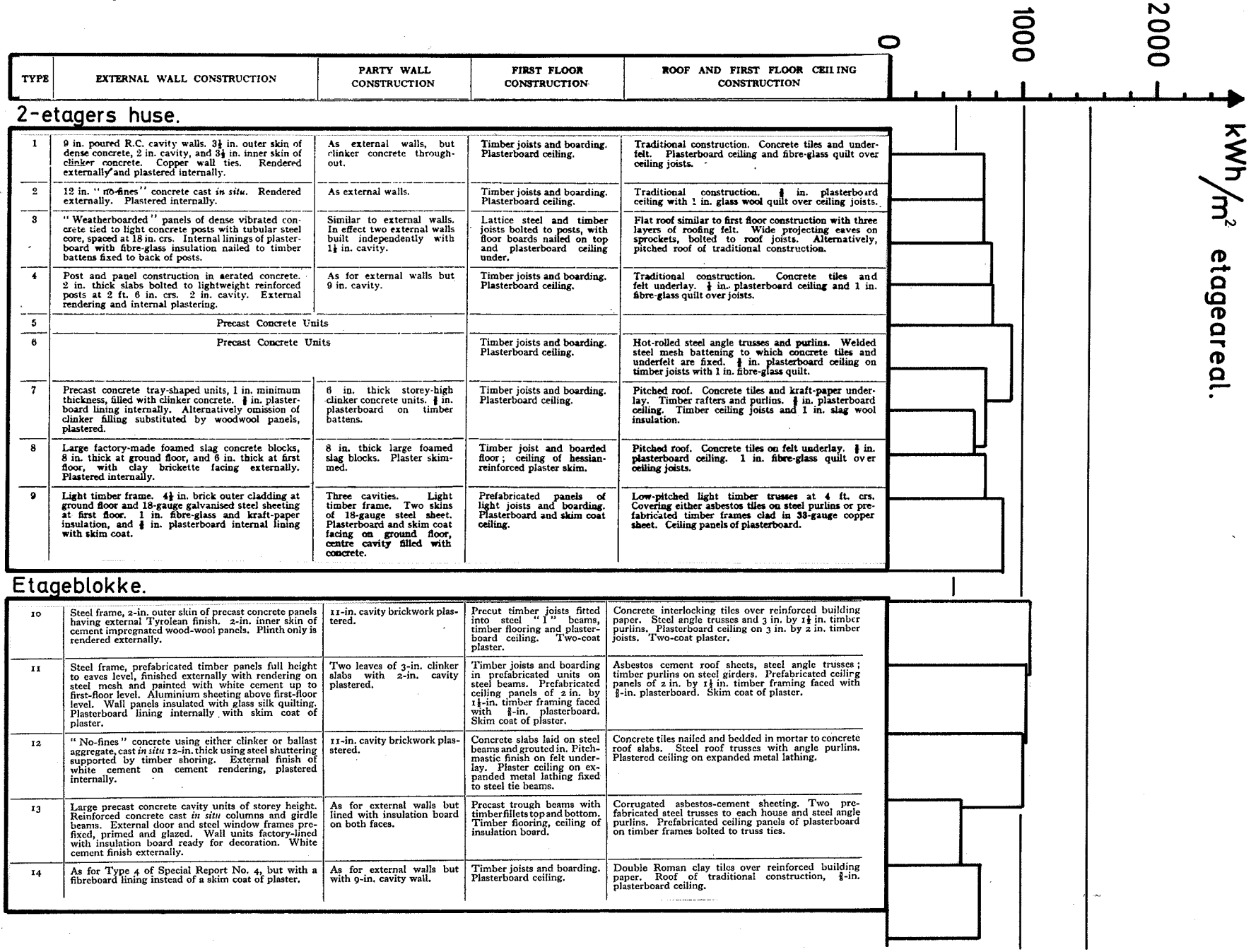
Ved beregninger af energiforbrug på byggepladsen for konkrete byggerier anbefales det derfor at benytte angivelserne i afsnit 4.1 - 4.6 i [80.1].

Litteraturliste

[79.1] Sigurd Andersen:
"DET AKKUMULEREDE ENERGIFORBRUG TIL FREMSTILLING AF BYGGEMATERIALER"
Rapport nr. 134, Instituttet for Husbygning, DTH,
Danmark 1979.

[80.1] Sigurd Andersen:
"ENERGIFORBRUGET PÅ BYGGEPLADSEN"
Rapport nr. 135, Instituttet for Husbygning, DTH,
Danmark 1980.

[80.2] Appendix A1 + A2:
UDSKRIFT AF MÆNGDER OG ANLÆGSENERGIFORBRUG FOR EKSISTERENDE BYGGERIER
Findes på biblioteket på Instituttet for Husbygning,
Danmark 1980.



TYPE	EXTERNAL WALL CONSTRUCTION	PARTY WALL CONSTRUCTION	FIRST FLOOR CONSTRUCTION	ROOF AND FIRST FLOOR CEILING CONSTRUCTION
2-etagers huse.				
1	9 in. poured R.C. cavity walls. 3½ in. outer skin of dense concrete, 2 in. cavity, and 3½ in. inner skin of clinker concrete. Copper wall ties. Rendered externally and plastered internally.	As external walls, but clinker concrete throughout.	Timber joists and boarding. Plasterboard ceiling.	Traditional construction. Concrete tiles and underfelt. Plasterboard ceiling and fibre-glass quilt over ceiling joists.
2	12 in. "no-fines" concrete cast *in situ*. Rendered externally. Plastered internally.	As external walls.	Timber joists and boarding. Plasterboard ceiling.	Traditional construction. ½ in. plasterboard ceiling with 1 in. glass wool quilt over ceiling joists.
3	"Weatherboarded" panels of dense vibrated concrete tied to light concrete posts with tubular steel core, spaced at 18 in. crs. Internal linings of plasterboard with fibre-glass insulation nailed to timber battens fixed to back of posts.	Similar to external walls. In effect two external walls built independently with 1½ in. cavity.	Lattice steel and timber joists bolted to posts, with floor boards nailed on top and plasterboard ceiling under.	Flat roof similar to first floor construction with three layers of roofing felt. Wide projecting eaves on sprockets, bolted to roof joists. Alternatively, pitched roof of traditional construction.
4	Post and panel construction in aerated concrete. 2 in. thick slabs bolted to lightweight reinforced posts at 2 ft. 6 in. crs. 2 in. cavity. External rendering and internal plastering.	As for external walls but 9 in. cavity.	Timber joists and boarding. Plasterboard ceiling.	Traditional construction. Concrete tiles and felt underlay. ½ in. plasterboard ceiling and 1 in. fibre-glass quilt over joists.
5	Precast Concrete Units			
6	Precast Concrete Units		Timber joists and boarding. Plasterboard ceiling.	Hot-rolled steel angle trusses and purlins. Welded steel mesh battening to which concrete tiles and underfelt are fixed. ½ in. plasterboard ceiling on timber joists with 1 in. fibre-glass quilt.
7	Precast concrete tray-shaped units, 1 in. minimum thickness, filled with clinker concrete. ½ in. plasterboard lining internally. Alternatively omission of clinker filling substituted by woodwool panels, plastered.	6 in. thick storey-high clinker concrete units. ½ in. plasterboard on timber battens.	Timber joists and boarding. Plasterboard ceiling.	Pitched roof. Concrete tiles and kraft-paper underlay. Timber rafters and purlins. ½ in. plasterboard ceiling. Timber ceiling joists and 1 in. slag wool insulation.
8	Large factory-made foamed slag concrete blocks, 8 in. thick at ground floor, and 6 in. thick at first floor, with clay brickette facing externally. Plastered internally.	8 in. thick large foamed slag blocks. Plaster skimmed.	Timber joist and boarded floor; ceiling of hessian-reinforced plaster skim.	Pitched roof. Concrete tiles on felt underlay. ½ in. plasterboard ceiling. 1 in. fibre-glass quilt over ceiling joists.
9	Light timber frame. 4½ in. brick outer cladding at ground floor and 18-gauge galvanised steel sheeting at first floor. 1 in. fibre-glass and kraft-paper insulation, and ½ in. plasterboard internal lining with skim coat.	Three cavities. Light timber frame. Two skins of 18-gauge steel sheet. Plasterboard and skim coat facing on ground floor, centre cavity filled with concrete.	Prefabricated panels of light joists and boarding. Plasterboard and skim coat ceiling.	Low-pitched light timber trusses at 4 ft. crs. Covering either asbestos tiles on steel purlins or prefabricated timber frames clad in 38-gauge copper sheet. Ceiling panels of plasterboard.
Etageblokke.				
10	Steel frame, 2-in. outer skin of precast concrete panels having external Tyrolean finish. 2-in. inner skin of cement impregnated wood-wool panels. Plinth only is rendered externally.	11-in. cavity brickwork plastered.	Precut timber joists fitted into steel "I" beams, timber flooring and plasterboard ceiling. Two-coat plaster.	Concrete interlocking tiles over reinforced building paper. Steel angle trusses and 3 in. by 1½ in. timber purlins. Plasterboard ceiling on 3 in. by 2 in. timber joists. Two-coat plaster.
11	Steel frame, prefabricated timber panels full height to eaves level, finished externally with rendering on steel mesh and painted with white cement up to first-floor level. Aluminium sheeting above first-floor level. Wall panels insulated with glass silk quilting. Plasterboard lining internally with skim coat of plaster.	Two leaves of 3-in. clinker slabs with 2-in. cavity plastered.	Timber joists and boarding in prefabricated units on steel beams. Prefabricated ceiling panels of 2 in. by 1½-in. timber framing faced with ⅜-in. plasterboard. Skim coat of plaster.	Asbestos cement roof sheets, steel angle trusses; timber purlins on steel girders. Prefabricated ceiling panels of 2 in. by 1½ in. timber framing faced with ⅜-in. plasterboard. Skim coat of plaster.
12	"No-fines" concrete using either clinker or ballast aggregate, cast *in situ* 12-in. thick using steel shuttering supported by timber shoring. External finish of white cement on cement rendering, plastered internally.	11-in. cavity brickwork plastered.	Concrete slabs laid on steel beams and grouted in. Pitchmastic finish on felt underlay. Plaster ceiling on expanded metal lathing fixed to steel tie beams.	Concrete tiles nailed and bedded in mortar to concrete roof slabs. Steel roof trusses with angle purlins. Plastered ceiling on expanded metal lathing.
13	Large precast concrete cavity units of storey height. Reinforced concrete cast *in situ* columns and girdle beams. External door and steel window frames prefixed, primed and glazed. Wall units factory-lined with insulation board ready for decoration. White cement finish externally.	As for external walls but lined with insulation board on both faces.	Precast trough beams with timber fillets top and bottom. Timber flooring, ceiling of insulation board.	Corrugated asbestos-cement sheeting. Two prefabricated steel trusses to each house and steel angle purlins. Prefabricated ceiling panels of plasterboard on timber frames bolted to truss ties.
14	As for Type 4 of Special Report No. 4, but with a fibreboard lining instead of a skim coat of plaster.	As for external walls but with 9-in. cavity wall.	Timber joists and boarding. Plasterboard ceiling.	Double Roman clay tiles over reinforced building paper. Roof of traditional construction, ⅜-in. plasterboard ceiling.

Figur 5.1.1: Beregninger af materialeenergiforbruget for forskellige bygningstyper, [49.0].

5. ANLÆGSFORBRUGETS STØRRELSE

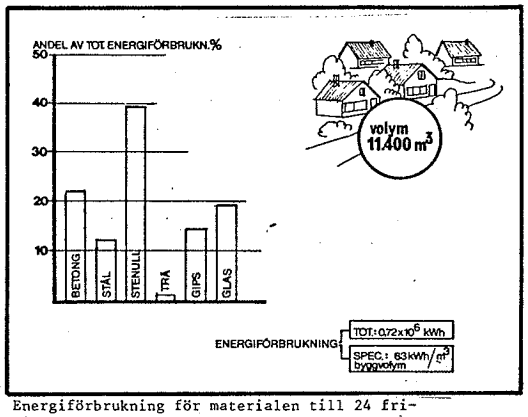
5.1 Tidligere undersøgelser

Som et led i de almindelige analyser af ressourcebesparende byggemetoder lige efter krigen gjorde man i England, [49.0], også et forsøg på at bestemme energiforbruget til fremstilling af materialerne i alternative bygningskonstruktioner. Desværre er forudsætningerne for analysen ikke nævnt, men hovedtendenserne med hensyn til materialevalgets indflydelse på energiforbruget er de samme, som er konstateret i senere undersøgelser. Disse tendenser er, at man ved valg af stålkonstruktioner eller teglkonstruktioner øger energiforbruget til fremstilling af huset, mens man ved valg af betonkonstruktioner eller trækonstruktioner mindsker energiforbruget (se figur 5.1.1).

For at finde lignende analyser som ovenfor nævnte skal vi helt frem til 1974 til den første energiforsyningskrise, hvor man i Sverige gennemførte et indledende kortlægningsarbejde af energiforbruget i og omkring bygninger, [74.0]. I modsætning til den tidlige engelske undersøgelse er der her ikke gjort så meget ud af beskrivelsen af konstruktionerne, men af variation i bygningstyper.

Det ses af figur 5.1.2, at man får et bemærkelsesværdigt lavt energiforbrug for enfamiliehuset i forhold til de andre bygningstyper, hvilket især skyldes et ret lavt specifikt energiforbrug for træ og cement. I øvrigt er værdierne generelt lave, hvilket må tilskrives analysens summariske karakter.

I en senere undersøgelse i England, [76.0], fra 1976 er man gået mere grundigt til værks, og resultaterne er mere realistiske. Det interessante ved denne analyse er, at man får en tydelig sammenhæng

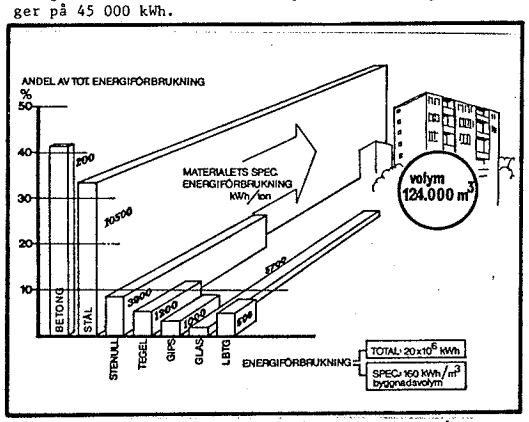


Energiförbrukning för materialen till 24 friliggande villor med den sammanlagda byggnadsvolymen 11 400 m^3. Energiåtgången för materialframställningen per hus blir 30 000 kWh. Detta objekt har genomgående energisnåla material. Ett genomsnittsvärde för småhusproduktionen ligger på 45 000 kWh.

~ 165 kWh/m^2etage

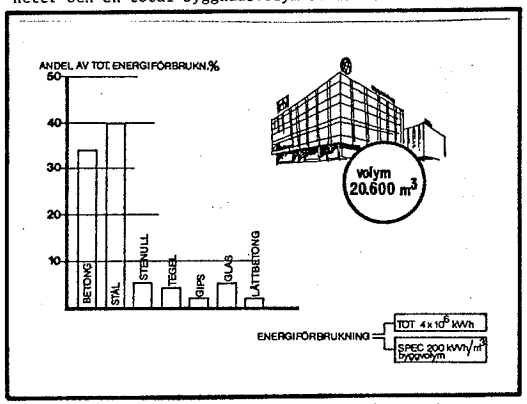
gennemsnit

~ 250 kWh/m^2etage



Energiförbrukning för framställning av byggmaterialen till 8 bostadshus med 3-7 våningar, 334 lägenheter och en total byggnadsvolym av 124 000 m^3.

~ 450 kWh/m^2etage

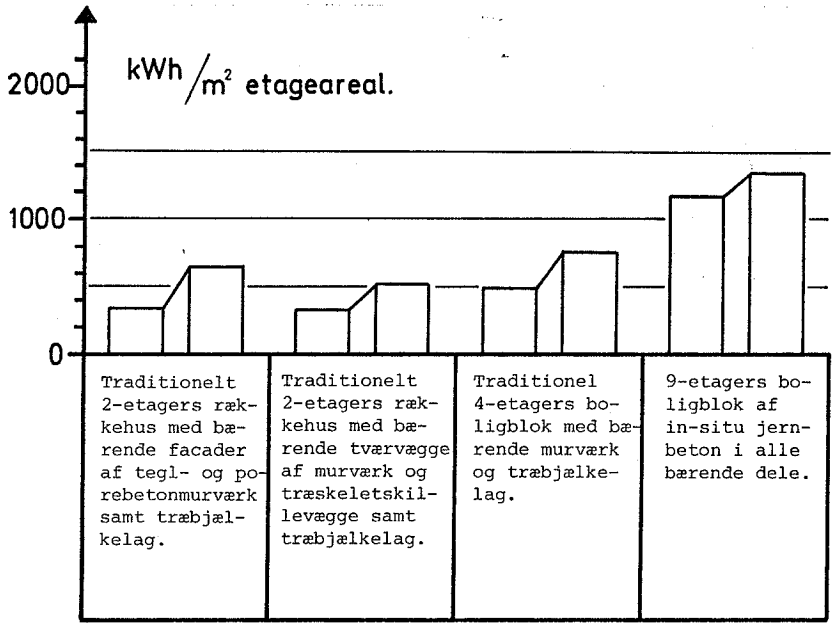


Energiförbrukning för materialframställningen till 2 kontorshus - 6 resp 4 våningar höga - med en sammanlagd volym på 20 600 m^3.

~ 600 kWh/m^2etage

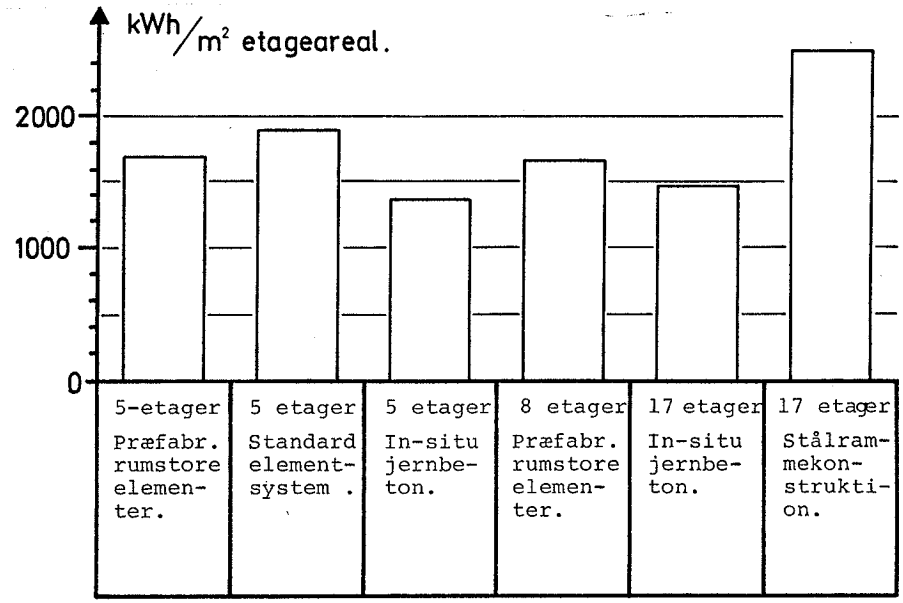
Figur 5.1.2:

Beregnede materialeenergiforbrug for svenske bygningstyper [74.0].



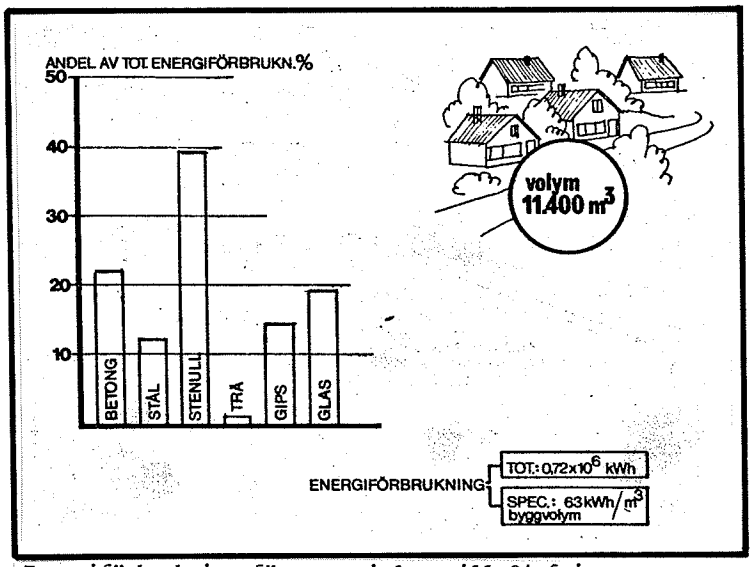
Figur 5.1.3:

Materialeenergiforbrug for typiske engelske boliger [76.0].



Figur 5.1.4:

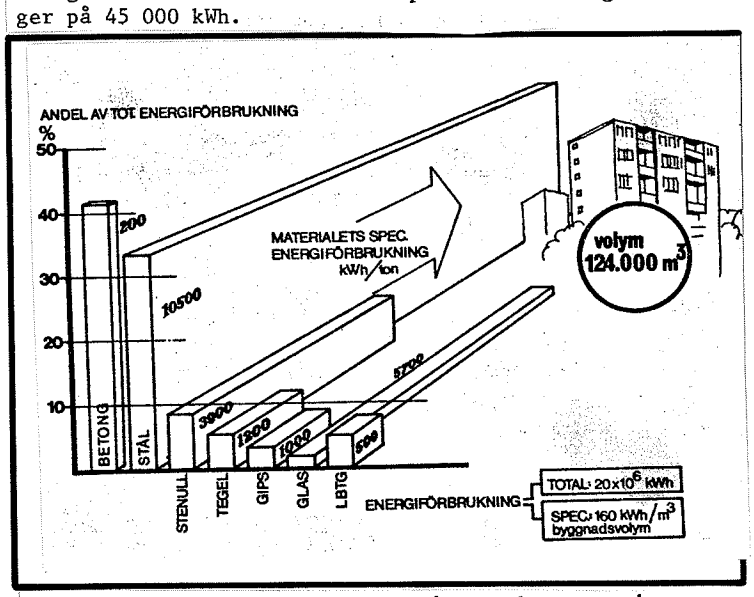
Energiforbrug til fremstilling af materialerne i betonbygninger (GER-værdier) [77.0].



Energiförbrukning för materialen till 24 friliggande villor med den sammanlagda byggnadsvolymen 11 400 m^3. Energiåtgången för materialframställningen per hus blir 30 000 kWh. Detta objekt har genomgående energisnåla material. Ett genomsnittsvärde för småhusproduktionen ligger på 45 000 kWh.

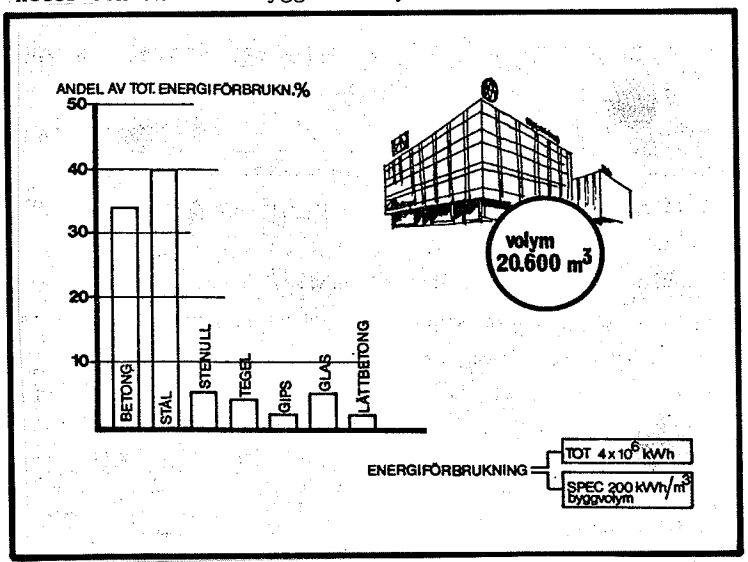
~ 165 kWh/m^2etage

gennemsnit
~ 250 kWh/m^2 etage



Energiförbrukning för framställning av byggmaterialen till 8 bostadshus med 3-7 våningar, 334 lägenheter och en total byggnadsvolym av 124 000 m^3.

~ 450 kWh/m^2 etage

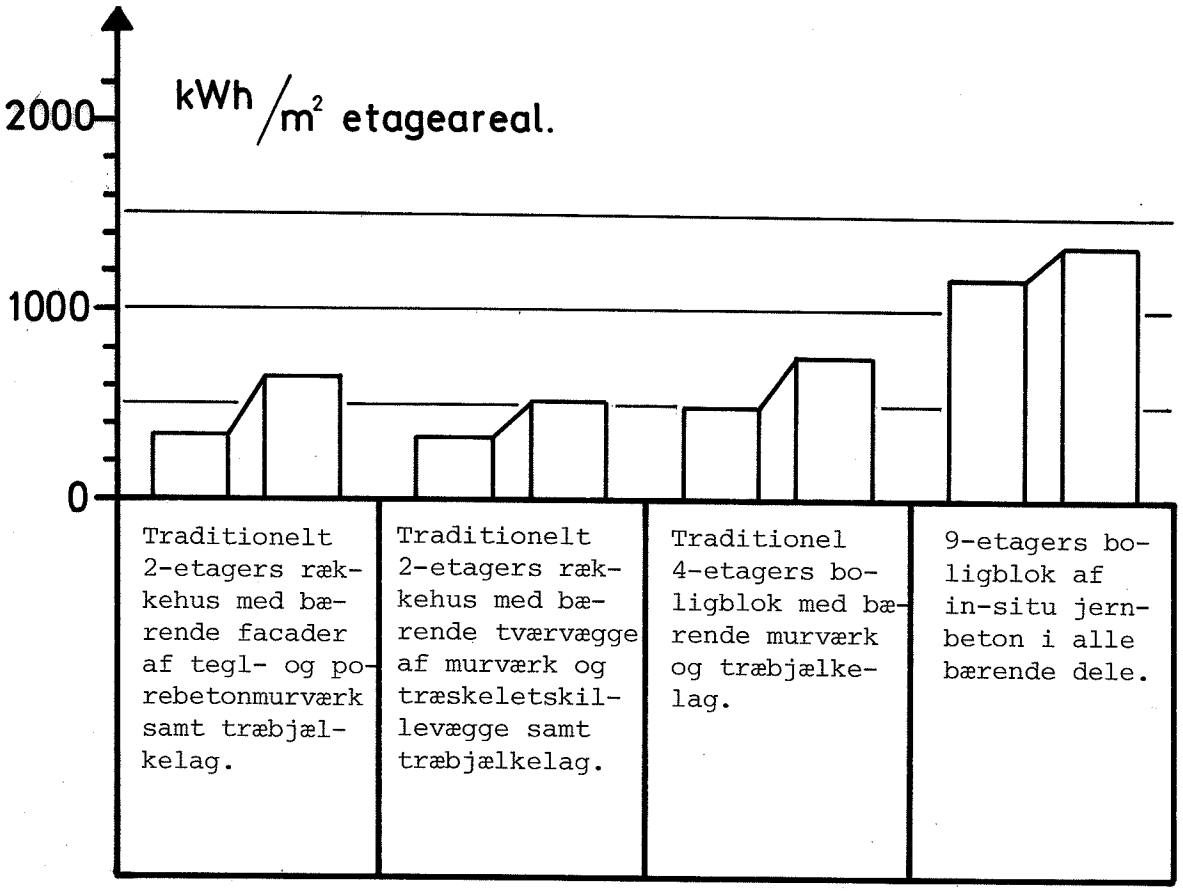


Energiförbrukning för materialframställningen till 2 kontorshus - 6 resp 4 våningar höga - med en sammanlagd volym på 20 600 m^3.

~ 600 kWh/m^2 etage

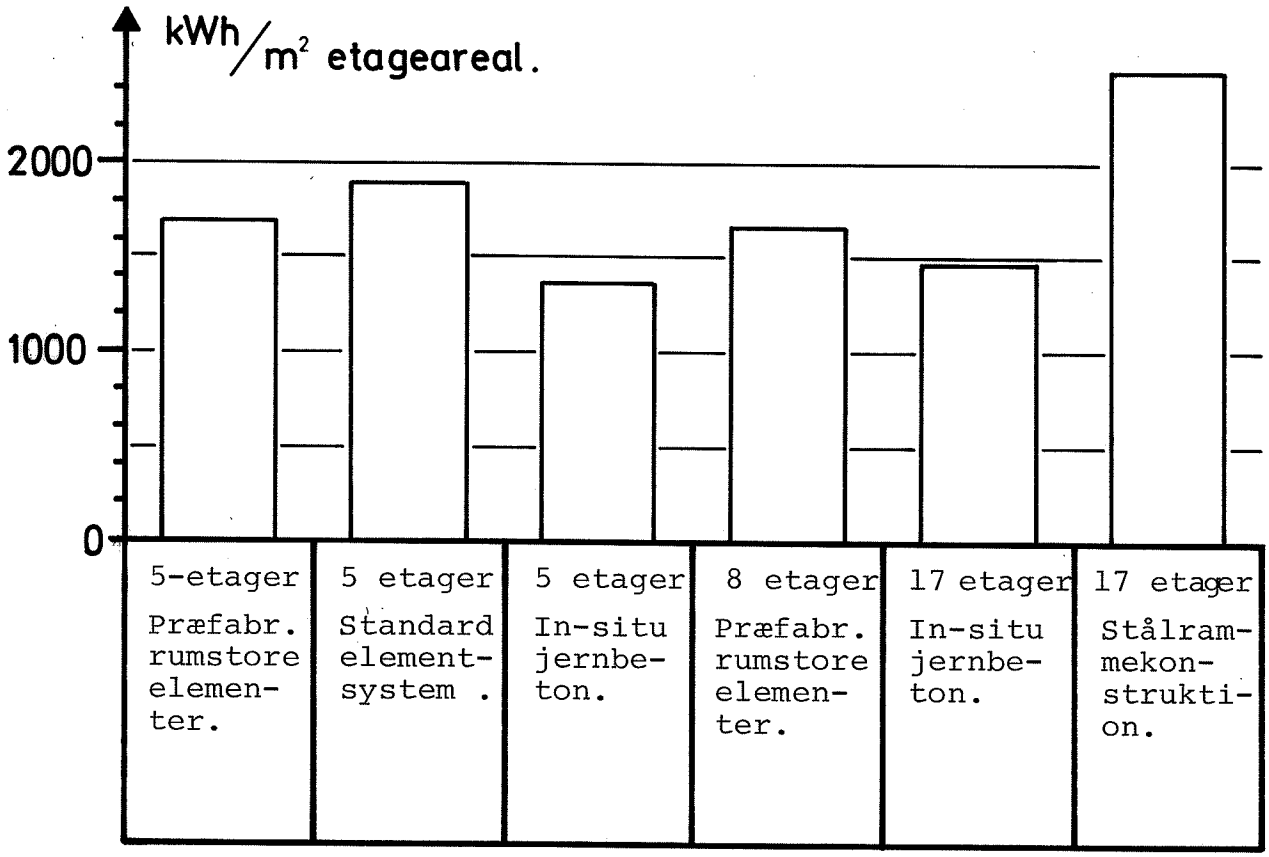
Figur 5.1.2:

Beregnede materialeenergiforbrug for svenske bygningstyper [74.0].



Figur 5.1.3:

Materialeenergiforbrug for typiske engelske boliger [76.0].



Figur 5.1.4:

Energiforbrug til fremstilling af materialerne i betonbygninger (GER-værdier) [77.0].

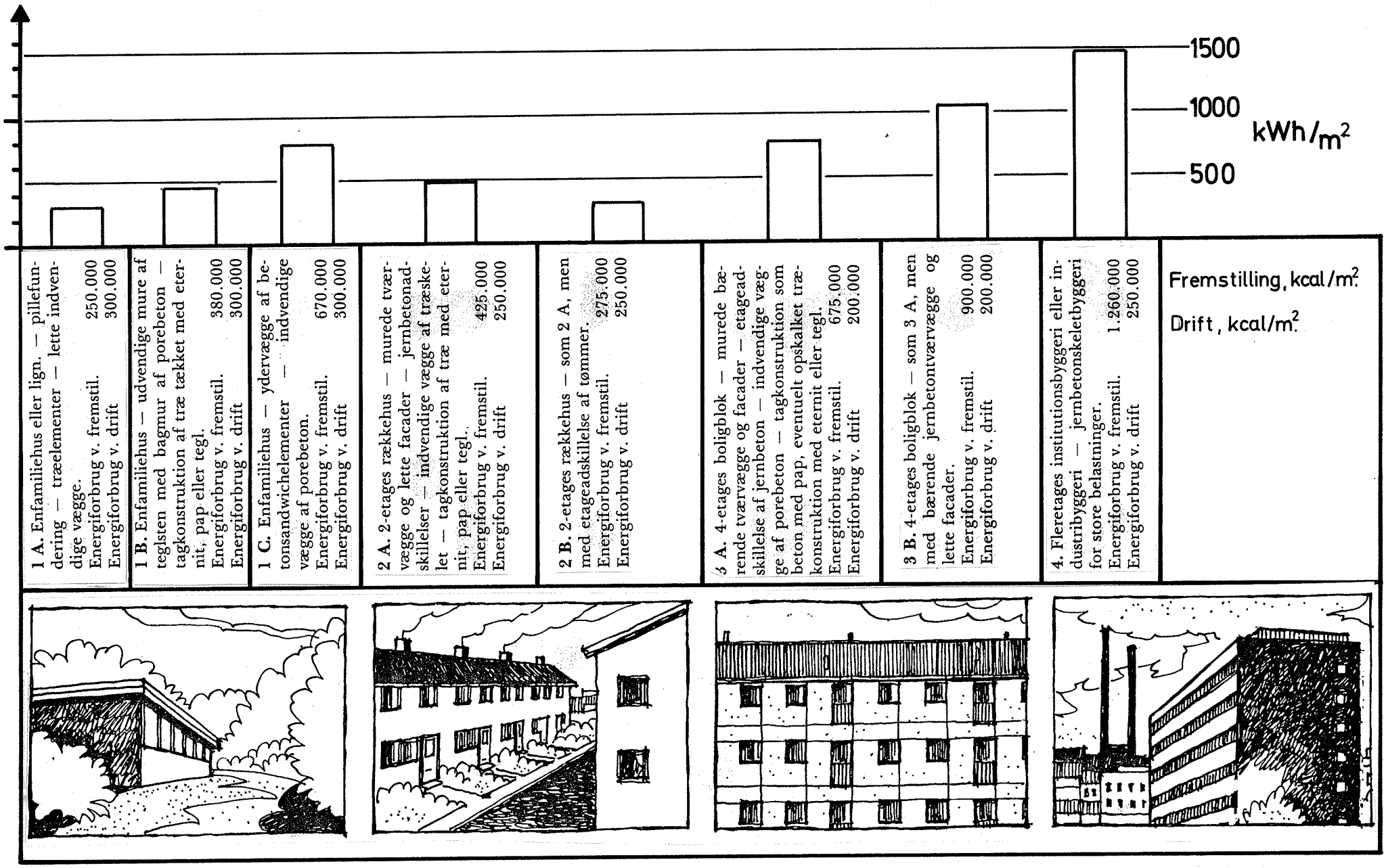
mellem etageantallet og energiforbruget således, at energiforbruget stiger kraftigt med etageantallet (se figur 5.1.3).

Dette er i strid med resultater, som beskrives senere i denne rapport, og også med de beregninger der er gjort i en polsk analyse [77.0] (se figur 5.1.4).

Forklaringen må bl.a. findes i et specielt lavt energiforbrug til fremstilling af tegl (ca. 700 kWh/ton), som skyldes specielle lerarter, der findes i England. Lerarten kan bearbejdes med betydeligt lavere vandindhold, samtidig med at leret ofte indeholder organisk materiale, som giver et varmetilskud under brændingen.

Det karakteristiske ved resultatet af den polske analyse er dels de øjensynlige fordele ved in-situ-byggeriet og det høje energiforbrug for stålkonstruktionen. Det første vil imidlertid blive noget udjævnet, hvis der også tages hensyn til energiforbruget på byggepladsen. Desuden benyttes der i [77.0] et meget højt specifikt energiforbrug for præfabrikation.

Til slut skal nævnes en dansk analyse, som første gang blev bragt i [74.1] og senere illustreret i [74.2], se figur 5.1.5. Tendenserne i resultaterne af denne analyse er af omtrent samme art som den engelske, [76.0], og den svenske analyse, [74.0]. Der er beregnet afvigende værdier af energiforbruget til fremstilling af de grundlæggende byggematerialer i forhold til nyere undersøgelser, idet stål og cement har fået tillagt energiforbrug, der ligger ca. 40% over andres angivelser, og tegl og tømmer er tillagt værdier, der ligger mere end 50% lavere. Dette skyldes, at undersøgelsen til dels er foretaget på grundlag af statistikker fra begyndelsen af 60'erne. Konsekvensen af dette er da også, at de traditionelt opførte bygninger har et noget lavere energiforbrug til fremstillingen i forhold til betonbygninger i den danske analyse.



Figur 5.1.5: Materialeenergiforbrug beregnet for forskellige boligtyper fra undersøgelsen [74.1].

Sammenfattende kan det siges, at de fleste af de hidtil foretagne analyser i nogen grad modsiger hinanden i deres konklusion. Dette må imidlertid ses på baggrund af den usikkerhed, der er forbundet med at fastlægge energiforbruget til fremstilling af de enkelte bygningsmaterialer, både på grund af geografisk betingede afvigelser, og ikke mindst på grund af afvigelser i metode og detaljeringsgrad, fordi de specifikke materialeenergiforbrug ændrer sig med tiden.

I nyere analyser, som f.eks. [77.1], [78.2] og [79.0], er en stor del af denne usikkerhed elimineret, men desværre er formålet i disse analyser i højere grad rettet mod energiproducerende eller -besparende systemer og ikke mod selve bygningen.

5.2 Minimering af anlægsenergiforbruget

Som det fremgår af de to forrige hovedafsnit hidrører den største del af anlægsenergiforbruget fra materialeforbruget og kun en mindre del fra aktiviteter på byggepladsen. Anlægsenergiforbruget vil derfor især være følsomt over for ændringer i materialeforbrug og for ændret materialevalg.

Disse to faktorer er imidlertid ikke uafhængige, men er alt andet lige sammenknyttet ved det man kan kalde "materialernes forarbejdningsgrad".

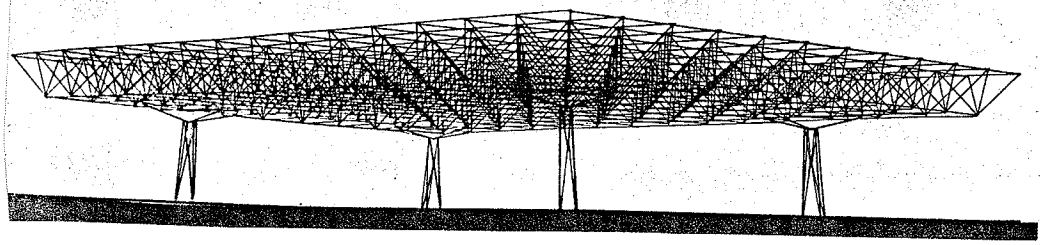
Jo højere materialets forarbejdningsgrad er, des bedre er materialets styrkeegenskaber normalt. Dermed kan materialet bruges til samme statiske formål med et mindre materialeforbrug, jo højere materialets forarbejdningsgrad er.

Samme generelle bemærkning gælder med hensyn til andre funktionskrav, som f.eks. isoleringsevne, regntæthed, slidstyrke m.m.

For hvert enkelt materiale, og til dels også materialerne indbyrdes, gælder desuden, at energiforbruget til fremstilling af materialet vokser, når det får en højere forarbejdningsgrad.

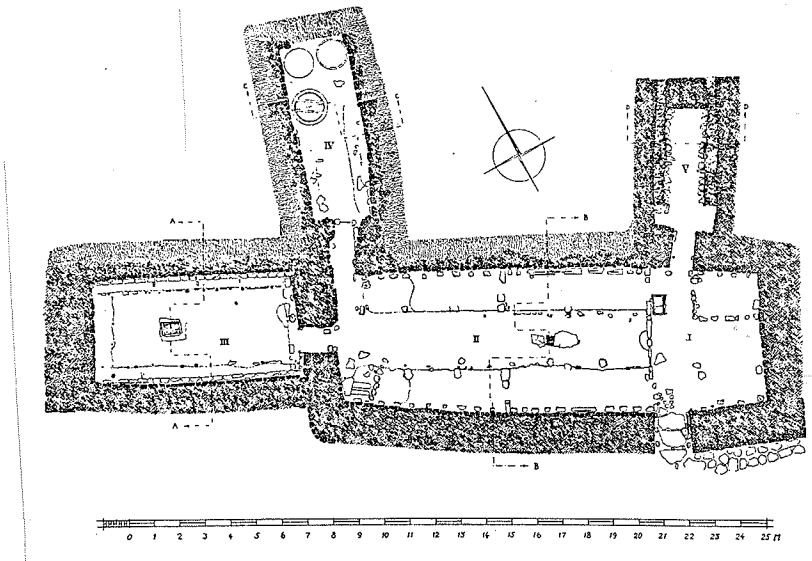
Ud fra dette kan en minimering af anlægsenergiforbruget ske i flere forskellige "retninger" eller med flere forskellige midler.

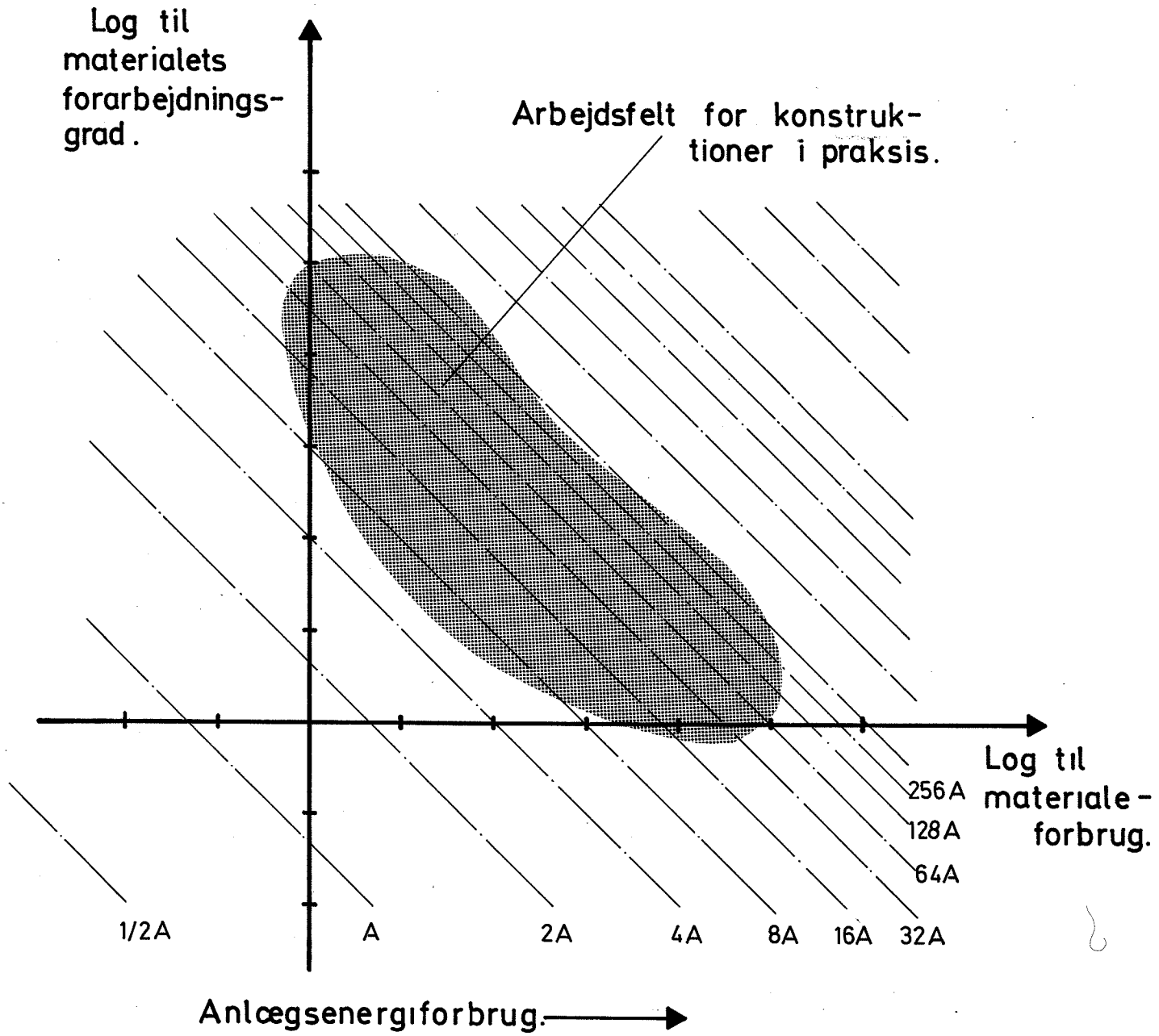
En retning kunne være at minimere materialeforbruget. Dertil hører naturligt et valg af konstruktionsmateriale blandt de højt forarbejdede materialer. Et eksempel på konstruktioner i denne retning er f.eks. rumgitre i stål.



En anden retning kunne være at minimere energiforbruget gennem materialevalget blandt de lavest forarbejdede materialer. Hertil hører naturligt et konstruktionsvalg, der kræver et stort materialeforbrug. Dette kan eksemplificeres ved en plan af de gamle islandske græstørvhuse.

Støng-tomten, Island (800 e.kr.)



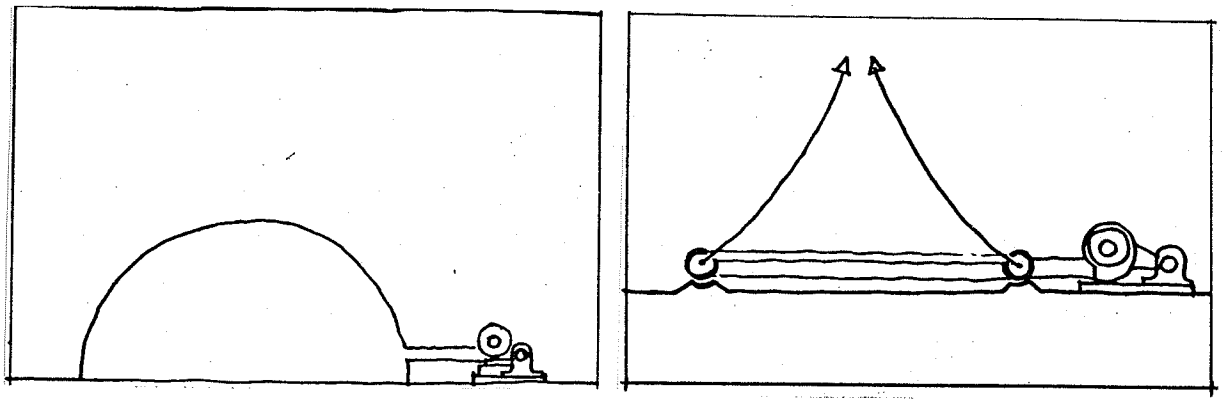


Figur 5.2.1:

Anlægsenergiforbruget, givet som niveaulinier i et treretvinklet koordinatsystem. Anlægsenergiforbruget ud af papirets plan.

Der henvises til figur 8.4.2.

Som en yderligere belysning af den første retning peges der i [75.0] på de materialebesparelser, der resulterer af, at konstruktionernes bæreevnefunktion eller klimaskærm opnås ved et løbende energiforbrug. Dette er tilfældet i de pneumatiske konstruktioner, der opnår bæreevnen gennem opretholdelsen af et konstant overtryk i det overdækkede rum. Et andet eksempel er "jethuset", som består af en kraftig, opadrettet luftstrøm liggende i overfladen af et kegleformet rum. Luftstrømmen, som er opvarmet, beskytter rummet mod regn og kulde.



boblehal jethuset

[75.0]

Holdes disse sidste to konstruktionsformer udenfor, kan anlægsenergiforbruget beskrives som funktion af to hovedvariable: Materialeforbruget og materialets forarbejdningsgrad. I et treretvinklet koordinatsystem - forudsat at forarbejdningsgraden kan måles i en definérbar enhed - kan anlægsenergiforbruget da beskrives som en niveauflade, der vil have minima for givne sæt værdier for materialeforbrug og forarbejdningsgrad.

Udseendet af en sådan flade må da i meget grove træk blive som vist på figur 5.2.1, hvor en mulig flade er vist ved niveaukurver.

Et delområde af denne omfattende minimering er den geometriske minimering af konstruktionerne. En sådan minimering er i mange tilfælde uafhængig af materialevalget og vil derfor have samme positive virkning

på anlægsenergiforbruget for alle de materialer, der er egnet til udførelse af den behandlede konstruktions geometri.

Ved minimering af de enkelte konstruktionsdele har den geometriske minimering dog indflydelse på materialets forarbejdningsgrad som omtalt på de foregående sider.

Den geometriske konstruktionsminimering kan gennemføres på forskellige niveauer af bygningskonstruktionens omfang. Her vælges det at dele den ind i 3 niveauer:

Råhusenes overordnede geometri, hvor det er overflader af bygningerne m.m., der minimeres.

Konstruktionssystemets geometri, hvor det er de bærende hovedsystemer, der minimeres.

Byggekomponenternes geometri, hvor det er de enkelte bærende elementers geometri, der minimeres.

På det første niveau er minimeringen mest uafhængig af materialevalget og skal derfor beskrives i det følgende.

5.3 Råhusets overordnede geometri

I tidligere undersøgelser er en minimering af bygningers overordnede geometri foretaget for at kunne udtale sig om bygningernes varmetab. Det er da bygningens overflade mod det fri og mod jord, der er den minimerede størrelse, se f.eks. [75.0] eller [78.1].

Det viser sig da, at der kan uddrages to generelle regler:

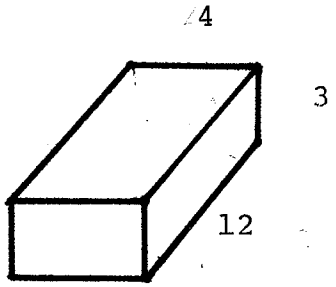
a) Bygningens specifikke ydre overflade, d.v.s. forholdet mellem dens ydre overflade og dens volumen, bliver mindre, når bygningens volumen forøges for ligedannede geometrier.

b) Den minimale specifikke ydre overflade opnås i kuglen, i praksis i kugletilnærmede geometrier, for fastholdt volumen.

En lignende undersøgelse kan gennemføres for overfladen af de rumafgrænsede bygningsdele, d.v.s. vægge, etageadskillelser, facader og gavle.

Eksempel 5.3.1:

Der betragtes i det følgende en bygningsenhed, som måler 4 m i bredden, 3 m i højden og 12 m i dybden. Denne enhed skal repræsentere en halv bolig. Enhedens overflader er samtidig symmetriplaner for plader og skiver, som afgrænser enheden. Undersøgelsen i dette eksempel går på at bestemme den samlede specifikke overflade af 64 enheder bygget sammen i bredden og højden på forskellige måder.

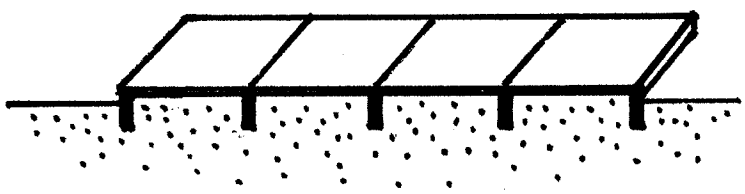


1 bygningsenhed

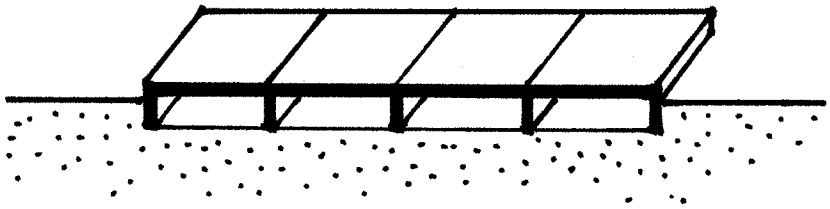
Bygningen deles nu ind i tre dele:

Bygningsbasis, som består af fundamentet, eventuelt kælderen og terrændækket henholdsvis etageadskillelsen mellem kælder og 1. etage. Bygningsbasen kan da bestå af fire forskellige typer:

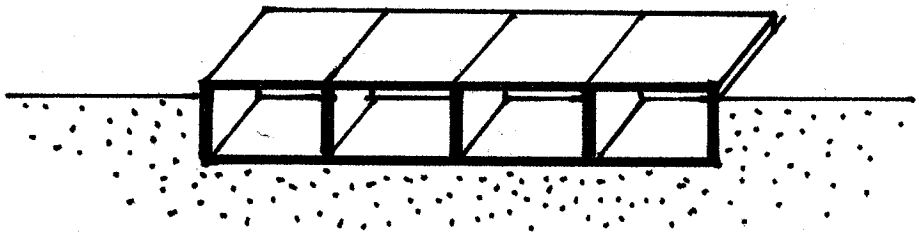
I. Rendefundament + terrændæk



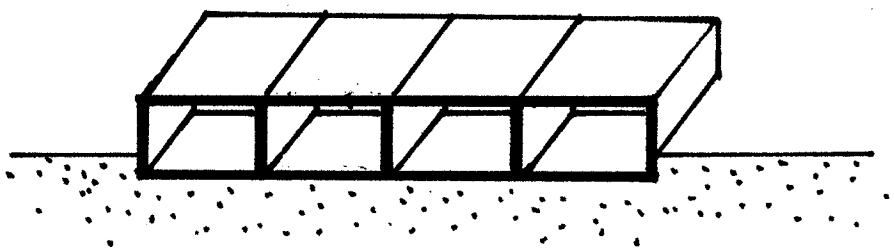
II. Krybekælder



III. Uudnyttet kælder

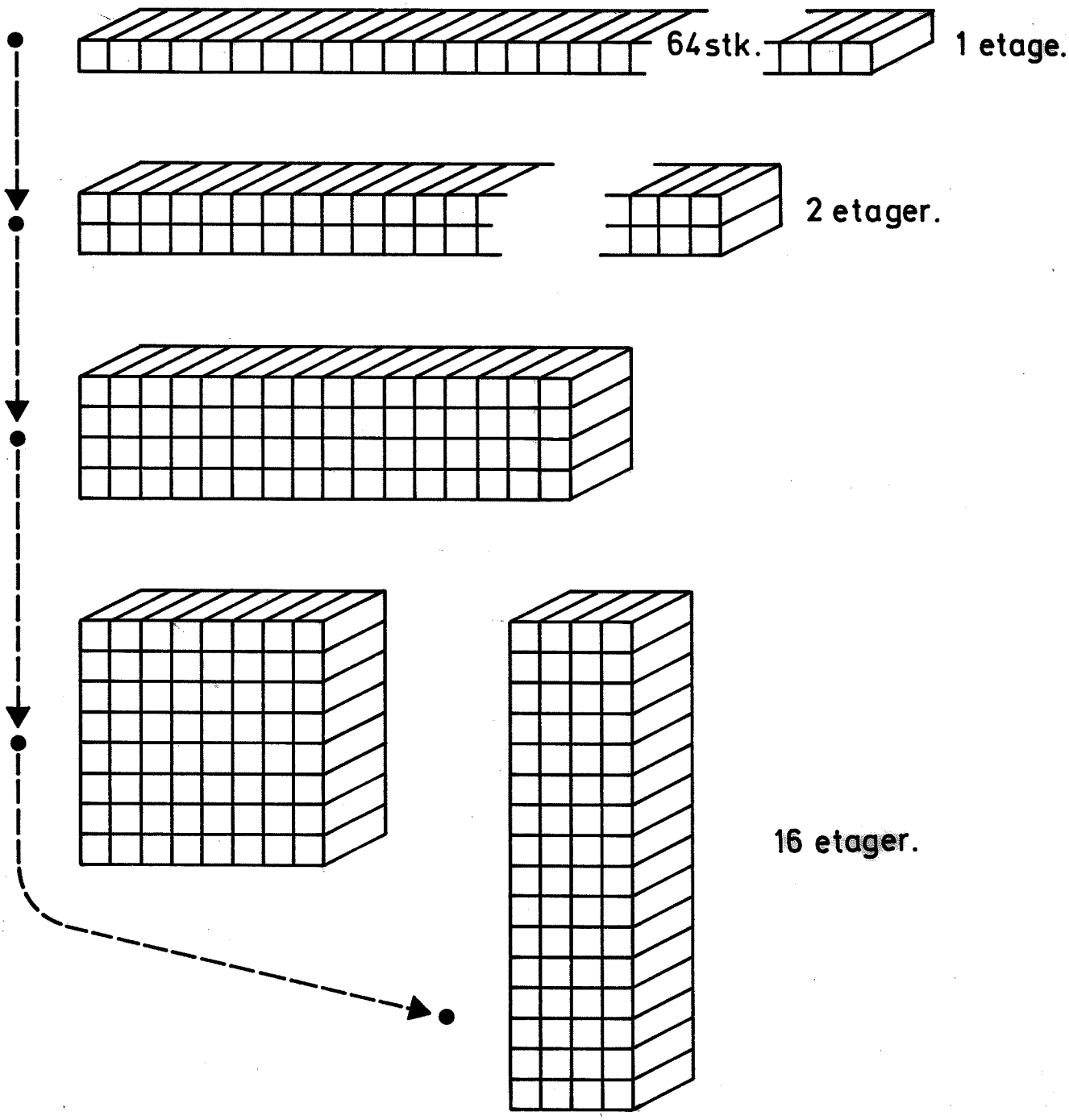


IV. Udnyttet kælder



For de fire tilfælde kan nedenstående specifikke overflader bestemmes, idet der er indført følgende tilnærmelser:

- fundamentshøjden er 1.5 m = ½·3 m for tilfælde I og II,
- kældervæg + fundament har en højde på 3 m for tilfælde III + IV
- et volumen svarende til de 64 elementer (32 lejligheder) placeres oven på bygningsbasis.
- i tilfælde IV kan kælderens volumen medregnes til det samlede volumen. (Dette svarer til reglerne i BR-77 for bygningers etageareal.)



Figur 5.3.1:

Sammenbygningsmåder for de 64 bygningsenheder.

Den specifikke overflade af Bygningsbasens konstruktioner bliver da:

$$\text{Type I + II} : \frac{13}{24\,n} + \frac{1}{1536}$$

$$\text{Type III} : \frac{13}{12\,n} + \frac{1}{768}$$

$$\text{Type IV} : \frac{13}{12(n+1)} + \frac{n}{768(n+1)}$$

hvor de 64 enheder er bygget sammen i n etager, $1 < n < 16$ (se figur 5.3.1).

Råhuset består af de primære konstruktioner over bygningsbasen, d.v.s. facader, vægge, gavle, tag og etageadskillelser.

Råhusets specifikke overflade bliver da:

$$\text{Type I + II + III} : \frac{3}{4} + \frac{1}{768}\,n$$

$$\text{Type IV} : \frac{3\,n}{4(n+1)} + \frac{n^2}{768(n+1)}$$

Endelig betragtes bygningens overflader, som består af ydre facade- og tagoverflader og indre væg- og gulvoverflader.

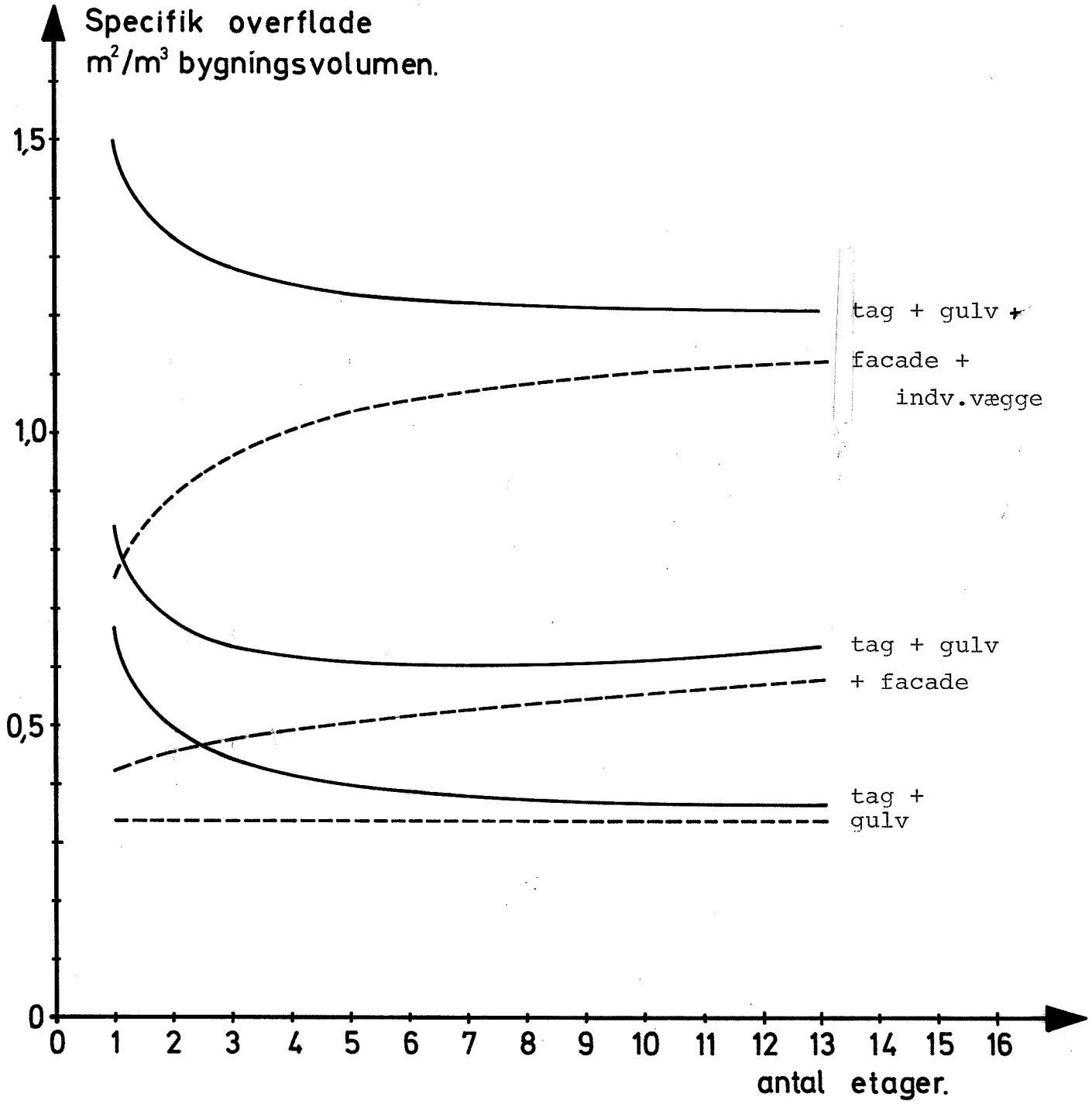
Hertil hører en specifik overflade på:

$$\text{Type I + II + III} : \frac{7}{6} + \frac{1}{3\,n} + \frac{1}{768}\,n$$

$$\text{Type IV} : \frac{7\,n}{n+1} + \frac{1}{3(n+1)} + \frac{n^2}{768(n+1)}$$

I figur 5.3.2 er de specifikke overflader optegnet som funktion af etageantallet.

Det ses, at for den samlede specifikke overflade er der tale om en aftagende funktion af etageantallet for alle tilfældene I - IV inden for det benyttede område af etageantal.



Figur 5.3.2:

Den specifikke overflade af de 64 bygningsenheder bygget sammen som vist i figur 5.3.1.

——— uudnyttet kælder/krybekælder

- - - - udnyttet kælder

Denne model er god til at beskrive skivekonstruktioner, men kan ikke bruges til at beskrive søjle- eller rammekonstruktioner. □

Materialeforbruget i en konstruktion kan ikke angives alene ved udstrækningen af konstruktionens symmetriplan, men må også gives ved konstruktionstykkelsen. I det næste eksempel undersøges konstruktionstykkelsens afhængighed af etageantallet for en skivebygning.

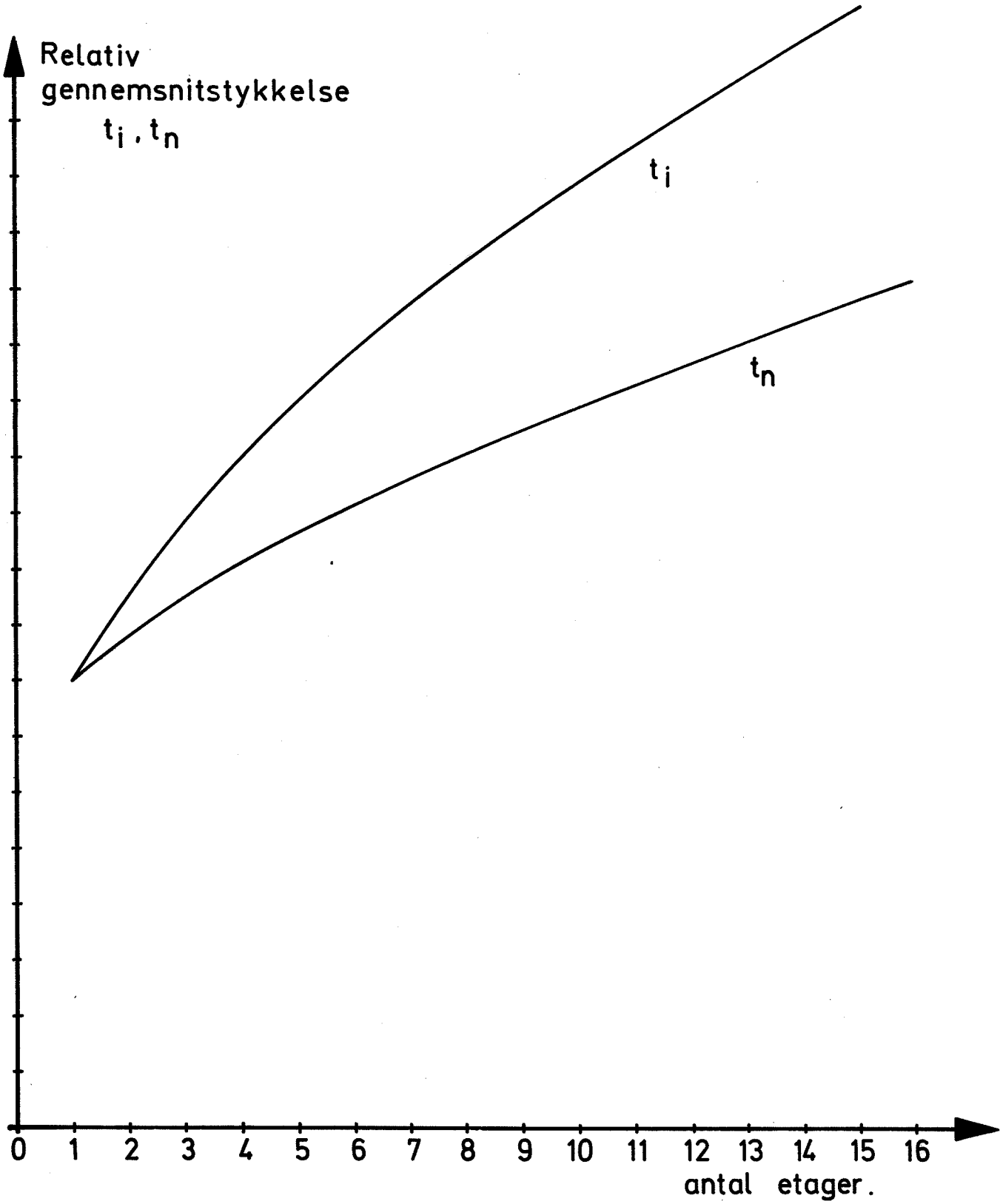
Eksempel 5.3.2:

For en skivebygning, som givet ved sammenbygning af de 64 bygningselementer, regnes de vandrette konstruktioner at skulle optage en belastning på 6.25 kN/m^2 og de lodrette konstruktioner en belastning på 37 kN/m pr.etage. Der tages ikke hensyn til afstivende konstruktioner og vandret belastning.

De vandrette konstruktioners belastning er ikke afhængig af etagehøjden, og dermed er de vandrette konstruktioners tykkelse konstant, her vælges en referencetykkelse på 12.9 cm svarende omtrent til standard betonhuldæks massive tykkelse.

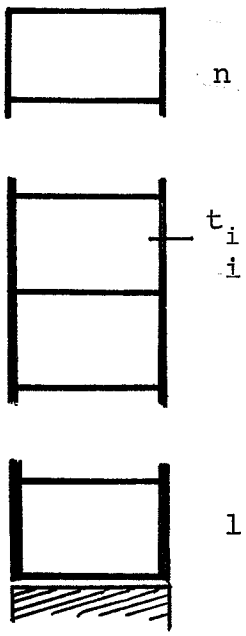
Konstruktionstykkelsen af de lodrette konstruktioner regnes at følge lovmæssighederne, der gælder for standardbetonelementer (uarmeret beton, σ'_{bk} = 15 MPa). Dimensioneringsreglerne for sådanne kan udledes af Engessers' 1. søjleformel, se [78.1].

Med den givne etagehøjde på 3 m, σ'_{bk} = 15 MPa og en standard excentricitet for normalkraften på 2 cm, kan sammenhængen mellem tykkelsen t_i af de lodrette konstruktioner i etage i og n gives ved



Figur 5.3.3:

Den nødvendige relative konstruktionstykkelse for de lodrette konstruktioner i et skivehus af betonelementer bestemt efter [78.1] (Engesser I).



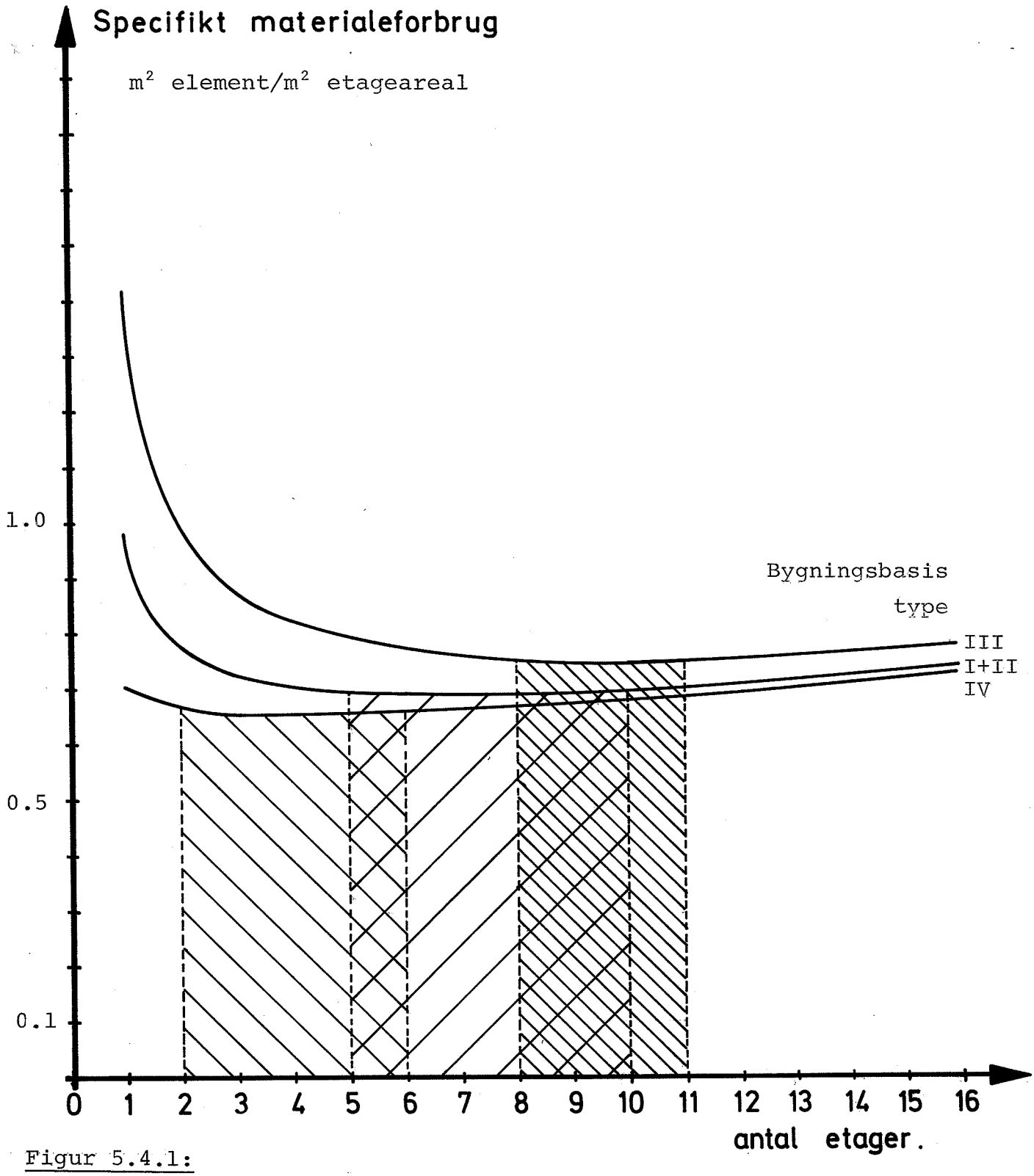
$$(n - i)\cdot 0.037 = t_i \frac{1 - \left(\frac{0.04}{t_i}\right)^2}{1 + \frac{0.0094}{t_i^2}} \quad (t_i \text{ i meter})$$

På grundlag af denne formel kan en række førsteordens værdier for t_i, $1 < i < 16$, beregnes. Disse tykkelser kan dernæst give et bedre grundlag for beregningen af de virkelige belastninger, idet de tidligere konstante belastninger må korrigeres svarende til ændrede vægtykkelser. En ny beregningsrunde vil da give andenordensværdier for t_i og den gennemsnitlige vægtykkelse $t_n = \sum_{1}^{n} \frac{t_i}{n}$ for de n etager kan da bestemmes.

I figur 5.3.3 er disse tykkelser givet som relative tykkelser i forhold til referencetykkelsen for dæk. Det ses, at man opnår en næsten lineær sammenhæng, hvor konstruktionstykkelsen vokser for voksende antal etager.

5.4 Materialeforbrug

For skivebygninger med de angivne geometrier kan materialeforbruget, udtrykt ved det massive, specifikke konstruktionsvolumen, bestemmes som produktet af specifik overflade og nødvendig konstruktionstykkelse. For fundamenter anvendes da værdierne for t_i og for råhusets vægge gennemsnitsværdierne t_n fra eksempel 5.3.2.



Figur 5.4.1:

Det specifikke materialeforbrug som funktion af etageantallet for skivebygninger i betonelementer. Kurverne bestemt på grundlag af eksemplerne 5.3.1 og 5.3.2.

Der opnås de i figur 5.4.1 viste sammenhænge mellem specifikt materialeforbrug og etageantal.

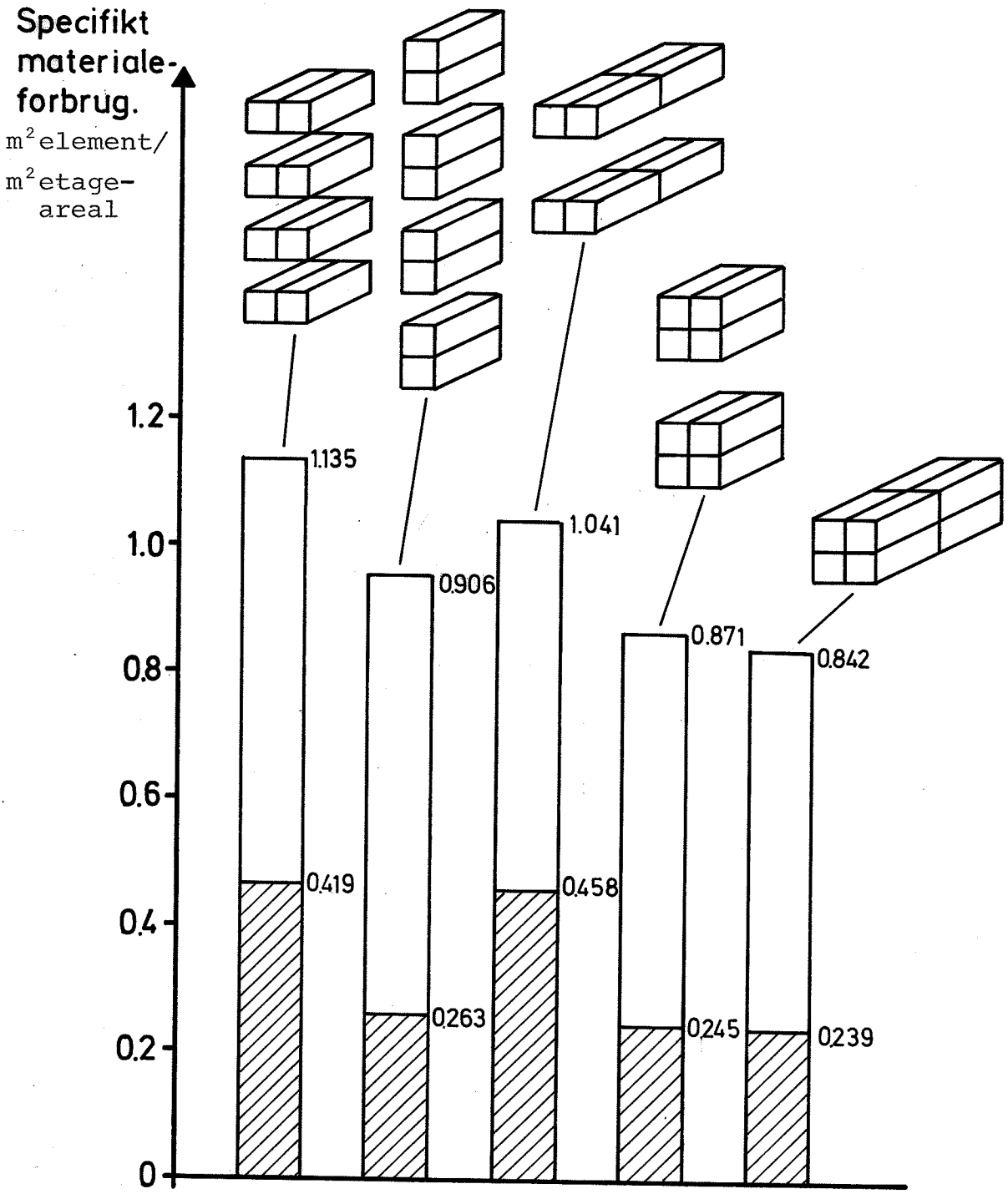
Det ses, at de søgte minima viser sig at være meget flade. Der er ikke tale om en givet optimal værdi for n, men om et optimalt interval, som, alt efter hvorledes bygningsbasens art er, varierer fra 2 til 11 etager.

Det skal påpeges, at der i bestemmelsen af disse kurver indgår en række tilnærmelser, og at de kun er gældende for skivebygninger. Samtidig er de kun gældende for netop det valgte antal enheder. For andre antal enheder og sammenbygningsmuligheder eller for fritliggende enheder kan der gennemføres lignende undersøgelser. Nogle af disse er gennemført for bygningsbasis type II, krybekælder (eksempel 5.3.1), for samme forudsætninger som i eksemplerne 5.3.1 og 5.3.2, dog kun for 4 boliger, d.v.s. 8 bygningselementer. Værdierne er vist i stavdiagrammet i figur 5.4.2.

Ved sammenligning med figur 5.4.1. ses, at alle værdier naturligvis ligger over kurven for det samlede specifikke materialeforbrug.

Det viser sig senere i rapporten, at de viste kurver er et udmærket redskab til hjælp ved vurderingen af de undersøgte, eksisterende boligbyggerier, se afsnit 6.

Konklusionen på dette afsnit er imidlertid, at for skivebygninger med fastlagt materialevalg vil det være en fordel at sammenbygge boligenheder til større blokke. For sammenbyggede blokke af betonelementskiver vil det optimale antal etager, d.v.s. det antal etager, der giver det laveste materialeforbrug til de primære konstruktioner, ligge i et bredt interval mellem 2 og 11 etager.



Figur 5.4.2:

Det specifikke materialeforbrug for 8 bygningselementer sammenbygget på 5 måder. Bidraget fra bygningsbasis er vist skraveret, mens bidraget fra råhus er hvidt. Sammenlign med figur 5.4.1.

Hvis resultaterne skal overføres til en minimering af anlægsenergiforbruget, slår de afstivende konstruktioner hårdt igennem på grund af, at der hertil normalt bruges en hel stål, som er et højt forarbejdet og energiintensivt materiale.

Der er derfor grund til at tro, at optimumintervallet da rykker længere ned.

Litteratur:

[49.0] Ministry of Works:
"NEW METHODS OF HOUSING CONSTRUCTION"
National Building Studies, Special Report
Nos. 4 and 10.
England 1949.

[74.0] "ENERGIFORSKNING, BYGGSEKTORENS ENERGIANVÄNDNING"
Särtryck ur SOU 1974:74 och SOU 1974:76
Industridepartementet,
Sverige 1974.

[74.1] Erik Reitzel:
"RÅHUS OG RÅSTOFFER"
DIF-pjece nr. 8,
Danmark 1974.

[74.2] FREJA 74
Institut 3A, Kunstakademiet
Danmark 1974.

[75.0] Erik Reitzel, H.F. Mathiassen:
"ENERGI, BOLIGER, BYGGERI"
Fremad,
Danmark 1975.

[76.0] E.M. Gartner m.fl.:
"ENERGY COSTS OF HOUSE CONSTRUCTION"
BRE-Current Papers CP 47/76
England 1976.

[77.0] W. Srozynski m.fl.:
"ACCUMULATED ENERGY CONSUMPTION IN THE PRODUCTION OF CONSTRUCTION MATERIALS AND LARGE BUILDINGS"
The Tenth World Energy Conference,
Istanbul 1977.

[77.1] Søren Alrøe:
"FREMSTILLING AF STÆRKSTRØMSTEKNISKE PRODUKTER UNDER ENERGI- OG RÅSTOFKNAPHED"
Stærkstrømsafdelingen, DTH, publ. nr. 7708,
Dele af rapporten offentlig tilgængelig.
Danmark 1977.

[78.0] "BEBYGGELSESPLANENS VARMEFORBRUG"
Planstyrelsen
Danmark 1978

[78.1] Johs.F.Munch-Petersen:
"DÆK- OG VÆGELEMENTER"
Forelæsningsnotat nr. 54, 2. rev. udgave,
Instituttet for Husbygning, DTH,
Danmark 1978.

[78.2] E.N. Morris:
"HOUSING ENERGY ECONOMICS"
Building and Environment, Vol. 13,
Edinburgh, Skotland 1978

[79.0] Henrik Lawaetz, Simon Furbo:
"ENERGIFORBRUG TIL FREMSTILLING AF
SOLVARMEANLÆG"
Laboratoriet for Varmeisolering, DTH, Medd.87
Danmark 1979.

	Eenfamiliehuse	Tæt-lav	Etageblokke
Betonhuse:	H&S lavenergihus B.Udsens udstillingshus i gasbeton B.Udsens udstillingshus i KS-sten	Blåkildegård Frydenhøjparken	Grantoften Hedegården Montagebyggeriets indexhus Frederiksberg Gasværksgrund
Teglhuse:	Bikuben-lavenergihuset M.Gudiksens hus B.Udsens udstillingshus	Tinggården	Boligministeriets indexhus Charlottehøj
Stålhuse:			GEAI
Træhuse:	Nordhus Villa Lange	Flexibo	
Andre:	Hellebo typehus Ferrobetonhus Nulenergihuset LN-lavenergihus Boblehal	Skolebygning af stål	SBI-kontorhus

Tabel 6.1.1:

De analyserede byggerier rubriceret efter primært anvendte konstruktionsmaterialer og efter bebyggelsestype, (se [80.1]).

6. ENERGIFORBRUGET TIL DE PRIMÆRE KONSTRUKTIONER

De primære konstruktioner i bygningerne betegner i det følgende de bærende konstruktioner i bygningsbasen og råhuset, klimaskærmens isolering og ydre beskyttende beklædning samt de indre konstruktioners beskyttende beklædning.

Dette svarer til de konstruktionsdele, der i afsnit 3 og i appendix A1 og A2 er opført under bygningsbasis, råhusets primære dele og overflader.

De i det følgende givne resultater er alle beregnet på grundlag af ASF-værdier*.

6.1 Analyserede byggerier

Til belysning af materialeforbrug og især energiforbrug til fremstilling af boliger er der, svarende til beregningsmetoderne skitseret i afsnit 3 og 4, gennemført en dataindsamling, mængdeberegning og beregning af energiforbruget til fremstilling af materialerne og på byggepladsen, ERM + ERB** for ca. 25 eksisterende byggerier. Disse byggerier spænder over eenfamiliehuse, lavenergihuse, tæt-lav-bebyggelse, etageboligblokke og enkelte ikke-boligbyggerier.

Data og beregningsresultater, som beskrevet i afsnit 3, er dokumenteret i appendix A1 og A2, [80.1]. De undersøgte byggerier er givet i tabel 6.1.1.

En direkte sammenligning af beregningsresultaterne, som kan aflæses af appendix A1 og A2, vil give et ret uoverskueligt billede. Dette skyldes, at byggerierne adskiller sig fra hinanden på mange måder, ved materialevalg, størrelse, isoleringstykkelser, konstruktionssystem m.m.

* Aktuelt specifikt energiforbrug, se afsnit 3

** Energy requirement for materials og - on building site.

Vil man isolere enkelte af disse faktorer og bestemme deres indflydelse på anlægsenergiforbruget, må man opstille en model for en bygning, hvori man kan ændre den givne faktor, uden at det får indflydelse på andre faktorer. Dette er gennemført for konstruktionsudformningen som faktor i afsnit 7 og for isoleringstykkelser m.m. som faktorer i afsnit 9.

Her er der valgt også at tage hensyn til de aspekter, der må tilgodeses i den praktiske udformning af både indretningsmæssig og udførelsesmæssig karakter. De undersøgte byggerier har alle en vis standardkvalitet som bolig, der skulle være sikret ved, at de enten er tegnet af kendte arkitekter, eller at bygherren er en større boligforening. Der er således ingen af boligbyggerierne, der kan betegnes som spekulationsbyggeri.

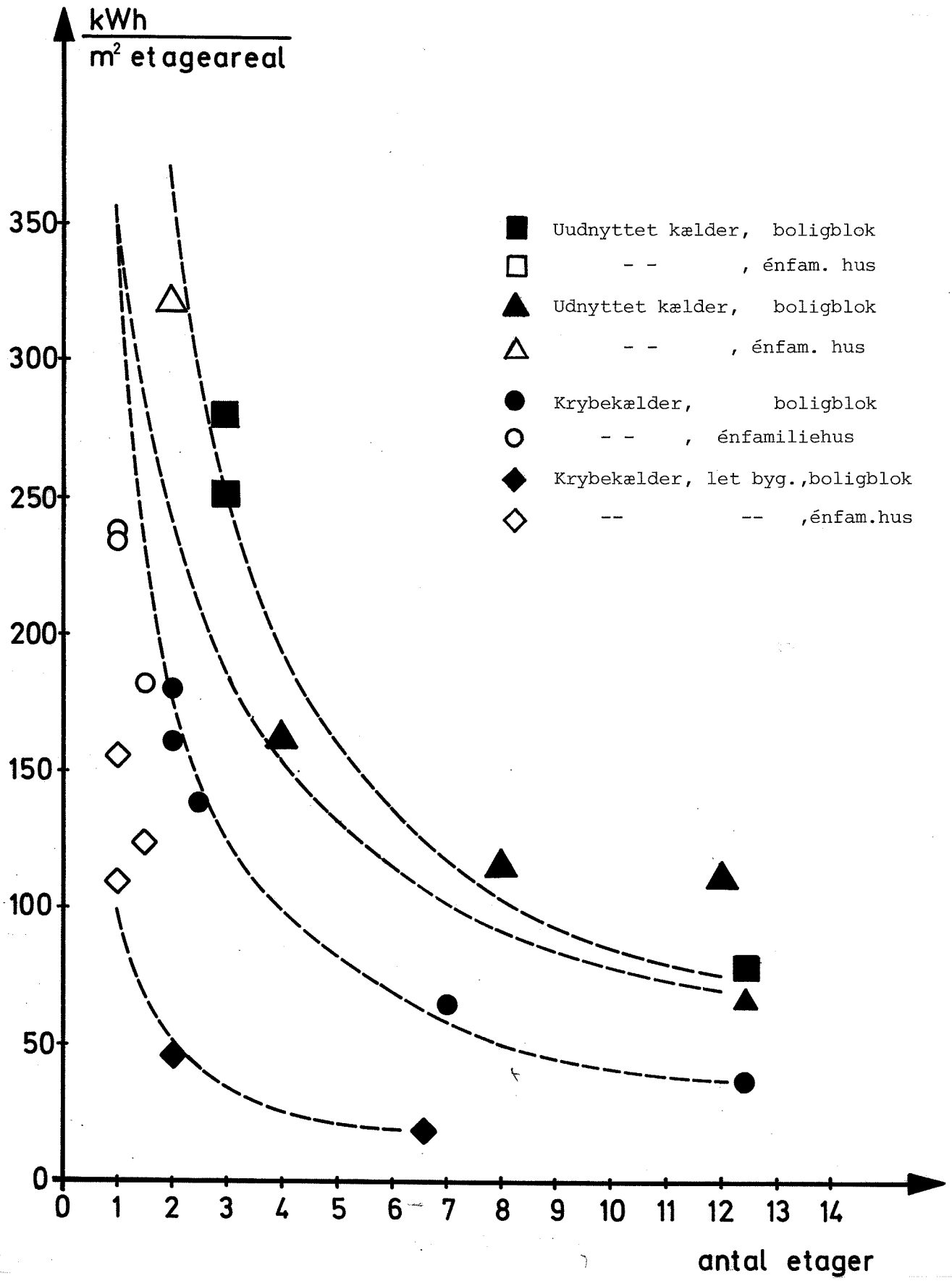
Det viser sig ved nærmere sammenligning af de beregnede anlægsenergiforbrug til de primære konstruktioner, at der er tre faktorer, der har den væsentligste indflydelse på disse anlægsenergiforbrug. Det drejer sig først og fremmest om materialevalget, dernæst om bygningsbasens udformning og endelig om byggeriets højde eller etageantal.

De sidste to parametre er, som vist i afsnit 5, knædet sammen gennem råhusets overordnede geometriske udformning. Det vil sige, at disse to parametre kan føres sammen til én, og dermed kan anlægsenergiforbruget afbildes i et almindeligt retvinklet koordinatsystem som funktion af to variable.

Sådanne afbildninger er benyttet i det følgende.

6.2 Bygningsbasis

Et tilnærmet udtryk for anlægsenergiforbruget til bygningsbasen, som defineret i afsnit 5.2, kan findes ved at addere de beregnede energiforbrug opført under Bygningsbasis fra ERM-beregningen og



Figur 6.2.1:

Anlægsenergiforbruget for bygningsbasen som funktion af etageantal og materialevalg for udvalgte, undersøgte byggerier.

og Jordarbejde fra ERB-beregningen. Dette anlægsenergiforbrug er afbildet i figur 6.2.1 som funktion af etageantallet og det primære konstruktionsmateriale.

Med kendskab, fra afsnit 5, til materialeforbruget for skivebygninger som funktion af etageantallet er der indtegnet teoretiske kurver, der sammenkæder energiforbruget og etageantal for samme materialevalg.

Det ser ud til, at denne beregningsmodel, der behandler materialeforbruget, kan overføres til også at gælde anlægsenergiforbruget for de enkelte materialegrupper, idet de beregnede anlægsenergiforbrug fordeler sig omtrent som kurverne viser, jvf. i øvrigt figur 5.2.1. Dog afviger energiforbruget for bygninger med mange etager samt 1-etagehusene fra modellen. Dette skyldes formodentlig et forøget armeringsstålforbrug i højhusenes bygningsbasis, og at fundamentsbeton i enfamiliehuse er mindre cementholdig.

Det ses, at der for bygningsbasen er væsentlige forskelle på anlægsenergiforbruget, dels naturligvis for de forskellige kældertyper, men især meget store forskelle for tungt og let byggeri.

Med tungt byggeri menes byggeri med betonetageadskillelser og beton- eller murede vægge. Med let byggeri menes byggeri med træspærfag eller gitterspær i etageadskillelser og tag samt lette træskeletvægge.

Værdierne for de to lette byggerier uden kælder er korrigeret for et meget tykt lag isolering under terrændækket.

Der er fire kategorier af bygningsbaser, der synes at skille sig ud fra hinanden:

- tungt byggeri med uudnyttet kælder
- tungt byggeri med udnyttet kælder
- tungt byggeri med krybekælder eller uden kælder
- let byggeri uden kælder eller med krybekælder.

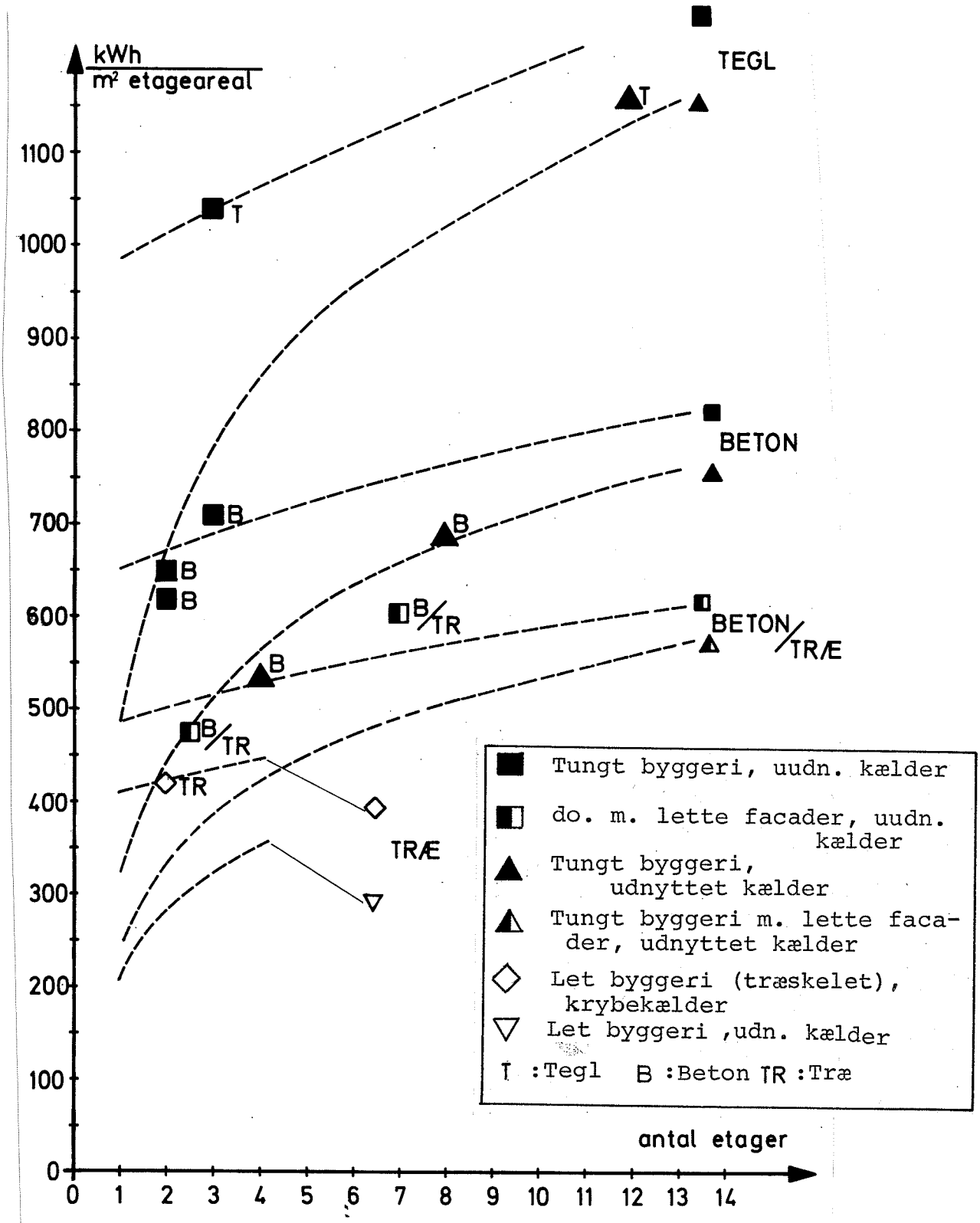
For de "kældertyper", hvor kælderarealet ikke regnes med til etageantallet, ser det ud, som om anlægsenergiforbruget fordeler sig som 6:3:1 efter ovenstående rækkefølge.

Enfamiliehusene, de lyse signaturer, kan naturligvis ikke følge modellen, idet den kun gælder for sammenbyggede huse. De skulle generelt ligge højere end de tilsvarende kurver (jvf. afsnit 5.3), hvilket også passer for de lette byggerier, men ikke for de tre tunge enfamiliehuse uden kælder. Her skal forklaringen, foruden det reducerede cementforbrug til fundamentsbetonen, søges i, at tagkonstruktionen er let (gitterspær) i forhold til de tunge etagebyggerier, hvor etageadskillelse og tagkonstruktion er en tung betonkonstruktion.

Vælges der i stedet for det sædvanlige skivesystem et ramme- eller søjle/pladesystem, kan fundamenterne ofte reduceres til punktfundamenter. Kombineret med en reduktion af de lodrette, bærende dele i kælderen resulterer dette normalt i en relativ materialebesparelse. Den tilsvarende anlægsenergibesparelse kan aflæses for et af de undersøgte byggerier, nemlig SBI's kontorhus, der for 3 etager med udnyttet fuld kælder har et anlægsenergiforbrug til bygningsbasen og jordarbejde på 104.4 kWh/m^2 mod 185 kWh/m^2 aflæst på kurverne for skivebygninger. Besparelsen skyldes hovedsagelig, at den indre bærende konstruktion i kælderen består af søjler og dragere samt punktfundamenter.

6.3 Råhusets primære dele

Råhusets primære dele omfatter i det følgende bærende vægge, søjler og etageadskillelser, tagkon-



Figur 6.3.1:

Anlægsenergiforbrug til råhusets primære dele, byggepladsoperationer, udtørring og vinterforanstaltninger for udvalgte, sammenbyggede boligenheder som funktion af etageantallet.

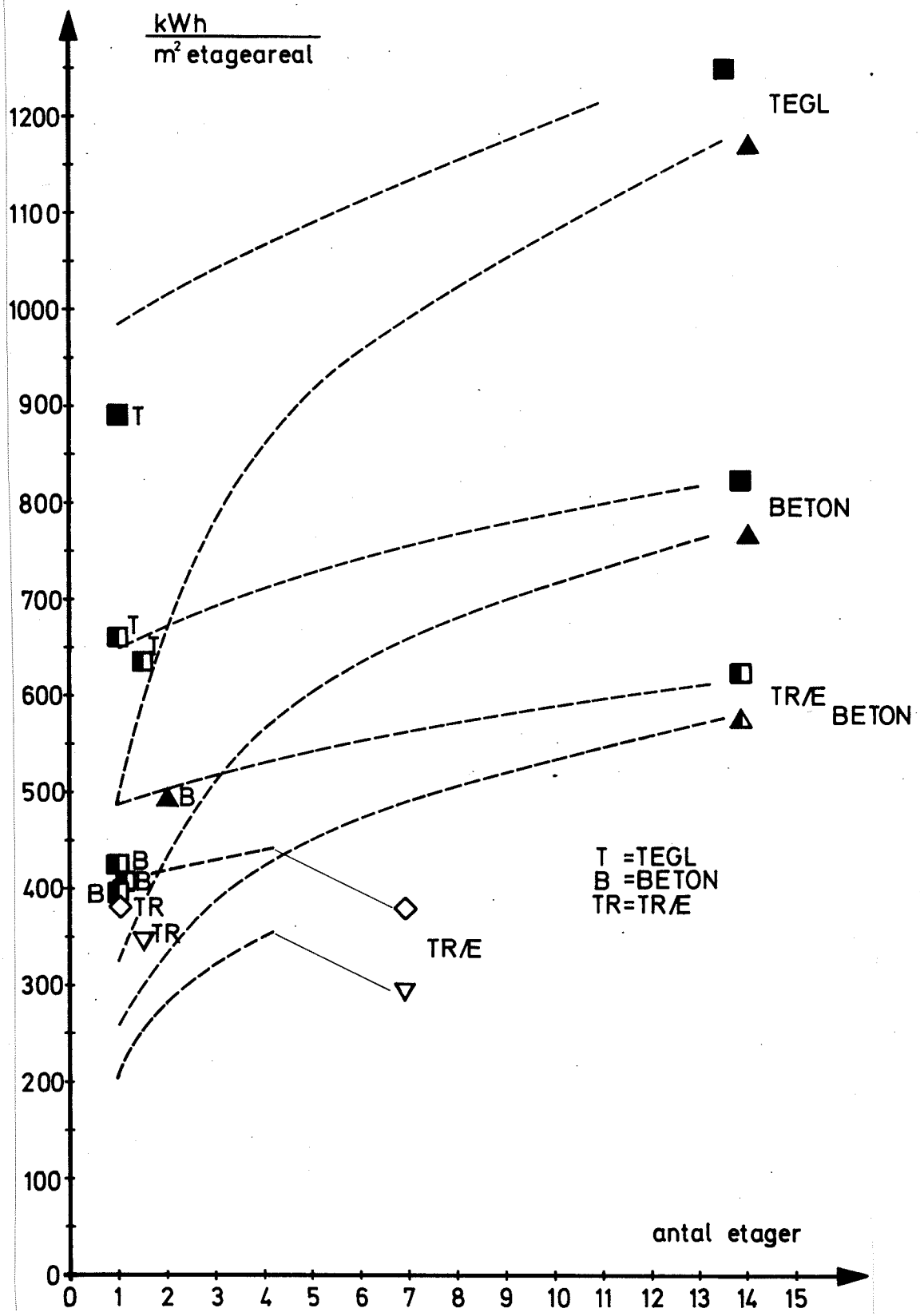
struktioner, facader og skillevægge, dog uden ydre beklædning i form af pladematerialе eller klinker (jvf. afsnit 3).

Det viser sig, at anlægsenergiforbruget for råhusets primære dele kan beskrives efter samme recept som bygningsbasens anlægsenergiforbrug.

I figur 6.3.1 er anlægsenergiforbruget til råhusets primære dele samt på byggepladsen ekskl. jordarbejde vist som funktion af etageantallet.

Som det ses af figur 6.3.1, giver beregningsmodellen fra afsnit 5 ikke helt så god overensstemmelse med de analyserede byggeriers anlægsenergiforbrug som i sidste afsnit. Det ser ud til, at anlægsenergiforbrugene fordeler sig efter stejlere hældninger, end kurverne angiver, d.v.s. at etageantallet har større indflydelse på anlægsenergiforbruget end på det teoretiske materialeforbrug. Dette kan forklares med to grunde:

1. I praksis vil man normalt ikke dimensionere væggene i hver etage for sig, men bruge den dimensionerende vægtykkelse i stueetagen også i de andre etager eller i et givet antal etager. I beregningerne af materialeforbruget er forudsat en afpasning af vægtykkelse for hver etage. Det er da nærmere kurven for t_i i figur 5.3.1, der skal benyttes til beregning af materialeforbruget i praksis.
2. Der er i beregningen af materialeforbruget ikke taget hensyn til afstivende vægge. Det må formodes, at afstivningen af bygningerne vil kræve en betydelig forøgelse især af armeringsstålforbruget for voksende etageantal. Dette har en væsentlig indflydelse på anlægsenergiforbruget ved høje bygninger.



Figur 6.3.2:

Anlægsenergiforbruget til råhusets primære dele for enfamiliehuse. Samme signaturer er gældende som i figur 6.3.1.

Ikke desto mindre giver den grove model af materialeforbruget et godt overblik over niveauet af anlægsenergiforbruget for forskellige materiale- og konstruktionsvalg.

I figur 6.3.1 er skivehusene delt ind i 3 kategorier:

I De fuldt murede huse med støbte jernbetondæk.

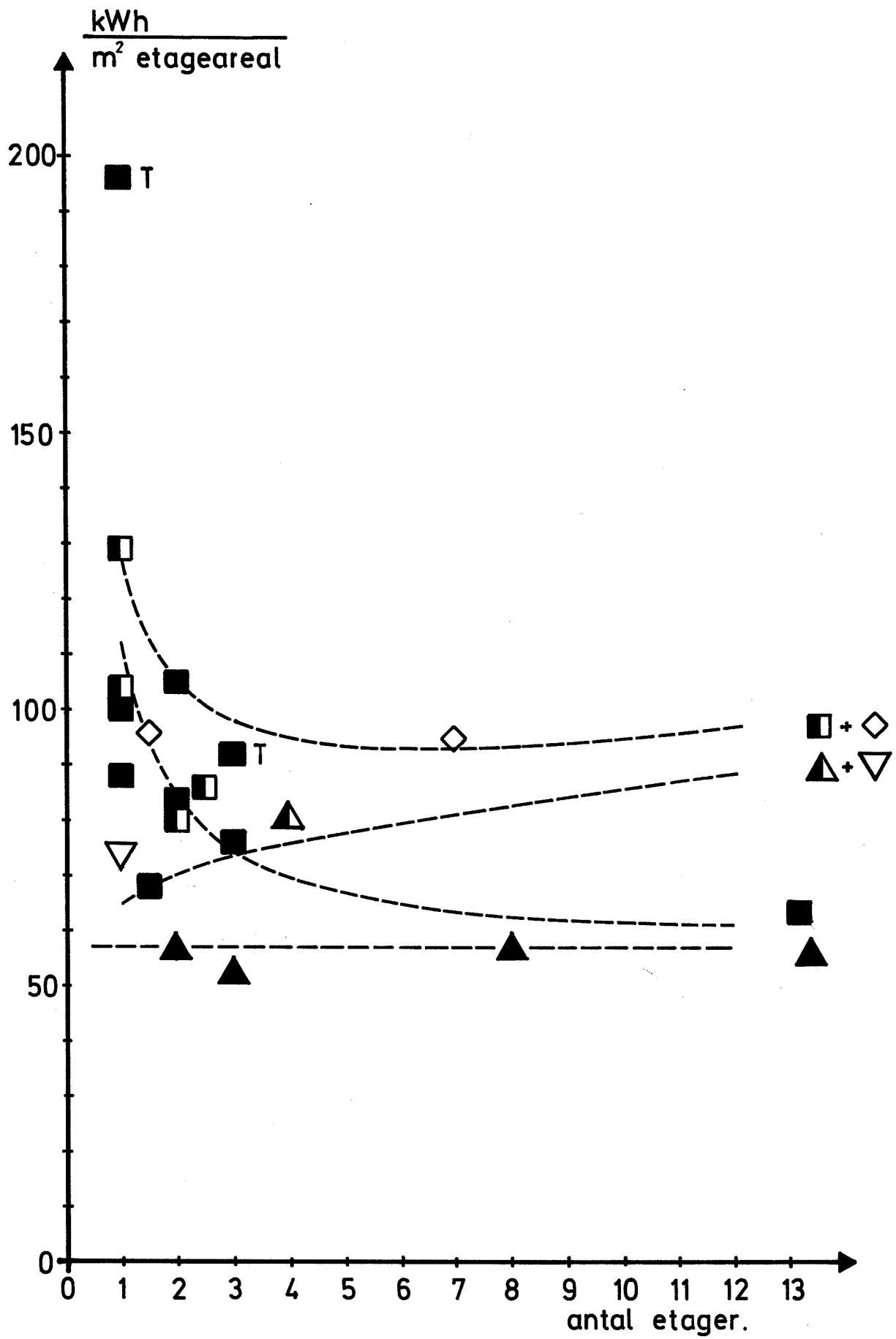
II De tunge montagebyggerier med overvejende betonsandwichfacader.

III De lettere montagebyggerier med tunge bærende betonelementer og lette træfacader og tagkonstruktioner.

Som det fremgår, er anlægsenergiforbruget til de murede huse betydeligt højere end til de tunge betonhuse, som igen har et højere anlægsenergiforbrug end de lettere montagebyggerier. Regnes de indtegnede teoretiske kurver at være repræsentative for niveauerne, forholder anlægsenergiforbruget for materialevalgene I, II og III sig som 6:4:3.

Dette gælder alt sammen for sammenbyggede boligenheder. For enfamiliehuse vil niveauerne forskydes mod lavere anlægsenergiforbrug, da der ofte kan anvendes lette tagkonstruktioner. Anlægsenergiforbruget bliver da i højere grad bestemt af, hvorledes tunge og lette konstruktioner kombineres. Som det fremgår af figur 6.3.2, øges råhusets anlægsenergiforbrug kraftigt, jo tungere husene bliver.

Da mulighederne for materialevalg for enfamiliehuse tillige er betydeligt større end for etageblokke, er der foretaget supplerende undersøgelser, hvor materialevalget er den eneste parameter, der ændres. Disse undersøgelser er beskrevet i afsnit 6.5.



Figur 6.4.1:

Anlægsenergiforbrug til beklædninger for de undersøgte byggerier.
Signaturer, se figur 6.3.1.

6.4 Beklædninger

Beklædninger betegner i det følgende tagbeklædninger, gulvbeklædninger, facadebeklædninger og indvendige vægbeklædninger, der ikke indgår direkte i den bærende konstruktion.

Der kan for de undersøgte byggerier skelnes mellem tre grupper af huse:

a. Huse, hvor beklædning af lodrette konstruktionsdele ikke er nødvendig, da disse konstruktioner består af et massivt og holdbart materiale.

   Dette gælder betonelementhuse, murede huse og letbetonhuse.

b. Huse, hvor facadekonstruktionen kræver en udvendig regnskærm af en eller anden pladebeklædning.

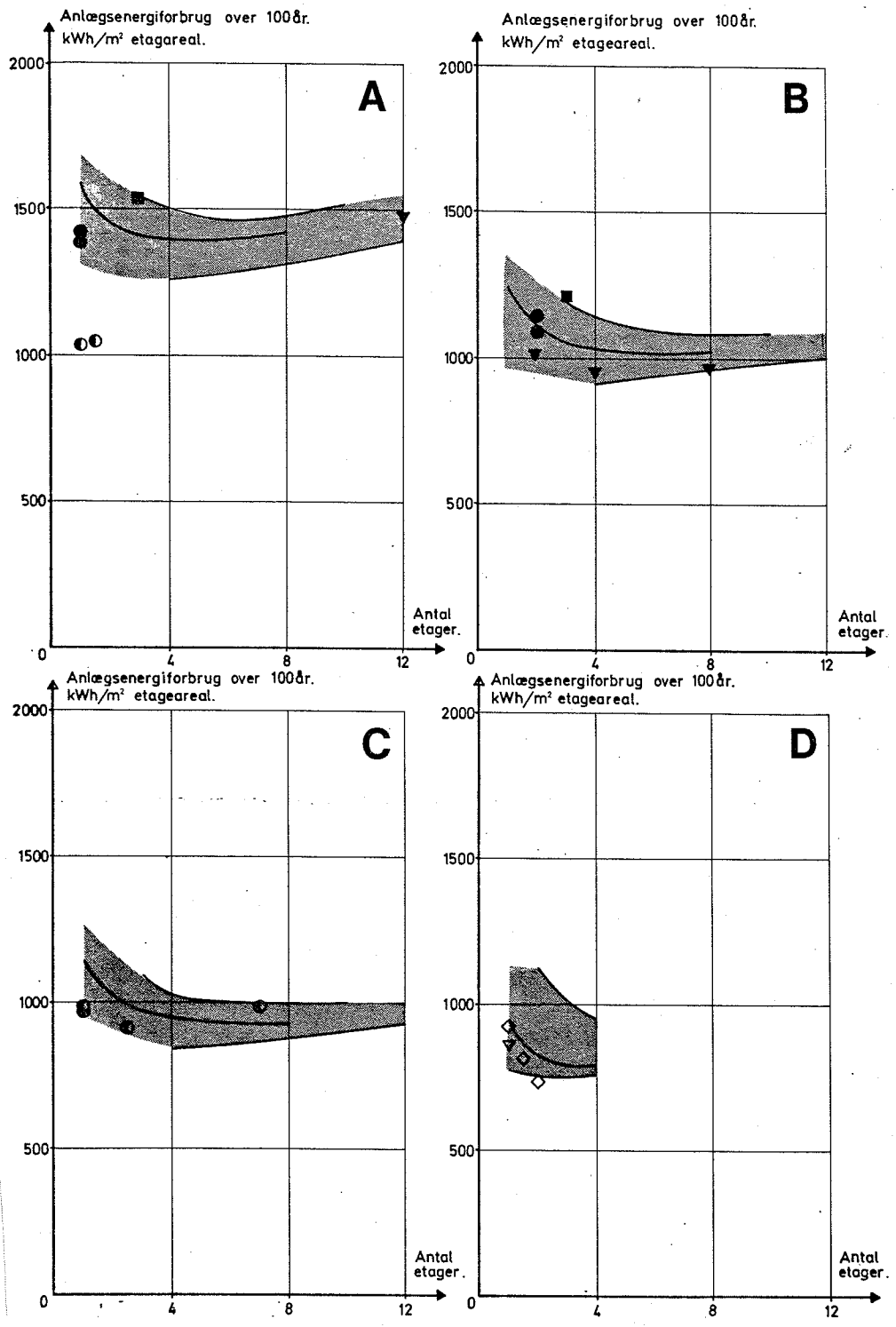
c. Huse, hvor alle de lodrette konstruktionsdele er skeletkonstruktioner, der udføres med en pladebeklædning.

For alle tre grupper er der behov for en gulv- og tagbeklædning.

For de undersøgte boligbyggerier er anlægsenergiforbruget til beklædninger givet i figur 6.4.1, idet de teoretiske kurver for de specifikke overflader fra afsnit 3 er tegnet ind.

De teoretiske kurver giver, bortset fra nogle få tilfælde, en god afgrænsning af energiforbruget til beklædninger for de to grupper. Grupperne er symboliseret ved det "tunge" byggeri (a) med udfyldte signaturer og ved det "lette" byggeri (b + c) med delvis eller ikke-udfyldte signaturer (jvf. tidligere figurer 6.2.1 og 6.3.1 og 2).

Anlægsenergiforbruget for to byggerier (signatur T) skiller sig væsentligt ud fra de andre ved en betydelig højere værdi. Det skyldes, at der i tagdæknin-



Materialevalg:

A: Teglmurværk + jernbeton eller tømmer

B: Betonelementbyggeri med betonfacader

C: Beton i bærende vægge og dæk samt lette facader

D: Lette trækonstruktioner, evt. afstivet af betonvægge

Figur 6.5.1:

Anlægsenergiforbrug til primære konstruktioner baseret på teoretiske kurver og de undersøgte byggerier - som funktion af materialevalg og etageantal.
Signaturer, se figur 6.3.1.

gen er anvendt teglsten. I alle de andre byggerier er der ikke anvendt teglsten som tagdækning, men enten asbestcementplader, betontagsten eller tagpap.

Da teglsten, som det er nævnt tidligere i rapporten, kan forventes at have en noget længere levetid end de andre tagdækningsmaterialer, må der tages højde herfor i en samlet vurdering, som det f.eks. er gjort i afsnit 6.5.

6.5 Totalt forbrug over boligens levetid

Ved sammenligning af anlægsenergiforbrug til de primære konstruktioner kan de beskrevne bidrag ikke tillægges samme levetid.

Som det er nævnt i afsnit 1.3 hører de førstnævnte bygningsdele, bygningsbasen og råhusets primære dele, til de bygningsknyttede dele, hvorimod beklædninger hører til de funktionsknyttede dele.

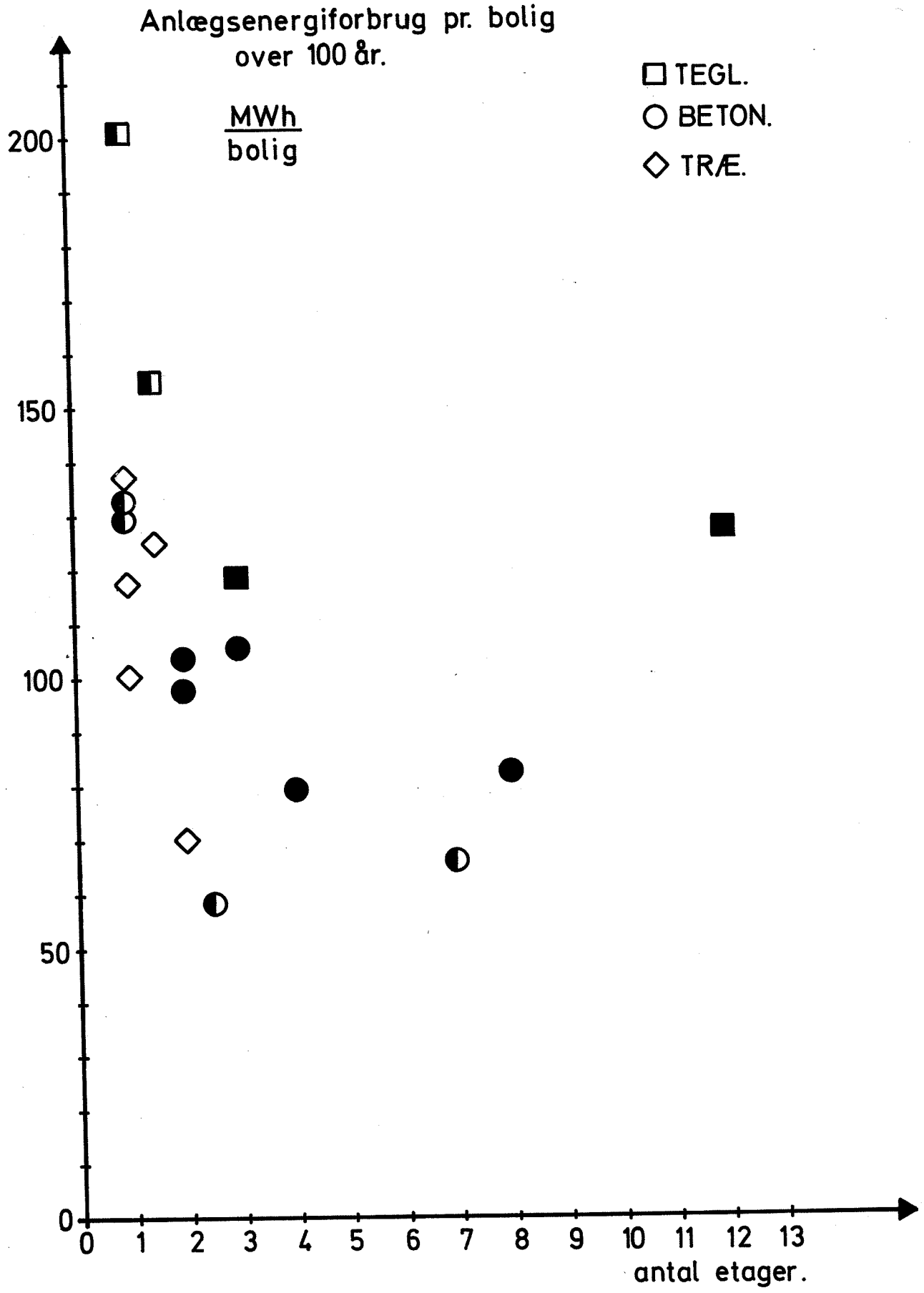
I afsnit 1.3 anbefales det at regne levetiden af bygningsknyttede dele til 100 år og af funktionsknyttede dele til 20-30 år, med visse undtagelser for teglbeklædninger.

Hvis de indtegnede tilnærmede teoretiske kurver i figur 6.2.1, 6.3.1, 6.3.2 og 6.4.1 betragtes som repræsentative, kan det totale anlægsenergiforbrug for de primære konstruktioner over 100 år summeres til de i figur 6.5.1 viste kurver.

Der er valgt følgende levetider:

Bygningsbasis	100 år
Råhusets primære dele	100 år
Beklædninger	30 år, dog
Tegltagsten	60 år

På baggrund af den benyttede normalisering, d.v.s. at anlægsenergiforbruget angives pr.m^2 bruttoetageareal, skiller de forskellige materialevalg sig tydeligt ud fra hinanden.



Figur 6.5.2:

Anlægsenergiforbruget til primære konstruktioner for de undersøgte byggerier som funktion af etageantal og materialevalg. Opgjort pr.bolig. Signaturer, se figur 6.3.1.

Niveauerne for anlægsenergiforbruget ligger således fra ~1400 kWh/m^2 over 100 år for tunge teglhuse helt ned til ~800 kWh/m^2 over 100 år for lette træhuse.

I praksis vil der være en tendens til, at man ved forskellige bygningshøjder (etageantal) vil vælge bestemte af de tidligere nævnte kældertyper. Ved meget høje bygninger vil man ofte føre kælderen over jord, mens man ved lave bygninger oftest vælger krybekælderen eller rendefundamentet og i nogen grad den uudnyttede kælder. I figur 6.5.1 er der taget hensyn hertil ved afgrænsningen af de typiske anlægsenergiforbrugsniveauer for materialevalgene.

Som tidligere nævnt giver etagearealet i en vis henseende et forvrænget billede af boligens værdi eller størrelse. Til dette er der fire generelle kommentarer.

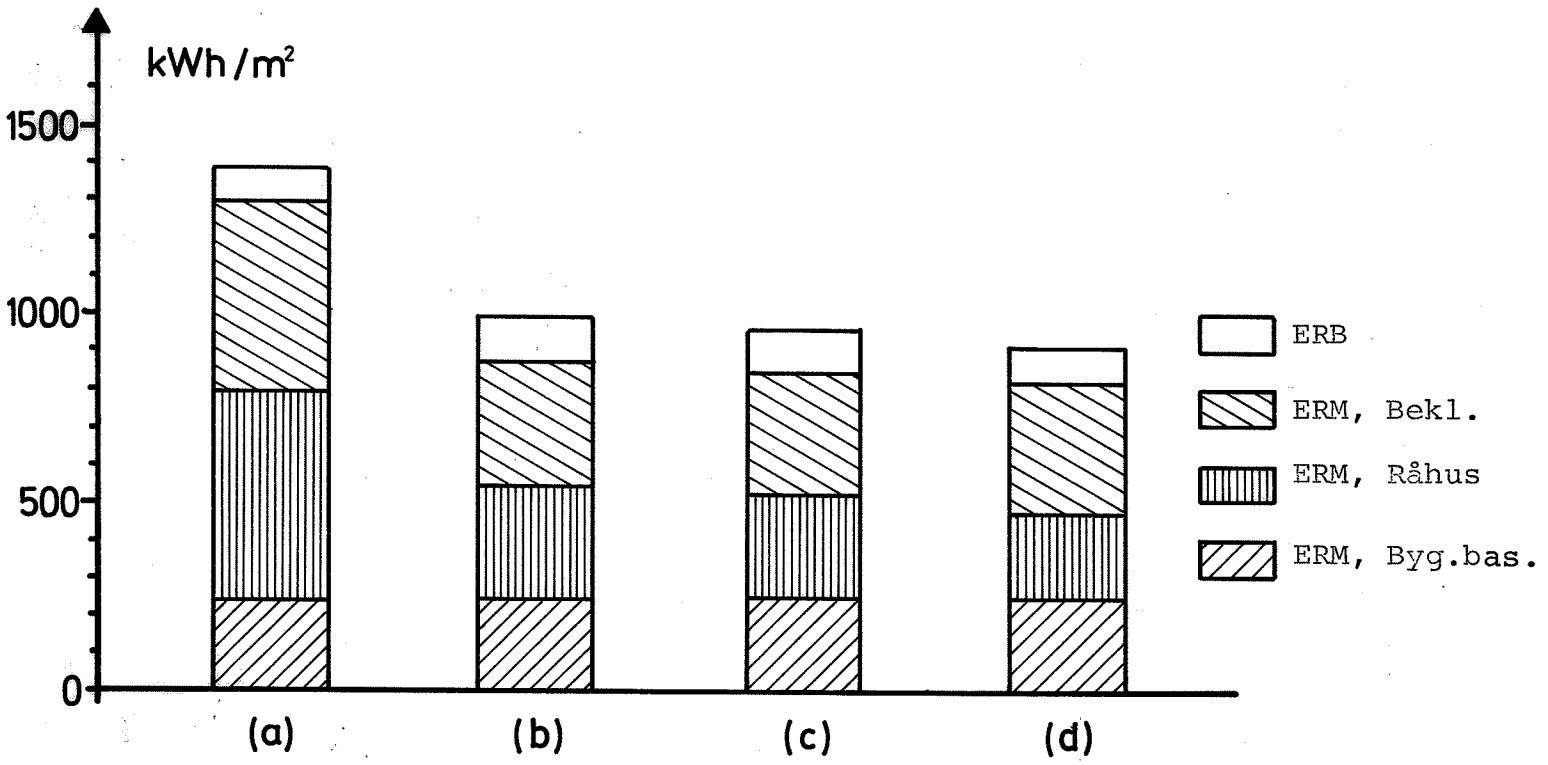
a) Forskellen mellem ydre og indre gulvareal af boligen (forskellen er vægtykkelsen) bliver relativt mindre, jo større bygningen bliver.

b) Etagehøjden i lavt byggeri og etagebyggeri er ikke ens.

c) Adgangsarealets del af bygningens gulvareal bliver større og større, jo højere bygningen bliver, alt andet lige. Dette skyldes krav om elevatorer, brandtrapper og andre flugtveje.

d) Det er almindeligt accepteret, at lejlighedsarealer er betydeligt mindre end arealet af et enfamiliehus, som skal betjene samme familiestørrelse.

Punkt a, b og c opvejer til dels hinanden i en sammenligning mellem højt og lavt byggeri. Med en ydervægstykkelse på 30 cm og en tykkelse af loftskonstruktionen på 40 cm vil forholdet mellem ydre og indre bygningsvolumen for et 110 m^2 enfamiliehus med fladt tag være 1.32, mens det for en 8 etagers boligblok vil være 1.08. Trækkes adgangsarealets volumen fra i den sidste bygning (inkl. kælder under



Figur 6.6.1:

Sammenligning af anlægsenergiforbrug til de primære konstruktioner over 100 år for alternative materialevalg i et enfamiliehus.

*) Beregningerne for dette hus må tillægges større usikkerhed end de andre på grund af usikkerheden ved bestemmelse af ASF for skiferstenen, se [79.0], afsnit 3.3.

bygningen) fås et forhold på 1.33, altså meget tæt på forholdet for enfamiliehuset.

Det er derfor hovedsagelig den sidstnævnte virkning, der ændrer billedet i sammenligningen, når anlægsenergiforbruget gøres op pr.bolig.

I det omfang, det er acceptabelt at sammenligne på dette niveau, uanset boligtype, kan figur 6.5.2 illustrere sammenhængene.

Som ventet bliver lave bygninger nu forholdsvis mere energikrævende, mens høje bygninger kræver mindre anlægsenergi.

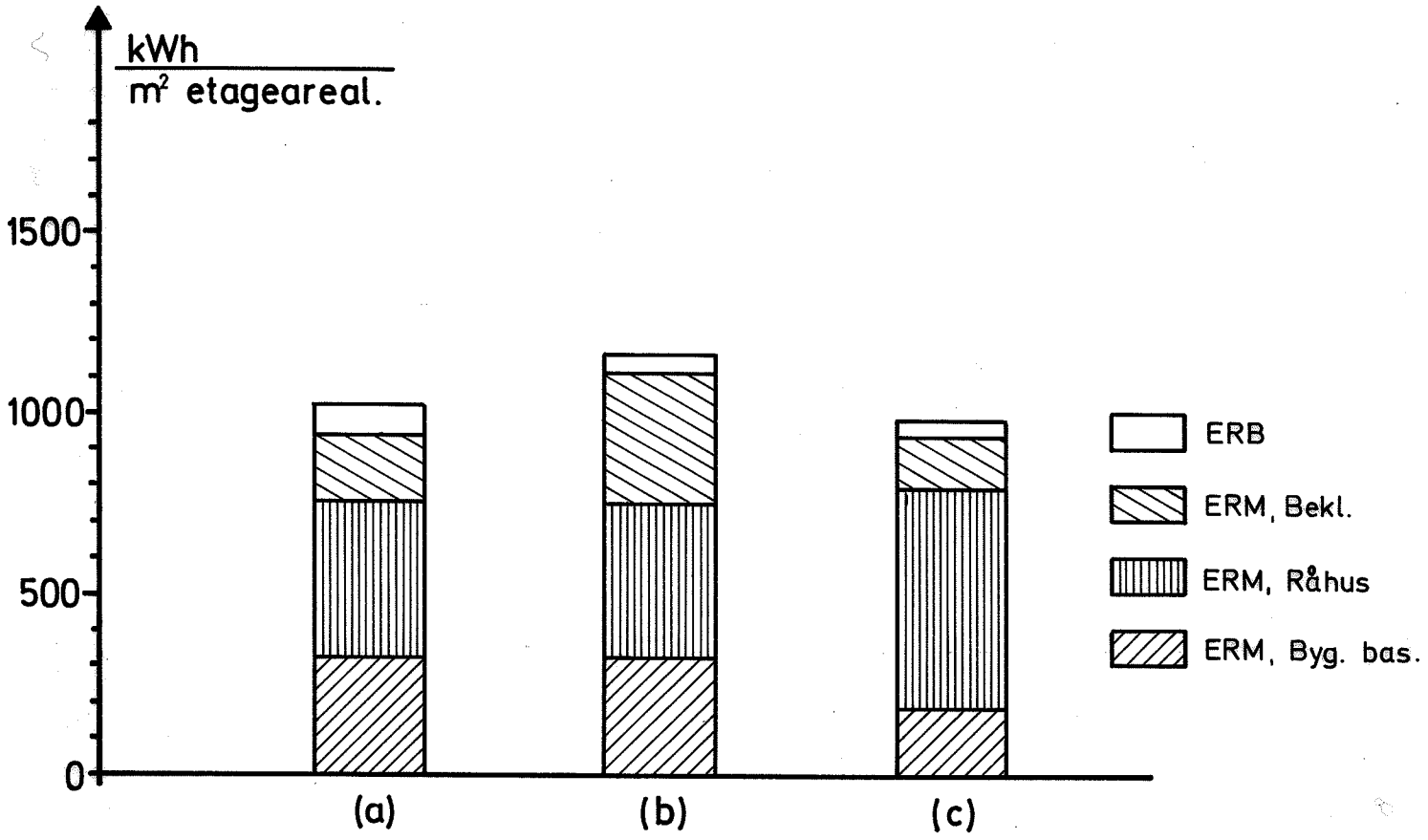
To enfamiliehuse er udeladt, idet de begge har et unormalt stort etageareal, således at de begge har et anlægsenergiforbrug over 250 MWh/bolig.

6.6 Materialevalget til enfamiliehuse

For at belyse materialevalgets indflydelse på anlægsenergiforbruget er tre af de analyserede enfamiliehuse benyttet som modelhuse. Disse modelhuse er derefter tænkt bygget med alternative byggematerialer i de primære konstruktioner.

Det første modelhus er Bertel Udsens udstillingshus, som er udført med teglmure, træspær og tagdækning af tegltagsten på asbestcementunderlag. Anlægsenergiforbruget er derefter beregnet på samme måde som i afsnit 6.5 for tre alternative materialevalg, nemlig kalksandstensmurværk plus tagdækning af betontagsten på armeret plastfolie, (b), porebetonblokmurværk plus betontagsten på armeret plastfolie, (c), og endelig murværk af tilhuggede skifersten plus tagdækning af skivershingels på brædde-underlag, (d).
Sammenligningen er givet ved figur 6.6.1

Det andet modelhus er det, der kaldes "H&S betontypehus", som er et betonelementhus i 2 etager med fladt built-up tag og udnyttet kælder. Dette model-



Figur 6.6.2:

Sammenligning af anlægsenergiforbruget over 100 år til de primære konstruktioner.

a) Eenfamiliehus i to etager med udnyttet kælder, 251 m^2, af betonelementer i vægge og dæk, se appendix A-1 [80.1].

b) Som (a), men betonelementer i vægge og dæk over terræn udskiftet med skiver og plader af korrugerede stålplader, som beskrevet i [80.0]. (Dæk 120 mm og vægge 100 mm). Facaderne er udvendigt beklædt med en internitplade, lister og en afsluttende korrugeret facadestålplade (35 mm).
Elementerne er samlet med vinkeljern, og samlingerne er opskummet med DU-skum.

c) Eenfamiliehus i 2 etager med krybekælder, 200 m^2, af ferrocementelementer i vægge og dæk. I facade og tag er elementerne forsynet med opskummet celleplast. Se appendix A-1, [80.1].

hus er sammenlignet med det samme hus bygget af skiver og plader af korrugerede stålplader, (b), samt med et lignende hus i 10 etager med krybekælder bygget af ferrocementelementer. (Michael Freddie, arkitekt). (c).

Resultatet er vist i figur 6.6.2.

Endelig tager den tredje sammenligning udgangspunkt i Max Gudiksens teglhus. Dette hus består af bærende teglmurværk og en tagkonstruktion af cylinderskaller muret af teglsten. Huset er i ét plan direkte på jord. Som alternativ til murværk og teglsten er undersøgt stampede jordvægge, soltørrede teglsten og geobetonsten.

Hvis disse huse skulle opføres med enkle mekaniske hjælpemidler, som beskrevet i [50.0] og [41.0], kan anlægsforbrugene beregnes til de i figur 6.6.3 viste værdier.

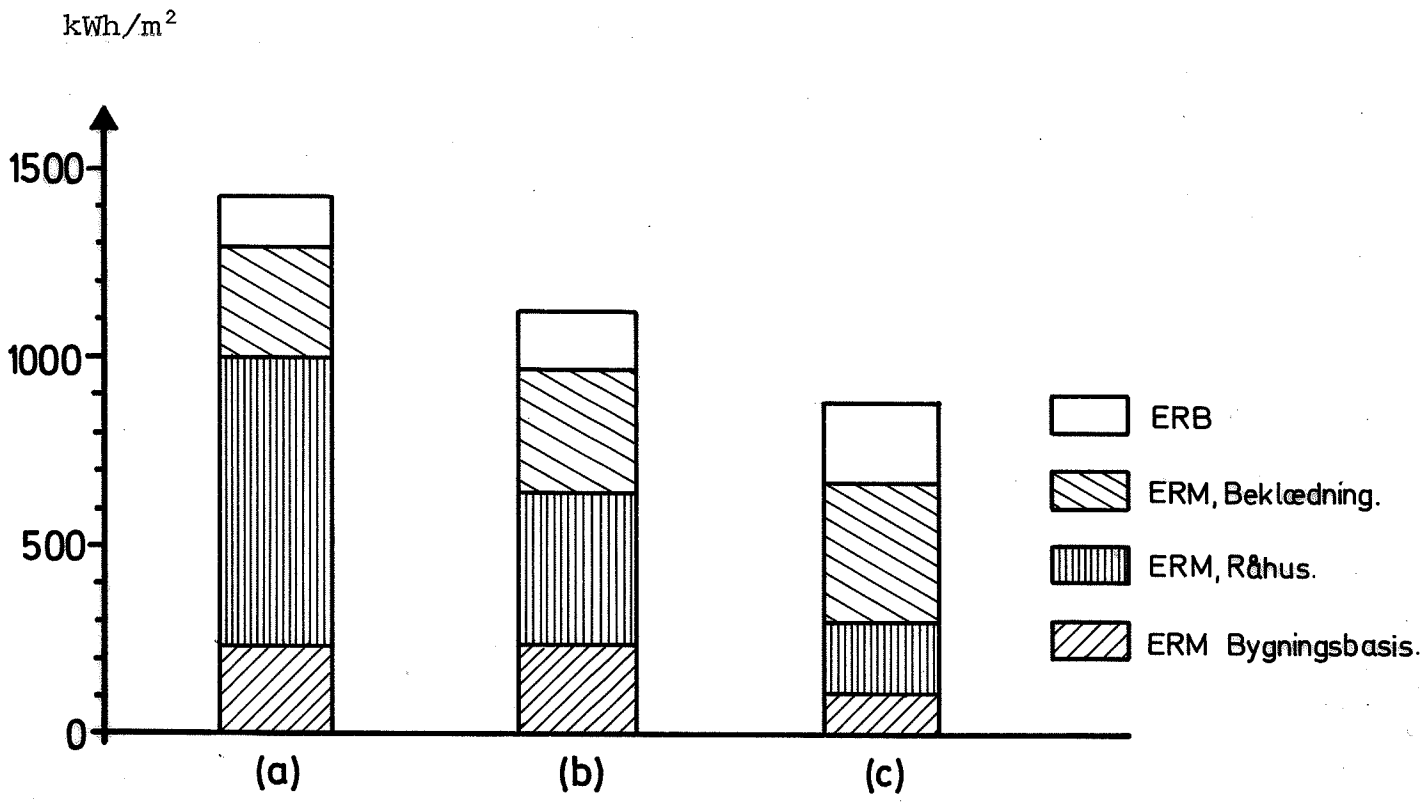
Materialeenergiforbruget er beregnet på grundlag af beskrivelser i [50.0] samt [41.0].

En jordcementsten vil da få et specifikt energiforbrug (ASF) på 0.335 kWh/kg, rumvægten vil være som for teglsten, og man kan forvente trækstyrker for stenene på over 7 MPa.

Ud fra oplysningerne i [79.0] om energiforbruget ved fremstilling af teglsten kan soltørrede teglsten tillægges et energiforbrug på 100 kWh/ton.

Af de tre sammenligninger kan der konkluderes:

1. En kraftig reduktion af bygningsmassen (figur 6.6.2) i forhold til betonbygninger vil ikke give nævneværdige besparelser i anlægsenergiforbruget, når der vælges konstruktioner, hvor stål udgør en væsentlig del af konstruktionen. Bygningsmassen er i de nævnte bygninger reduceret fra 1500 kg/m^2 etageareal til 500-600 kg/m^2 etageareal.



Figur 6.6.3:

Sammenligning af anlægsenergiforbrug over 100 år til primære konstruktioner.

a) Muret teglhus med teglskaller beklædt med asfaltpap.

b) Som a), dog de murede vægge udført med jordbetonsten, cementindhold 120 kg/ton, og pudset.

c) Som a), dog fundamenter af geobeton, vægge af stampet jord - udvendig isoleret og pudset (armeret puds). Skaller muret af soltørrede lersten og pudset indvendigt.

2. Bygninger med stort forbrug af teglsten i konstruktionerne har et væsentligt større anlægsenergiforbrug til de primære konstruktioner end andre traditionelle materialevalg, selv når der tages hensyn til levetid af beklædninger.

3. Anvendelsen af materialer med lav forarbejdningsgrad (se figur 6.6.1 (d) og figur 6.6.3 (b + c) vil, når samme boligstandard forudsættes og normal byggeskik, byggetidspunkt og materiel benyttes, give væsentlige besparelser i anlægsenergiforbrug i forhold til teglkonstruktioner. Besparelserne er dog marginale i forhold til letbeton- eller tømmerkonstruktioner. Energiforbruget på byggepladsen øges kraftigt.

De under punkt 3 nævnte alternativer må alt andet lige formodes at kræve mere arbejdskraft sammenligmed traditionelle huse. Dette er ikke eftervist for en rationel produktion, men erfaringerne samlet i [50.0] tyder på, at mandtimeforbruget for huse af stampet jord vil være af størrelsesordenen 5-15 mh højere pr.m^2 etageareal end i traditionelt byggeri. Af de beregninger, der er gjort i [80.2] kan det ses, at det svarer til et forøget serviceenergiforbrug på 10-30 kWh/m^2.

En endnu mere betydningsfuld faktor er imidlertid, at det ikke er eftervist, om så tykke, massive konstruktioner, der kræves i disse huse, kan udføres, så isoleringsevnen af klimaskærmen er så god som i lette konstruktioner. Kun et omfattende udviklingsarbejde vil kunne afgøre, om dette er tilfældet, og hvilke ekstraforbrug af isoleringsmaterialer det eventuelt vil kræve.

Der skal derfor ikke gås nærmere ind på dette punkt her. Det kan imidlertid forudses, at de nævnte alternative konstruktioner vil have betydelig større energibesparende virkning, også total set, i U-lande, hvor driftsenergiforbruget spiller en meget mindre rolle, og arbejdskraften er rigelig.

Litteratur

[80.2] Sigurd Andersen:
"ENERGIFORBRUGET PÅ BYGGEPLADSEN"
Rapport nr. 135, Instituttet for Husbygning, Danmark 1980.

[41.0] W.C. McNown:
"SOIL-CEMENT BLOCKS FOR WALLS OF UNIVERSITY RESEARCH LABORATORY"
Engineering News-Record, December 4, p.90-91, U.S.A. 1941.

[50.0] Carl-Olov Lindberg, K.G. Molin:
"JORDHUSBYGGE"
Förlagsaktiebolaget Hem i Sverige
Sverige 1950.

[79.0] Sigurd Andersen:
"DET AKKUMULEREDE ENERGIFORBRUG TIL FREMSTILLING AF BYGGEMATERIALER"
Rapport nr. 134, Instituttet for Husbygning
Danmark 1979.

[80.0] Flemming Frank:
"LYD- OG BRANDTEKNISKE UNDERSØGELSER AF LET DÆKKONSTRUKTION AF STÅL"
Eksamensprojekt ved Instituttet for Husbygning, DTH,
Danmark 1980.

[80.1] Appendix A1 og A2 til
Rapport nr. 137 "DET AKKUMULEREDE ENERGIFORBRUG TIL FREMSTILLING AF BOLIGER"
(findes på biblioteket ved Instituttet for Husbygning, DTH)

7. MINIMERING AF RÅHUSETS PRIMÆRE KONSTRUKTION

Ovenstående overskrift betegner et meget omfattende emne inden for ingeniørvidenskaben, som det er umuligt at sammendrage blot nogenlunde kortfattet.

Som det fremgår af det tidligere, har emnet stor betydning for anlægsenergiforbruget, eftersom en ret væsentlig del af anlægsenergiforbruget skyldes de primære konstruktioner i boligen.

7.1 Modelberegning

Der er derfor valgt at afprøve en enkelt tese, gående ud på en formodet besparelse i anlægsenergiforbrug.

Denne tese er opstillet ud fra tidligere undersøgelsers resultater. I [75.0] gennemføres en analyse af forskellige råhuskonstruktioners materialeforbrug. Der konkluderes, at søjle-pladekonstruktioner er fordelagtige i denne forbindelse.

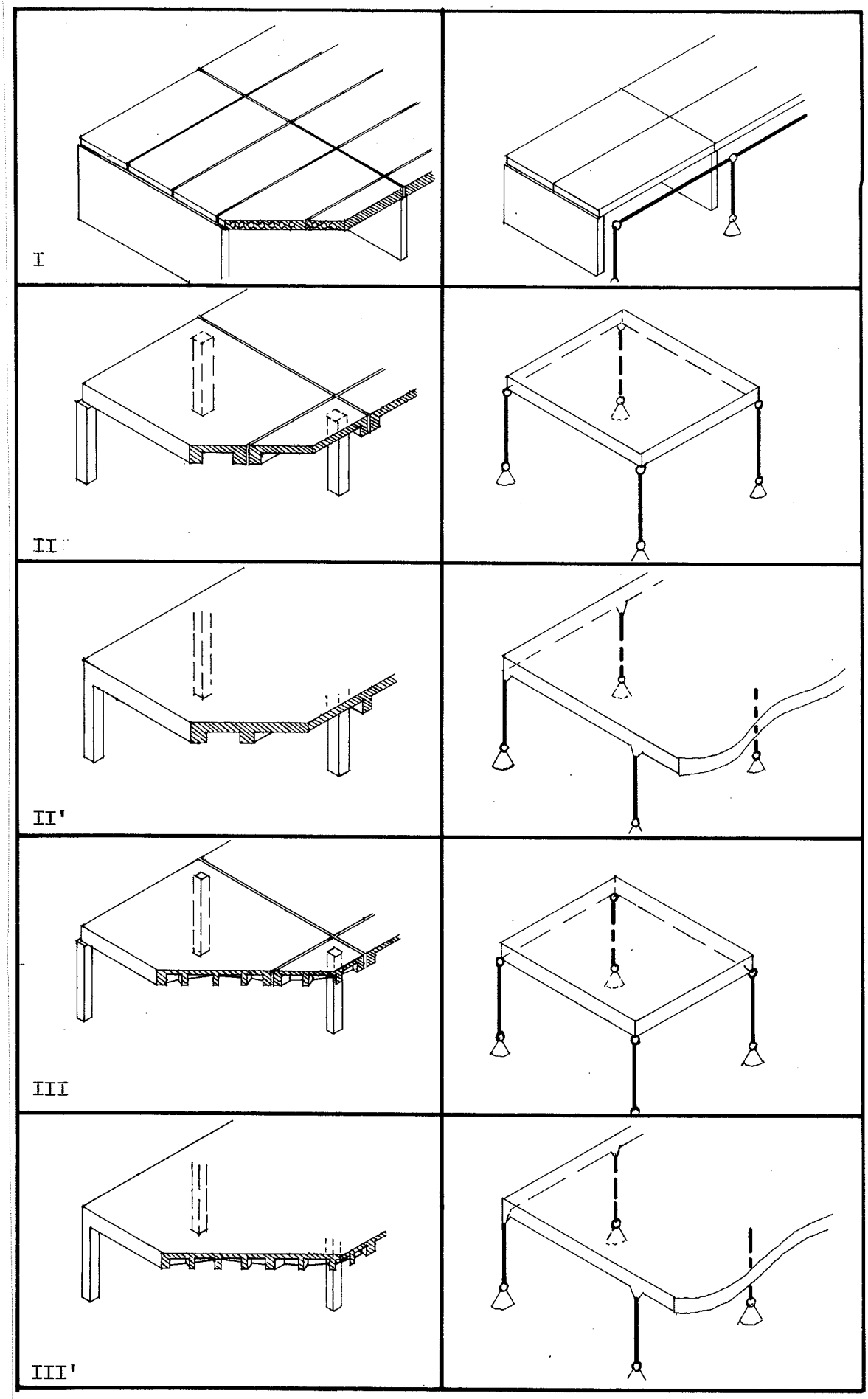
Med hensyn til isostatdækkene påpeges det i [76.0], at hvis man ønsker materialebesparende konstruktioner inden for det præfabrikerede byggeri, vil man med fordel kunne tage udgangspunkt i isostatdæk.

"Rimeligt udført vil sådanne løsninger ofte give anledning til gode materialebesparelser. Årsagen hertil er, at materialerne placeres på de steder og efter de retninger, hvor kræfterne er størst", skrives der i en senere uddybning [79.0] om isostatdæk.

Tesen er:

- Der kan gennem anvendelse af en kombination af søjler, isostatribbedæk* og koncentrerede, afstivende skivekonstruktioner opnås relative besparelser i anlægsenergiforbrug i fleretagers betonbygninger.

* Isostatribbedæk er dækkonstruktioner, hvis ribber er lagt således, at de følger hovedmomenttrajektorierne for jævnt fordelt belastning.



Referencesystem:

Standardbetonelementer, bærende tværvægge.

Præfab. pladeelementer m. kantribber på pendulsøjler af beton.

Pladefelter af massiv jernbeton med kantbjælker støbt sammen med søjlerne.

Præfab. krydsribbepladeelementer på pendulsøjler. Ribber orienteret efter isostaterne.

Krydsribbedæk støbt sammen med søjler, insitu alt sammen. Ribber orienteret efter isostaterne.

Figur 7.1.1:

Referencemodel og alternative konstruktioner undersøgt i [80.0].

Eftervisningen af tesen er dokumenteret i rapporten "Isostatdæk", [80.0]. Eftervisningen er gennemført for en seksetagers modelbygning, hvor facade, tagdækning, indre, ikke-bærende skillevægge samt gulvbeklædning er ens for alle undersøgte alternative bærende konstruktioner. Alle væsentlige funktionskrav er forsøgt tilgodeset.

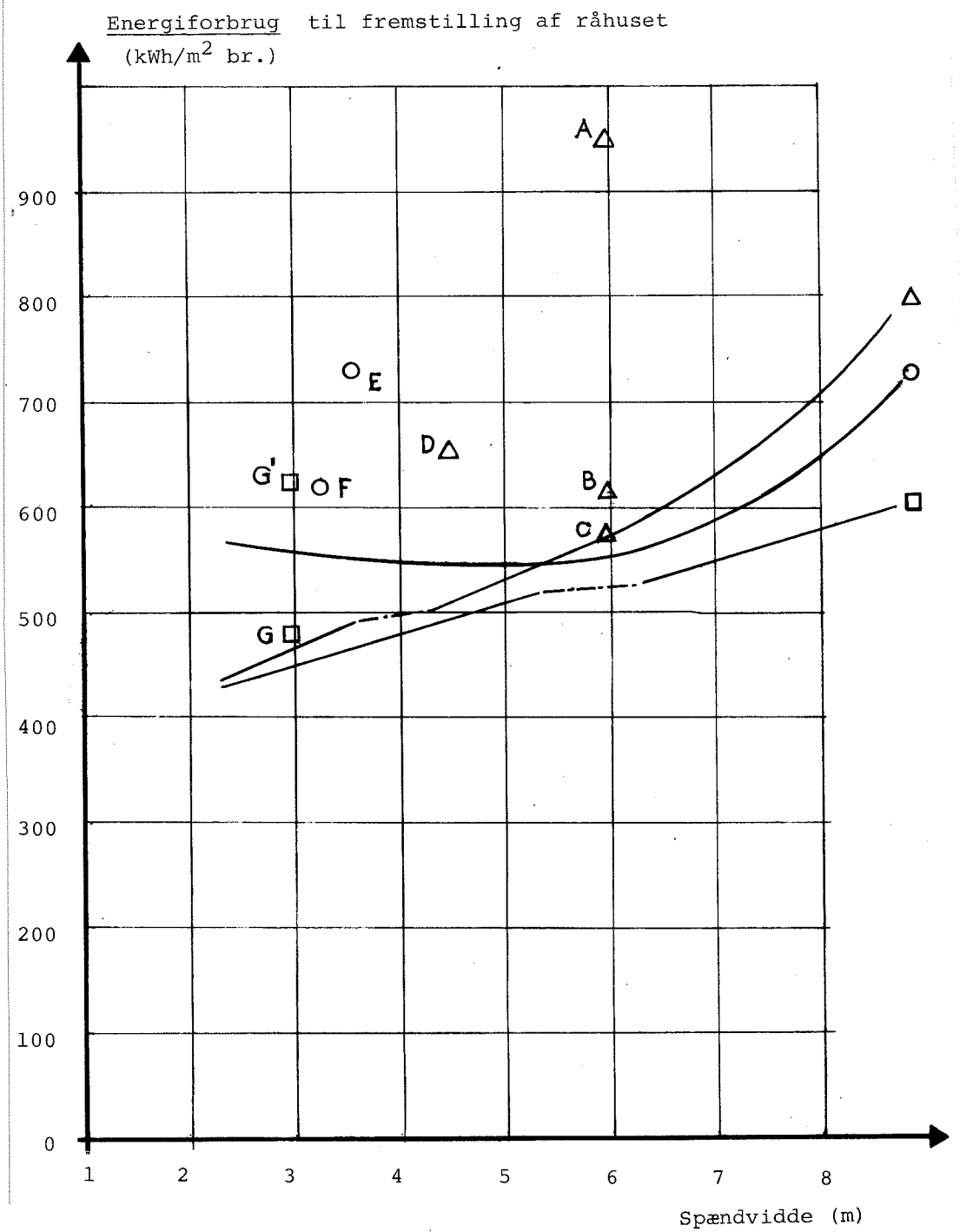
Forudsætningerne for beregning af anlægsenergiforbruget er de samme som i afsnit 6, dog er der ikke korrigeret for levetiden af beklædninger, men anlægsenergiforbruget betegner da energiforbruget ved indflytning i boligen. Dette er rimeligt, idet beklædning og andre ikke-bærende konstruktionsdele er ens for alle undersøgte alternativer.

De undersøgte statiske systemer er vist i figur 7.1.1.

Den givne bygningsstørrelse blev valgt ud fra teorierne om optimale bygningsformer med hensyn til lavt driftsforbrug og anlægsenergiforbrug, som er gennemgået i [78.0] og afsnit 5 og 6. Materialevalget, jernbeton + lette facader, er en naturlig følge af resultaterne i afsnit 6.5.

7.2 Besparelser

Undersøgelserne i [80.0], hvor også spændvidden af dækkonstruktionerne indgik som parametre, viste, at den omstående tese kan bekræftes. Besparelsen i anlægsenergiforbrug kan i praksis forventes at være mærkbar (20-25% ved små spændvidder (3-4 m) i forhold til et normalt betonelementskivesystem. Besparelsen vil da først og fremmest skyldes anvendelsen af søjler i stedet for skiver og kun sekundært anvendelsen af isostatribbedæk. Marginalbesparelsen ved at benytte isostatribbedæk i stedet for massive dæk med kantbjælker er så lille, at den vil opvejes af et merenergiforbrug i driftsperioden på grund af reduceret varmeakkumuleringsevne i de bærende konstruktioner.



Figur 7.2.1:

Anlægsenergiforbrug for betonmodelbygning i 6 etager med forskellige bærende systemer som funktion af dækkonstruktionernes spændvidde, [80.0]. (jvf. figur 7.1.1)

○ Råhussystem I
△ Råhussystem II
□ Råhussystem III

A : Skolebyggeri af stål og beton
B : Kontorhus af jernbeton søjler/bjælker/plader.
C: Søjlepladebygning, insitubeton
D: Rumgittersystem af stål
E: Hedegården (se tabel 6.1.1.)
F: Grantoften (-- --)
G og G' : se [80.0].

Som det kunne forventes er der dog betragtelige besparelser at hente ved en isostatløsning, hvis spændvidden af dækkonstruktionerne af en eller anden grund skal være over 8-10 m.

Det er generelt fordelagtigt at vælge små spændvidder ved søjlesystemerne, se figur 7.2.1.

Det viste sig desuden, at der ikke er afgørende forskel i anlægsenergiforbrug for præfabrikerede og in-situ-støbte jernbetonkonstruktioner for samme konstruktionssystem.

Sammenfattende kan der for etageboliger konkluderes, at der i praksis kan forventes 10-20% besparelser i anlægsenergiforbrug ved at vælge det optimale af de undersøgte bærende systemer:

> Jernbetonsøjler + massive, isostatarmerede jernbetondæk med kantbjælker med spændvidder omkring 3 m, systemet afstivet i vandret retning af centralt placerede jernbetonskiver ved trappegange,

i forhold til det mest udbredte betonelementsystem i Danmark.

Litteratur:

[75.0] B.A.Haseltine:
"COMPARISON OF ENERGY REQUIREMENTS FOR BUILDING MATERIALS AND STRUCTURES"
The Structural Engineer vol 53 no 9
England 1975

[76.0] Erik Reitzel:
"BETONKONSTRUKTIONER OG RÅSTOFØKONOMI"
Dansk Betondag 1976
Danmark 1976.

[78.0] "BEBYGGELSESPLANENS VARMEFORBRUG"
Planstyrelsen
Danmark 1978.

[79.0] Erik Reitzel:
"FRA BRUD TIL FORM",
p. 185-187,
Polyteknisk Forlag,
Danmark 1979.

[80.0] Sigurd Andersen:
"ISOSTATPLADER"
Rapport nr. 136, Instituttet for Husbygning,
Danmark 1978.

8. ANLÆGSENERGIFORBRUG TIL DE SEKUNDÆRE KONSTRUKTIONER

Dette afsnit omhandler de bygningsdele, som er stort set uafhængige af konstruktions- og materialevalg og af valg af bærende system.

Det drejer sig om de bygningsdele, der i tabel 3.2.1 benævnes kompletterende dele, d.v.s. vinduer, døre, afslutningslister m.m., og VVS-anlæg, som betegner de faste varme-, vand- og afløbsinstallationer, men ikke varmeforsyningsaggregater.

Desuden er der foretaget en opsamling af de mange dele af anlægsenergiforbruget, der er beskrevet, hvor der også er forsøgt at tage højde for serviceenergiforbruget, ERS (se afsnit 3).

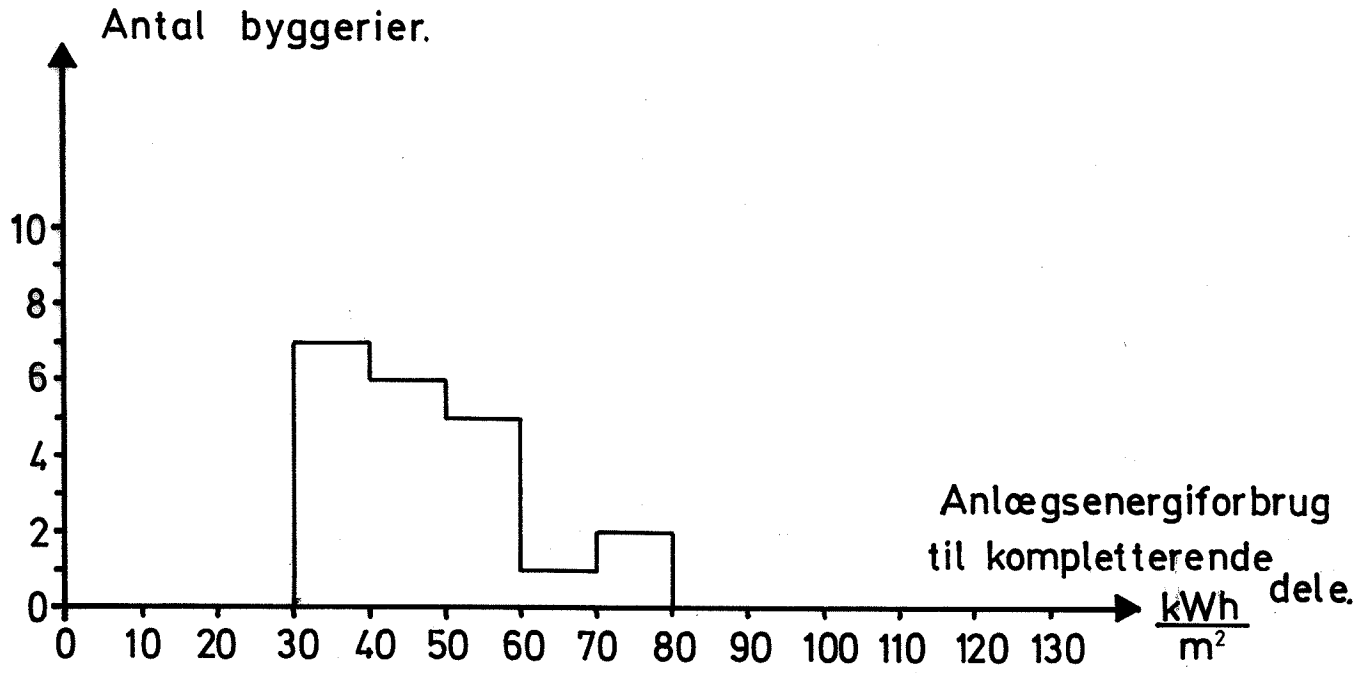
8.1 Kompletterende dele

De kompletterende dele viser sig, som ventet, at være et ret konstant bidrag for næsten alle de analyserede byggerier. Der er kun markante afvigelser i enkelte eenfamiliehuse, hvor murede pejse er indregnet under kompletterende dele. Fratrækkes energiforbruget til fremstilling af dette "luksusinventar", bliver fordelingen af anlægsenergiforbruget til de kompletterende dele for byggerierne som vist i figur 8.1.1.

De høje anlægsenergiforbrug, over 60 kWh/m^2, er beregnet for bygninger, der har specielle former for kompletterende dele, f.eks. solafskærmning, skodder, balkonkasser eller ekstra store vinduesarealer.

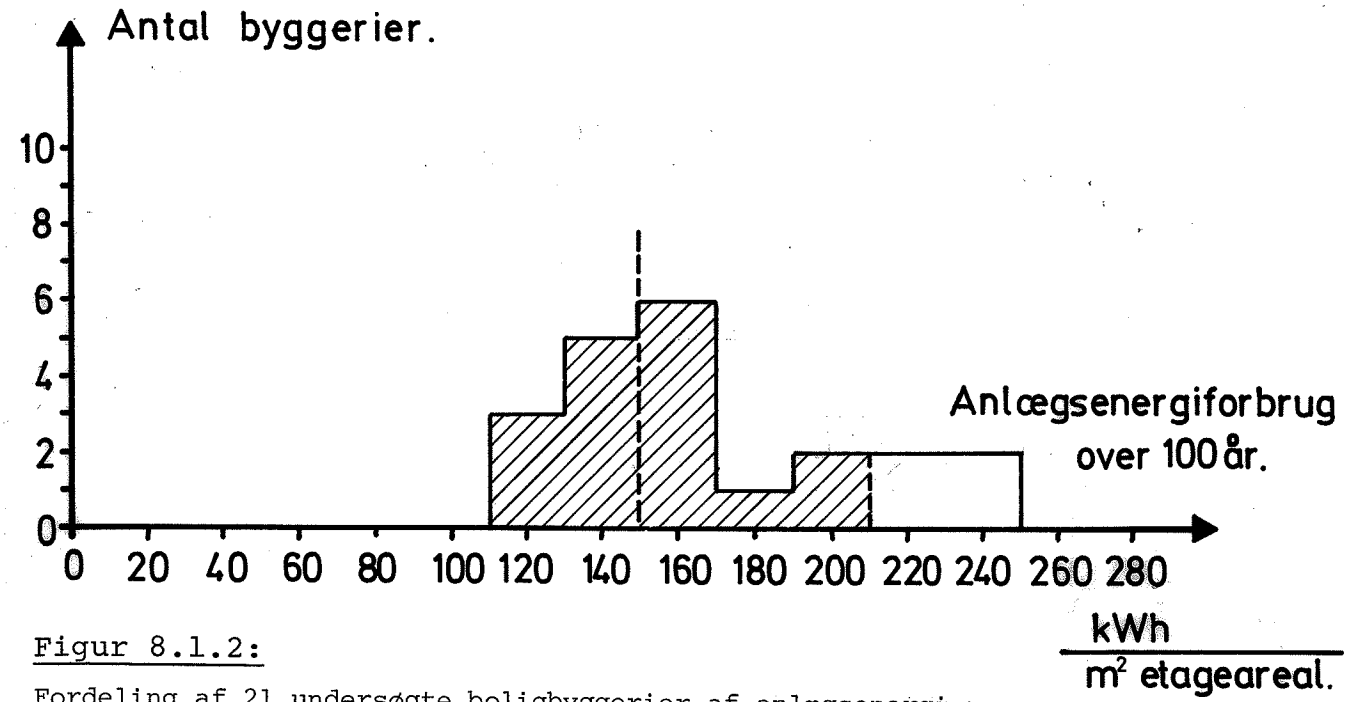
For normale vindueskonstruktioner med 2 lag glas vil anlægsenergiforbruget ligge omkring 45 kWh/m^2 for de kompletterende dele, hvoraf vinduesruderne udgør 10-15 kWh/m^2 etageareal.

Når anlægsenergiforbruget til de kompletterende dele skal sammenlignes med bidragene fra de andre bygningsdele, må de tillægges en given levetid.



Figur 8.1.1:

Fordeling af energiforbruget til kompletterende dele for 24 analyserede byggerier.



Figur 8.1.2:

Fordeling af 21 undersøgte boligbyggerier af anlægsenergiforbruget over 100 år til kompletterende dele.

Dette kan være ret problematisk, idet der indgår en hel række elementer, der har forskellig levetid. Termoruder må erfaringsmæssigt tillægges betydeligt lavere levetid end indvendige døre. Det samme gælder fugetætning ved vinduer set i forhold til fodpaneler. Intervallet spænder lige fra 10 år til 100 år.

Som en kompromisløsning, der delvis tager højde for denne forskel, tillægges i det følgende vinduesglasset og fugemidlerne en levetid på 20 år*, mens de resterende kompletterende dele tillægges levetiden 50 år. Dette resulterer i en korrigeret fordeling for de undersøgte byggerier, som vist i figur 8.1.2 med en middelværdi for "normalt" byggeri på 150 kWh/m^2 etagerareal.

Variationen i anlægsenergiforbrugene i figur 8.1.2 skyldes ret "tilfældige" ting og har ingen konstatérbar sammenhæng med de primære konstruktioners materialevalg eller bærende system. Ikke desto mindre er materialevalget ved de komplementerende dele ret afgørende, som det fremgår af eksempel 8.1.1.

Eksempel 8.1.1: Materialevalg til vindueskonstruktioner.

Tre alternative karmkonstruktioner til vinduer skal undersøges i det følgende.

* Garantiperioden for termoruder er i øjeblikket 5 år. Den praktiske levetid er ved rigtigt udførte vindueskonstruktioner ofte mere end det dobbelte. Andre løsninger, som f.eks. koblede rammer, giver glaslevetider over 20 år.

A: Standard tophængt termovindue med fyrretræskarm - udvendige mål 888×1320 mm, glasmål 691×1123 mm (fyrretræ vakuum-imprægneret).

Materialeforbrug	Energiforbrug
0.037 m^3 fyrretømmer	26.6 kWh
0.776 m^2 termorude	118.0 kWh
0.73 kg aluminiumsprofil	47.7 kWh
1.5 kg beslag	16.5 kWh
0.52 kg tætningslister	9.4 kWh
På fabrikken	65.0 kWh
IALT	283.2 kWh

B: Tophængt termovindue med plastprofilkarm - udvendige mål 900×1300 mm, glasmål 662×1062 mm

Materialeforbrug	Energiforbrug
14.7 kg plast (80%PVC, 20%PEL)	337.4 kWh
0.704 m^2 termorude	106.8 kWh
1.55 m^2 tætningslister	27.9 kWh
1.5 kg beslag	16.5 kWh
På fabrikken	65.0 kWh
IALT	553.6 kWh

C: Tophængt termorude med aluminiumsprofilkarm, - udvendige mål 900×1300 mm, indvendige mål 752×1152 mm

Materialevalg	Energiforbrug
8.35 kg aluminiumsprofil	545.3 kWh
0.79 kg tætningslister	14.2 kWh
1.5 kg beslag	16.5 kWh
0.866 m termorude	131.6 kWh
På fabrikken	65.0 kWh
IALT	772.6 kWh

Hvis der til vedligeholdelse af standardvinduet (A) bruges ½ ℓ træimprægneringsmiddel hvert 5. år, og vinduet antages at have en levetid på 30 år (glas dog 10 år), skal plastvinduet og aluminiums-

kWh / m²	Bebyggelsesform	Varmeforsyning	Distributionsanlæg	Varmeproduktionsanlæg excl.kedel	VVS-anlæg ialt
Grantoften I	8 etagers blokke i forlængelse	Varmecentral	51.1	~20*	~70
Hedegården	4 etagers blokke, adskilte	Varmecentral	94.8	~20*	~115
Frydenhøjparken	2 etagers blokke i forlængelse	Varmecentral	69.8	~20*	~90
Blåkildegård	2 etagers blokke, adskilte	Varmecentral	110.3	~20*	~130
Hellebo typehus	500 typehuse, adskilt	500 oliefyrsanlæg	91.7	~34**	~125

* Varmecentralbygning

** Til overordnet kloaknet + vandnet + olietank

Tabel 8.2.1:

Anlægsenergiforbrug til VVS-anlæg excl. oliefyringskedler (materialeenergiforbrug).

vinduet have levetider på 64 år, henholdsvis 143 år, for at give samme anlægsenergiforbrug over lang tid som (A). □

8.2 VVS-anlæg

Denne gruppe af bygningsdele er i højere grad end nogle af de tidligere nævnte tæt sammenknyttet med driftsenergiforbruget.

Man kunne umiddelbart fristes til at spørge, hvilken opvarmningsmetode der er den mindst energikrævende med hensyn til anlægsenergiforbrug. Dette giver imidlertid ingen mening, idet forskellene i driftsforbrug for alternative opvarmningsmetoder normalt er den afgørende faktor.
Spørgsmålet kan derfor i de fleste tilfælde kun besvares ved at gennemføre en energianalyse, som beskrevet i afsnit 0.3, hvor både anlægsenergiforbrug og driftsenergiforbrug tages i regning. I denne energianalyse vil levetiden af VVS-anlæggenes dele være helt afgørende for resultatet.

Idet fastlæggelsen af disse levetider, især ved nyere opvarmningsmetoder, er behæftet med stor usikkerhed, kræves der et stort forskningsarbejde for at få tilstrækkeligt styr på

- levetider af VVS-anlæggenes dele og
- driftsydelser/-forbrug

inden en seriøs energianalyse kan gennemføres.

Desuden er en hel del af de nyere opvarmningsmetoder stadig under udvikling, både mod større driftsydelser og ofte også mod lavere materialeforbrug. Som et eksempel på det sidste kan nævnes, at anlægsenergiforbruget til jordvarmeanlægs kondensatordel (jordslangerne) i begyndelsen blev udført af galvaniserede stålrør. Et anlæg med 400 m slange i haven svarer da til et anlægsenergiforbrug på ~5800 kWh. Idag er man gået over til at anvende PEL-rør, svarende til anlægsenergiforbruget

~1300 kWh. I fremtiden kan man tænke sig, at der kan anvendes direkte boringer til grundvandet. Er grundvandet blot 40 m under terræn, vil anlægsenergiforbruget være < 500 kWh til samme anlæg.

Der skal derfor i dette afsnit kun forsøges at sammenligne systemer, hvor der anvendes traditionel opvarmningsmetode, d.v.s. vandradiatoranlæg.

VVS-anlæg består også af andet end varmesystemet, nemlig vandforsyningssystemet, afløbs- og kloaksystemet.

Distributionsnettene til disse formål kan have mange former, og som det beskrives i [75.0], er formen og udstrækningen af nettene afgørende for materialeforbrug og dermed også for anlægsenergiforbrug til VVS-anlæg.

I de byggerier, der er nævnt i tabel 8.2.1, er anlægsenergiforbruget til ovennævnte systemer beregnet.

Anlægsenergiforbruget omfatter for alle fem bebyggelser forsyningsnettene for hele bebyggelsesområdet samt forsyningsnettene i bygningerne. I de fire første tilfælde er der tale om en fælles varmedistribution, mens typehusene har egen varmeforsyning.

Det fremgår tydeligt, at de sammenbyggede bebyggelser har et væsentligt lavere anlægsenergiforbrug. Dette skyldes både nettenes mindre udstrækning, og at ledningsnettet kan føres udelukkende i bygningernes kældre eller krybekældre.

Derudover kan der spores en sammenhæng mellem anlægsenergiforbruget og bebyggelsens udbredelse i vandret plan. Var typehusene opvarmet med fjernvarme, ville anlægsenergiforbruget for typehusene sandsynligvis være højest.

For de undersøgte byggerier er energiforbrugene til de interne VVS-anlæg, d.v.s. den del af distributionsnettene, der ligger inden for grundens afgrænsning, beregnet til 53.9 kWh/m^2 for et elvarmet enfamiliehus og helt op til 438.5 kWh/m^2 for VVS-anlægget i DTH's 0-energihus.

Levetiden af distributionsanlæggene kan for traditionelle anlæg skønnes nogenlunde korrekt ud fra det erfaringsmateriale, der efterhånden er opbygget. (Se f.eks. [76.0]).

Levetiden skønnes at ligge mellem 20 og 40 år for sådanne anlæg, og der anvendes i det følgende en gennemsnitsværdi på 30 år.

For nyudviklede opvarmningssystemer er levetiden erfaringsmæssigt mindre, da de i mange tilfælde i begyndelsen lider af "børnesygdomme".

D.v.s. at anlægsenergiforbruget for VVS-anlæg over 100 år vil andrage 170-400 kWh/m^2 for traditionelle anlæg, men helt op til 2-3000 kWh/m^2 for systemer, som det der anvendes i DTH's 0-energihus.

Der er derfor grund til at fokusere på disse bygningsdele i de fremtidige boligformer med hensyn til anlægsenergiforbrug i samme omfang som på de primære konstruktioner, måske mere.

8.3 Vedligeholdelse

Energiforbruget til vedligeholdelse afhænger af den vedligeholdelsesstandard, der opereres med. Denne har igen indflydelse på den forventede levetid af bygningsdele, og det bliver da i sidste ende et spørgsmål om at optimere disse parametre mod hinanden i en systematiseret vedligeholdelsesplanlægning. Dette emne behandles for det pengeøkonomiske tilfælde bl.a. i [76.0].

Der har ikke kunnet afsættes tid til et dyberegående studium af en energiøkonomisk belysning af emnet - desværre - for det må siges at være af største vigtighed for det totale energiforbrug over længere perioder.

Et enkelt eksempel kan belyse niveauet af energiforbrug i forbindelse med vedligeholdelse.

Eksempel 8.3.1: Vedligeholdelse af træfacade.

Et 120 m^2 eenfamiliehus har en udvendig beklædning af 1 på 2 brædder, som bliver behandlet med et imprægneringsmiddel (oliebeitse).

Behandlingen gennemføres hvert 5. år som følger:

140 m^2 træværk

1 gang strygning med pigmenteret træbeskyttelsesmiddel, 4 m^2/ℓ

1 gang strygning med upigmenteret træbeskyttelsesmiddel, 8 m^2/ℓ

Anlægsenergiforbruget vil med god tilnærmelse bestå alene af energiforbruget til fremstilling af materialerne, d.v.s.

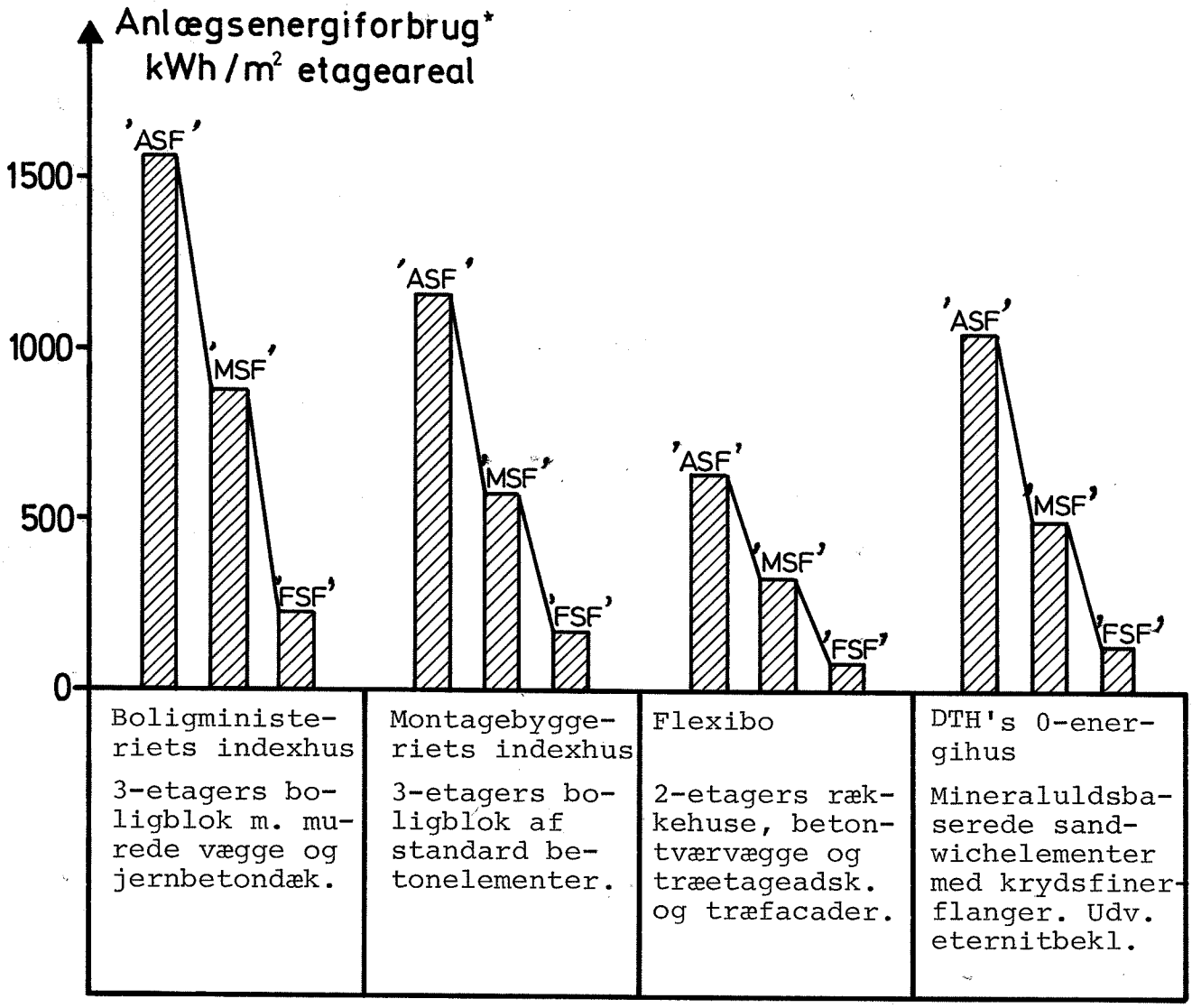
$$\frac{100}{5} \cdot 140 \cdot \left(\frac{1}{4} + \frac{1}{8}\right) = 1050\ \ell \text{ oliebeitse}$$

hvilket med ASF-værdierne fra afsnit 3 svarer til et energiforbrug på 27 kWh/m^2 etageareal over 100 år.

8.4 Akkumulerede anlægsenergiforbrug over 100 år

I de tidligere afsnit er bidragene til anlægsenergiforbruget beskrevet enkeltvis. Hvorledes vil da det samlede forbrug over lange perioder se ud - det energiforbrug, som kan sammenlignes med driftsenergiforbruget.

Som udgangspunkt er det akkumulerede anlægsenergiforbrug, AER_{100}, bestemt for boligbyggeriet Grantoften I, som jo har været demonstrationsmodel i tidligere afsnit. Resultatet, som ses i tabel 8.4.1,



Figur 8.4.1:

Sammenligning mellem "ASF-", "MSF-" og "FSF-beregninger af det samlede anlægsenergiforbrug* uden hensyntagen til levetider (beskrivelser, se [80.0]).

*excl. anlægsenergiforbrug til VVS-anlæg.

viser, at anlægsenergiforbruget for denne bygning er 4.8% af det akkumulerede totale energiforbrug.

Desuden viser "MSF"- og "FSF"-beregningerne, at der i anlægsenergiforbruget er maksimale besparelser i praksis og teoretisk på 53%, henholdsvis 89%.

kWh/m^2 etageareal		"ASF"	"MSF"	"FSF"
ERM	Bygningsbasis	112.1	60.3	20.1
	Råhusets primære dele	601.2	282.5	89.8
	Beklædninger	189.3	80.3	13.3
	Kompletterende dele	109.0	45.3	9.0
	VVS-anlæg	170.3	76.0	23.5
ERB	Byggeplads	85.6	54.1	2.8
ERS	Transport af arbejdere	61.1*	30.6*	12.2*
	Projektering m.m.	~10.0	~5.0	~2.0
ERC_{100}	Anlægsenergiforbrug over 100 år	1338.6	634.1	142.7

kWh/m^2 etageareal		"ASF"
	Olieforbrug	16500
	El-forbrug	11000
ERO_{100}	Driftsenergiforbrug over 100 år	27500
AER_{100}	Akkumuleret energiforbrug 100 år	28840

* Er beregnet på grundlag af arbejdskraftforbruget ved indflytning. Der er taget hensyn til arbejdskraftforbruget for udskiftede bygningsdele ved at multiplicere med ERM_{100}/ERM_o.

Tabel 8.4.1:

Det akkumulerede anlægsenergiforbrug over 100 år for Grantoften I.

Beregninger med MSF og FSF for andre byggerier med andre materialevalg giver temmelig nøjagtigt samme potentielle besparelse, d.v.s. ~50% og 85-90%, se figur 8.4.1.

Beregningen af disse tal er behæftet med en vis usikkerhed. Ud fra skønnede usikkerheder på de enkelte faktorer i beregningen, d.v.s. mængder, specifikke energiforbrug, etageareal og levetider, er der i appendix A2, [80.0], foretaget en usikkerhedsberegning på det samlede anlægsenergiforbrug. Dette er gjort ved hjælp af teorien for den successive kalkulation, [78.0].

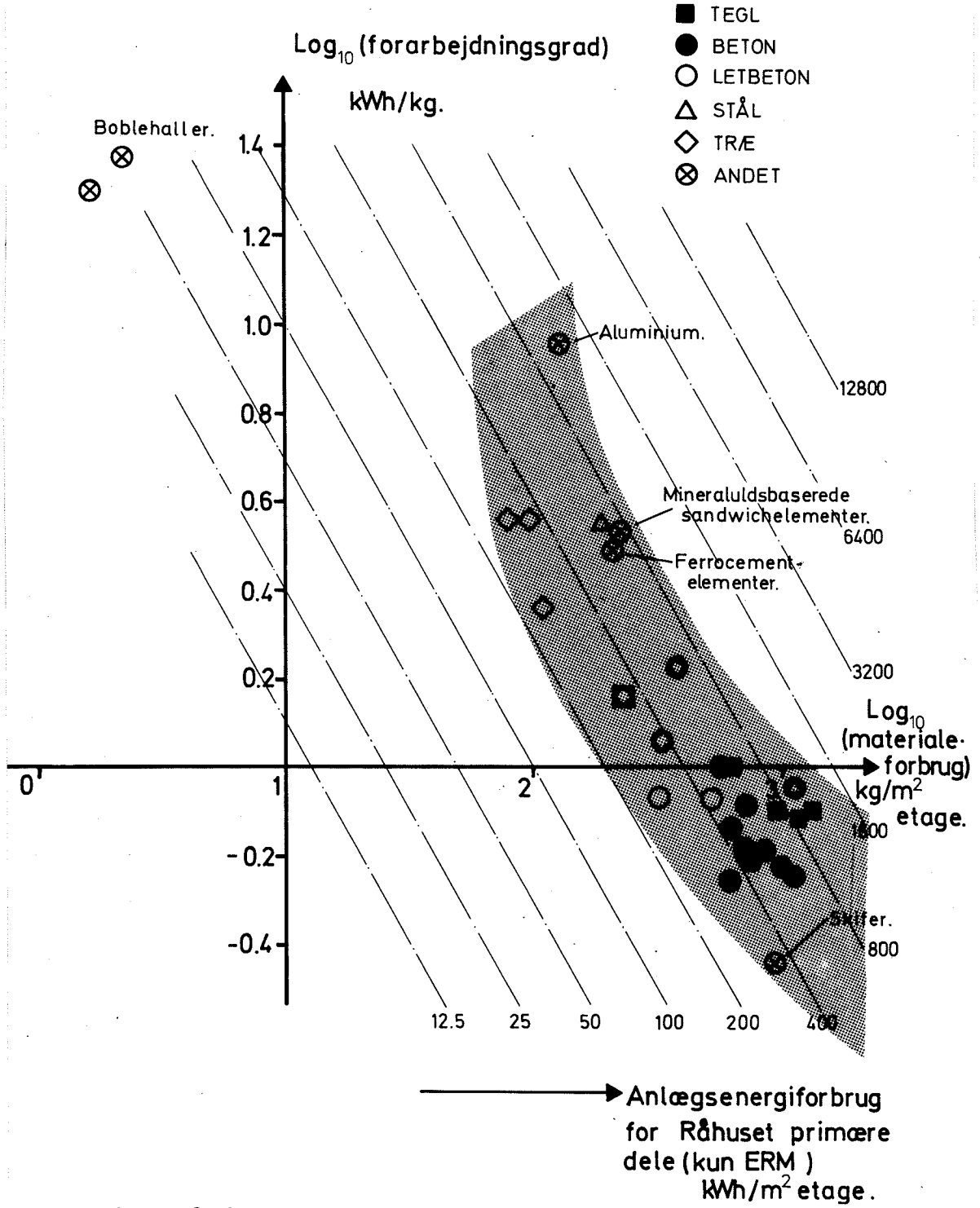
I tabel 8.4.2 er de relative standardafvigelser, s/m, angivet for de forskellige delforbrug.

Som det ses af tabellen er der ikke ret stor usikkerhed på den egentlige beregning af ERC i dette tilfælde, 8½%, men så snart levetiden bringes ind i billedet, vokser usikkerheden betydeligt. Derudover er det især bidragene fra råhus og byggeplads, der giver usikkerhed på slutresultatet. Usikkerheden på MSF- og FSF-slutværdierne kan ud fra dette skønnes til 15% og ~55%, hvis levetiden tages med.

	ERC (t = 0)		ERC (t = 100 år)	
kWh/m² etageareal	Middelværdi	s/m %	Middelværdi	s/m %
Bygningsbasis	112.1	4.6	112.1	20.5
Råhus	601.2	6.8	601.2	21.1
Beklædninger	56.7	11.0	189.3	22.8
Kompletterende dele	30.9	11.4	109.3	23.0
VVS-anlæg	51.1	11.3	170.3	22.9
Byggeplads	85.6	26.8	85.6	33.3
Service	52.5	20.5	71.1	28.7
		4.9		11.0
Materialespild } 5%	990.1	5.0	1338.6	5.0
Oversete konstr.dele }				
Andre usikkerheder 5%	990.1	5.0	1338.6	5.0
Levetider 50%			1338.6	50.0
Totalt	990.1	8.6	1338.6	51.7

Tabel 8.4.2:

Usikkerheder på beregningen af ERC til tiden 0 og 100 år, udtrykt ved den relative standardafvigelse, s/m (%) for Grantoften I. Standardafvigelserne er bestemt efter Lichtenberg [78.0]. (Se appendix A2, [80.0]).



Figur 8.4.2:

Materialeenergiforbrug til råhusets primære dele som funktion af materialeforbrug og materialernes forarbejdningsgrad. Værdierne for de undersøgte konstruktioner er plottet ind (jvf. figur 5.2.1).
Forarbejdningsgraden er her målt ved råhusmaterialernes gennemsnitlige specifikke energiforbrug, $\overline{ASF}$.

En alternativ metode til at vurdere det samlede energiforbrug til anlæg og drift er at tilbageskrive de løbende driftsudgifter til tiden, t = 0.

Man kan da, f.eks. ud fra samfundsmæssige betragtninger, tillægge fremtidige energiforbrug en "værdistigning", som kan være udtryk for en forventet energiknaphed eller forsyningsusikkerhed. I dette tilfælde bliver tidshorisonten fastlagt ved planlægningens tidshorisont, som for den nationale energipolitik ikke er mere end 30 år.

Udtrykkes den voksende energiforsyningsusikkerhed ved, at energi stiger 5% p.a. i værdi, vil det akkumulerede energiforbrug til tiden 0, AER_o, for Grantoften I være lig

$$ERC_o + ERO \sum_{i=1}^{30} (1 + 0.05)^i = 990.7 + 275 \cdot 69.75 =$$

$$= 20170 \text{ kWh/m}^2 \text{ etageareal}$$

En sådan vurdering vil gøre merenergiforbrug til energibesparende foranstaltninger mere fordelagtig end den tidligere nævnte metode og understreger endnu en gang, at det først og fremmest er i driftsenergiforbruget, der bør sættes ind med hensyn til besparelser.

Fastsættelsen af energiens fremtidige værdi er imidlertid yderst problematisk.

Til sidst er de undersøgte konstruktionsarters materialeenergiforbrug vist som funktion af materialeforbrug og materialets forarbejdningsgrad. Analogt til figur 5.2.1.

Bruges der som målestok for materialets forarbejdningsgrad det gennemsnitlige specifikke energiforbrug (kWh/kg) for konstruktionen, vil materialeenergiforbruget til råhusets primære dele (se tabel 3.2.1) blive som vist i figur 8.4.2.

Værdierne for de undersøgte konstruktionstyper ser ud til at passe med det principielle forløb i figur 5.2.1, men læg mærke til værdierne for boblehallerne, der falder helt udenfor. Dette forklares naturligvis af, at deres bæreevne ikke skyldes materialeforbrug, men driftsenergiforbrug. Det er desuden bemærkelsesværdigt, hvorledes konstruktionernes værdier grupperer sig tydeligt efter materialevalg.

Litteratur

[75.0] Erik Reitzel, H.F. Mathiassen:
"ENERGI, BOLIGER, BYGGERI"
Fremads forlag
Danmark 1975

[76.0] Reginald Lee:
"BUILDING MAINTENANCE MANAGEMENT"
Grosby Lockwood Staples
England 1976.

[78.0] J. Honoré, S. Lichtenberg:
"ERFARINGER MED SUCCESSIV KALKULATION"
Byggeindustrien 10, 1978
Danmark 1978

[80.0] Appendix A2 til
"DET AKKUMULEREDE ENERGIFORBRUG TIL FREMSTILLING AF BOLIGER"
Findes på biblioteket, Instituttet for Husbygning, DTH,
Danmark 1980.

9. GRÆNSETILFÆLDE FOR FORHOLDET MELLEM ANLÆGS- OG DRIFTSFORBRUG

Som det fremgår af de foregående afsnit, er anlægsenergiforbruget, ERC*, i praktiske tilfælde kun en brøkdel af det driftsenergiforbrug, der kan ventes at optræde i bygningers levetid, ERO*.

Som allerede skitseret i afsnit 0.4, vil det akkumulerede energiforbrug over bygningens levetid ikke kunne nedbringes uden en tilvækst i anlægsenergiforbruget.

Det er derfor interessant at vide, hvor grænsen er, hvor besparelsen i driftsenergiforbruget opvejes af et merenergiforbrug på anlægssiden, og hvor langt fra dette punkt de eksisterende normer med hensyn til bygningskonstruktioner befinder sig.

Det søgte punkt eller "lavenerginiveau" kan findes, hvor det marginale akkumulerede energiforbrug er nul, d.v.s.

$$\Delta AER^* = \Delta(ERC + \sum_{T} ERO) = 0$$

eller

$$AER = \text{minimum}.$$

Til illustration af disse grænsetilfælde vil metoderne, der er defineret i afsnit 0.4, blive benyttet, og der henvises hertil med hensyn til de benyttede forkortelser og begreber.

Der vælges at behandle nogle af de mest forekommende energibesparende foranstaltninger på et generelt niveau. Dertil er det nødvendigt at foretage forenklinger, som gør problematikken overskuelig, men samtidig gør en overførsel på praktiske konstruktionsforhold sværere.

* Jvf. afsnit 0.4.

9.1 Isoleringstykkelse

For at anskueliggøre konsekvenserne af sådanne forenklinger skal grænsetilfældet for isoleringstykkelsen bestemmes med tre mere eller mindre kraftige sæt forenklinger.

1) Der betragtes én kvadratmeter af en konstruktion, som er en del af klimaskærmen i en bygning. Isoleringstykkelsen i denne konstruktion varieres og sammenhængen mellem konstruktionsform og -mængde i øvrigt antages uændret ved varierende tykkelser. ERC kan alene udtrykkes ved isoleringstykkelsen, og ERO udtrykkes alene ved varmetabet gennem konstruktionen.

2) I stedet for at betragte én kvadratmeter af konstruktionen, betragtes en bokasse, som helt er omsluttet af den samme konstruktion.
ERC udtrykkes da ved en forøgelse af isoleringsvolumenet og af arealet af den ydre beskyttende skal i klimaskærmen, mens ERO bestemmes på samme måde som under 1).

3) De samme forenklinger som under 2) gælder, men desuden tages der ved beregningen af ERO hensyn til gratisvarmebidrag fra solindfald, elektriske apparater og personer samt til bygningens øvrige konstruktioner og varmetab.

Der opnås således en voksende samstemmen med virkelige forhold fra sæt 1) til 3).

Følgende forudsætninger indføres:

- ERO findes i 1) og 2) ved hjælp af graddøgntal på 3000 graddøgn
- Det varmetabsgivende areal bestemmes af isoleringslagets symmetriplan.
- Udgangskonstruktionen (isoleringstykkelse = 0) har en k-værdi på 2 $W/m^2{}^oC$.
- Der er ingen kuldebroer i isoleringen.

materiale	ρ kg/m^3	E' kWh/kg	λ W/m°C	d_{max} m	k_{min} W/m^2 °C
stenuld A	35	5.34	0.039	1.04	0.0368
stenuld,pladebatts A	80	5.34	0.039	0.68	0.0558
stenuld,pladebas kantstillet	80	5.34	0.045	0.73	0.0598
polystyrolplader	40	19.00	0.032	0.46	0.0672
polystyrolkugler	15	29.65	0.050	0.75	0.0645
celleglas	120	5.20	0.053	0.65	0.0783
gasbeton	600	1.25	0.190	1.07	0.1630
lecabeton	650	1.02	0.220	1.23	0.1640

Tabel 9.1.1:

Grænseværdier for isoleringstykkelse, d_{max}, samt den tilsvarende k-værdi, k_{min}, for en række isoleringsmaterialer, beregnet efter (1).

(k- værdien for den uisolerede væg, d = 0, er 2.0 W/m^2 °C)

Følgende betegnelser indføres:

λ = isoleringsmaterialets varmeledningstal, $W/m^{o}C$
d = isoleringstykkelsen, m
ρ = isoleringsmaterialets rumvægt, kg/m^3.
ℓ = bokassens længde, m
h = bokassens højde, m
b = bokassens bredde, m
E'_o = den ydre skals specifikke energiforbrug, $\frac{kWh}{m^2}$
η = opvarmningsforsyningens nyttevirkning = 0.8
E' = isoleringsmaterialets spec. energiforbrug, $\frac{kWh}{kg}$
k = væggens k-værdi, $W/m^2{}^{o}C$

Ved forholdsvis simple beregninger kan grænseværdien for isoleringstykkelsen, d_{max}, for tilfældet 1) findes som:

$$(1) \qquad d_{max} = \sqrt{\frac{5400\,\lambda}{\rho\,E'}} - \frac{\lambda}{2.0}$$

For tilfælde 2) er beregningen lidt mere kompliceret.

Den oprindelige bokasseoverflade, O_o, kan beregnes til $O_o = 2(h\,b + h\,\ell + \ell\,b)$.

Idet alle størrelser relateres til 1 m^2 af den oprindelige overflade fås:

Varmetabsoverfladen $O'_o = 1 + \frac{6\,d^2 + 4(b+h+\ell)d}{O_o}$

og

$$\sum_{1}^{60} ERO = 5400\,k\,O'_1 = \frac{5400}{\frac{\lambda}{2} + d}\left(1 + \frac{6\,d^2 + 4(b+h+\ell)d}{O_o}\right)$$

Efter lignende beregninger kan ERC beregnes til

$$ERC = E'\,\rho\,d\left(1 + \frac{4\,d(b+\ell+h) + 8\,d^2}{O_o}\right) + E'_o\frac{24\,d^2 + 8(b+h+\ell)d}{O}$$

$$\frac{\partial ERC}{\partial d} + \frac{\partial \sum ERO}{\partial d} = 0 \Rightarrow$$

$$(2)\begin{cases} \dfrac{5400\,\lambda}{E'\left(\dfrac{\lambda}{2}+d\right)^2\rho} = \\ = \dfrac{O_o + 8\,d(b+\ell+h) + 24\,d^2 + \dfrac{E'_o}{E'\rho}(48\,d + 8(b+h+\ell))}{O_o - 6\,d^2 - 2(b+h+\ell)\lambda} \end{cases}$$

idet led, hvor $d^2\lambda$ indgår, er negligeret.

I tilfælde 1) var højresiden lig 1, og korrektionen i tilfælde 2 bliver da

$$\frac{2(b+h+\ell)\left(4\,d+\dfrac{4\,E'_o}{E'\rho}+\lambda\right) + 6\,d\left(5\,d+\dfrac{8\,E'_o}{E'\rho}\right)}{O_o - 6\,d^2 - 2\,\lambda(b+h+\ell)}$$

I tabel 9.1.1 er d_{max} for forskellige isoleringsmaterialer beregnet efter (1), angivet sammen med den dertil hørende minimale k-værdi.

Tænkes der i konstruktionen at være en kuldebro, der udgør 5% af konstruktionsoverfladen med en k-værdi på 1.0 W/°C m², (som f.eks. kunne være en stolpekonstruktion), vil d_{max} for stenuld A ændres fra 1.04 m til 0,98 m, altså ikke nogen større ændring.

Efter (2)* kan d_{max} for stenuld A ved iteration beregnes til 0.78 m, altså en væsentlig reduktion i forhold til tilfælde 1).

En analytisk beregning er i tilfælde 3) ret besværlig. Der er valgt at benytte en beregningsmetode af driftsenergiforbruget, [79.1], som på en enkel måde tager hensyn til gratisvarmen, og som husobjekt er benyttet et 112 m² stort eenfamiliehus, hvis konstruktioner er de samme, som skitseret i varmetabsreglerne, DS418. Huset er dokumenteret i [79.0], hus nr. 2.

* Der forudsættes $E'_o = 60\ \frac{kWh}{m^2}$, b×h×ℓ = 8×2.5×14 m.

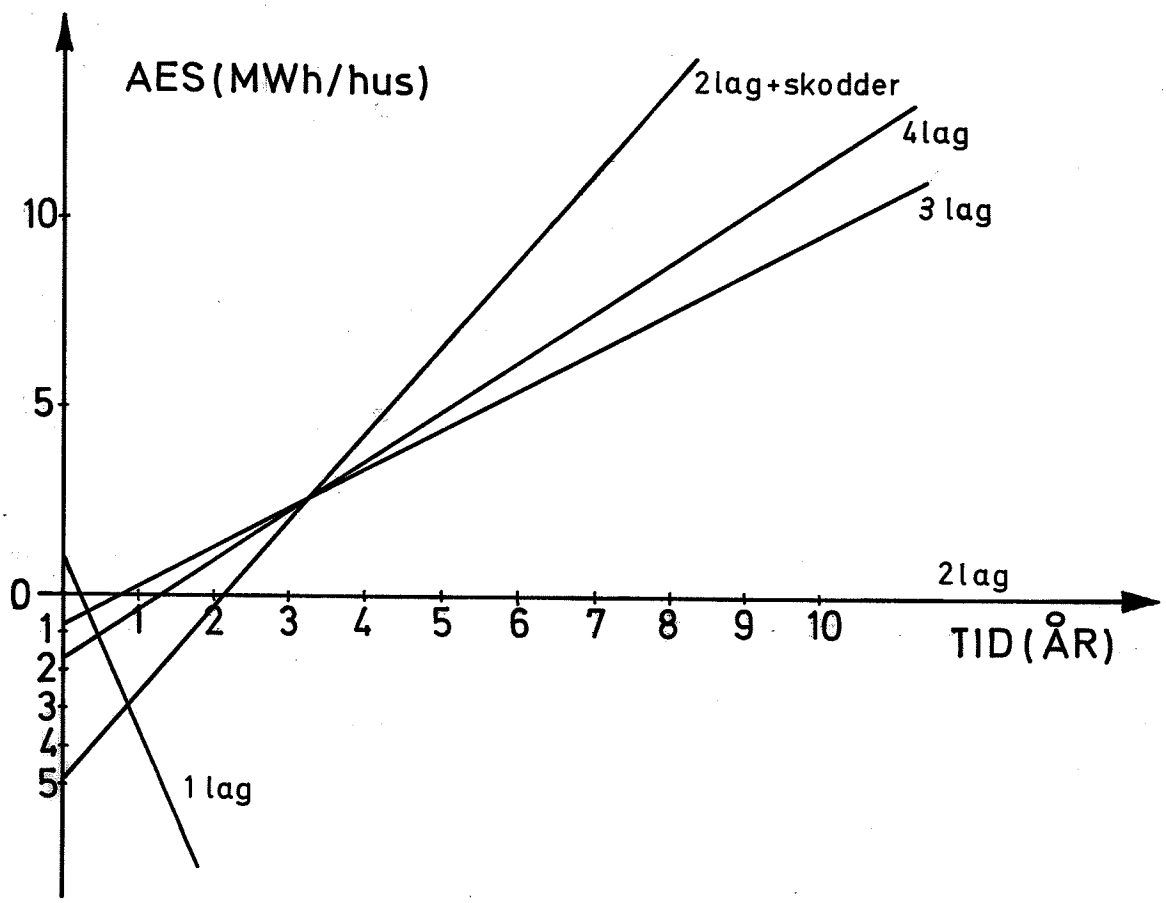
kWh/år	k-værdi W/°C m²	Q_{hus}	ERO(opv.)	ERC, kWh
1 lag glas	5.25	15234	19043	588
2 lag glas	2.70	11548	14435	1475
3 lag glas	2.00	10721	13401	2305
4 lag glas	1.75	10501	13126	3130
2 lag glas + skodder	0.40/2.70	9744	12190*	6320

* el til skoddemotorer = 10 kWh/år.

Tabel 9.2.1:

Beregnede energiforbrug for Hus nr. 2 i [79.0] for forskellige vindueskonstruktioner beregnet ved hjælp af EFB1, [79.1].

Forudsætninger: Skodder af samme art som på Hus F i Hjortekærhusene [79.2]. Nyttevirkning af opvarmning 0.80. 11.76 m² vinduer, 30% træ, 70% glasareal. Solindfald reduceres med 13%, 22% og 28% for 2, 3 og 4 lag glas i forhold til 1 lag glas.



Figur 9.2.1:

Den akk. energibesparelse, AES, afbildet efter besparelsesmetoden for forskellige vindueskonstruktioner. Besparelsen taget i forhold til 2 lag glas.

Idet opvarmningsbehovet er relateret til én kvadratmeter husoverflade fås for stenuld A en afhængighed, som er skitseret i figur 9.1.1, kurve nr. III, hvor d_{max} bliver ~0.80 m.*

Det ses, at tilfælde 2) og 3) giver ret enslydende resultater. Forskellen hidrører fra, at gratisvarmen udgør en større og større del af varmeforsyningen, jo mere der isoleres. Gratisvarmeudnyttelsen falder samtidig fra 97% ved isoleringstykkelsen 0 til 55% ved 1.50 m.

Karakteristisk for alle tre kurver er det imidlertid, at der er tale om flade minima. Allerede ved omkring 0.5 m isoleringstykkelse er energibesparelsesvirkningen begrænset for en yderligere forøgelse af tykkelsen.

9.2 Vinduets isoleringsevne

En lignende sammenhæng kan findes med hensyn til vinduets isoleringsevne. Det vil da være svært at skabe den samme kontinuitet i isoleringsevnens variation, som ved isoleringstykkelsen.

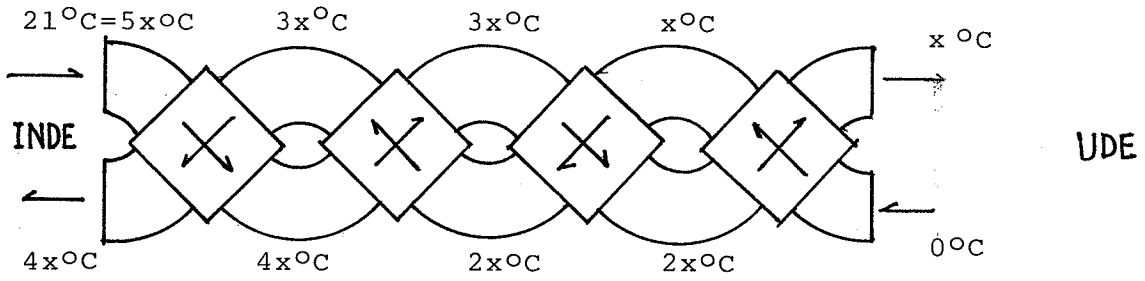
Det vil derfor være mere hensigtsmæssigt at benytte besparelsesmetoden i dette tilfælde.

For samme hus, som benyttet på de forrige sider, er opvarmningsenergiforbruget for forskellige vindueskonstruktioner beregnet, se tabel 9.2.1.

Som det ses af figur 9.2.1, er der ikke ret meget forskel på, om man benytter 3 eller 4 lag glas inden for de første 5 år, som er termorudens normale garantiperiode.

Den isolerende skodde, som er en automatisk betjent natisolering, tager lidt længere tid om at betale

* Der er forudsat 45% akkumulering, jvf. [71.1], samt E'_o = 60 kWh/m^2 svarende til f.eks. 22 mm krydsfinér.



Figur 9.3.1:

Seriekobling af krydsvarmevekslere, n = 4. Den totale nytte-virkning kan findes som (21 - x)/21.

Idet $x = \frac{21}{5}$ bliver $\eta_{total} = \frac{4}{5}$.

Virkningsgraden, η_{total}, er tilnærmet bestemt af temperaturudligningen over hver veksler.

sig selv hjem, men er efter 5 år et væsentligt bedre alternativ end både 3 og 4 lag glas. Endelig er linien for 1 lag glas indtegnet, som allerede efter 2 måneder giver en negativ energibesparelse.

9.3 Varmegenvinding

Samme hus er benyttet til en energianalyse - som marginalanalyse - af krydsvarmevekslere. Det forudsættes, at der eksisterer et ventilationsanlæg, og det tænkes, at man på ind- og udsugningskanalerne kan montere et antal, n, krydsvarmevekslere, se figur 9.3.1.

Forudsættes det, at temperaturnyttevirkningen kan benyttes som nyttevirkning af genvindingen, og at denne er 0.50 for hver af krydsvarmevekslerne, fås et udtryk for den totale genvindingsnyttevirkning af en serie af n vekslere som

$$\eta_{total} = \frac{n}{n + 1} \text{ , jvf. figur 9.3.1.}$$

For en almindelig krydsvarmeveksler til et eenfamiliehus gælder følgende:

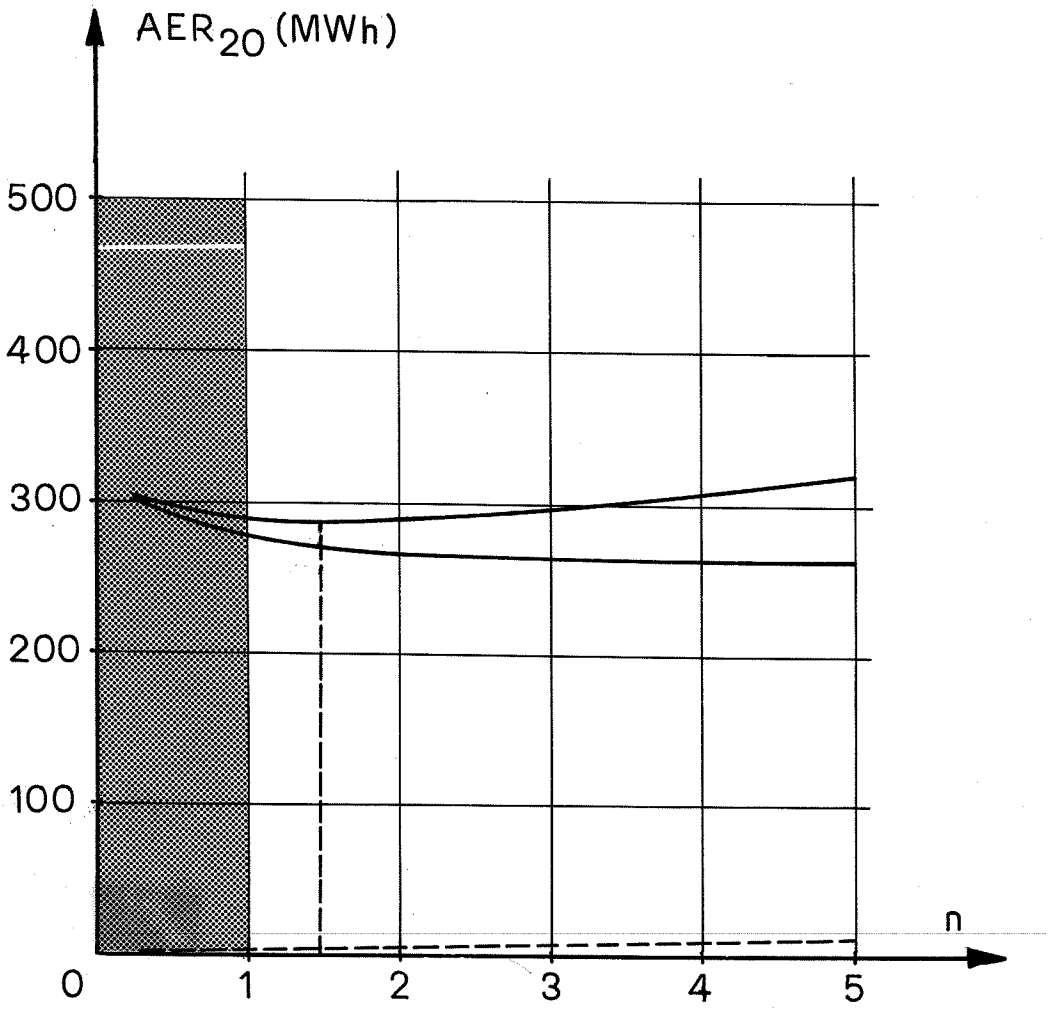
Δp_t = tryktabet over veksleren ~100 Pa
vægt ~ 30 kg
hovedbestanddele : aluminium og galvaniseret stål.

η_{el} = udtagsnyttevirkning af tilhørende ventilatorer ~15%

V = volumenstrøm ~250 m^3/h ~70 ℓ/sek.

Idet det forudsættes, at fabrikationen af krydsvarmeveksleren, udfra plademterialerne m.m., vil resultere i et energiforbrug på 0.10 kWh/kr pris, fås et samlet ERC for 1 varmeveksler inkl. 2 m kanal på 1910 kWh (for et bestemt fabrikat). I [79.3] er der for en krydsvarmeveksler inkl. motor m.m. regnet med ERC = 2940 kWh.

Merenergiforbruget til ventilation på grund af forøget tryktab må også tages med i denne situation og



Figur 9.3.2:
AER_{20} til opvarmning og ventilation for et 112 m^2 eenfamiliehus med seriekoblede krydsvarmevekslere. Normalt anvendte antal varmevekslere er angivet med raster. Den stiplede kurve angiver ERC, den nederste optrukne kurve angiver ERC + energiforbruget til opvarmning og endelig angiver den øverste kurve AER_{20} (inkl. energiforbrug til ventilation).

kan beregnes som

$$\Delta N = \frac{\Delta p_t \cdot V \cdot 4200}{1000\,\eta_{el}} \cdot 2.9 \text{ kWh/år}$$

idet der regnes med, at ventilationsanlægget skal give et luftskifte på 0.4 h^{-1}, mens der ved ukontrolleret ventilation er et luftskifte på 0.2 h^{-1}. Derved skal der med 250 m^3/h ventileres i 4200 h/år.

ΔN bliver i dette tilfælde 567 kWh/år.

Resultatet er afbildet i figur 9.3.2, idet energiforbrugene er akkumuleret over 20 år.

Som det ses af figuren, er det i højere grad ekstraenergiforbruget til ventilatoren, som er afgørende for grænseværdien end ERC. Det skyldes krydsvarmevekslers normalt store tryktabsværdi, som ved en bedre udførelse kan sænkes betydeligt. F.eks. har luftvarmeveksleren i DTH's 0-energihus en betydeligt lavere tryktabsværdi, 5 Pa, som er opnået ved en bevidst konstruktionsudformning for at sænke tryktabene i ventilationssystemet.

Med et tryktab på 5 Pa ville grænseværdien for n ligge mellem 4 og 5 i figur 9.3.2.

9.4 Solfangere

I rapporten [79.4] er der foretaget en energianalyse af solfangersystemer, delvis på grundlag af en foreløbig udgave af [79.5]. I den endelige rapport [79.5] er der sket ændringer i talværdierne i forhold til den foreløbige udgave. Korrigeres resultaterne i [79.4] svarende hertil fås følgende ligninger for ERC.

Brugsvandsanlæg
- 0-10 m^2 solf.: (1610+720A) kWh
- 10-20 m^2 solf.: (1735+735A) kWh

Integrerede anlæg
- 10-30 m^2 solf.: (2995+694A) kWh
- 30-80 m^2 solf.: (3150+701A) kWh

idet A betegner nettosolfangerarealet i m^2.

Driftsenergiforbruget (elforbruget) for systemerne må ligeledes korrigeres, idet konverteringsmultiplikatoren bør være 2.9 i stedet for de anvendte 2.2.

Med disse korrektioner fås marginalkurverne, som vist i figur 9.4.1 og 9.4.2, idet der er foretaget en extrapolation* ud over de angivne områder, tegnet med stiplede linier.

Der er benyttet en levetid på 20 år. Med en levetid på 10 år vil grænseværdierne være ~14, henholdsvis ~45 m^2.

9.5 Lavenergihuse

Grænseværdien for omfanget af sammensatte foranstaltninger kan ikke bestemmes ved simpel addition af de enkelte foranstaltninger, idet de meget sjældent er uafhængige.

Energibesparelsen for kombinationen af to forskellige foranstaltninger er næsten altid mindre end summen af energibesparelserne for de enkelte foranstaltninger.

Dette gør naturligvis, at der ikke kan gennemføres så generelle analyser som i de forrige afsnit. Et fingerpeg kan dog hentes af figur 0.3.2.4, hvor det kan ses, at vi med de nuværende lavenergihuse allerede er ved grænseværdien. Til illustration heraf kan det nævnes, at merenergiforbruget til fremstilling af varmesystemet i DTH's 0-energihus, i forhold til et konventionelt varmesystem svarer til energiforbruget til opvarmning af huset i 25 år ved en nyttevirkning på varmforsyningen på 75% og efter de beregnede energiforbrug til opvarmning (2300 kWh netto pr.år). Det kan diskuteres, om levetiden af 0-energihusets solfangeranlæg er større eller mindre end 25 år, men vi er i dette tilfælde tæt ved grænseværdien.

* For ERC er interpolationen retlinet, mens den anden for ERO er liniær i differenserne (ΔERO).

Referencemodel: BR-77 model af Hus-F. Standard betonelementer — øvrige konstruktioner efter BR-77 2 lag glas uden skodder, ingen solfangeranlæg, ingen genvinding, lette gulve.
1 En krydsvarmeveksler installeres, nyttevirkning 60%
2 Klimaskærmen erstattes med højisolerende elementer
3 2 lags ruder erstattes med 3 lags ruder
4 Sydvinduerne forsynes med automatisk betjente skodder
5 Der installeres et 18 m^2 solfangeranlæg til varme og brugsvand
6 De lette gulve udskiftes med tunge klinkegulve
Hus F i sin nuværende form

Tabel 9.5.1:

Beregnede foranstaltninger for Hus-F i Hjortekær-lavenergihusene.

	Q* kWh/år	El kWh/år	ESO MWh/år	ERC MWh	Omkostninger 1000 kr. 79	Udskiftning i 60 år
Reference	23280	4100		218.64		
1	18925	4295	4.88	1.90	5.5	2x
2	13105	4295	7.28	20.95	48.0	0x
3	11645	4295	1.82	1.53	2.8	3x
4	10065	4300	1.96	7.57	100.0	1x
5	6065	4430	4.62	32.18	48.0	2x
6			0.51	22.49	38.5	0x
Hus F	5655	4430		305.25		

* inkl. 3700 kWh/år til varmt brugsvand

Tabel 9.5.2:

Beregnede virkninger af de i tabel 9.5.1 givne foranstaltninger. Solvarmesystemets ydelse er opgivet i [79.2] til 4000 kWh/år.

En anden måde at vise sammenhængen på er at følge udviklingen af et lavenergihus under projekteringen.

Ved projekteringen af et af de 6 lavenergihuse i Handelsministeriets energiprogram i Hjortekær, Lyngby [79.2], blev der arbejdet med de i tabel 9.5.1 viste foranstaltninger.

De energimæssige virkninger for disse foranstaltninger samt deres økonomiske omkostninger er beregnet. Beregningen af energiforbruget til opvarmning er foretaget ved hjælp af en udvidet udgave af den tidligere anvendte EFB-metode, EFB 3 [79.6], der kan regne med flere rum, hvor temperaturerne eventuelt kan svinge frit. Dette er nødvendigt i dette tilfælde, hvor kælderen er uopvarmet. Huset er delt op i to rum, de opvarmede rum (stuen + 1. etage), hvor temperaturen er konstant 21°C, og kælderrummet, der modtager varme fra stuen ved transmission og ved ventilation, idet ventilationsreturluften ledes igennem kælderen, inden den ledes til udeluften (varmeveksleren).

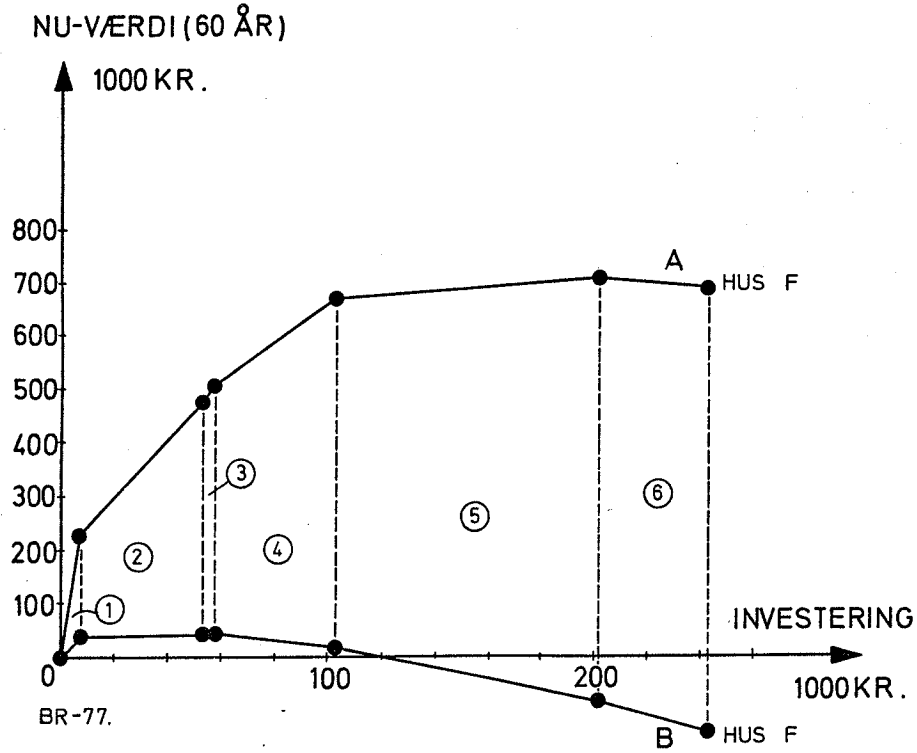
Beregningsmetodens ulempe er, at der tages hensyn til varmeakkumuleringen i konstruktionerne på en meget summarisk måde. Der er i de foretagne beregninger forudsat følgende akkumuleringsfaktorer (jvf. EFB-metoden):

Opvarmede rum med lette gulve	0.55
Opvarmede rum med tunge gulve	0.45
Kælderrum	0.45

De økonomiske omkostninger er oplyst af bygherren* og anlægsenergiforbruget er beregnet på grundlag af tegningsmateriale.

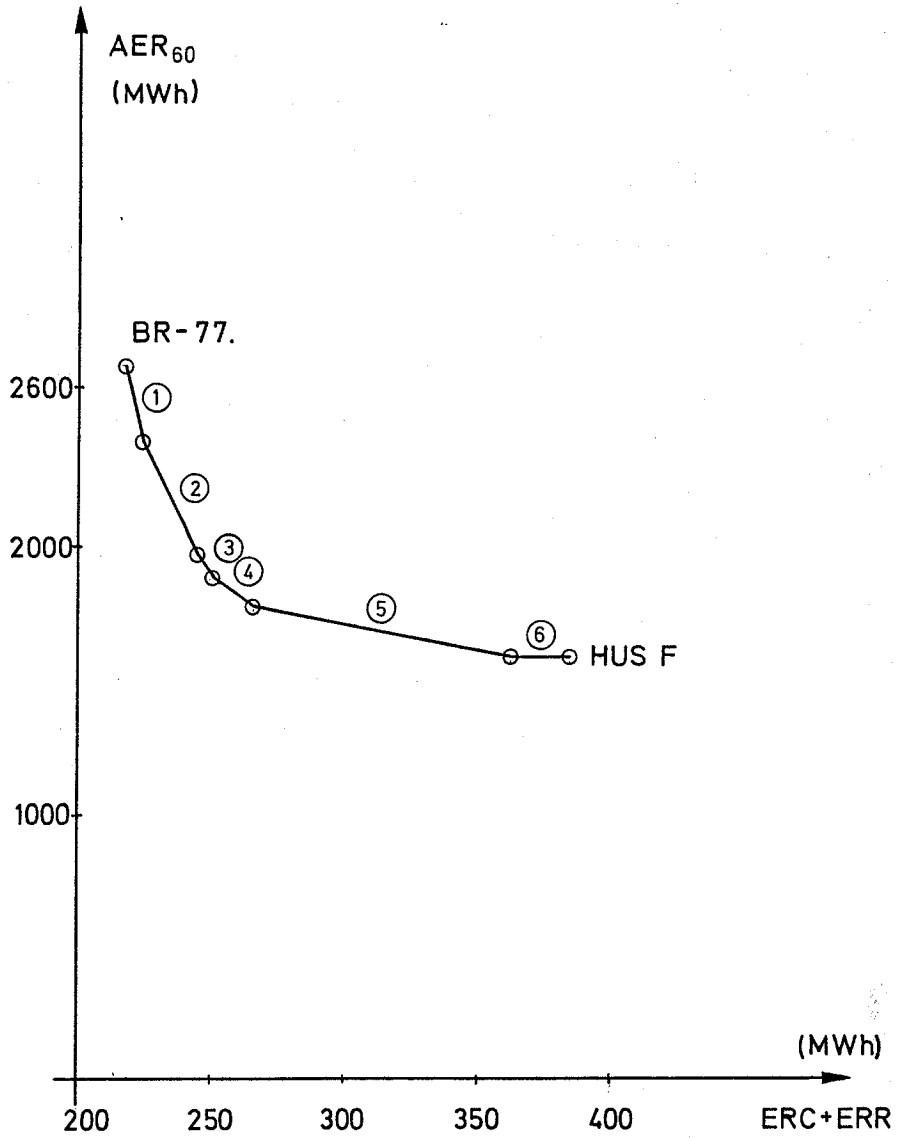
Med en nyttevirkning på opvarmningen på 0.8 og elforbrug til drift af foranstaltningerne, som angivet i tidligere afsnit, fås værdier for ESO som angivet i tabel 9.5.2.

* Oplysningerne blev givet på grundlag af foreløbige budgetter, men er dog korrigeret for atypiske omkostninger til f.eks. udvikling af nye bygningselementer.



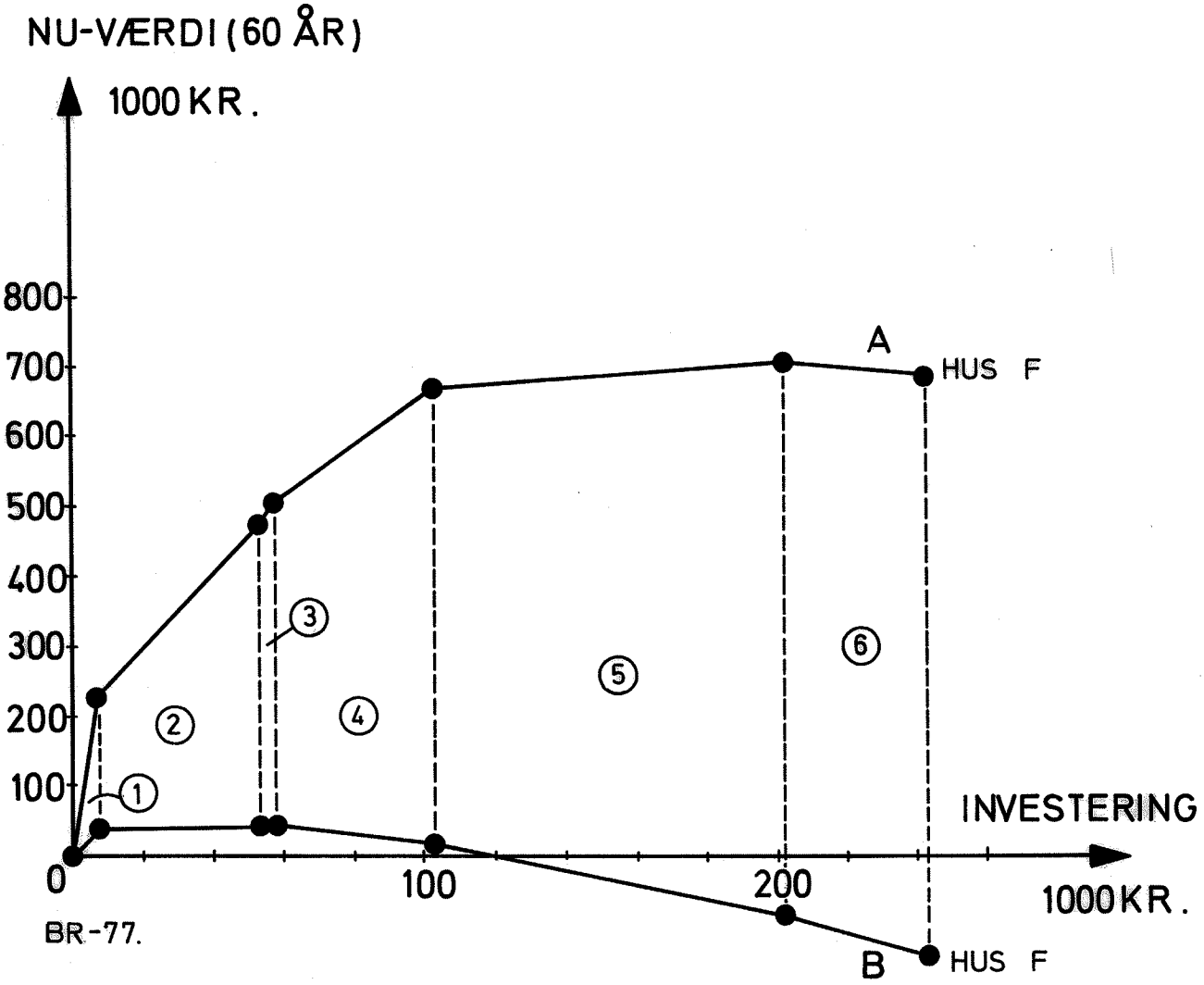
Figur 9.5.2:

Marginalkurver for foranstaltningerne i tabel 9.5.1 på grundlag af nuværdien. De enkelte foranstaltningers levetider forudsættes som angivet i tabel 9.5.2. Nuværdiberegning [79.7].
Kurve A: "Nationaløkonomisk analyse": energipris 12 øre/kWh, kalkulationsrente 16% p.a., inflation 11% p.a., energiprisstigning 16% p.a., vedligeholdelse = 0, ingen fradrag eller tilskud.
Kurve B: "Privatøkonomisk analyse": energipris 17 øre/kWh, kalkulationsrente 20% p.a., inflation 11% p.a., energiprisstigning 16% p.a., vedligeholdelse = 0, fradrag: marginalskat 40%, tilskud 20%.



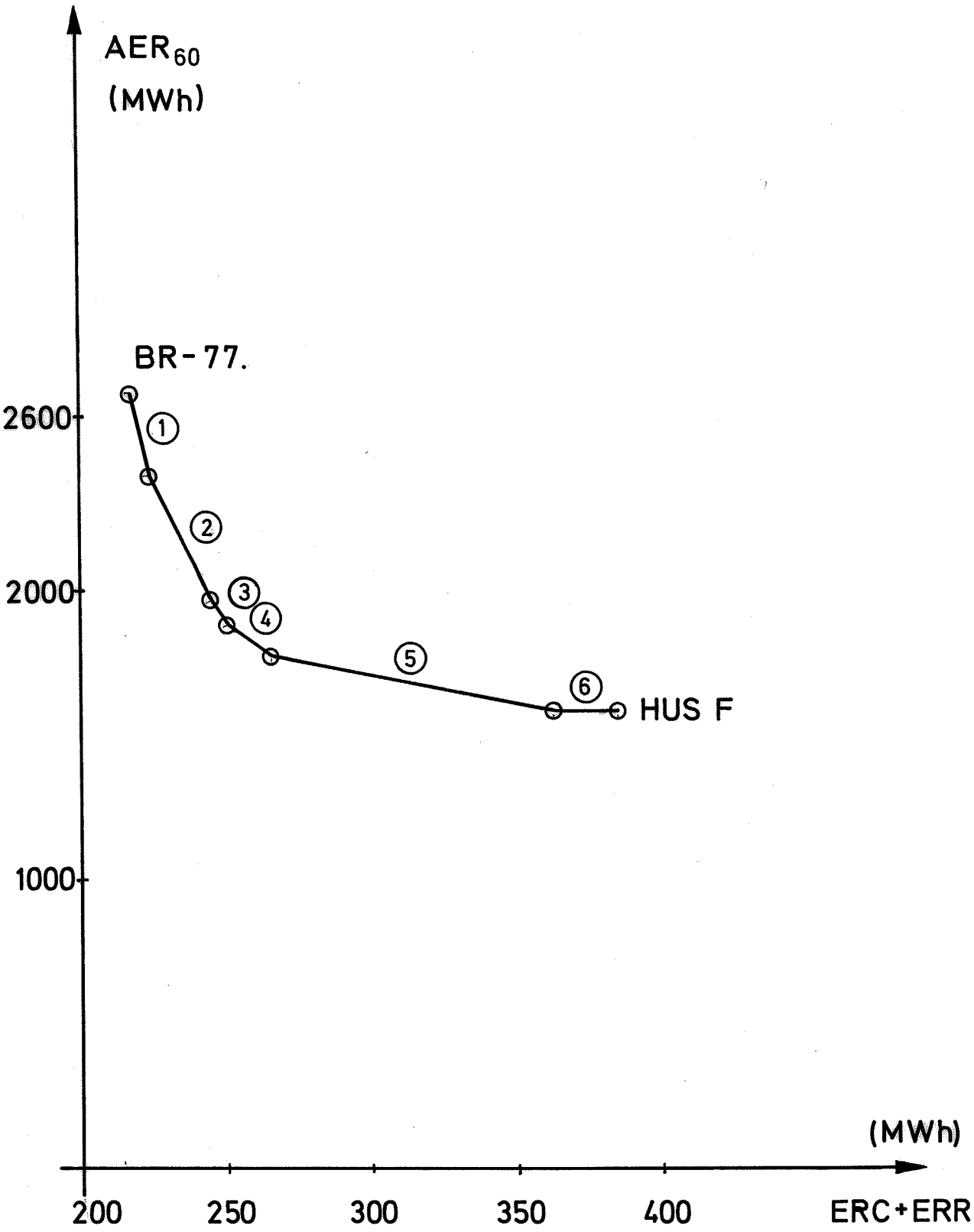
Figur 9.5.1:

Marginalkurven for foranstaltningerne i tabel 9.5.1 på grundlag af AE_{60}-værdier. De enkelte foranstaltningers levetid forudsættes som angivet i tabel 9.5.2.



Figur 9.5.2:

Marginalkurver for foranstaltningerne i tabel 9.5.1 på grundlag af nuværdien. De enkelte foranstaltningers levetider forudsættes som angivet i tabel 9.5.2. Nuværdiberegning [79.7].
Kurve A: "Nationaløkonomisk analyse": energipris 12 øre/kWh, kalkulationsrente 16% p.a., inflation 11% p.a., energiprisstigning 16% p.a., vedligeholdelse = 0, ingen fradrag eller tilskud.
Kurve B: "Privatøkonomisk analyse": energipris 17 øre/kWh, kalkulationsrente 20% p.a., inflation 11% p.a., energiprisstigning 16% p.a., vedligeholdelse = 0, fradrag: marginalskat 40%, tilskud 20%.



Figur 9.5.1:

Marginalkurven for foranstaltningerne i tabel 9.5.1 på grundlag af AE_{60}-værdier. De enkelte foranstaltningers levetid forudsættes som angivet i tabel 9.5.2.

Af figur 9.5.1 og 9.5.2 ses, at der findes forskellige grænseværdier for de "nationaløkonomiske" kurver og for energibaserede kurver, men at grænseværdien for den privatøkonomiske beregning næsten er lige så stor som for den energibaserede beregning.

Grænseværdien for omfanget af de energibesparende foranstaltninger ligger på det niveau, som det aktuelle Hus-F har, dog i de økonomiske analyser, figur 9.5.2, allerede ved 3-lagsruden henholdsvis solfangeranlægget.

9.6 Energibesparelser i den ældre boligmasse

Som led i en afløsningsopgave for eksamen er der i kurset "Konstruktion-Teknologi-Bygningskunst" ved Instituttet for Husbygning i foråret 1979 gennenført en energianalyse af mulighederne for energibesparende foranstaltninger i en Nørrebroejendom (6 etager). De studerende beregnede i denne opgave effekten af 18 forskellige foranstaltninger, dels ved hjælp af merværdimetoden og dels som det akkumulerede energiforbrug AES_{20}. Forudsætninger for beregningerne er givet i [79.7] og er med hensyn til det energimæssige praktisk taget identiske med forudsætningerne i nærværende rapport. De økonomiske forudsætninger er desuden givet i tabel 9.6.1.

De 18 foranstaltninger, hvoraf nogle udelukker hinanden, er nævnt i tabel 9.6.2. De sidste 6 er kombinationer af de første 12 og er beregnet som kombinerede foranstaltninger og ikke blot ved addition af de enkelte foranstaltningers virkninger. Kombinationerne er udvalgt på basis af en indledende beregning af tilbagebetalingstider for 1-12. Marginalkurven for AES_{20} er optegnet i figur 9.6.1 som funktion af (ERC + ERR). Der er ved marginalkurvens fastlæggelse kun taget hensyn til de mest effektive (højeste) værdier af AES_{20}.

	A	B
Energipris	13.5 øre/kWh	13.5 øre/kWh
Energiprisstigning	1980-1990 12% 1990-2000 16%	10%
Inflation	8% p.a.	8%
Kalkulationsrente	14% p.a.	18%
Tilskud til foranst.	som fradrag	ingen
Skattefordel medregn.	ja	nej
Marginalskatte-%	45%	-
Vedligeholdelsesrate	8% p.a.	10%

Tabel 9.6.1:

Forudsætninger for nuværdiberegningerne i figur 9.6.2.

1	Isolering af loft og kælderloft
2	Udvendig isolering af facaden
3	Indvendig isolering af facaden
4	Tætning af vinduer og montering af forsatsvinduer
5	Udskiftning af vinduer med to-lags termorudevinduer
6	Tætning af vinduer og montering af isolerende skodder
7	Tætning af vinduer og installering af temperaturregu-leringsautomatik
8	Tætning af vinduer og installering af ventilation + genvinding
9	Erstatning af oliefyrsanlæg med varmepumpeanlæg (luft)
10	Installering af solfanger og elpatron til brugsvand
11	Udskiftning af oliefyrsanlæg og montering af radia-tortermostatventiler
12	Udskiftning af slagterens kølemaskine til kølerummet med en vandkølet kølemaskine, der forvarmer central-varmevandet
I	4 + 11 + 12
II	1 + 2
III	1 + 4 + 7 + 11 + 12
IV	4 + 9 + 10
V	7 + 8
VI	4 + 11 + 12

Tabel 9.6.2:

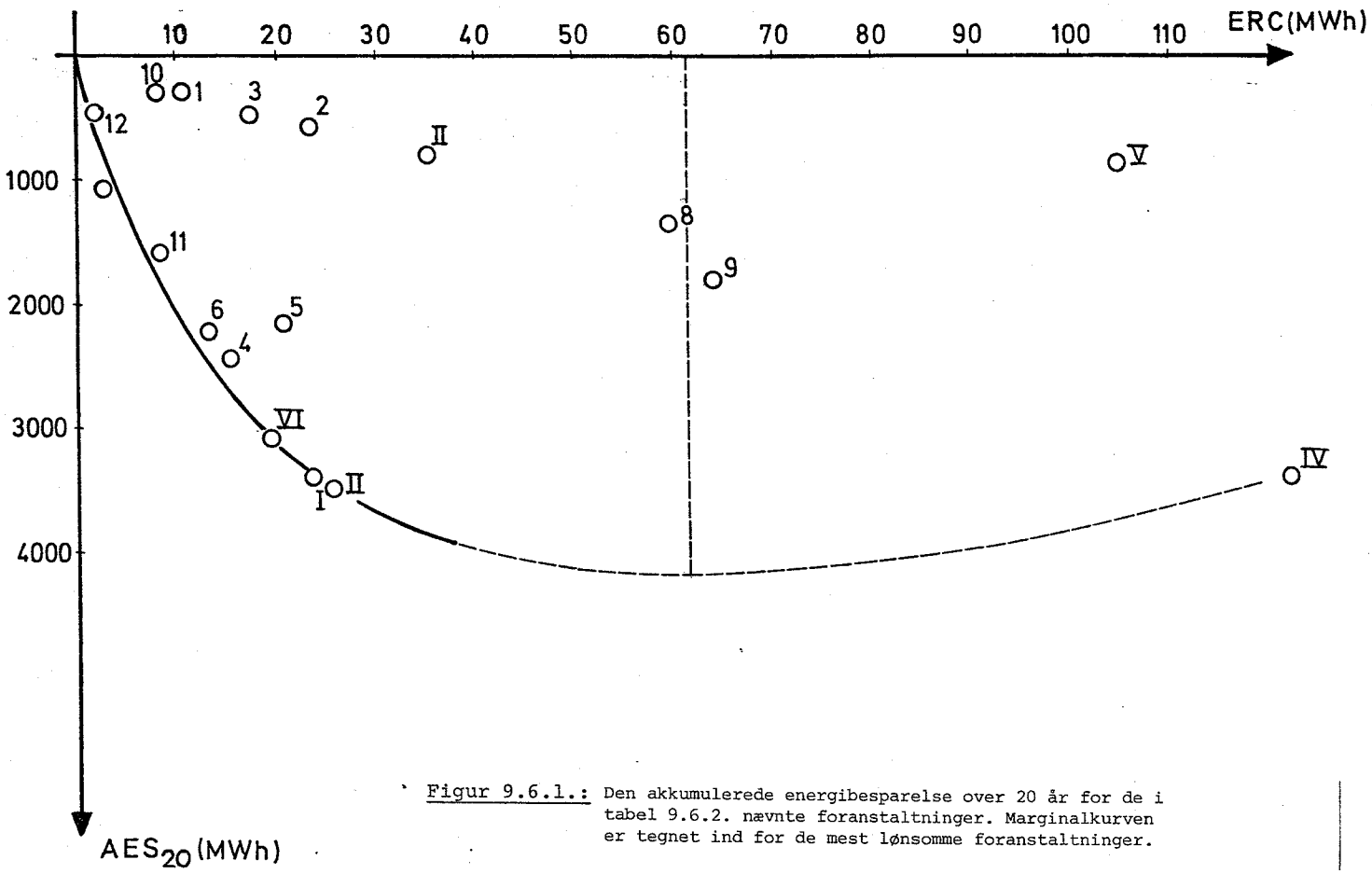
De i opgaven behandlede foranstaltninger. Detaljer er beskrevet i [79.7].

Antages det stiplede forløb at gælde, svarer det til en grænseværdi (min. AER_{20}) for ERC på 60-70 MWH eller 75-85 kWh/m^2 bruttoetageareal.
Der viste sig i øvrigt omtrent den normale rækkefølge med hensyn til tilbagebetalingstiderne for foranstaltningerne 1-12, når de vurderes efter lønsomhed (der kan f.eks. sammenlignes med resultaterne i [77.0]). Forholdet mellem den energimæssige tilbagebetalingstid og den økonomiske ligger i de fleste tilfælde mellem 20 og 50, men i foranstaltning 5 og 6 er dette forhold så højt som 90 og 120. Dette kan skyldes de relativt "uproduktive" udgifter til stilladser, der er i forbindelse med den slags foranstaltninger, når man ser bort fra de fejl, der kan være indført gennem de valgte forudsætninger.

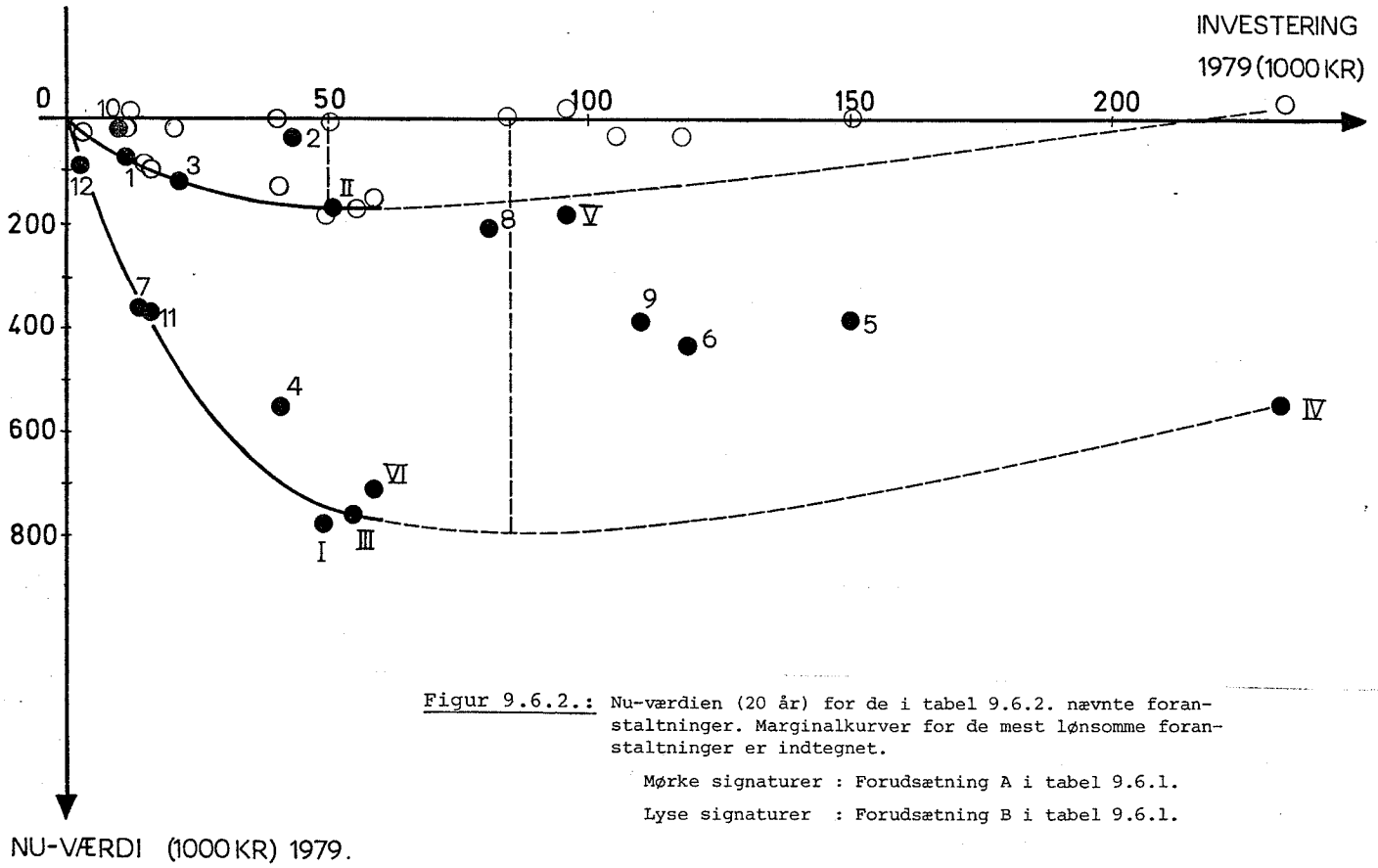
En anden afvigelse er der for foranstaltning 1, hvor det nævnte forhold kun er 12 år. Dette skyldes utvivlsomt det relativt store materialeforbrug i forhold til arbejdskraftforbruget ved denne foranstaltning. Tilbagebetalingstiderne er givet i tabel 9.6.3.
I figur 9.6.2 er marginalkurverne for merværdien tegnet op efter beregninger, der er baseret på antagelserne i tabel 9.6.1. Forskellen mellem de økonomiske betragtninger og de rent energimæssige kan aflæses ved en sammenligning af figurerne 9.6.1 og 9.6.2.
A er identisk med de i opgaven benyttede forudsætninger. Med hensyn til beregningsmetode henvises der til [79.7].

B er et alternativ til A, som tager højde for en mere pessimistisk udvikling set fra 1979.

Som det ses, er marginalkurvernes form alle af samme art, som man kunne forvente af de samstemmende tilbagebetalingstider, men grænseværd-



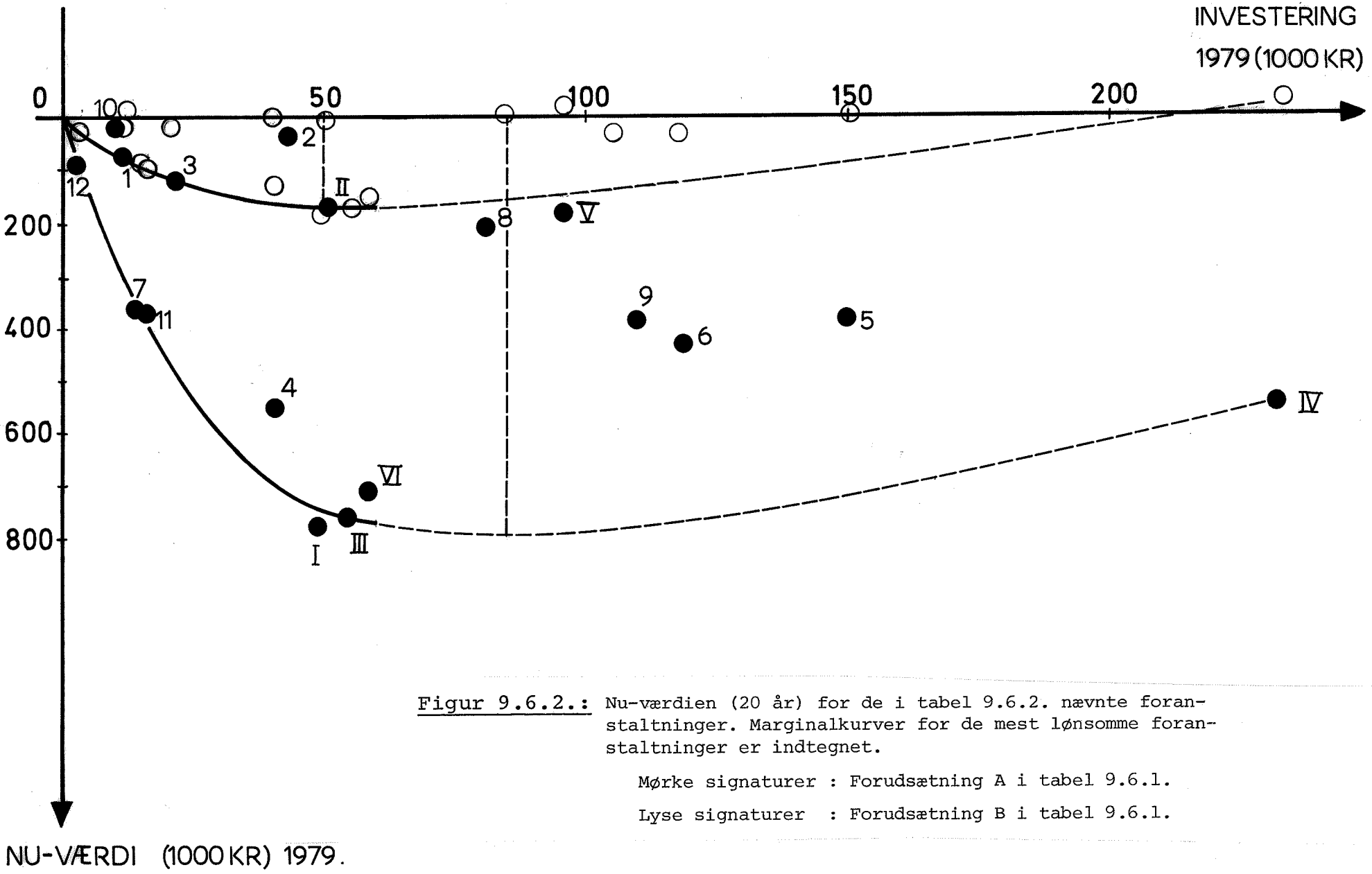
Figur 9.6.1.: Den akkumulerede energibesparelse over 20 år for de i tabel 9.6.2. nævnte foranstaltninger. Marginalkurven er tegnet ind for de mest lønsomme foranstaltninger.



Figur 9.6.2.: Nu-værdien (20 år) for de i tabel 9.6.2. nævnte foranstaltninger. Marginalkurver for de mest lønsomme foranstaltninger er indtegnet.

Mørke signaturer : Forudsætning A i tabel 9.6.1.

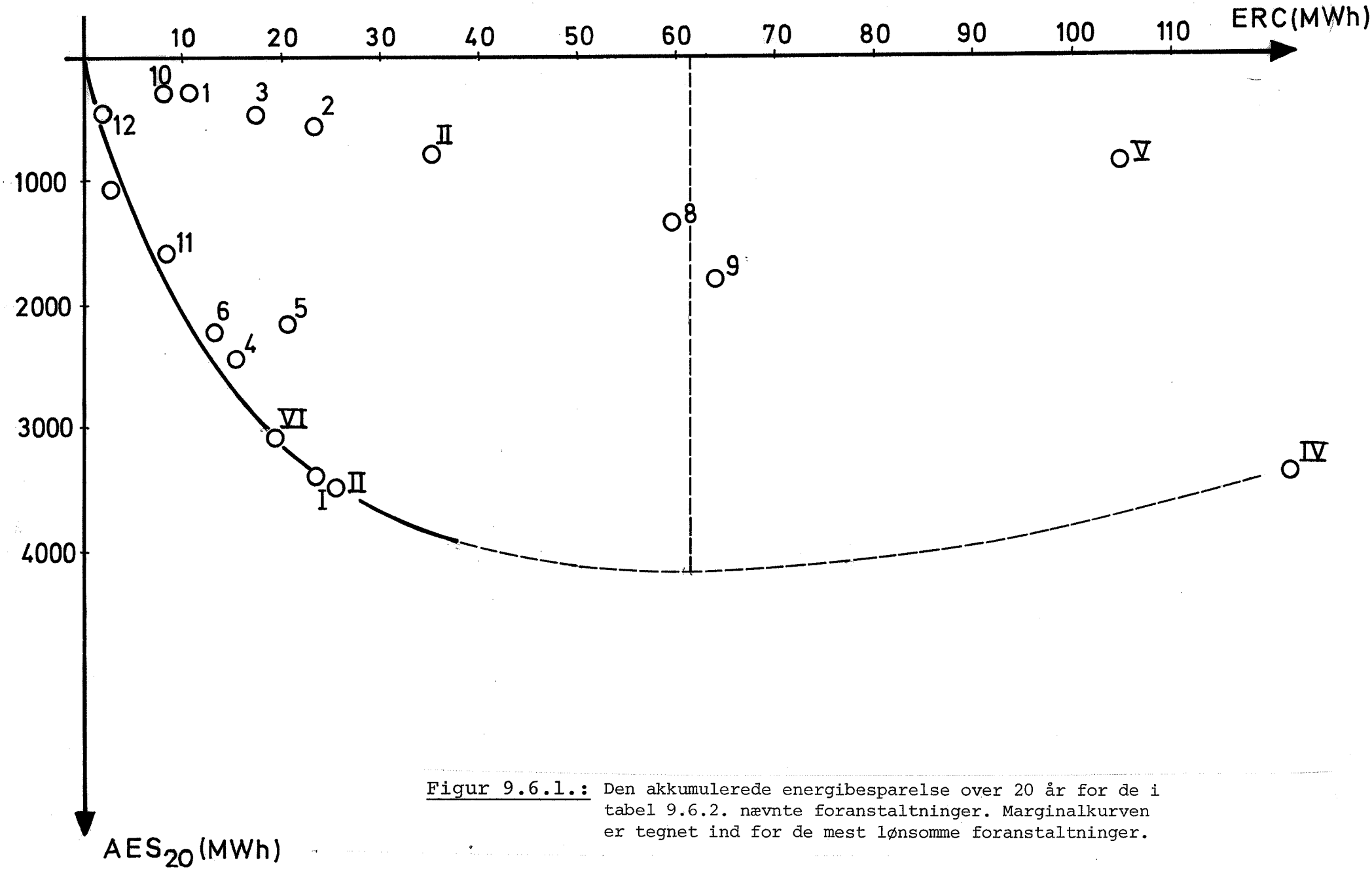
Lyse signaturer : Forudsætning B i tabel 9.6.1.



Figur 9.6.2.: Nu-værdien (20 år) for de i tabel 9.6.2. nævnte foranstaltninger. Marginalkurver for de mest lønsomme foranstaltninger er indtegnet.

Mørke signaturer : Forudsætning A i tabel 9.6.1.

Lyse signaturer : Forudsætning B i tabel 9.6.1.



Figur 9.6.1.: Den akkumulerede energibesparelse over 20 år for de i tabel 9.6.2. nævnte foranstaltninger. Marginalkurven er tegnet ind for de mest lønsomme foranstaltninger.

dien for "investeringen" er noget "højere" i figur 9.6.1 end nogle af dem i figur 9.6.2 (sammenlignet på omfanget af foranstaltningerne).

9.7 Grænseværdier i praksis

I de foregående afsnit, 9.1 - 9.6, er der forsøgt at belyse grænseværdierne for energibesparende aktiviteter ud fra det akkumulerede energiforbrug.

Alle disse grænseværdier er bestemt ved hjælp af mere eller mindre forenklede beregningsmetoder.

Det viser sig imidlertid, at de fleste steder, hvor man måler effekten af forskellige energibesparende foranstlatninger i gennemførte fuldskalaforsøg, som f.eks. DTH's 0-energihus, Lavenergihusene i Hjortekær, Efterisoleringsprojekter af ældre bygninger (SBI), er resultatet væsentligt mindre end forud beregnet.

Det skyldes naturligvis, at der ofte er ret mange faktorer, der skal gøres forudsætninger om ved en beregning, og som ved en eventuel afvigelse næsten altid vil virke i ugunstig retning. Sådanne faktorer er typiske udeklimavariationer, for dårligt udført håndværkerarbejde eller svigt i maskineri. En del af forklaringen ligger i, at den anvendte teknik endnu er ny og ukendt for mange, men forklaringen skal nok også søges i en manglende hensyntagen til statistiske afvigelsers ensidige indflydelse på besparelseseffekten.

Indtil videre må man ud fra erfaringer fra målinger i praksis regne med en reduceret besparelseseffekt og dermed også med en reduceret grænseværdi i praksis.

Betragtes dette sammen med de endnu få erfaringer med levetiden af foranstaltningerne, kan man af de foregående afsnit konkludere, at man i praksis allerede er i nærheden af grænseværdierne, når

Foranstaltning nr.:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0.77	0.76	0.56	0.13	0.20	0.12	0.05	0.01	0.68	0.56	0.11	0.09
9.9	17.2	10.9	4.5	18.5	14.2	2.5	19.0	14.2	20.3	2.5	1.7

Tabel 9.6.3:

Tilbagebetalingstider i år for de første 12 foranstaltninger, jvf. tabel 9.6.2. Øverste række er de energibaserede og nederste række de økonomiske tilbagebetalingstider.

det gælder lavenergihuse, isoleringstykkelser af visse isoleringsmaterialer til væg/dækkonstruktioner, integrerede solvarmeanlæg og krydsvarmevekslere.

De sidste undersøgte tilfælde har imidlertid også vist, at privatøkonomiske beregninger baseret på nuværdien kun giver lidt lavere grænseværdier end den rent energimæssige betragtning, og i store træk giver samme forløb. D.v.s. at de tilskud og skattefordele, der er forudsat gældende i de privatøkonomiske betragtninger, ville ved anvendelsen af en nuværdiberegning give sikkerhed for, at energien blev anvendt omtrent efter samme mønster, som hvis energiressourcebetragtninger blev benyttet.

Der kunne tænkes, at visse af de angivne forudsætninger ændredes så kraftigt, f.eks. at energiprisstigning ville fordobles, at den økonomiske analyse ville give betydeligt større grænseværdier end en ren energibaseret beregning.

De energimæssige grænseværdier er derfor ikke øvre grænser for, hvad det kan betale sig at foretage af energibesparende foranstaltninger under alle forhold, men alene under forudsætning af et minimumsforbrug af energi.

Grænseværdierne kan selvfølgelig øges, hvis anlægsenergiforbruget for foranstaltningerne nedsættes generelt, som der gives forslag til f.eks. i [79.4].

Litteraturliste

[77.0] Jørgen S.R. Nielsen m.fl:
"ENERGIBESPARENDE FORANSTALTNINGER I STØRRE BYGNINGER"
SBI-rapport 106:1977
Danmark 1977.

[79.0] N.H. Rasmussen:
"LIGE I SOLEN..."
Kursusarbejde, Instituttet for Husbygning,DTH,
Danmark 1979

[79.1] Anker Nielsen:
"BEREGNING AF BYGNINGERS ENERGIFORBRUG, EFB1, BRUGERVEJLEDNING"
Intern rapport 79-10, Laboratoriet for Varmeisolering, DTH,
Danmark 1979

[79.2] "6 LAVENERGIHUSE I HJORTEKÆR"
Meddelelse nr. 83, Laboratoriet for Varmeisolering, DTH,
Danmark 1979

[79.3] Bent Elbek:
"ENERGIANALYSE AF ENERGISYSTEMER"
VVS nr. 9, 1979, p. 29-33
Danmark 1979

[79.4] H. Lawaetz og S. Furbo:
"ENERGIFORBRUG TIL FREMSTILLING AF SOLVARMEANLÆG"
Meddelelse nr. 87, Laboratoriet for Varmeisolering, DTH,
Danmark 1979

[79.5] Sigurd Andersen:
"DET AKKUMULEREDE ENERGIFORBRUG TIL FREMSTILLING AF BYGGEMATERIALER"
Rapport nr. 134, Instituttet for Husbygning, DTH,
Danmark 1979

[79.6] Anker Nielsen:
"BRUGERVEJLEDNING FOR EFB2 OG EFB3"
Intern rapport 79-14, Laboratoriet for Varmeisolering, DTH,
Danmark 1979

[79.7] Sigurd Andersen:
"KONSTRUKTION-TEKNOLOGI-BYGNINGSKUNST, NOTER 6510 B." + opgave 1979:4.
Instituttet for Husbygning, DTH,
Danmark 1979

10. KONKLUSION

Undersøgelsen, der er beskrevet i denne rapport samt i rapporterne 134, 135 og 136, omfatter en energianalyse af energiforbruget i forbindelse med fremstilling af boliger.

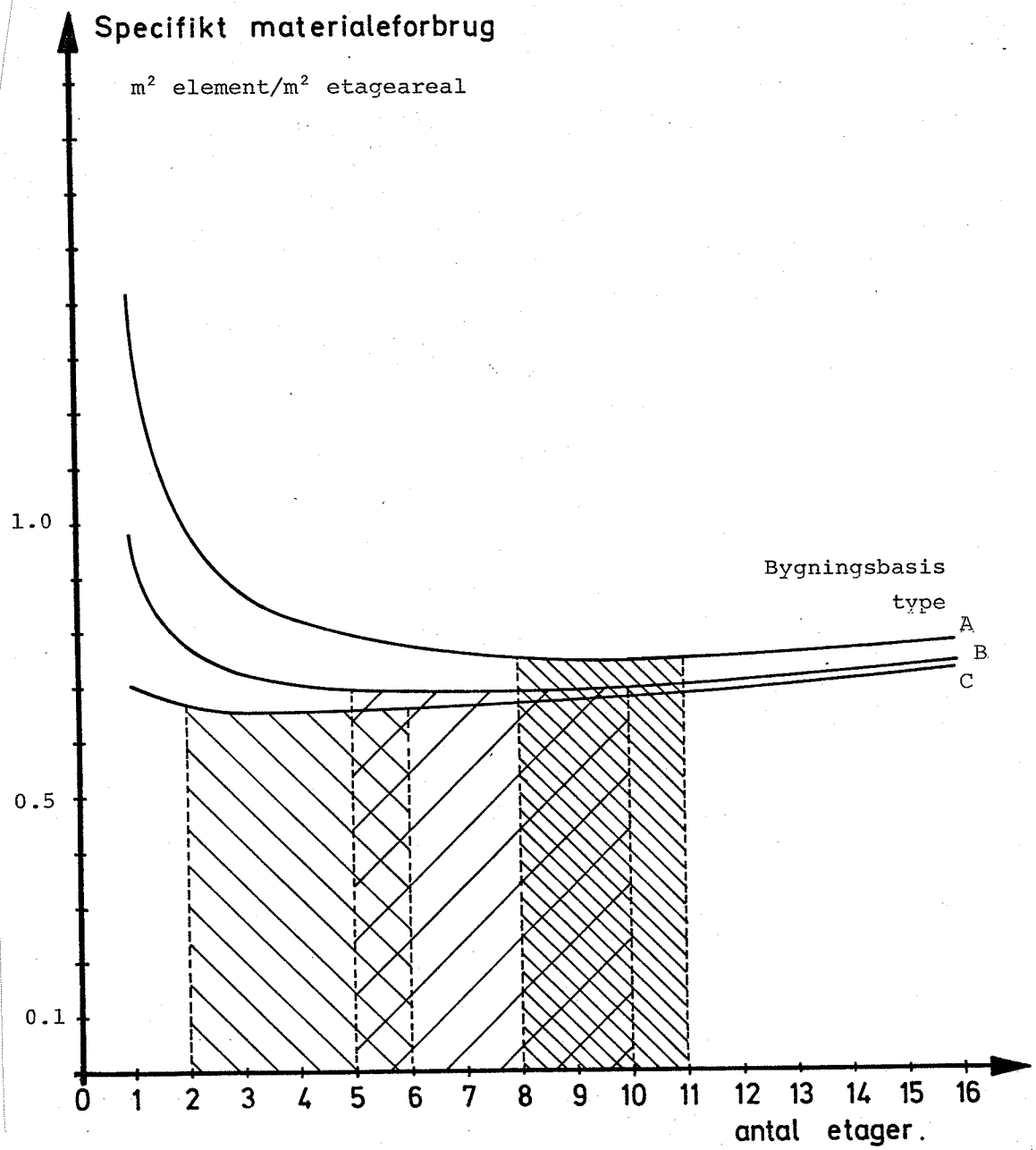
Energianalyser kan gennemføres med mere eller mindre skarpt defineret metodik og større eller mindre omfang. Den valgte metodik har som grundlag en global ressourcemæssig betragtningsmåde centreret om danske forhold og er med visse ændringer sammenfaldende med IFIAS-konventionen, [74.0].

Der er udviklet et nyt grundlag for vurdering af sammenhængen mellem driftsenergiforbrug, energiforbrug til fremstilling af objekter og det totale energiforbrug inden for objekternes levetid. Disse metoder, som er beskrevet i afsnit 0.3, kaldes "forbrugsmetoden", "besparelsesmetoden" og "marginalmetoden" og er specielt velegnede til at vurdere alternative løsninger på grundlag af det totale energiforbrug over længere perioder.

Energiforbruget til fremstilling af boliger, anlægsenergiforbruget, er inddelt i en række delforbrug, der er resultatet af forskellige aktiviteter (se figur 10.1).

Disse delforbrug er behandlet enkeltvis, og der er udviklet et beregningsgrundlag for hvert delforbrug. Der kan specielt fremhæves en omfattende dataindsamling samt et litteraturstudium til fastlæggelse af de specifikke energiforbrug til fremstilling af byggematerialer (rapport 134) og til fastlæggelse af specifikke energiforbrug ved arbejdet på byggepladsen (rapport 135).

Det viser sig, at det dominerende delforbrug skyldes materialefremstillingen til råhuset, men at anlægsenergiforbruget over lange perioder tillige



Figur 10.2:

Sammenhæng mellem materialeforbrug og etageantal for 32 enhedsboliger, bygget sammen sideværts i forskellige højder. Gælder for skivebygninger i beton.

A : Fuld kælder, uudnyttet.
B : Krybekælder eller ingen kælder.
C : Fuld kælder, udnyttet.

påvirkes kraftigt af anlægsenergiforbruget til VVS når der er tale om lavenergihuse.

Delforbrugene er akkumuleret efter to retningslinier:

a) Anlægsenergiforbruget akkumuleres frem til ibrugtagningstidspunktet for boligen, ERC_o.

b) Anlægsenergiforbruget akkumuleres over boligens levetid (i denne rapport 100 år), ERC_{100}.

Den sidstnævnte akkumulation tager hensyn til forskellige bygningsdeles levetider og de nødvendige udskiftninger af bygningsdele inden for boligens levetid.

Det akkumulerede anlægsenergiforbrug er for normale materialevalg bestemt med en usikkerhed som følger:

a) 7-10% på det samlede resultat.

og for det akkumulerede energiforbrug til drift og anlæg :

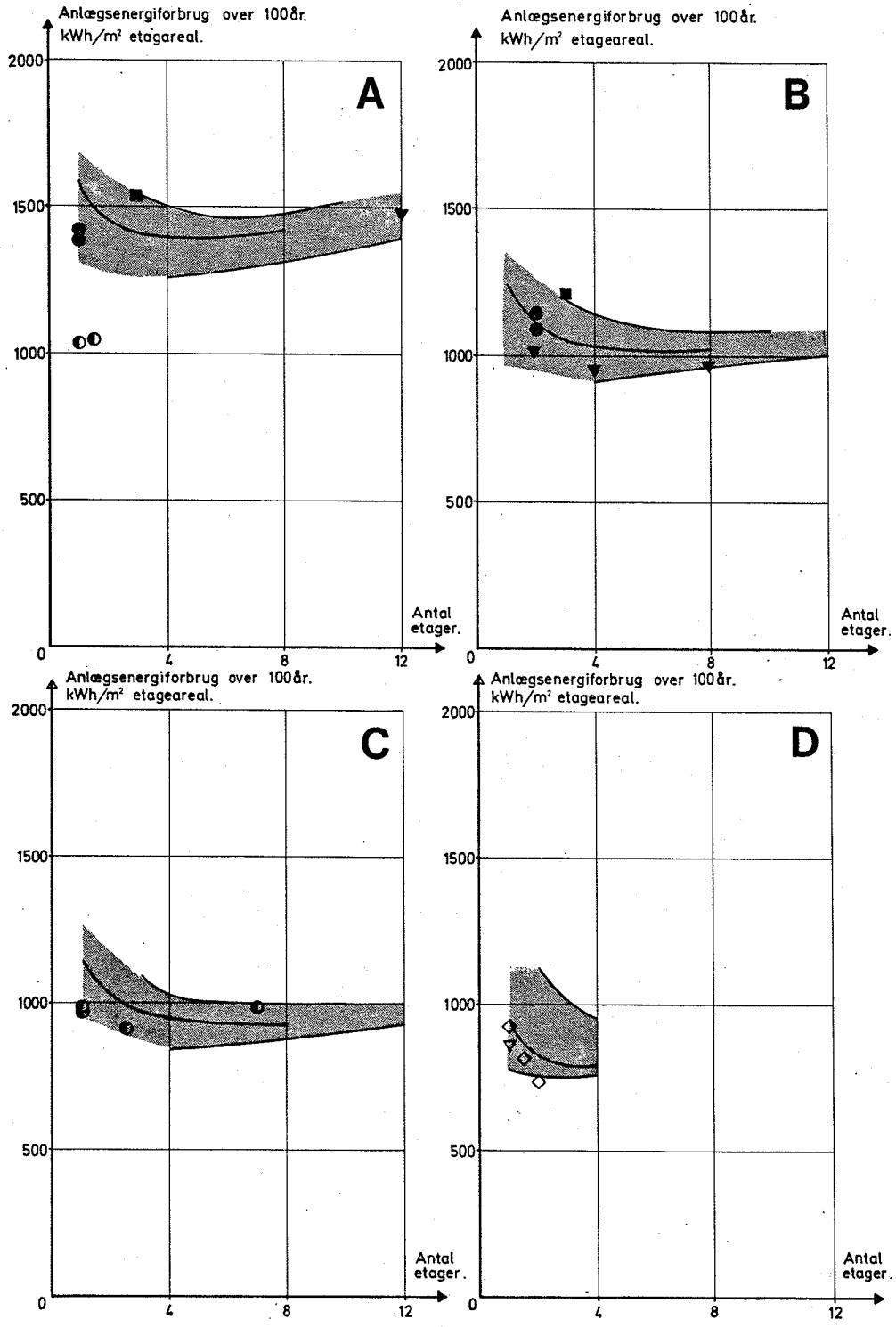
b) >50% på det samlede resultat, dog 11-15% ved indbyrdes sammenligninger af anlægsenergiforbrugene.

Der er i analysen specielt focuseret på anlægsenergiforbruget til boligens råhuskonstruktioner. Der er undersøgt forskellige faktorers indflydelse på anlægsenergiforbruget, nemlig:

- Bygningsform
- Materialevalg, samt
- Konstruktionssystem og -metode.

Disse undersøgelser er dels foretaget ved modelberegninger og dels ved analyser af eksisterende bygninger.

Bygningsform Bygningsformen - bygningens ydre geometri - har en væsentlig indflydelse på materialeforbruget og derigennem også på anlægsenergiforbruget. Det viser sig, at materialeforbrugets afhængighed af bygningsformen med tilnærmelse kan benyttes til at beskrive anlægsenergiforbruget, når materialevalget er uforandret. Det er simple sammenhænge mellem overflader,



Materialevalg : A: Teglmurværk + jernbeton eller tømmer

B: Betonelementbyggeri med betonfacader

C: Beton i bærende vægge og dæk samt lette facader

D: Lette trækonstruktioner, eventuelt afstivet af betonvægge.

Figur 10.3:

Anlægsenergiforbrug over boligens levetid, ERC_{100}, til de primære konstruktioner. Niveauerne er givet som de grå områder, og resultaterne for de analyserede byggerier er indtegnet.

konstruktionstykkelser og etageantal, som giver sådanne modeller (jvf. figur 10.2).

Materialevalg

Disse modeller er benyttet til at tydeliggøre materialevalgets betydning for anlægsenergiforbruget til boligens råhuskonstruktioner.

Ca. 25 byggerier er analyseret, og deres anlægsenergiforbrug er bestemt. Som det fremgår af figur 10.3, er materialevalgets indflydelse ret markant, og der kan groft angives følgende intervaller for anlægsenergiforbrugene til råhuskonstruktionerne inden for boligens levetid:

1250-1600 $\frac{kWh}{m^2 etageareal}$: Stålkonstruktioner. Murværk i tegl kombineret med jernbetondæk.

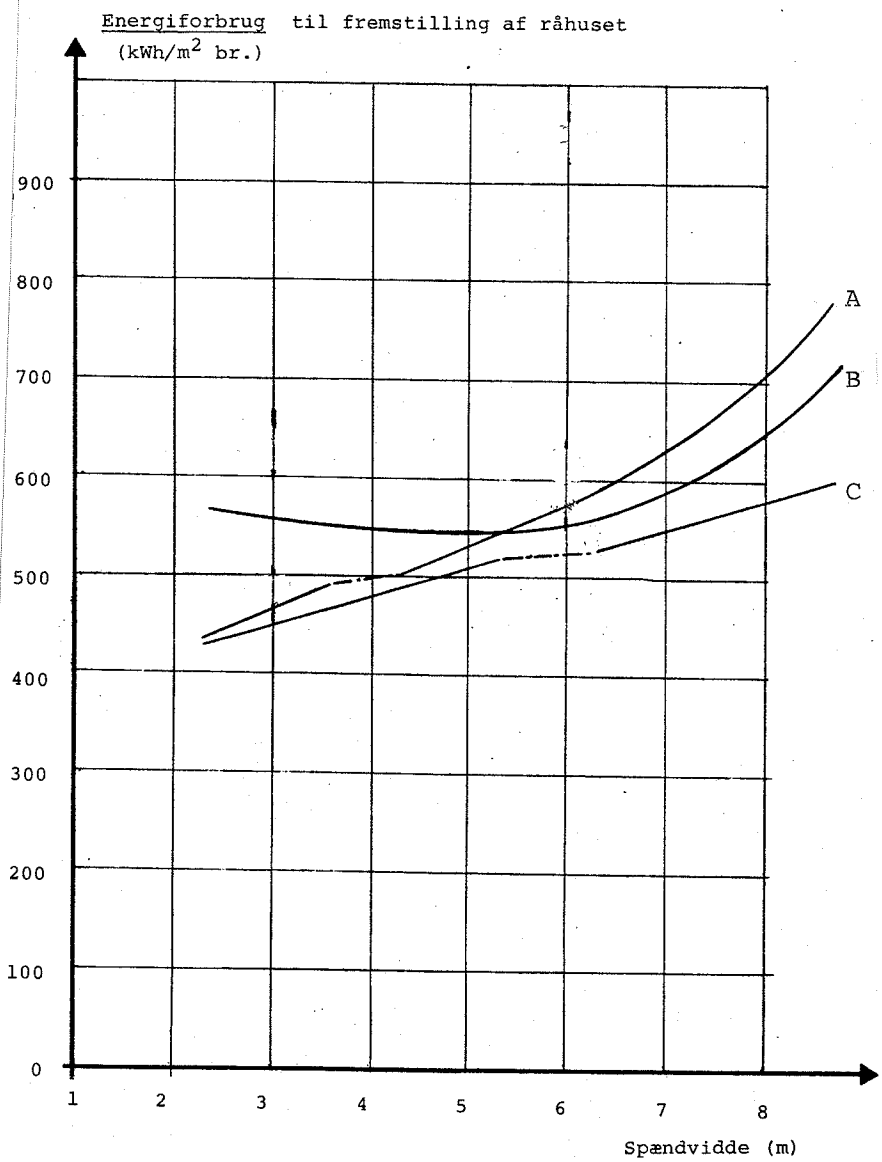
950-1250 $\frac{kWh}{m^2 etageareal}$: Tunge jernbetonkonstruktioner (præfab eller in-situ) helt eller delvis med betonfacader.

850-1150 $\frac{kWh}{m^2 etageareal}$: Kombination af bærende jernbetonkonstruktion med lette sekundære træskeletkonstruktioner.

750-1050 $\frac{kWh}{m^2 etageareal}$: Overvejende lette, bærende trækonstruktioner, eventuelt afstivet af betonskiver.

Derudover er der anlægsenergiforbrug til en række sekundære bygningsdele og vedligeholdelse, som normalt har mindre betydning i forhold til boligens samlede anlægsenergiforbrug.

Anlægsenergiforbruget til VVS kan dog for nyudviklede opvarmningssystemer blive meget betydeligt, når levetiden tages i betragtning og bliver dominerende i totalvurderingen.



A : Massivt, kantforstærket søjle-pladesystem.

B : Traditionelt skivesystem.

C : Isostatribbedæk, søjleunderstøttet.

Figur 10.4:

Anlægsenergiforbrug ved indflytning, ERC_O, til de primære konstruktioner for forskellige bærende systemer i betonelementer, som funktion af de vandrette konstruktioners spændvidde, se [80.1].

Konstruktionssystem og -metode

I en række modelberegninger (rapport nr. 136) er indflydelsen af fleretagers bygningers konstruktionsudformning undersøgt.

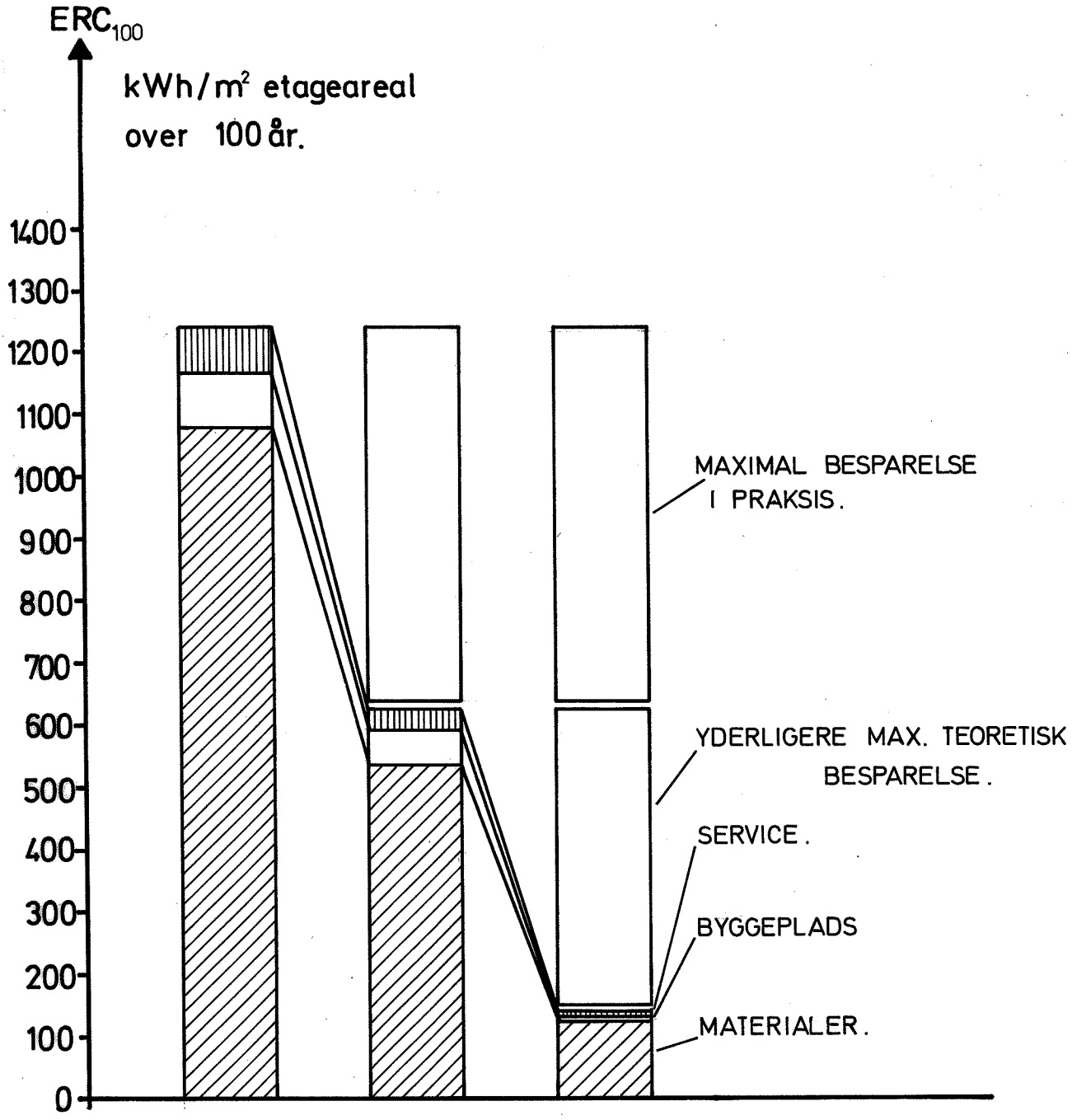
Resultaterne, der kan aflæses af figur 10.4, fortæller, at den optimale af de undersøgte konstruktionsudformninger i beton med hensyn til anlægsenergiforbrug er et søjle-pladesystem med kantforstærkede plader, koncentrerede skiveafstivninger og ret små søjleafstande (3 - 3,6 m). En yderligere optimering kan opnås ved at armere pladefelterne efter isostaterne (se rapport 136).

De potentielle besparelser i anlægsenergiforbrug i forhold til normale skivebygninger med bærende tværvægge er beregnet til 80 kWh/m^2 etageareal. Hvis alle fleretagers boligblokke blev bygget efter dette system, ville besparelsen svare til 3000 tons olie pr.år på landsbasis.
Disse besparelser reduceres, når der også tages hensyn til indflydelsen af konstruktionernes varmeakkumuleringsevne og bygningens driftsenergiforbrug. Reduktionen er dog for normale varmeforbrugsmønstre mindre end de beregnede besparelser.

Teoretiske besparelser i produktionen

En energianalyse, som skildret i det foregående, er tidsafhængig, idet energiforbrugsniveauet i industrien og på byggepladsen hele tiden ændres. Der er derfor forsøgt at bestemme nettoenergiforbrug, hvor energitab er bragt ned på et minimum. Dette er gennemført for de tab, der teoretisk kan genvindes med den teknologi, vi behersker idag samt for det totale energitab. De beregnede værdier MSF* og FSF* betegner da nedre grænseværdier for anlægsenergiforbruget i praksis og i en teoretisk-fysisk beregning. Som det ses af figur 10.5, udgør disse grænseværdier ca. 50, henholdsvis 10-15% af det aktuelle anlægsenergiforbrug, hvilket viser sig med meget lille afvigelse at være tilfældet for alle materialevalg.

* MSF - minimalt specifikt energiforbrug i praksis.
FSF - fysisk-teoretisk minimalt specifikt energiforbrug.



Figur 10.5:

Aktuelt anlægsenergiforbrug, ERC_{100}, sammenlignet med praktiske og teoretiske nedre grænseværdier for ERC_{100} (Grantoften).

Der er således tale om maksimalt opnåelige besparelser ved en forbedret produktionsteknik på ~50% i praksis og ~85% teoretisk.

Statistiske beregninger

Der er som indledning beregnet et gennemsnitligt anlægsenergiforbrug til fremstilling af boliger i Danmark på 1110 kWh/m^2 etagereal.

Analyserne af de ca. 25 byggerier viste en fordeling, som givet i figur 10.6, og det ses, at middelværdien af fordelingen stemmer omtrent med den statistiske gennemsnitsværdi.

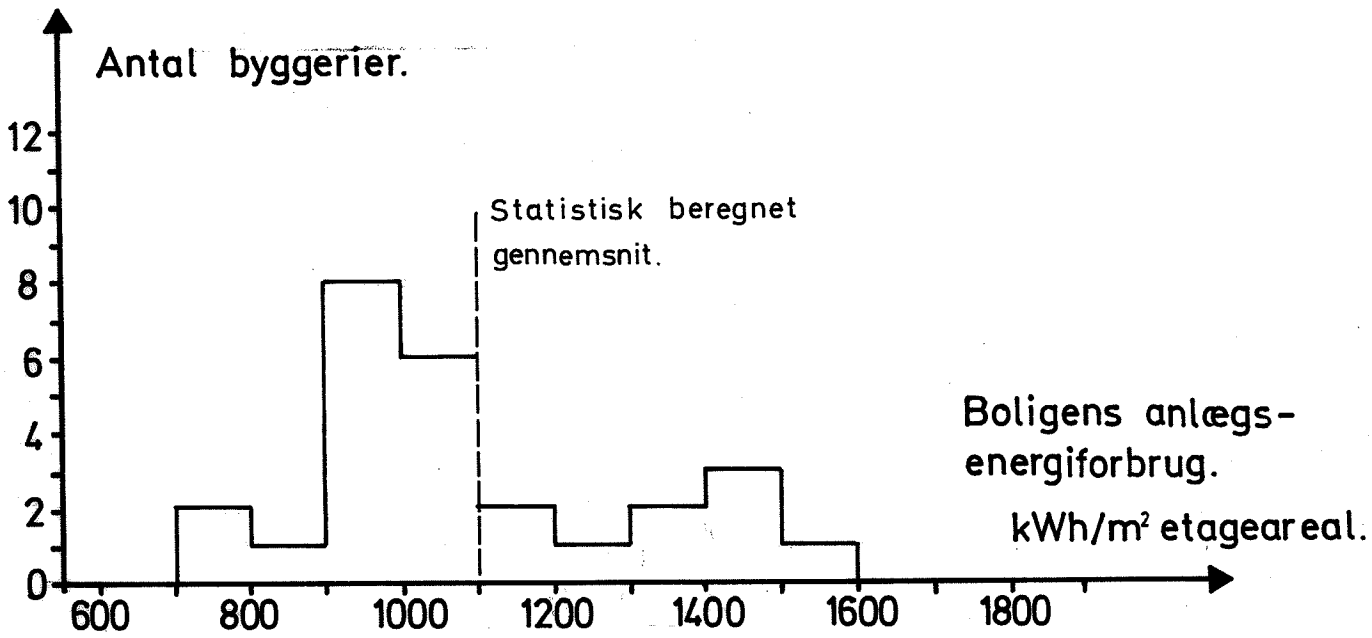
Totalforbrug

Anlægsenergiforbruget kan imidlertid kun med tilnærmelse betragtes isoleret fra driftsenergiforbruget.

Anlægsenergiforbruget og driftsenergiforbruget for boligen som helhed er stærkt sammenknyttede, og det er kun for råhusets bærende dele, at dette med god tilnærmelse kan negligeres, når man vil udtale sig om boligens totale energiforbrug.

Når vores boligstandard i 1978 er så dårlig, at opvarmningsenergiforbruget gennemsnitligt er af størrelsesordenen 220 kWh/m^2 etageareal/år, og det totale driftsenergiforbrug 350 kWh/m^2/år, er det naturligt, at den største indsats med hensyn til energibesparelser lægges på driftssiden.

Der er derfor gennemført en række energianalyser af teoretisk art, der fastlægger grænseniveauer for omfanget af energibesparende foranstaltninger i boligen. Disse grænseniveauer er givet ved, at totalenergiforbruget inden for den forventede levetid bliver minimum. Hertil har de udviklede energianalysemetoder vist sig velegnede. Et eksempel på "marginalmetoden" er vist i figur 10.7.



Figur 10.6:

Fordeling af analyseenergiforbruget ved indflytning, ERC_o, for analyserede boligbyggerier.

Resultatet af disse teoretiske analyser viser, at vi med den isoleringsstandard, der gælder i BR77, endnu er langt fra det optimale. Dette gælder de fleste energibesparende foranstaltninger taget hver for sig.

Man nærmer sig imidlertid grænseniveauet, når en hel række af energibesparende foranstaltninger foretages samtidig, som det f.eks. er gjort i de mest effektive lavenergihuse, vi kender idag. Dette bliver endnu mere udtalt, når beregningerne baseres på faktiske driftsenergibesparelser, som i mange tilfælde er mindre end de teoretisk beregnede.

Der er derfor grund til i fremtidens boliger, der må formodes at have et betydeligt reduceret driftsenergiforbrug, at vurdere boligens samlede energiforbrug altså også anlægsenergiforbruget.

I andre lande, f.eks. u-lande, kan driftsenergiforbruget spille en underordnet rolle i forhold til de ovennævnte forbrug.

Under disse betingelser vil en yderligere reduktion af anlægsenergiforbruget i forhold til de angivne niveauer - kunne opnås ved at anvende lavtforarbejdede materialer, som f.eks. soltørrede lersten, geobeton, jordcementsten, stampede jordvægge eller træ.

Sådanne løsninger synes ikke umiddelbart at kunne indpasses i vores teknologi og krav til isoleringsstandard m.m.

Litteratur

[74.0] "ENERGY ANALYSIS"
IFIAS-Workshop Report, Report No. 6,
Sverige 1974.

[79.0] Sigurd Andersen:
"DET AKKUMULEREDE ENERGIFORBRUG TIL FREMSTILLING AF BYGGEMATERIALER"
Rapport nr. 134, Instituttet for Husbygning,
DTH,
Danmark 1979.

[80.0] Sigurd Andersen:
"ENERGIFORBRUGET PÅ BYGGEPLADSEN"
Rapport nr. 135, Instituttet for Husbygning,
DTH,
Danmark 1980.

[80.1] Sigurd Andersen:
"ISOSTATDÆK"
Rapport nr. 136, Instituttet for Husbygning,
DTH,
Danmark 1980.

BILAG I

GER-værdier:

Et internationalt grundlag for energianalyseberegninger blev i 1974 udformet af en IFIAS*-arbejdsgruppe [74.0]. Resultatet baserer sig i høj grad på en totalenergibetragtning, GER** hvor alle energiforbrug i form af fossilt brændsel eller potentielle energibærere inddrages i energiforbruget til udøvelsen af en given aktivitet.

Områdeafgrænsningen er meget nær den samme, som er givet i afsnit 0.2.3, mens den energimæssige afgrænsning adskiller sig fra den i denne rapport benyttede på tre punkter:

1) Grundlaget for beregning af energiforbrug er brændslets øvre brændværdi.

2) Energiforbruget til produktion af brændslet inddrages også i energiforbruget.

3) Brændsel, som indgår i materialet, betragtes som energiforbrug, skønt det ikke anvendes til frigørelse af energi i normal forstand.

De tre faktorer er i forbindelse med denne rapports emne ting, der er med til at forvirre billedet en smule og er netop af denne grund udeladt.

Som det er nævnt andetsteds, kan energiforbruget til fremstilling af bygninger ikke betragtes uafhængigt af energiforbruget i bygningens driftstid. Det er imidlertid normalt, at driftsenergiforbruget beregnes på grundlag af den nedre*** brændværdi, som er den energimængde, man i praksis kan udnytte. Der er derfor fare for, at man ved at bruge GER-værdier uagtsomt kommer til at sammenligne energiforbrug

---

* International Federation of Institutes for Advanced Studies

** Gross Energy Requirement

*** Den øvre brændværdi betegner den energimængde, der afgives ved fuldstændig forbrænding og afkøling af et brændsel og dets røggasser. I den nedre brændværdi medregnes varmemængden i røggasser og vanddamp ikke.

til fremstilling og drift af bygninger, som i virkeligheden er usammenlignelige. Samme forhold gælder den energimængde, der kræves til produktion af brugsklart brændsel. Dertil kommer, at man i forskellige lande er ret uenige om, hvor meget energi der egentlig kræves til dette, hvilket først og fremmest skyldes brændslets godhed, beliggenhed og transportvej.

Den største urimelighed ligger imidlertid i, at man i visse tilfælde betragter råmaterialerne i en produktion som brændsel og altså energiforbrug.

Man advarer da også i [74.0] specielt mod tilfælde, hvor denne regel er urimelig. Inden for denne rapports emne opstår der imidlertid temmelig mange af sådanne tilfælde, især når det gælder fremstilling af trækonstruktioner eller -materialer. Ofte optræder træ i samme proces både som råmateriale og som brændsel, men det ville være absurd at betragte konstruktionstræ som brændsel.

Urimeligheden bliver måske mere tydelig, når man prøver at udstrække energianalyse til det tidspunkt, hvor materialet kasseres, og hvor en del af det kasserede materiale udnyttes i en affaldsforbrænding. Ved en GER-betragtning ville nyttevirkningen af forbrændingen blive uendelig stor.

En løsning på dette problem gives i [77.0], hvor ethvert materiale tillægges en skrotværdi, SEV*, som fratrækkes GER-værdien, og man betragter da i stedet GER_2 = GER - SEV som den afgørende størrelse.

Skrotværdien kan da enten opstå ved, at det kasserede materiale kan genanvendes, eller ved at det kan udnyttes ved en forbrænding.

Da Søren Alroes arbejde [77.0] ikke er offentlig-

* Scrap Energy Value

gjort, har det ikke været med i de litteraturstudier, der er gennemført i forbindelse med denne rapport, men blev mig rent tilfældigt kendt på et ret sent tidspunkt.

Der er derfor benyttet den oprindelige og enklere betragtningsmåde, hvor: materialets eventuelle indhold af brændsel formodes at kunne udnyttes ved bygningens kassation,
materialet kan genanvendes som skrot, hvor det på kassationstidspunktet tillægges energiforbruget 0.

I de tilfælde, hvor der er brug for at arbejde med GER-værdier, som f.eks. når man vil sammenligne rapportens resultater med andre analyser, kan energiforbrugene, udtrykt i GER-størrelser med rimelig tilnærmelse, findes ved at addere indgåede materialers brændværdi og multiplicere summen med 1.20 (se tabel 2).

Ved fastlæggelse af de indgåede materialers brændværdi må man da i hvert tilfælde gøre op med sig selv, hvilke brændselstyper man vil medregne som potentielle brændsler.

Brændværdier:

Der er i beregningerne benyttet de i tabel 1 nævnte nedre brændværdier (nb).

Konvertering:

Når der skal regnes tilbage fra en energimængde udtrykt ved hjælp af en sekundær energibærers energiværdi, må man tage højde for tabene ved konverteringen af den primære energibærer til den sekundære energibærer.

Oplysninger om disse tab er hentet fra Dansk Kedelforenings og DEFU's årlige opgørelser over energiforbruget i Danmark. Angående elproduktionen er yderligere anvendt Danske Elværkers årsrapport [79.0].

	Rumvægt kg/nm³	nb*	øb*	Δ%
Antracit*	750	8660	9535	10.1
Trækul*	160	7940	8490	6.9
Brunkul*	-	5930	7900	33.0
Stenkul*	750	8500	9400	10.6
Koks*	450	8265	9300	12.5
Gasolie	840	11850	12650	7.0
Heavy Fuel Oil	920	11450	-	-
Råolie	890	11150	11730	5.2
Benzin	750	12150	-	-
Accetylene	1.16	13510	13990	3.6
Metan	0.71	13870	15440	11.1
Propan	1.99	12870	14000	8.8
Kosangas	1.86	12900	13950	8.1
Bygas	-	4400	4880	10.9
Højovnsgas	-	1105	1130	2.2
Kulgas	-	8050	8870	10.2
Koksgas	-	5350	5990	12.0

* nb gælder fugtigt materiale, mens øb gælder tørt materiale.

Tabel 1:

Værdier for øvre og nedre brændværdi for nogle brændselsarter, kWh/ton, delvis efter [76.0].

Følgende multiplikatorer er anvendt (der henvises i øvrigt til [79.1] afsnit 3.1.3 med hensyn til beregning af multiplikator for el):

Elektricitet	2.90
Kraftvarme	1.45
Fjernvarme	1.45
Koks	1.13
Bygas	1.11

Tabel 2.

Energiforbrug til produktion af brændsel:

Energiforbruget til produktion af energi er svært at fastlægge og varierer afhængigt af mange forhold, ikke mindst tiden. Nedenfor er angivet forskellige kilders opgivelser, udtrykt som multiplikator på nettoenergien.

Det ses, at der er nogen afvigelser i angivelserne. [77.0] synes dog at have gjort de grundigste undersøgelser, og det anbefales at benytte disse. I yderste kolonne i tabellen er med [77.0]'s angivelser opført repræsentative GER-multiplikatorer, som er fremkommet som produktet af brændværdimultiplikatorerne fra tabel 1 og merenergimultiplikatorerne fra første kolonne i tabel 2.

Det ses, at en grov tilnærmelsesværdi for GER-multiplikatorerne er 1.20. Usikkerheden ved at bruge denne værdi for alle brændselsarter er formodentlig ikke større end den usikkerhed, der ligger i bestemmelsen af energiforbruget til produktion af brændsel.

GER-værdier kan da udregnes af de i rapporten angivne tal ved at addere de indgåede materialers brændværdi og multiplicere summen med faktor 1.20.

	[77.0]	[74.0]	[74.1]	GER Multiplikator
Fuel oil	1.124		-	1.19
Gas oil	1.144	1.19	1.11	1.22
Benzin	1.168		-	1.26
Naturgas	1.062	1.16		1.17
Bygas	1.144	-	1.23	1.27
Kosangas	1.120	-		1.21
Kul	1.018	1.014	1.047	1.13
Koks	1.018	-	1.136	1.15
Træ*	1.03	-	-	1.30

* Fra [76.0].

Tabel 3:

Merenergiforbruget til fremstilling af energi, udtrykt som råbrændslets bruttoenergiindhold divideret med det færdige brændsels bruttoenergiindhold.

Produktion af objekt

Fremstillingen af materialer og bygninger er processer, hvor anvendelsen af regnskabet over den anvendte energi i mange tilfælde kan ækvivaleres med et økonomisk regnskab. Behandlingen af energiregnskabet er blevet kaldt "enerkonomien", [74.2]. Man kan overføre økonomiske udgifter til analoge størrelser i energiudgift:

1. Råvareressourcer	råvareressourcer.
2. Råvareudgift	energiforbrug til råvareproduktion.
3. Produktionsudgifter	produktionsenergiforbrug.
4. Arbejdsløn	energiforbrug til personale.
5. Transportudgifter	transportenergiforbrug.
6. Administrationsudgifter	energiforbrug til administrationen.
7. Afskrivning	afskrivning af energiforbrug til produktionsapparatet m.m.
8. Ny investering	energiforbrug til nyt produktionsapparat.
9. Miljøudgifter	energiforbrug til mindskning af forurening.

*

Ting, som ikke kan overføres fra en økonomisk betragtning, er f.eks. inflation og renteudgifter, idet energimængden ikke afhænger af konkunktur og diskonto, men er en yderst konservativ størrelse. Det er vel også åbenbart, at man ikke kan gå ud fra, at den samme faktor i økonomi og enerkonomi har samme vægt i en samlet vurdering.

Energiforbruget i forbindelse med en aktivitet vil ikke være følsomt over for udbud og efterspørgsel. Desuden kan det begreb, der populært kaldes profit, ikke gives en analog forklaring i energistørrelser.

* De enkelte begreber defineres nærmere på de næste sider.

I vores samfund er pengeøkonomien i meget høj grad bestemt af den menneskelige arbejdsindsats, idet forholdet mellem prisen på arbejdskraft og ressourcer er vokset til et meget højt niveau. Dette giver en skævhed i sammenligningen mellem økonomien og enerkonomien, men forhindrer ikke, at man kan bruge pengeøkonomiens beregningsmetoder og vurderingsmåder også på enerkonomien.

Man kan imidlertid i en stor del af byggesektoren se bort fra en del af de ovenfor nævnte faktorer, idet de enerkonomisk set bidrager meget lidt til det samlede forbrug af energi.

Råvareudgift

En råvare repræsenterer en bestemt mængde energi, idet der er anvendt energi til fremstilling af råvaren lige fra den er blevet gravet ud af jorden. Dette energiforbrug er sammensat af alle de nedenstående størrelser. Energien optræder altså ikke i processen eller i det interne enerkonomiske regnskab for den aktuelle produktion, men må alligevel tages med som en energiudgift, ligesom der optræder en økonomisk udgift til råvarer i det økonomiske rengskab. Dette gælder for alle produkter.

Produktionsforbrug (Procesforbrug)

Ved produktion forstås her en bearbejdning af råvarer til færdigvarer eller halvfabrikata inden for et afgrænset område, hvorved der direkte forbruges energi.

Det viser sig, at dette forbrug i de fleste tilfælde er det væsentligste af dem alle og derfor må behandles med den største omhu. Produktionsforbruget eller procesforbruget er som regel også undersøgt og belyst intensivt for de forskellige delprocesser i industrien.

Arbejdskraftforbrug

Her er sammenhængen meget kompliceret. Økonomisk betyder udgiften til arbejdsløn meget, og man kan med en vis ret sige, at lønnen går til opretholdelse af arbejdskraftens levestandard, d.v.s. private energi- og råvareforbrug. Man kan ækvivalere en arbejders energimængde med den mængde energi, en maskine forbruger, når den skulle udføre samme arbejde, eller man kan ækvivalere en arbejder med den mængde fødevareenergi, en arbejder kan producere.

Arbejdskraft er en ressource, som i økonomisk henseende idag er mere kvalitativ end kvantitativ. I økonomien kan både kvalitet og kvantitet af arbejdskraft omsættes til et pengekvantum.

Enerkonomisk set vil det være svært at omsætte arbejdets kvalitet til et energiforbrug ud fra et objektivt synspunkt. Skulle man tage hensyn til alle de forbrug, en arbejdskraft resulterer i, også i det private, kunne man beskrive hele den danske energiomsætning ud fra én bestemt virksomheds energiforbrug.

Formålet med denne afhandling er at kortlægge de håndgribelige energiforbrug i en byggeproces for derudfra at kunne afgøre, hvor og i hvor store mængder man kan nedsætte energiforbruget. Der vælges derfor at betragte arbejdskraft som en udenfor stående størrelse, der ganske vist repræsenterer en energimængde, som ikke tages i regning i det følgende. Dette må tages i betragtning ved vurdering af resultater af de senere analyser.

Der henvises dog til afsnittet om transport.

Transport

Transport optræder mange steder i en byggeproces, både godstransport og persontransport. Transportudgifter betyder i økonomien både brændselsudgifter, afskrivning, renter og vedligeholdelsesudgifter.

Enerkonomisk er brændselsudgifterne langt de overvejende. Et eksempel:

En 3 t lastbil kører i sin levetid 200.000 km og har en lasteevne på 10 t.

Brændselsforbruget er for en lastbil ca. 0,6 kWh/kmt, altså ialt 1.200.000 kWh [74.2].

En lastbil kan skønsmæssigt ækvivaleres med et skjult energiforbrug på 20.000 kWh/t, altså ialt 60.000 kWh. Reparation antages at andrage 10% heraf ~ 6.000 kWh. Det ses, at 5% af brændselsforbruget svarer til vedligeholdelse og produktion.

Da man imidlertid ikke kan bestemme brændselsforbruget pr.transportenhed med en usikkerhed bedre end ±20%, kan man se helt bort fra disse sekundære energibidrag.

Transportforbruget vil i de fleste tilfælde kun være få procent af produktionsforbruget, men kan få betydning i meget energiextensive processer og produkter.

Administration og anden service

Her går udgiften, økonomisk set, både til drift, afskrivning, renter og arbejdsløn.

Enerkonomisk glider renter og arbejdsløn ud, og afskrivningen behandles senere. Tilbage er energiforbruget til driften af bygninger. I denne sammenhæng vil det sige brændsels- og elforbruget til opvarmning, belysning og ventilation og elektriske apparaturer.

Disse forbrug kan i visse tilfælde være ret betragtelige, især i den mere serviceprægede del af byggeprocessen. De bør i alle tilfælde tages med og vil i de fleste tilfælde være registrérbare.

Afskrivning

Ligesom man i økonomien må regne med en vis værdiforringelse af produktionsapparatet og bygningerne,

må man i enerkonomien regne med en nedskrivning af den energimængde, der er anvendt til fremstilling af produktionsanlægget med tiden. For bygninger er anskaffelsesenergien af størrelsesordenen 1.500 kWh/m^2 (se f.eks. [78.0]). Opvarmningsbehovet og elforbruget er årligt af størrelsesordenen 200 kWh/m^2. Afskrives bygningen over 40 år, fås 40 kWh/m^2/år, altså 20% af komfortomkostningerne. Afskrivningen af andet produktionsmateriel kan være større, men vil i de fleste tilfælde optræde sammen med meget store produktionsforbrug.

Det vil altså være rimeligt i de fleste tilfælde at se bort fra dette bidrag og kun kontrollere bidraget herfra i energiextensive produktioner, idet bidraget i de fleste tilfælde ligger mellem 0 og 5%.

Investering

For investering af produktionsapparatet gælder de samme betragtninger. Der vælges derfor at lægge denne ind under afskrivningen.

Miljø

I visse industrigrene kan man tænke sig, at man i fremtiden vil stille endnu større krav til forureningskontrol m.m., og at det vil resultere i et voksende energiforbrug i industrien. Det kan f.eks. være et krav om en minimumventilation i produktionslokalerne, som vil forøge elektricitetsforbruget, eller en omdannelsesproces af det affald, som er et biprodukt ved produktionen.

Denne faktor må huskes, når man vil sammenligne energiforbrug i f.eks. Danmark med tilsvarende forbrug i et mindre udviklet land, hvor miljøkrav og sikkerhedskrav ikke er gældende.

Definition

Grænserne for energianalysen vælges således, at der medtages :

DF - Det direkte energiforbrug i produktionen.

KF - Det tilhørende energiforbrug til komfort (opvarmning, ventilation m.m.) i produktionslokaler, byggepladser og administrationsbygninger.

RF - Det skjulte energiforbrug i de anvendte råmaterialer.

TF - Transportens energiforbrug i forbindelse med produktion eller levering.

AF - Afskrivning af energiforbruget til produktion af produktionsapparatet.

MF - Miljøbestemte ekstraenergiforbrug.

SSF - Det samlede specifikke energiforbrug.

$$= \frac{(DF + KF + RF + TF + AF + MF)}{\text{produktionsmængde}}$$

I den del af energianalysen, der drejer sig om energiforbruget på byggepladsen, sættes AF og MF imidlertid lig 0.

Litteratur

[74.0] "ENERGY ANALYSIS"
IFIAS-Workshop Report, Report No. 6,
Sverige 1974.

[74.1] P.F. Chapman m.fl.:
"THE ENERGY COST OF FUELS"
Energy Policy Vol. 2, 1974, pp. 231-243
England 1974.

[74.2] Bent Elbek:
"ENERGI, ENERGI, ENERGIKRISE"
Munksgård,
Danmark 1974.

[76.0] Kuzman Raznjevic:
"HANDBOOK OF THERMODYNAMICS, TABLES AND CHARTS"
MacGraw Hill,
U.S.A. 1976.

[77.0] Søren Alrøe:
"FREMSTILLING AF STÆRKSTRØMSTEKNISKE PRODUKTER UNDER ENERGI- OG RÅSTOFKNAPHED"
Stærkstrømsafdelingen, DTH, publ.nr. 7708,
Dele af rapporten offentlig tilgængelig,
Danmark 1977.

[78.0] E.N. Morris:
"HOUSING ENERGY ECONOMICS"
Building and Environment, Vol. 13,
Edinburgh 1978.

[79.0] "DANSK ELFORSYNING 1978"
Danske Elværkers Forening,
Danmark 1979.

[79.1] Sigurd Andersen:
"DET AKKUMULEREDE ENERGIFORBRUG VED FREMSTILLINGEN AF BYGGEMATERIALER"
Rapport nr. 1 , Instituttet for Husbygning,
DTH,
Danmark 1979.