

Lavenergihuse og deres energimæssige placering

Af civilingeniør Jørgen S.R. Nielsen, Birch & Krogboe K/S

Baggrund

Der har i de senere år været megen tale om nulenergihuse, lavenergihuse og »økonomihuse«. Energisituationen har naturligvis affødt stor statslig og folkelig interesse for energiøkonomisk byggeri – men spørgsmål som: Hvad er et lavenergihus? Kan det betale sig? – er vel i det store og hele ubesvarede endnu.

Der er fra mange sider udfoldet prisværdige anstrengelser ved bygning af parcelhus-prototyper med lavt energiforbrug til opvarmning, opnået ved kraftig isolering, omhyggelig tætning, energibesparende installationer og udnyttelse af alternative energikilder som sol, vind og jordvarme.

Med støtte fra Handelsministeriet har laboratoriet for varmeisolering, Danmarks Tekniske Højskole, i foråret 1977 påbegyndt et lavenergihusprojekt, der omfatter bygning af 6 forskellige former for »lavenergihuse«, der efter færdiggørelse og udstilling for offentligheden i august 1978 skal gennemgå et to-årigt, videnskabeligt måleprogram, der kan danne et sikkert fundament for den videre udvikling. Formålet med projektet er *at udvikle og demonstrere, at det er muligt at bygge egentlige lavenergihuse, egnede til typehusfabrikation, til byggeudgifter, der ikke overstiger de normale m²-priser med større beløb, end at disse på rimelig måde kan forrentes og afskrives gennem de opnåede besparelser i varmeudgiften.* Hvad der her skal forstås ved »rimelig« må afgøres ved en økonomisk-politisk betragtning under hensyntagen til energi-, handelspolitiske-, og beskæftigelsesmæssige forhold. I denne artikel vil det blive forsøgt at give et indtryk af lavenergihusenes energimæssige placering i forhold til andre huse inden for boligsektoren, og hvilke foranstaltninger, der især er væsentlige for at nedbringe en bygnings energiforbrug til opvarmning og luftfornyelse.

Bygningers energiforbrug. Begreber

Bygningers energiforbrug til opvarmning, luftfornyelse og varmt brugsvand kan opdeles således:

1. Energiforbrug til dækning af bygningens *varmetab til omgivelserne*. Varmetabet består dels af *transmissionstabet*, dvs. den varmemængde, der afgives fra bygningen gennem dens begrænsende flader (klimaskærmen), dels af energiforbruget til opvarmning af den luftmængde, der gennem bygningens utætheder udskiftes med

omgivelserne, idet følgende kaldet det *naturlige luftskifte*.

Normalt afgiver bygningen mere varme, end der tilføres via varmeanlægget, idet bygningens »gratisvarme«, der tilføres af personer, lys, andre installationer samt solvarme fra vinduerne, giver et vist bidrag til bygningens opvarmning. Dette bidrag varierer stærkt med bygningens anvendelse og klimaskærmens udformning. Ved beregning af varmetabet må bygningens isoleringsgrad, tæthed og overfladeareal kendes. Til en overslagsmæssig bedømmelse kan f.eks. angivelser som vist på fig. 3 A–D anvendes. På denne figur er vist varmetabskurver for forskellige bygningsmodeller, som nøjere defineres i det følgende.

På kurvernes venstre, lodrette akse er angivet bygningens *karakteristiske varmetabstruktur, P*, som angiver varmetabet til transmission og det naturlige luftskifte, udtrykt i Watt (W) pr. m² *eta-geareal* ved 1°C differens mellem ude- og inde-temperatur.

2. Energiforbrug til *mekanisk ventilation*. I mange bygninger, dog sjældent inden for boligsektoren, tilstræbes et kontrolleret, større luftskifte, som fremskaffes ved mekanisk ventilation. Energiforbruget hertil anvendes til opvarmning af friskluften, drift af ventilatormotorer samt til eventuel luftbehandling i form af køling og/eller befugtning. Indførelse af mekanisk, kontrolleret ventilation kan fordrer mindre energi end et tilsvarende, naturligt luftskifte, idet anlægget til den kontrollerede luftfornyelse kan forsynes med varmegenvinding, dvs. varmeafgivelse fra den bortkastede til den indkommende luft. Herom mere senere.

Undertiden udformes ventilationsanlægget således, at *luftcirkulationen* i bygningen er større end *friskluftskiftet*, idet anlægget forsynes med recirkulation, dvs. kun en del af den cirkulerende mængde er frisk luft, – resten er bygningens »brugte« luft, der recirkuleres. En større luftcirkulation er medvirkende til en bedre luft- og varmefordeling i bygningen, og derigennem også til en bedre udnyttelse af gratisvarmen, der udvikles spredt i bygningen.

3. Energiforbrug til *opvarmning af varmt brugsvand*.

I boliger udgør energiforbruget hertil cirka 4000 kWh pr. år pr. normallejlighed, svarende til et

for brug på ca. 240 liter varmt vand (50-55°C) i døgnet.

Bygningsmodeller

For at kunne placere »lavenergihuse« energimæssigt i forhold til andre huse opstilles i Tabel I nogle bygningsmodeller med forskellige egenskaber for klimaskærmen og det naturlige luftskifte (der dog i meget tætte bygninger kunne tænkes erstattet af et mekanisk, kontrolleret luftskifte). Modellerne, kaldet »20«, »40« og »60«, kan tages som et gennemsnitligt, skønnet niveau for byggeskikken i tidsperioderne 1900–40, 1940–60 og 1960–75. Modellen »BR 77« angiver kravene i det nye bygningsreglement. Modellerne A, B og C angiver ekstra velisolerede og tætte huse – dog må model C betragtes som et teoretisk grænsetilfælde, idet man (ihvertfald gældende for forfatteren af disse linier) næppe kan forestille sig en kraftigere isolering og mindre vinduesarealer end her angivet udført i praksis.

Beregning af den karakteristiske varmetabfaktor, P

Fig. 1 viser de anvendte betegnelser ved de følgende varmetabsberegninger, der udføres for den på fig. 1 viste »boligkasse«. Den karakteristiske varmetabfaktor for hele bygningen sammensættes af 5 bidrag:

1. Taget: kl / n .
2. Gulvet: $kg \times 0,6 / n$.
Faktoren 0,6 er indsat som en gennemsnitsreduktionsfaktor for gulvets randfelter.
3. Ydervægge: $kv \times G$.
hvor G angiver forholdet mellem vægarealet (eksklusive vinduer) og etagearealet.
Med betegnelser fra fig. 1 har vi, at vægoverflader inclusive vinduer er lig med:
 $U=2,5 \times 2 \times (BX + B) \times n$,
idet etagehøjden regnes lig 2,5 meter.

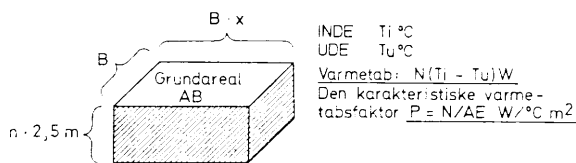


Fig. 1.

n = etageareal
 $v \cdot AE$ = Vinduesareal [m^2].
 AE = samlet etageareal [m^2].
Vægarealer = G [m^2].

Da vi har $B^2X = AB$ (bebygget areal), kan U skrives:

$$U = 5 \times n \times \sqrt{AB} \times F,$$

hvor:
$$F = \sqrt{X} + \frac{1}{\sqrt{X}}$$

F – faktoren angiver overfladens variation med længde/bredde – forholdet X. F er på fig. 2 afbildet som funktion af X. Da bygningsbredder normalt vil ligge mellem 8 og 15 m og grundarealet af en enkelt bygning sjældent er under 100 eller over 2000 m^2 vil X sjældent komme over 10 og sjældent under 1,5, dvs.: $2,1 < F < 3,5$.

Ved beregning af bygningsmodellernes varmetab er anvendt $F = 2,5$ svarende til $X = 4$. Vægarealet minus vinduesarealer er givet ved:

$$AE \times G = U - v \times AE.$$

Da $AE = n \times AB$, har man:

$$AE \times G = AE \left(\frac{5F}{\sqrt{AB}} - v \right)$$

$$\Gamma = \frac{\cong \Phi}{\sqrt{AB}} - v$$

Indsættes $F = 2,5$ fås $G = \frac{12,5}{\sqrt{AB}} - v$

Vinduer: $kv \times v$,

hvor v er vinduesfaktoren, dvs., forholdet mellem vinduesfladernes areal og etagearealet.

5. Luftskiftet: $0,36 \times z \times 2,5$ eller:
 $0,9 \times z$.

Den samlede, karakteristiske varmetabfaktor bliver summen af følgende 3 led:

Tag, gulv og vægge: $P1 =$

$$\frac{kl + 0,6 kg}{n} + kv \left(\frac{12,5}{\sqrt{AB}} - v \right).$$

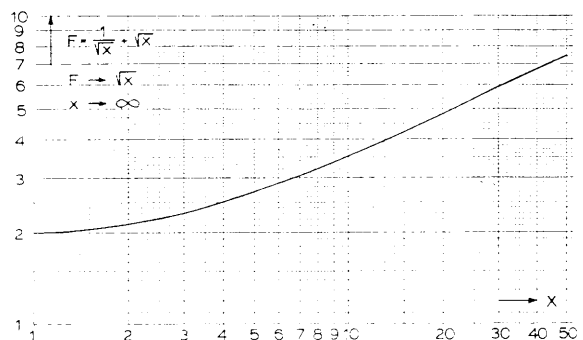


Fig. 2.

Vinduer: $P_2 = kf \times v$.

Luftskifte: $P_3 = 0,9 z$.

Bygningens karakteristiske varmetabsfaktor er da givet ved:

$$P = P_1 + P_2 + P_3 \text{ W/ } ^\circ\text{C pr. m}^2 \text{ etageareal.}$$

På fig. 3 A–D er P vist som funktion af det bebyggede areal ved forskellige etagetal og de angivne bygningsmodeller. Ændring fra 1 til 2 etager giver en væsentlig større ændring end ændring fra 2 til 4 etager som det ses af figuren. Desuden ses, at jo bedre isoleret og tætnet klimaskærmen er, jo mindre varierer P med det bebyggede areal.

Fig. 3. B viser den karakteristiske varmetabsfaktor for et etetages-hus, hvor det angivne luftskifte kan kontrolleres således, at en varmegenvinding (skønnet gennemsnit 60% på afkastluften er mulig. Det ses, at indførelsen af varmegenvinding i de angivne modeller medfører en formindskelse af P på ca. 15–25%, størst ved de mindst energiforbrugende huse. Forudsætningen for denne formindskelse er dog, som før nævnt, at husene er så tætte, at det naturlige luftskifte er ubetydeligt i forhold til det mekaniske, kontrollerede luftskifte.

Sammenhængen mellem P og årligt energiforbrug

Husets årlige nettoenergiforbrug til opvarmning og luftfornyelse er givet ved:

$$ET = P \times AE \times \text{graddagetallet} \times 24 \times 0,001 \text{ kWh/år,}$$

hvor graddagetallet er et mål for årets almindeligt optrædende temperaturdifferens mellem inde- og udetemperatur. Det »officielle« normalt anvendte graddage tal er forskellen mellem indetemperatur på 17°C og en middeltemperatur for referenceårets udetemperatur i fyringssæsonens 227 døgn (3,9°C), ganget med 227, dvs. det normalt anvendte gradtal bliver omtrent $227 \times 13,1 = 2974$, som ofte i beregninger afrundes til 3000 graddage. De 17°C inde-temperatur, som indgår i beregningen af normalgraddagetallet er empirisk valgt som en »passende« beregningstemperatur, idet man regner med, at gratisvarmen (personer, el, solindfald) hæver inde-temperaturen op til 21°C. Jo bedre klimaskærmen tætnes og isoleres, jo større indflydelse får gratisvarmen. EDB-simuleringer, der er foretaget for de angivne modeller med et indlagt program for en normalboligs person- og elbelastning kombineret med referenceårets klimadata, tyder på, at vi for de angivne modeller bør regne med beregningsgraddagetallet, der afhænger af den karakteristiske varmetabsfaktor som angivet på fig. 4. Fig. 4 viser en rigtig tendens, men bør dog nøjere eftervises, end det her har været muligt. Jeg vil dog vove at anvende kurven ved de efterfølgende regninger. Især for dårligt tætnede og isolerede huse kan gratisvarmens betydning dog variere meget med husets og vinduernes placering, så de anvendte tal må for disse bygningers vedkommende tages som et skønnet gennemsnit. Desuden vil udnyttelsen af gratis-

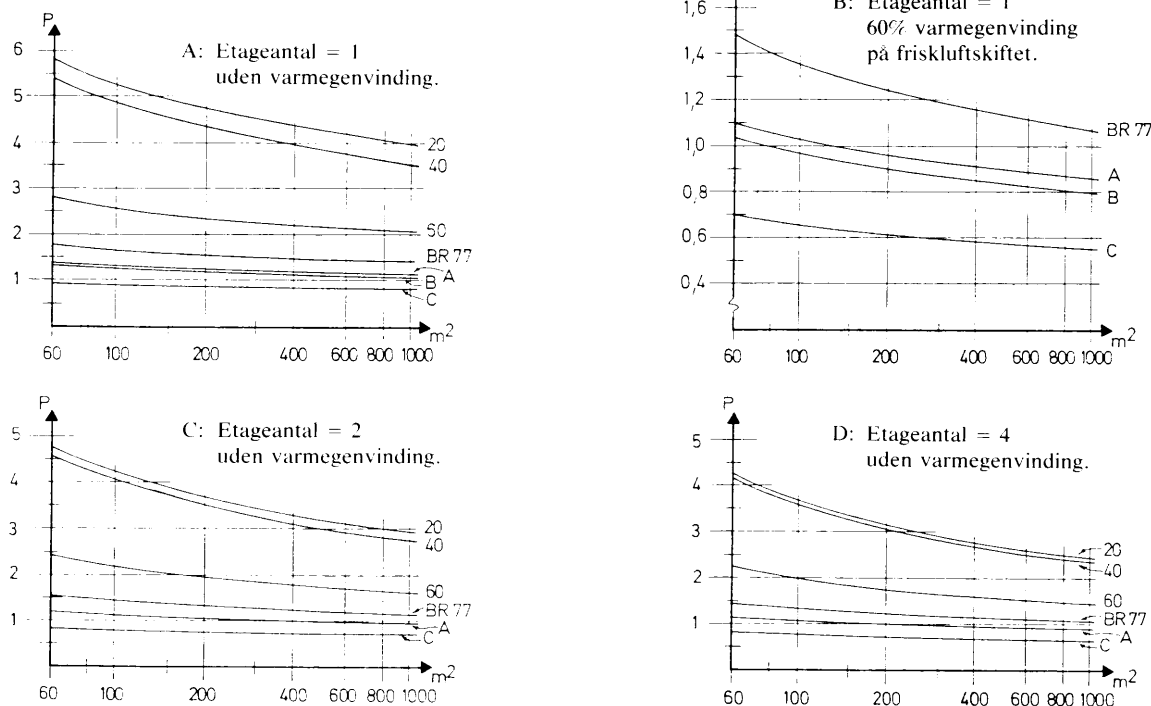


Fig. 3. A–D: Den karakteristiske varmetabsfaktor, P W/ °C pr. m² etageareal, som funktioner af det bebyggede areal.

varmen i alle modellerne være afhængig af bygningsdelenes varmeakkumulerende egenskaber – jo større akkumuleringssevne – jo bedre udnyttelse. Ved anvendelse af ovennævnte formel for det årlige forbrug, fig. 3 og 4 og den i forrige afsnit nævnte fordeling af varmeafgivelsen er i fig. 5 angivet det årlige forbrug for et 130 m² etplanshus, opbygget som de angivne 7 forskellige bygningsmodeller. De 4 meget velisolerede og tætte modeller: BR 77, A, B og C vises med og uden varmegenvinding på luftskiftet. Ved forbrugsøjlerne er den procentviske andel af forbruget til

1. tag, gulv og vægge
2. vinduer
3. luftskifte

angivet. Det ses, at andelen for 2+3 vokser stærkt når isolationen forbedres. Ved vurdering af husets samlede, årlige forbrug må man erindre forbruget til det varme brugsvand, der udgør ca. 4000 kWh årligt.

Definition af 5 huskategorier, bestemt ved deres energiforbrug

Fig. 6 viser den beregnede, årlige tilførte energimængde (el, olie, gas) pr. m² etageareal til opvarmning og varmt brugsvand i boliger med et areal på ca. 80–130 m², som funktion af den karakteristiske varmetabsfaktor, P. Ved større, fleretages bygninger må disse tænkes opdelt i lejligheder af denne størrelse, da der i beregningerne er taget hensyn til gratisvarmen og brugsvandsopvarmningen for boliger af denne størrelse, anvendt af en almindelig familie. Det er endvidere en forudsætning, at luftfornyelsen ikke er større end angivet i bygningsmodellerne, dvs. at bygningens fugtab ikke er betydelige.

På figur 6 er bygningsmodellernes P – områder angivet, dvs., det område, hvori P kan variere for den pågældende model, afhængig af etageantal og bebygget areal. Områdets venstre, nedre begrænsning gælder for et stort, fleretages hus, hvorimod den

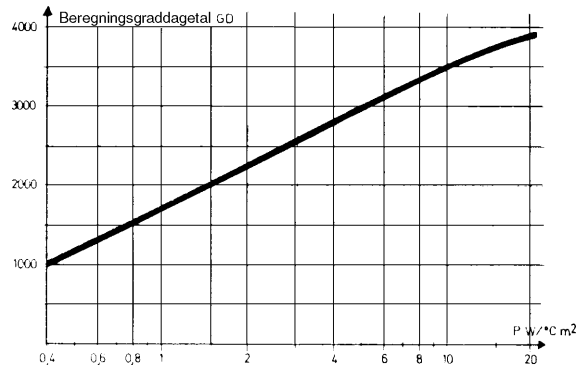


Fig. 4: Beregningsgraddagstallet som funktion af P. Gratisvarmen for boliger 80–130 m² indregnet, se bemærkninger i teksten. Figuren kan ikke anvendes generelt.

højre, øvre begrænsning gælder for mindre, etplans parcelhuse. Det årlige energiforbrug pr. m² etageareal er angivet i kWh, Gcal og liter olie, beregnet som nettoforbrug (sekundær energi) for de to førstnævnte måleenheder, hvorimod der ved beregning af olieforbruget er forudsat en virkningsgrad på 70% for fyringsanlægget.

Der findes ikke en definition på »lavenergihuse« og/eller deres energiforbrug. Af årsager, som senere vil fremgå, vil jeg foreslå, at boliger m.h.t. energiøkonomi opdeles i følgende 5 kategorier:

1. kategori. Lavenergihuse.

En bygning, anvendt til beboelsesformål, kan betegnes som et lavenergihus, såfremt *energioptagelsen fra el eller fossilt brændsel til opvarmning, luftfornyelse og varmt brugsvand ligger mellem 0–50 kWh/år pr. m² etageareal.*

Som det ses af fig. 6 kan man ikke isolere sig til et lavenergihus. Med model C kan vi i bedste tilfælde (stort, fleretages hus) kun komme ned på ca. 60–70 kWh/år m². Et parcelhus efter model C, der som før nævnt må betragtes som teoretisk grænsetilfælde for højisolation, vil have et beregnet forbrug på ca. 80–90 kWh/år m². Et tæt, højisoleret parcelhus

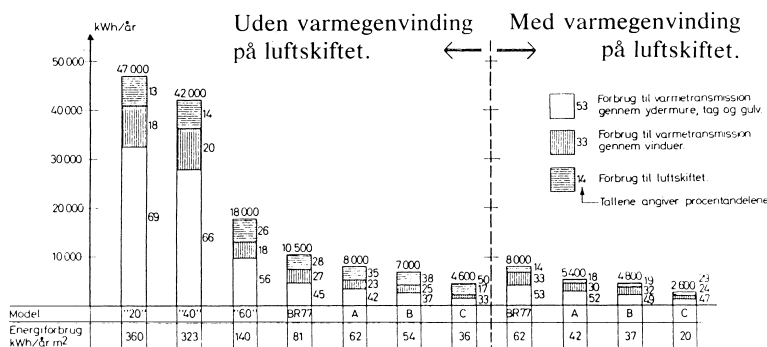


Fig. 5: Det årlige forbrug til varmetabstransmission og luftskifte for et 130 m² etplans parcelhus i afhængighed af bygningsmodel. Forbruget angives med og uden varmegenvinding på tætte, højisolerede modeller. Årligt forbrug: $E = 3,12 \cdot GD \cdot P$ kWh/år. Det varme brugsvand øger alle de angivne årsforbrug med ca. 4000 kWh, eller 31 kWh/år m².

med kontrolleret luftskifte med varmegenvinding kan ikke opfylde det opstillede krav til et lavenergihus, som det ses af fig. 3B og fig. 6. For at opfylde kravet til et lavenergihus vil det derfor være nødvendigt at varmegenvinde luft og evt. spildevand samt at udnytte alternative energikilder, såsom sol-, luft-, jordvarme og/eller vindkraft. Som det ses af fig. 5 ville et 130 m² parcelhus efter model A og B, som dog skulle ligge inden for de praktiske muligheds grænse, kunne klare kravet til et lavenergihus, såfremt energien til det varme brugsvand kunne hentes fra en alternativ energikilde, f.eks. de meget omtalte solvarmeanlæg til dette formål. En forudsætning ville, som det ses af fig. 5, være varmegenvinding på luftskiftet, dvs. et hus, der er så tæt, at det naturlige luftskifte er ubetydeligt i forhold til det kontrollerede, mekaniske luftskifte. Model A's data (se tabel I side 654) svarer nøje til de krav, som Laboratoriet for Varmeisolering har stillet som minimumskrav til klimaskærmen for Lavenergihusprojektets hustype B (sol- og varmepumpehuset). Dette hus opføres af en projektgruppe bestående af arkitekt Rut Speyer, Rockwool A/S og ingeniørfirmaet Birch og Krogboe K/S. En varmepumpe kombineret med et solfangeranlæg og en energiakkumulator (f.eks. i form af en vandtank) kan betragtes som et middel til en bedre udnyttelse af det installerede solfangerareal og tankvolumen.

2. kategori. Økonomihuse.

En bygning, anvendt til beboelsesformål, kan betegnes som et økonomihus, såfremt *energioptagelse*

sen fra el eller fossilt brændsel til opvarmning, luftfornyelse og varmt brugsvand ligger mellem 50–100 kWh/år pr m² etageareal.

Som det ses af fig. 6 kan alle huse opført efter model C umiddelbart komme ind under denne betegnelse. Desuden kan store huse opført efter model A og model BR 77 umiddelbart kunne opnå denne betegnelse. For parcelhuse vedkommende vil huse opført efter model A forsynet med varmegenvinding på luftskiftet kunne komme ind under denne betegnelse, og parcelhuse opført efter BR 77 vil, såfremt de forsynes med et solvarmeanlæg til dækning af energiforbruget til det varme brugsvand, ligeledes kunne betegnes som økonomihuse. Såfremt et BR 77-parcelhus desuden forsynes med varmegenvinding vil energiforbruget kunne komme ned på ca. 70 kWh/år m², dvs., næsten midt i området for økonomihuse.

3. kategori. BR 77 huse.

En bygning, anvendt til beboelsesformål, kan energiforbrugsmæssigt betegnes som et BR 77-hus, såfremt *energioptagelse fra el eller fossilt brændstof til opvarmning, luftfornyelse og varmt brugsvand ligger mellem 100–150 kWh/år pr. m² etageareal.*

Som det ses af fig. 6 vil alle huse, opbygget efter model BR 77, umiddelbart høre til denne 3. kategori. Større beboelsejendomme med flere etager opbygget efter model 60 vil også kunne komme ind under denne kategori. Også etplans parcelhuse, opbygget som model 60, vil ved indførelse af energibesparende automatik, såsom fremløbsregulering

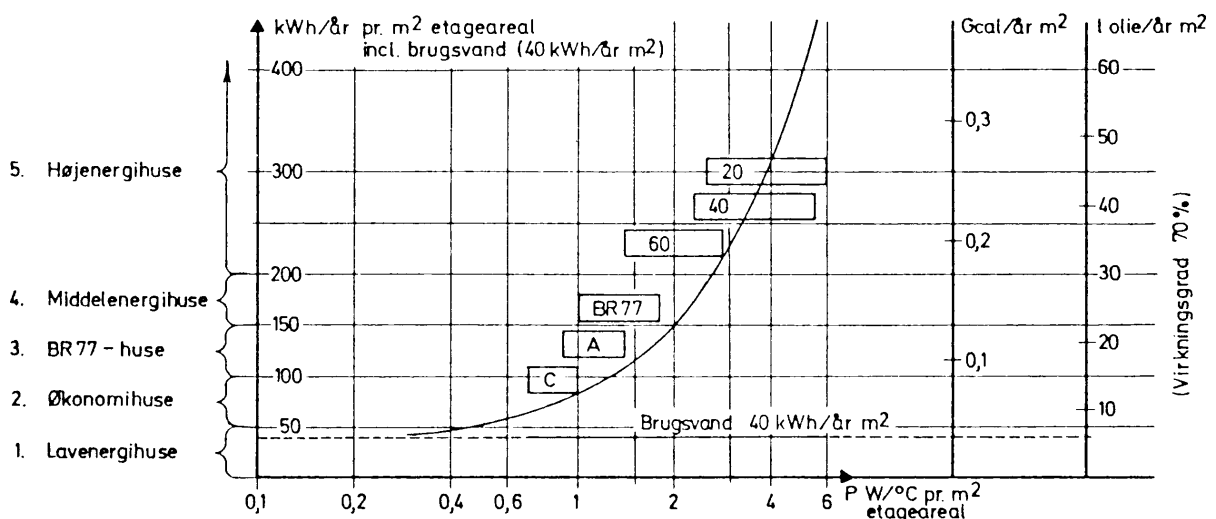


Fig. 6: Boliger, 80–130 m² pr. lejlighed eller parcelhus.

Årligt forbrug (el, olie gas) til opvarmning og varmt brugsvand i afhængighed af den karakteristiske varmetabsfaktor, P. De angivne felter med betegnelse for bygningsmodellerne angiver modellernes P-områder, afhængig af etagetal og bebygget areal. Her regnes *ikke* med varmegenvinding.

efter udetemperaturen og/eller radiatortermostater netop kunne nå at komme med i denne kategori. Forsynes model 60 – parcelhuset desuden med et mindre solvarmeanlæg til produktion af brugsvand i den varme årstid vil det rykke et godt stykke ned i BR 77 – området, ja, i heldige tilfælde kan det måske tangere kategori 2, økonomihuset.

4. kategori. Middelenergihuse.

En bygning, anvendt til beboelsesformål, kan betegnes som et middelenergihus, såfremt *energi-optagelsen fra el eller fossilt brændstof til opvarmning, luftfornyelse og varmt brugsvand ligger mellem 150–200 kWh/år pr. m² etageareal.*

Som det ses af fig. 6 vil praktisk taget alle boliger efter model 60 komme ind under denne kategori. Det kan dog knibe lidt for etplans parcelhuse, men såfremt disse udstyres med energibesparende automatik og evt. med et programur for sænkning af indetemperaturen om natten vil de uden større besvær kunne komme under 200 kWh/år m² – grænsen. Store og mellemstore huse efter model 20 og 40 kan, når de udstyres med energibesparende automatik, komme ned i denne energikategori uden større omkostninger, men herudover må efterisolering, hulrumisolering og forsatsvinduer anbefales. Tilbagebetalingstiderne for de nævnte investeringer vil variere mellem 0,5 til ca. 15 år. Parcelhuse efter model 20 og 40 kan ikke komme ned i denne kategori alene ved anvendelse af automatik – her vil yderligere isolering af klimaskærmen være en nødvendighed.

5. kategori. Højenergihuse.

En bygning, anvendt til beboelsesformål, kan betegnes som et højenergihus, såfremt *energi-optagelsen fra el eller fossilt brændstof til opvarmning, luftfornyelse og varmt brugsvand ligger over 200 kWh/år pr. m² etageareal.*

I denne kategori ligger alle beboelsejendomme efter model 20 og 40. Som før nævnt kan disse bygninger ved indførelse af energibesparende foranstaltninger »overflyttes« til kategori 4, middelenergihuse. Investeringerne hertil vil have en tilbagebetalingstid på gennemsnitligt 10 år ved den nuværende energipris.

Konklusion

Lavenergihuse bruger 3–4 gange mindre energi fra traditionelle energikilder end almindelige, velisolerede huse. De tekniske opgaver ved konstruktionen af et lavenergihus er især koncentreret om:

- Tætning af klimaskærmen.
- Et behageligt, kontrolleret luftskifte med varmegenvinding.
- Effektiv udnyttelse af gratisvarme.
- Udnyttelse af energiakkumulatorer.
- Udnyttelse af alternative energikilder.

Inden for en overskuelig fremtid vil erfaringerne fra mange prototype-lavenergihuse forhåbentligt kunne give os de længe ventede oplysninger vedrørende lavenergihuses indeklima, energiforbrug og rentabilitet.

Jørgen S.R. Nielsen

TABEL I	DATA FOR SYV BYGNINGSMODELLER													
		"20"		"40"		"60"		BR 77	A		B	C		
BYGNINGSDEL		EKSEM- PELVIS	EKSEM- PELVIS	EKSEM- PELVIS	EKSEM- PELVIS	EKSEM- PELVIS	EKSEM- PELVIS	EKSEM- PELVIS	EKSEM- PELVIS	EKSEM- PELVIS	EKSEM- PELVIS	EKSEM- PELVIS		
Tag, k _t ¹⁾	1,2	Tegltag u isolering	0,8	Tegltag + 25mm isol	0,45	Tegltag + 80mm isol	0,2	Tegltag + 200mm isol	0,14	Tegltag + 300mm isol	0,14	300mm isolering	0,1	500 mm isolering
Gulv, k _g	1,5	Træbjælker u isolering	1,5	Træbjælker u isolering	0,5	Trægulv på strøer, 40mm isol	0,3	Trægulv på strøer, 150mm isol	0,3	Trægulv, 150 mm	0,2	200 mm isolering	0,14	300 mm isolering
Ydervægge, k _v	1,5	35cm massiv mur	1,5	35cm hul-mur uden isolering	0,65	30cm hul-mur med isolering	0,3	Lette vægge + 100 mm isolering	0,21	200mm isolering	0,21	200mm isolering	0,12	400mm isolering
Vinduesandel, v ²⁾	0,15		0,15		0,15		0,15		0,15		0,15		0,1	
Vinduer, k _f	6	1-lag glas	6	1-lag glas	3	2-lag glas	2,9	2-lag termo	2,0	3-lag glas	2,0	3-lag glas	1,5	4-lag glas
Luftskifte, z ³⁾	0,7		0,7		0,7		0,5		0,5		0,5		0,5	

1) k-værdier: W/°C m².

2) Vinduesandelen v er den faktor, etagearealet skal ganges med for at få vinduesarealet.

3) Luftskiftet (time⁻¹ eller h⁻¹) angiver, hvor mange gange i timen boligens luftrumfang udskiftes ved naturlig og/eller mekanisk ventilation.