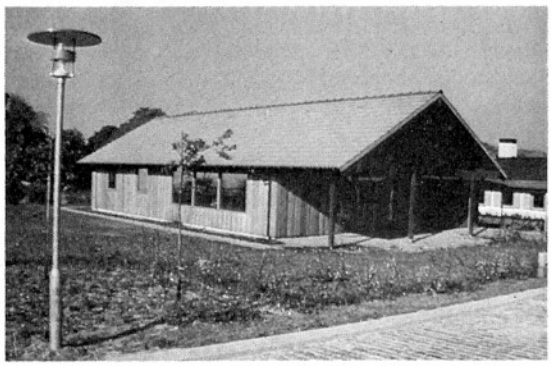
CI/SfB 81 (R3) (L2) (M2) UDC 728.3 (489)

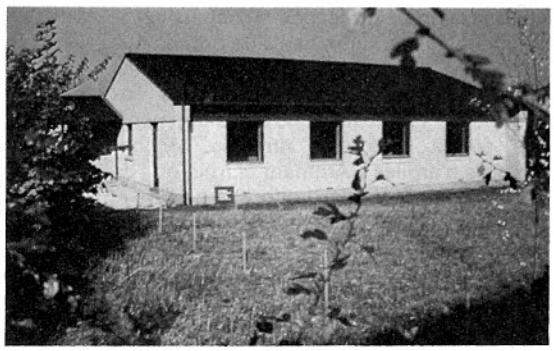
Low-energy houses: insulation and air tightness

by Bjarne Saxhof and Allan A. Nielsen

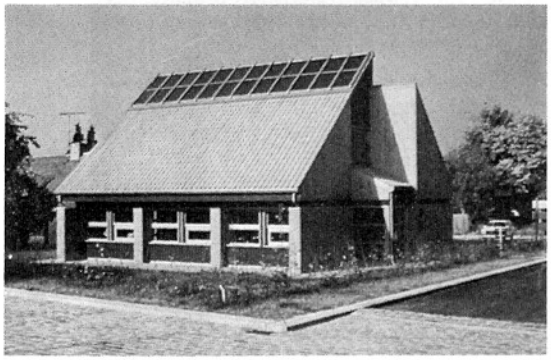
The Hjortekar project of six low energy house designs north of Copenhagen has become renowned. Here, the authors, from the Thermal Insulation Laboratory, the Technical University of Denmark, explain some of the construction details to avoid cold bridges, including a new-type structural element, and to ensure airtightness. Test results of infiltration air change rates range from 0.02 to 0.12 ach, while other tests show less than 15 per cent difference between calculated and measured transmission heat losses, which range from only 70 to 155 W/°C. A discussion of the correlation of tests forms a major part of this article.



Until about 20-25 years ago most houses in Denmark were brick-built (solid or cavity walls), and internal surfaces were plastered. In the late fifties timber structures became prevalent, often with a brick facing, and internal surfaces were panelled. There followed the use and misuse of vapour barriers, and too little attention has been given to the joining of these vapour checks. In general, therefore, the change in building methods has caused an increase in air change by infiltration. However during the past few years the air-tightness of houses has been improved, mainly through introduction of weather stripping of doors and windows.



The six low-energy houses at Hjortekar, built as part of the Danish Energy Research and Development Programme, offer a diversity of architectural and technical solutions as to design, choice of building materials, heating systems, energy sources, etc. (ref. 1). Each house has a living area of about 120 m^2 and a designed energy supply of approximately 5 000 kWh/year, covering space heating, ventilation and domestic hot water. The low designed energy supply is achieved through an interplay of a low energy demand and utilisation of alternative energy sources, greater importance being attached to the former (ref. 2).



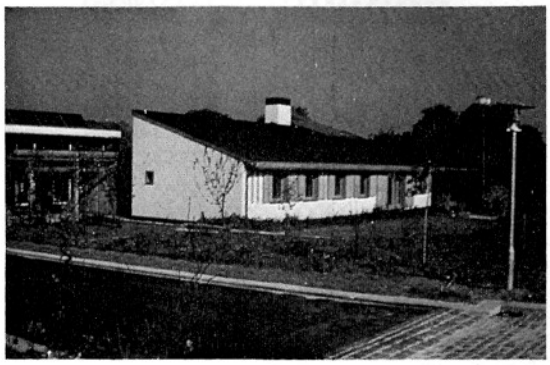
The Hjortekar project houses of various designs and forms of construction. Distinctive among them is the solar heated house

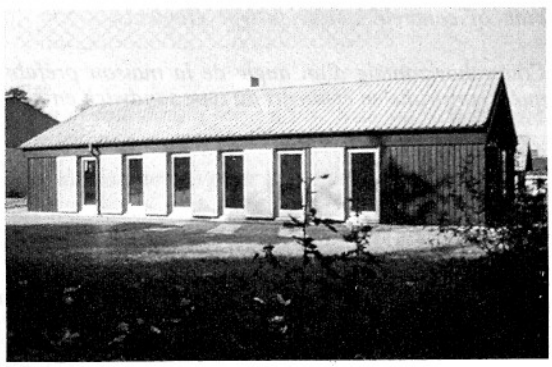
In this issue we feature aspects of energy economy in buildings, includingt selected and edited papers from the international symposium held by CIB commission W67 in Dublin last year. The full Proceedings are now available from An Foras Forbartha, St. Martin's House, Waterloo Road, Dublin 4, Ireland. The six-volume set cost IR£80, plus postage costs of IR£1.40 (Ireland and UK), IR£6.25 (rest of Europe), IR£6.00 (USA and Canada) and IR£10.50 (rest of the world).

Maisons consommant peu d'énergie : isolation et étanchéité à l'air

par Bjarne Saxhof et Allan A. Nielsen

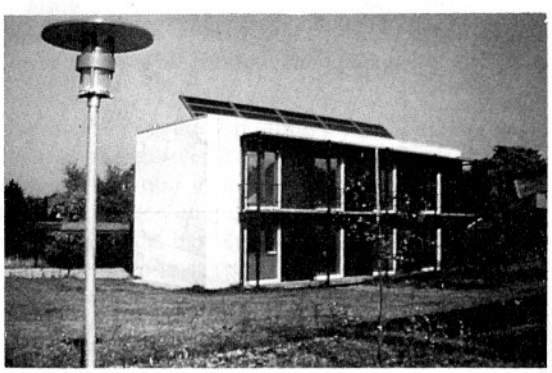
Le projet Hjortekar de six types de maison consommant peu d'énergie au nord de Copenhague est devenu célèbre. Dans cet article, les auteurs du Laboratoire Isolation Thermique de l'Université Technique du Danemark exposent certains détails de construction permettant d'éviter les ponts thermiques, dont un élément porteur d'un nouveau type, et d'assurer l'étanchéité à l'air. Les résultats des essais relatifs au taux de renouvellement d'air par infiltration vont de 0,02 à 0,12 rah, tandis que d'autres essais révèlent une influence inférieure à 15 % entre les calculs et les mesures des déperditions thermiques par transmission qui vont de 70 à 155 V/°C seulement. L'essentiel de cet article est consacré à une discussion des corrélations des essais.





Jusqu'à il y a environ 20-25 ans, au Danemark, presque toutes les maisons étaient construites en briques (murs pleins ou creux) et les surfaces intérieures recouvertes de plâtre. C'est vers la fin des années 50 que les ouvrages en bois se sont répandus, avec souvent des parements extérieurs en briques et des panneaux à l'intérieur, d'où l'utilisation, bonne ou mauvaise, de barrières de vapeur et des problèmes dus essentiellement au peu d'attention accordé au jointoiement de ces pare-vapeur. Ces nouvelles méthodes de construction ont donc entraîné, en général, une augmentation des renouvellements de l'air par infiltration. Cependant, l'étanchéité à l'air a été améliorée au cours de ces dernières années, grâce surtout à l'introduction des bourrelets d'étanchéité des portes et des fenêtres.

Les six maisons de Hjortekar, construites dans le cadre du programme de R & D danois sur l'énergie, offrent une diversité de solutions architecturales et techniques quant à la conception, au choix des matériaux de construction, des systèmes de chauffage, des sources d'énergie, etc. (réf. 1). Chaque maison a



Les maisons du projet Hjortekar de conceptions et formes de construction variées. Une des plus remarquables est la maison à chauffage solaire

Nous avons consacré plusieurs articles de ce numéro à des problèmes économiques de l'énergie, avec une sélection de communications, déjà publiées, du Colloque international de la commission du CIB W 67 qui a eu lieu à Dublin l'année dernière. Le compte rendu complet en est maintenant en vente à An Foras Forbatha, St Martin's House, Waterloo Road, Dublin 4, Ireland. Il comporte six volumes et coûte IR £ 80 plus les frais d'expédition s'élevant à IR £ 1,40 pour l'Irlande et le RU, IR £ 6,25 pour le reste de l'Europe, IR £ 6,00 pour les USA et le Canada et, enfin, IR £ 10,50 pour le reste du monde.

All six houses are extremely well insulated (typical U-values for walls 0.13 — 0.20 W/m^{2}C, and for roofs 0.09 — 0.12 W/m^{2}C). An attempt has been made to keep the air leakage to a negligible level.

Some construction details

It must be emphasised that the main reason for the extreme care given to the use of and the joining of polyethylene or aluminium foils in this project is not to prevent moisture transport by diffusion, but to prevent air leakage through the construction. Airtightness is important for two main reasons. First, possible moisture transport by convection considerably exceeds moisture migration by diffusion, and condensation in the timber structures can cause severe damage (wet and dry rot). Secondly, controlled ventilation with heat recovery is only energy-efficient if the heat loss by infiltration is kept low, as illustrated by the simple calculations in table 1. All six houses at Hjortekar have commercially built cross-flow plate type heat exchangers.

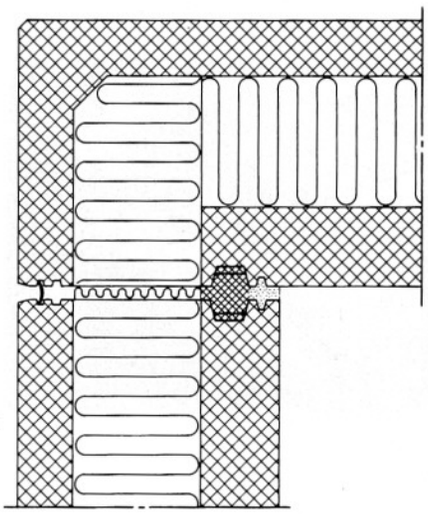


Figure 1
Horizontal section of corner of prefabricated house, built of concrete sandwich-type elements

Coupe horizontale d'un angle de la maison préfabriquée, construite en éléments du type sandwich en béton

Table 1 *Example, heat exchanger with 50% efficiency*

Infiltration rate (a.c.h.)	0.10	0.50	1.00
Controlled ventilation (a.c.h.)	0.50	0.50	0.50
Total air change (a.c.h.)	0.60	1.00	1.50
Thermal net air change (a.c.h.)	0.35	0.75	1.25
True heat recovery efficiency (%)	42	25	17

The first construction detail (fig. 1) shows a horizontal section of the corner of a prefabricated house, built of concrete sandwich building elements. The elements are insulated with 200 mm mineral wool (the term mineral wool being used for rockwool as well as for glass fibre wool). In this new building unit the insulation thickness has not been reduced at the edges of the elements. The concrete facing and the inner leaf are connected with stainless steel reinforcement (approx. 350 mm^2/m^2) which causes an increase of the U-value of less than 6 per cent. No vapour barrier is shown — the painted interior surface of the concrete acts as vapour barrier.

The joint between two elements is cast with cement mortar, except that lime mortar has been used for the inner 20 mm, to be replaced with mastic, if necessary. The house was completed in March 1979, and so far the mortar joints have proved satisfactory.

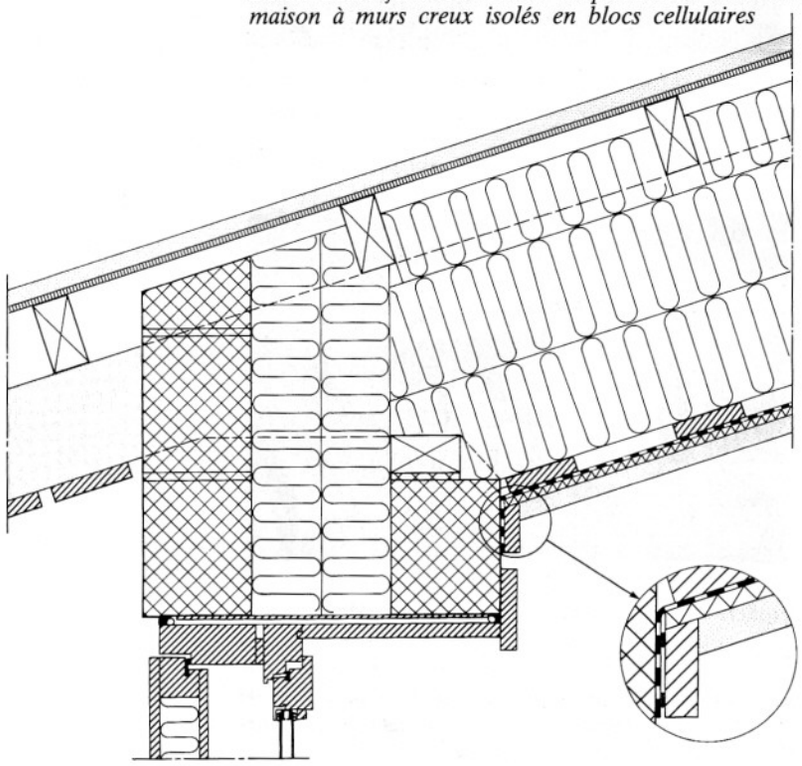
Figure 2 shows a vertical section of a foundation for a house with a slab-on-ground construction, traditionnally a weak point, thermally speaking. In this case the 200 mm wall insulation is adjacent to the 225 mm foundation insulation (both mineral wool), the only thermal bridge being the concreting at the bottom connecting the two prefabricated concrete elements. This foundation construction has since been further developed into a U-shaped precast and pre-insulated unit.

To prevent water suction a bituminous millboard is placed between the foundation slab and the brickwork. The interior surface of the lightweight concrete wall is puttied and painted and serves as vapour barrier. The polyethylene foil on the concrete floor slab is fastened between the lightweight concrete wall and the skirting board, sealed with mastic to compensate for warping.

Figure 3 shows a vertical section of the connection of a sloping roof to the upper part of the lower wall. The outer and inner leaf of the sandwich wall are built from blocks of aerated concrete, a special insulating mortar being employed for the joints. Very few binders (ties) — and then only plastic binders — have been used, causing only infinitesimal thermal bridges.

Figure 3
Detail of connection of pitched roof and wall, in a house built of cavity-filled aerated block walls

Détail d'une jonction toiture en pente-mur dans une maison à murs creux isolés en blocs cellulaires



une superficie habitable d'environ 120 m^2 et une puissance installée d'environ 5 000 kWh/an pour le chauffage central, la ventilation et l'eau chaude domestique. Ce chiffre, relativement faible, est possible grâce à une interaction entre une faible demande en énergie et l'utilisation de sources d'énergie de remplacement, une plus grande attention étant accordée au premier point (réf. 2).

Ces six maisons sont toutes extrêmement bien isolées (coefficients K des murs 0,13 à 0,20 W/m^2. °C, et des toitures de 0,09 à 0,12 W/m^2. °C). Les responsables ont cherché à maintenir à un niveau négligeable les fuites d'air.

Quelques détails de construction

Il faut souligner que la principale raison du soin tout particulier apporté, dans ce projet, à l'utilisation de feuilles de polyéthylène ou d'aluminium et à leur jointoiement n'est pas d'empêcher le transfert d'humidité par diffusion, mais de prévenir les fuites d'air au travers de la construction. L'étanchéité à l'air est importante pour deux raisons principales. Premièrement, un transfert d'humidité par convection dépasse de beaucoup la migration d'humidité par convection et la condensation peut causer des dommages très graves aux structures en bois (pourriture humide et cubique). Deuxièmement, la ventilation contrôlée avec récupération de chaleur n'est efficace du point de vue énergétique que si la perte de chaleur par infiltration est maintenue à un niveau faible, comme le montrent les calculs simples du tableau 1. Ces six maisons ont toutes des échangeurs de chaleur plans industrialisés à flux oblique.

Tableau 1 *Exemple d'un échangeur de chaleur efficace à 50 %*

Taux d'infiltration (rah).....	0,10	0,50	1,00
Ventilation contrôlée (rah)	0,50	0,50	0,50
Renouvellement d'air total (rah)	0,60	1,00	1,50
Renouvellement d'air thermique net (rah).....	0,35	0,75	1,25
Efficacité réelle de la récupération de chaleur (%).....	42	25	17

Le premier détail de construction (fig. 1) montre une coupe horizontale d'un coin d'une maison industrialisée en éléments sandwiches de béton. Les éléments sont isolés avec 200 mm de laine minérale (le terme laine minérale étant utilisé pour de la laine de roche comme pour la laine de fibre de verre). Dans ce nouvel élément de construction, l'épaisseur de l'isolant n'a pas été réduite sur les bords. Le parement de béton et la feuille intérieure sont connectés par une armature en acier inoxydable (environ 350 mm^2/m^2) qui ne cause qu'une augmentation du coefficient K inférieure à 6 %. On ne voit aucune barrière de vapeur car la surface intérieure, peinte, du béton en joue le rôle.

Le joint entre deux éléments est rempli avec du mortier de ciment, sauf pour les 20 mm intérieurs où il s'agit de mortier de chaux que l'on peut remplacer par du mastic, si nécessaire. L'achèvement de la maison date de mars 1979 et jusqu'à maintenant les joints ont eu un comportement satisfaisant.

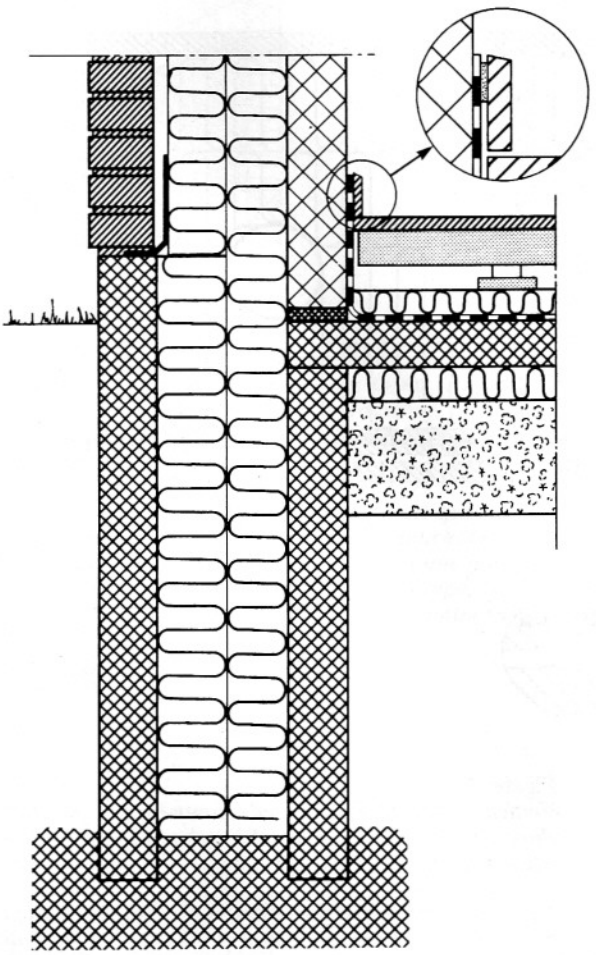


Figure 2
Section of foundation for a house with slab-on-ground construction

Coupe des fondations pour une maison de construction dalles sur le sol

La figure 2 montre une coupe verticale de fondations pour une maison de construction dalles sur le sol, qui constitue toujours un point faible, thermiquement parlant. Dans ce cas, l'isolation du mur de 200 mm est adjacente à l'isolation des fondations de 225 mm (toutes deux constituées de laine minérale), le seul pont thermique étant le bétonnage au fond constituant la liaison entre les deux éléments de béton préfabriqués. Ce type de construction s'est développé depuis sous la forme d'un élément manufacturé et pré-isolé en U.

Pour empêcher toute aspiration d'eau, une plaque de carton épais recouverte de bitume est placée entre la dalle de fondation et la maçonnerie de briques. La surface intérieure du mur de béton léger est luté puis peint et sert de barrière de vapeur. La feuille de polyéthylène sur la dalle de plancher en béton est fixée entre le mur en béton léger et la plinthe, étanchée avec du mastic pour compenser le voilement.

La figure 3 montre une coupe verticale de la liaison toiture en pente/partie supérieure du mur. Les feuilles extérieure et intérieure du mur sandwich sont en blocs de béton alvéolaire, avec un mortier isolant spécial pour les joints. Très peu de tirants — et seulement en plastique — ont été utilisés, d'où des ponts thermiques infiniment petits. Les surfaces extérieure et intérieure ont été plâtrées et peintes, la surface intérieure du

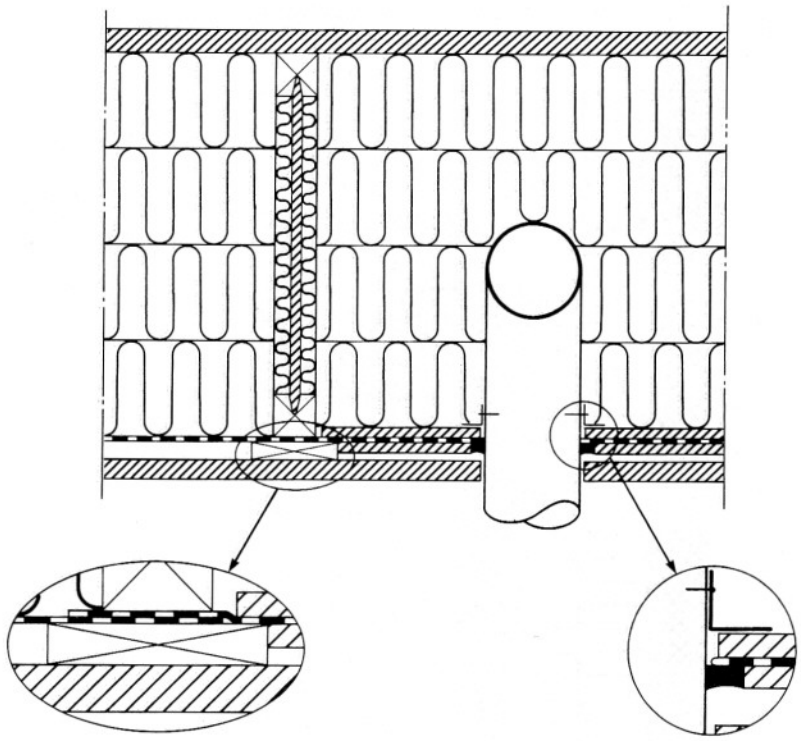
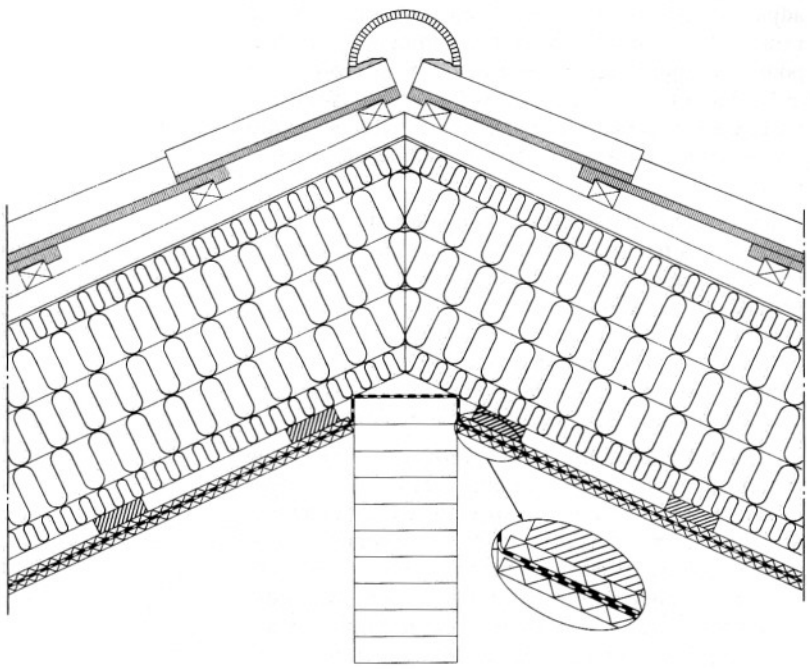


Figure 4
Vertical section of insulated storey-height partition shows how to seal a break through a vapour barrier when introducing ducts or tubes

La coupe verticale d'une cloison de hauteur d'étage avec isolation montre comment réaliser l'étanchéité dans une coupure à travers une barrière de vapeur lors de la pose de conduits ou de tuyaux

Figure 5
Vertical section at roof ridge. Masonite rafters are used and the vapour barrier goes between two layers of plasterboard

Coupe verticale du faîtage d'un toit. Des poutres en masonite sont utilisées et la barrière de vapeur passe entre deux couches de plaques de plâtre



The exterior and interior wall surfaces have been plastered and painted, the internal wall surface acting as vapour barrier. The mineral wool insulation of roof and walls measure 400 mm and 200 mm respectively. The 65 mm wide laminated rafters (indicated by dashed lines) form a thermal bridge of minor importance, causing an increase of the mean U-value for the roof of less than 7 per cent.

In the roof the vapour barrier consists of polythene sheeting between the lathing and the gypsum ceiling panels. Along the edges a wooden board is screwed onto the wall, squeezing the foil — two strips of foam plastic compensate for warping of the board. The wide window casing is preassembled, nailed and glued to the window frame to form an airtight box, open to the room. The joint between the casing and the aerated concrete is sealed with mastic. The exterior silicone mastic shown should be replaced by a weather strip.

The vertical section of a ceiling construction shown in figure 4 demonstrates one way to take ducts, tubes or wires through the vapour barrier without introducing a leakage. The normal cross section of the storey-height partition is seen to the left of the masonite beam (the first floor is a one-room loft, designed for later enlargement of the house). Certain specific areas are predesigned for perforations, then the polyethylene sheeting is squeezed between two plywood boards, and the lead-in is sealed with mastic. The mastic sealing can be carried out from below, as shown, or from above if preferred. The structural beam has a depth of 400 mm, and its 8 mm wide web plate of hard fibreboard minimises thermal bridges. The enlargement to the left shows the squeezed lap joints of the polyethylene foil.

Figure 5 shows a vertical section of a roof construction at the ridge. The rafters are 400 mm masonite rafters as in figure 4; thus the cold bridges are minimised. In this case the vapour barrier is placed between two layers of plaster boards. Other construction details not included in this paper suggested this solution. As everywhere else in the six houses, joints between polyethylene sheets are squeezed lap joints. As soon as the laminated girder is in position a sheet of heavy polyethylene foil is rolled out on top of it and stapled to its sides temporarily. When the rafters, the lathing and the first layer of gypsum ceiling panels have been put up the foil is unstapled and a lap joint can be established (as indicated in the enlargement).

A new type of structural element, a post without any thermal bridges, is shown in figure 6. It consists of two strips of wood glued to a hard core of mineral wool. Two posts, glued and nailed to a thin plywood panel, form a strong beam, as shown to the right in figure 6. The post and the beam are used as structural parts in the building elements of a prefabricated thermally light house, the post being used in the roof and walls, and the beam in the floor. A vertical cross section of two such floor elements is shown in figure 7, before and after the joining.

No vapour barrier has been indicated in the illustration. The idea was to use 15 mm plywood boards with aluminium foil integrated in the panels. This is not a standard product, and to keep

mur jouant le rôle de barrière de vapeur. L'isolation en laine minérale de la toiture et de ses murs mesure respectivement 400 mm et 200 mm. Les chevrons stratifiés de 65 mm de large (en pointillés sur le dessin) forment un pont thermique d'importance mineure, entraînant une augmentation du coefficient K pour la toiture inférieure à 7 %. Dans la toiture, la barrière de vapeur consiste en feuilles de polyéthylène entre le lattis et les panneaux de plafond en plâtre. Une planche de bois est vissée le long des bords dans les murs, serrant la feuille — deux bandes de mousse de plastique compensant le voilement de la planche. Le large dormant de la fenêtre est pré-assemblé, cloué et collé au châssis de la fenêtre pour former une boîte étanche à l'air, s'ouvrant à l'intérieur. Le joint entre le dormant et le béton alvéolaire est étanché au mastic. Le mastic au silicone pour emploi extérieur peut être remplacé par un bourrelet d'étanchéité.

La coupe verticale d'un plafond montrée figure 4 illustre une façon de faire traverser la barrière de vapeur aux conduits, tuyaux et fils sans créer de fuite. On voit à gauche de la poutre en masonite une coupe normale d'une cloison de hauteur d'étage (le premier étage est un grenier d'une seule pièce conçu pour un agrandissement ultérieur de la maison). Certaines zones spécifiques sont prévues pour des perforations, puis les feuilles de polyéthylène sont comprimées entre deux planches de contre plaqué et le point d'entrée est étanché au mastic. Cette pose du mastic d'étanchéité peut se faire par en-dessous comme le montre la figure ou par au-dessus, si on le préfère. La poutre porteuse a 40 cm d'épaisseur et son âme pleine d'une largeur de 8 mm en plaque de fibre dure minimise les ponts thermiques. L'agrandissement à gauche montre les joints par chevauchement comprimés de la feuille de polyéthylène.

La figure 5 montre une coupe verticale du faîtage d'une toiture. Les chevrons sont des chevrons en masonite de 400 mm comme dans la figure 4, ce qui minimise les ponts froids. Dans ce cas, la barrière de vapeur est placée entre deux couches de plaques de plâtre. Ce sont d'autres détails de construction, non inclus dans cet article, qui ont suggéré cette solution. Comme partout ailleurs dans les six maisons, les joints entre les feuilles de polyéthylène sont des joints de chevauchement comprimés. Dès que la poutre stratifiée est en place, une feuille de polyéthylène lourd est déroulée au-dessus et agrafée provisoirement sur les côtés de la poutre. Une fois les chevrons, le lattis et la première couche de panneaux de plafond en plâtre posés, la feuille est dégrafée et l'on peut réaliser un joint par chevauchement (cf. l'agrandissement).

La figure 6 montre un nouveau type d'élément de construction, un montant sans aucun pont thermique. Il consiste en deux bandes de bois collées à une âme dure de laine minérale. Les montants, collés et cloués à un panneau mince de contre plaqué, forment une poutre résistante (cf. fig. 6 à droite). Le poteau et la poutre sont utilisés comme parties porteuses dans les éléments de construction d'une maison préfabriquée de faible inertie thermique, les montants étant utilisés en toiture et pour les murs et les poutres pour le plancher. On peut voir, en figure 7, une coupe verticale de deux de ces types d'éléments de plancher, avant et après réalisation des joints. L'illustration ne fait état d'aucune barrière de vapeur. L'idée était d'utiliser des plaques de contre plaqué de 15 mm avec une feuille d'aluminium incorporée dans ces pan-

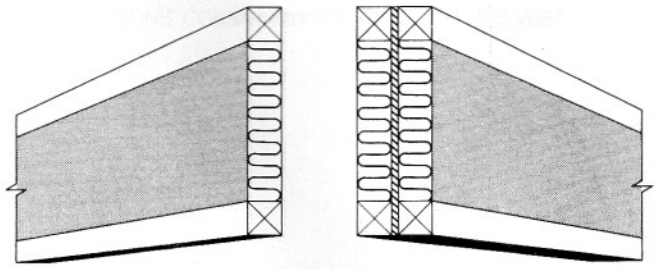


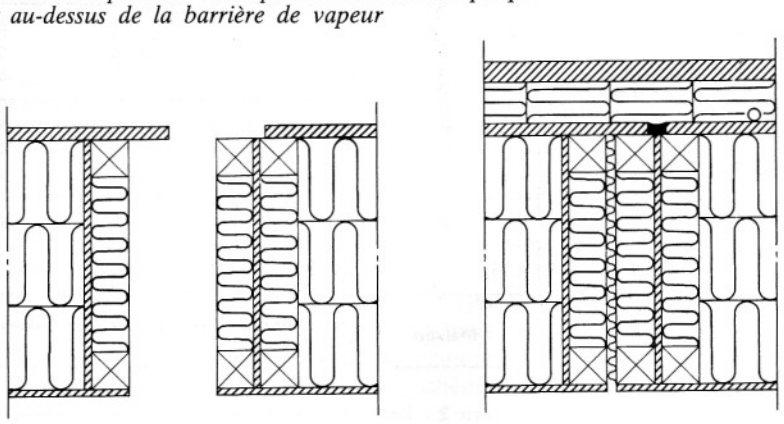
Figure 6
A new type of structural element which avoids thermal bridges. In post (left) and beam form, it has wood strips glued to a hard core of mineral wool. Two such panels, glued and nailed to a central plywood layer, form the beam

Nouveau type d'élément de construction qui évite les ponts thermiques. Du type montant (à gauche) poutres, il comporte des bandes de bois collées à une âme dure en laine minérale. Deux panneaux de ce type, collés et cloués sur une couche centrale de contre-plaqué, forment la poutre

neaux. Il ne s'agit pas d'un produit standard et, pour rester dans les limites de temps fixées, il a été décidé d'utiliser pour cette première maison, des feuilles de polythène (entre les 15 mm de contre plaqué et les 300 mm d'isolant en laine minérale). On peut, malgré tout, supposer raisonnablement que les panneaux de contre plaqué seuls seraient suffisamment étanches. Les joints entre éléments sont étanchés au mastic. L'utilisation de grands éléments (6 unités de plancher, 6 unités de toiture et 6 unités de murs extérieurs seulement pour la maison) permet de maintenir au minimum la longueur totale des joints. La partie droite de la figure 7 montre les plaques de sol assorties qui sont posées directement sur la laine minérale, le plan des fibres de la laine minérale étant vertical. Il est

Figure 7
Two floor elements, before and after joining (vertical cross section). Matched floor boards rest directly on mineral wool; ducts, tubes, etc. go in space between floor boards and plywood panels and above the vapour barrier

Deux éléments de plancher, avant et après confection des joints (coupe verticale). Les planches assorties reposent directement sur la laine minérale; les conduits, tuyaux, etc. passent dans l'espace entre les planches du plancher et les panneaux de contre-plaqué et au-dessus de la barrière de vapeur



within the time limits it was decided to use polyethylene sheeting (between the 15 mm plywood and the 300 mm mineral wool insulation) for this first house. However, it is reasonable to assume that the plywood panels alone would be sufficiently tight. The joints between elements are sealed with mastic. Through the use of large units (only 6 floor units, 6 roof units and 6 external wall units for the house) the total length of joints is kept low. As shown to the right in figure 7 the matched floor boards rest directly on mineral wool, the fibre plane of the mineral wool being vertical. In the space between the floor boards and the plywood panels rectangular ventilation ducts, pipes and (as indicated) wire tubes can be placed, above the vapour barrier.

Air change measurements

Normally controlled ventilation provides an air change of approx. 0.5 per hour. To determine the air leakage of the houses, *ie* through the construction, the ventilation ducts were sealed during the test periods. When the first tests were carried out the houses were about 18 months old and had been heated all the time. The weather data were recorded locally as part of the continuous monitoring programme of this project.

Tracer gas method

No equipment for constant-concentration measurements was available. Tracer gas was injected in all rooms until the concentration reached a fixed level. A uniform distribution was obtained by means of transportable fans. The concentration was then monitored as a function of time, and the assumed constant air change rate was derived as a reciprocal of the time constant of the exponential decrease function.

The first measurements were carried out simultaneously in all six houses, using N_2O as tracer gas. The results are shown in table 2. Later tests were performed one house at a time, using a radioactive tracer, Kr-85. These results are also shown in the table.

Pressurisation and depressurisation

In all six houses depressurisation measurements were made, and in four houses additional pressurisation tests were carried out. (The normal operating conditions of the houses result in a slight depressurisation). In each test an exterior door was replaced by a plywood panel with a fan, and a venturi tube for air flow measurement. An attempt was made to replace the tightest door of each house, mostly from a choice between two possibilities. The results are shown in figure 8 and table 3. House C is

Table 2 *Air change rates measured by the tracer gas decay method*

House	Measured infiltration (a.c.h.)	Wind speed (m/s)	Temperature difference (C)	Tracer gas (N = N_2O, K = Kr − 85)
A	0.10	5.9	18	N
	0.07	2.0	14	N
	0.05	1.8	13	K
	0.05	1.5	6	K
B	0.03	5.6	23	N
	0.02	1.6	23	N
	0.02	3.4	16	N
	0.02	3.1	15	K
C	0.12	5.9	20	N
	0.07	1.6	8	N
	0.05	1.9	10	K
D	0.09	5.9	17	N
	0.08	3.2	16	N
	0.08*	4.1	11	K
E	0.08	5.9	18	N
	0.11	4.5	13	N
	0.10	4.6	12	K
F	0.07	5.9	19	N
	0.07	2.2	11	N
	0.08	2.3	13	K
Maison	**Infiltration mesurée (rah)**	**Vitesse du vent (m/s)**	**différence de température (°C)**	**Gaz traceur (N = N_2O, K = Kr − 85)**

* Insulating shutters closed. Volets isolants fermés.

Tableau 2 *Taux de renouvellement de l'air mesurés par la méthode de décroissance des gaz traceurs*

possible de faire passer dans l'espace entre les planches du plancher et les panneaux de contre-plaqué des conduits rectangulaires de ventilation, des tuyaux et des fils sous gaine, au-dessus de la barrière de vapeur.

Mesures du renouvellement d'air

Une ventilation contrôlée donne normalement un taux approximatif de 0,5 rah. Pour déterminer les fuites d'air, par l'enveloppe, les conduits de ventilation ont été bouchés pendant les périodes d'essai. Lors des premiers essais, les maisons avaient environ 18 mois et avaient été chauffées en continu. Les données météorologiques avaient été enregistrées localement dans le cadre du programme de contrôle continu de ce projet.

Méthode du traceur à gaz
Les responsables ne disposaient d'aucun appareillage pour mesurer la concentration constante. Un gaz traceur a été injecté dans toutes les pièces jusqu'à ce que la concentration ait atteint un niveau déterminé et une répartition uniforme a été obtenue grâce à des ventilateurs portatifs.

La concentration a été mesurée en fonction du temps et le taux constant de renouvellement de l'air dérivé en tant que réciproque de la constante temps de la fonction de décroissance exponentielle.

Les premières mesures ont été effectuées simultanément dans les six maisons, avec du N_2O. Le tableau 2 donne les résultats de cette étude ainsi que des essais ultérieurs réalisés maison après maison avec un traceur radioactif, le Kr-85.

Pressurisation et dépressurisation
Des mesures de dépressurisation ont été faites dans l'ensemble des six maisons ainsi que, dans quatre d'entre elles, des essais complémentaires de pressurisation. (Les conditions normales de fonctionnement de la maison ont pour résultat une légère perte de pression). Dans chaque essai, une porte d'entrée a été remplacée par un panneau de contre-plaqué avec ventilateur et un tube de venturi pour mesurer l'écoulement d'air. On a tenté de remplacer la porte la plus étanche de chaque maison, essentiellement un choix entre deux possibilités. La figure 8 et le tableau 3 donnent les résultats. La maison C est représentée par deux courbes de défaut d'étanchéité pour des raisons que nous exposerons ci-après. Le taux de renouvellement de l'air y est enregistré également pour une pression différentielle de 50 Pa. D*, E* et F* représentent les mesures dans trois maisons avec volets extérieurs ; pour ces mesures, les volets étaient fermés mais les fenêtres derrière ouvertes.

Discussion des résultats
Il apparaît clairement des résultats de ces deux techniques de mesure que les six maisons doivent être considérées comme étanches. Mais, à en juger par les essais de perte de charge, il est possible de les diviser en trois groupes : 1. extrêmement étanches (B et F) ; 2. très étanches (A, D et E) ; et 3. relativement bien étanches (C). B et F sont toutes les deux des maisons industrialisées en grands éléments, tandis que les autres ont été construites sur le chantier. La maison C a un porche et, à la suite d'un malentendu, le constructeur a mis des bourrelets d'étanchéité à la porte du porche donnant sur l'extérieur mais a utilisé

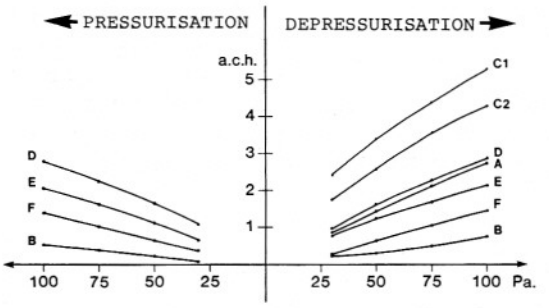


Figure 8
Measured air change rates for the different houses under positive and negative pressures

Taux de renouvellement d'air mesurés pour les différentes maisons soumises à des pressions positives et négatives

Table 3 *Measured air change rates at different differential pressures*

Measured air change rates at a differential pressure of 50 Pa		
House	**Pressurisation (a.c.h.)**	**Depressurisation (a.c.h.)**
A	—	1.42
B	0.21	0.29
C1	—	3.39
C2	—	2.59
D	1.65	1.61
E	1.12	1.24
F	0.64	0.64
D*	—	2.22
E*	—	1.23
F*	—	0.72
Maison	**Pressurisation (rah)**	**Dépressurisation (rah)**
Taux de renouvellement d'air à une pression différentielle de 50 Pa		

Tableau 3 *Renouvellements de l'air mesurés pour différentes pressions différentielles*

represented by two leakage curves for reasons discussed later. In the same figure and table, the air change rate at a differential pressure of 50 Pa is listed. D*, E* and F* represent measurements in three houses with external shutters; in these measurements the shutters have been closed, but the windows behind them opened.

Discussion of results

It is obvious from the results by the two measurement techniques that all six houses must be considered tight. Judged by the depressurisation tests, however, they can be divided into three groups: 1. extremely tight (B and F); 2. very tight (A, D and E); and 3. fairly tight (C). B and F are both prefabricated houses built from large elements, while the others are site constructions. C has a porch, and due to some misunderstanding the builder put weather strips on the exterior porch door, but used interior doors (without plastic strips and without sills) between the porch and the house. In figure 8 the curve C2 shows the air leakage values when the porch doors and a leaking loft hatch had been sealed with tape. In B, all windows and doors open inward, and the results illustrate that the weather stripping, though good, is the weak point in this connection. The results D*, E* and F* indicate that the external insulating shutters are effective, *ie* that their effect on the transmission heat loss is not diminished by unexpected air leakage.

The results quoted so far, and other measurement values not included in this paper, have not demonstrated any significant relations between the infiltration air change of tight houses and the wind speed. It must be emphasised that, so far, too few tests have been made, considering the low infiltration rates measured. The work will be continued, but until this relation is established, no special effort is made to correlate the wind speed and wind direction to the differential pressure governing the air leakage.

Transmission heat loss measurements

Test procedure

As with the air change measurements the ventilation ducts were sealed for these tests.The tests were performed during the winter 1979-80 in two houses at a time, for periods ranging from 7 to 24 days. Houses D, E and F were calibrated twice, the shutters being closed the first time and open the second. Each room was heated by a thermostat-controlled electric resistance heater, and meter readings were logged twice a day. Room temperatures as well as weather data were recorded every ten minutes (solar radiation data were measured every ten seconds, and the sums were recorded every ten minutes).

Calculation method

From each test two periods were selected; first, the longest period beginning and ending with much the same internal and external temperatures (to minimise the problem of heat accumulation in the constructions), and, secondly, a short stationary period (24-48 hours) with a minimum of insolation. For the chosen periods, the following heat balance applies:

Transmission heat loss + infiltration heat loss = Electricity for heating + solar heat gain.

The transmission heat loss is calculated from the theoretical U-values, the actual average temperature difference and the transmission areas (as prescribed in ref. 3). The lower sky radiation temperature is taken into account through a 15 per cent increase of the transmission heat loss through the roof, in accordance with those rules. This one-dimensional model is slightly modified regarding the heat flow at the foundation. An additional heat loss is calculated, using a model for two-dimensional heat flow, (ref. 4). The transmission heat loss coefficients listed in table 4 are obtained by dividing the calculated heat losses by the average internal to external temperature difference for each period. In this case the house average temperature is derived from the room temperatures, each room temperature being weighted with respect to the room's designed transmission heat loss.

The solar heat gain is obtained as the product of the measured solar radiation, the window area and standard solar transmission factors, (ref. 5). The infiltration heat loss is calculated from the measured air change rates; the values obtained from the first N_2O measurements were chosen for this purpose. The measured transmission heat loss is found as the sum of the solar heat gain and the electricity meter readings with the subtraction of the infiltration heat loss. As before, the heat loss coefficient is obtained from division by the average internal to external temperature difference. The results are listed in table 4.

Discussion of results

The agreement between the theoretical and the experimental values is good, considering the simplicity of the model applied. The longer test periods show the better agreement (measured coefficients range from 8 per cent below to 7 per cent above the calculated values; relevant percentages for the shorter periods are 14 per cent and 13 per cent respectively).

Generally, the product of the heat loss coefficient and the number of heating degree hours is used as an estimate of the annual transmission heat loss. Denmark has approximately 70 000 heating degree hours (17 deg C base) in a year. The simple product, however, will not necessarily be in agreement with the measured annual transmission heat losses.

Some of the houses have been designed to utilise a large part of the free heat (especially house F, which was designed as a passive solar house), and the steady state model does not take this into account, except

des portes intérieures (sans bandes plastiques et sans seuil) entre le porche et la maison. Dans la figure 8, la courbe C2 donne les valeurs de fuites d'air après que les portes du porche et la trappe du grenier laissant passer l'air aient été scellées avec une bande. Dans la maison B, toutes les fenêtres et les portes ouvrent vers l'intérieur et les résultats montrent clairement que les bourrelets d'étanchéité, bien que de bonne qualité, sont le point faible à cet égard. Les résultats D*, E* et F* indiquent que les volets isolants extérieurs sont efficaces, c'est-à-dire que leur effet sur la déperdition de chaleur par transmission n'est pas diminué par des fuites d'air non prévues.

Les résultats cités jusqu'ici et d'autres valeurs de mesure non comprises dans cet article n'ont pas fait la preuve de relations significatives entre le renouvellement d'air par infiltration et la vitesse du vent. Il faut souligner que, jusqu'à maintenant, il y a eu trop peu d'essais, compte tenu des faibles taux d'infiltration mesurés. Ce travail se poursuivra, mais jusqu'à ce que ce rapport soit prouvé, il ne sera fait aucun effort pour corréler vitesse et direction du vent et la pression différentielle corrélant les fuites d'air.

Mesures des déperditions de chaleur par transmission

Procédure d'essai

Comme pour les mesures de renouvellement de l'air, les conduits d'air ont été étanchés pour ces essais qui ont été réalisés au cours de l'hiver 1979-80 dans deux maisons en même temps, sur des périodes allant de 7 à 24 jours. Les maisons D, E et F ont été calibrées deux fois, les volets étant fermés la première fois et ouverts la seconde. Chaque pièce était chauffée par un radiateur à résistance électrique avec thermostat et les compteurs relevés deux fois par jour. Les températures des pièces ainsi que les données météorologiques l'ont été toutes les dix minutes (les données relatives au rayonnement solaire ont été mesurées toutes les dix secondes, et les totaux enregistrés toutes les dix minutes).

Méthode de calcul

Deux périodes ont été sélectionnées dans chaque essai, d'abord, la plus longue période commençant et se terminant avec les mêmes températures (approximativement) intérieure et extérieure (pour minimiser le problème de l'accumulation de chaleur dans les constructions) et deuxièmement, une courte période stationnaire (24-28 heures) avec un minimum d'ensoleillement. Pour les périodes choisies, l'équilibre thermique suivant s'applique : déperdition de chaleur par transmission + déperdition de chaleur par infiltration = électricité pour le chauffage + apport de chaleur solaire.

La déperdition de chaleur par transmission est calculée à partir des coefficients K théoriques, de la différence de température moyenne réelle et des zones de transmission (comme prescrit dans la référence 3). La température inférieure du rayonnement du ciel est prise en compte par une augmentation de 15 % de la déperdition de chaleur par transmission par le toit, conformément à ces règles. Ce modèle à une dimension est légèrement modifié en ce qui concerne l'écoulement de chaleur au niveau des fondations. Une déperdition de chaleur supplémentaire est calculée grâce à un modèle d'écoulement de chaleur à deux dimensions (réf. 4). On obtient les coefficients de déperdition de chaleur donnés au tableau 4 en divisant les déperditions de chaleur calculées par la différence de température extérieur-intérieur moyenne pour chaque période. Dans ce cas,

Table 4 *Results from transmission heat loss measurements*

House Maison	LP (h)	Δt (C)	I (kWh)	EL (kWh)	TC (W/C)	TM (W/C)	TC − TM . 100 / TC (%)	TMV (W/m³C)
A	119.3	21.9	6.5	214.5	83	76	8	0.31
A	22.8	22.5	0.3	40.6	83	71	14	0.29
B	119.2	22.1	5.4	195.8	79	73	8	0.25
B	46.8	22.5	0.4	77.0	78	70	10	0.24
C	516.2	23.3	124.0	1 077.2	88	89	− 1	0.33
C	44.8	21.3	1.1	97.7	89	93	− 4	0.35
D	328.2	21.6	172.9	592.6	97	97	0	0.28
D	47.7	20.4	6.7	89.2	97	88	9	0.25
D*	454.0	21.9	0.0	765.6	68	66	3	0.19
D*	49.3	22.3	0.0	86.4	68	68	0	0.20
E	424.6	22.1	195.6	732.2	82	88	− 7	0.21
E	47.7	20.9	4.2	87.0	82	80	2	0.19
E*	334.4	22.8	0.0	560.5	60	62	− 3	0.15
E*	93.9	22.8	0.0	162.0	60	65	− 8	0.16
F	410.7	22.6	550.0	966.5	145	155	− 7	0.44
F	24.5	21.1	5.9	66.7	145	132	9	0.38
F*	311.8	23.3	0.0	788.8	92	100	− 7	0.29
F*	23.1	20.9	0.0	55.7	95	107	− 13	0.31

D*, E*, F*
Houses with insulating shutters closed

Maisons avec volets isolants fermés

LP	Length of period
Δt	Average temperature difference during LP
I	Insolation during LP (solar heat gain)
EL	Electricity for heating during LP
TC	Calculated transmission heat loss coefficient
TM	Measured transmission heat loss coefficient
TMV	TM per m^3 house volume

LP	Durée de la période
Δt	Différence de température moyenne pendant LP
I	Ensoleillement pendant LP
EL	Electricité pour le chauffage pendant LP
TC	Coefficient calculé de déperdition de chaleur par transmission
TM	Coefficient mesuré de déperdition de chaleur par transmission
TMV	TM par m^3 de volume de la maison

Tableau 4 *Résultats des mesures de déperdition de chaleur par transmission*

that the stipulation of a 17 deg C base to some extent does compensate for this free heat effect. It must be emphasised that the main achievement of this experiment has been to verify the calculation of U-values, and thus the standard design procedure, for low-energy houses.

Some of the differences between calculated and measured heat losses are considered to be due to the difficulties of assessing the solar heat gain. The standard solar transmission factors have been determined from experiments with clean windows. The windows at Hjortekar were not cleaned immediately before the house calibrations, and their glass might be different from that of the reference windows (*eg* with respect to the concentration of iron oxide). However, some preliminary solarimeter measurements of the solar transmission indicate that the solar heat gain derived from the standard factors was too high.

A comparison between the transmission heat loss coefficients derived from the longer test periods (of house D, E, and F respectively) with and without shutters, verifies that the expected energy savings from the use of insulated shutters is obtained (table 5). The shorter periods all indicate smaller energy savings than expected.

Table 5 *Energy saving effect of shutters*
(sp = the shorter period, lp = longer period)

	D(sp)	D(lp)	E(sp)	E(lp)	F(sp)	F(lp)
Calculated effect (W/C)	29	29	22	22	50	53
Measured effect (W/C)	20	31	15	26	25	55

Conclusions

It has been shown in this project that it is possible to build well insulated airtight houses, and that it can be done in various ways using many different building materials. The designer must pay attention to the two- and three-dimensional character of the tightness problems, and he must make the builder aware of the importance of a properly sealed structure. During a period of transition intensified supervision may be necessary.

Although no direct correlation has so far been found between the tracer gas measurements and the depressurisation tests it is advisable to apply both methods to assess and/or improve the air tightness of a house. The tracer gas decay method gives the level of the weather-dependant air infiltration at the specific time of the measurements, and the depressurisation tests supply information on the physics of the building. Under depressurisation it is possible to find air leaks, as they cause cold draughts, and a pressurisation/depressurisation test can furthermore be combined with a smoke test.

The thermal calibration of the houses shows good agreement between the measured transmission heat loss and the transmission heat loss calculated according to the present simplified design procedures. Test periods should have a length of not less than 10 days. It has been found that results based on shorter extracts of the test periods, *eg* 24 hours, are more dispersed, even if the data are selected from a quasi-stationary period. Future work will show if it is possible to derive a simple heat loss equation for each low-energy house from regression analysis of the experimental data, an equation based on the three variables — temperature difference, solar radiation and wind speed (ref. 6).

Acknowledgement

We thank our colleagues in the research team, Mogens R. Byberg (project manager), Rolf G. Djurtoft, Gad Nissenbaum, Johannes Poulsen, Kirsten E. Poulsen and Niels Henrik Rasmussen, who have participated in either the planning or the execution of the experiments and calculations reported in this paper.

The Low-Energy House Project is funded by the Danish Ministry of Energy.

References/Bibliographie

1. BYBERG M., DJURTOFT R.G. and SAXHOF B., Six low-energy houses at Hjortekar, Description of the houses. Thermal Insulation Laboratory, Report No. 83, May 1979.
2. SAXHOF B., DJURTOFT R.G., BYBERG M. and AASBJERG NIELSEN A., Six low-energy houses at Hjortekar, Denmark, Description of the houses and presentation of energy measurements during the first winter. 7th International Congress of Heating and Air Conditioning, 'Clima-2000', Budapest 1980.
3. NP-138-S (DS 418). Dansk Ingeniørforening's. Rules for the calculation of heat loss from buildings, 4th Edition. Copenhagen 1977. In Danish.
4. TODIM, Internal document on the two-dimensional heat flow programme. Thermal Insulation Laboratory.
5. NIELSEN, ANKER, Beregning af energiforbrug i bygninger (EFB-1). Thermal Insulation Laboratory, Report No. 92, 1980.
6. KORSGAARD, VAGN, Wärmeersparnisse durch bessere wärmedämmung an einfamilienwohnhäusern, Gesundheits-Ingenieur. Nr. 8, 1960, Thermal Insulation Laboratory, 1960.

on dérive la température moyenne de la maison des températures des pièces, chacune d'elles étant pondérée en fonction de la déperdition de chaleur par transmission du projet.

L'apport de chaleur solaire est obtenu, comme étant le produit des radiations solaires mesurées, de la superficie des fenêtres et des coefficients de transmission solaire standard (réf. 5). La déperdition de chaleur par infiltration est calculée d'après les taux de renouvellement de l'air mesurés ; on a choisi, dans ce but, les valeurs obtenues d'après les premières mesures de N_2O. On obtient la déperdition de chaleur par transmission mesurée par l'addition de l'apport de chaleur solaire et des relevés du compteur d'électricité moins la déperdition de chaleur par infiltration. Comme précédemment, le coefficient de déperdition est obtenu par division par la différence des températures extérieur-intérieur (cf. les résultats au tableau 4).

Discussion des résultats

La concordance entre les valeurs théoriques et expérimentales est bonne, malgré la simplicité du modèle appliqué. Les essais sur des périodes plus longues révèlent une meilleur concordance (les coefficients mesurés vont de − 8 % à + 7 % des valeurs calculées, les pourcentages correspondants pour les périodes plus courtes sont respectivement de 14 et 13 %).

On utilise, en général, le produit du coefficient de déperdition de chaleur et du nombre de degrés-heures de chauffage pour estimer la déperdition de chaleur annuelle par transmission. Le Danemark compte approximativement 70 000 degrés-heures de chauffage (sur la base de 17 °C) par an. Ce produit simple ne sera pas forcément en accord avec les déperditions de chaleur par transmission mesurées.

Certaines maisons ont été conçues pour utiliser une grande part de l'énergie libre (en particulier la maison F, conçue comme maison solaire passive), et le modèle en régime permanent ne tient pas compte de ce fait, sauf que la prescription d'une base de 17 °C compense en fait, dans une certaine mesure, l'incidence de cette chaleur gratuite. Il faut souligner que cette expérience a eu pour mérite principal de vérifier le calcul des coefficients K et donc la procédure standard de calcul au stade du projet pour les maisons consommant peu d'énergie.

Certaines différences entre les déperditions de chaleur calculées et mesurées sont dues, pense-t-on, aux difficultés d'une estimation exacte des apports de chaleur solaire. Les coefficients standard de transmission solaire ont été déterminés à partir d'expériences faites avec des fenêtres propres. A Hjortekar, les vitres n'ont pas été nettoyées immédiatement avant le calibrage des maisons, et leurs vitrages étaient peut-être différents des fenêtres de référence (en ce qui concerne, en particulier, la teneur en oxyde de fer). Mais quelques mesures préliminaires au solarimètre indiquent que les apports solaires dérivés des coefficients standard étaient trop élevés).

Une comparaison entre les coefficients de déperdition de chaleur par transmission dérivés des périodes d'essais plus longues (des maisons D, E et F respectivement) avec et sans volets permet de vérifier que l'on obtient bien les économies d'énergie attendues de l'utilisation des volets isolants (cf. tableau 5). Les périodes plus courtes donnent toutes des économies inférieures à celles que l'on escomptait.

Tableau 5 *Energie économisée grâce aux volets* (sp = période courte, lp = période longue)

	D(sp)	D(lp)	E(sp)	E(lp)	F(sp)	F(lp)
Incidence calculée (W/°C).....	29	29	22	22	50	53
Incidence mesurée (W/°C).....	20	31	15	26	25	55

Conclusions

Ce projet a permis de montrer qu'il est possible de construire des maisons bien isolées et étanches à l'air, et ce de différentes façons et en utilisant des matériaux de construction nombreux et variés. Le projeteur doit faire attention au caractère à double ou triple dimension des problèmes d'étanchéité à l'air et c'est à lui de faire prendre conscience au constructeur de l'importance d'un ouvrage correctement étanche. Une supervision très rigoureuse peut être nécessaire pendant une période de transition.

Bien que l'on n'ait pas, jusqu'ici, établi de corrélation directe entre les mesures au gaz traceurs et les essais de pressurisation, il est conseillé d'appliquer les deux méthodes pour évaluer et/ou améliorer l'étanchéité à l'air d'une maison. La méthode d'atténuation des gaz traceurs donne le niveau d'infiltration d'air dépendant des conditions météorologiques au moment spécifique des mesures, tandis que les essais de dépressurisation fournissent des informations sur l'état du bâtiment. Il est possible, en cours de dépressurisation, de trouver les fuites d'air, car elles provoquent des courants d'air et, en outre, de combiner ce type d'essai avec un essai d'enfumage.

L'étalonnage thermique de ces maisons a révélé une bonne concordance entre les déperditions de chaleur par transmission mesurées et calculées selon les procédures simplifiées actuelles de conception. Les essais devraient porter sur des périodes de 10 jours au moins, car on s'est aperçu que les résultats basés sur 24 h, par exemple, sont plus dispersés, même si les données sont choisies sur une période quasi stationnaire. Les travaux ultérieurs montreront s'il est possible de dériver une équation simple de déperdition de chaleur pour chaque maison consommant peu d'énergie d'une analyse de régression des données expérimentales, équation basée sur trois variables : différence de température, radiations solaires et vitesse du vent (réf. 6).

Remerciements

Nous tenons à remercier nos collègues de l'équipe de recherche, Mogens R. Byberg (chef du projet), Rolf G. Djurtoft, Gad Nissenbaum, Johannes Poulsen, Kirsten E. Poulsen et Niels Henrik Rasmussen qui ont participé soit à la préparation, soit à l'exécution des expériences et des calculs rapportés dans cet article.

Le Projet Maisons consommant peu d'énergie est subventionné par le ministère de l'Energie du Danemark.