



Det här verket har digitaliserats vid Göteborgs universitetsbibliotek och är fritt att använda. Alla tryckta texter är OCR-tolkade till maskinläsbar text. Det betyder att du kan söka och kopiera texten från dokumentet. Vissa äldre dokument med dåligt tryck kan vara svåra att OCR-tolka korrekt vilket medför att den OCR-tolkade texten kan innehålla fel och därför bör man visuellt jämföra med verkets bilder för att avgöra vad som är riktigt.

This work has been digitized at Gothenburg University Library and is free to use. All printed texts have been OCR-processed and converted to machine readable text. This means that you can search and copy text from the document. Some early printed books are hard to OCR-process correctly and the text may contain errors, so one should always visually compare it with the images to determine what is correct.



**Rapport**

TEKNISKA HOGSKOLAN I LUND  
SEKTIONEN FOR VAG- OCH VATTEN  
BIBLIOTEKET

**R6:1973**

**Metod för beräkning av  
extrema yttemperaturer  
hos isolerade  
ytterkonstruktioner**

**Ingemar Höglund**

**Byggforskningen**

# Metod för beräkning av extrema ytttemperaturer hos isolerade ytterkonstruktioner

Ingemar Höglund

I ett flertal fall måste en byggnadsprojektor känna till de temperaturer som är dimensionerande för konstruktionen, exempelvis vid beräkning av rörelser och spänningar samt för bedömning av materials beständighet.

Rapporten beskriver en teoretisk metod för beräkning av extrema temperaturer för byggnaders ytterytter under icke-stationära förhållanden där hänsyn tas till såväl långvägigt som kortvägigt strålningsutbyte med omgivningen. Inverkan av olika faktorer som värmotstånd, värmekapacitet, absorptionsfaktor, emissionstal och yttre värmeövergångskoefficienter diskuteras.

Rapporten avslutas med några tillämpningsexempel som klargör den praktiska användningen liksom jämförelser mellan dels beräknade och dels i praktiken uppmätta ytttemperaturer.

## Bakgrund

På grund av stora temperaturvariationer hos ett taks och en väggs ytteryta och inuti resp. konstruktion uppstår många byggnadstekniska problem. Exempelvis kan hos ett tak nedbrytningen av ett täckande bitumenskikt påskyndas om det utsätts för kraftig kortvägig strålning. Vid vissa byggmaterial, t.ex. styrencellplast, kan man riskera att de blir så mjuka att de deformeras vid hög ytttemperatur när de används för isolering av tak eller fasader. En annan temperaturpåfrestning på konstruktioner är av temperaturvariationer förorsakade spännings- och deformationstillstånd som ibland även ger upphov till sprickbild-

ning. På grund av att temperaturvariationerna är olika på olika djup i konstruktionen kan man i vissa fall få krökning på fasadelementen vid elementbyggda hus. För beräkning av rörelser hos fasadelement p.g.a. temperaturändringar, både långtidsvarierande och korttidsvarierande, måste man kunna bestämma dimensionerande temperaturer. Storleken av dessa rörelser påverkar naturligtvis fogtätningmaterial och infästningsbeslag. För utformning, dimensionering och val av material för dessa detaljer är det nödvändigt att beräkningarna baseras på icke-stationära förhållanden och då med hänsyn till både det kort- och långvägiga strålningsutbytet med omgivningen.

Vid institutionen för byggnadsteknik, KTH, Stockholm, pågår ett arbete för utformning av beräkningsmetoder som möjliggör att vid icke-stationära förhållanden – som alltid är rådande i praktiken – beakta såväl det kortvägiga som det långvägiga strålningsutbytet mellan byggnaders ytterytter och omgivningen (FIG. 1). Dessa beräkningsmetoder möjliggör mera värmeekonomiska och från andra synpunkter mera optimala lösningar av resp. konstruktioners utformning.

Tidigare har publicerats ”Tabeller för beräkning av solinstrålning mot byggnader” (Bygghorsknigen, Rapport 49/68). I rapporten presenteras bl.a. solhöjd, asinut och total solinstrålning beräknande för varannan latitud mellan 56° och 68° N, dvs. för hela Sverige.

Det till synes enklaste sättet att skaffa

## Bygghorsknigen Sammanfattningar

R6:1973

Nyckelord:

extrema ytttemperaturer (väggar, tak), modifierad ekvivalent utetemperatur, icke-stationär värmetransport, strålningsutbyte, termiska rörelser och spänningar

Rapport R6:1973 avser anslag C 575 från Statens råd för bygghorskningsforskning till institutionen för bygghorskningssteknik, KTH, Stockholm.

UDK 69.022.3  
536.2  
699.86  
SfB (21)  
(27)  
ISBN 91-540-2106-5

Sammanfattning av:

Höglund, I, 1973, *Metod för beräkning av extrema ytttemperaturer hos isolerade ytterkonstruktioner*. (Statens institut för bygghorskningsforskning) Stockholm. Rapport R6:1973, 56 s., ill. 16 kr.

Rapporten är skriven på svenska med svensk och engelsk sammanfattning.

Distribution:

Svensk Byggtjänst  
Box 1403, 111 84 Stockholm  
Telefon 08-24 28 60

Grupp: konstruktion

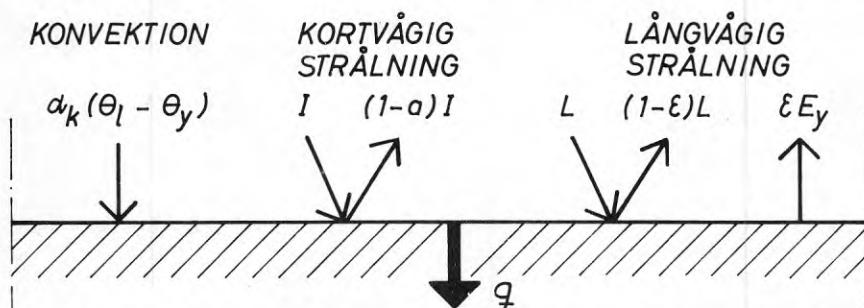


FIG. 1. Schematisk bild av värmebalansen vid en byggnads ytteryta. Konvektionsdelen ger ett värmetilskott eller en värmeförlust beroende på om luftens temperatur,  $\theta_l$ , är högre eller lägre än ytterytans temperatur,  $\theta_y$ . Den kortvägiga strålningen,  $I$ , består dels av direkt solstrålning och dels av diffus strålning i vilken ingår strålning från himlavalvet samt reflekterad strålning från marken och den övriga omgivningen. En vanligtvis större del,  $aI$ , av den kortvägiga strålningen absorberas eftersom absorptionsfaktorn  $a$  för de flesta material i byggnaders ytterytter antar värden mellan 0,4 och 0,9. En vanligtvis mindre del,  $(1-a)I$ , reflekteras vid ytterytan. Från atmosfären och omgivningen inkommer långvägig strålning,  $L$ , av vilken största delen,  $\epsilon L$ , absorberas och ger ett värmetilskott. Resten,  $(1-\epsilon)L$ , reflekteras och utsänds tillsammans med den av ytterytan emitterade långvägiga strålningen,  $\epsilon E_y$ .

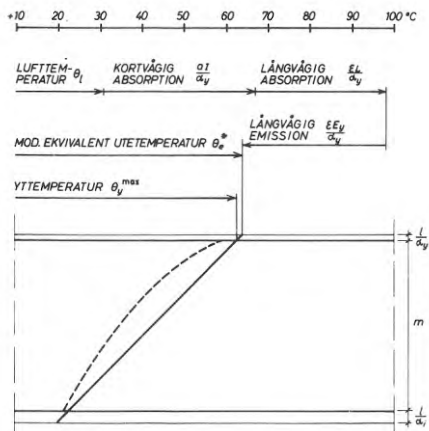


FIG. 2. Uppbyggnaden av den modifierade ekvivalenta utetemperaturer och ytemperaturer.

Om konstruktionen saknar värmekapacitet (heldragen kurva) beror storleken av skillnaden mellan ytemperaturen och den modifierade ekvivalenta utetemperaturer på förhållandet mellan det yttre värmeövergångsmotståndet och konstruktionens totala värmemotstånd. För högisolerade konstruktioner blir skillnaden mycket liten, varför approximationen  $\Theta_y \approx \Theta_e^*$ , som används vid härledningen av de extrema ytemperaturerna, är mycket väl försvarbar. Likheter skulle gälla exakt om värmemotståndet vore oändligt stort.

För konstruktioner med värmekapacitet (streckad kurva) blir normalt skillnaden mellan ytemperaturen och den ekvivalenta utetemperaturer större, men approximationen är dock alltid på den säkra sidan, dvs  $\Theta_y^{max}$  enligt de härledda uttrycken får ett högre värde än den verkliga. På samma sätt blir värdet på  $\Theta_y^{min}$  lägre än den verkliga ytemperaturer för en konstruktion med värmekapacitet.

sig kunskaper om de extrema temperaturerna är att utföra direkta mätningar. Detta är dock i de flesta fall en mycket opraktisk metod. Vill man exempelvis studera de ytemperaturer ett taktäckningsmaterial kan komma att utsättas för, krävs bl.a. att mätningarna görs under tillräckligt lång tid på ett flertal orter och på ett stort antal konstruktionstyper.

### Teoretisk metod

I rapporten visas en teoretisk metod för beräkning av extrema temperaturer på byggnaders ytterytter under icke-stationära förhållanden. Därvid tas hänsyn till såväl det kortvägiga som långvägiga strålningsutbytet med omgivningen. Metoden har avpassats för beräkning av extrema ytemperaturer hos isolerade ytterkonstruktioner utan skikt med stor värmekapacitet och litet värmemotstånd (typ betong)<sup>1</sup> nära ytterytan (se FIG. 2).

I ett särskilt avsnitt diskuteras inverkan av bl.a. värmemotstånd och värmekapacitet, solstrålningsintensitet, absorptionsfaktor, emissionstal och yttre värmeövergångskoefficient.

Metodens tillämpning vid beräkningen

<sup>1</sup>Behandlas i ett snart avslutat arbete vid institutionen för byggnadsteknik, KTH.

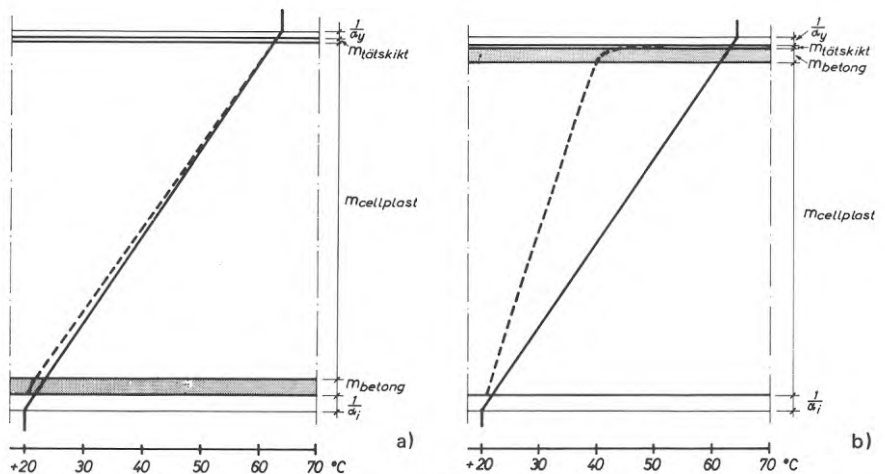


FIG. 3. De högsta temperaturerna under stationära (heldragen kurva) och icke-stationära förhållanden (streckad kurva) för ett 200 mm betongtak.

a) Utvärdig isolering av 100 mm cellplast. På grund av betongens invändiga placering inverkar dess värmekapacitet endast litet på temperaturfördelningen i konstruktionen vid icke-stationära förhållanden, varför de två kurvorna praktiskt taget sammanfaller i konstruktionens yttre delar. Den högsta ytemperaturer blir därför i det närmaste lika med den extrema ytemperaturer. Det betyder att för konventionella utvärdigt isolerade tak tätskiktet utsätts för både höga och låga ytemperaturer med snabba temperaturväxlingar medan temperaturvariationerna i betongen blir små och de termiskt betingade spänningarna och rörelserna i betongen blir av ringa storlek.

b) Invändig isolering av 100 mm cellplast. På grund av betongens värmekapacitet blir temperaturvariationerna i konstruktionen dämpade och fördröjda vid icke-stationära förhållanden. Den högsta ytemperaturer blir därför lägre än den extrema ytemperaturer. Temperaturvariationerna i betongen under soliga dygn blir vid invändig placering av cellplasten tämligen stora, varför de termiskt betingade spänningarna och rörelserna i betongen kan bli stora.

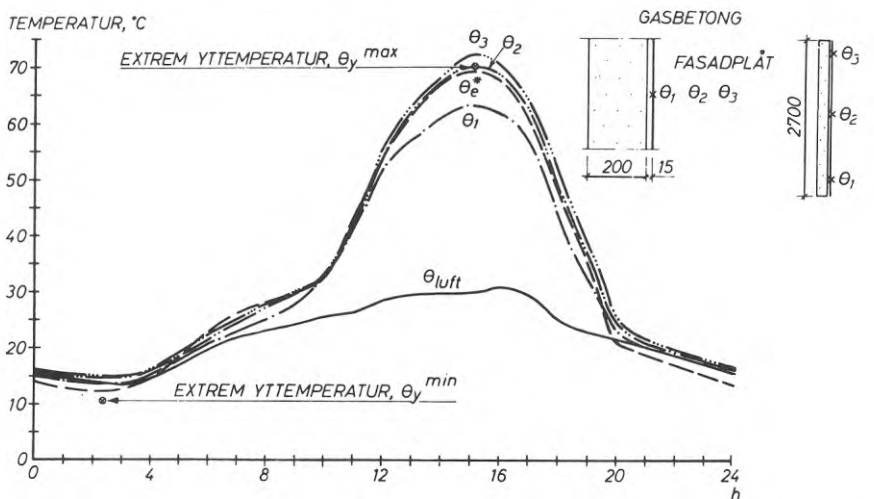


FIG. 4. Den modifierade ekvivalenta utetemperaturer,  $\Theta_e^*$ , och de extrema ytemperaturerna,  $\Theta_y^{max}$  och  $\Theta_y^{min}$ , jämförda med de under ett extremt varmt och soligt sommar-dygn uppmätta ytemperaturerna,  $\Theta_1$ ,  $\Theta_2$  och  $\Theta_3$ , för en mörk yttervägg. Väggen består av element av 25 cm gasbetong på utsidan beklädda med en profilerad mörk fasadplåt (absorptionsfaktor  $a = 0,9$ ). Mellan plåten och gasbetongen finns en ventilerad luftspalt om ca 15 mm.

Den modifierade ekvivalenta utetemperaturer och de extrema ytemperaturerna har beräknats med användande av värden på solstrålningsintensiteten som uppmäts samtidigt som ytemperaturerna. Yttre värmeövergångstalet har antagits till  $\alpha_y = 14 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ .

Överensstämmelsen är mycket god mellan den modifierade ekvivalenta utetemperaturer och ytemperaturer  $\Theta_2$ . I den nedersta mätpunkten,  $\Theta_1$ , kyls fasadplåten under dagen av i luftspalten inströmmande luft, varför överensstämmelsen då är mindre god. I den översta mätpunkten,  $\Theta_3$ , uppvärms däremot plåten av luftströmmen, varför den uppmätta temperaturer där är något högre än den modifierade ekvivalenta utetemperaturer.

av extrema ytemperaturer presenteras dels i en förenklad version avsedd för överslagsmässiga beräkningar, dels i en version avpassad för noggranna beräkningar "för hand" eller i dator.

### Exempel

I FIG. 3 a och b visas beräknade tempe-

peraturer och temperaturfall för två alternativa utformningar av en ytterkonstruktion, dels med utvärdig isolering dels med invändig isolering.

Exempel lämnas också på metodens användning i en rad praktiska fall liksom på jämförelser mellan uppmätta och beräknade ytemperaturer (se FIG. 4).



# Method for calculation of extreme surface temperatures in insulated external parts of structures

Ingemar Höglund

In several cases a building designer must know the design temperatures for a given structure, e.g. in calculating movements and stresses and in assessing the durability of materials.

The report describes a theoretical method of calculating extreme temperatures occurring on the outer surfaces of buildings under non-stationary conditions taking into account both heat transfer by convection and exchange of short-wave and long-wave radiation with the surroundings. The influence of various factors, such as thermal resistance, thermal capacity, absorption factor, coefficient of emission and outside heat transfer coefficient, is discussed.

The report concludes by giving a number of applied examples to demonstrate how the method can be used and compares calculated surface temperatures with surface temperatures recorded in the field.

## Background

A large number of structural problems occur owing to large temperature variations on the outside surfaces of roofs and walls and also inside a structure. Disintegration of a weatherproof layer of bitumen can, for instance, be hastened if the material is exposed to strong, short-wave radiation. With some building materials, e.g. cellular polystyrene, there may be a risk of softening to such an extent that they become deformed at high surface temperatures when used to insulate roofs or facades. Another circumstance that may cause cracking is stress-deformation conditions caused by

temperature. Temperature limits for adhesives, sealants etc can be computed with the above mentioned method. Temperature varies with the depth in the structure and this may in some cases cause buckling in external wall panels on prefabricated buildings. It is essential to be able to determine design temperatures in order to predict movements of structural elements and surface finishes, for example, due to temperature changes which vary both over long and short periods. Naturally enough, the magnitude of these movements effects joint sealants and fixing details. The design, dimensioning and choice of materials for these items renders it necessary for calculations to be based on non-stationary conditions taking into account exchange of both short-wave and long-wave radiation with the surroundings.

The Division of Building Technology at the Royal Institute of Technology in Stockholm is at present working on methods of calculation designed to take into account the exchange of both long-wave and short-wave radiation between buildings and the sky under non-stationary conditions; these are the conditions which in fact always prevail in practice (FIG. 1). These methods of calculation will pave the way to achieving optimum solutions in structural design both from the point of view of heat economy and from other angles.

## Theoretical method

This report describes a theoretical method of calculating extreme temperatures on the outside surfaces of buildings

# National Swedish Building Research Summaries

R6:1973

Key words:

extreme surface temperatures (walls, roofs), modified sol-air temperature, non-steady heat flow, solar radiation, long-wave radiation, temperature movements and stresses

Report R6:1973 has been supported by Grant C 575 from the Swedish Council for Building Research to the Division of Building Technology, Royal Institute of Technology, Stockholm.

UDC 69.022.3  
536.2  
699.86  
SfB (21)  
(27)  
ISBN 91-540-2106-5

Summary of:

Höglund, I, 1973, *Metod för beräkning av extrema yttemperaturer hos isolerade ytterkonstruktioner*. Method for calculation of extreme surface temperatures in insulated external parts of structures. (Statens institut för byggnadsforskning) Stockholm. Report R6:1973, 56 p., ill. 16 Sw. Kr.

The report is in Swedish with Swedish and English summaries.

Distribution:

Svensk Byggtjänst  
Box 1403, S-111 84 Stockholm  
Sweden

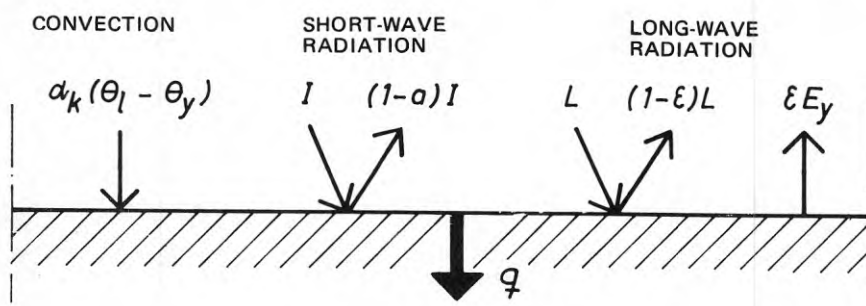


FIG. 1 Diagram showing heat balance at the outside surface of a building. Convection causes an increment or loss of heat depending on whether the temperature of the air ( $\theta_l$ ) is higher or lower than the temperature of the outside surface ( $\theta_y$ ). The short-wave radiation ( $I$ ) consists of direct solar radiation and diffuse radiation which includes radiation from the sky and reflected radiation from the ground and the surroundings in general. A certain, normally major, proportion ( $aI$ ) of the short-wave radiation is absorbed since the absorption factor ( $a$ ) lies between 0.4 and 0.9 for most materials present at the external surfaces of buildings. Another, usually smaller, proportion  $(1-a)I$  is reflected at the outside surface. Long-wave radiation ( $L$ ) is received from the sky and from the surroundings, the greatest proportion of which ( $\epsilon L$ ) is absorbed and causes an increase in heat. The remainder  $(1-\epsilon)L$  is reflected and emitted together with the long-wave radiation ( $\epsilon E_y$ ) emitted by the outside surface.

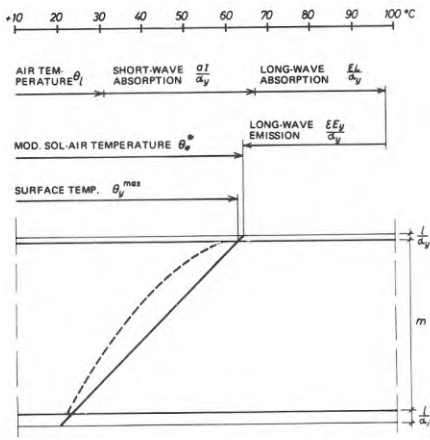


FIG. 2 Composition of the modified sol-air temperature and the extreme surface temperature.

If the structure has no heat capacity (continuous line), the magnitude of the difference between surface temperature and the modified sol-air temperature depends on the relationship between the external surface resistance and the total thermal resistance of the structure. For structures with a high level of insulation this difference is very small and the approximation  $\Theta_y \approx \Theta_e^*$  used to derive the extreme surface temperatures is therefore well justified. Were the thermal resistance infinitely large, the above approximation would be absolutely exact.

For structures with heat capacity (dashed line) the difference between the surface temperature and the sol-air temperature will normally be greater, although the approximation will always remain on the safe side, i.e.  $\Theta_y^{max}$  according to the results derived has a higher value than is the case in reality. Similarly, the value of  $\Theta_y^{min}$  is lower than the true surface temperature for structures with heat capacity.

under non-stationary conditions. This method takes the exchange of both short-wave and long-wave radiation with the surroundings into account. It has been modified for calculation of extreme surface temperatures in insulated outer parts of structures without layers of high thermal capacity and low thermal resistance (e.g. concrete)<sup>1</sup> near to the outer surface (FIG. 2).

The influence of factors such as thermal resistance, thermal capacity, intensity of solar radiation, absorption factors, emission coefficients and external surface coefficient of heat transfer is given special attention.

Application of the method for calculation of extreme surface temperatures is demonstrated in the form of a simplified version designed for rough estimates and in the form of a version designed for accurate calculation, either manual or using a computer.

### Example

FIGS. 3a and 3b show temperatures and temperature drops calculated for two alternative designs of external struc-

<sup>1</sup>This is dealt with in another work by the Division of Building Technology to be published shortly.

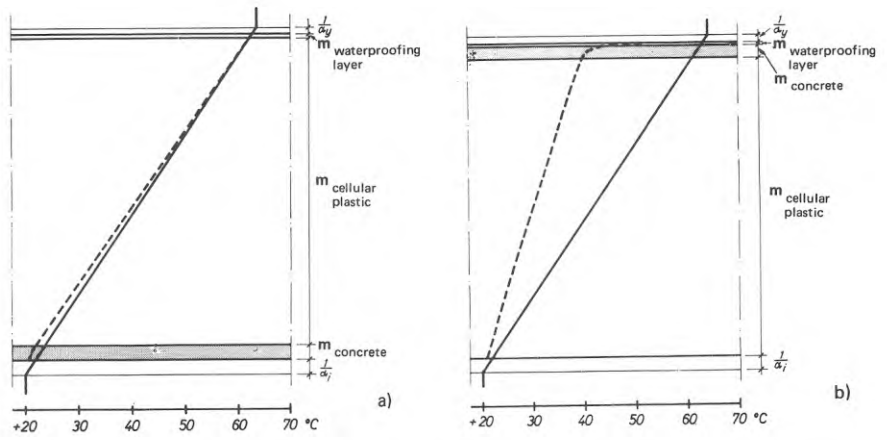


FIG. 3 The highest temperatures under stationary conditions (continuous line) and non-stationary conditions (dashed line) for a 200 mm concrete roof.

a) External insulation of 100 mm cellular plastic. Owing to the concrete's internal position, its heat capacity has very little effect on temperature distribution in the structure under non-stationary conditions. The two curves therefore more or less coincide in the outer parts of the structure. The highest surface temperature is thus more or less equal to the extreme surface temperature. This means that in the case of roofs with the traditional type of outer insulation, the weatherproofing layer is exposed to both high and low surface temperatures with rapid fluctuations, while the variations in temperature in the concrete are slight and the stresses and movements in the concrete due to thermal effects more or less negligible.

b) Internal insulation with 100 mm of cellular plastic. Owing to the heat capacity of the concrete, temperature variations in the structure are damped and delayed under non-stationary conditions. The highest surface temperature is therefore lower than the extreme surface temperature.

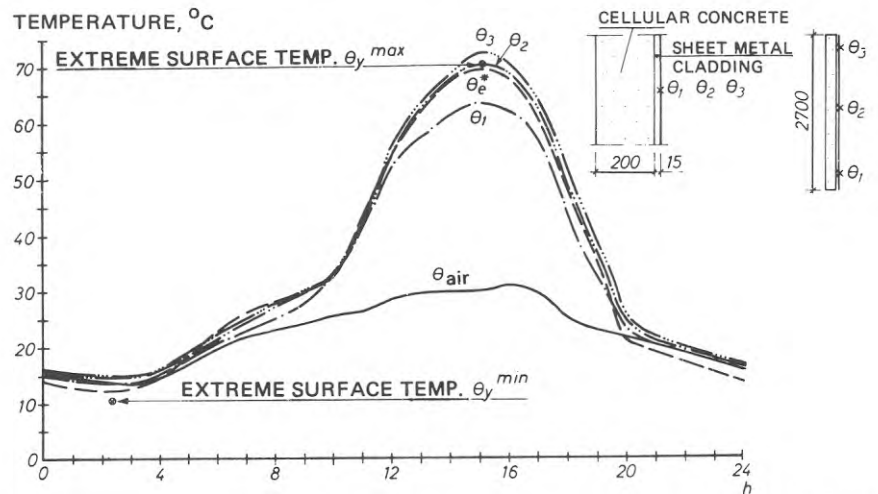


FIG. 4 The modified sol-air temperature ( $\Theta_e^*$ ) and the extreme surface temperatures ( $\Theta_y^{max}$  and  $\Theta_y^{min}$ ) compared to the surface temperatures  $\Theta_1$ ,  $\Theta_2$  and  $\Theta_3$  recorded on a very warm, sunny summer day on a dark outside wall. The wall consists of cellular concrete elements 250 mm thick with an outside cladding of dark, corrugated metal sheeting (absorption factor  $a = 0.9$ ). There is a ventilated air space approximately 15 mm in width between the cladding and the cellular concrete.

The modified sol-air temperature and the extreme surface temperatures have been calculated using the values of solar radiation intensity recorded at the same time as the surface temperatures. The outside heat transfer coefficient was taken to be  $\alpha_y = 14 \text{ kcal/m}^2 \text{ h}^\circ\text{C}$ .

There is a very good agreement between the extreme surface temperature and the surface temperature  $\Theta_2$ . At the lower measuring point,  $\Theta_1$ , the cladding is cooled during the day by air flowing into the air space, thus rendering the agreement less satisfactory. At the upper measuring point,  $\Theta_3$ , on the other hand, the cladding is heated by the stream of air, thus rendering the temperature recorded somewhat higher than the extreme surface temperature.

tures with insulation on the outside and inside respectively. Examples are also given of the application of the method

in a number of sample cases and of comparison of recorded and calculated surface temperatures (FIG. 4).

Rapport R6:1973

METOD FÖR BERÄKNING AV EXTREMA YTTEMPERATURER  
HOS ISOLERADE YTTERKONSTRUKTIONER

METHOD OF DETERMINING EXTREME SURFACE TEMPERATURES  
AT INSULATED EXTERNAL STRUCTURES OF BUILDINGS

av Ingemar Höglund

Denna rapport avser anslag C 575 från Statens råd för  
byggnadsforskning till institutionen för byggnads-  
teknik, KTH, Stockholm.

Försäljningsintäkterna tillfaller fonden för byggnads-  
forskning.

Statens institut för byggnadsforskning, Stockholm  
ISBN 91-540-2106-5

Rotobekman Stockholm 1973



## INNEHÅLL

1	INLEDNING	5
2	EKVIVALENT UTETEMPERATUR	6
3	EXTREMA YTTEMPERATURER	14
4	DISKUSSION AV $I$ , $\alpha_y$ , $a$ och $\theta_\ell$	17
5	APPROXIMATIONEN $\theta_y \approx \theta_e^x$ GILTIGHET	20
6	JÄMFÖRELSE MED UPPMÄTTA YTTEMPERATURER	31
7	NÅGRA TILLÄMPNINGSEXEMPEL	34
	LITTERATUR	45
	CAPTIONS	47

### **SI-enheter**

I rapporten (manuskriptet tillkom för ca två år sedan) används det äldre sortsystemet, som f.n. används i Svensk Byggnorm. Således anges värmeövergångstalet (enligt en nyare nomenklatur värmeövergångskoefficient) i enheten kcal/m<sup>2</sup>h<sup>o</sup>C och värmemotståndet i m<sup>2</sup>h<sup>o</sup>C/kcal. Enligt beslut av Sveriges Standardiseringskommission skall Sverige 1978 helt ha gått över till SI-enheter, motsvarande enhet för värmeövergångskoefficienten blir då W/m<sup>2</sup> °C och för värmemotståndet m<sup>2</sup>·°C/W.

## 1 INLEDNING

För beräkning av exempelvis rörelser och spänningar i en byggnads ytterkonstruktioner måste man känna till de temperaturer som är dimensionerande. Detta är nödvändigt även t.ex. för bedömning av materials beständighet vid användning i ytterkonstruktioner liksom även för beräkning av icke stationär fukttransport. Det till synes enklaste sättet att skaffa sig kunskap om de dimensionerande temperaturerna är att utföra direkta mätningar. Detta är dock i de flesta fall en mycket opraktisk metod. Vill man exempelvis studera de yttemperaturer ett taktäckningsmaterial kan komma att utsättas för, krävs bl.a. att mätningarna görs under tillräckligt lång tid på ett flertal orter och på ett stort antal konstruktionstyper.

I denna rapport visas en teoretisk metod för beräkning av extrema temperaturer på byggnaders ytterytter under icke-stationära förhållanden. Därvid tas hänsyn till såväl det kortvågiga (i form av solstrålning) som långvågiga strålningsutbytet med omgivningen. Metoden har avpassats för beräkning av extrema yttemperaturer hos isolerade ytterkonstruktioner utan skikt med stor värmekapacitet och litet värmemotstånd (typ betong) nära ytterytan.

På grund av stora temperaturvariationer hos ett tak och en väggs ytteryta och inuti resp. konstruktion uppstår många byggnadstekniska problem. Exempelvis kan hos ett tak nedbrytningen av ett täckande bitumenskikt påskyndas om det utsätts för kraftig kortvågig strålning. Vid vissa byggmaterial, t.ex. styren-cellplast, kan man riskera att de blir så mjuka att de deformeras vid hög yttemperatur när de används för isolering av tak eller fasader. Vidare uppstår spänningar och i vissa fall stora rörelser i konstruktionen, vilka kan ge upphov till t.ex. sprickbildningar. På grund av att temperaturvariationerna är olika på olika djup i konstruktionen kan man i vissa fall få krökning på fasadelementen vid elementbyggda hus. För beräkning av rörelser hos fasadelement p.g.a. temperaturändringar, både långtidsvariationer och korttidsvariationer, måste man kunna bestämma dimensionerande temperaturer. Storleken av dessa rörelser påverkar naturligtvis fogtätningmaterial och infästningsbeslag. För utformning, dimensionering och val av material för dessa detaljer är det nödvändigt att beräkningarna baseras på icke-stationära förhållanden och då med hänsyn till både det kort- och långvågiga strålningsutbytet med omgivningen.

## 2 EKVIVALENT UTETEMPERATUR

Härledningen av ett uttryck för de extrema yttemperaturerna vid icke-stationära förhållanden görs enklast genom att man först beräknar den s.k. ekvivalenta utetemperaturen,  $\theta_e$ . Denna kan karakteriseras som en fiktiv utelufttemperatur, som har egenskapen att den kombinerade inverkan av konvektion, solstrålning och långvågigt strålningsutbyte kan medtagas i en "konventionell" formel för beräkning av värmeövergången vid en byggnads ytteryta, d.v.s.

$$q = \alpha_y(\theta_e - \theta_y) \quad (1)$$

där

$q$  = totala värmetillskottet eller värmeförlusten vid ytterytan

$\alpha_y$  = yttre värmeövergångstalet

$\theta_e$  = ekvivalenta utetemperaturen

$\theta_y$  = ytterytans temperatur

Det första uttrycket för den ekvivalenta utetemperaturen angavs av Mackey & Wright (1943)

$$\theta_e = \theta_l + \frac{aI}{\alpha_y}$$

där

$\theta_l$  = utelufttemperaturen

$a$  = ytans absorptionsfaktor för kortvågig strålning

$I$  = solstrålningens intensitet (direkt och diffus strålning)

Detta uttryck för den ekvivalenta utetemperaturen innebär fysikaliskt att himlen och omgivningen betraktas som en i strålningshänseende svart kropp, vilkens yttemperatur är densamma som uteluftens. Detta betraktelsesätt innebär att himlens och omgivningens långvågiga strålning mot ytterytan ges för höga värden. De med denna formel beräknade ekvivalenta utetemperaturerna blir därför genomgående för höga. De största felen erhålls vintertid vid klart väder för en horisontell ytteryta eftersom himlen då i strålningshänseende som mest avviker från en svart kropp.

Ett uttryck för den ekvivalenta utetemperaturen, som bättre tar hänsyn till det långvågiga strålningsutby-



tet vid en byggnads ytteryta, har angivits av Höglund (1967). Härledningen av denna modifierade ekvivalenta utetemperatur  $\theta_e^*$ , kan utföras utgående från FIG. 1, vilken visar en schematisk bild av värmebalansen vid en byggnads ytteryta. Som inses av figuren kan värmeutbytet skrivas

$$q = \alpha_k(\theta_\ell - \theta_y) + aI + \epsilon L - \epsilon E_y \quad (2)$$

där

$\alpha_k$  = konvektiva värmeövergångstalet

$\theta_\ell$  = uteluftens temperatur

$a$  = absorptionsfaktorn för kortvågig strålning

$I$  = totala solstrålningens intensitet (direkt och diffus strålning)

$\epsilon$  = emissionsfaktorn för långvågig strålning

$L$  = långvågiga strålningens intensitet

$E_y$  = emissionsförmågan hos en svart kropp

Värmeutbytet kan analogt med ekvation (1) också skrivas

$$q = \alpha_y(\theta_e^* - \theta_y) \quad (3)$$

där

$\theta_e^*$  = den modifierade ekvivalenta utetemperaturen.

För att förenkla uttrycket för den långvågiga instrålningen i ekvation (2) är det lämpligt att införa begreppet effektiv motstrålningstemperatur. Denna är temperaturen hos en fiktiv absolut svart yta ( $\epsilon = 1$ ), som omger ytterytan och ger samma motstrålning som den verkliga omgivningen. Stefan-Boltzmanns strålningslag ger

$$L = \sigma T_g^4$$

där

$\sigma$  = Stefan-Boltzmanns konstant

$T_g$  = effektiva motstrålningstemperaturen, ( K)

Den av en ytteryta emitterade långvågiga strålningen omskrivs på samma sätt

$$\epsilon E_y = \epsilon \sigma T_y^4$$

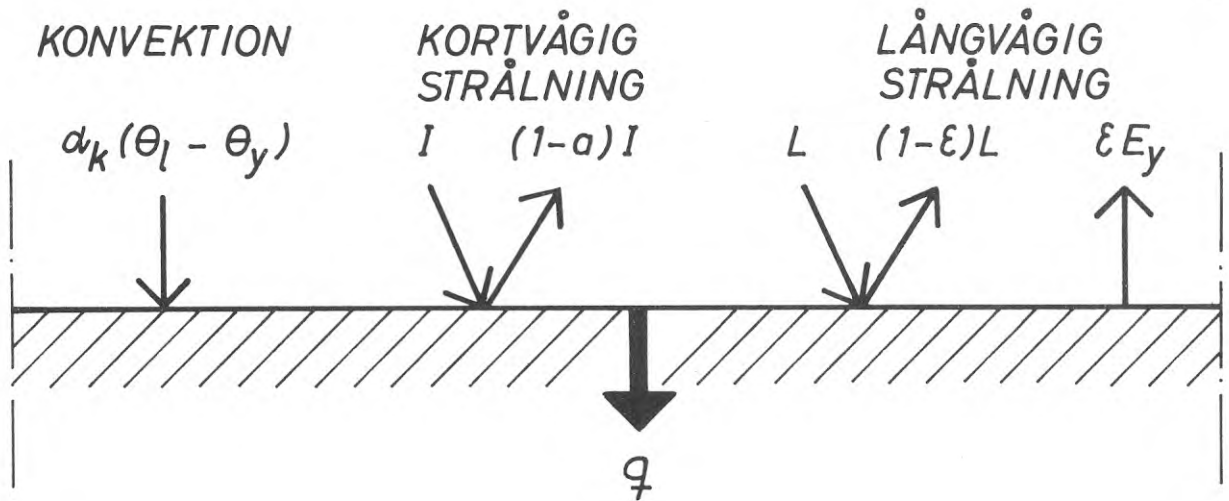


FIG. 1. Schematisk bild av värmebalansen vid en byggnads ytteryta. Konvektionsdelen ger ett värmetilskott eller en värmeförlust beroende på om luftens temperatur,  $\theta_l$ , är högre eller lägre än ytterytans temperatur,  $\theta_y$ . Den kortvågiga strålning,  $I$ , består dels av direkt solstrålning och dels av diffus strålning i vilken ingår strålning från himlavalvet samt reflekterad strålning från marken och den övriga omgivningen. En vanligtvis större del av den kortvågiga strålningen absorberas,  $aI$ , eftersom absorptionsfaktorn  $a$  för de flesta material i byggnaders ytterytor antar värden mellan 0,4 och 0,9, se TAB. 3. En vanligtvis mindre del,  $(1-a)I$ , reflekteras vid ytterytan. Från atmosfären och omgivningen inkommer långvågig strålning,  $L$ , av vilken största delen,  $\epsilon L$ , absorberas och ger ett värmetilskott. Resten,  $(1-\epsilon)L$ , reflekteras och utsänds tillsammans med den av ytterytan emitterade långvågiga strålningen,  $\epsilon E_y$ . För de flesta material i ytterytor ligger emissionsfaktorn för långvågig strålning omkring  $\epsilon = 0,9$ . För blanka metallytor kan värdet på  $\epsilon$  vara betydligt lägre, men ökas vanligen efterhand på grund av nedsmutsning och korrosion etc.

där

$T_y$  = ytterytans temperatur, ( $^{\circ}\text{K}$ ).

Det långvågiga strålningsutbytet vid ytterytan kan nu skrivas på två sätt

$$\epsilon(L - E_y) = \epsilon\sigma(T_g^4 - T_y^4) = \epsilon\sigma(T_g^2 + T_y^2)(T_g + T_y)(T_g - T_y) \quad (4)$$

$$\epsilon(L - E_y) = \alpha_s(\theta_g - \theta_y) = \alpha_s(T_g - T_y) \quad (5)$$

där  $\alpha_s$  = värmeövergångstalet för långvågig strålning

Detta ger ett uttryck för  $\alpha_s$

$$\alpha_s = \epsilon\sigma(T_g^2 + T_y^2)(T_g + T_y) \approx 4\epsilon\sigma\left(\frac{T_g + T_y}{2}\right)^3 \approx 4\epsilon\sigma T_\ell^3 \quad (6)$$

där  $T_\ell$  = uteluftens temperatur, ( $^{\circ}\text{K}$ ).

Ekvation (5) kan omskrivas

$$\epsilon(L - E_y) = \alpha_s(\theta_g - \theta_y) = \alpha_s(\theta_g - \theta_\ell) + \alpha_s(\theta_\ell - \theta_y) \quad (5a)$$

där

$\theta_g$  = effektiva motstrålningstemperaturen, ( $^{\circ}\text{C}$ ).

Ekvationerna (2), (3) och (5a) ger, eftersom  $\alpha_k + \alpha_s = \alpha_y$ , ett uttryck för den modifierade ekvivalenta utetemperaturen

$$\theta_e^* = \theta_\ell + \frac{aI}{\alpha_y} + \frac{\alpha_s}{\alpha_y}(\theta_g - \theta_\ell) \quad (7)$$

I FIG. 2 visas den principiella uppbyggnaden av den modifierade ekvivalenta utetemperaturen.

Med ledning av ekvation (6) samt av Brown (1956) utförda bestämningar av det konvektiva värmeövergångstalet  $\alpha_k$  vid en byggnads ytterytor erhålls approximativa medelvärden på kvoten

$$\frac{\alpha_s}{\alpha_y}$$

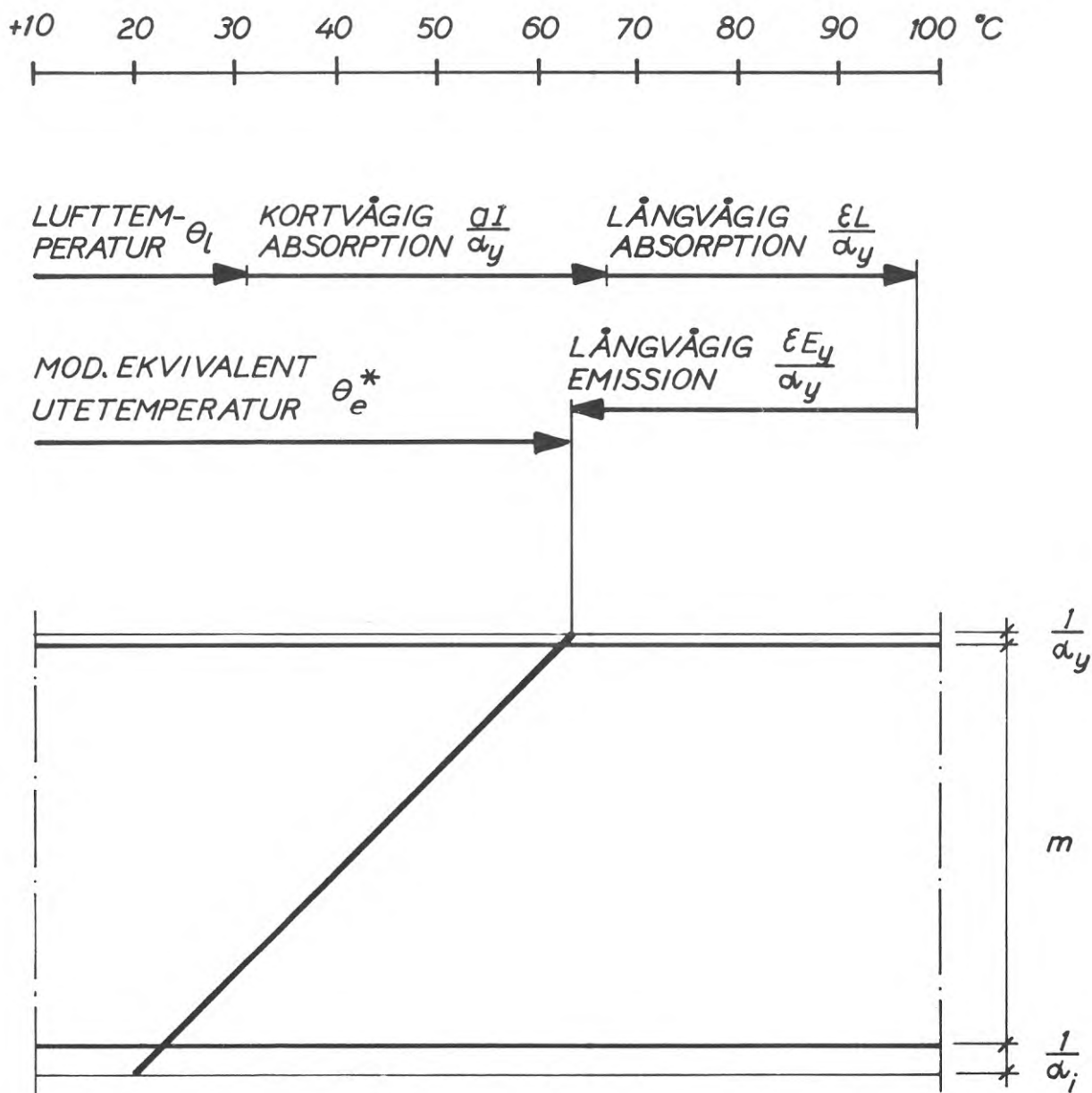


FIG. 2. Uppbyggnaden av den modifierade ekvivalenta utetemperaturen. Exemplet avser en horisontell takkonstruktion med mörk ytteryta under en varm sommardag när solstrålningsintensiteten vid klar himmel är som störst och samtidigt den långvågiga motstrålningen är så stor som möjligt. Figuren visas för det tillfälle under dagen då den modifierade ekvivalenta utetemperaturen är som högst.

I stället för tjocklekarna hos de olika skikten i konstruktionen, har längs den vertikala axeln avsatts summan av de olika skiktens värmemotstånd (m) samt inre ( $1/\alpha_y$ ) värmeövergångsmotstånden. Temperaturfördelningen i konstruktionen kan därför i det stationära fallet eller i det icke-stationära fallet om värmekapacitet saknas åskådliggöras med en rät linje.



Av nedanstående tabell framgår dessa värden för horisontella och vertikala ytor gällande under dag resp. natt. De flesta byggnadsmaterial i ytterytor har emissionsfaktorer för långvågig strålning som antar värdet nära  $\epsilon = 0,9$  varför kvoten

$\frac{\alpha_s}{\alpha_y}$  beräknats för detta värde.

	DAG	NATT
Horisontella ytor	0,3	0,4
Vertikala ytor	0,4	0,5

Med hjälp av mätningar utförda av Brown (1958) i Stockholm erhålls approximativa värden för den effektiva motstrålningstemperaturen  $\theta_g$ . Browns uppmätta värden överensstämmer väl med av Bliss (1961) teoretiskt beräknade värden för horisontella ytor.

För en helt klar himmel erhålles: (se FIG. 3)

$$\text{för horisontella ytor } 0,2 \cdot \theta_\ell - 18 \leq \theta_g - \theta_\ell \leq 0,2 \cdot \theta_\ell - 10 \quad (8)$$

$$\text{för vertikala ytor } 0,1 \cdot \theta_\ell - 7 \leq \theta_g - \theta_\ell \leq 0,1 \cdot \theta_\ell - 3 \quad (9)$$

För beräkning av den modifierade ekvivalenta utetemperaturen väljs medelvärdena ur ovanstående uttryck, d.v.s. för

$$\text{horisontella ytor } \theta_g - \theta_\ell \approx 0,2 \cdot \theta_\ell - 14 \quad (8a)$$

$$\text{vertikala ytor } \theta_g - \theta_\ell \approx 0,1 \cdot \theta_\ell - 5 \quad (9a)$$

Vid molnig himmel ändras det långvågiga strålningsutbytet mellan ytterytan och omgivningen. Hänsyn till detta tas genom beräkning av en kvot mellan strålningen  $R_m$  vid molnighetsgraden  $m$  och strålningen  $R_0$  vid klar himmel med ledning av förslag av Ångström (1928). Molnighetsgraden  $m$  anges i oktast där  $m = 0$  betyder helt klar och  $m = 8$  betyder helt mulen himmel. Kvoten blir då

$$\frac{R_m}{R_0} = \frac{9-m}{9}$$

Vid en molnighetsgrad av  $m$  oktast erhålls därför för

$$\text{horisontella ytor } \theta_g - \theta_\ell \approx \frac{9-m}{9} (0,2 \cdot \theta_\ell - 14) \quad (8b)$$

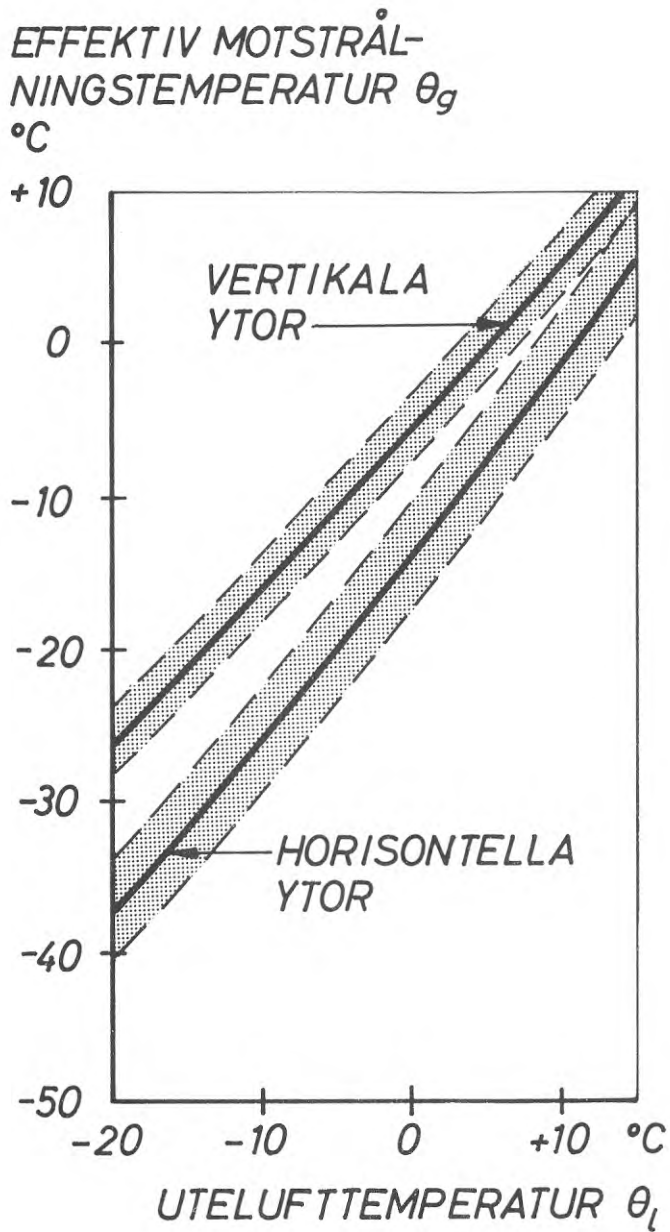


FIG. 3. Den effektiva motstrålningstemperaturen,  $\theta_g$ , under helt klara nätter som funktion av utelufttemperaturen,  $\theta_l$ , enligt mätningar utförda av Brown åren 1949-51. För horisontella ytor ligger den effektiva motstrålningstemperaturen mellan gränserna  $1,2 \cdot \theta_l - 18 \leq \theta_g \leq 1,2 \cdot \theta_l - 10$ . För vertikala ytor gäller  $1,1 \cdot \theta_l - 7 \leq \theta_g \leq 1,1 \cdot \theta_l - 3$ .

vertikala ytor  $\theta_g - \theta_\ell \approx \frac{9-m}{9} (0,1 \cdot \theta_\ell - 5) \quad (9b)$

Insätts värdena i TAB. 1 tillsammans med ekvationerna (8b) och (9b) i ekvation (7) erhålls slutligen den modifierade ekvivalenta utetemperatur (under natten är  $I = 0$ )

horisontella ytor

$$\theta_{e_{\text{dag}}}^* = \theta_\ell + \frac{aI}{\alpha_y} - \frac{(9-m)}{9} (4,2 - 0,06 \cdot \theta_\ell) \quad (7a)$$

$$\theta_{e_{\text{natt}}}^* = \theta_\ell - \frac{(9-m)}{9} (5,6 - 0,08 \cdot \theta_\ell) \quad (7b)$$

vertikala ytor

$$\theta_{e_{\text{dag}}}^* = \theta_\ell + \frac{aI}{\alpha_y} - \frac{(9-m)}{9} (2,0 - 0,04 \cdot \theta_\ell) \quad (7c)$$

$$\theta_{e_{\text{natt}}}^* = \theta_\ell - \frac{(9-m)}{9} (2,5 - 0,05 \cdot \theta_\ell) \quad (7d)$$

Dessa uttryck kan med fördel användas vid beräkning av byggnadstekniska icke-stationära värmeströmsproblem (se exv. Höglund, Mitalas & Stephenson, 1967 och Brown, 1971).

Ett mer komplicerat uttryck för en modifierad ekvivalent utetemperatur har också härletts med utgångspunkt från atmosfärens skenbara emissionstal och med insatta engelska mätvärden (se Brunt, 1952). Beräkningar baserade på dessa två från helt skilda utgångspunkter härledda uttryck visar sig ge lika god överensstämmelse med direkt uppmätta yttemperatur och värmeflöden (Höglund et al., 1967).

Den i ekv. 7a-d angivna metoden för modifierad ekvivalent utetemperatur torde därför kunna användas även utanför Skandinavien.

Under molniga dagar kan solstrålningens intensitet  $I$  (i ekv. 7a och 7c) approximativt förhandsbestämmas om man har tillgång till vad som internationellt går under fackbenämningen CCF (cloud cover factors) eller antalet soltimmar under dagen.

## 3 EXTREMA YTTEMPERATURER

Spridningen hos de uppmätta värdena på den effektiva motstrålningstemperaturen i uttrycken (8) och (9) beror på att bl.a. den relativa fuktigheten, koloxidhalten och mängden fasta partiklar i luften har betydelse för motstrålningens storlek. Den övre gränsen motsvarar ett rikligare innehåll av vattenånga, koldioxid och fasta partiklar än normalt, medan vid den undre gränsen luften är klarare än normalt.

De extrema yttemperaturerna är den högsta  $\theta_y^{\max}$  och den lägsta temperaturen  $\theta_y^{\min}$  som kan antas av en yteryta med en given orientering och lokalisering och med givna absorptions- och emissionsegenskaper för kort- och långvågig strålning. Den högsta yttemperaturen erhålls under en varm sommardag när solstrålningsintensiteten vid klar himmel (d.v.s.  $m = 0$ ) är som störst<sup>1</sup> och samtidigt den långvågiga motstrålningen är så stor som möjligt, varför i detta fall vid beräkning av den extrema yttemperaturen den övre gränsen i olikheterna (8) och (9) används, d.v.s. för

$$\text{horisontella ytor} \quad \theta_g - \theta_l \approx 0,2 \cdot \theta_l - 10 \quad (8c)$$

$$\text{vertikala ytor} \quad \theta_g - \theta_l \approx 0,1 \cdot \theta_l - 3 \quad (9c)$$

Den lägsta yttemperaturen erhålls under en kall, klar vinternatt när den långvågiga motstrålningen är så liten som möjligt. Detta ger att undre gränsen i olikheterna skall användas, d.v.s. för

$$\text{horisontella ytor} \quad \theta_g - \theta_l \approx 0,2 \cdot \theta_l - 18 \quad (8d)$$

$$\text{vertikala ytor} \quad \theta_g - \theta_l \approx 0,1 \cdot \theta_l - 7 \quad (9d)$$

Genom kombination av ekvation (7) med ekvationerna (8c-d) och (9c-d) samt värdena på  $\frac{\alpha_s}{\alpha_y}$  enligt TAB. 1 och

genom införande av approximationen (se nedan kap. 5)

$$\theta_y \approx \theta_e^*$$

erhålls följande uttryck för de extrema yttemperaturerna  $\theta_y^{\max}$  och  $\theta_y^{\min}$

<sup>1</sup> Enligt Kimura & Stephenson (1969) kan solstrålningsintensiteten vara något större vid delvis molnig himmel än under en helt klar dag.



horisontella ytor

$$\theta_y^{\max} = \theta_l + \frac{aI}{\alpha_y} - (3,0 - 0,06 \cdot \theta_l) \quad (10)$$

$$\theta_y^{\min} = \theta_l - (7,2 - 0,08 \cdot \theta_l) \quad (11)$$

vertikala ytor

$$\theta_y^{\max} = \theta_l + \frac{aI}{\alpha_y} - (1,2 - 0,04 \cdot \theta_l) \quad (12)$$

$$\theta_y^{\min} = \theta_l - (3,5 - 0,05 \cdot \theta_l) \quad (13)$$

De negativa termerna i ekvationerna (10-13) har åskådliggjorts i FIG. 4. Som framgår av figuren ändras de ganska litet vid variation av lufttemperaturen. Det är därför ibland motiverat att välja de konstanta värden på de negativa termerna som framgår av figurtexten. Uttrycken för de extrema yttemperaturerna blir då för

horisontella ytor

$$\theta_y^{\max} = \theta_l + \frac{aI}{\alpha_y} \quad (10a)$$

$$\theta_y^{\min} = \theta_l - 10 \quad (11a)$$

vertikala ytor

$$\theta_y^{\max} = \theta_l + \frac{aI}{\alpha_y} \quad (12a)$$

$$\theta_y^{\min} = \theta_l - 5 \quad (13a)$$

Dessa uttryck (10a-13a) är lämpliga att använda vid överslagsmässiga beräkningar.

Under speciella förhållanden kan den högsta yttemperaturen  $\theta_y^{\max}$  bli högre än de värden som erhålls vid beräkning enligt dessa ekvationer. Vid exempelvis höga byggnader erhålls ofta en uppåtriktad varm luftström vid fasaden, varför  $\theta_y^{\max}$  kan bli 5-10 °C högre vid fasadens övre del.

KORREKTION FÖR  
LÅNGVÅGIG STRÅLNING  
°C

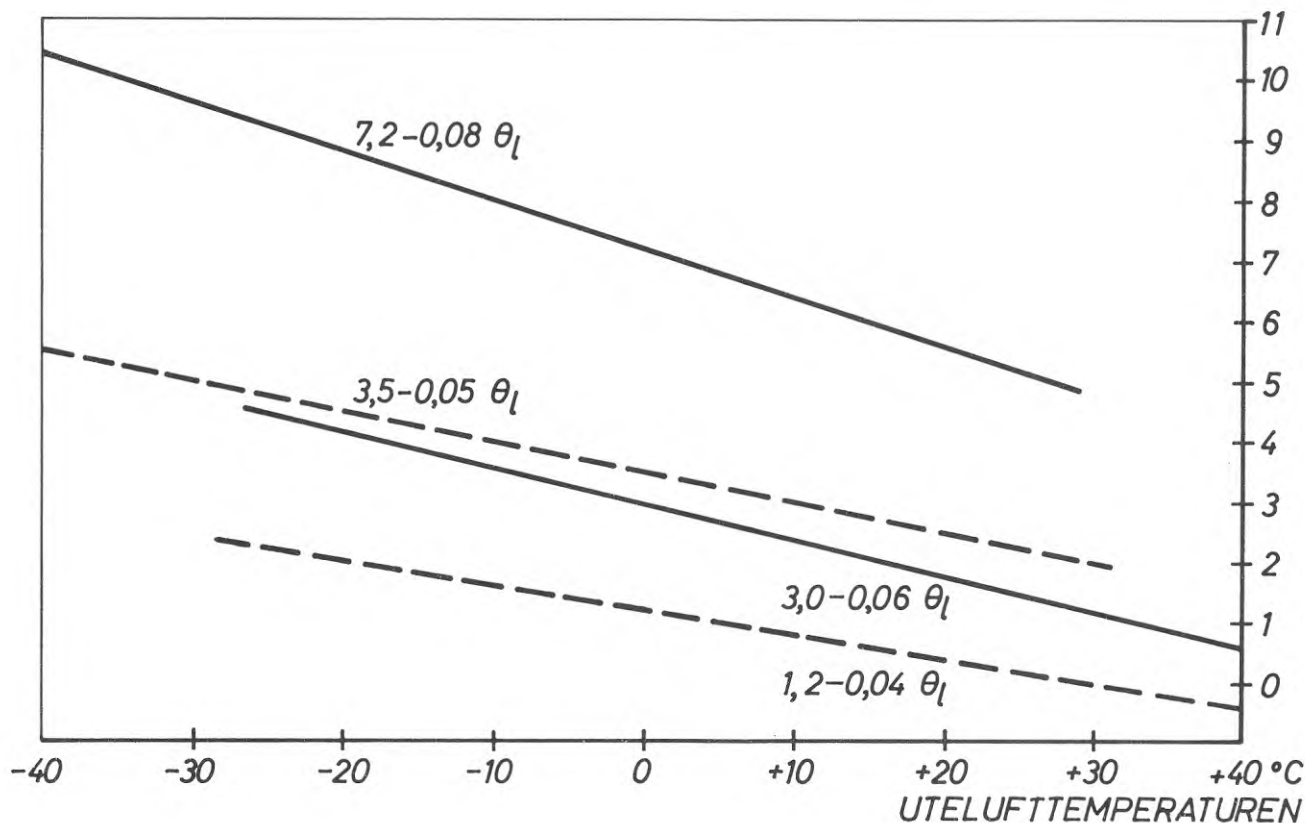


FIG. 4. De på grund av det långvågiga strålningsutbytet erhållna negativa termerna i ekvationerna (10-13) visade som funktion av utelufttemperaturen. Vid beräkning av  $\theta_y^{\max}$  kan för horisontella ytor som framgår av figuren sättas  $(3,0 - 0,06 \cdot \theta_\ell) \approx 0$  och för vertikala ytor  $(1,2 - 0,04 \cdot \theta_y) \approx 0$ . Vid beräkning av  $\theta_y^{\min}$  är det motiverat att för horisontella ytor sätta  $(7,2 - 0,08 \cdot \theta_\ell) \approx 10$  och för vertikala ytor  $(3,5 - 0,05 \cdot \theta_\ell) \approx 5$ . När dessa värden insätts i ekvationerna (10-13) erhålls de förenklade versionerna (10a-13a).

4 DISKUSSION AV  $I$ ,  $\alpha_y$ ,  $a$  och  $\theta_\lambda$ 

Vid beräkning av de extrema yttemperaturerna enligt ovanstående formler måste användas lämpliga värden på variablerna  $I$ ,  $\alpha_y$ ,  $a$  och  $\theta_\lambda$ . Nedan diskuteras dessa kortfattat, medan inverkan av värmemotstånd och värmekapacitet behandlas separat i kap. 5.

Den kortvågiga strålningen,  $I$ , består av direkt solstrålning och diffus strålning. Den diffusa strålningen kan i sin tur uppdelas i dels strålning från solens absoluta närhet och himlavalvet i övrigt, dels i reflekterad strålning från marken och omgivningen. Storleken av den direkta solstrålningen och strålningen från himlavalvet mot en vägg- eller takyta beror i huvudsak på följande faktorer: Ytans orientering, solhöjden, d.v.s. tidpunkten på dagen och kalenderdagen, latituden och atmosfärens klarhet. Storleken av den från marken och omgivningen reflekterade strålningen beror av den däremot infallande strålningen och hur stor del av strålningen som reflekteras, d.v.s. reflektionsfaktorn. Med hänsyn till dessa faktorer har Höglund & Stephenson (1968) uppställt tabeller för beräkning av solinstrålning mot byggnader. I dessa har tabellerats värden på den kortvågiga instrålningen genom englasfönster orienterade dels horisontellt och dels vertikalt mot de åtta huvudväderstrecken. Tabellerna anger för varje månad värden på instrålningens intensitet varje timme under den ljusa delen av dygnet. Värdena anges för varannan breddgrad mellan  $56^\circ\text{N}$  och  $68^\circ\text{N}$  (d.v.s. täckande hela Sverige). Intensiteten av den kortvågiga strålningen mot horisontella och vertikala ytterytor hos byggnader erhålls genom att tabellvärdena (i kolumnerna 4-12) multipliceras med faktorn 1,15.

På grund av reflektion från ljusa intilliggande ytterytor kan intensiteten hos den kortvågiga strålningen mot en byggnads ytteryta bli större än normalt, vilket också förhöjer den högsta yttemperaturen. Om byggnadens ytteryta inte är fritt exponerad, t.ex. en vägg- yta i koncentrerad stadsbebyggelse, kan den kortvågiga strålningen mot ytan bli avsevärt mindre än normalt, vilket ger ett lägre värde på den högsta yttemperaturen.

Det yttre värmeövergångstalet  $\alpha_y = \alpha_k + \alpha_s$  beror bl.a. av vindstyrkan, ytans emissionstal för långvågig strålning samt temperaturskillnaden mellan väggytan och uteluften. Som genomsnittliga värden brukar anges  $\alpha_y = 17 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$  för horisontella ytor och  $\alpha_y = 14 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$  för vertikala ytor. Dessa värden förutsätter låg vindstyrka samt att emissionsfaktorn för långvågig strålning antar värden omkring  $\epsilon = 0,9$ , vilket gäller för de flesta material använda i byggnaders

ytterytor. Dock kan vid vindstilla och under speciella förhållanden lägre värden på  $\alpha_y$  erhållas, t.ex.  $\alpha_y = 12 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ .

Absorptionsfaktorn  $a$  för kortvågig strålning varierar främst beroende på ytterytans färg. Nedanstående tabell ger exempel på värden på  $a$  och även värden på emissionsfaktorn  $\epsilon$

Färg eller material	Absorptionsfaktor $a$	Emissionstal $\epsilon$
Svart färg	0,90	0,90
Mörkgrön färg	0,70	0,90
Ljusgrön färg	0,40	0,90
Mörkgrå färg	0,70	0,90
Ljusgrå färg	0,40	0,90
Vit färg	0,20	0,90
Aluminiumfärg	0,50	0,50
Galvaniserat stål blank yta	0,25	0,25
Aluminiumfolie, blank yta	0,05	0,05
Aluminiumfolie, oxiderad yta	0,15	0,12

Hänsyn måste dock tas till att en byggnads ytteryta vanligtvis är mer eller mindre nedsmutsad. Praktiskt tillämpbara värden på  $a$  är angivna nedan

Ytans färg	Absorptionsfaktor för kort- vågig strålning
Ljusa ytor	0,4 - 0,5
Mörkgrå ytor	0,7 - 0,8
Svarta ytor	0,9

Med hänsyn till nedsmutsning, oxidation etc. föreslås att man åtminstone tills vidare inte räknar med låga värden på  $\epsilon$ . Vid härledning av ovanstående uttryck för de extrema yttemperaturerna har därför använts värdet  $\epsilon = 0,9$ .

Lufttemperaturen  $\theta_0$  väljs lämpligen med hjälp av SMHI:s statistik. I exempelvis VVS:handboken visas i tabeller den absoluta maximitemperaturen och den absoluta minimitemperaturen under åren 1880-1945 för ett trettiotal orter i Sverige. Dessa temperaturer förekommer alltför sällan för att det skall vara motiverat att använda dem vid praktisk beräkning av de extrema yttemperaturerna. För beräkning av den lägsta yttemperaturen

$\theta_y^{\min}$  föreslås i stället att man använder den extrema utetemperaturen (EUT 1), vilken finns redovisad i diagramform. Denna är den lägsta utetemperatur som kan beräknas komma igen vart trettionde år som dygnsmedeltal. För beräkning av den högsta yttemperaturen  $\theta_y^{\max}$  föreslås t.v. att diagrammet "Medelvärden av de fem högsta årsmaxima 1901-1950" används (se VVS-handboken).

5 APPROXIMATIONEN  $\theta_y \approx \theta_e^x$  GILTIGHET

Om ytterkonstruktionen saknar värmekapacitet (eller om temperaturförhållandena är stationära) beror skillnaden mellan den modifierade ekvivalenta utetemperaturer och temperaturen på ytterytan på förhållandet mellan det yttre värmeövergångsmotståndet och det totala värmemotståndet, se FIG. 5 och 6. För konstruktioner med stort värmemotstånd är denna skillnad mycket liten, varför approximationen  $\theta_y \approx \theta_e^x$ , som används vid härledningen av de extrema yttemperaturerna, endast ger upphov till mycket små fel. Om värmemotståndet vore oändligt stort skulle gälla exakt  $\theta_y = \theta_e^x$ .

För konstruktioner med värmekapacitet blir, på grund av att temperaturvariationerna dämpas, skillnaden mellan yttemperaturen och den ekvivalenta utetemperaturer större än om värmekapacitet saknas. Approximationen är dock alltid på den säkra sidan, d.v.s.  $\theta_y^{\max}$  enligt uttrycken (10) och (12) ger högre värden än de verkliga. På samma sätt ger uttrycken för  $\theta_y^{\min}$  (11) och (13) eller (11a) och (13a) värden som är lägre än de verkliga.

I FIG. 7-13 visas några exempel på hur värmemotståndet och värmekapaciteten hos konstruktionen inverkar på ytterytans temperatur och på temperaturfördelningen i konstruktionen. Temperaturerna har beräknats enligt den nedan under "Tillämpningsexempel" omtalade analogiräknemetoden.

För konstruktioner med liten värmekapacitet och stort värmemotstånd är approximationen  $\theta_y \approx \theta_e^x$  mycket väl försvarbar även under icke-stationära temperaturförhållanden. Ett exempel på detta ges i FIG. 7, i vilken för ett metalledäck med isolering av 10 cm cellplast visas temperaturfördelningen vid några olika tidpunkter under ett varmt sommar dygn. Temperaturvariationerna blir mycket stora och sker hastigt. Temperaturkurvorna för denna konstruktion blir praktiskt taget linjära vid varje tidpunkt. Approximationen  $\theta_y \approx \theta_e^x$  gäller därför med mycket god noggrannhet.

Vid konstruktioner med värmekapacitet i skikten nära ytterytan dämpas och fördröjs temperaturvariationerna. På grund av detta blir bl.a. yttemperaturer variationer mindre än för en konstruktion med liten värmekapacitet. Som exempel visas FIG. 8, i vilken för ett 20 cm gasbetongtak visas temperaturfördelningen vid några olika tidpunkter under ett varmt sommar dygn.

Under icke-stationära förhållanden kan temperaturerna i en ytterkonstruktion aldrig bli högre än de som skulle uppkomma under stationära förhållanden om den modifierade ekvivalenta utetemperaturer antages vara konstant och lika med den högsta som erhålles under en



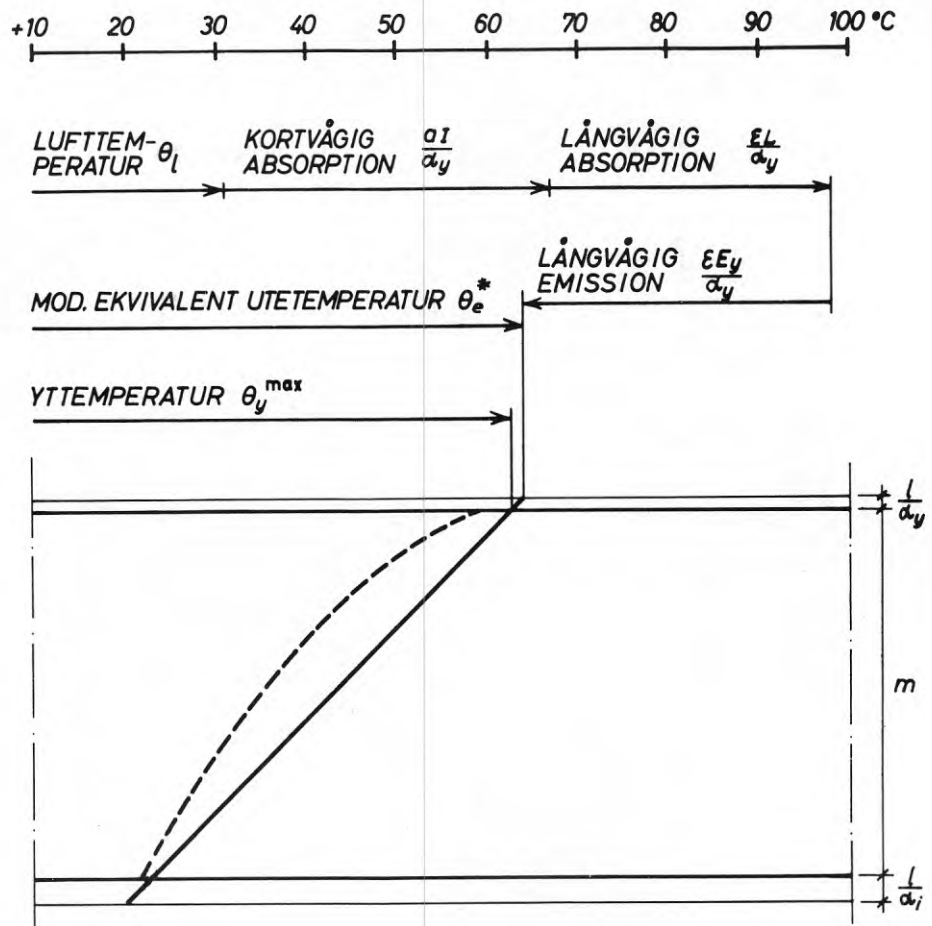


FIG. 5. Uppbyggnaden av den modifierade ekvivalenta utetemperaturen och yttemperaturen (jfr FIG. 2).

Om konstruktionen saknar värmekapacitet (hel-  
dragen kurva) beror storleken av skillnaden  
mellan yttemperaturen och den modifierade  
ekvivalenta utetemperaturen på förhållandet  
mellan det yttre värmövergångsmotståndet och  
konstruktionens totala värmemotstånd. För hög-  
isolerade konstruktioner blir skillnaden  
mycket liten, varför approximationen  $\theta_y \approx \theta_e^*$ ,  
som används vid härledningen av de extrema  
yttemperaturerna, är mycket väl försvarbar.  
Likheten skulle gälla exakt om värmemotstånd-  
det vore oändligt stort (se FIG. 6).

För konstruktioner med värmekapacitet  
(streckad kurva) blir normalt skillnaden mel-  
lan yttemperaturen och den ekvivalenta ute-  
temperaturen större, men approximationen är  
dock alltid på den säkra sidan, d.v.s.  $\theta_y^{\max}$   
enligt de härledda uttrycken får ett högre  
värde än den verkliga. På samma sätt blir  
värdet på  $\theta_y^{\min}$  lägre än den verkliga yttem-  
peraturen för en konstruktion med värmekapaci-  
tet.

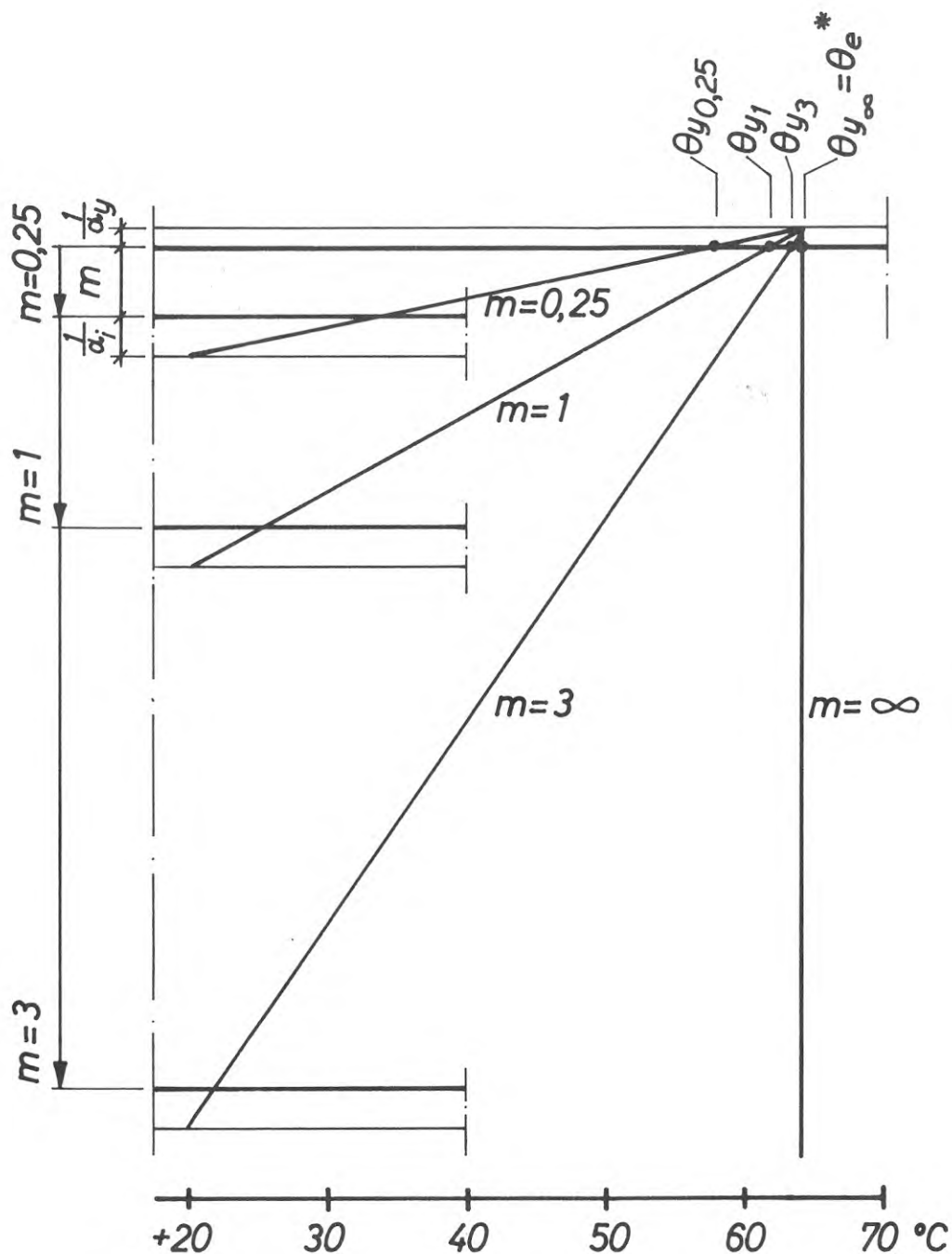


FIG. 6. Temperaturfördelningen i några ytterkonstruktioner med olika värmemotstånd under stationära förhållanden. Likheten  $\theta_y = \theta_e^*$  gäller exakt om isoleringstjockleken är oändligt stor. För högisolerade konstruktioner är approximationen dock väl försvarbar, se exempelvis kurvan för  $m = 3 \text{ m}^2\text{h}^\circ\text{C/kcal}$ . Approximationen är dessutom sådan att vid beräkning av de extrema yttemperaturerna  $\theta_y^{\max}$  och  $\theta_y^{\min}$  erhålles värden något på den säkra sidan, d.v.s. värdet på  $\theta_y^{\max}$  blir något för högt och värdet på  $\theta_y^{\min}$  blir något för lågt. Beroende på de noggrannhetskrav som uppställts kan approximationen användas för konstruktioner med liten värmekapacitet med värmemotstånd på ned till  $m \approx 1 \text{ m}^2\text{h}^\circ\text{C/kcal}$ .

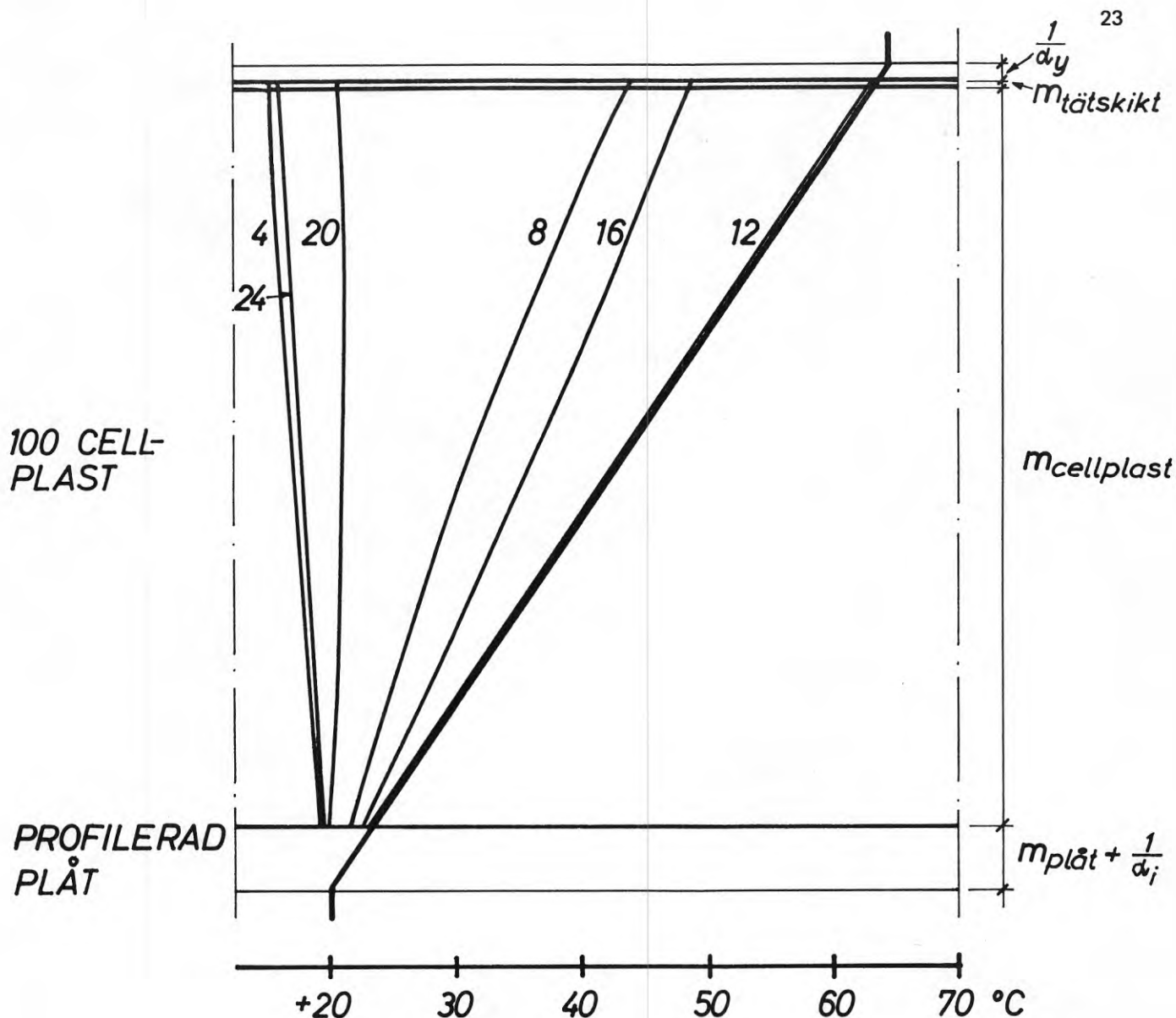


FIG. 7. Temperaturfördelningen vid några olika tidpunkter under dygnet för ett metalledäck med isolering av 10 cm cellplast. Temperaturkurvorna är praktiskt taget linjära. För detta metalledäck med stort värmemotstånd och liten värmekapacitet gäller approximationen  $\theta_y \approx \theta_e^x$  med mycket god noggrannhet.

Temperaturerna kan teoretiskt aldrig bli högre än de som skulle uppkomma under stationära förhållanden om den modifierade ekvivalenta utetemperaturen antages vara konstant och lika med den högsta som erhålls under en extremt varm sommardag (den kraftigt markerade linjen). Jämför FIG. 9, där de högsta temperaturerna i konstruktionen (streckad kurva) inritats.

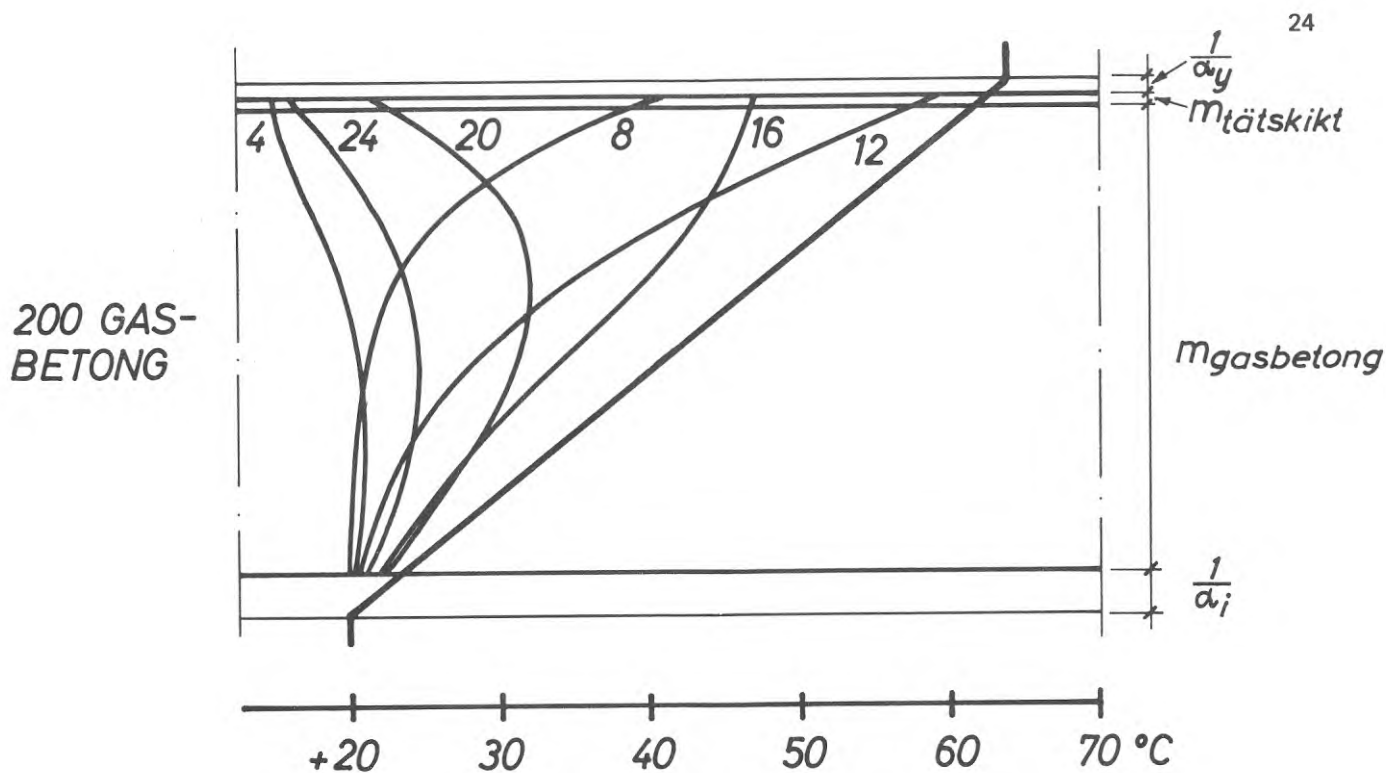


FIG. 8. Temperaturfördelningen vid några olika tidpunkter under dygnet för ett horisontellt tak av 20 cm gasbetong. På grund av gasbetongens värmekapacitet dämpas och fördröjs temperaturvariationerna, varför bl.a. yttemperaturens variationer blir mindre och yttemperaturens högsta värde lägre än för konstruktioner med liten värmekapacitet.

varm sommardag när solstrålningens intensitet vid klar himmel är som störst och samtidigt den långvågiga motstrålningen är så stor som möjligt. Detta framgår bl.a. av FIG. 9 och 10, vilka visar de högsta temperaturerna under stationära respektive icke-stationära förhållanden för ovan nämnda metalldeck och gasbetongtak. På grund av gasbetongens värmekapacitet blir under icke-stationära förhållanden yttemperaturen något lägre än den extrema. Avvikelsen är dock inte större än att den presenterade metoden för beräkning av de extrema yttemperaturerna är tillämplig även för gasbetongkonstruktioner, d.v.s. för konstruktioner med tämligen stor värmekapacitet nära ytterytan. Däremot blir yttemperaturen för metalldeck, som praktiskt taget saknar värmekapacitet, i det närmaste lika med den extrema yttemperaturen  $\theta_y^{\max}$  beräknad enligt i rapporten angiven metod. Generellt gäller att vid beräkning av  $\theta_y^{\max}$  enligt denna metod erhålles värden på den säkra sidan.

På samma sätt kan temperaturerna i en ytterkonstruktion aldrig bli lägre än de som skulle uppkomma under stationära förhållanden om den modifierade ekvivalenta utetemperaturen antages vara konstant och lika med den lägsta som erhålls under en kall, klar vinternatt när den långvågiga motstrålningen är så liten som möjligt. Även vid beräkning av  $\theta_y^{\min}$  enligt angiven metod erhålls därför värden på den säkra sidan.

För konstruktioner med litet värmemotstånd och stor värmekapacitet är dock beräkningsmetoden inte tillämplig. Detta exemplifieras i FIG. 11 för ett tak av 200 mm betong. Betongens stora värmekapacitet medför att temperaturvariationerna vid icke-stationära förhållanden dämpas och fördröjs. Dämpningen i samverkan med att taket har mycket litet värmemotstånd gör att den högsta yttemperaturen i praktiken blir väsentligt lägre än den enligt ekvation (10) och (10a) beräknade.

När betongdäcket förses med en utvändig värmeisolering enligt FIG. 12 blir inverkan av betongens värmekapacitet på temperaturfördelningen mycket liten (jfr FIG. 9). Approximationen  $\theta_y \approx \theta_e^x$  gäller därför med mycket god noggrannhet. Om värmeisoleringen placeras på betongdäckets insida, se FIG. 13, inverkar betongens värmekapacitet, liksom vid betongkonstruktioner utan värmeisolering, dämpande och fördröjande på temperaturvariationerna vid icke-stationära förhållanden. Den högsta yttemperaturen blir därför i praktiken väsentligt lägre än den enligt ekvation (10) och (10a) beräknade.

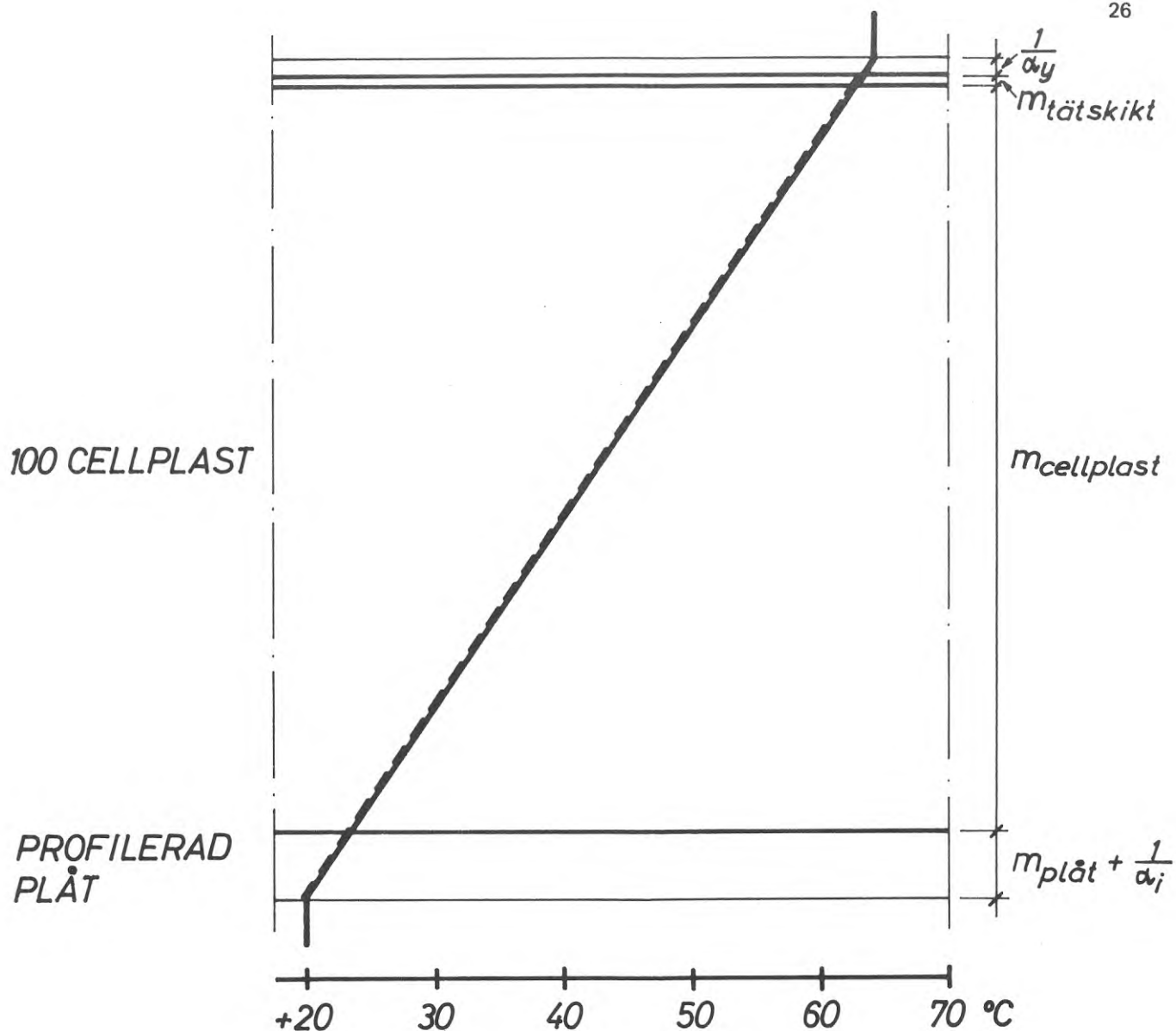


FIG. 9. De högsta temperaturerna under stationära (heldragen kurva) och icke-stationära förhållanden (streckad kurva) för metalledet i FIG. 4. På grund av konstruktionens ringa värmekapacitet sammanfaller de båda kurvorna praktiskt taget.



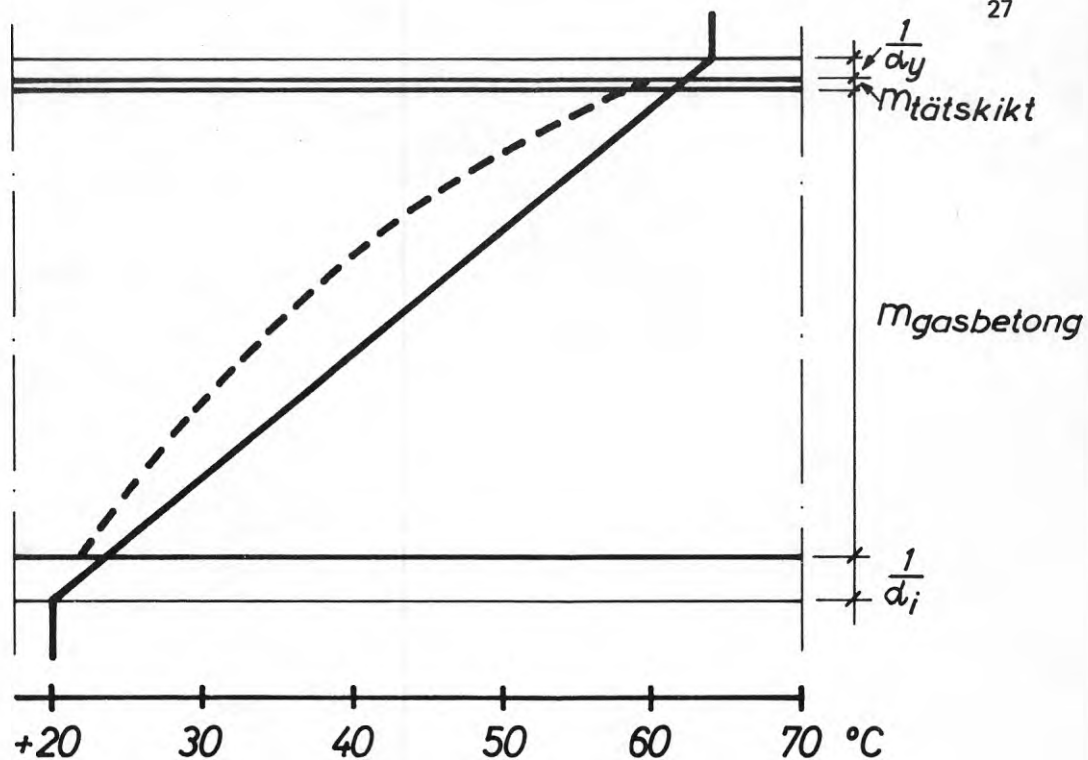
200 GAS-  
BETONG

FIG. 10. De högsta temperaturerna under stationära (heldragen kurva) och icke-stationära förhållanden (streckad kurva) för gasbetongta-  
ket i FIG. 8. På grund av gasbetongens  
värmekapacitet blir under icke-stationära  
förhållanden yttemperaturen lägre än den  
extrema.

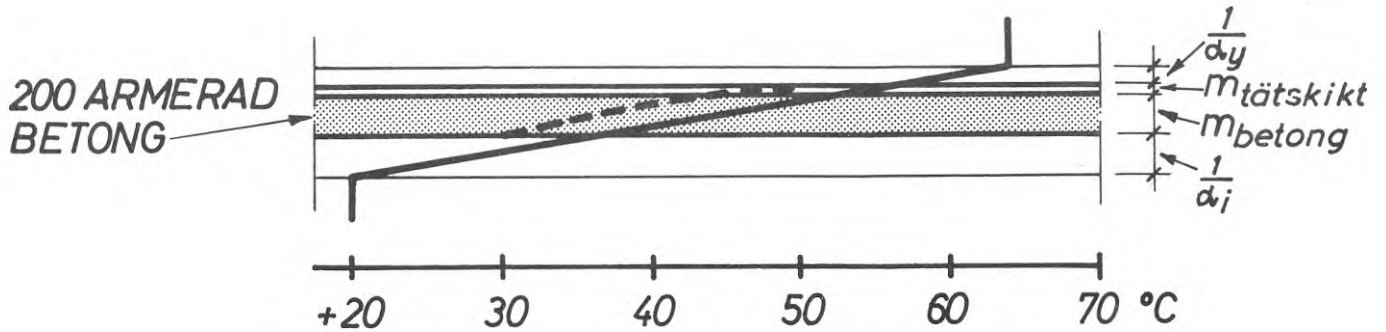


FIG. 11. De högsta temperaturerna under stationära (heldragen kurva) och icke-stationära förhållanden (streckad kurva) för ett tak av 200 mm betong.

Betongens stora värmekapacitet medför att temperaturvariationerna vid icke-stationära förhållanden dämpas och fördröjs. Dämpningen i samverkan med att taket har mycket litet värmemotstånd (se FIG. 6) gör att yttemperaturens högsta värde blir väsentligt lägre än den extrema yttemperaturen beräknad enligt ekvation (10) och (10a).

Trots dämpningen blir temperaturvariationerna i betongen under ett soligt sommar dygn tämligen stora varför de termiskt betingade spänningarna och rörelserna kan bli avsevärda.

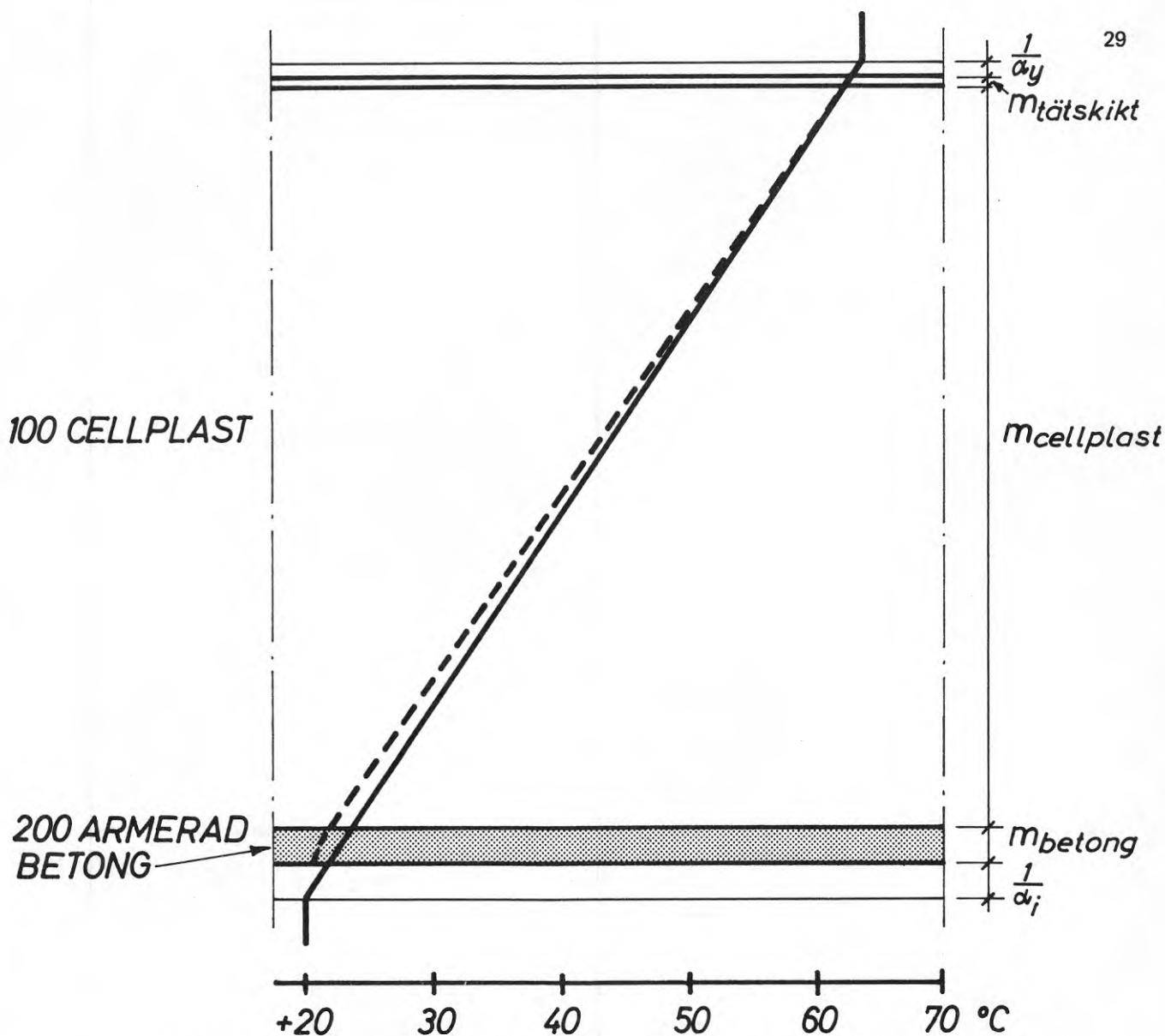


FIG. 12. De högsta temperaturerna under stationära (heldragen kurva) och icke-stationära förhållanden (streckad kurva) för ett 200 mm betongtak med utvändig isolering av 100 mm cellplast. På grund av betongens invändiga placering inverkar dess värmekapacitet endast litet på temperaturfördelningen i konstruktionen vid icke-stationära förhållanden, varför de två kurvorna praktiskt taget sammanfaller i konstruktionens yttre delar. Den högsta yttemperaturen blir därför i det närmaste lika med den extrema yttemperaturen  $\theta_{y,max}$  beräknad enligt ekvation (10) och (10a). Det betyder att för konventionella utvändigt isolerade tak tättskiktet utsätts för både höga och låga yttemperaturer med snabba temperaturväxlingar.

Temperaturvariationerna i betongen blir små vid utvändig placering av cellplasten, varför de termiskt betingade spänningarna och rörelserna i betongen blir av ringa storlek.

Placeras tättskiktet under isoleringen på själva betongdäcket erhålls ett s.k. omvänt tak. Tättskiktet ligger då skyddat för temperaturpåfrestningar (se vidare FIG. 19 och sid 34).

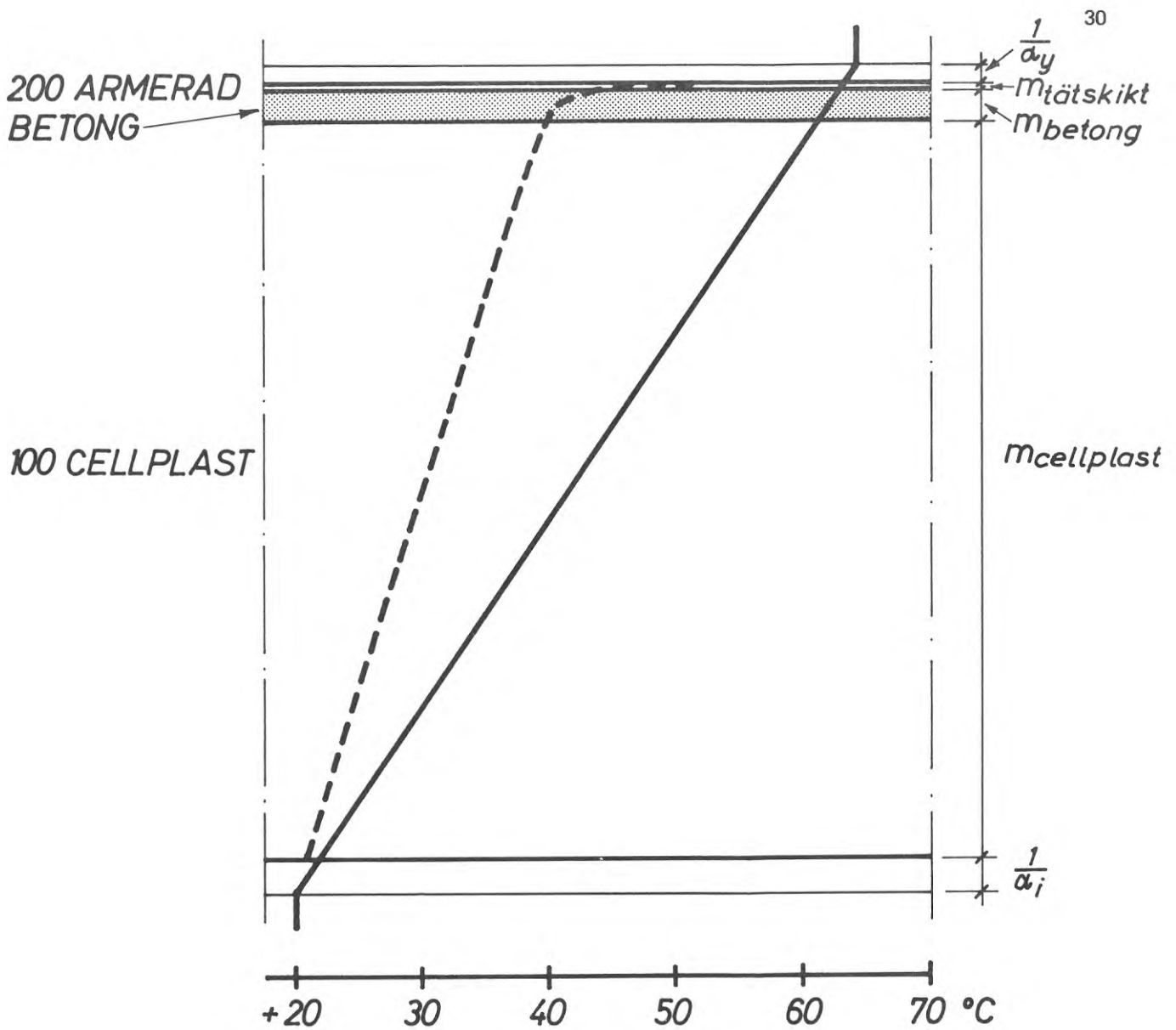


FIG. 13. De högsta temperaturerna under stationära (heldragen kurva) och icke-stationära förhållanden (streckad kurva) för ett 200 mm betongtak med invändig isolering av 100 mm cellplast. På grund av betongens värmekapacitet blir temperaturvariationerna i konstruktionen dämpade och fördröjda vid icke-stationära förhållanden. Den högsta yttemperaturen blir därför lägre än den extrema yttemperaturen  $\theta_{y, \max}$  beräknad enligt ekvation (10) och (10a).

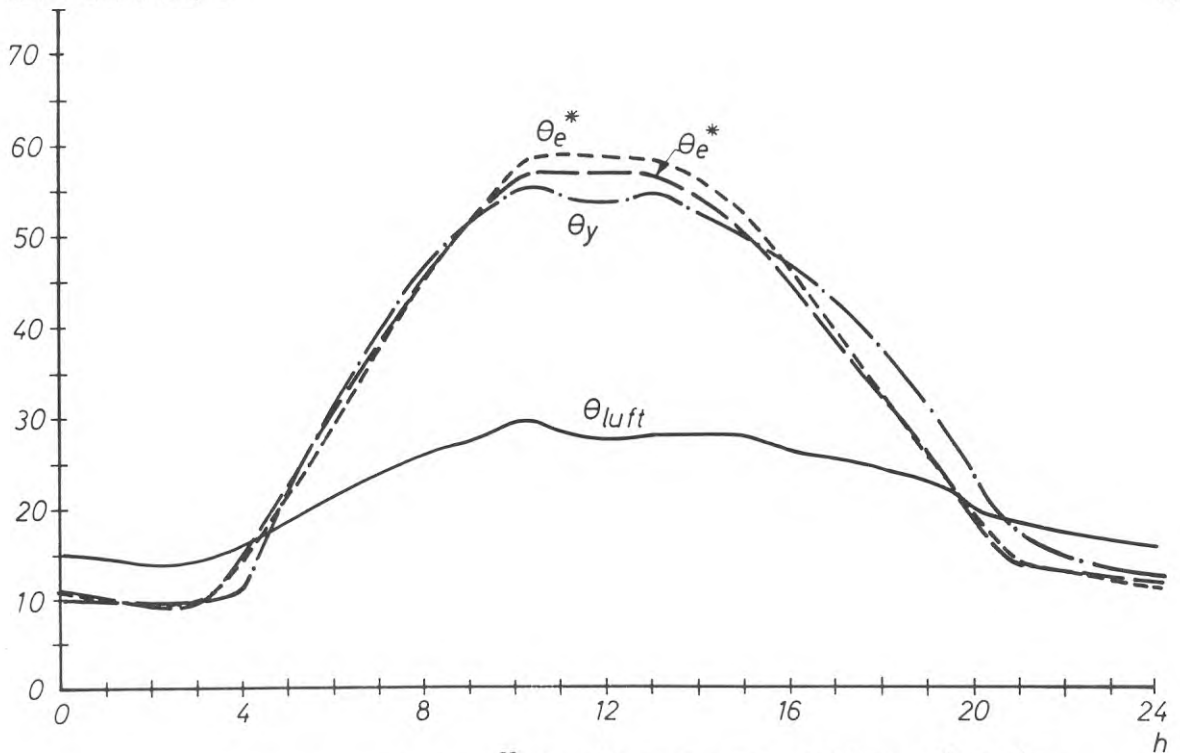
Temperaturvariationerna i betongen under soliga dygn blir vid invändig placering av cellplasten tämligen stora, varför de termiskt betingade spänningarna och rörelserna i betongen kan bli stora.

## 6 JÄMFÖRELSE MED UPPMÄTTA YTTEMPERATURER

I FIG. 14 och 15 visas några exempel på jämförelser mellan i praktiken uppmätta yttemperaturer och enligt den föreslagna metoden beräknade yttemperaturer. För dessa isolerade ytterkonstruktioner, vilka har ringa värmekapacitet nära ytterytan, är överensstämmelsen mycket god mellan de uppmätta och de beräknade temperaturerna.

I samband med tidigare diskussion om inverkan av värmemotstånd och värmekapacitet lämnades exempel på tillämpning av beräkningsmetoder vid olika byggnadskonstruktioner.

Som avslutning behandlas nedan ytterligare några exempel på metodens användning i några praktiska fall.



-----  $\theta_e^*$  beräknad med värden på solstrålningsintensiteten enligt tabeller av Höglund och Stephenson

— — — —  $\theta_e^*$  beräknad med värden på solstrålningsintensiteten uppmätta samtidigt som yttemperaturen

FIG. 14. Jämförelse mellan den modifierade ekvivalenta utetemperatur,  $\theta_e^*$ , och den uppmätta yttemperaturen,  $\theta_y$ , för en mörk takyta under ett varmt och soligt sommardyg. Takkonstruktionen består utifrån räknat av takpapp (absorptionsfaktor  $a = 0,8$ ) på 1" träpanel vilande på regelverk uppstolpat ca 50 cm från det bärande betongbjälklaget. På betongen ligger en värmeisolering av ca 12 cm mineralull.

Den modifierade ekvivalenta utetemperatur har beräknats dels med användande av uppmätta värden på solstrålningsintensiteten dels med hjälp av tabeller för beräkning av solinstrålning mot byggnader, Höglund & Stephenson (1968). Yttre värmeövergångstalet har antagits till  $\alpha_y = 17 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ .

På grund av att konstruktionen har endast ringa värmekapacitet nära ytterytan och att den är högisolerande är överensstämmelsen mellan uppmätt yttemperatur och de båda modifierade ekvivalenta utetemperaturerna mycket god.



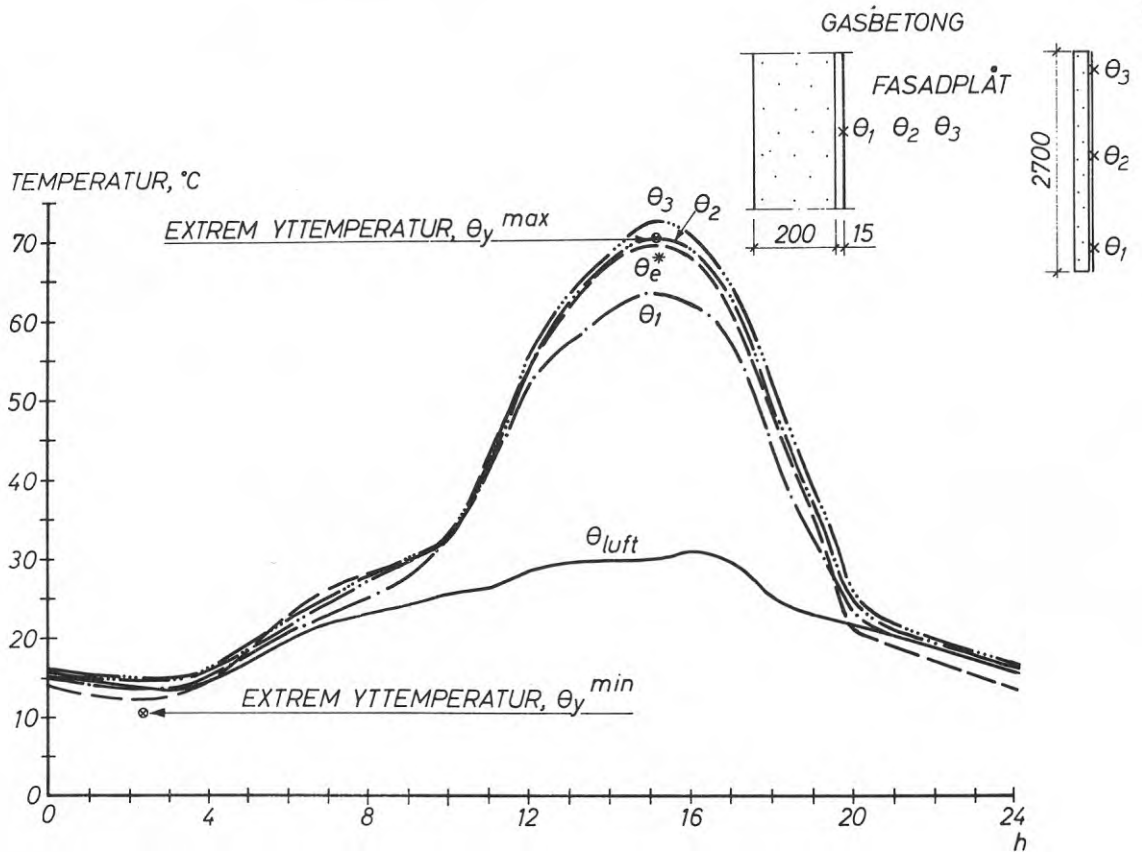


FIG. 15. Den modifierade ekvivalenta utetemperaturen,  $\theta_e^*$ , och de extrema yttemperaturerna,  $\theta_y^{max}$  och  $\theta_y^{min}$ , jämförda med de under ett extremt varmt och soligt sommar-dygn uppmätta yttemperaturerna,  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  och  $\theta_3$ , för en mörk yttervägg. Väggen består av element av 25 cm gasbetong med höjden 270 cm på utsidan beklädda med en profilerad mörk fasadplåt (absorptionsfaktor  $a = 0,9$ ). Mellan plåten och gasbetongen finns en ventilerad luftspalt om ca 15 mm.

Den modifierade ekvivalenta utetemperaturen och de extrema yttemperaturerna har beräknats med användande av värden på solstrålningsintensiteten som uppmätts samtidigt som yttemperaturerna. Yttre värmeövergångstalet har antagits till  $\alpha_y = 14 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ .

På grund av luftspaltens inverkan är överensstämmelsen mycket god mellan den modifierade ekvivalenta utetemperaturen och yttemperaturerna i de två översta mätpunkterna. I den nedersta mätpunkten kyls fasadplåten under dagen av i luftspalten inströmmande luft, varför överensstämmelsen då är mindre god. I den översta mätpunkten uppvärms däremot plåten av luftströmmen, varför den uppmätta temperaturen där är något högre än den modifierade ekvivalenta utetemperaturen.

## 7 NÅGRA TILLÄMPNINGSEXEMPEL

Temperaturvariationerna vid icke-stationära förhållanden har beräknats för några olika ytterkonstruktioner. Beräkningarna har med hjälp av en analogiräknemaskin utförts enligt en RC-nätverksmetod. Ett exempel på resultaten av beräkningarna framgår av FIG. 16, där temperaturvariationerna på olika "djup" i ett horisontellt metalldäck med isolering av 10 cm cellplast visas. Beräkningen har gjorts för ett extremt varmt och soligt sommar dygn.

Metalldäckets ytteryta har i det visade exemplet antagits bestå av en mörk ( $a = 0,9$ ) papptäckning. Temperaturvariationerna under dygnet blir på grund av solstrålningens inverkan mycket stora och sker mycket hastigt för denna konstruktion, som har mycket liten värmekapacitet. Den högsta yttemperaturen ligger vid drygt  $+60^{\circ}\text{C}$  och yttemperaturens totala variation under dygnet är ungefär  $50^{\circ}\text{C}$ .

De extrema temperaturerna för metalldäcket under sommar resp. vinter framgår av FIG. 17. Ytterytans maximala temperaturvariation blir ungefär  $95^{\circ}\text{C}$ . Med en ljus takyta med absorptionsfaktorn  $a = 0,5$  blir den högsta yttemperaturen drygt  $15^{\circ}\text{C}$  lägre och temperaturvariationen minskar till ungefär  $80^{\circ}\text{C}$ .

Ett sätt att minska temperaturen hos metalldäckets ytteryta är att lägga på ett lager ljus singel. Beroende främst på minskad absorption av solstrålning men även på singellagrets värmekapacitet sänks den högsta yttemperaturen för pappskiktet ungefär  $20^{\circ}\text{C}$  (för  $a = 0,5$ ), se FIG. 18.

Tidigare har visats att tätskiktet på utvändigt isolerade tak utsätts för mycket stora temperaturpåfrestningar. Dessa kan undvikas genom att tätskiktet placeras under värmeisoleringen, s.k. omvänt tak. Taktypen förekommer i USA (Smolenski et al.) men knappast ännu i Sverige, trots att man i detta fall troligen kan undvika många skador på tätskiktet på grund av klimatpåfrestningar. I FIG. 19 visas beräknade högsta och lägsta temperaturer under ett varmt sommar dygn för de båda konstruktionstyperna. För det s.k. omvända taket finner man att tätskiktets temperaturvariation - och därmed temperaturpåfrestningarna - blir mycket mindre än för ett konventionellt tak.

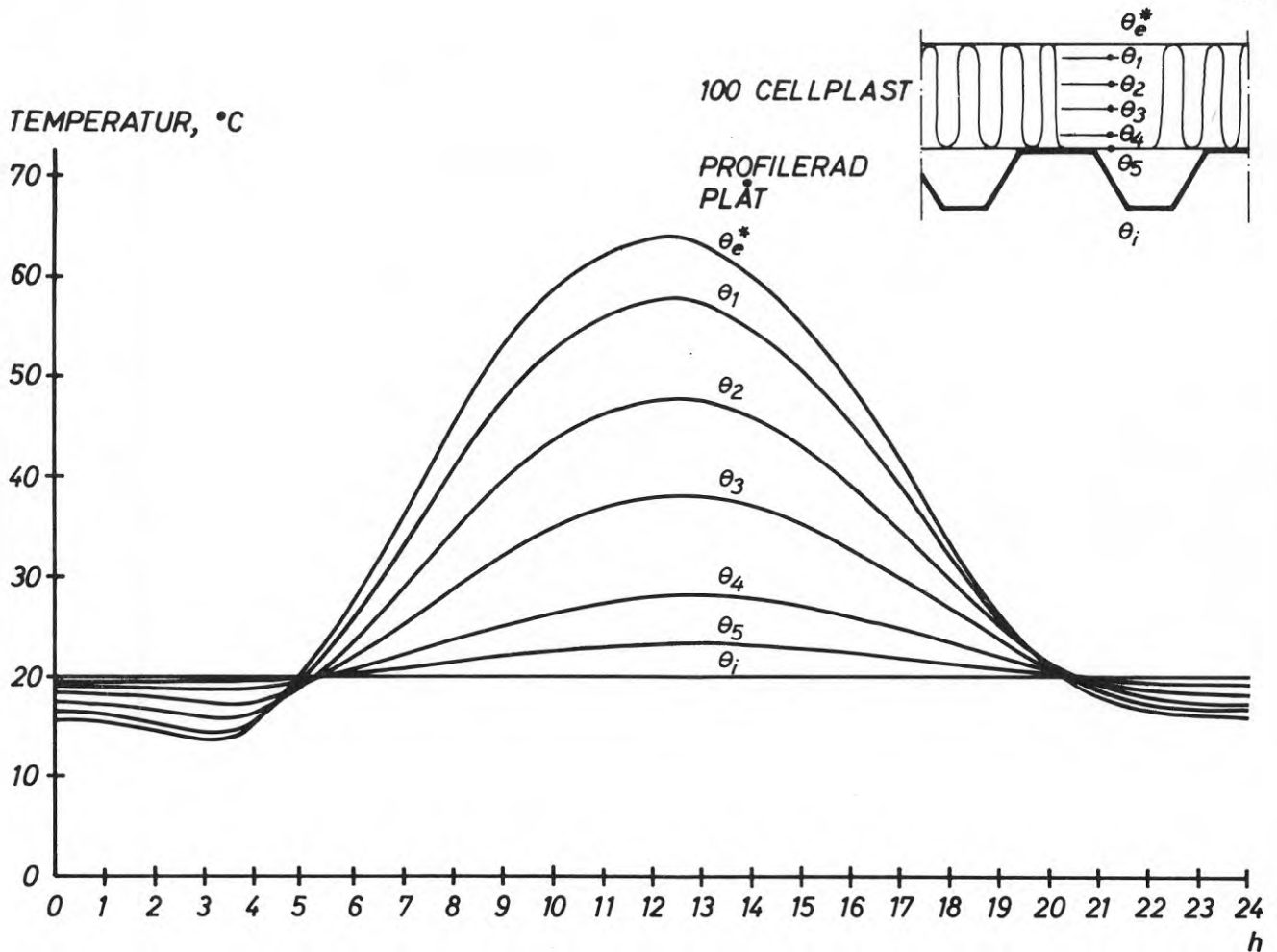


FIG. 16. Temperaturvariationerna i ett horisontellt metalltäck med isolering av 10 cm cellplast under ett extremt varmt och soligt sommar-dygn. Beräkningen har gjorts i analogmaskin med en RC-nätverksmetod. Inomhustemperaturen  $\theta_i$  har antagits vara konstant lika med  $+20^\circ\text{C}$ , medan den modifierade ekvivalenta utetempera-turen  $\theta_e^*$  antagits variera dygnsperiodiskt enligt en tidsserie beräknad med ekvation (7a-d). Ytterytan har förutsatts vara mörk,  $a = 0,9$ , och lufttemperaturen  $\theta_l$  har tagits från ett av de absolut varmaste dyggen i Stockholm under de senaste tio åren. Värde-na på solstrålningsintensiteten  $I$  och yttre värmeövergångstalet  $\alpha_y$  har valts enligt den tidigare diskussionen.

Temperaturvariationerna under dygnet är mycket stora och sker mycket hastigt för denna konstruktion, som praktiskt taget saknar värmekapacitet. Eftersom  $\theta_y \approx \theta_e^*$  blir det totala temperaturspannet för takytan under detta dygn ungefär  $50^\circ\text{C}$ . För en ljus tak-yta med  $a = 0,5$  blir temperaturspannet unge-fär  $35^\circ\text{C}$ .

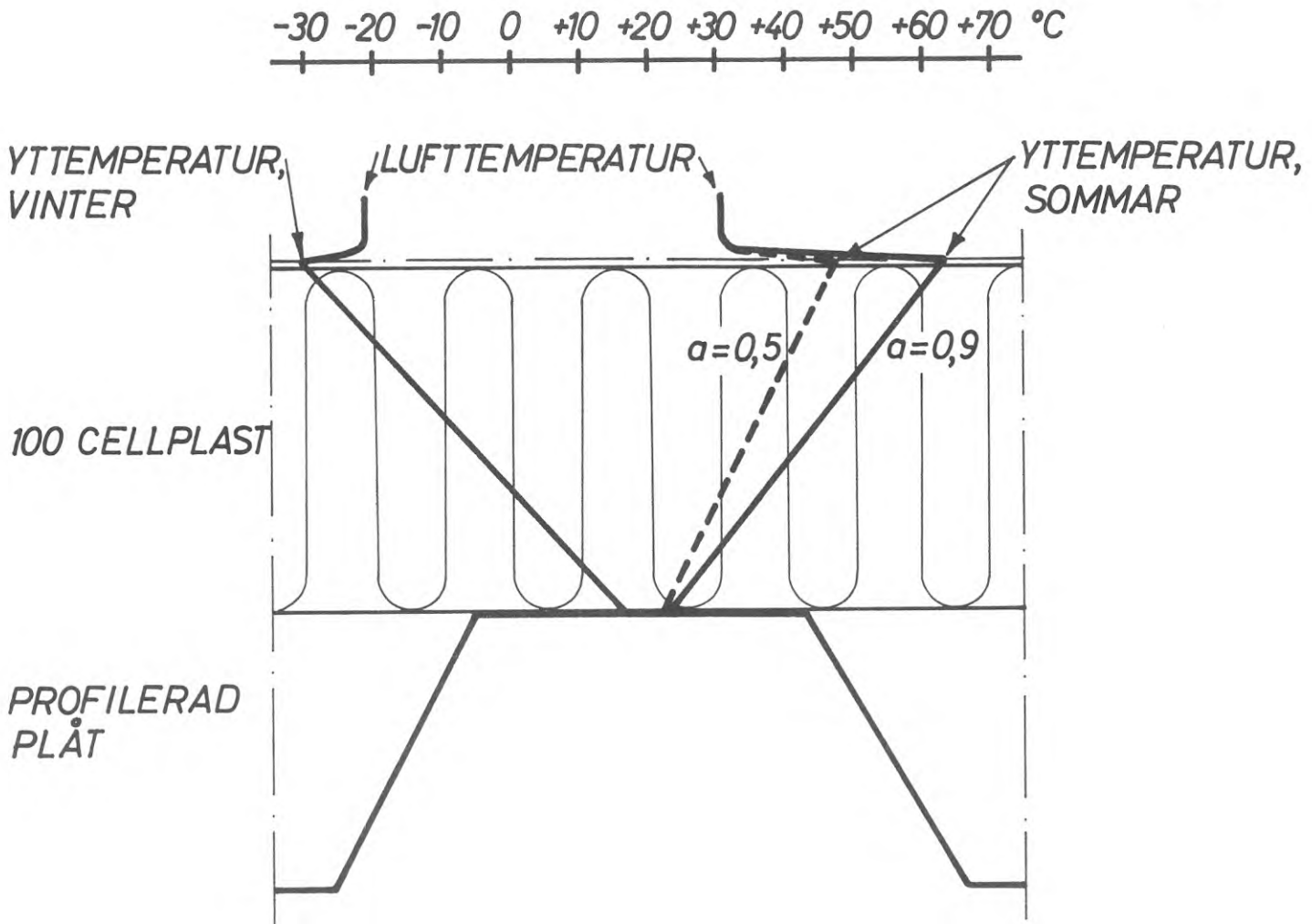


FIG. 17. Beräknade extrema temperaturer för ett isolerat metalledäck under sommar resp. vinter. Det totala temperaturspannet för ytterytan blir (mörk taktäckning med absorptionsfaktorn  $a = 0,9$ ) ungefär  $95^{\circ}\text{C}$ . Med en ljus takyta med absorptionsfaktorn  $a = 0,5$  blir den högsta yttemperaturen  $\theta_y^{\max}$  ungefär  $15^{\circ}\text{C}$  lägre och det totala temperaturspannet minskar till ungefär  $80^{\circ}\text{C}$ .

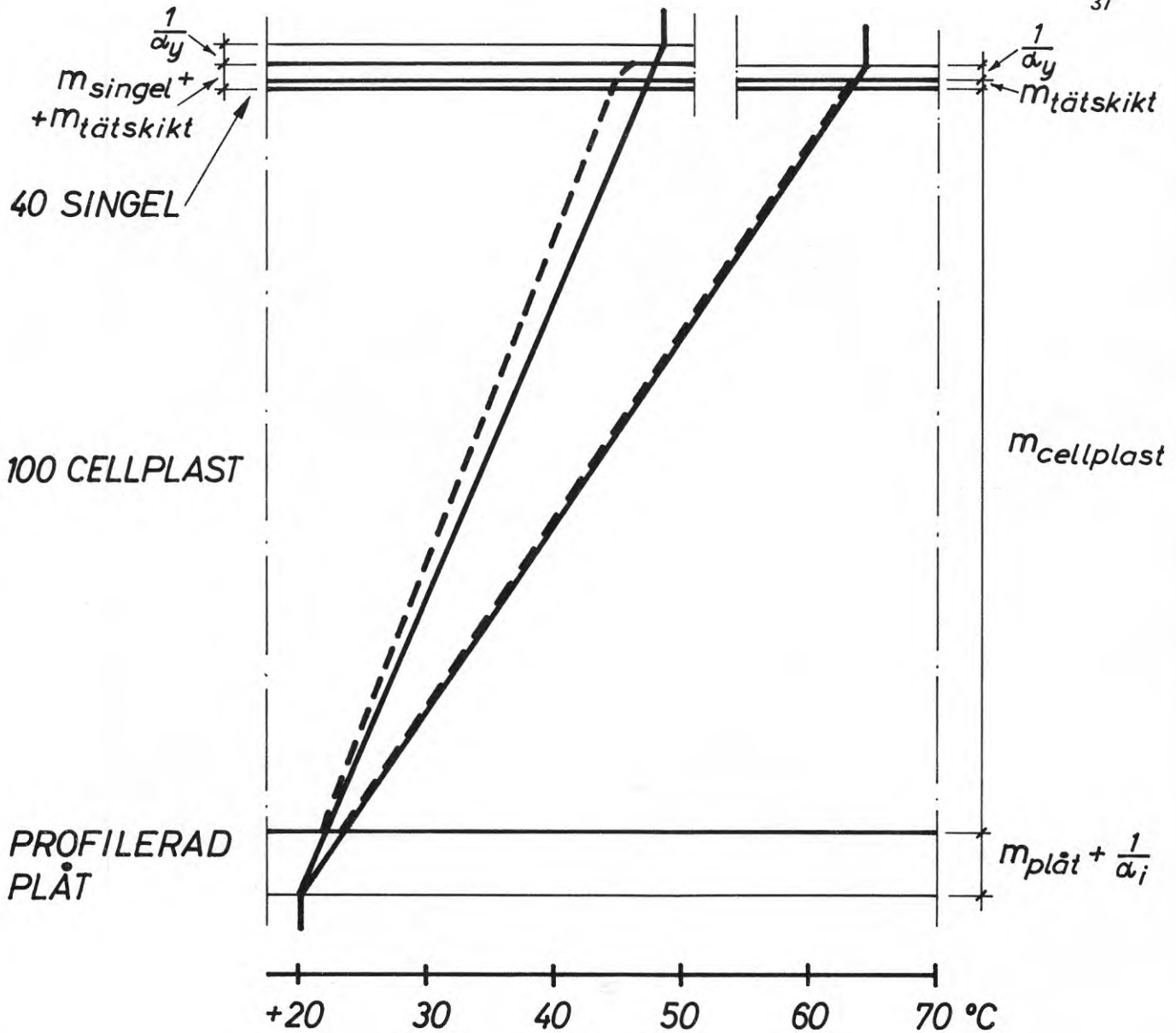


FIG. 18. Om metalledet i FIG. 5 förses med ett singellager på ovansidan blir yttemperaturen väsentligt lägre och temperaturvariationerna i konstruktionen mindre. Detta beror huvudsakligen på att singeln har en lägre absorptionsfaktor för kortvågig strålning (här har antagits  $a = 0,5$ ). Singelns värmekapacitet har också en viss inverkan. Den extrema yttemperaturen sänks ca  $20^{\circ}\text{C}$  med hjälp av singeln.

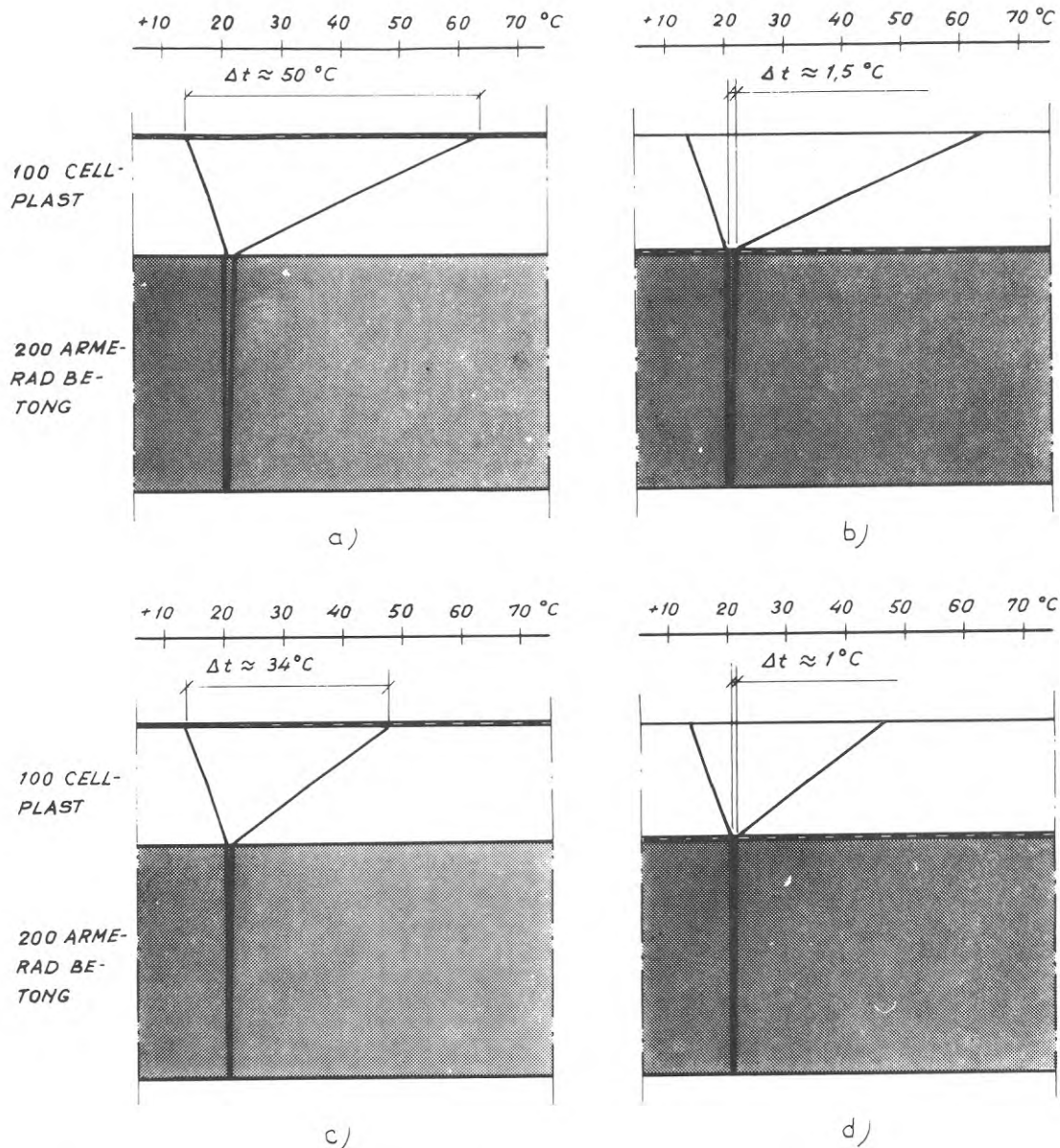


FIG. 19. De högsta och lägsta temperaturerna under ett varmt och soligt somrardygnet för ett tak av 200 mm betong med utvändigt värmeisolering av 100 mm cellplast. Tätskiktet är dels konventionellt placerat ovanpå värmeisoleringen (bild a och c) och dels placerat enligt det omvända takets princip, dvs. tätskiktet är lagt direkt på betongen och är skyddat av värmeisoleringen (bild b och d). Dessutom visas inverkan av olika absorptionsfaktorer för kortvägig strålning,  $a = 0,9$  i de två övre bilderna och  $a = 0,5$  i de två undre.

Tätskiktets temperaturvariation under dygnet blir ca  $50^\circ\text{C}$  (resp. ca  $34^\circ\text{C}$ ) vid den konventionella placeringen men endast ca  $1,5^\circ\text{C}$  (resp. ca  $1^\circ\text{C}$ ) vid den skyddade placeringen. Vid det omvända taket är således tätskiktet mycket väl skyddat mot påfrestningar på grund av variationer hos takets yttemperatur.



I ett särskilt provhus utanför Stockholm pågår studier av olika problem i samband med icke stationär värmetransport. Byggnaden är utförd med stomme av gasbetong. Ytterväggarna består av element av 25 cm gasbetong beklädda med vågprofilerad aluminiumplåt uppdelad i 2,5 m breda vertikala fält med olika ytbehandlingsar, se FIG. 20. Mellan plåten och gasbetongen bildas en ca 15 mm ventilerad luftspalt.

Som ett exempel på inverkan av olika färger hos fasadbeklädnaden och därmed av olika grad av absorption av kortvågig instrålning visas i FIG. 21 och FIG. 22 uttorkningsförloppen hos gasbetongväggar mot sydväst beklädda med jordbrun resp. benvit fasadplåt. Instrålningen bidrar i båda fallen till att främst skiktet närmast ytterytan får en snabb uttorkning under våren och en del av sommaren. Uttorkningen är dock betydligt snabbare för väggen med den jordbruna fasadplåten (absorptionsfaktor för kortvågig strålning ca 0,9) än för väggen med den benvita fasadplåten (absorptionsfaktor ca 0,35). Den större absorptionen vid den mörka fasadplåten medför således en snabbare uttorkning av gasbetongens byggfukt. Som jämförelse kan nämnas att ytemperaturen under ett varmt sommarygn varierar mellan ca +15°C och ca +70°C för den mörka plåten (jämför FIG. 15, vilken avser samma vägg) och mellan ca +15°C och ca +45°C för den ljusa plåten.

Inverkan av bl.a. plåtens ytemperatur och vindens hastighet på luftströmningen i de ventilerade luftspalterna har också undersökts. Som exempel kan nämnas att under en varm, vindstill somardag erhålls i luftspalterna bakom den mörka fasadplåten (vid ytemperaturen ca +70°C) en lufthastighet av ca 25 cm/s medan för den ljusa fasadplåten (vid ytemperaturen ca +45°C) erhålls ungefär hälften så stor lufthastighet. Den mörka plåtens större absorption medför således vid solbelysning förutom en högre ytemperatur också en större lufthastighet i den innanförliggande luftspalten.

Som exempel visas slutligen också några resultat av beräkningar av extrema ytemperaturer, som erhållits för ett horisontellt tak och en vägg. Uteluftens temperatur har tagits från ett av de absolut varmaste resp. ett av de absolut kallaste dygnen i Stockholm under de senaste tio åren.

I FIG. 23 och 24 visas den extrema ytemperaturen för en horisontell, mörk takyta samt som jämförelse för mörka väggytor orienterade mot de fyra huvudväderstrecken. Av figurerna framgår att stora och snabba förändringar av ytemperaturen uppkommer vid klart väder. Under en mycket varm somardag kan sålunda temperaturen i ytskiktet hos takytan på grund av absor-

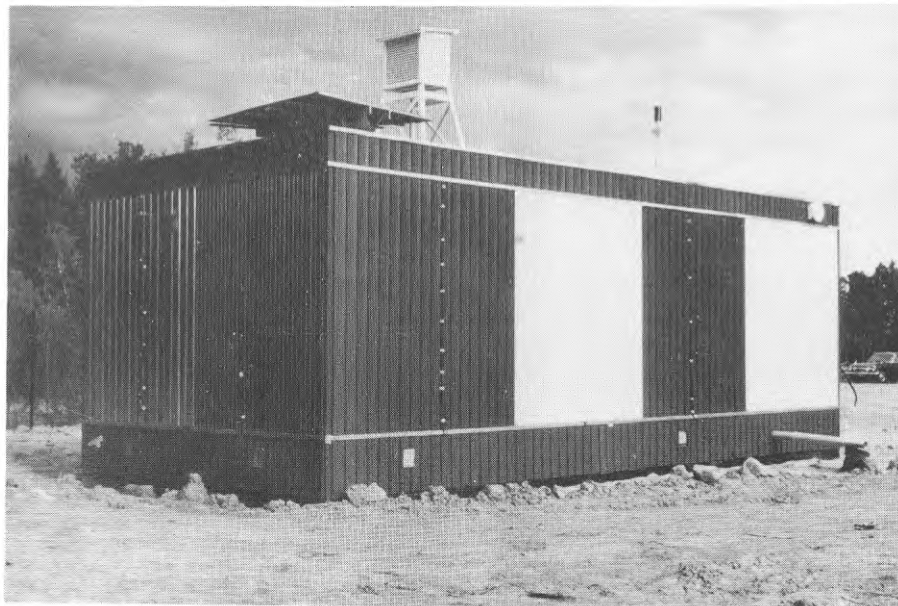


FIG. 20. I ett provhus utanför Stockholm studeras bl.a. olika problem i samband med icke stationär värmetransport. Provhuset har stomme av gasbetong. Ytterväggarna består av 2,7 m höga helement av gasbetong med tjockleken 25 cm. De är utvändigt beklädda med vågprofilerad aluminiumplåt uppdelad i vertikala fält med bredden 2,5 m och med olika ytbehandlingar. Mellan plåten och gasbetongen bildas en ca 15 mm ventilerad luftspalt.

Fuktkvot,  
viktprocent

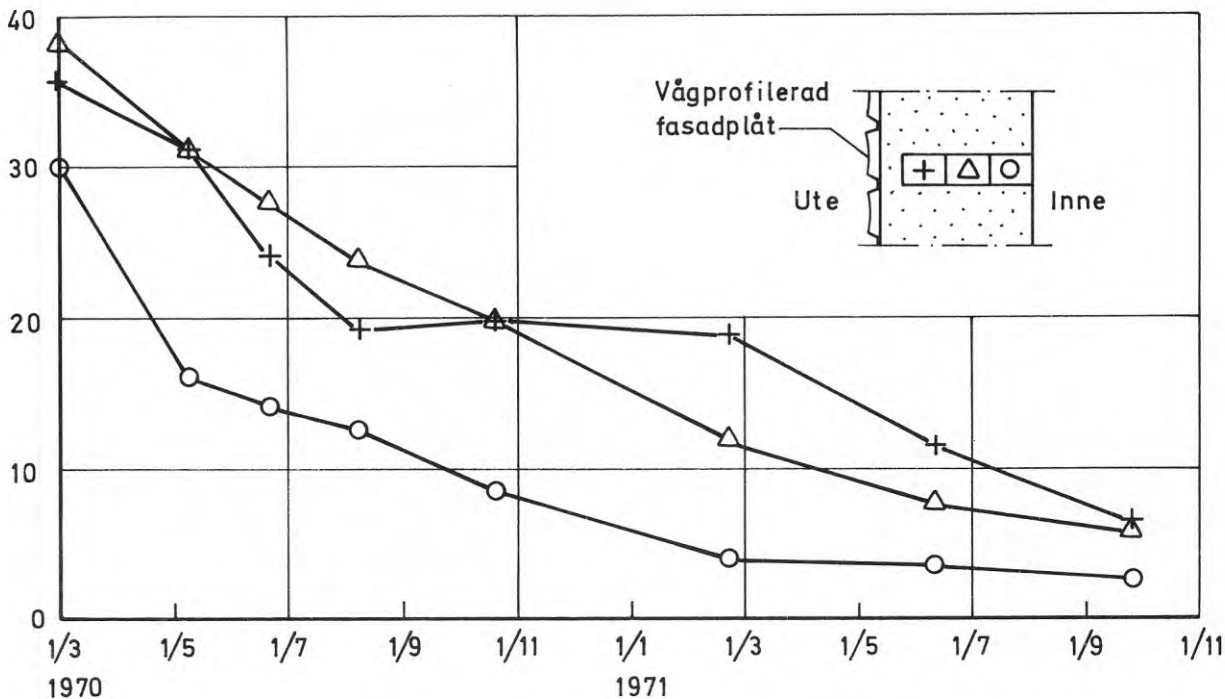


FIG. 21. Byggfuktens uttorkning hos en gasbetongvägg mot sydväst utvändigt beklädd med en benvit fasadplåt (absorptionsfaktor för kortvågig strålning ca 0,35).

Fuktkvot,  
viktprocent

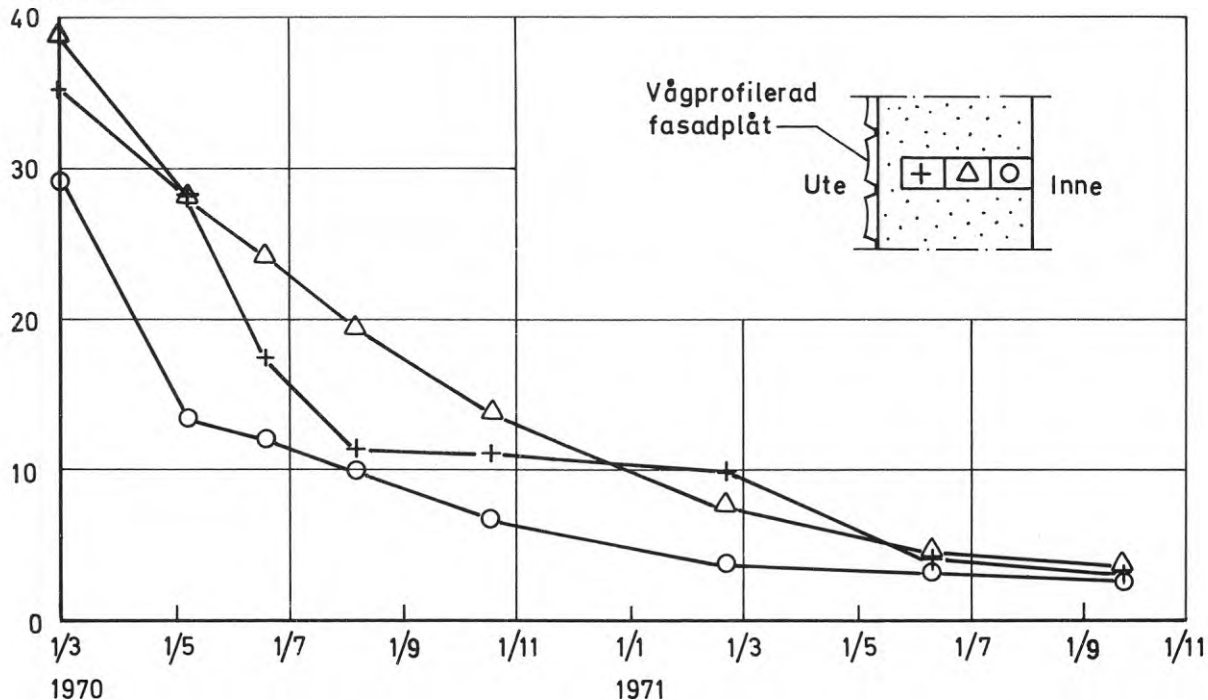


FIG. 22. Byggfuktens uttorkning hos en gasbetongvägg mot sydväst utvändigt beklädd med en jordbrun fasadplåt (absorptionsfaktor för kortvågig strålning ca 0,9). På grund av fasadplåtens större absorption av den infallande kortvågiga strålningen erhålls en snabbare uttorkning än vid den benvita fasadplåten.

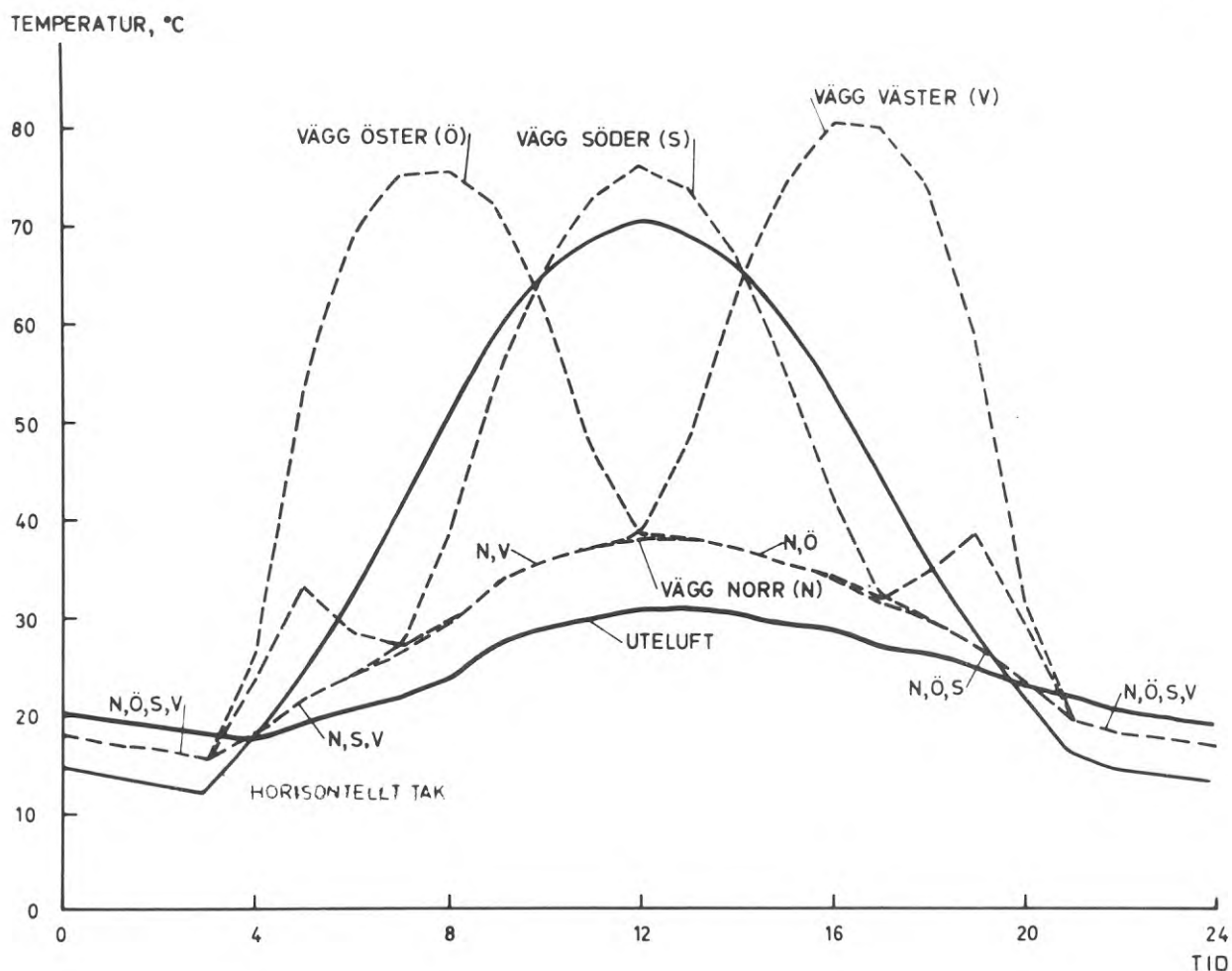


FIG. 23. Beräknade extrema yttemperaturer hos en horisontell takyta och väggytor mot de fyra huvudväderstrecken under ett varmt, soligt, klart och vindstilla sommarygn ( $l = 60^{\circ}\text{N}$ ). Ytorna är mörka (absorptionsfaktorn  $a = 0,9$ ). Skillnaden mellan den högsta och lägsta temperaturen under sommarygnet är för takytan ungefär  $60^{\circ}\text{C}$  och för väggytorna ungefär  $65^{\circ}\text{C}$ .

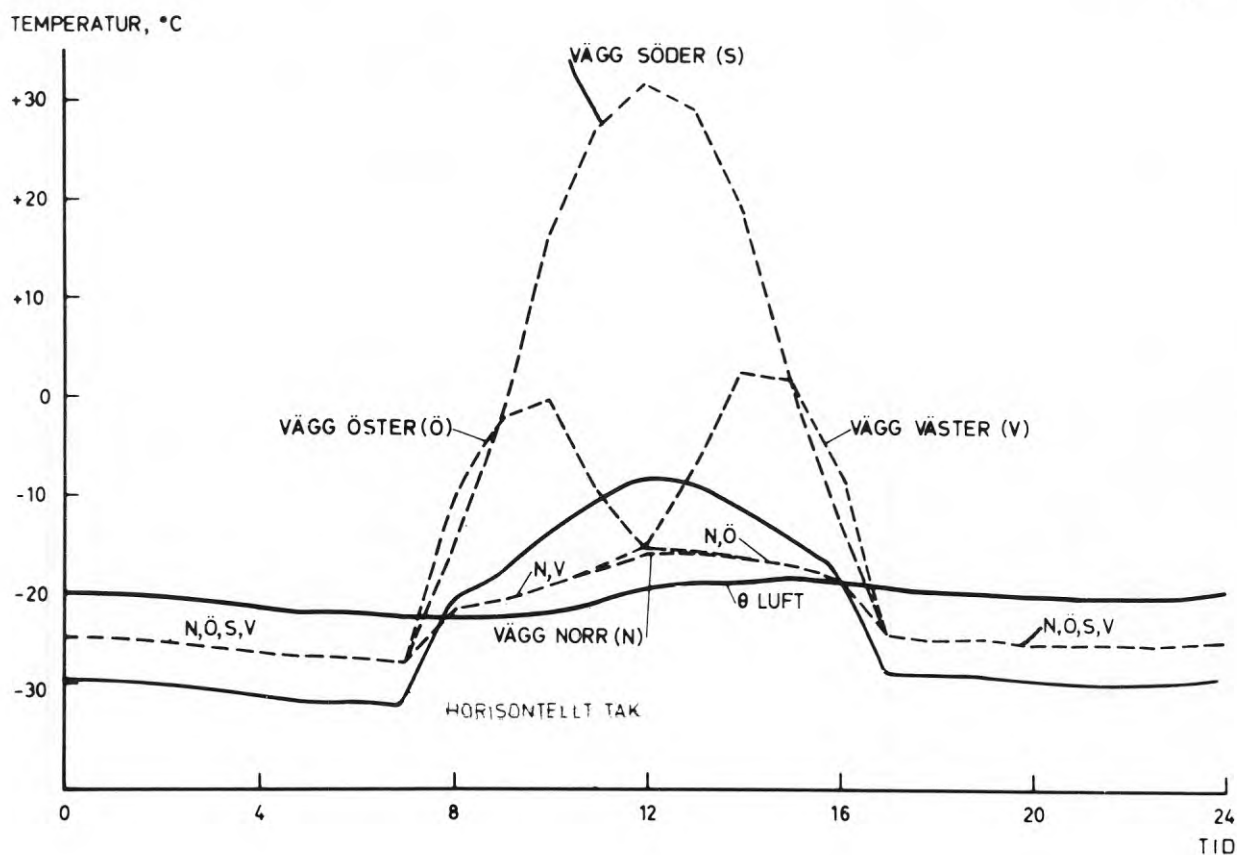


FIG. 24. Beräknade extrema yttemperaturer hos en horisontell takyta och väggytor mot de fyra huvudväderstrecken under ett kallt, soligt, klart och vindstilla vinterdygn ( $l = 60^\circ\text{N}$ ). Ytorna är mörka (absorptionsfaktorn  $a = 0,9$ ). Skillnaden mellan den högsta och lägsta temperaturen under vinterdygnet är för takytan ungefär  $23^\circ\text{C}$  och för väggytan mot söder ungefär  $60^\circ\text{C}$ . För väggytorna mot öster och väster är motsvarande skillnad ungefär  $30^\circ\text{C}$  samt för ytan mot norr ungefär  $12^\circ\text{C}$ .

berad kortvågig strålning stiga uppemot  $40^{\circ}\text{C}$  högre än lufttemperaturen. Under en klar natt sjunker däremot temperaturen i ytskiktet åtskilliga grader under lufttemperaturen. Detta beror på att ytan utsänder en större mängd långvågig strålning än den mottar från omgivningen. Takytans temperatur kan därför vid helt klart väder sjunka ända till ca  $10^{\circ}\text{C}$  under lufttemperaturen.

Det totala temperaturspannet för takytan under sommar-dygnet blir ungefär  $60^{\circ}\text{C}$ . Vid jämförelse mellan FIG. 23 och 24 fås det maximala temperaturspannet för hela året till ungefär  $105^{\circ}\text{C}$ . För en ljus takyta (absorptionsfaktorn  $a = 0,5$ ) blir temperaturspannet för sommar-dygnet ungefär  $40^{\circ}\text{C}$  och för hela året ungefär  $85^{\circ}\text{C}$ .



## LITTERATUR

Bliss, R W, 1961, Atmospheric Radiation Near the Surface of the Ground. A Summary for Engineers. Solar Energy. Vol. V.

Brown, G, 1956, Värmeövergång vid byggnaders ytter-  
ytor. (Statens nämnd för byggnadsforskning.) Handling-  
ar nr 27. Stockholm

Brown, G, 1971, Simulation by Digital Computer Program of the Temperature Variation in a Room. (United States Department of Commerce, National Bureau of Standards.) Ur Use of Computers for Environmental Engineering Related to Buildings. Building Science Series 39. Washington.

Brunt, P, 1952, Physical and Dynamic Meteorology. (University Press.) Cambridge.

Höglund, I, Mitalas, G P & Stephenson, D G, 1967, Surface Temperatures and Heat Fluxes for Flat Roofs. Building Science, Vol. 2, No 1.

Höglund, I & Stephenson, D G, 1968, Tabeller för be-  
räkning av solinstrålning mot byggnader. (Statens  
institut för byggnadsforskning.) Rapport 49. Stockholm.

Kimura, K & Stephenson, D G, 1969, Solar Radiation on Cloudy Days. ASHRAE Transactions. Vol. 75, part 1. New York.

Mackey, C O & Wright, L T, 1943, Summer Comfort Factors as Influenced by the Thermal Properties of Building Materials. ASHVE Transactions. Vol. 49. New York.

Smolenski C P, Halteman, E K & Krokosky, E M, 1971, Application of Multilayer Periodic Heat Flow Theory To the Design and Optimization of Roofing Systems. (United States Department of Commerce, National Bureau of Standards.) Ur Use of Computers for Environmental Engineering Related to Buildings. Building Science Series 39. Washington.

VVS-handboken, 1963. (Förlags AB VVS.) Stockholm.

Ångström, A, 1928, Beitr. Phys. frei Atmos. 14, 1.



## CAPTIONS

FIG. 1 Diagram showing the heat balance at the outside surface of a building. Convection causes an increment or loss of heat depending on whether the temperature  $\theta_{\ell}$  of the air is higher or lower than the temperature  $\theta_y$  of the outside surface. The short-wave radiation,  $I$ , consists of direct solar radiation and diffuse radiation which includes radiation from the sky and reflected radiation from the ground and other parts of the surroundings. A certain, usually major, proportion,  $aI$ , of the short-wave radiation is absorbed since the absorption factor  $a$  has values between 0.4 and 0.9 for most materials in the outside surfaces of buildings, see TABLE 3. Another, usually smaller, proportion,  $(1-a)I$ , is reflected at the outside surface. Long-wave radiation  $L$  is received from the sky and the surroundings, the greatest proportion  $\epsilon L$  of which is absorbed and causes an increase in heat. The remainder  $(1-\epsilon)L$  is reflected and is emitted together with the long-wave radiation  $\epsilon E_y$  emitted by the outside surface. The emissivity of most materials in outside surfaces, with respect to long-wave radiation, is about  $\epsilon = 0.9$ . The value of  $\epsilon$  for shiny metal surfaces may be considerably lower but usually increases as time goes on owing to deposits of dirt, corrosion etc.

FIG. 2 Composition of the modified sol-air temperature. The example refers to a horizontal roof structure of dark external surface on a warm summer day when the sky is clear and the intensity of solar radiation is a maximum and the long-wave emission from the surface is also as large as possible. The figure applies to that time during the day when the modified sol-air temperature is a maximum.

The sum of the thermal resistance ( $m$ ) of the different layers and the internal and external surface resis-

tance ( $1/\alpha_y$ ) have been plotted along the vertical axis instead of the thicknesses of the different layers in the structure. It is therefore possible, for stationary conditions or for non-stationary conditions if there is no heat capacity, to illustrate the temperature distribution in the structure by means of a straight line.

FIG. 3 The equivalent radiant temperature of sky and ground  $\theta_g$  on a clear night as a function of the outside air temperature  $\theta_1$ , according to measurements made by Brown over the period 1949-51. For horizontal surfaces the equivalent radiant temperature is in the region  $(1.2 \times \theta_\ell - 18) \leq \theta_g \leq (1.2 \times \theta_\ell - 10)$ . For vertical surfaces the corresponding region is  $(1.1 \times \theta_\ell - 7) \leq \theta_g \leq (1.1 \times \theta_\ell - 3)$ .

FIG. 4 The negative terms in Equations (10-13), obtained as a result of the interchange of long-wave radiation, shown as functions of the outside air temperature. As will be seen in the figure, when calculating  $\theta_y^{\max}$  it is possible to write  $(0.3 - 0.06 \theta_\ell) \approx 0$  for horizontal surfaces and  $(1.2 - 0.04 \theta_y) \approx 0$  for vertical surfaces. In calculating  $\theta_y^{\min}$ , there is good reason to put  $(7.2 - 0.08 \theta_\ell) \approx 10$  for horizontal surfaces and  $(3.5 - 0.05 \theta_\ell) \approx 5$  for vertical surfaces. When these values are substituted into Equations (10-13), the simplified Equations (10a-13a) are obtained.

FIG. 5 Composition of the modified equivalent outside temperature and surface temperature (see FIG. 2).

If the structure has no heat capacity (continuous line), the magnitude of the difference between the surface temperature and the modified sol-air temperature depends on the relationship between the external surface resistance and the total thermal resistance of the structure. For structures with a high degree of

of insulation this difference is very small, and the approximation  $\theta_y \approx \theta_e^*$  used in the derivation of the extreme surface temperatures, is very well justified. Were the thermal resistance infinitely large, the above approximation would be exactly true (see FIG. 6).

For structures which have heat capacity (dashed line), the difference between the surface temperature and the sol-air temperature is normally greater, but the approximation is still on the safe side, i.e.  $\theta_y^{\max}$  according to the derived expression has a value higher than the actual one. In the same way, for a structure which has heat capacity, the value of  $\theta_y^{\min}$  is lower than the actual surface temperature.

FIG. 6 The temperature distribution in some surface structures of different thermal resistances under stationary conditions. The relationship  $\theta_y = \theta_e^*$  is exactly correct if the thickness of insulation is infinitely large. For structures with a high degree of insulation, however, the approximation is very well justified, see e.g. the curve for  $m = 3 \text{ m}^2\text{h}^\circ\text{C/kcal}$ . In addition, the approximation is such that in calculating the extreme surface temperatures  $\theta_y^{\max}$  and  $\theta_y^{\min}$ , values on the safe side are obtained, i.e. the value of  $\theta_y^{\max}$  is a little too high and the value of  $\theta_y^{\min}$  a little too low. Depending on accuracy requirements, the approximation may be used for structures of small heat capacity which have thermal resistances ranging to a value as low as  $m \approx 1 \text{ m}^2\text{h}^\circ\text{C/kcal}$ .

FIG. 7 Temperature distribution at certain times during the day for a metal deck with an insulation of 100 mm cellular plastic. The temperature curves are practically straight lines. For this metal deck which has a large thermal resistance and a small heat capacity, the approximation  $\theta_y \approx \theta_e^*$  applies with a high degree of accuracy.

Theoretically, the temperatures cannot become higher than those under stationary conditions, assuming the modified sol-air temperature to be constant and equal to the highest temperature obtained on an extremely hot summer day (the line heavily drawn). See also FIG. 9 in which the highest temperatures in the structure (dashed curve) have been plotted.

FIG. 8 Temperature distribution at certain times during the day for a horizontal roof of cellular concrete 200 mm thick. Owing to the heat capacity of the cellular concrete, temperature variations are damped and delayed, and variations in the surface temperature etc. will therefore be less and the maximum value of the surface temperature lower than in the case of structures of small heat capacity.

FIG. 9 The highest temperatures under stationary conditions (continuous line) and non-stationary conditions (dashed line) for the metal deck in FIG. 4. Owing to the slight heat capacity of the structure, the two curves practically coincide.

FIG. 10 The highest temperatures in the cellular concrete roof in FIG. 8 under stationary conditions (continuous curve) and non-stationary conditions (dashed curve). Owing to the heat capacity of the cellular concrete, the surface temperature under non-stationary conditions is lower than the extreme temperature.

FIG. 11 The highest temperatures in a roof of 200 mm concrete under stationary conditions (continuous curve) and non-stationary conditions (dashed curve).

Owing to the large heat capacity of the concrete, the temperature variations under non-stationary conditions are damped and delayed. Owing to the fact that the roof has very small thermal resistance (see FIG. 6),



coupled with the damping, the maximum value of the surface temperature is considerably lower than the extreme surface temperature calculated according to Equations (10) & (10a).

In spite of the damping, the temperature variations in the concrete are fairly large on a sunny day, and the stresses and movements caused by thermal effects may therefore be considerable.

FIG. 12 The highest temperatures under stationary conditions (continuous line) and non-stationary conditions (dashed line) for a 200 mm concrete roof with an external insulation of 100 mm cellular plastic. Owing to the fact that the concrete is on the inside, its heat capacity has a small influence on the temperature distribution in the structure under non-stationary conditions, and the two lines therefore practically coincide in the outer portions of the structure. The highest surface temperature is therefore practically equal to the extreme surface temperature  $\theta_y^{\max}$  calculated according to Equations (10) and (10a). This means that in conventional externally insulated roofs, the waterproofing layer is exposed to both high and low surface temperatures, the alternations in temperature being rapid.

When the cellular plastic is placed on the outside, temperature variations in the concrete are small and the stresses and movements due to thermal effects are therefore small in the concrete.

If the waterproofing is placed below the insulation on the concrete itself, the waterproofing is protected from temperature stresses (see also FIG. 13).

FIG. 13 The highest temperatures under stationary conditions (continuous line) and non-stationary conditions (dashed line) for a 200 mm concrete roof with internal insulation of 100 mm cellular plastic. Owing

to the heat capacity of the concrete, temperature variations in the structure are damped and delayed under non-stationary conditions. The highest surface temperature is therefore lower than the extreme surface temperature  $\theta_y^{\max}$  calculated according to Equations (10) and (10a).

The temperature variations in the concrete on sunny days are fairly large when the cellular plastic is placed on the inside, and the stresses and movements in the concrete, due to thermal effects, may be large.

FIG. 14 Comparison between the modified sol-air temperature  $\theta_e^*$  and the recorded surface temperature  $\theta_y$  for a dark roof surface on a warm and sunny summer day. Starting from the outside, the roof structure consists of roofing felt (absorption factor  $a = 0.8$ ) on 1" wood panelling underlain by battens supported about 50 cm above the load-bearing concrete slab. There is heat insulation consisting of about 120 mm mineral wool on top of the concrete.

The modified sol-air temperature has been calculated by use of the recorded values of the intensity of solar radiation and also by means of tables for calculation of the solar radiation on buildings, Höglund & Stephenson (1968). The external surface coefficient of heat transfer has been taken as  $\alpha_y = 17 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ .

Owing to the fact that the structure has only a slight heat capacity near the outside surface and that it has a high degree of insulation, the agreement between the recorded surface temperature and both the modified equivalent outside temperatures is very good.

FIG. 15 The modified equivalent outside temperature  $\theta_e^*$  and the extreme surface temperatures  $\theta_y^{\max}$  and  $\theta_y^{\min}$  compared with the surface temperatures  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  and  $\theta_3$  measured on a dark outside wall on a very warm and sunny summer day. The wall consists of cellular con-

crete elements 250 mm thick and 2700 mm high, with an outside cladding of corrugated dark metal sheeting (absorption factor  $a = 0.9$ ). There is a ventilated air space about 15 mm wide between the sheeting and the cellular concrete.

The modified sol-air temperature and the extreme surface temperatures have been calculated by using the values of solar radiation intensity which were measured at the same time as the surface temperatures. The external surface coefficient of heat transfer has been taken as  $\alpha_y = 14 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ .

There is very good agreement between the extreme surface temperature and the surface temperatures at the measuring point  $\theta_2$ . At the bottom measuring point  $\theta_1$ , the sheeting is cooled during the day by air flowing into the air space, and the agreement is therefore less satisfactory. On the other hand, the sheeting is heated at the top measuring point  $\theta_3$  by the stream of air and the measured temperature at this point is therefore somewhat higher than the extreme surface temperature.

FIG. 16 Temperature variations in a horizontal metal deck with an insulation of 100 mm cellular plastic on an extremely warm and sunny day. The indoor temperature  $\theta_i$  has been assumed constant at  $+20^\circ\text{C}$  while the modified sol-air temperature  $\theta_e^*$  has been assumed to have a periodical diurnal variation according to a time series calculated by means of Equations (7a-d). The external surface has been assumed to be dark with  $a = 9.0$  and the air temperature  $\theta_\ell$  is that relating to one of the absolutely hottest days in Stockholm over the past ten years. The values of the solar radiation intensity  $I$  and the external surface coefficient of heat transfer  $\alpha_y$  have been chosen according to the previous discussion.

The temperature variations over the day are very large

and occur very rapidly in this structure which has practically no heat capacity. Since  $\theta_y \approx \theta_e^x$ , the total range of temperature for the roof surface is about  $50^\circ\text{C}$  on this day. For a light-coloured roof surface with  $a = 0.5$ , the temperature range is about  $35^\circ\text{C}$ .

FIG. 17 Calculated extreme temperatures for an insulated metal deck in the summer and winter. The total temperature range for the external surface (dark roof covering with an absorption factor  $a = 0.9$ ) is about  $95^\circ\text{C}$ . With a light-coloured roof surface with the absorption factor  $a = 0.5$ , the highest temperature  $\theta_y^{\max}$  is about  $15^\circ\text{C}$  lower and the total temperature range is reduced to about  $80^\circ\text{C}$ .

FIG. 18 If the metal deck in FIG. 5 is provided with a layer of gravel on the top, the surface temperature is considerably lower and the temperature variations in the structure smaller. This is mainly due to the fact that gravel has a lower absorption factor with respect to short-wave radiation (assumed at  $a = 0.5$ ). The heat capacity of the gravel also has some influence. Owing to the presence of the gravel, the extreme surface temperature is lowered by about  $20^\circ\text{C}$ .

FIG. 19 The highest and lowest temperatures on a warm and sunny summer day for a roof of 200 mm concrete with an external thermal insulation of 100 mm cellular plastic. The waterproofing layer is placed both conventionally on top of the thermal insulation (a and c) and also according to the built-up roofing, i.e. the waterproofing is laid directly on the concrete and is protected by the thermal insulation (b and d). The influence of different absorption factors with respect to short-wave radiation,  $a = 0.9$  in the two upper figures and  $a = 0.5$  in the two bottom ones, is also shown.

The temperature variation in the waterproofing layer is about  $50^\circ\text{C}$  (about  $34^\circ\text{C}$ ) over the day when it is

placed in the conventional way, but only about  $1.5^{\circ}\text{C}$  (about  $1^{\circ}\text{C}$ ) when it is protected by the insulation. The waterproofing layer is thus very well protected in a built up roofing from stresses due to variations in the temperature of the roof surface.

FIG. 20 Problems connected with non-stationary heat transfer are being studied in a test building outside Stockholm. The building has a frame of cellular concrete. The outside walls consists of cellular concrete elements 2.7 m tall and 250 mm thick. They are clad on the outside with corrugated aluminium sheeting divided into vertical sections of 2.5 m width which have different surface finishes. There is an air space about 15 mm wide between the sheeting and the cellular concrete.

FIG. 21 Drying of moisture in a cellular concrete wall of south-westerly orientation clad on the outside with ivory-coloured sheeting (absorption factor with respect to short-wave radiation about 0.35).

FIG. 22 Drying of moisture in a cellular concrete wall of south-westerly orientation clad on the outside with ochre-coloured sheeting (absorption factor with respect to short-wave radiation about 0.9). Owing to the greater absorption by the sheeting of short-wave radiation, incident drying is more rapid than in the case of the ivory-coloured sheeting.

FIG. 23 Calculated extreme surface temperatures along a horizontal roof surface and wall surfaces oriented towards the four main points of the compass on a warm, sunny and clear summer day without wind (latitude =  $60^{\circ}\text{N}$ ). The surfaces are dark (absorption factor  $a = 0.9$ ). The difference between the highest and lowest surface temperature, on a summer day, is about  $60^{\circ}\text{C}$  for the roof surface and about  $65^{\circ}$  for the wall surfaces.

FIG. 24 Calculated extreme surface temperatures along a horizontal roof surface and wall surfaces oriented towards the four main points of the compass on a cold, sunny and clear winter day without wind (latitude =  $60^{\circ}\text{N}$ ). The surfaces are dark (absorption factor  $a = 0.9$ ). The difference between the highest and lowest temperature, on a winter day, is about  $23^{\circ}\text{C}$  for the roof surface and about  $60^{\circ}\text{C}$  on the wall surface towards the south. The corresponding difference is about  $30^{\circ}\text{C}$  on wall surfaces towards the east and west and about  $12^{\circ}\text{C}$  on the wall surface towards the north.



**R6: 1973**

**Denna rapport avser anslag C 575 från Statens råd för byggnadsforskning till institutionen för byggnadsteknik, KTH, Stockholm. Försäljningsintäkterna tillfaller fonden för byggnadsforskning.**

**Distribution: Svensk Byggtjänst, Box 1403, 111 84 Stockholm  
Grupp: konstruktion**

**Pris: 16 kronor**