#4614

De temperatuurfactor van thermische bruggen

The temperature factor of thermal bridges

Ir. W. J. Lichtveld*

Ing. W. J. Lichtveld

Inleiding

De temperatuurfactor van een constructie is niet langer geheimtaal van bouwfysici. De binnenoppervlaktetemperatuurfactor van klimaatscheidende constructies zal met het van kracht worden van het BOUWBESLUIT, naar verwachting met ingang van 1991, een kwaliteitsaspect zijn waar elke bouwkundige mee te maken krijgt. En naar verwachting niet alleen de bouwkundige maar ook ontwerpers van klimatiseringsinstallaties. Weliswaar richt het Bouwbesluit zich in eerste instantie op nieuw te bouwen woningen, maar het is te voorzien dat ook in de utiliteitsbouw de temperatuurfactor een gebruikelijk onderdeel gaat vormen van de technische specificaties. Wanneer men een begrip in het maatschappelijk verkeer wil kunnen gebruiken zal men het goed moeten definieren. In dit artikel wordt ingegaan op één van de achtergronden van de norm [1] die hiertoe gaat dienen, namelijk de overgangsweerstand aan het binnenoppervlak.

Samenvatting

In het ontwerp norm NEN 2778 'Vochtwering in gebouwen; bepalingsmethoden' zal een voorschrift worden gegeven voor de bepaling van de temperatuurfactor aan de binnenzijde van een constructie. Vaste toe te passen overgangsweerstanden vormen een onderdeel hiervan. De toe te passen waarden wijken af van de waarden volgens NEN 1068. In dit artikel wordt ingegaan op de achtergronden hiervan.

Summary

In the Dutch pre-standard NEN 2778 'Moisture control in buildings – Determination methods', rates are given for the calculation of the temperature factor at the inner surface of a construction. Prescribed values of the surface heat transfer resistances are part of the standard. These values differ from those used in NEN 1068. In this article the background to this difference is discussed.

De aanleiding

Vochtproblemen en schimmelvorming in woningen komen veelvuldig voor. Het is geen typisch Nederlands verschijnsel, het is een wijd verbreid probleem dat zo oud is als de bouw. De oorzaak ligt deels in de bouwkundige kwaliteit en deels in het klimaat binnen het gebouw. Wanneer de klimaatregeling grotendeels wordt bepaald door bewoners, is er een scheiding van verantwoordelijkheden nodig. Dit gebeurt door een minimale kwaliteit van thermische bruggen vast te leggen. Deze minimale kwaliteit dient uiteraard voldoende vrijheid aan bewoners te laten. Het kwaliteitscriterium moet gestoeld zijn op een opvatting over normaal woongedrag [2]. Hoe die opvatting luidt is voorlopig nog een kwestie van nationale voorkeur. De wijze waarop de thermische kwaliteit van thermische bruggen wordt berekend leent zich echter voor internationale normalisatie. Op dit moment is niet alleen de Nederlandse ontwerpnorm (hoofdstuk 8 van NEN 2778) opgesteld maar begint ook een europese norm (CEN TC89/WG1) contouren te krijgen. Hoewel er enig faseverschil tussen beide ontwerpen optreedt – de europese norm moet in 1992 gereed zijn en de nederlandse norm reeds eind 1990 – bestaat er tussen beide ontwerpen een wisselwerking. Naast deze ontwikkelingen op het normalisatiefront is er nog een andere vermeldenswaard. Sinds enkele jaren werken zes europese landen samen binnen de commissie ANNEX 14 van de International Energy Agency, met voor Nederland NOVEM als coördinator en financier. Dit werk zal resulteren in twee samenvattende rapporten waarin de huidige stand van kennis en opvattingen over vocht- en schimmelproblemen worden gegeven.

De temperatuurfactor

De binnenoppervlaktetemperatuurfactor geeft de verhouding van het verschil tussen binnenoppervlaktetemperatuur T_{si} en de buitentemperatuur T_e enerzijds, en de binnentemperatuur T_i en de buitentemperatuur T_e anderzijds:

$$f = \frac{(T_{si} - T_e)}{(T_i - T_e)}$$

Een alternatieve uitdrukking is de door ISO gebruikte 'temperature difference ratio' Z, waarvoor geldt $Z = 1 - f$.
Om tot een eenduidige definitie te komen zijn afspraken nodig onder welke voorwaarden f wordt berekend en wat men onder T_i en T_e verstaat. Uit metingen in de praktijk is bekend dat bouwkundige constructies zich niet-stationair gedragen [3]. Dit maakt het meten van de temperatuurfactor een tijdrovende zaak, terwijl ook dan nog het gevonden getal een onnauwkeurigheid heeft van ongeveer 5% (zie figuur 1 en 2). Bovendien kan men in het ontwerpstadium niets meten. Daarom is gekozen voor een **berekening** onder stationaire omstandigheden. De keuze voor T_e ligt dan voor de hand. Men neemt hiervoor de over één maand gemiddelde temperatuur van de buitenlucht.

De binnentemperatuur

Meer discussie vond plaats over de keuze van de binnentemperatuur T_i. Bij

* Lichtveld Buis en Partners b.v., Utrecht.

berekening van warmteverliezen bestaat voorkeur voor de comforttemperatuur. De internationaal best aanvaarde definitie is het gemiddelde van de stralingstemperatuur T_r en de luchttemperatuur T_a, de 'dry resultant temperature'.

$$T_{rs} = \frac{(T_r + T_a)}{2}$$

Voor de berekening van condensatie- en schimmelsrisico's heeft deze uitdrukking echter bezwaren. De relatieve vochtigheid aan een binnenoppervlak speelt bij vochtprobleem een dermate grote rol dat dit begrip niet gemist kan worden. De relatieve vochtigheid heeft betrekking op de luchttemperatuur. Er is dan ook gekozen voor de luchttemperatuur T_a. Daarmee zijn we er nog niet. De luchttemperatuur in een vertrek is immers niet homogeen. Voor het berekenen van warmteverliezen uit een vertrek of uit een gebouw als geheel mag een inhomogene temperatuurverdeling binnen een ruimte verwaarloosd worden, maar voor het berekenen van oppervlaktetemperaturen op een specifiek detail zou zo'n vereenvoudiging tot forse fouten leiden. Daarom wordt voor de berekening van de temperatuurfactor uitgegaan van de binnenluchttemperatuur op 1,7 meter boven de vloer in het midden van de ruimte $T_{a,ref}$.

De warmte-overgangsweerstanden

Het gebruik van een vaste referentietemperatuur met behoud van een grote rekennauwkeurigheid heeft vergaande gevolgen. Het duidelijkst is dit wanneer we de definitie van *f* toepassen op en vlakke wand:

$$f_{Ri} = \frac{(T_{si} - T_e)}{(T_{a,ref} - T_e)} = \frac{R_{eq}}{(R_{eq} + R_i)}$$

Hierin is:

R_{eq} de som van de schijnbare warmteweerstand van de constructie en de warmte-overgangsweerstand aan de buitenzijde;

R_i de warmte-overgangsweerstand aan de binnenzijde.

Wanneer de getalswaarde van R_i onbekend is kan de temperatuurfactor *f* niet worden berekend. Daarom is de correcte schrijfwijze f_{Ri}. Maar hoe groot is R_i? De internationaal gebruikelijke waarde van R_i bij warmteverliesberekeningen bedraagt $R_i = 0{,}13$ m²K/W met kleine verschillen afhankelijk van de richting van de warmtestroom. Deze waarden zijn min of meer aanvaardbaar wanneer men uitgaat van de 'dry resultant temperature' en in aanmerking neemt dat

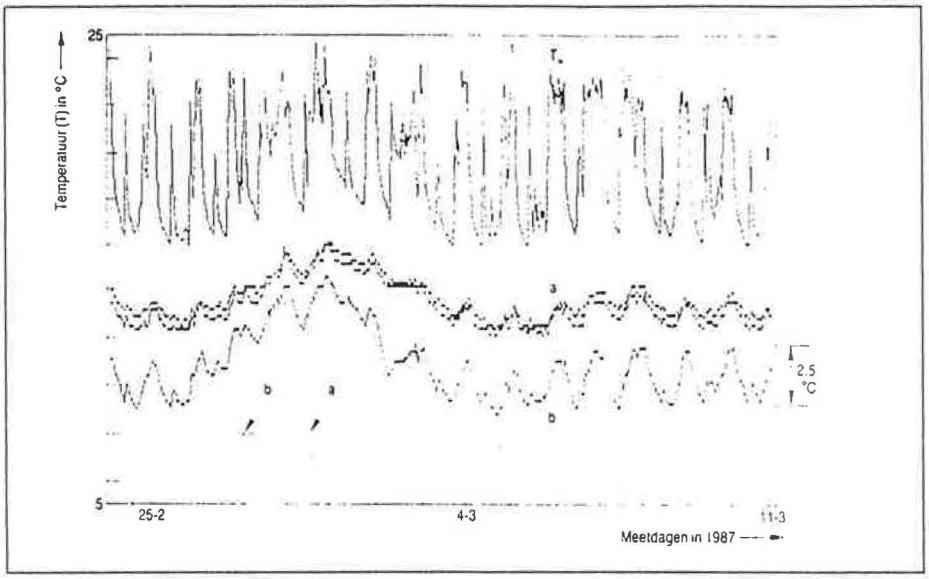

Fig. 1 Temperatuurvariaties. Voorbeeld van temperatuurvariaties in de binnenlucht (T_{bl}) en aan het binnenoppervlak van een funderingskoudebrug ($T_{0,1}$), gemeten op plinthoogte aan de kopgevel (a) en in de benedenhoek achter een gordijn (b)

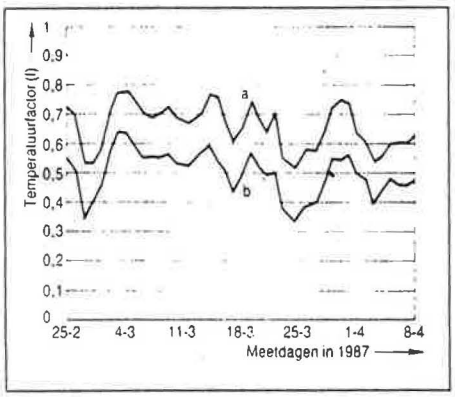

Fig. 2 Temperatuurfactor. De gemeten temperatuurfactor (f) voor (a) en (b) uitgezet. De sterke variatie toont aan dat f beter berekend dan gemeten kan worden

een soms wat te lage waarde voor R_i tot een veilige benadering van de berekende warmteverliezen leidt. Zowel theoretisch als experimenteel blijkt echter dat deze waarden te laag en soms veel te laag zijn om tot een correcte berekening van de binnenoppervlaktetemperatuur te komen. Jarenlang werden met deze onjuiste waarden te hoge oppervlaktetemperaturen berekend en verkeerde conclusies getrokken bij de beoordeling van condensatierisico's. Wij zullen dit hieronder aantonen.

Convectieve en radiatieve warmtestromen

Op het binnenoppervlak van een thermische brug komen twee warmtestromen samen. De convectieve ontstaat door het temperatuurverschil met de aangrenzende luchtlaag en de radiatieve is de netto som van de stralingsuitwisselingen met alle overige binnenoppervlakken waarmee een zichtlijn bestaat. De oppervlaktetemperatuur stelt zich in op basis van:

$$q_{tr} = q_c + q_r \ (W/(m^2.K)). \qquad (1)$$

De doorgelaten warmtestroomdichtheid q_{tr} wordt uiteraard bepaald door de warmteweerstand R_{eq} van de constructie (inclusief R_e), maar eveneens door de toegevoerde warmtestroomdichtheden uit de ruimte. Vanuit de ruimte gezien worden de warmtestromen eveneens bepaald door de grootte van R_{eq} van een constructiedetail. Er is dus sprake van een wisselwerking tussen vertrek en thermische brug. Een thermische brug kan worden voorgesteld als een netwerk van warmteweerstanden met knooppunten. Met behulp van de eindige elementmethode kunnen de knooppuntstemperaturen worden berekend, mits de waarde van R_i bekend is. Een vertrek kan worden voorgesteld als een netwerk van warmteweerstanden, eveneens met knooppunten. Ook hiervoor bestaan numerieke oplossingsmethoden, mits van alle oppervlakken, dus ook die van de thermische brug, R_{eq} bekend is. Het zou dus voor de hand liggen om beide netwerken te integreren: dat van het kamermodel en dat van thermisch brugmodel. Uit vergelijking van de netwerken van beide modellen blijkt snel dat dit op grote problemen stuit omdat de structuren verschillen (figuur 3). Geïntegreerde modellen met veel elementen bestaan dan ook niet.

De enige overblijvende strategie is dan om beide modellen elk voor zich te berekenen en vervolgens de resultaten aan elkaar gelijk te stellen (figuur 4).

Als koppelingsconditie moet voldaan worden aan (1) wat neerkomt op een

iteratieve aanpassing van beide modellen met de voorwaarde dat voor beide zowel R_{eq} als R_i aan elkaar gelijk zijn. Op een hierbij impliciet aangenomen veronderstelling namelijk dat de gezochte waarde R_i slechts weinig verloopt over het oppervlak van een beschouwd detail, komen wij nog terug.

Vergelijking (1) luidt in uitgeschreven vorm:

$$q_{tr} = h_i(t_{a,ref} - T_{si}) = h_c(T_{a,y} - T_{si}) + h_r(T_r - T_{si})$$

zodat:

$$h_i = \frac{1}{R_i} = \frac{h_c(T_{a,y} - T_{si}) + h_r(T_r - T_{si})}{(T_{a,ref} - T_{si})} \quad (2)$$

waarin:

- h_i de rekenwaarde voor de warmteovergangscoëfficiënt;
- q_{tr} de som van de convectieve en radiatieve warmtestroomdichtheden;
- $T_{a,ref}$ de luchttemperatuur op 1,7 meter boven de vloer;
- $T_{a,y}$ de lokale luchttemperatuur op y meter boven de vloer;
- T_r de gemiddelde stralingstemperatuur van de binnenoppervlakken;
- T_{si} de oppervlaktetemperatuur op het beschouwde oppervlak op y meter boven de vloer;
- h_c de convectieve warmte-overgangscoëfficiënt ($h_c = 2{,}5$ m².K/W)
- h_r de radiatieve warmte-overgangscoëfficiënt met:
  $h_r = 5{,}0$ m².K/W voor een vlak (zichthoek 4 octanten)
  $h_r = 3{,}0$ m².K/W voor een tweevlakshoek (zichthoek 2 octanten)
  $h_r = 2{,}0$ m².K/W voor een drievlakshoek (zichthoek 1 octant).
  De waarden voor de hoeken gelden slechts als de samenstellende vlakken aan de buitenlucht of de aarde grenzen.

Voor (1) kan worden geschreven:

$$(T_{a,ref} - T_{si}) = \frac{R_i(T_{a,ref} - T_e)}{(R_{eq} + R_i)} = \frac{T_{a,ref} - T_e}{(h_i.R_{eq} + 1)} \quad (3)$$

We voeren de volgende dimensieloze temperatuurquotiënten in:

$$\frac{(T_{ay} - T_e)}{(T_{a,ref} - T_e)} = \tau_{ay} \quad (4)$$

$$\frac{(T_r - T_e)}{(T_{a,ref} - T_e)} = \tau_r \,. \quad (5)$$

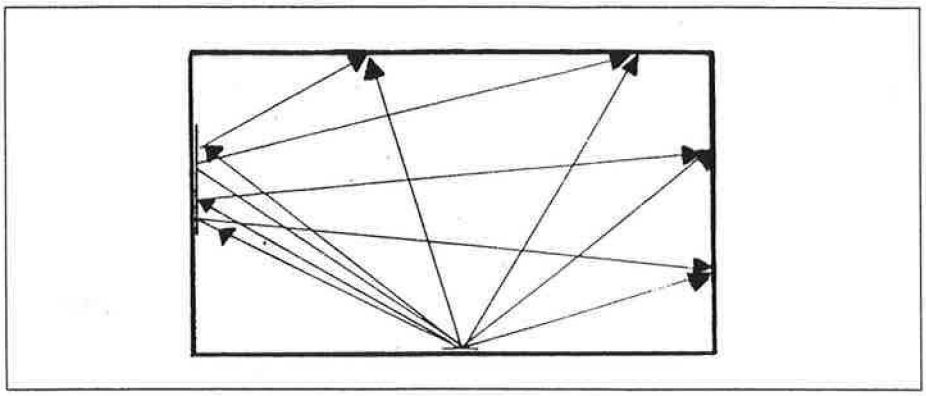

Fig. 3 Het netwerk van een kamermodel bestaat uit elkaar kruisende weerstanden. Dat van een koudebrugmodel bestaat uit een normaal raster

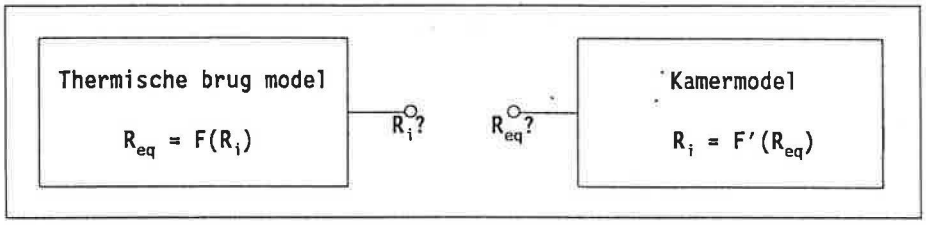

Fig. 4 Om beide modellen op elkaar aan te kunnen sluiten moeten zowel R_i als R_{eq} aan elkaar gelijk zijn. Daarom moet door herhaling van berekening $R_{eq}=F(R_i)$ voor het thermische brugmodel en $R_i=F'(R_{eq})$ voor het kamermodel worden bepaald

$$\frac{(T_{si} - T_e)}{(T_{a,ref} - T_e)} = f_{Ri} \quad (1)$$

Na het invullen van (4) en (5) in (3) of (1), ontstaan drie gelijkwaardige betrekkingen:

$$R_i = \frac{(1 + p.R_{eq})}{(h_c + h_r - p)} \quad (6)$$

$$R_i = \frac{(1 - f_{Ri})}{(1 - f_{Ri})\,(h_c + h_r) - p} \quad (7)$$

$$f_{Ri} = \frac{R_{eq}\,(h_c + h_r - p)}{\{1 + R_{eq}\,(h_c + h_r)\}} \quad (8)$$

met de ruimteparameter:

$$p = h_c\,(1 - \tau_{ay}) + h_r\,(1 - \tau_r) \quad (9)$$

De ruimteparameter heeft geen fysische maar een formele betekenis. Alle karakteristieke thermische grootheden zijn er in opgenomen.
Hiermee wordt bereikt dat de karakteristieke waarde van de thermische brug R_{eq} gescheiden wordt van de thermische eigenschappen van de ruimte als geheel. Aangezien de ruimteparameter p vrijwel geheel onafhankelijk is van de waarden van R_{eq} ter plaatse van de thermische brug — de invloed van een relatief klein oppervlak met een lagere oppervlaktetemperatuur is op de gemiddelde stralingstemperatuur van de ruimte immers onbetekenend — zijn in de formules (6) tot (9) de karakteristieke waarde R_{eq} van de thermische brug gescheiden. Beide modellen zijn dan te koppelen.

De ruimteparameter

De waarde van R_i in afhankelijkheid van de plaats op het binnenoppervlak kan worden bepaald met behulp van een kamermodel waarin het binnenoppervlak in vele kleine oppervlakken is verdeeld en een bepaalde verdeling van de binnenluchttemperatuur wordt aangenomen. Door middel van een iteratieve berekening worden van plaats tot plaats de geldende warmteovergangsweerstanden R_i berekend. Door op een bepaalde plaats een thermische brug met een onbekende R_{eq} te veronderstellen kan ter plaatse van de thermische brug R_i worden bepaald als functie van R_{eq} door de iteratieve berekening met het kamermodel te herhalen voor verschillende waarden van R_{eq}. Er ontstaan dan vrijwel rechte lijnen volgens figuur 5.
Op formele gronden kan aan deze lijnen de parameter p volgens formule (6) worden toegekend. Indien deze overeenkomst voldoende nauwkeurig is kunnen de formules (6) tot en met (9) worden toegepast en kan er worden afgezien van gedetailleerde berekeningen met het kamermodel. Dit is natuurlijk een belangrijke vereenvoudiging. Toetsing van deze veronderstelling vormde een onderdeel van een door NOVEM opgedragen onderzoek ten be-

hoeve van IEA annex 14 [4]. Binnen de nagestreefde nauwkeurigheid in de bepaling van R, bleek dit inderdaad het geval te zijn. Om de formule (9) te kunnen gebruiken moeten de waarden van τ_{ay} en τ_r bekend zijn. Standaert [5] komt op grond van literatuur en berekeningen tot de volgende uitdrukkingen:

$$\tau_{ay} = 1 + 0{,}2\ U.p_c.\ (y - 1{,}7) \qquad (10)$$

$$\tau_r = \frac{0{,}6\ h_c}{\{0{,}6h_c + (p_c - 0{,}4)\ U\}} \qquad (11)$$

met:

U: de gemiddelde U-waarde van de ruimte volgens NEN 1068; (W/(m².K)).
y: de hoogte van het beschouwde oppervlak boven de vloer (m);
p_c: de verhouding tussen het convectief afgegeven vermogen en het totaal afgegeven vermogen van het verwarmingssysteem;
luchtverwarming $p_c = 1$
convectoren, afgeschermde radiatoren $p_c = 0{,}9$
onafgeschermde radiatoren geen meubels $p_c = 0{,}6$
vloerverwarming $p_c = 0{,}4$
de constanten zijn door correlatieberekeningen vastgesteld.

Invullen van (10) en (11) in (9) met h_c= 2,5 W/(m².K) geeft voor de ruimteparameter:

$$p = U.\ \left\{-0{,}5p_c.\ (y - 1{,}7) + \frac{(p_c - 0{,}4).h_r}{1{,}5 + (p_c - 0{,}4)U}\right\} \qquad (12)$$

Grafische presentatie

De binnenoppervlaktetemperatuurfactor van een thermische brug kan men op numerieke wijze berekenen met een daardoor geschikt computerprogramma. Omdat we nog niet weten welke waarde voor R_i moet worden toegepast is deze berekening achtereenvolgens voor enkele verschillende waarden van R_i uit te voeren. Er ontstaan dan grafieken volgens figuur 6 waarin f_{Ri} een functie is van R_i.
Met behulp van formule (1) is voor dezelfde constructie een grafiek te maken waarbij R_{eq} een functie is van R_i. De thermische brug is dan met dezelfde variabelen vastgelegd als formule (6). Er ontstaan dan nagenoeg horizontale lijnen, zoals fig. 5 toont. In figuur 5 zijn eveneens de rekenresultaten gegeven van de berekening met het ruimtemodel. Deze lijnen verlopen steiler. Wan-

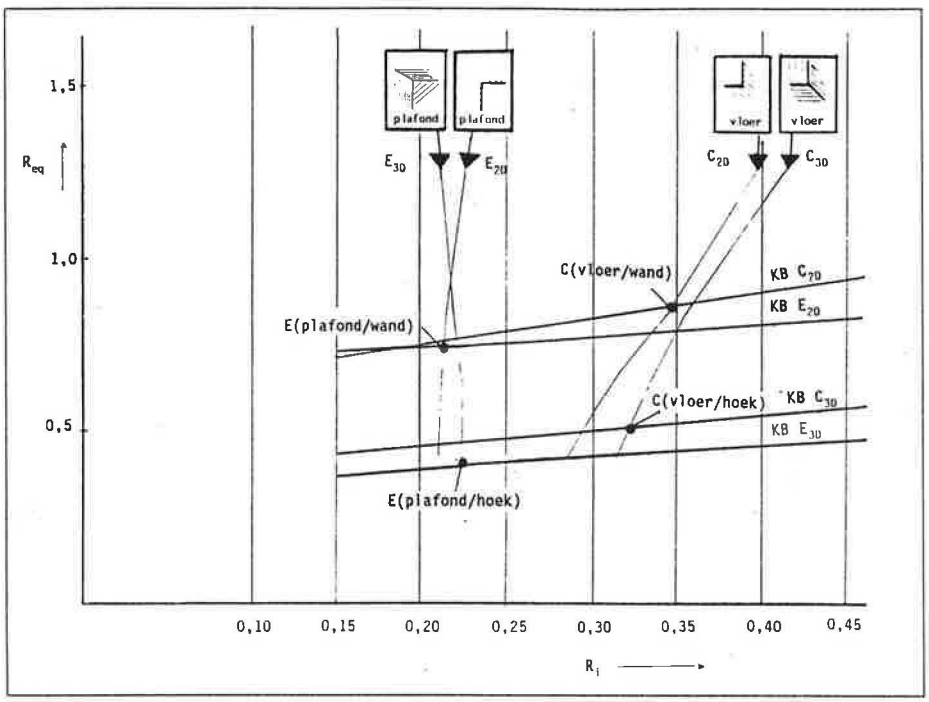

Fig. 5 Berekeningen met een kamermodel geven op de aangegeven plaatsen de p-lijnen E_{3d}, E_{2d}, C_{2d}, C_{3d}. Berekeningen volgens figuur 6 van de thermische brug geven de TB-lijnen. Hieruit volgen de snijpunten voor gelijke R_i en R_{eq}.

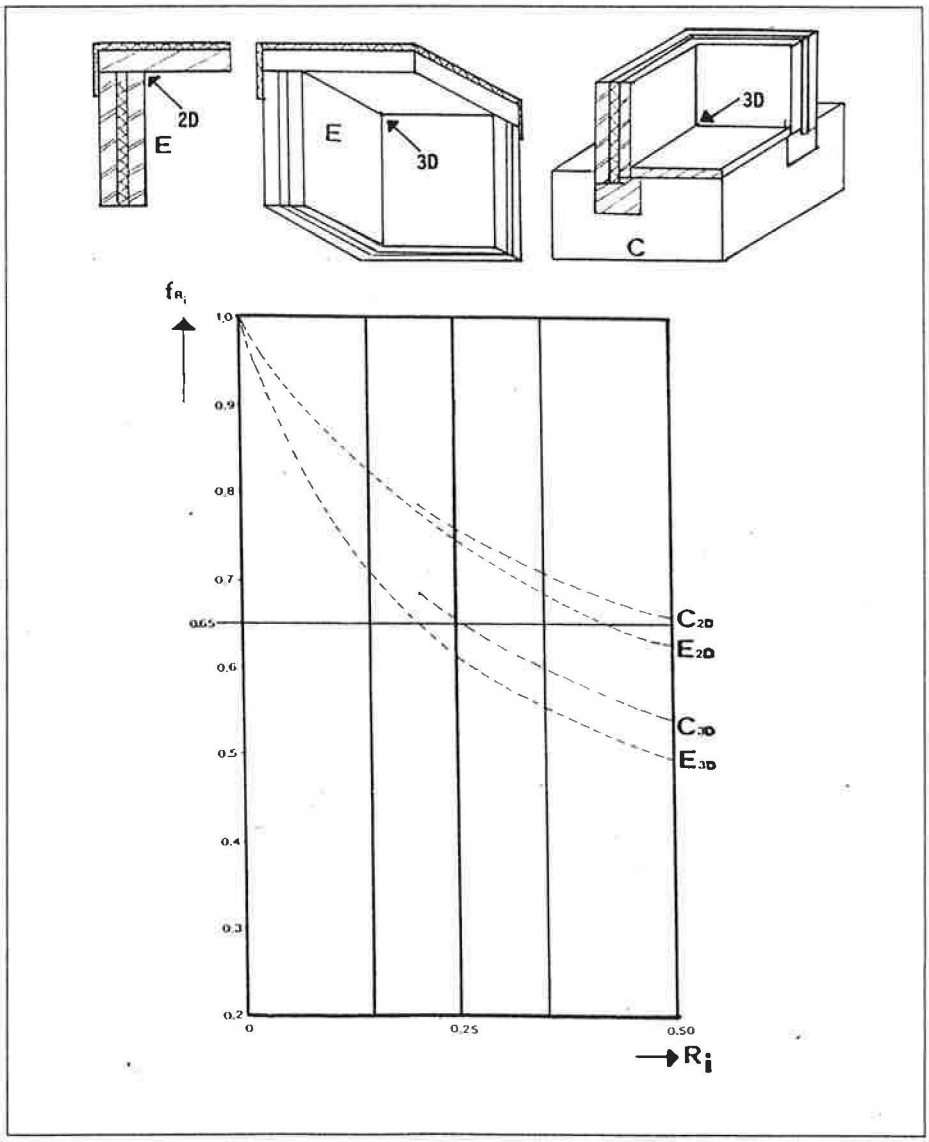

Fig. 6 Door f van een thermische brug voor enkele waarden van R_i te berekenen ontstaat de grafiek. Met $R_{eq} = f.R_i/(1-f)$ zijn de TB-lijnen van figuur 5 te tekenen

ver ze enigszins gestyleerd worden, voldoen deze lijnen aan formule (6). De ruimteparameter p is een maat voor de helling p = 0 betekent een vertikale lijn. Ter plaatse van het snijpunt tussen de grafiek van de thermische brug en de p-lijn wordt voldaan aan de koppelingsvoorwaarde tussen het 'ruimtemodel' en het 'thermische brug model', omdat dan in beide numerieke berekeningen dezelfde waarden voor R_i en voor R_{eq} gelden. Daarmee heeft men dus de ter plaatse geldende waarde van R_i gevonden. Het blijkt dat voor de gewenste nauwkeurigheid van R_i afgezien kan worden van een computerberekening van het ruimtemodel en volstaan kan worden met toepassing van formule (6), waarin voor de ruimteparameter formule (12) wordt gebruikt.
De grafische presentatie heeft als belangrijk voordeel dat men in één oogopslag ziet welke consequentie wijziging van parameters heeft voor de waarde van R_i. We gaan aan de hand van een voorbeeld na of er algemene conclusies over de waarden van R_i zijn te trekken.

Een voorbeeld
We nemen het tamelijk ongunstige voorbeeld van een hoekvertrek op de begane grond met een plat dak. De hoogte van het vertrek is 2,70 m. Drie van de zes vlakken van het vertrek grenzen dan aan de buitenlucht en één vlak grenst aan de bodem. Alle vlakken voldoen aan R_c = 2,5 m².K/W en er is dubbel glas toegepast. We vinden voor het vertrek U = 0,45 W/(m².K). In het vertrek staan radiatoren die door meubilair enigszins zijn afgeschermd (p_c = 0,8).
Met (10) vinden we τ_{ay} = 1 + 0,072 (y − 1,7). Bij een binnenluchttemperatuur van 20°C en een buitenluchttemperatuur van 0°C, is de luchttemperatuur bij de vloer dan 17,5°C en de luchttemperatuur bij het plafond 21,4°C.
Met (11) vinden we τ_r = 0,89. De gemiddelde stralingstemperatuur in het vertrek bedraagt dus onder de vermelde condities 17,8°C.

De ruimteparameter p is volgens (12):
- op vloerhoogte (y=0) p = 0,306 + 0,107 h_r
- op 1,7 m hoogte p = 0,107 h_r
- op plafondhoogte (y=2,7) p = −0,18 + 0,107 h_r

We vinden dus de volgende waarden voor p:

Locatie	*vloer*	*gevel*	*plafond*
hoogte y (m)	0	1,70	2,70
eenvlak (h_r=5)	0,84	0,54	0,36
tweevlakshoek (h_r=3)	0,62	0,32	0,14
drievlakshoek (h_r=2)	0,52	–	0,03

In de figuren 7, 8 en 9 zijn de resultaten uitgezet tesamen met enkele representatieve waarden voor R_{eq} van vlakken, tweevlakshoeken en driekvlakshoeken (zie figuur 5).

In deze figuren is tevens een schuine lijn vanuit de oorsprong getekend met daarbij vermeld f_{Ri} = 0,65. Deze lijn geeft de minimaal vereiste waarde voor de binnenoppervlaktetemperatuurfactor volgens het Bouwbesluit 1990. Liggen de snijpunten tussen de lijn van de thermische brug en de relevante waarde van p boven de p-lijn dan voldoen de thermische bruggen aan de eis.

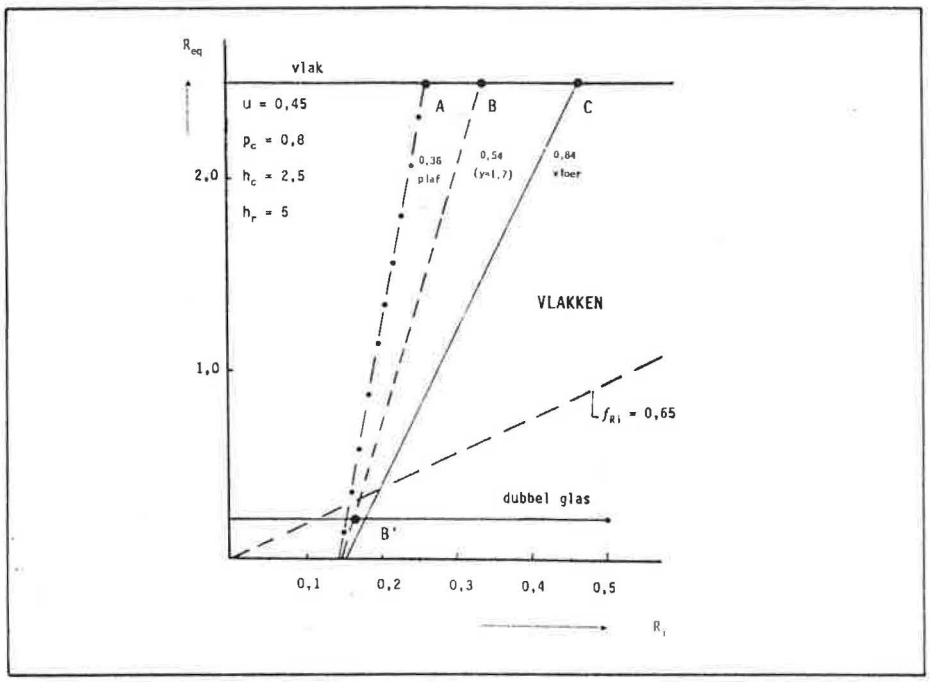

Fig. 7 Berekende f_{Ri} en f (NEN 2778) voor vlakken:

A (plafond)	***R_i= 0,27***	***f_{Ri}= 0,90***	***$f_{0,25}$= 0,91***
B (midden wand)	***R_i= 0,34***	***f_{Ri}= 0,88***	***$f_{0,25}$= 0,91***
B' (midden glas)	***R_i= 0,16***	***f_{Ri}= 0,57***	
C (vloer)	***R_i= 0,47***	***f_{Ri}= 0,84***	***$f_{0,50}$= 0,83***

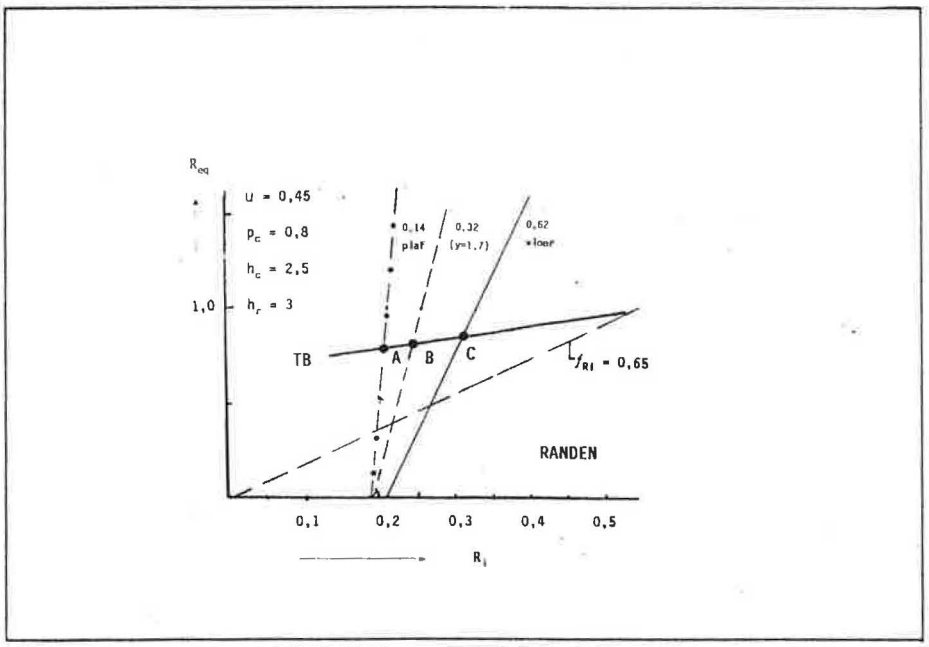

Fig. 8 Berekende R_i, f_{Ri}, en f (NEN 2778) voor tweevlakshoeken:

A (dak/gevel)	***R_i= 0,21***	***f_{Ri}= 0,79***	***$f_{0,25}$= 0,76***
B (gevel/gevel)	***R_i= 0,24***	***f_{Ri}= 0,77***	***$f_{0,25}$= 0,76***
C (vloer/gevel)	***R_i= 0,31***	***f_{Ri}= 0,73***	***$f_{0,50}$= 0,66***

Men kan ook de snijpunten tussen de lijn f_{Ri} = 0,65 en de relevante p-lijn bepalen. Dit is de grafische weergave van formule (7). De berekende f_{Ri}-waarden volgens formule (8) kan men eveneens aan de figuren ontlenen omdat het snijpunt zowel R_{eq} als R_i vastlegt.

De bovenste helft van een vertrek

We beperken ons eerst tot de bovenste helft van het vertrek. In de figuren 7, 8 en 9 zijn de snijpunten die R_i vastleggen, aangegeven. Op plafondhoogte zijn deze punten aangegeven met A.

We zien dat zowel in figuur 7, waar het gaat om het plafond zelf als in figuur 8 (de tweevlakshoek tussen gevel en dak) en figuur 9 (de drievlakshoek tussen twee gevels en het dak) de waarden van R_i tussen 0,20 en 0,25 liggen. Uit de figuren is bovendien te concluderen dat wijzigingen in de waarde van de ruimteconstante p maar weinig invloed hebben op de waarde van R_i. Het isolatieniveau van de ruimte (U), het verwarmingssysteem (p_c) en van de kwaliteit van de thermische brug (R_{eq}) hebben dus maar weinig invloed op R_i bij het plafond. Men kan in dat geval zonder groot verlies aan nauwkeurigheid de vaste waarde R_i = 0,25 m².K/W toepassen.

Ook de tweevlakshoek tussen twee gevels op een hoogte van 1,7 m boven de vloer (punt B in figuur 8) voldoet hier nog aan. Slechts punt B in figuur 7, dat een punt weergeeft op ongeveer halve hoogte aan de binnenzijde van een goed geïsoleerde gevel toont een duidelijk hogere waarde. Door ook in dit gedeelte van een wand uit te gaan van R_i = 0,25 m².K/W komen we tot een te hoge temperatuurfactor. Deze temperatuurfactor is echter ook bij toepassing van de in dit voorbeeld gevonden waarde R_i = 0,34 m².K/W nog dusdanig hoog dat uit het oogpunt van condensatierisico geen bezwaar bestaat tegen een wat te gunstige waardering van de temperatuurfactor. Op grond van deze bevindingen is in ontwerp NEN 2778 gekozen voor een vaste waarde R_i= 0,25 m².K/W voor alle oppervlakken boven y= 1,5 m. Hierdoor kan de temperatuurfactor van thermische bruggen voldoende realistisch worden berekend zonder rekening te hoeven houden met de specifieke thermische eigenschappen van de ruimte.

In figuur 7 (punt B') is eveneens te zien dat voor dubbel glas vrijwel de 'klassieke' waarde voor R_i geldt, namelijk R_i = 0,16. In NEN 2778 wordt voor beglazingen geen R_i–waarde gegeven omdat het Bouwbesluit geen eisen stelt aan beglazingen en kozijnen.

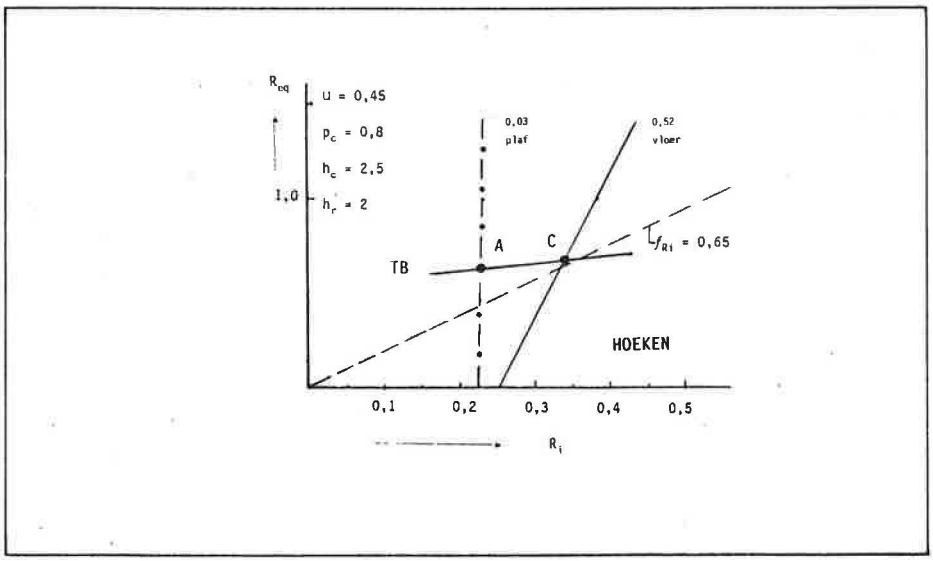

Fig. 9 Berekende R_i, f_{Ri}, en f (NEN 2778) voor drievlakshoeken:

A (dak/gevel/gevel)	***R_i= 0,23***	***f_{Ri}= 0,73***	***$f_{0,25}$= 0,72***
C (vloer/gevel/gevel)	***R_i= 0,34***	***f_{Ri}= 0,67***	***$f_{0,25}$= 0,72***

De onderste helft van de ruimte

Dichter bij de vloer is de situatie ingewikkelder. Hiervoor moeten we in de figuren 7, 8 en 9 kijken naar de punten C. Terwijl bij het plafond de relatief hoge luchttemperatuur compensatie bood voor het effect van de stralingsuitwisseling, is bij de vloer de luchttemperatuur juist relatief laag. Dit leidt tot hogere waarden voor p en daarmee ook tot hogere waarden van R_i.

Ontwerp NEN 2778 schrijft voor alle binnenoppervlakken beneden y=1,5 m met een paar uitzonderingen de waarde R_i = 0,50 m².K/W voor.

Hoewel deze waarde zeer hoog is blijkt uit figuur 7 dat het voor de vloer een realistische waarde is. Men moet hierbij goed voor ogen houden dat R_i een rekengrootheid is die voortvloeit uit het rekenen met een luchttemperatuur op 1,7 m boven de vloer, dat wil zeggen een luchttemperatuur die bij de vloer niet wordt bereikt.

Bij de rand tussen begane grond vloer en gevel (figuur 8, punt C), een favoriete plaats voor schimmelproblemen, leidt deze waarde tot een te ongunstige beoordeling van de funderings koudebrug. Dit blijkt ook uit metingen [3]. De waarde R_i = 0,31 in figuur 8 komt goed overeen met onze experimentele bevindingen.

Dat desondanks in ontwerp-NEN 2778 een hogere waarde voor R_i wordt aangehouden houdt verband met mogelijke thermische afscherming door tegen de wand geplaatst meubilair. De ervaring leert dat met name achter kasten een verhoogde kans op schimmelproblemen bestaat [3]. Het voorschrift om in dit gebied R_i = 0,50 toe te passen houdt met deze vaak onvermijdelijke thermische afscherming rekening.

Hoe zit het met de drievlakshoeken (figuur 9) bij funderingen?

De punten C in de figuren 8 en 9, laten zien dat er in tegenstelling tot de gangbare mening slechts weinig verschil bestaat tussen de R_i-waarden bij een vloerrand en die in een driedimensionale hoek. De in ons voorbeeld gevonden waarden R_i = 0,30 tot 0,35 komen overeen met de door ons experimenteel vastgestelde waarden [6]. Aangezien ook in drievlakshoeken thermische afscherming door meubilair of gordijnen mogelijk is zou men ook voor deze benedenhoek R_i = 0,50 moeten voorschrijven.

Uit toetsing van thermisch goed geïsoleerde funderingsdetails op de hoek van een eindgevel en een langsgevel met behulp van berekeningen bleek de toepassing van R_i = 0,50 echter ernstige consequenties voor ontwerp en uitvoering met zich mee te brengen. Om aan f_{Ri} = 0,65 te voldoen zou R_{eq} > 0,93 moeten zijn en daar is met de gebruikelijke detaillering van funderingen vrijwel niet aan te voldoen (zie figuur 6). Berekening van drievlakshoeken bij de fundering met R_i = 0,50 op grond van mogelijke afscherming door meubilair stelt binnen de huidige bouwwijze dus te hoge eisen. Daarbij komt nog een technisch aspect van de rekenvoorschriften volgens ontwerp NEN 2778, waardoor driedimensionale funderingskoudebruggen enigzins ongunstig uit de bus komen. Deze overwegingen hebben geleid tot een op het eerste ge-

zicht wat merkwaardige enclave in driedimensionale benedenhoeken grenzend aan de bodem (figuur 10). In deze hoeken tussen twee gevels en de begane grond vloer moet R_i=0,25 worden toegepast. Bewoners kunnen zichzelf een handje helpen door niet gelijktijdig een tamelijk vochtig binnenklimaat in stand te houden (waarmee het Bouwbesluit nog rekening houdt) en de hoek te gebruiken om oude kranten op te stapelen.

Conclusie

De keuze van een vaste luchttemperatuur als referentietemperatuur voor de berekening van thermische bruggen leidt tot gedifferentieerde waarden voor R_i. Ondanks de schijnbaar grote spreiding in deze waarden blijkt een standaardisering mogelijk te zijn zonder te grote onnauwkeurigheden.
Dit artikel toont ook een werkwijze om in specifieke gevallen, bijvoorbeeld bij condensatieproblemen tot een zo goed

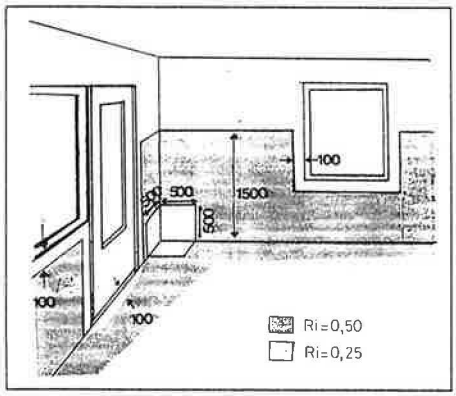

Fig. 10 Vaste waarden voor R_i volgens ontwerp NEN 2778. In de benedenhoek op de begane grond en bij uitkragende verdiepingen geldt R_i = 0,25

mogelijke berekening van de oppervlaktetemperatuur te komen. Het meest nauwkeurig werkt men dan door van het concrete vertrek een thermisch model te maken en te werk te gaan volgens figuur 4. Zoals we zagen geeft het snijpunt R_i, R_{eq} en de lokaal geldende temperatuurfactor f_{Ri}. Op die wijze houdt men rekening met de plaatselijke invloed van radiatoren en beglazing.
Een eenvoudiger aanpak is mogelijk met de formule (12). Deze vervangt het kamermodel. Na berekening van de gemiddelde U-waarde van het vertrek en de waarde voor p_c kan formule (12) worden ingevuld en p berekend. Vervolgens gaat men op dezelfde wijze te werk. De lokale invloed van stralende vlakken worden dan verwaarloosd. Men kan de berekening uiteraard ook uitvoeren met de formules (6) en (8).

Wanneer bij het berekenen van thermische bruggen geen inzicht bestaat in de thermische eigenschappen van de ruimte biedt NEN 2778 vaste waarden. Uit de geboden benadering zijn veel conclusies te trekken over de invloed van verwarmingssystemen en de bouwkundige uitvoering op condensatie- en schimmelproblemen.

In dit artikel zijn we niet ingegaan op de relatie tussen het binnenklimaat en de in het ontwerp Bouwbesluit gestelde eis aan de binnenoppervlaktetemperatuurfactor. Figuur 11 ontleend aan [2] toont deze samenhang.
Met name voor de ontwikkeling en toepassing van het kamermodel ben ik dank verschuldigd aan Ir. P. Standaert.

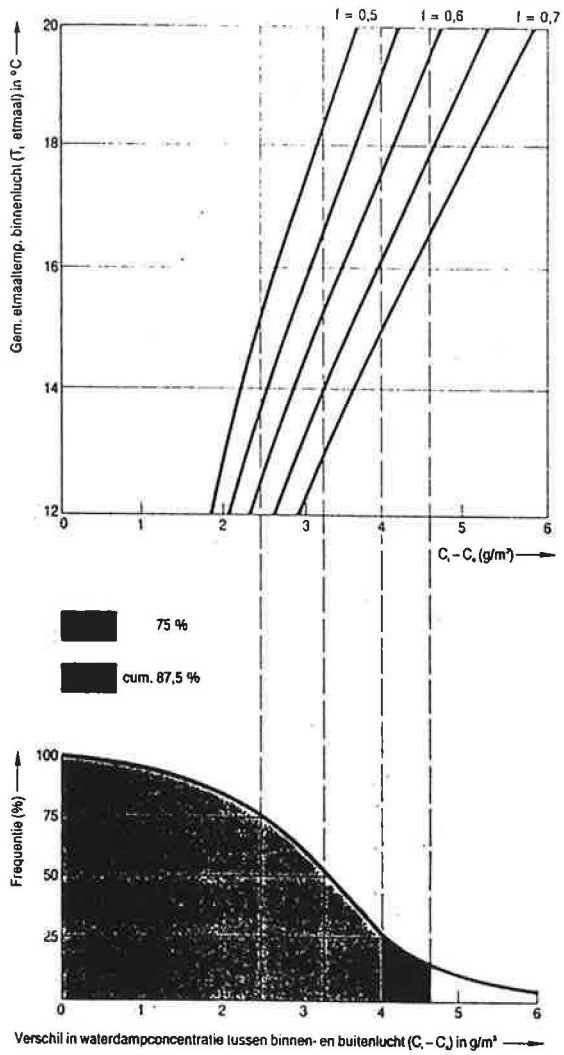

Fig. 11 Klimaatgebied

Literatuur

1 Ontwerp NEN 2778 Vochtwering in gebouwen; bepalingsmethoden
2 Lichtveld, W.J. Schimmels, mijten en Bouwbesluit, Bouwwereld nr. 7, maart 1989
3 Oppervlaktecondensatie voorkomen, Stichting Bouwresearch publ. 202, 1989
4 Lichtveld, W.J. Recommended values for surface heat resistances, Report to IEA Annex 14, NOVEM 1990
5 Standaert, P Determination of the inside surface boundary conditions in surface temperature calculations, CIB congres Rotterdam september 1990
6 Schaap L. en Lichtveld W. Thermische isolatie van funderingskoude bruggen, NOVEM, september 1988.