

TNO-rapport
98-CON-R1256

Vier energie-indicatoren voor tuinbouwkassen.
Inhoud van de presentatie van het onderzoek tijdens het seminar op 12 juni 1998 te Delft

TNO Bouw

Contactpersoon
Dhr. Ir. H.D.M. Kool

Lange Kleiweg 5
Postbus 49
2600 AA Delft

Telefoon 015 284 23 28
Fax 015 284 39 78

Datum
juni 1998

Auteur(s)
Dhr. Ir. H.D.M. Kool
Dhr. Ing. H. 't Hart
Dhr. Ir. I.J.J. van Straalen

Opdrachtgever : NOVEM, het Landbouwschap en
de stichting STOREKA

Rubricering : Kasconstructies
Vastgesteld door : HTH
Vastgesteld d.d. : 25 augustus, 1998

Titel : Seminar 'Energie-geïntegreerd ontwerpen van
tuinbouwkassen'
Rapporttekst : Licht en energie
Bijlagen : CASTA/Kassenbouw versie 2.00 (Windows)
Projectnummer : 08.21.4.7011
Goedgekeurd : KLHB/HTH
Gezien : KLHB/HTH

Alle rechten voorbehouden.
Niets uit deze uitgave mag worden
vermenigvuldigd en/of openbaar
gemaakt door middel van druk, foto-
kopie, microfilm of op welke andere
wijze dan ook, zonder voorafgaande
toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd
uitgebracht, wordt voor de rechten en
verplichtingen van opdrachtgever en
opdrachtnemer verwezen naar de
Algemene Voorwaarden voor onder-
zoeksopdrachten aan TNO, dan wel
de betreffende terzake tussen de
partijen gesloten overeenkomst.
Het ter inzage geven van het
TNO-rapport aan direct belang-
hebbenden is toegestaan.

Aantal pagina's : 43+5

Aantal Bijlagen : 1

© 1998 TNO

ONTWIKKELING GROENLABELKAS

Implementatie energie-indicatoren

"Van middelvoorschrift naar doelvoorschrift"

Vast deel van de groenlabelkas

- a) Lichtdoorlaat kas met enkel glasdek $\geq 75,0\%$ ^{*)}
- b) U-waarde kasdek $\leq 8,2 \text{ W/m}^2\text{K}$ ^{**)}

Flexibel deel van de groenlabelkas

- a) Voor ieder procentpunt lichtdoorlaat $>75\%$ ^{*)} één Groenlabelpunt
- b) Eén Groenlabelpunt voor iedere procent U-waarde kasdek $< 8,2 \text{ W/m}^2\text{K}$ ^{**)}
- c) Productie-energie kasmaterialen $\leq 700 \text{ MJ/m}^2$ ^{*)} levert één Groenlabel-bonuspunt op.

^{*)} Uitgaande van de complete kasconstructie, inclusief lichtmechaniek. De invloed van installaties voor scherming, verwarming, regeneratie e.d. is hierin niet meegenomen.

^{**)} U-waarde per vlakante meter grondoppervlak, exclusief de invloed van de luchtkramen.

Voorstel voor uitbreiding van eisen van de Groenlabelkas met de ontwikkelde energie-indicatoren.

1. SAMENVATTING: PERSBERICHT SEMINAR

Seminar 'Energie-geïntegreerd ontwerpen van tuinbouwkassen'

Delft, vrijdag 12 juni 1998

Het op 12 juni 1998 door TNO Bouw georganiseerde seminar 'Energie-geïntegreerd ontwerpen van tuinbouwkassen' heeft aangetoond dat de glastuinbouw zich bewust is van de noodzaak om bewust met energie om te gaan. De 120 toehoorders uit alle geledingen van de Nederlandse glastuinbouw konden deze middag kennis nemen van de vier ontwikkelde energie-indicatoren om de energie-efficiency van kassen objectief te kunnen beoordelen.

Verschillende prominente sprekers hebben onder leiding van de dagvoorzitter Bijlaard van TNO Bouw, hun licht laten schijnen over het belang van energievriendelijke kassen. In zijn inleiding op het seminar stelde de heer Custers van NOVEM dat de taakstelling afgesproken in de Meerjarenspraak Energie Glastuinbouw alleen te halen is middels verjonging van het kassenbestand door grootschalige herstructurering. Vervolgens stelde de heer Hoogervorst van LTO-Nederland dat de tuinbouwondernemers dit beamen en dat de glastuinbouw staat aan het begin van een sterk zelfvernieuwend proces. Technische ontwikkelingen zijn daarbij noodzakelijk.

Om de energie-efficiency van tuinbouwkassen objectief te kunnen beoordelen, zijn de afgelopen twee jaar in opdracht van NOVEM, Landbouwschap en STOREKA, door TNO Bouw energie-indicatoren ontwikkeld. Met deze energie-indicatoren zijn de lichtdoorlatendheid, de U-waarde, de ventilatiecapaciteit en de productie-energie van een tuinbouwkas te berekenen.

De heer Kool van TNO Bouw lichtte de achtergronden toe en liet aan de hand van rekenvoorbeelden zien dat de tuinder bij de aanschaf van een nieuwe kas op basis van objectieve criteria de energie-efficiency kunnen betrekken in hun keuze. Vervolgens demonstreerde de heer 't Hart van TNO Bouw de nieuwe Window versie van CASTA/Kassenbouw. Naast toetsing van de kasconstructie aan de norm NEN 3859, kan nu ook met één druk op de knop de bijbehorende waarden van de energie-indicatoren worden berekend.

Maar bewust omgaan met energie in een glastuinbouwbedrijf is meer dan alleen het kiezen van een optimale tuinbouwkas. De heer Bakker van IMAG-DLO gaf aan dat ook het gewas en het gedrag van de tuinder van invloed is op het energieverbruik. Tenslotte zette de heer Helderman van P.L.J. Bom B.V. uiteen hoe de kassenbouwer de objectieve energie-indicatoren kan inzetten om tot optimalere concepten te komen.

Met de overhandiging van een poster aan de heer Hoogervorst, bood de heer Kool de vier ontwikkelde energie-indicatoren symbolisch aan. Namens de tuinbouwondernemers verzocht de heer Hoogervorst de heer Duffhues van MJA-Energie vervolgens om de energie-indicatoren mee te nemen in de Groenlabelregeling.

Het succes van dit seminar onderstreept het belang van energiebewust ontwerpen van tuinbouwkassen. Het gezamenlijke doel van een moderne en milieuvriendelijke glastuinbouw, is hiermee weer een stap dichterbij gekomen.

Inhoud

TITELBLAD: VOORSTEL ONTWIKKELING GROENLABELKAS

1. SAMENVATTING: PERSBERICHT SEMINAR.....	3
2. INLEIDING.....	6
2.1 Inhoud	6
2.2 Vier energie-indicatoren	7
2.2.1 Enkel glasgedekte kassen.....	8
2.3 Achtergrond	8
2.4 Doelstelling.....	9
3. REKENMETHODIEKEN.....	11
3.1 Energie-indicator (1): lichtdoorlatendheid	11
3.1.1 'Halve-omtrekmethode'	11
3.1.2 'IDT-methode'.....	13
3.1.3 Lichtreflectie.....	13
3.1.4 Vormfactoren	15
3.1.5 Overige lichtfactoren	17
3.1.6 Voorbeeldberekening.....	17
3.1.7 Lichtdoorlatendheid van zes basis kastypen.....	19
3.1.8 Lichtdoorlatendheid-variaties op een 4,0 meter Venlo-kap.....	20
3.2 Energie-indicator (2): U-waarde	21
3.2.1 Eindige elementen methode.....	21
3.2.2 BBI-methode van TNO Bouw	22
3.2.3 Warmtebalans	24
3.2.4 Randcondities	24
3.2.5 Rekenvoorbeelden U-waarden.....	25
3.3 Energie-indicator (3): ventilatiecapaciteit	28
3.3.1 Optimalisatie.....	28
3.3.2 Maximale openingshoek	28
3.3.3 Rekenvoorbeelden ventilatie-capaciteit.....	29
3.4 Energie-indicator (4): productie-energie	31
3.4.1 Hoeveelheid bouwmaterialen	31
3.4.2 Energie-inhoud.....	31
3.4.3 Rekenvoorbeelden productie-energie	32
4. VALIDATIE	34
4.1 Energie-indicator (1): lichtdoorlatendheid	34
4.1.1 Praktijkmetingen DLV.....	34
4.1.2 Lichtberekeningen IMAG-DLO	35
4.1.3 Lichtstraalprogramma P.L.J. Bom B.V. Kassenbouw	36
4.2 Energie-indicator (2): U-waarde	38

4.2.1 Praktijkmeting IMAG-DLO.....	40
4.2.2 Computerprogramma HAS Den Bosch.....	40
4.2.3 Samenvatting.....	41
5. CONCLUSIES EN SLOTOPMERKINGEN	42

Bijlage A:

Korte samenvatting van de demonstratie van het computerprogramma
CASTA/Kassenbouw 2.00 met de vier energie-indicatoren.
(door ing. H. 't Hart en ing. G. Verhoeff)

2. INLEIDING

Dit rapport geeft de uitgebreide tekst (inclusief figuren) van de voordracht "Vier energie-indicatoren voor tuinbouwkassen" samengesteld en voorgedragen door de heer Ir. H.D.M. Kool (TNO Bouw) tijdens het seminar "Energie-geïntegreerd ontwerpen van tuinbouwkassen", gehouden op vrijdag 12 juni 1998 te Delft.



Figuur 2.1 Inhoud van de presentatie van het onderzoek tijdens het seminar op 12 juni 1998 te Delft.

2.1 Inhoud

In opdracht van de NOVEM, het Landbouwschap en de stichting STOREKA heeft TNO Bouw vier energie-indicatoren ontwikkeld. Eerst zal worden ingegaan op de achtergrond van de vier ontwikkelde energie-indicatoren. Wat zijn nu precies die vier energie-indicatoren en waarom zijn ze eigenlijk ontwikkeld? Vervolgens zal één voor één ingaan worden op de manier waarop de vier energie-indicatoren berekend (kunnen) worden. Daarna komt de validatie van de rekenmethodieken aan de orde. Anders geformuleerd, de betrouwbaarheid van de uitkomsten van de berekeningen. Een belangrijk punt. Het rapport wordt afgesloten met enige



Figuur 2.2 De vier energie-indicatoren voor tuinbouwkassen, in volgorde van belangrijkheid.

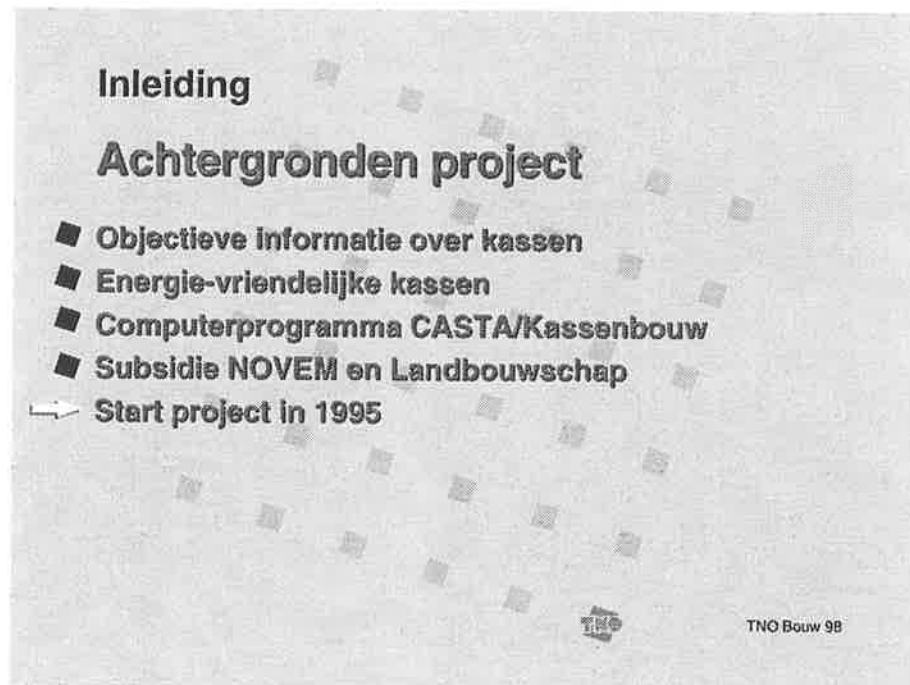
conclusies en slotopmerkingen. De bespreking van de energie-indicatoren wordt uitgebreid toegelicht met voorbeeldberekeningen en berekeningsresultaten. Het onderwerp 'voorbeeldberekeningen' wordt ook kort behandeld in de bijlage bij dit rapport. In die bijlage wordt de toepassing van de ontwikkelde energie-indicatoren met het door TNO Bouw ontwikkelde computerprogramma CASTA/Kassenbouw gedemonstreerd.

2.2 Vier energie-indicatoren

Wat zijn nu precies die vier ontwikkelde energie-indicatoren voor tuinbouwkassen? Min of meer in volgorde van belangrijkheid zijn dit:

Als eerste de **lichtdoorlatendheid van de kas**. Uiterst belangrijk vanwege de directe relatie met de opbrengst van het gewas. Maar ook belangrijk uit oogpunt van energie. Immers, hoe meer instraling van zonne-energie, des te minder er gestookt hoeft te worden. En de genoemde opbrengstverhoging werkt direct door in de verbetering van de energie-efficiency.

Ten tweede de **U-waarde van het kasdek** in $[W/m^2.K]$, vroeger de k-waarde genoemd, met een kleine letter k. De U-waarde is een warmtedoorgangscoefficiënt. Het geeft aan hoeveel energie per vierkante meter naar buiten verdwijnt per graad temperatuurverschil tussen binnen en buiten. Het is dus zaak om deze U-waarde zo klein mogelijk te hebben c.q. te krijgen.



Figuur 2.3 Door een combinatie van factoren is in 1995 het idee ontstaan van de vier energie-indicatoren voor tuinbouwkassen.

De derde energie-indicator is de **ventilatie-capaciteit van de kas**. Zeg maar het oppervlakte van de luchtramen van de kas als percentage van de oppervlakte van de kas zelf, maar dan op een manier uitgerekend die rekening houdt met de openingshoek van het luchtraam.

En tot slot de **productie-energie van een kas**, ofwel de hoeveelheid energie die nodig is voor de productie van de toegepaste bouwmaterialen. De indicator beperkt zich tot de constructie van de kas. In de kas geplaatste installaties en de energie benodigd voor de bouw zelf vallen buiten de beschouwing.

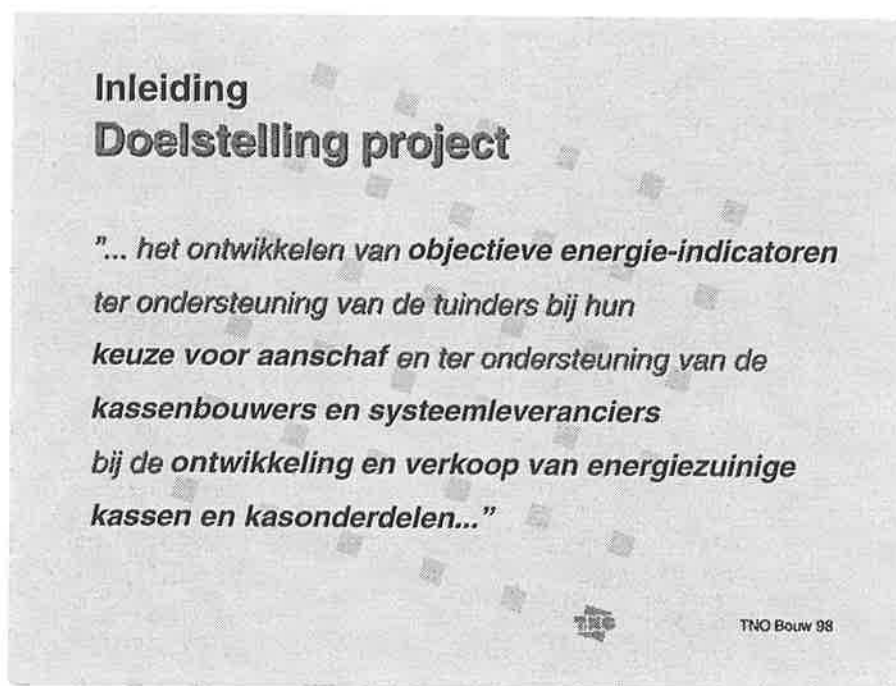
2.2.1 Enkel glasgedekte kassen

Vooralsnog beperken de vier ontwikkelde energie-indicatoren zich tot kassen gedekt met enkel glas. Maar alle betrokken partijen zijn enthousiast om in de toekomst ook kassen gedekt met alternatieve omhullingsmaterialen mee te nemen, zoals gecoat glas, dubbel glas en kunststof kanaalplaten. Zowel qua licht, als qua energie biedt dat ongekende mogelijkheden.

2.3 Achtergrond

Het idee voor de energie-indicatoren is een jaar of vier, vijf geleden door een combinatie van factoren ontstaan. Allereerst was en is daar de behoefte van de

markt aan objectieve informatie over de prestaties van kassen. Objectieve indicatoren over licht en energie kunnen de tuinder helpen bij de aanschaf van een nieuwe kas en de kassenbouwers en systeemleveranciers ondersteunen bij de ontwikkeling en verkoop van goede kassen en kasonderdelen. Ten tweede was en is daar de behoefte van de overheid en de samenleving aan energie-zuinige en milieuvriendelijke kassen. De heer Hoogervorst heeft daar zojuist al het een en ander over gezegd. En de derde bouwsteen voor de energie-indicatoren was de succesvolle ontwikkeling van ons computerprogramma CASTA/Kassenbouw. Anno 1993 was de sterkte van de draagconstructie van kassen geheel 'in de computer gestopt'. Voorlopige berekeningen hadden ons geleerd dat met die gegevens ook objectieve licht- en energiegetallen berekend konden worden. De laatste en beslissende factor was de subsidie van NOVEM en Landbouwschap in het kader van de Meerjarenaafsprake Energiebesparing. Samen met een bijdrage van de stichting STOREKA, die de belangen van de gebruikers van CASTA/Kassenbouw behartigt, en ondersteunt door het Ministerie van Economische Zaken, is het project in 1995 van start gegaan.

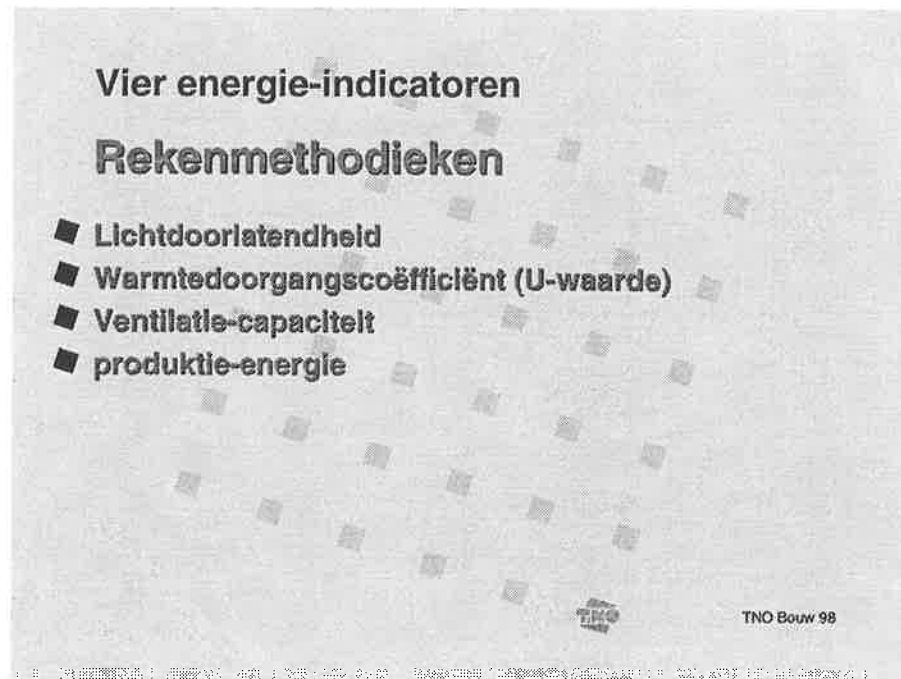


Figuur 2.4 Doelstelling van het project 'energie-geïntegreerd ontwerpen'.

2.4 Doelstelling

Doelstelling van het project is het ontwikkelen van objectieve energie-indicatoren ter ondersteuning van de tuinders bij hun keuze voor (energie-zuinige) kastypen,

kasafmetingen en kasmaterialen en ter ondersteuning van de kassenbouwers en systeemleveranciers bij de ontwikkeling en verkoop van die (energie-zuinige) kassen en kasonderdelen. Onderliggende doelstellingen zijn het bijdragen aan het realiseren van de Meerjarenaafspraken Energiebesparing en het stimuleren van energie-zuinige en milieuvriendelijke kassen voor de Nederlandse glastuinbouw.

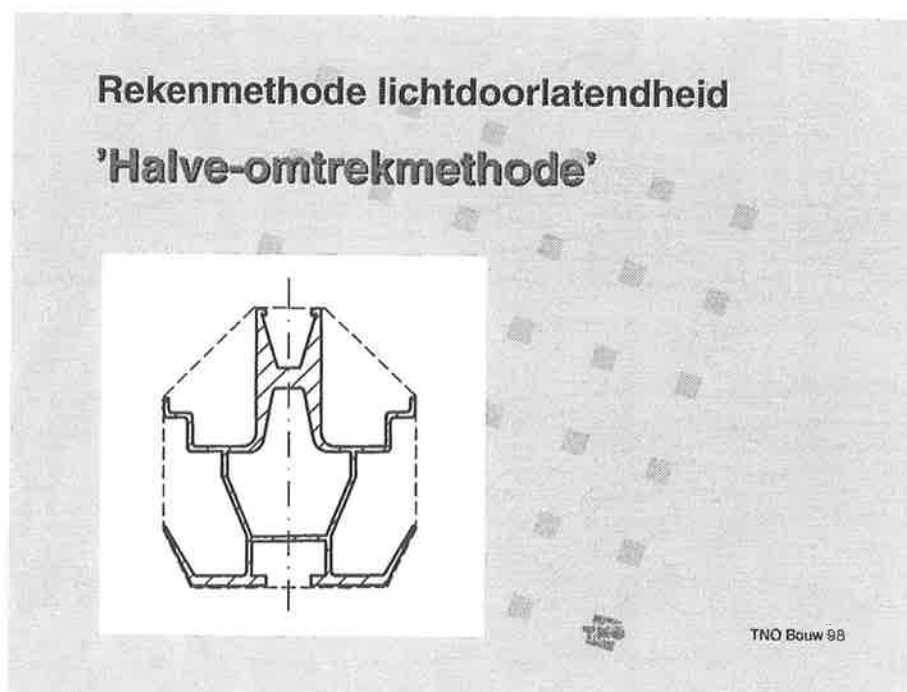


Figuur 2.5 De ontwikkelde energie-indicatoren moesten voldoen aan de twee min of meer tegenstrijdige eisen.

Om die doelstellingen te kunnen realiseren moesten de te ontwikkelen energie-indicatoren aan de volgende twee enigszins tegenstrijdige eisen voldoen. Enerzijds moesten ze voldoende eenvoudig zijn om een 'breed' gebruik mogelijk te kunnen maken. Maar anderzijds moesten ze ook voldoende nauwkeurig zijn om de gewenste 'eerlijke' objectieve informatie te kunnen bieden. Het was dus een kwestie van zoeken naar de 'waarheid in het midden'. In de volgende hoofdstukken wordt behandeld in hoeverre wij in die zoektocht geslaagd zijn.

3. REKENMETHODIEKEN

Overeenkomstig het belang wordt bij de lichtdoorlatendheid en de U-waarde het langst stilstaan en bij de ventilatie-capaciteit en de productie-energie het kortst.



Figuur 3.1 Met de oude 'halve omtrek methode' wordt de lichtonderschepping van een profiel bepaald door als het ware een 'touwtje' om de doorsnede te spannen

3.1 Energie-indicator (1): lichtdoorlatendheid

3.1.1 'Halve-omtrekmethode'

Een oude veel gebruikte manier om de lichtdoorlatendheid van kassen te berekenen is de 'halve-omtrekmethode'. Van ieder kasonderdeel dat zich boven het gewas bevindt, werd de halve omtrek bepaald door als het ware een 'touwtje' om de doorsnede te spannen. De halve lengte van het touwtje was dan een maat voor de lichtonderschepping van het profiel. Figuur 3.1 geeft een voorbeeld van een nok. De opgetelde lichtonderschepping van alle profielen bij elkaar leverde zo een maat voor de totale licht-onderschepping van de kas. De methode leverde beslist géén nauwkeurige indicatie voor de lichtdoorlatendheid van de kas, maar was en is wel een goede methode om de lichtonderschepping van twee of meer verschillende kassen met elkaar te vergelijken.

Rekenmethode lichtdoorlatendheid

'Halve-omtrekmethode'

$$\frac{\text{omtrek}}{2} \times \frac{\text{lengte}}{\text{rep. grondoppervlak}} = \dots \%$$

Bijvoorbeeld bovenrand tralieligger

$$\frac{(50 + 25) \times 2}{2} \times \frac{7880}{8000 \times 4500} = 1.64 \%$$

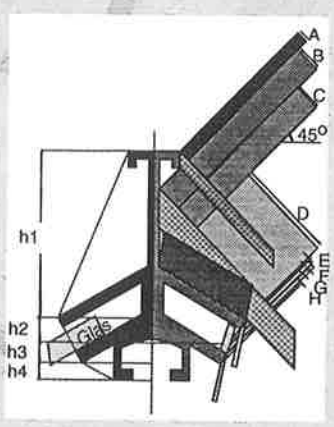
TNO Bouw 98

Figuur 3.2 De 'halve omtrek-methode' is een bruikbare methode om de lichtonder-schepping van twee of meer verschillende kassen met elkaar te vergelijken

Rekenmethode lichtdoorlatendheid

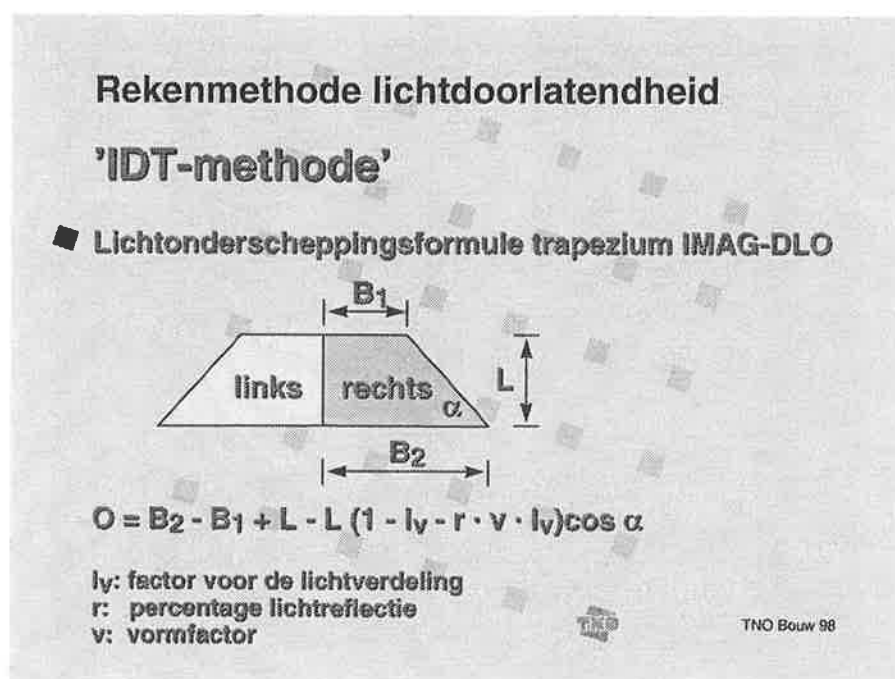
'IDT-methode'

■ Model bestaande uit trapezia



TNO Bouw 98

Figuur 3.3 De nieuwe lichtberekeningsmethode wordt ook wel de IDT-methode genoemd, met de I van het IMAG, de D van DLV en de T van TNO.



Figuur 3.4 Volgens de IDT-methode wordt de lichtonderschepping van een profiel per trapezium berekend.

3.1.2 'IDT-methode'

In nauwe samenwerking met de heer Geert-Jan van Dijk van DLV uit Naaldwijk is een verfijnde berekeningsmethode van de 'halve-omtrekmethode' ontwikkeld. Eigenlijk is het enige wat nog aan de oude methode herinnert 'het touwtje', dat om de profieldoorsnede wordt gedacht. Met behulp van het touwtje wordt het profiel opgedeeld in boven elkaar gelegen trapezia. Figuur 3.3 geeft een bijvoorbeeld voor een nok. Ieder knikpunt in 't touwtje komt overeen met een grensvlak tussen twee trapezia. Ter plaatse van het midden van de glasruit wordt ook een grensvlak tussen twee trapezia geplaatst. Van ieder trapezium moet de hoogte en de breedte aan de boven- en de onderkant worden opgegeven. Op deze manier kan de omtrek van ieder profiel nauwkeurig beschreven worden. Nu kan de lichtonderschepping van dit profiel berekend worden met behulp van de formules voor de lichtonderschepping van een trapezium. Deze formules zijn als in de jaren zeventig afgeleid/opgesteld door onderzoekers van het IMAG-DLO te Wageningen. Daarom noemen wij deze nieuwe lichtberekeningsmethode ook wel de IDT-methode, met de I van het IMAG, de D van DLV en de T van TNO.

3.1.3 Lichtreflectie

De lichtonderschepping van alle trapezia bij elkaar levert weer precies de lichtonderschepping van het profiel volgens de 'oude halve-omtrekmethode' op. Niks opgeschoten zou je zeggen, maar niks is minder waar. De formules van het IMAG-DLO bieden namelijk de mogelijkheid om de lichtreflectie mee te nemen. Hierbij zijn twee zaken van belang: het reflecterend vermogen van het materiaal en de vorm van het profiel. De mate van reflectie is afhankelijk van het materiaal. Figuur 3.5 geeft een overzicht met veel gebruikte reflectiewaarden voor

verschillende kassenbouwmaterialen. Wit gecoat staal reflecteert bijvoorbeeld aanzienlijk meer dan verzinkt staal. De reflectie van aluminium zit daar ongeveer tussen in. Dit zijn echter reflectiecijfers van nieuwe materialen. Na verloop van tijd loopt de reflectie van coating en aluminium terug, maar daar is nog te weinig over bekend om u daar precieze cijfers van te kunnen geven. Wellicht een mooi onderwerp voor aanvullend onderzoek.

Rekenmethode lichtdoorlatendheid

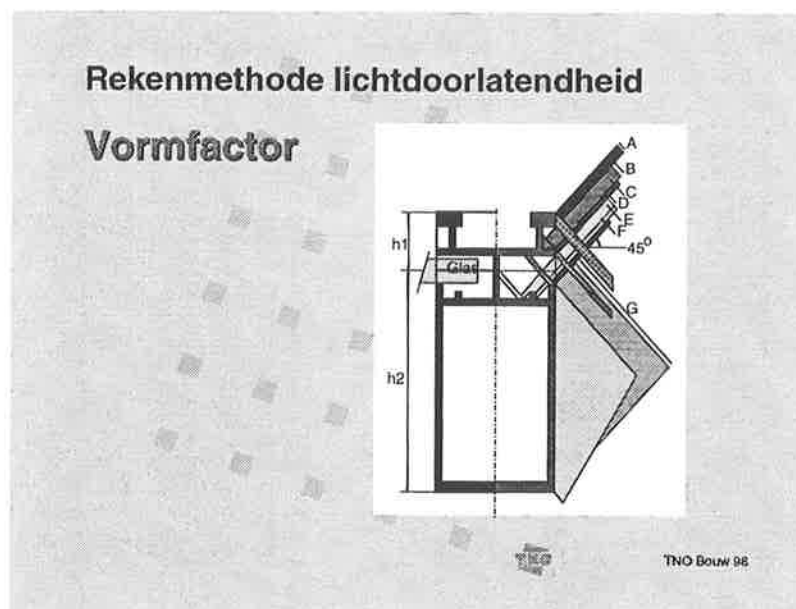
Reflectie

■ **Standaard reflectie-waarden diverse kassenbouwmaterialen**

Material	Reflectiecoëfficiënt
verzinkt staal	20%
aluminium	45%
wit gecoat staal	70%

TNO Bouw 98

Figuur 3.5 Overzicht van veel gebruikte reflectiewaarden voor verschillende kassenbouwmaterialen.



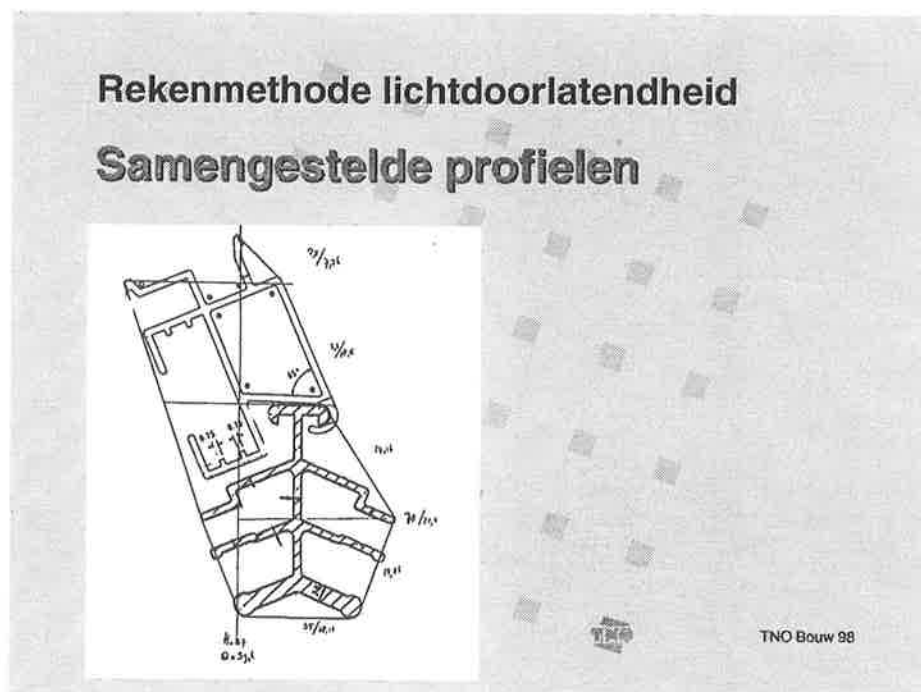
Figuur 3.6 Van ieder trapezium wordt de vormfactor bepaald door van een lichtbundel die onder 45 graden op het profiel valt, de hoeveelheid licht te bepalen die de kas in wordt gereflecteerd.



Figuur 3.7 Met de IDT-methode is het mogelijk constructiedelen die verdraaid zijn ten opzichte van het horizontale vlak, in de analyse mee te nemen.

3.1.4 Vormfactoren

Maar er speelt nog een factor een rol bij de bepaling van de hoeveelheid licht die gereflecteerd wordt, namelijk de vorm van het profiel. In de 'nieuwe' methode wordt de vorm van het profiel meegenomen door een vormfactor per trapezium. Van ieder trapezium wordt de vormfactor bepaald door van een lichtbundel die onder 45 graden op het profiel valt, de hoeveelheid licht te bepalen die de kas in wordt gereflecteerd. De vormfactor is dus altijd een getal tussen 0 en 1. Voor massieve zijkanten, bijvoorbeeld van roeden of goten is de vormfactor 1 of bijna 1. Voor 'holten' waar het licht bijna niet meer uitkomt, bijvoorbeeld de glassponningen, is de vormfactor 0 of bijna 0. Figuur 3.6 geeft een voorbeeld een glasroede, over de hoogte opgebouwd uit twee trapezia. Van 't onderste trapezium zal de vormfactor bijna 1 zijn, zeg 0,9. Een deel van de gele lichtstraal verdwijnt nog in de glassponning. Van 't bovenste trapezium zal de vormfactor veel kleiner zijn, zeg ongeveer 0,3. Alleen de zijkanten van de aluminium flenzen reflecteren wat licht de kas in. Het zal duidelijk zijn dat de uiteindelijke hoeveelheid licht die per trapezium gereflecteerd wordt, het produkt is van de vormfactor van het profiel en de reflectiefactor van het materiaal. In de formules van Figuur 3.4 zijn deze uitgangspunten van het IMAG terug te vinden.



Figuur 3.8 Volgens de IDT-methode kan de lichtonderschepping van asymmetrische profielen en samengestelde profielen met afdekprofielen nauwkeurig berekend worden.



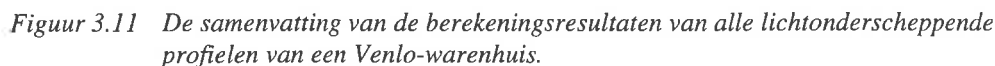
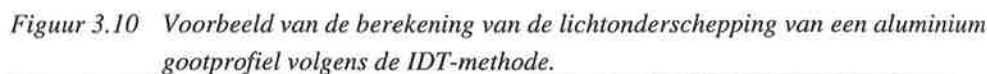
Figuur 3.9 De IDT-methode houdt rekening met onder elkaar liggende profielen, waarbij de onderste voor een deel door de bovenste van het licht wordt afgeschermd.

3.1.5 Overige lichtfactoren

De ontwikkelde rekenmethodiek voor de bepaling van de lichtdoorlatendheid van een kas houdt nog met veel meer factoren rekening. Zo is er de mogelijkheid om constructiedelen die verdraaid zijn ten opzichte van het horizontale vlak, in de analyse mee te nemen. Hierbij is bijvoorbeeld te denken aan de dwarsdragers in het dek van een Breedkapkas. Daarnaast is het nu ook mogelijk om asymmetrische profielen en samengestelde profielen met afdekprofielen van een ander materiaal mee te nemen. Verder is de methode uitgebreid voor onder elkaar liggende profielen, waarbij de onderste door de bovenste wordt afgeschermd. Er wordt dus rekening gehouden hoeveel licht er op een profiel kan vallen. Figuur 3.9 illustreert dat. Op de horizontale as is de verhouding van de breedte van het bovenliggende profiel ten opzichte van de breedte van het onderliggende profiel gegeven. Op de verticale as is de verhouding van de afstand tussen de profielen en de breedte van het bovenliggende profiel gegeven. De contourlijnen geven het percentage licht wat op het onderliggende profiel kan vallen. De berekeningsmethode houdt sowieso rekening met de positie van ieder profiel in de kas. Licht dat onderschept is door het glas, kan niet nog eens onderschept worden door lager gelegen profielen, bijvoorbeeld de tralieligger. De feitelijke lichtonderschepping van de tralieligger is dus minder omdat niet 100% van het buiten aanwezige licht op de tralieligger valt. Zo houdt de rekenmethode voor ieder profiel precies bij hoeveel licht op dat profiel valt.

3.1.6 Voorbeeldberekening

Uiteindelijk ziet zo'n berekening er als volgt uit (zie ook Figuur 3.10 en Figuur 3.11). Per profiel een A4-tje met de lichtonderschepping van maximaal 20 trapezia, 10 links en 10 rechts. Aan de profielschets rechtsboven van Figuur 3.10 is te zien dat het hier om een goot gaat. Rechtsonder staat de lichtonderschepping. In dit geval 2,4%. De samenvatting geeft een overzicht van de lichtonderschepping van alle profielen. In dit geval 17 verschillende profielen. De totale lichtonderschepping blijkt 24,8%, hetgeen een lichtdoorlaat betekent van 75,2%. Hierbij is nog geen rekening gehouden met de lichtonderschepping door installaties en schermen en dergelijke. Maar dat kan wel. 't Is gewoon een kwestie van extra profielen op de juiste plaats aan de lijst toevoegen.



Rekenmethode lichtdoorlatendheid			
Zes basis kastypen			
Kastype		Bouwjaar	Lichtdoorlatendheid ¹⁾
Venlo	"classic"	1980	69.1 %
	2x3,20 m kap	1990	74.2 %
	2x4,00 m kap	1995	75.2 %
	2x4,80 m kap	1998	76.2 %
Breedkap	6,40 m, enkel lucht	1990	71.5 %
	12,80 m, dubbel lucht	1990	72.0 %

¹⁾ Per kastype is een gemiddelde waarde voor de lichtdoorlatendheid gegeven, exclusief installaties en met een lichtdoorlaat van het glas van 80%. De lichtberekeningen zijn uitgevoerd volgens de IDT-methode.

TNO Bouw 98

Figuur 3.12 Vergelijkingstabel met de lichtdoorlatendheid van een zestal kastypen.

3.1.7 Lichtdoorlatendheid van zes basis kastypen

Met behulp van de ontwikkelde IDT-methode is een vergelijkingsstudie naar de lichtdoorlatendheid van verschillende kastypen onderzocht. Figuur 3.12 geeft een tabel waarin de lichtdoorlatendheid van een zestal kastypen met elkaar worden vergeleken. Alle kastypen betreft vakmaat 4,5 meter met 1,125 meter breed glas op het dek, behalve het als 'classic' aangeduide Venlo-warenhuis. Dat betreft een 2*3,20 meter traliekas met vakmaat 3,0 meter, glasbreedte 0,73 meter en een AC-goot. Dit kastype is meegenomen als referentiekas voor 1980, zoals u wellicht weet, het referentiejaar voor de Meerjarenafspraak Energiebesparing. En dan nu de cijfers. Voor ieder kastype is een soort gemiddelde waarde bepaald, onafhankelijk van het type systeemleverancier. Voor die 'oude' kas berekent het programma een lichtdoorlatendheid van 69,1%. Voor een modern 6,40 meter Venlo-warenhuis rolt er 74,2% uit de berekening. De lichtwinst is met name groot voor de moderne 8,0 meter en 9,60 meter Venlo-warenhuizen van tegenwoordig. Zoals bekend scoren de Breedkapkassen qua licht aanzienlijk minder, met name een 6,40 meter Breedkapkas.

3.1.8 Lichtdoorlatendheid-varianties op een 4,0 meter Venlo-kap

Er is ook een tabel uitgerekend met varianties op een standaard 2*4,0 meter Venlo-warenhuis. Zo is de invloed van het aantal 4,0 meter kappen op een tralieligger onderzocht, de invloed van het type goot, de glasmaat, de grootte van het luchtraam en nog een aantal variabelen. Uiteraard zijn meer interessante vergelijkingen met de gegevens van de tabel te maken.

Rekenmethode lichtdoorlatendheid		
Varianties op een 4.0 meter kap		
Variabele		Lichtdoorlatendheid ¹⁾ (%)
Aantal Kappen	1 x 4,0 m	75.6
	2 x 4,0 m ²⁾	
	3 x 4,0 m	74.9
	4 x 4,0 m	74.0
Type goot	Alu medium ²⁾	
	Alu smal	76.3
	Staal zink medium	74.5
	Staal zink smal	75.8
	Staal wit medium	74.7
	Staal wit smal	76.1
Glasmaat	1,125 m ²⁾	
	1,500 m	75.3
Luchtramen	2- ruits ²⁾	
	3- ruits	74.8
Nok	momentvast ²⁾	
	scharnier	75.1
Scherm	nee ²⁾	
	ja	73.8
Onderbouw	verzinkt ²⁾	
	wit	75.8

¹⁾ Per variant is een gemiddelde waarde voor de lichtdoorlatendheid gegeven, exclusief installaties en met een lichtdoorlaat van het glas van 90%. De lichtberekeningen zijn uitgevoerd volgens de IDT-methode.

²⁾ Deze variabelen horen bij het basis kastype "Venlo 2x4,0 m kap" met een lichtdoorlatendheid van 75,2 %.

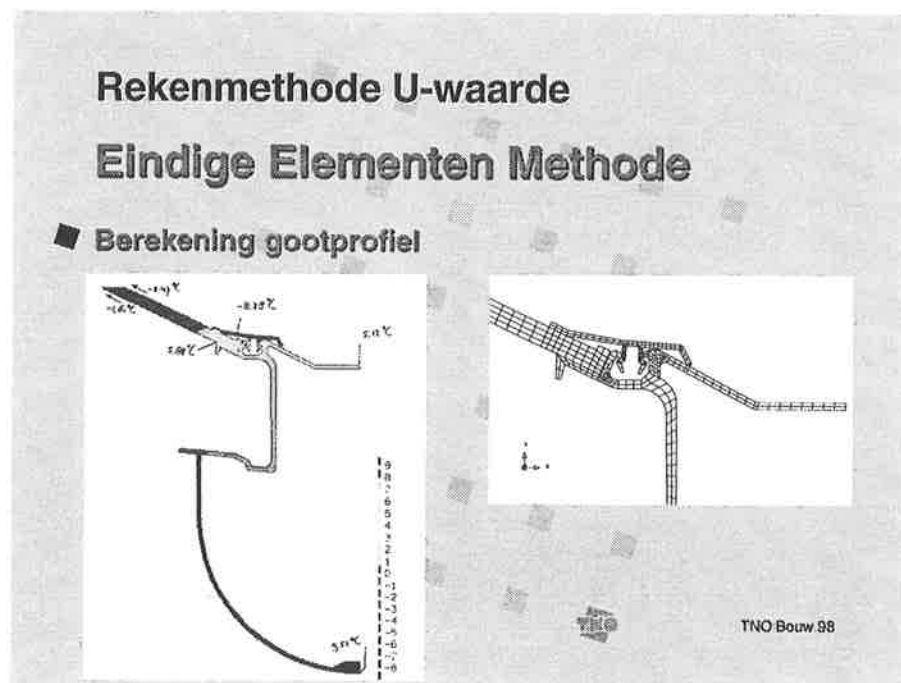
TNO Bouw 98

Figuur 3.13 De lichtdoorlatendheid van een aantal standaard 2*4,00 meter Venlo-warenhuizen met varianties in de constructie en uitvoering.

3.2 Energie-indicator (2): U-waarde

3.2.1 Eindige elementen methode

De U-waarde, ofwel de warmtedoorgangscoefficiënt [in $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$] is de moeilijkste van vier ontwikkelde energie-indicatoren om uit te rekenen. Uiteindelijk heeft dit project twee verschillende rekenmethodieken opgeleverd. In het begin van het project hebben we gewerkt met een 'eindige elementen methode'. Hierbij wordt de doorsnede van een profiel opgedeeld in een groot aantal elementen, zoals bijvoorbeeld geschematiseerd in Figuur 3.14. Uit de energiebalans tussen al die elementen kan de energiestroom door dat profiel worden uitgerekend. Door optelling van de energiestromen door alle profielen waaruit een kasdek is opgebouwd kan dan de warmtedoorgang door het kasdek [in $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$] worden vastgesteld. Velen van u herinneren zich wellicht nog wel de eindejaarskaart, die wij eind 1995 naar al onze relaties hebben gestuurd. Een mooi plaatje van temperaturen en energiestromen in een kasdeksysteem bij 10^0 C onder nul in de winter. De U-waarde was zelfs tot twee decimalen achter de komma gegeven, namelijk $5,93 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$. Echter, bij nader onderzoek blijkt dat getal veel te laag, aangezien de warmte-uitstraling naar de koude hemelkoepel niet volledig is meegenomen. Dat stralingseffect zou nog wel in de 'eindige elementen methode' ingebouwd kunnen worden, maar de methode heeft bovendien als nadeel, dat het



Figuur 3.14 Met een 'eindige elementen methode' wordt de doorsnede van een profiel opgedeeld in een groot aantal thermische elementen

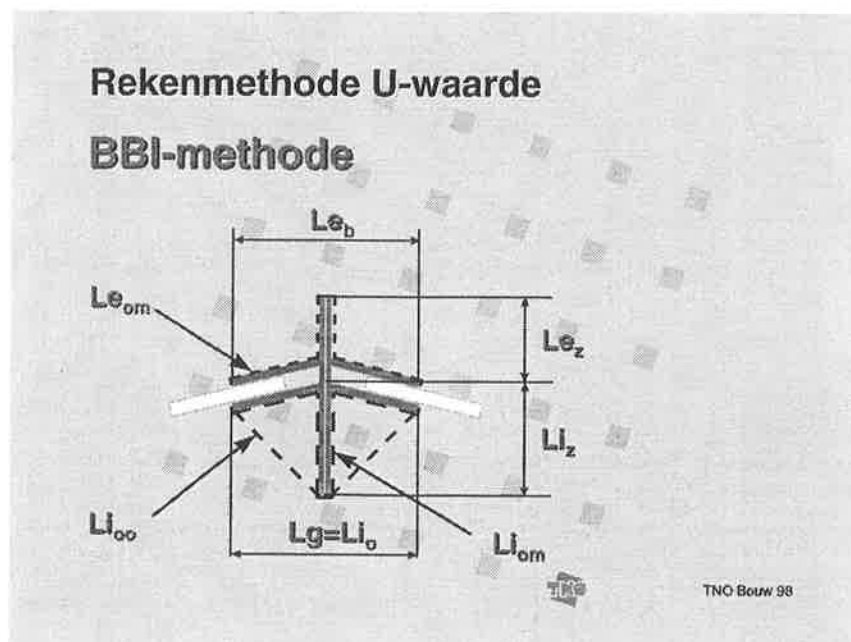
bepalen van al die elementen een 'heidens' karwei is. Het uitrekenen van een kasdeksysteem kost op deze manier ongeveer een dag. Dat is in de praktijk niet haalbaar, vandaar dat we naar een andere methode op zoek zijn gegaan. Overigens kan deze 'eindige elementen methode' nog wel steeds gebruikt worden voor 'moeilijke' gevallen, die zich met de andere methode niet goed laten berekenen.



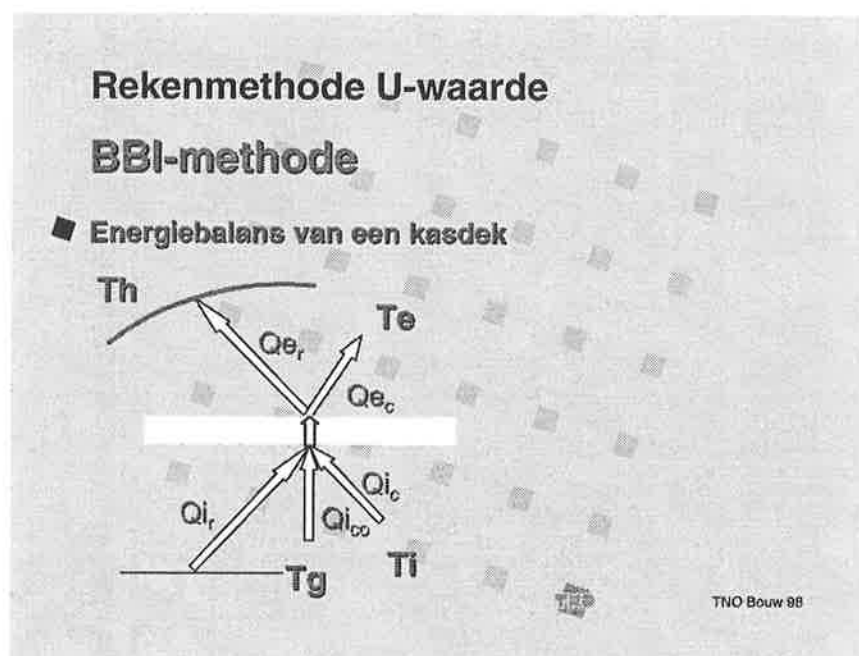
Figuur 3.15 Eindejaarskaart van 1995 van TNO Bouw met de temperaturen en energiestromen in een kasdeksysteem bij 10^0 C onder nul in de winter, berekend met de 'eindige elementen methode'.

3.2.2 BBI-methode van TNO Bouw

Die verbeterde methode ter bepaling van de warmtedoorgangscoefficiënt door een kasdek is ontwikkeld door onze collega's van de afdeling Bouwfysica, Binnenmilieu en Installaties (BBI) van TNO Bouw. Bij deze methode wordt ieder profiel geschematiseerd door een achttal variabelen die van belang zijn voor de warmtestroom door het profiel. Zowel de warmteoverdracht door convectie alsook door straling wordt meegenomen. Figuur 3.16 geeft die variabelen voor een fictief profiel. De variabelen weergegeven door een getrokken maatlijn betreffen geprojecteerde boven- en zijaanzichten van het profiel onder en boven het glas en hebben vooral betrekking op de stralingsuitwisseling van het profiel met z'n omgeving. De variabelen, weergegeven door streepjeslijnen, beschrijven de werkelijke omtrek c.q. oppervlakte van het profiel dat aan de binnen- respectievelijk buitenlucht wordt blootgesteld en hebben vooral betrekking op de warmteoverdracht door convectie.



Figuur 3.16 Met de BBI-methode wordt ieder profiel geschematiseerd door acht variabelen die van belang zijn voor de warmtestroom door het profiel.



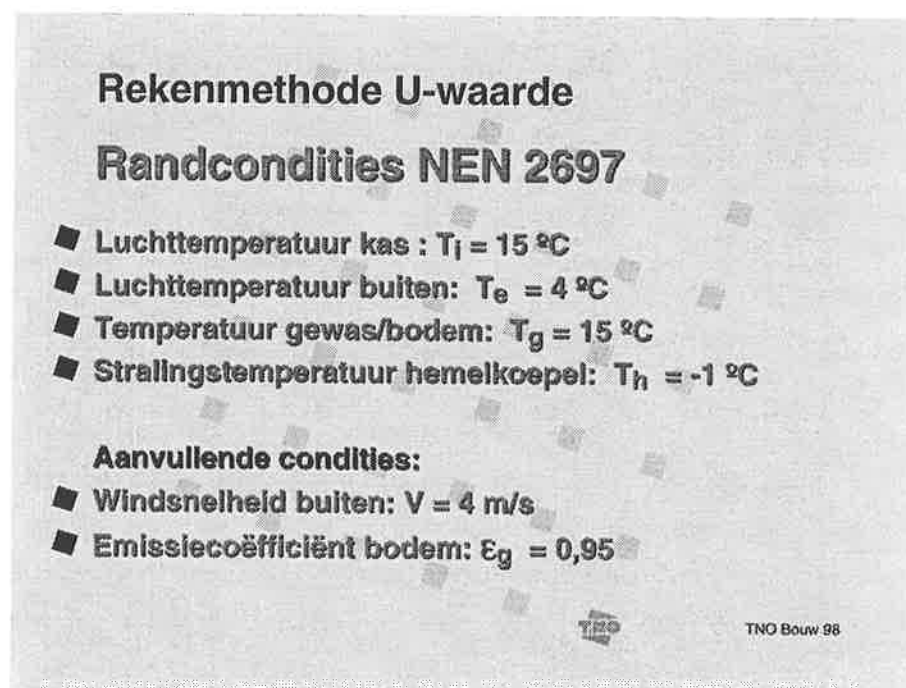
Figuur 3.17 Met de variabelen wordt optimaal rekening gehouden met stralingsuitwisseling en de warmteoverdracht door convectie.

3.2.3 Warmtebalans

Met behulp van deze gegevens kan een warmtebalans worden opgesteld van de verschillende warmtestromen bij een kasdek. In die warmtebalans komen de volgende temperaturen voor:

- T_e = de buitenluchttemperatuur
- T_i = de binnenluchttemperatuur
- T_g = de temperatuur van gewas en/of bodem
- T_h = de temperatuur van de hemelkoepel
- T_{io} = de oppervlaktetemperatuur van het binnenoppervlak van het kasdek
- T_{eo} = de oppervlaktetemperatuur van het buitenoppervlak van het kasdek

Het oplossen van de warmtebalans geeft nu de waarden van de onbekende oppervlakte-temperaturen T_{io} en T_{eo} , waaruit de warmtestroomdichtheid en de U-waarde kan worden afgeleid. Tenslotte kunnen de U-waarden van alle kasdekprofielen bij elkaar genomen worden om te komen tot een U-waarde voor het kasdek als geheel.



Figuur 3.18 De randcondities komen uit NEN 2697, een norm voor het bepalen van de warmtedoorgangscoefficiënt door enkel glas van tuinbouwkassen.

3.2.4 Randcondities

Uitermate belangrijk bij de bepaling van U-waarden van constructies zijn de randcondities voor de berekening. In dit geval zijn de randcondities gebruikt zoals die voorkomen in NEN 2697, een norm voor het bepalen van de warmtedoorgangscoefficiënt door enkel glas van tuinbouwkassen. Op die manier

weten we zeker dat onze berekeningsresultaten van de profielen aansluiten bij die van het enkelglas volgens NEN 2697. De luchttemperatuur in de kas is op 15⁰ C gesteld, evenals de temperatuur van gewas en bodem. Buiten is de luchttemperatuur 4⁰ C en de stralingstemperatuur van de hemelkoepel -1⁰ C. In aanvulling op NEN 2697 zijn verder nog standaardcondities ingevoerd voor de windsnelheid buiten en de emissiecoëfficiënt van de bodem. Tot slot zijn vaste warmteovergangscoefficienten van de verschillende materialen met de omgeving vastgesteld. Uiteraard wordt hierbij onderscheid gemaakt tussen de warmteoverdracht door straling en de warmteoverdracht door convectie.

Rekenmethode U-waarde	
Warmteovergangs- en emissie-coëfficiënt	
Emissie coëfficiënt	
Glas	0,837
Blank aluminium	0,2
Staal verzinkt	0,9
Staal wit	0,9

Figuur 3.19 De BBI-methode gaat uit van vaste warmte-overgangscoefficienten van de verschillende materialen met de omgeving.

3.2.5 Rekenvoorbeelden U-waarden

Ook hier weer enige rekenvoorbeelden ter illustratie. Dezelfde zes basis kastypen, waarvan hiervoor de lichtdoorlatendheid bepaald is, zijn ook doorberekend qua warmtedoorgangscoefficient. Figuur 3.20 geeft de uitkomsten. Duidelijk blijkt het effect van 'compact construeren'. De profielen zijn toch relatief 'koude bruggen' ten opzichte van het glas. Dus hoe groter het glas met behoud van relatief kleine profielen, zoals bij de 4,80 meter Venlo-kappen, des te geringer de U-waarden. Zoals gezegd dit zijn een soort gemiddelde waarden onafhankelijk van het type systeemleverancier. Ook nu weer zijn voor een 'standaard' 4,0 meter Venlo-kap de effecten van een aantal variaties doorberekend. In de tabel van Figuur 3.21 is met name de invloed van het type goot op de U-waarde van het kasdek te zien. Een smalle aluminium kokergoot levert ca. 2% energiebesparing op ten opzichte van een

Rekenmethode U-waarde

Zes basis kastypen

Kastype		Bouwjaar	U-waarde W/(m ² K) ¹⁾
Venlo	"classic"	1980	8.27
	2x3,20 m kap	1990	7.94
	2x4,00 m kap	1995	7.95
	2x4,80 m kap	1998	7.93
Breedkap	6,40 m, enkel lucht	1990	8.19
	12,80 m, dubbel lucht	1990	8.05

¹⁾ De U-waarde van het kasdek is berekend per vierkante meter grondoppervlak, exclusief de invloed van de luchtramen.

TNO Bouw 98

Figuur 3.20 Vergelijkingstabel met de U-waarde van een zestal kastypen.

'open' stalen APD-goot. 1,50 Meter breed glas levert ca. 0,3% energiewinst op ten opzichte van 1,125 meter breed glas. Op zich zijn dit natuurlijk geringe percentages. Maar 't is wel mooi meegenomen, zeker wanneer 't tegelijkertijd ook lichtwinst oplevert. Dat is de kracht van 'compact construeren', hetgeen nu eenduidig kan worden vastgesteld. Veel grotere energiebesparingspercentages zijn te behalen met alternatieve omhullingsmaterialen als gecoat glas, dubbel glas en kunststof kanaalplaten. Zoals gezegd gaan we er vanaf nu aan werken om ook die materialen in de ontwikkelde rekenmethodieken mee te kunnen nemen.

Rekenmethode U-waarde

Variaties op een 4.0 meter kap

Variabele		U-waarde $W/(m^2K)$
Aantal Kappen	1 x 4,0 m	
	2 x 4,0 m ²⁾	
	3 x 4,0 m	
	4 x 4,0 m	
Type goot	Alu medium ²⁾	
	Alu smal	7.94
	Staal zink medium	8.11
	Staal zink smal	8.09
	Staal wit medium	
Glasmaat	Staal wit smal	
	1,125 m ²⁾	
Luchtramen	1,500 m	7.93
	2- ruits ²⁾	
Nok	3- ruits	
	momentvast ²⁾	
Scherm	scharnier	7.97
	nee ²⁾	
Onderbouw	ja	
	verzinkt ²⁾	
	wit	

¹⁾ De U-waarde van het kasdek is berekend per vierkante meter grondoppervlak, exclusief de invloed van de luchtramen.

²⁾ Deze variabelen horen bij het basis kastype "Venlo 2x4,0 m kap" met een U-waarde van 7.95 $W/(m^2.K)$

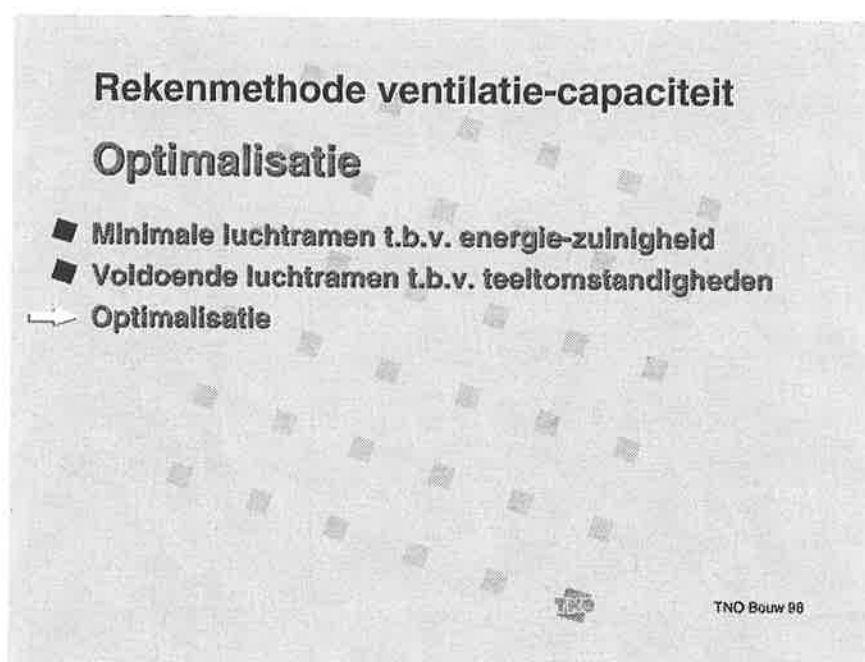
TNO Bouw 98

Figuur 3.21 De U-waarden van een aantal standaard 2*4,00 meter Venlowarenhuizen met variaties in de constructie en uitvoering.

3.3 Energie-indicator (3): ventilatiecapaciteit

3.3.1 Optimalisatie

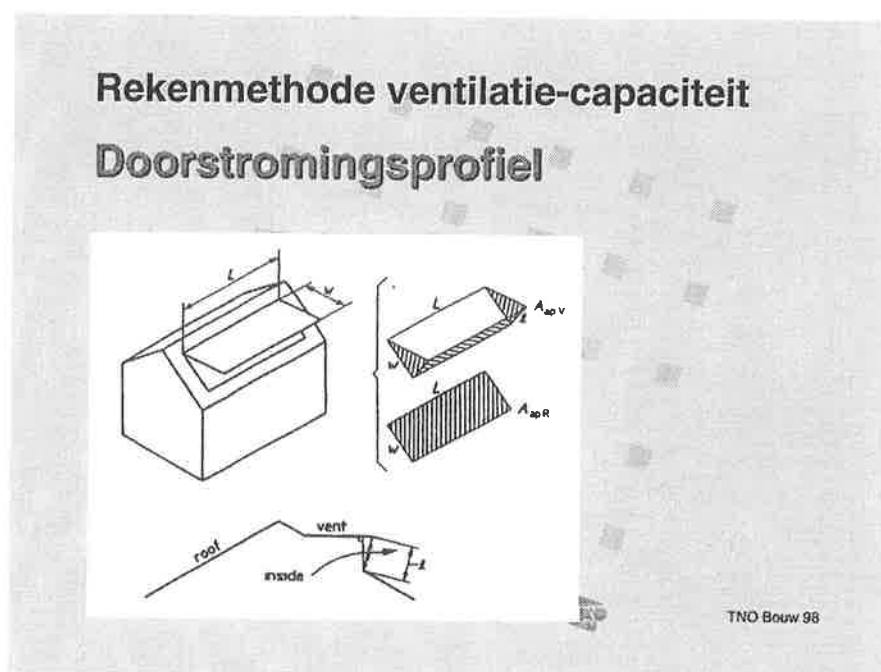
De derde energie-indicator is de ventilatie-capaciteit, zeg maar het percentage van het kasdek dat 'open' kan. De ventilatie-capaciteit van een kas is een belangrijke teelttechnische parameter, die een directe relatie heeft met de energie-huishouding van een kas. Voor een energie-zuinige kas is het wenselijk dat het aantal en de grootte van de luchtramen beperkt blijft. Daarnaast is de lichtdoorlaat van een kas met kleinere luchtramen ook iets gunstiger. Afhankelijk van het type gewas is het echter ook noodzakelijk dat er een bepaalde mate van ventilatie aanwezig is om de overtollige warmte en vocht kwijt te kunnen raken. Voor een gunstige energie-huishouding van een kas zal dus de grootte en het aantal luchtramen geminimaliseerd moeten worden, gegeven het type gewas waarvoor de kas bedoeld is.



Figuur 3.22 Luchtraafmetingen kunnen verder geoptimaliseerd worden aan de hand van de energiebesparing en de teeltomstandigheden.

3.3.2 Maximale openingshoek

Voor de ventilatie-capaciteit van de kas is een eenduidige indicator ontwikkeld. Hierbij is rekening gehouden met de maximale openingshoek van de luchtramen,



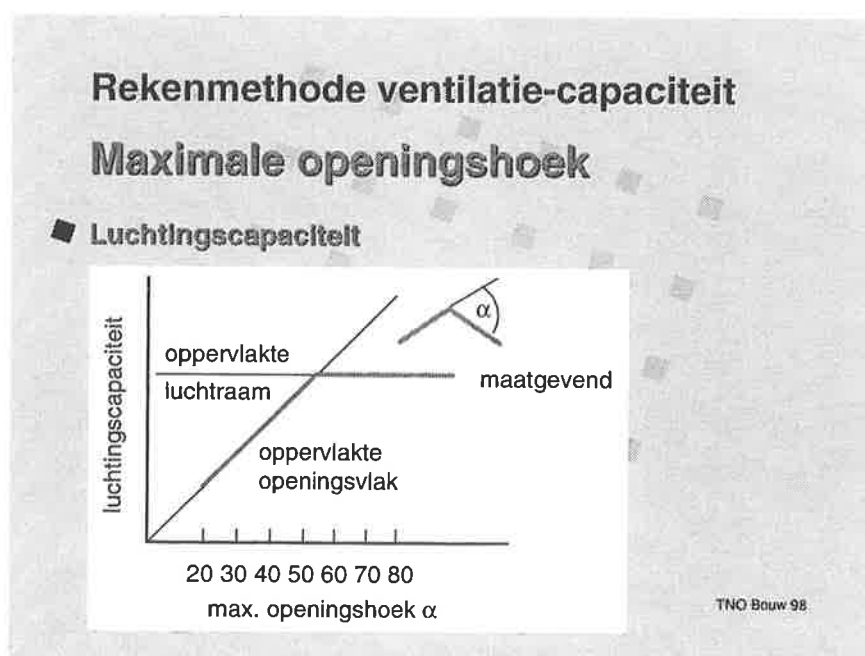
Figuur 3.23 De rekenmethode voor het bepalen van de ventilatiecapaciteit komt overeen met de in ontwikkeling zijnde Europese kassenbouwnorm.

overeenkomend met de in ontwikkeling zijnde Europese kassenbouwnorm. Bij luchtramen met een maximale openingshoek kleiner dan ca. 55 graden is het vlak vanaf de steunregel (het kalfprofiel) onder het luchtraam, loodrecht op het maximaal geopende luchtraam maatgevend voor de luchttingscapaciteit. Dit is meestal het geval. In die situatie geldt: hoe groter de maximale openingshoek van de luchtramen hoe groter de luchttingscapaciteit van de betreffende luchtramen. Vanaf ca. 55 graden openingshoek wordt de oppervlakte van het 'gat in het kasdek' maatgevend voor de luchttingscapaciteit van de luchtramen. Verder vergroten van de maximale openingshoek van de luchtramen heeft volgens de ontwikkelde energie-indicator dan geen zin meer. Echter, hier dient bij opgemerkt te worden, dat in de ontwikkelde rekenmethodiek geen rekening is gehouden met een al dan niet mechanisch geforceerde (complexe) luchtstroom in de kas.

3.3.3 Rekenvoorbeelden ventilatie-capaciteit

In dit geval zijn alleen de rekenvoorbeelden van de zes basis kastypen gepresenteerd. Immers, de eerder gegeven variaties op een 4,0 meter Venlo-kap hebben niet of nauwelijks invloed op de ventilatie-capaciteit. Uit de tabel blijkt dat de ventilatie-capaciteit van de vier standaard Venlo-warenhuizen niet veel van elkaar verschilt. Logisch, aangezien in alle gevallen is uitgegaan van 2-ruitsluchtramen met een luchtraamdiepte ongeveer gelijk aan de helft van de nominale glaslengte in een kap. Zoals bekend scoren de Breedkapkassen juist goed

qua ventilatie-capaciteit, zelfs een 6,40 meter Breedkapkas met enkelzijdige luchtramen van 1,75 meter diep.



Figuur 3.24 Bij een luchtraamopeningshoek van ca. 55 graden wordt de oppervlakte van het 'gat in het kasdek' maatgevend voor de luchtingscapaciteit van de luchtramen.

Rekenmethode ventilatie-capaciteit

Zes basis kastypen

Kastype		Bouwjaar	Ventilatie capaciteit ¹⁾
Venlo	"classic"	1980	12.5 %
	2x3,20 m kap	1990	15.6 %
	2x4,00 m kap	1995	14.3 %
	2x4,80 m kap	1998	12.6 %
Breedkap	6,40 m, enkel lucht	1990	20.5 %
	12,80 m, dubbel lucht	1990	20.5 %

¹⁾ De berekening van de ventilatiecapaciteit is uitgevoerd overeenkomstig de in ontwikkeling zijnde Europese kassenbouwnorm, met een gegeven luchtraamswaaihoek, gelijk aan twee maal de dekhelling.

 TNO Bouw 98

Figuur 3.25 Vergelijkingstabel met de ventilatiecapaciteit een zestal kastypen.

3.4 Energie-indicator (4): productie-energie

3.4.1 Hoeveelheid bouwmaterialen

Tot slot de productie-energie van een kas, ofwel de hoeveelheid energie nodig voor de productie van de toegepaste kassenbouwmaterialen. Aangezien na de sterkteberekening de draagconstructie van de kas precies bekend is, kan CASTA/Kassenbouw vrij eenvoudig de toegepaste hoeveelheid staal, beton, aluminium, glas, kunststof en eventuele andere bouwmaterialen berekenen in $[\text{kg/m}^2]$. Voor kassenbouwers is dat handig voor een hoeveelheden staat en voor een eerste kostprijscalculatie voor de te bouwen kas. Maar in dit geval zijn die hoeveelheden bouwmaterialen ook ergens anders voor gebruikt.



Figuur 3.26 Overzicht van de toegepaste hoeveelheid staal, beton, aluminium, glas van een kas $[\text{kg/m}^2]$, berekend met CASTA/Kassenbouw.

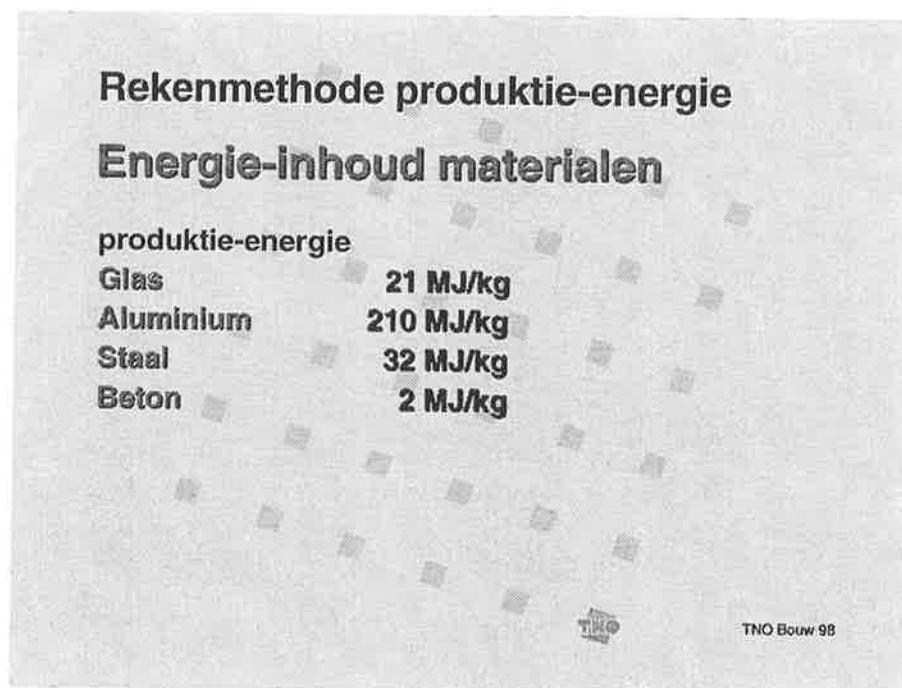
3.4.2 Energie-inhoud

Voor elk van de toegepaste bouwmaterialen is op basis van in de literatuur vermelde waarden de energie-inhoud vastgesteld in $[\text{MJ/kg}]$. Uit de getoonde tabel blijkt dat voor een aantal bouwmaterialen de energiewaarden afhankelijk van de wijze van produceren, nogal uiteen kunnen lopen. De energie-inhoud van de gebruikte bouwmaterialen in de kassenbouw is afgeleid uit gemiddelde waarden uit de literatuur, rekening houdend met de gebruikelijke productiewijze. Overigens moet de waarde van deze energie-indicator voor het milieu niet overdreven worden.

Indien wordt uitgegaan van een levensduur van een kas van 15 jaar, bedraagt de productie-energie ca. 4% van het totale energieverbruik voor de verwarming van een kas. Deze energie-indicator krijgt echter een groter aandeel indien er milieuvriendelijke kassen met een lager energieverbruik gebouwd gaan worden.

3.4.3 Rekenvoorbeelden productie-energie

Gelet op de tijd en het belang ook hier alleen de rekenvoorbeelden van de zes basis kastypen. Het zal u waarschijnlijk verbazen dat de Breedkapkassen behoorlijk wat minder productie-energie vergen dan de moderne Venlo-warenhuizen. Dat wordt veroorzaakt door de hoge energie-inhoud van aluminium, terwijl de Breedkapkassen voor een groter gedeelte dan Venlo-warenhuizen zijn opgebouwd uit staal. Overigens staat deze energie-inhoud van aluminium nog ter discussie, want door toenemende recycling en verbeterde productie-technieken daalt de energiebehoefte van aluminium gestaag. Bij de ontwikkeling van de Venlo-warenhuizen valt op, dat met steeds minder productie-energie (lees: bouwmaterialen) steeds grotere kassen, dat wil zeggen kassen met steeds grotere overspanningen gebouwd kunnen worden. Voorwaar een treffende illustratie van de produktontwikkeling in de Nederlandse kassenbouw.



Rekenmethode produktie-energie	
Energie-inhoud materialen	
produktie-energie	
Glas	21 MJ/kg
Aluminium	210 MJ/kg
Staal	32 MJ/kg
Beton	2 MJ/kg

Figuur 3.27 Overzicht van de energie-inhoud van de materialen glas, aluminium, staal en beton. De energie-inhoud van aluminium staat nog ter discussie.

Rekenmethode productie-energie

Zes basis kastypen

Kastype		Bouwjaar	Productie energie ¹⁾
Venlo	"classic"	1980	715
	2x3,20 m kap	1990	692
	2x4,00 m kap	1995	644
	2x4,80 m kap	1998	651
Breedkap	6,40 m, enkel lucht	1990	533
	12,80 m, dubbel lucht	1990	583

¹⁾ De hoeveelheid energie die nodig is voor de productie van de toegepaste kassenbouwmaterialen in MJ/m²

TNO Bouw 98

Figuur 3.28 Vergelijkingstabel met de productie-energie van een zestal kastypen.

4. VALIDATIE

Tot slot zal worden ingaan op de validatie van de uitkomsten. De validatie beperkt tot de twee belangrijkste energie-indicatoren: de lichtdoorlatendheid en de warmtedoorgangscoefficiënt, de U-waarde.

4.1 Energie-indicator (1): lichtdoorlatendheid

4.1.1 Praktijkmetingen DLV

Allereerst is de ontwikkelde rekenmethodiek voor het berekenen van de lichtdoorlatendheid van kassen getoetst aan lichtmetingen in de praktijk. Door de heer Geert-Jan van Dijk van DLV zijn lichtmetingen van zeven redelijk recente tuinbouwkassen uitgevoerd. De lichtberekeningen zijn uitgevoerd door collega Hans 't Hart van TNO Bouw. Het is niet toevallig dat de tabel wel vijf Breedkapkassen bevat en slechts twee Venlo-warenhuizen, omdat het onderzoek er juist ook op gericht was om de rekenmethodiek geschikt te maken voor Breedkapkassen. In de laatste kolom van Figuur 4.1 is het verschil tussen de gemeten en de berekende waarden. De eerste vier kassen zien er goed uit, met verschillen van maximaal 0,5%. De laatste drie kassen, en met name kas 5 en 6, geven echter grotere verschillen te zien. Gelukkig zijn daar eenvoudige verklaringen voor. De heer van Dijk van DLV denkt zelf dat er bij de lichtmeting van kas 5 iets niet helemaal goed

Validatie lichtdoorlatendheid			
Praktijkmetingen DLV			
	Tuinbouwbedrijf	gemeten	berekend
1.	Van Winden - Breedkapkas (lichtdoorlatendheid glas 90,5 %)	71 %	71,5 %
2.	Van Staalduinen - Breedkapkas (lichtdoorlatendheid glas 89,3 % - luchtramen waten 10 cm geopend)	73 %	72,9 %
3.	Van Schie - Breedkapkas (lichtdoorlatendheid glas 89,7 %)	72,4 %	72,9 %
4.	Van Dijk - Breedkapkas (lichtdoorlatendheid glas 90,3 %)	73,4 %	73,6 %
5.	Van Dijk - Breedkapkas (lichtdoorlatendheid glas 91,2 %)	70,5 %	72,9 %
6.	De Koning - Venlowarenhuize (lichtdoorlatendheid glas 91,3 %)	80-81 %	78,2 %
7.	Hooijmans - Venlowarenhuis (lichtdoorlatendheid glas 91,2 %)	79,5 %	78,6 %

Figuur 4.1 De ontwikkelde IDT-methode is getoetst aan lichtmetingen in de praktijk, uitgevoerd door DLV.

is gegaan. Een lichtdoorlatendheid van 70,5% is (zelfs) voor een 12,80 meter Breedkapkas aan de onwaarschijnlijk lage kant. Bij kas 6 heeft een oliecoating op het glas de validatie verstoord en bij kas 7 was sprake van een wit folie op de grond ten tijde van de metingen. Verder dient u nog te beseffen dat de bewolgingsgraad van de lucht, de tijd van de meting op de dag en op welke dag in het jaar de meting plaatsvindt, van grote invloed zijn op de lichtmetingen. Bovendien spelen toevallige omstandigheden als de reflectie van de bodem en/of het gewas, de vervuiling van het glas en de eventuele aanwezigheid van kleine, niet in de berekening meegenomen installaties een rol, zoals semi-transparante kunststof schermraden. In feite is een lichtmeting van een kas een momentopname die vrij makkelijk gemanipuleerd kan worden. Niet voor niets is het bij deskundigen bekend dat je voor hoge lichtcijfers moet gaan meten op een lichte maar bewolkte dag met veel diffuus licht. Kortom, deze validatie heeft met name opgeleverd, dat een lichtmeting vooral een precieze momentopname is van de lichtdoorlatendheid van een kas, maar dat voor een objectieve vergelijking van de lichtdoorlatendheid van verschillende kassen, de ontwikkelde energie-indicator veel consistentere cijfers oplevert en dus veel bruikbaar is.

4.1.2 Lichtberekeningen IMAG-DLO

De ontwikkelde lichtberekeningsmethode is ook vergeleken met lichtberekeningen die het IMAG-DLO uitvoert. Het IMAG voert die lichtberekeningen met name uit ten behoeve van studies naar het jaarverbruik aan energie afhankelijk van bijvoorbeeld het gewas, het kastype, de teeltomstandigheden en het gedrag van de tuinder. De heer Sjaak Bakker van IMAG-DLO zal u daar na de pauze het een en ander over vertellen. Helaas hebben we nog maar van één kas de lichtgetallen met

Validatie lichtdoorlatendheid	
Lichtgetallen IMAG-DLO	
■ Röhmkas Alltop PMMA-platen	
	Lichtdoorlatendheid Röhmkas
IMAG-DLO (Lichttransmissie PMMA 89 %)	71,2 %
TNO Bouw (Lichttransmissie glas 90 %)	71,8 %

Figuur 4.2 De ontwikkelde IDT-methode is ook vergeleken met lichtberekeningen van het IMAG-DLO voor kassen met kunststof platen als omhulling.

elkaar kunnen vergelijken. Namelijk van de Röhm-kas met de Plexiglas SDP-platen als omhulling, waarvan het IMAG vorig jaar een interessante studie heeft uitgevoerd. Uit deze tabel blijkt dat het IMAG voor die kas een lichtdoorlatendheid van 71,2% heeft uitgerekend en wij van 71,8%. Die overeenkomst wordt nog verbluffender als u beseft dat het IMAG heeft gerekend met een lichttransmissie van 89% zoals die geldt voor de genoemde kunststof PMMA-platen, terwijl TNO heeft gerekend met een lichttransmissie van 90% die wij standaard hanteren voor glas. De overeenkomst heeft genoemde heer Bakker van het IMAG in ieder geval de historische uitspraak ontlokt: "Blijkbaar is de natuurkunde in Delft toch hetzelfde als de natuurkunde in Wageningen". Overigens is de lichtdoorlatendheid van deze Röhm-kas nog aanmerkelijk te verbeteren door een optimalisatie van de platen zelf en van de profielen van het kasdek, maar dat is wél mede een gevolg van dit project, maar nu niet aan de orde.

4.1.3 Lichtstraalprogramma P.L.J. Bom B.V. Kassenbouw

Tot slot is de ontwikkelde lichtberekeningsmethode gevalideerd aan het lichtstraalprogramma van P.L.J. Bom B.V. Kassenbouw. Dat lichtstraalprogramma is in 1995 ontwikkeld door Maurice Bierhuizen van de Technische Universiteit Delft in het kader van een afstudeeronderwerp. Het lichtstraalprogramma gaat uit van een nauwkeurige driedimensionale CAD-tekening van de kas. In dat driedimensionale plaatje 'schiet' de computer duizenden lichtstralen uit alle mogelijke invalshoeken. Zodra een lichtstraal een voorwerp, bijvoorbeeld een tralieligger raakt, berekent de computer hoe deze straal wordt gereflecteerd. Hierbij



Figuur 4.3 Het lichtstraalprogramma van P.L.J. Bom BV gaat uit van een nauwkeurige driedimensionale CAD-tekening van de kas.

Validatie lichtdoorlatendheid							
Lichtstraalprogramma P.L.J. BOM B.V.							
Goottype	Dektype*	Luchtraamtype	Onderbouw	Licht	TNO	Vershil	
Ecotec Small	A-dek	Alu 2 ruits 1,20	8m std tralie verzinkt, 4,5 m vak	75,8%	75,3%	-0,5%	
Aquala	Nova	Alu 2 ruits 1,20	8m std tralie verzinkt, 4,5 m vak	75,5%	75,4%	-0,1%	
Lumenex	Lumenex	Alu 2 ruits 1,20	8m std tralie verzinkt, 4,5 m vak	75,5%	75,4%	-0,1%	
APD wit gec.	50 mm roe	Alu 2 ruits 1,20	8m std tralie verzinkt, 4,5 m vak	75,1%	74,7%	-0,4%	
PB goot	Breedkap	Eenzijdig 1,70	12,80 m raatgording, 4,5 m vak	72,7%	72,8%	+0,1%	
PB goot	Breedkap	Noklucht 1,70	12,80 m raatgording, 4,5 m vak	72,2%	72,2%	0 %	
PB goot	Breedkap	Noklucht 1,70	12,80 m zonder raat, 4,5 m vak	71,7%	72,0%	+0,3%	
AC goot verz.	40 mm roe	Alu 2 ruits 82,5	3,20 m ligger 70x40, 3,0 m vak	70 %	69,8%	-0,2%	

* glas met lichtdoorlaat 90%

TNO Bouw 98

Figuur 4.4 Vergelijkingstabel met uitkomsten van ontwikkelde energie-indicator lichtdoorlatendheid en met de berekeningsresultaten van het lichtstraalprogramma.

wordt rekening gehouden met de kleur, de ruwheid en de glans van het materiaal. Door breking en reflectie verdeelt één lichtstraal zich in vele duizenden kleinere lichtstraaltjes. In totaal worden er in één kas zo'n 100 miljard lichtstralen berekend. Het laat zich raden dat op deze manier een uiterst nauwkeurig getal voor de lichtdoorlatendheid van een kas berekend kan worden.

In de tabel van Figuur 4.4 zijn de uitkomsten van ontwikkelde energie-indicator lichtdoorlatendheid vergeleken met de berekeningsresultaten van het lichtstraalprogramma. Deze tabel is afkomstig uit de publikatie over het lichtstraalprogramma in het Vakblad voor de Bloemisterij in september 1995. De vergelijkende berekeningen zijn gezamenlijk uitgevoerd door de heer Michel Helderman van P.L.J. Bom B.V. en collega Hans 't Hart van TNO Bouw. Uit de uitkomsten is af te leiden dat de verschillen gering zijn. Het grootste verschil tussen lichtberekeningsmethodieken bedraagt slechts ca. <0,5% en is voor een belangrijk deel te wijten aan de vraag welke getallen voor de kleur, de ruwheid en de glans van diverse materialen ingevuld moeten worden. Maar beide programma's geven (van onder naar boven in de tabel), relatief dezelfde lichtgetallen aan de 'oude' Venlo-liggerbouw-kas, de drie Breedkapkassen, al dan niet met raatgording en/of eenzijdige luchting en de in 1995 moderne 8,0 meter Venlo-warenhuizen. Kortom, de ontwikkelde energie-indicator lichtdoorlatendheid heeft ook de vergelijking met het lichtstraalprogramma van P.L.J. Bom B.V. 'glansrijk' doorstaan. Wat ons betreft staat niets meer een wijd gebruik van de ontwikkelde lichtberekeningsmethode in de weg. Overigens kan het lichtstraalprogramma van P.L.J. Bom B.V. uitstekend

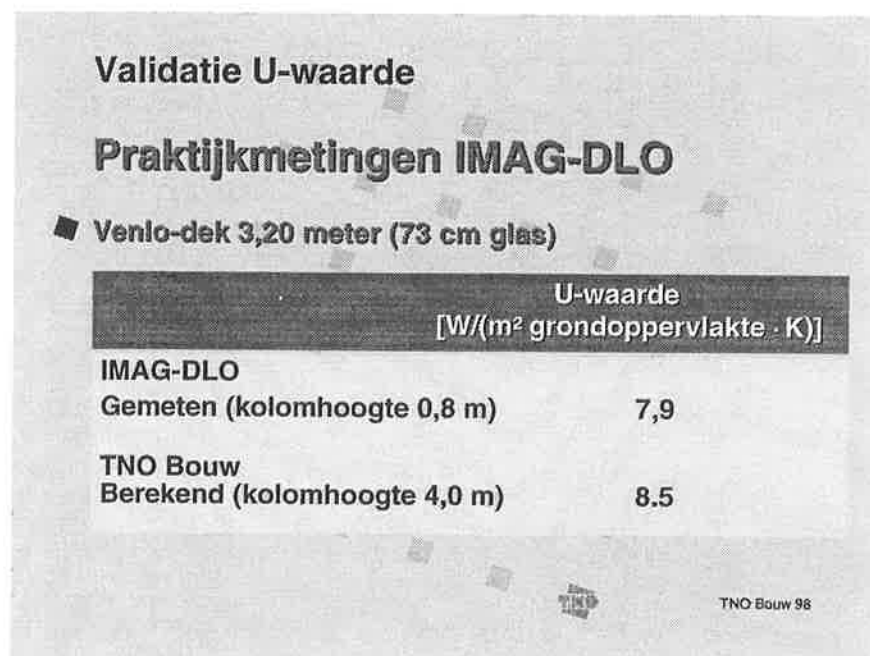
gebruikt worden voor het doorrekenen van kassen, die zich om één of andere reden niet zo goed lenen voor modellering in onze berekeningsmethodiek. Maar dan moet u wel even de tijd nemen. Want zowel de driedimensionale modellering als de berekening zijn een tijdrovende bezigheid voor mens en machine. In voorkomende gevallen, bijvoorbeeld het valideren van ons eigen programma voor nieuwe kastypen en -materialen, zullen wij er echter zeker gebruik van maken.

4.2 Energie-indicator (2): U-waarde

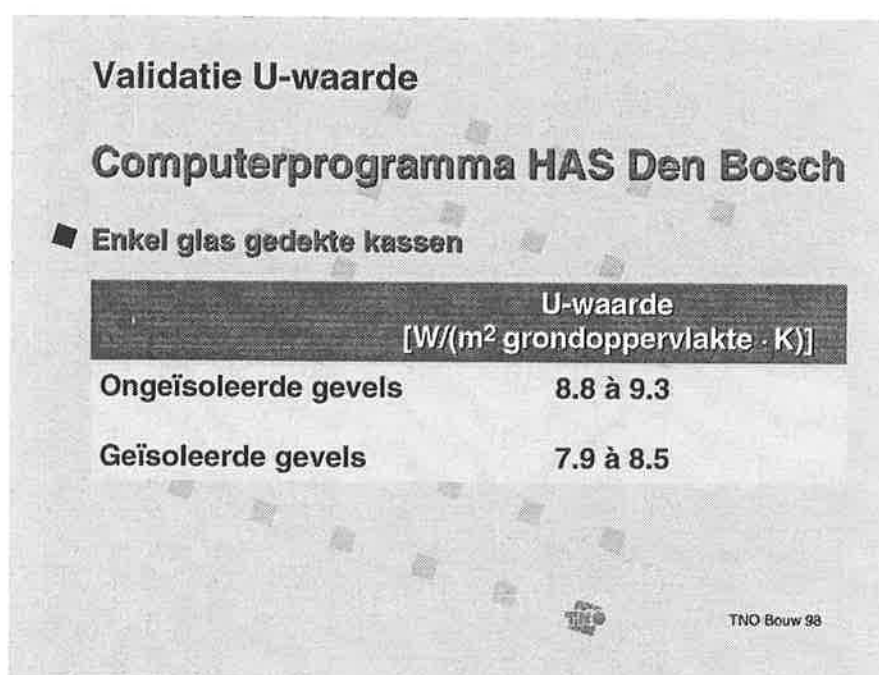
De U-waarde, de warmtedoorgangscoefficiënt, is de moeilijkste van de vier ontwikkelde energie-indicatoren om uit te rekenen. Maar gezien het belang is ook hier op zoek gegaan naar de 'waarheid in het midden'. Hierna zal duidelijk worden wat hiermee bedoeld wordt.



Figuur 4.5 Bij het IMAG-DLO zijn energiemetingen uitgevoerd met een meetkasje met een pothoogte van 80 cm.



Figuur 4.6 Het verschil tussen de gemeten en de berekende U-waarde kan eenvoudig worden verklaard door een hogere straling vanaf de bodem in de meetopstelling van het IMAG.



Figuur 4.7 De Hogere Agrarische School te Den Bosch gebruikt voor het analyseren van het energiejaarverbruik U-waarden van enkel glas gedekte kassen met geïsoleerde en ongeïsoleerde gevels.

4.2.1 Praktijkmeting IMAG-DLO

Allereerst is ook hier de ontwikkelde rekenmethodiek getoetst aan energiemetingen in de praktijk. Nu zijn goede energiemetingen schaars, maar reeds in 1977 en 1978 zijn, wederom bij het IMAG-DLO, goede energiemetingen uitgevoerd op verschillende glasdekken. Figuur 4.5 geeft een foto van de proefopstelling. Voor een enkel glas 3,20 meter Venlo-dek met 73 cm brede ruiten en een brede stalen goot is gemiddeld over de maanden oktober 1977 tot en met maart 1978 een U-waarde van $7,9 \text{ [W/(m}^2 \text{ grondoppervlak.K)]}$ gemeten. Voor ongeveer datzelfde dek, de precieze profielen waren niet meer bekend, berekenen wij een warmtedoorgang van $8,5 \text{ [W/(m}^2 \text{ grondoppervlak.K)]}$. Dat verschil kan echter zeer aannemelijk worden verklaard door een hogere straling vanaf de bodem in de meetopstelling van het IMAG. Een meetkasje met een poothoogte van 80 cm. is in dat opzicht wat gunstiger dan een kas met een kolomhoogte van 4,0 meter.

4.2.2 Computerprogramma HAS Den Bosch

De Hogere Agrarische School te Den Bosch heeft ook een computerprogramma ontwikkeld voor het analyseren van het energiejaarverbruik van tuinders. Als invoer gebruikt de HAS diverse getallen voor de U-waarden van enkel glas gedekte kassen, namelijk $8,8$ à $9,3 \text{ [W/m}^2 \text{ grondoppervlak.K]}$ voor kassen met ongeïsoleerde gevels en $7,9$ à $8,5 \text{ [W/m}^2 \text{ grondoppervlak.K]}$ voor kassen met geïsoleerde gevels. Theoretisch behoren de U-waarden voor kassen met geïsoleerde gevels het dichtst bij de U-waarde voor het kasdek alleen te liggen. Uit deze tabel blijkt dat onze rekenmethodiek een U-waarde voor het kasdek oplevert die aardig in het midden van deze bekende gegevens ligt. Vooral nog lijkt de ontwikkelde energie-indicator

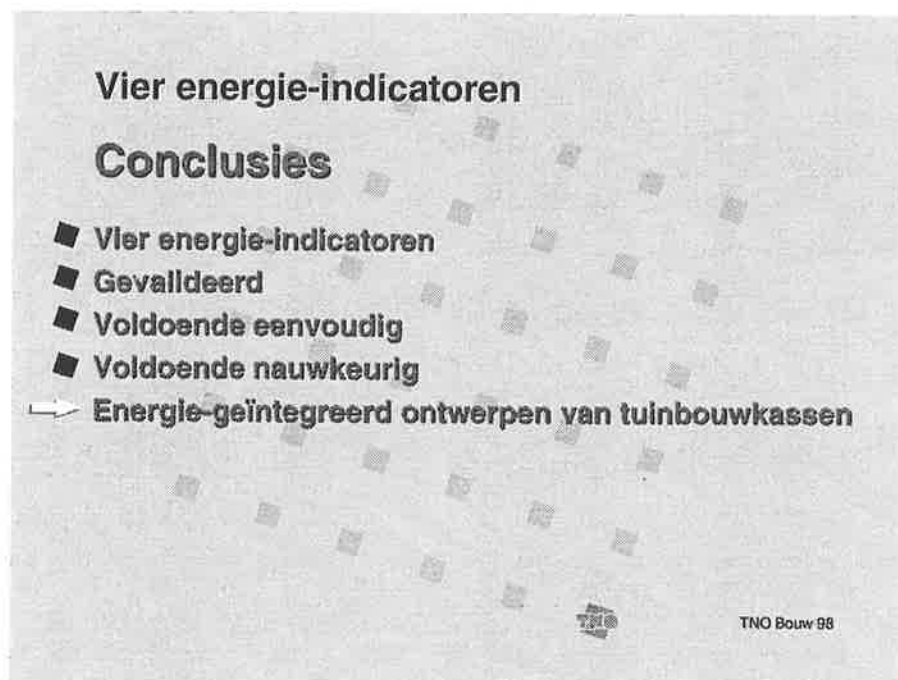
Validatie U-waarde	
Overzicht referentie-waarde	
■ Enkel glas gedekte kassen	
	U-waarde [W/(m ² grondoppervlakte · K)]
IMAG-DLO (gemeten)	7.9
TNO Bouw (berekend)	8.5
HAS Den Bosch (invoergegevens)	7.9 - 9.3

Figuur 4.8 De ontwikkelde rekenmethodiek levert een U-waarde op, die een goed gemiddelde weergeeft van de tot nu toe bekende gegevens.

een goede basis te bieden om de aanschaf en ontwikkeling van energie-zuinige kassen in de gewenste richting te stimuleren.

4.2.3 Samenvatting

Samengevat (b)lijkt onze rekenmethodiek een U-waarde op te leveren, die aardig in het midden van de bekende gegevens ligt. Bovendien zijn de verschillen redelijk verklaarbaar. Wel dient u te beseffen, dat dit slechts een zeer summier validatie van de berekeningsmethode voor de U-waarde is, maar meer bruikbare meet- of berekeningsresultaten van U-waarden van enkel glas gedekte kassen zijn er voor zover bekend gewoon niet. Dat laat onverlet dat de ontwikkelde energie-indicator een goede basis biedt om de aanschaf en ontwikkeling van energie-zuinige kassen en kasonderdelen in de gewenste richting te stimuleren.



Figuur 4.1 De ontwikkelde energie-indicatoren geven een goede stimulans voor de aanschaf en ontwikkeling van energie-zuinige kassen.

5. CONCLUSIES EN SLOTOPMERKINGEN

Tot slot enige samenvattende conclusies en slotopmerkingen. Het project heeft vier energie-indicatoren voor de objectieve beoordeling van enkel glas gedekte kassen opgeleverd, namelijk de lichtdoorlatendheid, de U-waarde, de ventilatie-capaciteit en de productie-energie. De twee belangrijkste energie-indicatoren lichtdoorlatendheid en U-waarde zijn met succes gevalideerd aan metingen en berekeningen van DLV, IMAG-DLO, P.L.J. Bom B.V. Kassenbouw en de Hogere Agrarische School Den Bosch. De ontwikkelde rekenmethodieken lijken inderdaad een goede middenweg tussen enerzijds voldoende eenvoudig voor een brede toepassing en anderzijds voldoende nauwkeurig om de gewenste objectieve informatie te kunnen leveren. Hierdoor bieden de ontwikkelde energie-indicatoren een goede basis om de aanschaf en de ontwikkeling van energie-zuinige kassen en kasonderdelen in de gewenste richting te stimuleren. Ons gezamenlijke doel, een moderne en milieuvriendelijke glastuinbouw, is daarmee weer een stap dichterbij gekomen.

Maar let wel, u moet het nog wel 'even' doen. U moet die energie-zuinige en milieuvriendelijke kassen ontwikkelen en bouwen. Daarbij wordt u alle succes van de wereld toegewenst en bieden wij u alle steun aan van de partijen die dit project mogelijk hebben gemaakt, namelijk NOVEM, het Landbouwschap wier taken in deze zijn overgenomen door het Produktschap Tuinbouw en de stichting STOREKA en natuurlijk niet vergeten TNO Bouw. Die partijen zijn ook dusdanig enthousiast dat het project zal worden voortgezet met het ontwikkelen van vergelijkbare rekenmethodieken voor kassen bedekt met alternatieve omhullingsmaterialen als gecoat glas, dubbel glas en kunststof kanaalplaten. Qua licht en energie biedt dat nog ongekennde mogelijkheden voor de Nederlandse glastuinbouw.

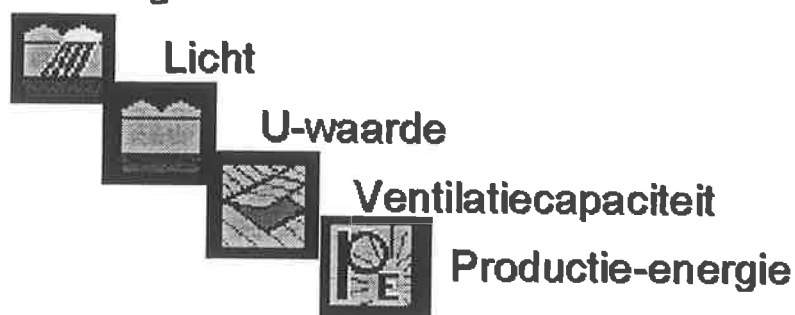
BIJLAGE A

Korte samenvatting van de demonstratie van het computer-programma CASTA/Kassenbouw 2.00 met de vier energie-indicatoren.

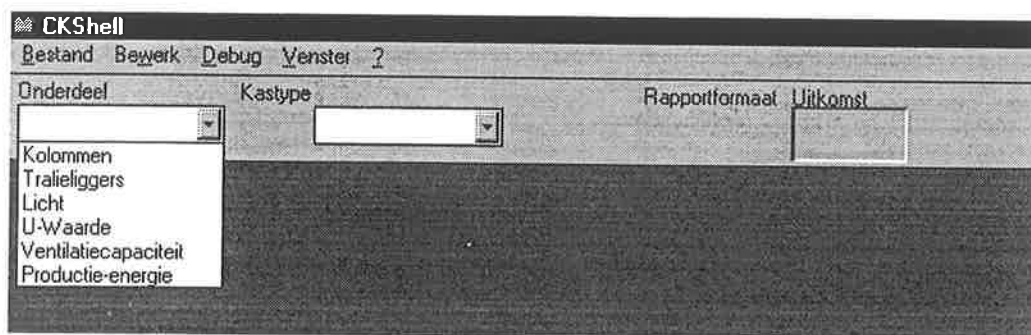
(door ing. H. 't Hart en ing. G. Verhoeff)

Demonstratie CASTA/Kassenbouw

■ Vier energie-indicatoren:



■ Conversie van DOS naar Windows



Figuur A.1

Met CASTA/Kassenbouw 2.00 kunnen behalve de sterkte onderdelen van een kas (kolommen, tralieliggers, schoorvakken, stabiliteitsverbanden en gevels) nu ook de vier energie-indicatoren berekend worden

Figuur A.2 Het invulscherm van het onderdeel 'Licht' van CASTA/Kassenbouw 2.00. In de rechter kolom kunnen de gegevens van het kasdek worden opgegeven. Een meegeleverde database met gegevens van kasdekken kan worden geraadpleegd.

Figuur A.3 Integreren van profielen, door bijvoorbeeld door de randafstand van de luchtingsbuis te minimaliseren, heeft een positief effect op de lichtonderschepping van de kasconstructie.

CKShell - DEMO2.DAT
Bestand Bewerk Debug Venster ?

Onderdeel: U-Waarde Kastype: Venlo-warenhuis Reken Rapport Rapportformaat Uitkomst: Invoer correct

Invo formulier

Geometrie		Kasdek	
Kapbreedte	4000 mm	Leverancier	CASTA
Aantal kappen	2	Kapbreedte	4000 mm
Vakmaat	4500 mm	Glasmaat	1125 mm
Kolomhoogte	4500 mm	Dekhelling	22.5 gr
Dekhelling	22.5 gr	Kasdek	STANDAARD
Spanthoogte	400 mm	U-waarde	Breedte
Spantverlaging	150 mm	Nok	0.279 W/mK 29 mm
Glasbreedte dek <=	1125 mm	Roede	0.251 W/mK 18 mm
Type mechaniek	rail	Goot	1.007 W/mK 93 mm
		Glas	7.158 W/m2K

Resultaat

U-waarde		Aandeel glas	
per m2 kasdek	7.3591 W/m2K	roede	2.9%
per m2 grondoppervlak	7.9469 W/m2K	goot	3.2%
		nok	0.9%

Figuur A.4 De gemiddelde U-waarde van de oudere type kasdekken van Venlo-warenhuizen met het bouwjaar van ca. 1985 tot 1990 is $8,2 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$.

CKShell - CLASSIC.DAT
Bestand Bewerk Debug Venster ?

Onderdeel: U-Waarde Kastype: Venlo-warenhuis Reken Rapport Rapportformaat Uitkomst: Invoer correct

Invo formulier

Geometrie		Kasdek	
Kapbreedte	3200 mm	Leverancier	CASTA
Aantal kappen	2	Kapbreedte	3200 mm
Vakmaat	4000 mm	Glasmaat	1000 mm
Kolomhoogte	3500 mm	Dekhelling	22.0 gr
Dekhelling	22.0 gr	Kasdek	3.20 classic 2
Spanthoogte	350 mm	U-waarde	Breedte
Spantverlaging	280 mm	Nok	0.501 W/mK 30 mm
Glasbreedte dek <=	1000 mm	Roede	0.251 W/mK 18 mm
Type mechaniek	schommel	Goot	1.962 W/mK 132 mm
		Glas	7.158 W/m2K

Resultaat

U-waarde		Aandeel glas	
per m2 kasdek	7.6535 W/m2K	roede	3.1%
per m2 grondoppervlak	8.2241 W/m2K	goot	7.5%
		nok	1.9%

Figuur A.5 De U-waarde van de huidige kasdekken van Venlo-warenhuizen is ca. $8,0 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$. Het aandeel van de goot op de U-waarde is flink afgenomen. Het aandeel van het glas op de U-waarde blijft echter groot. Naarmate er meer isolerende kasbedekkingsmaterialen worden gebruikt zal het aandeel van de profielen op de U-waarde van het kasdek toenemen en productontwikkeling stimuleren.

CKShell - DEMO2.DAT
Bestand Bewerk Debug Venster ?

Onderdeel: Ventilatiecapaciteit Kastype: Venlo-warenhuis Reken Rapport Rapportformaat: Test Uitkomst: Invoer correct

Invulformulier

Geometrie		Luchtramen op het dek	
Kapbreedte	4000 mm	In de middenvelden	
Aantal kappen	2	- glasbreedte	1125 mm
Vakmaat	4500 mm	- aantal ruiten	2
Aantal spanten	15	- opening	1200 mm
Dekhelling	22.5 gr	- zwaaihoek	45 gr
Kastlengte	100 m	- aantal	21
Glasbreedte dek <=	1125 mm	Langs de kopgevel	
Type mechaniek	rail	- glasbreedte	375 mm
		- aantal ruiten	2
		- opening	1200 mm
		- zwaaihoek	45 gr
		- aantal	2

Rekenresultaten

Ventilatiecapaciteit van het kasdek

Grondoppervlak van een kap	400 m ²
Ventilatieoppervlak	57 m ²
Capaciteit per kaplengte	14.25 %

Figuur A.6 Met het onderdeel 'Ventilatie-capaciteit' kan de lucht-opening per kaplengte bij elke gewenste zwaaihoek berekend worden. De berekening kan rekening houden met de invloed van de kopgevelluchtramen langs de kopgevel op het dek.

CKShell - DEMO2.DAT
Bestand Bewerk Debug Venster ?

Onderdeel: Ventilatiecapaciteit Kastype: Venlo-warenhuis Reken Rapport Rapportformaat: Test Uitkomst: Invoer correct

Invulformulier

Geometrie		Luchtramen op het dek	
Kapbreedte	4000 mm	In de middenvelden	
Aantal kappen	2	- glasbreedte	1500 mm
Vakmaat	4500 mm	- aantal ruiten	2
Aantal spanten	15	- opening	1200 mm
Dekhelling	22.5 gr	- zwaaihoek	45 gr
Kastlengte	100 m	- aantal	21
Glasbreedte dek <=	1500 mm	Langs de kopgevel	
Type mechaniek	rail	- glasbreedte	500 mm
		- aantal ruiten	2
		- opening	1200 mm
		- zwaaihoek	45 gr
		- aantal	2

Rekenresultaten

Ventilatiecapaciteit van het kasdek

Grondoppervlak van een kap	400 m ²
Ventilatieoppervlak	71 m ²
Capaciteit per kaplengte	17.74 %

Figuur A.7 Naarmate de glasbreedte toeneemt, in dit rekenvoorbeeld is gekozen voor 1500 mm breed glas i.p.v. 1125, neemt de 'Ventilatie-capaciteit' ook toe. Overigens worden de eventuele luchtlekverliezen niet berekend. Ook de invloed van luchtstromingen in de kas op de (praktische) entilatie-capaciteit zijn niet in dit model niet betrokken.

CKShell - DEMO.DAT

Bestand Bewerk Debug Venster ?

Onderdeel: Kartype:

Productie-energie: Venlo-warenhuis

Invulformulier

Geometrie		Onderbouw		Kasdek	
Kapbreedte	4000 mm	Kolom	RRBK180*50*4.0	Leverancier	CASIA
Aantal kappen	2	voetplaat	100*50*5.0	Kasbreedte	4000 mm
Vakmaat	4500 mm	geotplaat	178*50*5.0		
Kolomhoogte	4500 mm	Treke			
Aantal spanen	15	bovenrand	C50*25*8*3.0		
Dekhelling	22.5 gr	onderand	RHBK50*25*2.5		
Kaslangte	100 m	drukdiagonaal	RD14.0		
Funderingshoogte	300 m	trekdiagonaal	RD12.0		
Spanthoogte	400 m	diagonalen per kap	10		
Spanverlaging	150 mm	plaatsing 1e diagonaal	Druk		
Glasbreedte dek <=	1125 mm	geotvericaal	RHBK50*25*3.0		
Type mechaniek	rail	incliplaal	ST60*12.0		
		Luchtingsbuis	RB15*1.5		
		Opzetkolom	RHBK80*50*3.0		
		Fundatie	Gegevens		

Rekenresultaten

Energie voor de productie van de kas

Beton	17 MJ/m²
Staal	88 MJ/m²
Glas	220 MJ/m²
Aluminium	317 MJ/m²
Totale energie voor de productie van de kas	643 MJ/m²

Gewichten van de onderdelen

Staal onderbouw	2.76 kg/m²
Beton fundatie	8.37 kg/m²
Staal kasdek	0.00 kg/m²
Glas kasdek	10.49 kg/m²
Aluminium kasdek	1.51 kg/m²

Oppervlakte onderdelen onderbouw

	inwendig	uwendig
Kolom	1.18 m²	1.32 m²
Treke	2.11 m²	2.92 m²
Opzetkolom	0.04 m²	0.08 m²

Figuur A.8 Voor het bepalen van de 'Productie-energie' van de kas worden nauwkeurig de gewichten van de verschillende materialen per vierkante meter kas bepaald. Door deze gewichten te vermenigvuldigen met de vastgestelde productie-eenheden wordt de benodigde productie-energie per vierkante meter kas vastgesteld.