SW
FTW
N: 160507 H
T. 2000 09

Constructievormen en omhullingsmaterialen voor tuinbouwkassen

Inventarisatie en nieuwe mogelijkheden

Ing. D. Waaijenberg
Dr. S. Hoffmann

IMAG Rapport 2000-09
Hfl. 45,00
januari 2001

IMAG

CENTRALE LANDBOUWCATALOGUS
0000 0935 3372

WAGENINGEN UR

CIP-GEGEVENS KONINKLIJKE BIBLIOTHEEK, DEN HAAG

Waaijenberg, D., S. Hoffmann

Constructievormen en omhullingsmaterialen voor tuinbouwkassen – Inventarisatie en nieuwe mogelijk heden = Stuctural designs and covering materials – Inventory and new possibilities / D. Waaijenberg, S. Hoffmann. – Wageningen: IMAG. – (Rapport / Stichting Landbouwkundig Onderzoek, Instituut voor Milieu- en Agrotechniek; 2000-09).
Met lit.opg. – Met samenvatting in het Engels
ISBN 90-5406-185-5
NUGI 849
Trefwoorden: tuinbouwkassen, dekmaterialen, membraan constructies, pneumatische constructies, duurzaamheid

C 2000-09 IMAG
Postbus 43 – 6700 AA Wageningen
Telefoon 0317-476300
Telefax 0317-425670

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze opgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen of enig andere manier zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van het instituut.

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system of any nature, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the institute.

Abstract

The environmental impact of an agricultural production system has to be reduced appreciably in the future. The research program Sustainable Technological Development (Duurzame Technologische Ontwikkeling DTO) claims a reduction of the environmental impact with a factor 20 in 2040 compared to the situation in 1990. This inspired IMAG to develop a Sustainable Plant Production System (Duurzaam Gewas Productie Systeem DGPS).

Via a literature study an inventory of traditional structural shapes used as horticultural greenhouses is done. Membrane and pneumatic strutures out of the world of civil buildings are presented as well. Besides, the possibilities to apply advanced structural shapes for a new generation of horticultural greenhouses are examined. The suitability of transparent greenhouse coverings is also investigated. The gap between today's available material properties and demanded material characteristics gives an impulse for new developments.

In the scope of development of a Sustainable Plant Production System advanced greenhouse designs are examined. A feasibility study is carried out. The advantages and disadvantages of the different types of membrane and pneumatic structures used as horticultural greenhouses are illustrated. It can be concluded that advanced systems offer a lot of possibilities concerning better energy saving effects, being more environmental friendly, having a higher lighttransmission and contributing to better logistic. However, advanced structures are not without any difficulties. The DTO objectives can only be achieved if new advanced covering materials are developed.

Keywords: greenhouses, covering materials, membrane structures, pneumatic structures, sustainability

Voorwoord

In de toekomst moet de milieubelasting van agrarische productiesysteem aanzienlijk dalen. In het onderzoekprogramma Duurzame Technologische Ontwikkeling (DTO) wordt beoogd de milieubelasting in 2040 met een factor 20 terug te dringen ten opzichte van de situatie in 1990. Dit heeft aan IMAG een impuls gegeven om een zogenaamd Duurzaam Gewas Productie Systeem (DGPS) te ontwikkelen.

IMAG werkt aan een integraal ontwerp voor een Duurzaam Gewas Productie Systeem. In samenwerking met Proefstation Bloemisterij en Glasgroente (PBG) is een eerste ontwerp ontwikkeld en is de haalbaarheid van het betreffende productiesysteem uitgewerkt. In die haalbaarheidsstudie zijn de meest kritische componenten, te weten de klimatisering, de constructie, de energievoorziening en een globale milieukundige analyse onderzocht. Op basis van de haalbaarheidstudie is geconcludeerd, dat er geen onoverkomelijke wetenschappelijke en technische problemen bestaan om het beoogde duurzame gewasproductiesysteem verder te ontwikkelen en dat er voldoende perspectief is om de milieubelasting verder te verminderen. Vervolgens zijn door IMAG een aantal nieuwe kasontwerpen ontwikkeld en geschetst, zowel gebaseerd op de meer traditionele constructies als ook op geavanceerde constructies, zoals membraan- en pneumatische constructies. Ik hoop dat dit rapport bijdraagt aan innovaties op het gebied van de kassen voor beschermde teelten in Nederland.

Ir. A. A. Jongebreur
Directeur
IMAG BV Wageningen

Inhoud

ABSTRACT 3

VOORWOORD 4

INHOUD 5

1. INLEIDING EN PROBLEEMSTELLING 7

2. INVENTARISATIE BESTAANDE SITUATIE 9

2.1 TRADITIONELE CONSTRUCTIES 9
2.1.1 Kassen met niet-flexibele omhullingsmaterialen 10
2.1.2 Kassen met flexibele omhullingsmaterialen 10
2.1.3 Bijzondere kasconstructies 12
2.2 TRADITIONELE OMHULLINGSMATERIALEN 12
2.2.1 Glas 12
2.2.2 Kunststofplaten 13
2.2.3 Kunststoffolie 13

3. INVENTARISATIE NIEUWE MOGELIJKHEDEN 15

3.1 NIEUWE CONSTRUCTIES 15
3.1.1 Eisen te stellen aan nieuwe constructies 15
3.1.2 Membraan constructies 16
3.1.3 Pneumatische constructies 18
3.2 NIEUWE OMHULLINGSMATERIALEN 21
3.2.1 Eisen te stellen aan nieuwe omhullingsmaterialen 21
3.2.2 Membranen 22

4. TOEPASSING NIEUWE CONSTRUCTIES EN OMHULLINGSMATERIALEN 25

4.1 EERSTE ONTWERP VAN EEN DUURZAAM GEWAS PRODUCTIE SYSTEEM 25
4.2 PROGRAMMA VAN EISEN VOOR POTENTIËLE KASONTWERPEN 26
4.3 BESCHRIJVING POTENTIËLE KASONTWERPEN 30
4.4 BEOORDELING POTENTIËLE KASONTWERPEN 30
4.5 RANKING POTENTIËLE KASONTWERPEN 36

5. CONCLUSIES 37

LITERATUUR 38

SAMENVATTING 41

SUMMARY 42

BIJLAGE 43

1. Inleiding en probleemstelling

IMAG heeft het voortouw genomen om in samenwerking met PBG te werken aan de ontwikkeling van duurzame geïntegreerde productiesystemen voor de glastuinbouw, aangeduid als DGPS. Dit project sluit aan bij de doelstelling van het onderzoekprogramma Duurzame Technologische Ontwikkeling (DTO) van de ministeries van VROM, EZ, V&W, LNV en OC&W. Hierbij moet voldaan worden aan de maatschappelijke behoeften om door duurzame productiewijzen de milieubelasting (grondstoffen en energieverbruik) in 2040 met een factor 20 terug te dringen ten opzichte van de situatie in 1990 (Achten, 1999). In het project wordt onderzocht of (grotendeels) gesloten productiesystemen te ontwikkelen zijn, waarbij de input bestaat uit water, nutriënten, CO_2 en lokaal opgewekte, duurzame energie en waarin maximaal gebruik wordt gemaakt van natuurlijk zonlicht en zonnewarmte. Veel aandacht wordt tevens besteed aan de kwaliteit en veiligheid van de voortgebrachte producten, de maatschappelijke acceptatie van hightech productiesystemen en de veiligheid, de gezondheid en het welzijn van de werkenden.

Om deze ambitieuze doelstellingen te bereiken moeten grote doorbraken in de huidige kasconcepten gerealiseerd worden en met name op het gebied van de energiehuishouding. De aanwending van fossiele energie in beschermde ruimten heeft een zeer grote impact op de milieubelasting; 80-90% van de milieubelasting wordt hierdoor veroorzaakt. De energiebehoefte moet daarom drastisch omlaag worden gebracht. Toepassing van nieuwe kasconcepten en innovatieve kasdekmaterialen kunnen een essentiële bijdrage leveren aan de verlaging van de energiebehoefte. De bijdrage van de nieuwe kasconcepten dient te liggen op het ondersteunen van natuurlijke ventilatie, waardoor minder energie benodigd is voor een uniforme klimatisering in de kassen en op het verminderen van de constructiedelen. De bijdrage van de innovatieve kasdekmaterialen dient te liggen op verhoging van de thermische isolatiewaarde, zonder in te leveren op de lichttransmissie en daarnaast blijvend aandacht voor het verminderen van ondersteunende constructiedelen (zelfdragende omhulling).

Traditioneel bestaan kassen uit staal-, aluminium- en betonelementen. Ze zijn voorzien van vlakke, licht hellend geplaatste daksegmenten waarin ruiten zijn geplaatst, dan wel van gebogen dragende delen waarover het kasdek wordt gespannen. In het eerste geval wordt meestal glas toegepast, in het tweede geval een flexibele kunststof.

Bij toepassing van een niet-flexibel, bros kasdekmateriaal, zoals glas maar ook kunststofplaten, moet de vervorming van het kasdek worden beperkt. Hiervoor is meer ondersteuningsconstructie nodig. De hoeveelheid benodigde materialen heeft een ongunstige invloed op de LCA (life cycle analysis) en op de lichtonderschepping door de kasconstructie. Om hierin verbetering te brengen zijn andere kasconcepten nodig.
Een flexibel kasdekmateriaal zoals folie kan bij voldoende eigen sterkte aanzienlijke vervormingen opnemen. Zo hebben zelfs traditionele foliekassen het voordeel dat er minder constructiedelen nodig zijn, de kas lichter is en dus de lichtonderschepping lager is. De lichttransmissie van het kasontwerp is rechtstreeks afhankelijk van de lichttransmissie van het dekmateriaal. Verder bestaat de mogelijkheid om een dubbellaagse folie met lucht in de tussenruimte toe te passen, waardoor zowel de stabiliteit als ook de isolatiewaarde toenemen. Het grootste voordeel van foliekassen is: de lagere investeringskosten, maar de levensduur en sterkte van sommige huidige folies is nog beperkt.

Zogenaamde geavanceerde constructies bieden hier meer mogelijkheden. Ze kunnen worden onderverdeeld in membraan constructies en pneumatische constructies. Het kenmerk van een membraan constructie is dat een gespannen membraan een dragende functie vervult door het opnemen en afvoeren van krachten, die op het dakvlak werken. De onderconstructie kan bestaan uit kabels en stalen- en aluminiumprofielen. In pneumatische constructies worden de krachten op de constructie opgenomen en afgevoerd door drukverschillen tussen binnen- en buitenlucht. Over- of onderdruk in het hele gebouw of over- of onderdruk in constructieonderdelen opgebouwd uit dubbellaagse membranen leiden tot de stabiliteit van de constructie. Er zijn ook pneumatische constructies, welke alleen uit membranen bestaan geheel zonder een onderconstructie uit kabels of stalen- en aluminiumprofielen.

Door de toepassing van geschikte nieuwe kasdekmaterialen, wordt verwacht dat geavanceerde constructies betere mechanische (hoge treksterkte) en betere optische eigenschappen (hoge lichtdoorlatendheid) hebben, gecombineerd met een goede isolatiewaarde (hoge energiebesparing). Membraan- of pneumatische constructies bieden verder nieuwe mogelijkheden om de vormgeving en het inpassen van kassen in het landschap te verbeteren. Zo wordt het toepassen van zogenaamde membraan- of pneumatische constructies ook in de tuinbouw haalbaar. De eerste ervaringen zijn er al met kasachtige bouwsels in dierenparken en botanische tuinen.

Via een literatuurstudie is een inventarisatie uitgevoerd van traditionele constructievormen voor kassen. Daarnaast zijn de mogelijkheden onderzocht voor het toepassen van geavanceerde constructievormen uit andere sectoren van de bouw, zoals membranen en pneumatische constructies voor toekomstige kassen. Ook de geschiktheid van alle mogelijke transparante kasomhullingsmaterialen zijn onderzocht voor een Duurzaam Gewas Productie Systeem. Op basis hiervan zijn nieuwe kasontwerpen ontwikkeld, waarvan de haalbaarheid onderzocht wordt. Dit rapport vormt de neerslag hiervan.

2. Inventarisatie bestaande situatie

2.1 Traditionele constructies

Kasconstructies zijn over het algemeen lokaal ontwikkeld en sterk afhankelijk van het te gebruiken omhullingsmateriaal. In West- en Noord-Europa is glas het meest gebruikte omhullingsmateriaal voor kassen, terwijl dit voor de Zuid-Europese landen overwegend kunststoffolie is. Kunststofplaten komen in zowel West- en Noord-Europese landen als in Zuid-Europese landen voor, zij het dat het areaal gedekt met kunststofplaten gering is ten opzichte van de arealen gedekt met glas en kunststoffolie. In tabel 1 zijn aangegeven de arealen kassen en zgn. tunnels in een aantal Europese landen met hierbij het percentage wat met kunststof gedekt is (Elsner *et al.*, 1999a).

Tabel 1: Overzicht arealen tuinbouwkassen en folietunnels in diverse Europese landen met tevens het percentage kunststofgedekte kassen (Elsner et al., 1999a)

EU-landen	**Oppervlakte kassen en tunnels (in ha)**	**Aandeel kunststofgedekte kassen en tunnels (in %)**
Spanje	28350	99
Italië	26600	91
Nederland	10316	2
Frankrijk	10082	70
Portugal	4390	98
Duitsland (West)	4300	10
Griekenland	4200	95
Verenigd Koninkrijk	2180	15
België	1800	5
Denemarken	550	2
Zweden	400	14
Oostenrijk	350	20
totaal	**93518**	**74 = 68812 ha**

De ontwerpeisen voor kassen zijn talrijk, namelijk (Zabeltitz, 1999):

- hoge lichtdoorlatendheid;
- laag energieverbruik;
- mogelijkheid om het klimaat (temperatuur, vocht, CO_2) te sturen in de kas;
- voldoende ventilatiecapaciteit (bij natuurlijke ventilatie);
- beheersen van condensatie op het omhullende oppervlak en afvoeren condens (dit is vooral van belang bij kunststoffen);
- voldoende sterkte en veiligheid;
- optimale logistiek en bedrijfsvoering in de kas;
- lage bouwkosten en geringe jaarkosten;
- geringe milieubelasting;

Aangezien er grote verschillen bestaan tussen enerzijds de klimaten in West-, c.q. Noord-Europa en Zuid-Europa en anderzijds tussen de eisen te stellen aan kassen, die met glas of kunststoffolie omhuld worden dient een ontwerp van een kas afgestemd te worden op hoofdzakelijk de klimaatseisen en het te gebruiken omhullingsmateriaal. Een traditionele (glas) kas in West-Europa ziet er heel anders uit dan een traditionele (folie)kas in Zuid-Europa (bijvoorbeeld in Almeria in Spanje). Een glazen kas heeft overwegend een zadeldakvorm (twee symmetrische dakvlakken onder een helling), terwijl een foliekas veelal een ronde of gebogen dakvorm heeft.

2.1.1 Kassen met niet-flexibele omhullingsmaterialen

Kassen gedekt met glas behoren tot de categorie 'niet-flexibele constructies' en kunnen hoofdzakelijk onderverdeeld worden in Venlo-kassen en breedkap-kassen.
Venlo-kassen zijn ontwikkeld in de regio Venlo en zijn ontstaan vanuit de traditionele lage broeibakken, die omhoog gebracht werden, zodat men in de kas rechtop kon lopen. Venlo-kassen hebben slechts één ruit in de hoogte van goot naar nok, die vierzijdig gedragen wordt door een samenstel van (stalen of aluminium) roeden, nokprofiel en gootrandprofiel (Elsner, *et al.*, 1999b). Een verder kenmerk van Venlo-kassen is de aanwezigheid van onderbroken luchtramen aan weerszijden van de nok (figuur 1). De kapbreedte van een Venlo-kas was traditioneel 3,20 m, echter is dit thans geheel verschoven naar 4 m en 4,80 m. Meestal worden twee of drie kappen gedragen door een horizontale tralieligger, dus met overspanningen van 8 m, 9,60 m of 12 m (figuur 2). De onderdelen en maatvoering zijn sterk gestandaardiseerd bij dit type kas, waarbij ruitbreedtes gehanteerd worden van 1,125 m of 1,25 m (bij een glaslengte van 2,14 m). De onderlinge afstand van de spanten is 4,50 of 5 m. Met dit type Venlo-kassen zijn gemakkelijk zeer grote aanéén gesloten kasoppervlakken te bouwen in de orde van grootte van 5 tot 10 ha.
De belangrijke sterke punten van Venlo-kassen zijn: de betere lichtdoorlatendheid, de hoge mate van technische ontwikkeling (innovatie) en de lagere investeringsprijs per oppervlakte-eenheid.
Een zwak punt van de Venlo-kas blijft de mindere luchtingscapaciteit vergeleken met een breedkap-kas.

Breedkap-kassen hebben meerdere ruiten in de hoogte van goot naar nok, die gedragen worden door een samenstel van roeden, nokprofiel, gordingen en gootrandprofielen (figuur 3). Tevens hebben breedkap-kassen veelal doorgaande luchtramen over de totale lengte van de kas aan weerszijden van de nok. De kapbreedte is 6,40 m, 8 m, 9,60 m of 12,80 m. De spantafstand is 4,50 of 5 m. Ook breedkap-kassen zijn in zeer grote aanéén gesloten kasoppervlakken te bouwen. Het areaal nieuw gebouwde breedkap-kassen is in Nederland veel minder dan het areaal Venlo-kassen.
De sterke punten van een breedkap-kas t.o.v. een Venlo-kas zijn: meer luchtinhoud in de kas en betere ventilatiecapaciteit door de doorgaande luchtramen. Het voordeel van de grotere luchtinhoud bij breedkap-kassen wordt minder zwaarwegend, door de toenemende hoogte van de Venlo-kassen (goothoogtes tot 5 m), waardoor de luchtinhoud van Venlo-kassen enorm is toegenomen.

Indien kunststofplaten van de materialen PMMA (polymethylmethacrylaat) en PC (polycarbonaat) worden toegepast, dan worden over het algemeen dezelfde constructiesystemen gebruikt als bij het omhullingsmateriaal enkelglas. Alleen met het materiaal PC zijn ook zeer goed gebogen dakvlakken (met een minimum radius) te maken, aangezien deze platen relatief gemakkelijk te buigen zijn. Meestal betreft het hier breedkap-kassen, omdat de grotere beschikbare plaatlengte hierbij in het voordeel is t.o.v. de maat van standaard glasruiten. Enkelwandige platen komen sporadisch voor in Nederland en wel in de vorm van golf- of trapeziumvormige platen (figuur 4). Het areaal kassen met kunststofplaten vormt in Nederland een minderheid t.o.v. de kassen gedekt met enkelglas (Briassoulis *et al.*, 1997a en 1997b).

2.1.2 Kassen met flexibele omhullingsmaterialen

Er komen in Nederland, maar vooral binnen Europa, een groot scala aan typen en maatvoeringen van kassen en tunnels met flexibele omhullingen voor. Een globale onderverdeling kan zijn:
- lage kunststoftunnels, waarin men niet rechtop kan lopen;
- kunststoftunnels, waarin men wel rechtop kan lopen;
- kunststofkassen.

Lage kunststoftunnels worden gebruikt om gewassen te beschermen tegen lage temperaturen, wind , regen, hagel, sneeuw, vogels en insecten en om de plantengroei te versnellen en te verbeteren. De folie wordt gedragen door bogen, meestal bestaande uit stalen buizen, die in de grond geprikt worden. De folie wordt ter bevestiging ingegraven in de grond (figuur 5). Deze lage tunnels worden in het algemeen geventileerd door het omhoog schuiven van de kunststoffolie ter plaatse van de bogen. Meestal worden ze voor slechts één seizoen gebouwd en worden ze niet additioneel verwarmd.
De sterke punten zijn: het zijn simpele constructies met lage bouwkosten.

De zwakke punten zijn: geen verwarming, problemen met de ventilatie en lastig om het gewas te bewerken (Zabeltitz, 1999)

Kunststoftunnels hebben ook ten doel om gewassen te beschermen tegen de genoemde invloeden, echter is het werken met deze tunnels veel eenvoudiger door de grotere loophoogte, de constructie kan degelijker gemaakt worden en de ventilatie is ook beter te realiseren. Figuur 6 toont twee typische vrijstaande tunnels met hun afmetingen. Er worden zeer veel verschillende doorsnedenvormen en afmetingen aangeboden op de markt en met verschillende luchtingssystemen. Een tunnel met doorgaande zijluchting is te zien in figuur 7. Om de ongunstige hoogte van de loopruimte langs de kanten te beperken en om gemakkelijker gevelventilatie aan te kunnen brengen worden de tunnels ook met verticale gedeeltes van de zijgevels uitgevoerd (over een hoogte van 1 à 1,50 m).

In het algemeen worden voor de spanten van deze tunnels gebogen stalen buizen gebruikt, die via een gestorte betonfundering of een schroeffundering worden verankerd in de grond. De bogen worden onderling gekoppeld door lengtebuizen. Voor de stabiliteit in de lengterichting zorgt windverband (windschoren). Alle stalen buizen e.d. zijn thermisch verzinkt om vroegtijdig roesten te voorkomen. De afstand tussen de bogen onderling varieert tussen 2 m of 1,50 m.

De constructie voor folietunnels e.d. kan momenteel goed qua sterkte berekend worden door de regels te volgen gegeven in de 'Richtlijn kassen met flexibele omhullingen' (Waaijenberg, 1995). Tussen de vrijstaande tunnels (zgn. singlespan) wordt een vrije ruimte aanbevolen van 2 m i.v.m. eventuele zijdelingse sneeuwbelasting op de folieomhulling en om het accumuleren van regenwater tussen de tunnels te voorkomen (waardoor het terrein tussen de tunnels vaak te drassig wordt).

Ventilatie van deze tunnels kan op verschillende manieren plaatsvinden, namelijk via de kopgevels (deur openen of wegklappen gevelgedeelte), via de langsgevels (door oprollen of wegschuiven van de folie) en via nokventilatie (omhoog bewegen heframen of draairamen) (Waaijenberg, 2000).

De sterke punten van de kunststoftunnels zijn: de relatief simpele constructie, de lage bouwkosten en de goede windbestendigheid.

Als zwakke punten zijn te noemen de ronde doorsnedevorm, waardoor het bewerken van de grond in de tunnel langs de kanten lastiger is. Hierdoor ontstaat ook verlies van teeltruimte. Verder is het niet mogelijk om meerdere tunnels naast elkaar tot één aanéengesloten oppervlakte te koppelen. Wel worden tunnels in de breedterichting gekoppeld tot maximaal twee, drie of vier aanéengesloten tunnels (twin, trio of quatro-tunnels). Ook zijn er problemen met het ontstaan op en afvallen van condensdruppels van de omhulling (door de ronde vorm) op het gewas.

Er wordt gesproken over **kunststofkassen**, zodra er sprake is van aanéengesloten kassen (zgn. multispan), waarbij de bogen gemonteerd worden op goten, die op een hoogte van 2,50 tot 4 m boven maaiveld worden aangebracht en waarbij zowel kop- als langsgevels verticale vlakken zijn (figuur 8). Voor de onderconstructie worden vaak standaard constructies, bestaande uit kolommen met tralieliggers, uit de glazen kassenbouw genomen. Ook wordt wel gewerkt met een samenstel van kolommen met trekstangen en schoren voor de onderbouw. De dakvorm bij kunststofkassen is vaak rond of gebogen, omdat het spannen van kunststoffolie dan gemakkelijker kan plaatsvinden. Ook zadeldakvormen komen echter voor, zoals bij de zgn. foliepatentkas. De constructie van kunststofkassen kan evenwel op sterkte worden berekend volgens de 'Richtlijn kassen met flexibele omhullingen' (Waaijenberg, 1995).

Ventilatie van foliekassen kan op dezelfde manier plaatsvinden als genoemd onder kunststoftunnels, echter vindt ventilatie vaker plaats via luchtramen in het dek of situaties waarbij dekhelften kunnen scharnieren om de nok (figuur 8).

De sterke punten van foliekassen zijn:

- goedkoper dan glazen kassen;
- gemakkelijk telen door doorlopende kasruimte;
- klimaatsregelingen e.d. vergelijkbaar met glazen kassen;
- geschikt om installaties e.d. op te hangen aan de constructie (aan de tralieliggers e.d.).

De zwakke punten zijn:

- beperkte levensduur van de (gangbare) folie door veroudering, dus regelmatig folie vervangen;
- condensatieproblemen bij kunststoffolies.

2.1.3 Bijzondere kasconstructies

Naast de beschreven traditionele constructies voor kassen en tunnels zijn er nog een aantal bijzondere constructies te noemen, namelijk de zgn. cabrioletkassen, de regenkappen en de schaduw- en schermhallen.

Cabrioletkassen zijn kassen, waarbij vrijwel de gehele kap geopend kan worden (Waaijenberg, 1990). Dit om maximale ventilatie te verkrijgen voor het afharden van gewassen. Er zijn systemen, waarbij de dakhelften scharnieren ter plaatse van goot en nok en die gelijktijdig worden weggeschoven tot een bijna verticaal vlak (figuur 9) of systemen, waarbij de kunststoffolie wordt opgerold of weggeschoven in het dek (figuur 10). Ook zijn de laatste tijd systemen ontwikkeld, waarbij complete glasgedekte dakhelften scharnieren om de goot (figuur 11).

Regenkappen geven alleen beschutting van gewassen als een paraplu boven het gewas, waarbij de gevels open blijven. Deze regenkappen geven bescherming tegen directe regen en hagel (Waaijenberg en Denkov, 1991). Een voorbeeld van een dergelijke constructie is aangegeven in figuur 12.

Schaduw- en schermhallen worden gebruikt om gewassen te beschermen tegen zonverbranding, windinvloed, zware regen en hagel, nachtvorst en (grote) insecten en vogels. Zij hebben vaak een rechthoekige doorsnede en de gevels en het (platte) dak zijn beide bekleed met geweven of geknoopte netten. Als de netten permanent worden bevestigd spreekt men meestal over schaduwhallen, terwijl men over schermhallen spreekt als de netten in het dak wegschuifbaar zijn, zoals bij beweegbare schermen in kassen. De netten zijn permeabel, dus worden ze geventileerd door de netten heen. De effectiviteit van de ventilatie en tevens het afremmen van de windsnelheid is bij dit soort hallen afhankelijk van de dichtheid van de netten (Holsteijn en Bot, 1990). Figuur 13 geeft een voorbeeld van een schaduw-, c.q. schermhal.

2.2 Traditionele omhullingsmaterialen

2.2.1 Glas

Thans is verreweg het grootste deel van het tuinbouwareaal in Nederland van ca. 10.600 ha (LEI-CBS, 2000) gedekt met enkelglas. De transmissie voor loodrecht opvallend licht van het enkelglas is ca. 91%, dat van diffuus licht ca. 83%. Het enkelglas heeft als voordelen: een lange levensduur en een lage prijs (ca. 10 NLG.m^{-2}). Nadelen zijn de relatief hoge reflectieverliezen, de geringe isolatiewaarde, de breukgevoeligheid en het hoge gewicht.
Gedurende een aantal jaren is op beperkte schaal dubbelglas toegepast als omhullingsmateriaal voor kassen. Naast nadelen, zoals hoge kosten en een hoog eigen gewicht was hierbij het belangrijkste nadeel: het grote lichtverlies van ca. 10% bij toepassing van dit dubbelglas vergeleken met enkelglas met een dikte van 4 mm (Landbouwschap, 1984).
De lichttransmissie van glas is te verhogen door het toepassen van antireflectiecoatings zoals binnenkort zal worden toegepast in de "Kas van de Toekomst" op de Floriade 2002 (Derikx *et al*, 2000). Deze coatings zorgen voor een geleidelijke overgang van de brekingsindex tussen lucht en glas, waardoor het lichtverlies door reflectie (loodrecht invallend) kan worden teruggebracht van ca. 8% tot ca. 1%. Een nadeel is echter de hoge kosten die verbonden zijn aan het toepassen van deze coatings.
Door het kiezen van een andere zandsoort bij de productie van glas, kan glas worden gefabriceerd dat, in tegenstelling tot gewoon floatglas, een deel van de UV-B straling doorlaat, het zgn. Planilux Diamant glas (Vegter, 2000). Deze nieuwe UV-B doorlatende glassoort kan eraan bijdragen om korte en compacte sierplanten te telen, de kleur en smaak van bepaalde bloemen en groenten te verbeteren en allerlei plantsoorten af te harden. Verder heeft dit glas een hogere totale lichttransmissie (Hoffmann, 1999 en 2000a).
Een mogelijkheid voor het toepassen van glasruiten met zeer grote afmetingen op een kas biedt het zgn. geharde glas (zoals bij autoruiten). Dit type glas zal ook toegepast worden in de 'Kas van de Toekomst' voor de Floriade 2002 (Derikx *et al*, 2000).

In het algemeen voldoet glas op grond van zijn gewicht niet aan de eisen van een zo laag mogelijk materiaalverbruik in verband met de berekening van de 'life cycle analysis (LCA). Bovendien zijn de mogelijkheden van het gericht veranderen van de optische glaseigenschappen zeer beperkt.

2.2.2 Kunststofplaten

In tegenstelling tot glas kunnen de mechanische en optische eigenschappen van kunststoffen in principe naar wens worden veranderd. Als niet-flexibele kunststoffen worden de volgende materialen toegepast in tuinbouwkassen: PVC (polyvinylchloride), glasvezelgewapend polyester (GRP), PMMA (polymethylmethacrylaat) en PC (polycarbonaat), meestal in de vorm van vervormde kunststofplaten (zie figuur 4). PC heeft als voordelen t.o.v. PMMA dat het materiaal slagvaster is en minder brandgevaarlijk. PMMA heeft over het algemeen een betere lichtdoorlatendheid. Het materiaal PVC is in het verleden op beperkte schaal toegepast voor kassen (Maxolux), echter gaf dit grote problemen bij hagelbelasting (schade) en ook uit milieuoverwegingen is PVC geen geschikt materiaal.
De meest toegepaste materialen zijn dubbelwandige kanaalplaten van de materialen PMMA en PC. Hierbij heeft PMMA (in een plaatdikte van 16 mm) de hoogste lichtdoorlatendheid, namelijk ca. 90% voor loodrecht invallend licht, terwijl dit cijfer voor een vergelijkbare plaat van PC ca. 80% is. PC heeft als duidelijke voordelen het betere gedrag bij brand (vlamdovend) en de hogere slagvastheid (hagelbestendigheid). De investering van PMMA-platen is veel hoger dan bij glas (ca. 50 NLG.m^{-2}). De warmte-isolatie is aanzienlijk beter dan die van enkelglas, namelijk <3 W.m^{-2}.K^{-1}.
Enkelwandige platen kunnen bestaan uit de materialen PMMA (acrylaat), PVC (polyvinylchloride) en glasvezelgewapend polyester (GRP). Laatstgenoemde platen (meestal in de vorm van golfplaten) moeten een polyvinyl-fluoride coating hebben om het polyester te beschermen tegen snelle veroudering (vergelen). Door de aanwezige glasvezels in de platen is de lichtdoorlatendheid van dit materiaal onvoldoende voor lichtgevoelige gewassen, bovendien is het materiaal minder glad waardoor de platen eerder vuil worden.
Het toepassen van lichtverhogende coatings is ook op kunststoffen mogelijk. Dit staat echter op flexibele kunststoffen nog in de kinderschoenen, terwijl bij het toepassen op harde kunststoffen de kosten een belangrijke rol gaan spelen. Bij alle kunststoffen kunnen additieven, stoffen die door het basismateriaal worden gemengd, hun waarde bewijzen bij het verbeteren van het verouderings- en condensgedrag. Tevens kan invloed worden uitgeoefend op de warmtetransmissie en de fotoselectieve eigenschappen van het materiaal in het zichtbare en infrarode (IR) gebied van het spectrum.

2.2.3 Kunststoffolie

De meest toegepaste flexibele kunststoffen in de tuinbouw zijn LDPE (low-density polyethyleen), PE-IR (polyethyleen infrarood) en EVA (ethyleenvynilacetaat). De prijs van deze materialen is laag (ca. 1,00-1,40 NLG.m^{-2}). De transmissie voor loodrecht opvallend licht is vergelijkbaar met die van enkelglas, namelijk 86-90%. In het buitenland, met name in Japan wordt veel PVC-folie toegepast. In het verleden is ook polyesterfolie (PET) toegepast als kasomhullingsmateriaal (Melinex).
Een hogere lichttransmissie van kunststoffolie is te bereiken, bijvoorbeeld door toepassing van andere materialen zoals ETFE (etheentetrafluorethyleen) (95%), TPU (thermoplastisch polyurethaan) (92%) en PVDF (polyvinylideendifluoride) (93%). Een nadeel van deze kunststoffen is echter de hogere prijs (ETFE en PVDF ca. 25 NLG.m^{-2}, TPU ca. 12 NLG.m^{-2}). Met deze materialen is het mogelijk ze dubbellaags toe te passen (waardoor de isolatie beter wordt) en nog steeds een relatief hoge lichttransmissie te bereiken. Ook hebben ze een lange levensduur (> 10 jaar). Zelfs als deze folies dubbel worden uitgevoerd zal naar verwachting de LCA (life cycle analysis) naar verhouding gunstig afsteken tegen het materiaal glas, omdat de hoeveelheid materiaal slechts een fractie is van die van glas.

3. Inventarisatie nieuwe mogelijkheden

3.1 Nieuwe constructies

De laatste jaren zijn incidenteel als experiment geavanceerde constructievormen voor kassen gebouwd. Deze zijn gebaseerd op het principe van membraan constructies, pneumatische constructies, dan wel combinaties van beide. Deze constructies worden in deze paragraaf besproken. Ook worden een aantal geavanceerde constructies besproken, die in andere sectoren van de bouw gebruikt zijn en die mogelijk perspectief bieden voor tuinbouwkassen.

3.1.1 Eisen te stellen aan nieuwe constructies

Eigenschappen, die van belang zijn bij het ontwerpen van kasconstructies zijn in het algemeen:
- laag energieverbruik (maximale isolatie van de kas, minimale oppervlakte van het omhullingsmateriaal, minimale warmtedoorlatendheid van het dekmateriaal)
- hoge lichtdoorlatendheid (minimum aantal constructiedelen, minimale afmetingen van constructiedelen, hoge lichttransmissie van het dekmateriaal)
- voldoende ventilatie efficiëntie (20%-25% van de kasgrondvlak) en een groot kasvolume voor optimaal kasklimaat
- voldoende sterkte van de constructie (belasting door wind, sneeuw, gewassen en installaties)
- minimale materiaalinzet, gebruik materialen met gunstige LCA
- minimale kosten (investering, onderhoud)
- repeteerbaarheid en grote overspanningen (efficiëntie en logistiek)

Bij het ontwerpen van kassen met flexibele kunststof omhullingsmaterialen moet bovendien aan volgende punten aandacht besteed worden:
- goede bevestiging van het dekmateriaal (profielen)
- voldoende voorspanning van het dekmateriaal (geen klapperen van het dekmateriaal bij wind)
- vermijden van het directe contact tussen metalen constructiedelen en het dekmateriaal (geen beschadiging door hoge temperaturen en scherpe uitsteeksels)
- makkelijk en snel installeren en vervangen van het dekmateriaal
- vermijden van afvallende condensdruppels (geen horizontale vlakken in het kasdek, anti-condens eigenschappen van het dekmateriaal)

Bij het ontwerpen van nieuwe kasconstructies is een van de belangrijkste punten het reduceren van het energieverbruik gecombineerd met een hoge lichtdoorlatendheid van het hele ontwerp. Vanuit de milieueisen wordt gestreefd naar een minimale materiaalinzet. Bovendien zijn voor een efficiënte logistiek grote overspanningen van een kas zonder storende constructiedelen gewenst. De repeteerbaarheid van een kasontwerp is daarom een eis. Geavanceerde constructies, zoals al bekend uit de civiele bouwwereld, kunnen hier voordelen bieden in vergelijking met traditionele constructies en zijn dus ook voor de tuinbouwsector denkbaar. De eerste ervaringen zijn er al met dierenparken en botanische tuinen. Textiel-constructies worden meer en meer in de civiele bouwwereld toegepast als het gaat om het overkappen van bijvoorbeeld sportstadions en zwembadenProblematisch zijn echter nog de sterkteberekeningen van dit type geavanceerde constructies (ook pneumatische constructies). Dergelijke constructies moeten driedimensionaal worden berekend waarbij als eerste stap het evenwicht van het flexibele dek moet worden bepaald, voordat de belastingen en de sterkte van de constructie kunnen worden berekend. Dit is alleen mogelijk met een eindig elementen programma, zoals Technet Easy, Birdair MCM, Forten etc.

3.1.2 Membraan constructies

Bij traditionele constructies, zoals kassen gedekt met glas en kunststofplaten wordt de omhulling meestal in rechte vlakken toegepast, waarbij de optredende belasting op de constructie gedragen wordt door spanten samen met gordingen, nokprofielen, gootprofielen e.d. Flexibele materialen, zoals kunststoffolies worden vaak in gebogen vlakken toegepast, omdat een belasting loodrecht op een gespannen folie in vlakke toestand vaak leidt tot grote vervormingen van de folie, doordat gespannen folie alleen in staat is om trekkrachten op te nemen en geen drukkrachten, zoals bij plaatmaterialen. Ook ontstaan snel trillingen onder windbelasting van een vlak opgespannen folie (het klapperen van de folie).
Een alternatieve methode voor het toepassen van folies is het buigen van het folieoppervlak in twee of meer richtingen, waarbij de belasting in dat geval afgevoerd wordt in twee of meer richtingen (Schock, 1997). We krijgen dan te maken met een driedimensionale constructie, waarbij door het voorspannen van de folies via kabels en profielen naast trekkrachten ook drukkrachten opgenomen kunnen worden. We spreken dan van een membraan constructie. Met dit soort draagconstructies met membranen zijn grote vrije overspanningen te maken met relatief weinig constructieonderdelen, waarbij de totale dakconstructie licht in gewicht kan zijn met een grote lichtdoorlatendheid (door minder constructiedelen). Dit biedt mogelijk perspectief voor tuinbouwkassen.
Samenvattend zijn de sterke punten van een membraan constructie:

- korte bouwperiode en snelle opbouw
- grote kolomvrije ruimtes overkappen met zeer weinig (lichtonderscheppende) constructiedelen;
- relatief goedkope constructie met over het algemeen een attractieve vormgeving;
- goede bescherming tegen warmtestraling door de zon in landen met een heet klimaat door de juiste keuze van membraan-materiaal met een hoge warmtereflectie;
- goede bestendigheid tegen aardbevingen door de geringe massa

Als zwak punt is te noemen:

- een geschikte, voldoende sterke folie met goede eigenschappen t.a.v. lichtdoorlatendheid, isolatie en condensgedrag moet nog ontwikkeld worden.

3.1.2.1 Basisprincipes

Traditionele draagconstructies met kolommen, spanten e.d. en met niet-gebogen stijve vlakken hebben in principe drie ondersteuningspunten nodig voor de stabiliteit (een kruk met drie poten is stabiel). Dit in tegenstelling tot een membraan constructie, die in principe minimaal vier punten nodig heeft voor stabiliteit. Figuur 14 toont de opbouw van een dergelijke basisconstructie met een gespannen folie, twee kolommen en gespannen kabels (Berger, 1996). Dit leidt tot een zogenaamde 4-punts constructie, zoals bij een zeil van een zeilboot.
Figuur 15 geeft het krachtsverloop weer van deze membraan constructie als er een voorspankracht P wordt aangebracht in de kabels bij één van de bevestigingspunten. Membraan constructies zijn voorgespannen en hebben een kromming o.i.d. om het fladderen van de folie onder windbelasting te voorkomen. Tevens dient deze kromming om regenwater en sneeuw adequaat af te kunnen voeren. Door combinatie van krommingen en ondersteuningsconstructies zijn oneindig veel equilibria vormen te maken, zoals bijvoorbeeld een dak golvend tussen hoge en lage kabels, een kegelvorm met een hoge puntsondersteuning (in de vorm van een stalen ring o.i.d.), een parapluvorm of een koepel met puntsondersteuningen door schotels e.d.
Er kan onderscheid gemaakt worden tussen lineaire en radiale constructies. Lineaire constructies hebben minimaal vier steunpunten nodig. Ze worden ondersteund door een netwerk van kabels. Figuur 16 toont een aantal mogelijke vormen van lineaire membraan constructies. Het geometrische element is hier een vierzijdig trapezium. Figuur 17 toont een aantal mogelijke radiale membraan constructies. Radiale constructies worden anders als lineaire constructies ondersteund door hoofdkabels en ringkabels. Als één van de voordelen van een radiale constructie kan genoemd worden dat de uitwendige krachten overgebracht worden naar een ring, bijvoorbeeld op de hoogte van bovenkant gevel, die evenwicht maakt met deze krachten. In dat geval hoeven de krachten niet via kabels en dergelijke naar de grond gebracht te worden (Berger, 1996). Hierdoor zijn ook complexere vormen mogelijk. De bevestigingen zijn minder duur, maar er zijn meer naden in de membraan nodig.

De voorgespannen membraan wordt ondersteund door kolommen en kabels. Aan de randen wordt een membraan constructie aan de vaste constructie verbonden via gespannen kabels of profielen. Een goede mogelijkheid is het toepassen van een kabel in een genaaide of gelaste zoom van de membraan.

3.1.2.2 Voorbeelden

Er zijn een groot aantal voorbeelden van lineaire en radiale membraan constructies gebouwd in de wereld. Ook zijn een aantal toepassingen van deze constructies als kas bekend.

Lineaire membraan constructies
Figuur 18 toont een voorbeeld van een zuivere 4-punts constructie gespannen tussen geschoorde masten. Dit is een ontwerp van Frei Otto, Kassel, 1955 (Berger, 1996). De terminal op het vliegveld van Denver in figuur 19 is een constructie, waarbij het membraan gespannen is tussen nokkabels en dalkabels (Jepesson terminal, Denver International Airport, Colorado, USA, 1994) (Berger, 1996). De nokkabels zijn gespannen tussen verticale masten. De situatie waarbij de membraan gedragen wordt door een inwendige stalen spantconstructie toont figuur 20, een membraan dakconstructie van een tennishal in Atlanta, USA. Het membraan materiaal is hier met siliconen gecoate glasvezels (Berger, 1996). In tegenstelling hiermee laat figuur 21 een voorbeeld laat zien van een gespannen membraan constructie met een uitwendig stalen vakwerkspant (model van het dak van het Bayamon stadion in Puerto Rico). De membraan wordt hier gesteund door een kabelnet (Berger, 1996). Ook kan het membraan gedragen worden door elkaar kruisende, uitwendige spanten, zoals in figuur 22 te zien is. Dit is de dakconstructie van de Wimbledon trainingsfaciliteit (Practice facility, Wimbledon, UK, 1988) (Berger, 1996). Hier zijn gewapend betonnen bogen toegepast, waaraan het membraan is opgehangen. In figuur 23 worden een aantal voor de wereldtentoonstellingen Expo 1992 in Sevilla, Spanje (Waaijenberg, 1992) en Expo 2000 in Hannover (D) (Hoffmann, 2000b) gebouwde membraan constructies getoond. Met name de bevestigingspunten van de membraan aan de omhullende staalconstructie zijn hier goed te zien.

Een schitterend voorbeeld van een bouwwerk wat erg lijkt op een kas is het transparante huis voor carnivoren en palmen in de dierentuin van München (D) (1995) (figuren 25 en 26). Dit is een membraan, die gedragen wordt door twee getuide masten van 17 m hoog, waarbij de membraan een combinatie is van een kabelnet (maaswijdte 2x2 m) met dubbele opgeblazen kunststoffolies (pneumatische dakhuid). De luchtkussens, die functioneren als dakhuid bestaan uit twee fluorpolymeren, namelijk ETFE (ethyleen-tetra-fluor-ethyleen) (Schock, 1997) (zie ook paragraaf 2.2.2.). Opmerkelijk is ook de aanwezigheid van louvre-luchtramen in het dek voor natuurlijke ventilatie. De moeilijke aansluiting van de dakmembraan met de gevels is hier goed opgelost met een opgeblazen foliebuis (figuur 26, rechts).
Een vergelijkbare gebouw, dat gereed gekomen is in 1988 voor een dierentuin in Arnhem is Burgers' Bush (figuur 27). Hier wordt een grote kolomvrije ruimte van 90 x 150 m afgedekt door een dak bestaande uit luchtkussens van 3 x 6 m, bestaande uit meerlaagse duurzame ETFE folies, die door overdruk op afstand gehouden worden (ABT, 1988). Het dak wordt gedragen door een achttal 30 m hoge stalen, getuide masten die via kabels de stalen tralieliggers van het dak dragen. Hierdoor ontstaat een kolomvrije ruimte van maar liefst 1,3 ha. De grootste hoogte onder de kap is 25 m.
Als gevolg van een Duitse studie in 1982-1984 zijn een aantal kasconstructies ontwikkeld, waarbij grote kolomvrije ruimtes ontstaan (Bubner *et al*, 1985). Figuur 28 toont een schets van een ontwikkeld studieontwerp met een membraandak gespannen tussen hoge en lage kabels, die bevestigd zijn aan 12 m hoge masten (Bubner *et al*, 1985).
Door IMAG, Wageningen is in 1992 een prototype ontwikkeld en gebouwd van een kas met een dak dat een combinatie is van een transparante membraan met een pneumatische ondersteuningsconstructie (figuur 29). Voor de dakfolie van deze zgn. kunststof kabelkas met een te overspannen vakmaat van 20 x 20 m zijn een tweetal soorten kunststoffen gebruikt namelijk PVDF en een terpolymeerfolie (Waaijenberg en Frénay, 1993). De draagconstructie is uitgevoerd met zgn. Twaronkabels, zijnde een kabel opgebouwd uit aramide-garens met een kunststofmantel.
In Manzares (E) is reeds in 1982 een ronde "kas" van 4,5 ha gedekt met PVDF folie (Tedlar®) (eerste helft) en met Polyester folie (tweede helft). In het midden staat een toren van 10 m diameter en 200 m hoogte (zie figuur 24). De met folie gedekte "kas" wordt gebruikt als zonnecollector en de toren bevat een windturbine om

energie op te wekken. Deze Solar Chimney kan 100 kW stroom produceren (Knapp, 1982). Onder de folie werd geprobeerd planten te telen maar de windsnelheid bleek hier te hoog te zijn.

Radiale membraan constructies

Figuur 30 laat een met de computer gegenereerd model zien met opwaarts- en neerwaartsgerichte radiale membranen. Figuur 31 toont een voorbeeld van een radiale membraan constructie, waarbij de tent is opgehangen aan stalen vakwerkspanten. Dit is het Queeny Park Pavilion in St. Louis County, Missouri, USA, 1978 (Berger, 1996). Ook het parapludak van figuur 32 is een radiale membraan constructie. Het betreft hier een overkapping van een kolenhoop in Binghamton, New York, USA. Een omgekeerde parasol constructie rond een centrale kolom is te zien in figuur 33, zijnde een voorziening om het interieur van de heilige moskee van de profeet in Medina, Saoedi-Arabië te beschermen tegen de zon, 1992. De parasols zijn 17 x 18 m groot (Schock, 1997) en worden gedurende de zomer overdag uitgeklapt voor bescherming tegen de zon en 's-nachts ingeklapt om de warmte-uitstraling uit de vloer e.d. niet te hinderen. Een samenstel van aanéén gesloten radiale membranen toont figuur 34, namelijk het dak boven een archeologische vindplaats in Desenzano sul Garda, Italië, 1990 (Schock, 1997). Hier worden de membranen gedragen door een ruimtevakwerk. Ook de Haj Terminal van het internationale vliegveld van Jeddah in Saoedi-Arabië van figuur 35 is een aanéénschakeling van radiale membranen. In dit geval in de vorm van zeer grote tenten, bestaande uit Teflon-gecoate glasvezels met buitenafmetingen van 45 x 45 m, die gezamenlijk een oppervlakte overkappen van maar liefst 43 ha (!). Het grootste gebouw met dit type constructie is thans de Millennium Dome in Greenwich, Engeland, die een oppervlakte van 80.000 m² met een radiaal membraan overspant (zie figuur 36). Het dak bestaat uit een membraan van PTFE met glasvezels welke gedragen wordt door 100 m hoge masten. De hoogte van het Millennium Dome is 50 m en de gevels zijn gemaakt van Lexan PC (polycarbonaat) platen (General Electric, 1998).

Ook in de Duitse studie van 1982-1984 is een radiale membraan constructie gekozen, waarbij grote kolomvrije ruimtes ontstaan (Bubner *et al*, 1985). Figuur 37 toont een schets van dit ontwikkeld studieontwerp met een *radiaal membraandak gespannen aan een centrale verticale mast* (Bubner *et al*, 1985).
Tenslotte is ook het eerste ontwerp van IMAG voor een Duurzaam Gewas Productie Systeem (DGPS) aangegeven in figuur 38 een radiale membraan constructie (Bakker, 1998).

3.1.3 Pneumatische constructies

Een membraan kan belasting opnemen door het uitoefenen van constante krachten op de folie in zijn vlak (voorspanning), maar ook kan dit door het uitoefenen van drukverschillen in een ruimte (over- en onderdruk); de membraan wordt dan gespannen door het opblazen (of leegzuigen) van een ruimte afgesloten door deze membraan. Zodra sprake is van (een) membra(a)nen in combinatie met een luchtdrukverschil tussen de door membra(a)n(en) afgesloten ruimte en de buitenlucht, spreekt men over pneumatische constructies. Een luchtballon en een luchtbed zijn dus een pneumatische constructies. De membraan kan bij pneumatische constructies alleen belasting opnemen als de ruimte onder constante druk blijft. Bij luchtlekverliezen moet er dus aanvullende lucht ingebracht worden via ventilatoren e.d. of lucht uitgezogen worden.
De sterke punten van pneumatische constructies zijn:

- grote kolomvrije overspanningen zijn te realiseren;
- door keuze omhullingsmateriaal is een goede lichtdoorlatende constructie te maken;
- door het ontbreken van veel massieve constructieprofielen (staal / aluminium) zijn er weinig schaduwgevende delen (dus een goede lichtdoorlatendheid);
- door het dubbelwandig uitvoeren ontstaat een goede warmte-isolerende constructie;
- door het lichte gewicht en door het systeem van opblazen (of leegzuigen) is een dergelijk bouwwerk eenvoudig en snel te bouwen;
- door het systeem van over- of onderdruk wordt de constructie stabieler en sterker (beter bestand tegen bijvoorbeeld windaanvallen).

De zwakke punten zijn:

- een geschikte, voldoende sterke folie met goede eigenschappen t.a.v. lichtdoorlatendheid, isolatie en condensgedrag moet nog ontwikkeld worden;

- er zijn altijd ventilatoren nodig om de over-, c.q. onderdruk op peil te houden. Deze ventilatoren moeten periodiek draaien (elektriciteitskosten).

3.1.3.1 Basisprincipes

Er kunnen twee verschillende typen pneumatische constructies onderscheiden worden, namelijk enkelvoudige en dubbelwandige constructies. Bij enkelvoudige constructies wordt de gehele omsloten ruimte onder overdruk gehouden, zoals schematisch aangegeven in figuur 39 I p (Herzog, 1976). Er is hier slechts sprake van één membraan en de ruimte wordt op slechts een geringe overdruk gehouden, aangezien mensen moeten verblijven in deze ruimte. Hiervoor wordt uitsluitend buitenlucht gebruikt. De druk in de ruimte varieert van 10 tot 100 mm waterkolom (1-10 mbar). In figuur 39 II p wordt het principe van een dubbelwandige pneumatische constructie aangegeven.
Er dient verder onderscheid gemaakt te worden tussen constructies met negatieve en met positieve druk. Negatieve druk ontstaan doordat de ruimte leeg wordt gezogen (onderdruk), dus de membraan spant zich naar binnen. Dat kan zowel met een enkele membraan (figuur 39 I n) als met een dubbele membraan (figuur 39 II n). Hierbij moet er altijd goed op gelet worden (door de holle vlakken) of het regenwater en de sneeuw goed van de dakvlakken kan worden afgevoerd en er dus geen accumulatie van regenwater, hagelkorrels of sneeuw optreedt. Dit kan gemakkelijk tot schade leiden. Positieve druk ontstaat, doordat de ruimte opgeblazen wordt, waardoor de membraan zich naar buiten spant. Figuur 39 laat schematisch een aantal mogelijkheden zien, waarbij ook de toepassing van additionele punt- of lijnondersteuningen in combinatie met over- of onderdruk is aangegeven. Ook een samenstel van punt- en lijnondersteuningen met over-, c.q. onderdruk is mogelijk. Figuur 40 toont foto's van lagedruk constructies met enkele en dubbele membranen en met additionele lineaire ondersteuningen in verschillende vormen, via kabels, liggers of bogen.
Verder dient er onderscheidt gemaakt worden tussen de beschreven lagedruk constructies en de hogedruk constructies. De druk in de afgesloten tussenruimte varieert bij de hogedruk systemen van 2000 tot 70000 mm waterkolom (200 – 7000 mbar). Hogedruk constructies worden meestal gebruikt als dragende spanten of ondersteuningsconstructies voor dakvlakken e.d. en worden ook wel kussen-constructies genoemd. Een springkussen voor kinderen is dus ook een hogedruk pneumatische constructie. Anders dan bij lagedruk constructies is er bij hogedruk constructies vaak sprake van opgeblazen buisconstructies, die gezamenlijk de draagconstructie vormen. In figuur 41 worden een aantal mogelijke vormen gegeven van draagconstructies, gebaseerd op hogedruk, waarbij onderscheid gemaakt wordt tussen rechte, geknikte en gebogen elementen.

3.1.3.2 Voorbeelden

Lagedruk constructies
Een voorbeeld van een enkelvoudige membraan, waarbij de gehele omsloten ruimte op (lage) overdruk gehouden wordt is aangegeven in figuur 42. Dit is het Mediadrom, een mobiele luchthal voor het Zweite Deutsche Fernsehen in Duitsland, 1995 (Schock, 1997). De huid van de hal bestaat uit PVC/PES doekmateriaal met plaatselijk grote ramen bestaande uit in hoge mate transparante folie. De grootste hal heeft een diameter van 51 m. Een soortgelijke, maar veel grotere door lucht gedragen hal is te zien in figuur 43. Dit is het paviljoen van de Verenigde Staten op de Expo tentoonstelling van 1970 in Osaka, Japan (Herzog, 1976). Het ovaal van 83 x 142 m is in één keer overspannen door de pneumatische membraan constructie zonder kolommen. De hoofdvorm van het dak wordt bepaald door een diagonaal netwerk van kabels. Figuur 44 toont dat er met een overdruk constructie een enorme vrije ruimte kan ontstaan. Door lucht gedragen hallen zijn ook veel toegepast als (tijdelijke) overkappingen boven zwembaden, tentoonstellingshallen en sporthallen in het verleden. Figuur 45 toont een dergelijke afdekking boven een voormalig openlucht zwembad in Kaufungen (bij Kassel), Duitsland, 1970. Deze hal is 57,5 m lang, 26 m breed en 10 m hoog (Herzog, 1976).

In de zeventiger jaren zijn diverse experimentele pneumatische kasconstructies gebouwd (Mears *et al*, 1976). Bij een door de Rutgers University in New Brunswick, New Yersey, USA ontwikkelde kas (Roberts, 1976) is niet alleen het dek uitgevoerd als een pneumatische constructie, maar ook de afdichting van de verticale luchtraamopeningen via slurven (zie figuur 46).

In de Duitse studie van 1982-1984 is een pneumatische lagedruk membraan constructie gekozen, waarbij een grote kolomvrije ruimtes ontstaat (Bubner *et al*, 1985). Figuur 47 toont een schets van dit ontwikkeld studieontwerp voor een kas met een pneumatische lagedruk constructie.
Figuur 48 geeft een bovenaanzicht van een aantal lagedruk kasconstructies (Toyoda *et al*, 1996). De breedte hiervan is 12 m en de lengte 80 m. Hierbij is sprake van een samenwerking tussen de opgeblazen kunststoffolie (overdruk constructie) en een netwerk van kabels en polyamide draden.
Een ander voorbeeld, weergegeven in figuur 49 is een onderdeel van de door IMAG, Wageningen ontworpen kunststof kabelkas, namelijk de luchtslurf, die als een soort gording het dakvlak draagt en onder spanning houdt (Waaijenberg en Frénay, 1993) (zie ook figuur 29).

Hogedruk constructies
Een duidelijk voorbeeld van een hogedruk constructie is te zien in figuur 50, waarbij de spanten zowel in de gevels als in het dak geheel opgebouwd zijn uit opgeblazen buisconstructies. Het is een tentoonstellingshal, genaamd 'Airtecture' in Esslingen-Berkheim in Duitsland, waarbij de binnendoos min of meer traditioneel is, maar de draagconstructie geheel pneumatisch (Schock, 1997). In principe is het mogelijk bij dergelijke constructies de sterkte aan te passen door variatie van de druk in de verschillende constructie-elementen afhankelijk van de variërende uitwendige belastingen. Dit principe van de hogedruk constructie is ook gebruikt bij de ontwikkeling van een drijvend theater paviljoen bij de Expo '70 in Osaka, Japan, zoals aangegeven in figuur 51. Hier bestaan de bogen uit onder hogedruk gebrachte opgeblazen buizen, terwijl de dakhuid enkelwandig is (University of Newcastle, 1999).
Tenslotte toont figuur 52 een zeer interessante studie, reeds uit 1962, voor een tuinbouwkas met grote overspanning van de hand van Frei Otto (de ontwerper van het membraandak van het Olympisch stadion in München !). Zoals de schets laat zien zorgen 'hogedruk' ribben in het interieur van de kas samen met de kolommen voor het dragen van de kas (Herzog, 1976).

3.2 Nieuwe omhullingsmaterialen

3.2.1 Eisen te stellen aan nieuwe omhullingsmaterialen

De **materiaaleigenschappen**, die van belang zijn bij het beoordelen van kasomhullingsmaterialen zijn:

- doorlatendheid voor globale straling (ultraviolet, zichtbaar en nabij-infrarood);
- doorlatendheid voor ver-infrarood (warmtestraling);
- isolerend effect;
- koelend effect;
- gevoeligheid voor veroudering (hoofdzakelijk UV-veroudering);
- condensatiegedrag (druppel- of waterfilmvorming);
- doorlatendheid voor vocht (water);
- mechanische sterkte;
- brandgedrag;
- investeringskosten en
- beschikbare afmetingen.

Niet alleen de absolute lichttransmissie van een kasdekmateriaal is van belang, maar ook het stralingsspectrum. De transmissie in het zichtbare gebied (VIS) van 380-780 nm of beter gezegd de transmissie voor fotosynthetisch actieve straling (PAR) van 400-700 nm is vooral belangrijk voor de fotosynthese van de planten. Een hoge lichttransmissie betekent ook een hoge substantie-toename van de planten. Voor groenten is er een algemene vuistregel dat 1% meer licht (PAR) 1% meer opbrengst levert. Voor sierplanten is dat in deze mate niet het geval, wel is licht altijd de beperkende factor in Nederland in de wintermaanden.

In gebieden met een hogere instraling zijn licht en temperatuur juist in de zomermaanden de beperkende factoren zodat in Zuid-Europa alleen in de wintermaanden in kassen kan worden geteeld. Het is hier van belang fotoselectieve materialen te ontwikkelen, die in de zomer de straling reflecteren welke de kas opwarmt en leidt tot een te hoge binnentemperatuur. Wil men ook in de zomer de kas zoveel mogelijk gesloten houden, om onder gecontroleerde omstandigheden te kunnen telen, dan moeten nieuwe dekmaterialen worden ontwikkeld, die de nabij-infrarood straling (NIR) van 800-3000 nm tegenhouden, zodat de warmtebelasting in de kas in de warme teeltperiode verminderd kan worden (Verlodt en Waaijenberg, 1999). Dergelijke materialen zijn ook in warmere gebieden, zoals Zuid-Europa, van belang om de teelt naar de zomermaanden uit te breiden en zo de teeltperiode te verlengen. In tropische gebieden (bijvoorbeeld in Azië) kan op deze manier de warmtebelasting van de kas geminimaliseerd worden; een beschermde teelt wordt dan ook in deze gebieden haalbaar.

Om de energiesparende functie van tuinbouwkassen ook in de winter te garanderen moet de isolatiewaarde van de kassen verhoogd worden door gebruik te maken van dubbelwandige dekmaterialen en het toevoegen van absorberende pigmenten of reflecterende coatings, welke de transmissie voor ver-infrarood (FIR), dus warmtestraling van 3000 nm – 1 mm, verlagen. De zonnestraling leidt tot het opwarmen van de binnenlucht, de kasinrichtingen, de planten etc. en wordt omgezet naar straling met een langere golflengte. Als deze warmtestraling het dekmateriaal van binnen naar buiten niet kan passeren neemt het energiesparende effect van het dekmateriaal en derhalve van de kas toe. Binnen het SEO-i project "Innovatieve kasdek- en schermmaterialen" zullen dergelijke dek- en schermmaterialen worden ontwikkeld. Het toepassen van energiebesparende maatregelen, zoals het toepassen van dubbellaagse dekmaterialen of de toevoeging van pigmenten en coatings zal met beperkt lichtverlies gepaard moeten gaan. Hier zijn zowel verbeteringen van het kasdekmateriaal zelf als ook het ontwikkelen van nieuwe kasconcepten noodzakelijk. Door het ontwikkelen van folies met betere mechanische (hogere treksterkte) en optische eigenschappen (hoge lichtdoorlatendheid) gecombineerd met een goede isolatiewaarde wordt het toepassen van membraan of pneumatische constructies ook in de tuinbouw haalbaar.

Uit het oogpunt van de kwaliteit van de teelt is de fotoselectieve doorlatendheid van het dekmateriaal voor bepaalde golflengten van 300-800 nm belangrijk. Zo wordt de fotomorphogenese van planten in grote mate beïnvloed door het absorberen, reflecteren of doorlaten van bepaalde golflengtegebieden. De ontwikkeling van

kasgewassen wordt in sterke mate beïnvloed door de hoeveelheid ultraviolette (UV) straling en de hoeveelheid ver-rood licht.
De toename in ver-rood leidt tot een toename van de stengelstrekking. Kortere planten kunnen worden geteeld door het uitfilteren van het ver-rode deel van het zonlichtspectrum. Maar tot nu toe is er nog geen geschikt materiaal beschikbaar dat deze eigenschappen combineert met een hoge totale lichttransmissie en met goede mechanische eigenschappen. De tot dusver beschikbare materialen hebben allemaal als nadeel dat ze, behalve het veranderen van de spectrale samenstelling van het licht, de lichttransmissie tussen 400 en 700 nm verminderen, waardoor de groeisnelheid van de planten vermindert en de productieduur wordt verlengd. Ook zijn deze materialen (nog) te duur.
Dekmateriaal dat UV-B straling doorlaat biedt perspectieven om de synthese van bladpigmenten als flavonoiden te stimuleren, de strekkingsgroei te remmen en de planten stress-toleranter te maken (harden van planten). Een ander effect van het gebruik van UV-straling in de kas is dat het de verspreiding van een aantal pathogene kan beïnvloeden. Er zijn kunststofmaterialen op de markt, die dit resultaat bereiken, echter is nog wetenschappelijk onderzoek nodig, om de juiste optische eigenschappen te bepalen, ook met het oog op een mogelijk interactie met andere golflengten (Hoffmann, 1999 en 2000a).

Ook moet bij het toepassen van geavanceerde constructies in de tuinbouw, zoals beschreven, meer aandacht worden besteed aan de mechanische sterkte van het dekmateriaal. Er moet worden gezocht naar een materiaal met een hoge lichtdoorlatendheid en een goede isolatiewaarde. Hier ligt een taak voor de kunststofindustrie om een materiaal te ontwikkelen dat de goede eigenschappen van duurzame kunststoffolies (ETFE of PVDF) en de huidige membranen (PVC met polyester of PTFE met glasvezel) combineert. De materialen moeten naast een hoge treksterkte ook een goede zelfreinigende werking hebben, gecombineerd met een geringe veroudering en een lange levensduur. Natuurlijk is ook het condensgedrag van het materiaal belangrijk. Duurzame anti-drop eigenschappen zijn vereist.

3.2.2 Membranen

Door het toepassen van duurzame kunststoffolies is het mogelijk om het dekmateriaal een dragende functie te laten vervullen, gecombineerd met de omhullende functie. Dat vraagt om een materiaal met verhoogde treksterkte. Dit kan worden bereikt door ofwel de treksterkte van het foliemateriaal zelf te verhogen ofwel door versterkende vezels toe te voegen aan het foliemateriaal.

In de civiele bouwwereld zijn reeds enkele materialen op de markt beschikbaar en worden gebruikt in textiel constructies. Hier is PVC (polyvinylchloride) met PET (polyester) het meest gebruikte materiaal voor membraan constructies (vrachtwagendoek). Het heeft een levensduur van 8 tot 10 jaar. Het materiaal is in verschillende kleuren verkrijgbaar. Om de levensduur van PVC te verbeteren wordt een acryllak of fluorpolymeer coating op het oppervlak van de membraan opgebracht. Er zijn membranen met een acryl laag op beide zijden of zelfs met een dubbele laag op de uitwendige zijde van de membraan. Nieuwere ontwikkelingen hebben een fluorpolymeer coating. Een PVF (polyvinylfluoride) folie (Tedlar®) op de uitwendige zijde van de membraan zorgt voor een betere isolatie, voorkomt veroudering van de folie en verhoogt de levensduur van de membraan naar 12 tot 15 jaar. Een nog betere bescherming tegen veroudering, UV-degradatie en vervuiling geeft een PVDF (polyvinylideendifluoride) lak op de film.
Een ander materiaal is PTFE (polytetrafluorethyleen) (Teflon®) met glasvezels. Glasvezels (fiberglas) zorgen voor een extra goede stabiliteit en PTFE voor een zelf-reinigend effect. Dit materiaal heeft een levensduur van 20 tot 25 jaar, maar het is relatief duur vergeleken met PVC. Normaal gesproken is het alleen in wit verkrijgbaar en wordt het alleen gebruikt voor duurzame membraan constructies.
Alle genoemde materialen hebben echter het nadeel, dat de lichttransmissie te laag is om in de tuinbouwsector te worden ingezet. Hier ligt een taak voor de kunststofindustrie om deze (duurzame) materialen verder te ontwikkelen gecombineerd met een hogere lichtdoorlatendheid.

In dierenparken of botanische tuinen worden reeds duurzame kunststoffolies bestaande uit ETFE of PVDF in dubbellaagse en zelfs drielaagse uitvoering als luchtkussens toegepast. Deze constructies zijn lichter dan de traditionele glazen kassen, hebben een hogere isolatiewaarde en leveren dus een behoorlijke bijdrage aan de energiebesparing. Op grond van de hogere materiaalkosten worden ze momenteel niet in de

productietuinbouw ingezet. De genoemde duurzame kunststoffolies ETFE en PVDF moeten verder worden ontwikkeld, zodat de treksterkte aanzienlijk wordt verbeterd en zo de dragende functie wordt verhoogd. Het is dan mogelijk ze als een transparant dekmateriaal in membraan- en pneumatische constructies toe te passen. Om de materialen als enkele membranen toe te passen is het verder nodig om de isolatiewaarde hiervan te verhogen.

Omdat in de toekomst een duurzaam en milieuvriendelijk productiesysteem met een gunstige milieubelasting gewenst is, wordt verwacht dat membraanachtige materialen ook in de productietuinbouw een rol kunnen gaan spelen. Ook in verband met de steeds belangrijker vraag naar inpassing van kassen in het landschap wordt van geavanceerde kasconcepten met nieuwe omhullingsmaterialen een behoorlijke bijdrage verwacht.

4. Toepassing nieuwe constructies en omhullingsmaterialen

In deze paragraaf worden de potentiële mogelijkheden m.b.t. constructies en omhullingsmaterialen toegepast in een aantal nieuwe ontwerpen voor een Duurzaam Gewas Productie Systeem (DGPS). Allereerst wordt de stand van het onderzoek kort aangeduid, waarna het programma van eisen (PVE) voor een DGPS in detail wordt besproken. Vervolgens worden de potentiële ontwerpen toegelicht, waarna de ontwerpen worden beoordeeld op basis van het programma van eisen en de hierbij behorende ontwerpcriteria. Op basis hiervan volgt een overzicht van de geprioriteerde ontwerpen, waarvan de haalbaarheid en geschiktheid in een vervolgonderzoek zullen worden onderzocht.

4.1 Eerste ontwerp van een Duurzaam Gewas Productie Systeem

In de haalbaarheidstudie van het DGPS werd een aantal eisen geformuleerd, op basis waarvan het 1-ste ontwerp voor een DGPS werd ontwikkeld [1]. In dit programma van eisen zijn met name de zwakke punten van de huidige kassen opgenomen (Bakker *et al*, 1999). Het globale PVE luidde:

- energievoorziening door duurzame energiebronnen;
- geslotenheid ten aanzien van CO_2, water en nutriënten;
- optimale benutting van het natuurlijk zonlicht;
- maatschappelijk acceptabele wijze van high tech-agroproductie door combinatie van gewasproductie met andere functies.

In de haalbaarheidstudie is uitgebreid aandacht besteed aan technische en wetenschappelijke haalbaarheid van de meest kritische componenten. Dit zijn 1) klimatisering, 2) constructie 3) energievoorziening en 4) milieuwinst.

De kern van het eerste ontwerp wat ontwikkeld is als Duurzaam Gewas Productie Systeem (DGPS) is een **centrale draagmast**, die een cirkelvormige afdekking ondersteunt (zie figuur 38). De centrale mast dient als drager van een **windturbine,** waarmee een deel van de energiebehoefte van het systeem kan worden gedekt. De ventilatielucht van het systeem kan op deze wijze via de centrale kolom op één punt worden afgevoerd waardoor goede mogelijkheden van **warmte- en waterterugwinning** ontstaan. De hoogte van de centrale mast en de afmetingen van de ventilatieopening worden zo gekozen dat door wind en schoorsteenwerking voldoende ventilatie wordt opgewekt. Door op een centraal punt water uit de ventilatielucht terug te winnen kan schoon water in de kringloop worden teruggebracht en latente warmte worden teruggewonnen. Deze warmte draagt bij aan de energievoorziening van het systeem. De resterende energiebehoefte wordt gedekt met **duurzame energie**, afkomstig van een in het systeem opgenomen windmolen, een biomassa warmtekrachtcentrale en zonnepanelen, in combinatie met de inzet van een warmtepomp en (korte- en lange termijn) warmteopslag. Vanuit de gedachte van integratie van logistiek, besturing en warmteopslag is de vloer van het systeem drijvend (hol of m.b.v. kunststof) en draaibaar uitgevoerd en deze vormt tevens de afdekking van een energieopslagsysteem. De **drijvende vloer** is verdeeld in cirkelsegmenten die het mogelijk maken verschillende teeltsectoren te definiëren. Door de segmenten te draaien kunnen alle locaties binnen het systeem vanuit een vaste logistieke opstelling bereikt en bewerkt worden. De klimatisering is een belangrijk uitgangspunt voor het ontwerp, waarbij gebruik wordt gemaakt van volledig **natuurlijke ventilatie** inclusief **ontvochtiging**. Voor extreme buitencondities zijn voor diverse uitvoeringsvormen de binnencondities berekend met behulp van een speciaal stromingsprogramma. Globale berekeningen zijn uitgevoerd voor de (jaarrond) energie- en CO_2-behoefte van het systeem. Vervolgens is bepaald hoeveel energie gegenereerd kan worden uit wind en zonne-energie en welk deel van de energiebehoefte moet worden gedekt uit andere bronnen, zoals bij voorbeeld biomassa; tevens is bepaald hoeveel warmteopslagcapaciteit (korte en lange termijn) daarbij vereist is.

Op basis van dit ontwerp is een inschatting gemaakt van de constructietechnische haalbaarheid. De totale vermindering van de milieubelasting van dit ontwerp komt op een factor zes á zeven uit. Naar verwachting kan

---

[1] *De uitvoering van de haalbaarheidsstudie is gefinancierd door een projectsubsidie van DWK-LNV en door externe financiers. Voor het eerste ontwerp van het duurzaam gewas productiessysteem is octrooi verkregen.*

door wijzigingen in het systeem bij dit ontwerp een verlaging van de belasting van het milieu worden bereikt met een factor negen à tien. De beoogde vermindering van de milieubelasting met een factor 20 is met het eerste ontwerp nog niet verkregen. In de studie is beperkt aandacht besteed aan de maatschappelijke haalbaarheid. Op basis van de haalbaarheidstudie is wel geconcludeerd, dat er geen onoverkomelijke technische en wetenschappelijke problemen bestaan om het beoogde duurzame gewasproductiesysteem verder te ontwikkelen en dat er voldoende perspectief is om de milieubelasting verder te verminderen. Op grond daarvan is besloten om verder te gaan met de uitvoering van het project Duurzame Kas.

4.2 Programma van eisen voor potentiële kasontwerpen

Het programma van eisen van het eerste ontwerp is naar aanleiding van de resultaten uit de haalbaarheidstudie en het uitgevoerde literatuuronderzoek aangevuld tot een PVE, waarop de vervolgontwerpen voor DGPS zijn gebaseerd (paragraaf 4.3). Aan het PVE zijn tevens een aantal ontwerpeisen toegevoegd op basis waarvan de potentiële ontwerpen worden beoordeeld (paragraaf 4.4). Schematisch wordt het PVE als volgt weergegeven:

A. Maximalisatie aanwending duurzame energie
- maximale inzet van energie verkregen van windmolens, zonnecollectoren, zonnecellen, biomassa, aardwarmte incl. korte termijn (dag-nacht) en lange termijn opslag (zomer – winter) van warmte.

B. Minimaliseren van energieverbruik
- maximale thermische isolatie van omhullingsmateriaal; k = maximaal 3 W.m2/K;
- minimalisatie van ongecontroleerde uitstroom van ventilatielucht;
- maximale energieterugwinning uit ventilatielucht;
- gebruik van materialen met een gunstige milieubelasting.

C. Minimaliseren van water- en nutriëntenverbruik
- gesloten teeltsysteem ten aanzien van water en nutriënten;
- opvang en opslag van regenwater ten einde in de waterbehoefte van de gewassen te voorzien (dit is ongeveer 700 $l.m^{-2}.a^{-1}$;
- opvang van condenswater.

D. Optimale klimaatscondities voor gewasproductie
- geconditioneerde teeltomstandigheden ten aanzien van licht, warmte, water, waterdamp, kooldioxide, mineralen en bestrijdingsmiddelen;
- maximale lichtdoorlatendheid van de kas, minimaal $\tau_{diffuus}$ = 75% (huidige systemen);
- gelijkmatige temperatuurverdeling in planthoogte (horizontaal, verticaal), maximaal ΔT = 2 K;
- optimale luchtvochtigheid, RV =60-90%;
- minimale windsnelheid in planthoogte, maximaal v_w = 1 $m.s^{-1}$.

E. Optimale besturing van gewasproductie
- ophangmogelijkheid voor gewassen en installaties;
- optimalisatie van logistiek in de kas;
- automatisering van productieprocessen.

F. Optimale arbeidsprocessen en arbeidsomstandigheden
- arbeidsprocessen: gemechaniseerd, gecentraliseerd;
- arbeidsomstandigheden: gezondheid, welzijn, veiligheid.

G. Multifunctionaliteit
- verhoging van het maatschappelijk draagvlak door combinatie van gewasproductie met andere functies: recreatie, wonen, werken.

H. Inpassen in het landschap
- afmetingen, vorm, materiaalkeuze, kleur;
- situering t.o.v. het erf, de omgeving.

I. Economie
- Economische levensduur niet minder dan huidige systemen

J. Constructieve haalbaarheid en betrouwbaarheid

Tabel 2: Beschrijving van de nieuwe kasontwerpen voor een Duurzaam Gewas Productie Systeem (IMAG)

DGPS ontwerp		Materiaal constructie	Materiaal omhulling	afmetingen (m)	Voordelen	nadelen
1.	Kas met gehard glas	Verzinkt staal / aluminium	Gehard glas in dek en gevels (gelijmd) met mogelijk in de gevels dubbelglas of kunststofplaten	kapbreedte 7,5 m vakmaat 15 x 5 m gevelhoogte 4 m	luchtramen zonder omranding; gehard glas is veilig (ook gelaagd is mogelijk); duurzaam materiaal; doorgaande nokluchting; hoge lichtdoorlatendheid; grote natuurlijke ventilatie; goede temperatuursverdeling en luchtvochtigheid; gewassen, installaties e.d. opgehangen; goede logistiek en automatisering mogelijk	montage kan alleen via beglazingsmachine o.i.d.; isolatie van het dek alleen via horizontaal energiescherm
2.	Pneumatische constructie met folies	Verzinkt staal; aluminium; draden / kabels	Dubbele opgeblazen kunststoffolies	overspanning 20 m; gevelhoogte 4 m; vakmaat 20 x 10 m	ventilatie door leegzuigen van slurven; doorgaande nokluchting; licht in gewicht; hoge isolatiewaarde (door luchtkussen-constructie); gunstige milieubelasting; hoge lichtdoorlatendheid; goede logistiek en automatisering mogelijk; gewassen, installaties e.d. opgehangen	weinig ervaring met pneumatische constructie; geschikte folie moet nog gevonden / ontwikkeld worden; energie nodig voor overeind houden kas; alleen éénzijdige luchting (niet oriëntatievrij)
3.	Pneumatische constructie met opgeblazen spanten	Draden / kabels	Dubbele opgeblazen kunststoffolies (spanten met overdruk; folies met onderdruk)	overspanning 20 m; kaslengte 5 x 10 = 50 m; nokhoogte 10 m	licht in gewicht; hoge isolatiewaarde (door luchtkussen-constructie); energieterugwinning mogelijk; gunstige milieubelasting; hoge lichtdoorlatendheid door het ontbreken van constructiedelen;	alleen ventilatie mogelijk via kopgevels (lengte beperkt en horizontale temp. verdeling en luchtvochtigheid slecht; gewassen, installaties niet op te hangen aan constructie; slechte logistiek en automatisering; geen repeteerbaarheid; energie nodig voor overeind houden kas; deels horizontaal vlak in het dek (condensdruppels)
3A.	Pneumatische constructie met opgeblazen spanten (repeteerbaar door verticale gevels)	Draden / kabels	Dubbele opgeblazen kunststoffolies (spanten met overdruk; folies met onderdruk)	overspanning 20 m; gevelhoogte 4 m; vakmaat 20 x 10 m	licht in gewicht; ventilatie via nokluchting; hoge isolatiewaarde (door luchtkussen-constructie); gunstige milieubelasting; hoge lichtdoorlatendheid (ontbreken van constructiedelen); goede temp. en luchtvochtigheidsverdeling; goede logistiek en automatisering mogelijk;	weinig ervaring met pneumatische constructie; geschikte folie moet nog gevonden / ontwikkeld worden; gewassen, installaties niet op te hangen aan constructie; energie nodig voor overeind houden kas; deels horizontaal vlak in het dek (condensdruppels)
4.	Pneumatische constructie met overdruk in de kasruimte "gesloten kas"	Geen	Enkele membraanfolie (Blaashalle)	diameter grondvlak 100 m; hoogte van de bol 20 m	licht in gewicht; vrije overspanning van 7854 m^2 zonder tussensteunpunten; energieterugwinning zeer gunstig, gunstige milieubelasting; zeer hoge lichtdoorlatendheid (ontbreken van constructiedelen); goede mogelijkheden voor logistiek en automatisering	ventilatie en ontvochtiging alleen mogelijk via een klimaatsinstallatie; sluis nodig voor deuropening; door overdruk ontstaat luchtbeweging voor de planten; gewassen, installaties e.d. kunnen niet opgehangen worden aan de constructie; energie nodig voor overeind houden kas

DGPS ontwerp		Materiaal constructie	Materiaal omhulling	afmetingen (m)	Voordelen	nadelen
5.	Membraan constructie met een symmetrisch geplaatste mast en centrale luchting	Verzinkt staal; aluminium; draden / kabels	Enkele kunststoffolie in het dek; kunststofplaten in de gevels; kunststofplaten of folie in nokpiramide	vakmaat 10 x 10 m; gevelhoogte 4 m; top van de mast: 8,6 m hoog	licht in gewicht; ventilatie door omhoogbewegen van piramide; energieterugwinning gunstig; gunstige milieubelasting; hoge lichtdoorlatendheid; repeteerbaar; goede mogelijkheden voor logistiek en automatisering	goede isolatie alleen mogelijk door dubbel membraan of hor. energiescherm op 4 m hoogte; geschikte folie moet ontwikkeld worden; tuidraden bij de eindgevels; gewassen, installaties ophangen aan constructie (met hulpconstructie)
5A.	Idem als 5 echter met openklapbare piramide	Idem als 5	Idem als 5 echter platen in piramide	Idem als 5	Idem als 5, echter ventilatie door openklappen piramide	Idem als 5,echter met kans op inregenen
5B.	Idem als 5 echter met draaibare horizontale klep	Idem als 5	Idem als 5 echter klep uitvoeren met kunststofplaat	Idem als 5 echter hoogte van top van het dak: 6,6 m	Idem als 5 echter ventilatie door draaien van de klep om een as	Idem als 5,echter met kans op inregenen; groot horizontaal vlak in het dek (condensdruppels)
5C.	Idem als 5B, echter met smalle, draaibare kleppen	Idem als 5B	Idem als 5B	Idem als 5B	Idem als 5 echter ventilatie via smalle, draaibare kleppen	Idem als 5,echter met kans op inregenen; groot horizontaal vlak in het dek (condensdruppels)
6.	Membraan constructie met asymmetrisch geplaatste mast	Verzinkt staal; aluminium; draden / kabels	Enkele kunststoffolie in het dek; kunststofplaten in de gevels (aansluiting via luchtslangen)	vakmaat 15 x 15 m; gevelhoogte 3 m; top van de mast: 8,56 m hoog	licht in gewicht; ventilatie door draaien van taatsramen; hoge lichtdoorlatendheid; gunstige milieubelasting; goede temperatuur- en luchtvochtigheidverdeling goede mogelijkheden voor logistiek en automatisering; repeteerbaar;	goede isolatie alleen mogelijk door dubbel membraan of hor. energiescherm op 4 m hoogte; geschikte folie moet ontwikkeld worden; tuidraden bij de eindgevels; gewassen, installaties ophangen aan constructie (met hulpconstructie)
7.	Membraan constructie gespannen tussen masten en met centrale luchting	Verzinkt staal; aluminium; draden / kabels	Enkele kunststoffolie in het dek en de luchting; kunststofplaten in de gevels	vakmaat 15 x 15 m; gevelhoogte 3 m; top van de masten: 12 m hoog	licht in gewicht; ventilatie door omhoogbewegen van kegel via kabels; energieterugwinning gunstig; gunstige milieubelasting; hoge lichtdoorlatendheid door zeer weinig constructiedelen; goede mogelijkheden voor logistiek en automatisering; repeteerbaar	goede isolatie alleen mogelijk door dubbel membraan of hor. energiescherm op 4 m hoogte; geschikte folie moet nog ontwikkeld worden; tuidraden bij de eindgevels; gewassen, installaties ophangen aan constructie (met hulpconstructie)

DGPS ontwerp		Materiaal constructie	Materiaal omhulling	afmetingen (m)	Voordelen	nadelen
8.	Oorspronkelijk DGPS-ontwerp rond met centrale draagmast	Verzinkt staal; aluminium; Draden / kabels	Dek: enkele kunststoffolie; gevels: kunststofplaten	straal 100 m, masthoogte 45 m; gevelhoogte 5 m	grote vrije ruimte; energieterugwinning gunstig; gunstige milieubelasting; hoge lichtdoorlatendheid door weinig constructiedelen; goede mogelijkheden voor logistiek en automatisering	goede isolatie alleen mogelijk door dubbel membraan; alleen klimatisering via centrale afzuiging met ontvochtiging e.d.; luchtaanvoer via gevels; slechte temp. verdeling en luchtvochtigheid; mogelijk te sterke luchtbeweging voor de planten; geen mogelijkheden voor ophangen gewassen e.d.; geen; geen repeteerbaarheid; afdichten ventilatieopening in het dek
8A.	DGPS-ontwerp moduul zeshoek	Idem als 8	Dek: enkele kunststoffolie; gevels: kunststofplaten	kleinere modulen; gelijkmatige zeshoek met rib van 25 m	ventilatie in de goten tussen de modulen; kleinere hoogte dan 8; energieterugwinning gunstig; gunstige milieubelasting; hoge lichtdoorlatendheid door weinig constructiedelen; repeteerbaar	goede isolatie mogelijk door dubbel membraan; minder vrije ruimte dan 8; ventilatie alleen op goothoogte; mogelijkheden voor logistiek en automatisering onduidelijk;
8B.	Idem, echter dakvorm met rechte lijnen	Idem als 8	Enkele / dubbele kunststofplaten	Idem als 8	Idem als 8	Idem als 8, echter goede isolatie ook mogelijk via platen i.p.v. membraan
8C.	Idem, echter dakvorm met radiaal netwerk met verschillende hoogten	Idem als 8	Dek: enkele kunststoffolie of enkele / dubbele kunststofplaten; gevels: kunststofplaten	Idem als 8	Idem als 8	Idem als 8, echter goede isolatie ook mogelijk via platen i.p.v. membraan
8D.	Idem, echter dakvorm met opgeblazen slurven	Verzinkt staal; aluminium; Draden / kabels	Opgeblazen kunststoffolie	Idem als 8	eventueel geen centrale draagmast nodig;	Idem als 8, echter goede isolatie via opgeblazen slurven i.p.v. membraan; energie nodig voor overeind houden kas
9	Halve bolvorm met inwendige nokluchting	Verzinkt staal; aluminium; Draden / kabels	Gespannen kunststoffolie; in ventilatieconstructie : opgeblazen slurven	diameter 40 m; nokhoogte 20 m	(regelbare) ventilatie op hoogste punt in de kas; energieterugwinning gunstig; gunstige milieubelasting; hoge lichtdoorlatendheid door weinig constructiedelen	slechte temp. en luchtvochtigheid verdeling, geen goede mogelijkheden voor logistiek en automatisering; geen repeteerbaarheid; groot horizontaal vlak in het dek (condensdruppels)
9A.	Halve bolvorm met uitwendige nokluchting	Idem als 9	Idem als 9	Idem als 9	Idem als 9 echter naar verwachting iets gunstiger t.a.v. temp. en luchtvochtigheidverdeling	Idem als 9 (zie ook voordelen)
10	Kas met taps toelopende daken en open nokventilatie	Verzinkt staal; aluminium; Draden / kabels	Dek: gespannen kunststoffolie; gevels kunststofplaten of folie	Moduul 10 x 20 m; nokhoogte 9,77 m; goothoogte 4 m	Mogelijkheden voor toevoeropeningen bij de goot en afvoeropeningen in de nok; energieterugwinning gunstig; gunstige milieubelasting; hoge lichtdoorlatendheid door weinig constructiedelen	afdichten ventilatieopening bij de nok

4.3 Beschrijving potentiële kasontwerpen

Op basis van dit programma van eisen zijn door IMAG in eerste instantie een aantal nieuwe kasontwerpen ontwikkeld en geschetst, zowel gebaseerd op de meer traditionele constructies als ook op geavanceerde constructies, zoals membraan en pneumatische constructies. In tabel 2 worden deze ontwerpen omschreven en in de figuren 53 t/m 71 worden schetsmatige tekeningen hiervan weergegeven. Beoordeling potentiële kasontwerpen

4.4 Beoordeling potentiële kasontwerpen

De nieuwe kasontwerpen (beschrijving zie paraaf 4.3) zijn ontwikkeld op basis van het programma van eisen (zie paragraaf 4.2). Om deze gemaakte ontwerpen te kunnen beoordelen en tot een selectie van ontwerpen te komen, zijn uit het programma van eisen de belangrijkste criteria samengevat en is er een ranking uitgevoerd. Deze uitgewerkte beoordelingscriteria zijn:

A. Geen gebruik van eindige energiebronnen

- dit is in principe onafhankelijk van het kasontwerp.

B. Minimaliseren van energieverbruik

Isolatie

De k-waarde van enkellaagse folie is hoog (5.8 $W.m^{-2}.K^{-1}$). Met een enkele membraan blijkt het dus niet mogelijk een k-waarde van maximaal 3 $W.m^{-2}.K^{-1}$ te behalen. Bij een kas anno 2040 mag verondersteld worden, dat er materialen zoals nanoschuim op de markt zijn, waardoor folies ook een lage k-waarde kunnen hebben. Als dat niet het geval is, kan door het toepassen van dubbellaagse folie met een luchtlaag ertussen, de isolatie ten opzichte van de huidige systemen sterk verbeterd worden. Het wordt verwacht dat toekomstige folies ook in dubbellaagse uitvoering een zeer hoge lichtdoorlatendheid hebben. In alle ontwerpen kan in plaats van een enkele membraan een dubbele membraan worden ingezet (een uitzondering vormt het ontwerp 4). Kunststofplaten kunnen met uitzondering van de ontwerpen 3, 3A, 4 en 8D worden ingezet. De isolatie van het ontwerp 4 kan alleen worden gerealiseerd door het gebruiken van nanoschuim als omhullingsmateriaal.

Energieterugwinning

Het minimaliseren van het energieverbruik kan verder worden gerealiseerd door het terugwinnen van energie ten aanzien van warmte en waterdamp uit de lucht binnen de kas. De taken van energieterugwinning zijn a) ontvochtiging om een te hoge luchtvochtigheid in de kas te voorkomen en de latente warmte (waterdamp) niet ongebruikt naar buiten te laten en b) de voelbare warmte niet ongebruikt naar buiten te laten.
In de haalbaarheidsstudie is een centrale luchtbehandeling gedacht. Indien veel aparte luchtopeningen in het dek aanwezig zijn, is verondersteld, dat ontvochtiging niet centraal kan worden uitgevoerd. In dit geval moet een decentrale luchtbehandeling plaatsvinden.
Bij een centrale energieterugwinning wordt gebruik gemaakt van de luchtstroming op één plaats. Deze luchtstroming is beschikbaar als de ventilatieopeningen open zijn. Het idee achter ontvochtiging is, dat de ventilatie pas dan geopend moet worden als de lucht te warm wordt of te veel vocht bevat. In dat geval heeft de centrale ontvochtiging geen voordeel, omdat ze alleen werkt als de ventilatie geopend is en zo voor een luchtstroming zorgt. Als de ventilatieopeningen gesloten zijn moet door middel van ventilatoren de luchtstroming opgewekt worden. Dat kost additionele energie. Een centrale ontvochtiging levert dus geen extra bijdrage aan het meer gesloten houden van een kas bijvoorbeeld ten aanzien van de geslotenheid voor kooldioxide.
Bij een decentrale energieterugwinning is geen luchtstroming nodig. Het systeem wordt op een hoog punt in de kas geïnstalleerd (vochtige lucht is lichter in gewicht dan droge lucht), zodat de afgekoelde ontvochtigde lucht naar beneden kan zakken Dat leidt tot een extra lichtverlies indien het systeem niet in de bestaande constructie geïntegreerd kan worden (zoals in de ontwerpen 3 en 3A) (→Ophangen van gewassen en installaties, →Lichtdoorlatendheid).

Milieubelasting van materialen
Een ander belangrijk criterium voor het minimaliseren van het energieverbruik is het gebruik van materialen met een minder schadelijke milieubelasting. Hier kan men een life-cycle-analysis LCA berekenen. Vereenvoudigd gesteld kan aangenomen worden dat de milieubelasting van de kas gering is als minder en lichtere constructiedelen nodig zijn. Nieuwe materialen, zoals geavanceerde folies en kabels, zijn licht in gewicht en kunnen grotere belastingen opnemen. Dus, ontwerpen met minder materiaalverbruik dragen bij tot het minimaliseren van de milieubelasting.

C. Minimaliseren van water- en nutriëntenverbruik
- dit is in principe onafhankelijk van het kasontwerp.

D. Optimale klimaatscondities voor gewasproductie
Ventilatiecapaciteit
De ventilatiecapaciteit is belangrijk i.v.m. de optimale klimaatcondities voor de gewasproductie. Indien luchtramen aanwezig zijn, is verondersteld, dat een natuurlijke ventilatie mogelijk is. Bij systemen met overdruk of onderdruk binnen in de kas is natuurlijke ventilatie niet mogelijk, dit zijn zogenaamde "gesloten kassen" (ontwerp 4). Natuurlijke ventilatie vindt plaats door drukverschillen en draagt zorg voor een optimale temperatuurverdeling, de afvoer van vocht en de toevoer van kooldioxide. Er is vooralsnog geen totale geslotenheid ten aanzien van kooldioxide mogelijk. Een grote ventilatiecapaciteit is vooral belangrijk om een te hoge temperatuur in de zomer en een te hoge luchtvochtigheid in de lente en de herfst te voorkomen. Het geopende vlak, de hoogte, de positie in de kas, de windrichting en -snelheid zijn belangrijke criteria voor een goede natuurlijke ventilatie. Deze factoren zijn ook belangrijk i.v.m. de energie terugwinning (→Energie terugwinning en Ontvochtiging). In ontwerpen met een lage luchtinvoer maar een hoge centrale uitlaatopening ontstaat een zogenaamd schoorsteeneffect. In dergelijk ontwerpen, waar in- en uitlaatopening apart zijn, kan een centrale ontvochtiging worden toegepast. In de winter moeten de luchtramen in het algemeen goed afsluiten om energieverlies door lekkage te voorkomen.
De ventilatiecapaciteit wordt negatief beoordeeld als ze niet groter dan 20% van het grondoppervlak kan worden uitgevoerd.

Klimaat en temperatuurverdeling
De verticale temperatuurverdeling is vooral voor hoge gewassen, zoals komkommers en tomaten, belangrijk. Indien de afmetingen van de kasmodules niet te groot zijn en de ventilatiecapaciteit voldoende hoog is, is verondersteld, dat een redelijk uniforme horizontale en verticale temperatuurverdeling te realiseren is. In ontwerp 3 met alleen ventilatie via de kopgevels is de horizontale temperatuurverdeling problematisch; de lengte van de kas wordt hierdoor beperkt. In de ontwerpen 8 en 8B-D, bestaande uit heel grote modules en kleine ventilatiecapaciteit, zijn grote temperatuurgradiënten te verwachten. Het wordt verondersteld dat bij een kas anno 2020 dekmaterialen op de markt zijn, die alle infrarood straling tegenhouden en zo een sterke opwarming door veel instraling voorkomen, zodat de klimatisering van de kas via een klimatiseringsinstallatie in de zomer geen probleem is.
Voor een optimaal klimaat is verder een goede regeling van de luchtvochtigheid nodig. Indien een goede energieterugwinning toegepast is en de ventilatiecapaciteit voldoende groot is, kan een optimale luchtvochtigheid van RV=60-90% (afhankelijk van het gewas) worden aangehouden (→Energie terugwinning en Ontvochtiging, →Ventilatiecapaciteit).
De luchtsnelheid is ook een criterium voor de klimaatcondities binnen de kas. Ze mag niet hoger zijn dan v_w=1 $m.s^{-1}$ zijn, omdat anders de planten minder groeien. Groenten reageren met een mindere opbrengst, terwijl sierplanten compacter blijven. De windsnelheid wordt in geen van de ontwerpen als kritisch gezien.

Lichtdoorlatendheid
In een nieuwe kas moeten de klimaatcondities voor de gewasproductie optimaal zijn. De lichtdoorlatendheid mag niet minder zijn dan bij de huidige systemen. Omdat de hoeveelheid licht op gewasniveau grote effecten heeft op de productieomvang, moet een doorlatendheid voor diffuus licht van minimaal 75% worden aangehouden.
In alle ontwerpen wordt als voorwaarde genomen, dat een folie met een hogere lichtdoorlatendheid dan enkelglas beschikbaar is. Het wordt verder aangenomen dat deze ook als dubbellaagse folie een lichtdoorlatendheid heeft vergelijkbaar met enkelglas. Bij een kas voor 2020 mag verondersteld worden, dat er

materialen zoals zigzag-kunststofplaten op de markt zijn met een hogere lichtdoorlatendheid. Verder is voor de lichtonderschepping het aantal en de grootte van de constructiedelen en de installaties binnen de kas belangrijk. Een constructie met grote overspanningen leidt meestal tot een hogere lichtdoorlatendheid. Ook kabelconstructies hebben hierop een positieve invloed.
Behalve de lichtdoorlatendheid door de constructie en het dekmateriaal zijn de lichtonderschepping door het systeem voor de energieterugwinning en door een aparte ondersteuningsconstructie voor het ophangen van gewassen en installaties van belang (→Energie terugwinning en Ontvochtiging, →Ophangen van gewassen en installaties).

E.Optimale besturing van gewasproductie
Ophangen gewassen en installaties
De constructie van de huidige Venlo-kas fungeert ook als ondersteuningsconstructie van het teeltsysteem. De belastingen door gewassen en installaties moeten volgens de norm worden bepaald en berekend. Als er een constructie met grote modulen wordt ontwikkeld, is het ophangen van gewassen en installaties aan de constructie zelf niet meer mogelijk. De kas kan dan wellicht lichter worden uitgevoerd. Er dient dan een aparte ondersteuningsconstructie te worden aangebracht voor het teeltsysteem (bij ontwerpen 3, 3A, 4, 8, 8B-D). Dus is het lichtverlies door de constructie zelf veel minder dan in de huidige kassen maar wordt een extra lichtonderschepping veroorzaakt door de aparte ondersteuningsconstructie. Verder kan het systeem voor de decentrale energieterugwinning in de aparte ondersteuningsconstructie worden toegepast. In dit geval mag de lichtonderschepping door de decentrale energieterugwinning niet extra in rekening worden gebracht (→Energieterugwinning en Ontvochtiging, →Lichtdoorlatendheid).

Logistiek en Automatisering
Het systeem moet kunnen voldoen aan een gevarieerde vraag naar producten, kwaliteiten, kwantiteiten en tijdstippen van beschikbaarheid. De ontwerpen zullen voor verschillende gewastypen geschikt moeten zijn, zodat in de toekomst in dezelfde kas gemakkelijk een ander gewas kan worden geproduceerd dan heden. Indien een ontwerp een modulair karakter heeft, is de inrichting van de logistiek binnen de kas traditioneel mogelijk. Indien een ontwerp geen modulair karakter heeft, zijn echter grote enkelvoudige modulen nodig, om logistiek en automatisering winstgevend uit te kunnen voeren. Bij ronde kasvormen moet een geavanceerde logistiek bedacht worden. In dat geval komt een logistiek met een draaibare teeltoppervlak etc. in beeld. Productieprocessen zullen zo veel mogelijk worden geautomatiseerd. Logistiek en automatisering worden verbeterd als de modulen grote vrije overspanningen hebben zonder tussenliggende kolommen of kabels, die het bedrijfsinterne transport belemmeren.

Repeteerbaarheid
De repeteerbaarheid, dus het modulaire karakter van een kas is niet alleen belangrijk voor de logistiek en automatisering maar ook voor de optimale benutting van de ruimte, optimale arbeidsprocessen en het energieverbruik van het systeem. Het warmteverlies door de kasomhulling neemt namelijk toe met de grootte van het dekoppervlak bij losstaande kassen. Ook is meer constructiemateriaal nodig, als vrijstaande eenheden worden gebouwd in vergelijking met een modulaire opbouw met een aanééngesloten kasoppervlak met een daaraan gekoppeld hogere milieubelasting.

F. Optimale arbeidsprocessen en arbeidsomstandigheden
- dit is in principe onafhankelijk van het kasontwerp.

G. Multifunctionaliteit
- dit is in principe onafhankelijk van het kasontwerp.

H. Inpassen in het landschap
- de ontwerpen zijn niet geëvalueerd op dit punt in het kader van dit onderzoek. Het is wel een duidelijk punt voor vervolgonderzoek.

I. Economie
- de ontwerpen zijn in deze fase (nog) niet geëvalueerd op dit punt in het kader van dit onderzoek. Het is wel duidelijk dat dit een belangrijk punt is voor vervolgonderzoek.

J. Constructieve haalbaarheid en betrouwbaarheid

Een van de belangrijkste criteria voor het beoordelen van de ontwerpen is de constructieve haalbaarheid. Deze is naar onze mening voor alle ontwerpen aangegeven. Alleen blijkt in ontwerp 3A het integreren van natuurlijke ventilatie in het dek nog moeilijk. De constructieve betrouwbaarheid wordt in de ontwerpen 5A-C kritisch ingeschat. In 5A en 5B is het te bewegen ventilatievlak heel groot en dus waarschijnlijk sterk windgevoelig. In 5B en 5C is verder op grond van het horizontaal vlak de afdichting van de ventilatie een probleem. Dat geldt ook voor de ontwerpen 9 en 9A.

De vraag kan gesteld worden: Welke van de kasontwerpen zijn nieuw en welke van de ontwerpen zijn reeds in de praktijk getest ?

In principe zijn alle vormen min of meer in de praktijk getest, echter hoofdzakelijk voor gebouwen en niet voor kassen. In de meeste ontwerpen zitten wel onderdelen die nog niet getest zijn, zeker niet in de tuinbouw.

Ontwerp 1 lijkt op een Venlo-kas maar met andere afmetingen, met ander glas en een andere bevestigingstechniek voor het glas, hetgeen voor gebouwen reeds getest is (Octatube, 1999).

Ontwerp 2 is een foliekas met een geavanceerd dekmateriaal, wat nog ontwikkeld moet worden om een maximale lichtdoorlatendheid met een maximale isolatiewaarde en een maximale foliesterkte te combineren. De ventilatie is in een prototype getest (Roberts, 1976).

Ook ontwerp 4 is getest in de tuinbouwpraktijk. In Ohio (USA) is reeds begin tachtiger jaren een kas met overdruk in de kas en ventilatie via ventilatoren gebouwd. In Nederland worden blaastunnels voor asperges en vollegronds groenten als tijdelijke overkapping gebruikt (Amevo, 1999). Een aantal voorbeelden zijn verder gebouwd in de vorm van zwembaden en sporthallen. Ook hier moet een geavanceerd dekmateriaal ontwikkeld worden.

De opgeblazen constructie van ontwerp 3 is onder andere getest op de Expo 1970 in Osaka (Japan) maar alleen met een enkele membraan en onderdruk in het gebouw (Nohmura, 1991). Het zal hier worden uitgevoerd met een dubbele membraan en onderdruk tussen de twee membranen om te voorkomen dat het gebouw als gesloten kas moet worden uitgevoerd. De transparante membraan moet nog worden ontwikkeld. Er zijn instituten bezig dergelijke pneumatische constructies te ontwikkelen, de eerste ontwerpen zijn al getest (Schock, 1997). De ontwerpen 3 en 3A zijn helemaal nieuw in de tuinbouw.

Membraan constructies zoals bij het ontwerp 5 zijn tegenwoordig heel populair voor gebouwen (Berger, 1996; Schock, 1997). Er zijn ook pogingen ondernomen om dergelijke constructies voor de tuinbouw te gebruiken (Bubner *et al*, 1985; TH Delft, 1985) maar er is nooit een prototype gebouwd. Voor dierenparken, zoals Burgers' Bush in Arnhem en Hellabrunn in München (Schock, 1997), zijn enkele projecten met transparante membranen op basis van meerlaagse ETFE folie gerealiseerd.

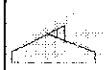
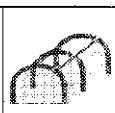
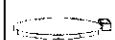
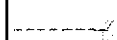
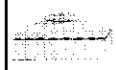
Ook ontwerp 7 is nieuw in de tuinbouw. Een vergelijkbare constructiewijze is reeds als een overkapping van een luchthaven getest (Berger, 1996). Een geschikt dekmateriaal moet nog worden ontwikkeld.

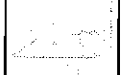
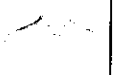
Ontwerp 6 is een combinatie van een membraan constructie en verticale kunststofplaten (of glas). Het is ons niet bekend of deze constructievorm reeds getest is. Het ventilatiemechanisme toegepast in gebouwen is reeds bekend, zoals te zien in het gebouw van Alterra in Wageningen.

Voor het oorspronkelijke DGPS-ontwerp (ontwerp 8) is octrooi verleend aan IMAG. De constructieve tentvorm is al eeuwenlang bekend (Berger, 1996) en ook voor nieuwe gebouwen heel populair (Berger, 1996). De energiewinning door het schoorsteeneffect in een "kas" is reeds in 1982 in Spanje getest (Knapp, 1982).

Ontwerp 9 bestaat uit dragende bogen, vergelijkbaar met verschillende reeds gerealiseerde projecten (Berger, 1996), terwijl ontwerp 10 een combinatie van de ontwerpen 1 en 8 beschrijft.

Tabel 3: Beoordeling en ranking van de nieuwe kasontwerpen voor een Duurzaam Gewas Productie Systeem (IMAG)

Beoordelings-criteria									
	1	**2**	**3**	**3A**	**4**	**5**	**5A**	**5B**	**5C**
Constructieve haalbaarheid / betrouwbaar-heid	ok	ok	ok	integreren ventilatie in dek moeilijk	ok	ok	ventilatie wind-gevoelig	afdichten ventilatie moeilijk, wind-gevoelig	afdichten ventilatie moeilijk
Isolatie mogelijkheid	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok
Milieubelasting van materialen	hetzelfde dan huidige systemen	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok
Energie terugwinning / ontvochtiging	decentraal	decentraal	decentraal	decentraal	centraal	decentraal	decentraal	decentraal	decentraal
Ventilatie-capaciteit	56%	20,1%	21,6%	25%	?	20%	22,6%	20%	20%
Klimaat / temperatuur-verdeling	ok	ok	tempera-tuur-gradiënt horizontaal	ok	ok, als nieuwe mateiralen beschik-baar zijn	ok	ok	horizontale vlakken in ventilatie	horizontale vlakken in ventilatie
Lichtdoorlatend-heid	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok
Ophangen gewassen en installaties	aan constructie	aan constructie	aparte constructie	aparte constructie	aparte constructie	aan constructie	aan constructie	aan constructie	aan constructie
Logistiek en automatisering	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok
Repeteerbaar-heid	ok	ok	ok	ok	niet mogelijk	ok	ok	ok	ok

Beoordelings-criteria										
	6	**7**	**8**	**8A**	**8B**	**8C**	**8D**	**9**	**9A**	**10**
Constructieve haalbaarheid / betrouwbaar-heid	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	afdichten ventilatie in nok moeilijk
Isolatie mogelijkheid	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok
Milieubelasting van materialen	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok
Energie terugwinning / ontvochtiging	decentraal	decentraal	centraal	decentraal	Centraal	centraal	centraal	decentraal	decentraal	decentraal
Ventilatie-capaciteit	30%	20%	10%	20.7%	10%	10%	10%	15%	15%	20%
Klimaat / temperatuur-verdeling	ok	ok	tempera-tuur-gradiënten	ok	Tempera-tuur-gradiënten	tempera-tuur-gradiënten	tempera-tuur-gradiënten	horizontale vlakken in ventilatie	horizontale vlakken in ventilatie	ok
Lichtdoorlatend-heid	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok
Ophangen gewassen en installaties	aan constructie	aan constructie	aparte constructie	aan constructie	Aparte constructie	aparte constructie	aparte constructie	aan constructie	aan constructie	aan constructie
Logistiek en automatisering	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	te kleine modulen	te kleine modulen	ok
Repeteerbaar-heid	ok	ok	niet mogelijk	ok	niet mogelijk	niet mogelijk	niet mogelijk	niet mogelijk	niet mogelijk	ok

4.5 Ranking potentiële kasontwerpen

Op grond van de genoemde beoordelingscriteria worden verschillende types kasontwerpen uitgekozen om deze verder uit te werken. Een overzicht van de ranking van alle kasontwerpen wordt weergegeven in tabel 3.

Ontwerp 1 (kas met gehard glas) is een traditionele constructie, het wordt niet verwacht dat de milieuwinst van een factor 20 kan worden gehaald met dit ontwerp. Ontwerp 2 (pneumatische constructie met folies) wordt gekozen om nader uit te werken. Bij ontwerp 3 (pneumatische constructie met opgeblazen spanten) worden grote nadelen qua kasklimaat verwacht. Er ontstaat naar verwachting een horizontale temperatuur gradiënt door de ventilatie alleen in de kopgevels te lokaliseren. Ontwerp 3A met grote ventilatievlakken in het dak heeft dit nadeel niet en is een uitdaging voor de ontwikkeling van een nieuwe generatie tuinbouwkassen. Omdat ontwerp 4 (pneumatische constructie met overdruk in de kasruimte) niet repeteerbaar is, wordt aan dit ontwerp geen aandacht besteedt. De ontwerpen 5, 5A, 5B, 5C (membraan constructie met een symmetrisch geplaatste mast) en 7 (membraan constructie gespannen tussen masten) zijn vergelijkbaar. Echter is in de ontwerpen 5A, 5B en 5C de ventilatie constructief moeilijk haalbaar of niet betrouwbaar, ze is of windgevoelig of niet voldoende af te dichten, horizontale vlakken in het dek leiden tot ongewenst afdruppelen van condenswater. In ontwerp 5 is een centrale mast nodig om de ventilatie te realiseren. Ontwerp 6 (membraan constructie met asymmetrisch geplaatste mast) wordt vooral op grond van de grote ventilatiecapaciteit en de grote mogelijke overspanningen gekozen om nader uit te werken. De functie van deze mast wordt in ontwerp 7 overgenomen door kabels, welke aan de masten in de hoek zijn bevestigd en welke het dak en het ventilatiesysteem dragen. Omdat met ontwerp 7 een grotere overspanning kan worden gerealiseerd wordt voor dit ontwerp gekozen. De ontwerpen 8, 8B, 8C, 8D (DGPS-ontwerpen) zijn niet repeteerbaar uit te voeren. Bovendien worden temperatuurgradiënten in de kas verwacht op grond van de lage ventilatiecapaciteit en de positionering van de ventilatieopeningen. Ontwerp 8A (DGPS-ontwerp) wordt vooral op grond van de mogelijke repeteerbaarheid en het betere verwachte kasklimaat gekozen om nader uit te werken. De ontwerpen 9 en 9A (halve bolvorm) zijn niet repeteerbaar en de enkelvoudige modulen zijn te klein. De horizontale vlakken in het dek leiden tot ongewenst afdruppelen van condenswater. Ook de ventilatiecapaciteit is te klein. In ontwerp 10 (kas met taps toelopende daken en open nokventilatie) is de ventilatie in de nok moeilijk af te dichten.

Keuze: De kasontwerpen 2 (pneumatische constructie), 3A (pneumatische constructie zonder additionele ondersteuningen), 6 (asymmetrische membraan constructie), 7 (symmetrische membraan constructie) en 8A (variatie oorspronkelijk ontwerp) zijn de meest veelbelovende constructies voor een nieuwe generatie tuinbouwkassen. Deze ontwerpen zullen nader uitgewerkt gaan worden.

5. Conclusies

Om aan de lange termijn doelstellingen van o.a. DTO in de toekomst te kunnen voldoen zijn nieuwe productiesysteem nodig met nieuwe constructies en dekmaterialen. Geavanceerde tuinbouwkassen, zoals membraan en pneumatische constructies, zouden hier een bijdrage kunnen leveren. Tot nu toe zijn reeds een aantal constructies in de civiele bouwwereld getest. Enkele constructies zijn gebouwd voor dierenparken en enkele prototypen zijn specifiek voor de tuinbouw ontworpen.

De DTO doelstellingen kunnen alleen maar worden gehaald door zoveel mogelijk kringlopen te sluiten. Zo moet gestreefd worden naar een gesloten waterkringloop, niet alleen voor irrigatie maar ook voor waterdamp, een gesloten CO_2-kringloop en een gesloten nutriëntenkringloop. Dat betekent dat een "gesloten kas", een kas zonder natuurlijke ventilatie, waar alle stof in- en uitstroom gecontroleerd worden, een optie zou kunnen zijn. Een dergelijk kas is echter momenteel niet realiseerbaar, maar vraagt een nieuwe generatie dekmaterialen, welke vooral het nabije infrarood (NIR) tegenhouden. Anders wordt de kas in de zomer te warm als gevolg van de hoge zoninstraling. Alle voorgestelde ontwerpen voor een Duurzaam Gewas Productie Systeem kunnen in principe als "gesloten" vorm worden uitgevoerd, als nieuwe dekmaterialen beschikbaar komen. Op grond van de gewenste ventilatiecapaciteit en de kosten heeft natuurlijke ventilatie heden ten dage echter de voorkeur. Weliswaar is het met geavanceerde constructies moeilijker een natuurlijke ventilatie te realiseren, omdat ze vooral bestaan uit een gespannen (of opgeblazen) membraan zonder of met weinig constructiedelen. De integratie van ventilatieramen is dus ingewikkelder.

Aan de andere kant is het grootste voordeel van geavanceerde constructies waarschijnlijk een hogere lichtdoorlatendheid. In een slim ontwerp behoeven er minder constructiedelen te worden gebruikt en zijn grote overspanningen mogelijk. Grote vrije overspanningen zijn ook vanuit logistiek oogpunt een voordeel. Spanten en profielen worden vooral in membraan constructies grotendeels door kabels vervangen. Bij pneumatische constructies, zoals ze momenteel worden ingezet voor dierenparken e.d., klopt dit argument echter niet. Door het werken met overdruk in luchtkussens zijn op geringe afstand lichtonderscheppende profielen nodig. In de toekomst moeten folies worden ontwikkeld, die een hogere treksterkte hebben, zodat grotere luchtkussen kunnen worden toegepast, of er moeten membranen met een hogere lichtdoorlatendheid komen. Grote voordelen qua lichtdoorlatendheid bieden zeker de pneumatische constructies zonder additionele ondersteuningen. Deze zijn echter ook in de civiele bouwwereld nog weinig getest. Het is een wetenschappelijke uitdaging om dergelijke transparante, pneumatische kassen, geheel opgebouwd uit gespannen membranen met onder- of overdruk, te ontwikkelen. Deze bieden verder goede mogelijkheden om de sterkte van het gebouw variabel aan te passen afhankelijk van het actuele buitenklimaat, de windsnelheid en de sneeuwbelasting. Hier wordt gevraagd om een regelstrategie voor het overeind houden van het gebouw (spanning in het membraan, over- en onderdruk).

Pneumatische constructies opgebouwd uit dubbele of drievoudige membranen kunnen verder een bijdrage leveren aan de energiebesparing, omdat de isolatiewaarde hoger is. Dat is echter niet het geval voor membraan constructies opgebouwd uit een enkele gespannen membraan. Hiervoor moeten membranen met een hogere isolatiewaarde worden ontwikkeld, zodat ook een gebouw met een enkellaags dekmateriaal een belangrijke bijdrage aan de energiebesparing kan leveren.

Omdat geavanceerde constructies vooral uit membranen en kabels en minder uit traditionele constructiedelen zoals aluminium en staal bestaan, wordt een gunstige LCA verwacht.

Tenslotte biedt de vaak gewelfde vorm van geavanceerde constructies nieuwe mogelijkheden om de kas goed in het landschap in te kunnen passen.

Samenvattend kan worden geconcludeerd, dat geavanceerde constructies veel mogelijkheden qua energiebesparing, milieuvriendelijkheid, lichtdoorlatendheid en logistiek kunnen bieden, maar er zijn tegelijkertijd ook een aantal problemen aan gehecht. Zo moeten vooral nieuwe geavanceerde dekmaterialen worden ontwikkeld om de DTO-doelstellingen te kunnen halen.

Literatuur

ABT, 1988 - De overkapping van het tropisch oerwoud Burgers' Bush te Arnhem. Brochure van BAM de Kinkelder, Arnhem, ABT, Velp, Buro Wiegerinck, Arnhem, 6 pp.

Achten, J.M.F.H., 1999 - Haalbaarheidsstudie voor duurzame gewasproductiesystemen. Jaarverslag 1998, IMAG-DLO, p. 17.

Amevo, 1999 - Productinformatie Air-O-Tunnels van Amevo, Akersloot, Nederland.

Bakker, J.C, 1998 - Duurzaam gewasproductiesysteem. Jaarverslag 1997, IMAG-DLO, p. 22-23.

Bakker, J.C., N.J. van de Braak, C.R. Braam, J.J.G. Breuer, J.B. Campen, J. Huijs, A.Peters, A.N.M. de Koning & K.J. Kramer, 1999 – Duurzaam gewasproductiesysteem – Haalbaarheidsstudie, IMAG /PBG nota V99-03, 77 pp.

Berger, H, 1996 - Light structures – Structures of light (The art and engineering of tensile architecture).

Birkhäuser Verlag, Basel, Boston, Berlin, 186 pp.

Briassoulis, D., D. Waaijenberg, J. Gratraud & B. von Elsner, 1997a - Mechanical properties of covering materials for greenhouses. Part 1: General overview. Journal of Agricultural Engineering Research 67, p. 81-96.

Briassoulis, D., D. Waaijenberg, J. Gratraud & B. von Elsner, 1997b - Mechanical properties of covering materials for greenhouses. Part 2: Quality assessment. Journal of Agricultural Engineering Research 67, p. 171-217.

Bubner, E., R. Koenen, K. Saxe & B. Schürmann 1985 - Weitspannende Gewächshäuser – Fünf Konstruktionsvorschläge. In: Membrankonstruktionen 5, Universiteit GH Essen, Fachbereich 10 Bauwesen, Wehlmann, Essen, 192 pp.

Derikx, P.J.L., J.C.J. Ammerlaan & H.D.M. Kool, 2000 - Kas van de Toekomst: nu onderzoek, straks werkelijkheid. Vakblad voor de Bloemisterij 19, p. 46-47.

Elsner, B. von, D. Briassoulis, D. Waaijenberg, A. Mistriotis, Chr. von Zabeltitz, J. Gratraud, G. Russo & R. Suay-Cortes, 1999a - Review of structural and functional characteristics of greenhouses in European Union countries. Part I: Design requirements. Journal of Agricultural Engineering Research 75, p. 1-16.

Elsner, B. von, D. Briassoulis, D. Waaijenberg, A. Mistriotis, Chr. von Zabeltitz, J. Gratraud, G. Russo & R. Suay-Cortes, 1999b - Review of structural and functional characteristics of greenhouses in European Union countries. Part II: Typical designs. Journal of Agricultural Engineering Research 75, p. 111-126.

General Electric, 1998 - Clearvision 2 (winter 1998/99), Productinformatie van General Electric Structured Products, Bergen op Zoom, Nederland, 11 pp.

Herzog, T., 1976 - Pneumatic Structures - a handbook for the architect and engineer. Crosby Lockwood Staples, Londen, 192 pp.

Hoffmann, S., 1999 - Die Wirkung von photoselektiven Bedachungsmaterialien auf das Wachstum von Zierpflanzen. III. Wirkung des Verhältnisses von Hellrot zu Dunkelrot auf das Streckungswachstum. Gartenbauwissenschaft 64 (6), p. 253-260.

Hoffmann, S., 2000a - UV-straling in de kas: mogelijkheden en grenzen. Vakblad voor de Bloemisterij 25, p. 44-46.

Hoffmann, S., 2000b - Foto's van de wereldtentoonstelling EXPO 2000 in Hannover, Duitsland.

Holsteijn, G.P.A. van & G.P.A. Bot, 1990 - Let bij het aanbrengen van gaas op licht- en luchtdoorlatendheid. Groenten en Fruit, 14 december.

Knapp, W., 1982 - Das Aufwindkraftwerk in Manzanares / Spanien – Energie-Experiment im spanischen Hochland. Bild der Wissenschaft 5, p. 1-12.

Landbouwschap, 1984 - Kwaliteit van kassen – verslag van een onderzoek naar de kwaliteit en de toepassingsmogelijkheden van kasomhullingsmaterialen. Landbouwschap, Den Haag, 32 pp.

LEI-CBS, 2000 - Land- en tuinbouwcijfers 2000, 293 pp.

Mears, D.R., M.K. Kim & W.J. Roberts, 1976 - Structural analysis of an experimental cable-supported air-inflated greenhouse. Transactions of the ASAE 19 (5), p. 915-924.

Nohmura, M., 1991 - The Development of Fabric Structures in Japan and in the United States. Bulletin of the International Association for Shell and Spatial Structures 33, p.156-164.

Ocatube, 1999 - Productinformatie van Octatube, Delft, Nederland.

Roberts., W.J., 1976 - An energy saving naturally ventilated plastic greenhouse. Paper 76-4013, Annual meeting ASAE, June 27-30, 1976, Lincoln, Nebraska, USA, pp. 7 + illustraties.

Rovero, 1999 - Productinformatie van Rovero Systems bv, Raamsdonksveer, Nederland.

Schock, H.J., 1997 - Soft shells – design and technology of tensile architecture. Birkhäuser Verlag, Basel, Boston, Berlin, 176 pp.

TH Delft, 1985 - Kassenproject. Werkgroep Glastuinbouw TH Delft, December 1985.

Toyoda, H., S. Sase, T. Ohtani, & L. Okushima, 1996 - Environmental characteristics of air-supported plastic greenhouse. Paper 26th national agricultural plastics congress, Atlantic City, New Jersey, USA, June 14-18, 1996, p. 121-126.

University of Newcastle-upon-Tyne, 1999 - C.G. Riches en P.D. Gosling, internet website: research activities, pneumatic structures, http://www.ncl.ac.uk/~n343992/pnstruct.htm

Vegter, 2000 - Naar een climax in kaseigenschappen. Vakblad voor de Bloemisterij 25, p. 47.

Verlodt, I. & D. Waaijenberg, 1999 - Folie om de kas doet niet meer onder voor glas. De Boomkwekerij 43, p. 13-15.

Waaijenberg, D. & D. Denkov, 1991 - Foliekappen bieden nieuwe mogelijkheden voor kleinfruit. Fruitteelt 46, p. 22-23.

Waaijenberg, D. & J.W. Frénay, 1993 - Kunststofkas met tuiconstructie: ontwerp, uitvoering en toetsing van een prototype. IMAG rapport 93-24, 51 pp.

Waaijenberg, D., 1990 - The 'cabriolet' greenhouse idea for 'container cultivation 2000'. Plasticulture 87 (3), p. 41-45.

Waaijenberg, D., 1992 - Foto's van de wereldtentoonstelling EXPO 1992 in Sevilla, Spanje.

Waaijenberg, D., 1995 - Richtlijn kassen met flexibele omhullingen – constructieve aspecten. IMAG rapport 95-30, 55 pp.

Waaijenberg, D., 2000 - Natuurlijke ventilatiemogelijkheden in kassen. IMAG nota P 2000-42, 44 pp.

Zabeltitz, Chr. von, 1999 - Greenhouse structures. In: Greenhouse Ecosystems, Ecosystems of the world 20 (Editor: Stanhill., G. & H. Zvi Enoch). Elsevier, Amsterdam, 423 pp.

Samenvatting

Het terugdringen van het energieverbruik in de beschermde teelt conform de Meerjaren Afspraak-Energie Glastuinbouw (MJA-E) en haar vervolg vraagt om nieuwe kasconcepten, waarmee in het jaar 2010 het energieverbruik met 65% gereduceerd kan worden t.o.v. 1980. Getracht wordt deze relatief korte termijn doelstelling te halen door technische verbeteringen aan bestaande kasconstructies en kasdekmaterialen. Lange termijn doelstellingen, bijvoorbeeld conform het plan van Duurzame Technologische Ontwikkeling (DTO) een reductie van de milieubelasting met een factor 20 in het jaar 2040 vraagt om innovaties in het totale kasontwerp. Om aan de lange termijn doelstellingen van o.a. DTO in de toekomst te kunnen voldoen zijn nieuwe productiesystemen nodig.

Sinds 1998 werkt IMAG aan de ontwikkeling van een Duurzaam Gewas Productie Systeem (DGPS), een ontwerp met een geavanceerd constructie, een nieuw type dekmateriaal (waardoor het energieverbruik geminimaliseerd wordt) en klimaatcondities voor de gewasproductie die optimaal zijn. De energievoorziening moet worden gerealiseerd vanuit duurzame energiebronnen, inclusief warmteopslag. Het water- en nutriëntenverbruik moet worden geminimaliseerd. Verder wordt aandacht besteed aan een optimale besturing van de gewasproductie en optimale arbeidsprocessen en arbeidsomstandigheden. Zowel aan maatschappelijke als aan economische aspecten moet aandacht worden besteed.

Om naar een geoptimaliseerd kasontwerp te komen is via een literatuurstudie een inventarisatie uitgevoerd van constructievormen voor kassen. Naast traditionele constructievormen worden ook membranen en pneumatische constructies vanuit de civiele bouwwereld gepresenteerd. Ook zijn de mogelijkheden onderzocht voor het toepassen van geavanceerde constructievormen voor een nieuwe generatie tuinbouwkassen. De sterke en zwakke punten van de verschillende constructietypes worden uitgelegd in paragrafen 2 en 3.

Tevens is de geschiktheid van transparante kasomhullingsmaterialen, glas, kunststofplaten, folies en membranen, onderzocht. Het verschil tussen de huidige beschikbare materialen en de benodigde eigenschappen kan een impuls geven voor nieuwe ontwikkelingen. In de paragrafen 2 en 3 wordt een beschrijving van de bestaande materialen en hun eigenschappen gegeven en een lijst met eisen voor de benodigde eigenschappen en ontwikkelingen van toekomstige materialen.

In het kader van de ontwikkeling van het Duurzaam Gewas Productie Systeem zijn kasontwerpen ontwikkeld, waarvan de haalbaarheid onderzocht werd. De sterke en zwakke punten van de verschillende typen membranen en pneumatische constructies voor de toepassing bij tuinbouwkassen worden toegelicht in paragraaf 4.

Om aan de lange termijn doelstellingen van o.a. DTO in de toekomst te kunnen voldoen zijn nieuwe productiesysteem nodig met nieuwe constructies en dekmaterialen. Samenvattend kan worden geconcludeerd, dat geavanceerde constructies veel mogelijkheden qua energiebesparing, milieuvriendelijkheid, lichtdoorlatendheid en logistiek kunnen bieden. Maar er zijn tegelijkertijd ook een aantal problemen. Zo moeten vooral nieuwe geavanceerde dekmaterialen speciaal voor de toepassing als tuinbouwkassen worden ontwikkeld om de DTO-doelstellingen te kunnen bereiken.

Summary

New greenhouse concepts are required to push back the energy consumption in accordance with the Moreyears Agreement-Energy Protected Cultivation (Meerjaren Afspraak-Energie Glastuinbouw (MJA-E) and its continuation. So the energy consumption has to be reduced with 65% in 2010 compared to 1980. Every effort will be made to succeed in this short-term objective by improving existing greenhouse structures and covering materials. A long-term objective, for example according to the plan of Sustainable Technological Development (Duurzame Technologische Ontwikkeling DTO), is the reduction of the environmental impact with a factor 20 in 2040. To reach this aim innovations of the whole greenhouse concept are necessary. To achieve the long-term objectives of DTO in the future, new integrated approaches are essential.

Since 1998 IMAG works on the development of a Sustainable Plant Production System (Duurzaam Gewas Productie Systeem DGPS), a design with an advanced system and a new type of covering material, which minimises the energy consumption and optimises the climatic conditions for plant production. The energy supply has to be realised with sustainable energy sources including heat storage. The water- and fertiliser consumption has to be minimised. Further attention has to be paid to an optimum control of the plant production and optimum working processes and working conditions. Both social and economical aspects have to be considered.

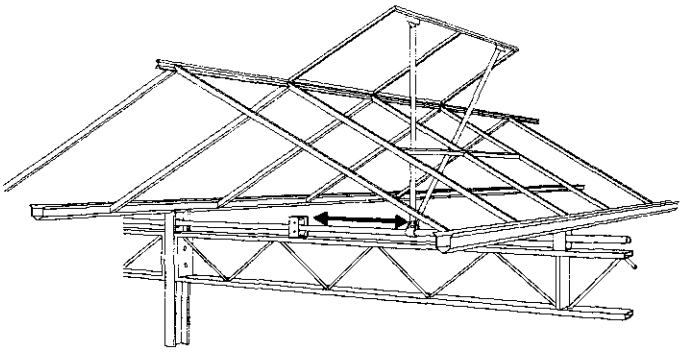
To get an optimum greenhouse design an inventory of structural shapes for greenhouses is made via a literature study. Next to traditional structural shapes also membrane and pneumatic structures out of the world of civil buildings are presented. Further the possibilities to apply advanced structural concepts for a new generation of greenhouses are investigated. The description and the advantages and disadvantages of several structural types are explained in chapter 2 and 3.

Next to this the suitability of transparent greenhouse covering materials, glass, rigid plastic, plastic films and membranes, is investigated. The difference between today's available materials and the necessary material properties gives an impulse for new developments. In chapters 2 and 3 a description of existing materials and their characteristics is given as well as the requirements for material properties and developments of new materials.

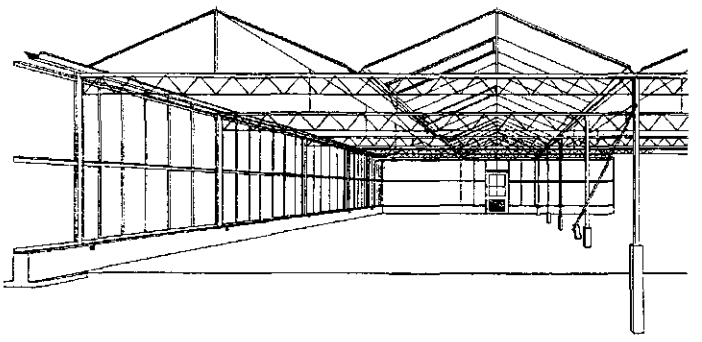
In the scope of investigations on a Sustainable Plant Production System detailed greenhouse designs are developed. The feasibility of these designs is studied. The advantages and disadvantages of the different types of membrane and pneumatic structures to be used as horticultural greenhouses are explained in chapter 4.

New production systems with new structures and new covering materials are necessary to achieve the long-term objectives of DTO. These new designs are described in chapter 4. It can be concluded that advanced systems offer a lot of possibilities concerning better energy saving effects, being more environmental friendly, having a higher lighttransmission and contributing to better logistic. However, advanced structures are not without any difficulties. The DTO objectives can only be achieved if new advanced covering materials are developed.

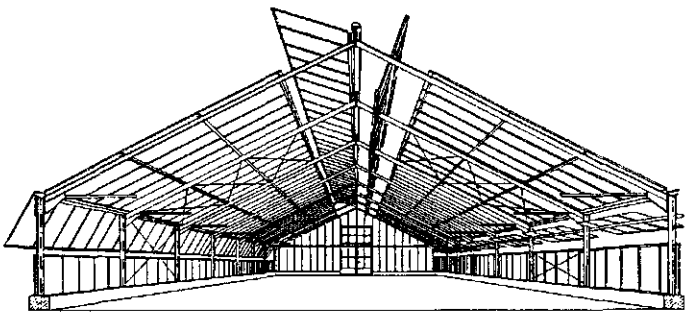
BIJLAGE



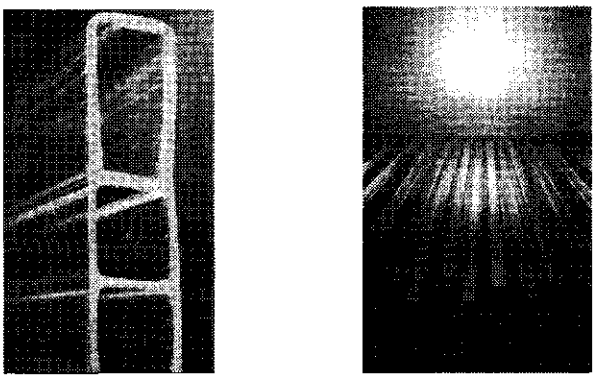
Figuur 1: Venlo-kas dakconstructie met apart 2-ruits luchtraam (Elsner et al, 1999b).



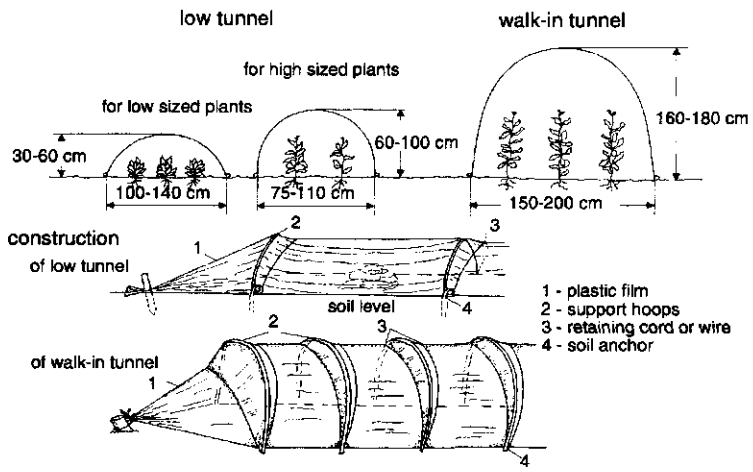
Figuur 2: Venlo-kas met tralieliggers (Zabeltitz, 1999).



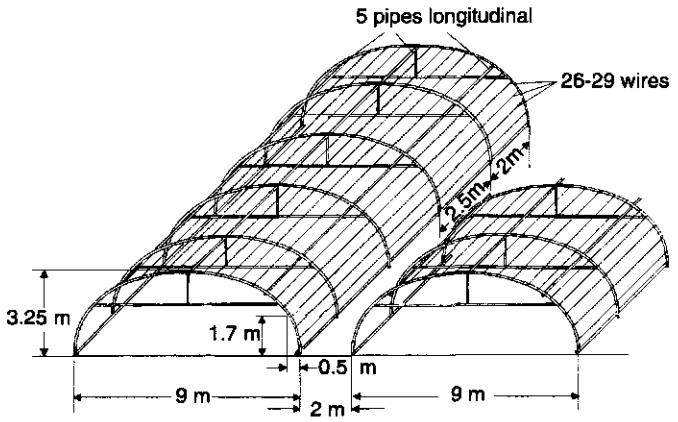
Figuur 3: Breedkap-kas met doorlopende nokluchting (Zabeltitz, 1999).



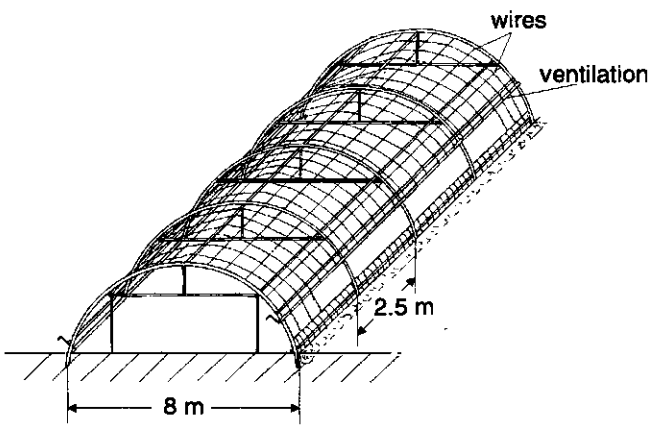
Figuur 4: Dubbelwandige kunststofkanaalplaat (links) en enkelwandige trapeziumvormige plaat (rechts).



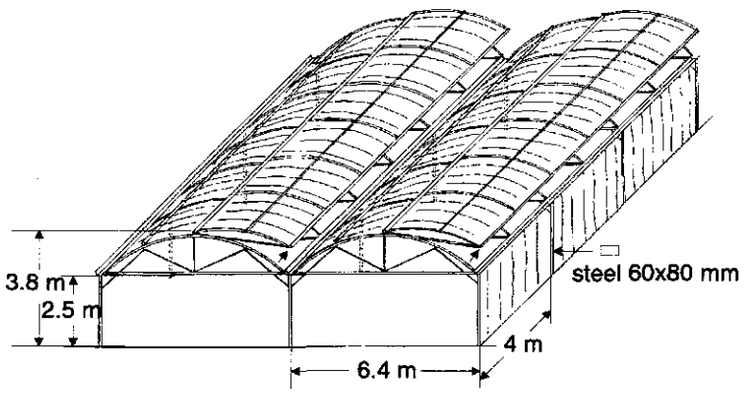
Figuur 5: Lage tunnels, waarin men niet rechtop kan lopen (Zabeltitz, 1999).



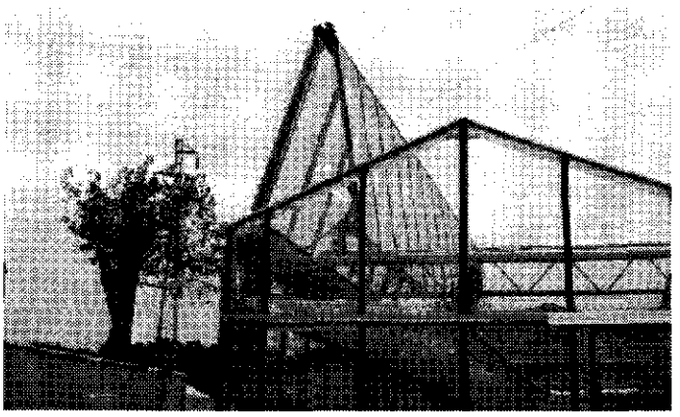
Figuur 6: Folietunnels met gebogen doorsnedenvorm (Zabeltitz, 1999).



Figuur 7: Folietunnel met doorgaande zijgevelluchting (Zabeltitz, 1999).

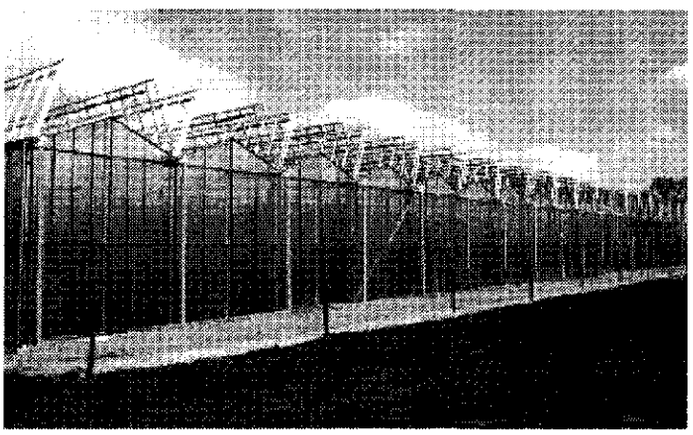


Figuur 8: Foliekas met verticale kop- en zijgevels en dekluchting (Zabeltitz, 1999).

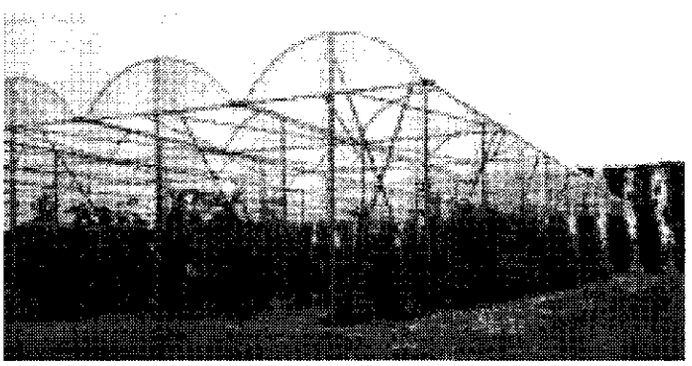


Figuur 9: Cabrioletkas met scharnierende dakvlakken.

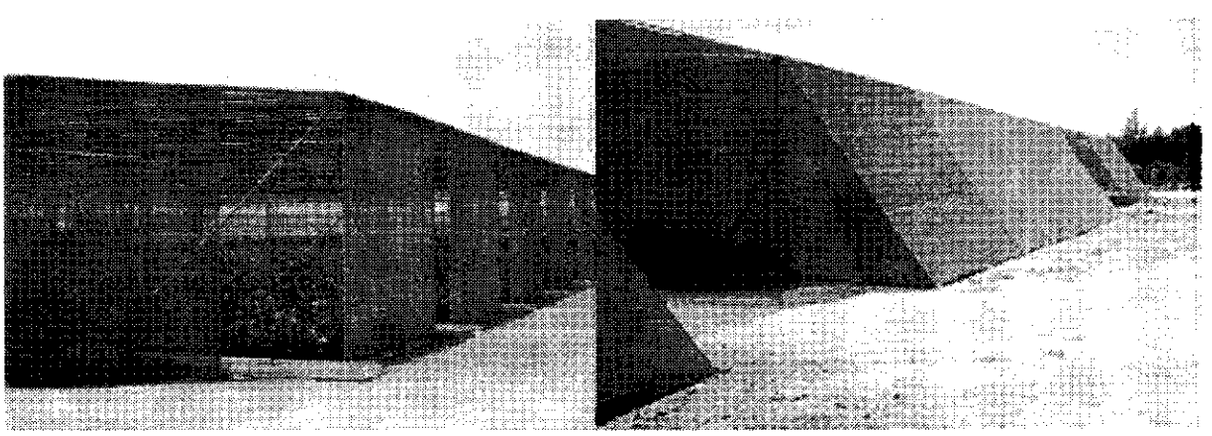
Figuur 10: Cabrioletkas met weggeschoven dak.



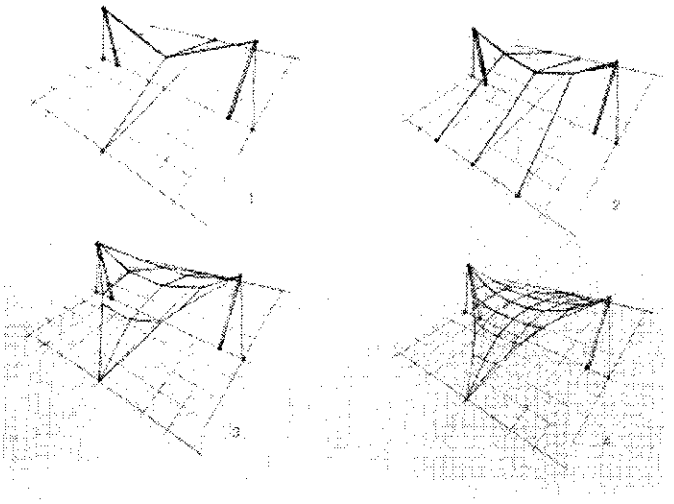
Figuur 11: Cabrioletkas met kleppende dakhelften.



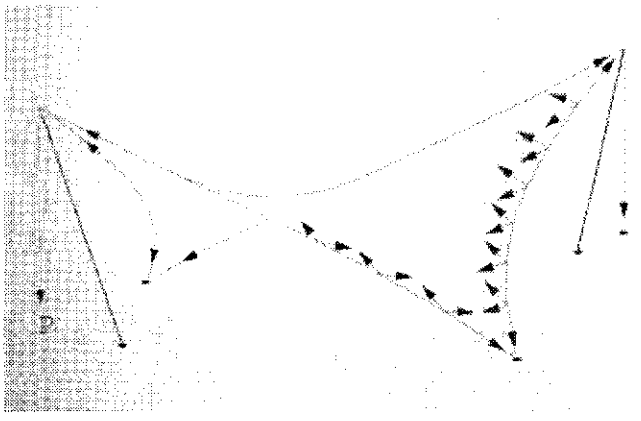
Figuur 12: Regenkappen (Rovero, 1999).



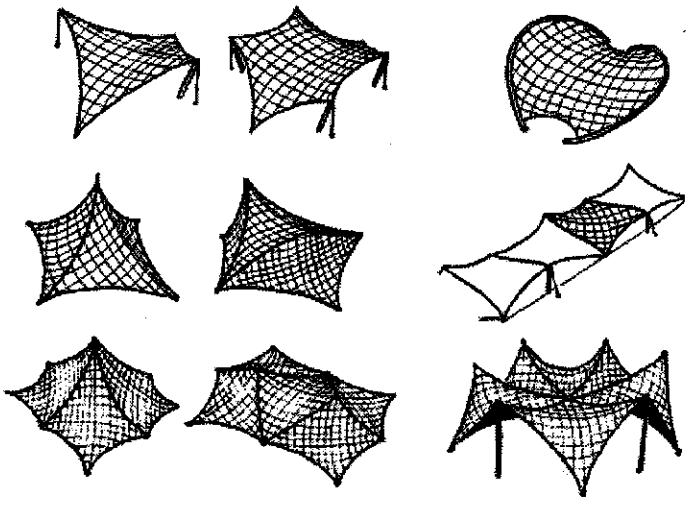
Figuur 13: Schaduwhal (links) en schermhal (rechts) (Rovero, 1999)



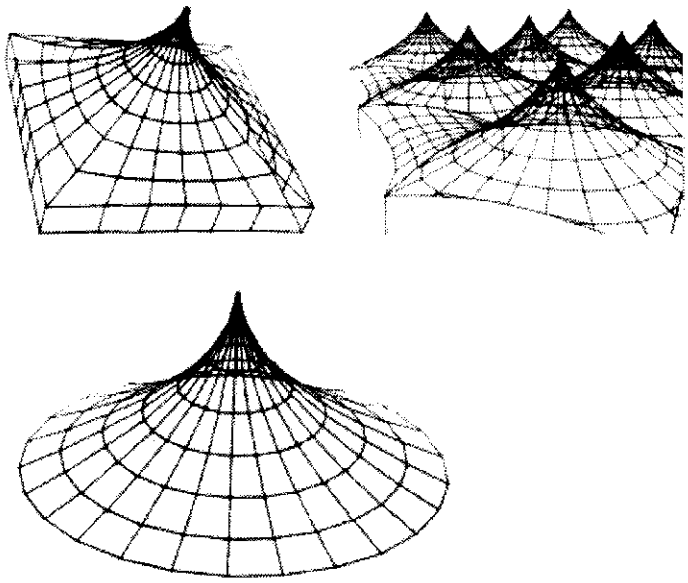
Figuur 14: Opbouw van een constructie met gespannen folie, twee kolommen en gespannen kabels (Berger, 1996).



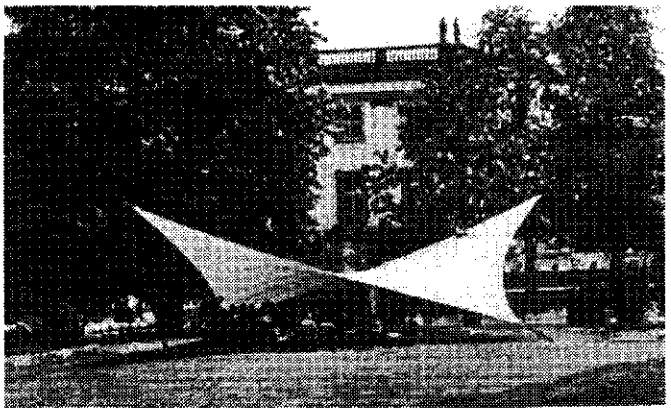
Figuur 15: Krachtsverloop bij een 4-punts membraan constructie als gevolg van een aangebrachte voorspankracht P (Berger, 1996).



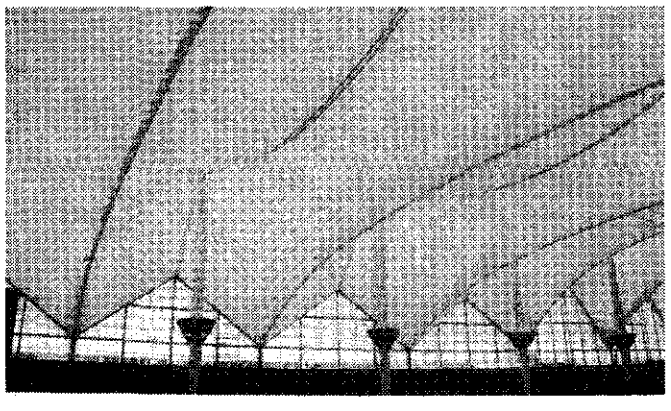
Figuur 16: Lineaire membraanvormen (Berger, 1996).



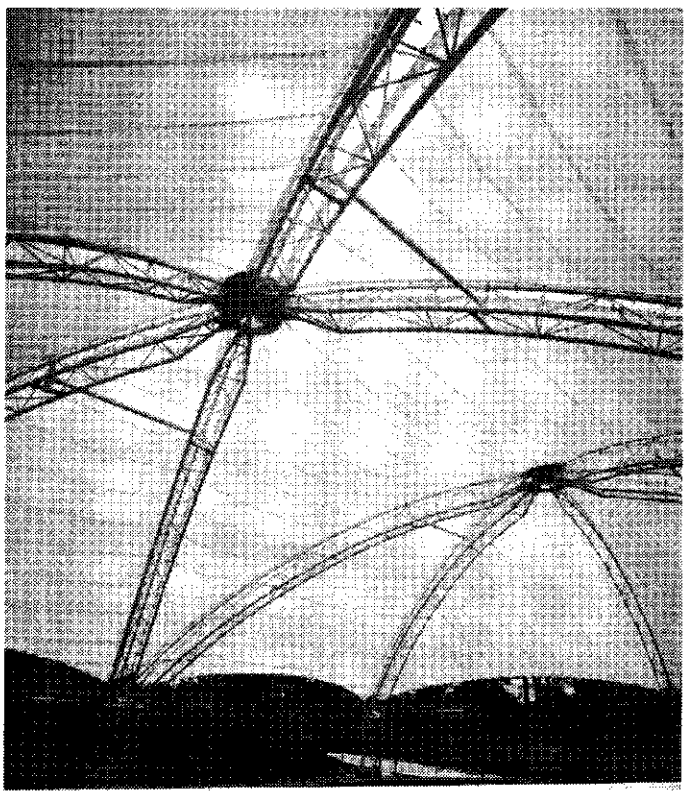
Figuur 17: Radiale membraan constructies (Berger, 1996).



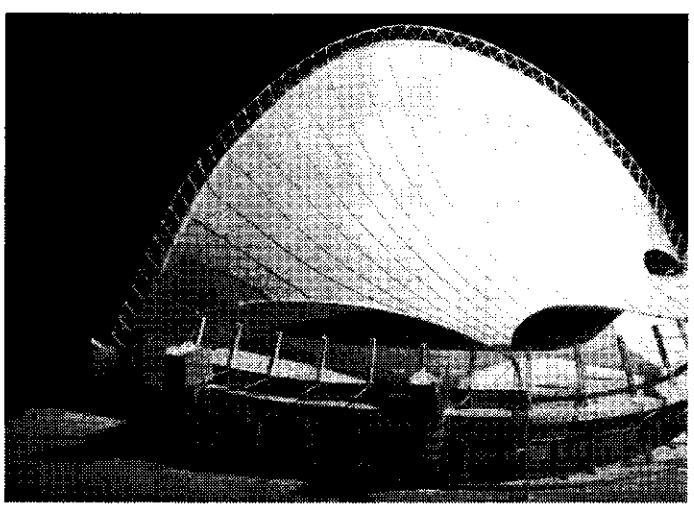
Figuur 18: Zuivere 4-punts constructie gespannen tussen geschoorde masten. Ontwerp van Frei Otto, Kassel, 1955 (Berger, 1996).



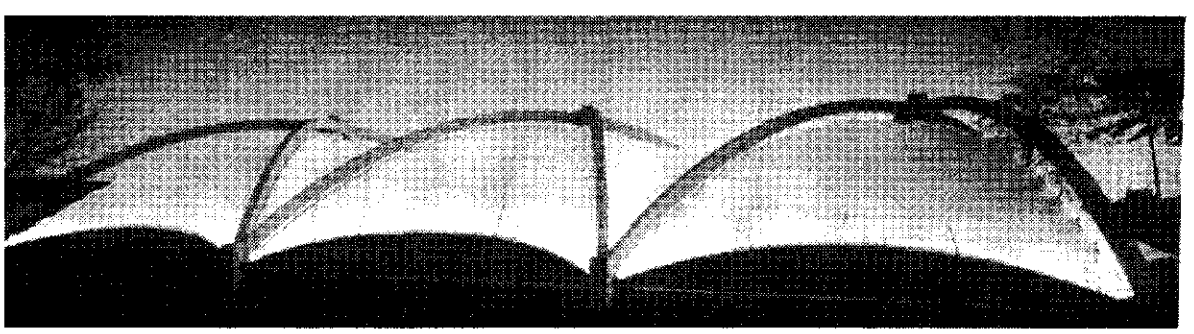
Figuur 19: Jepesson terminal, Denver International Airport, Colorado, USA, 1994 (Berger, 1996).



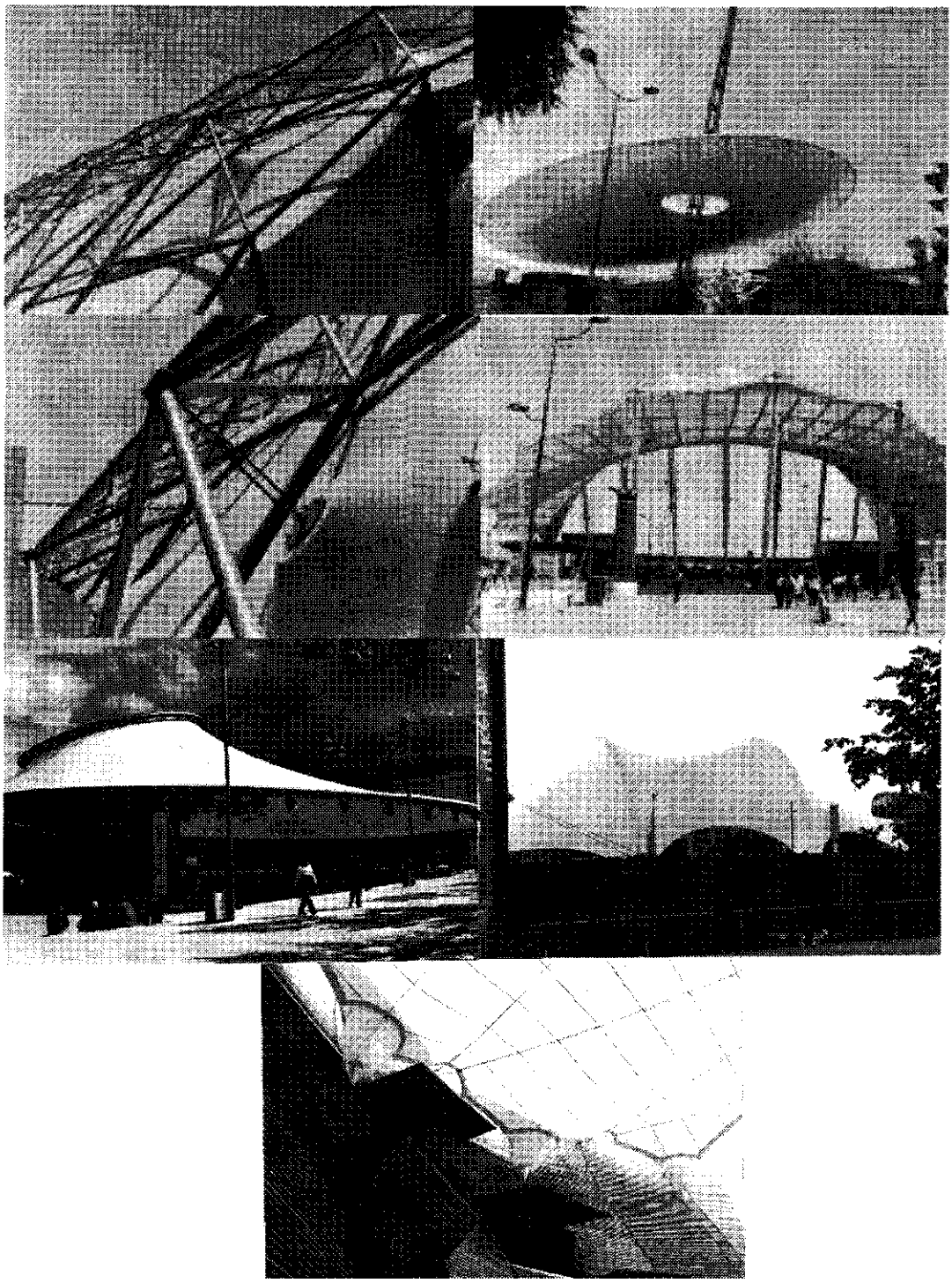
Figuur 20: Tennishal in Atlanta, USA (Berger, 1996).



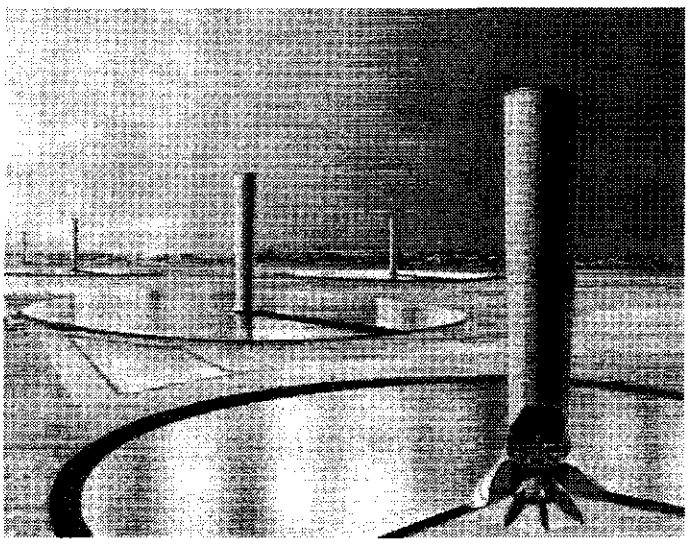
Figuur 21: Model van het Bayamon stadion in Puerto Rico (Berger, 1996).



Figuur 22: Wimbledon trainingsfaciliteit, Verenigd Koninkrijk, 1988 (Berger, 1996).



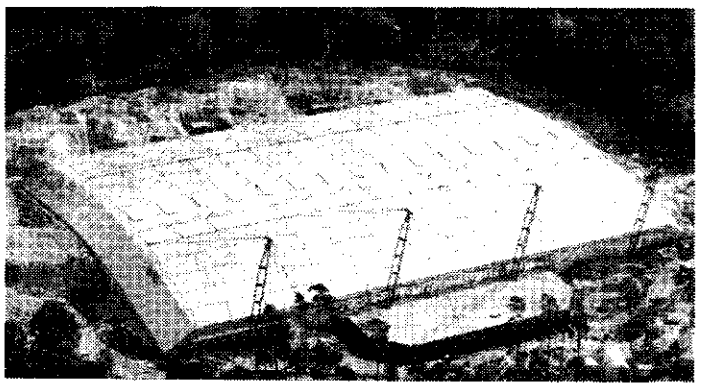
Figuur 23: Wereldtentoonstellingen EXPO 1992 in Sevilla (E) (4 foto's boven) (Waaijenberg, 1992) en EXPO 2000 in Hannover (D) (3 foto's beneden) (Hoffmann, 2000b).



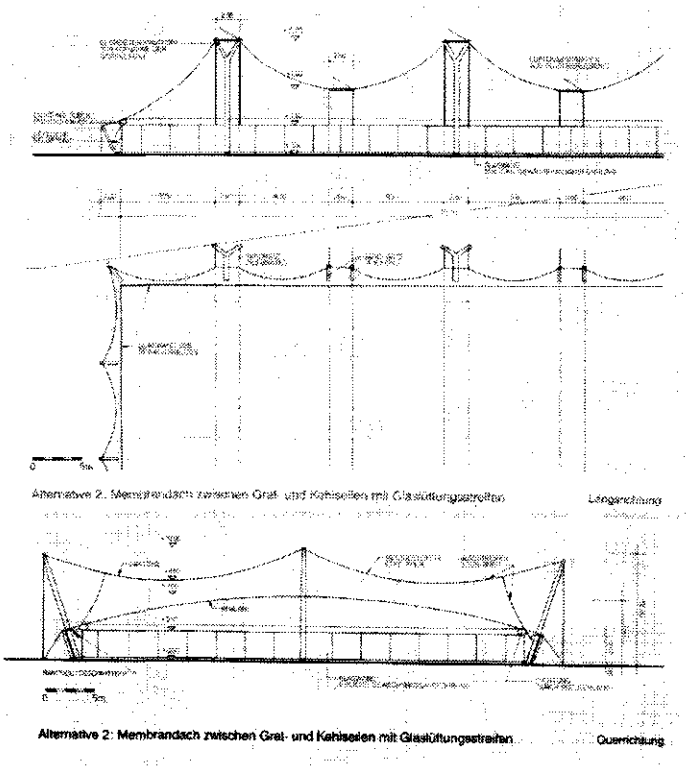
Figuur 24: Prototype van een Solar Chimney in Manzares, Spanje (Knapp, 1982).

Figuur 25: Dierentuin van München, Duitsland, 1995 (Schock, 1997).

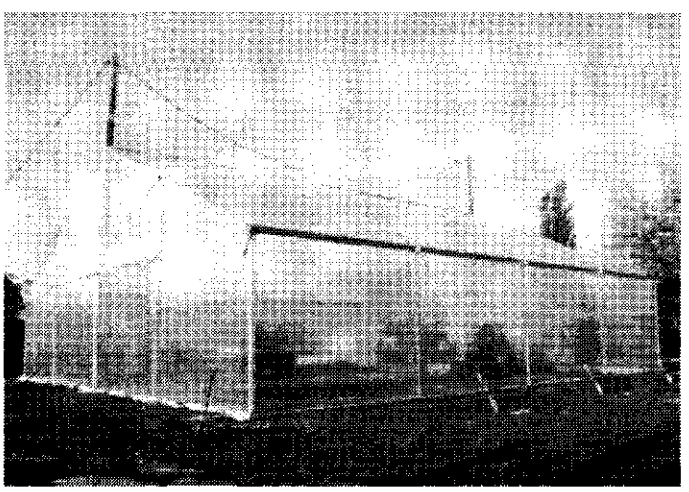
Figuur 26: Dierentuin van München, Duitsland, 1995, met opgeblazen membraankussens en louvre-luchtramen (links) en met een opgeblazen foliebuis als aansluiting van dakmembraan aan gevels (rechts) (Schock, 1997).



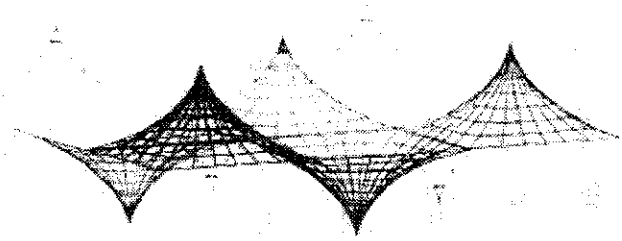
Figuur 27: Dierentuin Burgers' Bush in Arnhem, 1988 (ABT, 1988).



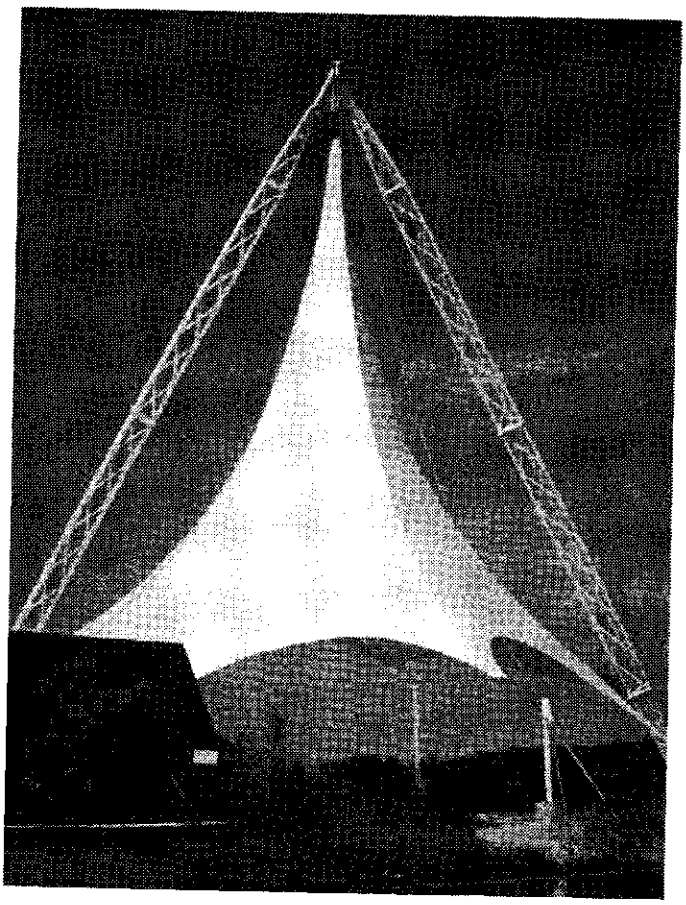
Figuur 28: Kasontwerp van Duitse studie uit 1982-1984, Universiteit GH Essen (Bubner et al, 1985).



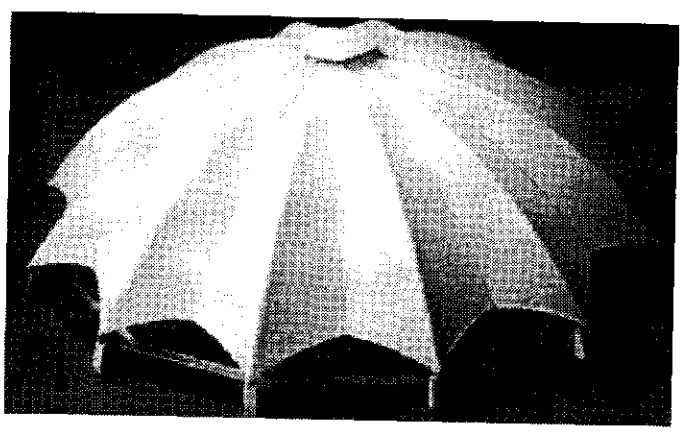
Figuur 29: Prototype van een kunststof kabelkas, IMAG 1992 (Waaijenberg en Frénay, 1993).



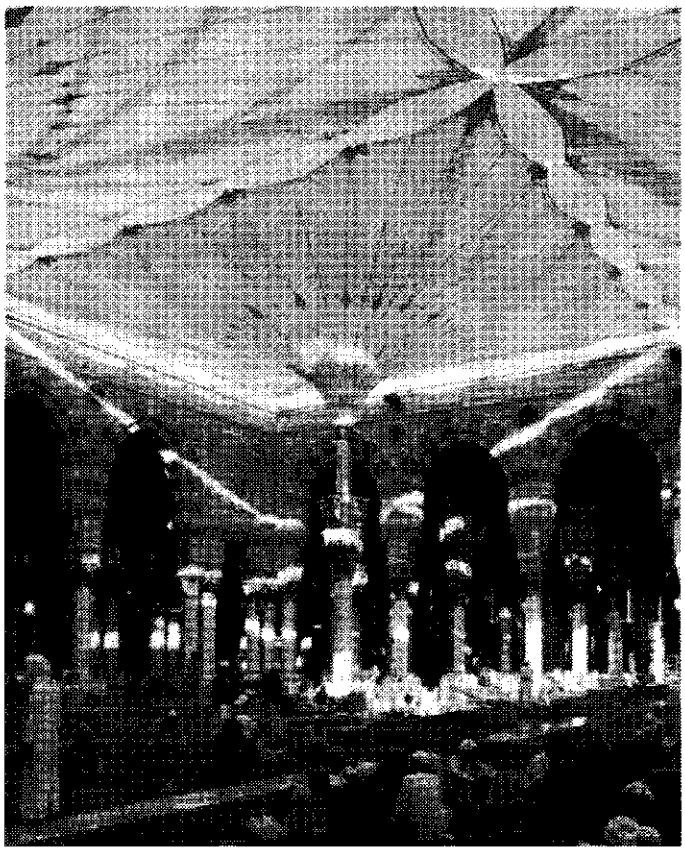
Figuur 30: Model met opwaarts- en neerwaartsgerichte radiale membranen (Berger, 1996).



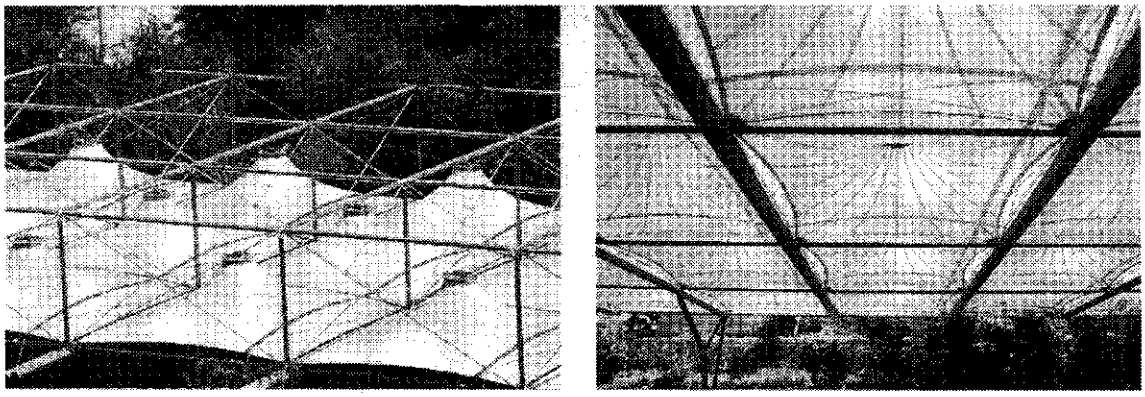
Figuur 31: Queeny Park Pavilion in St. Louis County, Missouri, Verenigde Staten, 1978 (Berger, 1996).



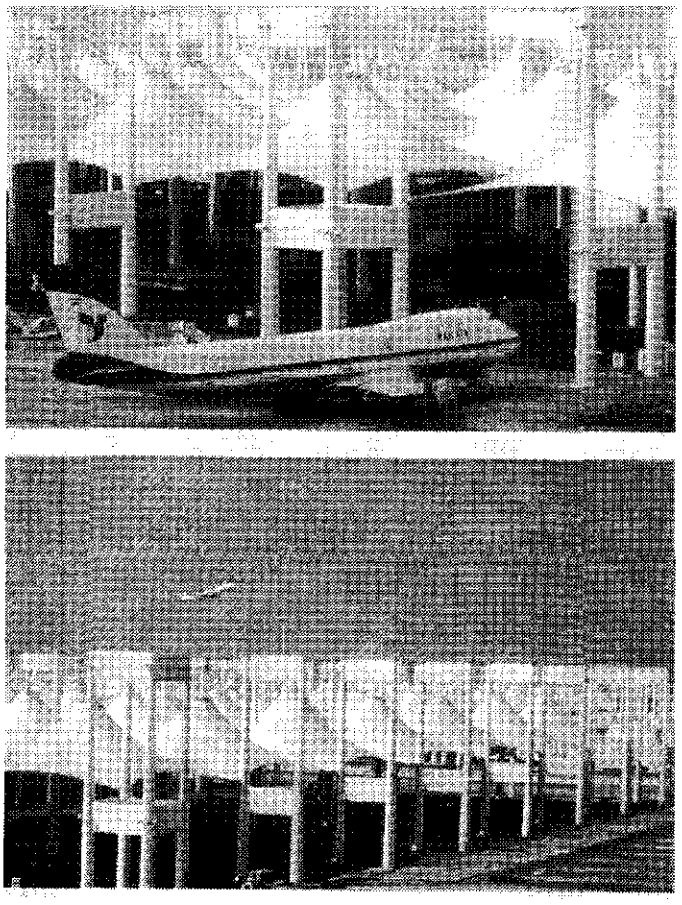
Figuur 32: Overkapping van een kolenhoop in Binghamton, New York, Verenigde Staten (Berger, 1996).



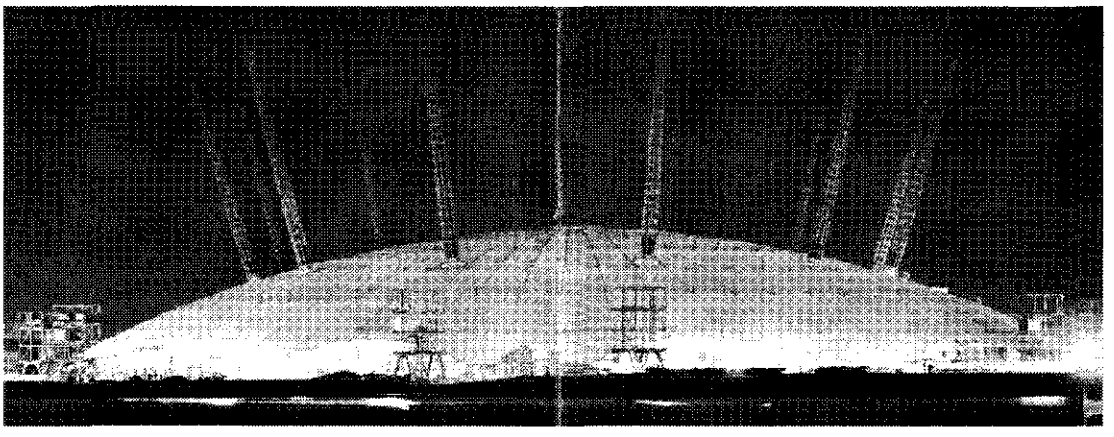
Figuur 33: Heilige moskee in Medina, Saoedi-Arabië, 1992 (Schock, 1997).



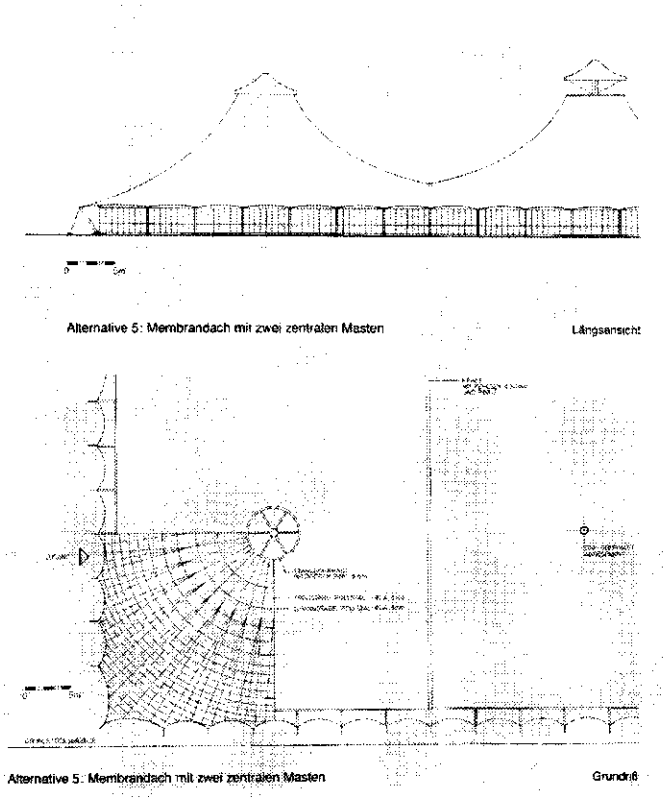
Figuur 34: Dak boven een archeologische vindplaats in Desenzano sul Garda, Italië, 1990 (links: buitenaanzicht; rechts: binnenaanzicht) (Schock, 1997).



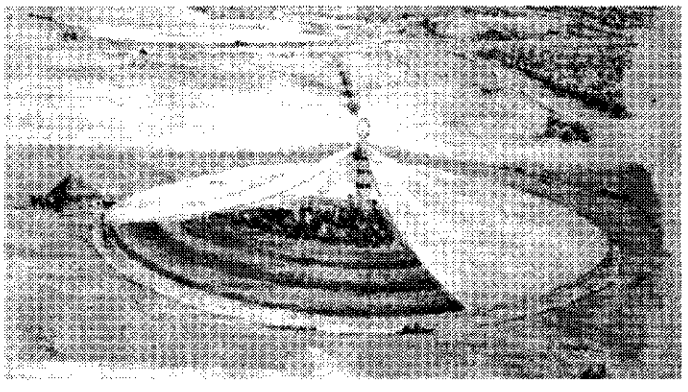
Figuur 35: Haj Terminal van het internationale vliegveld van Jeddah in Saoedi-Arabië, 1981 (Berger, 1996).



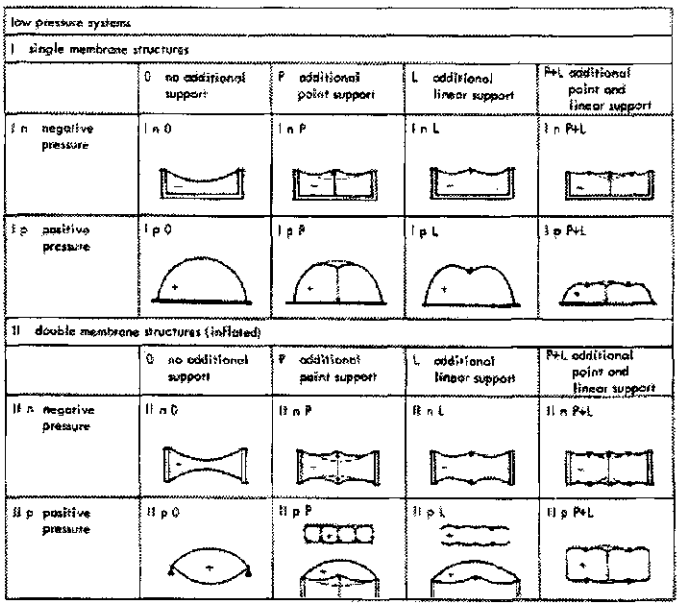
Figuur 36: Millennium Dome in Greenwich (GB), 1997-1998 (General Electric, 1998).



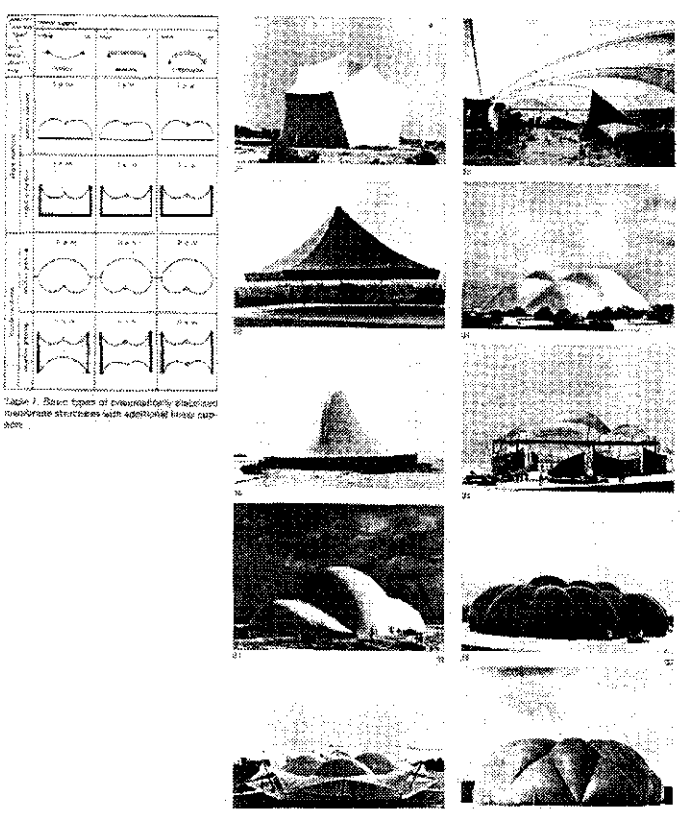
Figuur 37: Kasontwerp van een Duitse studie uit 1982-1984, Universiteit GH Essen (Bubner et al, 1985).



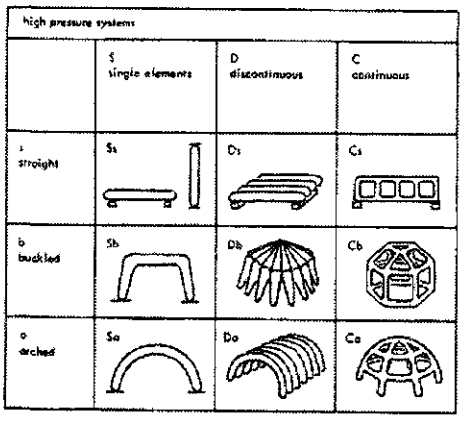
Figuur 38: Eerste ontwerp voor een Duurzaam Gewas Productie Systeem (DGPS), IMAG, 1998 (Bakker, 1998).



Figuur 39: Schematisch overzicht van pneumatische lagedruk constructievormen met enkele of dubbele membranen, met onder- of overdruk, zonder additionele ondersteuningen of met punt of lineaire ondersteuningen (Herzog, 1976).

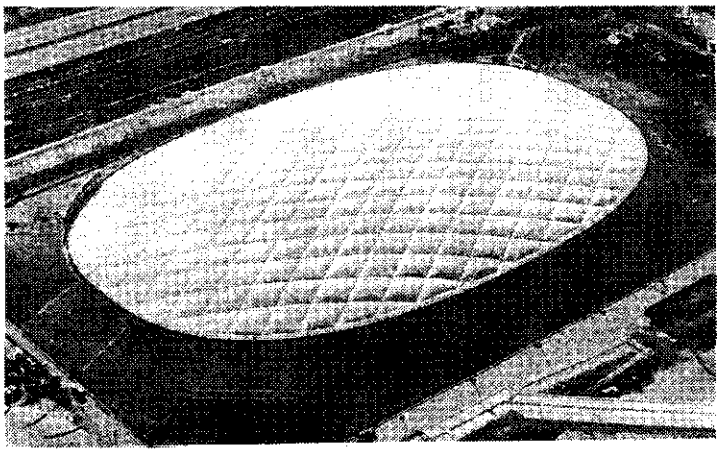


Figuur 40: Lagedruk constructies (Herzog, 1976).

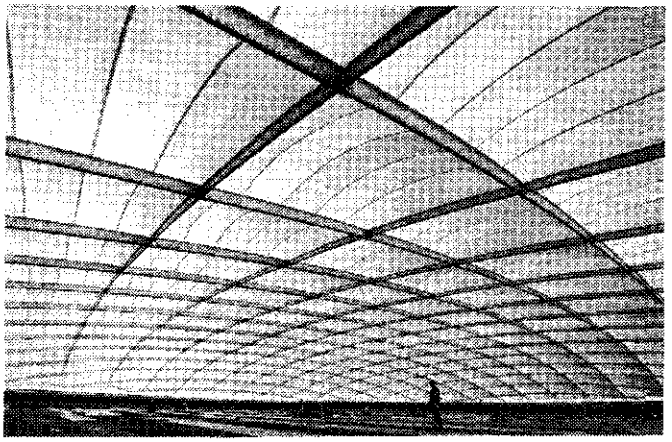


Figuur 41: Schematisch overzicht van hogedruk constructievormen (Herzog, 1976).

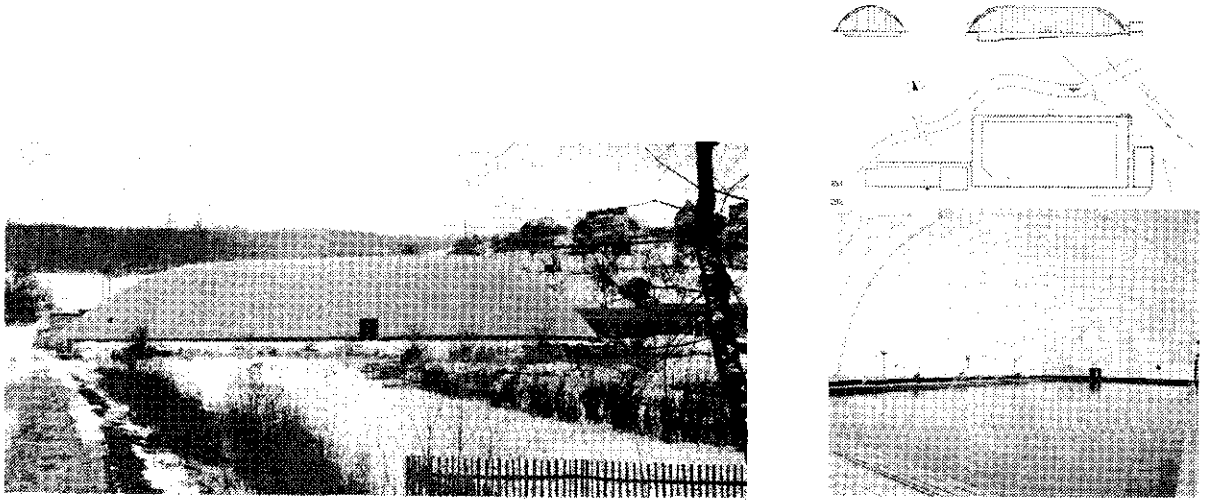
Figuur 42: Mediadrom voor het Zweites Deutsches Fernsehen (mobiele luchthal) in Duitsland, 1995 (Schock, 1997).



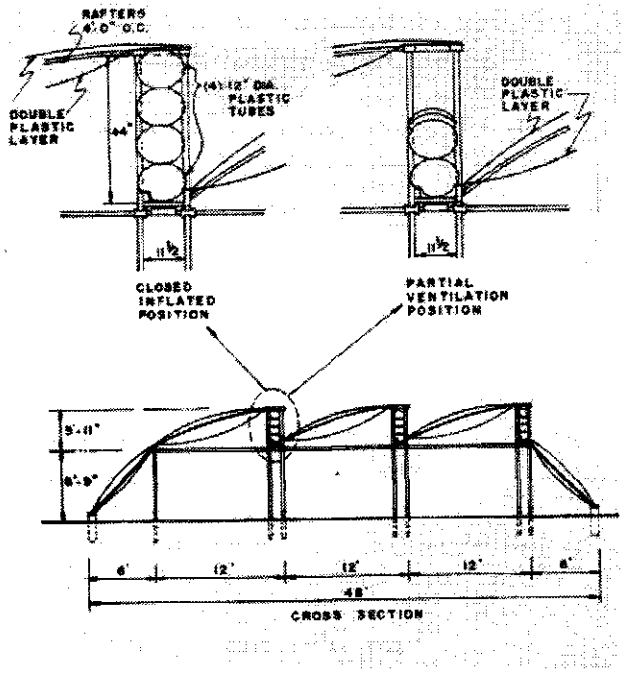
Figuur 43: Paviljoen van de Verenigde Staten op de EXPO tentoonstelling van 1970 in Osaka, Japan (Herzog, 1976).



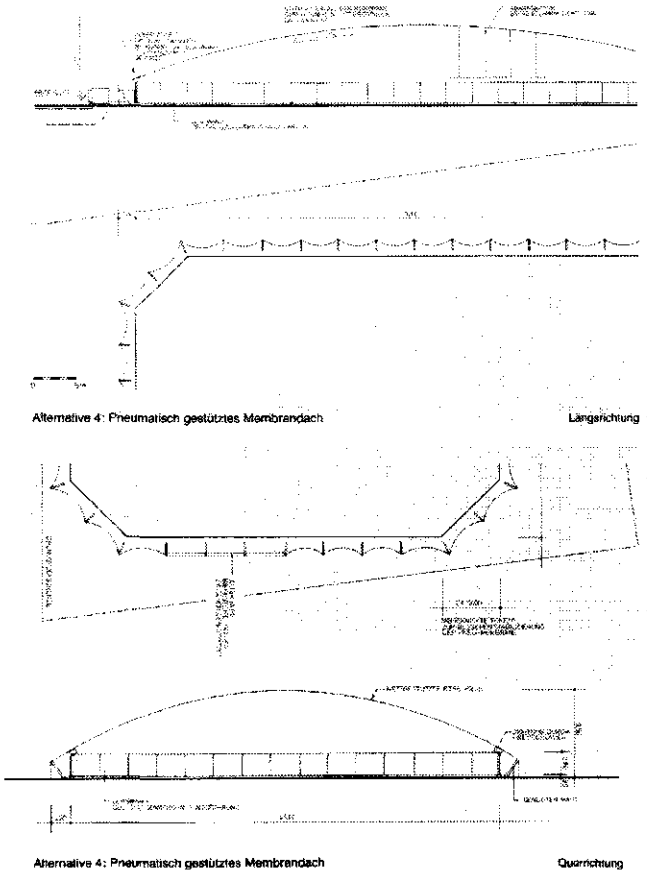
Figuur 44: Met een overdruk constructie kan een enorme vrije ruimte ontstaan (Herzog, 1976).



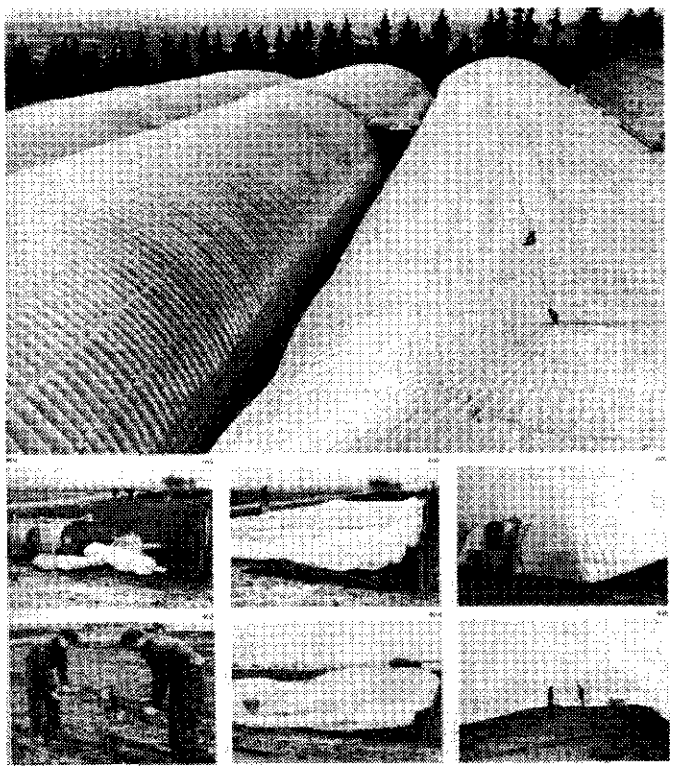
Figuur 45: Voormalig openlucht zwembad in Kaufungen, Duitsland, 1970 (Herzog, 1976).



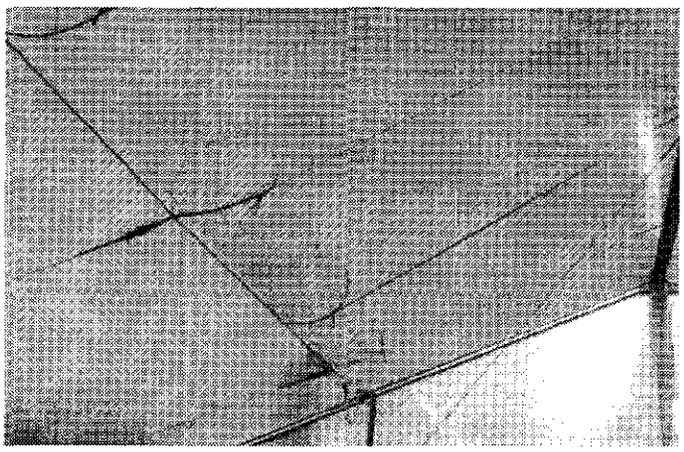
Figuur 46: Prototype van een kas, Rutgers University in New Brunswick, New Yersey, Verenigde Staten (Roberts, 1976).



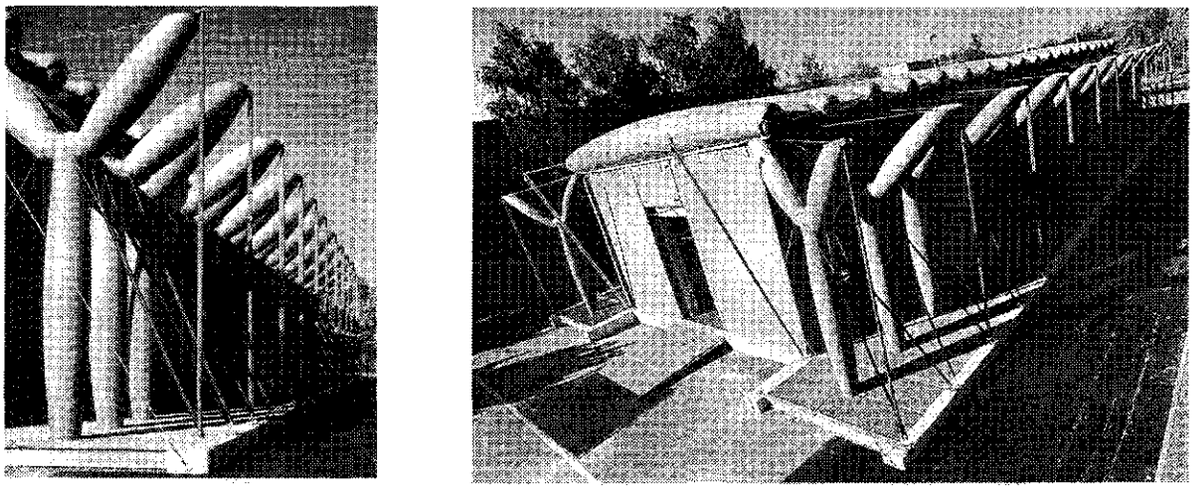
Figuur 47: Kasontwerp van een Duitse studie uit 1982-1984, Universiteit GH Essen (Bubner et al, 1985).



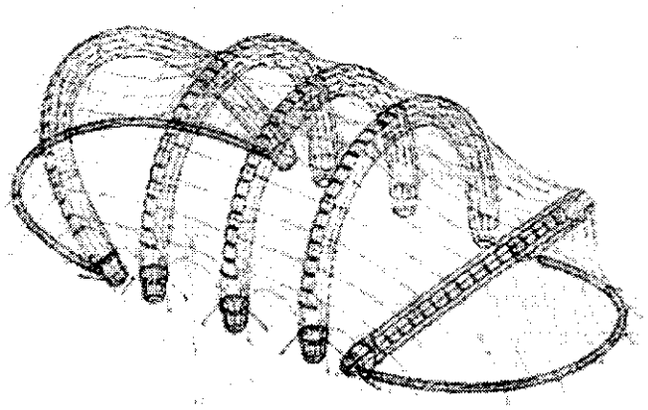
Figuur 48: Lagedruk kasconstructies met een opgeblazen kunststoffolie en een netwerk van kabels en polyamide draden (Herzog, 1976)(Toyoda et al, 1996).



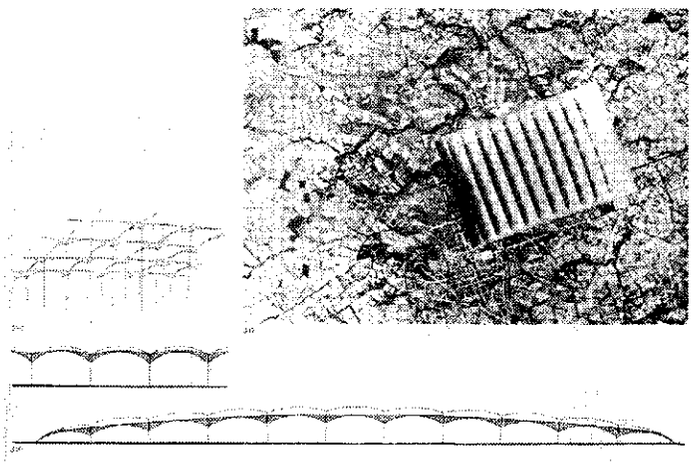
Figuur 49: Prototype van een kunststof kabelkas met opgeblazen buis als gording, IMAG, 1992 (Waaijenberg en Frénay, 1993).



Figuur 50: Hogedruk constructie opgebouwd uit opgeblazen buizen, 'Airtecture' in Esslingen-Berkheim, Duitsland, 1996 (Schock, 1997).

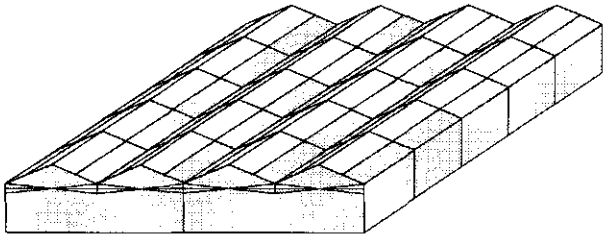


Figuur 51: Drijvend theater paviljoen bij de Expo '70 in Osaka, Japan (University of Newcastle, 1999).

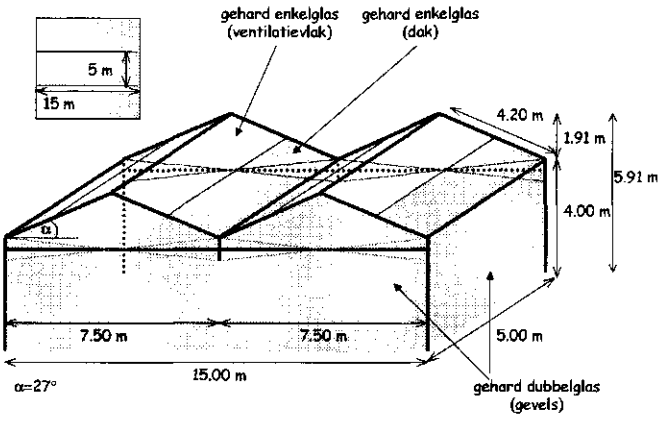


Figuur 52: Studie van een tuinbouwkas met 'hogedruk'-ribben en kolommen als draagconstructie, Frei Otto, 1962 (Herzog, 1976).

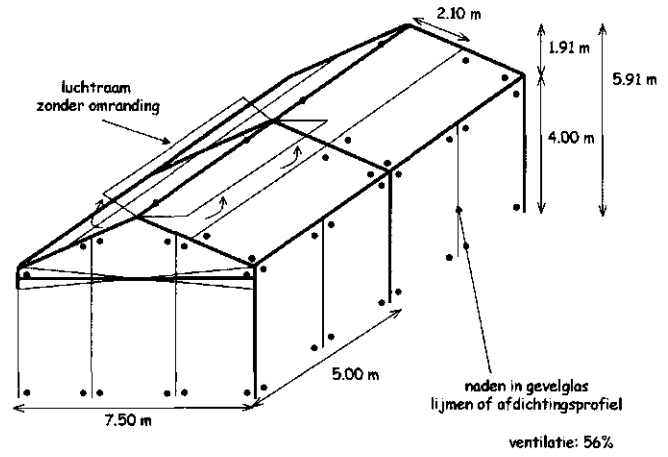
Aanzicht



Afmetingen

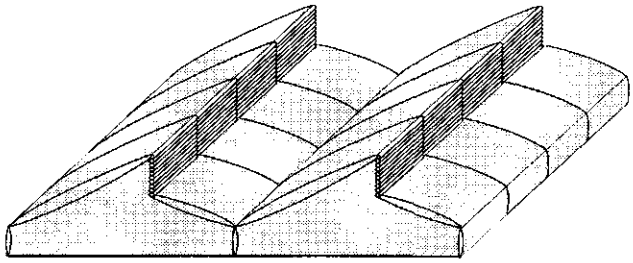


Ventilatie

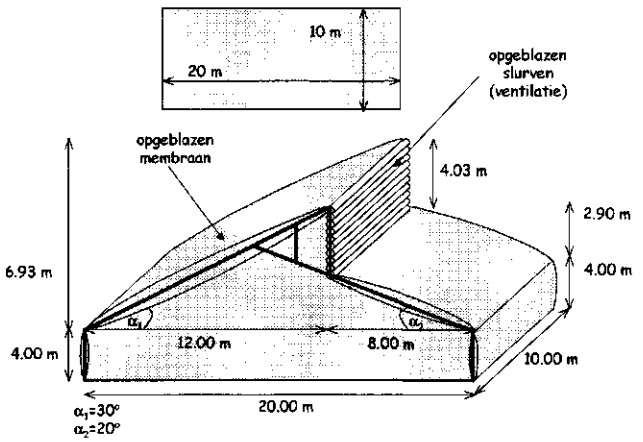


Figuur 53: Kasontwerp no. 1: Kas met gehard glas met puntsgewijze bevestiging (IMAG).

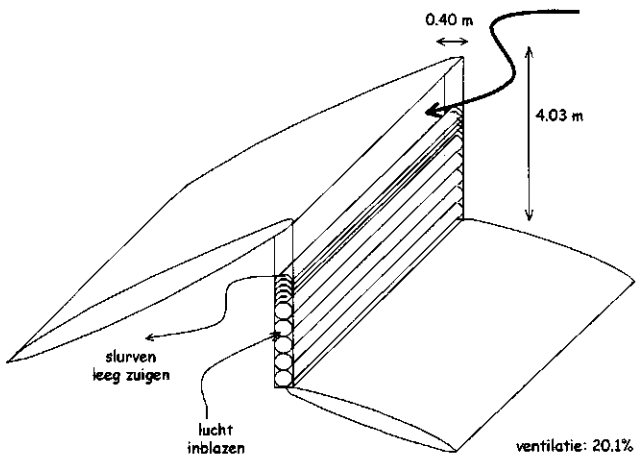
Aanzicht



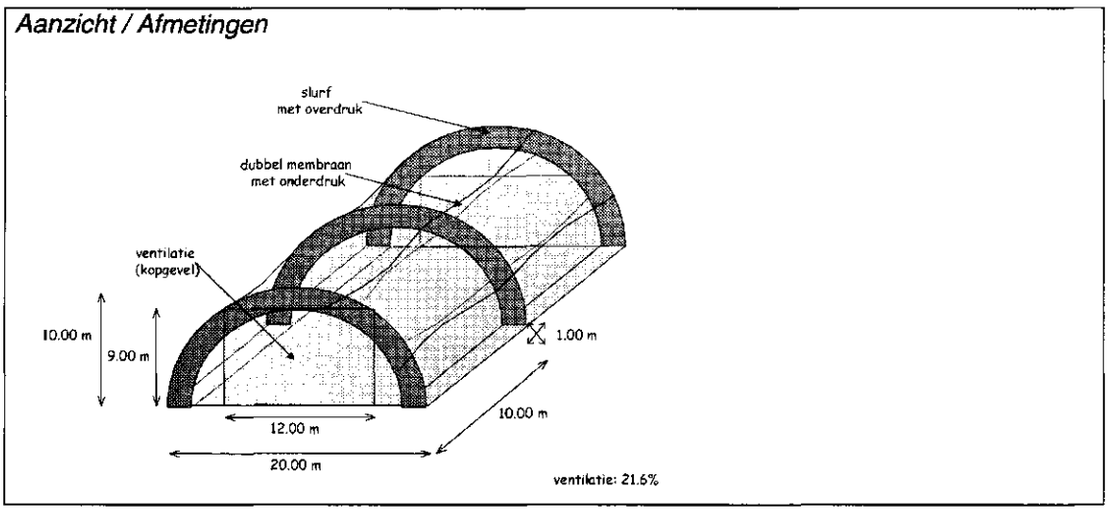
Afmetingen



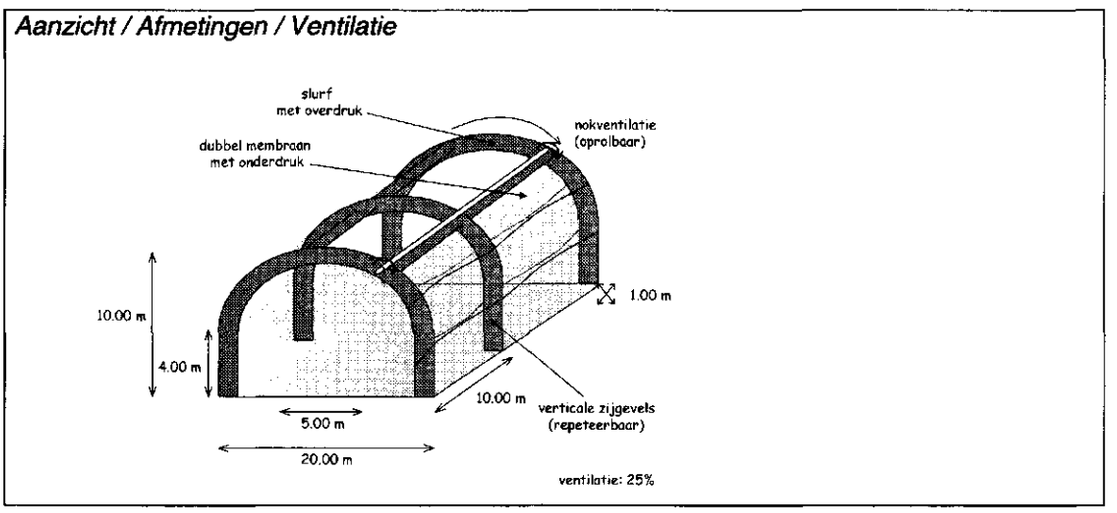
Ventilatie



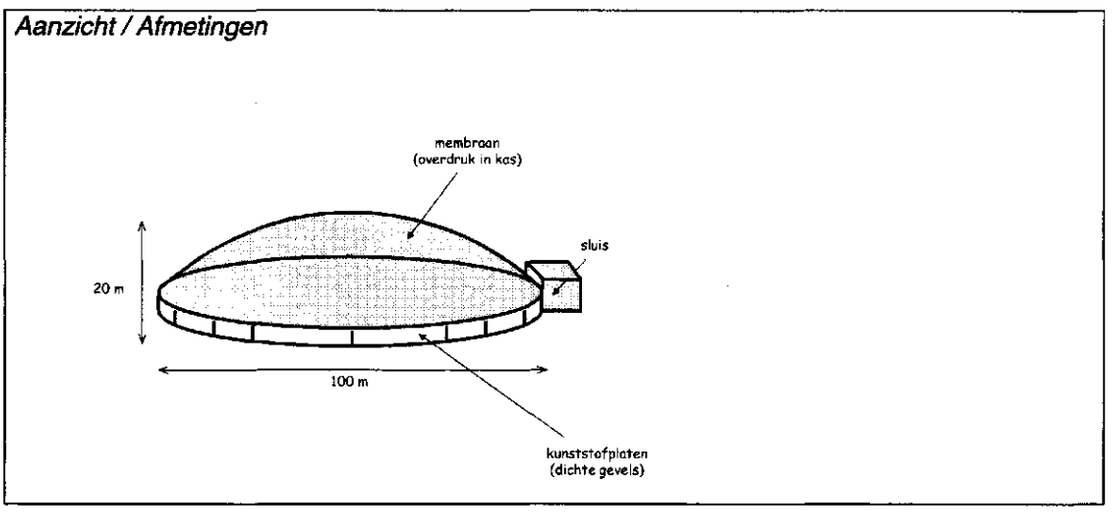
Figuur 54: Kasontwerp no. 2: Pneumatische constructie met folies (IMAG).



Figuur 55: Kasontwerp no. 3: Pneumatische constructie met opgeblazen spanten (IMAG).

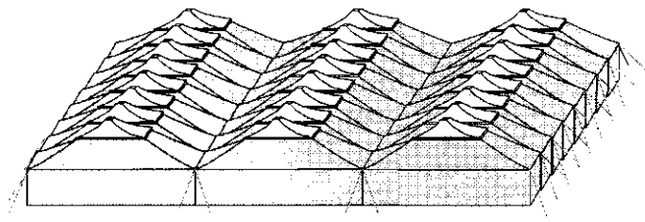


Figuur 56: Kasontwerp no. 3A: Pneumatische constructie met opgeblazen spanten (repeteerbaar door verticale gevels) (IMAG).

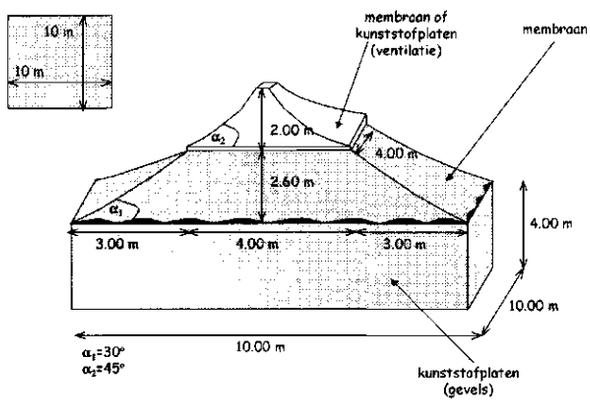


Figuur 57: Kasontwerp no. 4: Pneumatische constructie met overdruk in de kasruimte ("gesloten kas") (IMAG).

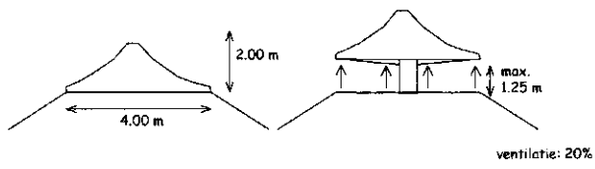
Aanzicht



Afmetingen

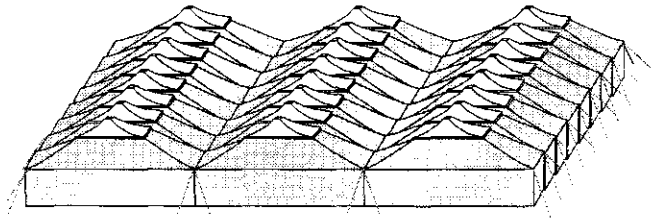


Ventilatie

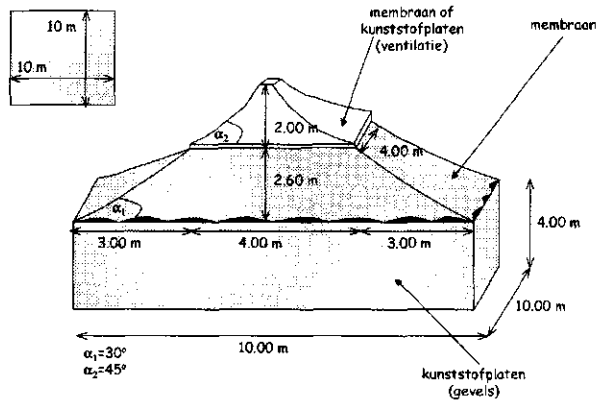


Figuur 58: Kasontwerp no. 5: Membraanconstructie met symmetrisch geplaatste mast en centrale luchting (IMAG).

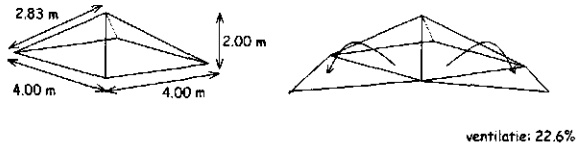
Aanzicht



Afmetingen

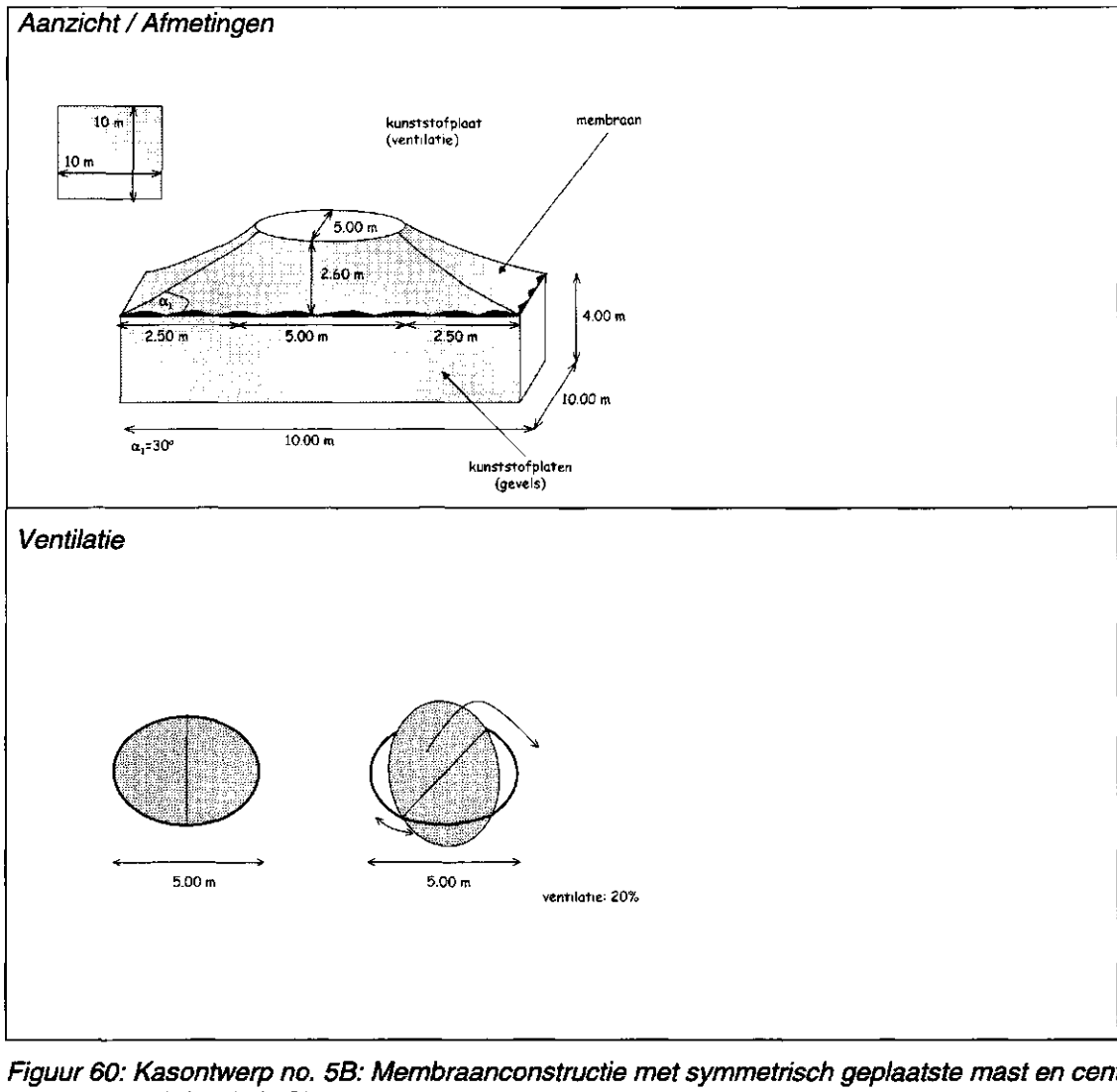


Ventilatie

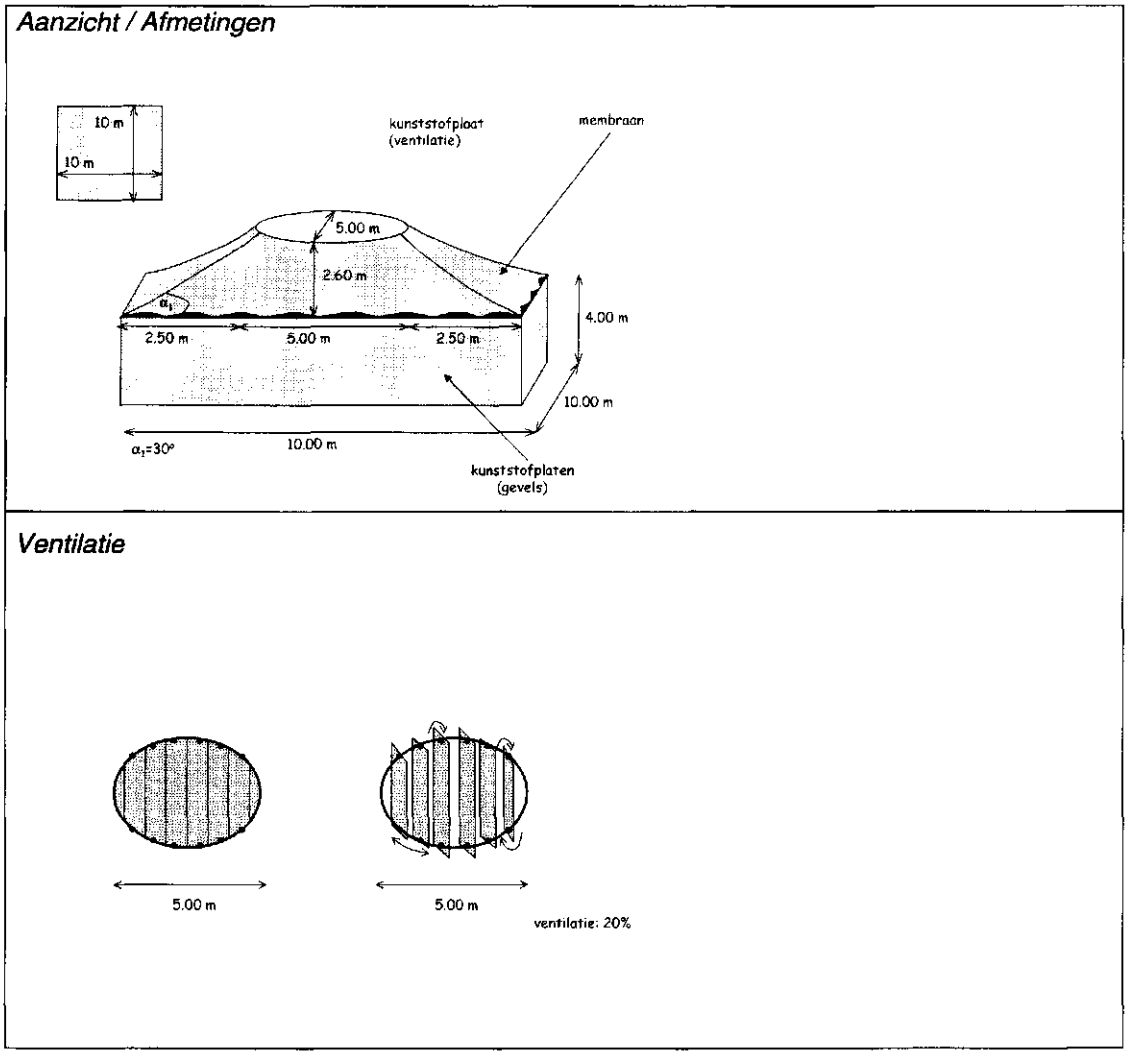


ventilatie: 22.6%

Figuur 59: Kasontwerp no. 5A: Membraanconstructie met symmetrisch geplaatste mast en centrale luchting (IMAG).

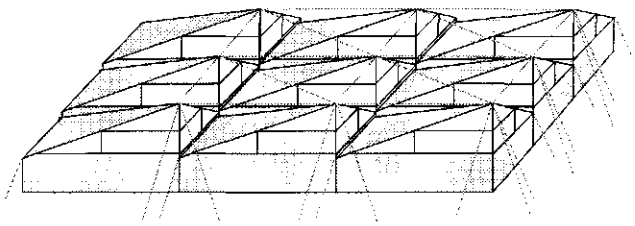


Figuur 60: Kasontwerp no. 5B: Membraanconstructie met symmetrisch geplaatste mast en centrale luchting (IMAG).

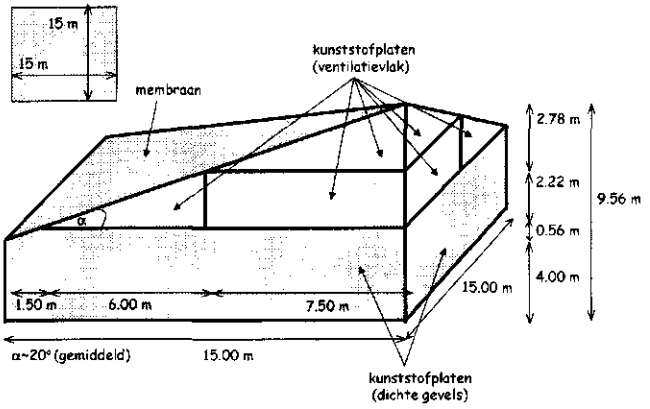


Figuur 61: Kasontwerp no. 5C: Membraanconstructie met symmetrisch geplaatste mast en centrale luchting (IMAG).

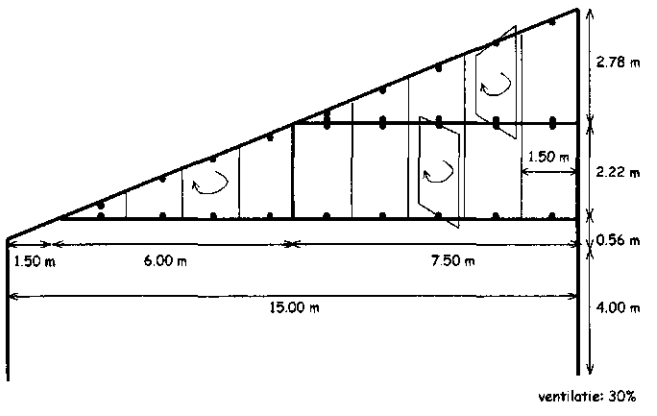
Aanzicht



Afmetingen

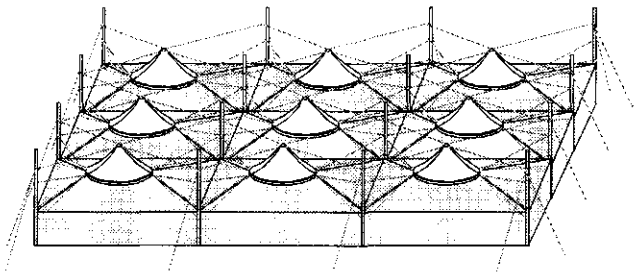


Ventilatie

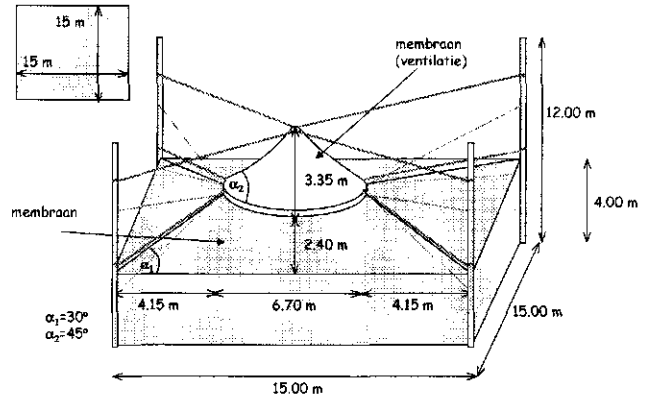


Figuur 62: Kasontwerp no. 6: Membraanconstructie met asymmetrisch geplaatste mast (IMAG).

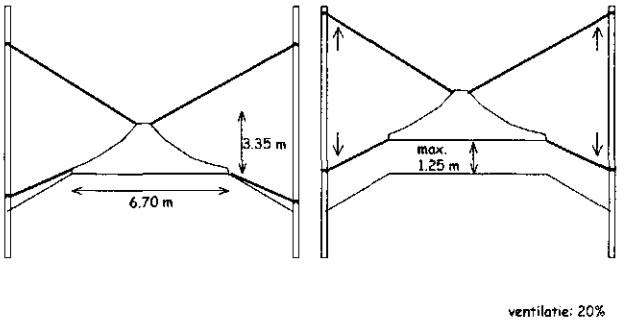
Aanzicht



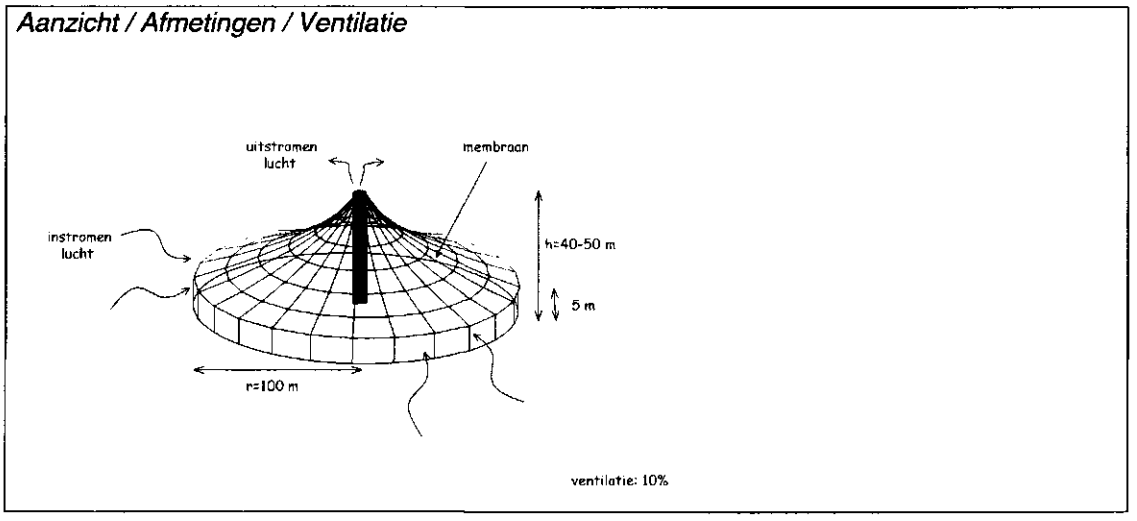
Afmetingen



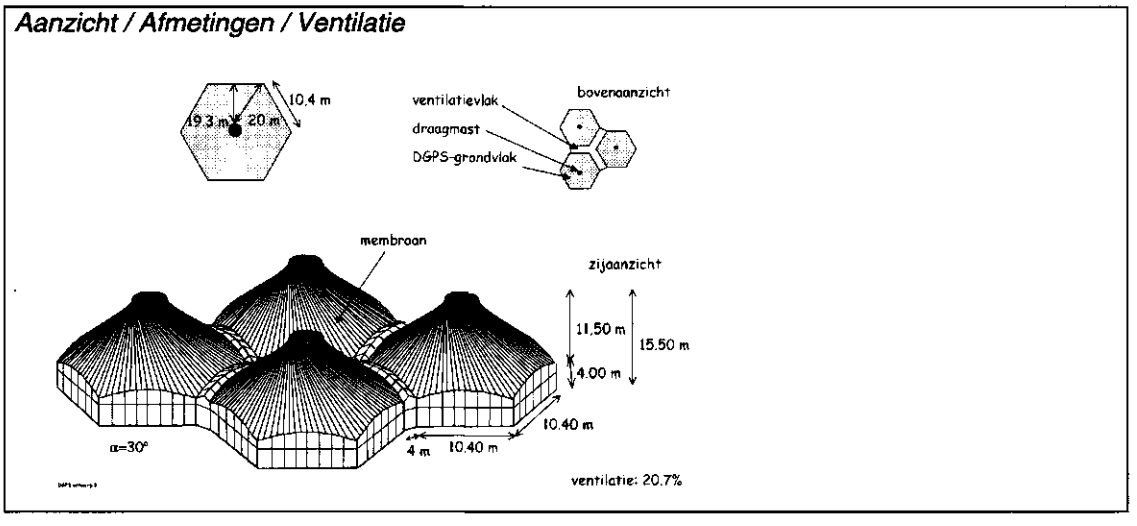
Ventilatie



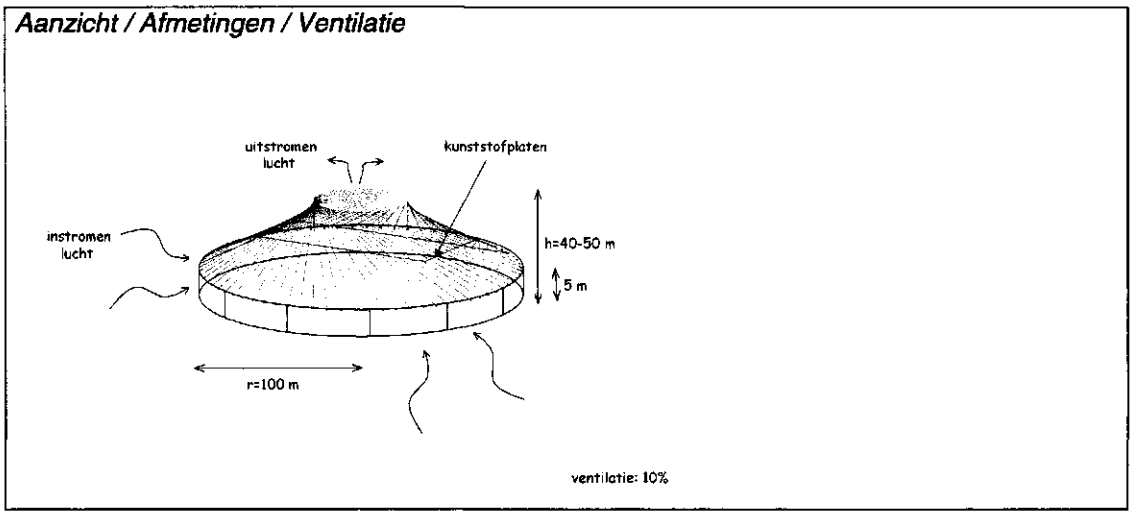
Figuur 63: Kasontwerp no. 7: Membraanconstructie gespannen tussen masten en met centrale luchting (IMAG).



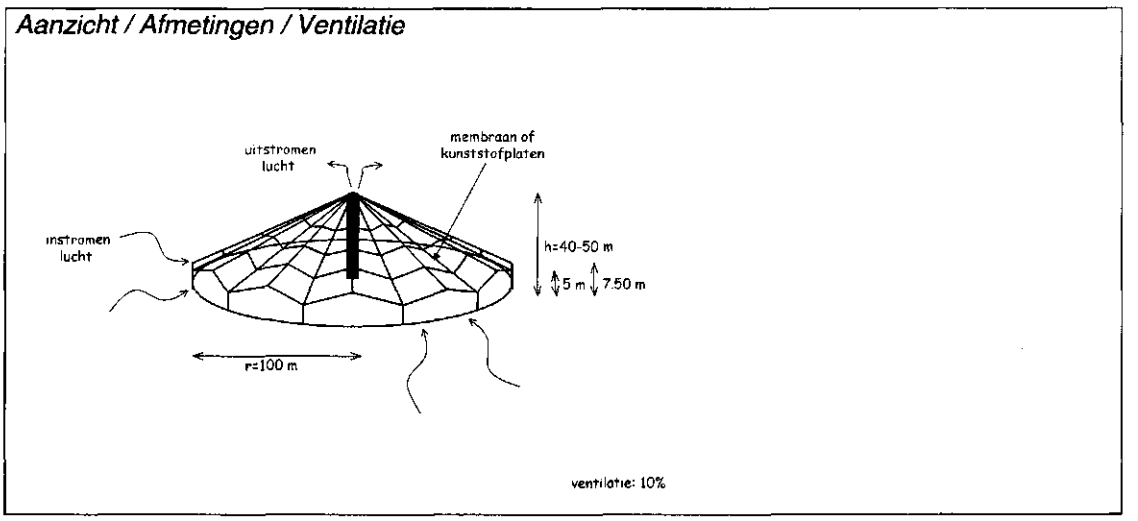
Figuur 64: Kasontwerp no. 8: Oorspronkelijk DGPS-ontwerp met centrale draagmast (IMAG).



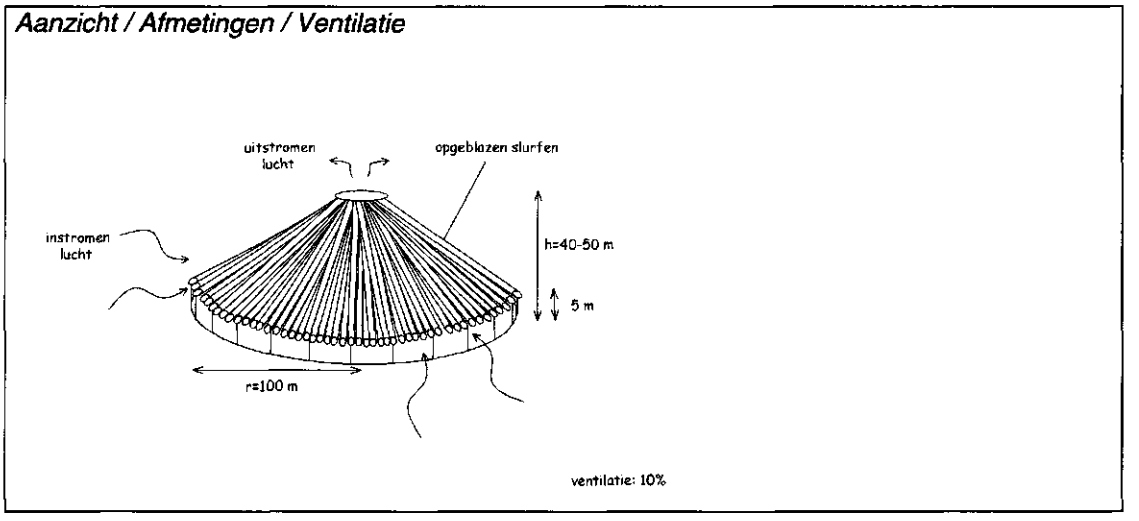
Figuur 65: Kasontwerp no. 8A: DGPS-ontwerp met zeshoekig grondvlak (IMAG).



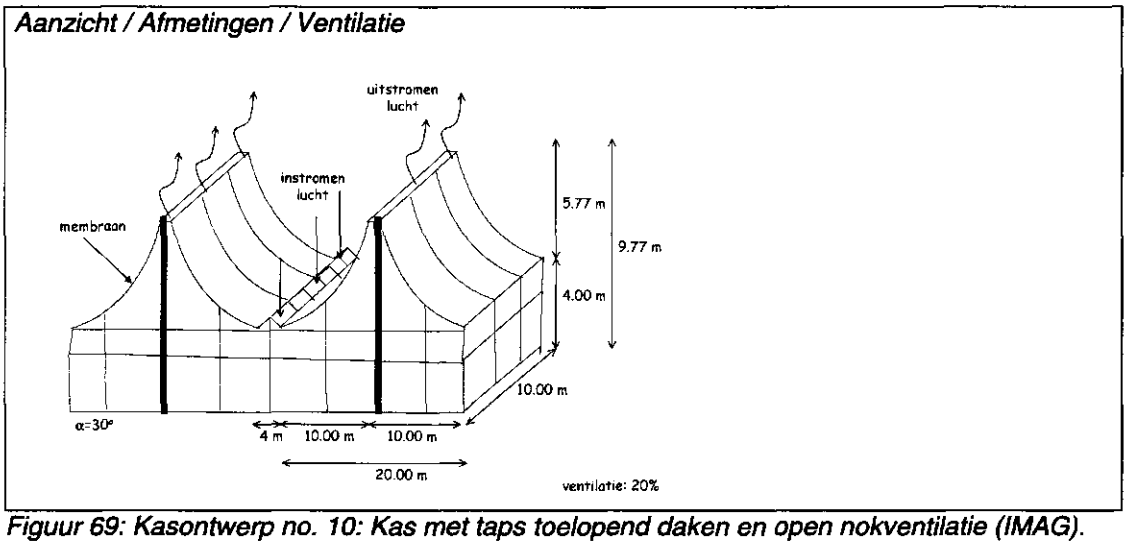
Figuur 66: Kasontwerp no. 8B: DGPS-ontwerp met dakvorm opgebouwd uit rechte lijnen (IMAG).



Figuur 67: Kasontwerp no. 8C: DGPS-ontwerp met dakvorm uit radiaal netwerk met verschillende hoogten (IMAG).

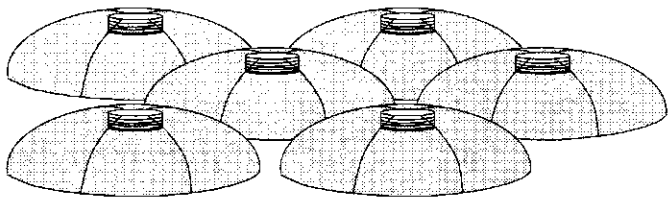


Figuur 68: Kasontwerp no. 8D: DGPS-ontwerp met dakvorm uit opgeblazen slurven (IMAG).

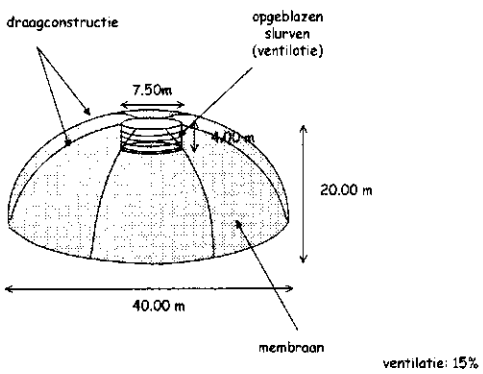


Figuur 69: Kasontwerp no. 10: Kas met taps toelopend daken en open nokventilatie (IMAG).

Aanzicht

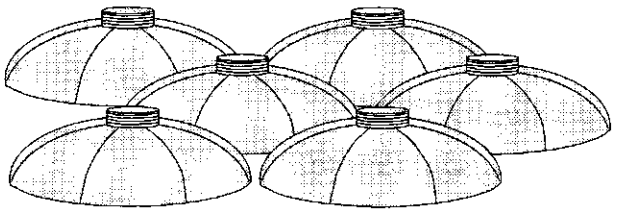


Afmetingen / Ventilatie

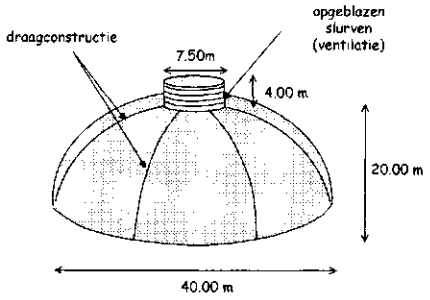


Figuur 70: Kasontwerp no. 9: Kas met halve bolvorm en met inwendige centrale luchting (IMAG).

Aanzicht



Afmetingen / Ventilatie



ventilatie: 15%

Figuur 71: Kasontwerp no. 9A: Kas met halve bolvorm en met uitwendige centrale luchting (IMAG).