

Van Mourik Broekmanweg 6
2628 XE Delft
Postbus 49
2600 AA Delft

www.tno.nl

T +31 88 866 30 00
F +31 88 866 30 10

TNO-rapport**TNO 2016 M11314**

Invloed van de stormstand van luchtramen op de windbelasting op tuinbouwkassen

Datum	12 oktober 2016
Auteur(s)	Dr. Ir. C. (Chris) Geurts L.P.M. (Leo) van der Knaap
Exemplaarnummer	-
Oplage	-
Aantal pagina's	16 (incl. bijlagen)
Aantal bijlagen	1
Opdrachtgever	PinC Agro Achmea T.a.v. Mw. Joke Hagg Postbus 115 7300 AC APELDOORN
Projectnaam	Stormstand van luchtramen
Projectnummer	060.22775

Alle rechten voorbehouden.

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

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor opdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.

Inhoudsopgave

1	Inleiding	3
2	Interne druk, waarneming en berekening	4
3	Gedrag van de kasomhulling	6
4	Aanbevelingen voor vervolgonderzoek	8
5	Referenties	9

Bijlage A

VOORONDERZOEK NAAR INTERNE DRUK BIJ TUINBOUWKASSEN



1 Inleiding

De windbelasting op tuinbouwkassen is een belangrijke ontwerpparameter voor het constructief ontwerp van het omhullingsysteem voor kasgevel en kasdek. Deze windbelasting wordt bepaald door de geografische ligging, en de vorm en afmetingen van de kas. Daarnaast speelt de interne druk een grote rol bij het ontwerp van onderdelen van de constructie.

Deze interne druk kan worden beïnvloed door de stand van de luchtramen. Recente ervaringen met schades aan kassen roepen de vraag op wat de rol van de luchtramen is, en of dit beter kwantificeerbaar is, wat het mogelijk maakt specifiek te ontwerpen. In dit rapport wordt op basis van een beknopte literatuurstudie omschreven wat er momenteel bekend is ten aanzien van de rol van de luchtramen voor de windbelasting op tuinbouwkassen.

Naast de invloed van windbelasting heeft de stand van de luchtramen ook invloed op het constructief gedrag van het kasdek en op de krachten in het luchttingsmechaniek. De normen voor kasconstructies gaan ervan uit dat tijdens een storm de luchtramen gesloten zijn. In dit rapport wordt nader ingegaan op de consequenties van niet gesloten luchtramen op de draagkracht van het omhullingsysteem voor kasgevel en kasdek.

De analyse van de constructieve aspecten is vooral gebaseerd op het type Venlo-kas. De informatie over de windbelasting en interne druk kan meer algemeen worden toegepast.

De resultaten van het onderzoek zullen door Achmea Agro worden gebruikt om de aanbevelingen aan tuinders met betrekking tot de toepassing van een stormstand te heroverwegen. Het onderzoek heeft overigens als doel om globaal inzicht te krijgen in de effecten van toepassing van een stormstand van luchtramen. Voor een cijfermatige onderbouwing van deze effecten zijn in hoofdstuk 4 aanbevelingen voor vervolgonderzoek opgenomen.

In de praktijk wordt de stormstand veelal omschreven als een maat tussen 4% en 8% geopend zijn van de luchtramen. De stormstand wordt meestal aan één kant van het kasdek toegepast, maar ook wel aan beide zijden (eventueel met een verschil in de maat van geopend zijn).

De aanbevelingen in hoofdstuk 4 zijn gericht op het verkrijgen van meer informatie over windbelasting op kassen dan er is gegeven in de voor kassen van toepassing zijnde normen en ook op nader onderzoek ten aanzien van de krachtverdeling in het kasdek, onder andere gericht op aspecten die niet zijn opgenomen in de WSL rekenmodellen en om bij toepassing van een stormstand schade door klapperen van het luchtraam te voorkomen.

2 Interne druk, waarneming en berekening

Op basis van voorliggende studies uit de internationale literatuur wordt vastgesteld dat er een beperkte hoeveelheid onderzoek is uitgevoerd waarbij de interne druk in tuinbouwkassen experimenteel is bepaald. Beschikbaar onderzoek beperkt zich tot wind loodrecht op de nok. Conclusies zijn vaak kwalitatief geformuleerd, en er is geen rekenkundig model aan gekoppeld om de interne druk te bepalen als functies van de hoeveelheid luchtramen die open staan, of de stand waarin deze open staan.

Rekenmodellen zijn beschikbaar waarmee op basis van de externe drukverdelingen ter plaatse van openingen de interne druk kan worden berekend. Deze modellen zijn geschikt om te worden toegepast op windtunnelmetingen van de externe drukken op schaalmodellen, waarbij ook het effect van windrichting kan worden meegenomen. Vervolgens kunnen vanuit de (tijdseries van de) externe drukken (nieuwe tijdseries van) de interne druk worden berekend, waarbij aannames worden gedaan voor de grootte van de opening, stromingsweerstand, enz.

Vereenvoudigde versies van deze rekenmodellen zijn gebruikt om interne drukken in de voorschriften af te leiden. Op basis van het model in de Eurocode (CEN, 2005) of de formule van (Holmes, 2001) kan van de interne druk een inschatting worden gemaakt. Van belang is dan te weten hoe groot de openingen zijn die aan de windzijde (met overdruk) en de openingen aan de onderdrukzijde. Ook de mate waarin er openingen in de gevels zijn, inclusief eventueel aanwezige 'achtergrondpermeabiliteit' moet daarin worden meegenomen.

Tijdens storm moet rekening worden gehouden met een draaiing van de windrichting, globaal met een richtingverandering van 30 graden.

Om een gevoel te krijgen voor de effecten die de interne druk bepalen is op basis van de formule van Holmes in bijlage A een voorbeeld uitgewerkt voor een grote tuinbouwkas met wind op de zijgevel. Daarbij is gebruik gemaakt van uitkomsten van het bij TNO uitgevoerd windtunnelonderzoek uit (concept) TNO rapport "Equivalent static wind loads on large multi-span duo-pitch greenhouses". Hieruit blijkt dat bij wind op de zijgevel de winddrukcoëfficiënt (onderdruk) op de lijzijde van het kasdek gemiddeld ca. $C_{pe} = -0,2$ bedraagt. Het oppervlak van het kasdek is bij een grote kas dominant ten opzichte van het oppervlak van de gevel. Dus wanneer de gevel gesloten is (afgezien van de kieren in het omhullingsysteem), is de winddruk (onderdruk) boven het kasdek bepalend voor de winddrukcoëfficiënt voor interne druk in de kas. Met het openen van luchtramen wordt het reeds marginale effect van de winddruk op de gevel verder verkleind en is het effect op de winddrukcoëfficiënt voor interne druk verwaarloosbaar.

Anders is de situatie wanneer er in de aangeblazen gevels ruiten bezwijken. Dan ontstaan er openingen waarvan het totale oppervlak al snel kan concurreren met het permeabele effect van de openingen in een gesloten kasdek (in het rekenmodel ca 7 m²). Dan heeft het openen van luchtramen, zelfs ongeacht de keuze voor loef- of lijzijde, een duidelijk positief effect ter voorkoming van een grote overdruk in de kas (uitgaande van de belastingen die lokaal kunnen optreden is het openen van de luchtramen aan de lijzijde gunstiger). In bijlage A is een aantal scenario's uitgewerkt, waaronder deze. Hieruit blijkt dat door toepassing van de stormstand

voor de luchtramen wordt voorkomen dat een grote overdruk in de kas optreedt, groter dan waarmee volgens NEN 3859 rekening moet worden gehouden.

Uit de in bijlage A uitgewerkte scenario's blijkt dat een stormstand voor luchtramen ook nuttig kan zijn, in het geval er ruitbreuk optreedt op locaties waar lokaal relatief hoge waarden voor de onderdruk kunnen optreden (met name in de randen van het kasdek). Het nut van de stormstand is voor dit geval het voorkomen van waarden voor de onderdruk in de kas groter dan die volgens NEN 3859 in rekening moeten worden gebracht.

Uit de gemaakte berekeningen blijkt dat bij toepassing van een stormstand de coëfficiënt voor onderdruk niet snel onder $C_{pe} = -0,2$ zal komen. $C_{pe} = -0,3$ is de winddruk coëfficiënt waarmee volgens NEN 3859 rekening moet worden gehouden in geval van wind op de zijgevel en $C_{pe} = -0,2$ bij wind op de kopgevel. Voor overdruk in de kas geeft NEN 3859 $C_{pe} = +0,2$ aan, ongeacht de windrichting.

Uit bij TNO uitgevoerd windtunnelonderzoek met een simulatie van wind op de zijgevel blijkt dat met een stormstand aan de lijzijde de coëfficiënt voor onderdruk ca. $C_{pe} = -0,2$ zal bedragen. Bij een gelijke stormstand aan loefzijde en lijzijde zal de coëfficiënt voor onderdruk in de kas ca. $C_{pe} = -0,1$ bedragen.

Uit de berekeningen die zijn gerapporteerd in bijlage A kan worden afgeleid, dat de toepassing van een stormstand niet of nauwelijks bijdraagt aan het voorkomen van (de eerste) schade, maar dat in geval van schade de stormstand van luchtramen een sterk nivellerend effect heeft. In geval van schade aan gevel of kasdek kan met de stormstand worden voorkomen, dat in de interne druk sterk/snel wisselt. Uit oogpunt van stormbestendigheid van de kasomhulling is de stormstand van luchtramen een dan goed instrument om te voorkomen dat de windbelasting (binnendruk en buitendruk opgeteld) groter wordt, dan waarmee gebruikelijk bij het constructief ontwerp rekening moet worden gehouden. Zo kan het nut van de stormstand worden samengevat als een rem op cumulatief bezwijken.

Naarmate schade aan de kasomhulling groter is, is er meer oppervlak geopend luchtraam nodig voor de gewenste vereffening van de binnendruk. Uit de berekeningen in bijlage A blijkt dat de stormstand van luchtramen in principe niet te groot kan zijn. Daarbij is niet het effect meegerekend van de wijziging van de vorm van het kasdek (hiermee wordt vooral bedoeld de (ongunstige) invloed op de belasting op het luchtraam zelf en eventueel ook het "lucht scheppen" in geval van geopende ramen aan de loefzijde).

3 Gedrag van de kasomhulling

Aansluitend op de vorige paragraaf kan ten aanzien van de windbelasting worden vermeld dat de belasting op het luchtraam zelf mede bepaald wordt door de aanstroomrichting van de wind. De aanstroomrichting is minder van belang voor de interne druk. Maar voor geopende luchtramen geeft NEN 3859 voor de middenvelden van het kasdek een verdubbeling van de windbelasting ten opzichte van gesloten luchtramen. Een ongunstige situatie daarbij is, wanneer de wind onder en boven het luchtraam langs kan stromen, bijvoorbeeld bij een windrichting evenwijdig aan de nok. De grootte van de stormstand heeft invloed op dit effect, maar gegevens ontbreken om dit nader te kunnen specificeren. Het is dus ook niet precies bekend voor welke windbelasting een luchtraam met stormstand moet worden berekend.

Een belangrijk kenmerk van luchtramen is dat zij een deel van de windbelasting op het kasdek afdragen aan het luchtmechaniek en daarmee krachten in de betreffende profielen en verbindingen van het kasdeksysteem beperken. Daar staat tegenover, dat ter plaatse van luchtramen de belastingen op het kasdeksysteem meer asymmetrisch is, zodat de vervormingen (buiging van de roe aan één zijde van het kasdek) relatief groot zijn. Deze kenmerken gelden zowel voor een kasdek met geopende (inclusief stormstand) als een kasdek met gesloten luchtramen.

Omdat bij toepassing van een stormstand de voorspanning uit het luchtmechaniek niet aanwezig is, zullen de vervormingen van de glasroeden in dat geval iets kleiner zijn. Minder buiging in de glasroeden is gunstig voor de grote ruiten in het kasdek. Maar een stormstand kan ook leiden tot klapperen van het luchtraam op de onderliggende glasroeden. Dat is zowel ongunstig voor de grote ruit in het kasdek als voor de ruiten in het luchtraam.

Omdat bij toepassing van een stormstand bij luchtramen de voorspanning uit het luchtmechaniek niet aanwezig is, zal de belasting die op het luchtmechaniek wordt overgebracht lager zijn. De belasting op het luchtraam bestaat voor meer dan de helft uit de krachten uit het kasdek als gevolg van het feit dat het luchtraam de opwaartse buiging van de onderliggende glasroeden verhindert. Uit oogpunt van het luchtmechaniek kan een stormstand van het luchtraam dus als gunstig beschouwd worden.

Constructief gezien heeft een stormstand bij luchtramen voordelen en nadelen. In dat opzicht kan dit het best worden toegepast op een locatie van het kasdek, waar de windbelasting relatief laag is. In de randlocaties van het kasdek met verhoogde windbelasting kunnen geopende luchtramen het best worden vermeden. Zo gezien komt een kas met relatief kleine afmetingen niet snel in aanmerking om een stormstand toe te passen.

Bij een grote kascompartimenten met meerdere afdelingen luchtmechaniek kan er voor worden gekozen om één of meer afdelingen aansluitend op aangeblazen gevels niet te gebruiken voor toepassing van de stormstand. Op die manier kan optimaal rekening worden gehouden met de (variabele) windrichting. Het totaal van de openingen van de luchtramen met stormstand moet voldoende groot zijn om

significant bij te kunnen dragen aan de drukvereffening in het geval er sprake is van ruitbreuk in gevel of kasdek.

Voor de drukvereffening in de kas is de afstand waarover de druk moet worden vereffend niet of nauwelijks van belang. Maar wanneer er relatief grote luchtraamopeningen nodig zijn om de gewenste drukvereffening te realiseren, kan dat ook een grote luchtstroom opleveren. Het is altijd gunstig om de luchtraamopeningen gelijkmatig over het kasdek te verdelen (afgezien van de randlocaties), ofwel: "voor drukvereffening werkt een vergiet beter dan een trechter".

Bij drukvereffening moet lucht worden verplaatst. In het geval er géén sprake is van kapotte ruiten in de kas, zal de hoeveelheid te verplaatsen lucht relatief gering zijn. In het geval er wél sprake is van kapotte ruiten, maar er zijn geen openingen om drukvereffening te realiseren, ook dan zal de hoeveelheid te verplaatsen lucht relatief gering zijn. De toepassing van een stormstand kan in geval van ruitbreuk in een aangeblazen (winddruk) gevel zorgen voor grote luchtverplaatsingen, wat van belang kan zijn uit oogpunt van schade aan het gewas.

4 Aanbevelingen voor vervolgonderzoek

De toepassing van een stormstand bij luchtramen is zinvol, met name als instrument om in geval van ruitbreuk in gevel of kasdek de effecten hiervan op de interne druk te vereffenen. De stormstand kan zelf ook oorzaak zijn van schade, bijvoorbeeld doordat het geopende luchtraam door windbelasting in contact komt met het kasdek (klapperen). De aanbeveling die hier van toepassing is, is het nader uitwerken van de grootte van de luchtraam opening en de positie(s) op het kasdek.

Het onderzoek in dit rapport is hoofdzakelijk gericht op invloed van de stormstand van luchtramen op de interne druk in de kas. Kennis op dit punt geeft beperkt inzicht in de mogelijke oorzaak van schade aan de kasomhulling. Aanbevolen wordt om schadegevallen in de praktijk nauwkeurig te documenteren en zo veel mogelijk factoren vast te leggen die de windbelasting op de kas kunnen beïnvloeden (terrein factoren, positie eerste ruitbreuk, dynamisch gedrag, windsnelheid en windrichting, gebruik van de kas, ed). Een nauwkeuriger beeld van de omstandigheden tijdens storm in combinatie met het schade patroon zal naar verwachting resulteren in (naast de stormstand) nieuwe instrumenten voor schadepreventie.

Het door TNO uitgevoerde windtunnelonderzoek (zie ook hoofdstuk 2) heeft tot nieuwe inzichten geleid ten aanzien van de windbelasting op de hoofd draagconstructie. Er zijn ook drukmetingen gedaan, die kunnen worden gebruikt om lokale drukcoëfficiënten op het kasdek af te leiden en daarmee de betrouwbaarheid van belastingaannee vergroten. Het uitvoeren van deze actie kan in het belang zijn van de stormbestendigheid van de kasomhulling, maar is ook belangrijk ter optimalisatie van huidige rekenmodellen en de kassenbouwnorm. Daarmee is deze aanbeveling gericht aan alle betrokken partijen, waarvan de belangrijkste zijn verenigd in WSL.

De toepassing van een stormstand bij luchtramen heeft invloed op de krachtverdeling in de profielen en verbindingen van het kasdeksysteem, inclusief de luchtramen en het luchtmechaniek. Deze effecten kunnen zowel gunstig als ongunstig zijn. Indien nader onderzoek op dit punt gewenst is, kan dit naar het oordeel van TNO het best in samenwerking met WSL plaatsvinden.

Met het rekenmodel "Holmes" kan bij benadering worden vastgesteld wat de invloed van een schadepatroon op de interne druk is. Voor een deel kunnen effecten met de stormstand van luchtramen worden vereffend. Geredeneerd vanuit de draagkracht van het kasdeksysteem kan desgewenst worden onderzocht, wat de robuustheid van een kasdeksysteem is om veranderingen in de windbelasting ten gevolge van ruitbreuk op te vangen. Voor de uitvoering van een dergelijk onderzoek moet de urgentie op de eerste plaats door de systeemleveranciers worden gezien, omdat daarbij gebruik moet worden gemaakt van systeem specifieke kenmerken verkregen uit experimenteel onderzoek.

Naar verwachting zijn er mogelijkheden om de klimaatregeling van de kas te optimaliseren voor het gebruik als signaleringssysteem bij stormachtig weer. De behoefte van een dergelijke optimalisatie is mogelijk koppelen aan doelstellingen voor energiebesparing.

5 Referenties

EN 1991-1-4, Eurocode 1: Actions on Structures – part 1-4 : General Actions – Wind Actions, CEN, 2005

NEN 3859:2012, Tuinbouwkassen : Ontwerp en constructie - Tuinbouwkassen voor de commerciële productie van planten en gewassen

Holmes, J.D., Wind Loading of Structures, Taylor and Francis, 2001

TNO rapport (concept 23-09-2016), Equivalent static wind loads on large multi-span duo-pitch greenhouses

TNO Rapport B-73-51, "Windbelasting op tuinbouwkassen"

TNO Rapport B-77-164, "Verslag van winddrukmetingen aan tuinbouwkassen; verwerking van de meetresultaten ten behoeve van richtlijnen voor ontwerpen"

Measurements of wind loads on full-scale glasshouses; Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 6 (1980) pp. 139-167

AFRC Divisional Note DN 1594: "Full scale wind pressure and load experiments - Multispan 167 x 111 m glasshouse (Venlo)", January 1991

BIJLAGE A: VOORONDERZOEK NAAR INTERNE DRUK BIJ TUINBOUWKASSEN

Bijlage A.1: Overzicht bestudeerde literatuur

TNO Rapport B-73-51 "Windbelasting op tuinbouwkassen"

Dit rapport omschrijft een aantal metingen gedaan aan een tuinbouwkas, waarbij verschildrukken over buiten- en binnenzijde is gemeten. Ten tijde van deze meetcampagne was er nog geen (internationale) ervaring met het afzonderlijk meten van externe en interne druk. Er is hierbij geen sprake van luchtramen die in de studie worden meegenomen. Wel is in een van de metingen melding gemaakt van een **snel fluctuerende druk, veroorzaakt door de aanwezigheid van enkele kapotte ruiten in de nabijheid van het meetpunt**.

Er wordt aangegeven dat het wenselijk is bij verder onderzoek de buiten en binnendruk afzonderlijk te meten om zo de invloed van maatregelen te toetsen om de binnendruk te reguleren. Een en ander is niet verder uitgewerkt.

TNO Rapport B-77-164 "Verslag van winddrukmetingen aan tuinbouwkassen; verwerking van de meetresultaten ten behoeve van richtlijnen voor ontwerpen"

Dit rapport omschrijft de resultaten van aanvullende metingen, die n.a.v. de conclusies uit het TNO rapport B-73-51 (zie boven) waren getrokken. Onder meer is nader ingegaan op de rol van de binnendruk.

De rol van de binnendruk is bestudeerd door deuren in de kas open en dicht te maken. Dit leidt met name tot een verhoging van de binnendruk (als de **deuren aan de loefzijde worden geopend**): **De gemiddelde stuwdruk op de dakvlakken werd verminderd met maximaal 150 N/m²** (van -500 naar -650). Er is niet ingegaan op het openen van ramen in het dek om zo de inwendige druk te verlagen en het drukverschil over het dek te beïnvloeden.

Measurements of wind loads on full-scale glasshouses; Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 6 (1980) pp. 139-167

Volle schaal metingen aan 5 verschillende kassen worden omschreven. Doel is om gegevens te verkrijgen voor het ontwerp van de draagconstructie en onderdelen van de kas. De kassen hadden tussen 1 en 8 kappen. Zowel de externe als intern druk is gemeten.

Daarnaast is in 5 andere kassen afzonderlijk de interne druk gemeten. **In alle kassen is er een negatieve waarde voor C_{pi} gevonden bij wind dwars op de nokrichting**. Voor wind evenwijdig is bij een situatie (met deuren aan de kopse kanten) een C_{pi} van ongeveer 0 gevonden. In alle andere gevallen was C_{pi} negatief. In alle 11 beschreven kassen (zie onderstaande tabel) was sprake van ventilatieopeningen in de buurt van de nokken. De permeabiliteit hiervan is niet gekwantificeerd. Voor enkele kassen zijn ook gegevens over de interne druk beschikbaar voor de situatie met schuine aanstroming.

Internal pressure coefficients measured in glasshouses of different geometries and glazing systems

Glasshouse description	Height/ span	Roof angle (deg)	C_{pi} transverse	C_{pi} longitudinal
Single 6.4 m span, length 21.3 m (Cambridge Glasshouse Co.). Overlapped glass (0.61 × 0.61 m) bedded on mastic and clipped at each corner. Continuous ridge vents; doors in centre of both ends.	0.37	26	-0.55	0.01
Seven 3.2 m spans, length 63.0 m (Huisman). Single sheets of glass (1.65 × 0.73 m) between ridge and gutter held in slotted glazing bars. Discrete vents (1 pane in 6); doors in centre of both sides.	0.73	26	-0.10	-0.15
Six 6.6 m spans, length 79.6 m (Cambridge Glasshouse Co.). Overlapped glass (0.61 × 0.61 m) bedded on PVC strip and clipped at each corner. Continuous ridge vents on lee side of each span for transverse wind; doors in centre of both sides.	0.36	26	-0.43	-0.24
Two 12.8 m spans, length 39.6 m (Robinsons of Winchester). Overlapped glass (0.61 × 0.61 m) bedded on PVC strip and clipped at each corner and sides. Continuous ridge vents on both spans; doors in both ends.	0.26	26	-0.11	—
Eight 6.4 m spans, length 88.8 m (Robinsons of Winchester). Overlapped glass (1.65 × 0.73 m) bedded on PVC strip with a metal bar-cap. Fan ventilated glasshouse with 10 fans on each side and continuous ridge ventilators on middle two spans (measurements with fans off), doors in both ends.	0.44	20	-0.38	—
Single 9.15 m span, length 36.6 m (Cambridge Glasshouse Co.). Overlapped glass (0.61 × 0.61 m) bedded on mastic and clipped at each corner. Continuous ridge vents; door in end of lee side.	0.24	26	-0.71	—
Three 6.4 m spans, length 35.0 m (Cambridge Glasshouse Co.). Overlapped glass (0.61 × 0.61 m) bedded on PVC strip and clipped at each corner. Continuous ridge vents on all spans; doors in centre of both ends.	0.39	26	-0.17	—
Three 6.7 m spans, length 40.0 m (Robinsons of Winchester). Overlapped glass (1.65 × 0.73 m) bedded on PVC strip with a metal bar-cap. Continuous ridge vents in each span; doors in centre of both sides.	0.33	20	—	-0.19
Four 9.1 m spans, length 36.0 m (Cambridge Glasshouse Co.). Overlapped glass (0.61 × 0.61 m) bedded on mastic and clipped at each corner. Continuous ridge vents; doors in centre of both ends.	0.26	26	-0.70	—
Nine 15.5 m spans, length 150 m (Wrighttrain). Overlapped glass (1.00 × 0.80 m) with plastic bar-cap. Continuous ridge vents in each span; doors in centre of both sides.	0.21	26	-0.62	-0.44
Twelve 3.2 m spans, length 33 m (Westdock). Single sheets of glass (1.65 × 0.73 m) between ridge and gutter held in slotted glazing bars. Discrete vents (1 pane in 6); doors in centre of both ends.	0.72	26	-0.28	—

Er wordt in deze publicatie omschreven wat het effect is van de permeabiliteit rondom deuren (die nooit volledig sluiten), als gevolg van de overlappen in ruiten en door onvolkomenheden rondom de 'ventilators' (luchtramen). De rol van deze openingen is aan de hand van de metingen geverifieerd. De rol van deze openingen is in algemene zin omschreven. Er is geen nadere studie uitgevoerd naar de rol van openstaande luchtramen. **De rol van de overlappende ruiten is verwaarloosbaar. De interne druk wordt dus vooral bepaald door de ruimte rondom deuren en de ventilatoropeningen.** Er wordt niet nader ingegaan op ontwerpwaarden o.i.d. voor de interne drukken, er wordt alleen een mogelijke procedure aangegeven:

"For each wind direction being considered, a design internal pressure should be derived such that air flow into the glasshouse equals that extracted, consideration being given to the size and position of openings relative to the external pressure distribution, The openings in a glasshouse may normally be considered to be limited to the perimeter of the seals of ventilators and doors. Mass flow should be taken as proportional to the area of the leakage paths and to the square root of the pressure difference across them."

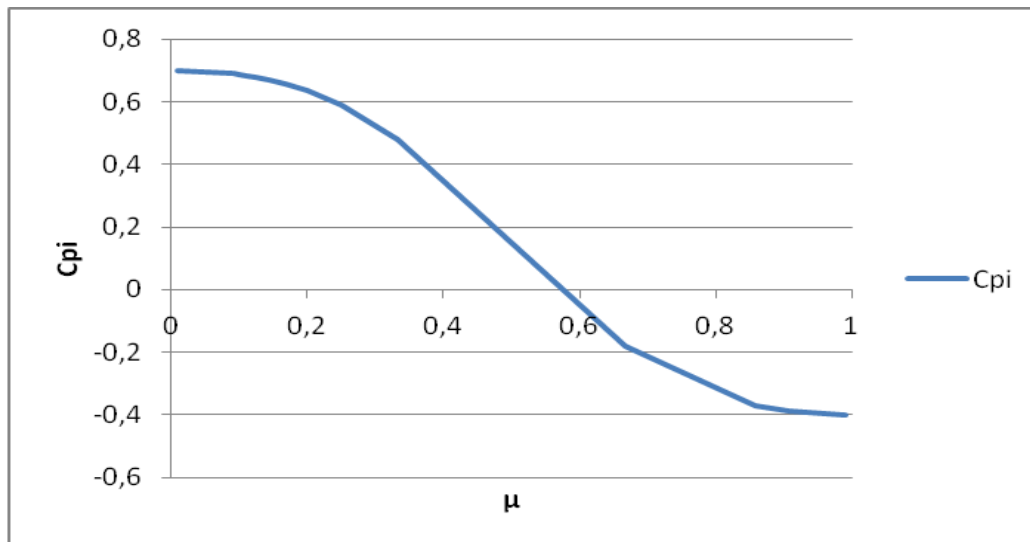
AFRC Divisional Note DN 1594: "Full scale wind pressure and load experiments - Multispan 167 x 111 m glasshouse (Venlo)", January 1991

Volle schaal metingen aan een tuinbouwkas worden beschreven. Naast externe zijn ook interne drukken gemeten. Er wordt in het rapport onderscheid gemaakt in C_{pi} waarden bij ventilatieramen open en gesloten zijn. **Voor een situatie met gesloten luchtramen wordt, bij wind loodrecht op de nok, een waarde van $C_{pi} = -0,29$ gegeven bij gesloten ramen en $C_{pi} = -0,34$ bij open ramen.**

Er zijn geen resultaten gegeven voor schuine aanstroming, hoewel deze volgens de beschrijving in het rapport wel gemeten zijn. Wel blijkt dat er bij schuine aanstroming de gemiddelde druk op de buitenzijde van de gevels lager is. Anders gezegd: bij schuine aanstroming heeft de overdruk op de schuin aangeblazen gevel een relatief lage waarde en is daardoor de kans op overdruk in de kas relatief klein.

Bijlage A.2: Eurocode EN 1991-1-4

In de Eurocode voor wind belastingen, artikel 7.2.9 van EN 1991-1-4 zijn ontwerpregels voor de interne druk opgenomen. Een relatie tussen de interne druk coëfficiënt C_{pi} en een permeabiliteitsverhouding μ is gegeven. Deze parameter geeft de verhouding tussen de openingen waar de externe druk coëfficiënt negatief is versus het totaal aan openingen. De C_{pi} is ook afhankelijk van de verhouding hoogte/diepte (h/d) van het gebouw. In het geval van een tuinbouwkas met luchtramen (en gesloten deuren), zal deze verhouding richting 1 gaan, en zal een C_{pi} van ongeveer -0,3 worden gevonden (bij $h/c < 0,25$), ervan uitgaande dat de C_{pe} bij geopende luchtramen overeenkomt met de C_{pe} bij het gesloten luchtraam (ofwel de stand van het raam verandert de C_{pe} verdeling niet, wat op zichzelf een vraag is die nadere studie vereist).



Relatie tussen μ en C_{pi} (gebaseerd op $C_{pi} = -0,4$ en $C_{pe} = 0,7$).

Bijlage A.3: Literatuur met betrekking tot interne drukken.

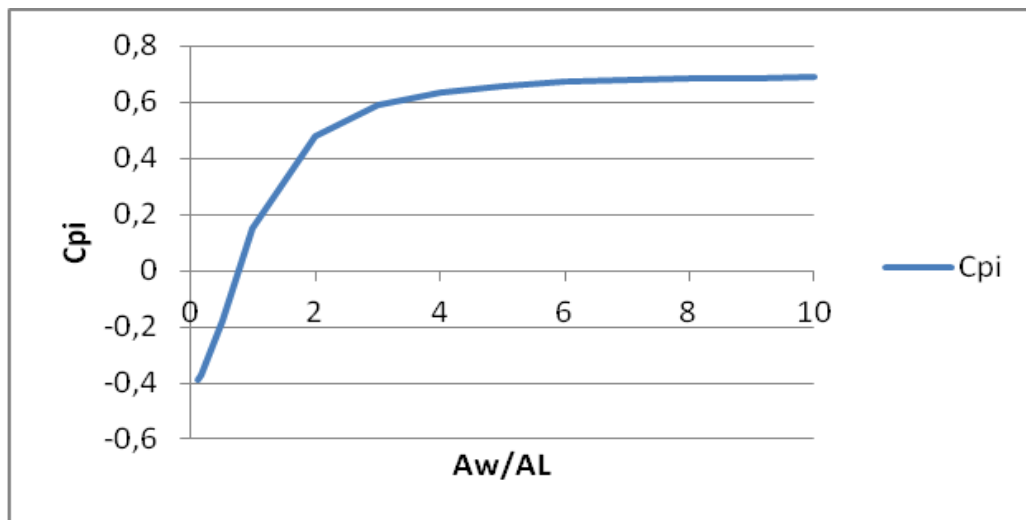
In de vakliteratuur zijn meerdere studies gepresenteerd waarin interne drukken worden bestudeerd. Vaak betreft het indirect bepaalde interne drukken, via de vertaling van een externe drukverdeling naar de interne druk. Een overzicht is gegeven in de volgende referenties:

Wind loading of Structures, John Holmes, chapter 6: internal pressures, 2001 (first), 2015 (third)
Holmes geeft achtergronden bij de bepaling van de interne drukken. Hij presenteert de volgende relatie tussen de externe drukken en interne druk coëfficiënt:

$$C_{pi} = \frac{C_{pw}}{1 + \left(\frac{A_L}{A_W}\right)^2} + \frac{C_{pl}}{1 + \left(\frac{A_W}{A_L}\right)^2}$$

C_{pW} is de externe drukcoëfficiënt aan de windzijde (positieve waarde)
 C_{pL} is de externe drukcoëfficiënt aan de lijszijde (negatieve waarde)
 A_L is de totale oppervlakte van de openingen aan de lijszijde
 A_W is de totale oppervlakte van de openingen aan de windzijde.

Deze formule is in onderstaande grafiek weergegeven, uitgaande van $C_{pL} = -0,4$ en $C_{pW} = +0,7$



The UWO contribution to the NIST aerodynamic database for wind loads on low buildings: Part 3. Internal pressures, 2007, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 95 (2007), 755-779

Daarnaast is in deze referentie een studie gepresenteerd naar de invloed van diverse verdelingen van openingen op de interne drukken. In deze studie is een windtunnelmodel gemaakt waarin ook de interne drukken zijn gemeten. Om aan de relevante schalingsvoorwaarden te voldoen is het windtunnelmodel aangepast. Een extra volume is onder de draaitafel aangebracht hiertoe. Het is dus niet mogelijk om op een standaard windtunnelmodel de interne drukken te meten die overeenkomen met de volle schaal situatie.

De metingen zijn vergeleken met C_{pi} waarden die met behulp van de continuïteitsvergelijkingen zijn bepaald uit externe drukmetingen. Algemeen wordt geconcludeerd dat het mogelijk is voor eenvoudige gevallen de interne druk goed te bepalen. Echter, er wordt ook geconcludeerd:

“The applicability of the discharge equations for buildings with separated internal volume, flexible envelope, and various opening locations needs to be studied. Eventually, the equations should be verified together with field experiments of internal pressures to clarify conversion of the model-scale to a full-scale building.”

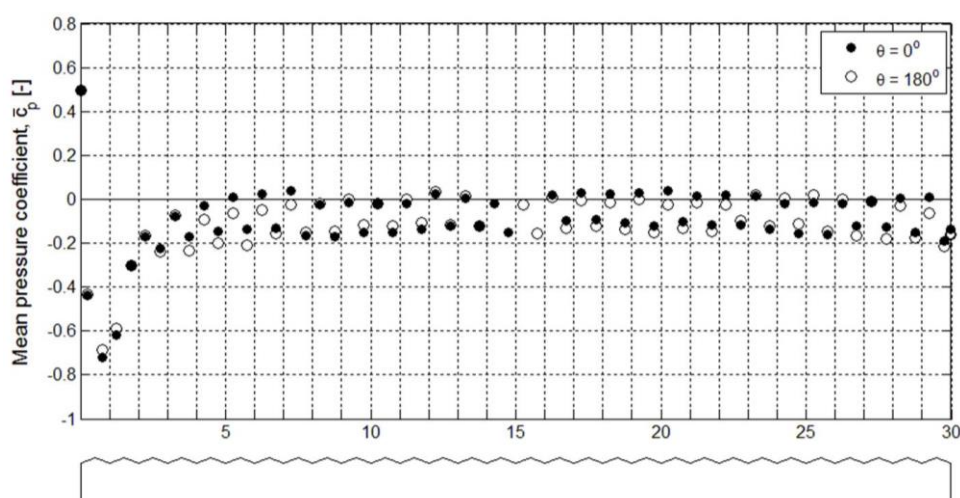
Dit geldt ook voor kassen, waarbij sprake is van vele openingen op een gerichte plek. Met name het effect van windrichting en de vraag of er een onderdruk dan wel overdruk aanwezig is in de kas is daarbij van belang. Windtunnelonderzoek, gevalideerd met volle schaal monitoring, is de geëigende weg om tot een nadere specificatie van de interne druk in tuinbouwkassen te komen. Zeker als daarbij het effect van de grootte van de openingen een rol speelt.

Bijlage A.4: Toepassing op een casus: een grote tuinbouwkas.

Om een gevoel te krijgen wat dit betekent voor de interne druk in een grote tuinbouwkas is hier op basis van de formule van Holmes een voorbeeld uitgewerkt. Het gaat om een kas met een grondvlak van $200 \times 200 \text{ m}^2$, bestaande uit 40 kappen van 5 m breed. De goothoogte is 6,9 m en nokhoogte 8,1 m en een hellingshoek van 24 gr.

Uitgegaan wordt van wind loodrecht op de zijgevel van de kas. Om de interne druk te bepalen zijn de volgende gegevens van het omhullingsysteem nodig: plaats en grootte van de openingen in gevel en dakvlak.

Waarde van de c_{pe} ter plaatse van de openingen, waarbij uitgegaan kan worden van gemiddelde c_{pe} waarden. Hiertoe wordt gebruik gemaakt van waarden die door TNO in een windtunnelonderzoek zijn gemeten, zie onderstaande figuur.



Een inschatting is gemaakt van de permeabiliteit van de verschillende oppervlakken van de kas:

locatie	opening [‰]	opmerking
kasdek dicht	0,17	bij neerwaartse belasting op het luchtraam $0,10 \text{‰}$ aanhouden
kasdek, raam 4% open	4,50	
kasdek, raam 8% open	8,84	
gevels	0,15	de openingen zitten hoog, nabij de aansluiting met het dak, maar wel in het gevelvlak

In deze beschouwing worden de volgende situaties naast elkaar gezet.

- 1) Alle Luchtramen dicht: (is het verschil tussen $0,10 \text{‰}$ en $0,17 \text{‰}$ relevant?)
- 2) Luchtramen loefzijde dicht + lijzijde 4% open
- 3) Luchtramen loefzijde dicht + lijzijde ‰ open
- 4) Luchtramen loefzijde 4% open + lijzijde 8% open

Situatie:	4% lij, 0% loef	8% lij, 0% loef	8% lij, 4% loef	0% lij, 0% loef
totaal A_w	0,207	0,207	0,207	0,207
Totaal A_l	100	200	100	7
C_{pew}	0,5	0,5	0,5	0,5
C_{pel}	-0,2	-0,2	-0,15	-0,2
C_{pi}	-0,20	-0,20	-0,15	-0,199

Hierna zijn 4 scenario's uitgewerkt om inzicht te krijgen in de invloed van lokale openingen in de kasomhulling (ruitbreuk of deur) op de interne druk. Hierbij is voor de lokale openingen gerekend met de lokale windvormfactoren volgens NEN 3859. Het effect van de openingen op de interne druk is afhankelijk van de toepassing van een stormstand voor de luchtramen. In volgende berekeningen is als stormstand een luchtraamopening van 4% aan de lizijde van de kap aangehouden.

Scenario 1: ruitbreuk in aangeblazen gevel; met/zonder stormstand luchtramen

Stel van kas 200 m x 200 m, h = 8m is 1/4 deel van de kopgevel van 1 kap gebroken: ofwel 10 m² aangeblazen oppervlak, in verband met lokaal effect moet CpW hoger worden aangenomen: +0,7

luchtramen gesloten: $C_{pW} := 0.7$
 $C_{pL} := -0.2$
 $AW := 0.207 + 10$
 $AL := 7$

$$C_{pi} := \frac{C_{pW}}{1 + \left(\frac{AL}{AW}\right)^2} + \frac{C_{pL}}{1 + \left(\frac{AW}{AL}\right)^2} \quad C_{pi} = 0.412$$

luchtramen lizijde open: $C_{pW} := 0.7$
 $C_{pL} := -0.2$
 $AW := 0.207 + 10$
 $AL := 100$

$$C_{pi} := \frac{C_{pW}}{1 + \left(\frac{AL}{AW}\right)^2} + \frac{C_{pL}}{1 + \left(\frac{AW}{AL}\right)^2} \quad C_{pi} = -0.191$$

Conclusie: Door toepassing van de stormstand voor de luchtramen wordt voorkomen dat een grote overdruk in de kas optreedt, groter dan waarmee volgens NEN 3859 rekening moet worden gehouden.

Scenario 2: ruitbreuk in 2e + 3e dakvlak vanaf zijgevel; met/zonder stormstand luchtramen

Stel van kas 200 m x 200 m, h = 8m zijn totaal 4 heel ruiten bezweken in 2e en 3e dakvlak vanaf zijgevel: ofwel 10 m² van het dakoppervlak, in verband met lokaal effect moet CpL lager worden aangenomen: -0,6 bij gesloten luchtramen; -0,25 bij geopende luchtramen

luchtramen gesloten: $C_{pW} := 0.5$
 $C_{pL} := -0.6$
 $AW := 0.207$
 $AL := 7 + 10$

$$C_{pi} := \frac{C_{pW}}{1 + \left(\frac{AL}{AW}\right)^2} + \frac{C_{pL}}{1 + \left(\frac{AW}{AL}\right)^2} \quad C_{pi} = -0.600$$

luchtramen lizijde open: $C_{pW} := 0.5$
 $C_{pL} := -0.25$
 $AW := 0.207$
 $AL := 100 + 10$

$$C_{pi} := \frac{C_{pW}}{1 + \left(\frac{AL}{AW}\right)^2} + \frac{C_{pL}}{1 + \left(\frac{AW}{AL}\right)^2} \quad C_{pi} = -0.250$$

Conclusie: ruitbreuk op een locatie waar hoge waarden voor onderdruk op de kasomhulling kan optreden, leidt tot extreme waarden voor de onderdruk in de kas. Met de stormstand wordt voorkomen dat een grotere onderdruk in de kas optreedt, dan NEN 3859 aangeeft.

Scenario 3: ruitbreuk in 2e randstrook vanaf kopgevel (eerste hele ruiten); met/zonder stormstand luchtramen

Stel van kas 200 m x 200 m, h = 8m zijn totaal 4 heel ruiten bezweken in de 2e randstrook vanaf kopgevel: ofwel 10 m² van het dakoppervlak, in verband met lokaal effect moet CpL lager worden aangenomen: -0,37 bij gesloten luchtramen; -0,25 bij geopende luchtramen

luchtramen gesloten: $C_{pW} := 0.5$
 $C_{pL} := -0.37$
 $AW := 0.207$
 $AL := 7 + 10$

$$C_{pi} := \frac{C_{pW}}{1 + \left(\frac{AL}{AW}\right)^2} + \frac{C_{pL}}{1 + \left(\frac{AW}{AL}\right)^2} \quad C_{pi} = -0.370$$

luchtramen lijzijde open: $C_{pW} := 0.5$
 $C_{pL} := -0.225$
 $AW := 0.207$
 $AL := 100 + 10$

$$C_{pi} := \frac{C_{pW}}{1 + \left(\frac{AL}{AW}\right)^2} + \frac{C_{pL}}{1 + \left(\frac{AW}{AL}\right)^2} \quad C_{pi} = -0.225$$

Conclusie: Ook in geval van lokale ruitbreuk nabij het midden van het kasdek kan de onderdruk in de kas hoger worden dan waarmee volgens NEN 3859 rekening moet worden gehouden. Toepassen van een stormstand voor luchtramen kan dit effect vrijwel vereffenen.

Scenario 4: deuropening in (midden) gevel lijzijde; met/zonder stormstand luchtramen

Stel van kas 200 m x 200 m, h = 8m is totaal 10 m² opening in gevel lijzijde, in verband met lokaal effect moet CpL lager worden aangenomen: -0,37 bij gesloten luchtramen; -0,25 bij geopende luchtramen

luchtramen gesloten: $C_{pW} := 0.5$
 $C_{pL} := -0.26$
 $AW := 0.207$
 $AL := 7 + 10$

$$C_{pi} := \frac{C_{pW}}{1 + \left(\frac{AL}{AW}\right)^2} + \frac{C_{pL}}{1 + \left(\frac{AW}{AL}\right)^2} \quad C_{pi} = -0.260$$

luchtramen lijzijde open: $C_{pW} := 0.5$
 $C_{pL} := -0.21$
 $AW := 0.207$
 $AL := 100 + 10$

$$C_{pi} := \frac{C_{pW}}{1 + \left(\frac{AL}{AW}\right)^2} + \frac{C_{pL}}{1 + \left(\frac{AW}{AL}\right)^2} \quad C_{pi} = -0.210$$

Conclusie: Doordat de waarde voor de winddruk coëfficiënt voor de zijgevel aan de lijzijde relatief laag is ($C_{pe} = -0,3$ volgens NEN 3859 in het midden van de gevellengte), is het effect van een deuropening op deze positie relatief klein. Met deuropening nabij de hoek van de kas kan het effect vergelijkbaar zijn met scenario 2 of 3.