

TNO-rapport

2002-BS-R0061

**Windbelasting op zonnecollectoren en
zonnepanelen op plat-dak opstellingen:**

**Deelrapport: Experimentele bepaling van de
ontwerp-windbelasting**

Datum	2 december 2002
Auteur(s)	Dr.ir. C.P.W. Geurts Ir. G.J.P. Ravenshorst Ir. D.R. Donkervoort
Exemplaarnummer	
Oplage	
Aantal pagina's	57
Aantal bijlagen	7
Opdrachtgever	Novem contract nummer 143.620-932.9 Novem contract nummer 2020-01-41-02-005
Projectnaam	006.06678/01.02, 006.06678/01.03, 006.20104/01.02
Projectnummer	

Alle rechten voorbehouden.

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

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

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

Samenvatting

Dit rapport geeft resultaten van metingen van de windbelasting aan zonne-energiesystemen die geplaatst zijn op een plat dak. Het betreft zowel metingen op schaal in een windtunnel als verificatiemetingen op volle schaal. Het rapport is het resultaat van werkzaamheden binnen twee opdrachten van Novem. Omdat de gebruikte methoden en technieken voor beide projecten dezelfde zijn en de resultaten voor dezelfde doelgroep zijn bedoeld, is ervoor gekozen de resultaten in één rapportage te presenteren.

Op basis van de combinatie van een volle schaal meting met een uitgebreid windtunnelonderzoek is het mogelijk gebleken ontwerpwaarden voor de vormfactoren voor zonne-energiesystemen geplaatst op platte daken vast te stellen.

Het onderzoek leidt tot tabellen voor de berekening van de windbelasting op zonne-energiesystemen geplaatst op platte daken die binnen de gestelde randvoorwaarden voor de ontwerpers van systemen en gebouwen direct toepasbaar zijn. Deze tabellen vormen de basis voor de aanvullende gegevens die in de ontwerp-NVN 7250 'Bouwkundige aspecten van zonne-energiesystemen' zullen worden opgenomen.

De invloed van de oriëntatie van het zonne-energiesysteem kan voor het Nederlandse windklimaat in rekening worden gebracht door een vermenigvuldigingsfactor toe te passen op de ontwerp-windbelasting, die is bepaald conform de uitgangspunten uit NEN 6700. Toepassing van deze factor kan tot 50% reductie opleveren voor de windbelasting in de hoekzone van het gebouw.

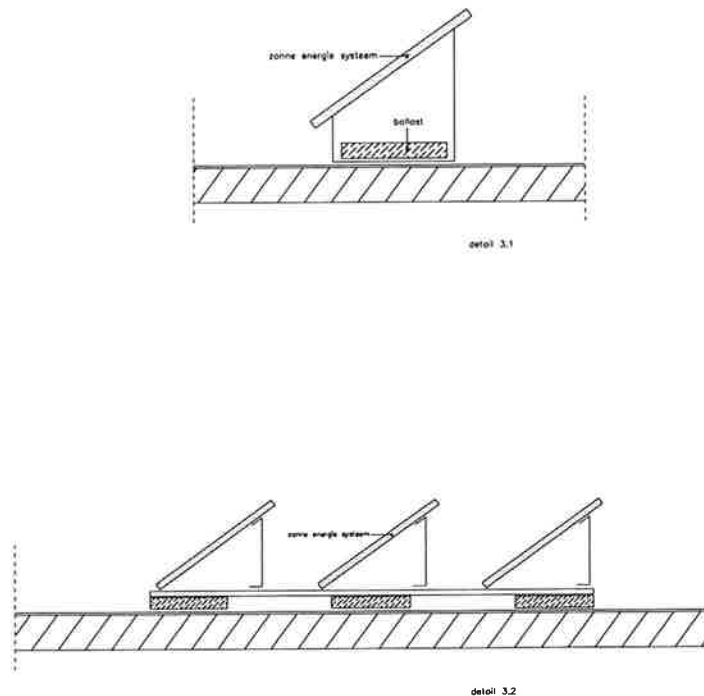
De resultaten zijn gebonden aan duidelijke randvoorwaarden. Voor systemen die buiten de gestelde randvoorwaarden vallen is het mogelijk op basis van de in het gepresenteerde onderzoek gehanteerde modellen en technieken, een advies op maat te bepalen. Dit betreft bijvoorbeeld systemen met bijzondere vormen en afmetingen, of situaties, waarbij de omgevingsbebouwing invloed uit kan oefenen op de te hanteren waarden.

Inhoudsopgave

1	Inleiding	4
2	Opzet van het windtunnelonderzoek	6
2.1	Windtunnel	6
2.2	Het windtunnelmodel	6
2.3	Drukmetingen	7
2.3.1	Opzet van de drukmetingen	8
2.4	Verwerking van de gemeten data	8
3	Opzet van de meting op ware grootte	10
3.1	Inleiding	10
3.2	De meetlocatie	10
3.3	De meetopstelling	10
3.4	Beschrijving van apparatuur en instrumentarium	11
3.5	Verwerking van de gemeten data	11
4	Resultaten	14
4.1	Inleiding	14
4.2	Windtunnelmetingen	14
4.2.1	Panelen met een open constructie.	15
4.2.2	Panelen met een gesloten constructie	16
4.3	Volle-schaal metingen	17
4.3.1	Verificatie verschildrukcoëfficiënten over gehele collector	18
4.3.2	Drukverschillen over onderdelen van de collector	18
4.4	Toepassing voor de berekening	18
4.5	Vergelijking met NEN 6702	19
4.6	Conclusie	19
5	Invloed van oriëntatie op de windbelasting	20
6	Referenties	22
7	Conclusies	23
8	Aanbevelingen	24
	Bijlage(n)	
	A Tekeningen van het windtunnelmodel	
	B Foto's gemaakt tijdens de windtunnelmeting	
	C Foto's van de volle-schaal meting	
	D Windtunnelmetingen: tussenresultaten voor open onderconstructies	
	E Windtunnelmeting: tussenresultaten voor gesloten onderconstructies	
	F Tussenresultaten volle schaal metingen	
	G Invloed windrichtingsafhankelijkheid	

1 Inleiding

Door TNO Bouw is in opdracht van Novem en in samenwerking met ZEN Solar een onderzoek uitgevoerd naar de in rekening te brengen windbelasting op zonnecollectoren en zonnepanelen, toegepast in opstellingen op een plat dak. Dit kunnen zowel los geplaatste, geballaste, systemen (zie figuur 1.1) zijn, of systemen waarbij de collectoren of panelen direct aan de draagconstructie van het gebouw zijn gemonteerd. Systemen kunnen bestaan uit kleine opstellingen met een of enkele systemen of bestaan uit meerdere rijen die achter elkaar geplaatst zijn.



Figuur 1: Voorbeeld van plat-dak systemen, geplaatst op een plat dak.

Dit onderzoek is verdeeld in drie onderdelen, te weten:

- Een inventarisatie van de gebruikte rekenmodellen voor het bepalen van de windbelasting op gebouwen en constructies binnen Europa, met speciale aandacht voor de specifieke aspecten die voor zonne-energiesystemen van belang kunnen zijn. Dit is gerapporteerd in TNO rapport 2002-BS-R0048.
- Een windtunnel studie, waarbij diverse parameters gevarieerd worden;
- Een in-situ meting, op ware grootte, van de windbelasting op een collector, geplaatst op een frame.

Dit rapport beschrijft de experimenten van het tweede en derde deel. Op basis van de aanbevelingen van het inventarisatierapport zijn deze experimenten opgezet en uitgevoerd.

Voor de windtunnel studie is een gebouw met een plat dak op schaal gemodelleerd en voorzien van gemodelleerde zonne-energiesystemen. In de studie is de invloed van de volgende aspecten meegenomen:

- Locatie van de zonne-energie systemen op het dak;
- Invloed van rijen zonne-energie systemen op elkaar;
- Het plaatsen van het zonne-energie systeem op een open, dan wel gesloten onder constructie.

Bovenstaande punten zijn uitgewerkt binnen het eerste project, met NOVEM contractnummer 143.620-932.9.

- Daarnaast zijn in dit rapport de resultaten opgenomen van aanvullende metingen, waarvoor in het tweede project, NOVEM contractnummer 2020-01-41-02-005, aanvullend opdracht is verleend. In deze metingen is het effect van de hoogte van de dakrand op de waarden voor de windbelasting onderzocht. Dit is uitgevoerd voor dezelfde configuraties als de oorspronkelijke metingen.

In de volle-schaal meting wordt de belasting op de frames waarop de zonne-energiesystemen zijn bevestigd, experimenteel bepaald, en wordt dieper ingegaan op de belasting die bij zonnecollectoren op de onderdelen binnen de collector werkt.

2 Opzet van het windtunnelonderzoek

Het toepassen van windtunnelonderzoek voor de bepaling van ontwerp-windbelastingen stelt specifieke eisen aan de windtunnel, het windtunnelmodel, de meettechniek en de analysetechniek. Hier wordt in dit hoofdstuk op ingegaan.

2.1 Windtunnel

Het windtunnelonderzoek is uitgevoerd in de atmosferische grenslaagwindtunnel van TNO-MEP te Apeldoorn. Om in een windtunnel de werkelijkheid juist te simuleren dient aan de volgende voorwaarden te worden voldaan:

- Het gebouw dient geometrisch juist geschaald te worden;
- De eigenschappen van de aanstromende wind dienen overeenkomstig deze geometrische schaal juist geschaald te worden;
- De verhouding tussen een tijdschaal, de lengteschaal en de schaling van de windsnelheid moet correct zijn.

Voor de geometrische schaal van het gebouw omgeving is 1:50 gekozen. Voor de schaling van de eigenschappen van de wind als functie van de hoogte boven het terrein is de ruwheid van het stroomopwaarts gelegen terrein van belang. Aangezien de resultaten toepasbaar dienen te zijn voor gebouwen onder verschillende omstandigheden is voor de terreinruwheid een veilige aanname gedaan. Het model is in een vrij gladde omgeving gesitueerd, waarbij is uitgegaan van een waarde voor de ruwheidslengte op ware grootte van 0,12 meter. Hiervoor wordt in de windtunnel een voorland met kleine blokken gebruikt samen met speciale turbulentiegeneratoren bij de tunnelingang. De eigenschappen van het windveld in de windtunnel zijn gedocumenteerd in het profielenboek van de windtunnel [1]. Tevens zijn in bijlage A de profielgegevens van de hier gebruikte configuratie gegeven. Foto's van de windtunnelmodellering zijn gegeven in bijlage B.

Het model wordt op een draaischijf gemonteerd, en de metingen worden uitgevoerd bij 24 windrichtingen, zodanig dat de volledige windroos wordt afgedekt, met intervallen van 15 graden. 0 graden komt overeen met wind uit het Noorden, 90 graden is oostenwind etcetera.

De ruwheid in de windtunnel is ten behoeve van deze meting doorgezet over de draaischijf.

2.2 Het windtunnelmodel

De bedoeling van het windtunnelonderzoek is om verschillende aspecten zodanig te onderzoeken, dat de resultaten toepasbaar zijn voor uiteenlopende verschijningsvormen van de zonne-energie systemen op platte daken. Hier is in de modelkeuze rekening mee gehouden.

Er is ervoor gekozen een gebouw te modelleren met een vorm van een platte doos met afmetingen van 30 bij 40 meter en een hoogte van tien meter. In figuur A.1 (bijlage A) is de opbouw van het dak gegeven.

In dit onderzoek is gebruik gemaakt van de symmetrie van het dakvlak. Het dak is onderverdeeld in vier kwadranten, die elk afzonderlijk geanalyseerd worden. Een van de kwadranten is niet voorzien van de zonne-energie systemen. Hier worden metingen uitgevoerd die dienen als referentie naar de huidige bouwregelgeving, zoals die in NEN 6702 in rekening wordt gebracht. Op de andere drie kwadranten zijn de zonne-energiesystemen aangebracht. Er zijn twee configuraties opgesteld, de eerste betreft zonne-energiesystemen die aan de onderzijde open zijn, de tweede betreft zonne-energiesystemen die op een dichte onderconstructie worden aangebracht, bijvoorbeeld consoles. In beide metingen zijn de locaties van de van modelleren zonne-energie systemen het dezelfde gekozen.

De systemen met open en gesloten onderconstructie hebben beide dezelfde afmetingen voor de gemodelleerde panelen en dezelfde hellingshoek en hoogte boven dakvlak. Voor de zonne-energiesystemen is een hellingshoek van 35 graden aangehouden. Er is een afstand tussen het dakvlak en de onderkant van de panelen in rekening gebracht van 400 mm op ware grootte. De lengte van het dakvlak van de zonne-energiesystemen (in hun vlak) is 1,20 meter. Aangenomen is dat de breedte van een paneel of collector in de orde van 1,5 meter ligt. Hierop is de keuze van de locatie van de drukmeters afgestemd. Per meetlocatie van 1,2 x 1,5 meter zijn 8 drukmetingen uitgevoerd: 4 aan de bovenzijde van het paneel, 4 aan de onderzijde van het paneel bij de open panelen, en 4 op het verticale vlak bij de gesloten systemen.

De zonne-energie systemen, en het dakvlak in het lege kwadrant, zijn voorzien van kleine gaatjes op de locaties waar de drukken bepaald worden. Deze gaatjes zijn d.m.v. slangetjes verbonden met verschildrukmeters, die het drukverschillen registreren tussen de meetlocatie en de barometerdruk. Er zijn locaties gekozen die representatief zijn voor het te onderzoeken onderwerp; locaties in de randzone, hoek zone en het midden van het gebouw, zowel aan de bovenkant als aan de onderkant van de systemen, en locaties, zodanig dat de afscherpende effecten van de zonne-energie systemen op elkaar kunnen worden onderzocht.

De gekozen locaties zijn aangegeven op de tekeningen in bijlage A. In bijlage B is een fotoserie gegeven van de gebruikte opstellingen.

In de tweede meetserie, uit de vervolgoopdracht, zijn de gemaakte modellen voorzien van een dakrand met een hoogte van 200 mm op volle schaal (4 mm in de windtunnel, ofwel 2% van de gebouwhoogte). Met dit aangepaste model zijn dezelfde metingen uitgevoerd die op identieke wijze worden geanalyseerd als met het model zonder dakrand.

2.3 Drukmetingen

Voor de drukmetingen is het model van het gebouw voorzien van kleine gaatjes, die met behulp van flexibele slangetjes verbonden zijn met drukmeetinstrumenten. De slanglengtes zijn zo gekozen dat snelle drukwisselingen kunnen worden geregistreerd.

2.3.1 *Opzet van de drukmetingen*

Er zijn per configuratie 2 series metingen uitgevoerd, waarbij in totaal 120 drukmeetpunten zijn bemonsterd. De locatie van de drukmeetpunten is door TNO Bouw vastgesteld op basis van de zone-indeling van een plat dak uit NEN 6702. De meetpunten zijn gegeven in figuur A.3 t/m A10.

Er zijn in totaal 8 meetlocaties gedefinieerd, waarvan er 4 in de hoekzone vallen, 2 in de rand zone en 1 in de middenzone van het gebouw, zoals in NEN 6702 gedefinieerd. Het laatste meetpunt ligt op de scheiding van rand en middenzone. In de figuren is aangegeven hoe de rand-, hoek- en middenzone voor dit gebouw zijn gesitueerd.

De metingen zijn uitgevoerd met een bemonsteringsfrequentie van 400 Hz. Per meting zijn 8192 datapunten geregistreerd, de totale meetduur is 20,5 seconde. De windsnelheid in de windtunnel ter hoogte van het dak van het gebouw is gelijk aan 10,7 m/s. Deze windsnelheid is ingesteld met behulp van een meting van de windsnelheid boven de in de tunnel opgewekte grenslaag. De verhouding tussen de windsnelheid boven de grenslaag en de windsnelheid ter plaatse van het dak van de toren volgt uit het gemiddelde profiel, dat voor de gebruikte ruwheid bekend is [2]. De in de windtunnel gebruikte windsnelheid wordt aan de hand van deze verhouding opgeschaald naar de waarden, zoals die in NEN 6702 worden gehanteerd voor gebied I, onbebouwd gebied. In de verwerking van de data worden vervolgens de waarden voor de vormfactor bepaald.

2.4 Verwerking van de gemeten data

Ten behoeve van de berekening van de windbelasting zijn extremen in de optredende drukken van belang. Hiervoor zijn in NEN 6700 en NEN 6702 eisen vastgelegd. Conform deze eisen dienen windtunnelmetingen zodanig verwerkt te worden dat het resultaat een vastgestelde betrouwbaarheid behaalt. Het is dus niet voldoende gemiddelde waarden of een enkel maximum of minimum te kennen. Hiervoor is een statistische bewerking van de data noodzakelijk.

Op de resultaten van de meting van de drukken in de windtunnel is door TNO Bouw een extreme waarden analyse uitgevoerd, waarmee de lokale ontwerpwaarden voor winddruk en -zuiging zijn bepaald. Per windrichting wordt hiermee representatieve waarde voor de belasting afgeleid.

De analyse bestaat uit de volgende stappen:

A: Per gemeten windrichting bepaling van de extreme drukken

- 1: De verhouding tussen de windsnelheid op het meteorologisch station Den Helder en windsnelheid ter plaatse van het dak op ware grootte is bepaald conform de procedures die ten grondslag hebben gelegen aan NEN 6702 (zie TNO rapport B90-0483). Deze verhouding is:

$$\text{Factor} = U_{\text{meteo}}/U_{\text{dak}}$$

In deze factor zit het effect van het verschil in terreinruwheid tussen het meteostation en de aanname voor de modelmeting verwerkt.

- 2: Allereerst is over de meetdata vooraf een 'moving average' van 0,5 seconde (op ware grootte) toegepast, om pieken te krijgen die representatief geacht worden voor de belasting op de zonnepanelen. De keuze voor de lengte van dit 'moving

average' is op basis van een eerste ruwe analyse van de meetresultaten vastgesteld. De fluctuerende drukken uit het windtunnelonderzoek zijn weergegeven als drukcoëfficiënten, door de gemeten drukken te delen door de gemiddelde stuwdruk die in een nabij meteorologisch station zou zijn opgetreden bij de windtunnelsnelheid. Die stuwdruk volgt uit het kwadraat van de gebruikte windtunnelsnelheid vermenigvuldigd met de onder punt 1 afgeleide Factor. Dit levert tijdfuncties van de drukcoëfficiënten op:

$$C_p(t) = \frac{p(t)}{\frac{1}{2} \rho (U_{meteo})^2} = \frac{p(t)}{\frac{1}{2} \rho (Factor U_{dak})^2}$$

- 3: De tijdfuncties van de drukcoëfficiënten worden in kleinere deelregistraties opgedeeld. Voor elk van die deelregistraties worden het maximum en het minimum bepaald. Vervolgens worden extreme waarde verdelingen bepaald van deze maxima en minima, en deze worden gefit op een Gumbel verdeling. Per meetpunt worden de bijbehorende verdelingsparameters voor de Gumbel verdeling bepaald.

B: Combineren van de drukmetingen met windklimaat statistiek

- 4: Per windrichting is de gevonden extreme waarden verdeling voor de drukcoëfficiënten gecombineerd met de bekende extreme-waarde verdeling van het meteorologisch station Den Helder. Dit meteorologisch station is als representatief aangehouden voor windgebied I in NEN 6702, en daarmee een bovengrens voor de Nederlandse situatie. De gebruikte extreme waarden verdeling volgt uit het Rijkooort-Weibull model van het KNMI, dat ten grondslag ligt aan de beschrijving van het windklimaat in Nederland. Dit levert per gemeten windrichting een verdeling op van de druk in het meetpunt, en representatieve waarde voor die druk.

- 5: Uit de gevonden verdelingen wordt per meetpunt en per windrichting die waarde vastgesteld die overeenkomt met de belasting die gemiddeld eens in de 50 jaar wordt overschreden. Deze belasting wordt vervolgens gedeeld door de stuwdruk die in NEN 6702 is gegeven voor gebied II, onbebouwde omgeving. Uit deze individuele drukken wordt per meetlocatie de druk bepaald die in rekening gebracht moet worden. Dit betreft in de meeste gevallen de negatieve waarde, omdat die in de berekening van zonne-energiesystemen maatgevend is. Voor de belasting op de verticale vlakken van gesloten systemen zijn de positieve waarden van belang.

Deze bepalingmethode is conform de betrouwbaarheidseisen van NEN 6700. Deze belastingen kunnen direct dienen als locale externe drukken op de gevel. Voor de volledigheid wordt hier opgemerkt dat voor de bepaling van de windbelasting op een gevelelement ook de interne druk in rekening moet worden gebracht, en dat een belastingfactor, conform NEN 6702 dient te worden toegepast.

Naast het analyseren van alle 120 gemeten kanalen individueel zijn ook analyses uitgevoerd, waarbij verschillende kanalen zijn gecombineerd. Zo is op de meetlocatie A de belasting op de zonne-energiesystemen bepaald door de metingen in punten 1 tot en met 8. Deze signalen zijn gecombineerd tot 1 signaal, dat afzonderlijk is geanalyseerd. Dit levert representatieve waarden voor de totale vormfactor op. Hier wordt in de bespreking van de resultaten verder op ingegaan.

3 Opzet van de meting op ware grootte

3.1 Inleiding

Een experiment op ware grootte is opgebouwd, om de windbelasting op een zonnecollector te kunnen meten. Hiervoor is het noodzakelijk dat de volgende zaken aanwezig zijn:

- Een geschikte locatie voor de meting: Dit stelt eisen aan het gebouw waarop gemeten wordt en aan de omgevingsomstandigheden.
- Een systeem dat wordt beïnstroomd.
- De benodigde apparatuur en instrumenten

Deze worden hieronder nader beschreven. Voor een beschrijving van de gebruikte hardware en software van het meetsysteem wordt verwezen naar TNO rapport 1999-CON-DYN-R0003.

3.2 De meetlocatie

De metingen zijn uitgevoerd op een meetlocatie op het terrein van TNO Bouw te Rijswijk. Op het dak van het Prins Bernhardgebouw op de locatie Plaspoelpolder is een ZEN zonnecollector geplaatst op een plat dak. Het dak waar de collector op is geplaatst is 9,5 meter hoog. Dit dakvlak is het hoogste van de diverse dakvlakken die het gebouw telt. De hoofdassen van het dak zijn ongeveer 30 graden verdraaid ten opzichte van het noorden, zie bijlage C.

In de directe omgeving van het gebouw staan bomen, die tijdens de meetduur zonder blad waren. Het omliggende terrein in de hoofdwindrichtingen zuidwest tot noordwest bestaat voornamelijk uit kleinschalige tuinbouw en veeteelt. Op grotere afstand bevindt zich het Westland en enkele dorpen. Voor de interpretatie van de metingen en het relateren van deze metingen aan de waarden zoals die in NEN- en EN-normen zijn gegeven, is de classificatie van de ruwheid van belang.

3.3 De meetopstelling

De meetopstelling bestaat uit drie onderdelen:

- 1: een meteorologische mast,
- 2: de zonnecollector
- 3: de data-acquisitie, apparatuur.

De meteorologische mast is direct naast het proefdak geplaatst. Deze mast is voorzien van een windsnelheids en een windrichtingsmeter. De windsnelheid en windrichting worden op 19 meter hoogte geregistreerd.

De zonnecollector is 1,77 meter diep en 2,60 meter breed. Deze is op een open frame opgesteld, onder een helling van 30 graden. Het laagste punt van de collector bevindt zich op 650 mm boven en het dakvlak, en het hoogste punt op 1,50 meter boven het dakvlak. De collector is op ongeveer 4 meter vanuit de dakrand opgesteld, zowel aan beide zijden als aan de achterkant (de hoge kant).

De collector is zo neergezet dat tijdens de meetperiode de ongunstigste belasting wordt gevonden. Dit betekent dat de hoge kant naar het zuidwesten (210 graden) is gericht. Uiteraard zal in werkelijkheid de ideale positie zo zijn dat de hoge kant naar het noorden is gericht. Dit is echter voor het uitvoeren van deze metingen niet relevant. Hier wordt in hoofdstuk 5 nader op ingegaan.

3.4 Beschrijving van apparatuur en instrumentarium

De collector is voorzien van faciliteiten om drukverschillen te meten over de verschillende lagen. Er zijn drukverschilmeters aangebracht in waterdichte kastjes, die direct naast de collector zijn aangebracht, zie de foto's in bijlage B. 12 verschildrukmetingen zijn uitgevoerd, waarbij de druk in de collector als referentie fungeerde. 6 maal is het verschil over de glasplaat gemeten, en 6 maal is het verschil over de isolatielaag aan onderzijde van de collector gemeten. Er is voor gezorgd dat de 6 locaties over de glasplaat boven de 6 locaties in de isolatielaag liggen. Op die manier is het mogelijk uit deze metingen ook direct het drukverschil over de gehele constructie te bepalen.

3.5 Verwerking van de gemeten data

De gemeten krachten en drukken worden op dezelfde wijze verwerkt. Deze verwerking bestaat uit de volgende stappen:

A: verwerking van elke meting.

Allereerst worden alleen die metingen geselecteerd waarbij de gemiddelde windsnelheid gedurende 10 minuten hoger was dan 7,5 m/s. Deze waarde wordt geacht hoog genoeg gekozen te zijn om representatieve resultaten op te leveren voor zowel de drukken als de krachten.

De tijdsignalen van de drukken en krachten worden allereerst dimensieloos gemaakt met de gemiddelde windsnelheid:

$$C_p(t) = \frac{p(t)}{\frac{1}{2} \rho (U_{mast})^2}$$

en

$$C_F(t) = \frac{p(t)}{\frac{1}{2} \rho A (U_{mast})^2}, \text{ met } A = 1 \text{ m}^2 \text{ (eenheidsoppervlak)}$$

Per meting worden vervolgens van elk der gemeten grootheden de volgende eigenschappen bepaald:

Het gemiddelde, het minimum, het maximum en de standaardafwijking van de druk- en krachtcoëfficiënten. Deze waarden worden weggeschreven in een serie bestanden, die zo zijn opgezet, dat elk bestand de resultaten uit een windrichtingsinterval van 15 graden omvat. Ofwel, van elke meting dient ook de gemiddelde windrichting te worden bepaald.

B: Selectie van meetresultaten voor de eindverwerking.

Op basis van de onder punt A gegenereerde bestanden wordt beoordeeld welke kanalen en welke meetresultaten niet betrouwbaar zijn. Dit gebeurt visueel, door na te gaan of

de waarden in de orde van grootte zijn die verwacht kan worden, en door na te gaan of alle metingen bij een gegeven windrichting vergelijkbare resultaten geven. Al te sterke uitschieters zijn niet in de eind analyse meegenomen.

C: Extreme waarden analyse

Van de gerapporteerde maxima en minima worden extreme waarde verdelingen bepaald. Vervolgens wordt die waarde bepaald die overeenkomt met de representatieve waarde voor C_{pmax} en C_{pmin} .

De met deze analyse gevonden waarden voor de windbelasting voldoen aan de eisen voor het betrouwbaarheidsniveau zoals gesteld in NEN 6700.

D: Correctie naar toepassing voor NEN 6702.

De onder punt C bepaalde waarden zijn gerelateerd aan de gemiddelde windsnelheid op de meetmast. NEN 6702 gaat uit van de windsnelheid op dakhoogte, en heeft in de stuwdruk bovendien ook het effect van de vlagrigheid verdisconteerd. Dit wordt als laatste gecorrigeerd, op basis van de modellen die ten grondslag liggen aan NEN 6702.

De basisformules die hiervoor van belang zijn, zijn:

$V_z = 2,5u * \left(\frac{z-d}{z_0} \right)$, de logwet, die de relatie tussen windsnelheid V , hoogte z en

ruwheidsparameters d en z_0 beschrijft;

$I_u = \frac{1}{\ln \left(\frac{z-d}{z_0} \right)}$, de definitie van de turbulentie-intensiteit;

$C_{p,NEN} = \frac{P_{rep}}{0,63V_z^2 (1 + 7I_u)}$, de definitie van de vormfactor volgens NEN 6702.

De ruwheidslengte zal in de orde van 0,2 tot 0,5 meter liggen. De verplaatsingshoogte ligt in de buurt van 5 meter. Voor een aantal combinaties van deze waarden is in onderstaande tabel de verhouding tussen $C_{p,NEN}$ en C_p uit de metingen gegeven. Dit geeft een indicatie van de nauwkeurigheid die bij deze meting is behaald. Het blijkt dat met name de keuze voor de parameter d een grote invloed kan hebben op de verhouding tussen gemeten waarde en toe te passen waarde voor de vormfactor conform de normbladen.

Tabel 1: Verhouding gemeten vormfactoren en waarde ten behoeve van toepassing in NEN 6702; voorbeeld

z_0	d	$C_{pnen}/C_{pmeting}$
0.20	7.00	0.64
0.30	7.00	0.64
0.50	7.00	0.64
0.20	5.00	0.55
0.30	5.00	0.53
0.50	5.00	0.52

Voor de vergelijking met de windtunnelproeven wordt aangenomen dat minstens de orde van grootte van de gevonden waarden moeten kloppen. De uiteindelijk toe te passen waarden worden vanuit het windtunnelonderzoek gedefinieerd.

Voor de toe te passen correcties voor drukvereffening als alleen de onderdelen van de zonnecollector worden beschouwd is de invloed van het voorliggende terrein verwaarloosbaar, omdat deze correctie een verhoudingsgetal is tussen twee waarden waarin het effect van de ruwheid op ongeveer gelijke wijze is opgenomen. De definitie van deze verhouding is:

$$C_{eq} = \frac{C_{pdif}}{C_{ptot}}$$

Waarin C_{pdif} is de vormfactor rechtstreeks uit de verschildrukmetingen, en C_{ptot} is de vormfactor gevonden uit de gecombineerde metingen aan boven- en onderzijde van de collector.

De tweede correctie die moet worden toegepast is het omrekenen van de resultaten uit de metingen, die als extreme waarden zijn gedefinieerd ten opzicht van een gemiddelde winddruk naar resultaten die toepasbaar zijn in combinatie met de normbladen. In de normbladen worden de vormfactoren toegepast in combinatie met een extreme winddruk. Deze omrekeningslag is uitgevoerd op de metingen, waarvan tussenresultaten in bijlage F worden gegeven.

4 Resultaten

4.1 Inleiding

In dit hoofdstuk worden de resultaten van de metingen beschreven. Voor wat betreft de windtunnelmetingen wordt allereerst een keuze gemaakt voor de resultaten die gebruikt gaan worden voor de eindconclusies.

4.2 Windtunnelmetingen

Per configuratie zijn in totaal 120 kanalen bemonsterd. Per kanaal zijn 24 windrichtingen doorgemeten. Dit levert per kanaal representatieve waarden op voor de windbelasting voor zowel het maximum als het minimum. Daarnaast zijn ook metingen beschikbaar waarbij meerdere kanalen tot 1 signaal zijn gecombineerd. Voor de open collectoren levert dat 14 extra kanalen op, voor de dichte collectoren 28 extra kanalen. Hieruit kan worden afgeleid dat in totaal 13536 representatieve waarden worden bepaald.

De eerste reductie betreft de keuze per meetpunt welke waarden worden gebruikt. Er is ervoor gekozen de meest ongunstige waarde te nemen, ongeacht de windrichting. Dit reduceert het aantal resultaten met een factor 24: Per meetpunt wordt zo 1 maximum en 1 minimum gekozen.

De tweede stap betreft de keuze of het maximum dan wel het minimum maatgevend is. In alle gevallen waarbij het de druk betreft aan de bovenzijde van de panelen wordt in elk geval het minimum aangehouden. Dit levert een uplift op de systemen, en dit is in de meeste gevallen maatgevend. In het geval van de drukken aan de onderzijde, alsmede de drukken op de verticale delen van de gesloten panelen, wordt de positieve waarde aangehouden. Dit reduceert de hoeveelheid verder. In dit rapport worden zowel de resultaten van de metingen zonder als de metingen met een dakrand gepresenteerd. Deze deelresultaten zijn in bijlage D gegeven. Op basis van die deelresultaten zijn waarden gegenereerd ten behoeve van de eindgebruiker. Dit betekent dat vooral de gecombineerde resultaten, waarbij direct de uplift van de systemen wordt bepaald, van belang zijn. De individuele metingen geven daarbij wel een indicatie van de verdeling van de drukken. Dit is van belang bij het bepalen van het aangrijpingspunt van de kracht, indien de gecombineerde waarden worden gebruikt.

De metingen zijn uitgevoerd bij een dak zonder dakrand, en met een afstand tussen het dakvlak en de panelen van 400 mm op ware grootte. Aangenomen wordt dat daarmee de gegevens toepasbaar zijn voor panelen die maximaal tot 400 mm boven het dak staan. Voor panelen die hoger worden aangebracht, zullen de hier gegenereerde waarden niet van toepassing zijn. Dit zou in een aanvullend onderzoek nader beschouwd kunnen worden.

De panelen zijn op 35 graden gelegd. Aangenomen kan worden dat de resultaten geldig zijn voor hellingshoeken van de panelen tussen 10 en 35 graden. Voor steilere hellingen zal een nadere beschouwing nodig zijn. Daar wordt verder niet op ingegaan. Vlakke systemen kunnen in veel gevallen met behulp van de waarden die gelden voor platte daken worden doorgerekend.

Er worden bij de resultaten 4 situaties onderscheiden:

- Situatie I betreft panelen in rand- en hoekzones, die met de hoge kant naar de dakrand gekeerd staan.
- Situatie II betreft panelen in rand- en hoekzones, die met de lage kant naar de dakrand gekeerd staan.
- Situatie III betreft panelen in de randzone, die met de zijden naar de dakrand gekeerd zijn.
- Situatie IV betreft systemen die worden afgeschermd door ervoor liggende systemen. Met name bij grootschalige toepassingen worden meerdere rijen systemen geplaatst. Vooral als deze onderling gekoppeld worden, kunnen voordelen gehaald worden omdat alleen de meest stroomopwaartse systemen volledig worden belast. De totale belasting wordt door de constructie verdeeld, waardoor in de berekening van benodigde ballast met reducties kan worden gewerkt. Indien een rij naast elkaar gelegen panelen wordt doorgerekend, gelden de panelen aan de uiteinden over een afstand van 2 meter vanuit het einde als niet afgeschermd.

Daarnaast gelden bij de toepassing van de resultaten in de hier gegeven tabellen de volgende randvoorwaarden. Binnen dit toepassingsgebied zijn genoemde waarden in elk geval veilig geacht. Voor specifieke toepassingen of producten kan het wenselijk zijn afzonderlijk de waarden te bepalen, als daarmee een kostenbesparing voor ballast en/of onderconstructie bereikt kan worden.

- 1: Het gebouw is maximaal 25 meter hoog; bij hogere gebouwen is het afhankelijk van de breedte-diepte-hoogte verhouding of toepassing van de waarden toelaatbaar is. Dit zal dan per geval beschouwd moeten worden;
- 2: De resultaten zijn toe te passen voor systemen met een hellingshoek van minstens 10 en hoogstens 40 graden;
- 3: De afstand tussen het dakvlak en het paneel bedraagt ten hoogste 400 mm. Bij grotere afstanden dient per project nagegaan te worden of het mogelijk is bovenstaande waarden toe te passen;
- 4: De resultaten zijn representatieve waarden voor de vormfactor. In de berekening dient de vormfactor vermenigvuldigd te worden met het aangestroomde oppervlak en dient de stuwdruk conform NEN 6702, alsmede de veiligheidsfactor conform NEN 6702 te worden toegepast, om de rekenwaarde te bepalen. De coëfficiënten C_{dim} , ϕ_I en C_{eq} uit NEN 6702 zijn gelijk aan 1. Zie hiervoor ook het deelrapport betreffende de regelgeving (TNO Rapport 2002-BS-R0048);
- 5: Voor dakrandhoogtes tussen 100 en 200 mm kan rechtlijnig geïnterpoleerd worden tussen de waarden uit de tabel. Als alternatief kan de ongunstigste van de twee waarden worden gehanteerd;
- 6: De stuwdruk ter hoogte van de dakrand van het gebouw is maatgevend. De waarde voor de factoren C_{dim} , ϕ_I en C_{eq} zijn gelijk aan 1.0;
- 7: De bebouwing rondom het gebouw dat wordt beschouwd mag niet boven de dakrand van dat gebouw uitsteken. Dit betreft gebouwen tot op een afstand van 10 maal de gebouwhoogte met een minimum van 100 meter.

4.2.1 *Panelen met een open constructie.*

Voor zonne-energiesystemen die op een open frame worden geplaatst, worden hier resultaten gegeven van totale vormfactoren, te vergelijken met C_I in figuur 27 van NEN 6702.

Dit zijn waarden die representatief worden geacht voor een paneel van maximaal 2 m². Voor toepassing op kleinere panelen kunnen dus dezelfde waarden worden gehanteerd. Voor toepassing op groter panelen kan wellicht de belasting wat gereduceerd worden, maar aanbevolen wordt hier ook daar met dezelfde waarden te rekenen.

Op basis van de hiervoor beschreven analyse en de deelresultaten zoals die in bijlage C zijn opgenomen, worden onderstaande ontwerpwaarden voor de windbelasting op zonne-energiesystemen met open frame geadviseerd.

Tabel 2: Waarden voor de coefficient C_t voor zonne-energiesystemen op platte daken.

Zone dak, conform NEN 6702, zie figuur A.2	Dakrand ≤ 100 mm		Dakrand ≥ 200 mm	
	opwaarts	neerwaarts	opwaarts	neerwaarts
Hoekzone (c), situatie I	-1.8	+0.2	-1.5	+0.2
Hoekzone, situatie II	-1.0	+1.2	-0.9	+1.0
Randzone (r), situatie I	-1.6	+0.2	-1.2	+0.2
Randzone (r), situatie II	-1.0	+1.0	-0.9	+0.5
Randzone (r), situatie III	-1.3	+1.2	-1.0	+1.2
Middenzone (t)	-0.6	+0.6	-0.6	+0.6
Middenzone (t), situatie IV	-0.4	+0.4	-0.4	+0.4

Het aangrijpingspunt van C_t is op $\frac{1}{4}$ van de overspanning vanaf de naar de wind toegekeerde zijde (conform NEN 6702, figuur 27).

4.2.2 Panelen met een gesloten constructie

Voor zonne-energiesystemen die op een gesloten constructie worden geplaatst, worden hier resultaten gegeven van drukcoëfficiënten $C_{pe,loc}$. Dit zijn waarden die representatief worden geacht voor een toepassing van maximaal 2 m². Voor toepassing op kleinere systemen kunnen dezelfde waarden worden gehanteerd. Voor toepassing op grotere systemen kan wellicht de belasting wat gereduceerd worden, maar aanbevolen wordt hier ook daar met dezelfde waarden te rekenen.

Tabel 3: Waarden voor de coefficient $C_{pe,loc}$ voor zonne-energiesystemen op platte daken, panelen of collectoren op een gesloten constructie.

Zone dak, conform NEN 6702, figuur 28	Dakrand ≤ 100 mm			
	onderdruk op bovenzvlak	overdruk op bovenzvlak	overdruk op verticaal vlak	onderdruk op verticaal vlak
Hoekzone (c), situatie I	-1.7	+0.2	+0.7	-0.7
Hoekzone, situatie II	-1.0	+0.2	+0.3	-1.2
Randzone (r), situatie I	-1.6	+0.2	+0.5	-0.7
Randzone (r), situatie II	-0.9	+0.2	+0.4	-0.8
Randzone (r), situatie III	-1.4	+0.2	+0.5	-1.1
Middenzone (t)	-1.0	+0.2	+0.3	-1.0
Middenzone (t), situatie IV	-0.5	+0.2	+0.3	-0.5

Het aangrijpingspunt van de kracht op het bovenzvlak is in het midden van de overspanning

Tabel 4: Waarden voor de coefficient $C_{pe,loc}$ voor zonne-energiesystemen op platte daken, panelen of collectoren op een gesloten constructie.

Zone dak, conform NEN Dakrand ≥ 200 mm 6702, figuur 28				
	onderdruk op bovenvlak	overdruk op bovenvlak	overdruk op verticaal vlak	onderdruk op verticaal vlak
Hoekzone (c), situatie I	-1.7	+0.2	+0.7	-0.7
Hoekzone , situatie II	-1.0	+0.2	+0.3	-1.2
Randzone (r), situatie I	-1.4	+0.2	+0.5	-0.7
Randzone (r), situatie II	-0.9	+0.2	+0.4	-0.8
Randzone (r), situatie III	-1.2	+0.2	+0.5	-1.0
Middenzone (t)	-1.0	+0.2	+0.3	-1.0
Middenzone (t), situatie IV	-0.5	+0.2	+0.3	-0.5

Het aangrijpingspunt van de kracht op het bovenvlak is in het midden van de overspanning

4.3 Volle-schaal metingen

In tabel 5 is een overzicht gegeven van de gemeten data tijdens de meetperiode, die liep van januari tot en met maart 2002.

Tabel 5: Overzicht van gemeten data gedurende de driemaandelijke meetperiode

Windrichtings- interval	Aantal metingen met $U > 7.5$ m/s	Windrichtingsinterval	Aantal metingen met $U > 7.5$ m/s
270-360	33	180-195	51
		195-210	81
0-90	3	210-225	349
		225-240	286
90-180	20	240-255	103
		255-270	76

In de kwadranten 0-90, 270-360 en 90-180 zijn gedurende de meetperiode te weinig metingen verricht boven de gestelde windsnelheid. Deze metingen zijn in de analyse niet nader beschouwd.

In het kwadrant 180-270 zijn de meeste metingen verricht. Daarbinnen zijn de intervallen 210-225 en 225-240 de grootste verzamelingen met data. Het windrichtingsinterval 210-225 komt overeen met aanstroming loodrecht op de achterzijde van de collector. Het interval 225-240 is een ietwat schuine aanstroming. Op basis van ervaring met eerdere projecten, en blijktens internationale literatuur, valt te verwachten dat hiermee de ongunstigste situaties voor de meetopstelling worden afgedekt. Derhalve zal de uiteindelijke analyse uitgaan van de metingen in deze twee intervallen.

De collector is zo geplaatst op het dak dat de gemeten waarden kunnen worden gebruikt als vergelijking met de windtunnelresultaten voor de randzone van het dakvlak. Er is geen dakrand aanwezig, en de volle-schaal metingen zijn uitsluitend voor een open onderconstructie uitgevoerd.

4.3.1 *Verificatie verschildrukcoëfficiënten over gehele collector*

De metingen van de verschildrukken aan boven- en onderkant zijn gecombineerd tot totale verschildrukken over de hele collector. Deze metingen zijn geanalyseerd op de wijze zoals bij het windtunnelonderzoek is beschreven. Per windrichtingsinterval van 15 graden zijn ontwerpwaarden voor de verschildrukken bepaald. Deze zijn gekoppeld aan de duur van de belasting. Zo zal een gemeten extreem met een frequentie van 10 Hz (vlaagduur 0,1 seconde) een minder groot oppervlak treffen dan een extreem met een frequentie van 1 Hz (vlaagduur 1,0 seconde). Voor de belasting op de collector als geheel is uitgegaan van een vlaagduur van 1,0 seconde. Vervolgens zijn de metingen ook gemiddeld over het oppervlak; immers op 6 locaties zijn verschildrukcoëfficiënten bepaald. Daarvan bleek 1 locatie om meettechnische redenen geen geschikte data op te leveren.

De collector staat op de locatie in de randzone van het gebouw. De resultaten moeten daarom vergeleken worden met de resultaten uit het windtunnelonderzoek voor de randzone.

De locale vormfactoren zijn in bijlage F uitgewerkt voor de drukmetingen. Op basis van deze metingen worden verschildrukfactoren, voor toepassing met de bouwvoorschriften, gevonden voor uplift van $-1,4$ en voor de neerwaartse belasting van $+0,5$, voor de ongunstigste windrichtingen.

Geconcludeerd is dat op basis van de ware grootte metingen er geen reden is om de resultaten zoals die uit het windtunnelonderzoek volgen, te veranderen.

4.3.2 *Drukverschillen over onderdelen van de collector*

Doelstelling van de volle schaalmeting is mede om te komen tot aanbevelingen met betrekking tot de in rekening te brengen windbelasting op de verschillende lagen in de collector. Om hierover conclusies te trekken is de verhouding bepaald tussen de ontwerpwaarden voor de gemeten verschildrukken over de onderste en bovenste laag van de collector en de ontwerpwaarde voor de totale verschildruk over de gehele collector. Dit is voor elk van de vier bruikbare locaties uitgevoerd. Deelresultaten zijn in bijlage F gegeven.

Het blijkt dat de verhouding tussen zowel bovenlaag en totale collector voor wat betreft de extremen in de belasting voor alle posities in de orde van 1 ligt. Voor de onderlaag (isolatielaag), van de collector kan een waarde voor de drukvereffeningscoëfficiënt van 0,4 worden gehanteerd. Dit wijst erop dat de totale belasting in elk geval in zijn geheel door de glasplaat en bijbehorende constructie moet worden opgevangen. De isolatielaag zal minder hoge belastingen te verwerken krijgen.

4.4 **Toepassing voor de berekening**

Voor de berekening van de ballast of de constructie van systemen die op een plat dak zijn opgesteld zijn twee gevallen maatgevend: kantelen of schuiven. Voor beide gevallen (open en gesloten onderconstructie) geldt dat de opwaartse belasting op de panelen zorgt voor de maatgevende belasting. Bij gesloten constructies geldt dat ook de belasting op de verticale delen van belang is. Doorgaans is overdruk op de hoogste zijde, in combinatie met de opwaartse belasting aan bovenzijde maatgevend. In sommige gevallen kan het zinvol zijn de combinatie van grote zuiging op de hoogste zijde met overdruk aan de bovenkant te beschouwen. Dit zal het geval kunnen zijn als de ballast niet gelijkmatig verdeeld is, of als de horizontale component maatgevend is.

Indien voor een gegeven product, dat los wordt geplaatst, de ballast bepaald moet worden, zal uitgegaan moeten worden van de ongunstigste situatie. Dit betreft de plaatsing in de hoekzone op een dak zonder dakrand.

Indien een constructie met meerdere panelen wordt ontworpen, kan daarin expliciet worden gerekend op de voordelen die door de afscherpende werking wordt verkregen.

4.5 Vergelijking met NEN 6702

In het inventarisatierapport is aangegeven welke figuren en getallen uit NEN 6702 zouden kunnen worden toegepast ten behoeve van de berekening van zonne-energiesystemen. Uit de metingen blijkt dat de gevonden waarden in beperkte mate overeenkomen met de waarden die uit NEN 6702 volgen. In NEN 6702 is voor een eenzijdig hellende overkapping, die onder 30 graden staat een C_t waarde gelijk aan -1.8 gegeven voor de opwaartse component en + 1.2 voor de neerwaartse belasting. Deze waarden blijken goed overeen te komen met de C_t waarden voor zonne-energiesystemen geplaatst in de hoekzone van het dak, met een open constructie.

Indien de systemen in een andere dan de hoekzone geplaatst worden, of indien een dakrand wordt toegepast, zijn de in rekening te brengen waarden gunstiger.

De zone-indeling van het platte dak blijkt van minder belang dan het effect van eventuele afscherming van de zonne-energiesystemen. Het systeem dat het dichtst bij een dakrand is gesitueerd krijgt ongeveer 50% meer windbelasting te verwerken dan het systeem dat erachter, in de luwte, is geplaatst. Deze getallen zijn niet te vergelijken met NEN 6702, die geen specifieke informatie voor dergelijke situaties bevat.

4.6 Conclusie

Op basis van een uitgebreid windtunnelonderzoek is het mogelijk gebleken ontwerpwaarden voor de vormfactoren voor zonne-energiesystemen geplaatst op platte daken vast te stellen. Binnen de gestelde randvoorwaarden zijn deze waarden direct voor de ontwerpers van dergelijke systemen en hun constructies toepasbaar.

Uit een verificatiemeting op volle schaal is geen aanwijzing gevonden dat de windtunnelresultaten aangepast hoeven te worden. Voor de verdeling van de belasting over de onderdelen in de collector (met name de glasplaat en het ondervlak), blijkt dat de extreme waarden voor de belasting over de glasplaat in orde grootte gelijk is aan de totale verschilbelasting.

Voor de windbelasting op de onderlaag in de collector geldt dat een drukvereffeningsfactor van 0,4 in rekening gebracht mag worden.

5 Invloed van oriëntatie op de windbelasting

De metingen die in hoofdstuk 3 werden gepresenteerd zijn geanalyseerd met behulp van een windstatistiek die geen rekening houdt met de windrichtingsafhankelijkheid. De zonne-energiesystemen kunnen in elke willekeurige oriëntatie worden geplaatst. In werkelijkheid zullen de systemen met de lage kant naar het zuiden en de hoge kant naar het noorden worden geplaatst. Dit betekent dat het geoorloofd zou zijn om expliciet met dit effect rekening te houden.

In NEN 6702 is geen expliciete mogelijkheid gegeven voor de introductie van een dergelijke reductie. Conform de betrouwbaarheidsuitgangspunten van NEN 6700 is het wel mogelijk een expliciete beoordeling uit te voeren.

Om dit nader te beschouwen is voor een deel van de metingen een extra analyse uitgevoerd, waarbij de windstatistiek van Den Helder is gebruikt, maar nu inclusief het effect van de windrichting op de windstatistiek. Hierbij is ervan uitgegaan dat de hoge zijden van de systemen precies op het noorden georiënteerd staan. Er mag ervan uitgegaan worden dat de conclusies die hieronder worden getrokken van toepassing zijn op die situaties, met een marge van 15 graden in beide richtingen.

De vergelijkende resultaten zijn in bijlage G weergegeven.

Op basis van die resultaten een reductie op de windbelasting worden toegestaan voor zonne-energie-elementen die zodanig zijn georiënteerd, dat de hoge zijde naar het noorden wijst en de lage zijde naar het zuiden, met een maximale afwijking van 15 graden linksom en rechtsom. Deze reductie wordt in de vorm van een vermenigvuldigingsfactor in tabel 6 gegeven:

Tabel 6: Vermenigvuldigingsfactor voor systemen die precies op het zuiden zijn georiënteerd.

Zone dak, conform NEN 6702, figuur 28	Dakrand ≤ 100 mm	Dakrand ≥ 200 mm
Hoekzone (c), situatie I	0.5	0.5
Hoekzone , situatie II	0.8	0.8
Randzone (r), situatie I	0.7	0.7
Randzone (r), situatie II	0.5	0.5
Randzone (r), situatie III	0.8	0.8
Middenzone (t)	0.8	0.8
Middenzone (t), situatie IV	0.6	0.6

Voor de opwaartse belasting geldt in elk geval een minimale waarde van +0.2, daar is geen extra reductie op geoorloofd.

Bovenstaande tabellen zijn geldig voor toepassing in het Nederlandse windklimaat, of in een windklimaat met een vergelijkbare windroos. Toepassing in België, Engeland, Noord-Duitsland en Denemarken zal naar verwachting geoorloofd zijn. Voor andere landen dienen de specifieke eigenschappen van het windklimaat in beschouwing te worden genomen.

Op basis van de metingen op ware grootte wordt geadviseerd geen drukvereffening in rekening te brengen voor de windbelasting op de glasplaat van de collector. Voor de onderste, flexibele, laag worden een drukvereffeningscoëfficiënt van 0,4 geadviseerd.

Voor systemen die meer dan 15 graden zijn verdraaid, is een individuele beoordeling mogelijk. Dit zal per geval afzonderlijk nagegaan moeten worden.

6 Referenties

- [1] TNO MEP; profielen in de atmosferische grenslaagtunnel
- [2] TNO Bouwrapport B90-483: Achtergronden van de windbelasting in NEN 6702; TGB Belastingen en vervormingen

7 Conclusies

Op basis van de windtunnelmetingen op verschillende configuraties van platdakopstellingen voor zonne-energiesystemen worden onderstaande conclusies getrokken.

Op basis van een uitgebreid windtunnelonderzoek is het mogelijk gebleken ontwerpwaarden voor de vormfactoren voor zonne-energiesystemen geplaatst op platte daken vast te stellen. Binnen de gestelde randvoorwaarden zijn deze waarden direct voor de ontwerpers van dergelijke systemen en hun constructies toepasbaar.

Volle schaal metingen bevestigen de conclusies uit het windtunnelonderzoek.

De lagen binnen een zonnecollector kunnen op een verschillende windbelasting worden berekend. De glasplaat dient op 100% van de windbelasting te worden doorgerekend. Voor de onderste, flexibele, laag mag een reductiefactor van 0,4 in rekening worden gebracht.

De invloed van de oriëntatie van het zonne-energiesysteem kan voor het Nederlandse windklimaat in rekening worden gebracht door een vermenigvuldigingsfactor toe te passen op de ontwerp-druk. Dit kan tot 50% reductie opleveren voor systemen in de hoekzone van het gebouw.

De resultaten zijn gebonden aan duidelijke randvoorwaarden. Voor systemen die buiten deze randvoorwaarden vallen kunnen individuele beoordelingen worden uitgevoerd, die conform de methoden en technieken in dit rapport worden opgezet.

8 Aanbevelingen

In de hoofdstukken 3 en 4 zijn tabellen gegeven die de ontwerper van de draagconstructie van zonne-energiesystemen geplaatst op een plat dak toe kan passen voor de berekening van de windbelasting. Aanbevolen wordt deze tabellen op te nemen in NVN 7250, of anderszins in de bouwregelgeving op te nemen.

Voor systemen die buiten de gestelde randvoorwaarden vallen is het mogelijk op basis van de in het gepresenteerde onderzoek gehanteerde modellen en technieken, een advies op maat te bepalen. Dit betreft bijvoorbeeld systemen met bijzondere vormen en afmetingen, of situaties, waarbij de omgevingsbebouwing invloed uit kan oefenen op de te hanteren waarden. Voor dergelijke specifieke situaties kunnen windtunnelmetingen worden opgezet en uitgevoerd.

TNO Bouw
Afdeling Bouwsystemen

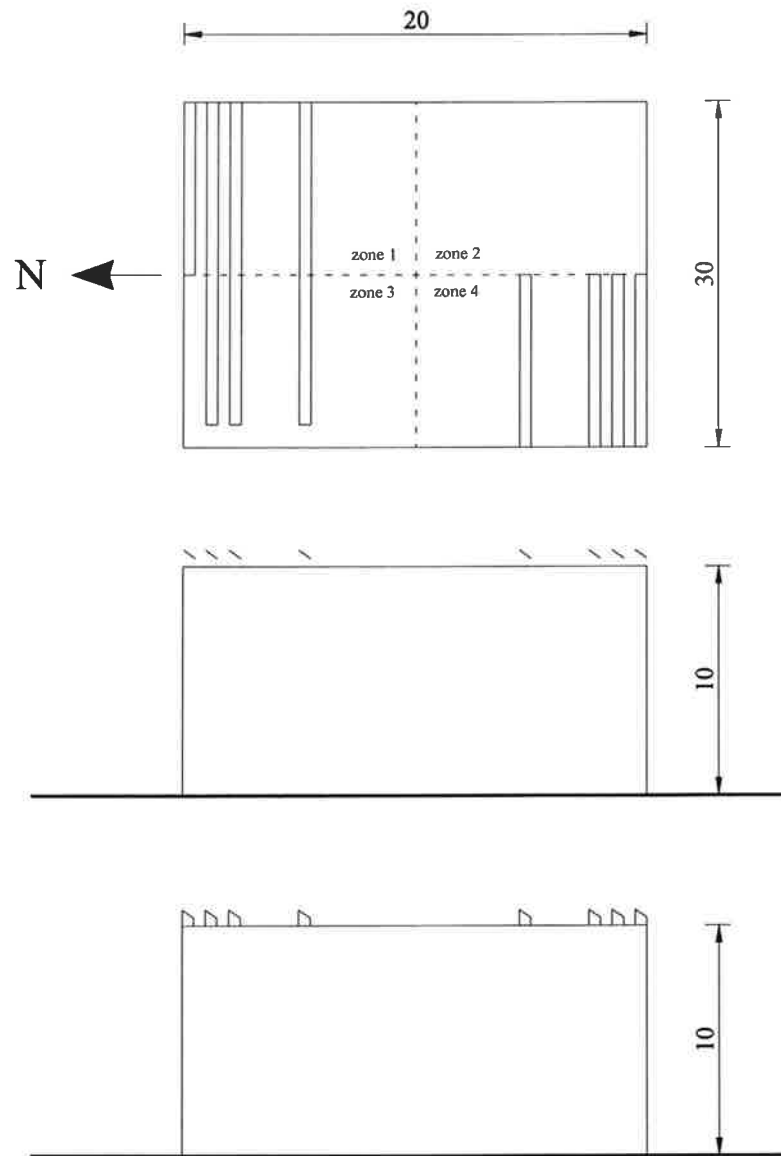


Dr.ir. C.P.W. Geurts

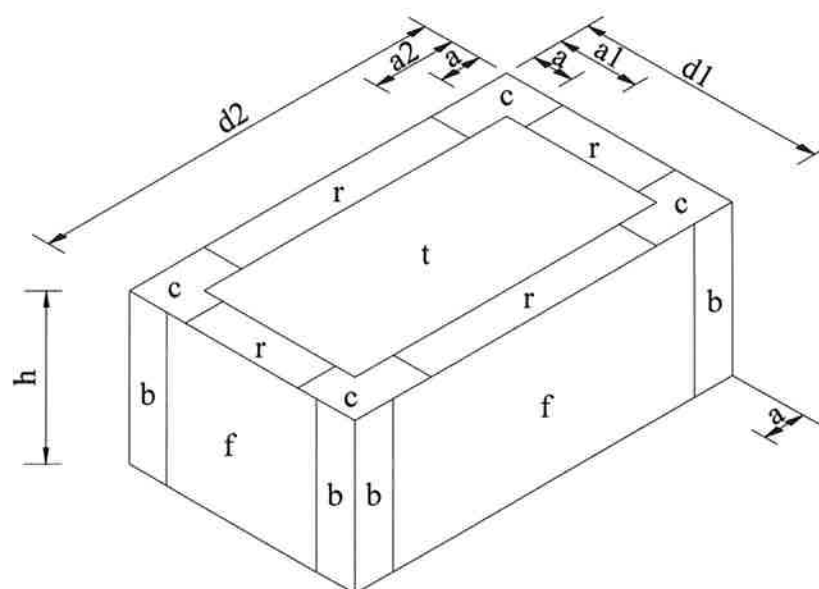


Ir. G.J.P. Ravenshorst

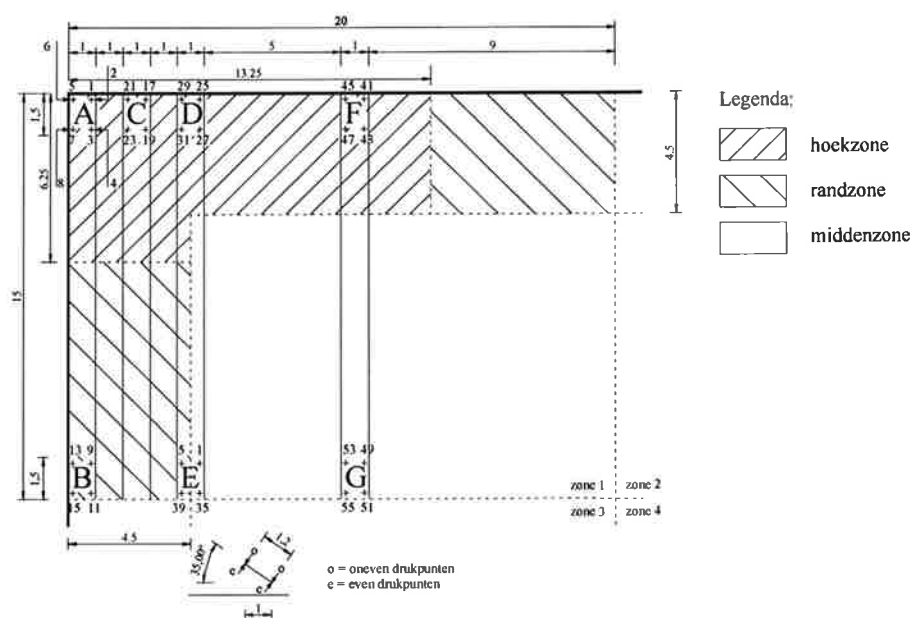
A Tekeningen van het windtunnelmodel



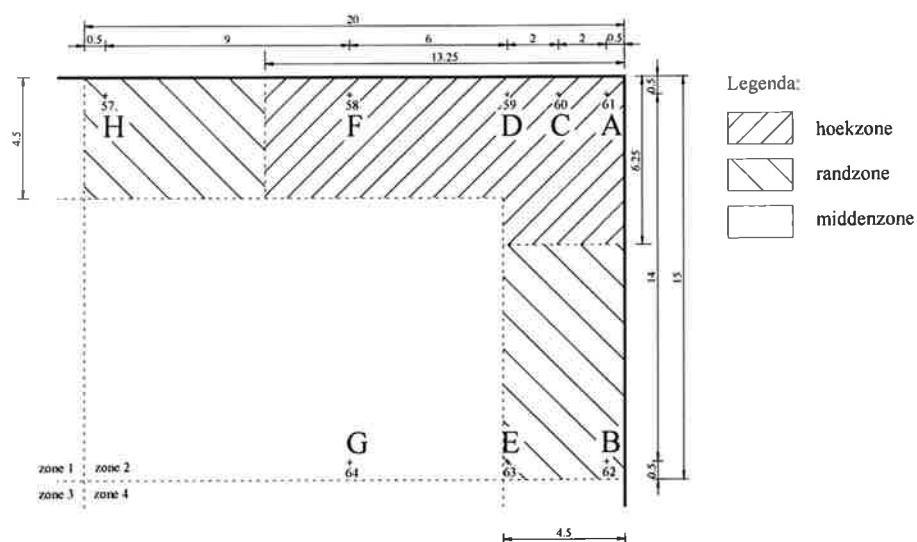
Figuur A.1: Lay out van het windtunnelmodel: boven: plan van het dakvlak, met aanduiding van zone-indeling en keuze voor de Noordpijl; midden en onder: aanzicht van de lange zijde, met (midden) open onderconstructie en (onder) dichte onderconstructie



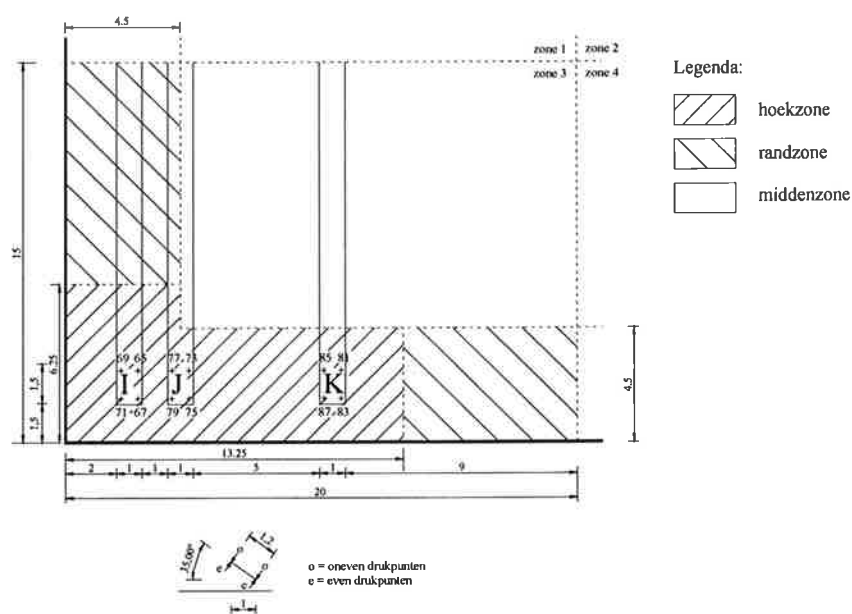
Figuur A.2: Zone-indeling conform NEN 6702, figuur 28



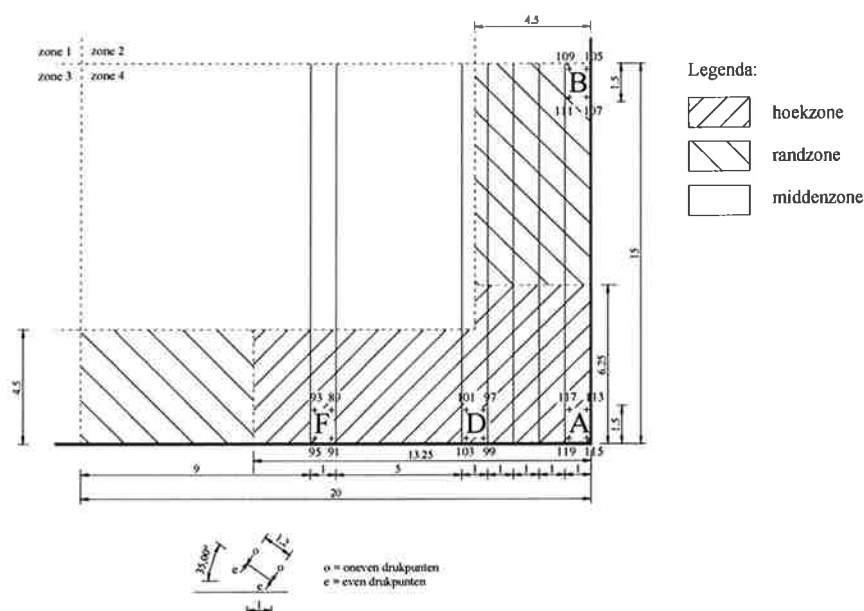
Figuur A.3: Definitie van de drukkpuntnummering voor configuraties met open constructie, zone 1; let op: definitie van even drukkpunten is conform definitie in meetpunt A.



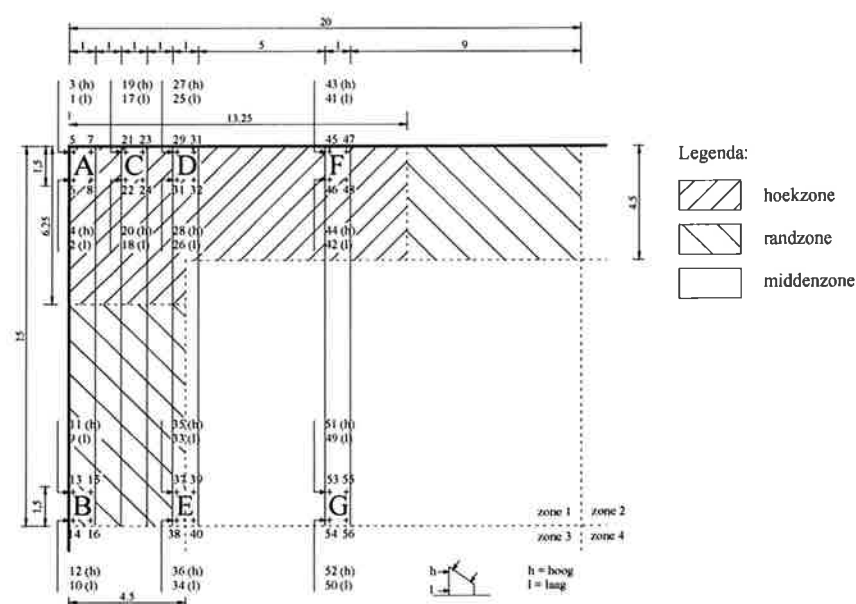
Figuur A.4: Definitie van de drukpuntnummering voor configuraties met open constructie, zone 2; zonder zonne-energiesystemen



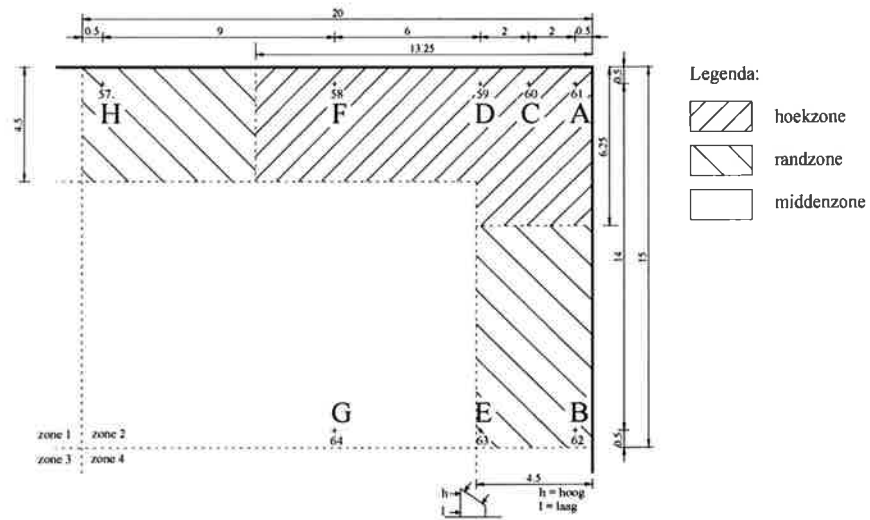
Figuur A.5: Definitie van de drukpuntnummering voor configuraties met open constructie, zone 3; let op: definitie van even drukpunten is conform definitie in meetpunt A in figuur A.3.



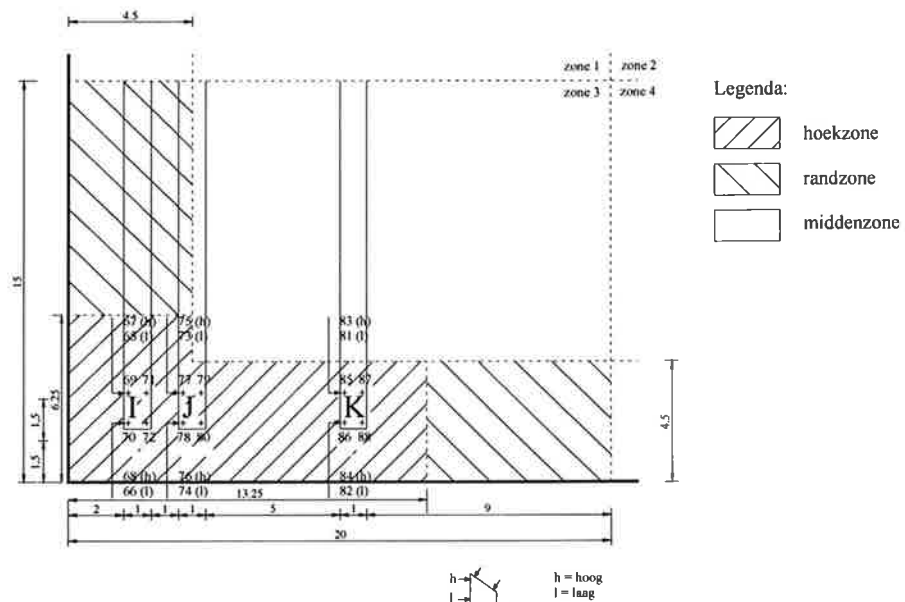
Figuur A.6: Definitie van de drukpuntnummering voor configuraties met open constructie, zone 4; let op: definitie van even drukpunten is conform definitie in meetpunt A in figuur A.3.



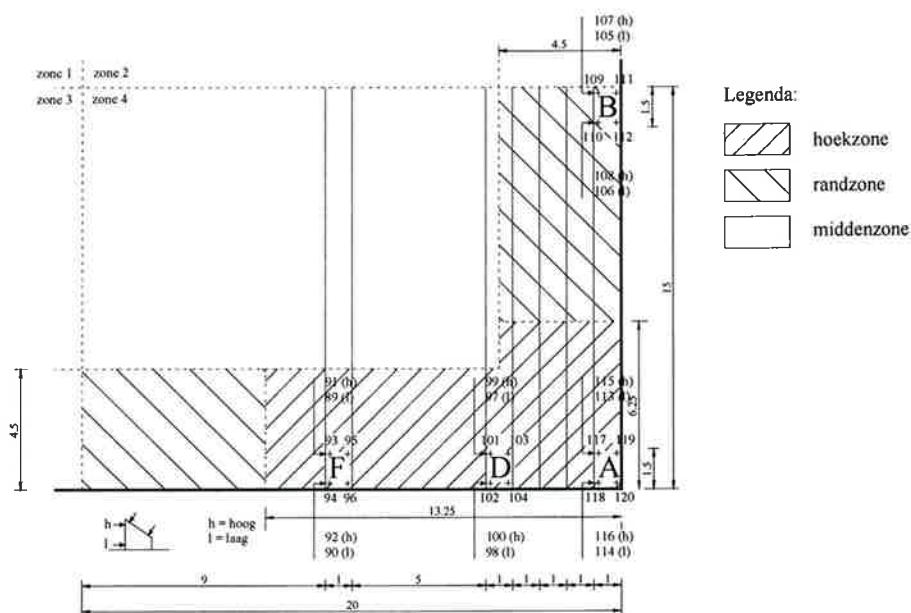
Figuur A.7: Definitie van de drukpuntnummering voor configuraties met dichte constructie, zone 1.



Figuur A.8: Definitie van de drukpuntnummering voor configuraties met dichte constructie, zone 2; geen zonne-energiesystemen.



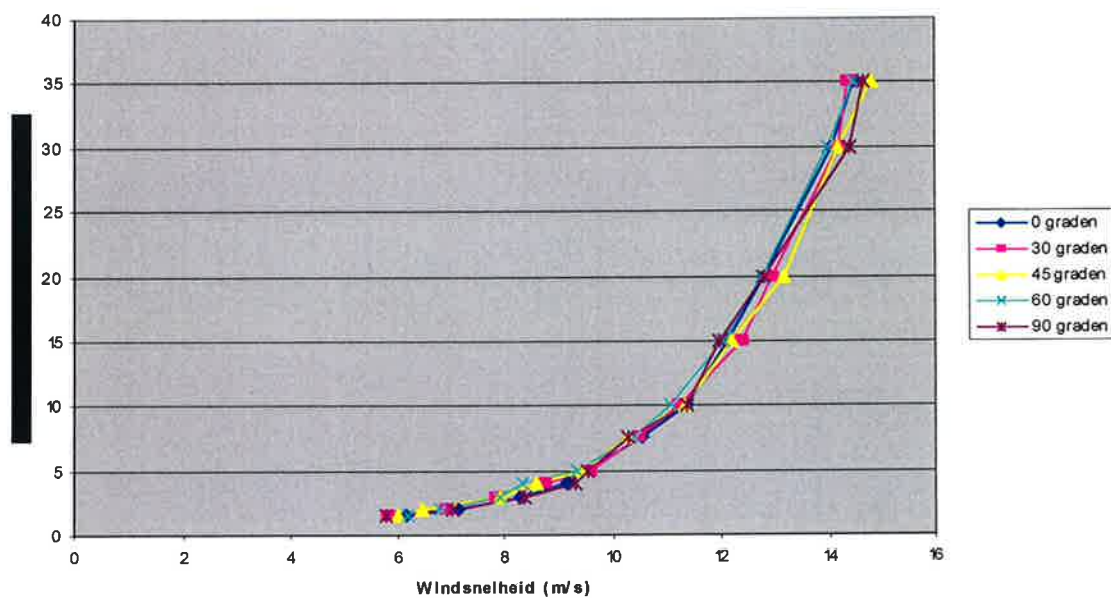
Figuur A.9: Definitie van de drukpuntnummering voor configuraties met dichte constructie, zone 3.



Figuur A.10: Definitie van de drukpuntnummering voor configuraties met dichte constructie, zone 4.

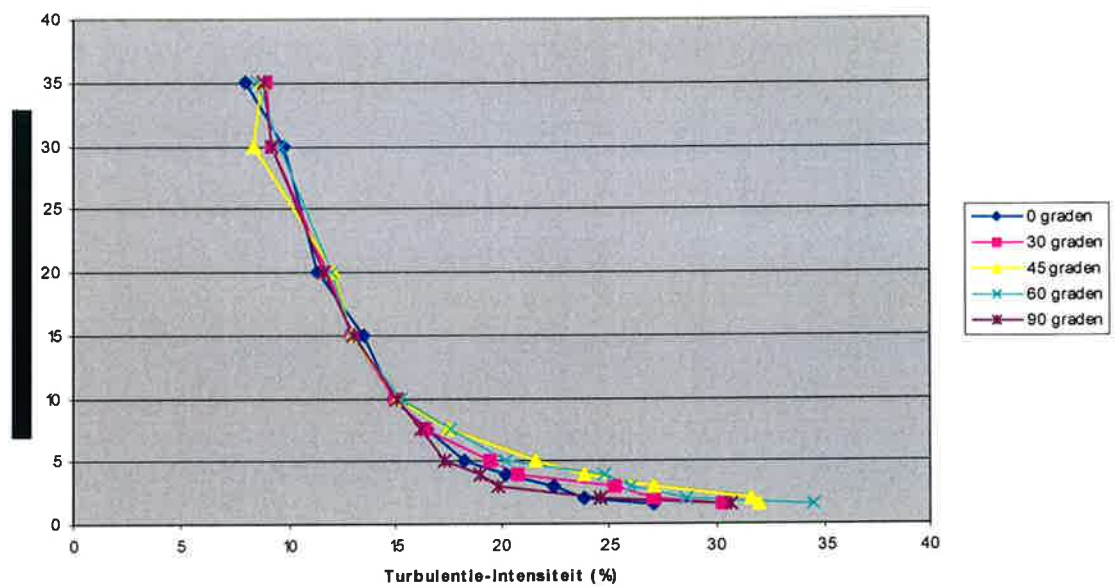
Profielen in de windtunnel:

Gemiddeld Profiel, hart draaischijf bij verschillende draairichtingen



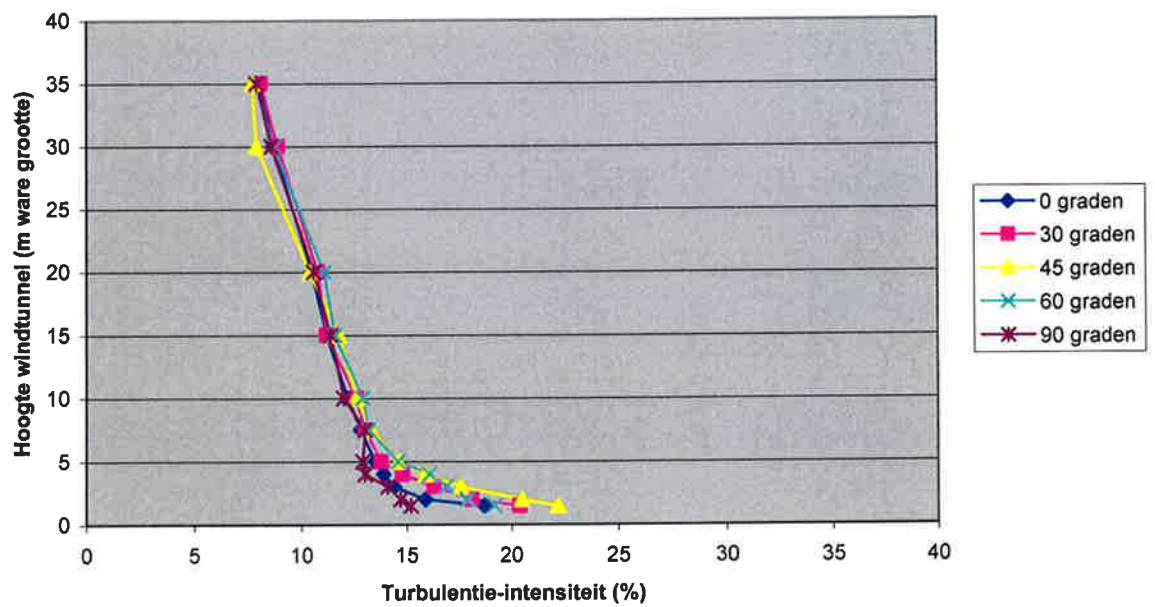
Figuur A.11: Profiel van de gemiddelde windsnelheid, opgeschaald naar afmetingen op ware grootte.

Turbulentie-intensiteit I_u , hart draaischijf bij verschillende draairichtingen



Figuur A.12: Profiel van de turbulentie-intensiteit I_u , opgeschaald naar afmetingen op ware grootte

Turbulentie-intensiteit I_w , hart draaischijf bij verschillende draairichtingen



Figuur A.13: Turbulentie-intensiteit I_w , opgeschaald naar afmetingen op ware grootte

B Foto's gemaakt tijdens de windtunnelmeting

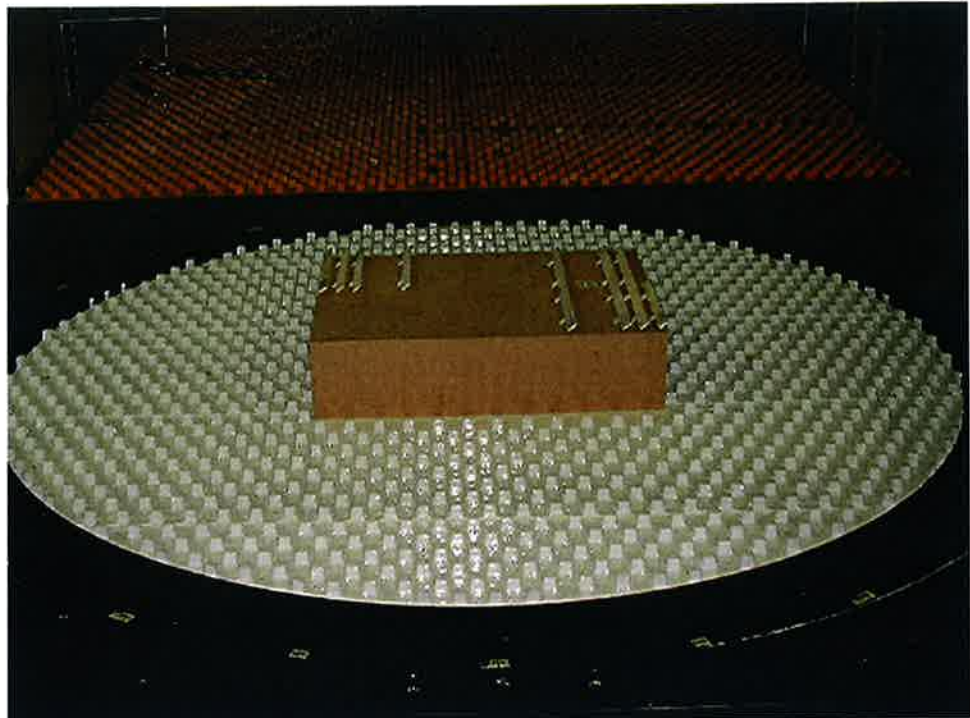


Foto B.1: Model op draaischijf in de windtunnel; open constructie

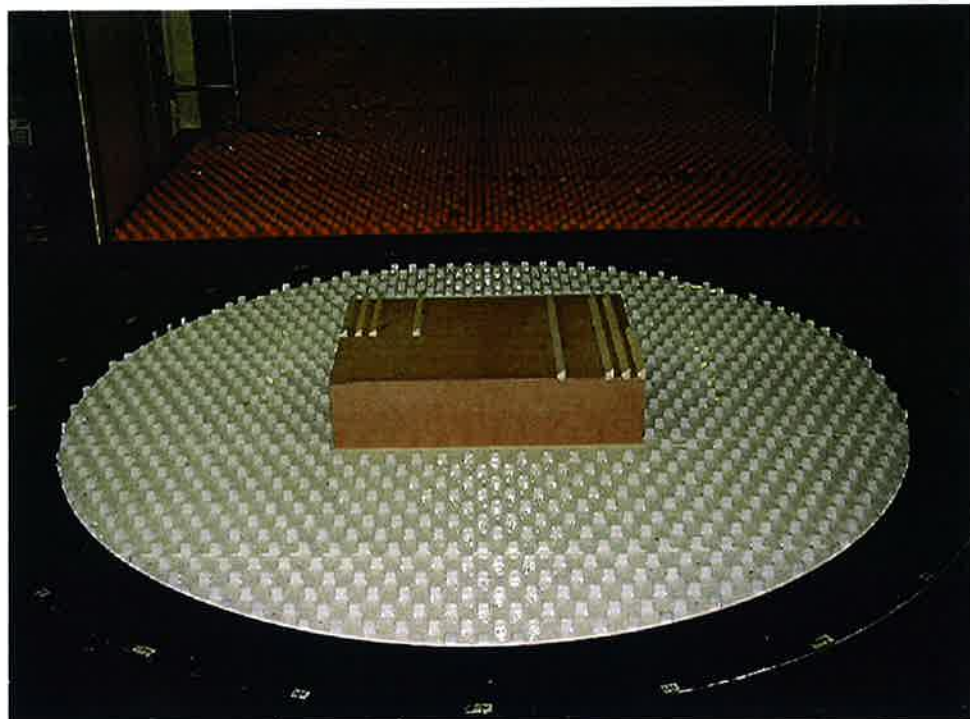


Foto B.2: Model op draaischijf in de windtunnel; dichte constructie

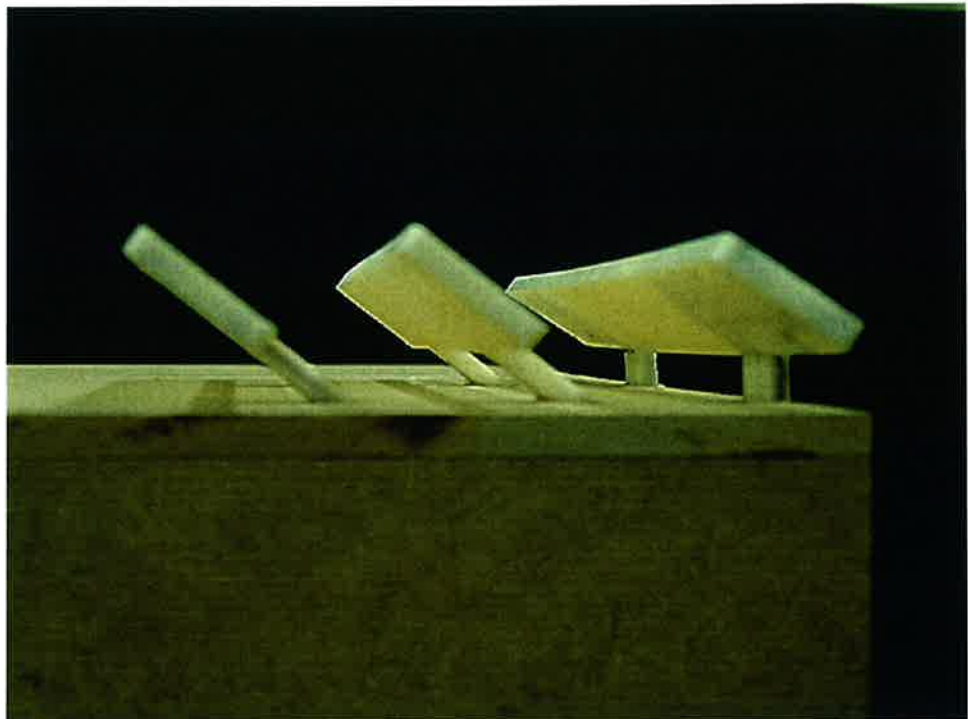


Foto B.3: Detail van model; zone 4, bij hoek van het gebouw.

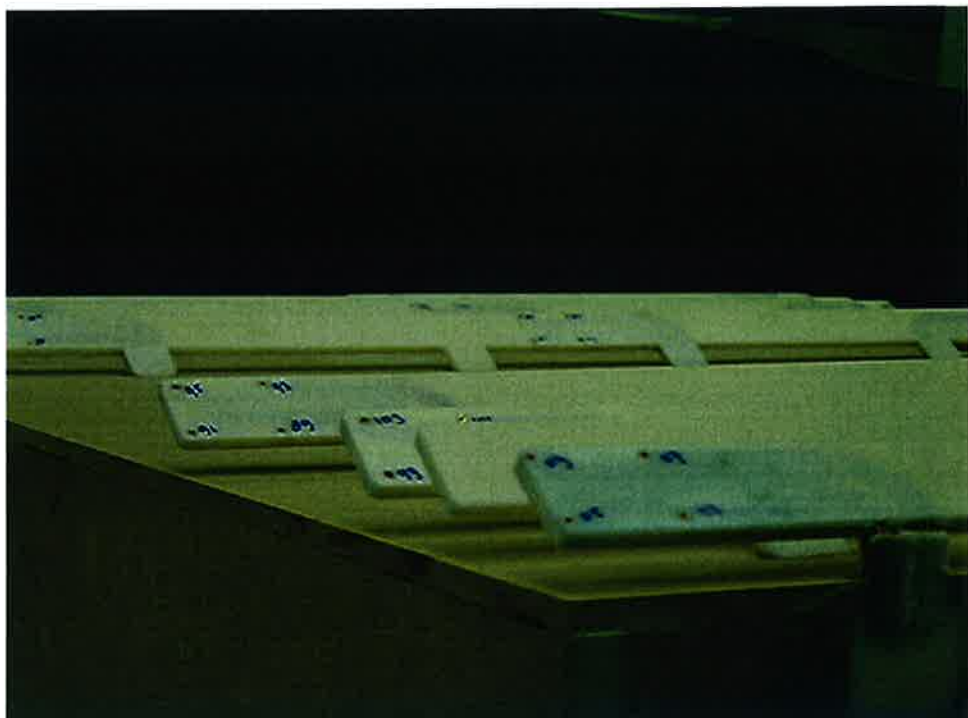


Foto B.4: Detail van model; zone 4.

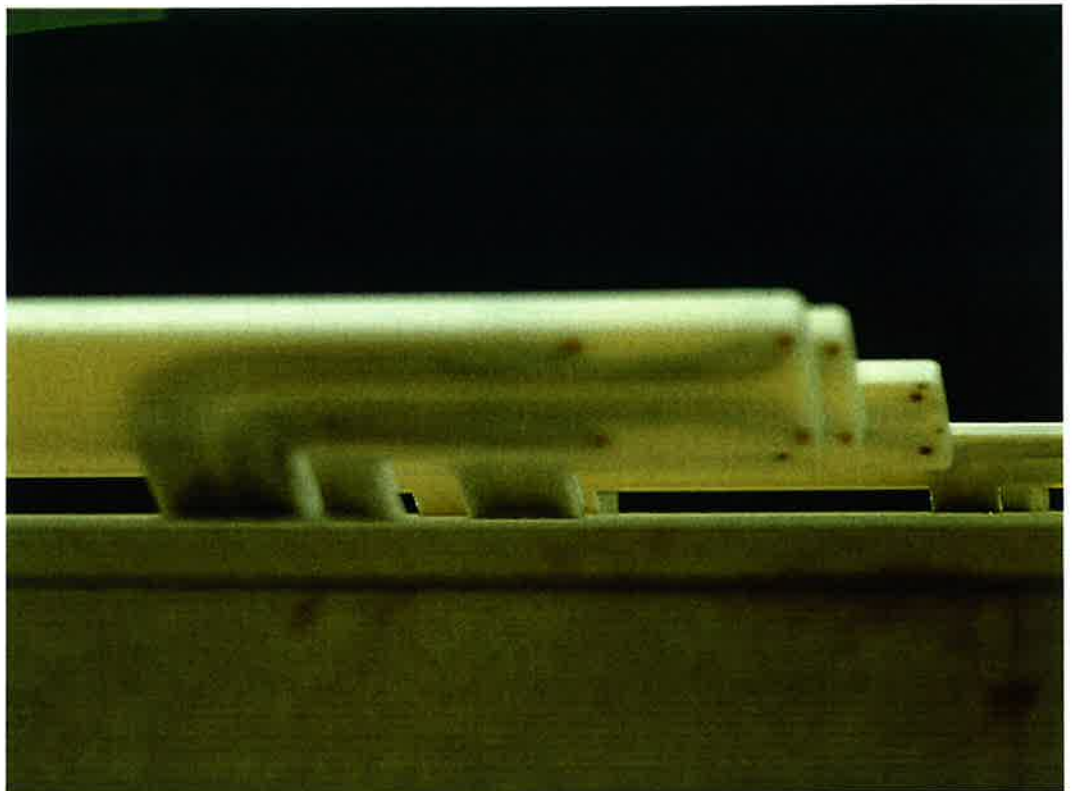


Foto B.5: Detail van model; zone 1

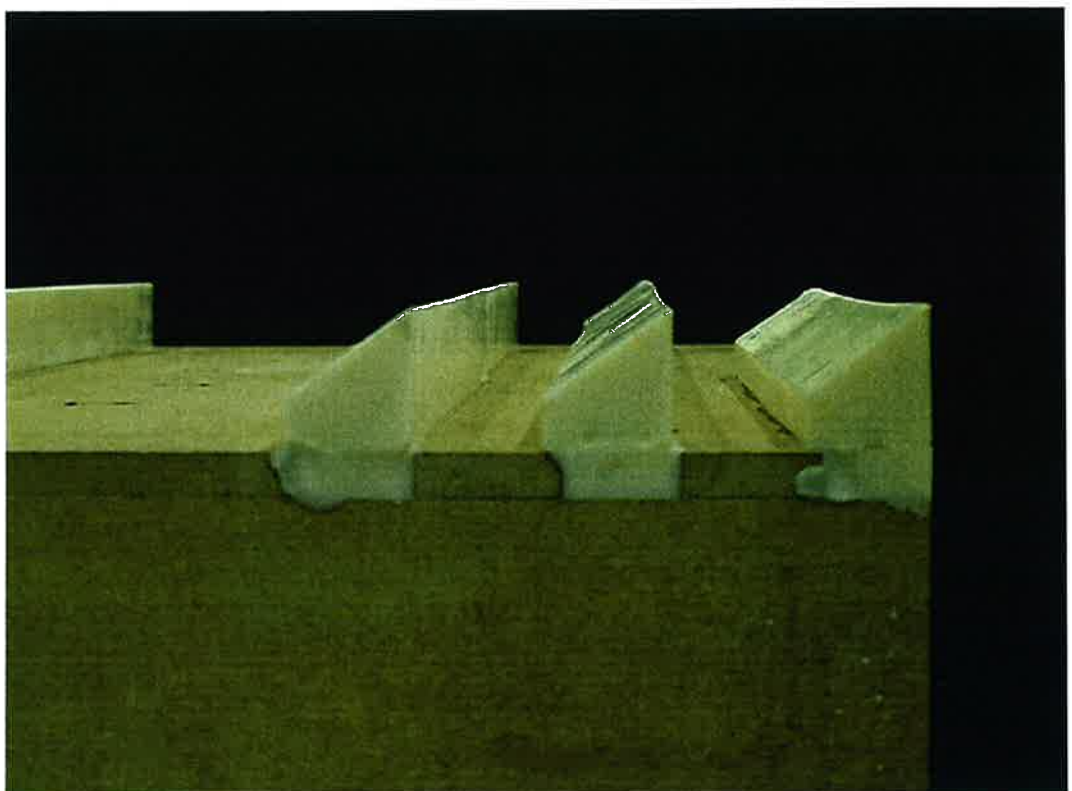


Foto B.6: Detail van het model, dichte constructie, zone 4

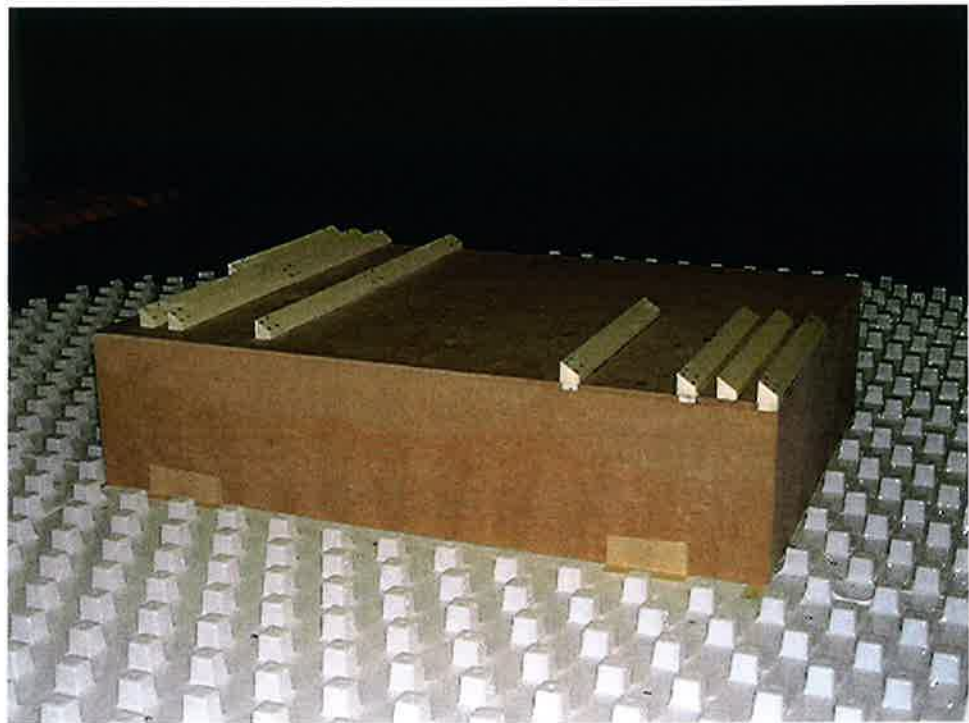


Foto B.7: Aanzicht van het model met dichte constructies



Foto B.8: Model voorzien van een dakrand; open constructie.

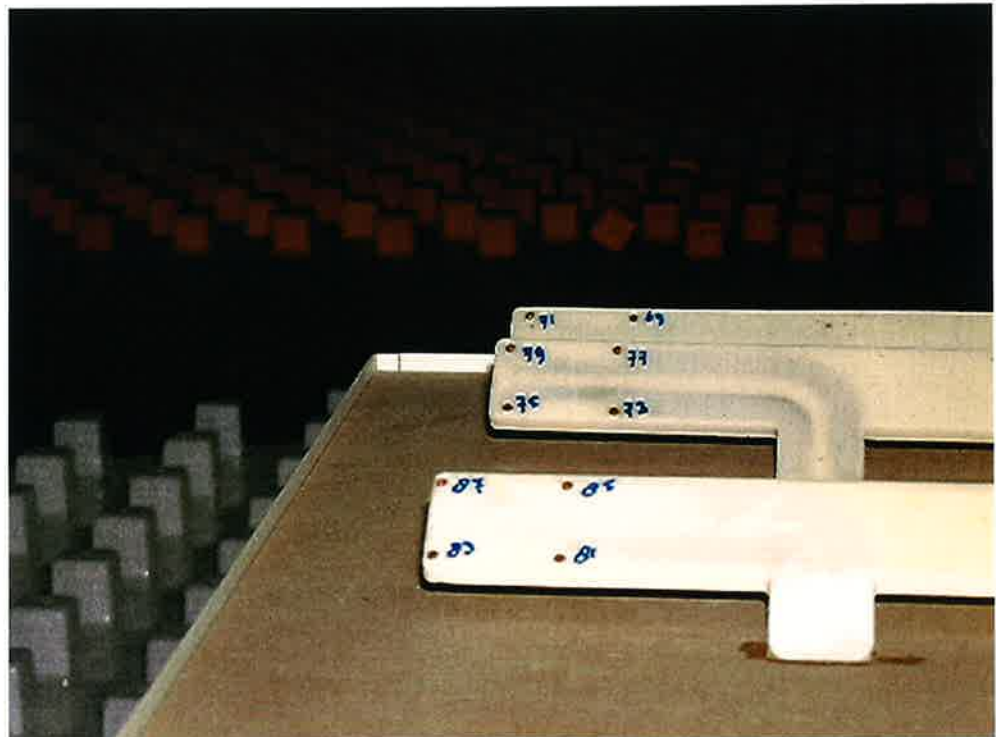


Foto B.9: Detail van model met dakrand.

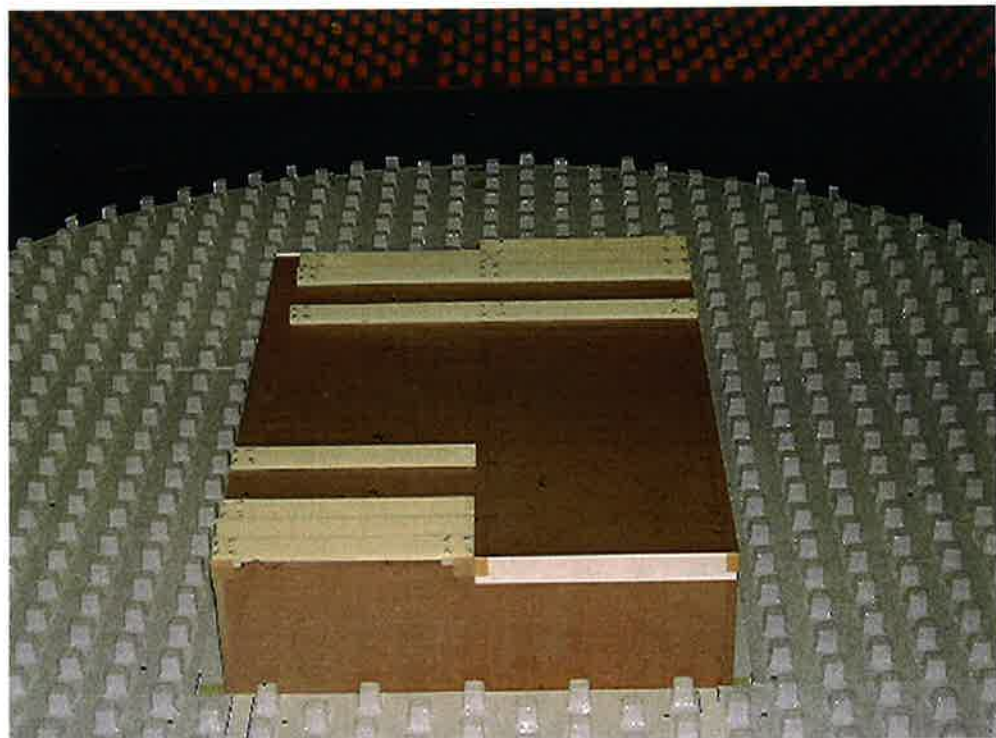


Foto B.10: Bovenaanzicht model met dakrand; dichte constructie.

C Foto's van de volle-schaal meting



Foto C.1: Collector op het platte dak



Foto C.2: Collector op het platte dak, zicht op onderkant



Foto C.3: Overzicht van meetmast en zonnecollector



Foto C.4: Blik in oostelijke richting, foto gemaakt tijdens meetcampagne



Foto C.5: Detailopname opstelplaats drukmeters bovenzijde



Foto C.6: Aanzicht van het gebouw vanuit oosten, met opstelplaats collector en mast.



Foto C.7: Blik op het zuiden vanaf opstelpunt. Foto gemaakt ruim voor de meting; tijdens de meting waren de bomen zonder blad



Foto C.8: Blik op het oosten; foto gemaakt voor start meetcampagne (vergelijk foto B.4)



Foto C.9: Blik naar het westen vanaf meetlocatie



Foto C.10: Het plaatsen van het meetsysteem op het dak.

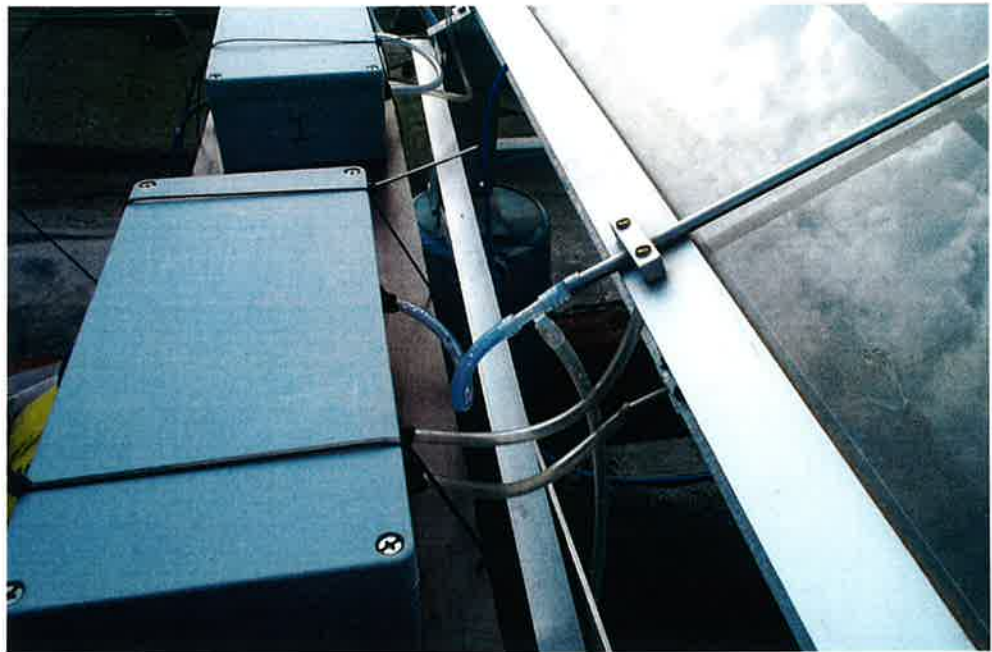


Foto C.11: Detailopname opstelplaats drukmeters aan lage zijde



Foto C.12: Aanzicht collector met drukmeetpunten op glasplaat.

D Windtunnelmetingen: tussenresultaten voor open onderconstructies

In deze bijlage worden per gemeten kanaal de relevante tussenresultaten gegeven.

D.1: Ct factoren meetpositie A: Hoekzone

Kanaal	Geen dakrand		Wel dakrand	
	Negatief	Positief	Negatief	Positief
1	-1.82	0.45	-1.59	0.47
2	-0.91	0.33	-0.77	0.17
3	-1.02	0.14	-0.98	0.11
4	-0.77	0.30	-0.73	0.19
5	-1.96	0.28	-1.89	0.27
6	-0.83	0.85	-0.84	0.81
7	-2.01	0.21	-2.12	0.31
8	-0.55	0.87	-0.70	0.93
61 (plat dak)	-1.90	0.04	-2.06	0.26
113	-0.90	0.38	-1.13	0.30
114	-1.61	0.12	-1.49	0.18
115	-1.21	0.46	-1.46	0.40
116	-1.71	0.29	-1.51	0.18
117	-0.78	0.02	-0.76	0.06
118	-0.96	0.12	-0.98	0.12
119	-1.07	0.13	-1.04	0.02
120	-1.10	0.62	-1.37	0.54
Combinatie 1	-1.73	0.53	-1.42	0.41
Combinatie 2	-0.88	1.16	-0.62	1.03

Combinatie 1: nieuw tijdssignaal: 1 tot en met 8 gecombineerd

Combinatie 2: nieuw tijdssignaal: 113 tot en met 120 gecombineerd.

D.2: Ct factoren meetpositie Positie B; Randzone, situaties I en II

Kanaal	Geen dakrand		Wel dakrand	
	Negatief	Positief	Negatief	Positief
9	-0.97	0.04	-0.91	0.12
10	-0.51	0.24	-0.71	0.13
11	-2.12	0.06	-1.48	0.15
12	-0.70	0.12	-0.89	0.14
13	-1.11	0.21	-0.91	0.29
14	-0.64	0.86	-0.76	0.85
15	-1.40	0.26	-1.31	0.26
16	-0.70	0.86	-0.85	0.83
62 (plat dak)	-1.42	0.09	-0.82	0.23
105	-1.47	0.31	-1.05	0.16
106	-1.57	0.12	-0.77	0.29
107	-1.19	0.24	-0.91	0.17
108	-1.24	0.12	-0.64	0.26
109	-1.69	0.02	-1.20	0.00
110	-0.99	0.43	-0.77	0.53
111	-0.95	0.05	-0.71	0.02
112	-0.85	0.23	-0.65	0.30
Combinatie 1 (I)	-1.62	0.47	-0.88	0.35
Combinatie 2 (II)	-1.02	0.86	-0.90	0.45

Combinatie 1: nieuw tijdssignaal: 9 tot en met 16 gecombineerd

Combinatie 2: nieuw tijdssignaal: 105 tot en met 112 gecombineerd.

D.3: Positie C; hoekzone, situatie III

Kanaal	Geen dakrand		Wel dakrand	
	Negatief	Positief	Negatief	Positief
17	-1.54	0.36	-1.60	0.39
18	-1.51	0.48	-1.31	0.24
19	-0.85	0.06	-0.82	0.11
20	-0.84	0.26	-0.77	0.24
21	-1.45	0.40	-1.17	0.39
22	-0.95	0.81	-1.07	0.75
23	-0.95	0.16	-0.85	0.27
24	-0.81	0.30	-0.85	0.23
60 (plat dak)	-2.28	0.06	-1.94	0.26
Combinatie 1	-1.17	0.66	-0.84	0.51

Combinatie 1: nieuw tijdssignaal: 17 tot en met 24 gecombineerd

D.4: Positie D; hoekzone, Situatie III

Kanaal	Geen dakrand		Wel dakrand	
	Negatief	Positief	Negatief	Positief
25	-1.92	0.53	-2.10	0.53
26	-1.11	0.24	-0.82	0.16
27	-1.02	0.51	-1.00	0.52
28	-0.88	0.22	-0.84	0.15
29	-1.78	0.10	-1.53	0.20
30	-0.95	0.73	-0.93	0.73
31	-1.30	0.18	-1.10	0.25
32	-0.78	0.26	-0.72	0.13
59 (plat dak)	-1.42	0.07	-1.33	0.22
97	-0.95	0.08	-0.85	0.09
98	-1.57	0.16	-1.03	0.15
99	-1.55	0.33	-1.54	0.39
100	-2.14	0.51	-1.96	0.23
101	-1.36	0.12	-0.90	0.26
102	-0.88	0.45	-0.88	0.28
103	-1.52	0.21	-1.10	0.27
104	-1.63	0.79	-1.36	0.79
Combinatie 1	-1.19	0.67	-0.91	0.58
Combinatie 2	-1.08	1.44	-0.78	1.17

Combinatie 1: nieuw tijdssignaal: 25 tot en met 32 gecombineerd

Combinatie 2: nieuw tijdssignaal: 97 tot en met 104 gecombineerd.

D.5: Positie E, Middenzone, situatie IV

Kanaal	Geen dakrand		Wel dakrand	
	Negatief	Positief	Negatief	Positief
33	-0.62	0.32	-0.69	0.37
34	-0.47	0.11	-0.59	0.12
35	-0.69	0.35	-0.81	0.36
36	-0.40	0.13	-0.57	0.13
37	-0.77	0.18	-0.74	0.28
38	-0.61	0.06	-0.66	0.13
39	-0.61	0.16	-0.67	0.20
40	-0.48	0.07	-0.62	0.12
63 (plat dak)	-0.63	0.10	-0.66	0.14
Combinatie 1	-0.41	0.44	-0.29	0.40

Combinatie 1: nieuw tijdssignaal: 33 tot en met 40 gecombineerd

D.6: Positie F, hoekzone, situatie III

Kanaal	Geen dakrand		Wel dakrand	
	Negatief	Positief	Negatief	Positief
41	-1.97	0.47	-2.22	0.42
42	-0.95	0.25	-0.94	0.26
43	-1.27	0.63	-1.24	0.70
44	-1.02	0.19	-1.02	0.22
45	-2.58	0.11	-2.95	0.16
46	-1.10	0.67	-0.87	0.52
47	-1.63	0.16	-1.48	0.18
48	-0.86	0.54	-0.90	0.48
58 (plat dak)	-1.03	0.08	-1.02	0.26
89	-1.06	0.64	-0.98	0.76
90	-1.12	0.16	-0.88	0.18
91	-1.77	0.58	-1.66	0.65
92	-1.80	0.46	-1.48	0.16
93	-1.49	0.24	-0.98	0.29
94	-0.91	0.65	-0.82	0.63
95	-1.83	0.23	-1.47	0.30
96	-1.20	0.80	-1.15	0.66
combinatie 1	-1.32	0.76	-1.03	0.65
combinatie 2	-1.32	1.17	-0.77	1.13

Combinatie 1: nieuw tijdssignaal: 41 tot en met 48 gecombineerd

Combinatie 2: nieuw tijdssignaal: 89 tot en met 96 gecombineerd.

D.7: Positie G, middenzone, situatie IV

Kanaal	Geen dakrand		Wel dakrand	
	Negatief	Positief	Negatief	Positief
49	-0.46	0.56	-0.58	0.61
50	-0.45	0.09	-0.62	0.16
51	-0.49	0.49	-0.61	0.55
52	-0.48	0.13	-0.58	0.18
53	-0.66	0.11	-0.64	0.15
54	-0.57	0.18	-0.60	0.27
55	-0.56	0.06	-0.65	0.15
56	-0.57	0.34	-0.59	0.34
64 (plat dak)	-0.36	0.13	-0.42	0.10
Combinatie 1	-0.51	0.57	-0.53	0.59

Combinatie 1: nieuw tijdssignaal: 49 tot en met 56 gecombineerd

D.8: Positie H, Randzone

Kanaal	Geen dakrand		Wel dakrand	
	Negatief	Positief	Negatief	Positief
57 (plat dak)	-1.10	0.07	-1.01	0.21

D.9: Positie A, hoekzone, geen afscherming

Kanaal	Geen dakrand		Wel dakrand	
	Negatief	Positief	Negatief	Positief
65	-0.81	0.06		0.10
66	-0.77	0.25	-0.81	0.27
67	-2.00	0.44	-1.62	0.43
68	-1.67	0.18	-1.04	0.17
69	-1.24	0.19	-1.41	0.18
70	-0.77	0.48	-1.27	0.37
71	-1.85	0.19	-2.20	0.23
72	-1.91	0.60	-1.83	0.46
Combinatie 1	-1.40	0.86	-1.11	0.65

Combinatie 1: nieuw tijdssignaal: 65 tot en met 72 gecombineerd

D.10: Positie J, hoekzone, situatie IV

Kanaal	Geen dakrand		Wel dakrand	
	Negatief	Positief	Negatief	Positief
73	-0.93	0.56	-0.88	0.49
74	-0.73	0.23	-0.72	0.25
75	-1.50	0.57	-1.18	0.62
76	-1.17	0.08	-0.95	0.08
77	-1.52	0.22	-1.56	0.17
78	-0.88	0.34	-1.38	0.32
79	-2.29	0.17	-2.32	0.19
80	-2.19	0.60	-2.00	0.59
Combinatie 1	-1.25	0.83	-0.88	0.49

Combinatie 1: nieuw tijdssignaal: 73 tot en met 80 gecombineerd

D.11: Positie K, hoekzone, situatie IV

Kanaal	Geen dakrand		Wel dakrand	
	Negatief	Positief	Negatief	Positief
81	-1.07	0.58	-0.94	0.60
82	-0.79	0.26	-0.76	0.31
83	-1.65	0.49	-1.35	0.44
84	-0.93	0.20	-0.84	0.26
85	-1.69	0.07	-1.44	0.07
86	-0.90	0.61	-0.84	0.74
87	-3.35	0.09	-2.41	0.11
88	-0.96	0.54	-1.00	0.65
Combinatie 1	-1.63	0.77	-1.17	0.65

Combinatie 1: nieuw tijdssignaal: 81 tot en met 88 gecombineerd

E Windtunnelmeting: tussenresultaten voor gesloten onderconstructies

In deze bijlage worden per gemeten kanaal de relevante tussenresultaten gegeven. Aangegeven

E.1: Ct factoren meetpositie A: Hoekzone

Kanaal	Geen dakrand		Wel dakrand	
	Negatief	Positief	Negatief	Positief
1	-0.91	0.77	-0.74	0.77
2	-0.74	0.80	-0.65	0.78
3	-1.01	0.56	-0.77	0.62
4	-0.65	0.54	-0.68	0.52
5	-2.34	0.28	-2.28	0.31
6	-2.16	0.38	-2.25	0.35
7	-1.99	0.38	-2.22	0.33
8	-1.80	0.20	-1.69	0.32
61 (plat dak)	-2.54	0.04	-2.30	0.24
113	-0.95	0.32	-0.91	0.22
114	-1.47	0.39	-1.58	0.25
115	-1.69	0.35	-1.69	0.35
116	-1.56	0.60	-1.30	0.61
117	-0.78	0.01	-0.86	0.02
118	-1.05	0.02	-1.10	0.01
119	-0.99	0.14	-0.99	0.26
120	-1.27	0.34	-1.67	0.30
Combinatie 1; verticaal	-0.69	0.63	-0.64	0.59
Combinatie 1; bovenvlak	-1.57	0.24	-1.69	0.24
Combinatie 2; verticaal	-1.17	0.30	-1.18	0.29
Combinatie 2; bovenvlak	-0.78	0.06	-0.92	0.08

Combinatie 1: nieuw tijdssignaal: 1 tot en met 8 gecombineerd

Combinatie 2: nieuw tijdssignaal: 113 tot en met 120 gecombineerd.

E.2: Ct factoren meetpositie Positie B; Randzone, situaties I en II

Kanaal	Geen dakrand		Wel dakrand	
	Negatief	Positief	Negatief	Positief
9	-0.54	0.69	-0.58	0.72
10	-0.72	0.75	-0.74	0.69
11	-0.57	0.35	-0.69	0.36
12	-0.81	0.50	-1.07	0.45
13	-1.37	0.20	-1.00	0.20
14	-1.58	0.28	-1.49	0.30
15	-1.55	0.07	-1.16	0.09
16	-2.32	0.08	-2.01	0.11
62 (plat dak)	-1.27	0.36	-0.94	0.33
105	-1.09	0.38	-0.75	0.35
106	-0.79	0.36	-0.74	0.32
107	-1.10	0.66	-0.85	0.64
108	-0.81	0.51	-0.74	0.56
109	-0.85	0.02	-0.97	0.03
110	-0.69	0.07	-0.75	0.06
111	-1.32	0.07	-1.35	0.12
112	-1.22	0.09	-1.12	0.10
Combinatie 1;verticaal	-0.59	0.47	-0.65	0.46
Combinatie 1; bovenvlak	-1.57	0.07	-1.40	0.13
Combinatie 2;verticaal	-0.82	0.37	-0.75	0.41
Combinatie 2; bovenvlak	-0.85	0.02	-0.83	0.03

Combinatie 1: nieuw tijdssignaal: 9 tot en met 16 gecombineerd

Combinatie 2: nieuw tijdssignaal: 105 tot en met 112 gecombineerd.

E.3: Positie C; hoekzone, situatie III

Kanaal	Geen dakrand		Wel dakrand	
	Negatief	Positief	Negatief	Positief
17	-1.68	0.36	-1.72	0.26
18	-0.94	0.24	-1.11	0.31
19	-0.90	0.52	-1.06	0.51
20	-1.17	0.28	-1.38	0.25
21	-0.99	0.23	-1.12	0.22
22	-0.93	0.25	-1.05	0.24
23	-1.50	0.25	-1.16	0.20
24	-0.87	0.05	-1.04	0.08
60 (plat dak)	-2.22	0.06	-2.09	0.16
Combinatie 1;verticaal	-0.90	0.26	-0.98	0.22
Combinatie 1; bovenvlak	-0.91	0.11	-1.02	0.08

Combinatie 1: nieuw tijdssignaal: 17 tot en met 24 gecombineerd

E.4: Positie D; hoekzone, Situatie III

Kanaal	Geen dakrand		Wel dakrand	
	Negatief	Positief	Negatief	Positief
25	-0.92	0.39	-1.04	0.39
26	-0.76	0.35	-0.78	0.37
27	-0.92	0.67	-0.84	0.73
28	-0.77	0.46	-0.86	0.52
29	-1.10	0.18	-1.03	0.21
30	-0.87	0.20	-0.85	0.22
31	-1.59	0.41	-1.30	0.37
32	-0.97	0.48	-0.95	0.58
59 (plat dak)	-1.38	0.05	-1.28	0.18
97	-1.01	0.51	-0.97	0.56
98	-1.23	0.67	-0.98	0.43
99	-1.04	0.61	-0.91	0.60
100	-1.21	0.79	-0.94	0.71
101	-1.13	0.24	-1.01	0.20
102	-1.08	0.17	-0.94	0.13
103	-1.05	0.26	-0.96	0.27
104	-1.76	0.42	-1.64	0.42
Combinatie 1;verticaal	-0.78	0.43	-0.83	0.44
Combinatie 1; bovenvlak	-0.99	0.22	-1.00	0.26
Combinatie 2;verticaal	-0.95	0.53	-0.87	0.53
Combinatie 2; bovenvlak	-1.06	0.10	-0.99	0.12

Combinatie 1: nieuw tijdssignaal: 25 tot en met 32 gecombineerd

Combinatie 2: nieuw tijdssignaal: 97 tot en met 104 gecombineerd.

E.5: Positie E, Middenzone, situatie IV

Kanaal	Geen dakrand		Wel dakrand	
	Negatief	Positief	Negatief	Positief
33	-0.68	0.16	-0.69	0.15
34	-0.74	0.11	-0.74	0.12
35	-0.90	0.14	-0.96	0.13
36	-0.83	0.13	-0.83	0.08
37	-0.75	0.25	-0.73	0.22
38	-0.78	0.19	-0.77	0.18
39	-0.80	0.30	-0.82	0.31
40	-0.82	0.28	-0.83	0.33
63 (plat dak)	-0.68	0.29	-0.63	0.31
Combinatie 1;verticaal	-0.76	0.13	-0.77	0.10
Combinatie 1; bovenvlak	-0.77	0.19	-0.76	0.21

Combinatie 1: nieuw tijdssignaal: 33 tot en met 40 gecombineerd

E.6: Positie F, hoekzone, situatie III

Kanaal	Geen dakrand		Wel dakrand	
	Negatief	Positief	Negatief	Positief
41	-1.37	0.68	-1.12	0.48
42	-0.95	0.50	-0.91	0.51
43	-1.30	0.75	-0.88	0.67
44	-1.10	0.62	-0.85	0.59
45	-1.62	0.09	-1.46	0.10
46	-1.36	0.12	-1.27	0.09
47	-1.62	0.29	-1.52	0.29
48	-1.28	0.39	-1.15	0.39
58 (plat dak)	-1.11	0.09	-0.98	0.20
89	-1.21	0.45	-1.04	0.51
90	-1.22	0.59	-1.06	0.44
91	-1.06	0.52	-0.97	0.60
92	-1.09	0.68	-0.88	0.59
93	-0.90	0.22	-0.90	0.25
94	-1.16	0.21	-1.00	0.17
95	-1.00	0.44	-0.96	0.50
96	-1.75	0.41	-1.26	0.42
Combinatie 1;verticaal	-1.10	0.54	-0.80	0.51
Combinatie 1; bovensvlak	-1.35	0.18	-1.22	0.14
Combinatie 2;verticaal	-1.04	0.46	-0.87	0.51
Combinatie 2; bovensvlak	-1.12	0.26	-0.95	0.28

Combinatie 1: nieuw tijdssignaal: 41 tot en met 48 gecombineerd

Combinatie 2: nieuw tijdssignaal: 89 tot en met 96 gecombineerd.

E.7: Positie G, middenzone, situatie IV

Kanaal	Geen dakrand		Wel dakrand	
	Negatief	Positief	Negatief	Positief
49	-0.45	0.39	-0.40	0.32
50	-0.51	0.35	-0.48	0.32
51	-0.57	0.41	-0.59	0.33
52	-0.65	0.44	-0.63	0.36
53	-0.69	0.07	-0.65	0.10
54	-0.56	0.15	-0.54	0.14
55	-0.57	0.37	-0.60	0.40
56	-0.47	0.36	-0.53	0.41
64 (plat dak)	-0.49	0.24	-0.50	0.30
Combinatie 1;verticaal	-0.50	0.32	-0.49	0.31
Combinatie 1; bovensvlak	-0.50	0.22	-0.47	0.21

Combinatie 1: nieuw tijdssignaal: 49 tot en met 56 gecombineerd

E.8: Positie H, Randzone

Kanaal	Geen dakrand		Wel dakrand	
	Negatief	Positief	Negatief	Positief
57 (plat dak)	-1.10	0.11	-0.90	0.19

E.9: Positie A, hoekzone, geen afscherming

Kanaal	Geen dakrand		Wel dakrand	
	Negatief	Positief	Negatief	Positief
65	-0.71	0.41	-0.86	0.33
66	-0.90	0.79	-1.04	0.72
67	-0.72	0.50	-0.94	0.50
68	-0.89	0.82	-0.92	0.77
69	-1.48	0.31	-1.73	0.24
70	-1.50	0.29	-1.66	0.27
71	-1.19	0.13	-1.12	0.07
72	-1.15	0.39	-1.09	0.38
Combinatie 1; verticaal	-0.72	0.54	-0.83	0.48
Combinatie 1; bovensvlak	-1.06	0.17	-1.08	0.15

Combinatie 1: nieuw tijdssignaal: 65 tot en met 72 gecombineerd

E.10: Positie J, hoekzone, situatie IV

Kanaal	Geen dakrand		Wel dakrand	
	Negatief	Positief	Negatief	Positief
73	-0.71	0.27	-0.71	0.32
74	-0.87	0.72	-0.79	0.69
75	-0.80	0.40	-0.74	0.45
76	-0.91	0.71	-0.97	0.75
77	-1.29	0.22	-1.45	0.21
78	-2.22	0.18	-2.01	0.17
79	-0.90	0.47	-0.96	0.51
80	-1.31	0.37	-1.05	0.36
Combinatie 1; verticaal	-0.77	0.42	-0.74	0.52
Combinatie 1; bovensvlak	-1.24	0.22	-1.09	0.27

Combinatie 1: nieuw tijdssignaal: 73 tot en met 80 gecombineerd

E.11: Positie K, hoekzone, situatie IV

Kanaal	Geen dakrand		Wel dakrand	
	Negatief	Positief	Negatief	Positief
81	-0.86	0.73	-0.82	0.64
82	-1.22	0.83	-0.90	0.75
83	-0.93	0.58	-0.88	0.66
84	-1.19	0.85	-0.95	0.88
85	-1.22	0.11	-1.00	0.09
86	-1.91	0.14	-1.40	0.20
87	-1.23	0.42	-1.13	0.37
88	-1.17	0.36	-1.10	0.36
Combinatie 1; verticaal	-0.98	0.68	-0.84	0.71
Combinatie 1; bovensvlak	-1.20	0.22	-1.04	0.17

Combinatie 1: nieuw tijdssignaal: 81 tot en met 88 gecombineerd

F Tussenresultaten volle schaal metingen

Inleiding

In deze bijlage zijn tussenresultaten opgenomen uit de volle schaal metingen. De resultaten betreffen representatieve waarden voor de locale vormfactor, gebaseerd op de drukmetingen. De resultaten uit de krachtmetingen zijn niet gepresenteerd, omdat bleek dat te veel data uit de range van de opnemer liepen, waardoor een goede extremenanalyse niet mogelijk was.

Voor de drukmetingen zijn in totaal 12 kanalen gebruikt, die ieder direct het verschil tussen de buitenzijde en de binnenkant van de collector hebben gemeten. Daarnaast zijn telkens twee kanalen gekoppeld en is door het van elkaar aftrekken van de meetdata een nieuwe meetreeks gevormd. De kanalen 13 tot en met 18 zijn deze gecombineerde kanalen: Kanaal 1 en kanaal 7 van elkaar afgetrokken geeft kanaal 13, idem met kanaal 2 en 8 etcetera. Deze nieuwe tijdreeksen zijn afzonderlijk geanalyseerd als nieuwe metingen. Dit geeft direct resultaat voor de bepaling van de totale belasting op een collector.

F.1: Ruwe vormfactoren per windrichtingsinterval; maatgevende richtingen voor de collector op het dak.

Richting M'

Representatieve waarden

Bovenzijde collector			Onderzijde Collector			Totaal verschil		
Kanaal	Overdruk	Onderdruk	Kanaal	Overdruk	Onderdruk	Kanaal	Dowd = +	Up = -
1	0.77	-2.65	2	2.05	-0.74	13	1.05	-4.23
3	8.56	-0.05	4	2.03	-0.55	14	8.95	-1.76
5	0.18	-2.34	6	1.62	-0.99	15	0.33	-3.49
7	0.01	-2.7	8	0.52	-1.14	16	0.09	-2.55
9	-0.05	-3.61	10	0.67	-0.73	17	0.19	-3.74
11	-0.02	-4.27	12	0.8	-0.91	18	0.37	-4.9

Richting N

Representatieve waarden

Bovenzijde collector			Onderzijde Collector			Totaal verschil		
Kanaal	Overdruk	Onderdruk	Kanaal	Overdruk	Onderdruk	Kanaal	Dowd = +	Up = -
1	2.1	-1.46	2	2.14	-0.58	13	2.27	-3.1
3	4.09	0.99	4	2.24	-0.51	14	4.14	-1.08
5	3.48	-2	6	1.97	-0.75	15	3.54	-3.39
7	-0.05	-3.07	8	0.62	-0.97	16	0.1	-3.59
9	-0.07	-3.5	10	0.79	-0.62	17	0.09	-3.76
11	-0.01	-3.81	12	0.85	-0.84	18	0.16	-4.06

Richting O

Representatieve waarden

Bovenzijde collector			Onderzijde Collector			Totaal verschil		
Kanaal	Overdruk	Onderdruk	Kanaal	Overdruk	Onderdruk	Kanaal	Dowd = +	Up = -
1	1.6	-1.43	2	1.9	-0.73	13	1.68	-2.58
3	10.33	-0.34	4	2.21	-0.61	14	10.74	-2.05
5	0.86	-2.63	6	2.25	-0.63	15	1.06	-4.43
7	-0.01	-3.73	8	1	-0.78	16	0.32	-4.39
9	0.01	-4.2	10	0.78	-0.56	17	0.16	-4.44
11	0.1	-3.36	12	0.69	-0.99	18	0.16	-3.69

Richting P

Representatieve waarden

Bovenzijde collector			Onderzijde Collector			Totaal verschil		
Kanaal	Overdruk	Onderdruk	Kanaal	Overdruk	Onderdruk	Kanaal	Dowd = +	Up = -
1	1.94	-0.98	2	1.29	-0.64	13	2.07	-1.6
3	10.87	1.35	4	1.6	-0.58	14	11.08	0.16
5	1.82	-1.91	6	1.74	-0.68	15	1.9	-3.13
7	0	-3.18	8	0.74	-0.83	16	0.46	-3.65
9	0.03	-3.78	10	0.5	-0.52	17	0.19	-3.83
11	0.12	-2.53	12	0.38	-0.85	18	0.12	-2.35

positie	Richting M		Richting N		Richting O		Richting P	
	Bovenlaag	Onderlaag	Bovenlaag	Onderlaag	Bovenlaag	Onderlaag	Bovenlaag	Onderlaag
1	0.63	0.48	0.47	0.69	0.55	0.74	0.61	0.81
2	0.03	1.15	-0.92	2.07	0.17	1.08	8.44	-10.00
3	0.67	0.46	0.59	0.58	0.59	0.51	0.61	0.56
4	1.06	0.20	0.86	0.17	0.85	0.23	0.87	0.20
5	0.97	0.18	0.93	0.21	0.95	0.18	0.99	0.13
6	0.87	0.16	0.94	0.21	0.91	0.19	1.08	0.16

Drukvereffeningscoëfficiënten, afgeleid voor uplift van de collector

Omrekenfactor wind op mast versus
wind op dakhoogte

U(20) =	1.00
z0 =	0.20
d =	0.00
z =	20.00
u*	0.22
zdak	12.00
Udak	0.89
Iu	0.24
Cpdak = Fact * Cpmast	
P	1.00
Cpmast	0.63
Cpdak	0.79
Fact	1.27
CpNEN	0.2918
FactNEN	0.46688

G Invloed windrichtingsafhankelijkheid

G.1: Resultaten voor open collectoren, zonder dakrand

positie	kanaal	Met windrichting		Zonder windrichting		Verhouding	
		min	max	min	max	minima	maxima
A	121	-0.72	0.21	-1.73	0.53	0.42	0.39
A	134	-0.69	0.92	-0.88	1.16	0.78	0.79
B	122	-1.02	0.42	-1.62	0.47	0.63	0.88
B	133	-0.43	0.32	-1.02	0.86	0.43	0.37
C	123	-0.48	0.27	-1.17	0.66	0.41	0.40
D	124	-0.52	0.29	-1.19	0.67	0.44	0.43
D	132	-0.89	1.15	-1.08	1.44	0.82	0.79
E	125	-0.23	0.35	-0.41	0.44	0.57	0.79
F	126	-0.60	0.33	-1.32	0.76	0.46	0.43
F	131	-1.20	0.93	-1.32	1.17	0.91	0.80
G	127	-0.43	0.44	-0.51	0.57	0.86	0.77
I	128	-1.12	0.74	-1.40	0.86	0.80	0.86
J	129	-1.00	0.66	-1.25	0.83	0.80	0.79
K	130	-1.28	0.59	-1.63	0.77	0.79	0.77

G.2: resultaten voor open collectoren, met dakrand

positie	kanaal	Met windrichting		Zonder windrichting		Verhouding	
		min	max	min	max	minima	maxima
A	121	-0.59	0.18	-1.42	0.41	0.42	0.43
A	134	-0.56	0.82	-0.62	1.03	0.91	0.79
B	122	-0.70	0.31	-1.08	0.35	0.65	0.89
B	133	-0.41	0.19	-0.90	0.45	0.45	0.41
C	123	-0.35	0.19	-0.84	0.51	0.42	0.37
D	124	-0.41	0.25	-0.91	0.58	0.45	0.43
D	132	-0.66	0.93	-0.78	1.17	0.84	0.79
E	125	-0.21	0.33	-0.29	0.40	0.75	0.82
F	126	-0.46	0.29	-1.03	0.65	0.45	0.45
F	131	-0.71	0.89	-0.80	1.13	0.88	0.79
G	127	-0.42	0.41	-0.53	0.59	0.80	0.70
I	128	-0.89	0.51	-1.11	0.65	0.80	0.79
J	129	-1.06	0.62	-1.31	0.79	0.80	0.79
K	130	-0.93	0.50	-1.35	0.65	0.69	0.77