

TNO-rapport

2002-BS-R0048

**Windbelasting op zonnecollectoren en
zonnepanelen op plat-dak opstellingen:
Deelrapport: Nederlandse en Europese regelgeving**

Datum	10 april 2002
Auteurs	Dr.ir. C.P.W. Geurts
Exemplaarnummer	
Oplage	
Aantal pagina's	28
Aantal bijlagen	
Opdrachtgever	NOVEM contractnummer 143.620-932.9
Projectnaam	Zonnecollectoren plat –dak
Projectnummer	006/06678/01.02



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 bevat de stand van zaken voor wat betreft de berekening van zonne-energiesystemen die geplaatst zijn op een plat dak. Deze berekening wordt bepaald door de windbelasting die op dergelijke systemen werkt.

De systemen waar het om gaat 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.

Allereerst wordt in het algemeen ingegaan op de Nederlandse en Europese regelgeving. Er wordt ingegaan op de relevante parameters en er wordt aangegeven hoe voor de Europese landen gerekend wordt. Daarnaast wordt dieper ingegaan op de vormfactoren zoals deze voorkomen in de normbladen. Deze vormfactor is de grootste onbekende in de berekening, en deze is in de huidige generatie bouwvoorschriften ook niet expliciet opgenomen.

Op basis van veilige aannamen kan een keuze worden gemaakt, maar daarnaast wordt aanbevolen in de toekomst te rekenen met specifiek voor deze toepassingen afgeleide waarden. Deze worden in een ander deelrapport behorend tot dit project gepresenteerd.

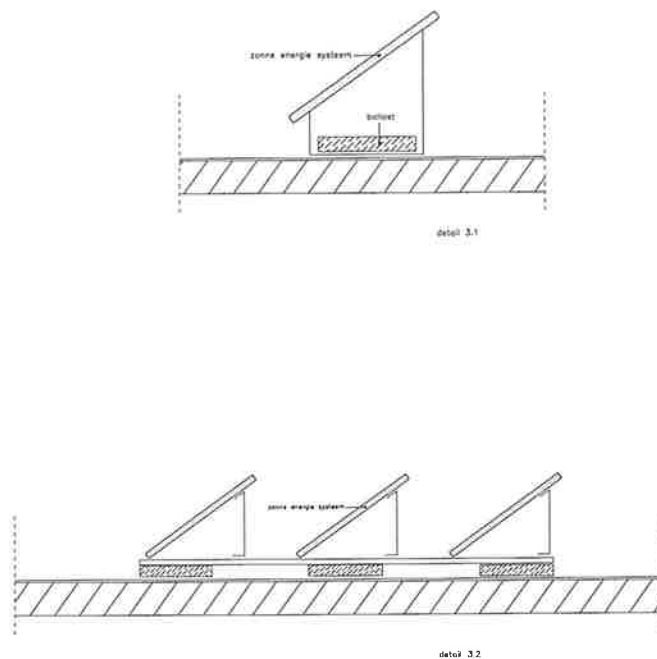
Tenslotte wordt in dit rapport specifiek ingegaan op de voor zonne-energiesystemen van belang zijnde parameters, die voor het berekenen van de windbelasting en windweerstand aan de orde zijn. Het principe van de berekeningsmethoden wordt uitgewerkt. Een onbekende parameter is momenteel de wrijvingscoëfficiënt die in rekening gebracht dient te worden om na te gaan of verschuiven van systemen een potentieel risico is. Aanbevolen wordt deze in nader onderzoek vast te stellen.

Inhoudsopgave

1	Inleiding — 4
2	De Nederlandse normbladen — 6
2.1	Algemeen — 6
2.2	Toepassingsgebied — 7
2.3	Berekening op windbelasting in NEN 6702 — 7
3	Eurocode — 11
3.1	Algemeen — 11
3.2	Toepassingsgebied — 11
3.3	Stand van zaken Eurocode 'Wind actions' — 12
3.4	Rekenmodel van de ENV 1991-2-4 — 13
3.5	Toepassing van NEN 6702 en ENV 1991-2-4 voor gebouw-onderdelen — 14
4	Verschillen per land — 15
4.1	Ontwerp windsnelheid — 15
4.2	Orografische effecten. — 16
4.3	Windrichtingsafhankelijkheid — 16
5	Vormfactoren — 18
6	Specifieke aspecten plat-dak opstellingen — 21
6.1	Inleiding — 21
6.2	Vormfactoren — 21
6.3	Windrichtingsafhankelijkheid — 22
6.4	Lokatie op het dak — 22
6.5	Relevante mechanismen — 22
6.5.1	Bezwijkmechanisme I: kantelen van het systeem — 23
6.5.2	Bezwijkmechanisme II: Verschuiven van het systeem. — 25
6.6	Bepaling van de ballast — 26
7	Conclusies — 27
8	Aanbevelingen — 28

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.



Figuur 1.1: Voorbeeld van plat-dak systemen, geplaatst op een plat dak.

Dit onderzoek is verdeeld in drie onderdelen, te weten:

1. een in-situ meting, op ware grootte, van de windbelasting op een collector, geplaatst op een frame;
2. een windtunnel studie, waarbij diverse parameters gevarieerd worden;
3. een inventarisatie van de gebruikte rekenmodellen binnen Europa, en de specifieke aspecten die voor de windbelasting op zonnecollectoren van belang kunnen zijn.

Dit rapport beschrijft het derde onderdeel, de inventarisatie van de rekenmodellen.

Allereerst wordt ingegaan op de Nederlandse regelgeving. Dit wordt in hoofdstuk 2 beschreven. Vervolgens wordt in hoofdstuk 3 ingegaan op de Europese regelgeving. De Eurocode bevat een aantal parameters, die per land kunnen verschillen. Voor zover momenteel na te gaan is, zal ingegaan worden op deze parameters, en zal aangegeven worden hoe voor de diverse landen gerekend zal kunnen worden. In hoofdstuk 4 wordt hier nader op ingegaan. Hiervoor wordt de thans in ontwikkeling zijnde Eurocode als basis genomen. Hoofdstuk 5 behandelt wat meer specifiek de vormfactoren zoals deze voorkomen in de normbladen, de belangrijkste parameter die in de andere onderzoeksdelen bepaald moet worden.

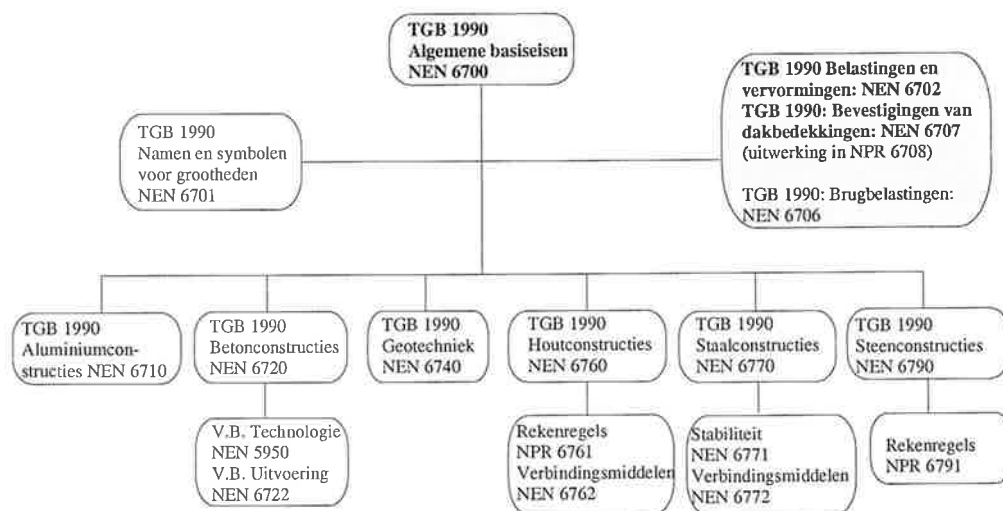
In hoofdstuk 6 tenslotte wordt specifiek ingegaan op de voor zonne-energiesystemen van belang zijnde parameters.

Hoofdstukken 7 en 8 bevatten de conclusies en de aanbevelingen.

2 De Nederlandse normbladen

2.1 Algemeen

De huidige Nederlandse normbladen, die van belang zijn voor de berekening van bouwconstructies op windbelasting zijn in eerste instantie NEN 6700 en NEN 6702. Daarnaast is er voor de bevestiging van dakbedekkingen NEN 6707. Deze normbladen zijn opgenomen in een schema van alle TGB's zoals gegeven in figuur 1. Voor de beoordeling van de veiligheid van bouwconstructies op windbelasting is de bovenste helft van het schema van belang. De relevante normbladen zijn met grijs aangeduid.



Figuur 2.1. Overzicht van normbladen voor het berekenen van bouwconstructies in Nederland.

Het belangrijkste normblad uit de serie is NEN 6700:1991 “TGB 1990 Algemene basiseisen”. Hierin zijn op een fundamenteel niveau de eisen (betrouwbaarheid, bruikbaarheid) gegeven waaraan alle bouwconstructies moeten voldoen, ongeacht het materiaal waarvan zij zijn gemaakt.

De fundamentele eisen zijn nader uitgewerkt naar de aspecten, bepaling van de belastingen en bepaling van de weerstand van de constructie tegen die belastingen in respectievelijk NEN 6702: 1991 “TGB Belastingen en vervormingen” en in de aan een specifiek constructiemateriaal gebonden TGB's, voor de materialen aluminium, beton, grond, hout, staal en steen.

De onderste helft van het schema betreft die normbladen die betrekking hebben op de specifieke bouwmaterialen. Hierin is geregeld welke karakteristieke waarden voor de sterkte er voor de berekening van bouwwerken en bouwdelen moeten worden toegekend.

De onderlinge relatie tussen de normbladen houdt in dat wanneer een bouwconstructie voldoet aan een NEN/NPR uit de TGB normbladen serie, voor het daar behandelde materiaal, ook is voldaan aan de bijbehorende “TGB 1990 Basiseisen en eenvoudige rekenregels” en aan NEN 6700:1991 “TGB 1990 Algemene basiseisen”. Als een bouwwerk of gebouwdeel niet volgens een van deze normbladen kan worden berekend, is een integrale beoordeling volgens NEN 6700 nodig.

2.2 Toepassingsgebied

In NEN 6700 wordt het toepassingsgebied nader gespecificeerd als volgt:

'De norm is bedoeld om te worden toegepast op bouwconstructies. De eisen hebben diensgevolge ook betrekking op:

- nieuwe typen bouwconstructies die buiten het bestaande ervaringsgebied vallen;*
- nieuwe constructieve toepassingen van bestaande materialen;*
- bouwconstructies die buiten het toepassingsgebied van de materiaalgebonden TGB normbladen vallen;*
- bouwconstructies die worden onderworpen aan speciale belasting en/of invloeden.'*

Dit betekent dat de Nederlandse normbladen eisen dat nieuwe constructietypen en materialen aan de betrouwbaarheidseisen van NEN 6700 voldoen.

Eén van de nieuwe typen bouwconstructies, dus die na 1990 veelvuldig worden toegepast, zijn de plat-dakopstellingen waarop zonne-energiesystemen zijn gemonteerd.

NEN 6702 geeft als toepassingsgebied (artikel 2): *Bouwconstructies, met uitzondering van offshore constructies en waterkeringen.* Een bouwconstructie is gedefinieerd als *'ieder deel van een bouwwerk dat is bestemd om belasting te dragen.'*

Dit betekent dat elk onderdeel van een gebouw, dat bedoeld is als draagconstructie, maar ook als bekleding, moet voldoen aan de eisen van NEN 6702. Immers, ook delen die als bekleding dienen, zullen belasting (eigen gewicht en vaak wind) moeten afdragen.

Het toepassingsgebied voor de berekening op windbelastingen is niet verder gespecificeerd dan hiervoor gegeven. In de achtergronden bij de windbelasting volgens NEN 6702, beschreven in TNO rapport B-90-483, wordt aangegeven dat bij gebouwen met een bijzondere geometrie of gelegen in bijzondere terreinomstandigheden de norm niet altijd een oplossing zal bieden. Er wordt geen scherpe grens gedefinieerd wanneer sprake is van een bijzondere geometrie of terreinomstandigheden. Daarnaast wordt in NEN 6702 een stuwdruktabel gegeven die niet verder gaat dan tot 150 meter boven maaiveld.

2.3 Berekening op windbelasting in NEN 6702

Windbelastingen op constructies volgen uit het product van een stuwdruk, een druk- of krachtcoëfficiënt en het aangeblazen oppervlak, met daarop reducties of toeslagen voor specifieke effecten. In NEN 6702 is dit aangegeven met:

$$F = A \ C_{\text{dim}} \ C_{\text{index}} \ C_{\text{eq}} \ \varphi_1 \ p_w$$

en voor p_w geldt:

$$p_w = \frac{1}{2} \rho v^2(z) [1 + 7I(z)]$$

Nederland is voor de berekening op windbelasting in drie gebieden ingedeeld; bovendien wordt onderscheid gemaakt in bebouwd en onbebouwd gebied. Dit heeft

direct betrekking op de stuwdruk p_w . Hiervoor zijn in NEN 6702 tabellen opgenomen, die in Tabel 2.1 is weergegeven tot een hoogte van 100 m.



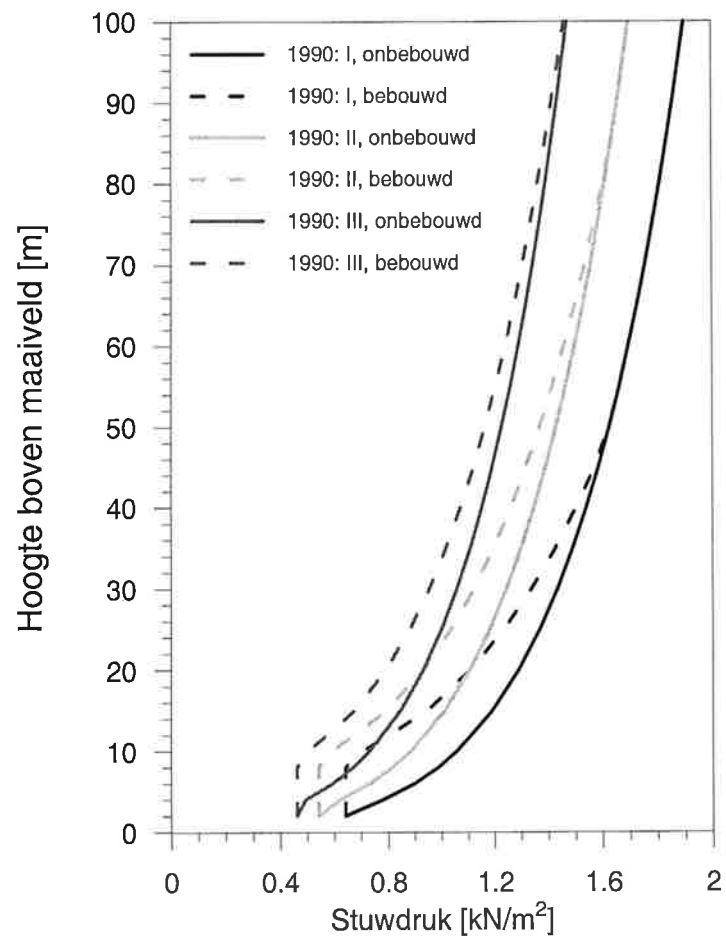
Figuur 2.2 *Indeling van Nederland in windgebieden I, II en III*

hoogte	gebied 1		gebied 2		gebied 3	
	onbebouwd	bebouwd	onbebouwd	bebouwd	onbebouwd	bebouwd
2	0.64	0.64	0.54	0.54	0.46	0.46
4	0.78	0.64	0.62	0.54	0.49	0.46
6	0.90	0.64	0.73	0.54	0.59	0.46
8	0.99	0.64	0.81	0.54	0.67	0.46
10	1.06	0.70	0.88	0.59	0.73	0.50
15	1.19	0.94	1.01	0.79	0.84	0.67
20	1.29	1.11	1.10	0.93	0.93	0.79
25	1.37	1.23	1.18	1.03	1.00	0.88
30	1.43	1.34	1.24	1.12	1.06	0.95
35	1.49	1.43	1.30	1.20	1.11	1.02
40	1.54	1.50	1.35	1.26	1.15	1.07
45	1.58	1.57	1.39	1.32	1.19	1.12
50	1.62	1.62	1.43	1.37	1.23	1.16
55	1.66	1.66	1.46	1.42	1.26	1.20
60	1.69	1.69	1.50	1.46	1.29	1.24
65	1.73	1.73	1.53	1.50	1.32	1.27
70	1.76	1.76	1.56	1.54	1.34	1.31
75	1.78	1.78	1.58	1.57	1.37	1.33
80	1.81	1.81	1.61	1.61	1.39	1.36
85	1.83	1.83	1.63	1.63	1.41	1.39
90	1.86	1.86	1.65	1.65	1.43	1.41
95	1.88	1.88	1.68	1.68	1.45	1.44
100	1.90	1.90	1.70	1.70	1.47	1.46

Tabel 2.1. Stuwdrucktabellen in NEN 6702. Stuwdruk gegeven in kN/m^2 , hoogte in m boven maaiveld.

- Voor de windsnelheid is de uurgemiddelde snelheid die gemiddeld eens per 12,5 jaar wordt overschreden de basis. Hierop wordt met behulp van piekfactor en turbulentie-intensiteit de stuwdruk bepaald. Deze procedure sluit aan bij de uitgangspunten in NEN 6700, waarbij de belastingen worden afgeleid met behulp van een referentieperiode van 50 jaar.
- Voor de vormfactoren zijn figuren opgenomen, waarbij onderscheid is gemaakt in de windvormfactoren voor een gevel of dak als geheel en in locale vormfactoren.

Voor de drie windgebieden zijn de stuwdrucktabellen in grafiekvorm gegeven in Figuur 2.3.



Figuur 2.3. Profielen van de stuwdruk tot 100 m hoogte volgens NEN 6702

3 Eurocode

3.1 Algemeen

Momenteel wordt in Europees verband gewerkt aan het opstellen van Europese voorschriften voor de berekening van bouwconstructies. Dit zal uitmonden in een serie normbladen die vergelijkbaar is met de TGB serie. In totaal worden 9 Eurocodes opgesteld, te weten:

Eurocode 1: Basis of design and actions on structures
Eurocode 2: Design of concrete structures
Eurocode 3: Design of steel structures
Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures
Eurocode 5: Design of timber structures
Eurocode 6: Design of masonry structures
Eurocode 7: Geotechnical design
Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance
Eurocode 9: Design of aluminium alloy structures

De Eurocode 1 komt dus inhoudelijk ongeveer overeen met NEN 6700, NEN 6701 en NEN 6702. Voor de berekening op windbelasting is 'Eurocode 1: Part 1-4: Wind Actions' relevant (op dit moment is dit normblad in een voornorm stadium, ENV-1991-2-4, naar verwachting in 2002 is deze in definitieve vorm beschikbaar), alsmede Part 1: Basis of design.

Naast de Eurocodes heeft elk aangesloten land eigen National Application Documents. Hierin worden amendementen op de Eurocodes geschreven, zodanig dat de gebruiker van de Eurocode in een land dezelfde uitgangspunten gebruikt als bij gebruik van het nationale voorschrift, waardoor de Eurocode + NAD kan worden beschouwd als gelijkwaardig aan de nationale voorschriften. Hoe de definitieve versies van de Eurocodes worden ingepast in het wettelijk kader in Nederland is momenteel nog onbekend. Wel mag ervan worden uitgegaan dat op termijn deze voorschriften in Europa gebruikt gaan worden.

3.2 Toepassingsgebied

In Eurocode 1: Part 1, basis for design' (ENV 1991-1;1994) staat onder het hoofdstuk 'requirements' gegeven dat:

'A structure shall be designed and executed in such a way that it will, during its intended life with appropriate degrees of reliability and in an economic way:

*-remain fit for the use for which it is required; and
-sustain all actions and influences likely to occur during execution and use'*

en

'A structure shall also be designed and executed in such a way that it will not be damaged by events like fire, explosion, impact or consequences of human errors, to an extent disproportionate to the original cause.'

Tenslotte

'The potential damage shall be avoided or limited by appropriate choice of one or more of the following:

- avoiding, eliminating or reducing the hazards which the structure may sustain;*
- selecting a structural form which has low sensitivity to the hazards considered;*
- selecting a structural form and design that can survive adequately the accidental removal of an individual element or a limited part of the structure, or the occurrence of acceptable localized damage;*
- avoiding as far as possible structural systems which may collapse without warning;*
- tying the structure together.'*

3.3 Stand van zaken Eurocode 'Wind actions'

In 1994 is de ENV 1991-2-4 "Basis of design and actions on structures – Part 2-4: Actions on structures – Wind Actions " uitgekomen. Deze norm heeft de status van 'voornorm', en wordt door CEN (Comite Europeene de Normalisation) uitgegeven. De ENV heeft als doel de praktiserend ingenieur vertrouwd te maken met de regels, en om gedurende twee jaar commentaar te verzamelen vanuit de aangesloten landen. Deze periode van twee jaar is afgesloten, waarna door CEN een nieuw Project Team is geïnstalleerd dat de ENV 1991-2-4 op basis van de verzamelde commentaren moet verbeteren, waarna uiteindelijk de Eurocode EN 1991-1-4 moet verschijnen.

Momenteel legt dit project team de laatste hand aan het document, dat aan het eind van 2001 in een groene versie gaat verschijnen. Na een korte periode zal het document in (gewogen) stemming worden gebracht, waarbij de aangesloten landen door hun norm-instituten (voor Nederland NEN Bouw) hun stem uitbrengen. Bij voldoende meerderheid van stemmen wordt de EN 1991-1-4 waarschijnlijk binnen 1 à 2 jaar van kracht.

Windbelasting is mede bepaald door de geografische lokatie van de te berekenen constructie. Dit betekent dat in de Eurocode per land de ontwerp windsnelheid gegeven dient te worden.

ENV 1991-2-4 geeft als toepassingsgebied bouwconstructies tot een hoogte van 200 m. Voor bruggen is het toepassingsgebied overspanningen tot 200 m voor verkeersbruggen en 30 m voor voetgangersbruggen. Daarnaast geeft ENV 1991-2-4 de windbelasting voor schoorstenen, echter niet voor vakwerkmasten en getuide masten. Tui- en hangbruggen vallen ook niet onder ENV 1991-2-4. Een verdere indicatie voor het toepassingsgebied wordt niet gegeven.

De Eurocode is op het gebied van wind uitgebreider dan NEN 6702. In de Eurocode is met name meer aandacht voor de dynamisch en aerodynamische effecten op constructies. Er zijn meer figuren voor de bepaling van de vormfactoren opgenomen, en daarnaast zijn bepalingen opgenomen voor de bepaling van de stuwdruk op bijvoorbeeld heuvels, waarmee we in Nederland momenteel niet expliciet rekenen.

In ENV 1991-2-4 is een indicatieve kaart met windsnelheden in Europa gegeven. Deze komt echter niet overeen met de waarden voor de ontwerp-windsnelheid zoals die in de diverse landen worden toegepast. Voor ENV 1991-2-4 zijn deze waarden gegeven in het National Application Document (NAD). Dit National Application Document heeft verder als functie om aan te geven welke regels uit ENV 1991-2-4 wel of niet van toepassing worden verklaard, en welk alternatief er geoorloofd is. Dit betekent dat een land in het NAD de complete Eurocode kan aannemen of afwijzen, zolang er een alternatief is.

In EN 1991-1-4 zal het NAD verdwijnen. In plaats daarvan wordt een National Annex voorbereid door elk land, waarin keuzes en alternatieven worden gegeven voor die onderwerpen, waar in de hoofdtekst van EN 1991-1-4 ruimte gegeven wordt. Dit betekent dat de landen dus niet overal zomaar af kunnen wijken. Het is nu nog te vroeg om definitief te kunnen melden welke de 'open' regels van de Eurocode zullen zijn. Het is te verwachten dat om diverse redenen relatief veel ruimte overblijft voor de landen om hun eigen regels toe te voegen.

3.4 Rekenmodel van de ENV 1991-2-4

De windbelasting in de Eurocode is gebaseerd op de uurgemiddelde windsnelheid die gemiddeld eens in de 50 jaar wordt overschreden. Om aansluiting te verkrijgen met NEN 6702, is in het Nederlandse NAD de windsnelheid met een gemiddelde terugkeerperiode van 12,5 jaar gegeven. De stuwdrucktabellen voor de Eurocode zijn nog niet definitief bekend. Het valt te verwachten dat deze nauwelijks af zullen wijken van de tabellen die in NEN 6702 zijn gegeven. De gebiedsindeling van NEN 6702 zal waarschijnlijk ongewijzigd blijven, waarbij een indeling in onbebouwde en bebouwde omgeving opnieuw gehanteerd wordt.

De basisformule voor de windbelasting in ENV 1991-2-4 oogt op het eerste gezicht heel anders dan de formule in NEN 6702:

$$F = A c_e c_d c_f \frac{1}{2} \rho v_{ref}^2$$

De factor c_d in ENV 1991-2-4 combineert ϕ_l en C_{dim} uit NEN 6702; c_f is het equivalent van C_{index} uit NEN 6702.

Voor de referentie-windsnelheid v_{ref} geldt:

$$v_{ref} = C_{DIR} C_{TEM} C_{ALT} v_{ref,0}$$

Hierin is $v_{ref,0}$ de referentiesnelheid op open terrein met ruwheidslengte $z_0 = 0.05$ m. Verder zijn C_{TEM} , C_{DIR} en C_{ALT} factoren die met herhalingstijd, windrichting en hoogte van de ligging van een gebouw te maken hebben. Tenslotte is in de 'exposure factor' c_e de invloed van windvlagen, de hoogte boven het maaiveld en de ligging bij eventuele windsnelheidsverhogende omstandigheden in het landschap verwerkt; voor c_e geldt:

$$c_e(z) = c_r^2(z) c_t^2(z) [1 + 2 gI(z)]$$

In de term $[1 + 2 gI(z)]$ herkennen we de invloed van de windvlagen, vergelijkbaar met NEN 6702.

3.5 Toepassing van NEN 6702 en ENV 1991-2-4 voor gebouw-onderdelen

Voor onderdelen van gebouwen, waar in het kader van dit rapport ook de zonnenergiesystemen onder worden verstaan, worden enkele vereenvoudigingen toegepast.

Het effect van dynamische responsie, alsmede het effect van de onvolledige correlatie van de windvlagen wordt niet in rekening gebracht. De factoren ϕ_1 en C_{dim} in NEN 6702, alsmede de factor c_d uit ENV 1991-2-4 wordt daarmee gelijk aan 1. Daarnaast geldt voor de belasting op de systemen als geheel dat ofwel met een totale vormfactor wordt gerekend, dan wel met een vormfactor aan elke zijde van de collector. In het model van NEN 6702 wordt daarom de drukvereffeningscoëfficiënt C_{eq} niet nader beschouwd.

Verder wordt vooralsnog aangenomen dat $C_{DIR} = 1$, en dat c_t en c_r gelijk zijn aan 1 in ENV 1991-2-4. Op deze coëfficiënten wordt later in dit rapport terug gekomen.

Dit houdt in dat de berekening van de windbelasting op zonnecollectoren volgens de onderstaande vergelijkingen verloopt:

NEN 6702:

$$F = A C_{index} p_w = A C_{index} \frac{1}{2} \rho v^2(z) [1 + 7 I(z)]$$

ENV 1991-2-4:

$$F = A c_e c_f \frac{1}{2} \rho v_{ref}^2 = A(z) c_f c_r^2 \frac{1}{2} \rho v_{ref}^2 [1 + 2 g I(z)]$$

Er geldt:

$$g = 3.5$$

$$v(z) = c_r^2 v_{ref}^2$$

$$c_f = C_{index}$$

Dit betekent dat beide rekenmodellen in principe gelijk aan elkaar zijn.

4 Verschillen per land

4.1 Ontwerp windsnelheid

In Annex A van ENV 1991-2-4 zijn voor de aangesloten landen waarden voor v_{ref} opgegeven. Deze waarden hebben een informatief karakter. Voor een aantal landen zal deze waarde ook in de National Annex van de Eurocode komen, een aantal andere landen zal met andere waarden komen. Onderstaande tabel geeft een overzicht van de waarden die per land in ENV 1991-2-4 zijn genoemd. De waarden in deze tabel zijn indicatieve waarden. In ENV 1991-2-4 wordt uitgegaan van 10 minuten gemiddelden, gemeten op 10 meter hoogte boven terrein met $z_0 = 0,05$ meter, met een herhalingsstijd van 50 jaar. In de tabel is aangegeven waar door de landen expliciet is aangegeven waar van deze definitie wordt afgeweken.

Tabel 4.1: Overzicht van waarden voor $v_{ref,0}$ in ENV 1991-2-4, voor zover opgenomen in Annex A

Land	laagste waarde	hoogste waarde	opmerkingen
Belgie	26,2		
Denemarken	27,0		
Duitsland	24,3	31,5	
Finland	23,0		
Frankrijk	24,0	30,5	
(excl. gebieden overzee)			
Griekenland	30,0	36,0	
IJsland	--		alleen 3-s gemiddelden beschikbaar
Ierland	27,0	30,0	
Italië	25,0	31,0	
Luxemburg	26,0		
Nederland	25,0	30,0	uurgemiddeld, $z_0 = 0.03$ m
Noorwegen	--		geeft 3-5 seconden gemiddelden
Oostenrijk	--		nationale code geeft 2-s pieken
Portugal	28,0	31,0	
Spanje	--		
UK	20	31	10 meter boven zeeniveau
Zweden	21	26	
Zwitserland	27,2	33,3	

Bij een vergelijking van de waarden blijkt dat er bij de landsgrenzen onlogische sprongen kunnen ontstaan. Momenteel (2001) wordt door diverse landen gewerkt aan een revisie van hun windkaarten, waarbij in veel gevallen ook naar de buurlanden wordt gekeken. Daarnaast zullen ook Polen en Tsjechie in de Eurocode opgenomen worden.

4.2 Orografische effecten.

In tegenstelling tot NEN 6702 kent de Eurocode specifieke regels voor de bepaling van de windsnelheid bij belangrijke afzonderlijk liggende onvlakheden in het terrein, zoals heuvels en dijken. Afzonderlijk liggende heuvels komen in Nederland praktisch niet voor. Dijken en duinen zijn wel van belang. Voor lokaties op of nabij de hellingen zijn op basis van experimenteel onderzoek vergrotingsfactoren voor de windsnelheid gedefinieerd, indien de helling ϕ groter is dan 0.05. Voor betrekkelijk flauwe hellingen volgt de helling uit $\phi = H/L$, indien $H/L < 0.3$, indien $H/L > 0.3$ moet een $\phi = 0.3$ worden aangehouden. Voor de vergrotingsfactor op de windsnelheid geldt nu:

$$c_t = 1 + 2s\phi$$

waarin:

ϕ is de hellingshoek, in rad;

s is een factor, te ontlelen aan figuren 8.1 en 8.2 uit ENV 1991-2-4.

De vergrotingsfactor c_t moet worden toegepast indien de afstand tot de top van de verhoging minder bedraagt dan de helft van de lengte van helling of minder dan 1.5 maal de hoogte van de heuvel, dijk of onvlakheid, zowel aan de naar de wind toegekeerde als aan de van de wind afgekeerde zijde.

4.3 Windrichtingsafhankelijkheid

In bijlage A van ENV 1991-2-4 zijn tenslotte nog enkele factoren gedefinieerd, die nationaal nader ingevuld kunnen worden. Het betreft hier de factor C_{ALT} , die de invloed van de ligging van het aansluitende terrein rondom bouwwerken ten opzichte van de zeespiegel weergeeft, de factor C_{TEM} , die als reductiefactor op de windbelasting mag worden toegepast voor constructies met een levensduur kleiner dan 1 jaar en de factor C_{dir} waarmee de invloed van de richtingsafhankelijkheid van de extreme windsnelheid in rekening gebracht kan worden.

De factor C_{ALT} is voor Nederland niet van belang. Deze factor is dus gelijk te stellen aan 1.0. Alleen Duitsland vormt in de ENV 1991-2-4 vooralsnog een uitzondering op de regel dat C_{ALT} gelijk is aan 1.0.

De factoren C_{dir} en C_{TEM} zijn door de meeste landen ook op 1.0 gesteld, zo ook voor Nederland. België en het Verenigd Koninkrijk geven hiervoor wel waarden aan. De waarden van C_{dir} en C_{TEM} zijn in Nederland wel beschikbaar, maar aangezien de huidige ontwerppraktijk en bouwregelgeving alleen impliciet (via het gelijkwaardigheidsbeginsel) de ruimte geven voor het aanhouden van referentieperioden kleiner dan 1 jaar of voor een onderscheid naar windrichting is ervan afgezien deze waarden op te geven. Ter informatie zijn de waarden voor C_{DIR} voor de drie windgebieden in Nederland gegeven. Het gebruik van deze waarden kan alleen onder specifieke condities, waarbij specialistische kennis op het gebied van de achtergrond van C_{DIR} en de relatie met de betrouwbaarheidseisen noodzakelijk is.

Tabel 4.2: Reductiefactor C_{dir} voor de drie windsnelheidsgebieden in Nederland

richting ¹	gebied I	gebied II	gebied III
0	0.69	0.65	0.61
30	0.65	0.62	0.60
60	0.68	0.65	0.63
90	0.66	0.62	0.60
120	0.62	0.59	0.55
150	0.66	0.61	0.56
180	0.77	0.72	0.70
210	0.90	0.88	0.87
240	0.96	0.95	0.96
270	0.98	0.98	0.98
300	0.91	0.92	0.89
330	0.78	0.79	0.74

¹) in graden ten opzichte van het noorden, gerekend met de klok mee

Bovenstaande getallen zijn verhoudingsgetallen die gelden voor de wind met een herhalingsjijd van 50 jaar. In NEN 6702 is de wind met een herhalingsjijd van 12,5 jaar als basis genomen. Tussen de waarde voor 12,5 jaar en de waarde voor 50 jaar zit ongeveer 10 % verschil. Indien vanuit de in NEN 6702 gegeven waarde voor de stuwdrukken een richtingsafhankelijke stuwdruk moet worden bepaald zal per windrichting een waarde moeten worden vastgelegd die gemiddeld eens in de 50 jaar wordt overschreden. Dit betekent dat bovenstaande tabel met 1,1 moet worden vermenigvuldigd. Dit levert bij een windrichting van 240 en 270 graden waarden op voor $C_{dir} > 1,0$, bij toepassing van de stuwdruktabel van NEN 6702.

Toepassing van C_{dir} voor de stuwdruk betekent dat de basis-stuwdruk met C_{dir}^2 moet worden vermenigvuldigd.

5 Vormfactoren

De constructeur maakt bij de berekening van de windbelasting op een gebouw gebruik van druk- of zuigingscoëfficiënten of van krachtcoëfficiënten. Deze coëfficiënten zijn in de normen NEN 6702 en ENV 1991-2-4 gegeven als functie van de vorm en afmetingen van objecten. Separatie van de stroming en wervelvorming geeft soms aanleiding tot lokale afwijkende drukken en soms tot een hogere belasting van de constructie als geheel. Ook hiervoor bevatten NEN 6702 en ENV 1991-2-4 regels, die een relatie leggen tussen de afmeting van het belaste oppervlak en de aan de houden winddruk of windzuiging.

Zoals reeds vermeld volgt de belasting die een onderdeel van een bouwwerk onder extreme condities ondervindt uit het produkt van stuwdruk en een vormfactor. We onderscheiden de volgende belasting-componenten:

- 1) uitwendige druk of zuiging op grote vlakken:

$$p_{\text{ext}} = C_{\text{pe}} p_w$$

waarin:

- p_{ext} is de uitwendige druk of zuiging, in N/m^2 ;
- C_{pe} is de drukcoëfficiënt voor externe overdruk of onderdruk;
- p_w is de extreme stuwdruk, in N/m^2

De externe belasting moet in een aantal situaties zowel in de vorm van overdruk als van onderdruk worden beschouwd. De uitwendige onderdruk (zuiging) op onderdelen van gebouwen met afmetingen kleiner dan 10 m^2 , met name nabij randen van daken en hoeken van gevels wordt berekend met een speciale lokale winddrukcoëfficiënt, in NEN 6702 aangeduid als $C_{\text{pe,loc}}$ en in ENV 1991-2-4 als $C_{\text{pe,1}}$. Deze lokale externe winddrukcoëfficiënt brengt tot uitdrukking dat in lokale situaties hoge windbelastingen kunnen optreden.

De externe drukken vormen een verdeelde belasting loodrecht op het vlak.

- 2) wrijving op een vlak:

$$p_{\text{fr}} = C_{\text{fr}} p_w$$

waarin:

- C_{fr} is de coëfficiënt voor wrijving op een vlak;
- p_{fr} is de verdeelde belasting ten gevolge van wrijving, in N/m^2 .

De verdeelde belasting ten gevolge van wrijving is evenwijdig aan het vlak in de richting van de wind.

- 3) inwendige onder- of overdruk in ruimten:

$$p_{\text{int}} = C_{\text{pi}} p_w$$

waarin:

C_{pi} is de coëfficiënt voor inwendige onder- of overdruk;

p_{int} is de inwendige onder- of overdruk, in N/m^2 .

De onder- of overdruk in gebouwen is afhankelijk van de vorm het gebouwen en van de plaats en verdeling van openingen over de gevel en/of dak. Afhankelijk van de oriëntatie van openingen in de ruimte ten opzichte van de wind moet onderdruk of overdruk zijn beschouwd. De belasting door inwendige onder- of overdruk is werkzaam op alle vlakken, die deze ruimte omsluiten, en moet gecombineerd worden met de belastingen ten gevolge van uitwendige overdruk of onderdruk.

4) kracht op een specifiek object:

$$F = C_f A p_w$$

waarin:

C_f is de krachtcoëfficiënt;

A is het aangestroomde oppervlak van het object in de windrichting, in m^2 ;

F is de totaal ondervonden kracht in de windrichting op het object, in N.

C_f zou bijvoorbeeld voor een zonnecollector of PV paneel kunnen worden gedefinieerd.

De krachtcoëfficiënten zijn afhankelijk van de vorm van het object, van de slankheid, en bij ronde objecten van het Reynoldsgetal, bij vakwerkconstructies ook van de dichtheid van het vakwerk. De kracht op een staaf volgt vervolgens uit:

$$F_x = C_{fx} D \ell p_w$$

en

$$F_y = C_{fy} D \ell p_w$$

waarin:

C_{tx}, C_{fy} is de krachtcoëfficiënt in x- en y-richting;

F_x, F_y is de totale kracht in x- en y-richting, in N;

D is de breedte van de staaf, in m
(gedefinieerd in combinatie met de waarden van C_{tx}, C_{ty})

ℓ is de lengte van de staaf, in m;

Deze krachten werken in de richting van de wind, of, zoals bij een staaf, in de x- en y-richting waarvoor de vormfactoren zijn opgegeven.

De belasting op een bouwwerk als geheel, dat kan worden beschouwd als een samenstel van een aantal objecten (bijvoorbeeld vlakken) volgt nu uit het ongunstigste samenstel van alle hiervoor genoemde belastingen, gesommeerd over alle onderdelen en hun oppervlakken:

$$F_w = \sum C_i A_i p_{w,i}$$

Hierin zijn C_i de kracht- en drukcoëfficiënten, A_i de oppervlakten van de samenstellende onderdelen waarover de drukken werken of de referentieoppervlakten van de krachtcoëfficiënten en $p_{w,i}$ de stuwdruk ter plaatse van de onderdelen.

6 Specifieke aspecten plat-dak opstellingen

6.1 Inleiding

De belasting op zonne-elementen (collectoren en PV-panelen) door wind bestaat uit een loodrecht op het vlak van de elementen gerichte verdeelde belasting. Zowel een belasting naar het vlak toe als van het vlak af dient te worden beschouwd. Deze belasting hangt af van:

- vorm en afmetingen van het gebouw
- positie van frames (= draagconstructies) op het dak (vlak bij de rand of in het midden)
- afstand van zonne-elementen tot het dak
- hoek waaronder de zonne-elementen zijn geplaatst
- open of gesloten frames.

De weerstand tegen deze belastingen wordt geleverd door het eigen gewicht van het element, het frame en daarin aangebrachte ballastgewicht (betontegels e.d.), en door wrijving tussen het frame en de dakbescherming c.q. het dak.

Voor de windbelasting op zonnecollectoren en zonnepanelen op een plat dak opstelling kan de windbelasting bepaald worden volgens de formules uit NEN 6702 en de Eurocode. De basiswaarde voor de stuwdruk volgt uit de geografische lokatie van het systeem, en omdat de dynamische effecten niet relevant worden geacht, dient alleen een keuze voor de vormfactor te worden gemaakt om de windbelasting te kunnen afleiden. Daarnaast zijn enkele aspecten van belang, die te maken hebben met de specifieke oriëntatie en lokatie van de zonne energiesystemen op het dak.

6.2 Vormfactoren

In de huidige generatie voorschriften voor het in rekening brengen van windbelasting op gebouwen en bouwconstructies, wordt niet expliciet rekening gehouden met systemen die op een plat dak worden geplaatst. Als op basis van de huidige voorschriften een schatting voor de windbelasting op dergelijke systemen wordt gemaakt, kan uitgegaan worden van de volgende regels:

- 1: In de bouwvoorschriften zijn vormfactoren voor de externe druk op platte daken opgenomen. Deze platte daken worden in zones opgedeeld. Voor elk van deze zones geldt een andere waarde voor de vormfactor. In de zones bij dakranden en hoeken wordt een hogere belasting op het dakvlak gevonden.
- 2: voor eenzijdig hellende overkappingen zijn vaak waarden opgenomen voor de totale vormfactor. Afhankelijk van de windrichting en de helling eens hoek van deze overkappingen betreft dit een opwaarts, dan wel een neerwaarts gerichte belasting. Deze waarden zijn oorspronkelijk afgeleid voor grote overkappingen, en niet voor de kleinschalige objecten zoals zonnepanelen.
- 3: in de Eurocode zijn waarden opgenomen voor de drukcoëfficiënten voor repeterende dakvlakken. Hierbij moet bijvoorbeeld gedacht worden aan zaagtand daken. Mogelijk zouden deze regels ook van toepassing verklaard kunnen worden op zonne-energie centrales.

De volgende onzekerheden dienen bij de interpretatie van bovengenoemde rekenregels een achtste worden genomen:

- Het stromingspatroon van de wind bij platte daken, met name bij de randen en hoeken, wijkt sterk af van de wind, zoals die gemodelleerd wordt om bijvoorbeeld de vormfactoren voor overkappingen te bepalen. Dit houdt in dat de onder punt 2 genoemde regels niet zonder meer toegepast kunnen worden. als eerste aanname kan worden gehouden, dat de rand en hoeken zones van het platte dak niet gebruikt mogen worden voor de plat dak opstellingen.
- Het toepassen van de onder twee genoemde regels voor opstellingen in de middenzone van een plat dak zal voor het zonne-energie systeem meestal een veilige, maar wellicht niet economische aanname zijn. Dit betekent dat extra ballast noodzakelijk is, wat weer een extra belasting voor de dak constructie betekent.

In de *richtlijnen voor plaatsing van zonnecollectoren op daken* (TNO Rapport 1999-G&I-R118) is de volgende tekst opgenomen:

Voor zonnecollectoren die op een draagconstructie worden gemonteerd, waarbij de draagconstructie op een platte dakbedekking wordt geplaatst, moet rekening gehouden worden met een totale vormfactor voor de elementen, die is te bepalen met behulp van figuren 27a en 27b van NEN 6702. Als deze draagconstructie in een rand- of hoekzone van het platte dak is geplaatst, zoals gedefinieerd in figuur 28a, kan een veilige waarde voor de totale vormfactor van -2.5 gehanteerd worden.

Met behulp van een individuele beoordeling kunnen mogelijk lagere waarden gehanteerd worden. Deze beoordeling kan bestaan uit de uitvoering van een in-situ proef op ware grootte waarbij gedurende een meetperiode, waarin een aantal stormen valt, de drukverschillen en resulterende krachten op de constructie worden geregistreerd. Uit een statistische analyse van de extremen kan dan, conform de eisen gesteld in NEN 6700, een waarde voor de in rekening te brengen representatieve waarden voor de windbelasting worden vastgesteld.

6.3 Windrichtingsafhankelijkheid

De Eurocode biedt de mogelijkheid om expliciet met de windrichting afhankelijke waarden voor de vormfactoren te rekenen. omdat deze systemen in de meeste gevallen naar het zuiden gericht zullen zijn, kan met de frequentieverdeling van de windsnelheden over de windroos rekening worden gehouden. in de berekening volgens de Eurocode betekent dit dat een coëfficiënt c_{dir} in rekening worden gebracht. De waarden van c_{dir} hangen af van het lokale windklimaat, en verschillen dus per land.

6.4 Lokatie op het dak

Zoals uit par. 6.2 is gebleken, kan de lokatie van de collectoren en panelen op het dak een belangrijke invloed hebben op de in rekening te brengen windbelasting.

6.5 Relevante mechanismen

Twee bezwijkmechanismen kunnen worden onderscheiden:

Kantelen van het systeem, onder invloed van een opwaarts gerichte windbelasting;

Verschuiven van het systeem, door de horizontale component van de windbelasting.

Voor beide bezwijkmechanismen wordt hieronder aangegeven hoe de benodigde ballast, dan wel de benodigde sterkte van de draagconstructie, kan worden bepaald.

6.5.1 *Bezwijkmechanisme I: kantelen van het systeem*

Voor de bepaling van het ballastgewicht, dan wel de sterkte van de verbinding met de draagconstructie, om kantelen tegen te gaan geldt:

$$M_{gewicht} > M_{wind}$$

waarin:

$M_{gewicht}$ is de rekenwaarde voor het moment volgend uit het gewicht van het element en het frame met de ballast, vermenigvuldigd met de momentarm.

M_{wind} is de rekenwaarde van het moment volgend uit de windbelasting. Deze is gelijk aan de representatieve waarde voor het moment, vermenigvuldigd met de belastingfactor, waarvoor hier veiligheidsklasse II volgens NEN 6702 wordt aangehouden.

$M_{gewicht}$ wordt berekend uit:

$$M_{gewicht} = \gamma_{gewicht} \sum (G_i L_i) = \gamma_{gewicht} (G_{ballast} \sum L_{ballast} + G_{element} L_{element} + G_{frame} L_{frame})$$

waarin:

$\gamma_{gewicht}$ is de belastingfactor (= 0,9) voor gunstig meewerkend eigen gewicht;

G_i zijn de gewichten van ballast, frame en element;

L_i zijn de momentarmen behorend bij de respectievelijke gewichten;

De waarden voor G en L zijn afhankelijk van de uitvoering van het systeem.

M_{wind} wordt berekend uit:

$$M_{wind} = \gamma F_{rep} L,$$

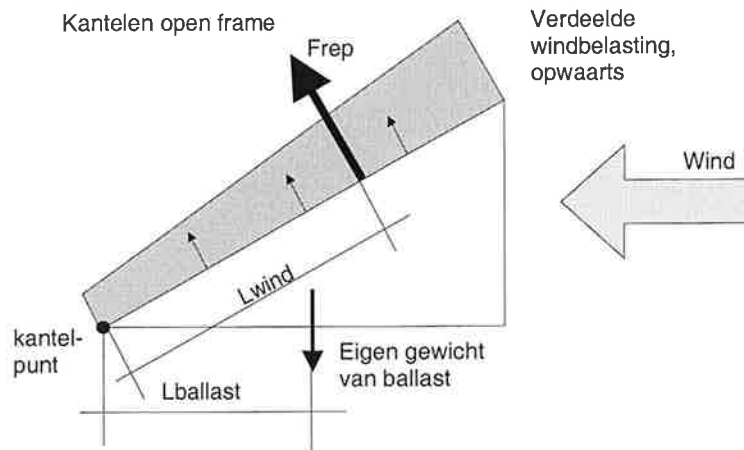
waarin:

γ = de belastingfactor;

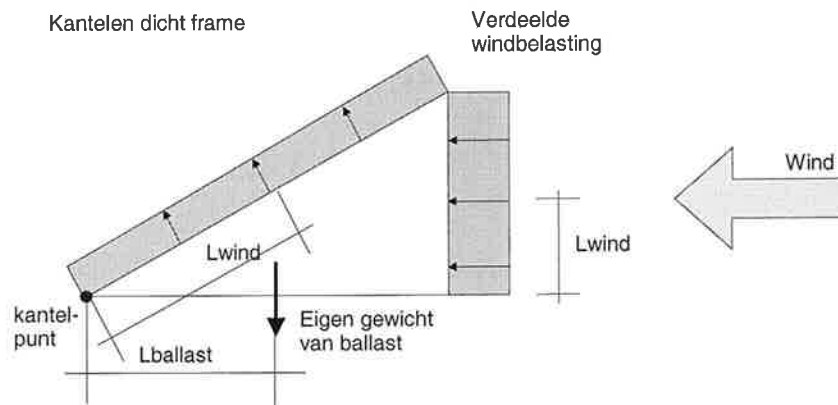
F_{rep} = de resulterende kracht volgend uit de verdeelde windbelasting. Deze resulterende kracht volgt uit het product van een stuwdruk met een vormfactor en het aangestroomde oppervlak. Voor de bepaling van deze vormfactor is het experimenteel onderzoek gestart.

L = de momentarm, de afstand tussen het kantelpunt en het aangrijpingspunt van de kracht F_{rep} .

Voor een open frame dat is opgesteld in de middenzone van het plat dak (volgens figuur 28 van NEN 6702), kan een resulterende kracht worden bepaald zoals in figuur 27a van NEN 6702 is aangegeven. Gerekend kan worden met een opwaarts gerichte windbelasting, betrokken op een stuwdruk op dakhoogte van het gebouw (zie tabel 10 van NEN 6702). De resulterende kracht grijpt aan op ¼ van de lengte van het zonnelement, beschouwd vanuit de windrichting. In het experimentele onderzoek wordt deze aanname getoetst, en zullen waarden worden vastgesteld die specifiek voor deze toepassingen zijn bepaald.



Figuur 6.1: *Schema van bezwijken door kantelen, voor een open frame*



Figuur 6.2: *Schema van bezwijken door kantelen, voor een gesloten frame*

Voor een gesloten frame, opgesteld in de middenzone van het platte dak wordt de resulterende kracht bepaald uit samenstelling van de windbelasting op de naar de wind toegekeerde zijde en de windzuiging aan de bovenzijde van het paneel. Per vlak wordt de resulterende windkracht F_{rep} gevonden uit:

$$F_{rep} = p_w C_p A,$$

waarin:

p_w is de stuwdruk volgens tabel 10 van NEN 6702;

C_p is de vormfactor;

A is de lengte van het beschouwde oppervlak (de lengte van het zonne-element voor de bovenzijde, en de hoogte van het frame voor de voorzijde).

In figuur 6.2 wordt F_{rep} gevonden door een vormfactor voor overdruk toe te passen op de naar de wind toegekeerde zijde. Verder wordt een vormfactor voor onderdruk aangehouden voor de zuiging aan bovenzijde van het zonne-element. De resulterende kracht grijpt ongeveer aan in het midden van de overspanning. Deze aannames zullen in het experimenteel onderzoek worden gecontroleerd.

Voor opstellingen van frames in de rand- en hoekzones van het dak (figuur 28 van NEN 6702) zijn lokale windeffecten bepalend. Van de consequenties van deze effecten op de

belasting op de zonne-energie-elementen is weinig bekend. Het is momenteel niet bekend welke waarden voor lokaties in deze zones afgegeven dienen te worden.

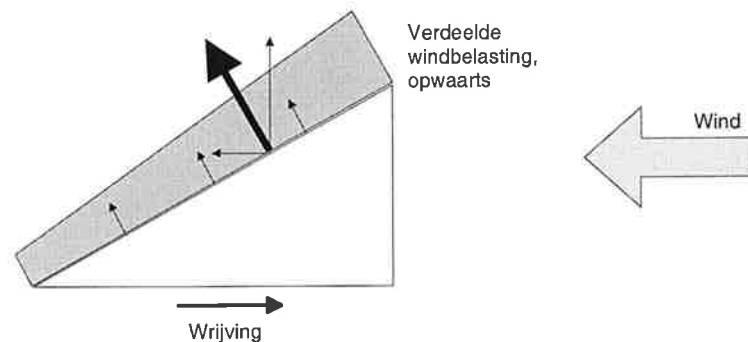
6.5.2 *Bezwijkmechanisme II: Verschuiven van het systeem.*

Voor het tegengaan van verschuiven moet de wrijving tussen het systeem en de ondergrond voldoende zijn om de horizontale component van de windbelasting te kunnen weerstaan. Er moet gelden:

$$F_{wrijving} > F_{wind}$$

De wrijving hangt af van de contactdruk die wordt uitgeoefend. Hoe hoger de contactdruk, des te groter $F_{wrijving}$. De contactdruk wordt bepaald door het eigen gewicht en de verticale component van de windbelasting. Omdat een naar beneden gerichte windbelasting zal leiden tot een verhoging van deze contactdruk (wat in principe gunstig werkt), wordt hier alleen de opwaarts gerichte windbelasting beschouwd.

Verschuiven van het frame (open opstelling)



Figuur 6.3: Bezwijken door schuiven van het systeem.

$F_{wrijving}$ volgt uit:

$$F_{wrijving} = \gamma f F_{vert} ,$$

waarin:

γ = de belastingfactor conform NEN 6702; deze is voor veiligheidsklasse 2 gelijk aan 0,9 voor gunstig werkende belasting, en is gelijk aan 1,3 voor belasting door wind;
 F_{vert} = de rekenwaarde voor de verticale belasting, volgend uit eigen gewicht, ballast en wind, ofwel: $F_{vert} = G_{frame} + G_{element} + G_{tegels} - F_{rep} \cos(\alpha)$, waarin α de hellingshoek van het zonne-element is en F_{rep} wordt bepaald, zoals omschreven bij bezwijkmechanisme I.
 f = de wrijvingscoëfficiënt. Deze hangt af van de contactdruk en van de materialen waartussen de wrijving overgebracht moet worden. De waarde voor de wrijvingscoëfficiënt voor (bijvoorbeeld) bitumineuze dakbedekkingen en daarop geplaatste constructies is niet bekend, en kan ook afhangen van de temperatuur van het materiaal. Deze kan door middel van beproeving worden vastgesteld.

Voor het eigen gewicht van frame en element worden de waarden aangehouden, zoals die ook bij de beschouwing van bezwijkmechanisme I zijn gehanteerd.

F_{wind} volgt uit de horizontale component van de windbelasting vermenigvuldigd met de belastingfactor:

$F_{wind} = \gamma F_{rep} \sin(\alpha)$, waarin F_{rep} wordt bepaald conform de wijze die bij het mechanisme kantelen is beschreven.

6.6 Bepaling van de ballast

De benodigde ballast wordt bepaald als zijnde de minimale massa nodig om zowel kantelen als verschuiven tegen te gaan.

Voor *kantelen* geldt:

$$M_{gewicht} = \gamma_{gewicht} \Sigma(G_i L_i) = \gamma_{gewicht} (G_{ballast} \Sigma L_{ballast} + G_{element} L_{element} + G_{frame} L_{frame})$$

en

$$M_{wind} = \gamma F_{rep} L,$$

Ofwel:

$$G_{ballast} = \frac{\gamma_{wind} F_{rep} L - \gamma_{gewicht} (G_{element} L_{element} + G_{frame} L_{frame})}{\gamma_{gewicht} \Sigma L_{ballast}}$$

Voor *wrijving* geldt:

$$F_{wrijving} = \gamma_{gewicht} f (G_{frame} + G_{element} + G_{ballast}) - \gamma_{wind} f F_{rep} \cos(\alpha)$$

en

$$F_{wind} = \gamma_{wind} F_{rep} \sin(\alpha)$$

Ofwel:

$$G_{ballast} = \frac{\gamma_{wind} F_{rep} (\sin(\alpha) + f \cos(\alpha)) - \gamma_{gewicht} f (G_{element} + G_{frame})}{\gamma_{gewicht} f}$$

De benodigde ballast is de hoogste van de twee aldus bepaalde waarden $G_{ballast}$.

7 Conclusies

Op basis van de inventarisatie van de huidige bouwvoorschriften op het gebied van de berekening van windbelasting, worden voor de toepassing van zonne-energiesystemen geplaatst op platte daken, de volgende conclusies getrokken.

- De huidige bouwregelgeving, zoals uitgewerkt in NEN 6702 voor het aspect windbelastingen, is niet expliciet toegesneden op de hier beschreven toepassingen. Dit is niet verwonderlijk, omdat bij het schrijven van dit normblad de ervaring met dergelijke toepassingen minimaal was.
- Om de windbelasting te bepalen kunnen een aantal gerichte, veilige waarden worden gehanteerd. Aan de hand van die waarden kunnen dan de ballastgewichten worden vastgelegd. Deze procedure is uitgewerkt, maar heeft als beperking dat toepassingen dicht bij de rand van het dak niet worden toegestaan.
- Voor de berekening van de ballast wordt naar twee mechanismen gekeken: Enerzijds moet kantelen van het systeem worden voorkomen, anderzijds mag het systeem niet gaan verschuiven als gevolg van de wind.
- Voor het minimaliseren van de benodigde ballast, bijvoorbeeld bij daken met grote overspanningen, met een stalen constructie, is een nadere, nauwkeurige bepaling van de vormfactoren vereist.
- Voor de wrijvingsconstante in de berekening van het verschuiven van de constructies zijn geen waarden bekend voor de hier beschreven toepassingen.

8 Aanbevelingen

Naar aanleiding van dit rapport zijn de volgende aanbevelingen geformuleerd:

- Aangeraden wordt met behulp van een experimenteel onderzoek te bepalen welke waarden voor de windvormfactoren gebruikt kunnen worden in de berekening van de windbelasting op plat-dak systemen. Hiervoor is inmiddels een deelproject in uitvoering, dat in een separaat rapport wordt beschreven. In dat deelproject wordt onder meer de invloed beschouwd van het type frame (gesloten of open) , de locatie op het dak, en mogelijke afscherming.
- Voor de bepaling van de windweerstand met als mechanisme verschuiven, zijn waarden nodig voor de wrijvingsweerstand tussen het platte dak en het materiaal waarvan de constructie is gemaakt, waarop de zonne-energiecomponent is gemonteerd. Aanbevolen wordt hiervoor een standaard beproevingsprocedure vast te stellen, op basis waarvan toekomstige systemen kunnen worden beoordeeld. In deze beproevingsprocedure zal onder meer aandacht besteed moeten worden aan de diverse mogelijke dakbedekkingen.