

PV panelen op industriële platte daken: invloed op de draagstructuur en terugverdientijd

Dries Depreeuw

Promotoren: prof. dr. ir.-arch. Jan Belis, prof. dr. Patricia Everaert
Begeleider: ir. Didier Delincé

Masterproef ingediend tot het behalen van de academische graad van
Master in de ingenieurswetenschappen: bouwkunde

Vakgroep Bouwkundige Constructies
Voorzitter: prof. dr. ir. Luc Taerwe

Vakgroep Accountancy en Bedrijfsfinanciering
Voorzitter: prof. dr. Ignace De Beelde

Faculteit Ingenieurswetenschappen en Architectuur
Academiejaar 2010-2011



Voorwoord

Het idee voor het onderwerp van deze masterproef groeide uit de ervaringen opgedaan toen de auteur werkte aan zijn masterproef voor het behalen van de master in industriële wetenschappen: bouwkunde met als onderwerp “De invloed van ventilatie op het rendement van zonnepanelen”.

Initieel was het de bedoeling om een haalbaarheidsstudie van PV-installaties te maken waarbij de meerkost voor het verzwaren van de constructie werd opgenomen.

Er bleken echter nog geen ontwerpmethodes van kracht om de windbelasting op zonnepanelen te begroten. Als bouwkundig ingenieur kon de auteur dit probleem niet negeren en al snel verschoof het zwaartepunt van deze masterproef naar het bouwkundige aspect. Bijgevolg is deze masterproef een vrij lijvig document geworden.

Dankwoord

De auteur wil Prof. ir.-arch. Jan Belis en Prof. Patricia Everaert bedanken voor het aanvaarden van dit onderwerp en het begeleiden van deze masterproef.

Veel lof voor de boeiende gesprekken en intensieve feedback van ir. Didier Delincé.

Deze masterproef zou echter niet tot stand gekomen kunnen zijn zonder de uitgebreide contacten met spelers uit de sector, waarbij ik volgende mensen uitdrukkelijk wil bedanken:

Betreffende de technische en praktische aspecten van PV-installaties wordt Mathieu Vandebulcke zeer bedankt voor de leerzame gesprekken. Veel succes gewenst met het nieuwe bedrijf Mind4Energy dat hij recent opstartte met enkele collega's! Met de knowhow die hij bezit lijkt een succesvolle toekomst verzekerd.

Bedankt ook Jan Desmet voor de vele info betreffende courante prijzen en uitvoeringswijzen.

Tot slot een woord van dank voor Koen Beyers van Voxdaele voor de verhelderende gesprekken over de stromingsproblematiek van zonnepanelen op daken.

De toelating tot bruikleen

"De auteur geeft de toelating deze masterproef voor consultatie beschikbaar te stellen en delen van de masterproef te kopiëren voor persoonlijk gebruik.

Elk ander gebruik valt onder de beperkingen van het auteursrecht, in het bijzonder met betrekking tot de verplichting de bron uitdrukkelijk te vermelden bij het aanhalen van resultaten uit deze masterproef."

"The author gives permission to make this master dissertation available for consultation and to copy parts of this master dissertation for personal use.

In the case of any other use, the limitations of the copyright have to be respected, in particular with regard to the obligation to state expressly the source when quoting results from this master dissertation."

06-06-2011

PV panelen op industriële platte daken: invloed op de draagstructuur en terugverdientijd

Dries Depreeuw

Promotoren: prof. dr. ir.-arch Jan Belis, prof. dr. Patricia Everaert
Begeleider: ir. Didier Delincé

Masterproef ingediend tot het behalen van de academische graad van
Master in de ingenieurswetenschappen: bouwkunde

Vakgroep Bouwkundige Constructies
Voorzitter: prof. dr. ir. Luc Taerwe

Vakgroep Accountancy en Bedrijfsfinanciering
Voorzitter: prof. dr. Ignace De Beelde

Faculteit Ingenieurswetenschappen en Architectuur
Academiejaar 2010-2011

Samenvatting

Op industriële daken zijn grote oppervlaktes beschikbaar waar men grote hoeveelheden aan zonne-energie zou kunnen opwekken met fotovoltaïsche (PV) toepassingen. Om de zonnepanelen onder een helling te plaatsen zodat maximale jaarlijkse zonnewinsten kunnen worden gerealiseerd, worden ze op een hulpstructuur gemonteerd. Deze wordt meestal los op het dak geplaatst en door toevoeging van ballast wordt ervoor gezorgd dat de modules op hun plaats blijven.

Door de ballast en de gewijzigde vorm van het dakvlak zijn extra lasten op de dakstructuur te verwachten. Om deze extra lasten te kunnen opnemen, zal de dakopbouw mogelijk aangepast moeten worden en zal de dakstructuur verzwakt moeten worden. Dit betekent een substantiële meerkost die moet worden opgenomen in de haalbaarheidsstudie van een PV-installatie op industriële daken.

Het opzet van deze masterproef is dan ook tweeledig: in eerste instantie wordt de impact op de dakstructuur begroot en vervolgens wordt deze meerkost begroot aan de hand van enkele case studies.

Deze meer kost bleek vrij groot, vooral bij daken met een lichte dakopbouw. Lokale effecten zorgen voor hoge, geconcentreerde lasten waardoor staalplaten, dakdichting en isolatie met een hogere weerstand zullen moeten worden gebruikt. Ook leek het in de filosofie van de Eurocodes aangewezen om de sneeuwlast met 20 kg/m^2 te verhogen. Het nodige doodgewicht van de geballasteerde systemen bleek navenant hoog: voor de casus die uitgewerkt werd, bleek dit 70 kg/m^2 . Lokaal liep dit op tot meer dan 150 kg/m^2 .

Dit vertaalde zich dan ook in een meerkost van 16 % op het totale investeringsbedrag van een PV-installatie.

Met deze verhoogde kost bleek de investering voor bedrijven niet meer aantrekkelijk. De terugverdientijd viel terug van 9,39 jaar tot 10,55 jaar voor het best case scenario waarbij het gros van de opgewekte energie zelf kan verbruikt worden. Installaties die hun productie integraal op het net injecteren bleken sowieso niet rendabel.

Er werd echter een grote discrepantie opgemerkt tussen theorie (volgens de Eurocodes) en praktijk: men blijkt slechts 10 à 20 kg/m² in te rekenen. Hoewel geen wetenschappelijke onderbouwing kon worden gevonden voor deze lage supplementaire belasting, blijkt het aantal schadegevallen tot op heden beperkt. Opdat de haalbaarheidsstudie toch representatief zou zijn voor wat er courant in de praktijk wordt toegepast, werd de casus hiervoor aangepast en werd de meerkost werd hiervoor op 6,5 % begroot.

Trefwoorden: zonnepanelen, windbelasting, haalbaarheidsstudie, IRR

Solar energy systems on industrial roofs: a stability and feasibility study

Depreeuw Dries

Supervisors: Prof. dr. ir.-arch Jan Belis, Prof. dr. Patricia Everaert

Abstract Industrial roofs have great potential for solar energy systems. Most systems are ballast mounted and induce considerable loads on the underlying construction. These loads were estimated according to Eurocodes and the impact was calculated for a 18 m by 48 m industrial hall in steel. The results were implemented in a feasibility study of a ballast-mounted PhotoVoltaic installation on the construction. The extra cost for the adjustments in the structural elements amounted to 6.5 % of the total investment cost for what is commonly adapted in practice. When the loads were calculated using the developed design method in accordance with the Eurocodes, the extra cost amounted up to 16 %.

Keywords ballast-mounted solar energy systems, wind, loads, feasibility study, IRR

I. INTRODUCTION

Current feasibility studies for solar energy installations on industrial roofs only consider the installation cost of the system. However, an additional, reasonable cost can be expected because the commonly used ballast-mounted systems induce extra loads on the structure which should be taken into consideration when designing the structure and its elements.

Since ballast-mounted systems are not attached to the underlying construction, extra dead weight should be added so that the modules can resist the imposed wind forces.

It is the quantification of the total dead weight needed per square meter to keep the systems in place that is of great discussion. Whereas it is a common practice in the industry to foresee only 10 to 15 kg/m², calculations in accordance with the Eurocodes require a much higher dead weight, amounting up to 100 kg/m² or more.

Because of this large discrepancy a literature study was carried out in order to determine what exactly is happening around the roof panels in windy conditions.

II. STABILITY STUDY

A. Design methods in Belgium

Constructions should be designed to resist certain loads based on the design methods given by the Eurocodes. These Eurocodes offer a pragmatic approach to commonly occurring design situations. However, as solar energy systems only recently became widely used on constructions due to grants warranted by local governments, no specific recommendations on this subject are to be found.

Additional information can be provided by national design guides. However, as for now there is no such guide in Belgium to determine the loads on inclined panels mounted on a roof.

In this study, the situation was divided into different scopes to evaluate the effect of the presence of these solar panels on a roof.

B. Approach

A roof in windy conditions can be divided into two regions with completely different flow regimes: a highly turbulent region close to the windward edges and a region where flow reattachment and a steadier wind flow occurs. For the latter it was found that the wind loads could be well estimated in accordance with the canopy roof specifications in the EN 1991-1-4 [1].

For the panels in a highly turbulent region only a study of Geurts et al. seemed representative [2].

Using these parameters the required dead weight could be calculated for the roof-mounted solar energy systems under different inclination angles and this for all construction heights in different wind climates as defined by the EN 1991-1-4.

Next to the wind loads one can also expect a higher snow load due to snow sliding down from the panels and accumulating underneath them where the snow will be less likely to melt as fast as usual. To estimate this effect the EN 1991-1-3 was used [3].

C. Results

In accordance with the wind model used in the Eurocodes the intensity of the wind load is highly variable with the building surroundings and the reference height on which the panels are installed.

The wind loads on a panel are found to be greatly affected by its position on the roof and its orientation toward the direction of the wind. As PV modules are mostly clustered in matrices on the roof, it was found that panels at the sides generally require double the amount of dead weight compared to a module which is surrounded by others on all sides.

Other design parameters of great influence are the inclination of the panel, the distance between the panels and the friction coefficient of the contact surface between the roof and the module.

For the snow load it seemed reasonable to increase it from 40 kg/m² to 60 kg/m² due to accumulation of snow.

The combination of these loads leads into very high locally concentrated loads which should be well addressed in the design of the roof components.

The structural analysis on a global scale showed that the dead weight of the installation can average between 25 kg/m² and 100 kg/m² or more, all depending on the design parameters specified.

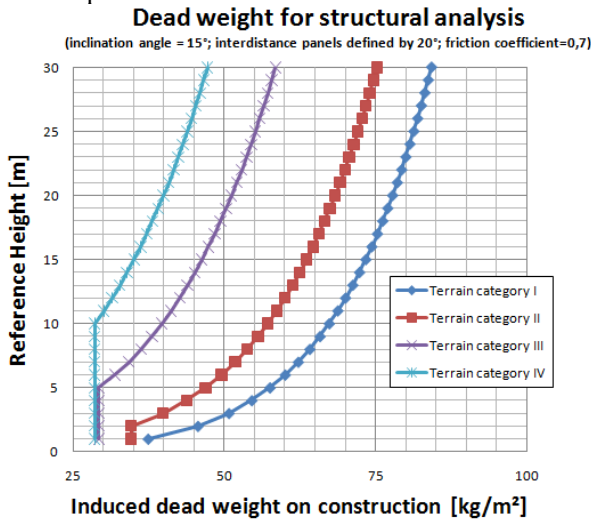


Figure 1 Dead weight for structural analysis

Due to friction of the wind in the region of the roof where reattachment occurs, it seems that a higher global horizontal load can be expected on the construction.

III. FEASIBILITY STUDY

A. Earning out of solar energy systems in Flanders

Local government recently decided to have a steep decrease in time for the guaranteed income out of electricity production from solar energy. Hence it seemed interesting to examine the effect of this lower guaranteed income for installations which would come operational in the next year.

Two cases were examined: a situation where most of the production is directly used (production hall) and one where most of the electricity is sold to the market after full injection in the electricity net (storage facilities).

B. Approach

The cost of the adjustments needed to build a solar energy installation on a roof is highly dependent on the type of construction and its geometrical characteristics. Therefore, a case study was carried out for a typical industrial hall in steel with a height of 9 m, width of 18 m and length of 48 m. The building was placed in an industrial surrounding with a relatively open space. The installation amounts for 49.2 kWp with a price of 2.5 €/Wp.

Dead weight and other loads were calculated for a ballast-mounted solar system under an inclination angle of 15°. Interdistance of the panels was determined by an angle of 20° and a friction coefficient of 0.7 was assumed.

This resulted in extra dead weight of 70 kg/m² and a snow load of 20 kg/m² compared to the loads on the construction without a PV installation.

Because the loads calculated in accordance to the Eurocodes proved to be in great discrepancy with what is commonly used in practice, the effect of only adding a dead weight of 20 kg/m² and increasing the roofing and plate thickness to withstand the concentrated loads was studied.

C. Results

The total investment cost by taking the cost for adapting the construction into account, increased by 6.5% or 16 % depending on which load scheme was used for both cases. An installation where most of the solar energy produced is to be sold to the market does not seem profitable at all. For the production hall the IRR dropped below the interest rate at which most companies might seem to consider the investment (8.5%).

Table 1 Internal Rate of Return investment PV system

	No constr. cost	With cc. According to practice	With cc. According to calculations
Production hall	8.96%	8.30%	7.49%
Storage facilities	5.27%	4.71%	4.03%

Taking into account that i. the construction is yet to be built and ii. lower grants will be issued in the future, the investment no longer seems viable at all, unless prices for solar energy installations would continue to drop in the next few years.

Table 2 IRR for different dates of completion (with cc from practice)

	2011		2012		
	July to September	October to December	January to March	April to June	July to December
Production hall	8.30%	7.58%	7.10%	6.61%	6.13%

IV. CONCLUSION

The adaptations needed for a construction to be able to withstand the loads of ballast-mounted solar energy systems on the roof amount to an extra cost which cannot be neglected in a feasibility study for such systems.

There is a great discrepancy which should be addressed between loads calculated according to Eurocodes and those currently used by the industry. Further research is needed, especially concerning the behavior of wind flow patterns on the roof around the inclined panels clustered in a matrix.

ACKNOWLEDGEMENTS

The author would like to thank Prof. Jan Belis and Prof. Patricia Everaert for accepting this paper's subject proposal. Didier Delincé is greatly appreciated for the enlightening discussions and his intensive feedback.

This paper could not have been realized without the expert field knowledge of Mathieu Vandenbulcke, Koen Beyers and Jan Desmet.

REFERENCES

- [1] *Wind loads on solar energy roofs*. Geurts, Chris P.W. en van Benthum, A. 2007, HERON Vol. 52 No. 3, pp. 201-222.
- [2] EN 1991-1-4:2005
- [3] EN 1991-1-3:2003

Inhoudsopgave

Inleiding	1
Deel I: Fotovoltaïsche Toepassingen	3
1 Beschrijving van de installatie [3].....	4
1.1 De zonnecellen	4
1.2 Opbouw van een paneel.....	7
1.3 Omvormer	8
1.4 Netaansluiting	9
2 Beïnvloeding van het rendement [3].....	11
2.1 Bestraling.....	11
2.2 Oriëntatie en helling van de modules	12
2.3 Beschaduwning.....	13
2.4 Temperatuur.....	13
2.5 Ventilatie	13
2.6 Verliezen veroorzaakt door de verschillende componenten	14
2.7 Overzicht verliezen	15
3 Bouwkundige toepassingen	16
3.1 Zonnepanelen op daken.....	18
3.2 Fotovoltaïsche façades	22
3.3 Transparante systemen	23
3.4 Zonnewering systemen	23
3.5 Stand-alone PV-systemen.....	24
Deel II: Bouwtechnisch	25
1 Inleiding	26
2 Overzicht deel II.....	28
3 Wind	29
3.1 Algemeen.....	29
3.2 Invloed van de omgeving.....	29
3.3 Aanzet snelheidsprofiel	31
3.4 Gemiddelde windsnelheid.....	33
3.5 Basiswindsnelheid	35

3.6	Turbulentie	35
3.7	Piekstuwdruk	36
3.8	Referentiehoogte	36
4	Winddruk op een oppervlak	37
4.1	Algemeen.....	37
4.2	Tekenafpraak volgens EN 1991-1-4	37
4.3	Lokale & globale effecten	38
4.4	Achtergrond drukcoëfficiënten	38
4.5	Resulterende krachten	39
5	Stroming op dak	40
5.1	Algemeen.....	40
5.2	Turbulente zone	40
5.3	Zone met vrije aanstroming	41
5.4	Invloed obstructies	41
5.5	Drukcoëfficiënten volgens EN 1991-1-4.....	42
6	Stroming aan de modules.....	47
6.1	Algemeen.....	47
6.2	Proefmodellen	47
6.3	Invloedsfactoren winddrukken op PV panelen	52
6.4	Drukcoëfficiënten	55
6.5	Besluit	66
7	Opbouw hulpstructuur	67
7.1	Algemeen.....	67
7.2	Grootte van de hulpstructuur	67
7.3	Wrijvingscoëfficiënt.....	69
7.4	Contactvlak en indrukking	70
7.5	Helling dakvlak en waterstagnatie	70
7.6	Thermische zettingen	70
8	Sneeuwbelasting	71
8.1	Sneeuw op begane grond.....	71
8.2	Sneeuw op dak	71
8.3	Sneeuwlast vormcoëfficiënt.....	72

8.4	Bemerkingen	73
9	Opgelegde belasting.....	75
10	Ontwerpregels.....	76
10.1	Algemeen.....	76
10.2	Grenstoestanden.....	77
10.3	Gevolgklassen & ontwerplevensduur.....	79
10.4	Besluit.....	81
11	Impact op constructie.....	82
11.1	Inleiding	82
11.2	Faalmodi	82
11.3	Casus.....	84
11.4	Besluit.....	105
12	Algemeen besluit.....	106
Deel III:.....		107
Haalbaarheidsstudie.....		107
1	Inleiding.....	108
2	Kosten.....	109
2.1	prijs installatie	109
2.2	Meerkost aanpassen dakstructuur.....	111
2.3	Andere	113
3	Opbrengsten.....	115
3.1	Elektriciteit	115
3.2	Financiële ondersteuning	118
3.3	Levensduur van de installatie.....	124
4	Toelichting tools uit de investeringsanalyse	125
4.1	Algemeen.....	125
4.2	Payback Period	125
4.3	Netto Present Value	125
4.4	Internal Rate of Return.....	126
4.5	Inflatie.....	126
4.6	Tijds waarde	127
5	Case study.....	128

5.1	Beschrijving.....	128
5.2	Kosten.....	129
5.3	Opbrengsten.....	133
5.4	Samenvatting.....	135
5.5	Resultaten.....	136
6	Besluit.....	138
	Bijlagen.....	139
	Bijlage A: Piekstuwdrukken.....	139
	Bijlage B: Doodgewicht geballasteerd systeem bij verstoren glijdingsevenwicht.....	141
	Bijlage C: Technische fiche geprofileerde staalplaat HACIERCO 106.....	145
	Bijlage D: Kasstromen haalbaarheidsstudie.....	146
	Bibliografie.....	151

Symbolenlijst

A	oppervlak[m ²]
C _d	grenswaarde [-]
C _{dir}	richtingsfactor[-]
C _f	krachtscoëfficiënt[-]
C _o	orografiefactor[-]
C _p	drukcoëfficiënt[-]
C _{pe}	uitwendige drukcoëfficiënt[-]
C _{pe,1}	lokale uitwendige drukcoëfficiënt[-]
C _{pe,10}	globale uitwendige drukcoëfficiënt[-]
C _{pi}	inwendige drukcoëfficiënt[-]
C _{p,net}	netto drukcoëfficiënt[-]
C _s C _d	bouwwerkfactor[-]
C _{season}	seizoensfactor[-]
C _r	ruwheidfactor[-]
E	Effect van belasting
F	kracht[N]
G	permanente belasting
I _v	turbulentie-intensiteit[-]
p	druk[Pa]
Q	variabele belasting
q _p	piekstuwdruk[N/m ²]
R	Weerstand
s	sneeuwbelasting op dak[N/m ²]
S _k	sneeuwbelasting op begane grond[N/m ²]
v	windsnelheid[m/s]
v _b	basiswindsnelheid[m/s]
v _{b,0}	fundamentele windsnelheid[m/s]
v _m (Z)	gemiddelde windsnelheid[m/s]
W	winddruk[N/m ²]
X	Straal hoeksector bij bepalen terreincategorie[m]
Z ₀	Terreinruwheid[m]
Z _e	Referentiehoogte[m]
Z _{min}	minimumhoogte[m]
α	hellinghoek paneel[°]
γ	partiële veiligheidscoëfficiënt[-]
φ	reductiefactor [-]
ρ	densiteit lucht[kg/m ³]
μ	Wrijvingscoëfficiënt[-]
μ _i	sneeuwlast vormcoëfficiënt[-]
ψ _{mc}	Blokkadecoëfficiënt[-]
Ψ ₀	combinatiecoëfficiënt[-]
	subscript
e	uitwendig
d	rekenwaarde belasting
fr	inwendig
G	permanente belasting
i	wrijving
k	karakteristieke waarde voor belasting

Q ref	variabele belasting referentie
----------	-----------------------------------

Verklarende woordenlijst

Dak-/draagstructuur: elementen die zorgen voor de stabiliteit van het dak en/of de constructie.

Downforce: situatie waarbij de winddruk een resultante naar onder krijgt, dit loodrecht op het aangrijpende vlak.

Glijdingsevenwicht: die toestand waarbij het evenwicht nog net bewaard blijft alvorens het geheel verschuift.

Hulpstructuur: onderdeel van de PV installatie waarop de zonnepanelen bevestigd zijn en die de aangrijpende krachten op het paneel overbrengen/verdelen naar het dakvlak. Nodige ballast wordt hieraan bevestigd.

Kantelevenwicht: die toestand waarbij het evenwicht nog net bewaard blijft alvorens het geheel omkantelt.

Laminair: stroming waarbij de luchtlagen zich parallel ten opzichte van elkaar voortbewegen.

Module: het paneel met het aandeel van de hulpstructuur die per paneel kan toegewezen worden. In referentie tot het dakvlak is dit de verticale projectie van het paneel verhoogd met de tussenruimte tot het volgende paneel.

PV: afkorting voor PhotoVoltaic, fofovoltaïsch: omzetting van licht naar elektriciteit.

Terugkeerperiode: wordt gehanteerd voor de statistische benadering van stochastische belastingen zoals wind en sneeuw. Een waarde voor een terugkeerperiode van bijvoorbeeld 10 jaar drukt een waarschijnlijkheid van 100% uit dat deze waarde in deze periode minstens eenmaal zal worden overschreden.

Turbulent: stroming gekenmerkt door een wervelend patroon. Veel stroming loodrecht op de hoofdstroom.

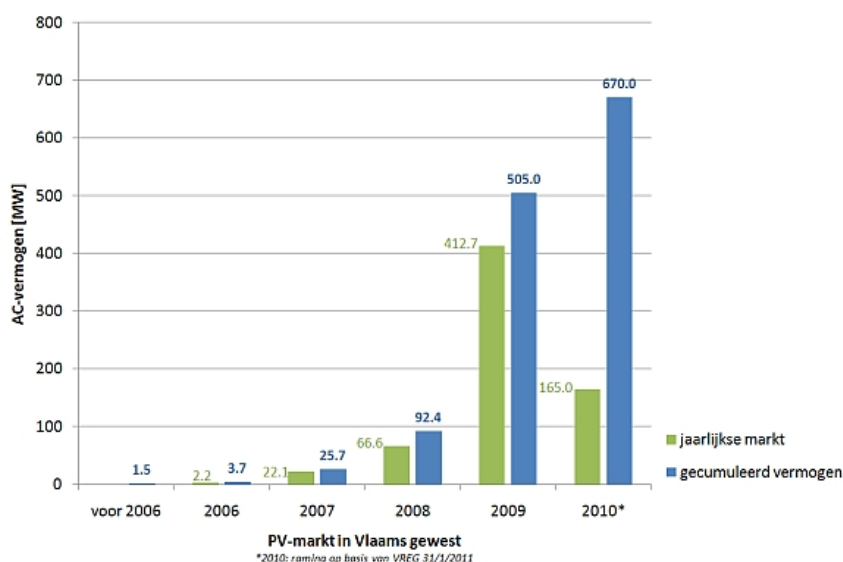
Uplift: situatie waarbij de winddruk een resultante naar boven krijgt, dit loodrecht op het aangrijpende vlak.

Wattpiek[Wp]: nominaal vermogen van een zonnepaneel/-installatie onder standaard test condities(STC), waaronder een bestraling van 1000 W/m^2 en $25 \text{ }^\circ\text{C}$.

Inleiding

Zonnepanelen waren niet weg te denken uit de media het voorbije jaar. Aanleiding van de discussie was het herzien van de premies voor deze fotovoltaïsche toepassingen. Hoewel er sinds dag één reeds een degressief stelsel werd vastgelegd waarbij de steun de meerprijs t.o.v. de klassieke vormen van energiewinning moest bijpassen, zou men de steun nog sneller willen afbouwen.

De laatste jaren bleek de markt voor zonnepanelen spectaculair gegroeid, misschien iets te spectaculair.



Figuur 1: PV- markt in het Vlaamse gewest [1]

De drijvende kracht achter deze groei zijn de groenestroomcertificaten (GSC). Per 1.000 kWh geproduceerde energie wordt zo'n certificaat uitgereikt dat vergoed dient te worden door de netbeheerders aan een vastgelegde minimumprijs. Andere vormen van groene energie zoals windenergie, biomassa, biogas en waterkracht worden ook via dit systeem gestimuleerd. Jaarlijks moeten de netbeheerders aan de hand van deze GSC kunnen aantonen dat een zeker quotum van de totale energieproductie uit groene energie bestaat. Op 31 maart 2010 bleken de netbeheerders over een overschot van 2.262.000 GSC te beschikken, bijna voldoende om het quotum voor het volgend jaar te halen. Hoewel tegen 2020 de jaarlijkse einddoelstelling van 13% is, was enige bijsturing wel aangewezen. Maar hoeveel precies was nu net het discussiepunt.

Tabel 1: Resultaten van de voorbije inleveringsrondes van groenestroomcertificaten [2]

INLEVERDATUM	Quotum	In te leveren GSC op 31/3	GSC beschikbaar op 31/3	Ingeleverde GSC
31/03/2003	0,80%	313.192	199.203	115.132
31/03/2004	1,20%	409.959	393.009	259.125
31/03/2005	2,00%	850.960	800.798	650.610
31/03/2006	2,50%	1.061.176	1.206.073	1.025.450
31/03/2007	3,00%	1.269.650	1.587.945	1.268.311
31/03/2008	3,75%	1.589.781	2.061.134	1.587.281
31/03/2009	4,90%	2.077.894	2.540.586	2.073.043
31/03/2010	5,25%	2.073.201	3.120.099	2.072.013
31/03/2011	6,00%	2.543.663	nog niet beschikbaar	nog niet beschikbaar

Toen de netbeheerders bekend maakten dat wegens het enorme succes van deze premies de gemiddelde prijs voor elektriciteit voor een modaal gezien met 70 € zou verhogen, ontplofte de bom. Burenruzies en klassennijd staken overal de kop op. Een algemene klacht weerklinkt: 'De gewone burger moet alweer opdraaien voor het winstbejag van meerbegoeden en grote bedrijven.'

Toch is het belangrijk dat er een maatschappelijk draagvlak gecreëerd wordt dat de overgang naar groene energie mogelijk maakt. De huidige energievoorziening is vooral gefundeerd op fossiele brandstoffen en nucleaire energie. Niet alleen zijn de voorraden hiervan eindig maar genereren ze brede maatschappelijk en ecologische problemen. Zo zou de klimaatopwarming grotendeels te wijten zijn aan het uit evenwicht brengen van de CO₂ balans door de opgeslagen reserves onder de vorm van olie en gas terug de lucht in te blazen. Dat kernenergie ook niet zonder enig risico is, werd dit jaar aangetoond door de ramp in Fukushima.

Risico's en externe kosten die aan de klassieke vormen van energiewinning gekoppeld zijn, zijn nagenoeg onbestaande bij zonne-energie. Enerzijds moet men deze kosten gaan internaliseren in de prijszetting van onze energievoorziening en anderzijds dient groene energie economisch interessant gemaakt te worden, m.a.w. een investering in zonnepanelen moet renderen.

In tegenstelling tot energieopwekking op basis van fossiele brandstoffen en kernenergie, heeft men bij energiewinning uit zonne-energie nagenoeg geen operationele kosten. Het vergt enkel een grote initiële investering die vervolgens met een minimum aan onderhouds- of herstellingskosten 20 tot 30 jaar rendeert. Daarom is een zorgvuldige analyse van de investeringskost en een prognose van de opbrengsten cruciaal.

Installateurs van PV-systemen goochelen momenteel met terugverdiertijden van 4 tot 7 jaar. In deze haalbaarheidsstudies wordt echter heel wat over het hoofd gezien, wat tot extra kosten leiden. De voornaamste meerkost is de impact op de constructie waarop de PV-installatie geplaatst wordt. Naast een niet te verwaarlozen dood gewicht van de panelen en hun hulpstructuur zullen ze afhankelijk van hun montagewijze ook extra windlasten aantrekken. Vergelijk het met de spoiler op een sportwagen die het chassis dichter bij de grond aandrukt bij hoge snelheden of het omverwaaien van uw parasol op een winderige stranddag.

De dakstructuur wordt dus onderworpen aan een hogere last dan voorheen. Wanneer de constructie zich nog in een ontwerpfase bevindt, zal dit zich vertalen in een zwaarder ontwerp van de dakstructuur en dus ook een extra kost.

Voor bestaande constructies moet men nakijken of ze de extra lasten wel kunnen dragen. Bij woningen vormt dit meestal geen probleem aangezien de dakconstructie voldoende stevig wordt gebouwd. Bij industriële daken is dit anders, hier werd de dakstructuur danig geoptimaliseerd zodat ze voor een zo laag mogelijke kost toch nog zijn functie te kan uitvoeren. Bijgevolg is er meestal weinig marge om de extra lasten van een PV-systeem op te nemen.

Maar wat zijn die extra lasten en hoe groot kunnen ze worden? Momenteel zijn in er België nog geen normen van toepassing die hier een antwoord kunnen op geven. Producenten zijn aangewezen op eigen onderzoek en ervaring. Dit geldt ook voor de studiebureaus die meestal de dakstructuur van industriële daken te ontwerpen. Daarom leek het aangewezen om de literatuur te raadplegen en een oplossing te zoeken, wat ruim aan bod komt in deel II.

Eens de extra lasten bepaald zijn, kan de meerkost die ze met zich meebrengen worden opgenomen in een haalbaarheidsstudie. Een uitgebreide casus en algemene beschouwingen met betrekking tot de haalbaarheid van PV werden opgenomen in deel III.

In deel I wordt de werking van een PV installatie nader toegelicht en worden de meest voorkomende toepassingen opgesomd.

Deel I: Fotovoltaïsche Toepassingen

1 Beschrijving van de installatie [3]

Hieronder worden de verschillende componenten, nodig voor een fotovoltaïsche installatie, kort besproken. Achtereenvolgens worden behandeld: de zonnecellen, de panelen, de omvormer en de netaansluiting.

1.1 De zonnecellen

Wanneer twee niet identieke halfgeleiders (deze atoombindingen kunnen immers gemakkelijk verbroken worden) met elkaar in contact worden gebracht en aan het licht worden blootgesteld, komt een elektriciteitsstroom op gang tussen deze halfgeleiders. Men spreekt van een fotovoltaïsche omzetting. Fotovoltaïsch is een samenvoeging van het Griekse woord "*Photo*" (licht), en het woord "*voltaic*" (van Volt) wat letterlijk "*Volt verkregen door licht*" betekent.

Een zonnecel bestaat meestal uit twee verschillend geladen lagen. Om een laagje positief of negatief op te laden maakt men gebruik van onzuiverheden. Indien bijvoorbeeld silicium wordt genomen als basismateriaal voor een zonnecel, dan kan men in de ene laag een kleine hoeveelheid fosfor (3-waardig atoom) aanbrengen, in de andere laag een kleine hoeveelheid borium (5-waardig atoom). Dit proces wordt doperen genoemd. Deze twee lagen zijn dan respectievelijk positief en negatief geladen. Door deze verontreinigingen wordt er een overschot aan elektronen in de halfgeleiders verkregen. De zonnecel is dus feitelijk een p-n junctie zoals terug te vinden in een diode, een van de basiscomponenten van de elektronica.

Indien men nu een stroomkring met spanningsbron aansluit op de zonnecel, dan zou deze zonnecel dezelfde eigenschappen vertonen als een foto-diode. Door het invallende zonlicht op de zonnecellen zullen de fotonen op verschillende diepte (afhankelijk van de golflengte) in de halfgeleider worden geabsorbeerd. Indien zo'n foton voldoende energie bevat, kan het ervoor zorgen dat er een valentie-elektron van een atoom van het halfgeleidermateriaal wordt vrijgemaakt. Er zullen elektronen van het positieve laagje(p) naar het negatieve laagje(n) bewegen wanneer er gat-elektronen in de barrièrelaag worden gevormd. Door de stroming van gaten van de negatieve laag naar de positieve laag ontstaat er een potentiaalverschil tussen het p-n gebied.

Uitgebreide informatie over werking, elektrische eigenschappen, productie, ed. van zonnecellen, of PV-cellen, kan men terugvinden op <http://www.pveducation.org/pvcdrom>.

Om de stroom te kunnen geleiden, wordt er een netwerk van dunne metallische aansluitingen (ook busbars genoemd) voorzien op de voorkant van de zonnecellen. Deze aansluitingen worden bekomen door opdamming¹. Op de achterzijde van de cel wordt meestal een dunne film van aluminium opgedampt.

De belangrijkste eigenschap van zonnecellen is hun rendement: de mate waarin invallend zonlicht kan omgezet worden in elektrische energie. Commerciële cellen halen een rendement tot 18%. In onderzoek naar nieuwe technologieën werd recent een omzetting van maar liefst 41,1% gehaald [4].

1.1.1 Silicium zonnecellen

Silicium is het meest geschikte materiaal om te gebruiken als grondstof voor de massaproductie van zonnecellen, of het nu van natuurlijke oorsprong is dan wel in een laboratorium werd vervaardigd. Het materiaal biedt tal van voordelen, de belangrijkste worden hier opgesomd. Silicium is bijna in onbeperkte hoeveelheden beschikbaar; bijna 60% van de aardkorst bestaat uit SiO_4 . Het hoofdbestanddeel van dit SiO_4 is kwartsiet of siliciumdioxide (SiO_2). Aangezien dit natuurlijke silicium niet zuiver genoeg is voor de productie van zonnepanelen wordt het kwartsiet gereduceerd met cokes via de EAF² methode. Hierdoor bekomt men een zuiverheid van 'slechts' 98 à 99% (dit is onbruikbaar

¹ Opdammen is een depositietechniek om dunne lagen op een substraat aan te brengen.

² Electric Arc Furnace: Een vlamboogoven is een oven waarin het materiaal wordt opgewarmd door een vlamboog tussen de elektroden en het materiaal.

voor elektrische toepassingen). Vervolgens wordt dit 'onzuivere' silicium verder gezuiverd totdat het onzuiverheidsgehalte een concentratie heeft van 0,1 ppma³, dit betekent een zuiverheid van 99,99999%. Om het silicium te zuiveren kan men ook gebruik maken van metallurgische methodes zoals slakkenvorming en uitsmelten, al is deze zuiverheid nog altijd niet goed genoeg voor de halfgeleiderindustrie.

Verder is silicium ook niet giftig, smelt het gemakkelijk en kan het goed bewerkt en verwerkt worden. Hierna worden de 3 meest gebruikte vormen besproken van silicium. Het stollen van het gesmolten silicium en de kristalstructuur die het oplevert, zal bepalend zijn voor het rendement.

1. Mono-kristallijn silicium

Zoals de naam het zelf zegt bestaan deze cellen uit een één enkel stollingskristal die vervolgens in fijne plakjes werd gesneden. Het grote stollingskristal zal eerder rond van vorm zijn, dit verklaart waarom de meeste mono-kristallijne cellen afgeronde randen hebben. Cellen uit dit materiaal halen een rendement van 15 tot 18% [5] en ze vertegenwoordigen een marktaandeel van circa 30% [6]. Voor de productie van mono-kristallijn silicium gebruikt men het 'afval' of de overschot van de wafers (dunne plak kristallijn halfgeleidermateriaal) uit de micro-elektronica industrie.

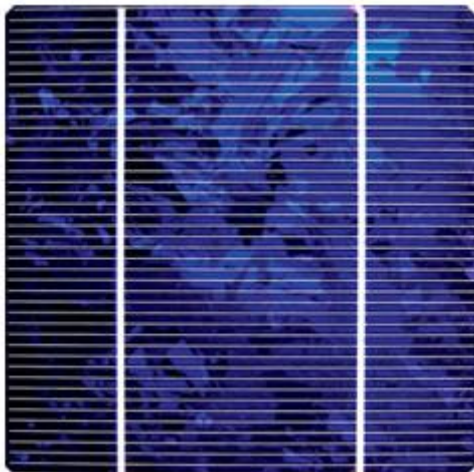
2. Polykristallijn silicium

Zonnecellen vervaardigd uit polykristallijne silicium hebben een rendement van 13 tot 16% en deze zonnecellen hebben tegenwoordig een marktaandeel van 46,5% [5].

De zonnecellen worden gekenmerkt door de vele afzonderlijke kristalkorrels die gescheiden worden door korrelgrenzen. De korrelgrootte varieert van 1 tot 100 μm . Voor de productie van polykristallijn silicium kan men twee verschillende productiemethoden beschouwen: enerzijds de productie tot vorming van balken en anderzijds tot linten (zeer dunne plaatjes).

A. Balken

De productie van polykristallijne zonnecellen begint bij het smelten van brokstukken silicium. Deze liquide substantie wordt vervolgens overgegoten in een grafieten kroes met vierkante sectie (hierdoor hebben de zonnecellen uiteindelijk een vierkante vorm). Door een gecontroleerde combinatie van afkoeling en verhitting zorgt men ervoor dat het mengsel koelt in een bepaalde richting. De bedoeling van deze gecontroleerde koeling is het vormen van een groot aantal silicium kristallen met een zo groot mogelijke celstructuur [5].



Figuur 2: PV Polykristallijne silicium [94]

Het gekoelde materiaal wordt dan in schijven gezaagd (wafers) met behulp van een draadzaag. Opmerkelijk is dat door het verzagen van deze balken er een materiaalverlies ontstaat van 50% [5]. De bekomen wafers hebben een benaderde dikte van 0,3 mm.

Om tot de eigenlijke zonnecellen te komen ondergaan de 'ruwe' wafers enkele specifieke stappen. Eerst worden de schijven gepolierd, hierna volgt er een chemische reiniging (om eventuele fouten veroorzaakt door het verzagen te verwijderen), gevolgd door een doping met behulp van fosfor.

B. Linten

³ Parts per million atomic

Om het materiaalverlies van 50%, veroorzaakt door het verzagen van de polykristallijne balken, te vermijden, heeft men verschillende lint-trek processen ontwikkeld. Bij deze processen trekt men dunne films rechtstreeks uit het gesmolten silicium. Hierdoor hebben de bekomen silicium wafers al de noodzakelijke dikte. Deze methodes zijn veel economischer qua materiaal- en energiegebruik en kunnen voor een significante kostenreductie zorgen. De EFG (Edge defined film-fed growth) methode is het meest gekend. Een achthoekige matrijs wordt gedoopt in gesmolten silicium en eruit getrokken aan een snelheid van 1 mm/s. Dit creëert een achthoekige pijp die tot 6,5 meter in lengte kan worden. De wafers worden vervolgens uit de achthoekige vorm gesneden. De bekomen wafers hebben een afmeting van 10 cm op 12,5 cm en zijn 0,3 mm dik. Vervolgens worden dezelfde stappen ondernomen als bij de gezaagde wafers om de eigenlijke zonnecellen te bekomen [5].

1.1.2 Amorfe cellen

De derde soort silicium zonnecellen, amorfe silicium cellen, hebben een rendement van 5 à 7%. Het beperkter materiaalverbruik en de eenvoudigere productie zorgen ervoor dat amorfe cellen minder kosten dan de voorgaande cellen. Deze zonnecellen hebben een marktaandeel van 4,7%. Een bijkomend voordeel van deze amorfe cellen is dat ze flexibel zijn en dus op eender welke dakvorm gelegd kunnen worden [5].

Amorf silicium bestaat, in tegenstelling tot kristallijn silicium, uit een netwerk van Si atomen zonder een regelmatig geordend kristalrooster. Dit silicium wordt niet uit een blok silicium gezaagd zoals bij de voorgaande kristallijnmaterialen maar wordt op een ondersteunend materiaal “opgedampt”.

Een van de grote voordelen van dit materiaal is het feit dat amorf silicium meer uniform is over grotere oppervlaktes. Aangezien amorf silicium van nature uit vele onzuiverheden bevat, zullen externe onzuiverheden of andere fouten de karakteristieken van het materiaal niet te veel wijzigen (en dus aantasten) en dit in tegenstelling tot mono- en polykristallijn silicium. Zoals reeds gezegd, ligt het rendement bij amorfe cellen aanzienlijk lager dan bij de kristallijne cellen. Dit komt doordat er relatief weinig silicium wordt gebruikt.



Figuur 3: Toepassing van amorfe zonnecellen op het dak van een industrieloos [96]

Vaak worden er meerdere laagjes amorfe cellen op elkaar geplaatst om de efficiëntie te verhogen. Amorfe cellen kennen vele toepassingen: amorfe PV-films, amorfe PV-lei modules, metalen dakbanen, dakrollen. Ook worden ze gebruikt in kleinere toepassingen zoals polshorloges en zakrekenmachines.

1.1.3 Koper-indium-diselenide

Door zijn afgeleide samenstellingen en de cadmiumsulfide kan men met koper-indium-diselenide (CuInSe_2), ook wel CIS genoemd, ook dunne-film zonnecellen maken op glas. Deze zonnecellen hebben een marktaandeel van 0,2%. CIS modules zijn vandaag de dag de meest efficiënte dunne-film modules die er op de markt verkrijgbaar zijn. Deze zonnecellen zijn op zeer kleine oppervlakten ($\pm 0,4\text{cm}^2$) zeer efficiënt, aangezien ze in dat geval een rendement hebben van 18%. Dit rendement daalt al zeer snel

naar een goede 9 tot 11% indien men overgaat naar grotere oppervlakten. Een nadeel is wel de beperkte beschikbaarheid van het component indium.

1.1.4 Cadmiumtelluride

CdTe is een kristallijn mengsel van cadmium en tellurium. Het wordt meestal gecombineerd met cadmium sulfide om een p-n junction zonnecel te maken. Deze zonnecellen hebben een marktaandeel van 2,7%. Net zoals de CIS technologie zijn de CdTe cellen uiterst efficiënt op kleine oppervlakten en niet zo efficiënt op grotere. Ze behalen dan immers een rendement van 7 – 8,5% [5]. De CdTe technologie heeft de laagste productiekost van al de dunne- film zonnecellen en vergelijkende voor- en nadelen als bij CuInSe_2 , maar een bijkomend nadeel is de giftigheid van Cd bij breuk of afbraak van de modules. Deze zonnecellen worden bijvoorbeeld ook nog gebruikt in zakrekenmachines.

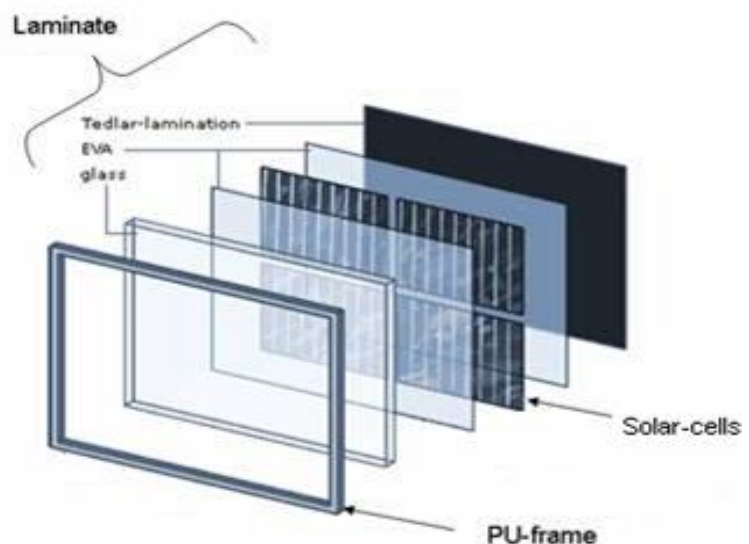
1.1.5 Organische cellen

De naam organisch slaat op het gebruik van organische polymeren die ook gebruikt worden in de polymeer elektronica. Het grote voordeel van deze moleculen is dat ze zeer geschikt kunnen zijn voor massaproductie en dat aan een lage kost. Door het gebruik van deze moleculen kunnen flexibelere, goedkopere, “plastieken zonnecellen” worden gecreëerd. Het is een techniek die nog volop in ontwikkeling is maar alvast veelbelovend lijkt. De grote beperkingen zijn momenteel hun laag rendement (3 tot 7% [5]) en hun korte levensduur wegens een hoge gevoeligheid aan UV licht en oxidaties.

1.2 Opbouw van een paneel

Losse zonnecellen kunnen niet gebruikt worden om elektriciteit op te wekken: ze zijn immers breekbaar, de metalen componenten zijn vochtgevoelig en ze wekken een te kleine spanning en stroom op. Daarom worden de zonnecellen met elkaar verbonden door middel van gesoldeerde ribbons. Men kan de zonnecellen ofwel in serie ofwel in parallel met elkaar verbinden. Men kiest voor serie geplaatste zonnecellen indien men een hoger voltage wenst. In die gevallen waarbij men werkt met modules met een groter uitgangsvermogen worden verschillende in serie geplaatste zonnecellen parallel geschakeld [5].

Een zonnepaneel bestaat uit een licht doorlatende plaat (meestal glas, maar kan ook kunststof zijn). Het is belangrijk dat de plaat voldoende licht doorlaat. Daarom wordt wit glas gebruikt met een laag ijzer gehalte, waardoor 92% van het licht wordt doorgelaten. De resterende 8% wordt meestal verloren door reflectie, daarom voorzien fabrikanten een anti-reflecterende coating op het glas. Door deze laag aan te brengen kan men de reflectie herleiden tot slechts 3% [5]. Door deze laag krijgen de silicium zonnecellen hun blauwe kleur. Andere kleuren zijn mogelijk mits men de samenstelling van de antireflecterende laag verandert. Het rendement zal



Figuur 4: Opbouw van standaard zonnepaneel [97]

hierdoor echter dalen. Aan de achterkant wordt een beschermende laag geplaatst: de tedlar⁴ (voor transparante zonnepanelen wordt deze laag vervangen door een glazen plaat zodat niet omgezet licht nog doorheen het paneel zal reizen). Deze laag zorgt voor de waterdichtheid, dampdichtheid en warmtegeleiding. Om de zonnecellen te beschermen tegen weersomstandigheden en vochtigheid worden de zonnecellen in een transparant bindingsmateriaal geplaatst. Dit materiaal zorgt er immers ook voor dat de cellen elektrisch geïsoleerd zijn. Courant worden er 4 verschillende inkapseling materialen gebruikt: EVA, polyvinyl butyral, teflon of met vloeibare harsen. EVA (ethyl vinyl acetaat) wordt het meest toegepast.

Bij de drie eerst vernoemden wordt het geheel vervolgens in een laminator geplaatst; hierin wordt alles verhit zodat alles met elkaar versmelt en er één geheel ontstaat. Tenslotte wordt er een aluminiumkader (PU kader) voorzien ter bescherming en voor de bevestiging.

1.3 Omvormer

De omvormer is van groot belang bij fotovoltaïsche systemen. Hij zorgt ervoor dat de gelijkspanning wordt omgezet in wisselspanning en doet dit door de spanning over de zonnecellen danig te sturen dat een maximaal vermogen wordt opgewekt. Dit noemt men het Maximum Power Point Tracking. Indien meerdere zonnepanelen met elkaar worden verbonden, dan dienen deze een gelijkaardige oriëntatie en hellingshoek te hebben. Indien dit niet het geval is dan zullen de stromen in de verschillende strings (een string = een in serie geplaatste groep zonnepanelen) ongelijk zijn, hierdoor kan de MPP tracker geen eenduidige MPP vinden. Een omvormer met 2 of meer MPP trackers kan hier soelaas brengen. Algemeen geldt dat het zoeken naar dit optimale punt voor twee verliezen zorgt. Men heeft namelijk de zoekverliezen, de omvormer moet namelijk altijd naar het maximum zoeken in de vermogenskarakteristiek. Dit kan door de spanning te fluctueren. Hierdoor zal de spanning rond de MPP spanning variëren waardoor het vermogen ook altijd lager of gelijk gaat zijn aan het vermogen bij de MPP. Een tweede soort verliezen verkrijgt je door de zogenaamde rimpelstroomverliezen. Deze komen voor bij 1-fase omvormers. Doordat deze omvormers een fluctuerend vermogen doorleveren aan het net en doordat de omvormers een beperkte opslagcapaciteit hebben leidt dit tot een rimpelspanning op het PV-array. Het verlies is afhankelijk per type omvormer en wordt geschat op ongeveer 1,5% van de DC-energie.

De omvormer staat ook garant voor de kwaliteitsbewaking van de stroomlevering aan het elektriciteitsnet en de beveiliging. De omvormer wordt liefst zo dicht mogelijk bij de elektriciteitskast van de woning geplaatst om de weerstandsverliezen te reduceren. Bij netgekoppelde fotovoltaïsche systemen is een synchrone omvormer nodig, deze zorgt er immers voor dat de geleverde stroom in fase is met de netstroom. Hierdoor kan men elektriciteit, die niet onmiddellijk wordt verbruikt, doorvoeren naar het elektriciteitsnet.

Doordat de omvormer werkt op een bepaald spanningsniveau is het nodig dat de zonnepanelen dusdanig geplaatst zijn dat ze deze vaste spanning voorzien. Meestal is hiervoor een combinatie van in serie en parallel geschakelde zonnepanelen nodig.

Omvormers zijn slechts in bepaalde vermogens beschikbaar. In West-Europese klimaatvoorwaarden is het aanbevolen om het vermogen van de omvormer lager te kiezen dan het vermogen van de serie aangesloten PV-panelen (onderdimensionering). Het gelijkstroomvermogen van de omvormer mag tot 20% lager liggen [7].

Het aantal en het vermogen van de omvormer is bepaald door het totale piekvermogen van het PV-systeem (en dus door het aantal panelen). Bij de keuze van het type omvormer moet men altijd in het achterhoofd houden dat de efficiëntie van zo'n omvormer in sterke mate afhangt van de spanning. Indien men immers een omvormer kiest waarbij het bereik veel lager is dan het maximale vermogen van een PV-systeem dreigt men een deel van de spanning te verliezen doordat de spanning wordt afgevlakt door de omvormer (de omvormer heeft een bepaalde minimum en maximum grens, indien de spanning hiertussen valt zal hij deze naar het spanningsnet sturen) [5]. Indien men te veel panelen

⁴ Marktnaam voor PolyVinyl Fluoride

aansluit op de omvormer kan men de levensduur ervan negatief beïnvloeden, te weinig panelen leveren dan weer een lager rendement op.

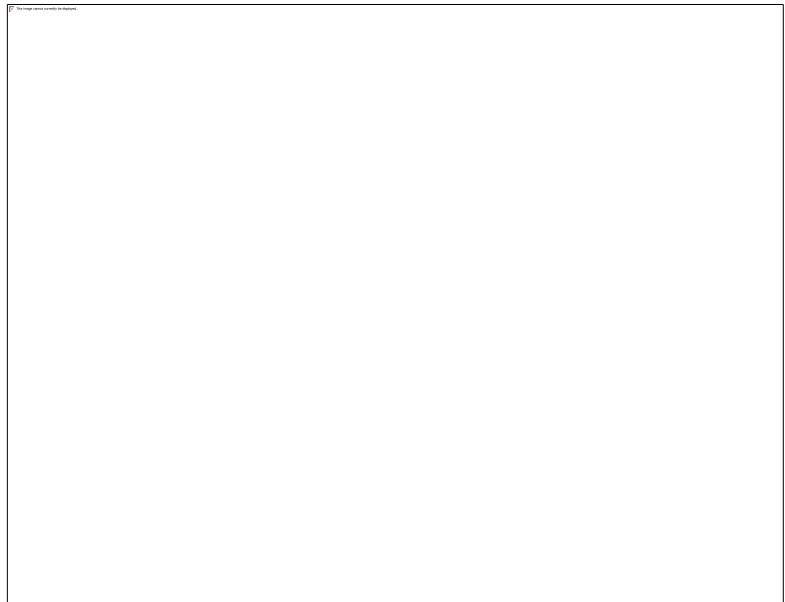
1.4 Netaansluiting

Zonnepanelen kunnen op twee manieren worden gebruikt. Enerzijds is er het netgekoppelde systeem, anderzijds het autonome systeem.

1.4.1 Netgekoppelde fotovoltaïsche systemen

Daar het productieniveau van zonnepanelen niet kan gestuurd worden in functie van ogenblikkelijke energiebehoefte maar louter afhankelijk is van irradiatie, worden de meeste systemen steeds aan het net gekoppeld. Zo kan het overschot aan elektriciteit nog elders dienen. Bij kleine installaties zal deze injectie weinig problemen geven. Bij grote productie kan dit het net verstoren: in eerste instantie zal ze volledig in fase met het 3fasig net moeten geïnjecteerd worden. Bovendien heeft het ook zijn implicaties op het beheer van het elektriciteitsnetwerk. Daar waar vroeger dit netwerk centraal werd bevoorradt vanuit enkele centrales om dan via aftakkingen de eindverbruiker te bevoorraden, krijgt men langzaam meer te maken met een netwerk waar op verschillende plaatsen op verschillende tijdstippen een variërende productie kan optreden.

Daarom werd in Vlaanderen een onderscheid gemaakt tussen een kleine en grote installatie met als grens 10kWp. Bij beiden wordt na de omvormer een groenestroommeter geplaatst. Op basis van de stand op deze teller worden de groenestroomcertificaten uitgereikt. Bij kleine installaties wordt een terugteller geplaatst die het verschil bijhoudt tussen verbruikte en geproduceerde elektriciteit. Mocht deze onder nul gaan, betekent dit dat de verbruiker meer geproduceerd heeft dan hij eigenlijk verbruikt heeft op jaarbasis. De eigenaar komt niet in aanmerking voor een vergoeding voor deze extra stroom.



Figuur 5: Van paneel tot net [9]

Dit is wel zo bij grote installaties: hier dient een netontkoppelkast geplaatst te worden om eerder vernoemde problemen te kunnen behelpen. De netto injectie wordt vervolgens op de markt aangeboden. Hiervoor kan men dan een vergoeding krijgen per kWh waarbij de prijs afhankelijk zal zijn van het volume.

1.4.2 Autonoom systeem

Autonome systemen zijn systemen die niet gekoppeld zijn aan het elektriciteitsnet. Overdag wordt er elektriciteit geproduceerd door middel van de zonnepanelen. Deze elektriciteit wordt rechtstreeks naar de verbruiker gevoerd. Het overschot van deze elektriciteit wordt opgeslagen in accu's zodat 's nachts of bij weinig zonlicht het object of de machine kan blijven functioneren. Autonome systemen worden vooral gebruikt bij kleinschalige toepassingen; zakrekenmachines, parkeermeters, auto's, ...

Ook biedt het veel mogelijkheden voor energievoorzieningen in afgelegen gebieden of ontwikkelingslanden. Zo zou energieproductie met een PV-systeem gekoppeld aan batterijen goedkoper zijn dan wanneer gegenereerd met dieselmotoren zoals meestal het geval is in rurale dorpen [8].

Een interessante ontwikkeling is wanneer deze systemen op carports gekoppeld worden aan een batterij. Zo kan men een elektrische wagen van eigen, groene stroom voorzien. Het kan zelfs nog een stapje verder gaan door PV-cellen te integreren op transportmiddelen. Er zijn al wat prototypes van 'solar cars' en recent landde op Zaventem de Solar Impulse, een vliegtuig enkel aangedreven door zonne-energie. Qua commerciële toepassingen kan men voor sommige wagens uit het luxesegment reeds een dak met zonnecellen bestellen die dan de airco kan aandrijven indien de auto op een zonnig plekje geparkeerd staat.

2 Beïnvloeding van het rendement [3]

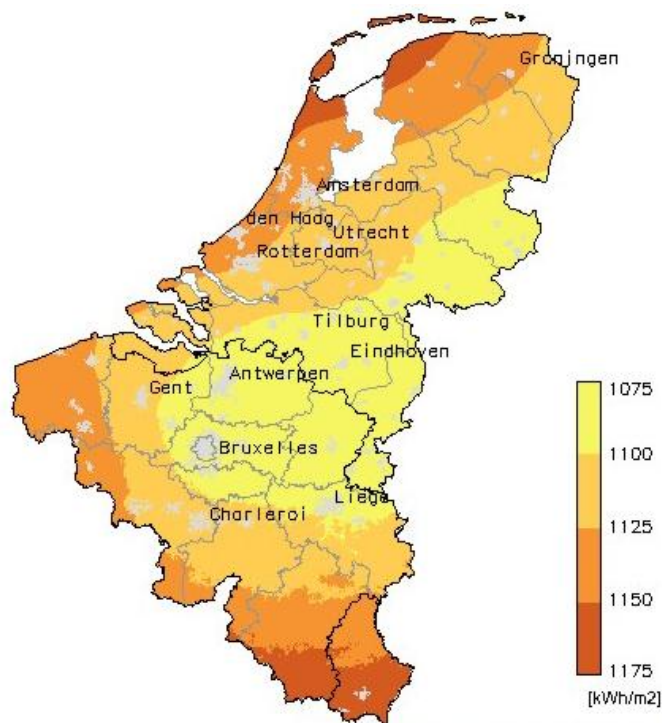
De elektriciteitsproductie van de geïnstalleerde PV-systemen hangt af van tal van factoren. Naast het klimaat zijn ook het systeemontwerp en de omgeving van invloed op de opbrengst.

Hieronder worden de belangrijkste factoren besproken die de opbrengst (nadelig) beïnvloeden.

2.1 Bestraling

De belangrijkste factor voor de opbrengst is de hoeveelheid invallend zonlicht op de zonnepanelen. Ook op dagen met beperkte zonnestraling werken de zonnecellen. Wanneer de zonnestraling de atmosfeer van de aarde binnendringt gaat een deel van de invallende energie verloren door verstrooiing of absorptie door luchtmoleculen, wolken en aerosols⁵. De straling die niet gereflecteerd of verstrooid wordt en die de aarde rechtstreeks bereikt, wordt directe straling genoemd. De straling die de ontvanger bereikt nadat deze door de luchtmoleculen wordt verspreid wordt diffuse straling genoemd. Het is ook mogelijk dat straling wordt gereflecteerd na in contact te zijn gekomen met de ondergrond. Dit wordt albedo⁶ genoemd.

De hoeveelheid straling die het aardoppervlak bereikt, is natuurlijk extreem variabel. Naast de dagelijkse en jaarlijkse regelmatigheid door de beweging van de zon, zijn er ook de onregelmatige variaties die veroorzaakt worden door de weersomstandigheden (wolkenbedekking e.d.) In onderstaande figuur wordt de jaarlijkse globale zonne-instraling bij optimale oriëntatie van een PV-paneel in België en Nederland weergegeven.



Figuur 6: Jaarlijkse globale instraling bij optimale oriëntatie [9]

Een exacte kennis van het pad van de zon is dus zeer belangrijk om de straling en de opbrengst te berekenen bij een toekomstig ontwerp. De stand van de zon wordt beschreven door middel van twee hoeken: de azimut (de hoek tussen de zon en het Zuiden) en de elevatiehoek (hoek tussen horizon en

⁵ Een aerosol is een colloïde bestaande uit zeer kleine vaste of vloeibare deeltjes die gesuspendeerd zijn in een gas

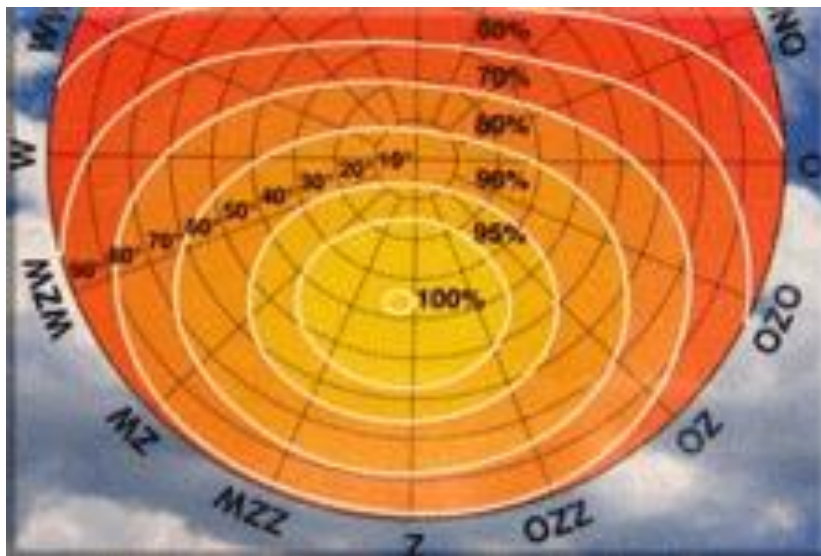
⁶ Weerkaatsingvermogen

invallende licht) [5] Door de beweging van de zon is de hoeveelheid straling niet altijd gelijk doorheen het jaar. In de winter staat de zon bijvoorbeeld veel lager aan de hemel dan in de zomer waardoor ze ook vlugger ondergaat wat resulteert in minder uren zonlicht. Niet alleen de zonuren maar ook het feit dat het zonlicht een langere weg doorheen de atmosfeer moet afleggen in de winter leidt tot verliezen. Zo zal er meer licht geabsorbeerd en verstrooid worden (door wolken, vochtigheid, pollutie) waardoor minder licht het oppervlak bereikt. In de zomer zal daarom de opbrengst van de zonnepanelen veel hoger liggen dan in de winter [5].

Om een zuiver beeld te krijgen van het vermogen dat een zonnepaneel kan opleveren onafhankelijk van deze variërende condities, wordt hun vermogen uitgedrukt in Wattpiek. Dit is het vermogen dat een paneel zal leveren onder de zogenaamde Standaard Test Condities. Deze standaardcondities zijn: een bestraling van 1000 Watt/m^2 , waarbij het spectrum hiervan dient overeen te komen met het spectrum van zonlicht bij een luchtmassa⁷ van 1,5 en een celtemperatuur van 25°C [5]. De luchtmassa wordt in belangrijke mate bepaald door de breedtegraad waarin de installatie zich bevindt. Zo zal een installatie die dicht bij de evenaar ligt minder verliezen opmeten (luchtmassa ± 1) dan een installatie die zich in België bevindt.

2.2 Oriëntatie en helling van de modules

Een zuidgerichte opstelling is volgens onderstaande figuur het meest ideaal voor het plaatsen van een fotovoltaïsche installatie. In België is de optimale plaatsing deze waarbij men de zonnepanelen naar het zuiden richt onder een hoek van 36° . Men merkt op dat er zeer hoge rendementen (90% en hoger) kunnen behaald worden voor oriëntaties gelegen tussen het zuidoosten en het zuidwesten en voor hellingshoeken van 10° tot 60° . In België bestaat 60% van de zonnestraling uit diffuse straling [7]. Wegens het grote aandeel van dit indirecte licht hebben de oriëntatie en de hellingshoek van de PV panelen, onverwacht, een minder grote invloed. Men merkt ook op dat zonnepanelen die geplaatst zijn tegen een gevel (en dus 90°) minimaal 30% minder rendement opleveren dan de ideale opstelling [5].



Figuur 7: Beïnvloeding van de oriëntatie op het rendement(in België) [93]

⁷ het spectrum van zonlicht dat overblijft na filtering door lucht over een afstand gemeten door de atmosfeer welke een factor in weglengte langer is dan de kortst mogelijke. Wanneer de zon op de middag verticaal boven het aardoppervlak staat = luchtmassa 1, luchtmassa 1,5 = spectrum van zonlicht na afleggen van anderhalf maal lange weg door atmosfeer

2.3 Beschaduwing

Een van de belangrijkste factoren waar men bij de dimensionering van PV-panelen rekening mee moet houden is het vermijden van schaduw op de zonnepanelen. Zonnecellen werken immers als PN dioden. Zodra één cel geen zonlicht krijgt zal deze de stroom versperren zodat de volledige string geen electriciteit meer zal kunnen leveren aan de omvormer. Mogelijke oorzaken van deze beschaduwing zijn bijvoorbeeld bomen, schouwen, lantaarnpalen, lichtstraten, enz. In extreme situaties kan dit zelfs tot zogenaamde hotspots leiden die de cel permanent kunnen beschadigen.

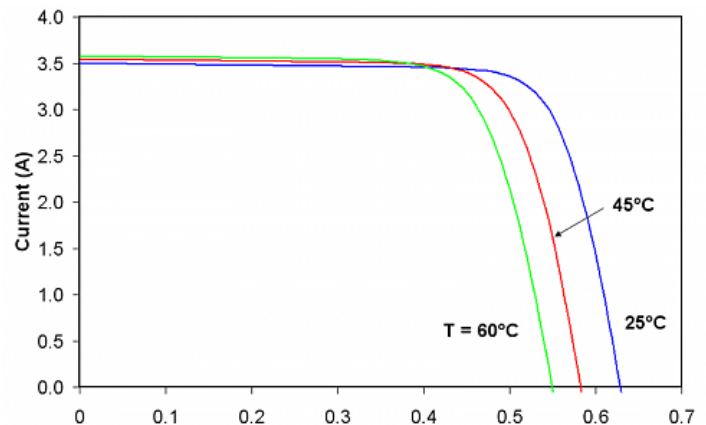
Om dit fenomeen te verhelpen worden er zogenaamde bypassdiodes ingebouwd zodat de stroom toch voorbij een beschaduwde serie van zonnecellen kan. Het beste resultaat wordt gegeven door een zonnepaneel waarbij elke zonnecel wordt voorzien van een bypass diode. In de praktijk wordt echter per 18 à 20 zonnecellen een bypass diode voorzien om de kostprijs te drukken. Om het effect van schaduw op zonnepanelen voor te stellen kan men de omgeving in een software programma modelleren zodat men de beste schikking kan vinden door de verschillende parameters (stand van de zon, schaduw op verschillende bomen,...) te laten variëren. [5]

Om de afstand weg van een horizontale rand te bepalen, wordt soms de elevatiehoek op zonmiddag bij de winterse zonnewende gehanteerd, nl 15,5°. Een andere handregel is om steeds een afstand van 2à3 maal de hoogte te vrijwaren.

2.4 Temperatuur

Bij stijging van de temperatuur verhoogt ook de geleidbaarheid van de halfgeleiders waaruit een zonnecel bestaat. Hierdoor worden de elektronen mobieler waardoor het gemakkelijker wordt om gaten in het materiaal op te vullen. Zo verbetert de elektrische balans in de cel waardoor het elektrisch veld in de grenslaag verdwijnt zodat de lading niet meer gescheiden wordt in de zonnecel [5].

Op de figuur is duidelijk dat hoe hoger de temperatuur is, hoe lager de spanning en dus ook het rendement zijn. De zonnecellen kunnen op een warme zomerdag temperaturen hebben van 60°C en meer. Hierdoor gaat een groot deel van het rendement verloren. Algemeen stelt men vast dat per graad Celsius waarmee de temperatuur stijgt, de opbrengst daalt met 0,4 à 0,6% [5].



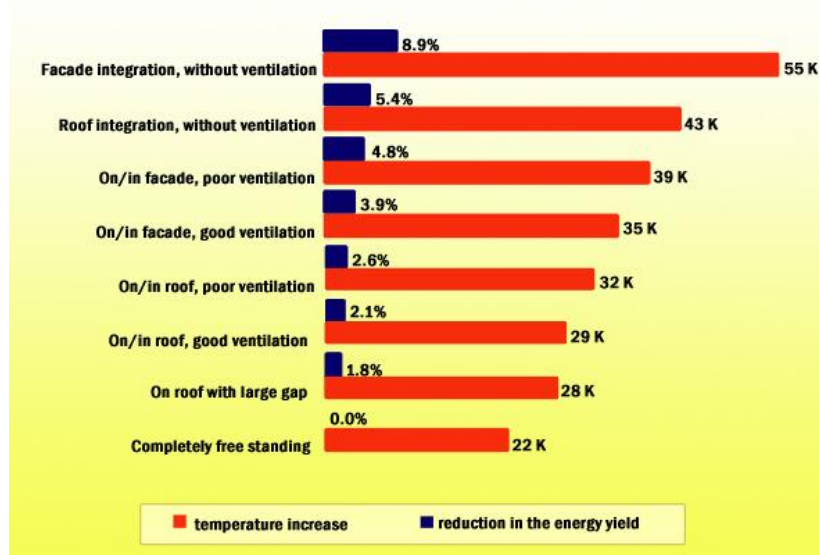
Figuur 8: Invloed van temperatuur op spanning [5]

Op de figuur is duidelijk dat hoe hoger de temperatuur is, hoe lager de spanning en dus ook het rendement zijn. De zonnecellen kunnen op een warme zomerdag temperaturen hebben van 60°C en meer. Hierdoor gaat een groot deel van het rendement verloren. Algemeen stelt men vast dat per graad Celsius waarmee de temperatuur stijgt, de opbrengst daalt met 0,4 à 0,6% [5].

2.5 Ventilatie

Om de temperatuur van de zonnepanelen op een aanvaardbaar niveau te houden, kan men beroep doen op natuurlijke ventilatie. Men kan dit verwezenlijken door een spouw achter de panelen te creëren. Indien men de achterzijde van de panelen goed kan ventileren, wat voornamelijk gebeurt bij zonnepanelen die op een plat dak worden opgesteld, zal het rendement positief worden beïnvloed.

Men kan ook de warmte onttrekken en gebruiken voor de verdere opwarming van het huis.



Figuur 9: Ventilatie-invloed op temperatuur [5]

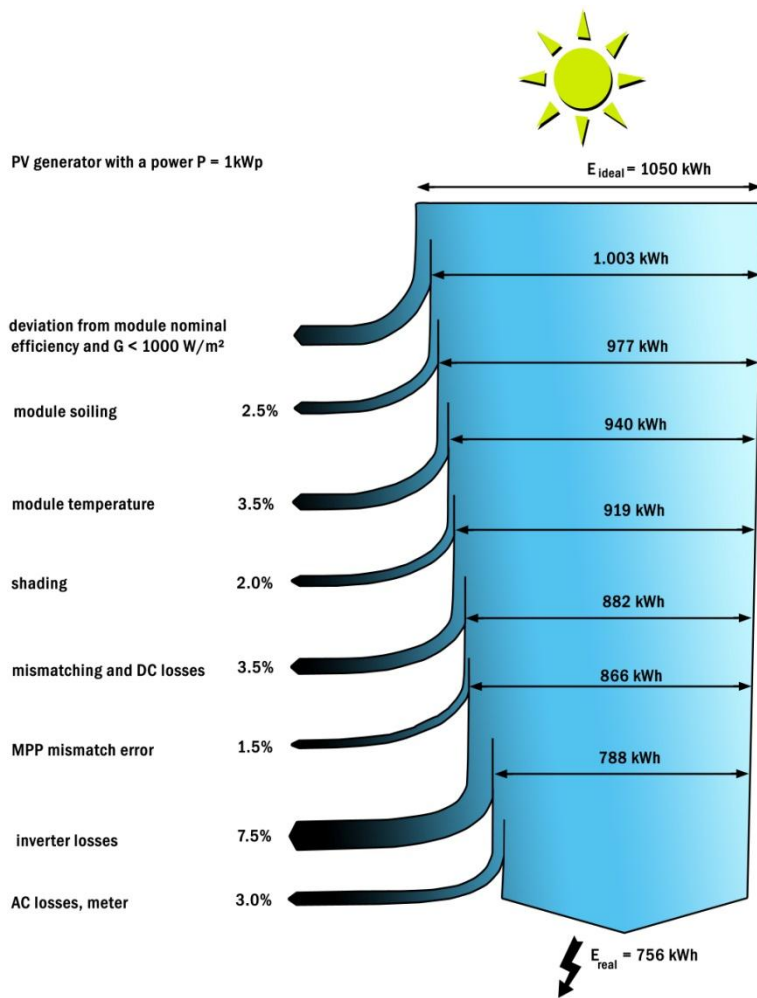
2.6 Verliezen veroorzaakt door de verschillende componenten

Het rendement hangt ook in grote mate af van het type zonnecel waaruit de zonnepanelen zijn samengesteld en van de componenten waarmee de installatie is opgesteld. Elk type zonnecel heeft immers een ander rendement, werking en werkelijk vermogen. Zonnecellen worden meestal gemaakt uit één type materiaal (bijvoorbeeld silicium). Aangezien zonlicht bestaat uit meerdere kleuren en het gebruikte materiaal slechts gevoelig is voor bepaalde kleuren gaat een deel van het zonlicht dwars door de cel heen. Een oplossing om dit probleem te verhelpen is het gebruik van een tandem. Door een zonnecel op te bouwen uit meerdere lagen, die elk werken bij een verschillende kleur, kan men een breder spectrum van het zonlicht gebruiken om energie op te wekken [5].

Een fotovoltaïsche installatie bereikt nooit of slechts zeer zelden zijn volledige piekvermogen of zelfs maar 90% ervan. Dit heeft onder meer te maken met de eerder besproken problemen. Door de hoge temperatuur daalt het elektrisch vermogen. Wanneer men nu een omvormer kiest waarbij het nominaal vermogen lager is dan het piekvermogen van de installatie, treedt er nauwelijks of bijna geen energieverlies op. België werkt met een verhouding van 80% tussen nominaal omvormervermogen en het piekvermogen van het veld. Door de omvormer zo te dimensioneren bekomt men het voordeel dat deze efficiënter zal werken bij lagere lichtinstralingswaarden.

Men dient ook goed op te letten bij het ontwerpen van het elektrische schema en bij de schakeling van de modules in de verschillende ketens. Door overmatig gebruik van bekabeling kunnen er weerstandsverliezen optreden in de bekabeling. Door de gelijkstroomspanning groter te maken zullen deze verliezen kleiner worden [5].

2.7 Overzicht verliezen



Figuur 10: Overzicht verliezen [5]

Figuur 10 laat zien hoeveel procent van het invallende zonlicht verloren gaat per beïnvloedingsfactor. Zo ziet men bijvoorbeeld dat 2 % van het zonlicht verloren gaat aan beschaduwing van de zonnecellen. De verliezen veroorzaakt door de ijking en de fout op de omvormer bedragen zo'n 7,5% (en zijn daarmee ook de grootste).

Indien we de verhouding nemen van de ideale energieproductie E_{ideal} en van de werkelijke energieproductie E_{real} dan bekomen we het opbrengst ratio (performance ratio) PR.

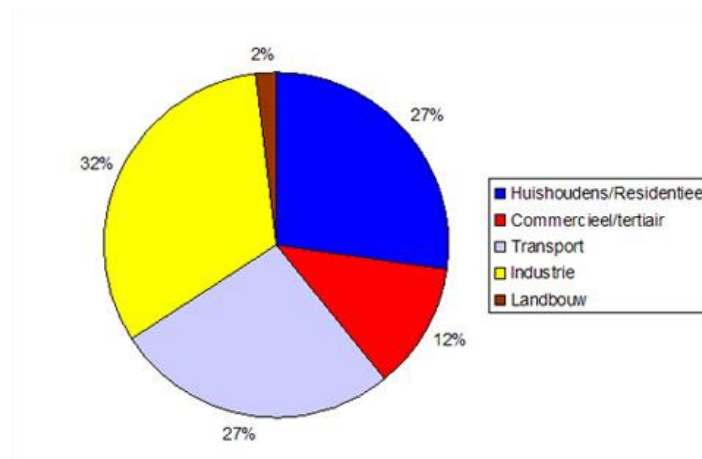
$$PR = E_{real} / E_{ideal}$$

Het PR is een indicator die aantoont hoeveel procent van de ideale energieproductie verloren gaat aan verliezen (hoe goed het systeem gepresteerd heeft onder de gerealiseerde omgevingscondities) [5].

3 Bouwkundige toepassingen

Daar waar klassieke energiewinning slechts in grote centrales tot stand kan komen, kan een PV-toepassing perfect gedimensioneerd worden in functie van zijn directe gebruiker. Van een enkele cel op een zakrekenmachine tot de vleugels van een vliegtuig, van een parkeermeter tot het dak van een groot industrieel complex.

Op macroscopisch niveau zijn gebouwen grootverbruikers van energie. Zowat 40% van de totale energieconsumptie in België gaat naar verwarming, verlichting, koeling en andere elektrische toepassingen in gebouwen.



Figuur 11: Energieverbruik in België [10]

In het kader van de Europese doelstellingen voor 2020 wil men het energieverbruik van gebouwen drastisch terugschroeven. Men wil overstappen naar zogenaamde passief gebouwen, gebouwen waarbij zowel het energieverbruik als energievoorziening uitermate efficiënt gebeuren.

Dit wordt ingeleid door de EPB regelgeving die van kracht is sinds 1 januari 2006. Zo wordt het goedkeuren van een bouwvergunning gekoppeld aan het behalen van een maximaal K- en E-peil. Het K-peil is een parameter die de energieverliezen van een gebouw evalueert: is er voldoende isolatie, is het gebouw voldoende compact, gaat er niet te veel warmte verloren door de ramen, enz. Het E-peil heeft dan weer betrekking op de energieprestatie van het gebouw: hoe wordt de energie opgewekt, welke efficiëntie hebben de toestellen, is de verlichting energiezuinig, enz.

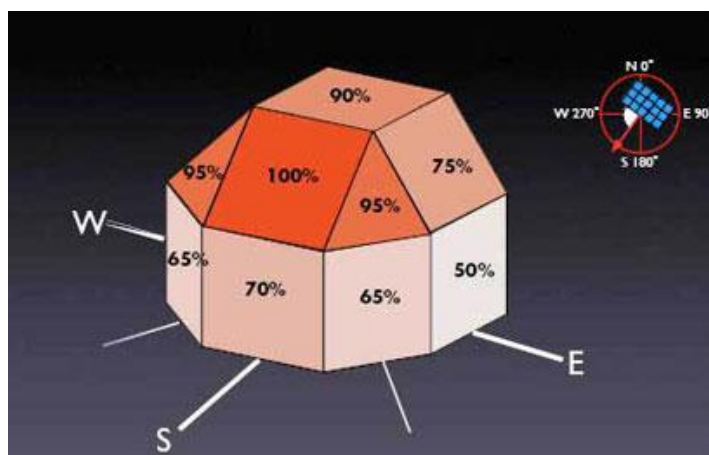
Een stap verder vindt men de zogenaamde nulenergie gebouwen: deze constructies voorzien zichzelf van hun jaarlijkse energiebehoefte. Drijft men dit verder, dan bekomt men een actief huis waarbij de energiebalans volledig naar productie overslaat.

De productie van de nodige energie moet uiteraard uit een hernieuwbare bron komen. Zo zijn er warmtepompen die warmte-energie uit de grond of omgeving onttrekken, elektriciteit kan dan weer onttrokken worden uit wind- of zonne-energie. Laag energetische woningen zijn uiteraard uitermate geïsoleerd zodanig de warmtebehoefte vrij minimaal blijft. Daarom verliest de installatie van een warmtepomp aan rendement en lijkt het beter de nodige warmte elektrisch op te wekken. Elektrische verwarming heeft immers een veel lagere investeringskost.

Rest dus nog wind- of zonne-energie. Er zijn reeds kleinschalige windmolens op de markt die lokaal voor energiewinning kunnen zorgen. Deze kennen echter nog maar weinig succes: problemen met bouwvergunning, geluidshinder, slagschaduw, laag rendement in dicht bebouwd gebied, zeer onvoorspelbare opbrengsten, enz.

De voornaamste oplossing lijkt dus een investering in zonne-energie.

Deze investering zal optimaal renderen wanneer de panelen zo georiënteerd zijn dat ze jaarlijks een optimale lichtinval krijgen. Op gebouwen zijn heel wat vlakken terug te vinden die hiervoor geschikt zijn. Het hoogste rendement wordt gehaald onder een lichte helling zuidwaarts, maar ook andere configuraties zijn ook mogelijk.



Figuur 12: Rendement van PV toepassingen op constructies volgens oriëntatie [5]

Volgens BelPV is er een potentieel van 25 tot 30% van de totale energiebehoefte in Vlaanderen mocht men ieder geschikt dakvlak benutten (statistisch gezien zou er per inwoner in West-Europese landen gemiddeld 18m² dakvlak en 6m² op gevels beschikbaar zijn volgens het IEA⁸) [11].

De fotovoltaïsche toepassingen voor constructies kunnen ruwweg in twee categorieën opgedeeld worden: BIPV en BAPV. BIPV (Building Integrated Photovoltaics) verwijst naar systemen en concepten waarbij de fotovoltaïsche cellen, naast de functie om elektriciteit op te wekken, ook een of meerdere functies overnemen van de bouwschil, zoals waterdichting, zonnewering, winddichtheid, enz. Vooral het esthetische aspect primeert bij dergelijke toepassingen. Bij BAPV (Building Adapted Photovoltaics) worden de zonnepanelen via een hulpstructuur op de bouwschil geplaatst zonder dat ze enige functie overnemen.



Figuur 13: Sanyo's Solar Ark in Japan

⁸ Internationaal Energie Agentschap

Er bestaan verschillende normen (IEC 61215, IEC 61646, IEC 61730) waaraan de fotovoltaïsche panelen moeten voldoen vooraleer deze kunnen gebruikt worden als een onderdeel van de gebouwschil van een woning. Deze normen zijn bepalend voor zowel elektrische karakteristieken als de sterkte van de panelen. Hieronder worden de meest voorkomende systemen om zonnepanelen te plaatsen weergegeven en besproken.

3.1 Zonnepanelen op daken

De meest voorkomende manier om zonnepanelen op een gebouw te installeren is in of op het dak. Niet alleen kunnen hier de grootste rendementen naar zonne-inval behaald worden, meestal heeft men hier grote vrije ruimtes en bevinden er zich weinig obstructies die voor schaduw kunnen zorgen. Er zijn verscheidene systemen op de markt, zowel voor platte als voor schuine daken.

3.1.1 Platte daken

Het grote voordeel bij platte daken is dat men een grote vrijheid heeft qua ontwerp. De plaatsing van de zonnepanelen kan zo bepaald worden dat men het hoogste mogelijke rendement kan halen. Ook de grote toegankelijkheid van platte daken is een pluspunt. Kantoren en loodsen waarvan de platte daken bedekt zijn met fotovoltaïsche systemen hebben meer voordelen ten opzichte van de kleinere daken van particulieren. Door schaafeffecten kunnen de installatie- en onderhoudskosten immers relatief laag worden gehouden.

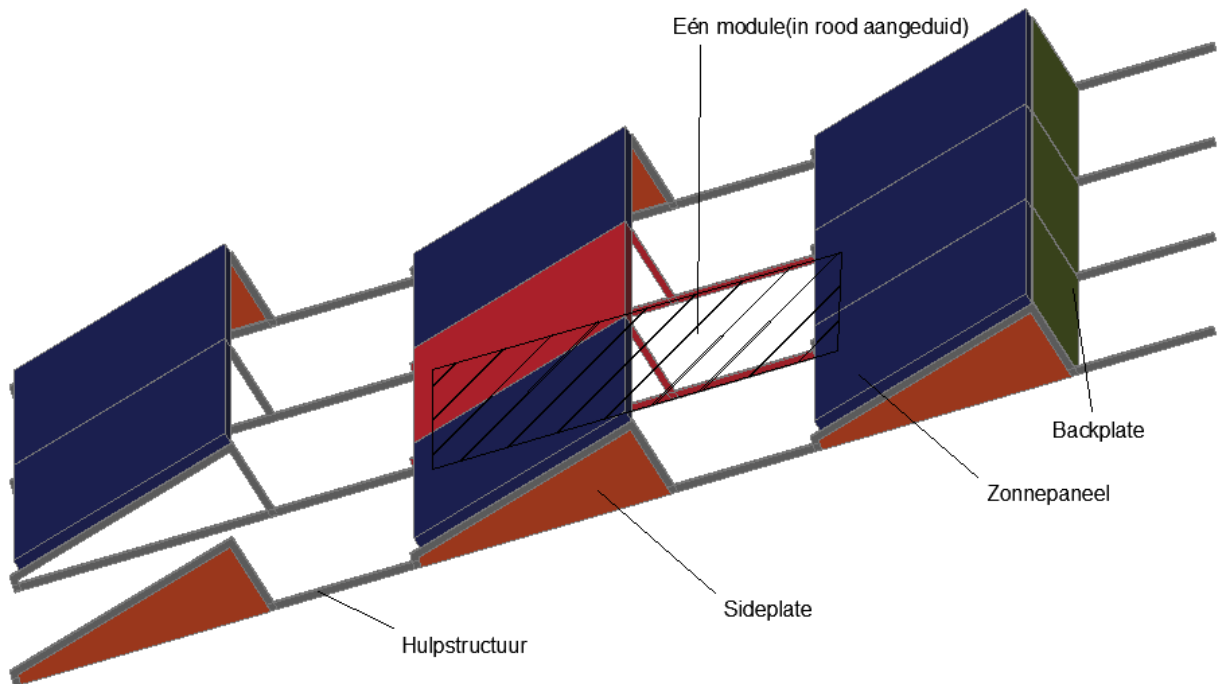
1. Opgebouwde systemen

Deze systemen worden het meest toegepast op platte daken. De panelen worden gemonteerd op een hulpstructuur die de instralinghelling optimaliseert. Deze hulpstructuur kan individueel per paneel voorzien zijn of men kan ze ook ontwerpen voor volledige rijen of matrices aan panelen. Vooral de laatst vernoemden bieden heel wat mogelijkheden: minder stukwerk, beveiliging van bekabeling, betere verdeling tot zelf reductie van de lasten, enz.



Figuur 14: Geballasteerd systemen [12] [13]

Deze hulpstructuur dient zo ontworpen te worden dat het geheel mooi op zijn plaats blijft. De eenvoudigste oplossing is deze waarbij de installatie los op het dak wordt gemonteerd, het zogenaamde geballasteerd systeem. De hulpstructuur dient zo ontworpen worden dat ze niet zal verschuiven bij hevige windvlagen. Dit kan men bekomen door het eigengewicht van de installatie te verhogen of het geheel aerodynamischer te maken zodanig deze minder windlasten zal aantrekken. Basisoplossing hiervoor is het monteren onder een lagere helling en het gebruik van back- en sideplates om te verhinderen dat de wind vrij spel krijgt onder de panelen.

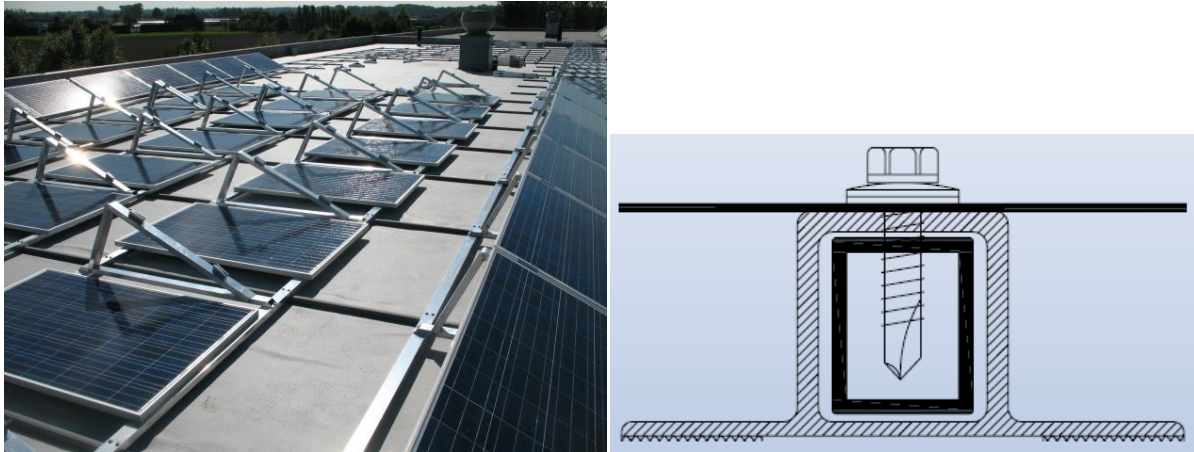


Figuur 15: Principeschets hulpstructuur (met zelfdragende panelen)

De stabiliserende factor voor dergelijke systemen is het eigengewicht. Indien het gewicht van de panelen en de hulpstructuur nog niet voldoende blijkt, kan dit verhoogd worden met ballast onder de vorm van bijvoorbeeld grind of betontegels. Uiteindelijk dient de dakstructuur dit extra overgewicht nog te kunnen opnemen. Het dimensioneren van dit gewicht en zijn impact op de dakstructuur wordt in detail uitgewerkt in deel II.

Om de impact verder te beperken kan men ook de hulpstructuur gaan verankeren op de onderliggende dakstructuur. Dit betreft systemen met dakpenetratie: verankeringsystemen die zowel op trek als op druk belast zijn, zullen doorheen de dakhuid een verbinding tussen beide structuren maken. Het spreekt voor zich dat bij dergelijke verbindingen extra aandacht dient te gaan naar waterdichting. Bovendien kan het vernieuwen of herstellen van de dakhuid in latere stadia erg omslachtig worden.

Interessant is het Renolit Alkorsolar systeem die dakpenetratie vermijdt door de supports van de hulpstructuur binnen een PVC omhulsel te plaatsen en deze dan te verlijmen op de PVC afdichting. Deze afdichting wordt ter hoogte van de supports mechanisch bevestigd aan de onderliggende dakstructuur zodat een krachtenoverdracht verzekerd is.



Figuur 16: Alkorsolar systeem [14] [15]

2. Geïntegreerde systemen

Bij de geïntegreerde systemen kent men vooral de toepassing van dakdichtingen met dunne-film zonnecellen op metalen of flexibele onderlagen. De dunne-film zonnecellen worden simpelweg gelijmd op het onderliggende dakoppervlak. Er zijn producten op de markt waarbij de dunne-film zonnecellen op sandwich panelen worden geplaatst waardoor er ook isolatie voorzien is (meestal gebruikt in de industrie, door de grotere oppervlaktes).



Figuur 17: Geïntegreerde dakdichting [16]

Aangezien slechts een beperkt gewicht wordt toegevoegd en het dakvlak een zelfde vorm blijft behouden, hebben dergelijke installaties zo goed als geen impact heeft op de dakstructuur. Gezien deze producten vrij flexibel moeten zijn zal men steeds met thin-film technologie moeten werken zoals amorf silicium. Samen met een lagere hellingshoek zal het rendement per m² dus lager liggen maar de gereduceerde materiaalkost compenseert dit enigszins.

3.1.2 Hellende daken

Terwijl platte daken de ontwerper een zekere vorm van vrijheid toelaten voor het ontwerp van een PV-systeem, is dit niet het geval bij hellende daken aangezien de oriëntatie en de helling al vast liggen.

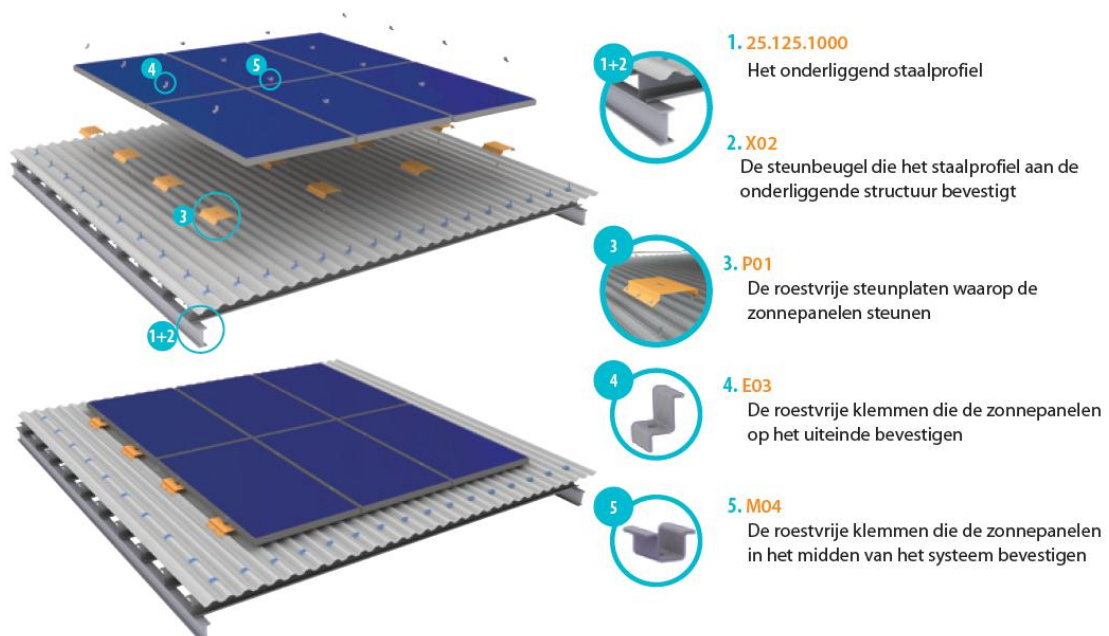
1. Opgebouwde systemen

Meestal zal een frame opgebouwd worden dat verankerd is aan de onderliggende dakstructuur. De spouw die zo tussen dakvlak en panelen gevormd wordt, zal voor natuurlijke ventilatie en dus extra koeling zorgen zodat de panelen iets beter zullen renderen, tot 3% hoger in vergelijking met installaties die zonder spouw geplaatst zijn [3].



Figuur 18: Installatie met frame op hellend dak [17]

Bij daken met geprofileerde staalplaten is het mogelijk om enkel met kleine verankerings-elementen te werken.



Figuur 19: Montage systeem op hellende geprofileerde platen JoriSolar [18]

2. Geïntegreerde systemen

Deze systemen hebben een dubbele functie: energiewinning en dakdichting. Gezien ze meestal iets duurder zijn, worden ze vooral geplaatst uit esthetische overwegingen.



Figuur 20: Geïntegreerde zonnepanelen op brandweerkazerne Utrecht [19]

Het kan ook als een snelbouwelement toegepast worden wanneer het geïntegreerd wordt op sandwichpanelen. Met deze constructiewijze kunnen hoge rendementen in uitvoering behaald worden.

Tot slot worden ze ook geïntegreerd op kleinschaligere elementen, zoals dakpannen. Het Korasun systeem is hier een mooi voorbeeld van.



Figuur 21: Korasun [20]

3.2 Fotovoltaïsche façades

PV-panelen kunnen zorgen voor een esthetisch aantrekkelijke muur. Ook hier zijn er verschillende plaatsingsmogelijkheden.

Ten eerste kan men de zonnepanelen simpelweg bevestigen aan een reeds bestaande structuur door middel van een railsysteem. De zonnepanelen dienen hier niet voor een waterdichte constructie aangezien de achterliggende muur hiervoor zorgt. Indien er geen eisen worden gesteld qua vorm en



Figuur 22: Fotovoltaïsche façade [101]

afmetingen kunnen standaard modules worden gebruikt [5]. De bevestiging moet zodanig gedimensioneerd zijn dat losrukken door windkrachten vermeden wordt.

Ten tweede kunnen de zonnepanelen in het vlak van de façade worden geplaatst (vliesgevels). Naast de traditionele vliesgevel kan men opteren voor een dubbele vliesgevel. Een dubbele vliesgevel bestaat uit een dubbele glaswand gescheiden door een spouw (waardoor natuurlijke ventilatie de temperatuur van de zonnepanelen verlaagt). Hier worden de zonnepanelen geplaatst in de buitenste glaswand. De zonnepanelen vervangen zo de conventionele bedekkingmaterialen (glas

e.d.). Het spreekt voor zich dat de zonnepanelen zo geplaatst moeten worden dat binnendringen van water voorkomen wordt. De modules moeten dezelfde duurzaamheid en constructieve eigenschappen hebben als de materialen die ze vervangen.

Het maximale rendement van verticaal geplaatste zonnepanelen is ongeveer 70% indien geplaatst naar het Zuiden. Men moet, voor het plaatsen van de zonnepanelen, nagaan of dichtbijstaande gebouwen niet zorgen voor een nefaste beschaduwing van de zonnepanelen.

Voor de opbouw (en lichtspeling) van fotovoltaïsche façades worden er verschillende types modules gebruikt: klassieke modules, transparante (zie 3.3) en semitransparante.

3.3 Transparante systemen

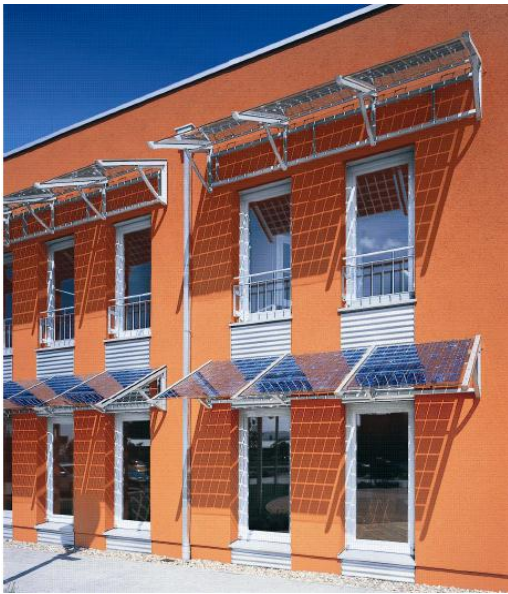
Transparante panelen kunnen gebruikt worden als glaspartijen voor zowel gevel als dak. Ze bestaan meestal uit een transparante achterzijde met standaard kristallijne cellen, maar vaak worden ook modules met gedeeltelijk-transparante dunne-film cellen gebruikt. De transparante modules worden vooral gebruikt wanneer men niet alleen energie wil opwekken maar ook natuurlijk zonlicht wil laten binnenvallen. De transparante modules zijn gunstig om het binnenklimaat te regelen, ze functioneren immers (ook) als een zonnewering.



Figuur 23: Transparante panelen in een dak [101]

3.4 Zonnewering systemen

Het overmatig gebruik van glas in een gebouw kan voor een grote koellast zorgen. Door het glas te positioneren aan de zuidkant kan men ervoor zorgen dat de woning wordt opgewarmd in de winter, maar hierdoor kan de woning ook sterk verhit geraken in de zomer. Door gebruik te maken van luifels en overhangdaken komt de zon in de winter er nog net onderdoor terwijl 's zomers de middagzon op de luifels valt. Ook hier kunnen fotovoltaïsche cellen het verschil maken: door dunne film amorfe zonnecellen op deze luifels te plaatsen of door fotovoltaïsche modules te voorzien boven ramen en andere openingen, krijgt men een win-win situatie. De modules kunnen ofwel vast ofwel op beweegbare 'tracking devices' bevestigd worden.



Figuur 24: Zonnewering met tracking systeem

3.5 Stand-alone PV-systemen

Net zoals bij PV-modules die aan gebouwen worden bevestigd, vereisen stand-alone PV-systemen een goede hulpstructuur die extreme weersomstandigheden kan doorstaan. De structuren dienen bovendien ook degelijk gefundeerd te worden. Doordat meerdere zonnepanelen achter elkaar worden geplaatst, is het nodig dat er enige plaats tussen wordt gelaten om beschaduwing te voorkomen.

De verschillende modules kunnen geëquipeerd worden met een sun-tracking-systeem. Er bestaan twee 'tracker' systemen, enerzijds hebben we het 'single-axis tracking' (beweging rond horizontale as) systeem, anderzijds het 'dual-axis tracking' (beweging rond verticale en horizontale as) systeem. Met het 'dual-axis tracking' systeem krijgen we een hogere efficiëntie dan bij de 'single axis'. Omdat dit systeem redelijk gecompliceerd is wordt een 'single-axis' systeem geprefereerd. De rendementsverhoging is 20% voor 'single-axis' en 30% voor 'dual-axis' [5].



Figuur 26: Solarboom in Duitsland [99]



Figuur 25: 2 MegaWatt landgoed in Fort Carson [100]

Deel II: Bouwtechnisch

1 Inleiding

De meest courante toepassing op platte industriële daken zijn de geballasteerde systemen. In deze masterproef worden vooral dergelijke systemen besproken aangezien deze ook de grootste impact hebben op de dakstructuur.

Bij geballasteerde systemen dient aan de hulpstructuur voldoende eigengewicht meegegeven te worden zodat de panelen en/of de installatie niet beschadigd kunnen worden onder invloed van extreme weersomstandigheden. Hevige windvlagen zouden er immers kunnen voor zorgen dat de installatie omkantelt of zelfs wordt verplaatst.



Figuur 27: Omgekantelde PV-module

Gezien PV-panelen vrij duur zijn, dient men de hulpstructuur voldoende veilig te ontwerpen. Men moet echter ook steeds rekening houden met de onderliggende dakstructuur: men kan het gewicht niet oneindig vergroten, want dit zou er kunnen toe leiden dat het dak instort. Zo heeft het dak van een beschutte werkplaats het begeven in de lange vriesperiode van 2011. Aanleiding was hier wel het accumuleren van sneeuw en ijs na verschillende vorst- en dooicycli.

Enerzijds moeten het PV-systeem en de onderliggende dakstructuur dus veilig ontworpen worden maar anderzijds moet er ook gestreefd worden naar een economisch haalbaar ontwerp. Om dit evenwicht te vinden moet men exact kunnen nagaan welke lasten er kunnen optreden en hoe de onderliggende structuur deze zal opnemen om ze uiteindelijk naar de grond af te dragen.

Om constructies en/of constructie-elementen te ontwerpen dient een bouwkundig ingenieur zich te beroepen op de Eurocodes aangevuld met hun nationale bijlagen. Bij onduidelikheden of voor betere nuances kan men ook de publicaties van het Wetenschappelijk Technisch Centrum Bouw (WTCB) consulteren. Dit wetenschappelijke onderzoekscentrum werd in het leven geroepen om de bouwsector technische voorlichting, bijstand en advies te verlenen [21]. Aan de hand van o.a. Technische Voorlichtingen en Rapporten worden de ontwerpregels en aandachtspunten van specifieke bouwkundige toepassingen toegelicht.

Binnen het WTCB werd recent een Technisch Comité samengesteld om een Technische Voorlichting rond fotovoltaïsche toepassingen uit te werken waarbij Eric Dupont als voorzitter werd aangesteld. Naast aanbevelingen rond aansluitingsdetails, materialen, brandveiligheid, enz. zullen ook ontwerpregels genuanceerd worden in de filosofie van de Eurocodes.

Aangezien de publicatie van dit document ten vroegste begin 2012 verwacht wordt, kan men zich momenteel enkel behelpen met de Eurocodes. Gezien PV-installaties nog maar vrij recent hun opmars kennen, zijn in de Eurocodes nog geen specifieke bepalingen opgenomen voor het dimensioneren van

deze (hulp)structuren. Wel kan men met enig *'Fingerspitzengefühl'* hierin toch toepasbare elementen terugvinden die een schijnbaar veilig ontwerp toelaten.

Ervaring van installateurs en producenten leert echter dat dit tot een veel te veilig en dus vooral oneconomisch ontwerp leidt. Daar waar volgens berekeningen conform de norm een geballasteerd systeem minimaal 100 kg/m^2 vergt, worden de meeste installaties geplaatst met een eigengewicht van slechts 25 kg/m^2 . Recent nemen installateurs al genoeg met 10 à 15 kg/m^2 , maar met extra aandacht voor de zones dicht bij de dakrand (hier is immers de grootste windbelasting te verwachten).

Hoewel producenten reeds wetenschappelijk onderzoek hieromtrent hebben verricht aan de hand van windtunnelproeven en CFD⁹ simulaties, is deze ballastbepaling eerder gegroeid uit de trial and error ervaring van installateurs. In tegenstelling tot wat de grote discrepantie in nodig eigengewicht doet verwachten, blijft het aantal schadegevallen relatief beperkt zodat de optimale ballast eerder naar de waarde voortvloeiend uit de ervaring van de installateurs lijkt te neigen dan naar deze volgens berekeningen conform de Eurocodes.

Als belangrijke opmerking valt onmiddellijk te noteren dat deze 'ervaring' slechts gebaseerd is op vaststellingen van de voorbije 5 à 7 jaar. De bepalende factor in het ontwerp is steeds de windbelasting en deze is nu net zeer stochastisch van aard. Berekeningen volgens de Eurocodes vertrekken daarom van een maximale windsnelheid met een terugkeerperiode van maar liefst 50 jaar. Gebouwen worden ten slotte vaak ontworpen om op zijn minst 50 jaar wind te kunnen trotseren en men verwacht ook van een PV-installatie ze bestand is tegen de grootst mogelijke windvlaag die kan voorkomen tijdens zijn levensduur.

Een tweede vaststelling die gemaakt werd, is dat meeste proeven, verricht door zowel producenten als wetenschappelijke onderzoekers, slechts van een vereenvoudigd model vertrekken dat enkele kritische configuraties over het hoofd ziet. Zo wordt het probleem vaak naar een tweedimensionaal model herleid en/of plaatst men de panelen in een laminair stromingsregime dat slechts maar op een deel van het dak kan voorkomen. De kritische invalshoek van de wind bleek ook niet loodrecht op het paneel te staan, maar eerder een schuine invalshoek te hebben die in een 2D benadering niet naar boven zou komen. De kritische windbelasting voor PV-panelen op een dak blijkt zich immers voort te doen in de zones dicht bij de dakrand waar een turbulente stroming heerst. In deze zones ontwikkelen zich conische of cilindrische wervels die onder de panelen kunnen aangrijpen.

Daarom leek het belangrijk om na te gaan wat er precies op een dak kan gebeuren en stellen we ons de volgende vragen:

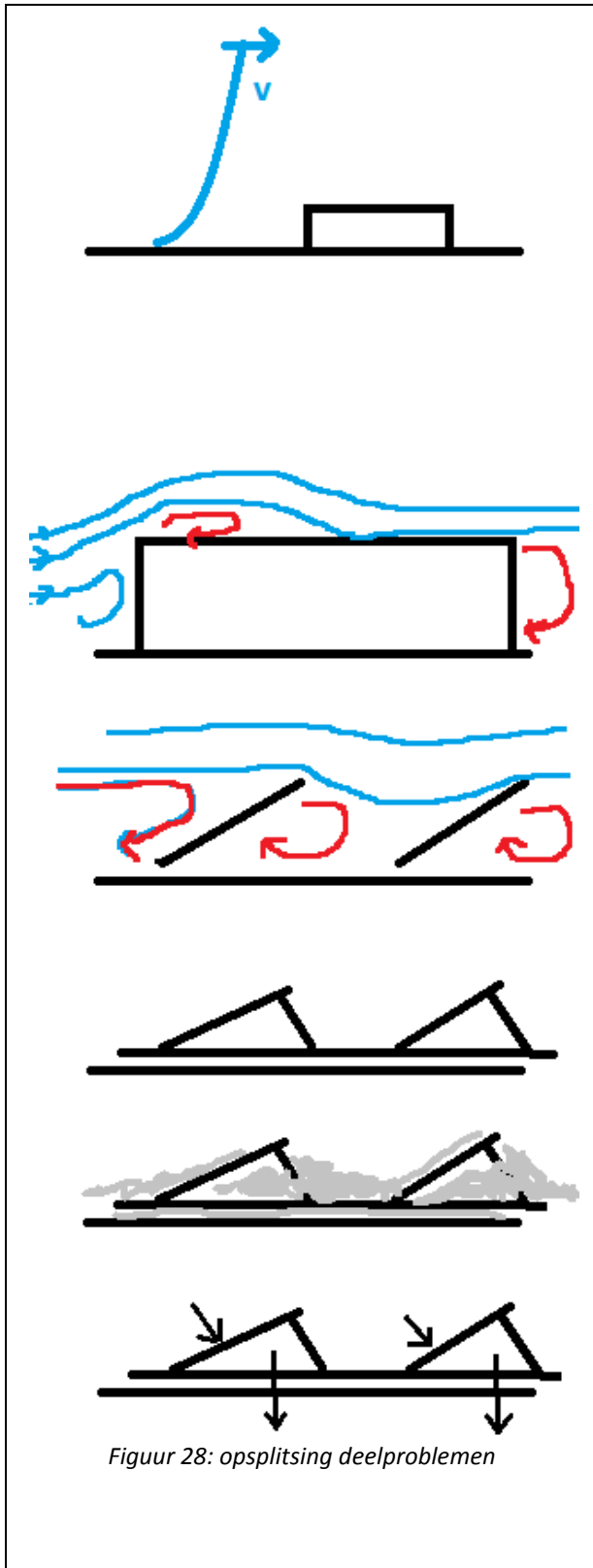
- Hoe verloopt de luchtstroming op een dak.
- Welke invloed zal de aanwezigheid van panelen hebben op de luchtstroming.
- Wat gebeurt er met sneeuw die zich eventueel tegen en onder de panelen kan ophopen?

Kortom welke belastingen kan men er verwachten

Zodra hier een duidelijk beeld van bestaat, kan men de belastingen kwantificeren en aan de hand van de ontwerpregels van de Eurocodes de hulp- en dakstructuur dimensioneren.

⁹ Computational Fluid Dynamics: zie hoofdstuk 6.2.4

2 Overzicht deel II



Figuur 28: opsplitsing deelproblemen

De voornaamste belasting wordt veroorzaakt door de wind. Daarom is het belangrijk om eerst dit fenomeen te kunnen karakteriseren: welke windsnelheden kan men verwachten, welke invloed heeft de omgeving, ... Windbelasting op constructies dient begroot te worden aan de hand van de Eurocode 1-1-4(EN 1991-1-4). Deze vertrekt van een model voor de wind waarbij alle omgevingsfactoren kunnen ingerekend worden. Dit model zal worden toegelicht in hoofdstuk 3.

In hoofdstuk 4 wordt verduidelijkt hoe men van de piekstuwdruk bepaald uit de wind en zijn turbulentie kan overgaan naar winddrukken op constructie-elementen.

Nadat de intensiteit van de aanstromende wind wordt bepaald, dient men het stromingspatroon rondom de constructie te evalueren. Aangestroomde delen zullen een drukopbouw ondervinden terwijl zones achter een obstakel eerder een zuigkracht zullen ervaren. De globale geometrie van de constructie zal hiertoe bepalend zijn. Hoe het dakvlak wordt opgedeeld in zones van verschillende winddrukken zal omschreven worden in hoofdstuk 5.

De aanwezigheid van zonnepanelen kan het stromingspatroon op het dak echter verstoren zodat er zich een ander drukpatroon ontvouwt. Uiteindelijk zal de hulpstructuur van de zonnepanelen aan deze drukken moeten kunnen weerstaan alvorens ze over te dragen aan de dakconstructie. De zoektocht naar deze drukken wordt uiteengezet in hoofdstuk 6.

Het montagesysteem, de hulpstructuur, zal een invloed hebben op deze drukken en hoe ze worden opgenomen: zijn de modules onderling verbonden, zijn ze verbonden met de dakstructuur, onder welke hellingshoek zijn ze gemonteerd, enz. Beschouwingen hieromtrent werden in hoofdstuk 7 opgenomen.

Naast de winddruk is ook een sneeuwlast (hoofdstuk 8) te verwachten en dient rekening gehouden te worden met een mogelijke tijdelijke belasting die optreden bij onderhoud (hoofdstuk 9).

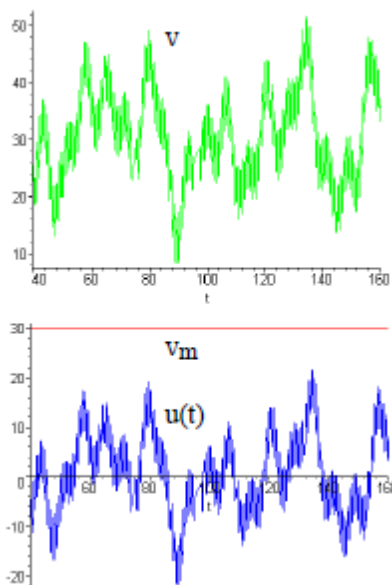
Eens de belastingen bekend zijn, worden de ontwerpregels toegelicht die van toepassing zijn bij het dimensioneren van zowel hulp- als dakstructuur volgens de Eurocodes. Dit komt aan bod in hoofdstuk 10.

Tot slot wordt een casus uitgewerkt aan de hand van voorgaande bevindingen om een idee te krijgen van de impact op de dakstructuur.

3 Wind

3.1 Algemeen

Berekeningen volgens de Eurocode vertrekken van een gemiddelde windsnelheid gemeten over een interval van 10 minuten op een hoogte van 10m. De turbulentie zorgt voor het grillige verloop van de ogenblikkelijke windsnelheid. Beiden werden statistisch bepaald uit meetgegevens.

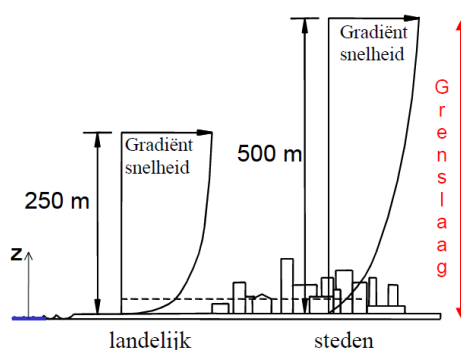


Figuur 29: Gemiddelde snelheid v_m en turbulentie $u(t)$ [22]

Als startwaarde voor het bepalen van de windbelasting gebruikt men de gemiddelde windsnelheid met een terugkeerperiode van 50 jaar. Met andere woorden de gemiddelde windsnelheid gemeten over een interval van 10 minuten die een kans heeft van 2% om in een jaar overschreden te worden. Om de piekwindsnelheid uit dit gemiddelde te bepalen, hanteert men een overschrijdingskans van 0,05%.

3.2 Invloed van de omgeving

Door wrijving met het aardoppervlak neemt de windsnelheid af naarmate zij dit oppervlak nadert. De zone waar dit zich afspeelt kan analoog met andere stromingsproblemen als een grenslaag beschouwd worden. De grenslaag kan men definiëren als de zone waarin een stroming zich niet volledig kan ontwikkelen wegens effecten die zich voordoen aan de wand. Eens buiten deze grenslaag is de windsnelheid nagenoeg constant en is turbulentie geminimaliseerd.

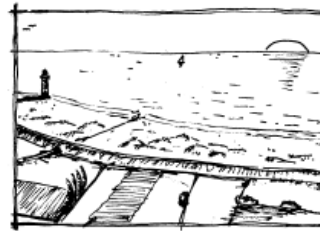


Figuur 30: Snelheidsprofiel grenslaag [22]

Reliëf, constructies, bomen en vegetatie zullen de luchtstroming verhinderen zodanig er turbulenties optreden en de windsnelheid zal afnemen. Deze obstakels kan men als de ruwheid van het aardoppervlak beschouwen. Hoe meer uitgesproken deze afwijken van een glad vlak, hoe sterker dit het snelheidsprofiel zal beïnvloeden. De Eurocode onderscheidt daarom 5 terreincategorieën.

Terrain category 0

Sea, coastal area exposed to the open sea



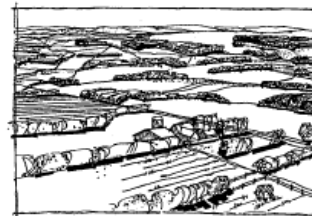
Terrain category I

Lakes or area with negligible vegetation and without obstacles



Terrain category II

Area with low vegetation such as grass and isolated obstacles (trees, buildings) with separations of at least 20 obstacle heights



Terrain category III

Area with regular cover of vegetation or buildings or with isolated obstacles with separations of maximum 20 obstacle heights (such as villages, suburban terrain, permanent forest)



Terrain category IV

Area in which at least 15 % of the surface is covered with buildings and their average height exceeds 15 m



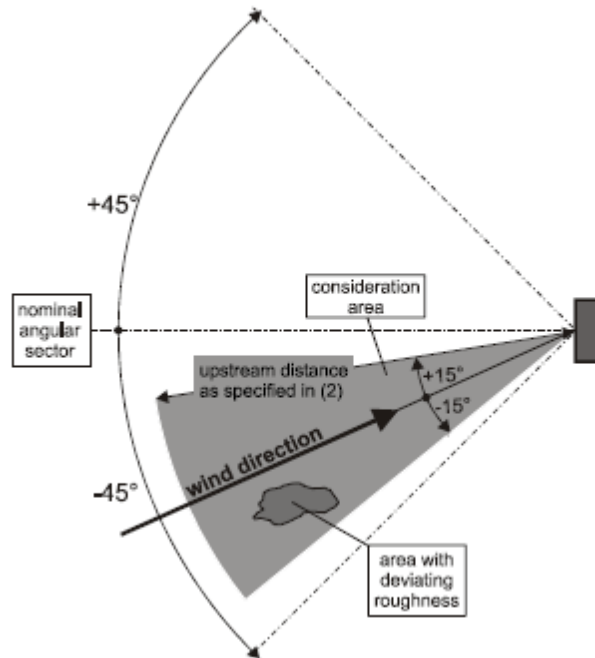
Figuur 31: Terreincategorieën [23]

Hoe lager de terreincategorie hoe hoger de windsnelheid en hoe sneller deze toeneemt met de hoogte tegen over het referentievlak.

In principe is het veilig met de laagste ruwheid te werken die terug te vinden in de nabijheid van het gebouw. Wenst men dit te verfijnen, dan kan men voor iedere windsector de juiste terreincategorie bepalen a.d.h.v. volgende procedure [24]:

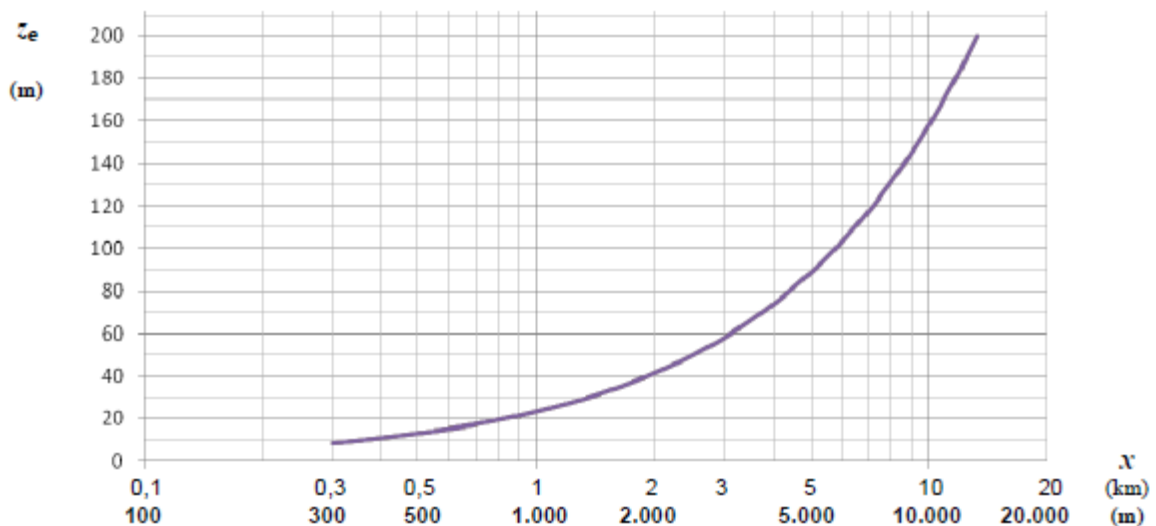
1. De referentiehoogte z_e wordt bepaald, rekening houdend met de ontwerpvoorwaarden (zie hoofdstuk 3.8). Vervolgens stelt men de meest ongunstige ruwheidscategorie vast (0, I, II, III, IV), d.w.z. de categorie met het kleinste Romeinse cijfer, die zich in de beschouwde nominale hoeksector met straal x bevindt (x wordt berekend aan de hand van Figuur 33).
2. De hoeksector van 30° wordt zodanig geplaatst dat de ingesloten oppervlakte, gekenmerkt door de meest ongunstige ruwheidscategorie, zo groot mogelijk is.

3. Tenslotte dient men na te gaan of de oppervlakte met de meest ongunstige ruwheidscategorie minstens 10 % van de totale oppervlakte van de hoeksector van 30° vertegenwoordigt :
- zo ja, dient men deze meest ongunstige ruwheidscategorie toe te passen
 - zo neen, dient men deze ruwheidscategorie te negeren, de resterende ruwheidscategorieën te beschouwen en de procedure te hernemen bij punt 3.



Figuur 32: Bepaling van de windrichtingsector [23]

De straal x van de sector is afhankelijk van de referentiehoogte z_e (voor het bepalen van de referentiehoogte zie 3.8).

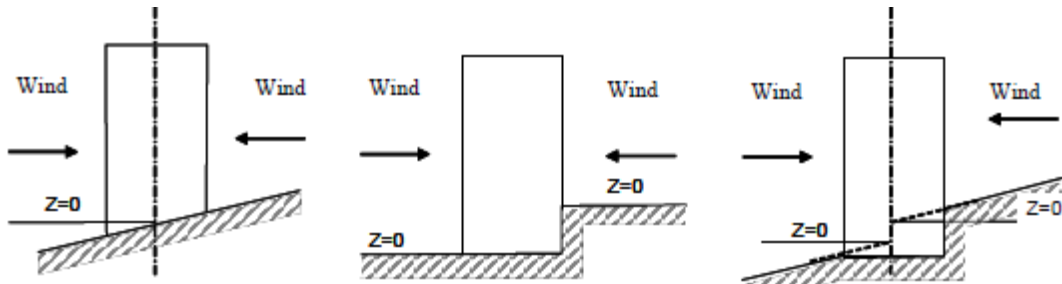


Figuur 33: Afstand x voor de in acht te nemen terreinruwheid [25]

3.3 Aanzet snelheidsprofiel

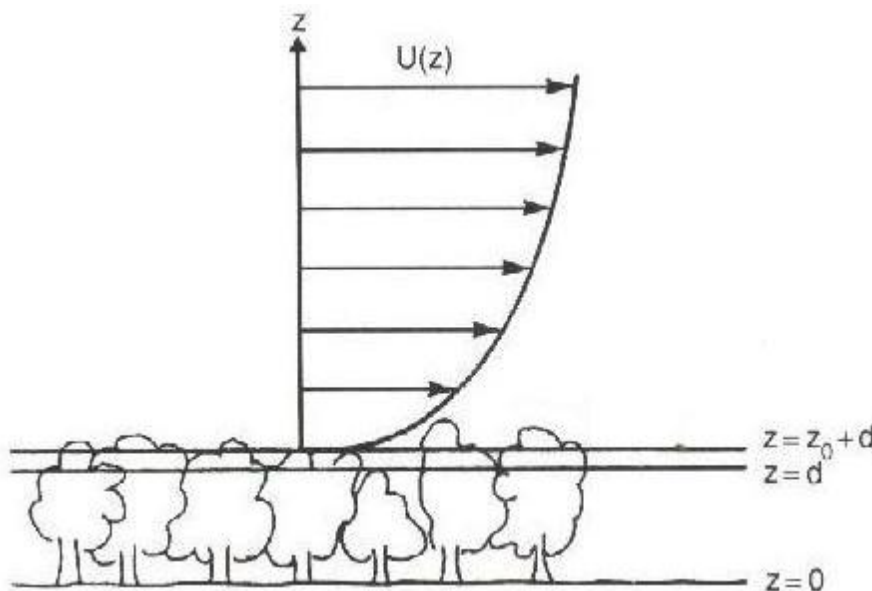
In principe bouwt het snelheidsprofiel zich op vanaf het maaiveld. De norm voorziet hier wel enkele uitzonderingen:

- Voor een bouwwerk ingeplant op een helling beschouwt men het gemiddelde hoogtepeil aan de centrale as van het gebouw. Bij een terreinsprong wordt de hoogte van het maaiveld beschouwd aan de gevel waaruit de wind afkomstig is.



Figuur 34: Referentieniveau in geval van verschil in hoogte van het terrein [25]

- Voor een bouwwerk aan de kust beschouwt men het eb peil.
- Voor een bouwwerk gelegen in een zeer ruw gebied(III of IV) houdt men rekening met de opstuwung van het snelheidsprofiel.



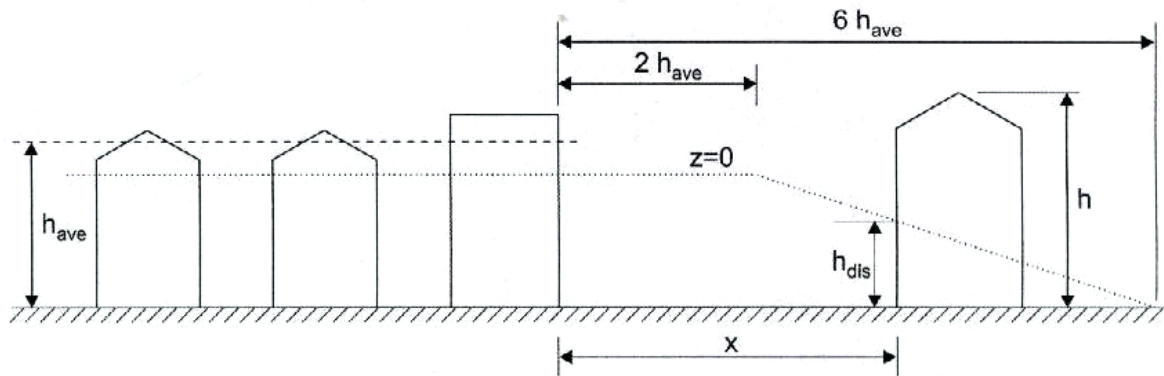
Figuur 35: Opstuwung snelheidsprofiel [22]

Deze opgestuwde hoogte kan men als volgt begroten:

$$d = h_m - 4,3 \cdot z_0 \cdot (1 - a)$$

Waarbij h_m de gemiddelde hoogte van de bouwwerken in de hoeksector, a de verhouding tussen de bebouwde en volledige oppervlakte bedraagt. z_0 is afhankelijk van de terreincategorie en is terug te vinden in Tabel 2 wat verderop.

De invloedzone van deze opstuwung is terug te vinden op onderstaande figuur. De berekeningsmethode is terug te vinden in bijlage A-5 van EN 1991-1-4.



Figuur 36: Invloedzone opstuwing [23]

3.4 Gemiddelde windsnelheid

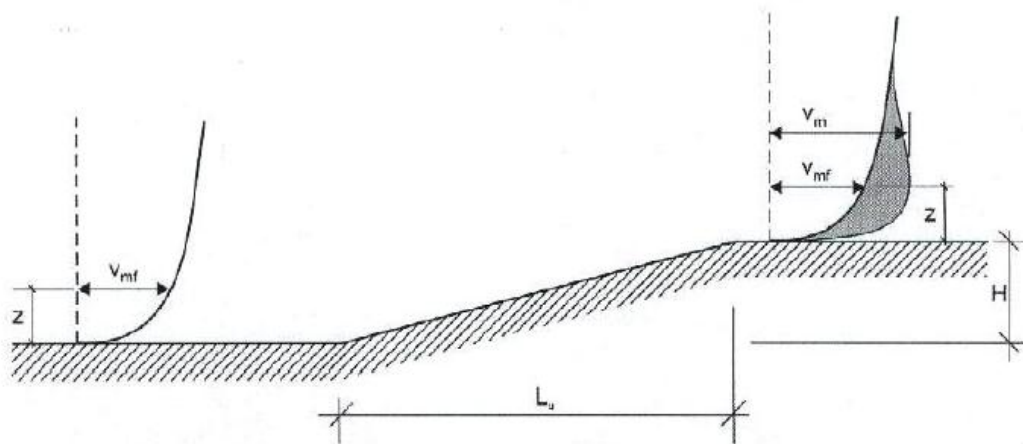
De windsnelheid kan omschreven worden als een machtsfunctie van de hoogte. Deze afhankelijkheid van de hoogte wordt in rekening gebracht aan de hand van 2 factoren: de orografiefactor en ruwheidfactor.

$$v_m(z) = c_r(z) \cdot c_0(z) \cdot v_b$$

$v_m(z)$ gemiddelde windsnelheid

v_b basiswindsnelheid: zie volgend hoofdstuk

$c_0(z)$ orografiefactor: glooiingen in het reliëf kunnen voor wijzigingen in het snelheidsprofiel zorgen. In een vlakke omgeving mag men deze factor 1 veronderstellen.



Figuur 37: Wijziging snelheidsprofiel reliëf [23]

Indien het gebouw bovenaan een helling gebouwd is, kan men deze factor begroten aan de hand van bijlage A-3 van de EN-1991-1-4.

$c_r(z)$ ruwheidfactor: in deze factor zit het grenslaagprofiel vervat. Deze is afhankelijk van de terreinklasse in de beschouwde hoeksector. Waarden voor z_0 en z_{min} zijn terug te vinden in Tabel 2.

$$c_r(z) = k_r \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad \text{als } z_{min} \leq z \leq 200m$$

$$c_r(z) = c_r(z_{min}) \quad \text{als } z < z_{min}$$

$$\text{met } k_r = 0,19 \left(\frac{z_0}{z_{0,II}}\right)^{0,07}$$

Tabel 2: Parameters terreincategorieën [23]

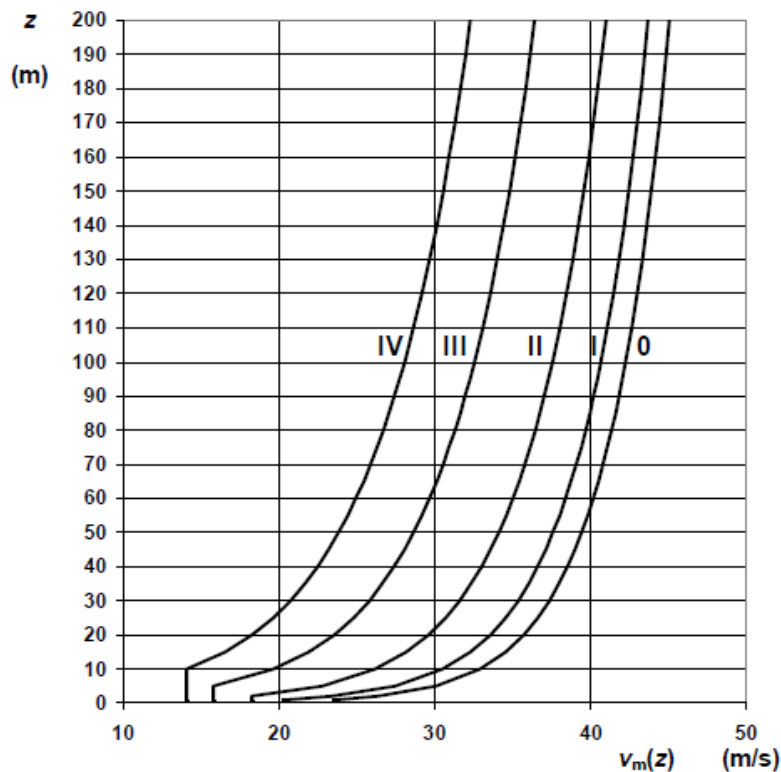
Terrain category		z_0 m	z_{min} m
0	Sea or coastal area exposed to the open sea	0,003	1
I	Lakes or flat and horizontal area with negligible vegetation and without obstacles	0,01	1
II	Area with low vegetation such as grass and isolated obstacles (trees, buildings) with separations of at least 20 obstacle heights	0,05	2
III	Area with regular cover of vegetation or buildings or with isolated obstacles with separations of maximum 20 obstacle heights (such as villages, suburban terrain, permanent forest)	0,3	5
IV	Area in which at least 15 % of the surface is covered with buildings and their average height exceeds 15 m	1,0	10

The terrain categories are illustrated in Annex A.1.

Wanneer de orografiefactor als de eenheid mag aangenomen worden, laat het snelheidsprofiel zich dus beschrijven volgens onderstaande formule.

$$v_m(z) = 0,19 \left(\frac{z_0}{z_{0,II}} \right)^{0,07} \cdot \ln \frac{z}{z_0} \cdot v_b$$

Met een basis windsnelheid van 26m/s en orografiefactor van 1 laat dit de volgende profielen optekenen.



Figuur 38: Voorstelling van de gemiddelde windsnelheid $v_m(z)$ voor $v_{b,0} = 26$ m/s en $c_0 = 1$ [25]

3.5 Basiswindsnelheid

Om tot de basiswindsnelheid te komen, vertrekt men van de fundamentele windsnelheid. Deze werd gedefinieerd als de over 10 minuten uitgemiddelde windsnelheid met een terugkeerperiode van 50 jaar onafhankelijk van de windrichting op een hoogte van 10m boven open terrein [26].

$$v_b = c_{dir} c_{season} v_{b,0}$$

c_{dir} richtingsfactor: aanbevolen waarde 1,0. In België is enkel een reductie toepasbaar voor wind uit het Oosten.

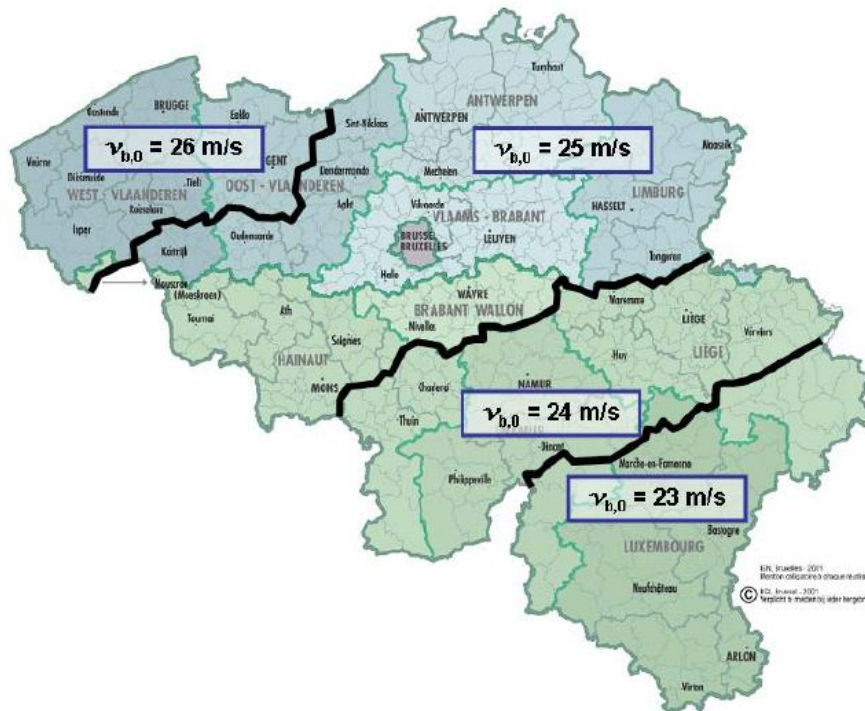
Tabel 3: Richtingsfactor [25]

RICHTING WAARUIT DE WIND KOMT	0°	22,5°	37,75°	45°	56,25°	90°	120°	150°	180°	270°
c_{dir}	1,0	1,0	0,95	0,90	0,85	0,85	0,90	0,95	1,0	1,0
$(c_{dir})^2$	1,0	1,0	0,90	0,81	0,72	0,72	0,81	0,90	1,0	1,0

c_{season} seizoensfactor: aanbevolen waarde 1,0

$v_{b,0}$ fundamentele basiswindsnelheid: deze mag gelijk genomen worden aan 26,0 m/s over gans België.

De NBN EN 1991-1-4-ANB laat toe dit eventueel te verfijnen volgens regio.



Figuur 39: Fundamentele basiswindsnelheden $v_{b,0}$ per gebied [25]

3.6 Turbulentie

Het tot hiertoe opgesteld profiel beschrijft enkel de gemiddelde windsnelheid. De wind bestaat echter uit een breed spectrum van vlagen waarvan de snelheid sterk kan variëren. De variatie blijkt licht af te nemen met de hoogte [22]. Deze turbulentie wordt ingerekend aan de hand van de turbulentie-intensiteit $I_v(z)$.

Ze wordt gedefinieerd als de standaardafwijking van de turbulentie gedeeld door de basis windsnelheid.

$$I_v(z) = \frac{k_1}{c_0(z) \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \text{ als } z_{min} \leq z \leq z_{max}$$

$$I_v(z) = I_v(z_{min}) \text{ als } z \leq z_{min}$$

k_1 mag 1 verondersteld worden. Bij terreincategorieën III en IV mag deze volgens EN 1991-1-4-ANB als 0,95 en 0,85 respectievelijk gekozen worden.

3.7 Piekstuwdruk

De dynamische druk veroorzaakt door de stroming van een fluidum is evenredig met het kwadraat van de snelheid van dit fluidum.

$$q_p = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2$$

Gezien de gemiddelde windsnelheid en zijn standaardafwijking al bepaald werden kan de piekstuwdruk eenvoudig bepaald worden. Men houdt rekening met windvlaag die een overschrijdingskans van 0,05% heeft. Zoals men kan merken wordt geen rekening gehouden met de kwadratische termen van de turbulentie-intensiteit.

$$q_p(z) = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_m(z)^2 \cdot [1 + 7I_v(z)]$$

ρ densiteit lucht: aanbevolen waarde 1,25 kg/m³

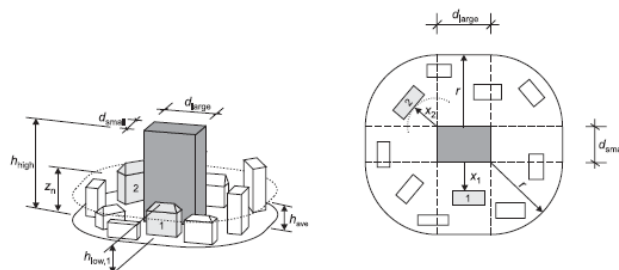
Daar het bepalen van de piekstuwdruk vrij omslachtig kan zijn, werden de tabellen uit de norm voor alle basiswindsnelheden overgenomen in bijlage A.

3.8 Referentiehoogte

Afhankelijk van het beschouwde constructieonderdeel zal men een referentiehoogte moeten bepalen om de piekstuwdruk te berekenen. Voor daken en dakelementen is dit telkens het hoogste punt van het dak nl. de nok of dakrand.

Wanneer een constructie-element deze hoogte overschrijdt, lijkt het aangewezen om de maximale hoogte van deze elementen als referentiehoogte te nemen bij het dimensioneren van dit element. Dit is o.a.. van toepassing bij zonnepanelen die hoger uitkomen dan de dakrand. Voor gevels is de keuze van de referentiehoogte afhankelijk van de totale hoogte van het gebouw.

Voor de referentiehoogte van een constructie voorziet de Eurocode een uitzondering wanneer er een groot gebouw aanwezig is in de nabije omgeving die tweemaal hoger is dan de gemiddelde bouwhoogte in die zone. Rekenregels hiervoor zijn terug te vinden in bijlage A-4 van de EN 1991-1-4.



Figuur 40: Invloed groot gebouw op 2 nabije constructies [23]

4 Winddruk op een oppervlak

4.1 Algemeen

Men kan het effect van de wind als een statische grootte beschouwen zolang de eigenfrequentie van de te ontwerpen constructie(-elementen) groter is dan 5Hz.

Door aanwezigheid van obstructies zal de lichtsnelheid op sommige plaatsen groter of dan wel kleiner zijn dan in de ongestoorde stroming. Dit zorgt voor drukvariaties waarbij sommige vlakken in een onderdruk of overdruk zullen komen te staan t.o.v. de atmosferische druk. Deze relatieve druk in een punt wordt als het product van de stuwdruk met een dimensieloze positieve of negatieve overdrukcoëfficiënt c_p beschreven [22].

$$w = c_p \cdot q_p(z) = c_p \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2$$

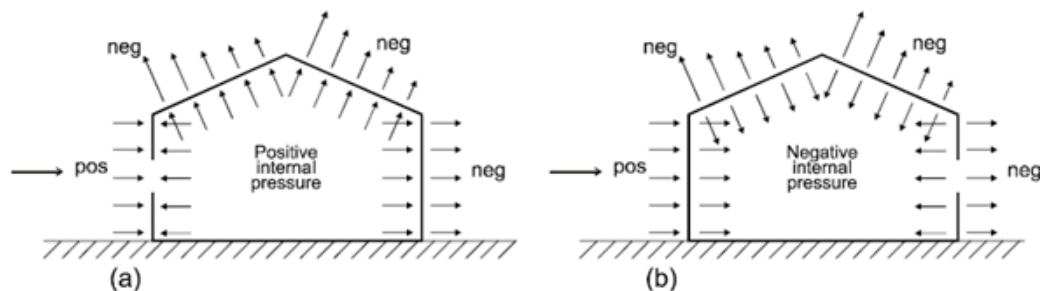
Zoende kan men de overdrukcoëfficiënt ook omschrijven als de verhouding van het drukverschil tussen lokale druk en de druk die normaal zou heersen in vrije aanstroming op een zelfde hoogte over de dynamische druk.

$$c_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2}$$

Men maakt onderscheid tussen de inwendige en uitwendige drukcoëfficiënt op een vlak, respectievelijk c_{pi} en c_{pe} . Bij een $c_{p,net}$ heeft men het over de netto drukcoëfficiënt waarbij inwendige en uitwendige drukcoëfficiënt gesommeerd werden.

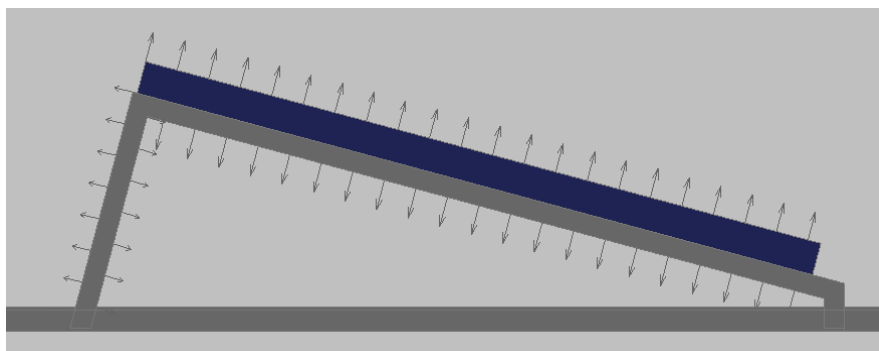
4.2 Tekenafpraak volgens EN 1991-1-4

Zowel een inwendige als uitwendige druk kan aan een oppervlak optreden. Tekenafspraken volgens de Eurocodes kan men op Figuur 41 terugvinden. Zuigkrachten krijgen een negatief teken, drukkrachten een positief.



Figuur 41: Tekenafspraken c_p volgens EN 1991-1-4 [23]

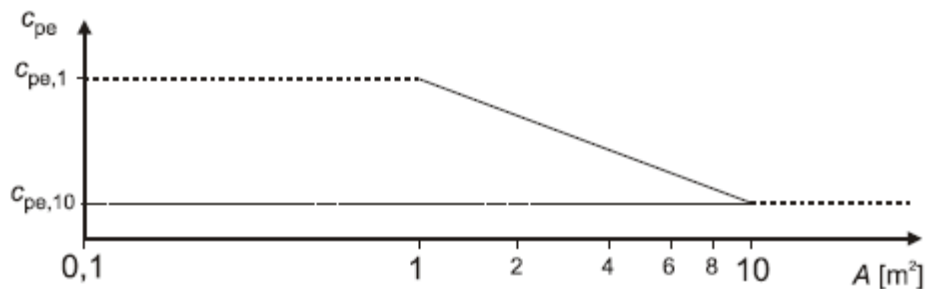
Toegepast op de hulpstructuur en het paneel geven negatieve drukcoëfficiënten steeds zuigkrachten, zowel inwendig als uitwendig. Een negatieve $c_{p,net}$ betekent een zuigkracht van het dak weg.



Figuur 42: Tekenafpraak bij negatieve drukcoëfficiënten

4.3 Lokale & globale effecten

De grootte van het beschouwde oppervlak speelt ook zijn rol. De intensiteit van een windvlaag is niet enkel afhankelijk van de tijd maar ook van zijn plaats. Terwijl een piek vrij lokaal zal optreden zal iets verder de druk reeds afgenomen zijn. Daarom maakt de norm een onderscheid tussen elementen kleiner dan 1m en groter dan 10m, voor tussenliggende waarden dient men logaritmisches te interpoleren.



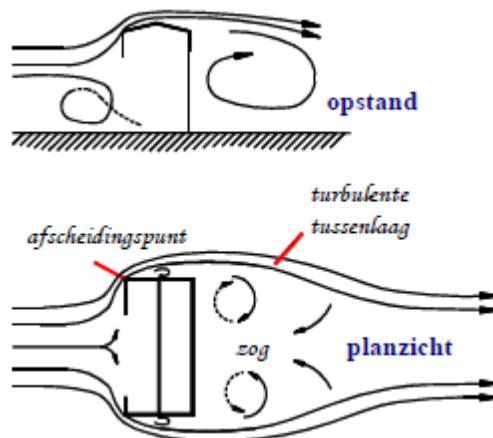
Figuur 43: Aanbevolen procedure voor interpolatie van elementen tussen 1 en 10m² [23]

4.4 Achtergrond drukcoëfficiënten

De drukcoëfficiënten kunnen niet op een analytische manier bepaald worden. Tot over enkele jaren was men enkel aangewezen op windtunnelproeven en in-situmetingen. Recent kunnen krachtige numerieke rekenmodellen opgebouwd in CFD software hiervoor een toedrage leveren. Wel dient men voorzichtig om te springen met resultaten uit dergelijke simulaties. Hier meer over in hoofdstuk 6.2.

De drukcoëfficiënt die heerst aan een oppervlak is afhankelijk van de geometrie van het lichaam waarvan het deel uit maakt en waar het zich bevindt in de luchtstroming. De aanwezigheid van het lichaam zal immers de stroomlijnen danig vervormen dat zowel de snelheid als de druk zal wijzigen en dit over de het volledige oppervlak. Het zelfde effect zal een ander lichaam hebben dat zich aan de loefkant bevindt van het oppervlak.

Typisch aan scherpe randen zullen de stroombanen loskomen en in de luwte voor turbulentie zorgen. Daar zal zich steeds een onderdruk voordoen die als een zuigkracht optreedt. De afmetingen van de zone waar deze onderdruk heerst zijn enkel afhankelijk van de globale geometrie van het gebouw en dus onafhankelijk van de windsnelheid.



Figuur 44: Luchtbeweging rond gebouwen [22]

Voor een groot aantal geometrieën van bouwwerken geeft de EN 1991-1-4 dergelijke coëfficiënten op. Deze komen later aan bod.

Om snel een schatting te maken welke drukken men kan verwachten op een constructie, wordt in de praktijk al snel met een winddruk van 100 kg/m² gerekend. Dit stemt overeen met de piekstuwdruk die men voor een terreincategorie II op een hoogte van 10 m. De meeste daken van industriële loodsen zijn van ongeveer die hoogte en zijn gebouwd in een omgeving die meestal met terreincategorie II overeenstemt. Daarom zal deze waarde dan ook verder in deze masterproef gehanteerd worden om het effect van de wind bevattelijk te maken.

4.5 Resulterende krachten

De resulterende kracht van de wind op een constructie-element vloeit voort uit de vectoriële som van de inwendige en uitwendige winddruk op dit element. Men dient wel steeds het onderscheid tussen lokale of globale effecten in gedachten te houden wanneer men elementen dimensioneert die een windlast over een oppervlak van kleiner dan 10m² moeten kunnen opvangen.

Naast de normaal gerichte krachten kunnen ook wrijvingskrachten optreden wanneer een wand van voldoende lengte is zodat losgekomen stroomlijnen na een zeker afstand terug het oppervlak aanstromen. Men dient deze kracht pas in rekening te brengen indien de som van de parallel aangestroomde oppervlaktes 4 maal groter is dan de som van alle vlakken loodrecht op de windrichting (zowel loef- als lijzijde).

$$F_{w,e} = c_s c_d \sum_{opp} w_e A_{ref}$$

$$F_{w,i} = c_s c_d \sum_{opp} w_i A_{ref}$$

$$F_{fr} = c_{fr} \cdot q_p(z_e) \cdot A_{fr}$$

$w_e = c_{pe} \cdot q_p(z_e)$ uitwendige winddruk

$w_i = c_{pi} \cdot q_p(z_i)$ inwendige winddruk

$c_s c_d$ bouwwerkfactor: brengt dynamische effecten in rekening, voor gebouwen lager dan 15m mag deze als 1,0 aangenomen worden evenals voor dakelementen met een eigenfrequentie groter dan 5Hz.

Voor het bepalen van de referentie hoogte voor de inwendige druk zijn andere regels van toepassing. Deze kan men terugvinden in de norm.

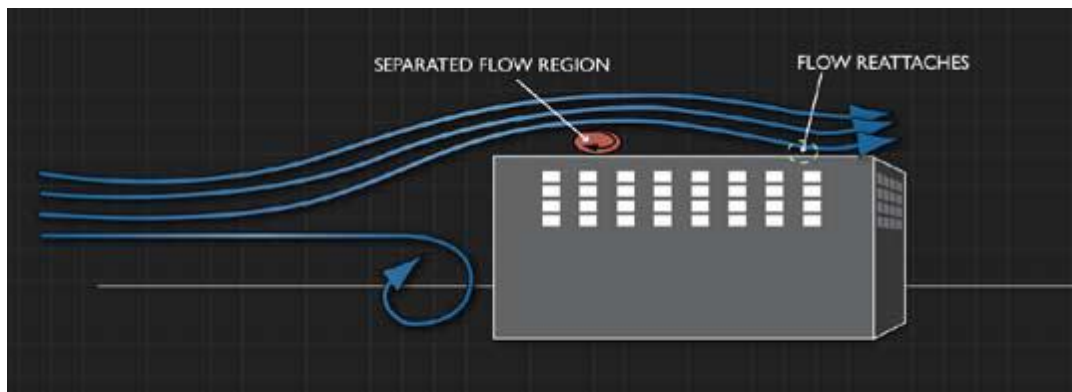
5 Strooming op dak

5.1 Algemeen

Bij platte daken van voldoende windwaartse diepte zijn er duidelijk 2 zones met elk een totaal verschillend stroomregime te herkennen.

Nabij de dakrand worden de stroombanen opgestuwd en komen ze los van deze scherpe rand. Dit fenomeen wordt als 'flow separation' omschreven. Er zullen wervels ontstaan waarbij de lucht nabij het dakoppervlak in tegengestelde richting zal stromen. Hier verkeert de stroming in een turbulent regime.

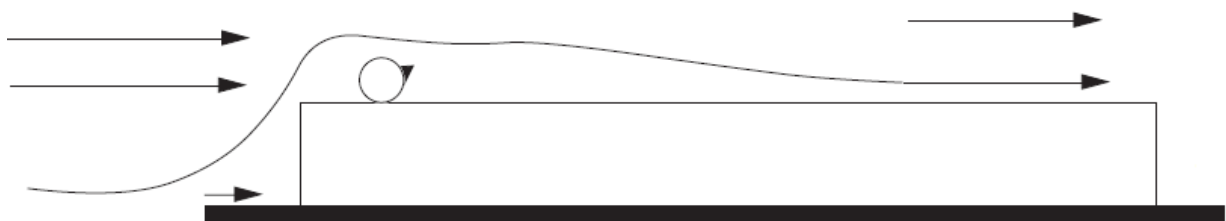
Verderop zullen de wervels uitsterven en kan de luchtstroming het dakvlak naderen. Hierdoor krijgt men terug vrije aanstroming van het dakvlak. De stroming is er dus eerder laminair.



Figuur 45: Luchtstroming bij plat dak [27]

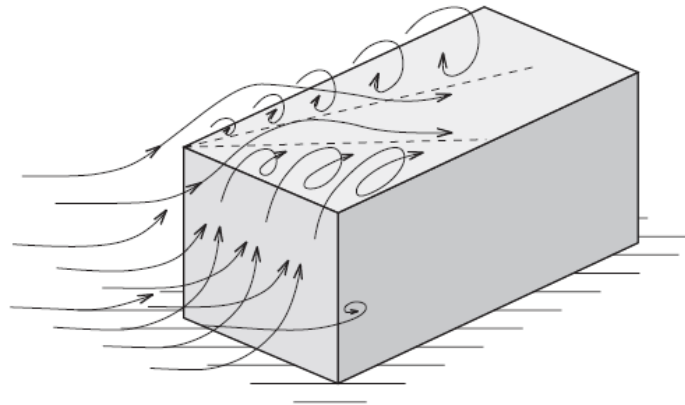
5.2 Turbulente zone

De zones onderhevig aan een turbulent regime doen zich dus voort nabij de dakranden. Wanneer de wind haaks op de gevel staat zal deze cilindrische wervels creëren.



Figuur 46: Cilindrische turbulenties bij wind loodrecht op de gevel [28]

Wanneer de wind volgens een bissectrice van het dakvlak aanstroomt dan zullen de losgekomen stroombanen elkaar ontmoeten en elkander versterken. Dit verklaart waarom de drukcoëfficiënten in de hoekzones nog hoger zullen zijn dan in de randzones.



Figuur 47: Conische turbulenties bij wind die invalt volgens de bissectrice van het dakvlak [28]

Deze wervels zorgen voor grote onderdrukken in vergelijking met andere punten waar de stroming niet beïnvloed wordt. Zodoende ondervindt het dak aan de randzones een uplift, die bij stalen constructies zelf bepalend kan worden bij het dimensioneren van de dakstructuur.

Daar de intensiteit van de turbulentie afneemt naarmate men zich verder van de dakrand beweegt, zullen de grootste onderdrukken net achter de dakrand optreden.

5.3 Zone met vrije aanstroming

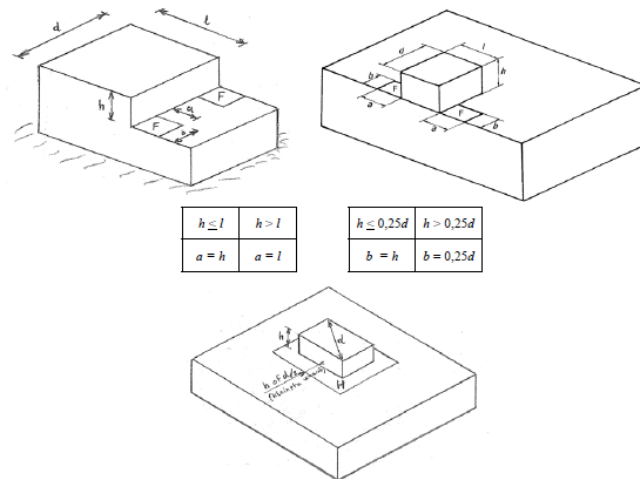
Na een zekere afstand ondervindt de luchtstroming geen invloed meer van de wervels en kan ze het dakvlak vrij aanstromen. Deze afstand is enkel afhankelijk van de globale geometrie van het gebouw. Hoewel ze lichtjes fluctueert door de turbulentie, valt deze gemiddeld samen met een afstand ongeveer 2 maal de hoogte van de aangestroomde gevel [27]. Bij smallere constructies zal de breedte van de aangestroomde gevel bepalend zijn voor het punt waar reattachement optreedt.

Dit is ook duidelijk terug te vinden in de dimensies van de zones waar verschillende drukcoëfficiënten van toepassing zijn volgens de EN 1991-1-4 (zie Figuur 49). Daar waar men bij de rand hoge negatieve drukcoëfficiënten dient toe te passen, blijft enkel een kleine schommelende druk meer over vanaf men zich op een afstand gelijk aan de hoogte van de rand verwijderd is.

5.4 Invloed obstructies

Meestal worden platte daken van dakranden voorzien. Dit laat niet enkel toe om op een eenvoudige manier te verhinderen dat opgevangen regenwater over de gevels zou stromen maar heeft ook een gunstige invloed op intensiteit van de wervels. Hoe hoger de dakrand hoe lager de te verwachten onderdrukken.

Andere hindernissen op een dak zullen meestal een negatieve invloed hebben. Hun aanwezigheid verstoort het aangenomen stromingspatroon en bijgevolg ook de drukken. Wanneer het dak verschillende niveaus heeft of er kleine opbouw op staat, dienen extra zones ingerekend te worden waar wervels kunnen optreden.



Figuur 48: Aanvullende legendes van toepassing op platte daken met verschillende dakniveaus [25]

Om een beter inzicht te krijgen over hoe moet omgesprongen worden met verschillende dakniveaus en afwijkende grondplan kan men [29] nalezen.

5.5 Drukcoëfficiënten volgens EN 1991-1-4

5.5.1 Algemeen

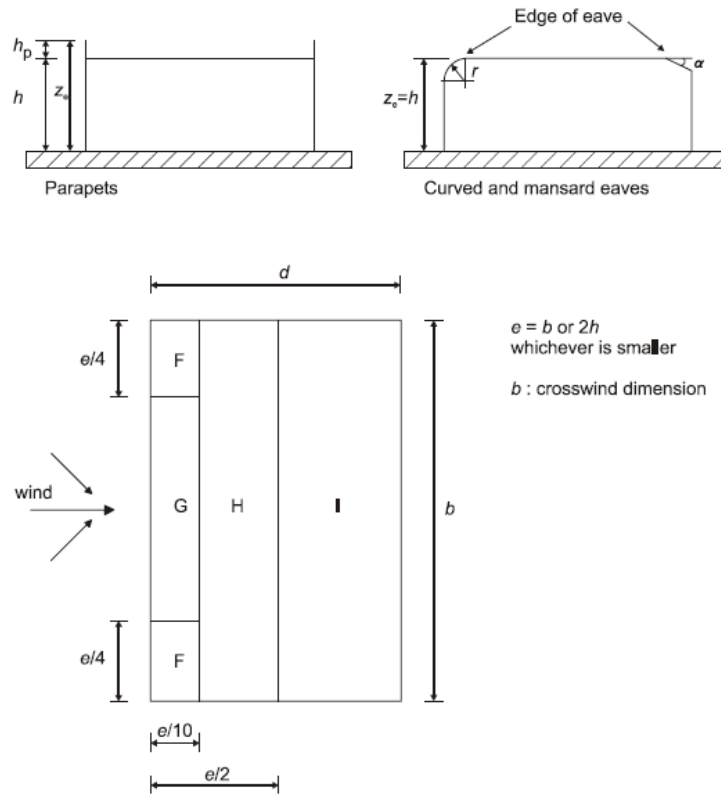
In de windnorm zijn drukcoëfficiënten opgenomen van een aantal type daken: platte, hellende en gebogen daken. Bij de hellende daken wordt een onderscheid gemaakt tussen enerzijds daken met één, twee of meerdere dakvlakken en anderzijds gesloten of open (cfr. Carports).

5.5.2 Platte daken

Alle daken met een helling kleiner dan 10° dienen beschouwd te worden als een plat dak.

Men dient het dak per windrichting haaks op een gevel te verdelen in zones waar verschillende drukcoëfficiënten zullen heersen. Zowel de dimensies van deze zones als de overdrukcoëfficiënten staan aangegeven op volgende figuren. Ook dient een onderscheid gemaakt te worden in de uitvoering van de dakrand. Wanneer geen dakrand aanwezig is zullen elementen kleiner dan 1m^2 net aan rand aan een zuigkracht van maar liefst 250kg/m^2 onderhevig zijn (zone F, $c_{pe,1} = -2,5$), plaatst men een relatief hoge dakrand dan moet men slechts een zuigkracht van 180kg/m^2 inrekenen (zone F, $c_{pe,1} = -1,8$).

De zones F, G en H stemmen overeen met de zones waar de wervels optreden. In zone I zijn deze uitgestorven en kan vrije aanstroming optreden. Hier dient men een drukcoëfficiënt van $+0,2$ of $-0,2$ in te rekenen afhankelijk van welke de meest belastende zou blijken te zijn. De maximale uitwendige neerwaartse druk op het dakvlak door de wind is dus slechts 20kg/m^2 .



Figuur 49 Zonering bij platte daken [23]

Tabel 4 Overdrukcoëfficiënten bij platte daken [23]

Roof type		Zone							
		F		G		H		I	
		$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$
Sharp eaves		-1,8	-2,5	-1,2	-2,0	-0,7	-1,2	+0,2	-0,2
With Parapets	$h_p/h=0,025$	-1,6	-2,2	-1,1	-1,8	-0,7	-1,2	+0,2	-0,2
	$h_p/h=0,05$	-1,4	-2,0	-0,9	-1,6	-0,7	-1,2	+0,2	-0,2
	$h_p/h=0,10$	-1,2	-1,8	-0,8	-1,4	-0,7	-1,2	+0,2	-0,2
Curved Eaves	$r/h = 0,05$	-1,0	-1,5	-1,2	-1,8	-0,4		+0,2	-0,2
	$r/h = 0,10$	-0,7	-1,2	-0,8	-1,4	-0,3		+0,2	-0,2
	$r/h = 0,20$	-0,5	-0,8	-0,5	-0,8	-0,3		+0,2	-0,2
Mansard Eaves	$\alpha = 30^\circ$	-1,0	-1,5	-1,0	-1,5	-0,3		+0,2	-0,2
	$\alpha = 45^\circ$	-1,2	-1,8	-1,3	-1,9	-0,4		+0,2	-0,2
	$\alpha = 60^\circ$	-1,3	-1,9	-1,3	-1,9	-0,5		+0,2	-0,2

NOTE 1 For roofs with parapets or curved eaves, linear interpolation may be used for intermediate values of h_p/h and r/h .

NOTE 2 For roofs with mansard eaves, linear interpolation between $\alpha = 30^\circ$, 45° and $\alpha = 60^\circ$ may be used. For $\alpha > 60^\circ$ linear interpolation between the values for $\alpha = 60^\circ$ and the values for flat roofs with sharp eaves may be used.

NOTE 3 In Zone I, where positive and negative values are given, both values shall be considered.

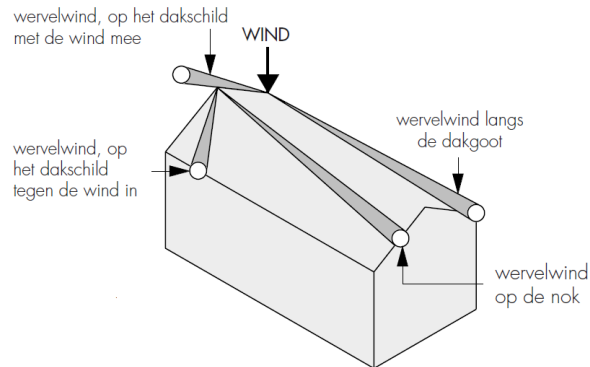
NOTE 4 For the mansard eave itself, the external pressure coefficients are given in Table 7.4 "External pressure coefficients for duopitch roofs: wind direction 0° ", Zone F and G, depending on the pitch angle of the mansard eave.

NOTE 5 For the curved eave itself, the external pressure coefficients are given by linear interpolation along the curve, between values on the wall and on the roof.

5.5.3 Hellende daken

Hoewel in dit deel vooral geballasteerde systemen op platte daken beschouwd worden, zullen hellende daken ook even aan bod komen. Naast eerder vernoemde systemen zijn installaties op hellende daken ook zeer courant. Bovendien geeft het ook een duidelijk beeld welk stromingspatroon zich opbouwt rondom een hellend vlak in vrije aanstroming. Wat vergelijkbaar is met een PV-module met back- en sideplates op een dakvlak in de zone van vrije aanstroming.

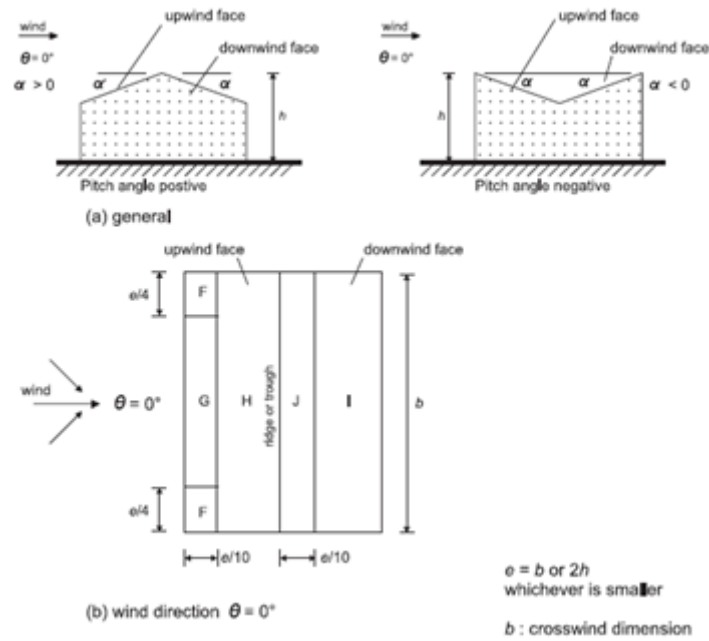
Analoog als bij platte daken ontstaan hier ook wervels aan de randen.



Figuur 50: Wervels op hellende daken[30]

In tegenstelling tot platte daken is er geen alzijdige symmetrie wat betreft de algemene geometrie. Er dienen 2 duidelijk verschillende situaties onderscheiden te worden: nl. deze waar de wind volgens de as van de nok gericht is en deze dwars hierop. In ieder geval is de referentiehoogte deze van de nok.

Men merkt dat de hellingshoek van de dakvlakken een grote invloed heeft. En dat in tegenstelling tot platte daken het moeilijker wordt om een algemeen patroon te ontwaren.



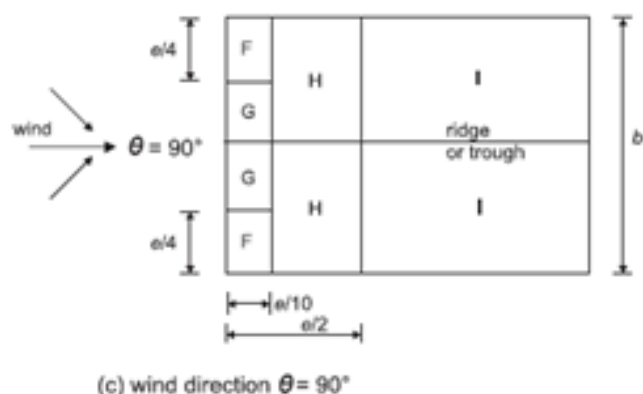
Figuur 51: Zonering hellende daken bij dwars op de nok [23]

Tabel 5: Overdrukcoëfficiënten voor hellende daken met de windrichting haaks op de nok [23]

Pitch Angle α	Zone for wind direction $\theta = 0^\circ$									
	F		G		H		I		J	
	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$
-45°	-0,6		-0,6		-0,8		-0,7		-1,0	-1,5
-30°	-1,1	-2,0	-0,8	-1,5	-0,8		-0,6		-0,8	-1,4
-15°	-2,5	-2,8	-1,3	-2,0	-0,9	-1,2	-0,5		-0,7	-1,2
-5°	-2,3	-2,5	-1,2	-2,0	-0,8	-1,2	+0,2		+0,2	
							-0,6		-0,6	
5°	-1,7	-2,5	-1,2	-2,0	-0,6	-1,2	-0,6		+0,2	
	+0,0		+0,0		+0,0				-0,6	
15°	-0,9	-2,0	-0,8	-1,5	-0,3		-0,4		-1,0	-1,5
	+0,2		+0,2		+0,2		+0,0		+0,0	+0,0
30°	-0,5	-1,5	-0,5	-1,5	-0,2		-0,4		-0,5	
	+0,7		+0,7		+0,4		+0,0		+0,0	
45°	-0,0		-0,0		-0,0		-0,2		-0,3	
	+0,7		+0,7		+0,6		+0,0		+0,0	
60°	+0,7		+0,7		+0,7		-0,2		-0,3	
75°	+0,8		+0,8		+0,8		-0,2		-0,3	

NOTE 1 At $\theta = 0^\circ$ the pressure changes rapidly between positive and negative values on the windward face around a pitch angle of $\alpha = -5^\circ$ to $+45^\circ$, so both positive and negative values are given. For those roofs, four cases should be considered where the largest or smallest values of all areas F, G and H are combined with the largest or smallest values in areas I and J. No mixing of positive and negative values is allowed on the same face.

NOTE 2 Linear interpolation for intermediate pitch angles of the same sign may be used between values of the same sign. (Do not interpolate between $\alpha = +5^\circ$ and $\alpha = -5^\circ$, but use the data for flat roofs in 7.2.3). The values equal to 0,0 are given for interpolation purposes



Figuur 52: Zoning hellende daken bij dwars op de nok [23]

Tabel 6: Overdrukcoëfficiënten voor hellende daken met de windrichting parallel aan de nok [23]

Pitch angle α	Zone for wind direction $\theta = 90^\circ$							
	F		G		H		I	
	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$
-45°	-1,4	-2,0	-1,2	-2,0	-1,0	-1,3	-0,9	-1,2
-30°	-1,5	-2,1	-1,2	-2,0	-1,0	-1,3	-0,9	-1,2
-15°	-1,9	-2,5	-1,2	-2,0	-0,8	-1,2	-0,8	-1,2
-5°	-1,8	-2,5	-1,2	-2,0	-0,7	-1,2	-0,6	-1,2
5°	-1,6	-2,2	-1,3	-2,0	-0,7	-1,2	-0,6	
15°	-1,3	-2,0	-1,3	-2,0	-0,6	-1,2	-0,5	
30°	-1,1	-1,5	-1,4	-2,0	-0,8	-1,2	-0,5	
45°	-1,1	-1,5	-1,4	-2,0	-0,9	-1,2	-0,5	
60°	-1,1	-1,5	-1,2	-2,0	-0,8	-1,0	-0,5	
75°	-1,1	-1,5	-1,2	-2,0	-0,8	-1,0	-0,5	

5.5.4 Inwendige druk

Tot slot is een dak ook onderhevig aan een inwendige druk. Wanneer er geen grote openingen zijn en/of er geen onevenredige verdeling is van openingen in de gevels hanteert men een overdruk bepaald met een inwendige drukcoëfficiënt van +0,2 en een onderdruk met een c_{pi} van -0,3. Mocht dit wel het geval zijn dan consulteert men best de EN 1991-1-4. Als referentiehoogte wordt dezelfde genomen die men hanteert voor het bepalen van de stuwdruk aan een gevel. Bij lage gebouwen is dit de dakrand.

Op de dakstructuur zal zowel een inwendige als uitwendige druk heersen. Deze kunnen elkander versterken. Zo zal de inwendige druk de netto neerwaartse winddruk verhogen tot 50kg/m² (Zone I $c_{pe} = +0,2$ en $c_{pi} = -0,3$)¹⁰.

¹⁰ Bij terreincategorie II met een dakrand op 10m hoogte

6 Stroming aan de modules

6.1 Algemeen

Nu het globale stromingspatroon aan het dakvlak bekend is, kan onderzocht worden welke winddrukken men kan verwachten op de zonnepanelen. Het lijkt voor zich te spreken dat de aanwezigheid van deze panelen invloed kunnen hebben op de stroming en dat bijgevolg ook de drukverdelingen anders zullen verlopen dan wanneer het geval zonder zonnepanelen.

Hiervoor werd in eerste instantie terug de Eurocode geconsulteerd: hoewel er geen specifieke bepalingen betreffende windbelasting op PV-panelen zijn in opgenomen, kan men misschien wel van vergelijkbare modellen vertrekken waarvoor de norm wel ontwerpparameters opgeeft.

Hieruit kon wel een schatting gemaakt worden van de te verwachten winddrukken maar de modellen waarbij deze winddrukken bepaald werden, leken niet 100% geschikt om te extrapoleren naar PV-toepassingen op platte daken.

In het buitenland bleken dan wel al normen ontwikkeld voor het bepalen van de windbelastingen op PV-systemen. Deze kunnen echter niet zomaar toegepast worden in het kader van de Europese windnorm: vertrekt men wel van hetzelfde windmodel, op welk niveau werden veiligheidsfactoren ingebouwd, etc.

Daarom werd verder gezocht in de literatuur naar onderzoek die de stromingsproblematiek rond PV-panelen behandelen. Alvorens deze zoektocht toe te lichten, zullen eerst de proefmodellen toegelicht worden waarmee men de gezochte drukcoëfficiënten zou kunnen bepalen. Tevens zal nagegaan worden welke factoren de uiteindelijke windbelasting op de panelen zullen beïnvloeden.

6.2 Proefmodellen

6.2.1 Algemeen

Stromingsproblemen op en rond gebouwen zijn vrij complex en kunnen wiskundig beschreven worden door de Navier-Stokes vergelijkingen. Hoewel vereenvoudigde opstellingen nog analytisch opgelost kunnen worden, is dit zeker niet het geval voor de stroming rond PV panelen op een gebouw. Dit kan enkel nog numerisch benaderd worden. Dit doet men aan de hand van CFD¹¹ software. Modellen gesimuleerd in dergelijke software vergen echter een grote rekenkracht. Maar dankzij de komst van steeds krachtigere Pc's is dit sinds enkele jaren geen beperking meer.

Vroeger had men deze krachtige computers niet en was men bij complexe problemen aangewezen op in-situmeetopstellingen of windtunnelproeven. In-situmeetopstellingen kennen echter de beperking dat men over een lange periode moet gaan meten alvorens men resultaten eenduidig kan interpreteren. Daarom worden meestal windtunnelproeven uitgevoerd op schaalmodellen.

6.2.2 In-situmetingen

Hierbij wordt een bestaande installatie of een object met gelijkaardige eigenschappen uitgerust met meetsensoren. Drukken kunnen opgemeten worden met druktransducers of pitotbuizen verspreid over het gehele oppervlak aan zowel voor als achterkant.

¹¹ Computational Fluid Dynamics



Figuur 53 Meetopstelling voor on-top module [31]

Hoewel dit proefmodel logischerwijs het best aansluit met een reële situatie heeft het toch heel wat beperkingen: zo zal over een lange periode moeten gemeten worden om maximale drukken met enige zekerheid te kunnen afleiden. Minimaal enkele maanden tot een jaar lijkt zeker aangewezen. Men zal immers per invalshoek van de wind over voldoende metingen moeten beschikken om een betrouwbare extreme waarden analyse te kunnen maken. Veel meetresultaten zullen ook moeten weerhouden worden ten gevolge van te lage windsnelheden, meetfouten, verstoring van de metingen door regen(druppels) enz. Een bijkomende moeilijkheid is het bepalen van de referentiewindsnelheid om de drukcoëfficiënten te bepalen. In principe dient te gebeuren op 10m hoogte in een vrij open veld, welke dus steeds op enige afstand van de opstelling zal zijn. Maar dan ook weer niet te ver want anders zal er geen correlatie meer zijn tussen de gemeten winddrukken.

De aankoop van de nodige meetapparatuur is overigens vrij duur en gezien het vrij lang duurt voor men betrouwbare resultaten kan verkrijgen uit één opstelling, zal deze kost niet snel op meerdere testconfiguraties kunnen afgeschreven worden. Men zal dus weinig verschillende configuraties kunnen testen in een relatief kort tijdsbestek tenzij men over veel (dure) meetsensoren kan beschikken. Bij windtunnelproeven kan men nu net wel verschillende configuraties op een korte tijd uitmeten.

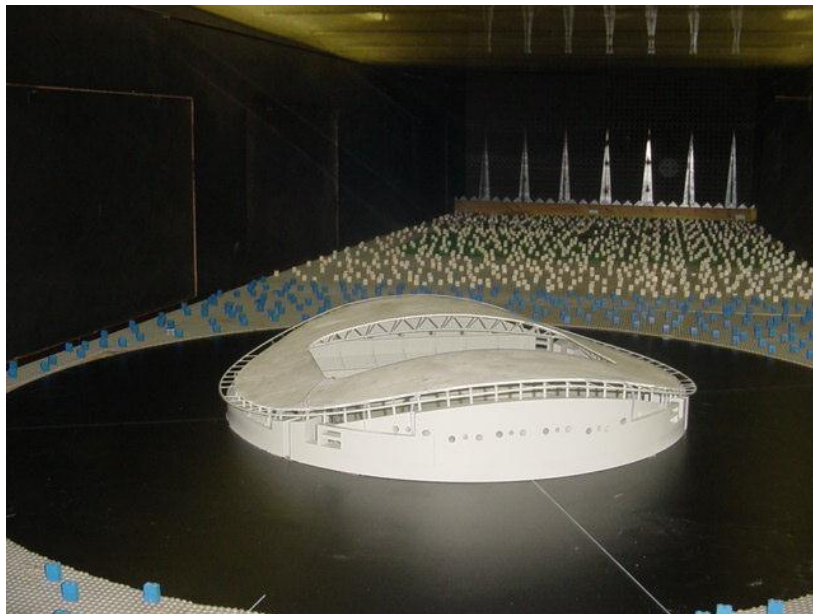
6.2.3 Windtunnelproef

Windtunnelproeven vormen het vertrekpunt van de meeste aerodynamische studies. Denk maar aan het ontwerpen van de vleugels voor een vliegtuig of aan een spoiler bij een auto. Aan de hand van rookinjectoren kunnen duidelijk de turbulente van de laminaire zones onderscheiden worden.



Figuur 54 Rooktrajectoriën bij windtunnelproef [32]

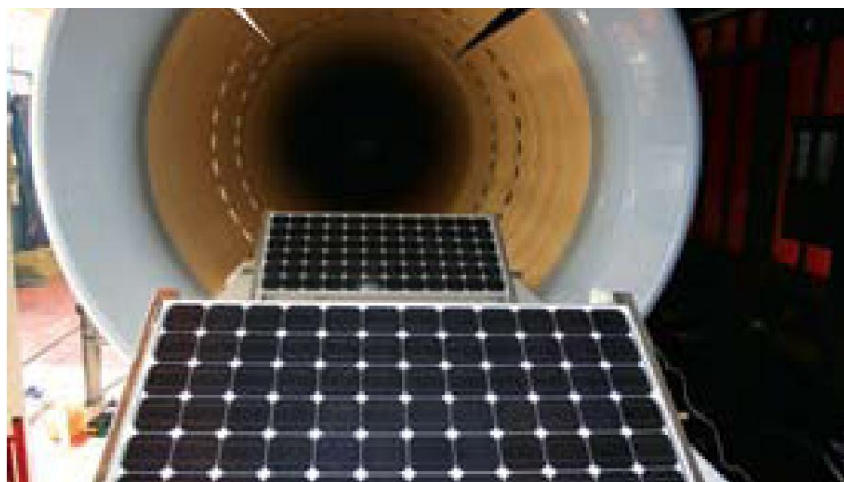
Bovendien kan men vrij sensoren plaatsen om de gewenste drukken of krachten te bepalen. Daarom worden windtunnelproeven toegepast wanneer windbelasting niet volgens de norm kunnen bepaald worden. Vooral bij grote bouwprojecten als wolkenkrabbers en bruggen komen er budgetten vrij om dergelijke studies aan te vatten.



Figuur 55 Windtunnelproef op schaalmodel van voetbalstadium [33]

Gezien de omvang van dergelijke constructies moet men steeds met schaalmodellen werken. Dit heeft ook een grote invloed op de randvoorwaarden. Zo zal bijvoorbeeld de windsnelheid verschaald moeten worden. Bovendien dient men in tegenstelling tot klassieke windtunnelstudies waar men enkel tot op een bepaalde kritieke uniforme luchtaanstroomsnelheid moet testen, een zeker snelheids- en turbulentieprofiel meegegeven aan de luchtstroming. Dit wordt verkregen door windwaarts het grondoppervlak een zekere ruwheid mee geven zodanig het gewenste profiel zich kan opbouwen alvorens het model te raken. Precieze aanbevelingen kan men terugvinden in het document CUR Aanbeveling 103 [34].

Gezien het instrumenteren en vervolgens interpreteren van de meetwaardes van dergelijke proeven nog een substantiële meerkost betekent, gaat men veelal destructieve proeven uitvoeren bij zonnepanelen. Hierbij worden de panelen op hun hulpstructuur in de windtunnel geplaatst en wordt de windsnelheid opgedreven tot wanneer het paneel gaat schuiven of kantelen.



Figuur 56: PV-systemen in windtunnel

Onmiddellijk valt op te merken dat een dergelijke test in principe enkel in overeenstemming is met de stromingscondities op platte daken daar waar vrije aanstroming optreedt. Voor het gedrag in

turbulente zones heeft deze opstelling geen enkele relevantie. Om dit alsnog te kunnen onderzoeken dient ook het gebouw in het model opgenomen worden.

6.2.4 CFD

Met de toenemende rekenkracht van computers treden CFD studies meer en meer op de voorgrond. In zoon studie wordt een model gemaakt van het element en zijn omgeving om dan vervolgens de randvoorwaarden op te leggen: windsnelheid, windrichting, snelheidsprofiel, wallfuncties, ed. De volledige omgeving wordt dan opgedeeld in vaste cellen of volumes, meshing genaamd. Algemeen kan men stellen dat een fijnere mesh betrouwbaardere resultaten zou opleveren.

Vervolgens worden de Navier-Stokes vergelijkingen per deeltje opgelost met de randvoorwaarden van de omliggende deeltjes en/of rand. Deze berekeningen moeten steeds herhaald wordt tot er een zekere convergentie bereikt wordt.

Zolang er geen turbulentie optreedt, vallen de niet-lineaire termen uit de basis vergelijkingen weg en kunnen de basisvergelijkingen eenduidig opgelost worden. Bij stromingsproblemen rond gebouwen zal er altijd turbulentie optreden en zullen de niet-lineaire termen alsnog moeten opgenomen worden. Daardoor kunnen de Navier-Stokes vergelijkingen niet meer exact opgelost worden en moet men numerieke oplossingschema's gebruiken. Zo heeft men een breed gamma van verschillende turbulentiemodellen waarbij het ene meer geschikt is voor bepaalde turbulentieproblemen dan het ander(meer info kan men vinden in [35]). Algemeen kan men stellen hoe beter het turbulentiemodel hoe meer rekenkracht nodig blijkt. Het valt buiten het opzet van deze masterproef om dieper op deze modellen in te gaan maar het leek toch belangrijk om enkele aandachtspunten hieromtrent aan te stippen.

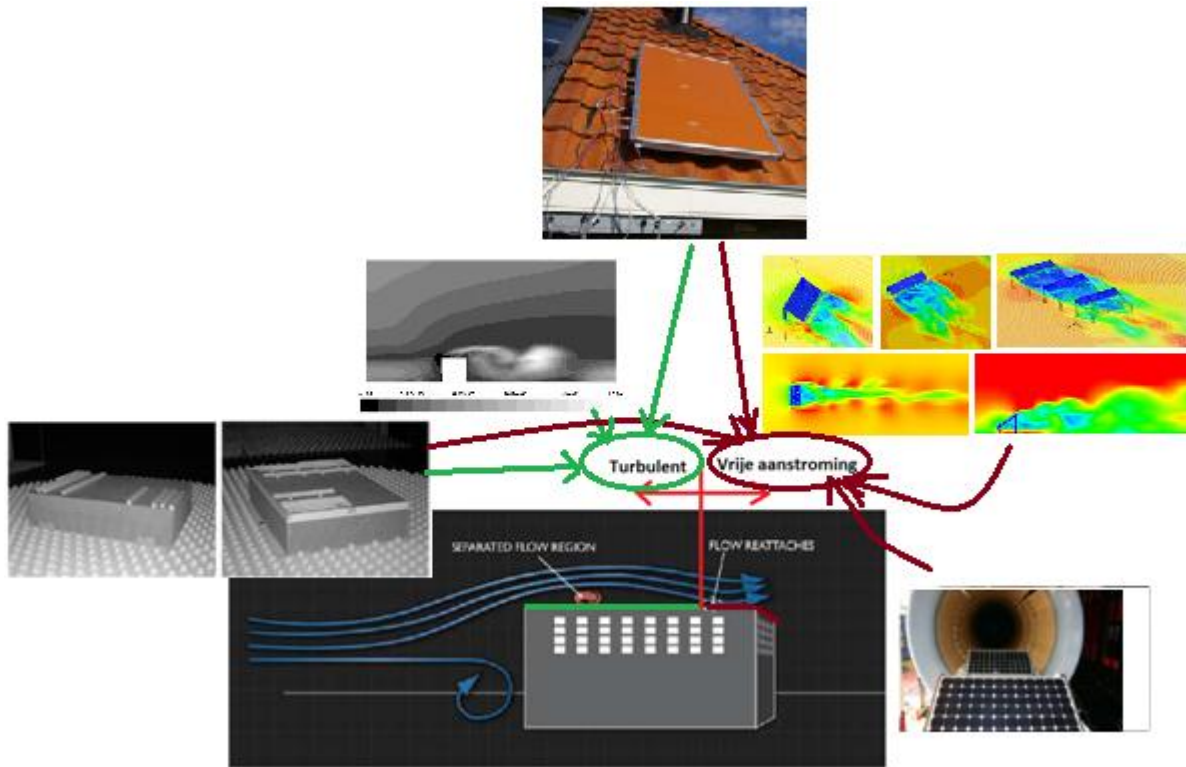
In commerciële toepassingen wordt standaard het $k-\xi$ model gebruikt om de turbulente zones op te lossen maar het SST $k-\omega$ en LES¹² model bleek vanuit de literatuurstudie betere oplossingen te bieden. Vooral bij situaties waar de stroombanen loskomen van een rand en wervels exciteren geven $k-\xi$ geen bevredigende resultaten. Het SST $k-\omega$ model presteert op dit vlak iets beter [36]. In een vergelijkende studie tussen meerder modellen voor luchtstroming rond een eenvoudig gebouw bleken enkel LES simulaties betrouwbare resultaten te geven [37].

Hoewel commerciële computers al over heel wat rekenkracht beschikken, botst men met de problematiek van stroming rond zonnepanelen op gebouwen op de grenzen van wat momenteel haalbaar is: men moet zowel een grote ruimte rondom het gebouw opnemen in het model zodat het stromingspatroon zich ongehinderd kan ontwikkelen en men dient de mesh voldoende te verfijnen rond de zonnepanelen om hier lokaal nog betrouwbare resultaten te bekomen. Dit leidt voor eenvoudige constructies tot een mesh van enkele miljoenen cellen. Wil men dan nog geavanceerdere turbulentiemodellen hanteren dan loopt de rekentijd op de krachtigere commerciële computers in het beste geval op tot meerdere uren of dagen.

6.2.5 Bedenkingen

Meestal worden PV opstellingen enkel getest in vrije aanstroming, dit stemt echter enkel overeen met vrijstaande installaties of modules die zich op voldoende afstand van de dakrand bevinden. Om te kunnen onderzoeken welke effect hun aanwezigheid in de turbulente randzones heeft, dient dan ook hun omgeving opgenomen te worden in het model, nl de algemene geometrie van het gebouw met voldoende vrije ruimte er rond zodat het stromingspatroon zich zoals in de werkelijkheid kan ontwikkelen.

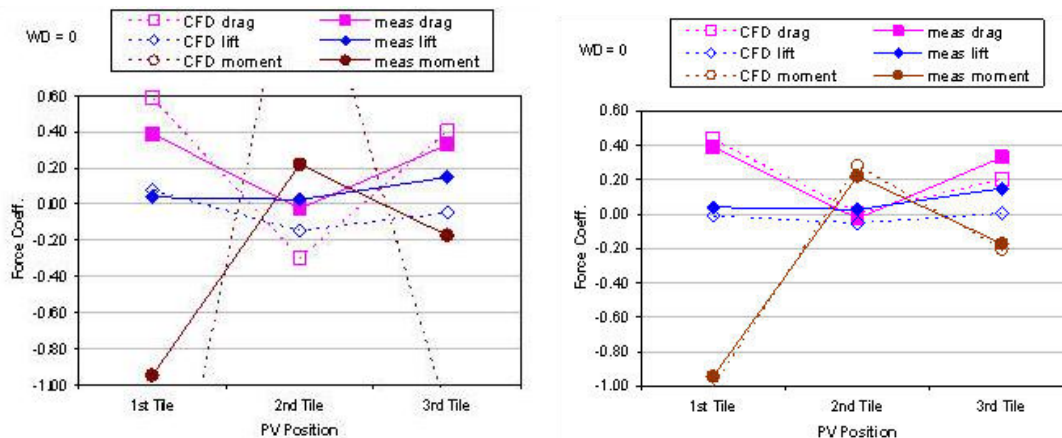
¹² Large Eddy Simulation



Figuur 57: Toepasbare modellen

Men dient de resultaten uit CFD studies steeds met enige voorzichtigheid te interpreteren gezien niet alle turbulentiemodellen de werkelijkheid benaderen. Daarom is het aan te raden om bij een specifieke problematiek steeds correlatie te gaan zoeken met resultaten uit windtunnelstudies met een identieke opstelling.

Ter vereenvoudiging zou men voor CFD studies van PV-systemen een 2D model kunnen hanteren. Uit een studie van Meroney et al. waarbij windtunnelresultaten vergeleken werden met een 2- en 3-dimensionale CFD simulatie, is echter gebleken dit deze vereenvoudiging tot foute resultaten kan leiden [36]. De stroming omheen de PV-modules is een duidelijk 3 dimensioneel probleem.



Figuur 58: Resultaten 2D(links) en 3D(rechts) vergelijkende studie CFD-windtunnel [36]

Bovendien blijkt de kritische invalshoek van de wind niet deze waarbij de wind loodrecht op het paneel invalt maar meestal onder een hoek die ca 15 tot 30° afwijkt van wind uit de achterkant [38].

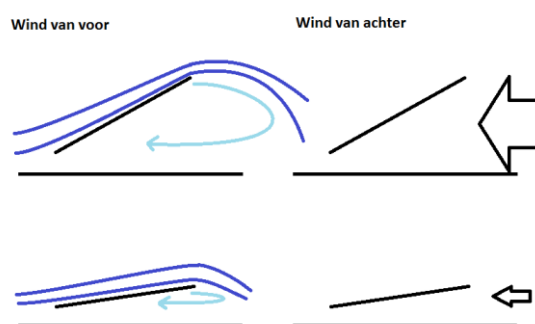
6.3 Invloedsfactoren winddrukken op PV panelen

6.3.1 Hellingshoek zonnepaneel

De belangrijkste ontwerpparameter is de hellingshoek waaronder het paneel gemonteerd wordt: ze zal niet enkel bepalend zijn voor het uiteindelijke rendement van de installatie maar zal ook een grote invloed hebben op de windlast die ze zal induceren.

Zoals reeds in deel I werd aangehaald, zullen zonnecellen onder een hoek van 36° optimaal presteren in België. Tot over enkele jaren werden dan ook alle PV-systemen onder deze hellingshoek geplaatst. Hier is men de laatste jaren van af gestapt en worden de meeste systemen onder een hellingshoek van 10° à 15° gemonteerd.

Deze lagere hellingshoek zal de stroombanen minder hinderen en minder wervels exciteren. Een lagere hellingshoek impliceert ook een lagere hoogte boven het dakvlak zodat de modules bij wind uit het noorden minder opgestuwd zullen worden.

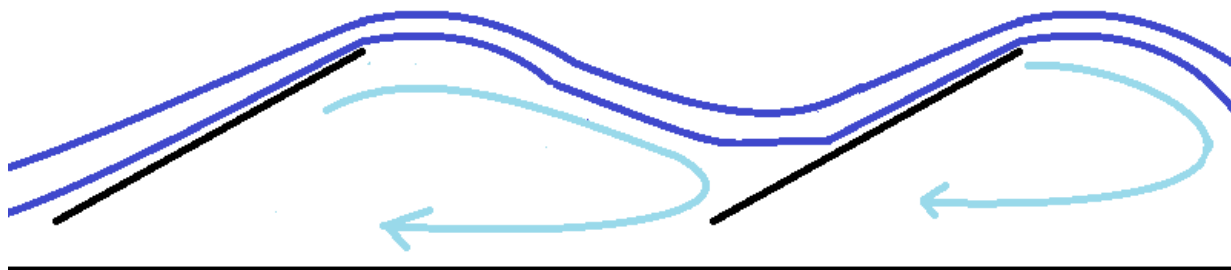


Figuur 59: Windbelasting bij panelen onder verschillende hellingshoek

Door voor een lagere hellingshoek te opteren, daalt dus de windlast op de panelen en dient men de hulp- en bijgevolg dakstructuur minder zwaar te dimensioneren. Vooral bij installaties op bestaande daken is dit een ideale oplossing daar er bij het ontwerp van de dakstructuur meestal weinig tot geen reserve werd ingerekend om extra lasten op te nemen.

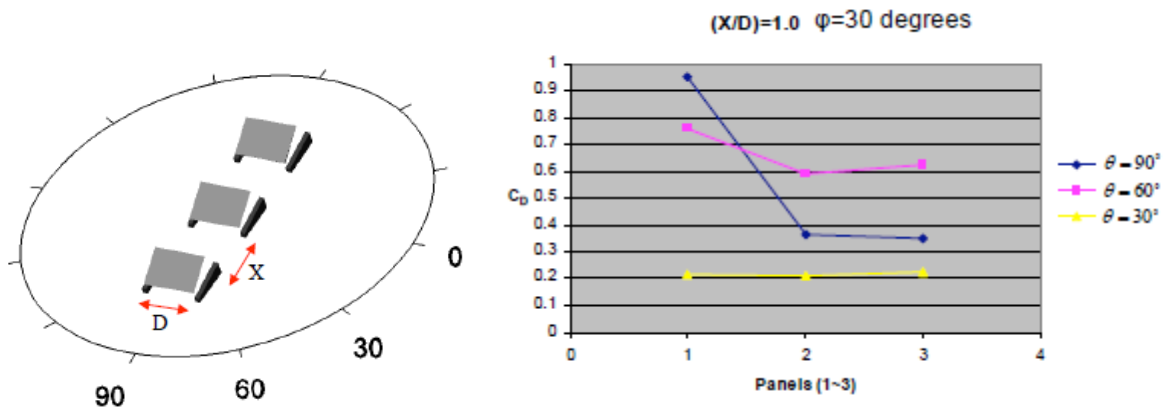
6.3.2 Shelter effect

Vergelijkbaar met een dakrand die windlasten op het achterliggend dakvlak reduceert, zal een rij zonnepanelen windwaarts beschutting geven voor de achterliggende rijen. Dit wordt het 'shelter effect' genoemd.



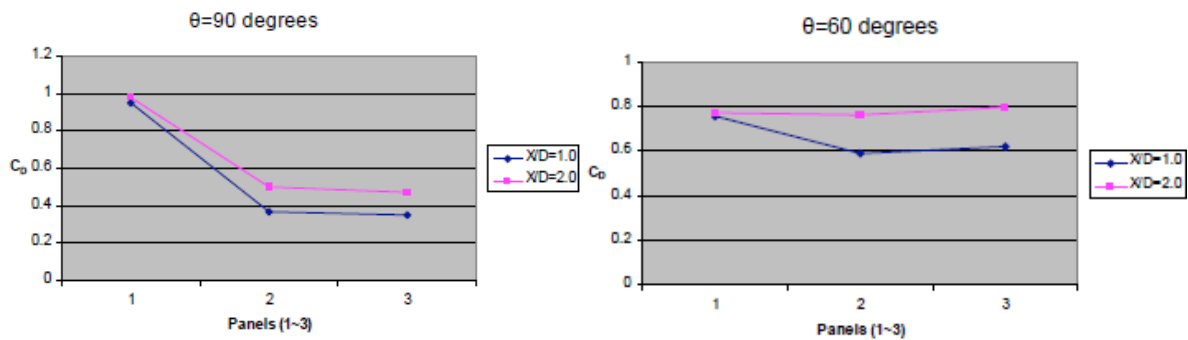
Figuur 60: Shelter effect

Shademan et al. hebben een CFD studie [39] uitgevoerd voor vrijstaande zonnepanelen onder een hellingshoek φ van 30° . Wanneer de wind haaks op de panelen instroomt ($\Theta = 90^\circ$), is een grote reductie te merken voor de tweede en derde rij. Bij schuin invallende wind ($\Theta = 60^\circ$ of 30°) is het effect minder uitgesproken, zonet onbestaand. Uit deze bevindingen leiden de auteurs af dat een zonnepaneel een volledige rij panelen voor zich moet hebben om van het shelter-effect te kunnen genieten. Dus niet alleen voor zich maar ook op de diagonalen.



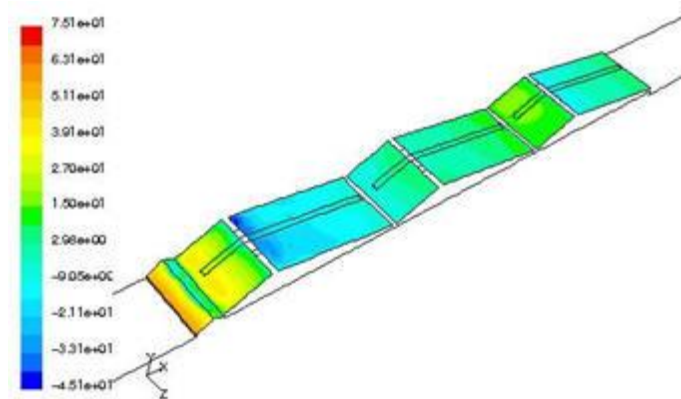
Figuur 61: Sleepcoëfficiënten bij 3 achtereenliggende panelen [39]

Ook werd de invloed van de tussenafstand geanalyseerd. Bij een verhouding van $X/D=1$ werden de laagste sleepcoëfficiënten vastgesteld. Wanneer de wind onder een hoek θ van 30 graden invalt, was geen reductie merkbaar.



Figuur 62 Sleepcoëfficiënten bij variërende tussenafstand [39]

In [36] werd een gelijkaardige studie gedaan voor zonnepanelen onder een hellingshoek van 10° . De opening tussen de panelen werd hier wel afgesloten door een backplate die tot de teen van het achterliggende paneel reikt.

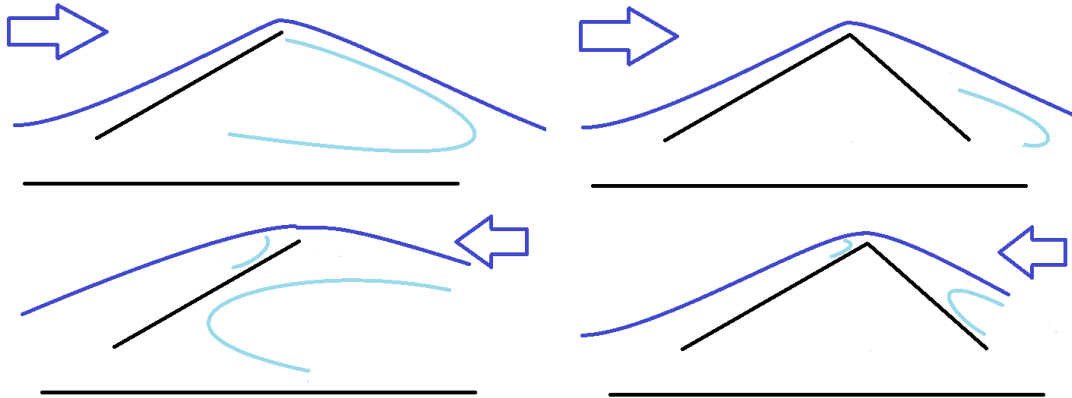


Figuur 63: Resultaten Statische druk uit CFD [36]

Hier werden de resultaten van de CFD studie wel gecorreleerd met een windtunnelproef. Dit liet toe om het CFD model kritischer te analyseren. Hieruit bleek dat het $k-\xi$ turbulentiemodel geen goede resultaten gaf: niet alleen kwam het shelter-effect niet tot uiting, bovendien hadden resultaten met dit turbulentiemodel de grootste afwijking ivm de gemeten waarden voor de 3 krachten (sleep, kantelmoment en oplift). Simulaties met het $k-\omega$ en RNG turbulentiemodel bleken wel goed te correleren, vooral bij $k-\omega$.

6.3.3 Back- en sideplates

Backplates plaatsen heeft 2 voordelen: de modules krijgen zo een aerodynamisch contour welke minder turbulenties zal opwekken. Door de aanwezigheid van een backplate en eventueel sideplate zullen ook minder extra drukken opgebouwd onder het PV paneel zodanig de module minder gevoelig wordt aan uplift.



Figuur 64: Principeschets effect backplate

Dankzij het shelter-effect dient men overigens niet iedere module van dergelijke platen te voorzien: sideplates op de randen van een matrix en backplates enkel op de achterste rij.

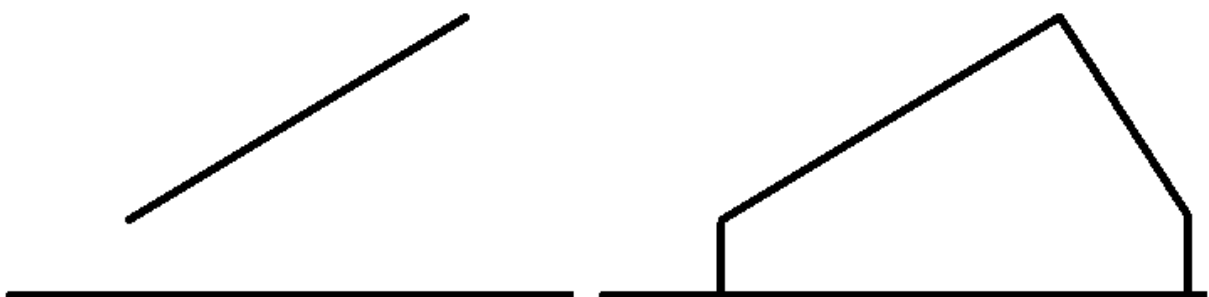
Door plaatsing van sideplates zullen er ook minder grote onder- of overdrukken kunnen opgebouwd worden onder de panelen.

6.3.4 Afstand paneel-dakvlak

Hoewel deze afstand een duidelijk effect zal hebben op het stromingspatroon omheen de module, werd hieromtrent geen parameter studie terug gevonden in de literatuur.

Indien de achterkant open blijft, lijkt het onduidelijk welk effect deze opening zal hebben. Deze kan eventueel nagegaan worden met de analogie van een stroming rond een paneel waarvoor wel literatuur beschikbaar is.

Mocht het volume volledig afgesloten worden, zullen er slechts beperkte drukschommelingen op de inwendige oppervlakken kunnen voorkomen. Dit zal de stabiliteit van de module onder windbelasting ten goede komen. Verder onderzoek zou kunnen uitwijzen in welke mate.



Figuur 65: Open vs Gesloten systeem

Valt op te merken dat een gesloten systeem slechts een theoretische benadering is, in de praktijk zal er steeds een opening zijn tussen dakvlak en PV-paneel/module. Mocht dit niet het geval zijn dan zal men problemen krijgen met afwatering.

6.4 Drukcoëfficiënten

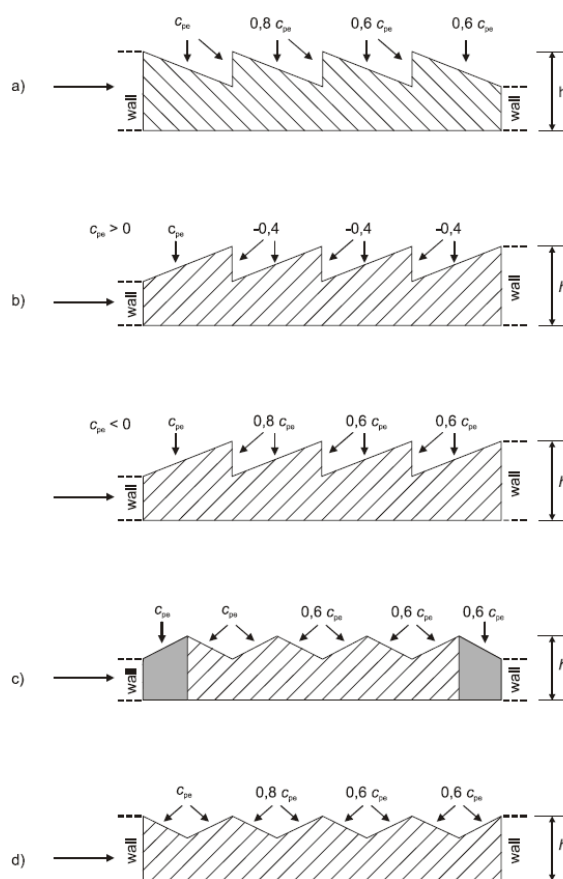
6.4.1 Eurocodes

We duiken terug in de Eurocodes op zoek naar configuraties die enigszins overeenstemmen met de algemene vorm van een PV-installatie.

In open systemen zonder back- of sideplates kan men een open dak herkennen, met backplate en gemonteerd op voldoende afstand van het dakvlak een open gewelfdak. Gesloten systemen zou men kunnen beschouwen als een 'multispan roof'.

1. Multispan roofs

De drukcoëfficiënten dienen afgeleid te worden uit deze voor de mono- of duopitch roof tabellen (duopitch zie Tabel 5 ; monopitch zie EN-1991-1-4). Wanneer de backplate vrij recht werd geplaatst is men aangewezen op situatie a) en b) op Figuur 66 en dient men met de mono pitch drukcoëfficiënten te rekenen. Staat de backplate onder een flauwe helling benadert men situatie c) met de duopitch waarden.



NOTE 1 In configuration *b* two cases should be considered depending on the sign of pressure coefficient c_{pe} on the first roof.

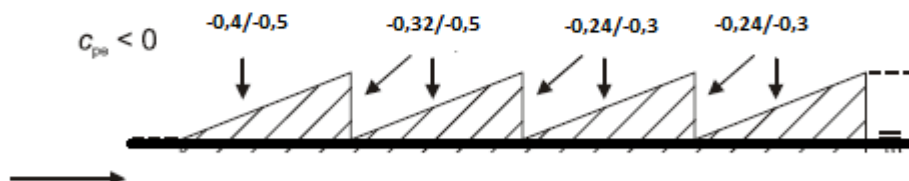
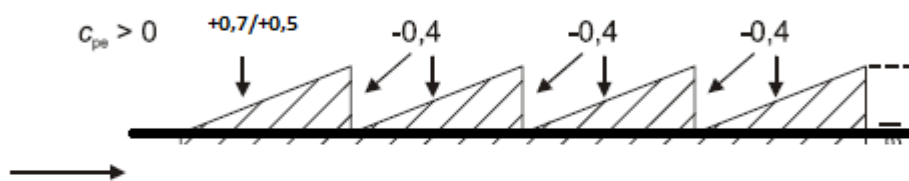
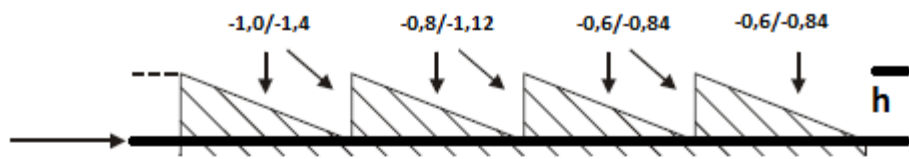
NOTE 2 In configuration *c* the first c_{pe} is the c_{pe} of the monopitch roof, the second and all following c_{pe} are the c_{pe} of the troughed duopitch roof.

Figuur 66: Winddrukcoëfficiënten bij multispan roofs [23]

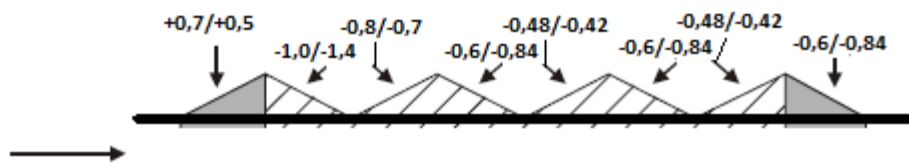
PV-systemen zullen echter zelden volledig gesloten uitgevoerd worden. Enige inwendige druk zal dus steeds te verwachten zijn. Zoals in hoofdstuk 5.5.4 werd deze voor het algemene geval op +0,3 en -0,2 bepaald. Combineert men dit met de uitwendige drukcoëfficiënten opgegeven in de Eurocode bekomt men de netto drukcoëfficiënten op de pv panelen en backplate aangegeven op Figuur 67. Hoewel men in principe ieder vlak terug zou moeten opdelen in verschillende zones zoals aangegeven op Figuur 51,

werden de turbulente zones aan de rand verwaarloost (deze zones reiken slechts tot een vijfde van de hoogte).

Backplate ongeveer recht



Backplate onder lichte helling



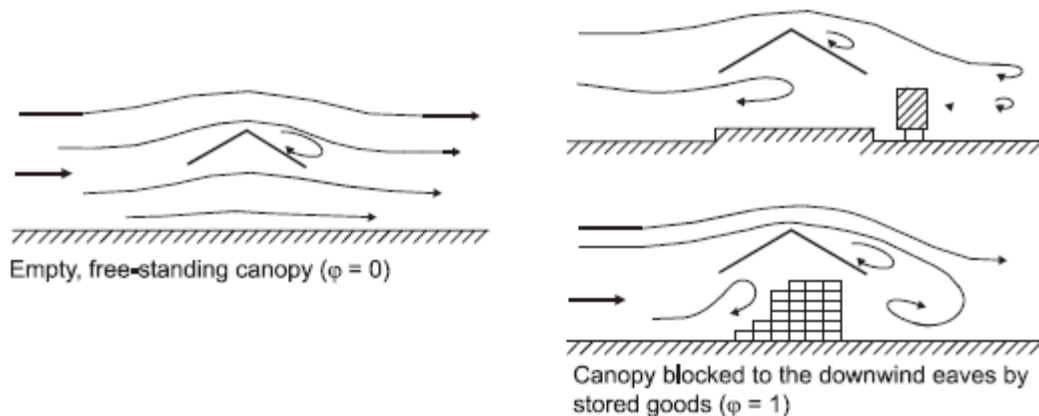
Figuur 67: Netto drukcoëfficiënten gesloten systemen hellingshoek 30°/15°

Veronderstel een winddruk van 100 kg/m^2 , dan kan men een maximale drukkracht van 70 kg/m^2 en zuigkracht van 100 kg/m^2 verwachten op het paneel gemonteerd onder een hoek van 30° . Onder 15° wordt dit 50 kg/m^2 en 140 kg/m^2 respectievelijk. Dat de zuigkracht verhoogt onder een lagere helling lijkt dit vrij contradictorisch en trekt de toepasbaarheid van dit model wel in twijfel.

2. Open daken

Open structuren kunnen vergeleken worden met een afdak. Onder de noemer canopy kunnen in de norm zowel globale kracht coëfficiënten als netto drukcoëfficiënten terug gevonden voor enkel-, twee- en zelf meervoudige afdaken.

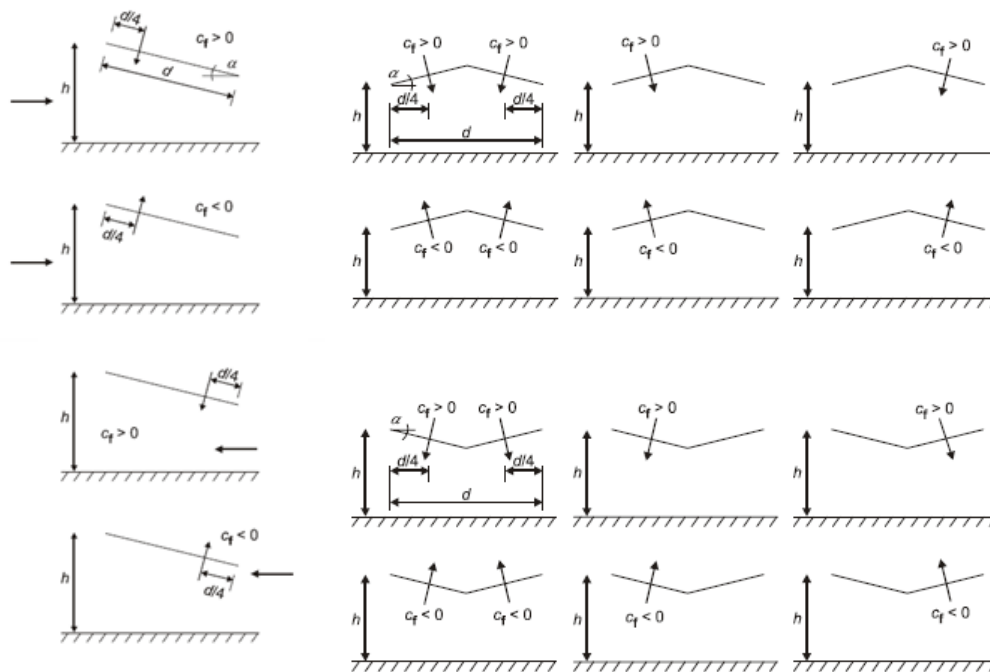
Belangrijk hierbij is de blokkadecoëfficiënt φ die weergeeft in welke mate de wind vrij onder het dak kan stromen. Ze wordt bepaald uit de verhouding van de obstruerende oppervlakte t.o.v. de vrije oppervlakte dwars op de wind met $\varphi = 0$ voor volledig vrij en $\varphi = 1$ voor geen vrije doorstroming mogelijk.



Figuur 68 blokkadecoëfficiënt φ bij afdaken [23]

Gezien PV panelen meestal vrij dicht bij het dakvlak gemonteerd zijn zal dit zijn invloed hebben op de stroming onder de panelen. Hoewel theoretisch de blokkadecoëfficiënt 0 zou zijn gezien er geen obstructies in of kort achter de PV-modules aanwezig zijn, lijkt een waarde verschillend van 0 meer aangewezen. Gezien dit niet gestaafd kan worden, is het aangewezen van de drukcoëfficiënten met een blokkadecoëfficiënt van zowel 1 als 0 te beschouwen en de meest belastende te hanteren.

Voordeel bij de open daken is dat de zonnepanelen niet in aparte zones hoeven verdeeld te worden. Er wordt immers een globale krachtscoëfficiënt opgegeven waarmee men onmiddellijk de kracht van de windbelasting kan bepalen. De globale krachtcoëfficiënt c_f is vergelijkbaar met de netto drukcoëfficiënt maar is geldig voor de gehele constructie en niet enkel voor een bepaalde zone. Men dient de resulterende kracht bij enkelvoudige afdaken wel op 1/4^{de} windwaarts van de overspanning te laten aangrijpen. Bij twee- en meervoudige blijft dit in het midden van het dakvlak. Wel dienen nu verschillende combinatie getest te worden waarbij o.a. een dakvlak zonder enige druk terwijl het ander maximaal belast wordt.



Figuur 69: Aangrijpingspunt resulterende winddruk [23]

Bij meervoudige afdaken dienen niet alle dakvlakken aan een de volledige windkracht blootgesteld worden. Aan de hand van de reductiefactor ψ_{mc} mag men de globale drukcoëfficiënt reduceren. Zo bedraagt de winddruk op het derde dakvlak en verder slechts 70% van het eerste.

Tabel 7: Reductiefactor bij open gewelfdaken [23]

Bay	Location	ψ_{mc} factors for all φ	
		on maximum (downward) force and pressure coefficients	on minimum (upward) force and pressure coefficients
1	End bay	1,0	0,8
2	second bay	0,9	0,7
3	third and subsequent bays	0,7	0,7

Bij enkelvoudige afdaken onder een hoek van 30° valt een globale krachtscoëfficiënt van +1,2 en -1,8 te noteren. Bij een winddruk van 100 kg/m^2 levert dit een druk van 120 kg en een zuigkracht tot 180 kg/m^2 . Onder de meer courante hellingshoek van 15° is de druk slechts 70 kg/m^2 en de zuigkracht 140 kg/m^2 . Men merkt dus duidelijk de aerodynamische voordelen om de modules onder een lagere hellingshoek te monteren.

Tabel 8: c_f en $c_{p,net}$ bij enkelvoudige afdaken [23]

		Net Pressure coefficients $c_{p,net}$ Key plan			
Roof angle α	Blockage φ	Overall Force Coefficients c_f	Zone A	Zone B	Zone C
0°	Maximum all φ	+ 0,2	+ 0,5	+ 1,8	+ 1,1
	Minimum $\varphi = 0$	- 0,5	- 0,6	- 1,3	- 1,4
	Minimum $\varphi = 1$	- 1,3	- 1,5	- 1,8	- 2,2
5°	Maximum all φ	+ 0,4	+ 0,8	+ 2,1	+ 1,3
	Minimum $\varphi = 0$	- 0,7	- 1,1	- 1,7	- 1,8
	Minimum $\varphi = 1$	- 1,4	- 1,6	- 2,2	- 2,5
10°	Maximum all φ	+ 0,5	+ 1,2	+ 2,4	+ 1,6
	Minimum $\varphi = 0$	- 0,9	- 1,5	- 2,0	- 2,1
	Minimum $\varphi = 1$	- 1,4	- 2,1	- 2,6	- 2,7
15°	Maximum all φ	+ 0,7	+ 1,4	+ 2,7	+ 1,8
	Minimum $\varphi = 0$	- 1,1	- 1,8	- 2,4	- 2,5
	Minimum $\varphi = 1$	- 1,4	- 1,6	- 2,9	- 3,0
20°	Maximum all φ	+ 0,8	+ 1,7	+ 2,9	+ 2,1
	Minimum $\varphi = 0$	- 1,3	- 2,2	- 2,8	- 2,9
	Minimum $\varphi = 1$	- 1,4	- 1,6	- 2,9	- 3,0
25°	Maximum all φ	+ 1,0	+ 2,0	+ 3,1	+ 2,3
	Minimum $\varphi = 0$	- 1,6	- 2,6	- 3,2	- 3,2
	Minimum $\varphi = 1$	- 1,4	- 1,5	- 2,5	- 2,8
30°	Maximum all φ	+ 1,2	+ 2,2	+ 3,2	+ 2,4
	Minimum $\varphi = 0$	- 1,8	- 3,0	- 3,8	- 3,6
	Minimum $\varphi = 1$	- 1,4	- 1,5	- 2,2	- 2,7
NOTE		+ values indicate a net downward acting wind action - values represent a net upward acting wind action			

Voor tweevoudige afdaken kan men onder een hoek van 30° een druk van 90 kg/m^2 en een zuigkracht van 130 kg/m^2 verwachten indien men de windbelasting als 100 kg/m^2 aanneemt. Onder 15° 50 kg/m^2 en 140 kg/m^2 respectievelijk. Gezien de wind van uit elke kant kan komen dient men de waardes voor zowel de postieve als negatieve hellingshoeken te beschouwen.

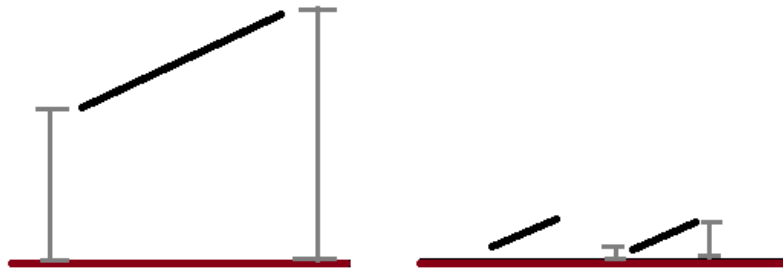
Tabel 9: c_f en $c_{p,net}$ bij tweevoudige afdaken [23]

			Net pressure coefficients $c_{p,net}$ Key plan			
Roof angle α [°]	Blockage φ	Overall Force Coefficient c_r	Zone A	Zone B	Zone C	Zone D
- 20	Maximum all φ	+ 0,7	+ 0,8	+ 1,6	+ 0,6	+ 1,7
	Minimum $\varphi = 0$	- 0,7	- 0,9	- 1,3	- 1,6	- 0,6
	Minimum $\varphi = 1$	- 1,3	- 1,5	- 2,4	- 2,4	- 0,6
- 15	Maximum all φ	+ 0,6	+ 0,6	+ 1,5	+ 0,7	+ 1,4
	Minimum $\varphi = 0$	- 0,6	- 0,8	- 1,3	- 1,6	- 0,6
	Minimum $\varphi = 1$	- 1,4	- 1,6	- 2,7	- 2,6	- 0,6
- 10	Maximum all φ	+ 0,4	+ 0,6	+ 1,4	+ 0,8	+ 1,1
	Minimum $\varphi = 0$	- 0,6	- 0,8	- 1,3	- 1,5	- 0,6
	Minimum $\varphi = 1$	- 1,4	- 1,6	- 2,7	- 2,6	- 0,6
- 5	Maximum all φ	+ 0,3	+ 0,5	+ 1,5	+ 0,8	+ 0,8
	Minimum $\varphi = 0$	- 0,5	- 0,7	- 1,3	- 1,6	- 0,6
	Minimum $\varphi = 1$	- 1,3	- 1,5	- 2,4	- 2,4	- 0,6
+ 5	Maximum all φ	+ 0,3	+ 0,6	+ 1,8	+ 1,3	+ 0,4
	Minimum $\varphi = 0$	- 0,6	- 0,6	- 1,4	- 1,4	- 1,1
	Minimum $\varphi = 1$	- 1,3	- 1,3	- 2,0	- 1,8	- 1,5
+ 10	Maximum all φ	+ 0,4	+ 0,7	+ 1,8	+ 1,4	+ 0,4
	Minimum $\varphi = 0$	- 0,7	- 0,7	- 1,5	- 1,4	- 1,4
	Minimum $\varphi = 1$	- 1,3	- 1,3	- 2,0	- 1,8	- 1,8
+ 15	Maximum all φ	+ 0,4	+ 0,9	+ 1,9	+ 1,4	+ 0,4
	Minimum $\varphi = 0$	- 0,8	- 0,9	- 1,7	- 1,4	- 1,8
	Minimum $\varphi = 1$	- 1,3	- 1,3	- 2,2	- 1,6	- 2,1
+ 20	Maximum all φ	+ 0,6	+ 1,1	+ 1,9	+ 1,5	+ 0,4
	Minimum $\varphi = 0$	- 0,9	- 1,2	- 1,8	- 1,4	- 2,0
	Minimum $\varphi = 1$	- 1,3	- 1,4	- 2,2	- 1,6	- 2,1
+ 25	Maximum all φ	+ 0,7	+ 1,2	+ 1,9	+ 1,6	+ 0,5
	Minimum $\varphi = 0$	- 1,0	- 1,4	- 1,9	- 1,4	- 2,0
	Minimum $\varphi = 1$	- 1,3	- 1,4	- 2,0	- 1,5	- 2,0
+ 30	Maximum all φ	+ 0,9	+ 1,3	+ 1,9	+ 1,6	+ 0,7
	Minimum $\varphi = 0$	- 1,0	- 1,4	- 1,9	- 1,4	- 2,0
	Minimum $\varphi = 1$	- 1,3	- 1,4	- 1,8	- 1,4	- 2,0

NOTE + values indicate a net downward acting wind action
 - values represent a net upward acting wind action

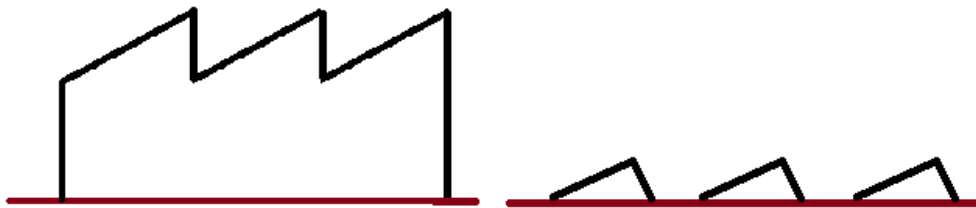
3. Besluit

Vooraf voor open montagesystemen blijkt de norm wel drukcoëfficiënten op te geven die eenvoudig kunnen worden toegepast. Vraag is echter of de geometrie van open systemen wel voldoende overeenstemt met deze van het basismodel waarvoor de drukcoëfficiënten werden bepaald in de norm? Wat met de relatieve hoogte van het aangenomen dakvlak t.o.v. de totale hoogte van de constructie? Wat met de absolute vrije hoogte onder het dakvlak? In elk geval legt de norm hieromtrent geen voorwaarden op, maar het lijkt vrij duidelijk dat het stromingspatroon toch enigszins verschillend zal zijn.



Figuur 70: Verschil basis- en toegepast model bij open systemen

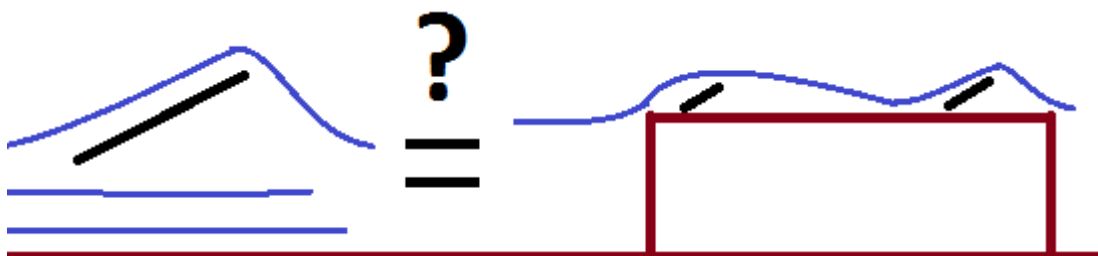
Voor gesloten montage systemen dient men het paneel op te delen in verschillende zones. Ook hier blijft de vraag of het basismodel van hellende daken uitgebreid met de meervoudige daken wel van toepassing is.



Figuur 71: Verschil basis- en toegepast model bij gesloten systemen

Wat de de meervoudige dakstructuur betreft, valt ook op te merken dat de meeste PV-schikkingen kleinschaliger zijn en dat de hellende vlakken bovendien zelden onmiddellijk aan elkaar gekoppeld worden.

De belangrijkste opmerking is toch wel dat in het referentiemodel de constructie in vrije aanstroming staat. Dit stromingsregime treedt op een dakvlak enkel na een zekere afstand op. Men mag dit model daarom zeker niet toepassen op elementen die zich in een turbulente stroming bevinden.



Figuur 72: Stromingsregime vrije aanstroming <-> turbulente zone

Het lijkt dus aangewezen om op zoek te gaan naar drukcoëfficiënten die bepaald werden a.d.h.v. van modellen die beter overeenstemmen met de werkelijke situatie. In eerste instantie werden hiervoor normen gezocht die van kracht zijn in het buitenland.

6.4.2 Bestaande normen

In het Verenigd Koninkrijk werd al in 2004 de BRE Digest 489 gepubliceerd waarmee windbelasting op PV-systemen kan begroot worden [40]. Deze werd opgesteld onder leiding van Dr P. Blackmore en kan toegepast worden aan de hand van de Britse nationale windnorm, de BS6399 part 2.

Dezelfde problematiek wordt behandeld in de NVN7250, een Nederlandse norm gepubliceerd in 2005 na onderzoek aan het TNO onder leiding van Dr. C. P. W. Geurts. Deze is dan weer van toepassing op de Nederlandse windnorm, NEN 6702:2002.

Nationale windnormen kunnen echter vertrekken van een windmodel verschillend van datgene dat de EN 1991-1-4 hanteert. Men kan de berekeningsmethodes in deze normen dus niet zomaar over nemen zonder die windnorm in detail te bestuderen.

Sinds eind 2005 is echter overal binnen de Europese Unie de EN-1991-1-4 in voege om windbelasting op constructies te bepalen. De meeste landen voorzagen hierna een overgangperiode waarbij zowel de nationale als Europese windnorm kon toegepast worden tot hun nationale bijlage kon worden opgesteld. Zo werd in december 2010 de NBN EN 1991-1-4 ANB gepubliceerd en sindsdien mag enkel deze samen met de EN-1991-1-4 toegepast worden.

Geurts et al. hebben de resultaten van hun onderzoek aan het TNO die leidden tot de NVN7250 aangepast zodanig deze binnen het kader van de EN 1991-1-4 kunnen toegepast worden [41]. Publicaties naar aanleiding van dit onderzoek zullen aan bod komen in hoofdstuk 6.4.5.

6.4.3 Ontwikkelingen in België

Zoals eerder vermeld werkt momenteel een Technische Comité onder leiding van Eric Dupont aan een Technische Voorlichting omtrent PV-toepassingen. Zolang deze TV nog niet gepubliceerd is, is men momenteel aangewezen op enige beroepservaring en wat er terug te vinden is in de literatuur.

Na contact met Eric Dupont bleek dat er over windbelasting zelf konden nog geen gegevens kunnen worden vrijgegeven. Wel zou men voor de ontwerpregels van dezelfde opvatting vertrekken als in het WTCB Rapport nr. 11 –Toepassing van Eurocodes op het ontwerp van buitenschrijnwerk. Afhankelijk van de functie van het te dimensioneren element moet men minder strenge veiligheidscoëfficiënten inrekenen, hierover meer in hoofdstuk 10.3.2.

6.4.4 Drukcoëfficiënten uit literatuur

De meeste onderzoeken bleven beperkt tot modules in vrije aanstroming of stand-alone installaties. Resultaten hiervan kunnen in principe enkel toegepast worden op modules die op voldoende afstand van de dakrand staan. Er werden echter geen bevredigende drukcoëfficiënten gevonden die men zou kunnen hanteren voor panelen in die randzones. En weze dit nu de modules die aan de grootste windlasten zullen onderhevig zijn.

Naar mening van de auteur kon slechts één onderzoek teruggevonden worden die drukcoëfficiënten bepaalt voor zowel panelen in de turbulente zone als in de zone met vrije aanstroming. Dit betreft een windtunnelstudie op een schaalmodel van een gebouw met zonnepanelen gemonteerd op het plat dak. De publicaties die uit dit onderzoek voorsproten zullen uitgebreid aan bod komen in het volgende hoofdstuk.

Voorts was er ook een uitgebreid contact met spelers uit de industrie waaruit bleek dat enkelen gelijkaardige studies hadden laten uitvoeren voor hun product. Resultaten hiervan waren niet beschikbaar of kunnen hier niet opgenomen worden wegens confidentialiteit.

6.4.5 Onderzoek aan TNO

1. Situering

Hoewel dit onderzoek reeds in 2002 werd uitgevoerd aan het TNO onder leiding van C.P.W. Geurts werden de resultaten ervan opgenomen in het EUR-ACTIVE ROOFer project. Dit werd in 2005 opgericht met steun van de Europese Commissie met als doel oplossingen aan te reiken bij problemen die rijzen bij toepassingen met actieve daken [42].

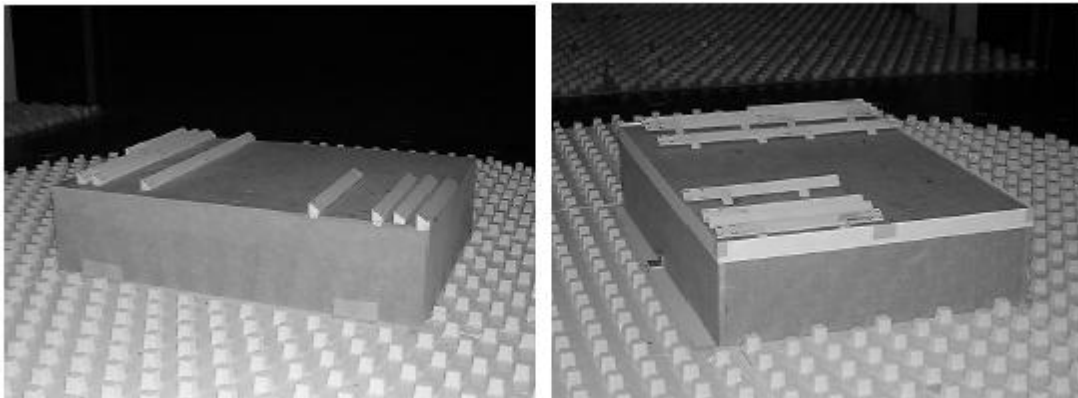
Binnen dit project werd een classificatie naar windbelasting opgesteld voor PV-toepassingen. Men hanteert 3 klassen die onderverdeeld werden in 10 subklassen [41]:

- Klasse A: producten bevestigd aan een constructie zonder deel uit te maken van de dakbekleding
 1. Andere toepassingen die niet onder subklasse 2 of 3 vallen
 2. Systemen geplaatst op platte daken
 3. Systemen onder hellende daken
- Klasse B: producten geïntegreerd in de buitenste laag van het dak
 4. Geïntegreerd in doorlatende laag met een stijf en onderdoorlatend onderdak
 5. Geïntegreerd met dubbel doorlatende laag op een flexibel onderlatend onderdak
 6. Geïntegreerd in een enkelvoudige flexibele laag
- Klasse C: producten die ook de functie als dakhuid vervullen
 7. Geïntegreerd in enkelvoudige ondoorlatende buitenlaag
 8. Geïntegreerd in enkelvoudige doorlatende buitenlaag
 9. Gemonteerd op een flexibele buitenlaag met gesloten onderdak
 10. Gemonteerd op een flexibele buitenlaag met doorlatend onderdak

In een samenvattend document [41] worden door Geurts winddrukcoëfficiënten en berekeningsmethodes opgegeven voor iedere subklasse, dit volledig binnen het kader van de EN 1991-1-4. In wat volgt zal enkel het onderzoek die leidde tot het bepalen van de drukcoëfficiënten voor PV-systemen op platte daken(subklasse 2) en de resultaten toegelicht worden.

2. Proefopstelling voor systemen geplaatst op platte daken

In een windtunnel werd een schaalmodel opgesteld van een laag gebouw met zonnepanelen. De panelen werden onder een hoek van 35° gemodelleerd.



Figuur 73: Model voor windtunnel [41]

Hierbij werden 4 mogelijke configuraties getest: open of gesloten systemen gecombineerd met of zonder een dakrand(op ware schaal 200 mm).






Figuur 74: Schematisering model [41]

3. Resultaten

A. Algemeen

Dezelfde afbakening van zones werd gehanteerd als volgens de EN 1991-1-4 (zie Figuur 49). Naast de positie van een paneel op het dak dient ook zijn oriëntatie in rekening gebracht te worden. Hiertoe onderscheid men 4 situaties:

- I. Systemen in hoek- en randzones met de hoge rand richting de wind() m.a.w. wind uit N
- II. Systemen in hoek- en randzones met lage rand richting de wind() m.a.w. wind uit Z
- III. Systemen in randzones met laterale wind() m.a.w. wind uit O of W
- IV. Systemen die genieten van het sheltereffect(*)

(*)Om de reductie door het shelter effect te kunnen toepassen dient windwaarts van de beschouwde module tenminste een volledige rij zonnepanelen aanwezig te zijn, dus ook op de diagonalen in planzicht.

Het drukpunt van de bekomen windbelasting dient windwaarts op $1/4^{de}$ van de overspanning verondersteld te worden.

De auteur lijkt zich merkwaardig genoeg vergist te hebben bij de benaming voor de verschillende zones. Zo hanteert hij voor de hoekzones de letter G en voor de randzones F, volgens de Eurocodes is dit net omgekeerd.

B. Systemen met open draagstructuur

Voor open systemen geeft de auteur netto drukcoëfficiënten op. Zonder het gunstig effect van een dakrand dienen de panelen te weerstaan aan een maximale uplift resulterend uit een drukcoëfficiënt van -1,8 en geven een maximale downforce van +1,4. Met dakrand zijn deze gereduceerd tot -1,5 en +1,2. Bij een winddruk van 100kg/m^2 zullen de panelen een zuigkracht tot 150kg/m^2 ondervinden, in ieder geval mag men minimaal op 60kg/m^2 rekenen. Ook kan er een druk tot 120kg/m^2 uitgeoefend worden door de wind in zelfde condities, minimaal zal deze 20kg/m^2 bedragen.

Tabel 10: Netto drukcoëfficiënten voor PV-systemen op open frame [41]

Zone on the flat roof	Roof Parapet ≤ 100 mm		Roof Parapet ≥ 200 mm	
	Upward	Downward	Upward	Downward
Corner (G), situation I	-1.8	+0.2	-1.5	+0.2
Corner (G), situation II	-1.0	+1.2	-0.9	+1.0
Edge (F), situation I	-1.8	+0.2	-1.2	+0.2
Edge (F), situation II	-1.0	+1.0	-0.9	+0.5
Edge (F), situation III	-1.4	+1.4	-1.0	+1.2
Centre (H, I)	-1.4	+0.9	-1.2	+0.7
Centre (H, I), sheltered	-0.6	+0.6	-0.6	+0.6

De zuigkrachten liggen in de lijn van de verwachtingen maar de hoge drukkrachten vallen uit de boot. Daar waar alle daken slechts met een neerwaartse winddruk van 20kg/m^2 ontworpen zijn, komt hier plots 120kg/m^2 op de panelen te staan! Naar analogie met de spoiler op een sportwagen is dit enigszins te verwachten maar niet zo hoog. Vooral omdat dit bij condities is waarbij de wind vanuit het westen of oosten komt.

C. Systemen met gesloten draagstructuur

Hoewel de auteur de notatie van lokale drukcoëfficiënten ($c_{pe,1}$) hanteert, stelt hij dat ze geldig zijn voor belaste oppervlakken van 1m^2 of meer. Vreemd genoeg wordt nog de oude notatie van de Nederlandse windnorm voor de opdeling van de zones gehanteerd: analoog vorige tabel wordt waarschijnlijk met 'corner zone' F bedoeld, 'randzone' r' G, voor de centrale zones H, I ipv t.

In vergelijking met de open systemen is de neerwaartse druk op het paneel sterk gereduceerd (van 140kg/m^2 naar 20kg/m^2). De hoge neerwaartse winddrukken lijken dus vooral door een hoge onderdruk op de onderkant van het paneel voort te komen. Voor de maximale zuigkracht verandert er weinig: van $-1,8/-1,5$ naar $-1,7$.

Tabel 11: Lokale drukcoëfficiënten voor gesloten systemen met lage dakrand [41]

Table 3A	Roof Parapet $\leq 100\text{ mm}$			
	under pressure on upper surface	over pressure on upper surface	over pressure on vertical surface	under pressure on vertical surface
Corner zone (G), situation I	-1.7	+0.2	+0.7	-0.7
Corner zone , situation II	-1.0	+0.2	+0.3	-1.2
Edge zone (r), situation I	-1.4	+0.2	+0.5	-0.7
Edge zone (r), situation II	-0.9	+0.2	+0.4	-0.8
Edge zone (r), situation III	-1.4	+0.2	+0.5	-1.1
Centre zone (t)	-1.2	+0.2	+0.5	-1.0
Centre zone (t), situation IV	-0.8	+0.2	+0.3	-0.8

Tabel 12: Lokale drukcoëfficiënten voor gesloten systemen met dakrand hoger dan 200 mm [41]

Table 3B	Roof Parapet $\geq 200\text{ mm}$			
	under pressure on upper surface	over pressure on upper surface	over pressure on vertical surface	under pressure on vertical surface
Corner zone (G), situation I	-1.7	+0.2	+0.7	-0.7
Corner zone , situation II	-1.0	+0.2	+0.3	-1.2
Edge zone (r), situation I	-1.6	+0.2	+0.5	-0.7
Edge zone (r), situation II	-0.9	+0.2	+0.4	-0.8
Edge zone (r), situation III	-1.2	+0.2	+0.5	-1.0
Centre zone (t)	-1.2	+0.2	+0.5	-1.0
Centre zone (t), situation IV	-0.8	+0.2	+0.3	-0.8

Opmerkelijk komt de normaliter gunstige invloed van de dakrand nu minder naar boven, integendeel voor de randzones bij situatie I verhoogt de oplift van $-1,4$ naar $-1,6$.

D. Opmerkingen

Deze testen werden gedaan in 2002, zonnepanelen werden toen courant onder de optimale instalingshoek van 30-35° geplaatst. Tegenwoordig gaat men de panelen eerder onder kleinere hoeken plaatsen (10°-15°). In [43] geeft Geurts toch aan dat de resultaten uit zijn onderzoek ook toepasbaar zijn voor montage systemen met een hellingshoek van 10° tot 40° graden. Tenzij ook proeven werden gedaan onder variabele helling lijkt het een sterke vereenvoudiging die niet toe laat rekening te houden met de eventuele gunstige effecten van een lagere hellingshoek. De motivatie van de auteur kon niet achterhaald worden.

De waarden uit deze tabellen zijn vrij rauw verteerbaar, daarom zullen ze aan de hand van de casus genuanceerd worden.

6.5 Besluit

Hoewel er toch enige bemerkingen zijn bij de resultaten uit het onderzoek aan het TNO, was dit tot op heden de meest volledige studie die kon worden gevonden. De drukcoëfficiënten voor PV op platte daken in zowel de BRE Digest 489 als de NVN7250 werden uit dit onderzoek overgenomen.

Voor de publicatie waarin een adaptatie voor de EN 1991-1-4 wordt voorgesteld [41], blijkt een ideaal vertrekpunt voor het bepalen van de windbelasting bij PV-installaties.

Zowel de resultaten uit het onderzoek aan het TNO als de windbelasting bij open daken volgens de EN 1991-1-4 gaven vergelijkbare winddrukken aan. Voor de uplift kan men een zuigkracht van 140 à 160 kg/m² verwachten. De lokale downforce kan oplopen tot een 120kg/m². Het drukcentrum van deze windkrachten dient op 1/4^{de} van de overspanning windwaarts verondersteld te worden.

Wel valt op te merken dat enkel drukcoëfficiënten werden gevonden die afgeleid werden uit de maximale winddruk op een paneel, m.a.w. enkel voor lokale effecten. Zoals in volgend hoofdstuk zal blijken, worden PV-modules meestal aan elkaar gekoppeld met doorlopende liggers tot een matrix structuur. Door op iedere module het maximaal lokale effect van de winddruk te laten aangrijpen, zal men een zekere overschatting maken bij het dimensioneren van de hulpstructuur.

7 Opbouw hulpstructuur

7.1 Algemeen

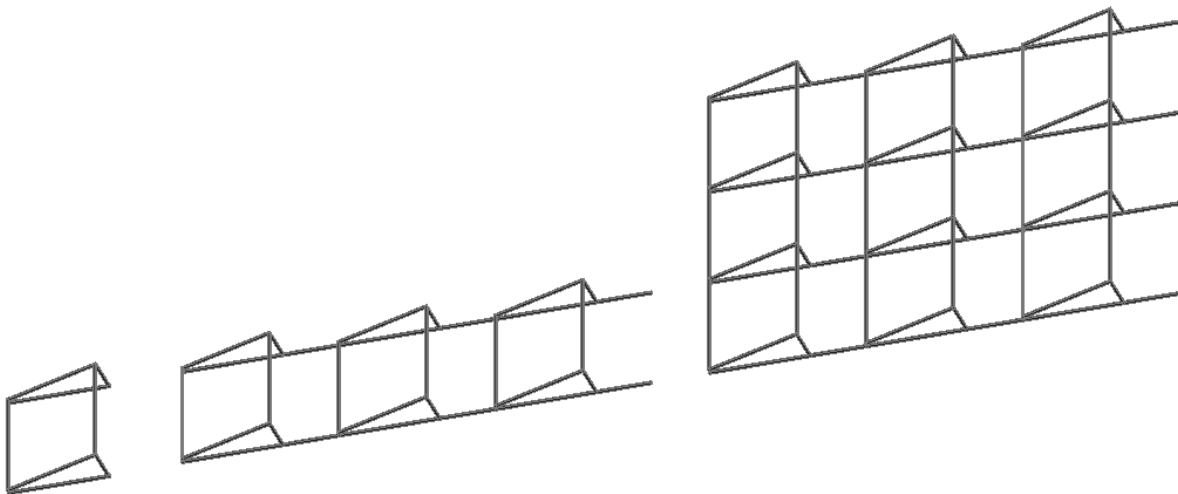
De hulpstructuur moet de aangrijpende lasten kunnen opnemen en overdragen naar de dakstructuur. Zoals in deel I werd aangehaald, bestaan hiervoor een reeks oplossingen. Naast een principiële keuze tussen geballasteerde, geïntegreerde of bevestigde systemen kan men de modules ook onderling gaan verbinden.

Deze keuze zal bepalend zijn voor het ontwerp van de hulpstructuur. In dit hoofdstuk zullen de ontwerpparameters en aandachtspunten voor geballasteerde systemen toegelicht worden.

Gezien deze systemen los op het dak worden geplaatst, moet men dankzij een vakkundig ontwerp ervoor zorgen dat het geheel niet zal omkantelen (kantelevenwicht) of verschuiven (glijdingsevenwicht) bij hoge windlasten. Het eigengewicht zal hierbij de stabiliserende factor zijn en is bijgevolg de belangrijkste ontwerpparameter bij geballasteerde systemen. Men kan echter door een doordacht ontwerp van de hulpstructuur de nodige ballast aardig reduceren.

7.2 Grootte van de hulpstructuur

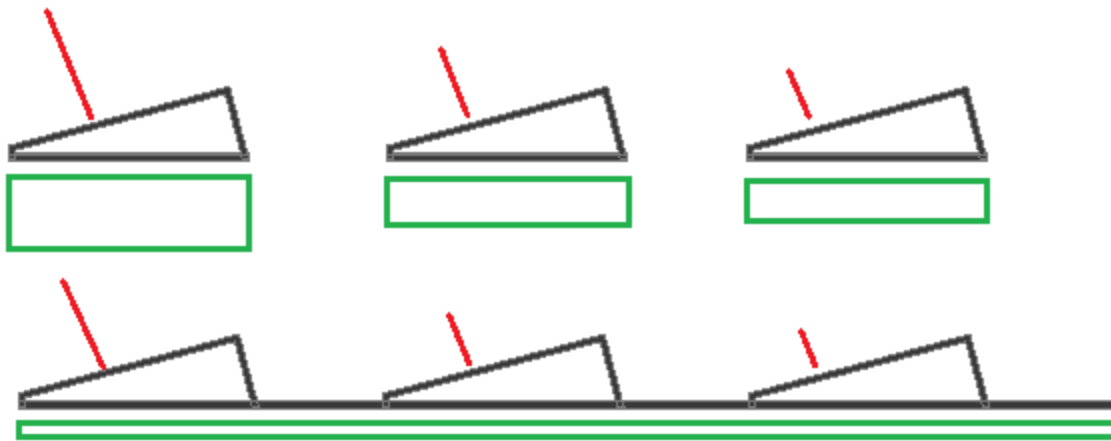
Een eerste belangrijke keuze is de omvang van de hulpstructuur: wordt deze voorzien om enkel één paneel te dragen, zullen doorlopende liggers gebruikt worden zodat meerder modules in de langsrichting aan elkaar gekoppeld worden of zal men deze bovendien ook dwars verbinden zodat men een matrix structuur bekomt.



Figuur 75: Grootte hulpstructuur: enkelvoudig, doorlopende liggers en matrix

Een voordeel bij het gebruik van doorlopende liggers is dat hierin ook de nodige bekabeling kan in weggewerkt worden.

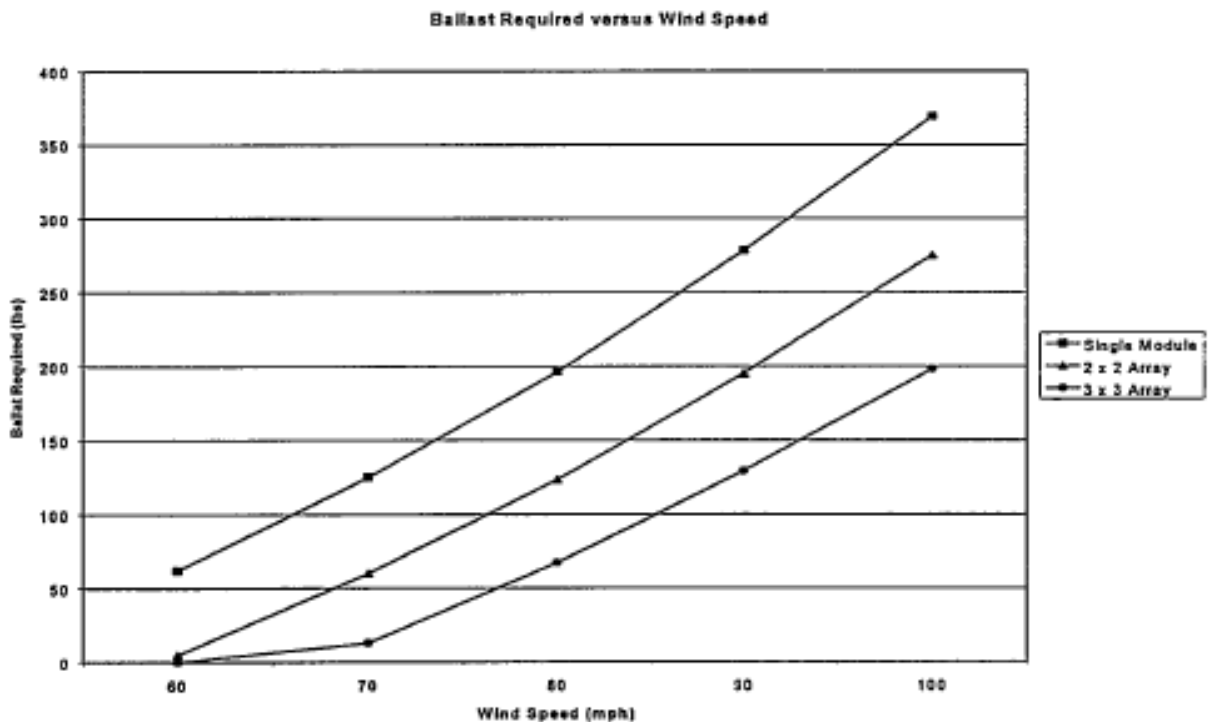
Maar het aaneenkoppelen van verschillende modules heeft vooral het voordeel dat het gunstig werkt voor de algemene stabiliteit van de hulpstructuur: enkelvoudige modules moeten weerstand bieden tegen de lokale windbelasting. Worden ze aaneengeschakeld dan zal men eerder met het globale effect van de windbelasting mogen rekening houden. De som van de lokale effecten is immers altijd hoger dan het globale effect. De aangrijpende belasting zal ook over een groter oppervlak kunnen uitgespreid worden.



Figuur 76: Principeschets belasting bij enkel- en meervoudige hulpstructuur

De rode lijnen symboliseren de windbelasting, de groene oppervlaktes de nodige weerstand. Achterliggende modules genieten van het shelter-effect en worden hierdoor minder belast. In vergelijking met de meervoudige hulpstructuur zal de enkelvoudige hulpstructuur aan grotere windkrachten onderworpen worden gezien men hier met lokale effecten dient rekening te houden (som van de groene oppervlaktes is groter bij enkelvoudige dan bij meervoudige). Bovendien zal men ook de totale belasting over een groter dakvlak kunnen uitspreiden en lokaal hoge waarden afvlakken.

Uit onderzoek aan het DOE¹³ bleek dat de gemiddelde ballast per module tot 45% afneemt indien ze opgenomen is in een 3*3 matrix [38].

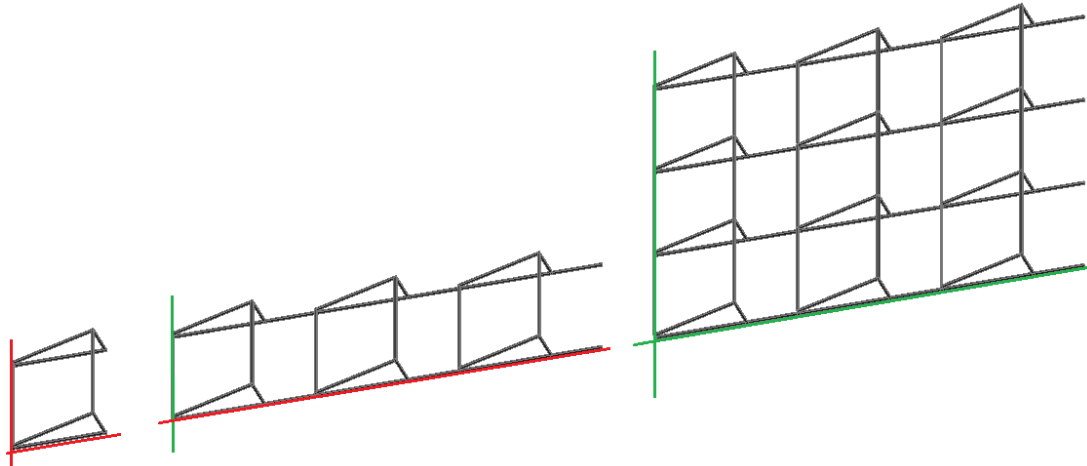


Figuur 77: Nodige ballast per oppervlakte eenheid bij matrix van 1,4 en 9 panelen [38]

Bovendien heeft deze matrixstructuur ook een gunstige invloed op het kantelevenwicht. Bij een verder gelegen omwentelingspunt zal de verhouding van de hefboomen voor de aanvallende en

¹³ Department of Energy: Amerikaans overheidsinstantie ter bevordering van wetenschappelijk onderzoek en beleid betreffende energievoorziening en milieu

weerstandbiedende krachten dicht bij de eenheid naderen zodanig de nodige weerstand lager zal liggen. Op volgende figuren lijkt het kantelen rond de rode lijnen zeker mogelijk, rond de groene lijnen lijkt dit minder snel op te treden.



Figuur 78: Principeschets assen bij omkantelen

De hulpstructuur moet uiteraard voldoende stevig ontworpen worden om op deze gunstige effecten te kunnen rekenen: de krachten moeten doorheen de structuur doorgegeven kunnen worden, zo mogen de liggers bijv niet halverwege kunnen omplooiën. Hiervoor dient men een structurele analyse te doen van de hulpstructuur. Dit valt echter buiten het opzet van deze masterproef.

7.3 Wrijvingscoëfficiënt

De wrijvingsfactor μ speelt een grote rol in het glijdingsevenwicht. Hoe hoger, hoe groter de weerstand tegen verschuiven tussen 2 contactoppervlakken en hoe minder ballast bijgevolg zal nodig zijn. De wrijvingsfactor is afhankelijk van zowel het type dakdichting als het materiaal van de hulpstructuur.

Meestal wordt de hulpstructuur in aluminium uitgevoerd. Voor dakdichting bij platte daken is een brede waaier van materialen mogelijk: EPDM, PVC, asfalt, asfalt met granulaten, ... Iedere combinatie leidt tot een andere wrijvingsfactor.

Soms kan de wrijvingscoëfficiënt uit in technisch fiche van het dakdichtingsproduct gevonden worden. Als dit niet het geval is kan men conservatieve waarden hanteren uit de literatuur ofwel kan men deze bepalen met een eenvoudige opstelling waarbij de hellingshoek genoteerd wordt waarbij een gekalibreerd gewicht gaat schuiven. Het contactvlak dient uiteraard uit een representatief staal van beide materialen te bestaan. Toch is enige voorzichtigheid aangeraden bij het bepalen van deze coëfficiënt: aanwezigheid van enig vocht tussen het contactoppervlak kan tot een andere waarde leiden, door verouderingseffecten kan de oppervlakte ruwheid veranderen, ...

Daar aluminium doorgaans een lage wrijvingscoëfficiënt heeft in contact met klassieke dakdichtingsmaterialen wordt dikwijls geopteerd om een ander materiaal tussen de hulpstructuur en dakvlak te plaatsen. Deze kan een driedubbele functie uitoefenen door bijvoorbeeld te kiezen voor beton- of rubbertegels die tevens als ballast meewerken en zal ook waterstagnatie kunnen vermijden indien deze op regelmatige afstand onderbroken wordt. Een andere mogelijkheid is het bevestigen van een neopreenlaag, deze bleek de wrijvingscoëfficiënt te verdubbelen [38].

Tabel 13 Wrijvingscoëfficiënt voor hulpstructuur in aluminium met of zonder neopreen [38]

Roof Type	Coefficient of Friction	
	Neoprene Adhered Tray	Bare Tray
EPDM	0.8 – 1.0	0.4 – 0.5
Tar and Gravel	0.7 – 0.9	0.3 – 0.4

7.4 Contactvlak en indrukking

Het contactmateriaal dient chemisch inert te zijn t.o.v. het dakdichtingsmateriaal. Zo dient bijvoorbeeld het gebruik van rubber vermeden worden op een PVC afdichting.

Tevens dient ook aandacht besteed te worden aan de grootte van het contactvlak. Bij te kleine contactvlakken ontstaat het risico op indrukking van het dakdichtingsmateriaal en/of isolatie. Afhankelijk van het type isolatie dient men een ander controleberekening te doen (verbrijzeling en/of te grote vervorming). Meer hierover in het WTCB Dossier Nr. 4/2010 [44].

De indrukking van het dakdichtingsmateriaal kan versneld worden door de hoge temperaturen die op platte daken kunnen optreden (tot 70°C). Denk maar aan dakdichtingen op basis van bitumen die weker worden bij stijgende temperaturen. Te allen tijde moet doorponsing van de dakdichting vermeden worden om geen insijpelend water te krijgen.

Mocht indrukking toch optreden bestaat er tevens een gevaar voor waterstagnatie. In dit vochtig milieu en door eventuele culturen die hierin kunnen groeien, kan een mogelijke chemische verwerking nog versneld worden.

7.5 Helling dakvlak en waterstagnatie

Platte daken worden steeds met een lichte helling ontworpen om waterstagnatie te vermijden. Voor kleinere vlakken hanteert men een hoek van 1° à 1,5°, voor grote dakvlakken kan dit tot 6 à 7° oplopen. Deze helling kan voor sommige situaties destabiliserend werken en dient steeds in rekening gebracht te worden. Toch zeker voor de modules die zich bovenaan een afhellend dakvlak bevinden.

Bovendien moet men er op nazien dat de doorlopende liggers van de hulpstructuur de afwatering niet kunnen verhinderen. Een te kleine spouw tussen dakvlak en hulpstructuur kan verstopt raken door vuil of sneeuw.

7.6 Thermische zettingen

Temperaturen op daken zijn onderhevig aan hoge maxima en variaties. Overdag kan de temperatuur oplopen tot 70° terwijl die 's nachts weer op omgevingtemperatuur komt. In een etmaal kan een aluminium hulpstructuur (uitzettingscoëfficiënt van 0,023 mm/mK) zo tot 1,38 mm per meter uitzetten. Zo kan de lengte van een aluminium ligger van 7m op een etmaal met 1 cm variëren.

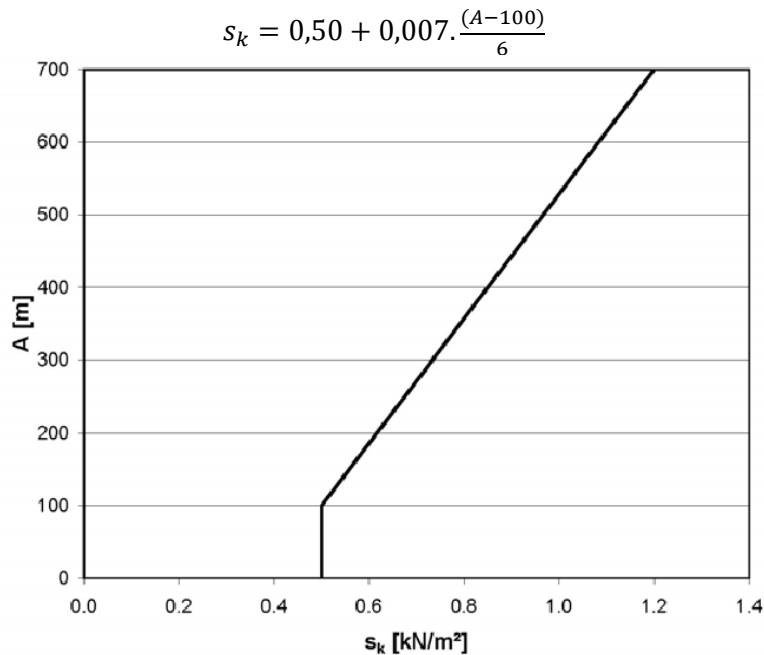
Het spreekt voor zich dat de hulpstructuur deze zettingen zal moeten kunnen opvangen zonder enige schade aan de modules of de dakdichting teweeg te brengen. Daar men een voorkeur geeft om zoveel mogelijk modules aan elkaar te koppelen, zullen de doorlopende liggers van de hulpstructuur moeten onderbroken worden en voorzien worden van een glijkoppeling die deze uitzettingen toelaat, doch andere krachten nog steeds kan overbrengen.

In principe dient men enkel de differentiële thermische uitzetting van de hulpstructuur t.o.v. het dakvlak te beschouwen. De thermische uitzetting van de dakopbouw ter hoogte van de dakdichting is echter van vele factoren afhankelijk: type dragende elementen en bevestiging, aanwezigheid en plaats van de isolatie, gewenst binnenklimaat van de constructie, etc.

8 Sneeuwbelasting

8.1 Sneeuw op begane grond

De bepaling van de sneeuwlast vindt men terug in de EN 1991-1-3 en zijn nationale bijlage. Om de sneeuwlast op een dak te vinden vertrekt men van de karakteristieke waarde van de sneeuwbelasting op de grond s_k . Net als bij windbelasting is de karakteristieke waarde van de sneeuwlast gekoppeld aan een terugkeerperiode van 50 jaar. Zolang men zich onder 100 m boven de zeespiegel bevindt, is deze in België 50 kg/m². Hoger dient men ze volgens volgende formule te begroten (met A als hoogteligging van de constructie):



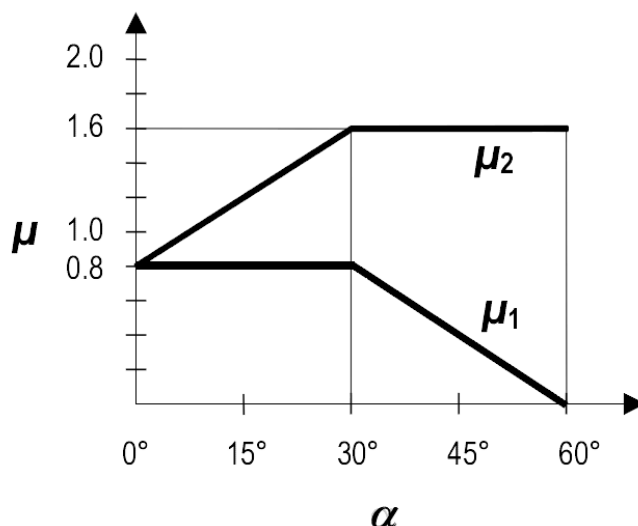
Figuur 79: Karakteristieke waarde van de sneeuwbelasting op de grond in België [45]

De norm vertrekt dus van een vers sneeuw pakket van ongeveer 50cm of een totale sneeuwlaag van 25cm wanneer deze al enkele dagen oud is.

8.2 Sneeuw op dak

Om sneeuw op een dak te begroten brengt men sneeuwlast vorm-, blootstellings- en thermische coëfficiënt in rekening. Laatst genoemden mogen in België gelijk aan de eenheid gesteld worden. Rest dus enkel de sneeuwlast vormcoëfficiënt μ_i .

$$s = \mu_i C_e C_t s_k$$



Figuur 80: Sneeuwlast vormcoëfficiënt voor daken [45]

8.3 Sneeuwlast vormcoëfficiënt

8.3.1 Sneeuwlaag en sneeuwophoping

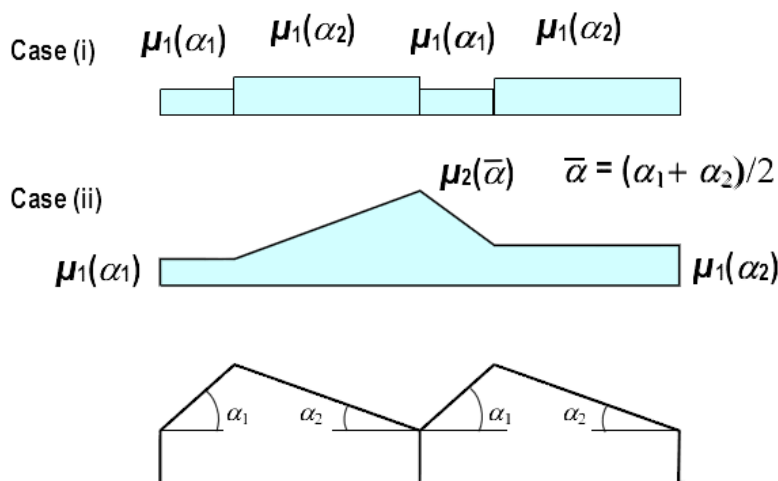
Voor het algemene geval wordt met de vormcoëfficiënt μ_1 gewerkt. Zolang de helling onder 30° blijft mag men dus 40kg sneeuw minstens eenmaal in 50 jaar verwachten

Wanneer er zich immers obstakels of andere dakvlakken in de nabijheid bevinden kan lokaal de sneeuw gaan ophopen. Zo kan tussen het contactvlak van dak en sneeuw de sneeuw smelten en vervolgens afschuiven naar een lager gelegen gebied. Ook de wind kan de sneeuw verplaatsen en op plaatsen waar de windsnelheid afneemt, terug afzetten. Daarom houdt de norm ook rekening met sneeuwophoping met de vormcoëfficiënt μ_2 .

Voor sneeuwophoping op en rond zonnepanelen leken twee benaderingen die opgegeven zijn in de norm geschikt.

8.3.2 Sneeuwophoping bij samengestelde daken

In Figuur 81 wordt toegelicht welke hoe men de sneeuwlast dient te bepalen bij samengestelde daken. Dit zou men kunnen extrapoleren naar PV-installaties.

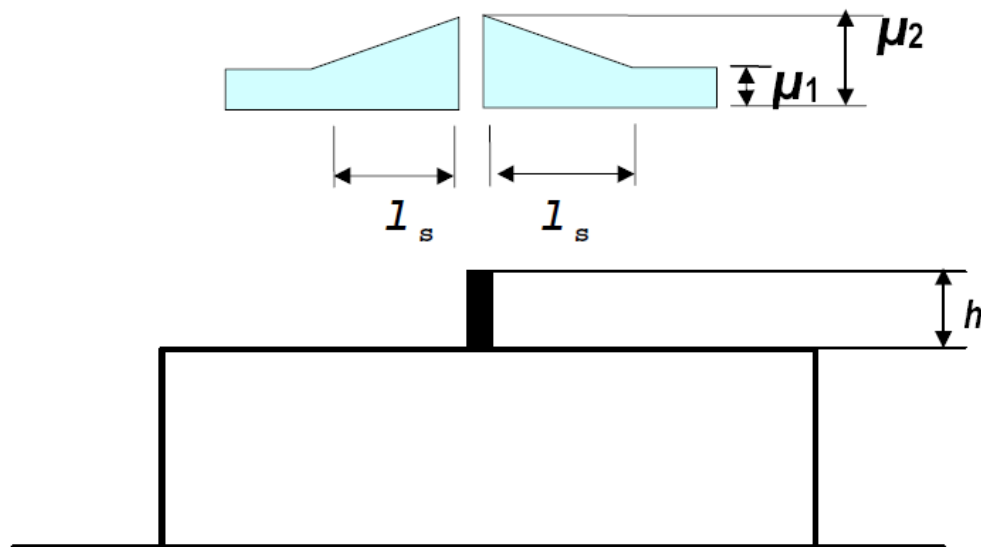


Figuur 81 Sneeuwlast vormcoëfficiënten voor multispandaken [45]

Zolang men onder de 100m blijft mag men dus op een plat dak minstens eenmaal in 50 jaar een sneeuwlaag van 40kg/m^2 verwachten (case i). Voor verse sneeuw komt dit overeen met pakket van 40cm. Blijft de sneeuw een tijdje liggen compacteert deze tot een 20 tal cm. Dit pakket zal na verloop van tijd echter afschuiven om zo tussen de panelen op te hopen (case ii). Dit geeft lokaal een ophoping tot 80kg/m^2 . Verdeelt men deze extra sneeuw tussen de panelen dan bekomt men een sneeuwlast van 60kg/m^2 .

8.3.3 Sneeuwophoping door lokale obstakels

Een andere benadering is deze voor lokale ophoping door obstakels.



Figuur 82: Sneeuwlast vormcoëfficiënten bij lokale obstakels [45]

Waarbij $\mu_1 = 0,8$ en $\mu_2 = \frac{\gamma \cdot h}{s_k}$ (μ_2 dient begrensd te worden tussen 0,8 en 2,0)

γ soortelijke dichtheid van sneeuw: 2 kN/m^3

$l_s = 2h$ waarbij l_s tussen 5 en 15 m dient beperkt te worden

Veronderstel een hoogte van 40 cm boven het dakvlak dan zou lokaal onder de panelen een ophoping tot 80 kg/m^2 kunnen optreden. Hoewel de tussenafstand tussen modules meestal minder is dan 5m, lijkt een verdeelde last van 60 kg/m^2 een goede benadering.

8.3.4 Conclusie

Zonder de aanwezigheid van zonnepanelen kan men een sneeuwlast van 40 kg/m^2 verwachten.

Door de zonnepanelen kan lokaal ophoping ontstaan. Zowel afglijding als ophoping geven volgens de berekeningen van de norm een verhoogde sneeuwlast van 60 kg/m^2 aan. De aanwezigheid van zonnepanelen op een plat dak kan dus de sneeuwlast met 50% verhogen!

8.4 Bemerkingen

Terug dienen hier wat bedenkingen gemaakt worden omtrent de toepasbaarheid van dit model op PV-modules. De bepalingen uit de norm gelden voor grote meervoudige daken, zal de ophoping wel even groot zijn tussen de kleinschaligere PV-modules? Het 'dakvlak' waar de sneeuw kan van schuiven is vrij beperkt voor PV-panelen. Het grote verschil zit ook in de algemene geometrie: tussen de panelen zal steeds een zekere afstand gehouden worden om beschaduwing te vermijden, enkel bij (zeldzame) toepassingen waarbij de backplate tot aan de voet van het achterliggend paneel reikt, kan men een zelfde geometrie herkennen.

Hoewel er dus geen scherp dal gevormd is tussen opeenvolgende modules en meestal geen backplate geplaatst wordt waarlangs de sneeuw kan afglijden, zal de sneeuw wel kunnen ophopen onder het PV paneel. Gezien PV-panelen ontworpen zijn om zoveel mogelijk zonlicht op te nemen, zullen ze ook sneller opwarmen dan hun omgeving. De sneeuw aan het glasoppervlak zal sneller smelten en zo zal het sneeuwpakket ook sneller afglijden.

Voor de lokale obstakels kan men argumenteren dat de wind niet volledig tot ontwikkeling zal komen om de sneeuw tot tegen en onder de modules te blazen door het shelter effect. Daarom werd een lagere equivalente sneeuwlast gekozen die tevens in overeenstemming is met het ophopen door afglijden.

Dat het geen onnodige luxe is om deze extra overlast in te rekenen, werd duidelijk in de winter van 2009. Het dak van een beschutte werkplaats in Roeselare bezweek er onder de sneeuwlast. Gelukkig was niemand aanwezig in het gebouw toen dit zich voordeed. Door verschillende vorst- en dooicycli is er een pak sneeuwijs zich gaan ophopen tussen de modules. Dit ijs blokkeerde de spouw onder de modules die voor afwatering moest voorzien. Het smeltwater kon dus niet weg zodat een ijspakket bleef accumuleren tot het dak uiteindelijk bezweek.

Een verhoging van de sneeuwlast met 20 kg/m² lijkt dus zeker aangewezen.

9 Opgelegde belasting

De laatste belasting die courant kan optreden op een dak is deze door aanwezigheid van personen, materialen en andere tijdelijk opgelegde belasting.

De Eurocode maakt onderscheid tussen 3 type daken op basis van hun functie:

- Categorie H: Niet toegankelijke daken behalve voor onderhoud en herstellingen
- Categorie I: Daken toegankelijk voor allerhande activiteiten (cfr categorie A tot D)
- Categorie K: Daken toegankelijk voor speciale diensten zoals helikopterlanding

Het lijkt voor zich te spreken dat zonnepanelen enkel op de eerste categorie zullen geïnstalleerd worden. Het uitvoeren van onderhoud en herstellingen zal uiteraard een belasting met zich meebrengen. Deze wordt forfaitair begroot met de opgelegde belasting. Naast een puntlast Q_k die op de meest nadelige plaats dient aan te grijpen dient men ook een oppervlaktelast q_k in te rekenen. De grootte van deze oppervlaktelast is afhankelijk van het dakoppervlak dat het beschouwde element dient op te nemen. Voor liggers zal dit 20 kg/m^2 naderen, voor steeldeckplaten zal deze dichterbij 80 kg/m^2 blijven.

Tabel 14 Opgelegde belastingen op daken van categorie H [46]

Categorie	q_k [kN/m ²]	Q_k [kN]
Categorie H	0,8-A/100 ≥ 0,2	1,5
<p>OPMERKING 2 : Op hellende daken wordt q_k toegepast per m² van de verticaal geprojecteerde oppervlakte tot een helling van 20°; ze wordt niet in acht genomen voor hellingen groter dan 60°; tussen 20° en 60° wordt lineair geïnterpoleerd.</p> <p>OPMERKING 3: Voor de daken van categorie H,</p> <ul style="list-style-type: none"> • in de uiterste grenstoestanden : werkt de eenparig verdeelde belasting q_k op een beperkte oppervlakte, verticaal geprojecteerd en als volgt bepaald : <ul style="list-style-type: none"> A=L x D (m²) waarbij L de lengte is van het dragend element tussen de steunen of in uitkraging (m) D de breedte is van het dragend element (bijvoorbeeld dakplaat) of de afstand tussen de dragende elementen (bijvoorbeeld tussen gordingen) (m) • in de bruikbaarheidsgrenstoestanden : de eenparig verdeelde belasting q_k wordt niet beschouwd (zie ook 3.3.2(1)). 		

De belasting dient uiteraard enkel op het dakvlak en niet op de modules toegepast worden.

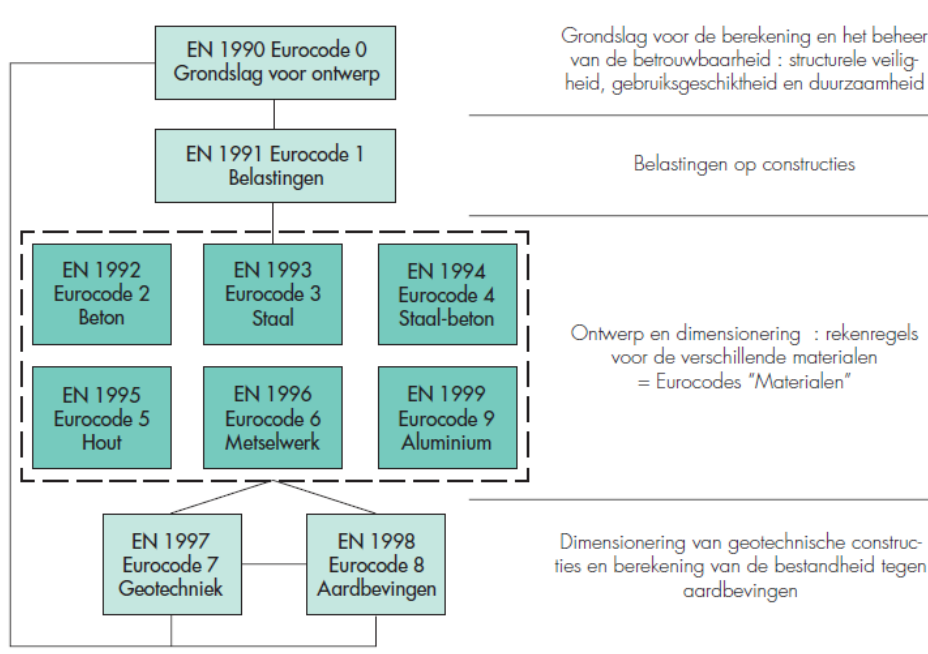
10 Ontwerpregels

10.1 Algemeen

Voor het ontwerpen van bouwkundige constructies en elementen dient men de rekenregels van de Eurocodes te respecteren. Alle mogelijke combinaties van belastingen moeten afgetoetst worden opdat een bepaalde voorwaarde nog zou voldaan blijven. Afhankelijk van welke voorwaarde zullen bepaalde belastingen meer of minder doorwegen. Wanneer men bijvoorbeeld de veiligheid van de constructie beschouwt, lijkt het logisch een hogere veiligheidsfactor in te rekenen dan wanneer men enkel de behaaglijkheid van de constructie evalueert.

Daarom onderscheidt de norm 2 grenstoestanden: deze in Uiterste Grenstoestand(UGT) en deze in de GebruiksGrensToestand(GGT). Afhankelijk van welk effect men beschouwd kan, wordt hierin nog verder gedifferentieerd.

In deze grenstoestanden wordt het effect van de belastingen gekwantificeerd. De weerstand die het element of de constructie hiertegen dient te bieden, kan bepaald wordt bepaald a.d.h.v. de Eurocodes specifiek voor het materiaal waaruit het element is samengesteld. Zo wordt er voor stalen structuren naar Eurocodes 3(EN 1993) verwezen, aluminium Eurocode 9(EN 1999).



Figuur 83: Structuur Eurocode [47]

Dit hoofdstuk zal zich vooral focussen op het opstellen van de juiste ontwerpbelasting. Deze dient bepaald te worden a.d.h.v. Eurocode 0 en zijn nationale bijlage. Hierin wordt toegelicht hoe de verschillende belastingen met elkaar gecombineerd moeten worden in een specifieke grenstoestand.

Deze zogenaamde combinatiescombinaties drukken de representatieve waarschijnlijkheid uit dat verschillende types belastingen gelijktijdig zullen optreden gedurende de levensduur van de constructie. Als types belastingen kan men eigengewicht, wind, sneeuw, mobiele last(voor onderhoud) en eventueel spanning ten gevolge van thermische uitzetting onderscheiden voor PV-systemen en dakstructuur.

De extreme waarden voor een bepaald type belasting die men gedurende de levensduur van een gebouw kan verwachten, noemt men de karakteristieke waarde van deze belasting(aangeduid door het subscript k). Deze worden bepaald in de Eurocodes 1-1-x en kwamen reeds aanbod in vorige hoofdstukken.

Voor meer detail welke normen momenteel in voege zijn voor een specifiek onderwerp, kan men overigens de normantennes van het WTCB consulteren [48].

10.2 Grenstoestanden

10.2.1 Algemeen

De Eurocodes onderscheiden dus twee types ontwerpbelastingen: de grenstoestand waarbij de veiligheid van personen en/of de veiligheid van de constructie net niet meer gegarandeerd kan worden (uiterste grenstoestand of UGT). Dit is de belasting waaronder de constructie of het element volgens het rekenmodel zou bezwijken.

Tevens zijn er de gebruiksgrenstoestanden (GGT). Hiermee wordt de goede werking van de constructie (elementen) gecontroleerd. Parameters als scheurvorming, overmatige doorbuiging, ... worden in grenstoestand geëvalueerd.

Hoe de belastingscombinaties voor een grenstoestand opgesteld dienen te worden zal verduidelijkt worden aan de hand van de UGT STR belastingscombinatie:

$$\gamma_G \cdot G_k \oplus \gamma_Q \cdot Q_k \oplus \sum_{i>1} \gamma_{Qi} \cdot \Psi_{0i} \cdot Q_{ki}$$

G_k, Q_k en Q_{ki} zijn de karakteristieke waarden voor de permanente, overheersende variabele en overige variabele belastingen respectievelijk.

γ is de partiële veiligheidscoëfficiënt: hierin zitten de onzekerheden op het rekenmodel en de dimensionale schommelingen vevat. Hierbij onderscheidt men deze voor permanente belastingen (γ_G) en voor variabele belastingen (γ_Q). Voor iedere γ zullen 2 waardes opgegeven zijn: één indien de belasting een gunstige invloed heeft, een hogere indien ze ongunstig werkt. Deze kunnen tevens verschillen naar gelang de impact van het falen van het te ontwerpen element. Hiervoor maken de Eurocodes een verschil inde zogenaamde gevolklasses.

Ψ_0 is de combinatiecoëfficiënt: de gereduceerde kans dat 2 variabele belastingen gelijktijdig hun extremale waarde bereiken, komt met deze coëfficiënt tot uiting

Het symbool \oplus wijst erop dat men de daaropvolgende belasting op het te ontwerpen element dient te laten aangrijpen in plaats van deze eenvoudigweg te sommeren. Daar zowel de veiligheidscoëfficiënten kunnen verschillen naar gelang het te evalueren effect en in principe alle variabele belastingen eens als overheersende belasting getoetst moeten worden met alle mogelijke combinatie van de overige variabele belastingen, levert deze formulering dus niet één vergelijking op maar een volledige set aan vergelijkingen waaraan de weerstand dient te voldoen.

In wat volgt worden de voornaamste grenstoestanden toegelicht die algemeen van toepassing zijn voor het dimensioneren van een PV-installatie en van de onderliggende dakstructuur. In principe zijn nog andere controles die moeten gedaan worden, zoals wat er gebeurt met de dakstructuur bij brand. Maar om ook op deze belastingscombinaties in te gaan, zou ons te ver leiden. Voor een genuanceerder beeld voor het hanteren van de Eurocodes kan men zich op [47] beroepen.

10.2.2 Uiterste grenstoestand

1. UGT STR (Set B)

Elementen dienen danig ontworpen te worden dat pas ze in deze grenstoestand zouden bezwijken. Ze is van toepassing bij het dimensioneren van de platen, liggers, gordingen, hulpstructuur, ... De rekenwaarde van hun weerstand R_d bepaald aan de hand van de Eurocode specifiek van toepassing voor het materiaal, dient voldoende te zijn voor alle gevallen tot de maximale ontwerpbelasting optreedt.

$$E_d \leq R_d \quad (UGT STR)$$

De ontwerpbelasting voor deze bezwijkgrenstoestand wordt bepaald door volgende formulering:

$$\gamma_G \cdot G_k \oplus \gamma_Q \cdot Q_k \oplus \sum_{i>1} \gamma_{Qi} \cdot \Psi_{0i} \cdot Q_{ki}$$

Voor UGT STR neemt men γ_G 1,00 indien het eigengewicht gunstig werkt. In het ongunstig geval 1,35. De partiële veiligheidscoëfficiënt bij variabele belastingen is 1,5 bij ongunstige gevallen en is 0 bij de gunstige. M.a.w. mag men niet op het gunstig effect van een variabele belasting rekenen. Wat per definitie van een variabele belasting vrij logisch is. Indien er naast een overheersende variabele belasting Q_k nog andere variabele belastingen Q_{ki} kunnen optreden, dienen deze gecombineerd te worden met de combinatiecoëfficiënt Ψ_0 .

Tabel 15: Combinatiecoëfficiënten Ψ_i [49]

Belasting	Ψ_0	Ψ_1	Ψ_2
Categorie H : daken	0	0	0
<i>Sneeuw- en ijsbelasting (cfr EN 1991-1-3)</i>			
Voor geheel België (hoogte H ≤ 1000 m)	0,5 ⁽³⁾	0 ⁽⁴⁾	0
<i>Windbelasting gebouwen (cfr EN 1991-1-4)</i>	0,6 ⁽³⁾	0,2 ⁽⁵⁾	0
<i>Temperatuur (uitgezonderd brand) (cfr EN 1991-1-5)</i>	0,6	0,5	0
⁽³⁾ Wanneer een veranderlijke belasting van korte duur – minder dan een maand – (bijvoorbeeld een sneeuwbelasting, een windbelasting) optreedt met een andere veranderlijke belasting van korte duur (overheersende veranderlijke belasting of belangrijkste veranderlijke belasting samengaand met de overheersende) is $\Psi_0 = 0,3$. ⁽⁴⁾ De frequente waarde van de belasting is nagenoeg nul volgens berekeningen van het Koninklijk Meteorologisch Instituut. ⁽⁵⁾ Voor de bruikbaarheidsgrenstoestanden mogen de waarden Ψ_0 en Ψ_1 afhangen van het gebruikscriterium (zie A1.4.2(2)).			

Men merkt dat Ψ_0 bij daken van categorie H nul zijn: men gaat er immers van uit dat geen herstellingen of onderhoud zal worden uitgevoerd tijdens andere extremale belastingen van storm of een dik sneeuwdek. De opgelegde belasting dient dus nooit gecombineerd te worden met wind- noch sneeuwbelasting. Bij de belastingscombinatie waarbij sneeuw en wind gelijktijdig optreden mag men Ψ_0 als 0,3 aannemen.

2. UGT EQU (Set A)

Deze belastingscombinatie dient gehanteerd te worden voor een bezwijktoestand met verlies aan statisch evenwicht. Ze zal dus bepalend zijn voor het begroten van de ballast bij geballasteerde systemen. Zowel het glijdingsevenwicht als het kantelevenwicht dient in deze BC geverifieerd te worden.

Men dient de ongunstige belastingseffecten $E_{d,dst}$ af te wegen tegenover de stabiliserende belastingseffecten $E_{d,st}$.

$$E_{d,dst} \leq E_{d,st} \quad (UGT EQU)$$

De formulering voor het effect van de gecombineerde belastingen is de zelfde, men dient echter voor de veiligheidscoëfficiënten andere waardes te hanteren.

$$\gamma_G \cdot G_k \oplus \gamma_Q \cdot Q_k \oplus \sum_{i>1} \gamma_{Qi} \cdot \Psi_{0i} \cdot Q_{ki}$$

γ_G wordt nu 0,9 indien de permanente belasting gunstig werkt, 1,1 in het ongunstige geval. Andere coëfficiënten blijven ongewijzigd.

10.2.3 Gebruiksgrenstoestand

Deze grenstoestand dient om de goede werking van de elementen te verifiëren. Het effect van de belasting zal tot een zekere aanvaardbare grenswaarde C_d beperkt moeten worden. Zo zal de doorbuiging van liggers, gordingen en platen beperkt moeten blijven.

$$E_d \leq C_d \quad (GGT)$$

In de gebruiksgrenstoestand onderscheidt men 3 combinaties: de karakteristieke, frequente en quasi-blijvende. Naar gelang het beoogde effect op het materiaal zal men een dezer moeten hanteren. De ogenblikkelijke doorbuiging van stalen elementen zal mijn bijvoorbeeld in de karakteristieke BC moeten beoordelen, het effect van kruip op bijv beton en hout bij een blijvende belasting in de quasi-blijvende, enz.

Welke BC men dient te hanteren zal men terugvinden in de Eurocode van toepassing voor het materiaal waaruit het element is samengesteld.

De doorbuiging van stalen liggers en staalplaten dient in volgende belastingscombinatie geëvalueerd te worden (karakteristieke belastingscombinatie):

$$G_k \oplus Q_k \oplus \sum_{i>1} \Psi_{0i} \cdot Q_{ki}$$

Deze doorbuiging dient voor elementen uit een dakstructuur van type H beperkt te worden een 300^{ste} van de overspanning die ze maakt.

Variabele belastingen die een gunstig effect hebben, worden uiteraard niet opgenomen.

10.2.4 Opmerkingen

Daar vooral stalen dakstructuren gevoelig zijn aan extra belasting, zullen in deze masterproef enkel dergelijke structuren beschouwd worden. Daar waar de dakopbouw in staal een eigengewicht van 15 à 40 kg/m² heeft, loopt deze bij daken uitgevoerd in betonplaten al snel op tot 200 kg/m². Bovendien wordt een stalen dakopbouw met geprofileerde staalplaten het meest toegepast bij industriële daken ongeacht uit welk materiaal de dakstructuur is opgebouwd.

De impact op een stalen dakstructuur zal dus veel groter zijn.

Voor het dimensioneren van stalen elementen zullen meestal de sterkte voorwaarden bepalend zijn. Voor beton zal dan eerder de gebruiksgrens bepalend zijn wegens te grote doorbuiging en/of scheurvorming die de wapening binnenin het beton blootstelt aan mogelijke corrosie.

Om deze redenen komt de gebruiksgrenstoestand weinig aan bod in deze masterproef, niet tegenstaande moet deze bij een actueel ontwerp steeds geverifieerd worden.

10.3 Gevolgklassen & ontwerplevensduur

10.3.1 Gevolgklassen

Eurocode 0 voorziet een onderscheid naar verschillende veiligheidsniveaus, nl de gevolgklassen. Voor iedere gevolgklasse worden dan andere waarden voor partiële veiligheidscoëfficiënten gehanteerd.

Tabel 16 Definitie gevolklassen [47]

OVEREENSTEMMING MET NBN B 03-001	GEVOLGKLASSE	BESCHRIJVING	VOORBEELDEN VAN GEBOUWEN EN CONSTRUCTIES
Verhoogde veiligheid	CC3	Zware gevolgen in termen van verlies van mensenlevens, of erg zware gevolgen op economisch, sociaal of milieuvlak	Tribunes, openbare gebouwen, waar gebreken zware gevolgen kunnen hebben (bv. concertzalen)
Gewone veiligheid	CC2	Middelmatige gevolgen in termen van verlies van mensenlevens, of aanzienlijke gevolgen op economisch, sociaal of milieuvlak	Residentiële of openbare gebouwen en kantoorgebouwen, waar gebreken middelmatige gevolgen kunnen hebben (bv. kantoorgebouwen)
Verminderde veiligheid	CC1	Zwakke gevolgen in termen van verlies van mensenlevens, of verwaarloosbare gevolgen op economisch, sociaal of milieuvlak	Agrarische gebouwen, waartoe de mensen normaal geen toegang hebben (bv. opslagruimten), serres

Een risicoanalyse dient dus de geschikte gevolgklasse te bepalen. Meestal valt de dakstructuur onder klasse 2.

Het falen van enkel de hulpstructuur van de PV-installatie op platte daken door bijv te verschuiven zou men onder gevolgklasse 1 kunnen plaatsen: de kans op menselijk leed is zo goed als nihil, economisch kan de schade wel oplopen daar zonnepanelen momenteel rond 300€/m² kosten. In België, bij gebrek aan meer specifieke bepalingen, ligt het aan de bouwheer of opdrachtgever om hierover te beslissen. De TV rond zonnepanelen waaraan momenteel gewerkt wordt aan het WTCB, zal hieromtrent duidelijkheid scheppen.

10.3.2 Ontwerplevensduur

Tenzij anders gespecificeerd worden gebouwen ontworpen voor een levensduur van 50 jaar. De karakteristieke waarde voor stochastische belastingen zoals sneeuw en wind zijn dan ook afgestemd op deze duurtijd.

Voor het dimensioneren van de dakstructuur kan men hier niet van afwijken. Voor de hulpstructuur van de PV panelen zou dit wel kunnen. De levensduur van een PV-installatie wordt immers op 20 à 30 jaar geschat.

10.3.3 Keuze gevolgklasse & ontwerplevensduur

Zoals gebleken zou men eventueel minder strenge veiligheidscoëfficiënten en karakteristieke belastingen voor sneeuw en wind kunnen hanteren in het opstellen van de belastingscombinaties voor de hulpstructuur van de PV panelen. Dit zou genuanceerd worden in de TV zonnepanelen, waar momenteel binnen het WTCB aan gewerkt wordt onder leiding van Eric Dupont. De publicatie laat nog op zich wachten maar in eerdere presentaties gaf Dupont aan dat men de hulpstructuur als een secundair element mag beschouwen en zodoende men met minder strenge veiligheidscoëfficiënten mag dimensioneren [50]. Dit naar analogie van de ontwerpregels voor buitenschrijnwerk bepaald in [24].

Zo mag men in de UGT STR combinaties de veiligheidsfactor voor het eigengewicht verlagen van 1,35 naar 1,15. In zowel de STR als EQU vergelijkingen mag de veiligheidscoëfficiënt van de variabele belastingen verlaagd worden van 1,50 naar 1,25. Bovendien zou de terugkeerperiode gereduceerd mogen worden van 50 jaar naar 25 jaar. Praktisch komt dit er op neer dat de karakteristieke waarde van de windbelasting met een factor 0,92 dient vermenigvuldigd te worden, de sneeuwbelasting met 0,86 [50].

10.4 Besluit

Elementen van zowel de draag- als hulpstructuur dienen aan de UGT STR belastingscombinaties te weerstaan en vervolgens op hun doorbuiging gecontroleerd te worden in de GGT karakteristieke belastingscombinatie.

Bij geballasteerde systemen dient het eigengewicht bepaald te worden a.d.h.v. de UGT EQU belasting.

Voor het dimensioneren van de hulpstructuur en ballast mag men op aangeven van Eric Dupont met minder strenge partiële veiligheidscoëfficiënten werken. In Tabel 17 wordt een samenvatting weergegeven van de veiligheidscoëfficiënten die van toepassing zijn.

Tabel 17 Partiële veiligheidscoëfficiënten bij PV-installaties [50]

		γ_G		$\gamma_{Q,wind}$		$\gamma_{Q,sneeuw}$		$\gamma_{Q,anderen}$	
		ongunstig	gunstig	ongunstig	gunstig	ongunstig	gunstig	ongunstig	gunstig
dakstructuur	UGT STR	1,35	1	1,5	0	1,5	0	1,5	0
	GGT	1	1	1	0	1	0	1	0
hulpstructuur	UGT STR	1,15	1	1,15*	0	1,075*	0	1,25	0
	UGT EQU	1,1	0,9	1,15*	0	1,075*	0	1,25	0

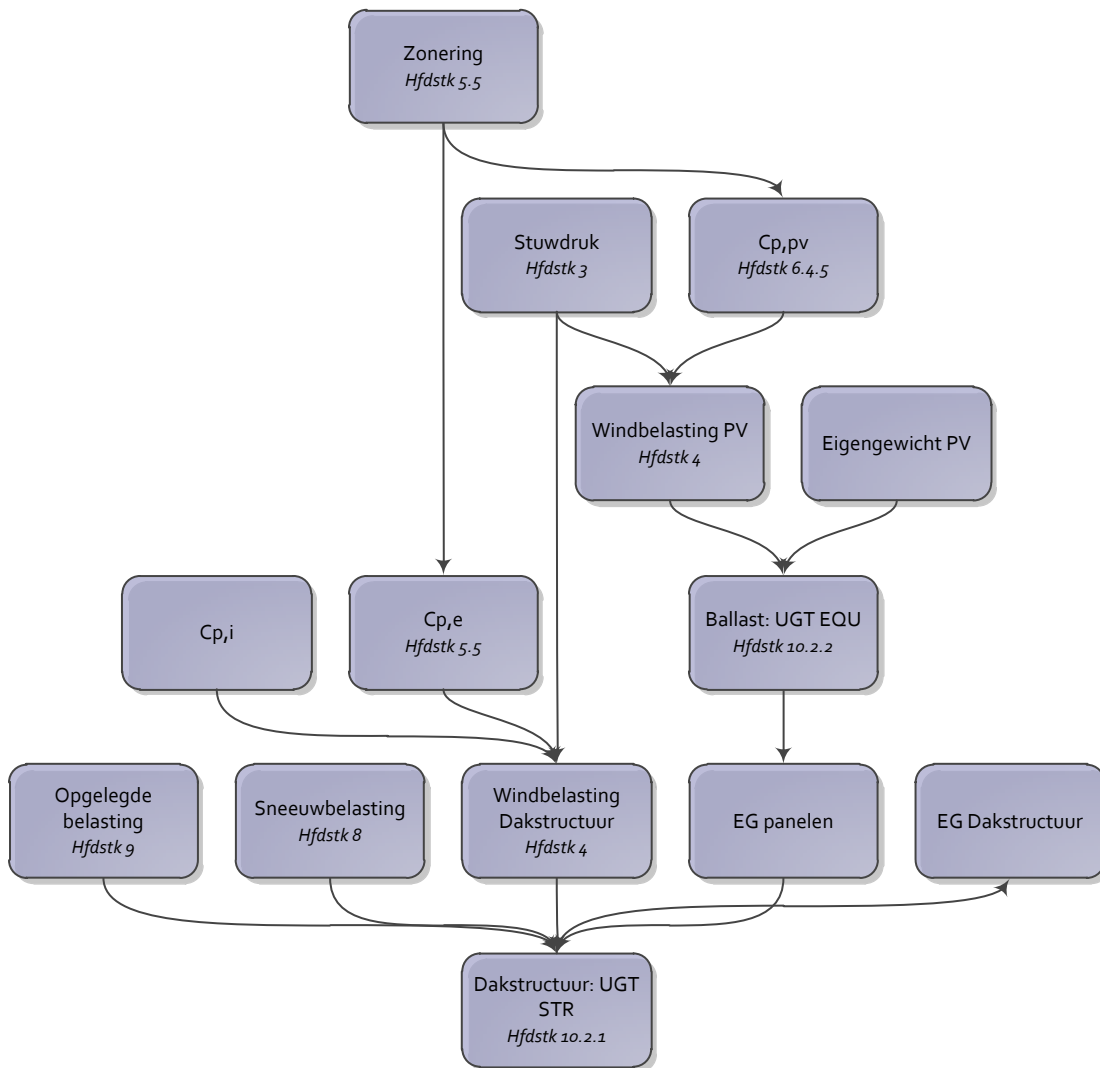
(*) bevat reductie wegens lagere retourperiode

(1,25*0,92=1,15 en 1,25*0,86=1,075)

11 Impact op constructie

11.1 Inleiding

Nu alle belastingen bepaald zijn en men de rekenregels kent, kan men een geballasteerd systeem ontwerpen en zijn invloed op de dakstructuur begroten. Hiertoe werd volgend stroomdiagram opgesteld die de rekenprocedure uit voorgaande hoofdstukken samenvat.



Figuur 84: Stroomdiagram rekenprocedure PV- installaties

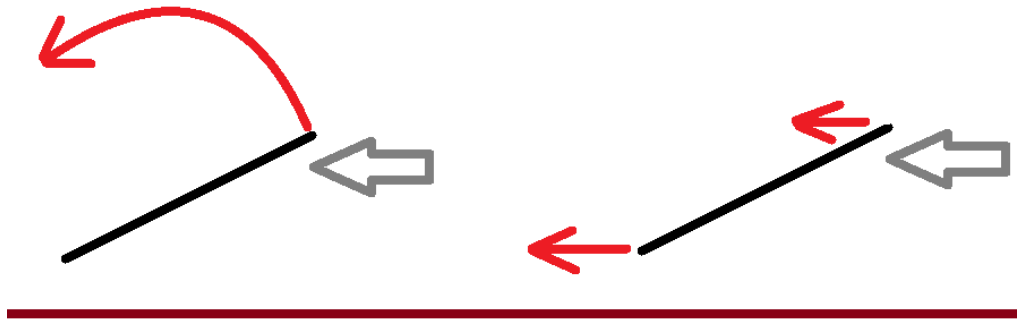
Dit stroomdiagram vormt de onderliggende gedachtengang bij de uitwerking van de ontwerpberekeningen waarvan de resultaten weergegeven worden in volgende hoofdstukken.

Maar eerst dient verduidelijkt te worden hoe een geballasteerd systeem kan 'bezwijken', de zogenaamde faalmodi.

11.2 Faalmodi

11.2.1 Algemeen

Voor geballasteerde modules zijn er 2 evenwichten die geverifieerd moeten worden: het glijdings- en kantel evenwicht.



Figuur 85: Bezijken door kantelen of schuiven

Voorts zijn nog structurele faalmodi van de hulpstructuur mogelijk: zowel de onderdelen als de verbindingen kunnen bezijken. Daarom dienen deze elementen op een adequate manier gedimensioneerd te worden in de UGT STR belastingscombinatie.

Tot slot dienen de panelen zelf te weerstaan aan de aangrijpende wind/sneeuwlasten. Sterkte eisen zijn voorzien in de IEC normering.

11.2.2 Glijdingsevenwicht

Een van de meest voorkomende problemen is het verschuiven van de modules. Hoewel dit minder risico inhoudt tot beschadiging van de panelen kan de onderliggende dakhuid wel beschadigd worden met insijpelend water tot gevolg.

Gezien dit een verlies van evenwicht betreft dient men de UGT EQU belastingscombinatie te hanteren.

11.2.3 Kantelevenwicht

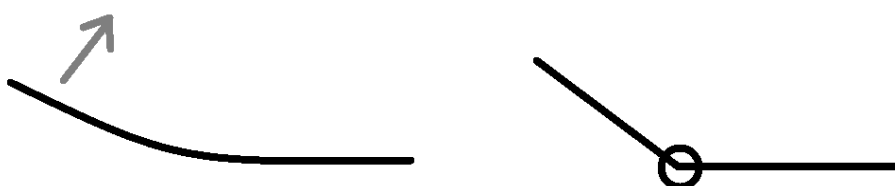
Ook is een bezwijkmechanisme mogelijk waarbij de één of meerdere modules omkantelen. Bij het omkantelen kunnen eventueel de panelen beschadigd geraken. Ook hier dient men terug de UGT EQU belastingscombinatie te hanteren.

11.2.4 Bezijken hulpstructuur

De hulpstructuur moet uiteraard voldoende stevig ontworpen zijn om alle lasten te kunnen overdragen naar het dakvlak en om voorgaande faalmodi mogelijk te maken. Het houdt geen steek om het kantelevenwicht in UGT EQU te beschouwen als de hulpstructuur al eerder uit elkaar zou vallen. Daarom dient deze gedimensioneerd te worden in de UGT STR combinatie.

De structurele analyse van dergelijke structuur zou ons te ver leiden en is weinig relevant voor het onderwerp van deze masterproef. In wat volgt zal de veronderstelling gemaakt worden dat deze aan de sterkte eisen volstaat.

Wat wel enige verduidelijking vraagt, is de vorming van plastische scharnieren. Elementen uit staal en aluminium hebben de capaciteit grote vervormingen te kunnen ondergaan zonder onmiddellijk te in meerdere stukken te breken. Lokaal kunnen de spanningen danig hoog oplopen dat het materiaal gaat vervloeien er zich een denkbeeldig scharnier gaat vormen. Hierdoor gaat het element zich volledig anders gaan gedragen dan waarvoor het initieel ontworpen werd.



Figuur 86: Vorming plastisch scharnier

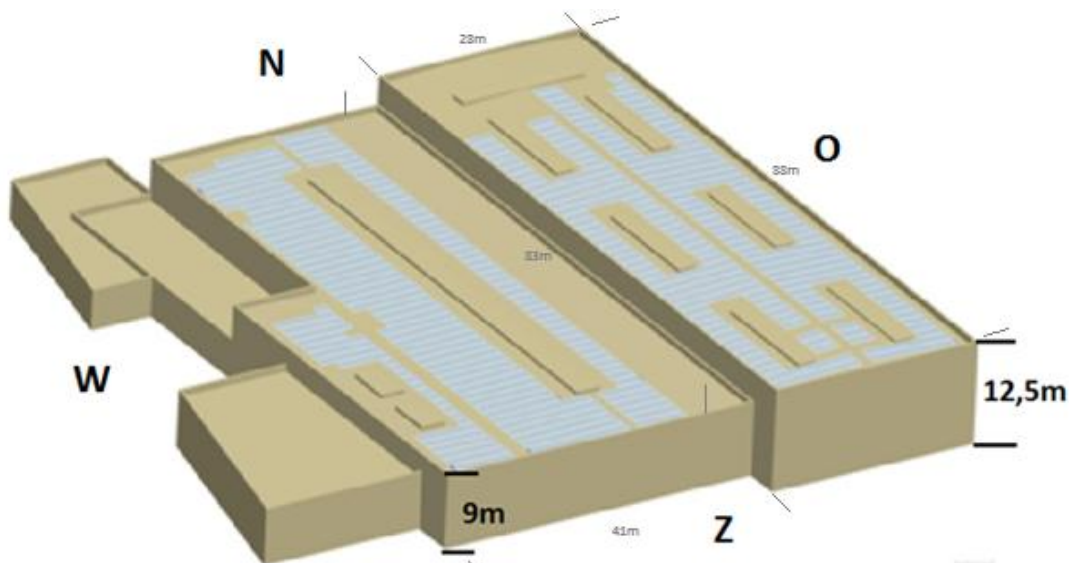
11.3 Casus

11.3.1 Algemene gegevens

1. Constructie

Voor een constructie van een plat dak van circa 7000 m² werd een geballasteerd systeem ontworpen. Er vallen 2 dakvlakken te onderscheiden op 2 verschillende niveaus, nl op 9 m en 12,5 m. Het hoogste gebouw heeft als basisafmetingen 28 m op 88 m. Het lagere gebouw 41 m op 83 m. De gevels zijn volledig volgens de hoofdrichtingen van de windroos georiënteerd.

De panelen zijn uiteraard zuidwaarts gericht. Bij het schikken van de modules dient rekening gehouden worden met obstructies op het dakvlak zoals lichtstraten en aanwezige technieken. In het totaal konden 920 panelen geplaatst worden op het dakvlak rekening houdende met de obstructies en beschaduwing. De installatie heeft een Wattpiek vermogen van 216 kWp.

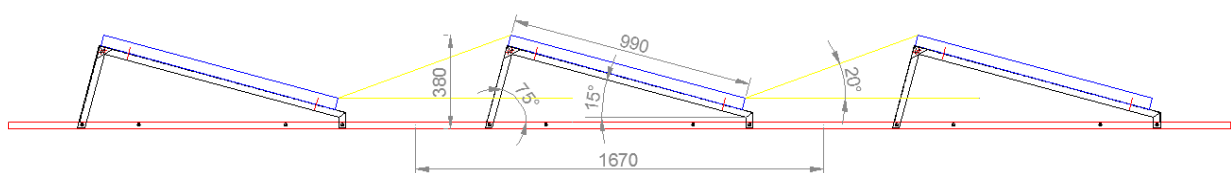


Figuur 87: 3D model constructie

Wegens confidentialiteit konden verder gegevens omtrent de structuur en dakopbouw niet opgevraagd en/of weergegeven worden. Om toch tot enige conclusies wat betreft de impact op de constructie komen, werd verondersteld dat de constructie volledig in staal is gebouwd en dat het dakvlak uit geprofileerde staalplaten bestaat met daarop isolatie en een zeker dakdichtingsmateriaal.

2. PV-systeem

De panelen werden in landscape t.o.v. het dakvlak geschikt. Zo zullen ze het minst uit het dakvlak rijzen en extra windlasten aantrekken. De hulpstructuur bestaat uit doorlopende liggers die op regelmatige afstand onderbroken worden met een glijkoppeling. De liggers worden met een tussenafstand van 1685 mm geplaatst (center tot center). De panelen zijn zelfdragend en worden danig gemonteerd dat ze toedragen tot de horizontale stabiliteit (zie Figuur 15).



Figuur 88: Basisafmetingen PV-module

Er werden back- noch side plates voorzien, zoals meestal van toepassing in de praktijk. De panelen hebben een oppervlak van 1,634 m² waarop de wind kan inspelen. In principe zal er ook een windlast optreden op de profielen van de hulpstructuur maar deze kunnen verwaarloosd worden. Het totale gewicht per paneel en het deel van de hulpstructuur dat bij één paneel hoort, bedraagt 25,6 kg. Zonder enige ballast wordt dus op het dak een gewicht van 9,10 kg/m² toegevoegd.

Tabel 18: Eigenschappen PV-module

Hulpstructuur(per module)		Paneel	
Lengte	1,670 m	Lengte	0,990 m
Breedte	1,685 m	Breedte	1,650 m
Oppervlak	2,814 m ²	Oppervlak	1,634 m ²
Gewicht	6 kg	Gewicht	19,6 kg
Helling paneel	15 °	Module	
Helling achterkant	75 °	Oppervlak	2,814 m ²
Helling tussen 2 panelen	20 °	Gewicht	25,600 kg

11.3.2 Windbelasting: algemeen

1. Bepalen van de piekstuwdruk

Een terreincategorie II werd vastgesteld rondom de constructie. De dakrand rijst minimaal 50 cm boven het dakvlak uit. De PV panelen slechts 38 cm. Als referentiehoogte voor de winddrukken op de installatie kan men dus de hoogte van de dakrand hanteren.

De piekstuwdruk voor het dakvlak dient ook met de hoogte van de dakrand bepaald te worden.

Dit geldt ook voor de inwendige druk gezien het gebouw relatief laag is.

Men dient dus de piekstuwdruk op 12,5 m en 9 m te bepalen voor een fundamentele basiswindsnelheid van 25m/s(provincie Antwerpen). Deze bedraagt 97,5 kg/m² en 89,3 kg/m². Hoewel het hoogteverschil slechts 3,5 m bedraagt, zal de windbelasting op het hoger dakvlak 10% groter zijn.

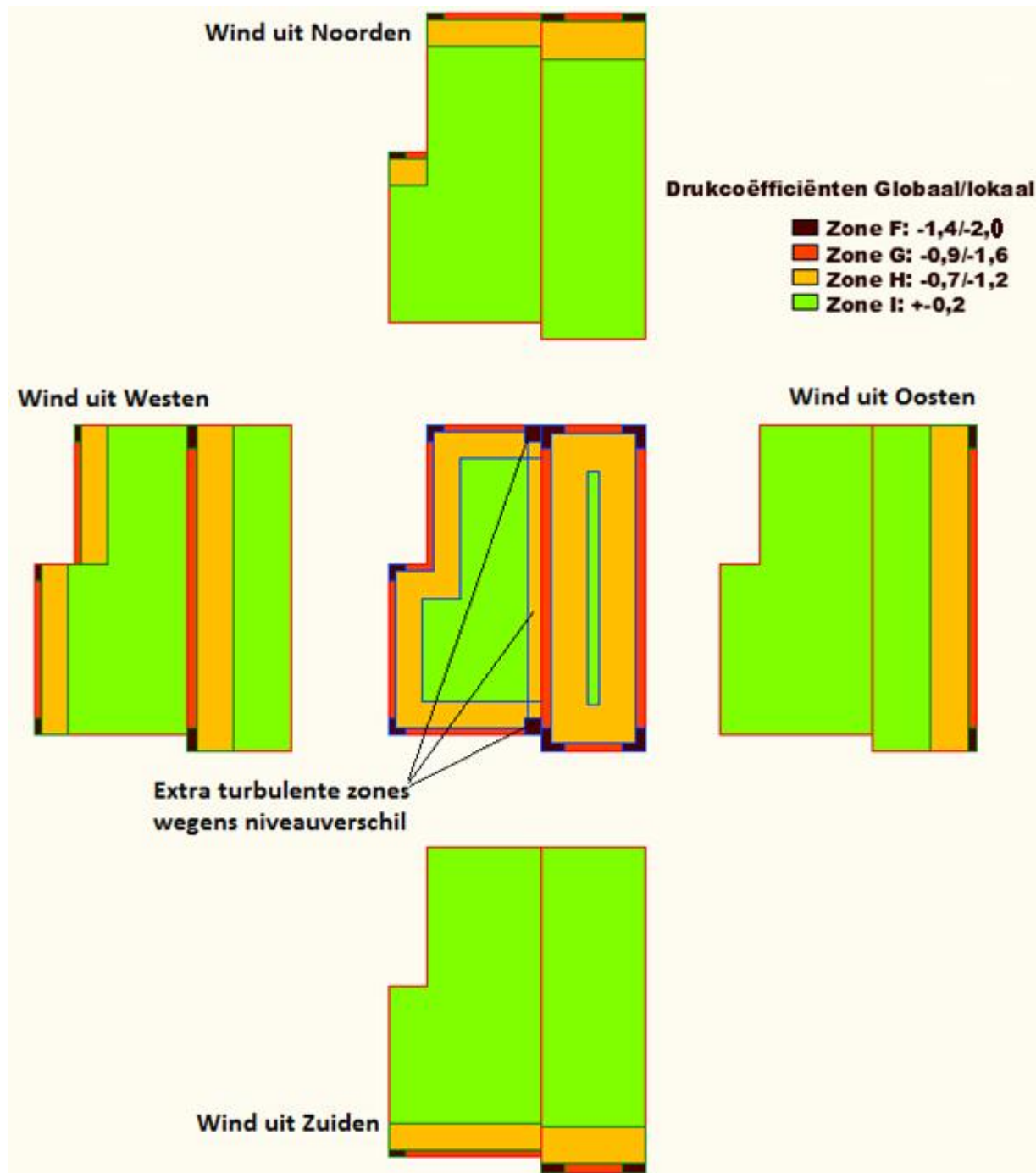
Tabel 19: Piekstuwdrukken

	referentiehoogte[m]	Piekstuwdruk[kN/m ²]
Dak A		
PV	12,5	0,975
Uitwendig	12,5	0,975
Inwendig	12,5	0,975
Dak B		
PV	9,0	0,893
Uitwendig	9,0	0,893
Inwendig	9,0	0,893

2. Indelen zones volgens EN 1991-1-4

De indeling van het dakvlak gebeurt in overeenstemming met de Eurcodes volgens Figuur 49. Hier is de hoogte van de constructie is bepalend voor het patroon dat men op het dakvlak zal krijgen. De hoogturbulente zone loopt uit tot 3,6 m of 5 m afhankelijk van op welk dakvlak men zich bevindt. Na 9 of 12,5 m is de turbulentie zo goed als uitgestorven en kan vrije aanstroming optreden. Dit patroon vindt men duidelijk terug in de drukcoëfficiënten.

Op het lager gelegen deel aan de overgang tussen beide dakvlakken, dienen extra turbulente zones ingerekend te worden. Wegens beschaduwing door de hoger gelegen dakrand zullen hier geen panelen geplaatst worden en zijn bijgevolg enkel relevant voor het ontwerpen van de dakstructuur.



Figuur 89: Indeling zones volgens EN 1991-1-4

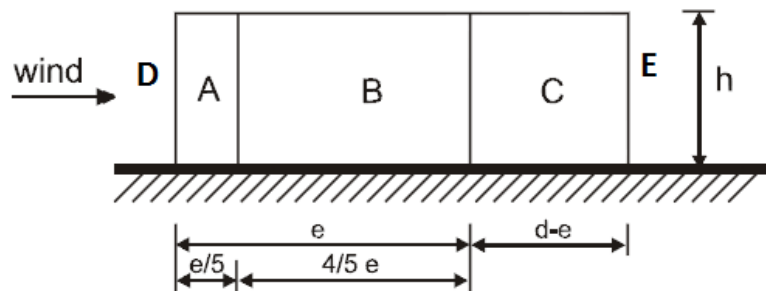
De dakrand is minimaal 50cm: drukcoëfficiënten voor een relatieve dakrandhoogte van 0,05 werden uit Tabel 4 overgenomen.

3. Winddrukken op de constructie

Om het globale effect van de wind op de constructie te evalueren, dienen nog de inwendige drukcoëfficiënten en deze voor de gevels bepaald te worden. In de veronderstelling dat er geen noemenswaardige openingen in de gevels noch ongelijkmatige verdeling van deze opening over de gevels, mag het basis geval voor de inwendige drukken gebruikt worden.

Voor de drukken op de gevels werden de coëfficiënten voor een gebouw waarbij de diepte groter is dan 4 maal de hoogte. Hoe de zones voor de gevels moeten opgedeeld worden wordt aangeduid in volgende figuur. Aan de windse kopgevel is heerst een onderdruk(D), aan de afwindse gevel een onderdruk(E).

Elevation for $e < d$



Figuur 90: Verdeling winddruk op de gevels volgens EN 1991-1-4 [23]

Een plat dak wordt traditioneel ontworpen met een neerwaartse winddruk bepaald uit een netto winddrukcoëfficiënt van +0,5 (uitwendig +0,2 en inwendig een zuigkracht). Bij het ontwerp van een dakstructuur houdt men dus rekening met een neerwaartse winddruk van circa 50 kg/m². De grootste zuigkracht die op een geprofileerde staalplaat kan voorkomen is 157 kg/m²

Tabel 20: Winddrukken op de constructie

	Winddrukken gebouw[kN/m ²]											
	Uitwendig dak					Inwendig		Gevels				
	F	G	H	I	I+	C _{pi+}	C _{pi-}	A	B	C	D	E
drukcoëfficiënt[-]	-1,4	-0,9	-0,7	-0,2	0,2	0,2	-0,3	-1,2	-0,8	-0,5	0,7	-0,3
12,5	-1,37	-0,88	-0,68	-0,20	0,20	0,20	-0,29	-1,17	-0,78	-0,49	0,68	-0,29
9	-1,25	-0,80	-0,63	-0,18	0,18	0,18	-0,27	-1,07	-0,71	-0,45	0,63	-0,27

11.3.3 Windbelasting op de PV-modules

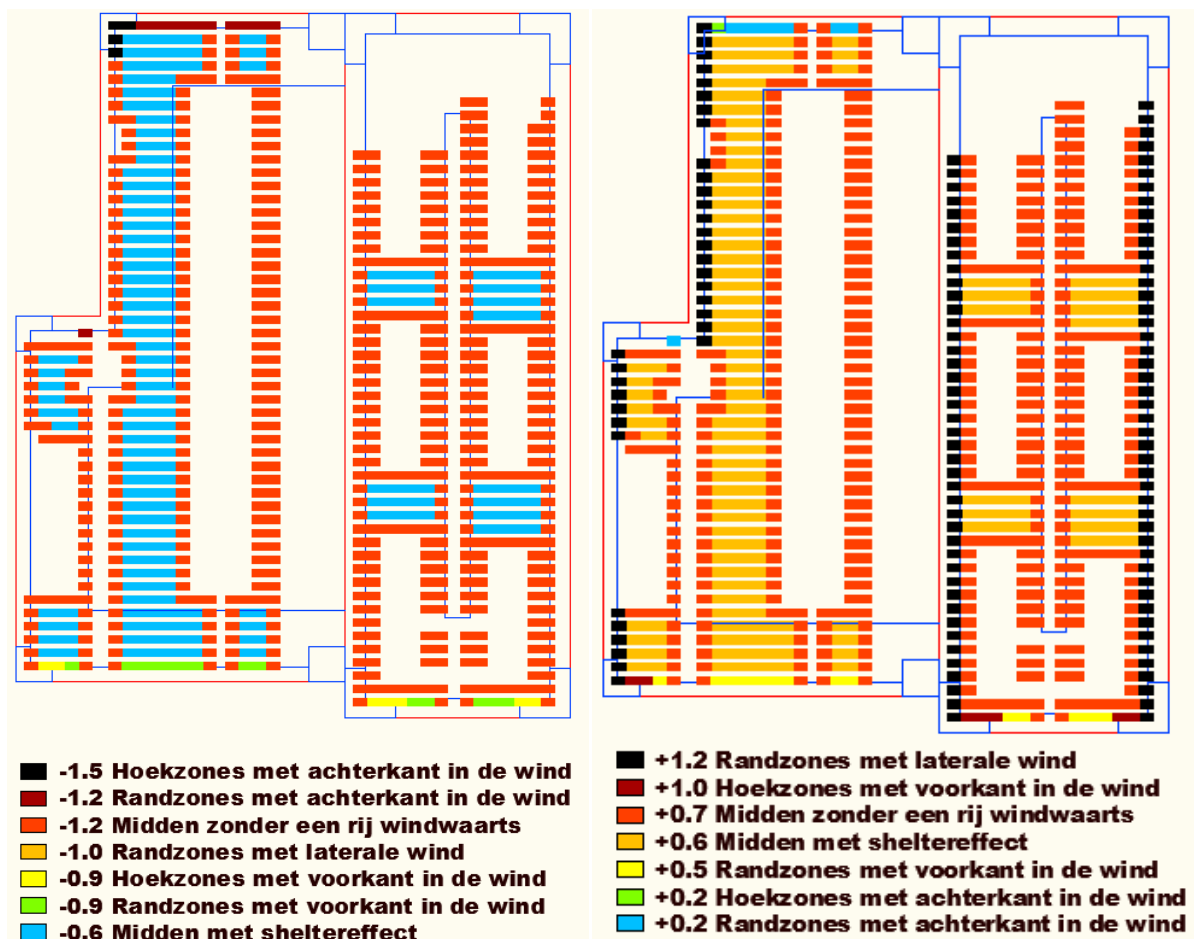
1. Bepalen drukcoëfficiënten PV

De installatie is duidelijk van het type open systeem. Men kan dus de netto drukcoëfficiënten hanteren uit Tabel 10 met dakrand hoger dan 200 mm.

Afhankelijk van de windrichting zal een paneel een andere winddruk ondervinden. Daarom moeten terug de 4 windrichtingen geëvalueerd worden en dient de drukcoëfficiënt die tot de hoogste belasting leidt per paneel bepaald worden. Dit kan verschillend zijn voor de positieve als de negatieve netto winddrukken. Beiden dienen dus apart geëvalueerd te worden.

Bij negatieve netto drukcoëfficiënten die leiden tot een winddruk weg van het dakvlak, blijkt algemeen voor paneel zonder shelter effect een $c_{p,net}$ van -1,2 van toepassing, voor afgeschermdde panelen -0,6. Met uitzondering van de panelen geplaatst bij de dakrand aan noord- en zuidgevel. Logischerwijs zijn deze aan de noordgevel veel zwaarder belast dan aan de zuidgevel.

Voor de positieve netto drukcoëfficiënten die de modules tegen het dakvlak drukken, zijn alle modules weg van de randzones aan een $c_{p,net}$ van +0,6 of +0,7 onderhevig. Het shelter effect speelt hier dus weinig mee. Ditmaal zijn de modules in de randzones aan de Noordgevel minder belast dan deze aan de Zuidgevel. Opvallend zijn de hoge drukcoëfficiënten van +1,2 aan de Oost- en Westgevels. Ook in de hoekzones aan de Zuidgevel vallen hoge waarden op te merken.

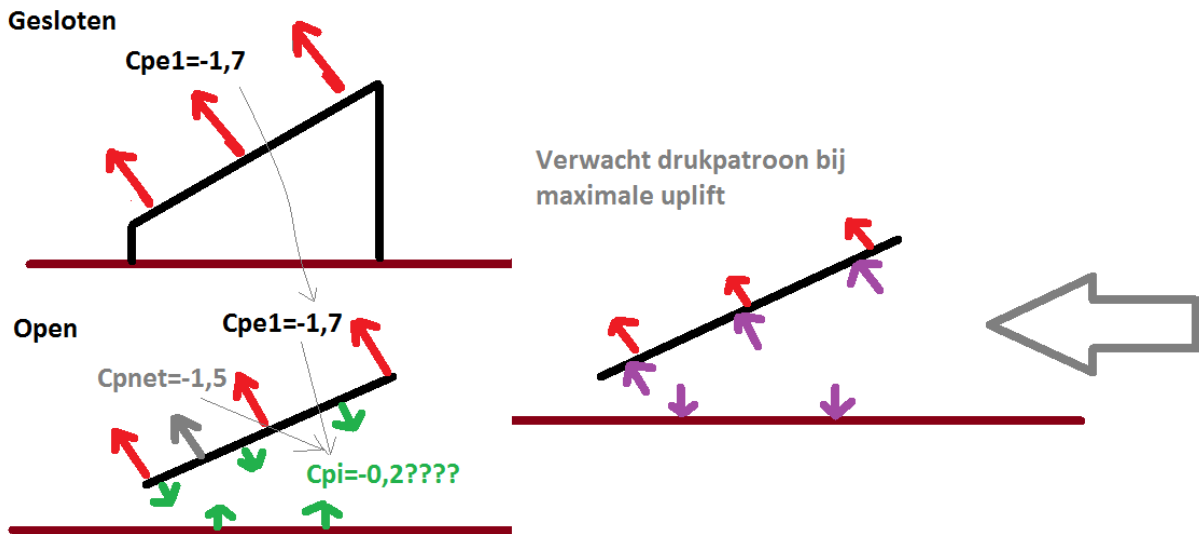


Figuur 91: drukcoëfficiënten individuele modules ($c_{p,net}$)

2. Vergelijking drukken open <-> gesloten systemen volgens Geurts

Onmiddellijk valt op te merken dat de hoogste winddrukken kunnen vermeden worden door het gebruik van back- en side plates. Voor de gesloten systemen geeft Geurts een maximale positieve $c_{pe,1}$ van slechts +0,2. Gezien de systemen nooit volledig gesloten zullen zijn lijkt het best deze te verhogen met een inwendige druk van -0,3, dit levert een $c_{p,net}$ van +0,5. Dit staat in schril contrast met een $c_{p,net}$ van +1,2.

De grootste uplift doet zich voor in de zones aan de Noordgevel en alle panelen met één kant blootgesteld aan de wind. Voor deze uplift kan het effect van de back- en sideplates minder duidelijk afgeleid worden uit de verschillende drukcoëfficiënten voor gesloten en open systemen. De uitwendige drukcoëfficiënt voor gesloten systemen blijkt zelf groter voor de modules aan de Noordgevel (-1,7 & -1,6 t.o.v. -1,5 & -1,2)! Dit geldt feitelijk voor zowat alle situaties. Het is alsof er een lichte onderdruk in de ruimte tussen dakvlak en panelen de modules beter op hun plaats houdt, terwijl men in condities met grote uplift net een overdruk zou verwachten.



Figuur 92: Te verwachten drukpatroon bij hoogste uplift

De drukcoëfficiënten die Geurts opgeeft, lijken het gunstig effect van back en side plates tegen te spreken. Zonder verder onderzoek kan men zich hier niet over uitspreken. In ieder geval lijken ze niet geschikt om tot een economisch ontwerp te komen van gesloten systemen. Bovendien werd de backplate in zijn opstelling loodrecht verondersteld, wat zelden het geval is. Tevens is ook niet duidelijk hoe de drukcoëfficiënten van de panelen en de backplates moeten gecombineerd worden.








3. Bepalen van de winddrukken op de PV-modules

Bij benadering mag enkel de druk op de zonnepanelen beschouwd worden. Op de profielen van de hulpstructuur zullen ook winddrukken optreden maar de resultante hiervan lijkt beduidend kleiner dan deze van de panelen.

Met de netto drukcoëfficiënten de de piekstuwdruk kan de winddruk op de panelen snel begroot worden. Vermenigvuldigd met een oppervlak van 1,634 m² bekomt men de kracht per paneel, de welke op 1/4^{de} van de overspanning aangrijpt.

Tabel 21: Uplift en Downforce per module [kN/module]

Situatie	Zone	$c_{p,net}$ (-)	Uplift		Downforce	
			kracht op paneel [kN]	$c_{p,net}$ (+)	kracht op paneel [kN]	
			12,5m	9m	12,5m	9m

	F	-1,5	-2,39	-2,19	0,2	0,32	0,29
		-0,9	-1,43	-1,31	1	1,59	1,46
	G	-1,2	-1,91	-1,75	0,2	0,32	0,29
		-0,9	-1,43	-1,31	0,5	0,80	0,73
		-1	-1,59	-1,46	1,2	1,91	1,75
	H&I	-1,2	-1,91	-1,75	0,7	1,11	1,02
		-0,6	-0,96	-0,88	0,6	0,96	0,88

De karakteristieke waarde voor de uplift op één paneel loopt op tot 240kg in de hoekzones aan de noordgevel bij noorderwind. Minimaal kan men 96kg uplift per paneel verwachten voor panelen die afgeschermd zijn door een volledige rij windwaarts. De grootste downforce is 191kg per paneel bij wind uit het oosten of westen op de panelen aan diezelfde gevels. Dit ligt niet in de lijn van de verwachtingen en zou nader bestudeerd moeten worden. De minimale drukkracht op een paneel is 32kg.

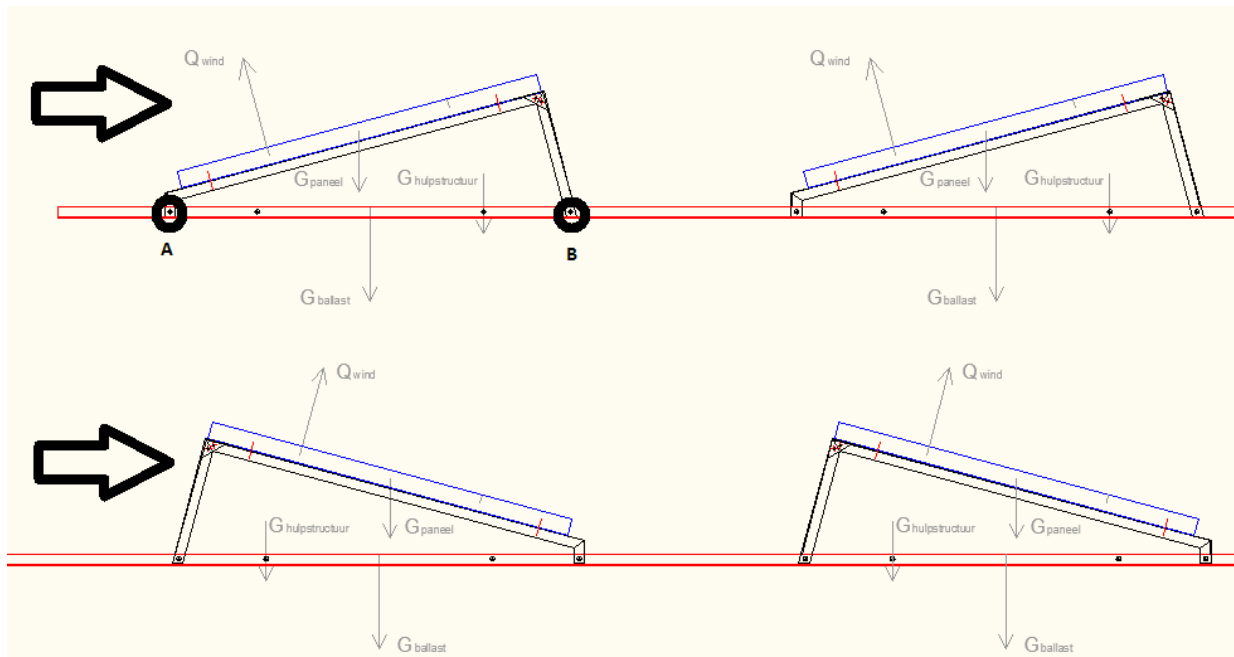
11.3.4 Ballastbepaling

Geballasteerde systemen zullen bezwijken na verlies aan evenwicht. Dit kan door verschuiven of omkantelen. Om dit te verifiëren dient men de UGT EQU belastingscombinaties hanteren. Als destabiliserende belasting valt de uplift op te merken. Deze dient men met een factor 1,15 te vergroten. Het eigengewicht en sneeuwlast werken stabiliserend. Het spreekt voor zich men niet altijd op de sneeuwbelasting zal kunnen rekenen en ze dus niet dient opgenomen worden in de belastingscombinatie. Het eigengewicht moet gereduceerd worden met een factor 0,9.

Tabel 22: Vermenigvuldigingsfactoren bij opstellen UGT EQU

	EG	Wind		Sneeuw
	gunstig	gunstig	ongunstig	gunstig
Factor	0,9	0	1,15	0

In volgende figuur werden de krachten met hun aangrijpingspunt aangeduid. De windkracht dient windwaarts op een vierde van de overspanning aan te grijpen.



Figuur 93: Aangrijpende belastingen bij wind van voor en achter

1. Glijdingsevenwicht

De destabiliserende kracht is de horizontale resultante van de windbelasting. De wrijvingskracht zal stabiliserend werken. De windbelasting dient ontbonden te worden in een resultante loodrecht op het dakvlak en evenwijdig met het dakvlak. De verticale component zal het gewicht van de module minderen en de horizontale zal de module doen verschuiven.

$$\mu \cdot (0,9 G_{\text{paneel}} + 0,9 G_{\text{frame}} + 0,9 G_{\text{ballast}} - 1,15 \cos \alpha \cdot Q_{\text{wind}}) \geq 1,15 \sin \alpha \cdot Q_{\text{wind}}$$

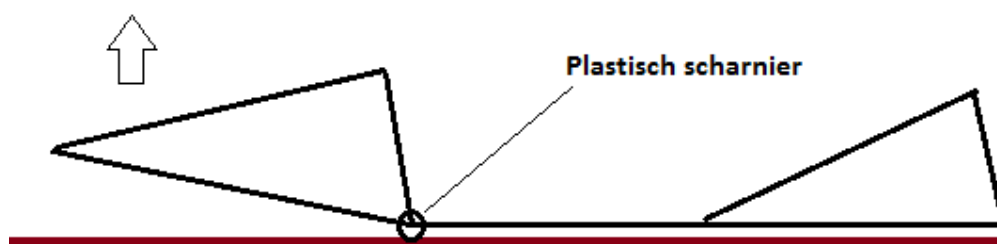
Als wrijvingsfactor werd 0,7 aangenomen. Voor de contactvlakken van deze installatie werd ze door een afglijdingproef bepaald op 0,75.

2. Kantelevenwicht

De windbelasting is terug de destabiliserende belasting. Het eigengewicht zal verhinderen dat de module zal omkantelen rond een bepaalde as. Men dient dus een momentenevenwicht op te stellen.

$$0,9 M_G \geq 1,15 M_{\text{wind}}$$

Rond welke assen en hoeveel modules men moet betrekken, is afhankelijk van de opvatting van de hulpstructuur. Een uitgebreide structurele analyse van de hulpstructuur zou hieromtrent duidelijkheid moeten scheppen. Worst case scenario vormen er zich plastische scharnieren ter hoogte van punt A of B (zie Figuur 93) zodat een module op het einde van een doorgaande ligger zich als een enkelvoudige module gaat gedragen en rond deze as zal kantelen.



Figuur 94: Vorming plastisch scharnier in hulpstructuur bij eindmodules

3. Resultaat

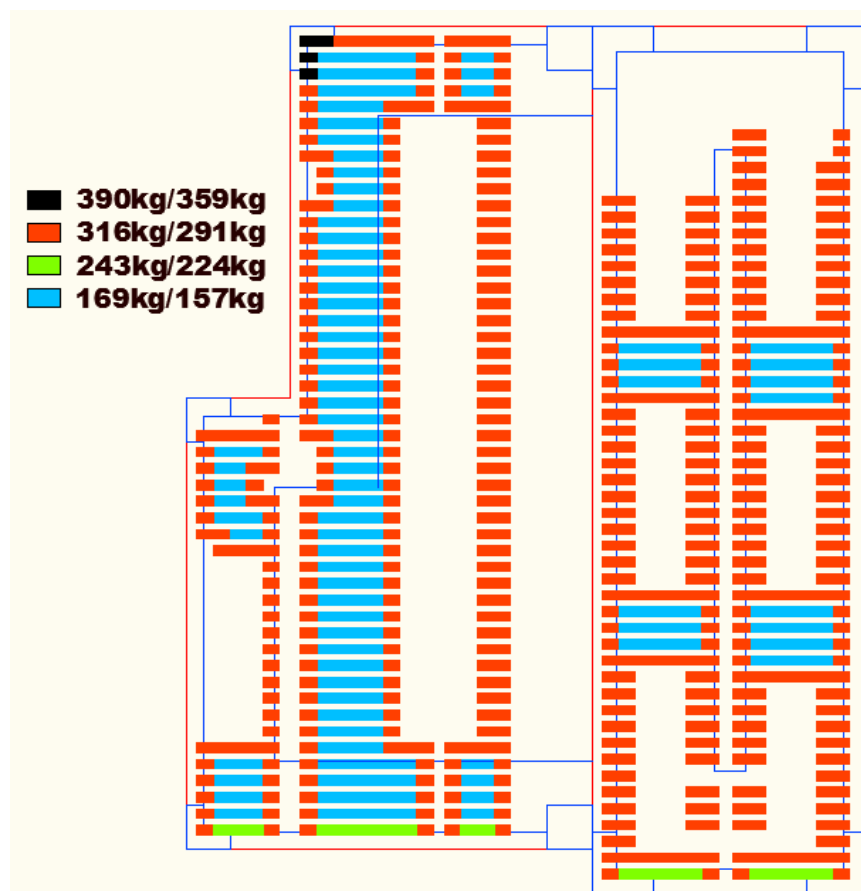
Maar liefst 360 kg bleek nodig om een module in de hoekzones aan de noordgevel op zijn plaats te houden. Afhankelijk van het dakvlak waarop ze geplaatst worden, is minimaal 146 of 157 kg nodig. Modules op het dakvlak van 12,5 m hoogte vergen tot 33 kg meer ballast dan deze op 9 m.

Wanneer deze ballast over het volledig oppervlak dat een module beslaat als verdeeld kan beschouwd worden, voegt deze een extra last van 56 kg/m² tot 128 kg/m² die de dakstructuur zal moeten opnemen.

Tabel 23: Ballast per paneel per zone volgens UGT EQU

Situatie	Zone	c _{p,net}	Ballast			
			gewicht[kN]		last[kN/m ²]	
			12,5	9	12,5	9
	F	-1,5	3,90	3,59	1,38	1,27
		-0,9	2,43	2,24	0,86	0,80
	G	-1,2	3,16	2,91	1,12	1,04
		-0,9	2,43	2,24	0,86	0,80
		-1	2,67	2,47	0,95	0,88
	H&I	-1,2	3,16	2,91	1,12	1,04
		-0,6	1,69	1,57	0,60	0,56

Welke panelen welke ballast vergen is aangeduid op volgende figuur.



Figuur 95: Ballast per paneel

4. Bemerkingen

De nodige ballast uit het kantelevenwicht bleek maximaal 13% hoger dan deze uit het glijdingsevenwicht. Toch werd deze uit de laatste berekeningsmethode gehanteerd. Men kan immers nog voldoende inspelen op de factoren die het kantelevenwicht beïnvloeden: Alvorens een plastisch scharnier te vormen zal de doorgaande ligger steeds enige weerstand bieden. Tevens kan men de hulpstructuur danig ontwerpen dat geen plastisch scharnier zal optreden en verschillende modules zullen samenwerken. Bij de structurele analyse van de hulpstructuur kan men deze dus zodanig ontwerpen dat het kantelevenwicht niet meer bepalend zal zijn.

Tevens dient aandacht besteed te worden voor de plaatsing van het ballast: Door het zwaartepunt van de belasting zo ver mogelijk van de omwentelingsas te plaatsen, zal men minder ballast nodig hebben. Het kantelevenwicht dient echter zowel rond een as vooraan als een as achteraan bekeken te worden. Bij alleenstaande modules of onzekerheid over het gedrag van de hulpconstructie is het dus aangewezen om het zwaartepunt in het midden te schikken. Kan men op de sterkte van de hulpconstructie rekenen, dan zou men het zwaartepunt naar het uiteinde kunnen verschuiven bij modules op het eind van een doorgaande ligger.



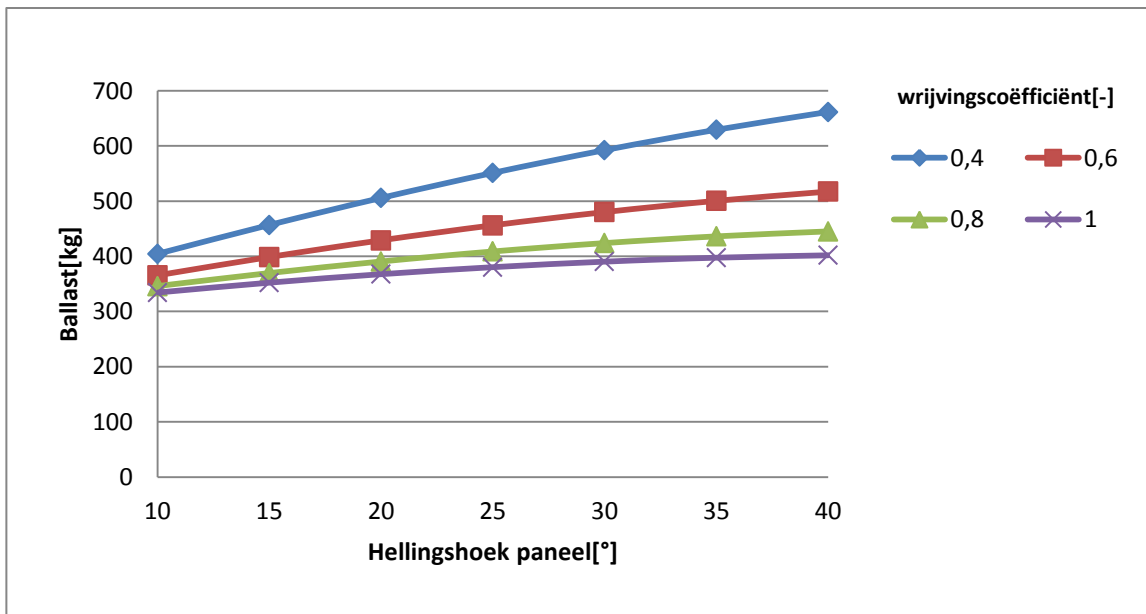
Figuur 96: Keuze zwaartepunt ballast

Het type ballast dient ook zorgvuldig gekozen te worden: men dient ervoor te zorgen dat deze niet op een te klein oppervlak geconcentreerd wordt. Mogelijke doorponsing van het dakdichtingsmateriaal en indrukking van isolatie dienen gecontroleerd worden. Tevens is het ook goed mogelijk dat de onderliggende dakstructuur niet voorzien is voor dergelijke gecentreerde lasten.

Afhankelijk van de keuze van het ballastmateriaal lijkt het ook aangewezen om enige veiligheid in te bouwen op zijn hefboomsarm t.o.v. de omwentelingsassen. Voor ballast met tegels zou dit niet nodig blijken mocht er op de hulpstructuur speciale voorzieningen zijn genomen dat bij plaatsing de ballast steeds op dezelfde plaats terecht komt. Bij ballast met grind is het al minder duidelijk waar het zwaartepunt precies zal komen te liggen. Indien deze in een diepe smallere bak gekiept worden, ligt het zwaartepunt redelijk vast, anders is dat wanneer deze op een plaat onder het paneel gegoten wordt.

Gezien men geballasteerde systemen danig kan ontwerpen dat vooral het glijdingsevenwicht bepalend blijkt, is de belangrijke ontwerpparameter dus de wrijvingscoëfficiënt. Zoals eerder op gewezen kan deze verhoogd worden door het plaatsen van een vakkundig gekozen tussenmateriaal.

Aan de hand van het glijdingsevenwicht werd de invloed van zowel de hellingshoek van het paneel als de wrijvingscoëfficiënt bestudeerd. Zoals te verwachten is er minder ballast nodig naarmate de wrijvingscoëfficiënt hoger en de hellingshoek lager.

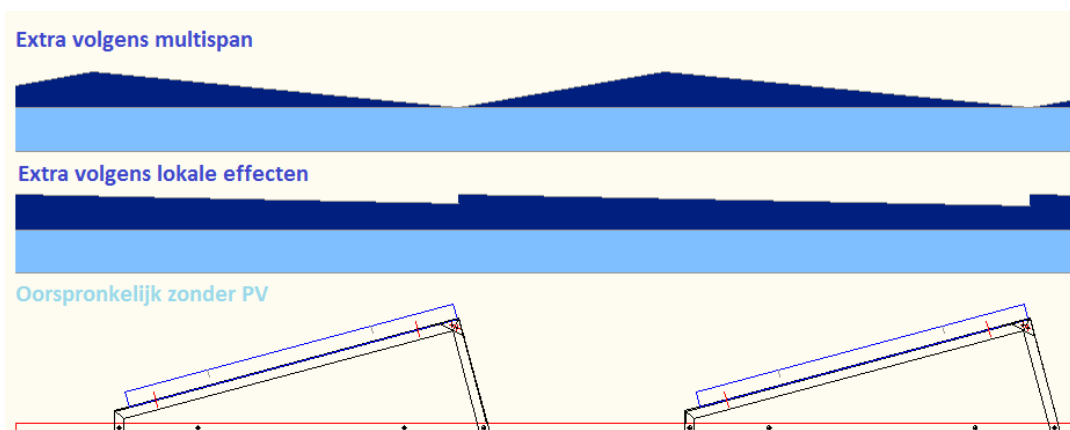


Figuur 97: Invloed hellingshoek en wrijvingscoëfficiënt op het glijdingsevenwicht

11.3.5 Sneeuwbelasting

Zonder ophoping is een sneeuwbelasting van 40 kg/m² te verwachten. Mocht de installatie niet op het dak voorzien zijn, zal dit ook de sneeuwlast zijn die de dakstructuur zal moeten opnemen.

Door de aanwezigheid van de panelen zal er zich echter sneeuw ophopen tussen de panelen. Zowel voor de benadering volgens meervoudige daken als volgens lokale effecten wordt μ_2 1,6. Dit betekent een lokale ophoping tot 40 cm, net tot aan de bovenrand van het paneel, goed voor piek van 80 kg/m². Voor de multispans benadering levert dit een verdeelde last van 60 kg/m², door het lokaal effect 73,3 kg/m².



Figuur 98: Extra sneeuwbelasting door aanwezigheid PV

De ophoping van sneeuw vindt zijn oorzaak in het afschuiven van de panelen en het verplaatsen door de wind tegen de achterkant tot zelf onderkant van de panelen. Onder de panelen is weinig zonlicht zodat eventuele sneeuw minder snel zal wegsmelten dan elders op het dakvlak.

Op het paneel zal in wat volgt de normale sneeuwlast verondersteld worden, nl. 40 kg/m² (op het horizontaal geprojecteerde vlak). De ophoping komt vooral op het dakvlak terecht.

Deze ophoping werd als een extra sneeuwlast van 20 kg/m² verondersteld, bovenop de oorspronkelijke sneeuwlast op het dakvlak van 40 kg/m².

11.3.6 Opgelegde belasting

De is afhankelijk van de grootte van het dakvlak dat het te ontwerpen element zal dragen.

$$q_{opgelegde} = 0,8 - \frac{A}{100} \text{ met als ondergrens } 0,2 \text{ kN/m}^2$$

Als oppervlak voor de geprofileerde staalplaat werd 10 m² verondersteld, voor de liggers werd verondersteld dat ze een dakvlak groter dan 60 m² moeten opnemen. Terwijl deze plaat tot 70kg/m² zal moeten opnemen, zal een ligger slechts op een overlast van 20 kg/m² voorzien moeten zijn. Tevens dient nog een puntkracht van 150 kg op de meest nadelige plaats gezet worden.

Tabel 24: Opgelegde belasting

	A[m ²]	qk[kN/m ²]	Qk[kN]
Geprofileerde platen	10	0,7	1,5
Liggers	60	0,2	1,5

11.3.7 Belastingscombinaties voor dakstructuur

Alle belastingen die de dakstructuur moet opnemen zijn nu bekend. Deze belastingen moeten gecombineerd worden in de uiterste grenstoestand voor de sterkte(UGT STR). Het aantal vergelijkingen die kan opgesteld worden is vrij groot: niet alleen dienen alle belastingstypes op elke mogelijk manier met elkaar gecombineerd te worden met een set van verschillende coëfficiënten, bovendien zijn er voor de windbelasting 4 verschillende windrichtingen te beschouwen die elk een andere druk verdeling zullen geven. Met software voor structurele analyse kunnen alle lineaire vergelijkingen automatisch opgesteld en geëvalueerd worden. Wanneer men manuele berekeningen uitvoert kan men met een portie gezond verstand er wel de meest belastende combinaties uit halen.

Bij constructie elementen met enkelvoudige overspanningen zal het veldmoment bepalend zijn en dient men dus de belastingscombinatie te zoeken met het grootste neerwaartse en eventueel opwaartse effect. Gezien klimaatbelastingen en opgelegde belastingen nimmer gecombineerd moeten worden voor daken vallen er al heel wat mogelijkheden weg. Als vermoedelijk meest belastende combinaties blijven nog over:

$$BC_1 = 1,35 G + 1,50 Q_{wind} + 0,3 * 1,50 Q_{sneeuw}$$

$$BC_2 = 1,35 G + 1,50 Q_{sneeuw} + 0,3 * 1,50 Q_{wind}$$

$$BC_3 = 1,35 G + 1,50 Q_{opgelegd}$$

Aan de dakranden treden grote onderdrukken op het dakvlak. Deze kunnen zo groot worden dat ze het dakvlak kunnen afrukken.

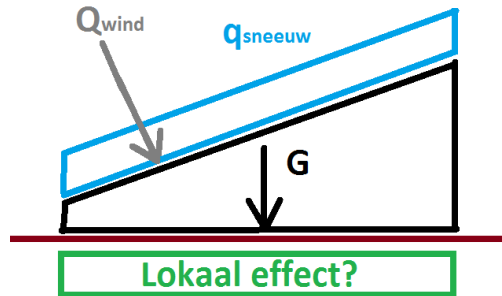
$$BC_4 = 1,00 G + 1,50 Q_{wind}$$

Wel dient men nog voor de wind op zoek te gaan naar de meest belastende drukken. Neerwaarts komt men bij de dakvlakken in Zone I terecht, opwaarts aan de randen. Afhankelijk van de windrichting en de oriëntatie van het beschouwde element kan men bij de opwaartse de meest kritische situatie snel inschatten.

11.3.8 Lokaal effect

1. Drukkracht op contactvlak tussen module en dakvlak

De contactdruk tussen dakoppervlak en de modules kan zo hoog oplopen dat men kans loopt op doorponsing van het dakdichtingsmateriaal en/of verbrijzeling van het isolatie materiaal. Om dit te verifiëren dient men de UGT STR belastingscombinaties op te stellen.



Figuur 99: Lokaal effect

Het eigengewicht verhoogd met de ballast uit Tabel 23 werd gecombineerd de hand van BC_1 en BC_2 met de downforce uit Tabel 21 en een sneeuwlast van $0,4\text{kN/m}^2$, goed voor 63kg per paneel. Dit leverde zeer hoge verticale krachten op die op het contactvlak tussen module en dakvlak terecht komen. De ontwerpbelasting bleek minimaal 429 kg en loopt op tot maar liefst 865kg per paneel!

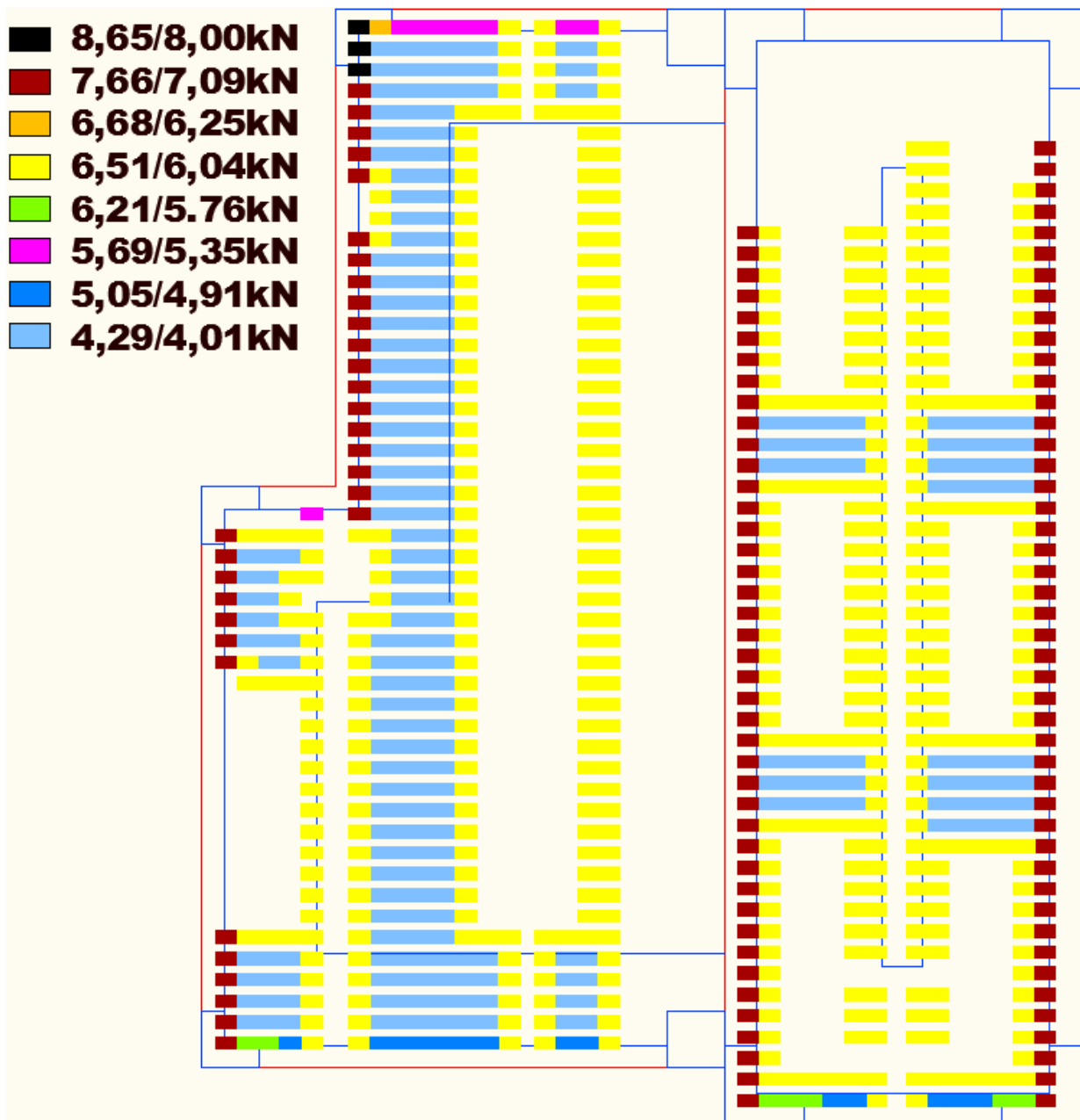
$$BC_1 = 1,35 (G_{module} + G_{ballast}) + 1,50 * \cos \alpha * Q_{wind,down} + 0,3 * 1,50 Q_{sneeuw}$$

$$BC_2 = 1,35 (G_{module} + G_{ballast}) + 1,50 Q_{sneeuw} + 0,3 * 1,50 * \cos \alpha * Q_{wind,down}$$

Tabel 25: Neerwaartse kracht per module voor lokale effecten in UGT STR[kN/module]

$c_{p,net}$		Belastingen[kN]		Neerwaartse kracht per module [kN]					
neg	pos	Ballast	Winddruk	BC1		BC2		Maximum	
				12,5	9	12,5	9	12,5	9
-1,5	1,2	3,90/3,59	1,19/1,75	8,65	8,00	7,38	6,89	8,65	8,00
	0,2		0,32/0,29	6,34	5,89	6,68	6,25	6,68	6,25
-1,2	1,2	3,16/2,91	1,19/1,75	7,66	7,09	6,38	5,98	7,66	7,09
	0,7		1,11/1,02	6,51	6,04	6,04	5,66	6,51	6,04
	0,2		0,32/0,29	5,35	4,98	5,69	5,35	5,69	5,35
-0,9	1	2,43/2,24	1,59/1,46	6,21	5,76	5,26	4,95	6,21	5,76
	0,5		0,80/0,73	5,05	4,71	4,91	4,63	5,05	4,71
-0,6	0,6	1,69/1,57	0,96/0,88	4,29	4,01	3,99	3,79	4,29	4,01

Op volgende figuur werden de neerwaartse krachten in UGT visueel weergegeven. Vooral de modules in de randzones aan de Oost en Westgevel trekken de hoogste contactdrukken aan.



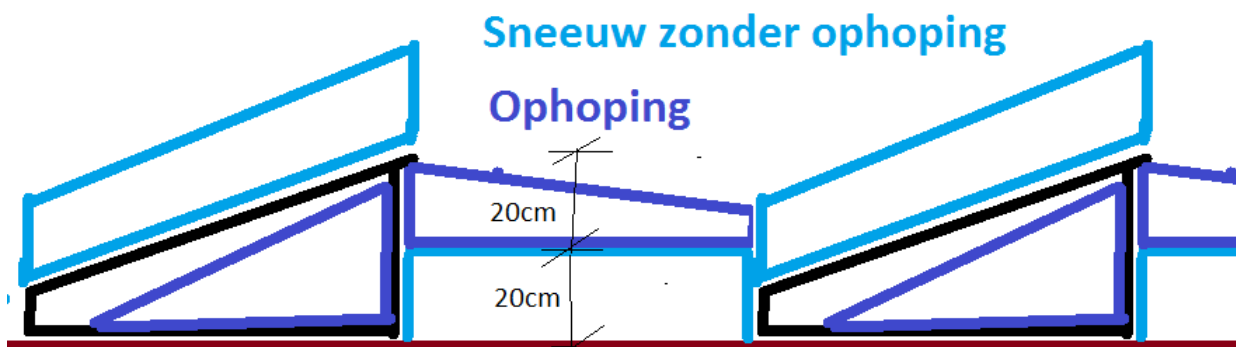
Figuur 100: Verticale contactkracht per module tussen module en dakvlak

2. Bemerkingen

Bij de interpretatie van deze resultaten zijn er 2 grote opmerkingen: ten eerste gaat men bij het opstellen van de belastingscombinaties er van uit dat twee variabele belastingen geen effect op elkaar hebben, de combinatiecoëfficiënt brengt enkel de kans dat ze gelijktijdig zullen optreden in rekening.

In onderstaande figuur werd de situatie geschetst zoals men de sneeuwlast zou kunnen verwachten voor zijn karakteristieke waarden. Het lijkt vrij duidelijk dat dit een grote invloed zal hebben op de windbelasting. De wind krijgt zo goed als geen vrij spel onder de panelen en er zal bijgevolg weinig tot geen onderdruk opbouwen onder de panelen. De modules zullen zich dus eerder gedragen als gesloten systemen. Maximale positieve drukcoëfficiënten op de panelen zijn in dit geval +0,2. Dit staat in schril contrast met de maximale netto drukcoëfficiënt van +1,2. Bij de BC waarbij sneeuwlast als overheersende belasting optreedt, rekt men dus beter overall met een winddruk bepaald met een

drukcoëfficiënt van +0,2. Gezien de panelen onder een dik sneeuwpakket liggen zal er geen inwendige druk zijn.

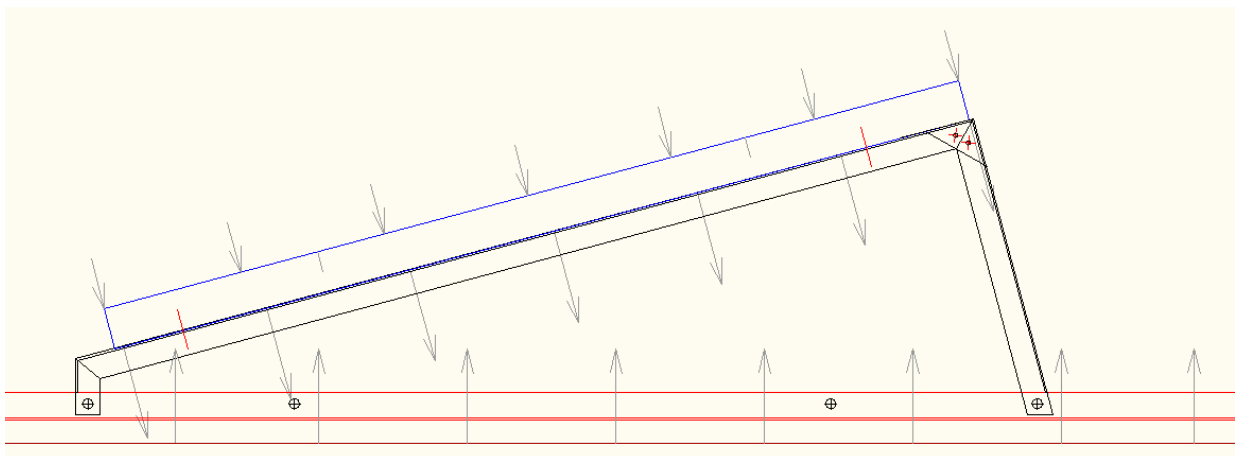


Figuur 101: Sneeuwbelasting rond de modules

Het lijkt dus beter om bij BC_2 enkel met een neerwaartse windbelasting door een $c_{pe,1}$ van 0,2 te rekenen. Bijgevolg zal BC_1 steeds bepalend zijn (met windbelasting als overheersende variabele belasting). Het effect van de sneeuw is hierin klein, zoniet te verwaarlozen ($0,3 \cdot 1,5 \cdot 63 \text{ kg} = 28 \text{ kg/paneel}$).

Dit verklaart ook waarom sowieso BC_1 zowat voor alle condities de grootste ontwerpbelasting leverde. De grootste toedrage blijft de rekenwaarde voor het eigengewicht onder de vorm van ballast ($1,35 \cdot 390 = 527 \text{ kg/paneel}$).

Ten tweede is dit niet de belasting die de dakstructuur zal moeten opnemen. Het is enkel de kracht die tussen het contactvlak van PV-module en dakvlak zal moeten overgedragen worden. De netto winddruk op het paneel bestaat immers onder een uitwendige en inwendige druk, deze laatste zal ook op het dakvlak aangrijpen maar de resultante ervan is in tegengestelde zin. In de veronderstelling dat de onderdruk op achterkant van het paneel en op het dakvlak onder dit paneel nagenoeg even groot zijn en dat het paneel onder een lage helling gemonteerd is, zullen de resultantes van deze druk zich nagenoeg opheffen zodanig enkel de uitwendige druk op het paneel dient beschouwd te worden.



Figuur 102: Drukverdeling rond paneel onderhevig aan downforce

3. Lokaal effect op de dakstructuur onder de panelen

Uit voorgaande bleek dat het lokaal effect op de dakstructuur niet gelijk is aan het lokaal effect op het contactvlak tussen dak- en hulpstructuur. Bij de grootste windbelasting met een neerwaartse

resultante zal er onder de panelen immers een onderdruk heersen die een gunstige invloed heeft op het dakvlak. Hoe groot dit effect zou zijn kunnen men inschatten door een analogie te maken met de gesloten systemen. De $c_{pe,1}$ op het paneel is daar +0,2 voor alle mogelijke configuraties. Dit geeft een karakteristieke waarde voor de winddruk van 32 of 29 kg per paneel afhankelijk van het dakvlak waarop de module zich bevindt. Voor de sneeuwlast lijkt het nu wel aangewezen om deze te verhogen door ophoping: vooral onder het paneel en misschien een beetje op de rand. In de filosofie van de sneeuwnorm lijkt 60 kg/m² redelijk goed voor 95 kg per module.

Logischerwijs is de belastingscombinatie met sneeuw als overheersende belasting hier bepalend. In UGT STR moet het dakstructuur lokaal onder de panelen tot maar liefst 454 kg/m² opnemen!

Tabel 26: lokale druk onder de panelen op de dakstructuur in UGT STR

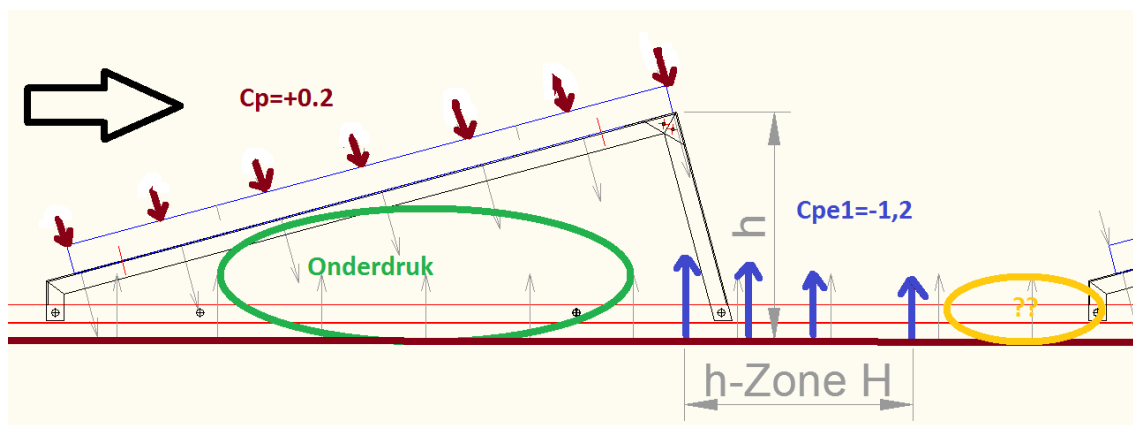
$c_{p,net}$		Belastingen[kN]		Kracht op dakvlak onder paneel[kN/m ²]					
neg	pos	Ballast	Winddruk	BC1		BC2		Maximum	
				12,5	9	12,5	9	12,5	9
-1,5	0,2	3,90/3,59	0,32/0,29	4,11	3,82	4,54	4,26	4,54	4,26
-1,2	0,2	3,16/2,91	0,32/0,29	3,48	3,25	3,91	3,69	3,91	3,69
-0,9	0,2	2,43/2,24	0,32/0,29	2,85	2,67	3,28	3,11	3,28	3,11
-0,6	0,2	1,69/1,57	0,32/0,29	2,23	2,10	2,65	2,54	2,65	2,54

Dit is tevens de rekenwaarde voor de last die een enkelvoudige module zou induceren in de uiterste grenstoestand(STR).

4. Lokaal effect op de dakstructuur per module

Wanneer verschillende modules aan elkaar gekoppeld worden, zal de last van de panelen over een groter oppervlak verdeeld kunnen worden.

De sneeuwbelasting kan uit Figuur 101 afgeleid worden en wordt terug als 60 kg/m² aangenomen. Maar wat met de windbelasting tussen de panelen? In de kritieke situatie met de grootste downforce op de panelen zal de wind van langs voor komen, zij het misschien onder een licht afwijkende invalshoek. Zowel onder als achter de panelen zal er een onderdruk opgebouwd worden. Naar analogie met Figuur 48 valt deze misschien te begroten met de winddrukcoëfficiënten voor zone H. Voor lokale effecten is deze -1,2, globaal -0,7. Men dient deze zone enkel over een afstand gelijk aan de hoogte te beschouwen. Deze zal niet meestal niet toereiken tot aan het volgende paneel, maar het lijkt veilig te veronderstellen dat de onderdruk zich langzaam zal afbouwen.



Figuur 103: Lokaal effect achter de panelen

Wat het totaal lokaal effect wordt voor een dakvlak afgebakend door de afmetingen van een module is dus niet éénduidig te bepalen voor alle mogelijke windconfiguraties. Voor de zone achter de panelen lijkt bij wind uit het zuiden de windkracht gunstig te zijn en zal deze deels de ongunstige winddruk op de panelen compenseren. Op basis van wat momenteel beschikbaar is in de literatuur kan de hoedanigheid enkel benaderd worden. In het geval dat de wind meer uit het zuidoosten of zuidwesten komt zouden de gunstige onderdrukken achter en tussen de panelen kunnen wegvallen.

Door een $c_{pe,1}$ van +0,2 over het volledige daksegment te hanteren, lijkt men in ieder geval veilig bezig. Dit is overigens dezelfde drukcoëfficiënt voor de maximale neerwaartse winddruk op een dakvlak.

Bijgevolg verandert er weinig met de resultaten uit Tabel 26. Sneeuwlast en windlast blijven gelijk. Enkel kan de ballast en het eigengewicht van de hulpstructuur nu over een groter oppervlak verdeeld worden. Dit is dan ook een bijkomend voordeel van het monteren op een meervoudige hulpstructuur. Uiteraard op voorwaarde dat de hulpstructuur danig ontworpen is dat deze de krachten redelijk kan uitspreiden.

Tabel 27: Oppervlakte last per module in UGT STR[kN/m²]

cp,net		Belastingen[kN]		Kracht op dakvlak onder module[kN/m ²]					
neg	pos	Ballast	Winddruk	BC1		BC2		Maximum	
				12,5	9	12,5	9	12,5	9
-1,5	0,2	3,90/3,59	0,32/0,29	2,30	2,14	2,54	2,39	2,54	2,39
-1,2	0,2	3,16/2,91	0,32/0,29	1,95	1,82	2,19	2,07	2,19	2,07
-0,9	0,2	2,43/2,24	0,32/0,29	1,60	1,50	1,84	1,75	1,84	1,75
-0,6	0,2	1,69/1,57	0,32/0,29	1,25	1,18	1,49	1,42	1,49	1,42

Ter hoogte van de modules zal het dakvlak een ontwerpbelasting tot 254 kg/m² moeten kunnen opnemen. Minimaal mag men op een 142 kg/m² rekenen.

11.3.9 Globaal effect

Door de panelen op het dak te plaatsen zal men de permanente belasting verhogen en tevens zal de sneeuwlast groter zijn gezien er sneller sneeuw op en onder de panelen zal kunnen ophopen.

Globaal blijft het stromingspatroon rondheen de constructie ongewijzigd. Men kan dus de windbelasting op de dakstructuur volledig volgens de Eurocode bepalen. Wat wel wijzigt is de oppervlaktetextuur van het dak: de aanwezigheid van de modules kan als een toevoeging van een zekere ruwheid verondersteld worden. Dit zal zijn impact hebben op de wrijvingskracht veroorzaakt door het aanstromen van de wind langs over het dakoppervlak. Dit zal nadelig zijn voor de horizontale stabiliteit van de constructie.

1. Verticale stabiliteit

Door toevoeging van extra massa zal de neerwaartse ontwerpbelasting meestal bepalend worden. Voor het ontwerp van de dakplaten, gordingen en liggers dient hun weerstand terug met de UGT STR belastingscombinaties geverifieerd worden.

Als sneeuwbelasting werd terug 60 kg/m² aangenomen, voor de windbelasting deze bepaald met een $c_{p,net}$ van +0,5 ($c_{pe}=+0,2$ & $c_{pi}=-0,3$). Geprofileerde platen kregen een opgelegde last van 70 kg/m², op niveau van de liggers slechts 20kg/m².

De dakopbouw werd forfaitair begroot op 50 kg/m². In de praktijk is de bepaling van het eigengewicht van de dakopbouw echter een iteratief proces waarbij eerst een schatting gemaakt dient te worden van het eigengewicht om zo de nodige sectie van het te dimensioneren element te bepalen. Eens deze

bepaald wordt de berekening opnieuw uitgevoerd maar dan met het gewicht dat voortvloeit uit de zopas bepaalde sectie.

In volgende figuur een samenvatting van welke lasten op de dakstructuur komen naargelang er modules aanwezig zijn of niet.

Ontwerpbelastingen zonder PV-installatie

Eigengewicht: 50kg/m²

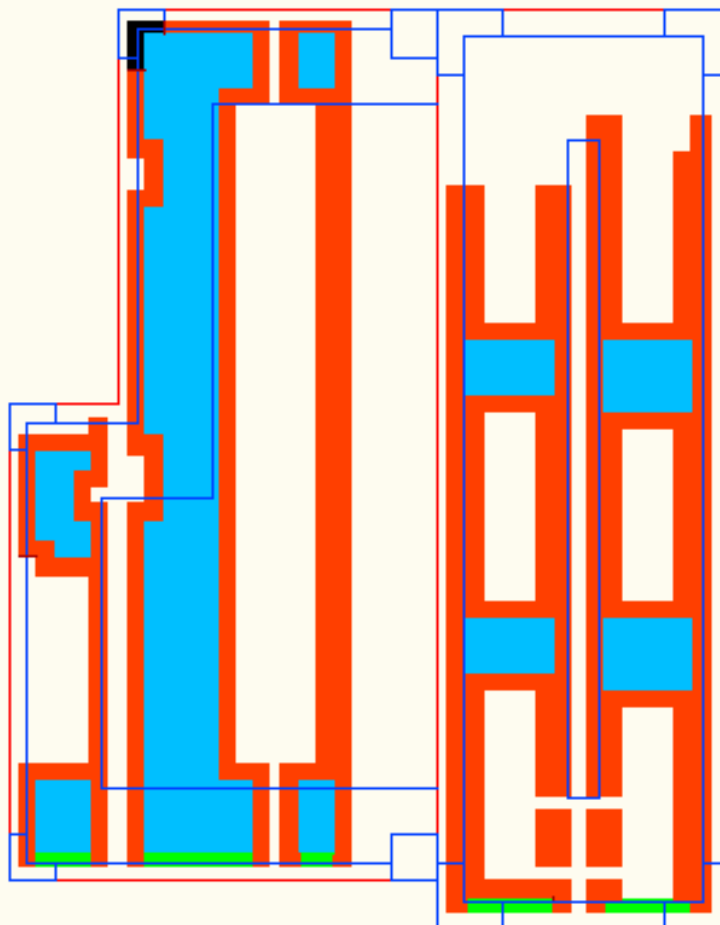
te combineren met een dezer als overheersende belasting

Sneeuwlast: 40kg/m²

Windlast: 48kg/m² of 44kg/m²

Opgelegde last plaat: 70kg/m²

Opgelegde last ligger: 20kg/m²



Supplementaire last door aanwezigheid PV

Extra sneeuwlast	EG(9m)	EG(12,5)
■ 20kg/m ²	136kg/m ²	147kg/m ²
■ 20kg/m ²	113kg/m ²	121kg/m ²
■ 20kg/m ²	89kg/m ²	95kg/m ²
■ 20kg/m ²	65kg/m ²	69kg/m ²

Figuur 104: Supplementaire lasten dakstructuur door aanwezigheid PV-systeem

Voor zowel de liggers als de platen bleek de belastingscombinatie met sneeuw als overheersende belasting(BC_2) bepalend. Daar waar zonder PV-installatie een element aan een neerwaartse last van 179 kg/m² moest weerstaan, moet ze nu een last tot 378 kg/m² kunnen opnemen! Minimaal is deze 273 kg/m².

Tabel 28: In te rekenen oppervlakte lasten bij verticale stabiliteit UGT STR

	BC met overheersende variabele belasting [kN/m ²]										Effect[kN/m ²]				
	Ballast		cpnet	Opgelegde last				Klimaat				Maximum			
	[kg/mod]	[-]	plaat	ligger		wind	sneeuw		max plaat	max ligger					
			12,5	9	12,5	9	12,5	9	12,5	9	12,5	9	12,5	9	
Met PV	3,90/3,59	-1,5	3,71	3,57	2,96	2,96	3,67	3,46	3,78	3,62	3,78	3,62	3,78	3,62	
	3,16/2,91	-1,2	3,36	3,24	2,61	2,61	3,31	3,13	3,43	3,29	3,43	3,29	3,43	3,29	
	2,43/2,24	-0,9	3,01	2,92	2,26	2,26	2,96	2,81	3,08	2,97	3,08	2,97	3,08	2,97	
	1,69/1,57	-0,6	2,66	2,60	1,91	1,91	2,61	2,49	2,73	2,65	2,73	2,65	2,73	2,65	
Zonder PV	0,00	-	1,73	1,73	0,98	0,98	1,68	1,61	1,79	1,78	1,79	1,78	1,79	1,78	

Gezien men er zo goed als altijd voor zal opteren om overal met een zelfde plaat of ligger te werken, zal deze ontworpen in de meest belastende combinatie die kan voorkomen. Wanneer men Figuur 104 er bij neemt dan lijkt het wel veilig te stellen dat men alles kan dimensioneren met een last van 343 kg/m². Dit stemt overeen met een volledige bezetting van modules die aan een $c_{p,net}$ van -1,2 onderhevig zijn op het hoogste dak. De toename in vergelijking met het geval zonder modules is 164 kg/m². Met andere woorden de weerstand van de te ontwerpen elementen uit de dakstructuur moet met 92% verhogen!

2. Horizontale stabiliteit

Bij voldoende lange constructies zullen de stroombanen van de wind na een zekere afstand terug het dakvlak aanstromen. Deze aanstroming veroorzaakt een wrijvingskracht. Deze kan volgens de windnorm begroot worden a.d.h.v. wrijvingsfactor. Men zou de aanwezigheid van zonnepanelen kunnen interpreteren als een verhoging van de ruwheid van het dak en bijgevolg van deze wrijvingsfactor van 0,01 tot 0,04.

$$F_{fr} = c_{fr} \cdot q_p(z) \cdot A_{fr}$$

Tabel 29: Wrijvingfactor c_{fr} [23]

Surface	Friction coefficient c_{fr}
Smooth (i.e. steel, smooth concrete)	0,01
Rough (i.e. rough concrete, tar-boards)	0,02
very rough (i.e. ripples, ribs, folds)	0,04

Het oppervlak dat hiervoor in aanmerking komt, is dat oppervlak dat op een afstand 4 maal de hoogte gelegen is t.o.v. de aangestroomde wand. Bij wind uit het noorden zal de wind het meest weerstand ondervinden door de geometrie van de modules.

Ter vereenvoudiging werd verondersteld dat het volledige dakvlak met modules bezet is om een maximale invloed te vinden en dat de helft van de winddrukken op de gevels onmiddellijk naar de fundering afgedragen wordt.

Zonder PV-installatie is de volledige constructie onderworpen aan een horizontale belasting van 367 kN(±36 ton). De aanwezigheid van de modules verhoogt dit tot 450 kN. Bekijkt men het effect op de hoogste loods alleen dan zal dit deelgebouw tot 30% extra horizontale krachten moeten opnemen.

Tabel 30: Effect op horizontale belasting

		Zonder PV		Met PV	
		12,5	9	12,5	9
	piekstuwdruk[kN/m ²]	0,975	0,893	0,975	0,893
Kopgevels	Oppervlak[m ²]	175	185	175	185
	kracht [kN]	171	165	171	165
Dakvlak	A _{fr} [m ²]	1064	1948	1064	1948
	kracht [kN]	10	17	41	70
Zijgevels	A _{fr} [m ²]	238	214	238	214
	kracht [kN]	2	2	2	2
Totaal	Kracht [kN]	183	184	214	236
		Toename[kN]:		<u>31</u>	<u>52</u>

11.3.10 Bemerkingen

Zowel voor de lokale als de globale effecten bleek het gewicht die de modules nodig hebben om niet te verschuiven de grootste toedrage te leveren. Volgens de voorgestelde berekeningsmethode loopt dit op tot een 150 kg/m² voor de hoog turbulente zones. Voor modules buiten deze zone bleef deze beperkt een 120 kg/m² voor modules die zich op de rand van een matrix bevinden en een 70 kg/m² voor deze die volledig omsloten zijn door andere modules.

Hoewel de berekeningen volledig in de filosofie van de Eurocodes werden uitgevoerd, zijn de resultaten in schril contrast met wat momenteel in de praktijk toepasselijk is. De meeste installateurs nemen genoeg met een gewicht van slechts 10 à 25 kg/m². In studie bureau's lijkt men bij ontwerp van een nieuw dak enkel een dood gewicht van 25 kg/m² in te rekenen. Bovendien lijkt de verhoging van de sneeuwlast door ophoping zo goed als nooit toegepast.

Een van de voornaamste oorzaken van de discrepantie lijkt volgens de auteur het feit dat enkel lokale drukcoëfficiënten konden gevonden worden in de literatuur. In de praktijk wordt de hulpstructuur danig ontworpen dat een lokale windpiek op één module kan verdeeld worden over meerdere modules die op dat moment aan een mogelijk lagere windbelasting onderhevig zijn. De voorgestelde berekeningsmethode veronderstelt dat alle modules gelijktijdig aan dezelfde piekbelasting zullen blootgesteld worden, welke uiteraard tot een overdimensionering kan leiden.

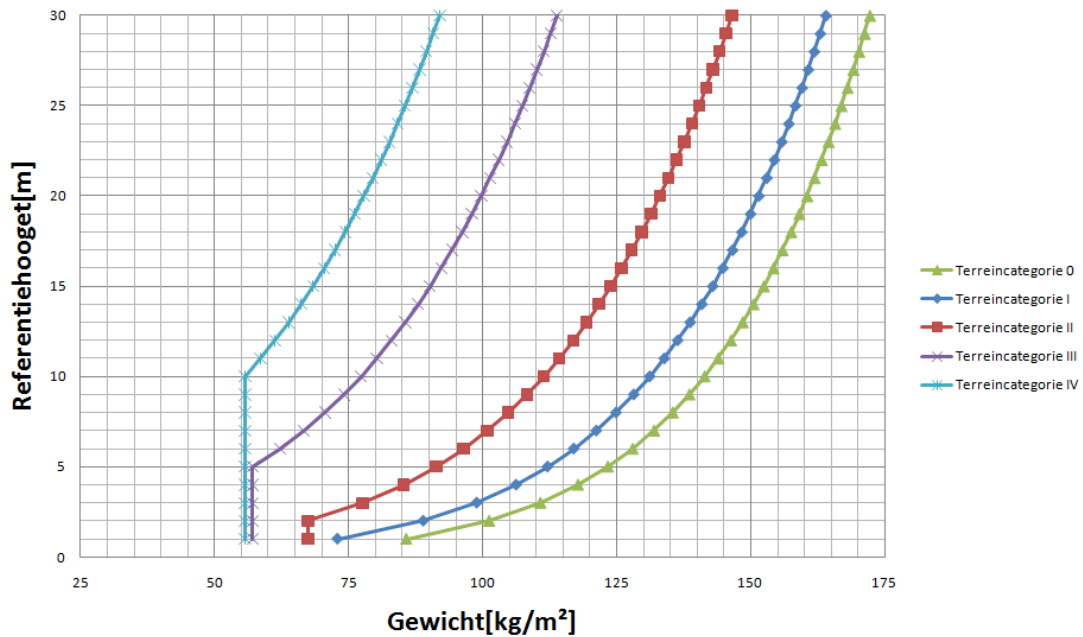
Zonder verder wetenschappelijk onderzoek is het moeilijk dit enigszins te kwantificeren omdat naast een uitwendige druk op de voorkant van de panelen ook de inwendige druk onder de panelen een grote invloed zal hebben. Hoewel men hiervoor wel een maximale en minimale waarde voor kan terugvinden in de literatuur kan deze niet onmiddellijk gekoppeld worden aan het volledige drukpatroon rond meerdere modules.

Zoals eerder gesteld zijn deze lage waardes vooral op ervaringen binnen de sector gefundeerd. Enkele producenten hebben hieromtrent wel degelijk onderzoek verricht maar de resultaten hiervan zijn uiteraard niet toegankelijk.

Vermoedelijk zal de juiste ballast eerder bij de waarde van de installateurs liggen daar op hun aangeven het aantal schadegevallen relatief beperkt is. Maar misschien moet de storm nog komen die toch zeker eens in de 50 jaar moet komen... Of was het nu 25.

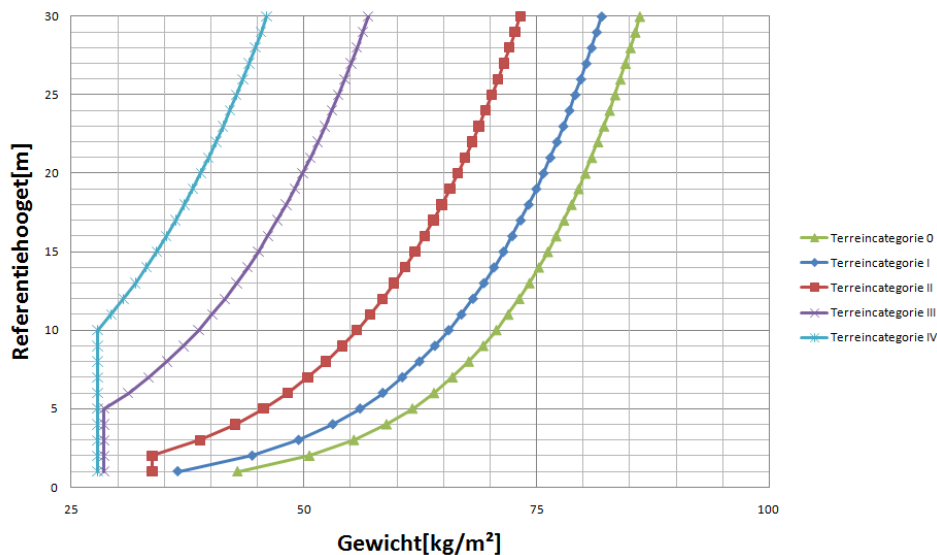
Wat wel moet opgemerkt worden is dat er zo goed als geen rekening wordt gehouden met verschillende windcondities: hoogte van het dakvlak of omgeving, de ballast zal niet aangepast worden. Als er een ding is wat wel naar voor komt uit deze studie, is dat het windklimaat en de hoogte waarop men de installatie plaatst, van grote invloed zijn. Staat de installatie op 10 m hoogte in een

redelijk bebouwd gebied (categorie III) dan zal 77 kg/m^2 eigengewicht nodig zijn voor de modules deels blootgesteld aan de wind, plaatst men een zelfde installatie op een zelfde hoogte aan de kust dan zal men 130 kg/m^2 aan eigengewicht nodig hebben.¹⁴



Figuur 105: Gewicht per module aan rand van matrix voor verschillende windklimaten¹⁴

Wanneer men terug volgens de ontwerpmethode de modules bekijkt die van een shelter effect genieten ($c_{p,net} = -0,6$), dan merkt men dat deze toch al dichter bij de ervaring van de installateurs nadert. In een terreincategorie III zou op 10 m slechts 40 kg/m^2 meer nodig zijn. Het voordeel van modules zoveel mogelijk bij elkaar te schikken tot een matrixstructuur lijkt onmiddellijk duidelijk. Tot op 5m en voor terreincategorie IV tot op 10 m blijft deze volgens het rekenmodel slechts 27 kg/m^2 .



Figuur 106: Gewicht per module middenin matrix voor verschillende windklimaten¹⁵

¹⁴ Volgens glijdingsevenwicht open systeem met $\mu=0,7$; $v_{b,0}=25\text{m/s}$; $c_{p,net}=-1,2$; hellingshoek=15°; paneel= $1,6\text{m}^2$; module= $2,6\text{m}^2$ in UGT EQU

¹⁵ Volgens glijdingsevenwicht open systeem met $\mu=0,7$; $v_{b,0}=25\text{m/s}$; $c_{p,net}=-0,6$; hellingshoek=15°; paneel= $1,6\text{m}^2$; module= $2,6\text{m}^2$ in UGT EQU

Overigens valt op te merken dat de Eurocodes aansturen tot een extra sneeuwlast door sneeuwophoping. In de praktijk wordt hier bij weten van de auteur geen rekening meegehouden.

Hopelijk brengt de TV zonnepanelen hieromtrent toch duidelijke richtlijnen.

11.4 Besluit

De impact op de constructie valt te ontleden in 3 facetten:

1. Lokaal kan men met zeer grote, geconcentreerde lasten te maken krijgen. Alle elementen uit de dakopbouw zullen hier moeten aan weerstaan: doorponsing van de dakdichting, indrukking of verbrijzeling van de isolatie en tot slot de kleinschalige elementen uit de dakstructuur zoals platen en gordingen.
2. De verticale belasting neemt drastisch toe: naast het eigengewicht van de hulpstructuur zal deze met zeer hoge ballast op zijn plaats moeten worden gehouden om de lokale winddrukken te weerstaan. Ook neemt de sneeuwlast toe wegens ophoping tussen en onder de panelen.
3. Ook de horizontale belasting verhoogt substantieel door de verhoogde ruwheid van het dakoppervlak.

Men kan danig op het ontwerp van de hulpstructuur inspelen dat enkel het glijdingsevenwicht bepalend blijkt. In dit geval kan men de ballastbepaling vereenvoudigen door de modules naar gelang hun locatie op het dakvlak in twee types op te delen: Enerzijds modules binnenin een matrix geplaatst in de zones H I. zolang deze volledig omgeven zijn door andere panelen, zal een $c_{p,net}$ van -0,6 van toepassing zijn. Voor alle andere panelen is maximaal een $c_{p,net}$ van -1,2 van toepassing zolang men geen modules plaatst in de hoekzones aan de noordgevel.

Het vereiste doodgewicht per m^2 dakvlak voor beide types onder een hellingshoek van 15° werd opgenomen in bijlage B, dit voor een referentiehoogte tot 30 m en alle terreinklassen zowel voor $v_{b,0} = 25$ m/s en 26m/s. De wrijvingscoëfficiënt werd als 0,7 verondersteld. De tussenafstand werd voor een beschaduwingshelling van 20° en $15,5^\circ$ gesimuleerd. Om de ballast per paneel af te leiden dient men te vermenigvuldigen met de totale oppervlakte die één module beslaat, niet het paneel dus.

Men kan de waarde voor het 'midden' type ook hanteren voor de globale stabiliteit van het dak: het eigengewicht van de verzwaarde modules aan de rand kan uitgemiddeld worden over lege dakvlak er net naast. Voor de stabiliteit van de dakplaten hanteert men best het doodgewicht van het 'rand' type.

12 Algemeen besluit

De voornaamste impact op een constructie bij het plaatsen van een PV-installatie blijkt voort te vloeien uit het opnemen en overbrengen van de windbelasting. In tweede instantie zullen de geplaatste zonnepanelen zullen er ook voor zorgen dat de sneeuw zich kan opstapelen tussen en onder de panelen, wat ertoe leidt dat de sneeuw minder snel gaat dooien en dus langer blijft liggen.

Berekeningen in overeenstemming met de Eurocodes wezen op een extra sneeuwlast van 20kg/m^2 bovenop de 40 kg/m^2 die meestal van toepassing is in laag België. De berekeningen voor de windbelasting op de panelen volgens de Eurocodes verliep heel wat moeizamer. In afwachting van de publicatie van de 'TV zonnepanelen' waar momenteel binnen het WTCB aan gewerkt wordt, werd een berekeningsmethode ontwikkeld op basis van de Eurocodes en wat er momenteel in de literatuur te vinden is.

Hoewel de regels van de Eurocodes werden gevolgd en de parameters voor de windbelasting op een adequate manier leken bepaald in het onderzoek waarop de berekeningsmethode zich baseert, bleken de resultaten in schril contrast te staan met de praktijk: voor een geballasteerd systeem op 12 m hoogte bleek in een beste geval een gewicht van 69 kg/m^2 nodig daar waar installateurs slechts 10 à 15kg/m^2 voorzien. Lokaal liep dit gewicht zelfs op tot 147 kg/m^2 .

Hoewel de berekeningsmethode dus zeker een veilig ontwerp toelaat, zal het zeker geen economische oplossing bieden. Wel kan deze methode gehanteerd worden om het effect van bepaalde ontwerpparameters en randcondities te testen. De voornaamste factoren waar installateurs momenteel weinig tot geen rekening mee houden, zijn i. het windklimaat zoals dat bepaald wordt a.d.h.v. de terreincategorie en ii. de hoogte van het dakvlak waar de installatie wordt geplaatst.

In de berekeningsmethode werden de voornaamste belastingscombinaties opgesteld die toelaten de constructie-elementen te dimensioneren die zwaarder belast zullen worden door de aanwezigheid van de PV-installatie van een geballasteerde PV-installatie.

Op lokaal niveau zal men de drukvastheid van de isolatie moeten controleren en de doorponing van het dakdichtingsmateriaal verhinderen. De platen en de gordingen zullen deze geconcentreerde krachten moeten kunnen opnemen en op globaal niveau zullen alle elementen onderworpen worden aan een hogere belasting, enerzijds door de drastisch verhoogde permanente belasting en anderzijds door de extra sneeuwlast.

De kans bestaat bovendien dat de constructie extra horizontale krachten zal moeten opnemen, iets wat vooral van toepassing is bij constructies op grote daken.

Deel III: Haalbaarheidsstudie

1 Inleiding

Nadat een ontwerpmethode werd opgesteld die toelaat de impact van een PV-installatie op de constructie te begroten, kan een haalbaarheidsstudie aangevat worden die de meerkost van deze impact zal opnemen.

PV-installaties zijn typisch vrij grote investeringen die pas renderen als ze over een voldoende lange periode beschouwd worden. Zo garanderen producenten van zonnepanelen steeds een minimaal rendement na 25 jaar.

Dergelijke, lange investeringslooptijden vragen een groot commitment van de investeerder. Daarom dient een verfijnd beeld gemaakt worden van welke kosten en opbrengsten men mag verwachten. Om de kandidaat-eigenaar een duwtje in de rug te geven verzekert de Vlaamse overheid een vaste minimumvergoeding voor de geproduceerde stroom gedurende 20 jaar, de zogeheten groenestroomcertificaten (GSC).

In tegenstelling tot deze vaste vergoeding en de extra premies waarvoor men in aanmerking komt bij het investeren in groene energie, zijn andere opbrengsten wel aan enige schommelingen onderhevig.

We denken hierbij bijvoorbeeld aan de besparing op de energiefactuur. Hoe hoog zullen de elektriciteitsprijzen over 10 of 20 jaar zijn? Installaties op industriële daken zijn meestal van dergelijke omvang dat een groot deel van de geproduceerde elektriciteit niet onmiddellijk kan verbruikt worden en daarom op de energiemarkt aangeboden wordt. Hoe zal deze energiemarkt evolueren de komende jaren?

Vele installateurs stellen de zaken maar al te graag rooskleurig voor en vergeten bepaalde kosten in hun offerte op te nemen. Daarom proberen we in deel III om alle mogelijke extra kosten in kaart te brengen en waar mogelijk te kwantificeren.

Vooraf kosten gerelateerd aan de impact van een installatie op een dakstructuur zijn zeer sterk projectgebonden. Deze zullen daarom begroot worden voor een casus van een stalen loods waarop men zonnepanelen wenst te plaatsen.

2 Kosten

2.1 prijs installatie

2.1.1 Algemeen

Men kan de kost van een PV-installatie in heel wat grootheden uitdrukken: per paneel, per vierkante meter, per geproduceerd kiloWattuur of volgens het nominaal output vermogen van de panelen uitgedrukt in Wattpiek¹⁶.

Om de haalbaarheid van energie uit zonnecellen te evalueren, dient men te kunnen vergelijken met de marktprijzen van elektriciteit. Deze worden steeds uitgedrukt in kWh. Afhankelijk van de afnemer en manier waarop de elektriciteit wordt opgewekt, worden hiervoor verschillende tarieven voor gehanteerd.

In de praktijk is het de gewoonte om de grootte van een PV-installatie uit te drukken in kWp. De geografische ligging en klimatologische omstandigheden in België zorgen er voor dat 1 kWp op jaarbasis een gemiddelde productie van 850kWh zal behalen bij een optimale opstelling, dit systeemverliezen in begrepen. Plaatst men een zelfde installatie in het zuidelijk deel van de Middellandse Zee dan zal deze dubbel zoveel elektriciteit produceren gezien de hogere jaarlijkse irradiantie. Om de kostprijs van installaties onderling te vergelijken moet men ze dus kunnen loskoppelen van hun productie die afhankelijk is van de instraling.

Bovendien is een kWp prijs ook losgekoppeld van het intrinsieke rendement van de cellen. Hoewel bijvoorbeeld amorf silicium een lager rendement haalt dan polykristallijn silicium, liggen de prijzen per kWp toch dicht bij elkaar. Men zal enkel een groter oppervlak ter beschikking moeten hebben om een zelfde productie te halen. Wanneer men weinig oppervlak ter beschikking heeft, is het meestal aangewezen om over te schakelen naar monokristallijn wat iets duurder per Wp is maar een hoger rendement biedt.

Tabel 31: oppervlak nodig voor 1 kWp bij commerciële modules [51]

Technology	Thin Film					Crystalline Silicon		CPV
	(a-Si)	(CdTe)	Cl(G)S	a-Si/ μ c-Si	Dye s. cells	Mono	Multi	III-V Multi-junction
Cell efficiency						16-22%	14-18%	30-38%
Module efficiency	4-8%	10-11%	7-12%	7-9%	2-4%	13-19%	11-15%	~25%
Area needed per KW (for modules)	~15m ²	~10m ²	~10m ²	~12m ²		~7m ²	~8m ²	

2.1.2 Prijs van de installatie

De prijs per geïnstalleerd Wattpiek is sterk afhankelijk van het volume van de installatie en ook van de montagewijze. Bij rondvraag aan installateurs werden de volgende richtwaarden meegegeven: voor grote installaties schommelen huidige marktprijzen rond de 2,2 à 3€/Wp. Op basis van 22 bestekken voor een installatie op een privé woning opgevraagd in het najaar van 2010 bleek volgens Test Aankoop de Wp-prijs tussen 3 à 3,7 € te schommelen. Dit voor een installatie variërend tussen de 3 en 8 kWp [52].

¹⁶ nominaal output vermogen van een zonnecel of zonnepaneel, getest onder standaard omstandigheden

2.1.3 Kostenstructuur

Tabel 32: kostenstructuur PV-installatie [53]

Component Cost (\$/W)	2010 (Est.)
PV Module	\$ 1.70
Semiconductor	\$ 0.54
Raw Materials (Si feedstock, saw slurry, saw wire)	\$ 0.36
Utilities, Maintenance, Labor	\$ 0.04
Equipment, Tooling, Building, Cost of Capital	\$ 0.06
Manufacturer's Margin	\$ 0.08
Cell	\$ 0.45
Raw Materials (eg. metallization, SiNx, dopants, chemicals)	\$ 0.18
Utilities, Maintenance, Labor	\$ 0.04
Equipment, Tooling, Building, Cost of Capital	\$ 0.04
Manufacturer's Margin	\$ 0.20
Module	\$ 0.70
Raw Materials (eg. Glass, EVA, metal frame, j-box)	\$ 0.26
Utilities, Maintenance, Labor	\$ 0.01
Equipment, Tooling, Building, Cost of Capital	\$ 0.01
Shipping	\$ 0.08
Manufacturer's Margin	\$ 0.34
Retail Margin	\$ -
Inverter	\$ 0.22
Magnetics	\$ 0.03
Manufacture	\$ 0.05
Board and Electronics (Capacitors)	\$ 0.07
Enclosure	\$ 0.04
Power Electronics	\$ 0.03
BOS/Installation	\$ 1.48
Mounting and Racking Hardware	\$ 0.25
Wiring	\$ 0.14
Other	\$ 0.17
Permits	\$ 0.01
System Design, Management, Marketing	\$ 0.15
Installer Overhead and Other	\$ 0.19
Installation Labor	\$ 0.38
Total	\$ 3.40

In de Wattlek prijs zitten alle facetten van de PV-installatie vevat. Naast de materiaalkost voor de voornaamste onderdelen (zie deel I), zijn o.a. ook de ontwerpkosten en marges vevat. In een streefdoel om tegen 2017 in de Verenigde Staten een wattlekprijs van 1€ te halen werd de kost opgebroken in alle factoren [53].

Volgens schatting van het DOE¹⁷ gaat slechts de helft van de kost voor een PV-installatie naar de PV-panelen, hiervan gaat ongeveer 60% naar de productie van de cellen en de rest gaat naar het assembleren tot één paneel. Onder module in tabel 32 wordt hier wel enkel het paneel verstaan, dit in tegenstelling tot de gehanteerde definitie in deze masterproef.

Slechts 6,5% van de totale kost gaat naar de omvormers. Enkel de productie-eenheid op zich beslaat dus maar 56,5% van de totale kost.

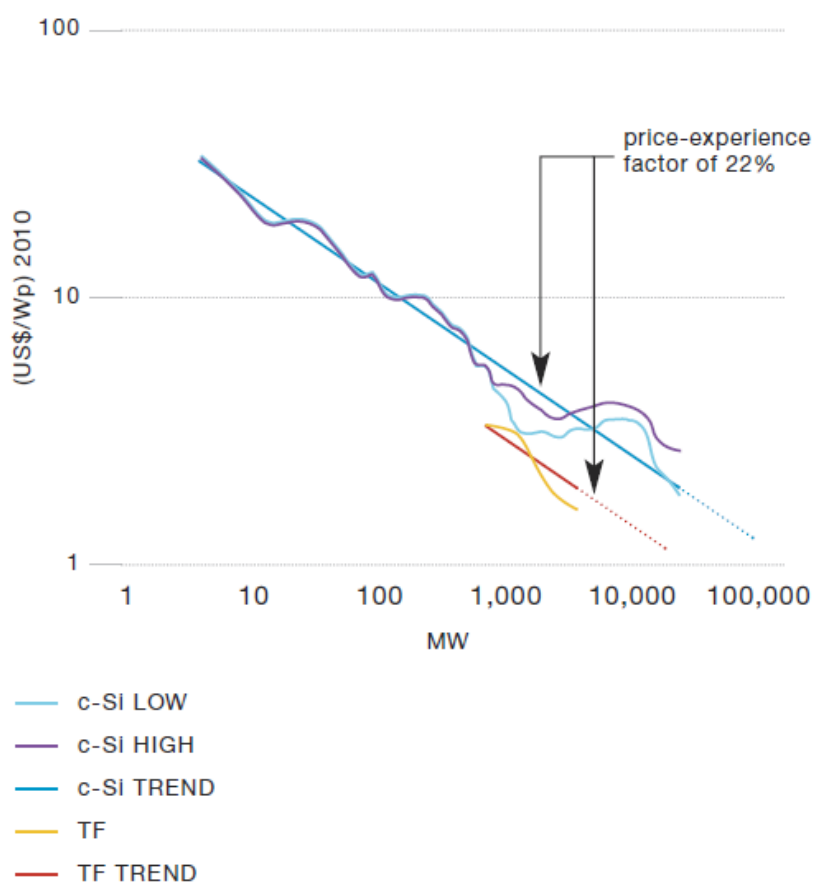
Een groot deel gaat dus nog naar het implementeren van de installatie: zo gaat 7% naar de hulpstructuur, 11% naar uitvoering, enz.

¹⁷ Department of Energy: overheidsinstantie ter bevordering van energie technologie en innovatie in US

2.1.4 Prijevolutie

Zoals met alle technologische ontwikkelingen het geval is, zijn de producten bij introductie op de markt vrij duur. Eens de volumes toenemen, kan de prijs beginnen te zakken: budgetten komen vrij voor ontwikkeling van betere/goedkopere productieprocessen, meer spelers komen op de markt met scherpere prijszetting tot gevolg, enz.

Om enige prognoses te maken voor de prijs, worden dikwijls de zogenaamde learning curves gehanteerd [54]: telkens het gecumuleerde productievolume verdubbelt, zakt de prijs procentueel met een zekere learning rate. Volgens EPIA¹⁸ bleek deze zich in 2010 rond de 22% te bevinden [51].



Figuur 107: Price experience curve PV-modules [51]

Merk op dat deze benadering van de prijsevolutie onafhankelijk is van de tijd. Men dient dus enkel extra volumes te stimuleren om sneller in prijs te doen dalen.

2.2 Meerkost aanpassen dakstructuur

1. Algemeen

De plaatsing van de zonnepanelen met ballast op daken zal lokaal tot hoge contactspanningen leiden en globaal zal een substantiële overlast moeten ingerekend worden.

¹⁸ European Photovoltaic Industry Association

Hiertoe dient men een onderscheid te maken tussen een installatie op een constructie die zich nog enkel op de ontwerptafel manifesteert en een installatie op een bestaande constructie.

2. Bestaande constructies

Voor een installatie op een bestaande constructie kan men enkel verifiëren of er bij het ontwerp voldoende marge werd voorzien om de extra lasten die bepaald werden in deel II op te nemen.

Bij constructies in beton met idem dakplaten blijkt er sneller enige marge beschikbaar om het extra dood gewicht op te nemen.

Anders is het bij staalconstructies waar de structurele elementen vrij scherp kunnen gedimensioneerd worden.

Dit geldt overigens ook voor recentere constructies: huidige rekenmodellen laten immers toe om een zeer economisch ontwerp te realiseren daar waar vroeger met een grotere veiligheidsmarge moest ontworpen worden.

Indien blijkt dat maar een kleine marge beschikbaar is, zal men allerlei spitsvondigheden moeten bewerkstelligen om toch binnen de marge te vallen: opteren voor een ander montagesysteem is het eenvoudigst. Thin-film technologie verwerkt in de dakdichting kan men op zo goed als ieder plat dak plaatsen.

In ieder geval lijkt het aangewezen om de dak huid voor installatie te vernieuwen: dit vermijdt problemen indien later zou blijken dat de bestaande dakafdichting aan vernieuwing toe is. Bovendien zal de bestaande dakafdichting er meestal niet op voorzien zijn om de hoge contactspanning onder de modules op lange termijn te weerstaan zodat de nood aan dakvernieuwing bespoedigd wordt.

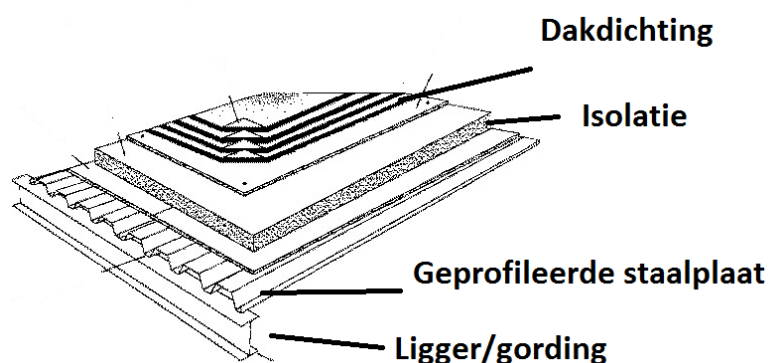
De kostprijs per vierkante meter varieert naargelang het type, het totaal volume en de dikte. Voor een PVC dakafdichting van 1,5 mm geplaatst op grote industriële daken werd 14,25€/m² opgegeven.

3. Constructies in ontwerp

Bij nieuw te bouwen constructies kan men het ontwerp nog aanpassen zodat men rekening kan houden met de extra lasten van de PV-installatie.

Om het extra gewicht en de horizontale windkrachten op te vangen zal de constructie sterker ontworpen moeten worden, wat zich vertaalt in een grotere behoefte aan constructiestaal bij stalen constructies. Voor grote, eenvoudige loodsen kan men de kost van de staalstructuur begroten door voor zijn gewicht aan staal een eenheidsprijs van 1,7€/kg te rekenen. Bij kleinere volumes of meer detail werd 2,8€/kg aangewezen.

Ook de dakopbouw zal aangepast moeten worden om de lokale effecten van de PV-modules te weerstaan: men zal stevigere elementen voor de dakopbouw moeten gebruiken. Een typische dakopbouw voor industriële platte daken is aangegeven op Figuur 109.



Figuur 108: Klassieke dakopbouw plat dak [55]

Zo zal men de geprofileerde staalplaten qua dikte verhogen (wat niet gelijk is aan de hoogte van het profiel). Daar waar courant een plaat van 1 mm dikte en 106 mm hoogte wordt gekozen, zal men bij een PV-installatie een plaat van 1,25 mm gebruiken om de geconcentreerde belastingen beter op te nemen. Het eigengewicht van de plaat verhoogt hierdoor substantieel (van 12,2 kg/m² tot 17,7 kg/m²) zodat de plaatsing niet meer manueel kan gebeuren voor courante lengtes en er een kraan aan te pas moet komen. Dit verklaart de prijsstijging van 10 €/m² naar 16,5 €/m².

Net zoals bij plaatsing op bestaande daken zal geopteerd worden om een dikkere dakdichting te voorzien. Daar waar voorheen een PVC afdichting van 1,2 mm voldeed aan een prijs van 13,00 €/m², wordt nu best een afdichting van 1,5 mm gebruikt goed voor 14,25 €/m².

Zonder de impact op de volledige draagstructuur te evalueren, wordt de dakopbouw op de ontwerptafel al 7,75 €/m² duurder. Ter vergelijking levert een snelle schatting voor de kostprijs van een geballasteerd PV-systeem een eenheidsprijs van rond 200 €/m².

2.3 Andere

2.3.1 Kosten bij installatie

1. Netontkoppelkast

Bij installaties groter dan 10 kWp dient steeds een netontkoppelkast geplaatst te worden. Hiervoor mag men snel 7.000 € inrekenen. Om deze vaste kost te dragen dient de installatie voldoende groot te zijn. In de praktijk gaat men uit van een minimaal volume van 30 tot 40 kWp.

2. Aansluiting & netstudie

Bij een installatie groter dan 10 kWp dient steeds een netstudie aangevraagd te worden bij de netbeheerder. Hierin wordt dan onderzocht of het net lokaal de injectie van de installatie zal kunnen opnemen. In sommige gevallen kan een aanvraag dus afgekeurd worden indien blijkt dat dit niet het geval is. De kost voor deze studie wordt steeds op 500 € begroot.

Het kan ook gebeuren dat men de bestaande aansluiting dient te verzwaren of een volledig nieuwe aansluiting dient aan te leggen. Kosten hiervoor kunnen snel tot 3.000 € oplopen. De standaard tarieven kunnen geconsulteerd worden op de website van Eandis (http://www.eandis.be/eandis/klant/k_tarieven_elektriciteit_P.htm).

Overigens is het goed mogelijk dat de bestaande elektrische installatie waarlangs de geproduceerde stroom zal afgetapt worden, verouderd is en men op geen keuringsattest zal kunnen rekenen zolang deze niet vernieuwd wordt. In ieder geval een extra kost maar in principe staat deze los van de investering.

3. Veiligheid tijdens uitvoering

Bij werken op daken vanaf een zekere omvang dienen veiligheidsvoorzieningen getroffen worden: Men zal de dakrand moeten beveiligen met een tijdelijke borstwering en tevens zal men valnetten onder het dakvlak moeten plaatsen wanneer er door de aard van de werken een risico bestaat dat iemand naar beneden valt. Voor valnetten mag men op 1 €/m² rekenen, borstwering 8 €/lm. Voor een loods van 50 m op 20 m is dit een extra kost van 2.120 €. Deze wordt zo goed als nooit opgenomen in de offerte.

Vele oudere industrielloosden zijn nog toegedekt met asbestplaten. Gezien men deze niet mag doorboren en/of enkel mag laten verwijderen door gespecialiseerde vaklui, zal een installatie op dergelijk dak een grote extra kost met zich meebrengen.

2.3.2 Kosten tijdens operationele fase

1. Verzekering

PV-installaties zijn vrij duur en de toekomstige eigenaar zal zich dus willen indekken voor enige bijkomstige risico's en schadegevallen. Bij benadering wordt hiervoor een jaarlijks tarief van 0,35% gehanteerd. Afhankelijk van de activiteit in de constructie waarop de PV geïnstalleerd wordt, kan dit hoger of lager blijken.

2. Onderhoud

Gedurende de levensduur van de installatie zullen er af en toe herstellingen en onderhoud uitgevoerd moeten worden. De jaarlijkse kost hiervoor wordt forfaitair begroot op 15 à 30 € per Wp, afhankelijk van het volume van de installatie.

3. Reinigen

Recentelijk specialiseren sommige schoonmaakfirma's zich in het reinigen van PV-panelen. Enig stof dat zich op het glasvlak bevindt verhindert immers de optimale werking van de panelen. De verliezen hierdoor worden op 2% op jaarbasis geschat (zie Figuur 10). De meeste fabrikanten echter garanderen wel een zelfreinigende werking van de panelen zolang ze onder een hellingshoek geplaatst worden die groter is dan 10°. De noodzaak hiervoor lijkt dus twijfelachtig.

4. Omvormer

De meeste omvormers worden vandaag geleverd met een garantie van 10 jaar. Gezien de beperkte levensduur van de zonnepanelen worden alle omvormers best omstreeks het 15^{de} jaar vervangen. De kostprijs voor de omvormers bedraagt 11 tot 30 cent per Wp.

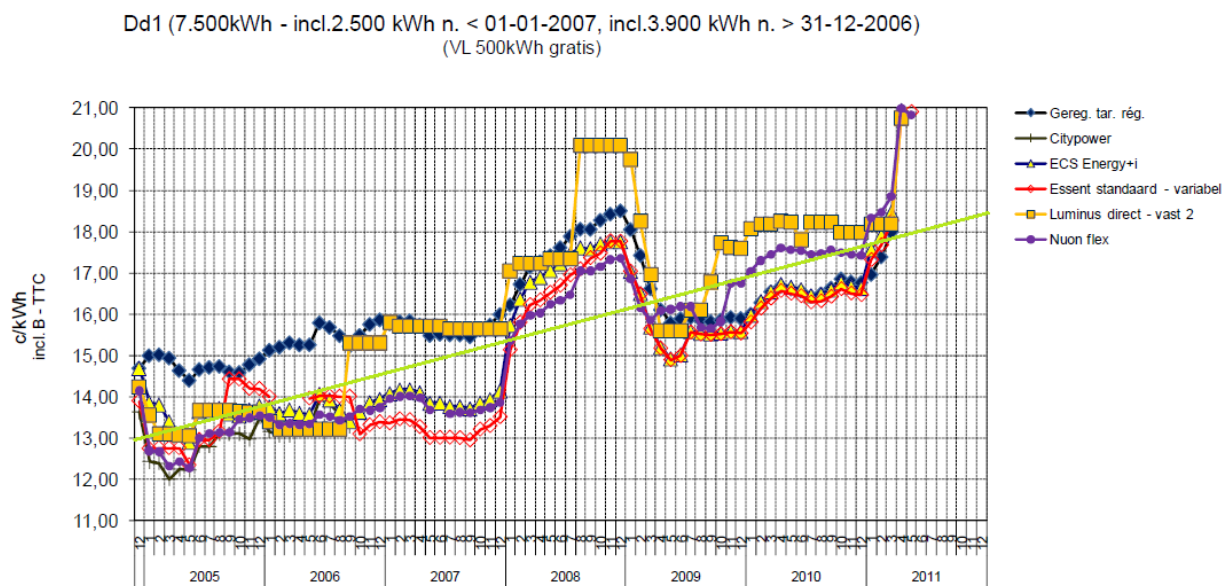
3 Opbrengsten

3.1 Elektriciteit

1. A.d.h.v. cijfermateriaal CREG en VREG

Vroeger hanteerde de Commissie voor Regulering van de Elektriciteit en het Gas (CREG) een formule die de prijs voor elektriciteit bepaalde. Gezien de vrijmaking van de energiemarkt heeft de CREG beslist om dit sinds 21 april 2011 over te laten aan de producenten [56]. De oude berekeningsmethodes en definities kunnen teruggevonden worden in [57].

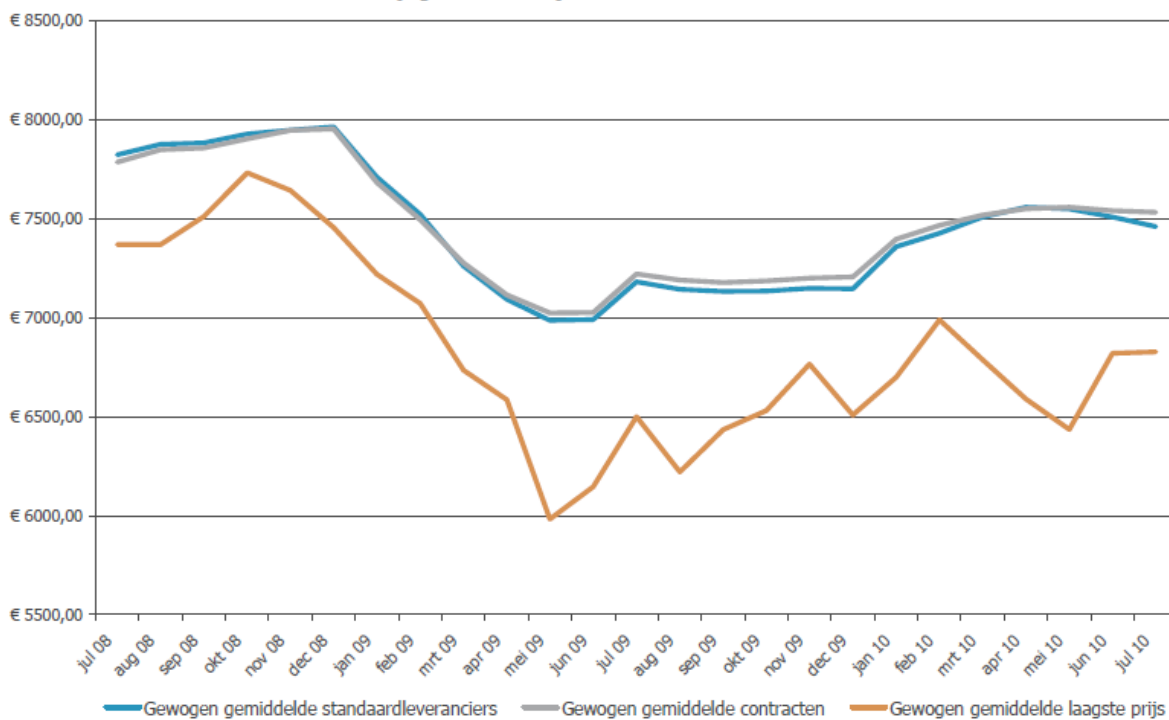
Prijzen voor kleine gebruikers schommelen momenteel rond de 18 à 20 cent per kWh. Wanneer men de evolutie bekijkt van de laatste 6 jaar op de residentiële markt merkt men een gemiddelde prijsstijging van 5,33% [58]. De correlatie tussen de prijs van de ruwe olie en energieprijzen is duidelijk merkbaar (zie Figuur 113).



Figuur 109: Evolutie Energieprijs residentiële markt [58]

Voor industriële gebruikers is heel wat minder cijfermateriaal beschikbaar, daar prijszettingen in deze sector nog sterker klantgebonden zijn. Uit cijfermateriaal van de VREG kon voor een professionele afnemer met een jaarlijks verbruik van 50 MWh een kWp-prijs van 15 cent geconstateerd worden [2].

Figuur 43. Evolutie van de elektriciteitsfactuur voor kleine professionele afnemers met een verbruik van 50 MWh (typecategorie Ib, 29.000 kWh dagverbruik en 21.000 kWh nachtverbruik op jaarbasis)



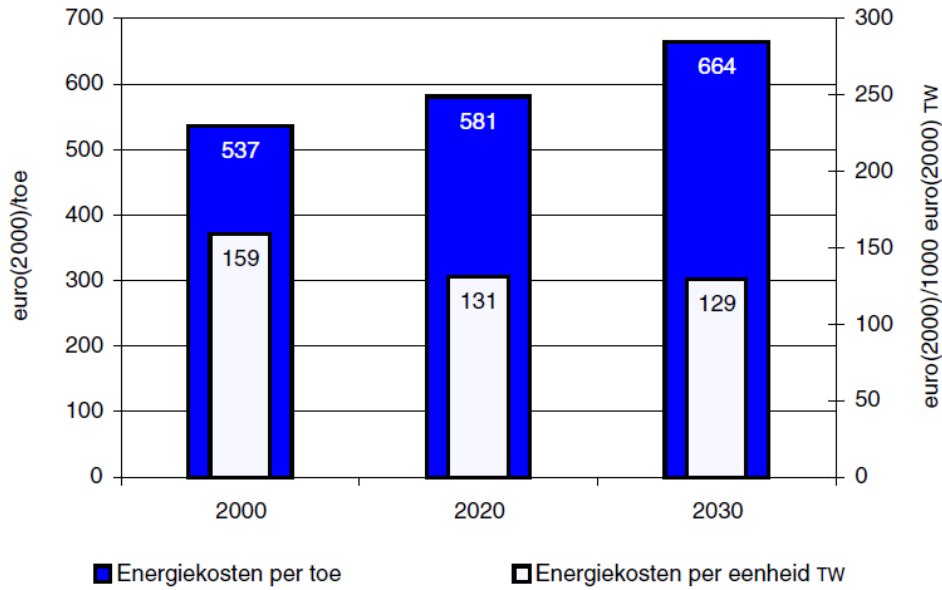
Figuur 110: Evolutie elektriciteitsfactuur voor kleine prof afnemers met verbruik van 50Mwh [2]

2. Prijsolutie volgens Federaal Planbureau

Om prognoses voor energieprijzen op lange termijn te maken hanteert het Federaal Planbureau het PRIMES energy system model. Dit model simuleert een marktevenwicht voor vraag en aanbod van energie in de Europese lidstaten. Voor het aanbod kan men verschillende scenario's uitwerken zodat men met de resultaten hiervan een beleid kan uitstippelen. Voor ieder type energievoorziening maakt het een marktprognose die teruggekoppeld is aan het volledige aanbod [59].

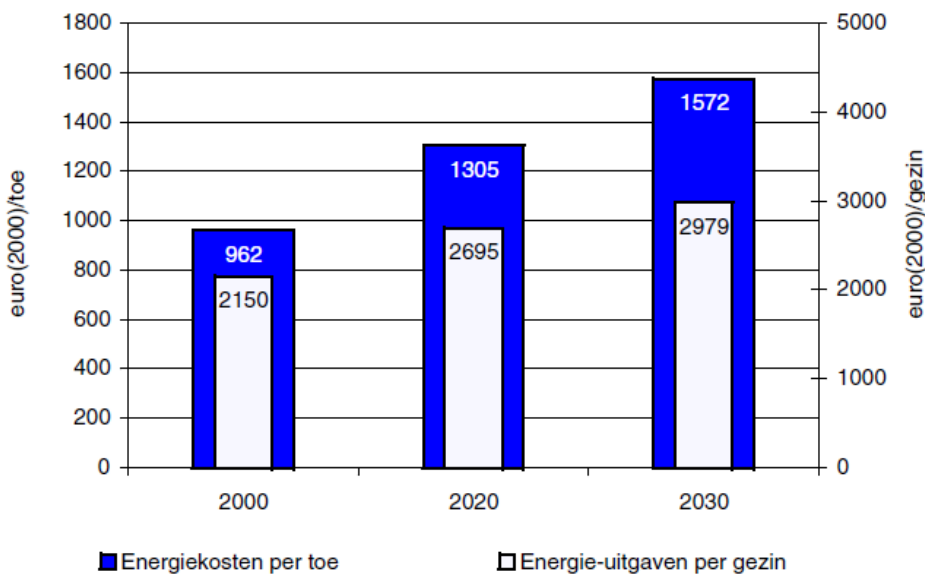
Driejaarlijks herevalueert het Federaal Planbureau de Belgische energiemarkt aan de hand van dit model. De laatste publicatie dateert van 2007 en maakt een prognose tot 2030 met de klimaatsverandering als belangrijke achtergrond [60].

Voor industriële verbruikers voorziet men een stijging van 24% tegen 2030 (met 2000 als referentie jaar).



Figuur 111: Evolutie van de energiekosten voor de industrie. [60]

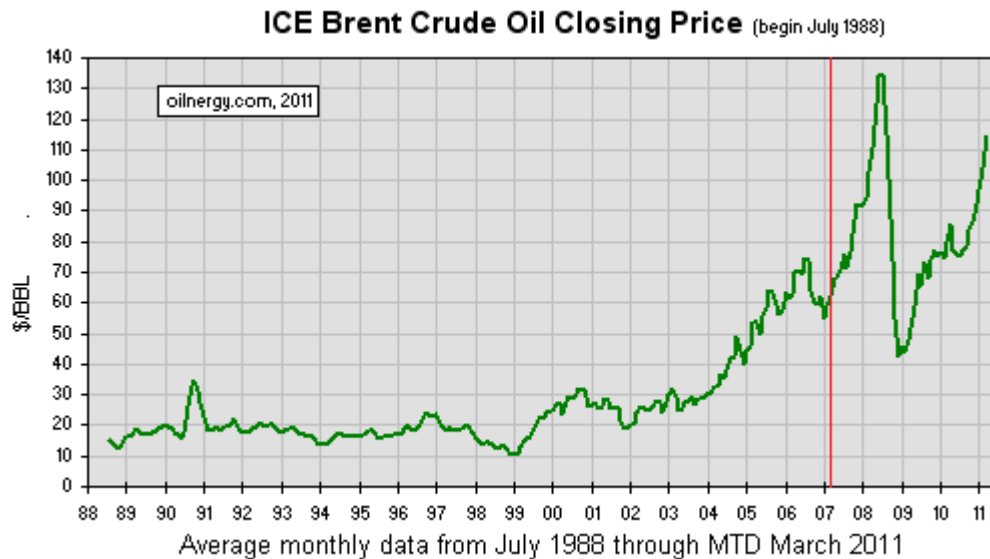
Voor residentiële verbruikers voorziet men een stijging van 63% voor dezelfde periode.



Figuur 112: Evolutie van de energiekosten voor particulieren [60]

Merk op dat hier nog geen inflatie werd ingerekend. In de veronderstelling dat het ECB deze op 2% zal kunnen houden (zie verder), bekomt men een jaarlijkse stijging van 2,7 % en 3,6 % voor beide sectoren.

Mocht een nieuwe energievoorziening worden opgesteld, dan lijkt het zeer waarschijnlijk dat de prognoses voor de energieprijzen hoger zullen worden geschat. Een jaar na de publicatie van het recentste document schoot de prijs van ruwe olie omhoog van een vorig maximum van 70 \$ per vat naar 140 \$.



Figuur 113: Prijs van Ruwe Olie [61]

3.1.1 Eigen verbruik <-> injectie

Men dient een belangrijk onderscheid te maken betreffende de bestemming van de geproduceerde energie: wordt de energie zelf verbruikt of wordt deze geïnjecteerd in het net?

Bij installaties kleiner dan 10 kWp moet steeds met een terugdraaiende teller gewerkt worden. Bij piekproductie op zonnige dagen, zal een groot deel terug in het net geïnjecteerd worden. Maar uiteindelijk wordt enkel het netto resultaat op het einde van het jaar beschouwd. Blijkt men meer geproduceerd te hebben dan verbruikt, dan zal men hiervoor geen vergoeding krijgen. Wel heeft men recht op de groenestroomcertificaten voor de volledige productie.

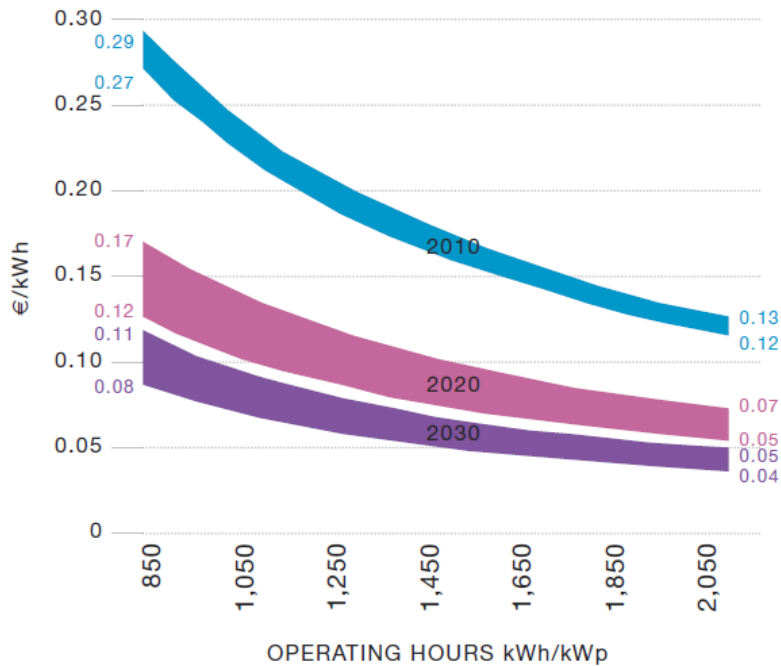
Voor installaties groter dan 10kWp dient steeds een netontkoppelkast geplaatst te worden. Bij zonlicht zorgt dit systeem ervoor dat in eerste instantie het eigenverbruik gevoed wordt en de overschot wordt dan in het net geïnjecteerd indien het net dat toelaat. Bij lage of geen productie (bewolkt of 's nachts) wordt energie uit het net onttrokken. Hiervoor betaalt men de gewone marktprijs als verbruiker. De elektriciteit die men injecteert, kan aangeboden worden op de markt en wordt vervolgens aangekocht door grote spelers om deze aan te beiden als 'groene energie'. Marktprijzen hiervoor schommelen tussen de 4,5 tot 5,5 cent per kWh.

3.2 Financiële ondersteuning

3.2.1 Doelstelling subsidiëring

Aangezien de elektriciteitsproductie uit zonne-energie momenteel nog te duur is om de concurrentie aan te gaan met klassieke vormen van energiewinning, worden premies uitgereikt zodat groene energie toch financieel aantrekkelijk wordt. Door dit marktsegment te stimuleren zullen de prijzen verder dalen tot de premies overbodig worden. Uit de learning curves bleek dat een prijsdaling enkel afhankelijk is van het geaccumuleerd volume en niet van de tijd. Op deze manier kan men sneller de overstap naar een groene energievoorziening maken.

Daar waar de kost per opgewekte kWh (Levelised cost of electricity) voor PV-technologie momenteel in België rond de 27 à 29 cent schommelt, moet deze verlaagd zien te worden naar 8 à 10 cent per kWh.

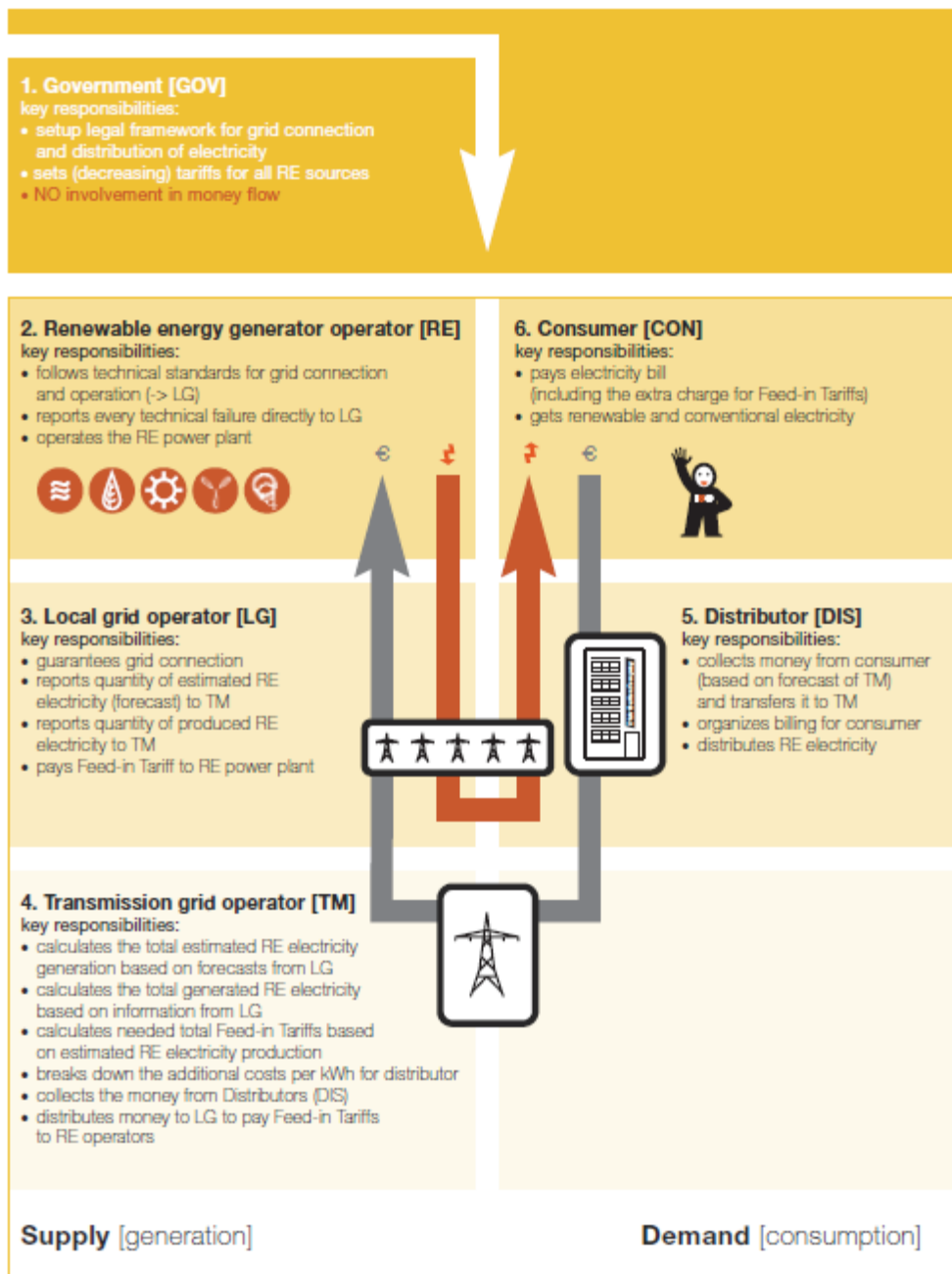


Figuur 114: Levelised cost of electricity voor zone-energie [51]

De kost om deze prijsdaling in te zetten moet verhaald worden op de eindverbruiker. Niet alleen moeten de externe kosten van kernenergie en energiewinning uit fossiele brandstoffen geïnternaliseerd worden, tevens moet de verbruiker mee betalen om een overgang naar groene energie mogelijk te maken. De overheid is enkel verantwoordelijk om het kader voor een dergelijk systeem bij wet te bepalen.

Het systeem van groenestroomcertificaten vormt een uitzondering in Europa. De meeste landen hebben hun programma afgestemd op het Duitse Feed-In-Tarief. Hierbij wordt een vast tarief gegarandeerd voor groene energie die in het net wordt geïnjecteerd. Analoog met de groenestroomcertificaten wordt het tarief jaarlijks bijgestuurd om de markt verder naar kostefficiëntie te doen streven, maar zonder aan het gegarandeerd inkomen van de bestaande installaties te raken. Dit zou voor financiële onzekerheid zorgen waardoor men minder snel zou instappen.

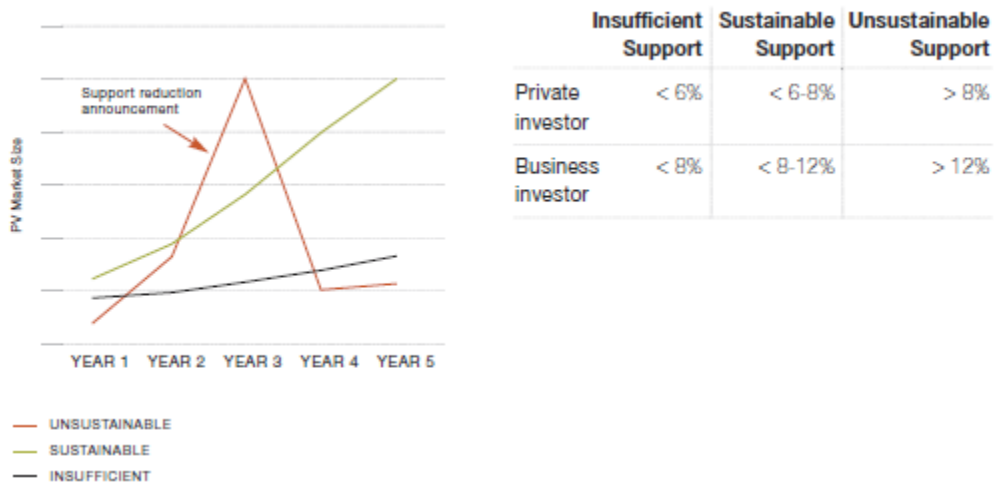
Hoe dergelijk subsidiesysteem werkt, wordt aangegeven op Figuur 116.



Figuur 115: Principe FiT [51]

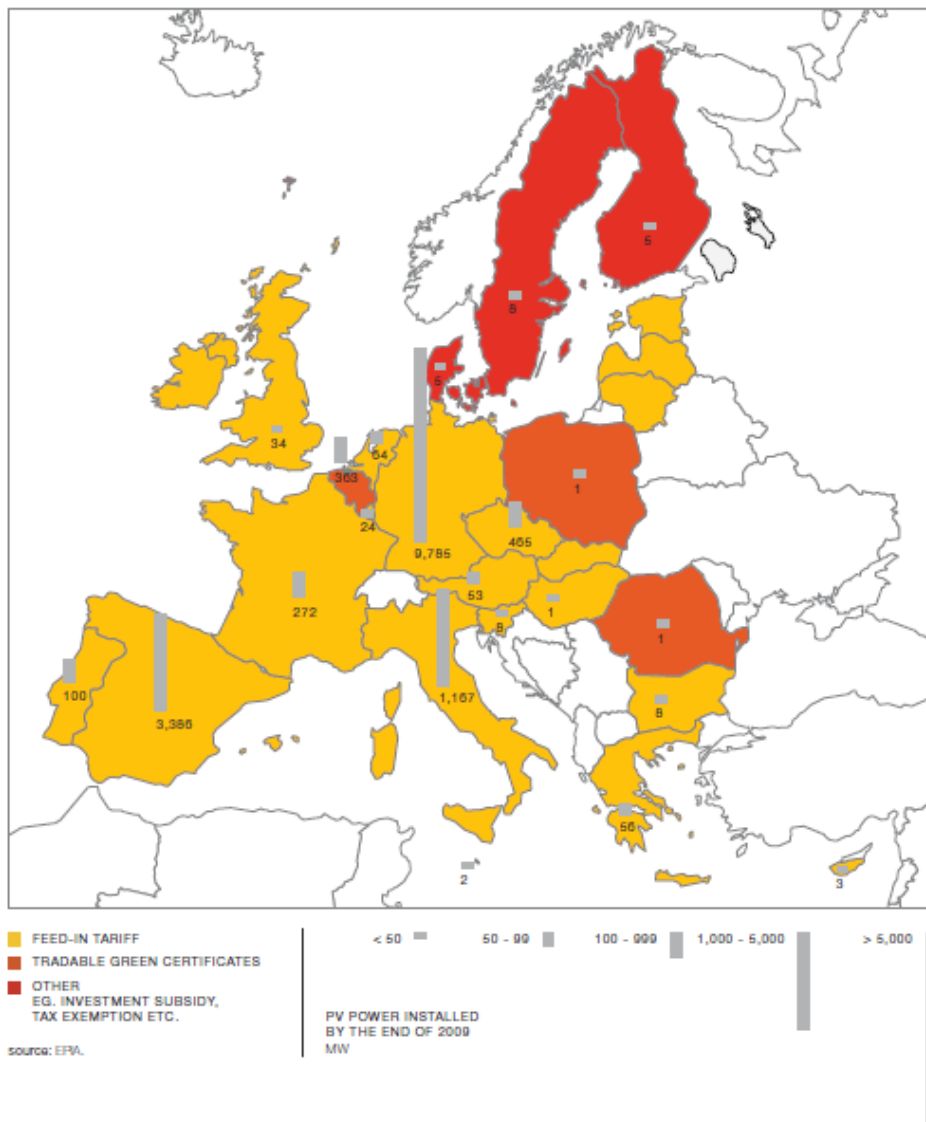
Het tarief voor nieuwe installaties dient wel tijdig bijgestuurd te worden. Indien er sprake is van oversubsidiëring zal de markt oververhitten en zal dit budgettair niet meer houdbaar zijn zodat er op korte termijn te veel zal moeten worden geknipt waardoor de markt ineenzakt. Bij een te laag tarief zal het systeem te weinig volume stimuleren zodat de markt niet aantrekt en er geen ruimte voor vernieuwing gecreëerd wordt. Als optimum voor een goede marktwerking dienen de subsidies zo afgesteld worden dat investeringen in PV een IRR¹⁹ van 6 tot 12% opleveren, afhankelijk van de investeerder [51].

¹⁹ Internal Rate of Return zie Hoofdstuk 4.3



Figuur 116: Target FiT [51]

Het succes van het Duitse systeem is duidelijk te merken op Figuur 117.



Figuur 117: Ondersteuningsprogramma's in Europa [51]

3.2.2 Groenestroomcertificaten

De Vlaamse overheid levert productiesteun voor elektriciteit uit PV-installaties onder de vorm van een groenestroomcertificaat (GSC). Voor elke 1.000 kWh elektriciteit die opgewekt wordt, wordt een dergelijk certificaat afgeleverd. Hiervoor dient de netbeheerder vervolgens een minimum bedrag uit te keren. Dit bedrag wordt vastgesteld bij de eerste keuring van de installatie en wordt vervolgens gegarandeerd voor een periode van 15 of 20 jaar.

Voor de periode van 1 juli tot 1 oktober 2011 ligt dit bedrag vast op 300 € voor installaties kleiner dan 250 kWp. Installaties groter dan 250 kWp zullen voor een productie van 1.000 kWh slechts recht hebben op een certificaat ter waarde van 240 €. Hierna wordt het bedrag verlaagd tot 270 € en 150 € respectievelijk. Voor installaties kleiner dan 250 kWp die operationeel worden begin 2010 is de minimumvergoeding slechts 250 €. Dit bedrag ligt nog lager voor grote installaties die, vanaf 2012, slechts recht meer hebben op 90 € per GSC.

Tabel 33: Minimum vergoeding groenestroomcertificaten [62]

		Nieuw Decreet			Huidig Decreet	
		<250 kWp	>250 kWp	Looptijd	Alle	Looptijd
2006-2009		450	450	20 jaar	450	20 jaar
2010		350	350		350	
2011	01->06	330	330			
	07->09	300	240			
	10->12	270	150			
2012	01->03	250	90		310	
	04->06	230				
	07->12	210				
2013		190		15 jaar	290	15 jaar
2014		150			250	
2015		110			210	
2016		90			170	
2017					130	
2018					90	
2019					50	
2020			10			

Dit degressief stelsel werd initieel ingevoerd om zo de learning curves van de PV-industrie te volgen. Wegens budgettaire beperkingen en de enorme explosie van de sector werden de premies echter sneller afgebouwd. Vooral grote installaties bleken te grote winsten te genereren en zodoende werden de subsidies hiervoor nog sneller afgebouwd. Bovendien werd ook de definitie van 'grote installatie' aangepast. In het eerste ontwerp van het decreet betrof dit een installatie groter dan 1000MWp. Hoewel het definitieve decreet bij plenaire zitting op 27-03-2011 werd goedgekeurd, is het oude tarief nog steeds in voege. Pas na publicatie in het Staatsblad zullen de nieuwe tarieven van kracht zijn.

Bij installaties op woningen is het in aanmerking komen voor het ontvangen van het GSC gekoppeld aan een degelijke dakisolatie (R-waarde van minstens 3 m²K/W [63]). Het geeft immers geen zin om tot dure energiebesparende maatregelen over te gaan indien alle energie verloren gaat via het dak. Dit is overigens een opmerking die algemeen geldig is: in eerste instantie dient een constructie voldoende energieconserverend ontworpen te worden door gebruik van voldoende isolatie,

hoogrendementsketels, zinnig omspringen met koellasten, enz. Als aan deze voorwaarden voldaan wordt, kan het zinnig worden om een PV-installatie of een warmtepomp te overwegen.

Als de installatie voor particuliere doeleinden aangewend wordt, zijn de GSC vrijgesteld van belastingen [64], wat dus niet geldt voor bedrijven en andere commerciële doeleinden.

3.2.3 Verhoogde investeringsaftrek

Bedrijven die zonnepanelen installeren komen in aanmerking voor de verhoogde belastingsaftrek voor energiebesparende maatregelen. Artikel 69 van het Wetboek der Inkomstenbelasting (W.I.B.) biedt bedrijven de mogelijkheid hun belastbare winst te verminderen met een verhoogde investeringsaftrek voor energiebesparende investeringen. De aftrek wordt verricht op de winst van het belastbaar tijdperk tijdens hetwelk de vaste activa zijn verkregen of tot stand zijn gebracht [65]. Voor de energiebesparende investeringen gedaan tijdens het belastbaar tijdperk dat aan aanslagjaar 2012 (inkomsten 2011) verbonden is, is er een verhoogde aftrek van 13,5% [66]. Deze bedroeg 15,5% voor AJ2010.

Indien het belastbaar tijdperk geen of onvoldoende winst of baten oplevert om de investeringsaftrek te kunnen verrichten, mag de niet verleende vrijstelling worden overgedragen op de volgende belastbare tijdperken. De investeringsaftrek mag ook gespreid worden over verschillende aanslagjaren [67].

3.2.4 Belastingsmindering

Voor installaties bij particulieren geeft de federale overheid een belastingvermindering voor de plaatsing van zonnepanelen ter waarde van 40 % van de installatiekost, beperkt tot een bepaald maximum bedrag dat jaarlijks geïndexeerd wordt. Voor 2011 bedraagt dit 3.860 € [68]. Wanneer de woning ouder is dan 5 jaar mag het resterende bedrag overgedragen worden naar de volgende jaren (maximaal 3 jaar later). Zo kan men in aanmerking komen voor een belastingsmindering tot 14.720 €, wat overeenstemt met een investering van 36.800 €. Dit dekt zeker de kosten voor een residentiële installatie.

Om hier voor in aanmerking te komen dienen volgende voorwaarden voldaan te zijn [69]:

- de fotovoltaïsche panelen moeten geplaatst worden door een geregistreerde aannemer
- de geregistreerde aannemer bevestigt dat:
 - de kenmerken van de modules beantwoorden aan de volgende vereisten:
 1. voor kristallijne modules wordt norm IEC 61215 vereist, alsook een minimum rendement van 12 %
 2. voor de dunne-filmmodules wordt de norm IEC 61646 vereist, alsook een minimum rendement van 7%
 - het minimum rendement voor de omvormers hoger ligt dan 88% voor de autonome systemen en 91% voor de netgekoppelde systemen
 - de oriëntatie van de panelen tussen het oosten en het westen via het zuiden ligt en dat de hellingshoek van de vaste panelen tussen 0 en 70° ten opzichte van de horizon ligt.

3.2.5 Groene lening

Een groene lening kan worden afgesloten door particulieren die investeren in milieuvriendelijke technologieën (zoals zonnepanelen) en die hiervoor een lening aangaan om deze investering te financieren. De federale overheid geeft bij deze groene lening een korting op de interestvoet van 1,5 % (= interestbonificatie) [68].

Het ontleende bedrag moet minstens 1.250 € bedragen, maar is begrensd tot 15.000€. Deze bedragen gelden per kalenderjaar, per woning en per kredietnemer. Een samenwonend koppel komt dus in aanmerking voor een krediet tot 30.000 € [70].

3.2.6 Premies van provincies en gemeenten

Sommige lokale besturen stimuleren de installatie van PV nog extra door bijkomende premies toe te kennen. Via www.energiesparen.be kan geverifieerd worden of ze van toepassing zijn.

3.2.7 VLIF-investeringssteun voor land- en tuinbouwers

Land- en tuinbouwers kunnen in aanmerking komen voor extra subsidies van het Vlaams LandbouwInvesteringsFonds. Meer info op <http://lv.vlaanderen.be/nlapps/docs/default.asp?id=1838>.

3.3 Levensduur van de installatie

Over de levensduur van de panelen kan veel gediscussieerd worden. Zowat alle PV-producenten geven een vermogensgarantie van 80% na 25 jaar. Hoewel een lange levensduur en werking gegarandeerd is, valt op te merken dat zonnecellen uit poly- en monokristallijn silicium na verloop van tijd aan rendement verliezen. In de praktijk wordt meestal een verlies van 0,5 à 0,65% gehanteerd per jaar.

De levensduur van omvormers wordt op 10 à 15 jaar ingeschat en het merendeel van de omvormers die nu op de markt komen hebben een garantie van 10 jaar.

4 Toelichting tools uit de investeringsanalyse

4.1 Algemeen

In de praktijk wordt de haalbaarheid van een PV-installatie meestal uitgedrukt in zijn terugverdientijd. Zoals zal blijken is dit de meest bevattelijke en eenvoudige manier om het rendement van een investering uit te drukken.

De grote tekortkoming van deze beoordelingsmethode is dat ze geen rekening houdt met de tijdswaarde van geld: 1.000 € nu is immers meer waard dan 1.000 € over een jaar. Men kan in tussentijd het geld beleggen zodat men na een jaar over 1050 € beschikt.

Zolang men slechts enkele jaren in de toekomst hoeft te kijken, zal deze tijdswaarde van klein belang zijn. PV-installaties hebben echter een levensduur van 20 tot 30 jaar en vergen een grote initiële investering. Wat betekent de belofte van een gegarandeerde opbrengst van 10.000 € over 20 jaar nog indien men bedenkt dat 3.769€ op een termijnrekening van vandaag met een rente van 5% , na 20 jaar ook 10.000 is geworden?

Daarom is het zeker nodig om de tijdswaarde van geld te kunnen incalculeren. In eerste instantie zal een overzicht gegeven worden van de beschikbare tools uit de investeringsanalyse om tot slot een genuanceerde keuze te maken van de parameters die dan verder in deze haalbaarheidsstudie zullen gehanteerd worden.

4.2 Payback Period

De terugverdientijd geeft aan hoe lang het duurt vooraleer de initiële investeringsuitgave terugverdiend wordt.

$$PP = \frac{\text{beginuitgave}}{\text{jaarlijkse kasstroom}}$$

Wanneer de kasstroom van jaar tot jaar varieert, dient deze in de tijd uitgezet te worden.

$$PP = \text{Jaar voor PP} + \frac{\text{resterend bedrag investering}}{\text{kasstroom in dit jaar}}$$

4.3 Netto Present Value

De NPV van een investeringsproject is precies de beginwaarde van de huidige en toekomstige kasstromen, bij een gegeven interestvoet. Of nog anders gezegd: de netto constante waarde geeft het verschil aan tussen de beginwaarde van de positieve kasstromen en de beginwaarde van de negatieve kasstromen bij een gegeven interestvoet [71].

$$NPV = -A_0 + \frac{A_1}{(1+i)^1} + \frac{A_2}{(1+i)^2} + \dots + \frac{A_n}{(1+i)^n}$$

Met A_0 = investeringsbedrag en A_1, \dots, A_n = toekomstige positieve kasstromen.

Indien de NPV positief blijkt, brengt de investering het vooropgestelde minimum rendement op.

Het spreekt voor zich dat de keuze van dit minimum rendement een grote invloed zal hebben. In eerste instantie dient dit minimum even groot te zijn als de interestvoet die men op de markt biedt voor een risicovrije belegging voor particulieren. Voor bedrijven is dit afhankelijk van de vooropgestelde winstmarges binnen het bedrijf. Eens deze basisrente bepaald is, zal men voorkeur

geven om een extra risicopremie in te calculeren die onzekerheden in de vooropgestelde cashflow kan opvangen.

4.4 Internal Rate of Return

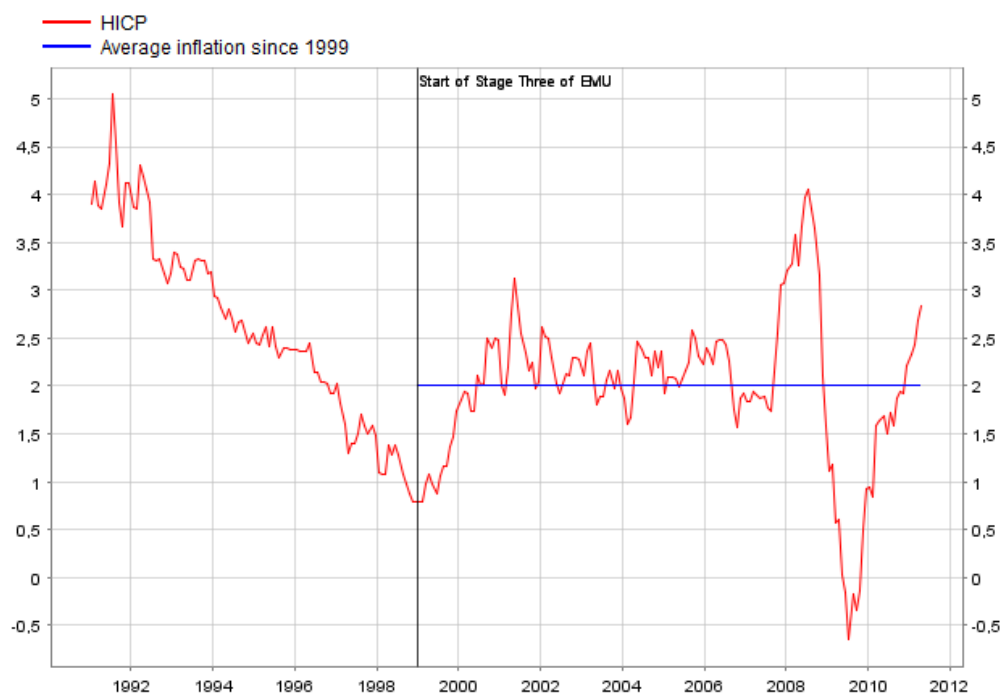
De IRR is de rentevoet waarover sprake in de vorige paragraaf waarbij de NPV nul wordt.

$$0 = -A_0 + \frac{A_1}{(1 + IRR)^1} + \frac{A_2}{(1 + IRR)^2} + \dots + \frac{A_n}{(1 + IRR)^n}$$

Enige voorzichtigheid met de interpretatie van de IRR is toch aangewezen. Enkel in het geval dat de opbrengsten uit de investering terug aan een zelfde rentevoet herbelegd kunnen worden, zal deze een zelfde resultaat opleveren als een belegging met een gegarandeerde interest. Vooral bij hoge IRR kan dit een misleidend beeld geven.

4.5 Inflatie

Meestal wordt een inflatie van 2 % gehanteerd. Hoewel in 2009 een lichte deflatie werd genoteerd, bevestigt de index der consumptieprijzen deze waarde [72]. Bovendien bepaalt het streefdoel van een inflatie van 2 % of licht eronder het monetair beleid van het ECB²⁰ op de middellange termijn [73]. Dit kan echter wel onder druk komen te staan gezien het ECB door de crisis zich o.a.. genoodzaakt zag om staatsobligaties op te kopen van slecht presterende eurolanden. Zo verwacht het Federaal Planbureau voor 2011 een gemiddelde inflatie van 3,5 % [74].



Figuur 118: Inflatie in de eurozone Harmonized Index of Consumption Prices [72]

Op een termijn van 20 jaar lijkt een inflatie van 2% een degelijke aanname.

²⁰ Europese Centrale Bank

4.6 Tijdswaarde

Om de NPV te kunnen hanteren dient een interestvoet bepaald te worden die de tijdswaarde van geld uitdrukt. Men dient dus een rente te bepalen voor het geïnvesteerde kapitaal. Zoals eerder gesteld dient hiervoor een onderscheid gemaakt te worden voor wie de investering wil maken.

4.6.1 Particulieren

De huidige lange termijnrente bedraagt circa 4,30 % (termijnrekening op 10 jaar) [75]. Verhoogd met een risicopremie van 1 à 2 % zou een investering gunstig lijken voor een particulier indien de NPV positief is bij een interestvoet van 6 %.

4.6.2 Bedrijven

Voor bedrijven wordt dit moeilijker. Marges kunnen sterk verschillen van sector tot sector. Misschien dient een investering in zonnepanelen niet volgens dezelfde bril geanalyseerd te worden als een typische investeringsbeslissing binnen een bedrijf en mag het rendement wat minder zijn.

Eenzijds kan het deel uitmaken van een bewust profileringsbeleid. Bedrijven zoals Colruyt kiezen resoluut voor groene energie [76] en communiceren dit duidelijk naar hun klanten.

Anderzijds is het ook een proactieve keuze om zelf energie te produceren: slinkende voorraden van fossiele brandstoffen en ook kernenergie zullen de prijzen steeds verder onder druk zetten en vanuit de overheden zullen steeds strengere eisen naar energieverbruik opgelegd worden.

Zolang de opbrengsten de financiële kosten dekken, lijkt het dus waarschijnlijk dat bedrijven de overweging zouden maken om een PV-installatie te bekostigen. Afhankelijk van de gezondheid van de balans worden investeringskredieten uitgeschreven van ongeveer 6,5%. Verhoogd met een risicopremie lijkt een 8,5% hanteerbaar.

5 Case study

5.1 Beschrijving

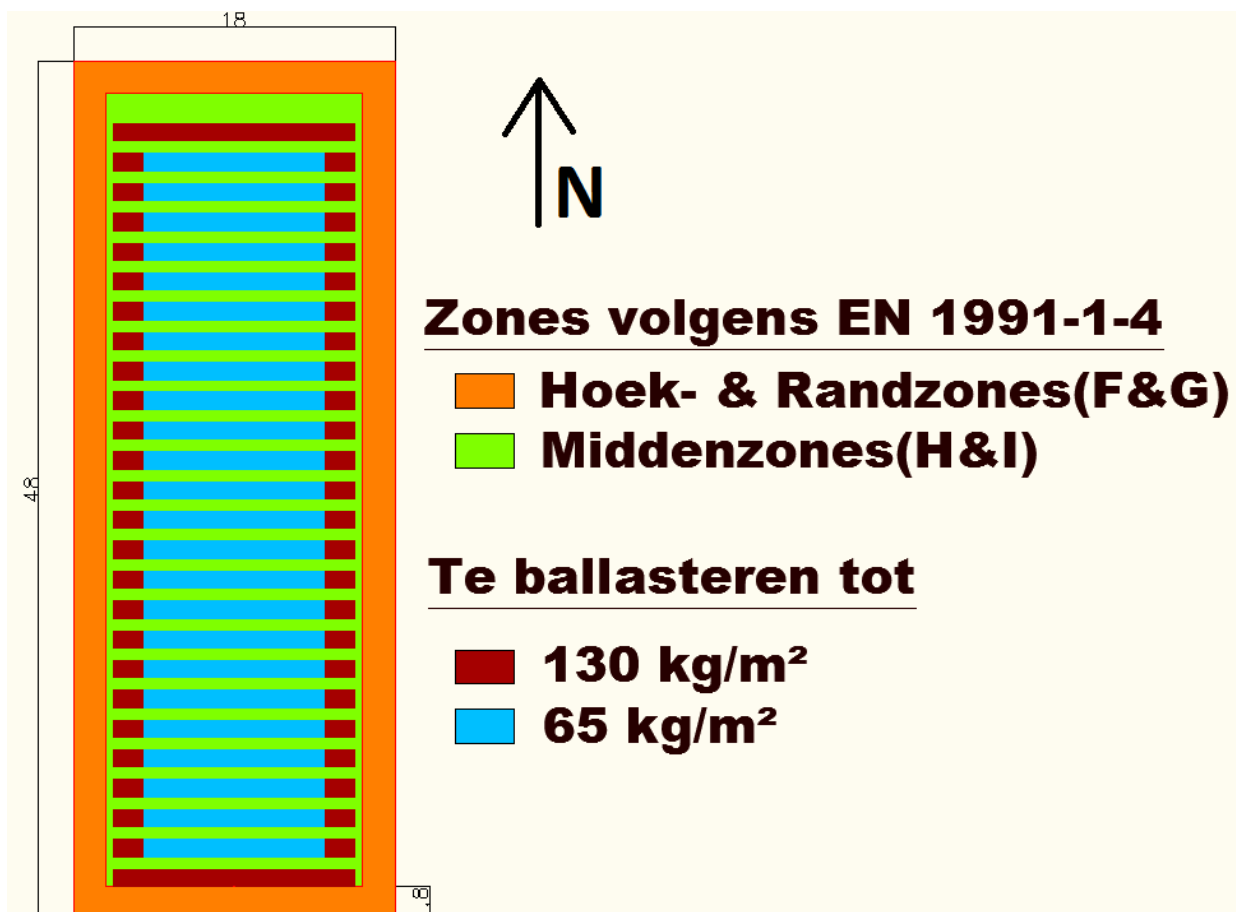
Een fictieve case studie werd opgesteld om de meerkost door de impact van de PV-installatie op een constructie te begroten. Zowel het gebouw als de installatie dienen gedimensioneerd te worden. Er werd gekozen voor een stalen constructie waarop zo veel mogelijk geballasteerde PV-modules geschikt kunnen worden.

Het gebouw moet 9 m hoog worden en het dakvlak ligt 50 cm onder de dakrand. De afmetingen werden vastgelegd op 18 m op 48 m zodat met een vaste tussenafstand van 6 m kon gewerkt worden voor de kolommen en dakliggers.

Op basis van bevindingen uit deel II werd beslist om geen panelen in de randzones te plaatsen, bepaald volgens de EN 1991-1-4. Aan de noordgevel werd één rij minder geplaatst dan wat volgens deze opdeling mogelijk is. Uit onderzoek en bevindingen van producenten bleek immers dat door de aanwezigheid van de panelen de hoogturbulente zones zich verder strekken dan de norm aangeeft (wel zou de intensiteit van de turbulentie dalen).

Zo konden 208 panelen geschikt worden van 240 Wp, goed voor een totale installatie van net geen 50 kWp.

Tot slot werd de ballast ontworpen aan de hand van de ontwerpmethode uit deel II. Het gebouw zou zich in een vrij open omgeving bevinden zodat een terreincategorie II van toepassing is bij het bepalen van de windbelasting. Modules aan de rand van de matrixstructuur vergen 130 kg/m² ballast, middenin 65 kg/m².



Figuur 119: Schikking van de modules op het dakvlak en ballast

Daar deze ballastbepaling in groot contrast bleek t.o.v. wat er courant gangbaar is, werd ook de meerkost bepaald voor de aanpassingen die men in de praktijk meestal toepast. Voor de stabiliteitsstudie werden dus 3 belastingsschema's gehanteerd: zonder PV-installatie, met PV-installatie met extra lasten die in de praktijk toegepast worden en tot slot met PV-installatie volgens het belastingsschema opgesteld in deel II.

Ook werd een onderscheid gemaakt tussen een installatie op een opslagloods en productiehal. De opbrengsten uit de elektriciteitsproductie zullen verschillend zijn naar gelang de verhouding tussen eigen verbruik en injectie.

Tot slot toont Tabel 33 nog een samenvatting van de belangrijkste parameters van de constructie en installatie.

Tabel 33: Basiseigenschappen constructie en PV-installatie

Constructie		Installatie	
Hoogte	9 m	Vermogen	240 Wp
Lengte	48 m	Helling paneel	15°
Breedte	18 m	Beschaduwingshelling	20°
Dakoppervlak	864 m ²	Aantal	208
Terreincategorie	II	Totale installatie	49,92 kWp

5.2 Kosten

5.2.1 Kostprijs installatie

Na rondvraag bij installateurs bleek 2,5 €/Wp een degelijke prijs voor het volume en montage systeem van deze casus. De netontkoppelkast is hier meestal inbegrepen maar werd afgezonderd ter verduidelijking.

Wanneer er een grote energiebehoefte is door de activiteiten in het gebouw zal er sowieso een zware aansluiting voorzien moeten worden. Bij opslagloodsen is dit niet het geval en zal de zwaardere aansluiting als extra kost bij de PV-installatie moeten toegewezen worden.

Daar deze casus een nieuwbouw betreft, zijn val- en dakrandbeveiliging sowieso al voorzien voor de uitvoering van het dak.

Tabel 34: Kostprijs installatie

	Aantal		Eenheidsprijs	Totaal
Installatie (van omvormer tot panelen)	49.920	Wp	€ 2,40	€ 119.808,00
Netontkoppelkast	1	st.	€ 7.000,00	€ 7.000,00
Netstudie	1	st.	€ 500,00	€ 500,00
Totaal (productiehal)				€ 127.308,00
Zwaardere aansluiting	1	st.	€ 3.000,00	€ 3.000,00
Totaal (opslagloods)				€ 130.308,00

5.2.2 Begroten meerkost aanpassingen constructie

1. Dakopbouw

Om doorponsing te vermijden moet een dikkere dakdichting worden toegepast. Door de hoge geconcentreerde lasten die kunnen optreden, wordt ook aangeraden om voor dikkere geprofileerde staalplaten te opteren.

De meerkost voor het nieuwe ontwerp van de dakopbouw loopt op tot 6.700 €, waarvan 5.600 € voor de zwaardere steeledekplaten en 1.100 € voor de dikkere dakdichting.

Tabel 35: Meerkost dakopbouw

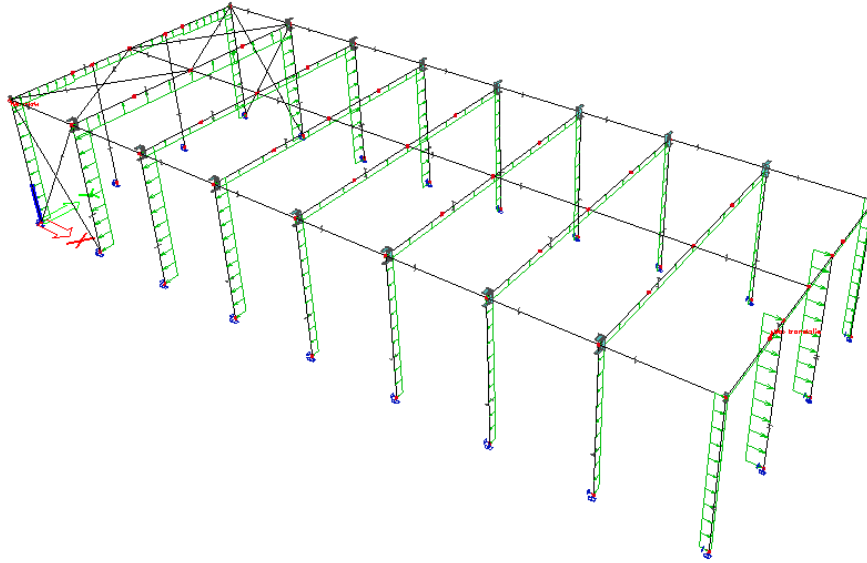
	Zonder PV	Met PV
<u>Geprofileerde staalplaat</u>		
Dikte	1 mm	1,25 mm
Eenheidsprijs	10 €/m ²	16,5 €/m ²
<u>Kostprijs</u>	<u>€ 8.640,00</u>	<u>€ 14.256,00</u>
<u>PVC afdichting</u>		
Dikte	1,0 mm	1,5 mm
Eenheidsprijs	13,00 €/m ²	14,25 €/m ²
<u>Kostprijs</u>	<u>€ 11.232,00</u>	<u>€ 12.312,00</u>
<u>Meerkost</u>	-	<u>€ 6.696,00</u>

Door een grotere plaatdikte te kiezen, neemt het gewicht van dit dakelement uiteraard toe. Voor het gekozen profiel bleek dit om een verhoging van 4,5 kg/m² te gaan (zie technische fiche in bijlage C).

2. Staalstructuur

Door de extra lasten die geïnduceerd worden door de plaatsing van de PV-installatie, zullen alle elementen van de constructie verzaamd moeten worden. Van de geprofileerde platen naar eventuele gordingen tot de liggers via de kolommen naar de fundering. Om deze impact enigszins te kwantificeren werd in SCIA engineer een basisvorm voor de staalconstructie uitgewerkt waarop alle belastingen worden geplaatst.

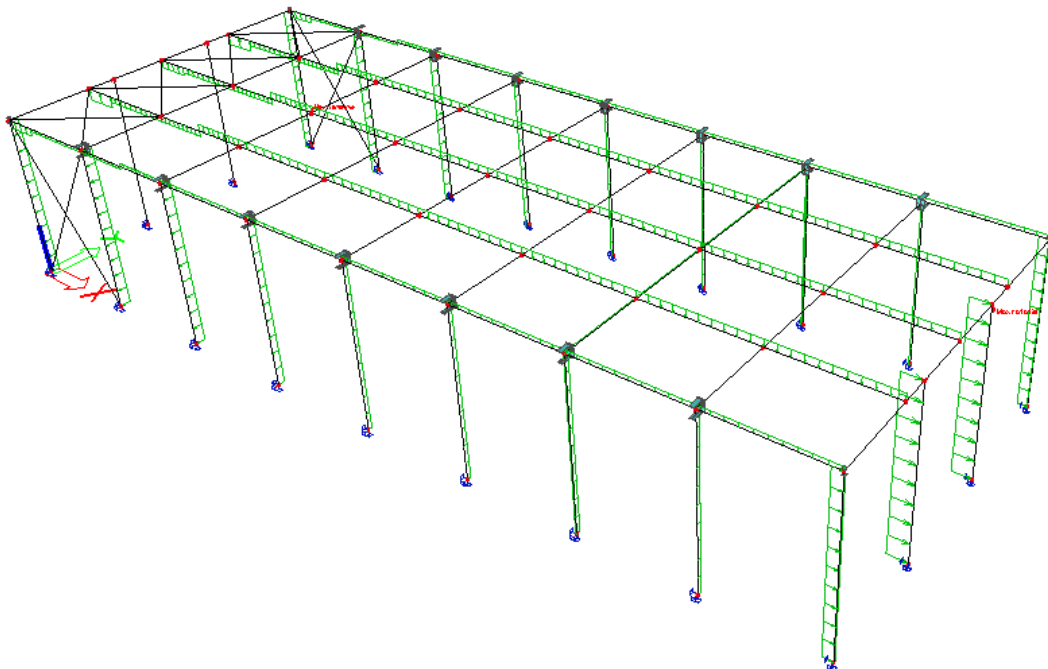
Bij stabiliteitsstudies in de praktijk verhoogt men enkel het doodgewicht met 20 kg/m² wanneer men rekening moet houden met de plaatsing van een PV-systeem. De staalplaten van 1,25 mm bleken bij een overspanning van 6 m nog steeds te voldoen aan de sterkte- en gebruikseisen.



Figuur 120: Basisvorm loods met normale daklasten

Volgens de ontwerpmethode die werd opgesteld in deel II bleek echter dat volgens de Eurocodes een sterk verhoogde ballast nodig is en dat men bovendien een extra sneeuwlast in acht moet nemen. De platen van 106 mm bleken met deze overlast niet meer te voldoen voor een overspanning van 6 m. Hogere, zwaardere geprofileerde platen zouden dit wel nog aankunnen. Hier zou een zware kraan aan te pas komen en dit zal dus naast het extra materiaalverbruik een extra plaatsingskost vergen. Bovendien zijn deze minder courant in gebruik zodat de prijs per m² beduidend hoger ligt.

Daarom leek het aangewezen om de dakstructuur te wijzigen: door gordingen met een tussenafstand van 4,5 m dwars op de liggers te plaatsen, bleken eerder gehanteerde platen wel nog te voldoen. Hierdoor zullen de daklasten nu op een andere manier afgedragen worden op de constructie.



Figuur 121: Basisvorm loods met hoge daklasten

Nadat de lastenoverdracht van de constructie bepaald werd, kan men overgaan tot het dimensioneren van de elementen. Welke belastingen precies wijzigen door de aanwezigheid van de PV-installatie op het dak werden in Tabel 36 samengevat. De extra horizontale belasting komt voort uit de verhoogde ruwheid van het macroscopisch dakvlak: de wind zal zich deels afdrukken tegen de schuin geplaatste

panelen. Hoewel de panelen aan de rand lokaal tot 130 kg/m² moeten geballasteerd worden, kan men deze uitmiddelen over het lege dakvlak tussen dakrand en modules wanneer men de globale stabiliteit beschouwt.

Tabel 36: Gewijzigde lasten en kostprijs verhoging nodig constructiestaal

	Zonder PV	Met PV	
		Praktijk	Ontwerpmethode
Dakopbouw	30 kg/m ²	35 kg/m ²	35 kg/m ²
Gewicht PV	-	15 kg/m ²	65 kg/m ²
Sneeuwbelasting	40 kg/m ²	40 kg/m ²	60 kg/m ²
Extra horizontale windbelasting	0,38 Ton	0,38 Ton	1,54Ton
Staalbehoefte(2,1€/kg)	42,75 Ton	43,51 Ton	49,00 Ton
Toename		0,76 Ton	6,25 Ton
Meerkost		€ 1.596,00	€ 13.125,00

Door een toename van 20 kg/m² aan dood gewicht, bleek de constructie ruw geschat 1.600 € duurder. Wanneer men echter een ontwerpmethode hanteert die meer in de filosofie van de Eurocodes past, wordt de staalstructuur 13.000 € duurder.

Als referentiewaarde voor de hoeveelheid constructiestaal nodig voor een stalen loods van 10.000 m², werd 27 à 28 ton opgegeven. Dit is echter van toepassing voor een constructiehoogte van 4,5 m. Hoewel de constructies niet voor alle details geoptimaliseerd werd, lijkt de bekomen staalbehoefte dus wel representatief.

3. Besluit

Voor de wijzigingen aan de dakstructuur die men in de praktijk aanbrengt bij ontwerp, lopen de kosten op tot 8.292 €. Volgens de ontwerpmethode uit deel II is dit 19.821 €.

Tabel 37: Totale meerkost impact op constructie

	Meerkost	
	Praktijk	Eurocodes
Geprofileerde staalplaten	€ 5.616,00	€ 5.616,00
Dakdichting	€ 1.080,00	€ 1.080,00
Constructiestaal	€ 1.596,00	€ 13.125,00
Totaal	€ 8.292,00	€ 19.821,00

Een grote hap uit het budget van een bouwproject zijn echter de funderingen. Het zou ons echter te ver leiden om de kost hiervan in te schatten omdat deze van nog zoveel meer factoren afhankelijk is.

Om toch al een idee te geven, kan men de dode gewichten van de volledige constructie vergelijken met het extra gewicht dat toegevoegd wordt bij de plaatsing van de zonnepanelen: het dood gewicht van enkel het dakvlak (afdichting tot geprofileerde staalplaat) zonder de installatie bedraagt 26 ton, de constructie 42 ton.

Dit wordt verhoogd door de plaatsing van de PV-installatie met 17 ton of 60 ton afhankelijk van de berekeningsmethode waar men het meest vertrouwen in heeft. Worst case scenario betreft het een afdak op een slechte ondergrond. De op te nemen dode last verhoogt met 25% of verdubbelt bij

berekeningen conform de Eurocodes. Hierdoor is het best mogelijk dat men naar andere funderingstechnieken moet overstappen die een grote meerkost kunnen betekenen.

Hoewel de werkvloer meestal niet naar de kolomfunderingen zal worden afgedragen, zal de gevelbekleding dit wel doen. Deze gevelbekleding vormt, afhankelijk van de uitvoering, het grootste dood gewicht van de constructie en relativeert bijgevolg voorgaande opmerking. Courant wordt deze uitgevoerd met betonwanden van 15 cm die een extra dood gewicht van 450 ton leveren. Soms worden deze vanaf een bepaalde hoogte vervangen met geprofileerde staalplaten of sandwich zodat men een lager totaal gewicht bekommt (bijvoorbeeld 3 m beton en 6 m staal geeft 170 ton).

5.2.3 Totale investeringskost

Bij een traditionele investeringsanalyse zal enkel de installatiekost opgenomen worden. De werkelijke investeringskost blijkt 6,5 % hoger te liggen wanneer men ook de meerkost m.b.t. de constructie opneemt. Wanneer men een lastenbepaling hanteert die meer in overeenstemming is met de filosofie van de Eurocodes, dan verhoogt de investeringskost zelfs met 16%.

Tabel 38: totale investeringskost

	Traditioneel	Praktijk	Eurocodes
Totaal productieloods	€ 127.308,00	€ 135.600,00	€ 147.129,00
Totaal opslagloods	€ 130.308,00	€ 138.600,00	€ 150.129,00
constructieve meerkost		€ 8.292,00	€ 19.821,00

Hoewel de berekeningen voor geballasteerde systemen werden uitgevoerd, is de meerkost van 6,5% ook representatief voor installaties met dakpenetratie: de dakopbouw zal op eenzelfde manier gewijzigd worden door te opteren voor een dikkere dakdichting en staalplaat. Bovendien ligt de ondergrens voor het gewicht van panelen en hulpstructuur ergens rond de 8 à 9 kg/m² wat weinig verschilt met de 15 kg/m² die men inrekenen voor geballasteerde systemen.

5.2.4 Operationele kosten

Onderhoud werd aan 25 €/kWp geschat op 1.250 € per jaar. Deze kost is onderhevig aan inflatie.

De verzekering werd op 443,83€ geschat, bepaald uit 0,035% van de installatiekost. Gezien men steeds verzekerd is voor de vervangingswaarde, zal deze kost mee evolueren met de kostprijs voor PV-installaties. Gezien hier moeilijk voorspellingen voor gemaakt kunnen worden, werd deze als constant gedurende de volledige looptijd aangenomen.

De prijs voor de omvormers zou nu 12.500€ bedragen en deze zullen in jaar 15 vervangen worden. Gezien hier ook een prijsverlaging te verwachten is die misschien wel de inflatie zal overstijgen, werd een zelfde kostprijs gehanteerd voor jaar 15.

5.3 Opbrengsten

5.3.1 Opbrengsten uit de productie

Er wordt verondersteld dat de installatie zal gekeurd worden tussen juli en oktober 2011, bijgevolg zal gedurende de daaropvolgende 20 jaar een minimum bedrag van 300 € per GSC uitbetaald worden.

Het bedrijf dat de installatie overweegt, werd verondersteld 15 cent per kWh te betalen voor zijn elektriciteit. Voor zijn injectie zou het vergoed worden aan 5 cent per kWh.

Tabel 39: Opbrengsten productie

Geïnstalleerd Wp vermogen	49.920 Wp
Omzetting elektriciteit	
Omzettingsfactor	0,85 kWh/Wp
Jaarlijkse elektriciteitsproductie	42.432 Kwh
Besparing verbruik	0,15 €/kWh
Verkoopprijs injectie	0,05 €/kWh
Groenestroomcertificaten	
Tarief tot 30 sept 2011	300 €/MWh
Jaarlijkse opbrengst (GSC per kWh)	€ 12.729,60 (0,30 €/kWh)

Onmiddellijk valt op te merken dat mocht de constructie momenteel nog maar op de ontwerptafel liggen, de voltooiing ten vroegste in medio 2012 zal gebeuren. Tegen dan is de minimum vergoeding voor de GSC slechts 210 €/MWh.

Om de totale opbrengst uit de elektriciteitsproductie te becijferen, dient men te weten welke de verhouding tussen eigen verbruik en injectie zal zijn gedurende de levensduur van de installatie. Voor een opslagloods lijkt het evident dat het gros van de productie zal geïnjecteerd worden. Bij een productiehal is de verhouding minder eenduidig: men moet zich baseren op de ogenblikkelijke elektriciteitsbehoefte en deze vergelijken met het maximale vermogen dat de installatie kan leveren. Dit moet men dan ook nog eens in de tijd gaan evalueren: blijft de elektriciteitsbehoefte even hoog tijdens de middaguren, blijft de productie 's weekend draaien, hoeveel dagen wordt de productie op jaarbasis stilgelegd wegens verlofdagen, etc.

Meestal zal blijken dat men niet de volledige productie zal kunnen verbruiken, daarom werd voor de productiehal een verhouding 85/15 gehanteerd, wat een best-case scenario lijkt. Worst-case scenario wordt alles in het net geïnjecteerd.

Absoluut worst-case scenario is wanneer men helemaal niet kan injecteren omdat het net overbelast is. Zo wordt in de kuststreek bijvoorbeeld voorrang gegeven aan de injectie van de windmolenparken. Toch komt men nog in aanmerking voor de GSC, wat vrij uniek is in Europa. Gezien dit een vrij onlogische situatie is, zal dit niet aan bod komen.

De jaarlijkse opbrengst die aan de productie gerelateerd is, bedraagt 18.500 € voor de productiehal en 14.850€ voor de opslagloods.

Tabel 40: Totale jaarlijkse opbrengst uit productie

	Productiehal	Opslagloods
Jaarlijkse productie[kWh]	42.432	42.432
Waarvan eigen verbruik	85%	0%
Waarvan injectie	15%	100%
opbrengst elektriciteit	€ 5.728	€ 2.122
opbrengst GSC	€ 12.730	€ 12.730
Totale jaarlijkse opbrengst	€ 18.458	€ 14.851

5.3.2 Verhoogde investeringsaftrek & belastingen

Dankzij de verhoogde investeringsaftrek mag men het afschrijven van de installatie met 13,5 % verhogen.

Aangezien de GSC als een opbrengst beschouwd worden door de fiscus voor niet-particulieren, zal het resultaat na belastingen moeten beschouwd worden. De te betalen belastingen worden dan als kost opgenomen. Deze zal lager uitvallen dankzij de verhoogde investeringsaftrek.

Als belastingsvoet wordt 33,99 % gehanteerd. De PV-installatie wordt afgeschreven op 20 jaar. De afschrijvingen mogen verhoogd worden met 13,5 %.

5.3.3 Tijdsafhankelijke effecten

Zowel de productie als de opbrengsten hieruit zijn variabel in de tijd.

De panelen werden verondersteld 0,65 % per jaar aan rendement te verliezen.

Stijging van de energieprijzen 2,7 % conform de projecties van het Federaal Planbureau.

Inflatie van 2 % en tot slot werd een interestvoet van 8,5 % gehanteerd voor de berekening van de NPV.

5.4 Samenvatting

In Tabel 41 worden nog eens alle basisparameters samengevat.

Tabel 41: Parameters klassieke haalbaarheidsstudie met 85% eigenverbruik

Kosten			Opbrengsten		
Investeringskost	€ 127.308,00		Investeringsaftrek	13,50%	j1-j20
Meerkost constructie	€ 0,00		Jaarlijkse productie	€ 42.432,00	j1-j30
Afschrijvingskost	€ 6.365,40	j1-j20	Tarief GSC	€ 300,00	
Verzekering	€ 443,83	j1-j30	Opbrengst GSC	€ 12.729,60	j1-j20
Onderhoud	€ 1.250,00	j1-j30	Verhouding verbruik	85%	
Omvormers	€ 12.500,00	j15	Elektriciteit	€ 5.728,32	j1-j30
Interestvoet, tijdsafhankelijkheid prijzen					
Interestvoet	8,50%		Stijging energieprijzen	2,70%	
Inflatie	2,00%		Daling rendement	0,65%	
Belastingsvoet	33,99%				

Voor de haalbaarheidsstudie zullen 6 gevallen bestudeerd worden: zowel voor productiehal als voor opslagloods zal de rendabiliteit berekend worden op basis van enkel de installatiekost. Dit zal vervolgens verhoogd worden met de meerkost wegens aanpassingen van de constructie begroot volgens wat meestal wordt toegepast in de praktijk en een tweede maal volgens de aanpassingen die nodig blijken volgens van de Eurocodes.

Tabel 42: Variabelen sensitiviteitsanalyse

	Investeringskost j0			Electriciteit	
	Traditioneel	Praktijk	Eurocodes	Eig. verbr.	Injectie
Productiehal	€ 127.308,00	€ 135.600,00	€ 147.129,00	85%	15%
Opslagloods	€ 130.308,00	€ 138.600,00	€ 150.129,00	0%	100%

5.5 Resultaten

De kasstroom voor productiehal met enkel de installatiekost werd uitgezet over 30 jaar in Tabel 43.

Tabel 43: kasstroom productiehal enkel installatiekost

	kosten		Rendement installat		Opbrengsten		Resultaatarekening		Kasstroom		NPV	IRR
	Verzek.	Ond.+omv.	Rend.	productie	GSC	Electriciteit	Afschr.	EBIT	belasting	jaarlijks		
j0										-127.308,00	-127.308,00	-127.308,00
j1	443,83	1.250,00	99,35%	42.432,00	12.729,60	5.728,32	7.224,73	9.539,36	3.242,43	13.521,66	-113.786,34	12.409,70
j2	443,83	1.275,00	98,70%	42.156,19	12.646,86	5.844,75	7.224,73	9.548,05	3.245,38	13.527,39	-100.258,94	11.394,00
j3	443,83	1.300,50	98,05%	41.880,38	12.564,12	5.963,28	7.224,73	9.558,34	3.248,88	13.534,19	-86.724,75	10.462,26
j4	443,83	1.326,51	97,40%	41.604,58	12.481,37	6.083,96	7.224,73	9.570,26	3.252,93	13.542,06	-73.182,69	9.607,47
j5	443,83	1.353,04	96,75%	41.328,77	12.398,63	6.206,80	7.224,73	9.583,84	3.257,55	13.551,02	-59.631,67	8.823,22
j6	443,83	1.380,10	96,10%	41.052,96	12.315,89	6.331,85	7.224,73	9.599,08	3.262,73	13.561,08	-46.070,59	8.103,65
j7	443,83	1.407,70	95,45%	40.777,15	12.233,15	6.459,12	7.224,73	9.616,01	3.268,48	13.572,25	-32.498,34	7.443,37
j8	443,83	1.435,86	94,80%	40.501,34	12.150,40	6.588,65	7.224,73	9.634,64	3.274,81	13.584,55	-18.913,79	6.837,45
j9	443,83	1.464,57	94,15%	40.225,54	12.067,66	6.720,46	7.224,73	9.654,99	3.281,73	13.597,99	-5.315,80	6.281,37
j10	443,83	1.493,87	93,50%	39.949,73	11.984,92	6.854,59	7.224,73	9.677,09	3.289,24	13.612,57	8.296,78	5.771,00
j11	443,83	1.523,74	92,85%	39.673,92	11.902,18	6.991,06	7.224,73	9.700,94	3.297,35	13.628,32	21.925,10	5.302,54
j12	443,83	1.554,22	92,20%	39.398,11	11.819,43	7.129,91	7.224,73	9.726,57	3.306,06	13.645,24	35.570,33	4.872,52
j13	443,83	1.585,30	91,55%	39.122,30	11.736,69	7.271,16	7.224,73	9.753,99	3.315,38	13.663,34	49.233,67	4.477,76
j14	443,83	1.617,01	90,90%	38.846,50	11.653,95	7.414,83	7.224,73	9.783,22	3.325,32	13.682,63	62.916,30	4.115,33
j15	443,83	1.649,35	90,25%	38.570,69	11.571,21	7.560,97	7.224,73	2.685,73	-912,88	5.451,88	68.368,18	1.504,92
j16	443,83	1.682,34	89,60%	38.294,88	11.488,46	7.709,59	7.224,73	9.847,16	3.347,05	13.724,84	82.093,02	3.477,00
j17	443,83	1.715,98	88,95%	38.019,07	11.405,72	7.860,72	7.224,73	9.881,90	3.358,86	13.747,77	95.840,79	3.196,40
j18	443,83	1.750,30	88,30%	37.743,26	11.322,98	8.014,40	7.224,73	9.918,52	3.371,30	13.771,94	109.612,73	2.938,69
j19	443,83	1.785,31	87,65%	37.467,46	11.240,24	8.170,64	7.224,73	9.957,01	3.384,39	13.797,35	123.410,08	2.702,00
j20	443,83	1.821,01	87,00%	37.191,65	11.157,49	8.329,47	7.224,73	9.997,40	3.398,12	13.824,01	137.234,09	2.484,59
j21	443,83	1.857,43	86,35%	36.915,84	0,00	8.490,93	0,00	6.189,67	2.103,87	4.085,80	141.319,90	736,64
j22	443,83	1.894,58	85,70%	36.640,03	0,00	8.655,04	0,00	6.316,63	2.147,02	4.169,60	145.489,50	631,22
j23	443,83	1.932,47	85,05%	36.364,22	0,00	8.821,81	0,00	6.445,51	2.190,83	4.254,68	149.744,18	591,13
j24	443,83	1.971,12	84,40%	36.088,42	0,00	8.991,29	0,00	6.576,33	2.235,30	4.341,04	154.085,22	553,53
j25	443,83	2.010,55	83,75%	35.812,61	0,00	9.163,48	0,00	6.709,10	2.280,42	4.428,68	158.513,90	518,26
j26	443,83	2.050,76	83,10%	35.536,80	0,00	9.338,42	0,00	6.843,83	2.326,22	4.517,61	163.031,51	485,20
j27	443,83	2.091,77	82,45%	35.260,99	0,00	9.516,12	0,00	6.980,52	2.372,68	4.607,84	167.639,35	454,19
j28	443,83	2.133,61	81,80%	34.985,18	0,00	9.696,61	0,00	7.119,17	2.419,81	4.699,37	172.338,72	425,12
j29	443,83	2.176,28	81,15%	34.709,38	0,00	9.879,91	0,00	7.259,80	2.467,61	4.792,20	177.130,91	397,86
j30	443,83	2.219,81	80,50%	34.433,57	0,00	10.066,04	0,00	7.402,41	2.516,08	4.886,33	182.017,24	372,32
											som:	€ 0,00
											4.638,95	

De overige tabellen werden opgenomen in bijlage D.

De terugverdientijd volgens de klassieke berekening met enkel de installatiekost als investeringskost is 9,39 jaar voor een installatie met een vrij hoog eigen verbruik van elektriciteit. De NPV bleek nog licht positief daar de IRR 8,96 % bedroeg. In principe lijkt deze investering nog net rendabel.

Wanneer men echter de meerkost voor het verzwaren van de dakstructuur opneemt, dit conform de berekeningsmethode uiteengezet in deel II, wordt de IRR slechts 7,49 %. Wat in de praktijk gangbaar leek qua aanpassingen van de dakstructuur, gaf de meerkost aanleiding tot een daling van 66 basispunten.

Tabel 44: Resultaten sensitiviteitsanalyse

	Klassiek		Praktijk		Ontwerpmethode deel II	
Productiehal	Winst	€ 182.017,24	Winst	€ 176.924,18	Winst	€ 169.842,91
	TT	9,39	TT	9,88	TT	10,55
	NPV	€ 4.638,95	NPV	€ -2.139,42	NPV	€ -11.563,90
	IRR	8,96%	IRR	8,30%	IRR	7,49%
Opslagloods	Winst	€ 83.811,72	Winst	€ 78.718,66	Winst	€ 71.637,39
	TT	11,88	TT	12,47	TT	13,26
	NPV	€ -28.688,35	NPV	€ -35.466,71	NPV	€ -44.891,19
	IRR	5,27%	IRR	4,71%	IRR	4,03%

Wanneer men de productie volledig in het net injecteert, bleek de investering niet meer interessant.

Deze resultaten vertekken wel van de veronderstelling dat de loods en de PV-installatie kunnen opgeleverd worden voor 1 november 2011. Dit lijkt weinig waarschijnlijk mocht de constructie nu nog op de ontwerptafel liggen. Daarom werden ook de opbrengsten uit de GSC gevarieerd afhankelijk van de opleveringsdatum.

Tabel 45: Investeringsanalyse bij verschillende opleveringsdata voor PV-installatie voor productiehal

Investeringsanalyse productiehal met meerkost dakstructuur									
1 juli 2011- 31 okt 2011		1 nov 2011- 31 dec 2011		1 jan 2012- 31 maa 2012		1 apr 2012- 30 jun 2012		1 jul 2012- 31 dec 2012	
300		270		250		230		210	
Winst	€ 176.924,18	Winst	€ 161.156,31	Winst	€ 150.644,40	Winst	€ 140.132,48	Winst	€ 129.620,57
TT	9,88	TT	10,50	TT	10,96	TT	11,46	TT	12,00
NPV	€ -2.139,42	NPV	€ -9.734,59	NPV	€ -14.798,04	NPV	€ -19.861,48	NPV	€ -24.924,93
IRR	8,30%	IRR	7,58%	IRR	7,10%	IRR	6,61%	IRR	6,13%

Hieruit blijkt dat men weinig geneigd zal zijn om aan de huidige marktprijzen een PV-installatie te overwegen op een industriële loods in aanbouw.

6 Besluit

De aanpassingen die moeten gedaan worden aan de dakstructuur om de extra lasten van een geballasteerde PV-installatie op te nemen, betekenen een reële meerkost die moet opgenomen worden in de haalbaarheidsstudie van een investering in zonne-energie.

Voor een klassieke stalen werd deze constructieve meerkost op 16 % geraamd wanneer de lasten volgens de regels van de Eurocodes worden bepaald. In de praktijk blijkt men echter een lagere belasting in te schatten en op basis hiervan werd een meerkost van 6,5 % bevonden.

Uit de investeringsanalyse bleek dat enkel de installatie met een hoog eigenverbruik een positieve NPV opleverde. Zodra de constructieve meerkost werd ingerekend, zakte de IRR 20 basispunten onder het vooropgesteld minimum rendement van 8,5 %. De installatie met een beperkte elektriciteitsafname bleek slechts een IRR van 4,71 % op te leveren.

Bij latere oplevering, na 1 november, bleek de investering in het best-case scenario slechts een IRR van 7,58% te halen. Zo zakt deze stapsgewijs verder tot 6,13 % bij oplevering in juli volgend jaar. Met deze lage IRR lijkt het weinig waarschijnlijk dat bedrijf met bouwplannen de voorzieningen zal treffen om een geballasteerd systeem te kunnen plaatsen.

Gezien men in de praktijk al zeer lage lasten inrekent, zijn de resultaten hiervan ook representatief voor verankerde systemen.

Tenzij de Wp-prijzen drastisch zakken, lijkt PV in dit marksegment dus ten einde te lopen. Voor nog grotere installaties (>250 kWp) kelderen de GSC nog sneller zodat een zelfde conclusie toepasbaar lijkt.

Bijlagen

Bijlage A: Piekstuwdrukken

Tabel A1: Piekstuwdruk $q_p(z)$ [N/m^2] voor $v_{b,0} = 26m/s$ en $c_0 = 1$ (25)

hoogte z_e (m)	Terreincategorieën				
	0	I	II	III	IV
200	2069	2038	1935	1676	1383
175	2029	1995	1887	1625	1332
150	1983	1945	1833	1567	1274
125	1930	1887	1769	1500	1207
100	1866	1818	1693	1419	1128
95	1851	1802	1675	1400	1110
90	1836	1785	1657	1381	1091
85	1819	1768	1638	1361	1071
80	1802	1749	1618	1340	1050
75	1784	1730	1597	1317	1028
70	1765	1709	1574	1293	1005
65	1744	1687	1550	1268	980
60	1722	1663	1524	1241	954
55	1698	1637	1496	1212	926
50	1672	1609	1465	1180	895
45	1644	1578	1432	1145	862
40	1612	1544	1395	1107	825
35	1576	1506	1354	1064	784
30	1536	1463	1307	1016	738
28	1518	1444	1286	995	718
26	1499	1423	1264	972	696
24	1478	1401	1240	948	673
22	1456	1377	1215	921	648
20	1431	1351	1187	893	622
18	1405	1323	1157	862	593
16	1376	1291	1123	828	561
14	1343	1256	1086	790	526
12	1305	1216	1043	748	486
10	1261	1170	994	698	441
9	1236	1143	966	670	441
8	1208	1114	935	639	441
7	1177	1081	900	605	441
6	1142	1043	861	566	441
5	1100	1000	815	522	441
2	903	793	601	522	441
1	765	651	601	522	441

Tabel A2: Extreme stuwdruk $q_p(z)$ [N/m²] voor $v_{b,0} = 25/s$ en $c_0 = 1$ (25)

hoogte z_e (m)	Terreincategorieën			
	I	II	III	IV
200	1884	1789	1550	1278
175	1844	1745	1503	1231
150	1799	1694	1449	1178
125	1745	1636	1386	1116
100	1681	1565	1312	1043
95	1666	1549	1295	1026
90	1651	1532	1277	1009
85	1634	1514	1258	990
80	1617	1496	1239	971
75	1599	1476	1218	951
70	1580	1455	1196	929
65	1559	1433	1172	907
60	1537	1409	1147	882
55	1514	1383	1120	856
50	1488	1355	1091	828
45	1459	1324	1059	797
40	1428	1290	1023	763
35	1393	1252	984	725
30	1352	1208	939	682
28	1335	1189	920	663
26	1316	1169	899	643
24	1295	1147	876	622
22	1273	1123	852	599
20	1249	1098	826	575
18	1223	1070	797	548
16	1194	1039	766	519
14	1162	1004	731	486
12	1125	965	691	450
10	1081	919	645	408
9	1057	893	620	408
8	1030	864	591	408
7	999	832	559	408
6	965	796	524	408
5	924	754	482	408
2	733	556	482	408
1	602	556	482	408

Bijlage B: Doodgewicht geballasteerd systeem bij verstoren glijdingsevenwicht

Enkel te gebruiken wanneer kantelevenwicht niet bepalend blijkt. Midden toepasbaar voor modules in zone I en H met volledig shelter effect, rand voor de rest zolang mijn buiten de hoekzones aan de Noordgevel blijft.

Tabel B1: Doodgewicht per m² dakvlak[kg/m²] $v_{b,0} = 26 \text{ m/s}$; $\mu = 0,7$; $\text{alfa} = 15^\circ$; $\text{beschaduwingshelling} = 20^\circ$

$v_{b,0} = 26 \text{ m/s}$; $\mu = 0,7$; $\text{alfa} = 15^\circ$; $\text{beschaduwingshelling} = 20^\circ$											
		0		1		2		3		4	
		midden	rand	midden	rand	midden	rand	midden	rand	midden	rand
1		47,64	95,29	40,50	81,00	37,43	74,87	31,72	63,43	30,93	61,86
2		56,21	112,43	49,38	98,76	37,43	74,87	31,72	63,43	30,93	61,86
3		61,51	123,03	54,91	109,82	43,12	86,25	31,72	63,43	30,93	61,86
4		65,40	130,80	58,99	117,98	47,35	94,70	31,72	63,43	30,93	61,86
5		68,49	136,98	62,24	124,47	50,74	101,47	31,72	63,43	30,93	61,86
6		71,06	142,12	64,95	129,89	53,57	107,15	34,55	69,11	30,93	61,86
7		73,27	146,53	67,28	134,55	56,02	112,05	37,02	74,04	30,93	61,86
8		75,20	150,40	69,32	138,65	58,18	116,36	39,20	78,41	30,93	61,86
9		76,93	153,86	71,15	142,31	60,11	120,22	41,17	82,34	30,93	61,86
10		78,49	156,97	72,81	145,61	61,86	123,72	42,95	85,91	30,93	61,86
11		79,91	159,82	74,32	148,63	63,46	126,92	44,59	89,19	32,54	65,08
12		81,22	162,44	75,71	151,41	64,94	129,88	46,11	92,22	34,03	68,07
13		82,43	164,87	77,00	153,99	66,31	132,62	47,52	95,04	35,43	70,85
14		83,56	167,13	78,20	156,40	67,59	135,18	48,84	97,69	36,73	73,47
15		84,62	169,24	79,33	158,65	68,79	137,58	50,09	100,17	37,96	75,93
16		85,62	171,23	80,39	160,78	69,92	139,84	51,26	102,52	39,13	78,25
17		86,56	173,12	81,39	162,78	70,99	141,98	52,37	104,74	40,23	80,46
18		87,45	174,90	82,34	164,68	72,01	144,02	53,43	106,85	41,28	82,56
19		88,30	176,59	83,24	166,49	72,97	145,95	54,43	108,87	42,28	84,56
20		89,10	178,20	84,10	168,21	73,90	147,79	55,40	110,79	43,24	86,48
21		89,87	179,74	84,93	169,85	74,78	149,56	56,32	112,63	44,16	88,32
22		90,61	181,22	85,72	171,43	75,62	151,24	57,20	114,40	45,04	90,08
23		91,32	182,63	86,47	172,94	76,43	152,87	58,05	116,10	45,89	91,78
24		92,00	183,99	87,20	174,39	77,21	154,43	58,87	117,74	46,71	93,42
25		92,65	185,30	87,90	175,79	77,96	155,93	59,66	119,31	47,50	95,00
26		93,28	186,56	88,57	177,14	78,69	157,38	60,42	120,84	48,26	96,52
27		93,89	187,78	89,22	178,44	79,39	158,78	61,16	122,31	49,00	98,00
28		94,48	188,95	89,85	179,70	80,07	160,13	61,87	123,74	49,72	99,43
29		95,04	190,09	90,46	180,92	80,72	161,45	62,56	125,12	50,41	100,82
30		95,60	191,19	91,05	182,10	81,36	162,72	63,23	126,46	51,08	102,17

Tabel B2: Doodgewicht per m² dakvlak[kg/m²] v_{b,0} = 26 m/s ; μ = 0,7 ; alfa = 15° ; beschaduwingshelling = 15,5°

v _{b,0} = 26 m/s ; μ = 0,7 ; alfa = 15° ; beschaduwingshelling = 15,5°											
	0		1		2		3		4		
	midden	rand	midden	rand	midden	rand	midden	rand	midden	rand	
1	42,07	84,14	35,76	71,53	33,05	66,11	28,01	56,01	27,31	54,63	
2	49,64	99,28	43,60	87,21	33,05	66,11	28,01	56,01	27,31	54,63	
3	54,32	108,63	48,49	96,98	38,08	76,16	28,01	56,01	27,31	54,63	
4	57,75	115,50	52,09	104,18	41,81	83,62	28,01	56,01	27,31	54,63	
5	60,48	120,95	54,96	109,91	44,80	89,60	28,01	56,01	27,31	54,63	
6	62,75	125,49	57,35	114,70	47,31	94,61	30,51	61,03	27,31	54,63	
7	64,69	129,39	59,41	118,81	49,47	98,94	32,69	65,38	27,31	54,63	
8	66,40	132,81	61,21	122,43	51,37	102,75	34,62	69,24	27,31	54,63	
9	67,93	135,86	62,83	125,66	53,08	106,16	36,35	72,70	27,31	54,63	
10	69,31	138,61	64,29	128,58	54,62	109,25	37,93	75,86	27,31	54,63	
11	70,56	141,12	65,62	131,25	56,04	112,08	39,38	78,75	28,73	57,47	
12	71,72	143,44	66,85	133,70	57,34	114,68	40,72	81,43	30,05	60,11	
13	72,79	145,58	67,99	135,98	58,55	117,10	41,96	83,93	31,28	62,57	
14	73,79	147,58	69,05	138,10	59,68	119,36	43,13	86,26	32,44	64,87	
15	74,72	149,44	70,05	140,09	60,74	121,49	44,23	88,45	33,52	67,04	
16	75,60	151,20	70,98	141,97	61,74	123,48	45,26	90,53	34,55	69,10	
17	76,43	152,86	71,87	143,74	62,69	125,37	46,24	92,49	35,52	71,05	
18	77,22	154,44	72,71	145,42	63,58	127,17	47,18	94,35	36,45	72,90	
19	77,97	155,93	73,51	147,01	64,44	128,88	48,07	96,13	37,34	74,67	
20	78,68	157,36	74,27	148,53	65,25	130,50	48,92	97,83	38,18	76,36	
21	79,36	158,72	74,99	149,98	66,03	132,06	49,73	99,46	38,99	77,99	
22	80,01	160,02	75,69	151,38	66,78	133,55	50,51	101,02	39,77	79,55	
23	80,63	161,27	76,36	152,71	67,49	134,98	51,26	102,52	40,52	81,04	
24	81,23	162,47	77,00	153,99	68,18	136,36	51,98	103,96	41,24	82,49	
25	81,81	163,62	77,61	155,23	68,84	137,69	52,68	105,36	41,94	83,88	
26	82,37	164,74	78,21	156,42	69,48	138,97	53,35	106,70	42,62	85,23	
27	82,90	165,81	78,78	157,57	70,10	140,21	54,00	108,00	43,27	86,54	
28	83,42	166,85	79,34	158,68	70,70	141,40	54,63	109,26	43,90	87,80	
29	83,93	167,85	79,88	159,76	71,28	142,56	55,24	110,48	44,51	89,03	
30	84,41	168,83	80,40	160,80	71,84	143,68	55,83	111,67	45,11	90,22	

Tabel B3: Doodgewicht per m² dakvlak[kg/m²] v_{b,0} = 25 m/s ; μ = 0,7 ; alfa = 15° ; beschaduwingshelling = 20°

v _{b,0} = 25m/s ; μ = 0,7 ; alfa = 15° ; beschaduwingshelling = 20°											
	0		1		2		3		4		
	midden	rand	midden	rand	midden	rand	midden	rand	midden	rand	
1	44,05	88,10	37,45	74,89	34,61	69,22	29,32	58,65	28,60	57,19	
2	51,97	103,95	45,66	91,31	34,61	69,22	29,32	58,65	28,60	57,19	
3	56,87	113,74	50,77	101,54	39,87	79,74	29,32	58,65	28,60	57,19	
4	60,47	120,93	54,54	109,08	43,78	87,56	29,32	58,65	28,60	57,19	
5	63,32	126,64	57,54	115,08	46,91	93,82	29,32	58,65	28,60	57,19	
6	65,70	131,40	60,05	120,09	49,53	99,07	31,95	63,90	28,60	57,19	
7	67,74	135,48	62,20	124,40	51,80	103,59	34,23	68,46	28,60	57,19	
8	69,53	139,06	64,09	128,19	53,79	107,58	36,25	72,49	28,60	57,19	
9	71,12	142,25	65,78	131,57	55,58	111,15	38,06	76,13	28,60	57,19	
10	72,57	145,13	67,31	134,63	57,19	114,39	39,71	79,43	28,60	57,19	
11	73,88	147,76	68,71	137,42	58,67	117,35	41,23	82,46	30,09	60,17	
12	75,09	150,18	70,00	139,99	60,04	120,08	42,63	85,26	31,47	62,93	
13	76,21	152,43	71,19	142,38	61,31	122,61	43,94	87,87	32,75	65,51	
14	77,26	154,52	72,30	144,60	62,49	124,98	45,16	90,32	33,96	67,92	
15	78,24	156,47	73,34	146,68	63,60	127,20	46,31	92,62	35,10	70,20	
16	79,16	158,32	74,32	148,65	64,65	129,29	47,39	94,78	36,17	72,35	
17	80,03	160,05	75,25	150,50	65,64	131,27	48,42	96,84	37,19	74,39	
18	80,85	161,70	76,13	152,26	66,58	133,15	49,40	98,79	38,17	76,33	
19	81,63	163,27	76,96	153,93	67,47	134,94	50,33	100,65	39,09	78,18	
20	82,38	164,76	77,76	155,52	68,32	136,64	51,22	102,43	39,98	79,96	
21	83,09	166,18	78,52	157,04	69,14	138,27	52,07	104,14	40,83	81,66	
22	83,77	167,55	79,25	158,50	69,92	139,83	52,89	105,77	41,64	83,29	
23	84,43	168,85	79,95	159,89	70,67	141,33	53,67	107,34	42,43	84,86	
24	85,06	170,11	80,62	161,24	71,39	142,78	54,43	108,85	43,19	86,37	
25	85,66	171,32	81,27	162,53	72,08	144,17	55,16	110,31	43,92	87,83	
26	86,24	172,48	81,89	163,78	72,75	145,51	55,86	111,72	44,62	89,24	
27	86,80	173,61	82,49	164,98	73,40	146,80	56,54	113,08	45,30	90,61	
28	87,35	174,70	83,07	166,15	74,03	148,05	57,20	114,40	45,97	91,93	
29	87,87	175,75	83,64	167,27	74,63	149,27	57,84	115,68	46,61	93,21	
30	88,38	176,77	84,18	168,36	75,22	150,44	58,46	116,92	47,23	94,46	

Tabel B4: Doodgewicht per m² dakvlak[kg/m²] v_{b,0} = 26 m/s ; μ = 0,7 ; alfa = 15° ; beschaduwingshelling = 15,5°

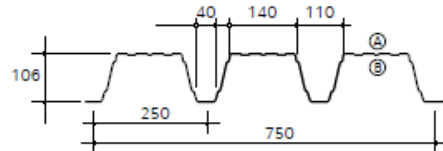
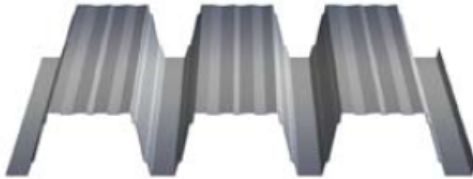
		v _{b,0} = 25m/s ; μ = 0,7 ; alfa = 15° ; beschaduwingshelling = 15,5°									
		0		1		2		3		4	
		midden	rand	midden	rand	midden	rand	midden	rand	midden	rand
1		38,90	77,79	33,07	66,13	30,56	61,12	25,89	51,78	25,25	50,50
2		45,89	91,79	40,31	80,63	30,56	61,12	25,89	51,78	25,25	50,50
3		50,22	100,44	44,83	89,66	35,21	70,41	25,89	51,78	25,25	50,50
4		53,39	106,78	48,16	96,32	38,66	77,31	25,89	51,78	25,25	50,50
5		55,91	111,83	50,81	101,62	41,42	82,84	25,89	51,78	25,25	50,50
6		58,01	116,02	53,02	106,04	43,74	87,48	28,21	56,42	25,25	50,50
7		59,81	119,63	54,92	109,85	45,74	91,47	30,22	60,45	25,25	50,50
8		61,39	122,79	56,60	113,19	47,50	95,00	32,01	64,01	25,25	50,50
9		62,80	125,61	58,09	116,18	49,07	98,15	33,61	67,22	25,25	50,50
10		64,08	128,15	59,44	118,88	50,50	101,01	35,07	70,14	25,25	50,50
11		65,24	130,48	60,67	121,34	51,81	103,62	36,41	72,81	26,57	53,13
12		66,31	132,62	61,81	123,62	53,02	106,03	37,64	75,29	27,79	55,57
13		67,30	134,60	62,86	125,72	54,13	108,27	38,80	77,59	28,92	57,85
14		68,22	136,44	63,84	127,68	55,18	110,36	39,88	79,75	29,99	59,98
15		69,09	138,17	64,76	129,52	56,16	112,32	40,89	81,78	30,99	61,99
16		69,90	139,80	65,63	131,26	57,08	114,17	41,85	83,70	31,94	63,89
17		70,67	141,33	66,45	132,89	57,96	115,92	42,76	85,51	32,84	65,69
18		71,39	142,79	67,22	134,45	58,79	117,57	43,62	87,24	33,70	67,40
19		72,08	144,17	67,96	135,92	59,58	119,15	44,44	88,88	34,52	69,04
20		72,74	145,49	68,66	137,33	60,33	120,66	45,23	90,45	35,30	70,60
21		73,37	146,74	69,33	138,67	61,05	122,10	45,98	91,95	36,05	72,10
22		73,97	147,95	69,98	139,96	61,74	123,48	46,70	93,40	36,77	73,54
23		74,55	149,10	70,59	141,19	62,40	124,80	47,39	94,78	37,47	74,93
24		75,11	150,21	71,19	142,38	63,04	126,07	48,06	96,12	38,13	76,27
25		75,64	151,28	71,76	143,52	63,65	127,30	48,70	97,41	38,78	77,56
26		76,15	152,31	72,31	144,62	64,24	128,48	49,33	98,65	39,40	78,80
27		76,65	153,30	72,84	145,68	64,81	129,63	49,93	99,86	40,00	80,01
28		77,13	154,26	73,35	146,71	65,37	130,73	50,51	101,02	40,59	81,18
29		77,59	155,19	73,85	147,70	65,90	131,80	51,07	102,15	41,16	82,31
30		78,04	156,09	74,33	148,67	66,42	132,84	51,62	103,24	41,71	83,41

Bijlage C: Technische fiche geprofileerde staalplaat HACIERCO 106

Arval

HACIERCO
106.250.750 HR

Zelfdragende onderdakplaat voor plat dak



Eigenschappen van het basismateriaal		NORMEN
Staalsoort	S320 GD	EN 103206
Aard van bescherming	verzinkt voorgelekt staal	EN 10326 EN 10169-1

Technische kenmerken

Nominale plaatdikte	mm	0,7	0,75	0,88	1	1,25
Gewicht	kg/m ²	9,3	9,9	11,7	12,2	16,7
RE	N/mm ²	320	320	320	320	320
Max. veldmoment	kg.m	564	607	724	827	1035
Max. steunpuntmoment	kg.m	550	599	730	829	1035
Inertie I	cm ⁴	173	188	226	257	321
Weerstandsmoment W	cm ³	25,8	28,1	33,9	38,8	48,6
Steunpuntreactie	kg	3115	3556	4721	6009	9096
Maximum lengte	m	18.0*	18.0*	18.0*	18.0*	18.0*

* Voor grotere lengtes - gelieve ons te consulteren

Opmerkingen

Kleuren en coatings volgens onze Belgian Colorissime.
Het profiel wordt standaard verzinkt - 275gr/m².
Gelieve ons te raadplegen voor niet-standaard coatings.

Overspanningstabel (m)

DRUK BELASTING kg/m ²	DIKTE mm	ENKELVELDS				TWEVELDS				DRIEVELDS			
		DOORBUIGING											
		1/150	1/200	1/250	1/300	1/150	1/200	1/250	1/300	1/150	1/200	1/250	1/300
100	0.70	5.71	5.19	4.81	4.53	6.63	6.63	6.45	6.07	7.24	6.58	6.11	5.75
	0.75	5.86	5.33	4.95	4.65	6.92	6.92	6.63	6.24	7.44	6.76	6.28	5.91
	0.88	6.24	5.67	5.26	4.95	7.64	7.60	7.05	6.64	7.92	7.19	6.68	6.28
	1.00	6.51	5.91	5.49	5.17	8.14	7.93	7.36	6.93	8.26	7.51	6.97	6.56
	1.25	7.01	6.37	5.91	5.57	9.10	8.54	7.93	7.46	8.90	8.08	7.51	7.06
110	0.70	5.53	5.02	4.66	4.39	6.32	6.32	6.25	5.88	7.02	6.38	5.92	5.57
	0.75	5.68	5.16	4.79	4.51	6.60	6.60	6.42	6.04	7.21	6.55	6.08	5.72
	0.88	6.05	5.49	5.10	4.80	7.28	7.28	6.83	6.43	7.67	6.97	6.47	6.09
	1.00	6.31	5.73	5.32	5.01	7.76	7.68	7.13	6.71	8.00	7.27	6.75	6.35
	1.25	6.79	6.17	5.73	5.39	8.68	8.27	7.68	7.23	8.62	7.83	7.27	6.84
120	0.70	5.37	4.88	4.53	4.26	6.05	6.05	6.05	5.72	6.77	6.19	5.75	5.41
	0.75	5.52	5.01	4.65	4.38	6.32	6.32	6.24	5.87	7.00	6.36	5.91	5.56
	0.88	5.87	5.34	4.95	4.66	6.97	6.97	6.64	6.25	7.45	6.77	6.28	5.91
	1.00	6.13	5.57	5.17	4.86	7.43	7.43	6.93	6.52	7.77	7.06	6.56	6.17
	1.25	6.60	5.99	5.57	5.24	8.31	8.04	7.46	7.02	8.37	7.61	7.06	6.65
125	0.70	5.30	4.81	4.47	4.20	5.93	5.93	5.93	5.64	6.63	6.11	5.67	5.34
	0.75	5.44	4.95	4.59	4.32	6.19	6.19	6.15	5.79	6.91	6.28	5.82	5.48
	0.88	5.79	5.26	4.89	4.60	6.83	6.83	6.55	6.16	7.35	6.68	6.20	5.83
	1.00	6.04	5.49	5.10	4.80	7.28	7.28	6.83	6.43	7.67	6.97	6.47	6.09
	1.25	6.51	5.91	5.49	5.17	8.14	7.93	7.36	6.93	8.26	7.51	6.97	6.56
150	0.70	4.99	4.53	4.20	3.96	5.42	5.42	5.42	5.30	6.05	5.75	5.34	5.02
	0.75	5.12	4.65	4.32	4.07	5.65	5.65	5.65	5.45	6.32	5.91	5.48	5.16
	0.88	5.45	4.95	4.60	4.33	6.24	6.24	6.16	5.80	6.92	6.28	5.83	5.49
	1.00	5.69	5.17	4.80	4.51	6.65	6.65	6.43	6.05	7.22	6.56	6.09	5.73
	1.25	6.13	5.57	5.17	4.86	7.43	7.43	6.93	6.52	7.77	7.06	6.56	6.17
200	0.70	4.53	4.12	3.82	3.60	4.69	4.69	4.69	4.69	5.24	5.22	4.85	4.56
	0.75	4.65	4.23	3.92	3.69	4.89	4.89	4.89	4.89	5.47	5.36	4.98	4.69
	0.88	4.95	4.50	4.18	3.93	5.40	5.40	5.40	5.27	6.04	5.71	5.30	4.99
	1.00	5.17	4.70	4.36	4.10	5.76	5.76	5.76	5.50	6.44	5.96	5.53	5.20
	1.25	5.57	5.06	4.69	4.42	6.43	6.43	6.29	5.92	7.06	6.42	5.96	5.61

Bijlage D: Kasstromen haalbaarheidsstudie

Tabel D1: Kasstroom productiehal installatiekost +constructiekost volgens praktijk

	kosten		Rendement installat		Opbrengsten		Resultaatrekening			Kasstroom		NPV	IRR
	Verzek.	Ond.+omv.	Rend.	productie	GSC	Electriciteit	Afschr.	EBIT	belasting	jaarlijks	geaccum.		
j0													
j1	443,83	1.250,00	99,35%	42.432,00	12.729,60	2.121,60	7.865,55	5.291,82	1.798,69	11.358,68	-138.600,00	-138.600,00	-138.600,00
j2	443,83	1.275,00	98,70%	42.156,19	12.646,86	2.164,72	7.865,55	5.227,20	1.776,73	11.316,02	-127.241,32	10.468,83	10.468,83
j3	443,83	1.300,50	98,05%	41.880,38	12.564,12	2.208,62	7.865,55	5.162,86	1.754,86	11.273,55	-115.925,29	9.612,46	10.319,96
j4	443,83	1.326,51	97,40%	41.604,58	12.481,37	2.253,32	7.865,55	5.098,80	1.733,08	11.231,27	-104.651,74	8.826,16	9.818,32
j5	443,83	1.353,04	96,75%	41.328,77	12.398,63	2.298,82	7.865,55	5.035,03	1.711,41	11.189,17	-93.420,47	8.104,20	9.341,08
j6	443,83	1.380,10	96,10%	41.052,96	12.315,89	2.345,13	7.865,55	4.971,54	1.689,83	11.147,26	-82.231,30	7.441,31	8.887,06
j7	443,83	1.407,70	95,45%	40.777,15	12.233,15	2.392,27	7.865,55	4.908,33	1.668,34	11.105,54	-71.084,04	6.832,66	8.455,14
j8	443,83	1.435,86	94,80%	40.501,34	12.150,40	2.440,24	7.865,55	4.845,41	1.646,95	11.064,00	-59.978,50	6.273,81	8.044,22
j9	443,83	1.464,57	94,15%	40.225,54	12.067,66	2.489,06	7.865,55	4.782,77	1.625,66	11.022,66	-48.914,49	5.760,69	7.653,30
j10	443,83	1.493,87	93,50%	39.949,73	11.984,92	2.538,74	7.865,55	4.720,41	1.604,47	10.981,49	-37.891,84	5.289,55	7.281,40
j11	443,83	1.523,74	92,85%	39.673,92	11.902,18	2.589,28	7.865,55	4.658,34	1.583,37	10.940,52	-26.910,34	4.856,95	6.927,59
j12	443,83	1.554,22	92,20%	39.398,11	11.819,43	2.640,71	7.865,55	4.596,55	1.562,37	10.899,73	-15.969,82	4.459,75	6.590,99
j13	443,83	1.585,30	91,55%	39.122,30	11.736,69	2.693,02	7.865,55	4.535,03	1.541,46	10.859,12	-5.070,09	4.095,05	6.270,77
j14	443,83	1.617,01	90,90%	38.846,50	11.653,95	2.746,23	7.865,55	4.473,80	1.520,64	10.818,70	5.789,03	3.760,18	5.966,12
j15	443,83	1.649,35	90,25%	38.570,69	11.571,21	2.800,36	7.865,55	4.412,09	1.500,64	10.778,28	16.607,73	3.452,70	5.676,28
j16	443,83	1.682,34	89,60%	38.294,88	11.488,46	2.855,40	7.865,55	4.352,15	1.479,30	10.738,41	29.873,35	2.911,15	5.138,22
j17	443,83	1.715,98	88,95%	38.019,07	11.405,72	2.911,38	7.865,55	4.291,74	1.458,76	10.698,53	40.571,88	2.673,12	4.888,65
j18	443,83	1.750,30	88,30%	37.743,26	11.322,98	2.968,29	7.865,55	4.231,59	1.438,32	10.658,83	51.230,71	2.454,56	4.651,22
j19	443,83	1.785,31	87,65%	37.467,46	11.240,24	3.026,16	7.865,55	4.171,71	1.417,97	10.619,30	61.850,01	2.253,88	4.425,32
j20	443,83	1.821,01	87,00%	37.191,65	11.157,49	3.084,99	7.865,55	4.112,09	1.397,70	10.579,94	72.429,95	2.069,61	4.210,41
j21	443,83	1.857,43	86,35%	36.915,84	0,00	3.144,79	0,00	843,53	286,72	556,81	72.986,76	100,39	211,61
j22	443,83	1.894,58	85,70%	36.640,03	0,00	3.205,57	0,00	867,16	294,75	572,41	73.559,17	95,12	207,75
j23	443,83	1.932,47	85,05%	36.364,22	0,00	3.267,34	0,00	891,04	302,86	588,17	74.147,34	90,08	203,86
j24	443,83	1.971,12	84,40%	36.088,42	0,00	3.330,11	0,00	915,15	311,06	604,09	74.751,44	85,27	199,95
j25	443,83	2.010,55	83,75%	35.812,61	0,00	3.393,88	0,00	939,51	319,34	620,17	75.371,61	80,68	196,02
j26	443,83	2.050,76	83,10%	35.536,80	0,00	3.458,67	0,00	964,09	327,69	636,39	76.008,00	76,30	192,10
j27	443,83	2.091,77	82,45%	35.260,99	0,00	3.524,49	0,00	988,89	336,12	652,76	76.660,76	72,14	188,17
j28	443,83	2.133,61	81,80%	34.985,18	0,00	3.591,34	0,00	1.013,90	344,62	669,28	77.330,04	68,17	184,24
j29	443,83	2.176,28	81,15%	34.709,38	0,00	3.659,23	0,00	1.039,12	353,20	685,92	78.015,96	64,39	180,32
j30	443,83	2.219,81	80,50%	34.433,57	0,00	3.728,16	0,00	1.064,53	361,83	702,70	78.718,66	60,80	176,41
											som:	-35.466,71	€0,00

Tabel D2: Kasstroom productiehal installatiekost +constructiekost volgens ontwerpmethode

	kosten		Rendement installat		Opbrengsten		Resultaatrekening			Kasstroom		NPV	IRR
	Verzek.	Ond.+omv.	Rend.	productie	GSC	Electriciteit	Afschr.	EBIT	belasting	jaarlijks	geaccum.		
j0													
j1	443,83	1.250,00	99,35%	42.432,00	12.729,60	2.121,60	8.519,82	4.637,55	1.576,30	11.581,07	-150.129,00	-150.129,00	-150.129,00
j2	443,83	1.275,00	98,70%	42.156,19	12.646,86	2.164,72	8.519,82	4.572,93	1.554,34	11.538,41	-138.547,93	10.673,80	11.132,85
j3	443,83	1.300,50	98,05%	41.880,38	12.564,12	2.208,62	8.519,82	4.508,59	1.532,47	11.495,94	-127.009,52	9.801,36	10.662,56
j4	443,83	1.326,51	97,40%	41.604,58	12.481,37	2.253,32	8.519,82	4.444,53	1.510,70	11.453,66	-115.513,58	9.000,26	10.212,16
j5	443,83	1.353,04	96,75%	41.328,77	12.398,63	2.298,82	8.519,82	4.380,76	1.489,02	11.411,56	-104.059,92	8.264,66	9.780,82
j6	443,83	1.380,10	96,10%	41.052,96	12.315,89	2.345,13	8.519,82	4.317,27	1.467,44	11.369,65	-92.648,36	7.589,20	9.367,72
j7	443,83	1.407,70	95,45%	40.777,15	12.233,15	2.392,27	8.519,82	4.254,06	1.445,96	11.327,93	-81.278,72	6.968,97	8.972,09
j8	443,83	1.435,86	94,80%	40.501,34	12.150,40	2.440,24	8.519,82	4.191,14	1.424,57	11.286,39	-69.950,79	6.399,44	8.593,19
j9	443,83	1.464,57	94,15%	40.225,54	12.067,66	2.489,06	8.519,82	4.128,50	1.403,28	11.245,04	-58.664,40	5.876,48	8.230,33
j10	443,83	1.493,87	93,50%	39.949,73	11.984,92	2.538,74	8.519,82	4.066,14	1.382,08	11.203,88	-47.419,36	5.396,27	7.882,80
j11	443,83	1.523,74	92,85%	39.673,92	11.902,18	2.589,28	8.519,82	4.004,07	1.360,98	11.162,91	-36.215,48	4.955,31	7.549,98
j12	443,83	1.554,22	92,20%	39.398,11	11.819,43	2.640,71	8.519,82	3.942,27	1.339,98	11.122,12	-25.052,57	4.550,41	7.231,23
j13	443,83	1.585,30	91,55%	39.122,30	11.736,69	2.693,02	8.519,82	3.880,76	1.319,07	11.081,51	-13.930,45	4.178,60	6.925,97
j14	443,83	1.617,01	90,90%	38.846,50	11.653,95	2.746,23	8.519,82	3.819,53	1.298,26	11.041,09	-2.848,94	3.837,18	6.633,61
j15	443,83	1.649,35	90,25%	38.570,69	11.571,21	2.800,36	8.519,82	3.757,32	1.277,32	10.999,81	8.192,15	3.523,67	6.353,61
j16	443,83	1.682,34	89,60%	38.294,88	11.488,46	2.855,40	8.519,82	3.697,88	1.256,91	10.960,79	10.941,75	808,77	1.521,02
j17	443,83	1.715,98	88,95%	38.019,07	11.405,72	2.911,38	8.519,82	3.637,47	1.236,38	10.920,91	21.902,54	2.971,43	5.828,62
j18	443,83	1.750,30	88,30%	37.743,26	11.322,98	2.968,29	8.519,82	3.577,32	1.215,93	10.881,21	32.823,45	2.728,69	5.582,65
j19	443,83	1.785,31	87,65%	37.467,46	11.240,24	3.026,16	8.519,82	3.517,44	1.195,58	10.841,68	43.704,67	2.505,77	5.347,08
j20	443,83	1.821,01	87,00%	37.191,65	11.157,49	3.084,99	8.519,82	3.457,82	1.175,31	10.802,33	54.546,35	2.301,08	5.121,46
j21	443,83	1.857,43	86,35%	36.915,84	0,00	3.144,79	0,00	843,53	286,72	556,81	65.348,68	2.113,11	4.905,37
j22	443,83	1.894,58	85,70%	36.640,03	0,00	3.205,57	0,00	867,16	294,75	572,41	65.905,49	100,39	243,06
j23	443,83	1.932,47	85,05%	36.364,22	0,00	3.267,34	0,00	891,04	302,86	588,17	66.477,90	95,12	240,20
j24	443,83	1.971,12	84,40%	36.088,42	0,00	3.330,11	0,00	915,15	311,06	604,09	67.066,08	90,08	237,26
j25	443,83	2.010,55	83,75%	35.812,61	0,00	3.393,88	0,00	939,51	319,34	620,17	67.670,17	85,27	234,26
j26	443,83	2.050,76	83,10%	35.536,80	0,00	3.458,67	0,00	964,09	327,69	636,39	68.290,34	80,68	231,18
j27	443,83	2.091,77	82,45%	35.260,99	0,00	3.524,49	0,00	988,89	336,12	652,76	68.926,73	76,30	228,05
j28	443,83	2.133,61	81,80%	34.985,18	0,00	3.591,34	0,00	1.013,90	344,62	669,28	69.579,50	72,14	224,86
j29	443,83	2.176,28	81,15%	34.709,38	0,00	3.659,23	0,00	1.039,12	353,20	685,92	70.248,77	68,17	221,63
j30	443,83	2.219,81	80,50%	34.433,57	0,00	3.728,16	0,00	1.064,53	361,83	702,70	70.934,69	64,39	218,35
											71.637,39	60,80	215,03
											som:	-44.891,19	€ 0,00

Tabel D3: Kasstroom opslagloods enkel installatiekost

	kosten		Rendement installat		Opbrengsten		Resultaatrekening			Kasstroom		NPV	IRR
	Verzek.	Ond.+omv.	Rend.	productie	GSC	Electriciteit	Afschr.	EBIT	belasting	jaarlijks	geaccum.		
j0													
j1	443,83	1.250,00	99,35%	42.432,00	12.729,60	5.728,32	7.224,73	9.539,36	3.242,43	-127.308,00	-127.308,00	-127.308,00	-127.308,00
j2	443,83	1.275,00	98,70%	42.156,19	12.646,86	5.844,75	7.224,73	9.548,05	3.245,38	13.521,66	-113.786,34	12.462,36	12.409,70
j3	443,83	1.300,50	98,05%	41.880,38	12.564,12	5.963,28	7.224,73	9.558,34	3.248,88	13.527,39	-100.258,94	11.490,92	11.394,00
j4	443,83	1.326,51	97,40%	41.604,58	12.481,37	6.083,96	7.224,73	9.570,26	3.252,93	13.534,19	-86.724,75	10.596,03	10.462,26
j5	443,83	1.353,04	96,75%	41.328,77	12.398,63	6.206,80	7.224,73	9.583,84	3.257,55	13.542,06	-73.182,69	9.771,60	9.607,47
j6	443,83	1.380,10	96,10%	41.052,96	12.315,89	6.331,85	7.224,73	9.599,08	3.262,73	13.551,02	-59.631,67	9.012,04	8.823,22
j7	443,83	1.407,70	95,45%	40.777,15	12.233,15	6.459,12	7.224,73	9.616,01	3.268,48	13.561,08	-46.070,59	8.312,20	8.103,65
j8	443,83	1.435,86	94,80%	40.501,34	12.150,40	6.588,65	7.224,73	9.634,64	3.274,81	13.572,25	-32.498,34	7.667,32	7.443,37
j9	443,83	1.464,57	94,15%	40.225,54	12.067,66	6.720,46	7.224,73	9.654,99	3.281,73	13.584,55	-18.913,79	7.073,06	6.837,45
j10	443,83	1.493,87	93,50%	39.949,73	11.984,92	6.854,59	7.224,73	9.677,09	3.289,24	13.597,99	-5.315,80	6.525,40	6.281,37
j11	443,83	1.523,74	92,85%	39.673,92	11.902,18	6.991,06	7.224,73	9.700,94	3.297,35	13.612,57	8.296,78	6.020,64	5.771,00
j12	443,83	1.554,22	92,20%	39.398,11	11.819,43	7.129,91	7.224,73	9.726,57	3.306,06	13.628,32	21.925,10	5.555,40	5.302,54
j13	443,83	1.585,30	91,55%	39.122,30	11.736,69	7.271,16	7.224,73	9.753,99	3.315,38	13.645,24	35.570,33	5.126,54	4.872,52
j14	443,83	1.617,01	90,90%	38.846,50	11.653,95	7.414,83	7.224,73	9.783,22	3.325,32	13.663,34	49.233,67	4.731,19	4.477,76
j15	443,83	1.649,35	90,25%	38.570,69	11.571,21	7.560,97	7.224,73	-2.685,73	-912,88	5.451,88	62.916,30	4.366,70	4.115,33
j16	443,83	1.682,34	89,60%	38.294,88	11.488,46	7.709,59	7.224,73	9.847,16	3.347,05	13.724,84	82.093,02	3.720,76	3.477,00
j17	443,83	1.715,98	88,95%	38.019,07	11.405,72	7.860,72	7.224,73	9.881,90	3.358,86	13.747,77	95.840,79	3.435,00	3.196,40
j18	443,83	1.750,30	88,30%	37.743,26	11.322,98	8.014,40	7.224,73	9.918,52	3.371,30	13.771,94	109.612,73	3.171,46	2.938,69
j19	443,83	1.785,31	87,65%	37.467,46	11.240,24	8.170,64	7.224,73	9.957,01	3.384,39	13.797,35	123.410,08	2.928,40	2.702,00
j20	443,83	1.821,01	87,00%	37.191,65	11.157,49	8.329,47	7.224,73	9.997,40	3.398,12	13.824,01	137.234,09	2.704,20	2.484,59
j21	443,83	1.857,43	86,35%	36.915,84	0,00	8.490,93	0,00	6.189,67	2.103,87	4.085,80	141.319,90	736,64	673,95
j22	443,83	1.894,58	85,70%	36.640,03	0,00	8.655,04	0,00	6.316,63	2.147,02	4.169,60	145.489,50	692,85	631,22
j23	443,83	1.932,47	85,05%	36.364,22	0,00	8.821,81	0,00	6.445,51	2.190,83	4.254,68	149.744,18	651,60	591,13
j24	443,83	1.971,12	84,40%	36.088,42	0,00	8.991,29	0,00	6.576,33	2.235,30	4.341,04	154.085,22	612,75	553,53
j25	443,83	2.010,55	83,75%	35.812,61	0,00	9.163,48	0,00	6.709,10	2.280,42	4.428,68	158.513,90	576,14	518,26
j26	443,83	2.050,76	83,10%	35.536,80	0,00	9.338,42	0,00	6.843,83	2.326,22	4.517,61	163.031,51	541,67	485,20
j27	443,83	2.091,77	82,45%	35.260,99	0,00	9.516,12	0,00	6.980,52	2.372,68	4.607,84	167.639,35	509,21	454,19
j28	443,83	2.133,61	81,80%	34.985,18	0,00	9.696,61	0,00	7.119,17	2.419,81	4.699,37	172.338,72	478,64	425,12
j29	443,83	2.176,28	81,15%	34.709,38	0,00	9.879,91	0,00	7.259,80	2.467,61	4.792,20	177.130,91	449,85	397,86
j30	443,83	2.219,81	80,50%	34.433,57	0,00	10.066,04	0,00	7.402,41	2.516,08	4.886,33	182.017,24	422,76	372,32
											some:	4.638,95	€ 0,00

Tabel D4: Kasstroom opslagloods installatiekost +constructiekost volgens praktijk

	kosten		Rendement installat		Opbrengsten		Resultaatrekening		Kasstroom		NPV	IRR
	Verzek.	Ond.+omv.	Rend.	productie	GSC	Electriciteit	Afschr.	EBIT	belasting	jaarlijks		
j0										-135.600,00	-135.600,00	-135.600,00
j1	443,83	1.250,00	99,35%	42.432,00	12.729,60	5.728,32	7.695,30	9.068,79	3.082,48	13.681,61	-121.918,39	12.609,78
j2	443,83	1.275,00	98,70%	42.156,19	12.646,86	5.844,75	7.695,30	9.077,47	3.085,43	13.687,34	-108.231,05	11.626,78
j3	443,83	1.300,50	98,05%	41.880,38	12.564,12	5.963,28	7.695,30	9.087,77	3.088,93	13.694,14	-94.536,91	10.721,25
j4	443,83	1.326,51	97,40%	41.604,58	12.481,37	6.083,96	7.695,30	9.099,69	3.092,99	13.702,01	-80.834,91	9.887,02
j5	443,83	1.353,04	96,75%	41.328,77	12.398,63	6.206,80	7.695,30	9.113,27	3.097,60	13.710,97	-67.123,94	9.118,42
j6	443,83	1.380,10	96,10%	41.052,96	12.315,89	6.331,85	7.695,30	9.128,51	3.102,78	13.721,03	-53.402,91	8.410,24
j7	443,83	1.407,70	95,45%	40.777,15	12.233,15	6.459,12	7.695,30	9.145,43	3.108,53	13.732,20	-39.670,71	7.757,68
j8	443,83	1.435,86	94,80%	40.501,34	12.150,40	6.588,65	7.695,30	9.164,07	3.114,87	13.744,50	-25.926,21	7.156,34
j9	443,83	1.464,57	94,15%	40.225,54	12.067,66	6.720,46	7.695,30	9.184,42	3.121,78	13.757,94	-12.168,27	6.602,15
j10	443,83	1.493,87	93,50%	39.949,73	11.984,92	6.854,59	7.695,30	9.206,52	3.129,29	13.772,52	1.604,25	6.091,39
j11	443,83	1.523,74	92,85%	39.673,92	11.902,18	6.991,06	7.695,30	9.230,37	3.137,40	13.788,27	15.392,51	5.620,60
j12	443,83	1.554,22	92,20%	39.398,11	11.819,43	7.129,91	7.695,30	9.256,00	3.146,11	13.805,18	29.197,70	5.186,63
j13	443,83	1.585,30	91,55%	39.122,30	11.736,69	7.271,16	7.695,30	9.283,42	3.155,43	13.823,28	43.020,98	4.786,57
j14	443,83	1.617,01	90,90%	38.846,50	11.653,95	7.414,83	7.695,30	9.312,65	3.165,37	13.842,58	56.863,56	4.417,74
j15	443,83	1.649,35	90,25%	38.570,69	11.571,21	7.560,97	7.695,30	-3.156,30	-1.072,83	5.611,82	62.475,38	1.650,66
j16	443,83	1.682,34	89,60%	38.294,88	11.488,46	7.709,59	7.695,30	9.376,59	3.187,10	13.884,79	76.360,17	3.764,12
j17	443,83	1.715,98	88,95%	38.019,07	11.405,72	7.860,72	7.695,30	9.411,33	3.198,91	13.907,72	90.267,89	3.474,96
j18	443,83	1.750,30	88,30%	37.743,26	11.322,98	8.014,40	7.695,30	9.447,94	3.211,36	13.931,89	104.199,78	3.208,30
j19	443,83	1.785,31	87,65%	37.467,46	11.240,24	8.170,64	7.695,30	9.486,44	3.224,44	13.957,30	118.157,08	2.962,35
j20	443,83	1.821,01	87,00%	37.191,65	11.157,49	8.329,47	7.695,30	9.526,83	3.238,17	13.983,96	132.141,04	2.735,49
j21	443,83	1.857,43	86,35%	36.915,84	0,00	8.490,93	0,00	6.189,67	2.103,87	4.085,80	136.226,84	736,64
j22	443,83	1.894,58	85,70%	36.640,03	0,00	8.655,04	0,00	6.316,63	2.147,02	4.169,60	140.396,44	692,85
j23	443,83	1.932,47	85,05%	36.364,22	0,00	8.821,81	0,00	6.445,51	2.190,83	4.254,68	144.651,12	651,60
j24	443,83	1.971,12	84,40%	36.088,42	0,00	8.991,29	0,00	6.576,33	2.235,30	4.341,04	148.992,16	612,75
j25	443,83	2.010,55	83,75%	35.812,61	0,00	9.163,48	0,00	6.709,10	2.280,42	4.428,68	153.420,84	576,14
j26	443,83	2.050,76	83,10%	35.536,80	0,00	9.338,42	0,00	6.843,83	2.326,22	4.517,61	157.938,45	541,67
j27	443,83	2.091,77	82,45%	35.260,99	0,00	9.516,12	0,00	6.980,52	2.372,68	4.607,84	162.546,29	509,21
j28	443,83	2.133,61	81,80%	34.985,18	0,00	9.696,61	0,00	7.119,17	2.419,81	4.699,37	167.245,66	478,64
j29	443,83	2.176,28	81,15%	34.709,38	0,00	9.879,91	0,00	7.259,80	2.467,61	4.792,20	172.037,85	449,85
j30	443,83	2.219,81	80,50%	34.433,57	0,00	10.066,04	0,00	7.402,41	2.516,08	4.886,33	176.924,18	422,76
											som:	-2.139,42
												€ 0,00

Tabel D5: Kasstroom opslagloods installatiekost +constructiekost volgens ontwerpmethode

	kosten		Rendement installat		Opbrengsten		Resultaatrekening			Kasstroom		NPV	IRR
	Verzek.	Ond.+omv.	Rend.	productie	GSC	Electriciteit	Afschr.	EBIT	belasting	jaarlijks	geaccum.		
j0													
j1	443,83	1.250,00	99,35%	42.432,00	12.729,60	5.728,32	8.349,57	8.414,52	2.860,10	-147.129,00	-147.129,00	-147.129,00	-147.129,00
j2	443,83	1.275,00	98,70%	42.156,19	12.646,86	5.844,75	8.349,57	8.423,20	2.863,05	13.904,00	-133.225,00	12.814,74	12.935,75
j3	443,83	1.300,50	98,05%	41.880,38	12.564,12	5.963,28	8.349,57	8.433,50	2.866,55	13.909,73	-119.315,28	11.815,69	12.039,88
j4	443,83	1.326,51	97,40%	41.604,58	12.481,37	6.083,96	8.349,57	8.445,42	2.870,60	13.916,52	-105.398,75	10.895,36	11.206,92
j5	443,83	1.353,04	96,75%	41.328,77	12.398,63	6.206,80	8.349,57	8.459,00	2.875,21	13.924,39	-91.474,36	10.047,48	10.432,38
j6	443,83	1.380,10	96,10%	41.052,96	12.315,89	6.331,85	8.349,57	8.474,24	2.880,39	13.933,35	-77.541,01	9.266,31	9.712,14
j7	443,83	1.407,70	95,45%	40.777,15	12.233,15	6.459,12	8.349,57	8.491,16	2.886,15	13.943,41	-63.597,59	8.546,55	9.042,32
j8	443,83	1.435,86	94,80%	40.501,34	12.150,40	6.588,65	8.349,57	8.509,80	2.892,48	13.954,59	-49.643,00	7.883,31	8.419,37
j9	443,83	1.464,57	94,15%	40.225,54	12.067,66	6.720,46	8.349,57	8.530,15	2.899,40	13.966,89	-35.676,12	7.272,13	7.839,96
j10	443,83	1.493,87	93,50%	39.949,73	11.984,92	6.854,59	8.349,57	8.552,25	2.906,91	13.980,32	-21.695,79	6.708,87	7.301,02
j11	443,83	1.523,74	92,85%	39.673,92	11.902,18	6.991,06	8.349,57	8.576,10	2.915,02	13.994,91	-7.700,89	6.189,74	6.799,68
j12	443,83	1.554,22	92,20%	39.398,11	11.819,43	7.129,91	8.349,57	8.601,73	2.923,73	14.010,65	6.309,77	5.711,25	6.333,27
j13	443,83	1.585,30	91,55%	39.122,30	11.736,69	7.271,16	8.349,57	8.629,15	2.933,05	14.027,57	20.337,34	5.270,18	5.899,35
j14	443,83	1.617,01	90,90%	38.846,50	11.653,95	7.414,83	8.349,57	8.658,37	2.942,98	14.045,67	34.383,01	4.863,58	5.495,61
j15	443,83	1.649,35	90,25%	38.570,69	11.571,21	7.560,97	8.349,57	8.682,21	2.952,21	14.064,96	48.447,97	4.488,72	5.119,93
j16	443,83	1.682,34	89,60%	38.294,88	11.488,46	7.709,59	8.349,57	8.722,32	2.964,72	5.834,21	54.282,18	1.716,07	1.975,87
j17	443,83	1.715,98	88,95%	38.019,07	11.405,72	7.860,72	8.349,57	8.757,06	2.976,53	14.107,17	68.389,36	3.824,41	4.444,97
j18	443,83	1.750,30	88,30%	37.743,26	11.322,98	8.014,40	8.349,57	8.793,67	2.988,97	14.130,11	82.519,46	3.530,53	4.142,15
j19	443,83	1.785,31	87,65%	37.467,46	11.240,24	8.170,64	8.349,57	8.832,17	3.002,05	14.154,28	96.673,74	3.259,51	3.860,29
j20	443,83	1.821,01	87,00%	37.191,65	11.157,49	8.329,47	8.349,57	8.872,56	3.015,78	14.179,68	110.853,42	3.009,55	3.597,92
j21	443,83	1.857,43	86,35%	36.915,84	0,00	8.490,93	0,00	6.189,67	2.103,87	14.206,35	125.059,77	2.778,99	3.353,66
j22	443,83	1.894,58	85,70%	36.640,03	0,00	8.655,04	0,00	6.316,63	2.147,02	4.085,80	129.145,57	736,64	897,36
j23	443,83	1.932,47	85,05%	36.364,22	0,00	8.821,81	0,00	6.445,51	2.190,83	4.169,60	133.315,17	692,85	851,99
j24	443,83	1.971,12	84,40%	36.088,42	0,00	8.991,29	0,00	6.576,33	2.235,30	4.254,68	137.569,86	651,60	808,83
j25	443,83	2.010,55	83,75%	35.812,61	0,00	9.163,48	0,00	6.709,10	2.280,42	4.341,04	141.910,89	612,75	767,78
j26	443,83	2.050,76	83,10%	35.536,80	0,00	9.338,42	0,00	6.843,83	2.326,22	4.428,68	146.339,57	576,14	728,73
j27	443,83	2.091,77	82,45%	35.260,99	0,00	9.516,12	0,00	6.980,52	2.372,68	4.517,61	150.857,19	541,67	691,60
j28	443,83	2.133,61	81,80%	34.985,18	0,00	9.696,61	0,00	7.119,17	2.419,81	4.607,84	155.465,02	509,21	656,29
j29	443,83	2.176,28	81,15%	34.709,38	0,00	9.879,91	0,00	7.259,80	2.467,61	4.699,37	160.164,39	478,64	622,72
j30	443,83	2.219,81	80,50%	34.433,57	0,00	10.066,04	0,00	7.402,41	2.516,08	4.792,20	164.956,59	449,85	590,80
										4.886,33	169.842,91	422,76	560,45
											som:	-11.563,90	€ 0,00

Bibliografie

1. [Online] [Citaat van: 23 05 2011.] http://www.ode.be/images/zonnestroom/pv_markt2006-2010_600p.jpg.
2. **VREG.** *Marktmonitor 2010*. 2010.
3. **Depreeuw, D. en De Kooning, Q.** *De invloed van ventilatie op het rendement van zonnepanelen*. 2010.
4. [Online] [Citaat van: 29 05 2011.] <http://www.zonnepanelen-info.nl/nieuws/duitse-zonnecel-haalt-rendement-van-41/>.
5. **The German Energy Society.** *Planning & installing Photovoltaic Systems*. Londen : Earthscan, 2008.
6. [Online] [Citaat van: 1 06 2011.] http://www.solarstream.nl/index.php?option=com_content&view=article&id=93&Itemid=171.
7. **Publicatie door ODE Vlaanderen vzw.** *Bouwen met fotovoltaïsche zonne-energie*. [Online] http://www.ode.be/images/stories/Brochures/zPV_br_bouwen_met_PV_050120.pdf.
8. *PV solar electricity industry: Market growth and perspective*. **Hoffmann, Winfried.** 90, sl : Solar energy materials & solar cells, 2005, Vol. 2006.
9. **Koramic.** *Powerpoint Koramic: opleiding KoraSun 30 december 2009 - nl, slide 11*.
10. [Online] [Citaat van: 23 05 2011.] <http://www.agoria.be/upload/30.142507001228813773.jpg>.
11. **BelPV.** *Zonne-energie werkt en is onmisbaar*. [Online] [Citaat van: 24 05 2011.] http://ode.be/images/zonnestroom/BelPV/belpv_standpunt_visie_zonne-energie_110418.pdf.
12. [Online] [Citaat van: 24 05 2011.] <http://www.stichtingmilieunet.nl/andersbekekenblog/wp-content/uploads/2009/05/zonnepanelen-the-green-drive.jpg>.
13. [Online] [Citaat van: 24 05 2011.] <https://www.sparelamp.com/userfiles/zonnepanelen%20.JPG>.
14. [Online] [Citaat van: 24 05 2011.] http://www.alkorproof.com/images/realisations/343_943_image.jpg.
15. **Renolit.** *ALKORSOLAR*. [Online] [Citaat van: 24 05 2011.] http://www.alkorproof.com/images/dld/96_86662_file.pdf.
16. [Online] [Citaat van: 24 05 2011.] http://www.design-buildsolar.com/images/sized/assets/images/uni-solar_laminates-480x250.jpg.

17. [Online] [Citaat van: 24 05 2011.]
<http://www.hethelewestland.nl/imagemanager/files/Adverteerders/SolarNRG/Zonnepaneel3.jpg>.
18. **Joris ide energy**. *Jorisolar - The Integrated Roof Solution*.
19. [Online] [Citaat van: 25 05 2011.] <http://static.howstuffworks.com/gif/green-engineering-2.jpg>.
20. [Online] [Citaat van: 25 05 2011.]
<http://www.hetportaal.be/img/nieuws/35/thumbs/nr4MIGEON%20ACTUA%20ANTRACIET%20MAT%20OMET%20KORASUN.JPG>.
21. **WTCB**. Voorstelling. [Online] [Citaat van: 25 05 2011.]
<http://www.wtcb.be/homepage/index.cfm?cat=bbri&sub=presentation>.
22. **Van Impe, Rudy**. *Berekenen van bouwkundige constructies II*.
23. **EN 1991-1-4:2005**.
24. **WTCB rapport nr. 11**. *Toepassing van de eurocodes op het ontwerp van buitenschrijnwerk*. sl : WTCB, 2009.
25. **NBN EN 1991-1-4-ANB:2006**.
26. **Cook, N**. *Designers' Guide to EN 1991-1-4*. London : Thomas Telford Publishing, 2007.
27. **Carpenter, David**. Solar modules on flat roofs – why worry about wind? *cppwind*. [Online] [Citaat van: 30 05 2011.]
http://www.cppwind.com/support/papers/papers/windenergy/Solar_on_Rooftops.pdf.
28. **WTCB**. *TV215: Het platte dak opbouw, materialen, uitvoering, onderhoud*. sl : WTCB, 2000.
29. *Platte en gewelfde daken*. **Spehl, Pierre, Raymaekers, Didier en Meert, Etienne**. 2001, WTCB, pp. 19-30.
30. *De windwerking op hellende daken*. **Parmentier, B**. 2003, WTCB, pp. 3-17.
31. *Full scale measurements of wind loads on stand-off photovoltaic systems*. **Geurts, Chris P.W. en Steenbergen, R. D.J.M.** Florence, Italy : sn, 2009. EACWE 5.
32. [Online] [Citaat van: 20 05 2011.]
<http://wwwm.coventry.ac.uk/SiteCollectionImages/engineering%2520and%2520computing/Facilities/Wind-Tunnel.jpg>.
33. [Online] [Citaat van: 20 05 2011.] <http://www.ifh.uni-karlsruhe.de/science/aerodyn/Defaultenglish.htm>.
34. **CUR**. *CUR aanbeveling 103 - Windtunnelonderzoek voor de bepaling van ontwerp-windbelastingen op (hoge) gebouwen en onderdelen ervan*.
35. [Online] [Citaat van: 28 05 2011.] http://www.cfd-online.com/Wiki/Turbulence_modeling.
36. *Wind effects on roof-mounted solar photovoltaic arrays: CFD and wind-tunnel evaluation*. **Meroney, Robert N. en Neff, David E**. Chapel Hill, North Carolina, USA : sn, 2010. The Fifth International Symposium on Computational Wind Engineering (CWE2010).
37. *Prediction of the pressure distribution on a cubical building with implicit LES*. **Köse, D. A. en Dick, E**. 98, sl : Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2010, Vol. 2010.
38. **Department of Energy**. *Ballast-Mounted PV Arrays: Phase 2*.

39. *Wind Loading on Solar Panels at Different Inclination Angles*. **Shademan, Mehrdad en Hangan, Horia**. San Juan, Puerto Rico : sn, 2009. 11th Americas Conference on Wind Engineering -San Juan, Puerto Rico.
40. *Wind loads on roof-based photovoltaic systems(BRE DIGEST 489)*. **Blackmore, Paul**. 2004, BRE.
41. *Wind loads on solar energy roofs*. **Geurts, Chris P.W. en van Benthum, A.** 2007, HERON Vol. 52 No. 3, pp. 201-222.
42. **EUR ACTIVE ROOFer**. Project Details. www.euractiveroofers.org. [Online] [Citaat van: 03 05 2011.] <http://www.euractiveroofers.org/projectdetails.htm>.
43. **Geurts, Chris P.W. en van Benthum, C. A.** *Windbelasting op Zonne-energiedaken*. Delft, Nederland : TNO, 2005.
44. *Aandachtspunten bij de plaatsing van zonnepanelen op platte daken*. **Mahieu, A.** 4, sl : WTCB-Dossiers, 2010.
45. **NBN EN 1991-1-3-ANB:2006**.
46. **NBN EN 1991-1-1-ANB:2005**.
47. *Ontwerp en dimensionering van constructies volgens Eurocode 0*. **Parmentier, B. en Delincé, D.** winter, sl : WTCB, Vol. 2003.
48. [Online] [Citaat van: 28 05 2011.] http://www.bbri.be/antenne_norm/eurocodes/nl/normes/eurocodes/tables/table_belg_EN.html.
49. **NBN EN 1990-ANB:2005**.
50. *Mise en oeuvre de systèmes photovoltaïques en toitures*. **Dupont, Eric**. 2010. Roofcity 2010.
51. **EPIA & Greenpeace**. *Solar generation 6* . 2011.
52. **Test Aankoop**. Zonnepanelen. *Test Aankoop*. juni, 2011.
53. **Laird, Joyce**. PV's falling costs. *Renewable Energy Focus*. 2011.
54. *Projected costs of a grid-connected domestic PV system under different scenarios in Ireland, using measured data from a trial installation*. **Ayompe, L. M., et al.** 38, sl : Energy Policy, 2010, Vol. 2010, pp. 3731-3743.
55. [Online] [Citaat van: 04 06 2011.] <http://database.ul.com/graphics/lisp/ulp183.jpg>.
56. **CREG**. Persbericht. [Online] [Citaat van: 23 05 2011.] <http://www.creg.info/pdf/Presse/2011/compress08042011nl.pdf>.
57. —. ELEKTRICITEITSTARIEVEN: prijsherzieningsparameters definitives. [Online] [Citaat van: 23 05 2011.] <http://www.creg.be/pdf/Tarifs/E/EP-MC-PARAMDEF-NL.pdf>.
58. —. *Evolutie van de elektriciteitsprijzen op de residentiële markt*. 2011.
59. **Crapos, P.** *The PRIMES Energy System Model Summary Description*.
60. **Federaal Planbureau**. *Energievooruitzichten voor België tegen 2030 in een tijdperk van klimaat vernadering*. 2007.
61. [Online] [Citaat van: 22 05 2011.] <http://www.oilenergy.com/hpix/2obrentm.gif>.
62. [Online] [Citaat van: 04 06 2011.] http://www.vlaanderen.be/servlet/Satellite?c=Solution_C&cid=1247814419129&context=1141721623065&p=1186804409590&pagename=Infolijn%2FView.

63. Wetgevend kader ivm zonnepanelen. [Online] [Citaat van: 19 05 2011.] <http://www2.vlaanderen.be/economie/energiesparen/reg/doc/dakisolatie.pdf>.
64. **Reynders, Didier.** *www.vlaanderen.be.* [Online] 25 07 2007. [Citaat van: 19 05 2011.] http://www2.vlaanderen.be/economie/energiesparen/doc/zon_briefreynders.pdf.
65. Verhoogde investeringsaftrek voor energiebesparende investeringen. . *energiesparen.* [Online] [Citaat van: 19 05 2011.] http://www.energiesparen.be/subsidies/subsidieregel_detail?id=1831&verstr=769&doelgroep=2.
66. **Federale overheidsdienst financiën.** *http://fiscus.fgov.be.* [Online] [Citaat van: 19 05 2011.] <http://fiscus.fgov.be/interfaofnl/Investeringsaftrek/BerichtIA-aj2012.01.02.2011.pdf>.
67. Verhoogde investeringsaftrek. *vlaanderen.be.* [Online] [Citaat van: 19 05 2011.] http://www2.vlaanderen.be/economie/energiesparen/doc/verhoogde_investeringsaftrek_bijlage.doc.
68. Steun voor zonnepanelen - premies, belastingvermindering en groenestroomcertificaten. *www.vlaanderen.be.* [Online] [Citaat van: 09 05 2011.] http://www.vlaanderen.be/servlet/Satellite?pagename=Infolijn/View&c=Solution_C&p=1186804409590&cid=1090509354622.
69. Plaatsing van fotovoltaïsche zonnepanelen. *www.energiesparen.be.* [Online] [Citaat van: 19 05 2011.] http://www.energiesparen.be/subsidies/belastingvermindering/fotovoltaïsche_zonnepanelen.
70. **Federale overheidsdienst Financiën.** Groene lening. *http://minfin.fgov.be.* [Online] <http://minfin.fgov.be/portail2/nl/themes/dwelling/energysaving/green.htm>.
71. **Bruggeman, Werner, Everaert, Patricia en Hoozéé, Sophie.** *Handboek management accounting.* Antwerpen : IOntersentia, 2010. ISBN 978-90-5095-996-4.
72. **http://economie.fgov.be.** Consumptieprijsindex vanaf 1920. *http://economie.fgov.be.* [Online] [Citaat van: 20 05 2011.] http://economie.fgov.be/nl/binaries/cpi_hist1920_tcm325-65934.xls.
73. **ECB.** Monetary policy. [Online] [Citaat van: 11 05 2011.] <http://www.ecb.int/mopo/html/index.en.html>.
74. Consumptieprijsindex en inflatie in april 2011. [Online] [Citaat van: 21 05 2011.] http://economie.fgov.be/nl/binaries/Nota%20inflatie%20201104%20website%20NL_tcm325-127507.pdf.
75. [Online] [Citaat van: 05 20 2011.] <http://www.rabobank.be/nl/termijnrekening/default.aspx>.
76. Colruyt werkt volledig op groene stroom. [Online] [Citaat van: 21 05 2011.] http://www.colruytgroup.be/colruytgroup/static/windmolen_be-nl.shtml.
77. *Invloed van de wind op dakafdichtingen.* **Dubois, J., Lacroix, Y. en Spehl, P.** 1992, WTCB, pp. 3-13.
78. *Cost reduction in PV manufacturing Impact on grid-connected and building-integrated markets.* **Maycock, Paul D.** 1997, Solar Energy Materials and Solar Cells 47, pp. 37-45.
79. *Luchtbewegingen en hellende daken.* **Vitse, P. en Dobbels, F.** 2002, WTCB, pp. 41-49.
80. *Wind loads on solar energy systems, mounted on flat roofs.* **Geurts, C.P.W., van Benthum, C. en Blackmore, P.**
81. *Numerical and experimental investigation of wind induced pressures on a photovoltaic solar panel.* **COȘOIU, COSTIN IOAN, et al.** Algarve, Portugal : sn, 2008. 4th IASME/WSEAS International Conference on ENERGY, ENVIRONMENT, ECOSYSTEMS and SUSTAINABLE DEVELOPMENT (EEESD'08). pp. 74-80.
82. *Numerical Evaluation of Wind Pressures on Flat Roofs with the $k-\xi$ Model.* **Stathopoulos, T. en Zhou, Y. S.** 1995, Building and Environment, Vol. 30, No. 2, pp. 267-276.

83. *Platte daken, ATG, windbelasting en veiligheidscoëfficiënt*. **Busschaert, Luc, Raymaekers, Didier en Vitse, Piet**. 2001, WTCB, pp. 54-56.
84. *PV solar electricity industry market growth and perspective*. **Hoffmann, Winfried**. 2006, Solar Energy Materials & Solar Cells 90, pp. 3285–3311.
85. *Reduction of wind uplift of a solar collector model*. **Chung, K., Chang, K. en Liu, Y.** 2008, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 96, pp. 1294–1306.
86. **Barkaszi, Stephen en O'Brien, Colleen**. *Wind load calculations for pv arrays*. sl : Solar American Board for codes and standards, 2010.
87. **CREG**. *Evolutie van de elektriciteitsprijzen op de residentiële markt*. 2010.
88. *Windweerstand van platte daken*. **Busschaert, L., La Grange, G. en Meert, E.** 1982, WTCB, pp. 20-24.
89. **EN 1990:2002**.
90. **CREG**. Haalbaarheid van de invoering van een progressieve prijszetting van electriciteit in België. [Online] 05 06 2010. [Citaat van: 23 05 2011.] <http://www.creg.info/pdf/Studies/F972NL.pdf>.
91. **Van Impe, Rudy**. *Berekening van bouwkundige constructie I*. 2010.
92. [Online] [Citaat van: 01 06 2011.] <http://www.zonnepanelen-bedrijven.be/images/instralingsdiagram-zonnepanelen.jpg>.
93. [Online] 01 06 2011. <http://users.telenet.be/marcelmeermans//foto/zonnepanelen/zonnehoek.gif>.
94. [Online] [Citaat van: 20 03 2010.] <http://www.appliedsolarwindsolutions.com.au/>.
95. [Online]
96. [Online] [Citaat van: 03 04 2010.] http://www.kyosemi.co.jp/product/pro_ene_sun_e1.html.
97. [Online] [Citaat van: 03 04 2010.] http://www.originenergy.com.au/environment/files/factsheet_sliver.pdf.
98. [Online] 04 03 2010. http://www.taxameter.nl/images/paragraph/img_os_stelio_straat.jpg.
99. [Online] [Citaat van: 03 04 2010.] http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_tree.
100. [Online] [Citaat van: 04 03 2010.] <http://www.wapa.gov/newsroom/default.htm>.
101. [Online] [Citaat van: 03 04 2011.] <http://www.solar-constructions.com/transparant01.jpg>.

