

TNO Bouw

Duurzame Energie en Gebouwen
Van Mourik Broekmanweg 6
Postbus 49
2600 AA Delft

www.tno.nl

T 015 276 30 00

F 015 276 30 22

TNO-rapport

DEG-2004-R088

Kasgeïntegreerde windmolens

Datum	19 april 2005
Auteur(s)	ir. H.H.R. Spoorenberg
Exemplaarnummer	
Oplage	
Aantal pagina's	28
Aantal bijlagen	1
Opdrachtgever	Onderzoeksprogramma Energie GLAMI van het Productschap Tuinbouw
Projectnaam	Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit (LNV) Kasgeïntegreerde windmolens (PT 11466)
Projectnummer	006.30120/01.01

Alle rechten voorbehouden.

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

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

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

© 2004 TNO

Samenvatting

In dit onderzoek zijn in opdracht van het Onderzoeksprogramma Energie GLAMI van het Productschap Tuinbouw en het Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit (LNV) de mogelijkheden onderzocht voor integratie in tuinbouwkassen van recent, speciaal voor de gebouwde omgeving ontwikkelde kleine windturbines om op die manier het elektriciteitsverbruik van de kas duurzaam te dekken. Tevens is een afschatting gemaakt van het economisch perspectief.

Door middel van CFD-modellering is de geschiktheid van het stromingsprofiel rondom kassen voor het gebruik van windenergie bepaald. Daaruit blijkt dat de beste positie voor een windturbine vlak boven de kasgevel is, aan de kant van de voorkeurswindrichting. Binnen de eerste twee meter boven deze kaswand treedt de grootste versnelling op, waardoor een windmolen maximaal wordt benut. Aangezien deze stroming schuin van onderen gericht is, zal het windmolenprincipe juist daar gebruik van moeten zien te maken. Veel van de bedoelde typen functioneren inderdaad onafhankelijk van de windrichting.

Plaatsing op/aan de kasconstructie is problematisch in verband met de door de molen op de constructie uitgeoefende krachten, waar deze niet op berekend is. Wanneer de windturbines op de kas worden geplaatst, verlangt dit een verstevigde kasconstructie, hetgeen niet strookt met de behoefte om minimaal licht te onderscheppen met de kasconstructie. De turbine zal dus zo dicht mogelijk voor de kas moeten worden geplaatst.

Al met al lijken met name de Turby en de Windwall geschikt voor plaatsing bij een kascomplex. De te behalen opbrengst is afhankelijk van de kashoogte: bij hogere goothoogte wordt de wind meer opgestuwd tegen de kas en zijn de optredende luchtstromingen sterker.

De turbine met de kortste terugverdientijd produceert jaarlijks 4.000 – 5.000 kWh_e; uitgaande van een gemiddeld centraal rendement van 50%, wordt per turbine ca. 300 m³ a.e. uitgespaard. Ondanks gunstige plaatsing blijft de elektrische opbrengst achter bij de kosten: investering in een kleine windturbine zal dan ook waarschijnlijk vooral geschieden op basis van ideële gronden of met een forse subsidie. De mogelijkheden qua investeringsaftrek zijn echter gunstig, en qua kosteneffectiviteit en CO₂-emissiereductie scoren kleine windturbines beter dan PV-systemen.

Inhoudsopgave

1	Inleiding.....	4
1.1	Vergelijking met windenergie op bedrijventerreinen	5
1.2	Doelstelling	5
1.3	Indeling rapport	5
2	Windgedrag rondom kassen.....	7
2.1	Ongestoord windprofiel.....	7
2.1.1	Gemiddelde windsnelheid	7
2.1.2	Windsnelheidsverdeling	8
2.2	Turbulentie	11
2.3	Windgedrag rondom gebouwen	11
2.4	Windenergie	12
3	CFD-berekeningen	14
3.1	Inleiding	14
3.2	Uitgangspunten.....	15
3.3	Resultaten	15
3.4	Conclusies	17
4	Beschikbare en geschikte turbines.....	18
4.1	Vergelijking turbines.....	18
4.2	Conclusies	20
5	Economische overwegingen	21
5.1	Glastuinbouw in Nederland.....	21
5.2	Aspecten van eigen elektriciteitsopwekking	21
5.3	Investeringsaftrek	23
6	Conclusies.....	24
6.1	Vervolgactiviteiten	24
7	Referenties.....	25
A	Bijlage: verloop van de stroming rondom de kas bij toenemende kashoogte	26

1 Inleiding

De Nederlandse overheid en de glastuinbouwsector hebben in 1997 met elkaar het Convenant Glastuinbouw en Milieu afgesloten. In dat kader wordt voor 2010 gestreefd naar een verbetering van de energie-efficiëntie met 65 % ten opzichte van het basisjaar 1980. Deze sectordoelstelling wordt nagestreefd door op bedrijfsniveau afspraken te maken over het energiegebruik per vierkante meter (energienormen). De verhoging van de energie-efficiëntie wordt op dit moment vooral bereikt door de toepassing van klimaatcomputers, warmtekrachtinstallaties, buffertanks die warmte opslaan, gevelisolatie en schermen, en de bouw van energiezuinige kassen.

De tweede convenantsdoelstelling is dat 4% van het totale energiegebruik in 2010 duurzaam opgewekt dient te worden. Niet voor niets hebben overheid en tuinbouwsector het jaar 2004 uitgeroepen tot het 'jaar van de groene stroom'. Deze duurzame energie kan zowel aangekocht als zelf geproduceerd zijn. In het convenant is echter vastgelegd dat alleen het eigen gebruik van duurzame energie en de inkoop van groene stroom meetellen. Elektriciteit die wordt verkocht, telt niet mee.

Windenergie vormt een belangrijk potentieel in de opwekking van duurzame energie. Uit recent onderzoek m.b.t. de mogelijkheden tot benutting van windenergie in de glastuinbouw, blijkt dat de potentie in deze sector hoog is [A]. Windenergie kan gebruikt worden om het elektriciteitsgebruik van kassen te verminderen of in ieder geval duurzaam te dekken. Door de duurzaam geproduceerde elektriciteit direct in het bedrijf in te zetten is afvlakking van het piekgebruik mogelijk, waardoor de kosten voor elektriciteit kunnen dalen. Bovendien zijn veel Nederlandse glastuinbouwgebieden gesitueerd in windrijke streken (Zeeland, Noord- en Zuid-Holland, Friesland, Groningen en de Flevopolder) en de mogelijkheden voor meervoudig ruimtegebruik (i.e. wind gecombineerd met kassen) liggen voor de hand.

Gesignaleerde problemen echter zijn met name het financiële stimuleringsmechanisme in Nederland, vergunningverwerving, onduidelijkheid m.b.t. de liberalisering van de elektriciteitsmarkt en de capaciteit van het openbare elektriciteitsnet [A]. Als verdere aandachtspunten worden genoemd: beschaduwning (door mast en rotorbladen), geluid, veiligheid (turbine zelf en omgeving), ijsafwerping, de (grote) benodigde grondoppervlakte voor fundering, en het landschap. Tenslotte zijn er vragen m.b.t. het investeringsbedrag en de jaarlijkse exploitatiekosten, maar ook tot het gebruik van elektriciteit versus teruglevering aan het openbare net.

Plaatsing van een windturbine boven een kas waar mensen werkzaam zijn, is niet toegestaan, vanwege de (weliswaar kleine) kans op afbreken van de turbinebladen door grote windkrachten. Het genoemde onderzoek [A] beschrijft echter enkel toepassing van conventionele windmolens (met een horizontale as met wieken). Kleine, kasgebonden molens komen niet aan bod, hoewel voor rurale applicatie hiervan bij een aantal gemeenten inmiddels ruime belangstelling zou bestaan. Sommigen beschouwen enkele kleine turbines zelfs als een aantrekkelijk alternatief voor een grote.

Tot voor kort kwamen kleinschalige windturbines in landelijk gebied vrijwel uitsluitend voor in 'stand-alone' opstellingen zoals batterijladers [H]. Inmiddels worden ook de mogelijkheden in de gebouwde omgeving onderzocht. Er is wat dat laatste betreft een aantal belangrijke problemen: zo is er van het gedrag van wind in de gebouwde omgeving relatief weinig bekend, waardoor ook de opbrengst van de systemen moeilijk te voorspellen is, en bovendien zijn de molens nog niet uitontwikkeld.

1.1 Vergelijking met windenergie op bedrijventerreinen

Bij beleidsmakers leeft de gedachte dat windenergie het best kan worden gekenmerkt als industriële activiteit die thuishoort op bedrijventerreinen [E, F]. Wat dat betreft bieden nieuwe bedrijventerreinen meer kansen dan bestaande i.v.m. kortere en minder complexe procedures, en met name kansrijk zijn bedrijventerreinen die grenzen aan agrarische bestemmingen of aan infrastructuur. Bij de planning moeten de partijen evenwel rekening houden met veiligheid, geluid, landschappelijke inpassing, vogelrichtlijnen en schaduwwerking. Met name de normen voor geluidsoverlast vormen vaak een knelpunt (voor gezoneerde terreinen geldt een cumulatieve norm van 40 dB aan de zonegrens).

Succesfactoren voor windenergieprojecten op bedrijventerreinen zijn derhalve de beschikbaarheid van zuidwest-locaties, de inpasbaarheid van windturbines in het bestemmingsplan, vrije aanstroming van de wind, juridische 'ruimte' voor windprojecten (geluid) en het enthousiasme en doorzettingsvermogen van de ondernemers: factoren waar in een kassengebied waarschijnlijk vrij eenvoudig aan is te voldoen.

1.2 Doelstelling

Het doel van dit onderzoek is het achterhalen van zowel de technische als de economische haalbaarheid van kleine windmolens die zijn geïntegreerd in of aan een kasconstructie, bijvoorbeeld als molen met verticale as aan de hoekpunten, of met horizontale as in de kasnok, of een van beide typen geplaatst tussen de kasnokken. De verwachting is dat op die manier een groot aantal van de genoemde problemen zoals beschaduwing door de mast, landschapsverstoring en benodigde grondoppervlakte, het hoofd kan worden geboden.

Kleine windmolens zijn, in termen van terugverdientijd, over het algemeen echter niet goedkoop. De terugverdientijd varieert van 10,5 tot meer dan 100 jaar [P]. Aldus zijn er twee mogelijkheden voor realistisch gebruik: ofwel de ontwikkeling van een zeer goedkope windmolen, ofwel plaatsing op een positie waar de grootste windversnelling optreedt.

De verwachting is dat een windturbine kan profiteren van het stromingsregime van wind boven een gebouw of in ons geval een kas, als die daardoor versneld wordt. Technische doelstelling van dit onderzoek is derhalve het maken van een selectie van geschikte uitvoeringsvormen van kasgeïntegreerde windmolens voor glastuinbouwbedrijven, waarbij rekening wordt gehouden met technische en economische aspecten en waarbij het elektriciteitsverbruik maximaal wordt teruggedrongen. Expliciet zullen de kansen voor bestaande kassen worden bestudeerd.

Tevens zal een afschatting worden gemaakt van het economische perspectief van deze vorm van windenergie. Grootschalige implementatie van windenergie in de glastuinbouwsector kan bijdragen aan verhoogde acceptatie van het glastuinbouwproduct door de consument. Belangrijk is uiteraard ook de acceptatie van windenergie door de tuinders zelf.

1.3 Indeling rapport

Er is in het verleden wel onderzoek gedaan naar stromingsprofielen rondom kassen, maar dat was in alle gevallen gericht op de ventilatie van de kas [bijv. V]. Men kan daaruit echter concluderen dat de numerieke simulatiemethoden van de drukken en

luchtstroming rondom commerciële kassen bevredigend zijn, met uitzondering echter van de situatie rondom de eerste kasnok aan de zijzijde van een kassencomplex. Daar treden veelal grote overschattingen op van de situatie in vergelijking met metingen.

Allereerst zal dus de geschiktheid van de stromingsprofielen van wind rond kassen worden onderzocht en in hoeverre gebruik kan worden gemaakt van de specifieke vorm van kassen ter vergroting van de windenergieopbrengst. Tevens wordt bekeken hoe de verschillende varianten zo optimaal mogelijk zijn toe te passen lettende op de voor dit onderzoek belangrijke aspecten en zal onderzoek worden gedaan naar de dekking van de directe elektriciteitsvraag van een bedrijf door windenergie.

In dit rapport wordt eerst de invloed van een kassencomplex op aanstromende wind beschreven en hoe de wind zich in de directe omgeving boven de kas gedraagt (hoofdstuk 2). In hoofdstuk 3 zullen op grond hiervan simulaties worden uitgevoerd. In hoofdstuk 4 worden de op dit moment beschikbare molens besproken en hun geschiktheid voor toepassing op kassen. In hoofdstuk 5 komen economische overwegingen aan bod. Ook wordt gepoogd helder te beschrijven wat de mogelijkheden zijn voor de opgewekte elektriciteit: dekking van het eigen elektriciteitsverbruik versus teruglevering.

Uit dit geheel volgt dan een conclusie en een schatting voor het potentieel in Nederland (hoofdstuk 6). De juridische aspecten zoals benodigde vergunningen worden niet behandeld. Wat dat betreft is recent door anderen goed werk verricht [D, L].

2 Windgedrag rondom kassen

Wind is een stochastische energiebron die het gevolg is van grootschalige warmteverschillen in de luchtlag boven de aardbol waardoor ze in plaats en tijd fluctueert. Ook is de rotatie van de aarde van invloed. Toch is het gedrag van wind redelijk te beschrijven. Hiervoor is het handig om een verdeling te maken in de verschillende luchtlagen boven het aardoppervlak.

- De eerste 2 km boven het aardoppervlak vormen, onder invloed van de ‘vaste’ aardwand waar de windsnelheid nul is, de zogeheten *grenslaag*.
- De eerste 100-200 meter boven het aardoppervlak vormen de *oppervlaktelaag*, en dat is de laag die onze grootste interesse heeft. Aan de top van deze oppervlaktelaag is met name de horizontale snelheidsgradiënt groot, er vindt nauwelijks draaiing plaats. Daarboven wel: in de hogere delen van de grenslaag kunnen boven een vast punt op aarde boven elkaar verschillende windrichtingen voorkomen.

2.1 Ongestoord windprofiel

Voor de toepassing van windenergie zijn de volgende gegevens omtrent de beschrijving van wind van belang [O]:

- a) De gemiddelde windsnelheid (over een jaar, over een maand, mogelijk ook over een bepaald seizoen).
- b) De windsnelheidsverdeling.
- c) Duur en frequentie van perioden van windstilte.
- d) Het gemiddeld verloop van de windsnelheid over de dag of het jaar.

2.1.1 Gemiddelde windsnelheid

De gemiddelde windsnelheid bedraagt in Nederland 2 - 5 m/s. Deze waarden zijn afkomstig uit het Europese Joule III onderzoek en blijken nogal omstreden. Met name rondom hoge gebouwen is de gemiddelde windsnelheid per definitie hoger [I], en voor de meeste toepassingen geeft ze onvoldoende informatie.

Meteorologische stations bepalen uurgemiddelden van de windsnelheid. Informatie op een tijdschaal kleiner dan een uur gaat daarbij verloren; deze is echter niet zo belangrijk voor energieschattingen, wel voor bijvoorbeeld de mechanische belasting van een windmolen [O]. Uitgaande van de gemeten wind en lokale terreinruwheid wordt daarmee de windsnelheid op de zogeheten menghoogte berekend. De menghoogte is de hoogte waarop het verschijnsel inversie (een toename van de temperatuur met de hoogte in plaats van een afname) plaatsvindt, en varieert tussen de 50 en 10.000 meter. Deze snelheid op de menghoogte wordt vervolgens weer naar beneden vertaald tot de wind op standaardhoogte boven een terrein met een referentieruwheid: de zogeheten potentiële windsnelheid (zie figuur 2.1). De meethoogte en de referentiehoogte H zijn veelal gelijk aan 10 m, de lokale ruwheidslengte is 0.5 m en de referentie ruwheidslengte z_0 is 0.03 m.

Een normaal (logaritmisch) windsnelheidsprofiel in de oppervlaktelaag wordt als volgt beschreven:

$$U(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln\left(\frac{z-d}{z_0}\right) \quad \text{voor } z > 20z_0 + d \text{ en } z \ll z_m \text{ (menghoogte)}$$

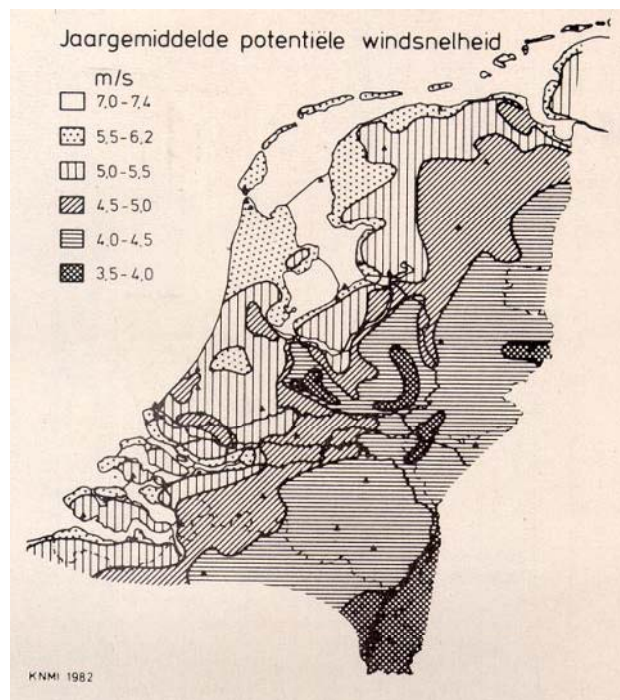
Waarin:

$U(z)$	[m/s]	windsnelheid op hoogte z
z	[m]	hoogte
u_*	[m/s]	wrijvingssnelheid
κ	[-]	Von Karman constante (0,42)
d	[m]	verplaatsingshoogte
z_0	[m]	ruwheidslengte

De verplaatsingshoogte d is de hoogte boven het maaiveld van het ruwe oppervlak. Voor d kiest men wel $2/3$ à $3/4$ van de obstakelhoogte. Als $z_0 < 0,3$ m is $d = 0$ m. De ruwheidslengte representeert de ruwheid van een gewas of van een stad, zoals het geheel van alle ruwheden, waaruit het gewas of de stad is opgebouwd, de wind remt. Tabel 2.1 geeft enige voorbeelden voor verschillende karakteristieke terreinsoorten.

stadskern	>2
dorp	1
bos	0,5
wei	0,1
open zee	0,0002

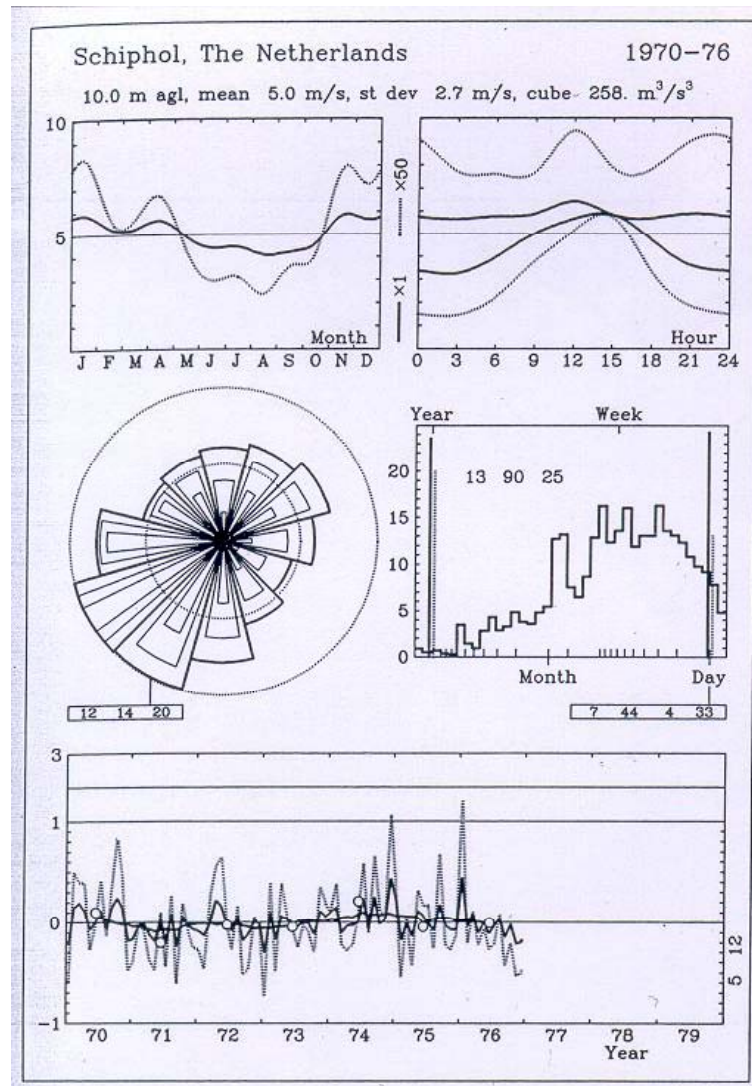
Tabel 2.1 Ruwheidslengten z_0 voor diverse terreinsoorten [m].



Figuur 2.1 Jaargemiddelde potentiële windsnelheid U_p in Nederland. De potentiële windsnelheid is de (fictieve) windsnelheid op 10 m hoogte boven een zeer groot open terrein met $z_0 = 0,03$ m.

2.1.2 Windsnelheidsverdeling

Een van de belangrijkste gegevens van de wind betreft de snelheidsverdeling. Deze beschrijft met welke kans windsnelheden voorkomen als functie van de windrichting, tijd van de dag, seizoen, of afhankelijk van temperatuur, neerslag, etc.



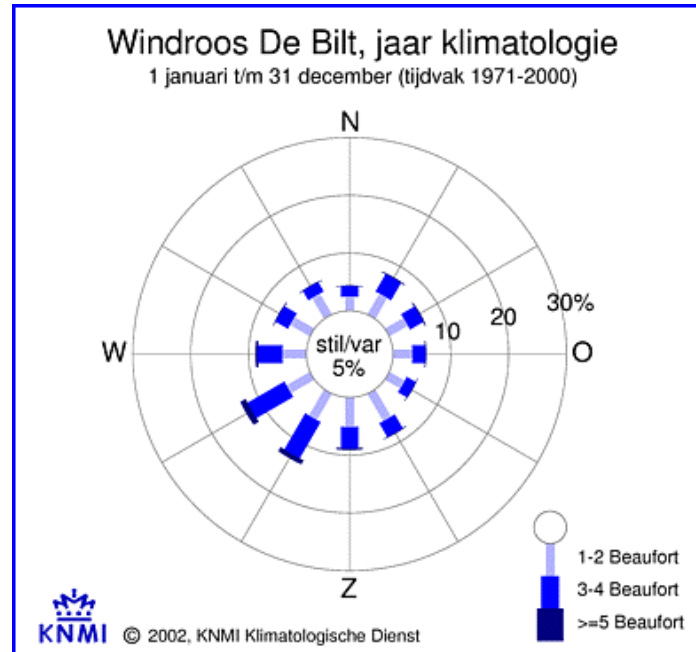
Figuur 2.2 Windklimatologische 'vingerafdruk' voor Schiphol.

Figuur 2.2 geeft de zogeheten windklimatologische vingerafdruk van een bepaald meetstation; in dit geval Schiphol [X]. De metingen zijn uitgevoerd op 10 m boven het maaiveld, de gemiddelde windsnelheid bedraagt 5,0 m/s, de standaard deviatie 2,7 m/s en de gemiddelde waarde van het kwadraat van de gemeten windsnelheden $258 \text{ m}^3/\text{s}^3$.

De getrokken lijn in de figuur linksboven geeft de variatie van de gemeten windsnelheid over het jaar (maandgemiddelden), de stippellijn het kwadraat van de windsnelheden. De figuur rechtsboven geeft de variatie in de gemiddelde windsnelheid over de dag voor de maanden januari en juli.

De relatieve frequentie van de 12 verschillende windrichtingen waaruit de wind waait staat in de figuur midden links (dikke lijn). De bijdrage van iedere sector aan de totale gemiddelde windsnelheid en aan de totale kwadraatgemiddelde van de snelheid wordt gegeven door respectievelijk de dünnere lijn en de middelste lijn. De normalisatie is steeds zodanig dat het grootste segment tot de buitenste cirkel reikt. De corresponderende waarde voor elk van de drie hoeveelheden, in procenten, staat in het kleine kader. De binnenste cirkel correspondeert met de helft hiervan. Figuur 2.3 toont deze waarden voor De Bilt. Deze figuur laat zien hoe vaak de wind uit een bepaalde richting komt. Hoe langer een staafje, des te vaker komt de wind uit de bijbehorende richtingsklasse.

In de windroos is een schaal weergegeven waarmee de procentuele frequentie kan worden afgelezen. De staafjes tezamen inclusief de variabele winden en windstiltes (stil/var) tellen op tot 100%.



Figuur 2.3 Windroos De Bilt

De breedte van de staafjes geeft informatie over hoe hard het gewaaid heeft. Er worden drie snelheidsklassen gehanteerd, te weten 1-2 Beaufort (0,3-3,3 m/s), 3-4 Beaufort (3,4-7,9 m/s) en 5 Beaufort en meer (>8 m/s). In de categorie 1-2 Beaufort is de verdeling over de windroos nagenoeg gelijk. Voor de overige categorieën is er een voorkeur voor Zuidwest. In tabelvorm:

	1 tot 2	3 tot 4	>5
N	2,6 %	2,0 %	0,2 %
NNO	4,1 %	3,6 %	0,2 %
ONO	3,6 %	3,1 %	0,2 %
O	3,4 %	2,6 %	0,2 %
OZO	3,1 %	2,0 %	0,2 %
ZZO	6,6 %	3,1 %	0,3 %
Z	5,1 %	4,1 %	0,5 %
ZZW	5,1 %	7,1 %	1,0 %
WZW	5,1 %	8,2 %	1,0 %
W	4,1 %	4,6 %	0,5 %
WNW	4,1 %	2,0 %	0,2 %
NNW	4,1 %	2,0 %	0,2 %

2.2 Turbulentie

Wanneer de windsnelheid gedurende kortere tijd – enkele seconden of minuten – duidelijk hoger is dan het uurgemiddelde, spreekt men van een windvlaag. Door de windvlagen varieert de wind in richting en grootte. Een handige grootheid om het buiige karakter van de wind aan te geven is de turbulentie-intensiteit I . Dit is de verhouding tussen het fluctuerend deel van de windsnelheid en het gemiddeld deel en is afhankelijk van de terreinruwheid (hoe ruwer, hoe meer turbulentie) en de hoogte (hoe verder weg van het terrein, hoe lager de turbulentie).

$$I = \frac{1}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} = \frac{\sigma}{V}$$

Waarin:

- I [-] turbulentie-intensiteit
 σ [m/s] standaardafwijking = Ku_* , met K ongeveer 2,5.
 V [m/s] gemiddelde windsnelheid

De turbulentie-intensiteit is voor een gegeven hoogte typisch voor het terrein. Tabel 2.2 geeft enige voorbeelden.

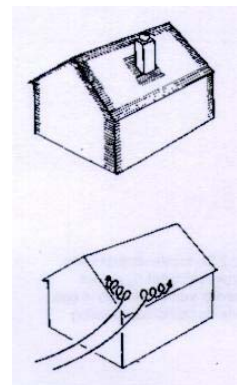
open water	0,08
open terrein	0,17
ruw terrein	0,22
zeer ruw terrein	0,35

Tabel 2.2 Turbulentie-intensiteit I op 10 m hoogte boven enkele terreintypen [-].

Turbulentie kan ook worden veroorzaakt door een eventueel aanwezige verticale warmtestroom. Zeker voor lage windsnelheden is dit effect niet te verwaarlozen. Bij een opwaartse warmtestroom wordt de turbulente menging versterkt; bij een neerwaartse verzwakt [U]. Hoewel over deze effecten vrijwel niets bekend is, is het voor windregimes boven kassen wellicht niet onbelangrijk. Voor voor windenergie interessante windsnelheden is deze invloed echter zonder meer beperkt.

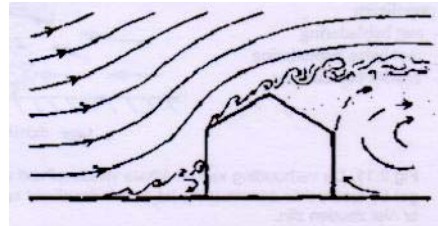
2.3 Windgedrag rondom gebouwen

Ook rondom gebouwen is de luchtstroom sterk turbulent. Vaak zijn er uitgesproken staande wervels aan bijvoorbeeld de loef- en lijzijde van een gebouw en om hoeken. Daar ontstaan ook loslatende wervels en bij rukwinden kortstondige maxima in de windsnelheid en dus ook de bijbehorende drukminima. Zie figuur 2.4.



Figuur 2.4 Delen van een woning die het meest blootstaan aan turbulentie.

Wanneer lucht eerst over grasland stroomt en vervolgens over een kassengebied, is er sprake van een ruwheidsovergang. Aanvankelijk is de luchtstroom aangepast aan het grasland. Zodra de lucht de ruwheidsovergang passeert, wordt deze van onderen afgeremd. Door turbulente menging wordt, naarmate de lucht verder stroomt, een steeds dikkere laag geremd en qua turbulentie en snelheid aangepast aan het nieuwe oppervlak. Zie figuur 2.5. De afstand die de wind aflegt vanaf de ruwheidsovergang heet de strijklengte x_s . Het is de afstand waarover de wind vrijelijk zijn gang kan gaan en een tamelijk constante richting en snelheid heeft.



Figuur 2.5 Stromingsverloop over een gebouw bij gegeven windrichting en -snelheid.

Ook de vorm van een gebouw beïnvloedt de windbelasting, ondermeer door de vorm van de plattegrond, de slankheid van het gebouw en de vorm van dak en gevels. Gebouwen die relatief laag zijn in vergelijking met de ruwheid van het omringende terrein, zullen slechts een kleine invloed hebben op de afbuiging van de wind. De afbuighoek van de windstroming is het grootst aan de gebouw- (of in ons geval kas-) zijde die op de wind gericht is. Aangezien in Nederland de wind het meest uit het zuidwesten waait, is de invloed van kassen ten zuidwesten van de windturbine het grootst.

Tot op een afstand van ongeveer 100 meter wordt de aanstroming van de wind verstoord door de aanwezigheid van gebouwen, bomenrijen en andere obstakels. Volgens Panofsky [T] reduceert de ruwheid van gebouwde omgeving de gemiddelde windsnelheid met zo'n 75%. Als de onderlinge afstand tussen kassen kleiner is dan ongeveer 15 maal hun hoogte, dan beïnvloedt het zog van de ene kas de stroming aan de loefzijde van de andere. Wanneer de onderlinge afstand kleiner is dan 5 maal de hoogte, is er zelfs een sterke interactie.

Dit zogeheten zogeffect treedt ook op bij het plaatsen van meerdere windturbines op één locatie. Wanneer de wind in de lengterichting van een aantal windturbines waait, wordt de snelheid verstoord door de aanwezigheid van de andere turbines. Een vuistregel is dat de onderlinge afstand tussen de windturbines minimaal vijf maal de rotordiameter moet bedragen om het opbrengstverlies beperkt te houden tot enkele procenten.

2.4 Windenergie

Uit al deze zaken volgt de potentiële windenergie in de gebouwde omgeving. Lokale winddrukken geven namelijk een indruk van de potentiële energieopbrengst:

$$Up = q_v * \Delta P \quad \text{met} \quad q_v = v * A \quad \text{en} \quad \Delta P = 0,5 * Cp * \rho * v^2$$

Waarin:

Up	[W]	potentiële windenergie
q_v	[m ³ /s]	volumestroom
ΔP	[Pa]	verschil tussen lokale en referentiedruk over een gebouw

v [m/s] (ongestoorde) windsnelheid
 A [m²] oppervlakte
 C_p [-] drukcoëfficiënt
 ρ [kg/m³] dichtheid (lucht: 1,25)

C_p bedraagt over een verticale gevel circa 0.6, over een schuin dak 0.2 à 0.3. De waarde is echter afhankelijk van alle factoren die de relatie tussen de ongestoorde windsnelheid en het effectieve drukverschil beïnvloeden. Het is daarom noodzakelijk bij het gebruik van gepubliceerde waarden van C_p goed te letten op de (vaak stilzwijgend) gekozen omstandigheden. In de praktijk is C_p vaak negatief. Het teken van C_p geeft echter geen uitsluitsel over de richting van de krachten op daken en wanden. Deze worden immers bepaald door drukverschillen en dus door de vraag hoe de druk aan de binnenzijde zich instelt tussen de waarden van de druk aan loef- en lijzijde.

Theoretisch volgt aldus voor de potentiële windenergie in een 'buitenwijk' 68 W/m². Praktisch (globaal 2/3 van de theoretische waarde) is dat maximaal 45 W/m² of 397 kWh/jr.m². Gemiddeld komt het neer op circa 20 W/m² (175 kWh/jr.m²). Ter vergelijking: een PV-paneel levert slechts ca. 6 W/m², een zonnecollector ca. 40 W/m² [C].

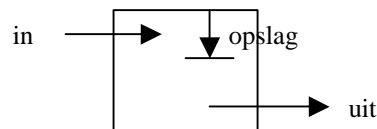
3 CFD-berekeningen

3.1 Inleiding

Met de zogeheten Navier-Stokes vergelijkingen is iedere stroming (laminair én turbulent) te beschrijven. Ze zijn echter alleen voor (sterk) vereenvoudigde stromingsproblemen analytisch op te lossen, wat voor stromingen in de gebouwde omgeving onmogelijk is. Met behulp van Computational Fluid Dynamics (CFD) zijn ze echter numeriek op te lossen. CFD is inmiddels een veelgebruikt middel om stromings- en temperatuurverdelingen in en rond geometriën te bepalen. Het geeft inzicht in stromingsproblemen, dient als ontwerphulpmiddel en ter voorspelling van bepaalde stromingsituaties. CFD dient vooral ter bepaling van gemiddelde drukken; lokale drukken worden bepaald door extremen en daarvoor zijn CFD-pakketten nog niet nauwkeurig genoeg.

In het kort behelst de door CFD programmatuur gevolgde oplosmethode de volgende stappen:

1. Discretisatie (naar ruimte en tijd) van het volume in volumecellen. Hiervoor zijn diverse mogelijkheden, al naar gelang de situatie. De volumeceldichtheid dient voldoende te zijn om het programma in staat te stellen om de natuur van de optredende stromingsverschijnselen adequaat te vangen.
2. Interpolatie. Per cel worden behoudswetten voor behoud van massa, impuls, warmte en druk geformuleerd. Hogere orde vergelijkingen zijn beter dan eerste orde, maar navenant moeilijker op te lossen.



Figuur 3.1 Voorbeeld gridcel waarvoor behoudswetten worden geformuleerd.

3. Iteratie: duizenden van elkaar afhankelijke vergelijkingen voor druk, snelheid, temperatuur, concentratie e.d. waar verschillende iteratieve oplosmethoden voor bestaan worden opgelost.
4. Convergentie: het is noodzakelijk om te controleren of de gemaakte gridcelverdeling fijn genoeg was. Na convergentie van de oplossing volgt visuele controle a.h.v. visualisatie van de stroming en een controle van behoud van massa en energie.

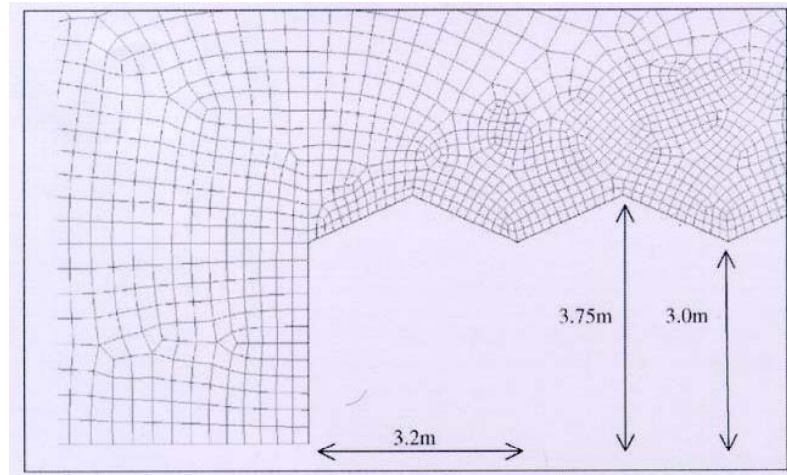
Op deze manier zijn in ieder geval laminaire stromingen te berekenen: turbulente stromingen ook, maar dan via een geschikt gekozen turbulentiemodel dat is gebaseerd op gemiddelde turbulentie (statistisch) [N]. Voor specifieke toepassingen zijn er veel verschillende alternatieve turbulentiemodellen. Het bekendste is het zogeheten $k-\epsilon$ model. Omdat dit empirische waarden behelst, dient indien mogelijk een validatie te worden toegevoegd. Dichtbij een oppervlak is de stroming laminair en is het $k-\epsilon$ model niet geldig.

In de literatuur blijkt de overeenkomst tussen de CFD-berekeningen en metingen in de praktijk tamelijk goed, met uitzondering van de situatie rondom de eerste kasnok aan de zijzijde van de kas, waar de drukken en snelheden veelal door de berekening onder- of juist overschat worden. Redenen daarvoor kunnen zijn de beperkte nauwkeurigheid van

het gebruikte turbulentiemodel of de juiste definitie van de randvoorwaarden. Bovendien wordt er van uitgegaan dat de kas volledig gesloten is, hetgeen in werkelijkheid niet zo is.

3.2 Uitgangspunten

We gaan voor dit onderzoek uit van het meest voorkomende kastype, de zogeheten Venlo-kas, met een kapbreedte van 3,2 m, een goothoogte van 3,0 m en een tophoogte van 3,75 m [V, W]. Zie figuur 3.2.



Figuur 3.2 Belangrijkste dimensies en gridstructuur van een 'Venlo'-kas.

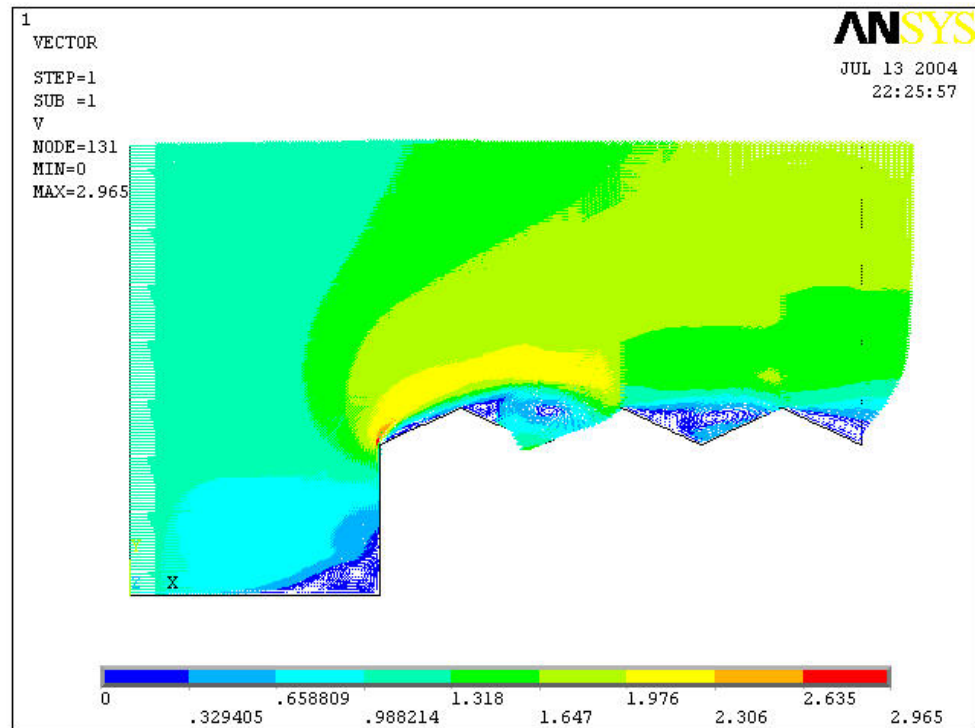
Voorts nemen we aan dat de aanstroming over relatief vlak terrein plaatsvindt. We gaan uit van tweede orde discretisatie en het k- ϵ turbulentiemodel. De gebruikte software is ANSYS 7.0.

Aan de 'inlaat'-zijde (links) is uitgegaan van een uniform windsnelheidsprofiel in X-richting. Langs de grond en de kaswanden zijn de snelheden in X- en Y-richting nul gesteld. De elementgrootte en hun verdeling is van groot belang in CFD analyses. De algemene filosofie om gebieden waar hogere bewegingsdichtheden worden verwacht (recirculatiegebieden bijvoorbeeld) van meer elementen te voorzien is hier van toepassing.

3.3 Resultaten

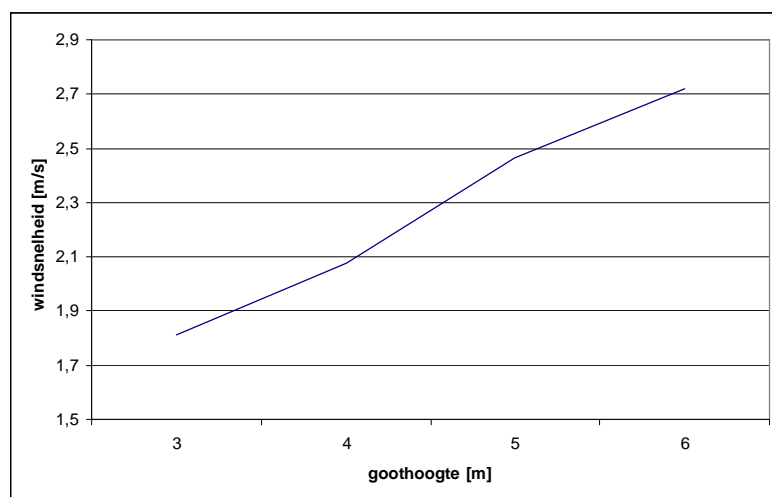
In dit onderzoek is de situatie bekeken, waarbij de wind dwars op de kasnokken aanstroomt. In dat geval wordt deze door de verticale kaswand opgestuwd en langs de schuine kasdaken geleid. De versnelling die ten gevolge daarvan optreedt, is vlak boven het opgaande deel van de eerste kasnok het grootst. Zie figuur 3.3. In de daarop volgende goten treden steeds wervels op, met een relatief lage snelheid.

Wat figuur 3.3 aangeeft, is in feite de toename van de windsnelheid ten opzichte van vrije aanstroming (1 m/s). In paragraaf 2.3 zagen we dat windenergie evenredig is met de windsnelheid in het kwadraat. Zou de wind evenwijdig aan de kasnokken aanstromen, dan zou enkel het opstuwende effect langs de verticale kaswand optreden, en het concentrerende effect ten gevolge van het schuine kasdak niet. Dat zal een over de kasbreedte minder gelijkmatig profiel opleveren, maar draagt nog altijd bij aan concentratie van de beschikbare windstroming, die de opbrengst van een aanwezige windturbine zou verhogen ten opzichte van vrije aanstroming.



Figuur 3.3 Stromingsprofiel rondom de kas bij aanstroming loodrecht op de kasknoken.

Deze exercitie is uitgevoerd voor verschillende kashoogten. Zie hiervoor bijlage A. De conclusie die daaruit is te trekken, is dat de voor een windmolen meest interessante plaats ten opzichte van de kasrand voor iedere kashoogte hetzelfde is; alleen neemt de windsnelheid toe met toenemende kashoogte! Deze relatie is weergegeven in figuur 3.4 voor 1,5 m boven de kasgevel.



Figuur 3.4 Het verband tussen de goothoogte en de gemiddelde windsnelheid 1,5 meter boven de kasgevel.

Men moet echter in de gaten houden dat juist in de situatie rondom de eerste kasknok aan de lijzijde van een kassencomplex veelal grote overschattingen van de situatie optreden in vergelijking met metingen. Voorts dient te worden opgemerkt dat de aanstroming

lang niet in alle gevallen over een relatief glad oppervlak plaats vindt. Daar zou in opbrengstberekeningen rekening mee moeten worden gehouden.

3.4 Conclusies

Plaatsing van windturbines kan het beste plaatsvinden in het vlak van de kasgevel, aan de kant van de voorkeurswindrichting (de windrichting is de richting waar de wind vandaan komt, niet de richting waar de lucht naartoe stroomt). Binnen de eerste twee meter boven deze kaswand treedt de grootste versnelling op (van 1,5 tot 3 maal de waarde van de ongestoord aanstromende wind), waardoor een windmolen maximaal wordt benut. Aangezien deze stroom schuin van onderen gericht is, zal het windmolenprincipe juist daar gebruik van moeten zien te maken. De energetische opbrengst van de windmolen ten gevolge van plaatsing op/bij een kas wordt echter niet hoger verondersteld dan bij plaatsing op een ander gebouw.

Plaatsing van kleine windmolens met een verticale as aan bijvoorbeeld de hoekpunten of met de poot door het vlak van de kasgevel, lijkt dus een mogelijkheid. Plaatsing van molens met een horizontale as in de kasnok, of van een van beide typen tussen de kasnokken, is gezien het optredende stromingsregime aldaar af te raden.

Wind komt hooguit 30-40% van de tijd uit haar 'voorkeursrichting'. Indien de wind uit een iets andere richting waait, zal de opbrengst niet veel verminderen. Als dit echter uit de tegenovergestelde richting is, en de wind dus eerst over het kassencomplex stroomt alvorens de windturbine(s) te bereiken, zal de wind in kracht zijn afgenomen en zal de opbrengst lager zijn dan als de turbine vrij werd aangestroomd.

Opmerking: op een hoog gebouw zal plaatsing van een windmolen in het algemeen het best plaatsvinden midden op het dak; omdat bij kassen de lengterichting relatief veel groter is, moet men de afremming van de wind die uit andere richtingen dan de voorkeursrichting stroomt afwegen tegen de hogere opbrengst aan de voorkeursrichting.

4 Beschikbare en geschikte turbines

Er is een veelheid aan typen machines waarmee windvermogen wordt omgezet in mechanisch vermogen aan een as. De meeste kunnen we classificeren naar een aantal aspecten [O]:

Aanstroming wind: Langs de rotatie-as (axiaal) of dwars erop.

Oriëntatie van de as: Horizontaal of verticaal.

Werkingsprincipe: Op lift (Darrieus-rotor: de molen draait hierbij sneller dan de wind) of op weerstand (Savonius rotor: de molen draait even snel als de wind). Gemengde systemen komen ook voor.

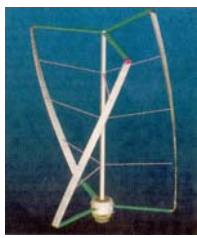




De beweging van de as is in de beschouwde gevallen steeds roterend.

4.1 Vergelijking turbines

Toepassing van windturbines in de gebouwde omgeving moet zoveel mogelijk op hogere gebouwen plaatsvinden (tussen aanzienlijk lagere gebouwen), vanwege de daar spelende zeer hoge turbulentieniveaus die zorgen voor betere opbrengsten (de – windrichtingafhankelijke - windsnelheid is daar hoger). Verticale as turbines verdienen in complexe stromingen zoals die boven daken voorkomen de voorkeur. Aldaar zal de prestatie beter zijn dan van molens met een horizontale as en wieken [T].

Ervaringen met windturbines in de gebouwde omgeving zijn nog beperkt. De enige op dit moment (bijna) marktrijpe turbines die op gebouwen geplaatst kunnen worden zijn de Turby, de Windwall, de Provane 5 en de Windside. Deze worden met elkaar vergeleken in tabel 4.1. Daarin is tevens de betrekkelijk conventioneel vormgegeven Tulipo opgenomen.

Tabel 4.1 Vergelijking van de op dit moment beschikbare kleine windturbines. Bron: [J, L, P, S] en bedrijfsinformatie.

	Turby	Windwall	Provane 5 / Virya	Windside	Tulipo (Lagerwey)
					
aanstroming wind en oriëntatie as	dwars op verticale as	dwars op horizontale as	langs horizontale as	dwars op verticale as	langs horizontale as
principe	lift	lift	lift	weerstand	lift
windrichting	wind uit alle richtingen	wind uit één hoofdrichting	Alle richtingen. Vaan draait molen in de wind.	wind uit alle richtingen	gaat lastig om met variabele windrichting
bereik [m/s]	4 – 16	3 – 25		2 – 40	

	Turby	Windwall	Provane 5 / Virya	Windside	Tulipo (Lagerwey)
status	Prototype. Experimenten in Tilburg en Delft.	Prototype, vb. op dak Deltion college Zwolle en HTM kantoor Den Haag.	Op de markt, vb. dak ROC in Ede. Voorts in Zaanstad en Rijswijk.	Op de markt - veel toepassing in Finland en Japan. In NL in Hedel.	op de markt
opbrengst ¹ [kWh/jr]	2.000 – 4.000	2.000 – 6.000, 7.500 bij 6 m/s gem. windsnelheid	4.000 – 5.000 bij 4 m/s	260	5.000
prijs [€]	11.000	40m ² (€ 37.250) 75m ² (€ 54.000) 150m ² (€ 88.600) (excl. subsidies en fiscale regelingen)	9.000	3.300	18.000
terugverdien tijd ² [jr]	40	55	22	140	40
CO ₂ -reductie [kg/€]	2,7	2	5	0,8	2,8
ashoogte [m]	3	4,2	6		12,25
vgl.baar aantal m ² PV (en prijs) ³	37,5 m ² (€ 21.560)	50 m ² (€ 28.750)	56 m ² (€ 32.340)	3,25 m ² (€ 1870)	62,5 m ² (€ 35.940)
diameter rotor [m]	2	1,20	5		5
massa [kg]	90	400	720, met mast 1030		645, met mast 1845
afstand [m]	6	modulair aaneen			25
geluid	beneden 70 dB bij 12 m/s	75 - 78 dBA bij 7 m/s		zeer stil	70 dB
vermogen [kW]	nominaal: 2,5, piek: 3	nominaal 2,3 - 4 (v/a 11 m/s, wat nogal extreem is)	2		2,5
Familie- ontwikkeling		ook 10 en 100 kW modellen lever- baar.	Virya 7 (4 kW) in de maak.	ook (tweezijdig ge- lagerd) groter mo- del (4m ² , opbr. 3440 kWh/jr)	
Onderhoud	20 jr. onderhouds- vrij			Halfjaarlijks olie bijvullen, na 50 jr lager vervangen. Molen zelf zou 100 jr meegaan.	

De CO₂ reductie is bepaald uit de kosteneffectiviteit van de verschillende molens, die op zijn beurt is te bepalen door de opbrengst over de levensduur [kWh] te delen door de kostprijs van de molen [€]. Hieruit laat zich vervolgens bij een voor Nederland aange-

¹ In de literatuur genoemde opbrengsten lopen enorm uiteen en geven slechts een hele grove indicatie.

² Voor alle turbines berekend op hetzelfde fictieve gebouw [P] zonder enige subsidie of fiscale regelingen. Voor het tarief voor conventionele elektriciteitslevering is € 0,09 genomen, een aanzienlijk lager tarief dan voor huishoudens. Ter vergelijking: de TVT van PV zou bij dit tarief zo'n 80 jaar bedragen.

³ Gemiddelde opbrengst 80 kWh/m²/jaar en gemiddelde prijs € 575 / m², zonder subsidie.

nomen vermeden CO₂ uitstoot van 660 gr. per kWh opgewekte energie eenvoudig de CO₂ reductie berekenen. Voor de levensduur is een periode van 15 jaar gekozen. Dit is slechts arbitrair en geeft een idee.

4.2 Conclusies

We zien dat sommige kleine windturbines qua kosteneffectiviteit en CO₂-emissiereductie beter scoren dan PV-systemen. De turbine met de kortste terugverdientijd (22 jr) produceert jaarlijks 4.000 – 5.000 kWh_e (uitgaande van een gemiddeld rendement van 50%, wordt daarmee per turbine jaarlijks een equivalent van ca. 300 m³ gas uitgespaard).

- De Turby kan goed omgaan met verschillende windrichtingen en door bebouwing veroorzaakte turbulentie. De opbrengst is echter nog onduidelijk en de prijs aan de hoge kant.
- De Windwall moet het vooral hebben van wind uit een bepaalde hoofdrichting. Bovendien is ook deze turbine erg duur, en tevens aan de zware kant. Wel is juist deze fabrikant aan het experimenteren met toepassing in kassengebieden.
- De Virya is richtingonafhankelijk en is het meest kostenefficiënt. Wel is de geschiktheid voor deze toepassing minder zeker, in de zin dat het de vraag is of de molen gunstige invloed ondervindt van de kassen..
- De Windside is zondermeer oninteressant voor toepassing in kassengebieden in verband met de lage opbrengst voor zijn prijs en het feit dat de molen volledig dicht is en dus zonlicht tegenhoudt.
- De Tulipo reken ik tot de conventionele molens die sowieso naast een kassengebied geplaatst dient te worden, maar biedt allicht perspectief.

Plaatsing op/aan een kasconstructie is in alle gevallen problematisch in verband met de door de molen op de constructie uitgeoefende krachten, waar deze niet op berekend is. Huidige kasconstructies zijn als het ware tot op de gram geoptimaliseerd, dus het introduceren van extra krachten uitgeoefend door een windmolen zal verstrekkende gevolgen hebben.

Met de conclusies van hoofdstuk 3 in het achterhoofd lijken met name de Turby en de Windwall geschikt voor plaatsing bij een kassencomplex, en dan het liefst zo dicht mogelijk ernaast, waarbij de molen zelf ook zo dicht mogelijk bij het kasdek wordt geplaatst.

5 Economische overwegingen

Bij de start van windenergieprojecten is het van belang of de rentabiliteit van de windturbine voldoende is en of de windturbine op de beoogde locatie geplaatst kan worden. Verwacht wordt dat windturbines jaarlijks € 150 tot € 380 opleveren. Esthetiek is in de glastuinbouw niet zozeer een issue. Wat bijvoorbeeld wel meespeelt is de productiederiving in kassen ten gevolge van slagschaduw. Deze kan worden berekend [K], maar zal klein zijn en zeker indien wordt uitgegaan van zuidwest plaatsing, zal eventuele slagschaduw van de turbines enkel in de (na-) middag daadwerkelijk over de kas vallen. Er zijn op dit moment nog geen subsidies voor kleine windturbines. Wel kunnen ze in aanmerking komen voor de Energie Investeringsaftrek (EIA) en kleinschaligheidsinvesteringsaftrek (KIA).

5.1 Glastuinbouw in Nederland

Nederland telt op het moment ruim 10.500 hectare (100 ha = 1 km²) aan kassen, 20% meer dan in 1980 [Q]. De laatste tien jaar echter is de oppervlakte nauwelijks toegenomen. Bijna de helft bevindt zich in het Westland (het gebied tussen Rotterdam, Delft en Den Haag), midden in het dichtgeweven netwerk van kennis, transport, afzet en toeleveranciers. Ook rondom Aalsmeer, bij Schiphol, Venlo en Emmen liggen uitgestrekte kasengebieden. Het aantal bedrijven is afgenomen, maar omdat de overblijvers groeien, neemt de oppervlakte per bedrijf toe.

De overheid wil de glastuinbouw momenteel weer laten groeien, maar wel gecontroleerd [R]. Sinds januari 2004 staat vast dat er meer kassen komen op meer plaatsen in Nederland. De sector wil en mag uitbreiden, op voorwaarde dat de bedrijven zich aan de afgesproken milieu- en energienormen houden. Dat zal aan de ene kant gaan inhouden dat de glazen steden kleiner zullen worden: de 4.000 ha glas in het Westland bijvoorbeeld moet in 2010 ten faveure van woningbouw, waterberging, infrastructuur en recreatie met 700 ha zijn gereduceerd. Bestaande bedrijven kunnen er niet uitbreiden. Aan de andere kant zijn er tien locaties aangewezen voor 2.500 ha glazen nieuwbouw, verspreid over vrijwel het hele land: Gelderland, Drenthe, Overijssel, Friesland, Limburg, Noord-Holland, Flevoland, Noord-Brabant, Zeeland en Zuid-Holland.

5.2 Aspecten van eigen elektriciteitsopwekking

De door een windturbine opgewekte elektriciteit wordt gezien als duurzaam geproduceerd. In tegenstelling tot de grote windturbines leveren de urban turbines meestal duurzame energie 'achter de meter'. Dit betekent dat de opgewekte elektriciteit uit windenergie direct benut wordt voor eigen gebruik. Dit is rendabeler dan teruglevering aan het net. Op deze manier wordt dure inkoop namelijk vermeden, waarbij bedacht moet worden dat elektriciteit alleen maar duurder zal worden. Windturbines moeten op dit gebied echter concurreren met andere kleinschalige, decentrale duurzame elektriciteitsopwekkers zoals PV-systemen en micro-WKK's. De opgewekte elektriciteit kan op de volgende vier manieren worden gebruikt [P]:

- a) Direct verbruik: de elektriciteit wordt meteen verbruikt door de kas. Wanneer er een overschot aan elektriciteit is wordt dit aan het net geleverd zonder hier een vergoeding voor te ontvangen.

- b) Teruglevering: opgewekte elektriciteit wordt deels direct verbruikt, de rest wordt aan het net geleverd tegen een terugleververgoeding. Hierbij komen extra administratieve handelingen en investeringen kijken, die in vergelijking tot de vorige optie niet veel extra inkomsten opleveren.
- c) Opslag: de opgewekte elektriciteit wordt direct verbruikt of in accu's opgeslagen. De kosten voor het opslaan van elektriciteit (aanschaf en onderhoud accu's) is hoger dan de extra opbrengst die uit de elektriciteit gehaald kan worden door de mogelijkheid van het opslaan.
- d) Volledige teruglevering: alle door de windturbine opgewekte elektriciteit wordt tegen een terugleververgoeding aan het net geleverd. Aangezien de terugleververgoeding lager is dan ingekochte elektriciteit is deze optie niet interessant.

Een windturbine is nooit 100% van de tijd beschikbaar. Er treedt bijvoorbeeld stilstand op door onderhoud en reparatie. Veel fabrikanten garanderen een beschikbaarheid van 95 tot 97%. Dit houdt in dat een windturbine in zijn algemeenheid maximaal 6.300 uren draait ($97\% \times 6.500$ uur).

Om duurzame energieopwekking te stimuleren is in mei 2001 gestart met het vrijgeven van de markt voor groene energie voor alle gebruikersgroepen. Met de liberalisering van de energiemarkt wil de overheid de concurrentie op de energiemarkt vergroten. De vrije groene energiemarkt biedt de windturbine-eigenaar meer verkoopmogelijkheden: hij kan de geproduceerde elektriciteit nu rechtstreeks leveren aan vrije en beschermde afnemers. Concreet kan hij dus leveren aan de hoogstbiedende partij [A].

Als gevolg van de liberalisering zal de elektriciteitsprijs naar verwachting even dalen en daarna weer stijgen. Begin 2002 stond de 'kale' elektriciteitsprijs voor producenten op ongeveer € 0,04 per kWh. Dit geldt voor zowel grijze als groene stroom. De verkoopprijs van groene stroom wordt nog verhoogd met € 0,02 per kWh, als gevolg van de zogenoemde Regulerende Energiebelasting (ook wel REB of ecotax genoemd). Deze belastingen werden voor een deel direct doorgesluisd naar de producenten van groene energie. Daartegenover staan kosten voor programmaverantwoordelijkheid. De kosten hiervan zijn moeilijk te kwantificeren, aangezien er nog geen ervaring bestaat met contracten op dit gebied.

Per 1 juli 2003 is de MEP (wet Milieukwaliteit ElektriciteitsProductie) regeling in plaats gekomen van de REB-vergoeding om de opwekking van duurzame elektriciteit uit bijvoorbeeld wind, zon, biomassa- en warmtekrachtinstallaties te stimuleren. De regeling houdt in dat men gedurende de eerste 10 jaar na plaatsing van een windmolen € 0,063 per kWh ontvangt of over de eerste 18.000 vollasturen, rekening houdend met het nominale vermogen van de turbine. Het wetsvoortsel MEP is van toepassing voor alle installaties die na 1 januari 1996 in gebruik zijn genomen. Aantrekkelijk is dat investeerders in nieuwe installaties al vóór de bouw zekerheid kunnen krijgen over subsidie.

De MEP-subsidie bedraagt een vast bedrag voor iedere opgewekte en op een net of een installatie ingevoede kWh. Voor windmolens op land geldt per 1 juli 2004 een subsidietarief van 6,3 eurocent per kWh. Voor 2005 is de MEP vastgesteld op 7,7 cent. Ter vergelijking: de WKK-subsidie blijft 0,57 eurocent per kWh.

5.3 Investeringsaftrek

Wie een bedrag tussen € 2.000 en € 258.000 (was € 286.000) investeert in bedrijfsmiddelen voor zijn/haar onderneming, kan in aanmerking komen voor de kleinschaligheidsinvesteringsaftrek (KIA). De bedrijfsmiddelen waarin wordt geïnvesteerd, moeten wel in aanmerking komen voor investeringsaftrek. De KIA is een percentage van alle investeringen in een jaar. Hoe hoog het percentage is, hangt af van het geïnvesteerde bedrag. Zie onderstaande tabel met schijven. Bepalend is het moment waarop de koop van het bedrijfsmiddel gesloten is.

Investeringsaftrek		Investering in 2005
meer dan	niet meer dan	
€ 2.000	€ 34.000	25 %
€ 34.000	€ 66.000	22 %
€ 66.000	€ 97.000	17 %
€ 97.000	€ 129.000	14 %
€ 129.000	€ 161.000	11 %
€ 161.000	€ 193.000	8 %
€ 193.000	€ 226.000	5 %
€ 226.000	€ 258.000	3 %
€ 258.000	--	0 %

Voor investeringen in bepaalde energiebesparende bedrijfsmiddelen kan men - naast de KIA - energie-investeringsaftrek (EIA) aanvragen. Bedrijfsmiddelen die in aanmerking komen voor de EIA staan vermeld in de zgn. Energielijst. De aftrek wordt verleend indien in een jaar meer dan € 2.000 (tot een maximum van € 103.000.000) in de aangewezen bedrijfsmiddelen wordt geïnvesteerd. De aftrek bedraagt 44% (was 55%).

Voor investeringen in milieuvriendelijke bedrijfsmiddelen kan de Milieuinvesteringsaftrek (MIA) worden geclaimd. De aanschaffingskosten en/of voortbrengingskosten van een nieuw bedrijfsmiddel komen in aanmerking voor aftrek als het bedrijfsmiddel voorkomt op de Milieulijst 2003. De aftrek bedraagt 15%, 30% of 40% van het investeringsbedrag. De MIA wordt verleend naast de KIA, maar kan niet cumuleren met de EIA, in een aantal gevallen echter wél met de vervroegde afschrijving op milieuvriendelijke bedrijfsmiddelen (VAMIL). Meer informatie te vinden op [Y].

6 Conclusies

In dit onderzoek zijn de mogelijkheden onderzocht voor integratie van kleine windturbines in tuinbouwkassen om op die manier het elektriciteitsverbruik van de kas duurzaam te dekken. Hiertoe is literatuuronderzoek uitgevoerd en het stromingsprofiel van de wind rondom de kas onderzocht met behulp van CFD-software.

Allereerst blijkt dat plaatsing op/aan de kasconstructie in alle gevallen problematisch is in verband met de door de molen op de constructie uitgeoefende krachten, waar deze niet op berekend is. Huidige kasconstructies zijn ondermeer op massa geoptimaliseerd, waardoor het introduceren van extra krachten uitgeoefend door een windmolen verstrekkende gevolgen zal hebben. Wanneer windturbines op de kas worden geplaatst verlangt dit een verstevigde kasconstructie; hetgeen niet strookt met de behoefte om minimaal licht te onderscheppen met de kasconstructie.

Gezien het bovenstaande en het optredende stromingsregime kan plaatsing van windturbines het beste plaatsvinden vlak voor het kassencomplex, aan de kant van de voorkeurswindrichting. Binnen de eerste twee meter boven deze kasgevel treedt de grootste versnelling op (van 1,5 à 3 maal de ongestoorde windsnelheid), waardoor een windmolen maximaal wordt benut. Aangezien deze luchtstroom sterk van onderen gericht is, zal het windmolenprincipe juist daar gebruik van moeten zien te maken. Veel typen zijn, zoals bij deze toepassing gewenst, onafhankelijk van de windrichting. Al met al lijken met name de Turby en de Windwall het meest geschikt voor plaatsing (vlak) bij een kassencomplex.

Qua kosteneffectiviteit en CO₂-emissiereductie scoren kleine windturbines beter dan PV-systemen. De turbine met de kortste terugverdientijd produceert jaarlijks 4.000 – 5.000 kWh_e; uitgaande van een gemiddeld rendement van 50%, wordt per turbine ca. 300 m³ gas uitgespaard op een gemiddeld gebruik van 400.000 m³ gas/ha.

De verschillende investeringsaftrekregelingen in Nederland vormen een goede stimulans voor de toepassing van duurzame energie in de glastuinbouw; en kunnen terugverdientijden met zo'n 20% bekorten.

6.1 Vervolgactiviteiten

Deze wijze van duurzame opwekking van energie zou in een vervolgfase als volgt verder onderzocht en ontwikkeld kunnen worden:

- Het belangrijkste lijkt verificatie van de opbrengsten. Proefneming in een (atmosferische) grenslaagwindtunnel (i.e. met een opgewekt windprofiel en turbulentie) is nuttig – alle vervolgobjecten hebben min of meer dezelfde geometrie – maar niet strikt noodzakelijk, aangezien er geen heel grote economische of veiligheidsissues aan verbonden zijn. Beter lijkt het om met de verschillende typen windmolens praktijkervaring op te doen.
- Een windturbine kan schadelijke trillingen veroorzaken voor de ondersteuningsconstructie. Bij het plaatsen op een kasconstructie moet goed doorgerekend worden wat de belastingen zullen worden. Een idee is om een ontwerpoptimalisatie uit te voeren voor nieuwe kassen. Gezien het feit dat er in de nabije toekomst veel nieuwe kassen gebouwd zullen worden, ontstaat aldus een groter totaal potentieel voor windenergie.

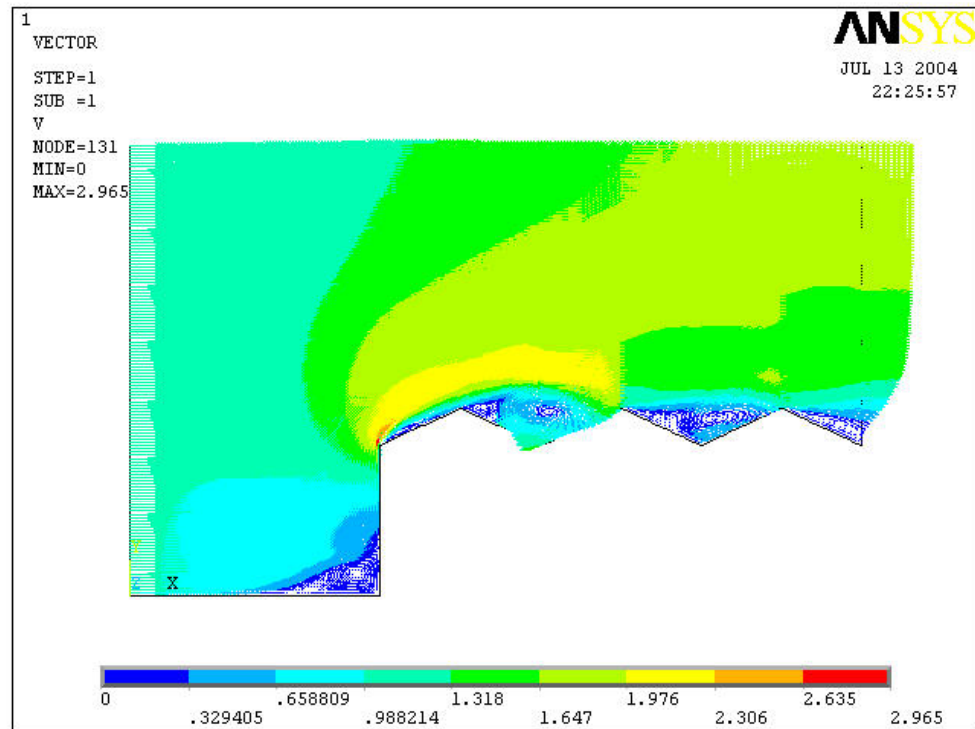
7 Referenties

- [A] *Perspectieven voor windenergie in de Glastuinbouw*, Ecofys/LEI, Productschap Tuinbouw-Energiebureau, 2002
- [B] *Windturbines in en op gebouwen*, Eize de Vries, Stromen, 2001
- [C] *Reader Cursus Windtechnologie*, Bas Knoll, TNO Bouw, 2003
- [D] *Besluit voorzieningen en installaties milieubeheer*, www.pde.nl/wat/mo/amvbvoorzeninstall.html
- [E] *Ook op bedrijventerreinen stuit plaatsing windturbines op geluid*, Cees ter Stege, Stromen, 28 juni 2002
- [F] *Windenergie op bedrijventerreinen mogelijk, maar geen vanzelfsprekende optie*, Stromen, 26 mei 2000
- [G] *Wind vangen op het dak*, Rijkert Knoppers, NRC Handelsblad, 11 februari 2002
- [H] *Kleine windturbines nu snel marktrijp*, Tseard Zoethout, Stromen, 4 oktober 2002
- [I] *Urban turbines: markt en technologieën in de lift*, Eize de Vries, Stromen, 15 december 2001
- [J] *Duurzame energie in nieuwbouw utiliteitsgebouwen*, ?, 2003
- [K] *Bedrijfsinformatie Van der Boom*, Zutphen, 2003
- [L] *Slagroomkloppers, grasmaaiers of wakkels?*, afstudeeronderzoek Etienne Vermeer, *Energie 2050*, december 2003
- [M] *reader Cursus Windtechnologie*, Chris Geurts, TNO Bouw, 2003
- [N] *reader Cursus Windtechnologie*, Marcel Loomans, TNO Bouw, 2003
- [O] *Blijvende Energiebronnen*, Piet Smulders e.a., TU/e diktaat 4645, 1995
- [P] *FAQ, 15 vragen en antwoorden over kleine windturbines in de gebouwde omgeving*, Etienne Vermeer, *Energie 2050*, 's Hertogenbosch, 2004
- [Q] *De zelfdenkende kas*, Marcel aan de Brugh, NRC Handelsblad, 16 januari 2004
- [R] *De stad van glas*, Tracy Metz, NRC Handelsblad, 16 januari 2004
- [S] *Windenergie: kleine windturbines*, Projectbureau Duurzame Energie, Arnhem, 2003
- [T] *Performance of an H-Darrieus in the Skewed Flow on a Roof*, Sander Mertens e.a., *Journal of Solar Energy Engineering*, vol.125, november 2003
- [U] *Wind in de gebouwde Omgeving*, M. de Wit, TU Eindhoven, 2001
- [V] *Computational fluid dynamics simulations and validation of the pressure distribution on the roof of a commercial multi-span Venlo-type glasshouse*, S. Reichrath en T.W. Davies, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, no.90, 2002
- [W] <http://www.agriholland.nl/dossiers/kassenbouw/standtechniek.html>
- [X] *European Wind Atlas*, Ib Troen en Erik Lundtang Petersen, publication for the community of EU countries, DG for SRD, Brussel, 1989
- [Y] <http://www.belastingdienst.nl/zakelijk/investeren/5a57f7c.htm>,
<http://www.belastingdienst.nl/zakelijk/investeringsregelingen/5a57ca1.htm>

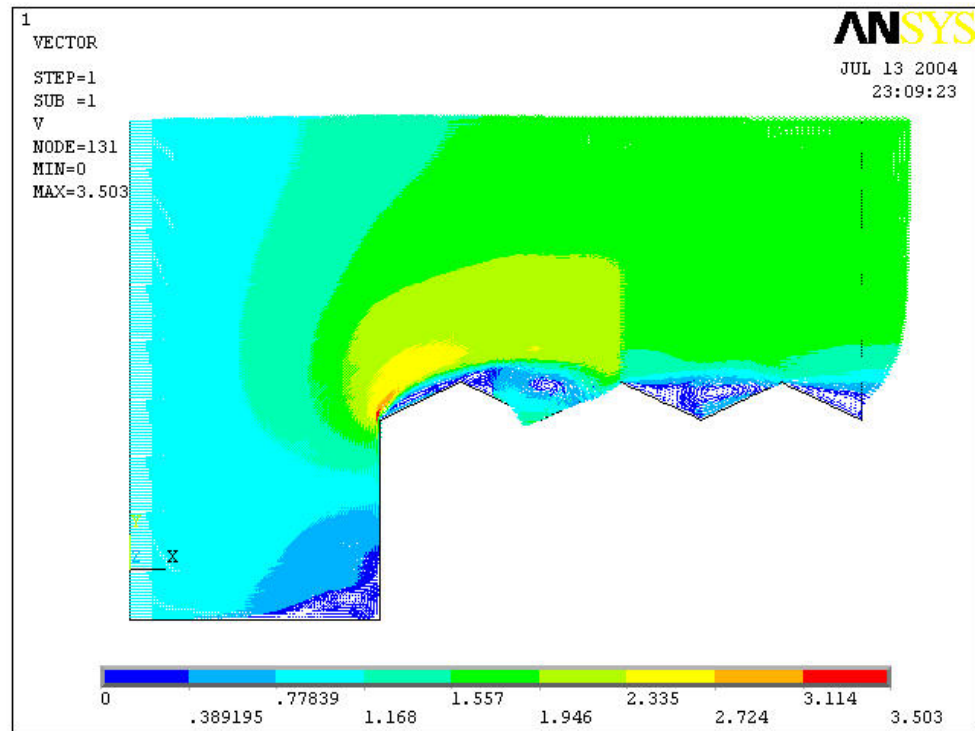
A Bijlage: verloop van de stroming rondom de kas bij toenemende kashoogte

De figuren in deze bijlage geven voor oplopende kashoogte telkens het verloop van de windsnelheid langs de kas. De hoogte van de kaswand loopt, met stappen van 1 m, op van 3 tot 6 meter. Hierbij is uitgegaan van een ongestoord windprofiel met een snelheid van 1 m/s. Zoals te zien wordt de wind door de kaswand omhoog gestuwd, waardoor deze langs het kasdak schuin omhoog voortbeweegt om vervolgens weer in horizontale richting zijn weg te vervolgen.

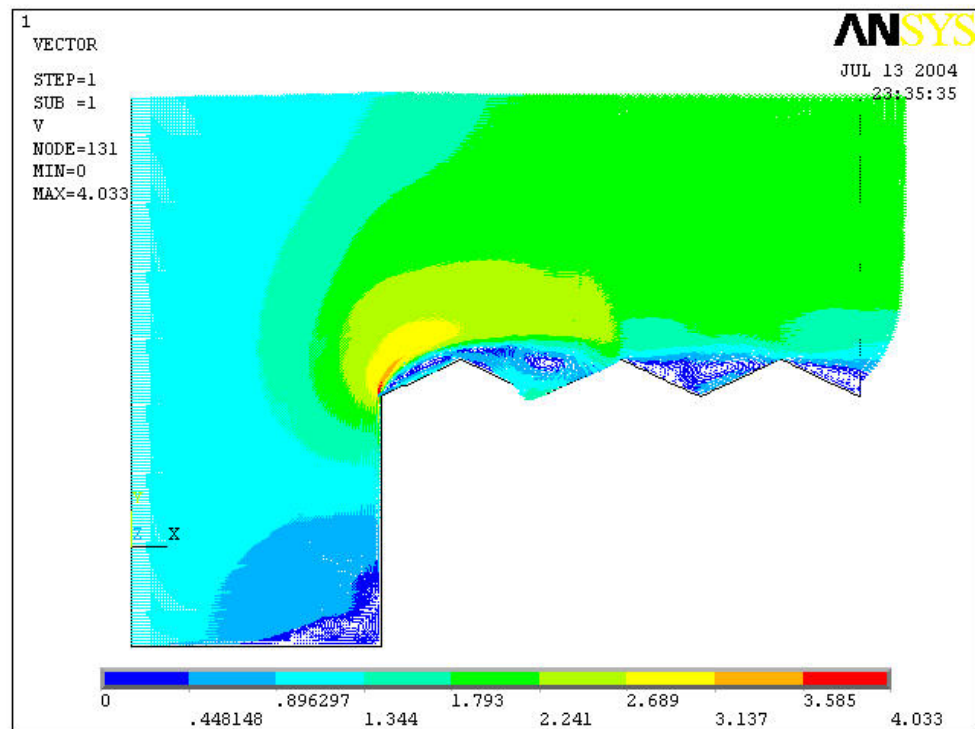
Merk op dat de kleuren in de verschillende figuren niet overeenkomen met dezelfde gemiddelde windsnelheid. De legenda's onderin de figuren geven steeds een indicatie van de grootte van de optredende snelheid.



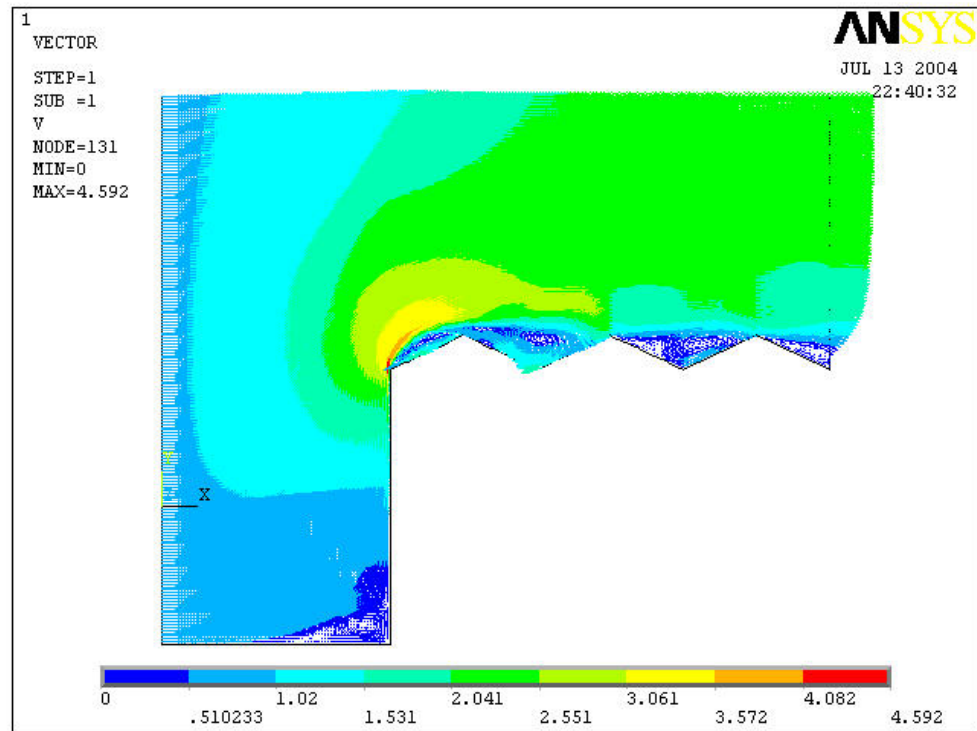
Stromingsprofiel bij een kas met een goothoogte van 3 m.



Stromingsprofiel bij een kas met een goothoogte van 4 m.



Stromingsprofiel bij een kas met een goothoogte van 5 m.



Stromingsprofiel bij een kas met een goothoogte van 6 m.