

**ANRE-DEMONSTRATIEPROJECT:
“WINDENERGIE ”
ECOPOWER, EEKLO**

Eindrapport

E. Peeters en J. Van Bael

Vito

Maart 2004

SAMENVATTING

Ecopower cvba is een coöperatieve vennootschap die zich geëngageerd heeft om op een milieuvriendelijke manier elektriciteit op te wekken uit windenergie. In het kader van de bevordering van nieuwe energietechnologieën (KB van 10/02/1983) heeft de Vlaamse overheid aan Ecopower cvba een subsidie toegekend van 247.893,52 € voor de investeringskosten van een windturbine op het stedelijk containerpark van Eeklo.

Vito voerde in opdracht van de Afdeling Natuurlijke Rijkdommen en Energie (ANRE) van de Vlaamse Gemeenschap een energetische evaluatie van dit demonstratieproject uit, en schrijft hiervoor het eindrapport. De monitoring van het windturbine-project liep over een tijdsperiode van 1 jaar, namelijk vanaf 01 juli 2001 t.e.m. 30 juni 2002. Op basis van metingen werden de technische prestaties van de windturbine, de bereikte primaire energiebesparing, de vermindering van de CO₂-emissie, de rendabiliteit en de energetische terugverdientijd geëvalueerd.

Voor de betreffende windturbine met een nominaal vermogen van 1.800 kW, bedroeg de totale bruto elektriciteitsproductie tijdens de monitoringperiode 3.954.879 kWh/jaar, wat 29 % meer is dan wat werd voorspeld door de haalbaarheidstudie die voor de opstart van het project werd uitgevoerd door de VUB. Het eigenverbruik van de windmolen was slechts 1.904 kWh/jaar. De gemiddelde capaciteitsfactor bedraagt 25 %. Dit levert een totaal aantal vollasturen op van 2.197 u, wat hoger is dan de 2.000 u die vooropgesteld wordt om een rendabel project te hebben.

De windturbine heeft gedurende de meetperiode een gemiddeld jaarrendement gehaald van 46 %, wat zeer hoog is in vergelijking met de Betz-limiet die alleen al voor de rotor een theoretisch maximumrendement vooropstelt van 59 %. Hierbij moet worden opgemerkt dat de berekeningen van het rendement werden uitgevoerd op basis van windmetingen met een windsensor op de gondel van de windturbine, wat minder nauwkeurige resultaten geeft dan metingen met een afzonderlijke meetmast.

Uit de meetgegevens wordt afgeleid dat de besparing op het primair energieverbruik die de windturbine van Ecopower met zich meebrengt, in vergelijking met een elektriciteitspark dat enkel bestaat uit met fossiele brandstoffen gestookte thermische centrales 34.726 GJ/jaar bedraagt. Ook wat de CO₂-uitstoot betreft brengt de windturbine van Ecopower een besparing teweeg. Door de 3.954.879 kWh elektriciteit die de turbine jaarlijks produceert, bedraagt deze besparing 2.717 ton/jaar.

Uitgaande van financiële cijfers bedraagt de terugverdientijd van de windturbine inclusief het 10-jarig onderhoudscontract 5,2 jaar. Indien de subsidie van 247.893,52 € in rekening wordt gebracht, bedraagt de terugverdientijd nog 4,5 jaar.

De energetische terugverdientijd voor deze windturbine is 0,36 jaar voor wat betreft de benodigde primaire energie en 0,37 jaar voor wat betreft de CO₂-uitstoot. Hierbij is rekening gehouden met de totale nodige primaire energie en CO₂-uitstoot zowel voor productie, onderhoud als afbraak van de windturbine.

INHOUD

1	INLEIDING	4
2	TECHNISCHE BESCHRIJVING VAN DE INSTALLATIE.....	5
2.1	BESCHRIJVING VAN DE WINDTURBINE.....	5
2.2	INPLANTING VAN DE WINDTURBINE	6
3	METINGEN EN REGISTRATIE VAN DE ENERGIESTROMEN	9
4	TECHNISCHE EVALUATIE.....	10
4.1	DRAAIUREN	10
4.2	HET WINDKLIMAAT.....	11
4.3	GEPRODUCEERDE ELEKTRICITEIT.....	13
4.4	RENDEMENT	18
5	PRIMAIRE ENERGIEBESPARING EN REDUCTIE VAN DE CO₂-EMISSIE.....	19
5.1	PRIMAIRE ENERGIEBESPARING	19
5.2	VERMINDERING CO ₂ -EMISSIE	19
6	ECONOMISCHE EVALUATIE	20
6.1	INVESTERING	20
6.2	ONDERHOUDSKOSTEN	20
6.3	GEREALISEERDE BESPARING	20
6.4	RENDABILITEIT	20
7	ENERGETISCHE TERUGVERDIEN TIJD	22
8	MENING VAN DE EIGENAAR	23
8.1	TECHNISCHE EVALUATIE	23
8.2	FINANCIËLE EVALUATIE.....	23
8.3	MAATSCHAPPELIJKE EVALUATIE	23
9	BESLUIT.....	25

BIJLAGE I: RENDEMENT EN CO₂-EMISSIEFACTOR ELEKTRICITEITSPARK
REFERENTIES

1 INLEIDING

Ecopower cvba is een coöperatieve vennootschap met als doel het verzamelen van financiële middelen voor alternatieve, duurzame en hernieuwbare energieproductie. In de beginjaren richtte Ecopower vooral de aandacht naar de bouw en de restauratie van waterturbines. Daarna werd hun actieterrein verruimd en werd Ecopower actief op verschillende deelterreinen van hernieuwbare energie en rationeel energiegebruik. De financieringscoöperatie Ecopower is afgestemd op bewonersparticipatie, wat inhoudt dat de financiering van de cvba voornamelijk gebeurt door investeerders die de ideologie van de decentrale energieopwekking genegen zijn.

Het betreffende project omvat de plaatsing van een windturbine van 1.800 kW op de terreinen van het stedelijk containerpark van Eeklo. De stad Eeklo fungeert als partner bij het project in het kader van het Gemeentelijk NatuurOntwikkelingsPlan (GNOP). Financiële steun in het kader van de demonstratieprojecten i.v.m. energietechnologiën werd aangevraagd in mei 2000. Het project werd goedgekeurd als demonstratieproject in december 2000, en de molen is opgestart op 22 juni 2001 (officiële opening op 30 juni 2001 door Minister Stevaert).

Vito voerde in opdracht van de Afdeling Natuurlijke Rijkdommen en Energie (ANRE) van de Vlaamse Gemeenschap een energetische evaluatie van dit demonstratieproject uit, en schrijft hiervoor het eindrapport. De monitoring van het windturbine-project liep over een tijdspanne van 1 jaar, namelijk vanaf 01 juli 2001 t.e.m. 30 juni 2002. Op basis van metingen werden de technische prestaties van de windturbine, de bereikte primaire energiebesparing, de vermindering van de CO₂-emissie, de rendabiliteit en de energetische terugverdientijd geëvalueerd

In dit rapport wordt in hoofdstuk 2 een technische beschrijving van de windturbine gegeven. In het derde hoofdstuk wordt de meting en registratie van de energiestromen beschreven en in hoofdstuk 4 worden de meetresultaten geanalyseerd. In hoofdstuk 5 wordt de besparing op primaire energie en de vermindering van de CO₂-emissie berekend. Vervolgens wordt de economische evaluatie beschreven in hoofdstuk 6 en de energetische terugverdientijd in hoofdstuk 7. Na de beschrijving van de mening van de eigenaar in hoofdstuk 8 wordt het besluit geformuleerd in hoofdstuk 9.

2 TECHNISCHE BESCHRIJVING VAN DE INSTALLATIE

2.1 Beschrijving van de windturbine

De Enercon E66 is een windturbine met een driebladige rotor, actieve bladhoekcontrole en een variabel toerentalregeling met een rotordiameter van 70 m, een nominaal vermogen van 1.800 kW en een ashoogte van 85 m. De turbine is ontworpen in overeenstemming met de GL / IEC windklasse II voor rotordiameters van 70 m.

De met glasvezel verstevigde plastic (GRP) / epoxyhars gemaakte rotorbladen zijn van groot belang voor de energieopbrengst en de geluidsproductie van de windmolen. Ze zijn speciaal ontworpen om te kunnen functioneren met zowel een variabele bladhoek als een variabel toerental. Dankzij het speciale profiel zijn ze ongevoelig voor turbulenties en invloeden van buitenaf op de bladneuzen. De buitenkant van de rotorbladen is tegen verontreiniging beschermd door een sterk slijtagebestendige en taaie polyurethaan coating met een hoge bestendigheid tegen chemische invloeden en stralingen.

De bladhoek van de drie rotorbladen wordt geregeld door 3 onafhankelijke microprocessor gestuurde systemen. De werkelijke bladhoek van ieder blad wordt continu gecontroleerd en de drie bladhoeken worden gesynchroniseerd. Deze techniek maakt een snelle en precieze regeling van alle bladhoeken mogelijk, afhankelijk van de bestaande windsituatie. Het bladhoekregelsysteem zal de snelheid van de rotor en de kracht op de rotorbladen verminderen. De geleverde elektrische energie zal daarom zelfs op korte termijn beperkt blijven tot 1 à 2 % meer dan de nominale waarde.

Het roterende gedeelte van de Enercon ringgenerator en de rotor van de Enercon E66 vormen samen een eenheid. De meerpolige generator is gebaseerd op het principe van een synchrone machine. Over het volledige werkingsgebied van de generator zou volgens de producent een efficiëntie van 94 % bereikt worden. Het roterende gedeelte van de generator is rechtstreeks met een flensverbinding op de naaf van de rotor bevestigd zodat ze beide op dezelfde lage snelheid zullen draaien. Dankzij het ontbreken van een tandwielkast en snelbewegende delen zullen het energieverlies tussen de rotor en de generator, de geluidsproductie, het verbruik van tandwielkastolie en mechanische slijtage worden beperkt. Als gevolg van de lage rotatiesnelheid en de grote dwarsdoorsnede van de generator is het temperatuurniveau betrekkelijk laag en aan weinig veranderingen onderhevig. De geringe temperatuurschommelingen en de weinige wijzigingen in de belasting tijdens werking zullen de mechanische spanningen en de veroudering van het generator- en isolatiemateriaal tot een minimum beperken. Dankzij de variabele toerentalwerking zullen daarnaast de koppelpieken verminderd worden.

De door de E66 generator opgewekte stroom wordt via het Enercon systeem voor de aansluiting op het net aan het openbare elektriciteitsnet geleverd. Het systeem voor de aansluiting op het net bestaat uit een gelijkrichter, een gelijkstroom tussenkring en een inverter, waardoor de stroom van de generator wordt omgezet en getransformeerd naar een stroomvorm en –waarde in overeenstemming met de vereisten van de openbare nutsvoorzieningen om vervolgens aan het openbare net te worden geleverd. Dit stelt de rotor van de E66 in staat om op verschillende toerentalen te draaien. Bij lage windsnelheden zal de rotor langzaam en bij hoge windsnelheden zal hij snel draaien. Dit

garandeert een optimale luchtstroom op de rotorbladen. Daarnaast zal de variabele snelheid de belastingen als gevolg van windvlagen tot een minimum beperken.

De rotor zal uitsluitend voor het onderhoud en het gebruik van de snelstop of de noodstop compleet worden geblokkeerd door een extra rotorrem, die echter pas zal ingrijpen als de rotor al tot een bepaald niveau zal zijn afgeremd. Om de windturbine af te remmen, worden uitsluitend de rotorbladen volledig uit de wind gedraaid. Hiervoor worden de drie onafhankelijke pitchaandrijvingen gebruikt. Deze aandrijvingen zijn in staat om de bladen binnen enkele seconden volledig uit de wind te draaien. De snelheid van de turbine wordt teruggebracht zonder dat het hoofdaandrijfmechanisme extra wordt belast. In geval van nood kan het uit de wind draaien van 1 blad volstaan. Als de turbine is uitgeschakeld, wordt de rotor ook niet vastgezet. De rotor kan langzaam vrijlopen. De rotor en het aandrijfmechanisme zullen praktisch onbelast zijn.

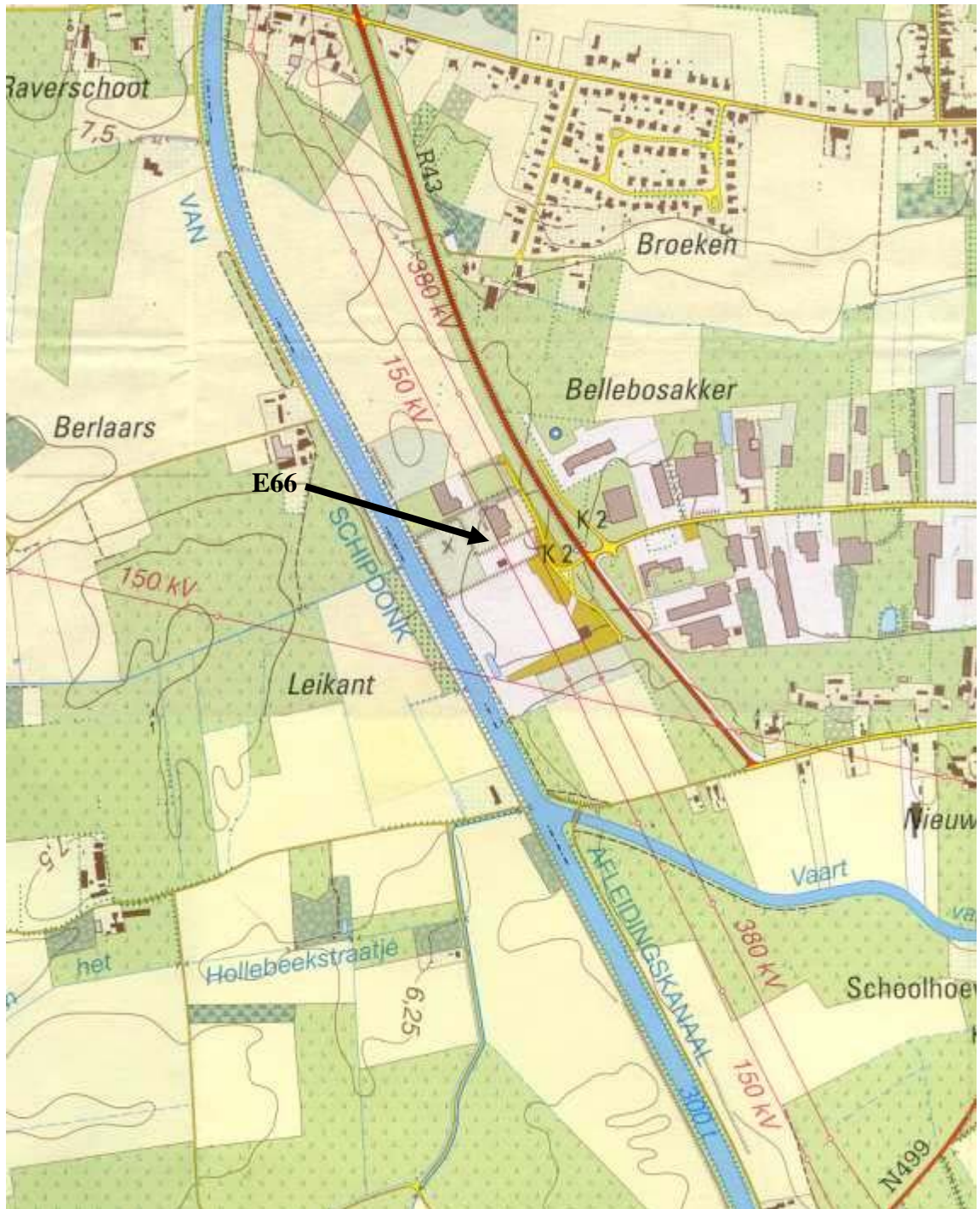
De belangrijkste technische specificaties van de Enercon E66 windturbine worden samengevat in Tabel 1.

Tabel 1: Technische specificaties van de Enercon E66

Technische specificaties E66	
Nominaal vermogen (kW)	1.800
Rotordiameter (m)	70
Ashoogte (m)	85
Omwentelingsnelheid (t.p.m.)	10 ... 22
Opstartwindsnelheid (m/s)	3
Nominale windsnelheid (m/s)	13
Maximum windsnelheid (m/s)	25
Brongeluid (dB(A))	102,5
Sturing en regeling	Pitch

2.2 Inplanting van de windturbine

De stad Eeklo heeft de inplanting van windmolens ingepast in het stedelijke natuurontwikkelingsplan. Vooraleer de stad besliste een recht van opstal aan te bieden voor het plaatsen van windmolens, werd een lange weg afgelegd. Een zorgvuldige ruimtelijke analyse werd opgezet. Rekening houdend met o.a. het ruimtelijk structuurplan Vlaanderen, met de aanzet tot het provinciaal structuurplan en met het GNOP (Gemeentelijk NatuurOntwikkelingsPlan), bleken slechts 3 gebieden in Eeklo aanvaardbaar voor het plaatsen van windmolens. Op twee van deze plaatsen heeft de stad grond in bezit, waarvoor zij dus recht van opstal kon uitschrijven: aan het sportterrein bij de Zandvleuge en bij het gemeentelijk containerpark bij de Ringlaan. Het is de windturbine op deze tweede locatie, de Leidijkmolen, waarvoor steun vanuit het ANRE-demonstratieprogramma werd goedgekeurd. Figuur 1 geeft een overzicht van de locatie, en Figuur 2 toont een foto van de betreffende 1.800 kW windturbine E66 op het containerpark van Eeklo.



Figuur 1: Positie van de Enercon 1.800 kW windturbine op het containerpark van Eeklo (schaal 1:10.000)



Figuur 2: Foto van de windturbine E66 in Eeklo

3 METINGEN EN REGISTRATIE VAN DE ENERGIESTROMEN

Windenergieinstallaties van Enercon zijn uitgerust met een monitoring- en besturingssysteem op afstand. De vereiste hardware voor de controle op afstand bestaat uit een standaard PC configuratie. Enercon Service levert een centraal controlesysteem op afstand dat de afzonderlijke windturbines en windparken ondervraagt om actuele werkgegevens te verkrijgen. Dit systeem maakt het mogelijk om op afstand de turbineparameters aan te passen en storingssignalen en waarschuwingen te ontvangen. Voor de molen in Eeklo kunnen zowel Ecopower als Enercon (de leverancier die ook het onderhoudscontract opvolgt) de meetgegevens op afstand uitlezen.

Voor de monitoring wordt gebruik gemaakt van deze metingen die aanwezig zijn in de E66 windturbine zelf. Volgende gegevens, telkens op 10 minuten basis, worden hierbij uitgelezen:

- V_{gem} gemiddelde windsnelheid (m/s)
- V_{max} maximum windsnelheid (m/s)
- V_{min} minimum windsnelheid (m/s)
- n_{gem} gemiddelde draaisnelheid (tpm)
- n_{max} maximum draaisnelheid (tpm)
- n_{min} minimum draaisnelheid (tpm)
- P_{gem} gemiddeld vermogen (kW)
- P_{max} maximum vermogen (kW)
- P_{min} minimum vermogen (kW)
- pos positie van de molen (°)
- h aantal draaiuren (u)
- E totale bruto productie (kWh)

De gegevens op 10 minuten basis werden per dag in een file bewaard. Dit geeft dus voor de meetperiode van 01/07/2001 tot 30/06/2002 365 afzonderlijke files. De gegevens werden door Ecopower geëxporteerd in db-formaat (.wsr) en vervolgens omgezet naar excel (.xls). Deze 365 files in excel-formaat werden in 1 keer naar Vito opgestuurd per e-mail voor verdere verwerking.

De gegevens voor het eigenverbruik van de molen werden eveneens door Ecopower geleverd, maar dan op maandbasis.

De totale bruto productie werd gemeten aan de laagspanningszijde, net voor de transformator. De gegevens voor de windsnelheid werden gemeten met een windsensor bovenop de gondel van de windmolen. Deze windsensor bevat zowel een anemometer voor het bepalen van de windsnelheid als een windvaan voor de windrichting.

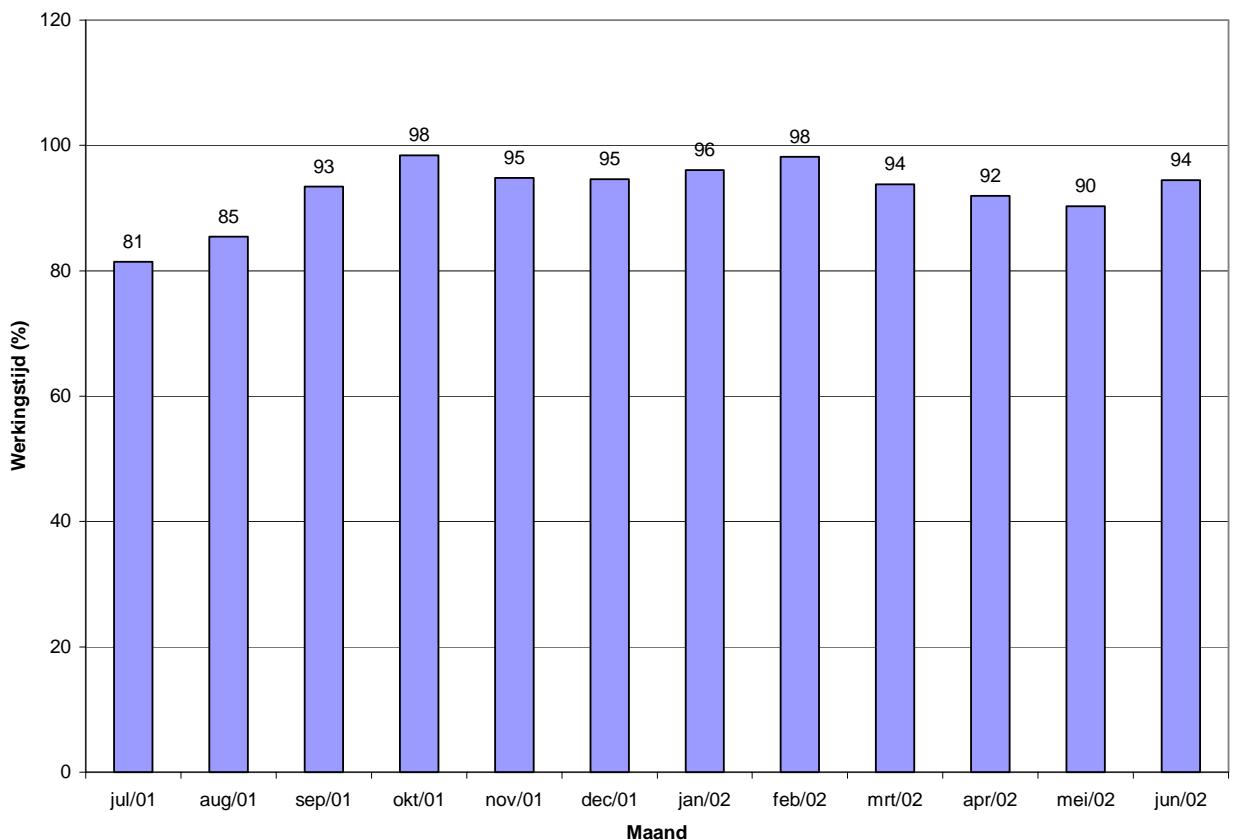
4 TECHNISCHE EVALUATIE

In deze paragraaf wordt een technische evaluatie van de windturbine gemaakt op basis van meetgegevens over de periode juli 2001 tot en met juni 2002. Op de volledige meetperiode van 8.760 uur ontbreken slechts gegevens voor een totale periode van 5,5 uur, wat een data rate recovery oplevert van bijna 100 %.

De maandelijkse productie vanaf opstart van de Leidijkmolen op 22 juni 2001 kan geraadpleegd worden op de website van Ecopower: <http://www.ecopower.be>.

4.1 Draaiuren

Het totaal aantal uren dat de windturbine elektriciteit produceert en het net instuurt gedurende de meetperiode, bedraagt 8.121 u. Dit betekent dat de turbine gedurende bijna 93 % van het meetjaar elektriciteit geproduceerd heeft. In onderstaande Figuur 3 wordt een overzicht gegeven van de procentuele maandelijkse werkingstijd van de Leidijkmolen.



Figuur 3: procentuele maandelijkse werkingstijd van de windturbine

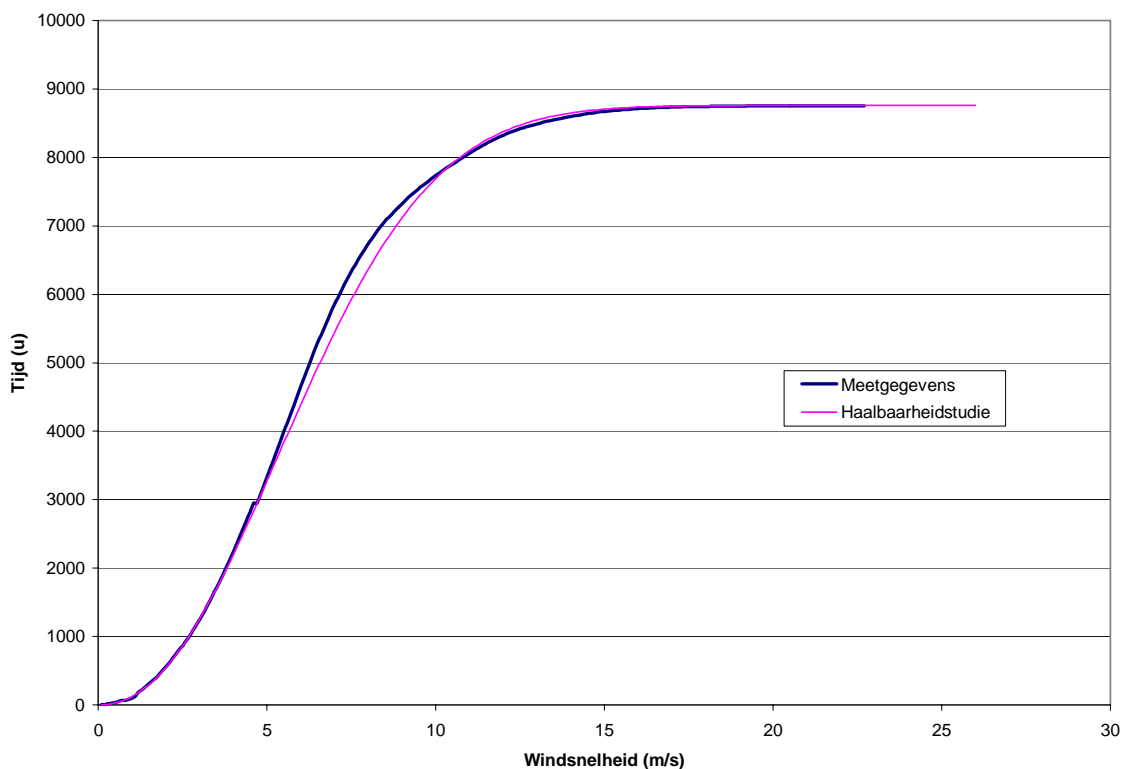
In deze grafiek valt onmiddellijk op dat gedurende de eerste 2 meetmaanden juli en augustus 2001 de molen respectievelijk 14 % en 10 % minder procentuele draaiuren heeft

dan het gemiddelde aantal draaiuren in de laatste 10 meetmaanden van september 2001 t.e.m. juni 2002 dat 94,5 % bedraagt.

De totale beschikbaarheid van de molen gedurende de meetperiode kan eveneens afgelezen worden op de computer, en bedraagt ongeveer 98 %. Enercon garandeert tijdens de garantieperiode en tijdens de periode van het onderhoudscontract (totale periode van 10 jaar) een beschikbaarheid van 97 %.

4.2 Het windklimaat

De opbrengst van een windturbine is in de eerste plaats afhankelijk van de in de wind beschikbare energie, en dus van de windsnelheid. De volgende Figuur 4 geeft een beeld van de windsnelheid gedurende de meetperiode. Uit deze grafiek kan worden afgeleid gedurende hoeveel uur van de meetperiode een bepaalde windsnelheid (of minder) is voorgekomen. De twee curves zijn gebaseerd op enerzijds de meetgegevens en anderzijds de resultaten van de haalbaarheidstudie die werd uitgevoerd door de VUB voor het opstarten van de windturbine.



Figuur 4: Voorkomen van de windsnelheid op 85 m hoogte, gebaseerd op enerzijds de meetgegevens en anderzijds de haalbaarheidstudie van de VUB

Uit de meetgegevens kan worden afgeleid dat gedurende de helft van het jaar (4.380 u) de gemiddelde windsnelheid op uurbasis kleiner dan of gelijk is aan 5,8 m/s. Gedurende 2/3 van het jaar (5.840 u) bedraagt deze windsnelheid ongeveer 7 m/s. De grootste

windsnelheid die gemiddeld op uurbasis wordt gemeten is 22,7 m/s. Gedurende 8.476 u komt een gemiddelde windsnelheid voor kleiner dan de nominale windsnelheid van 13 m/s.

Voor de haalbaarheidstudie werden de meteostations Middelkerke en Melsbroek gebruikt, die beide opgenomen zijn in de Europese Windatlas. Beide meteostations werden via het software pakket WASP verwerkt en geëxtrapolerd naar de locatie in Eeklo, rekening houdend met de ruwheid van het terrein, de hoogtelijnen, en de afstand tussen de site en de meteostations. De extrapolaties voor het containerpark op een hoogte van 85 m, geven de volgende resultaten:

- Gemiddelde windsnelheid: 6,3 m/s;
- De Weibulldichtheidsfunctie $f(x,k,A)$ van de windsnelheid (x) wordt gekenmerkt door een schaalfactor A van 7,1 m/s en een vormfactor k van 2,17.

$$f(x, k, A) = \frac{k}{A^k} x^{k-1} e^{-(x/A)^k}$$

- De maximaal voorkomende windsnelheid volgens de Weibulldichtheidsfunctie bedraagt 25,9 m/s.

De volgende Tabel 2 geeft de resultaten van de gemeten waarden van de gemiddelde en de maximum windsnelheid voor elke maand.

Tabel 2: resultaten van de meetgegevens voor de maandelijkse waarden van de gemiddelde en de maximum windsnelheid

Maand	Gemiddelde windsnelheid (m/s)	Maximum windsnelheid (m/s)
Juli 2001	4,8	24,5
Augustus 2001	5,1	21,6
September 2001	5,7	23,6
Oktober 2001	6,8	24,6
November 2001	5,5	29,4
December 2001	6,2	26,2
Januari 2002	7,4	31,8
Februari 2002	9,7	33,5
Maart 2002	6,1	25,0
April 2002	6,0	26,7
Mei 2002	5,8	25,2
Juni 2002	5,0	17,3
Volledige meetperiode	6,2	33,5

De gemiddelde windsnelheid is het grootst in de maand februari, nl. 9,7m/s, wat 31 % meer is dan voor maand met de daarop volgende grootste gemiddelde windsnelheid, nl. januari 2002 met een gemiddelde windsnelheid van 7,4 m/s. Voor de overige maanden ligt de gemiddelde waarde van de windsnelheid tussen 4,8 m/s en 6,8 m/s. De maandelijks gemeten waarde voor de minimum windsnelheid bedraagt telkens 0 m/s.

4.3 Geproduceerde elektriciteit

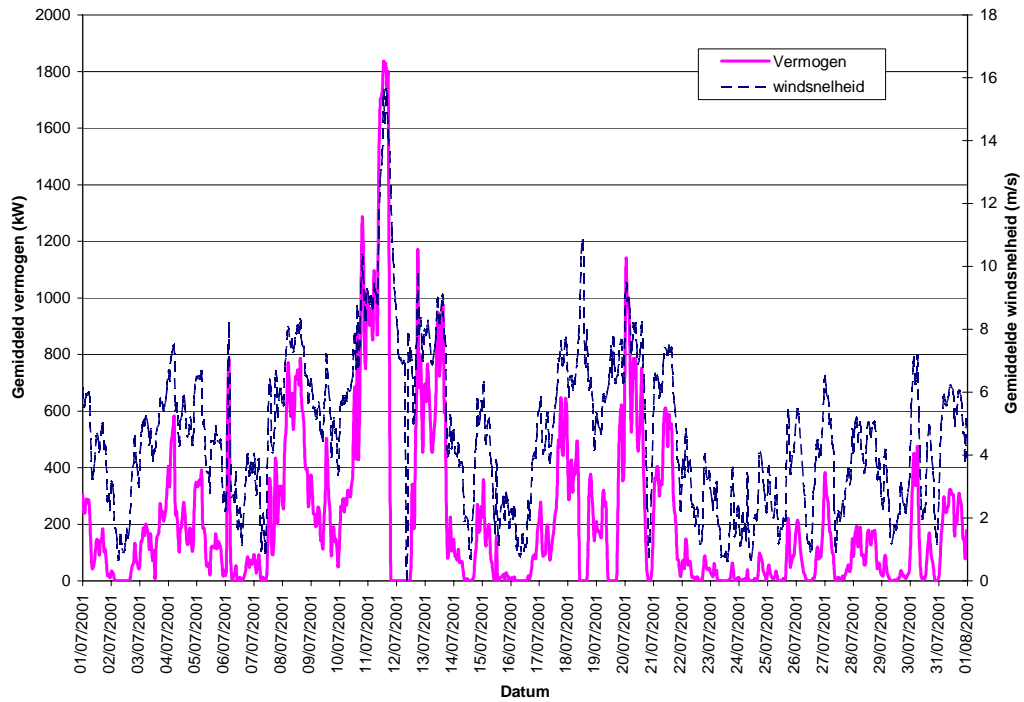
De volgende Tabel 3 toont de gemeten waarden van het gemiddeld vermogen, het maximum vermogen, de totale elektriciteitsproductie en het eigenverbruik voor elke maand van de meetperiode.

Tabel 3: resultaten van de meetgegevens voor de maandelijkse waarden van het gemiddeld vermogen, het maximum vermogen en de totale elektriciteitsproductie

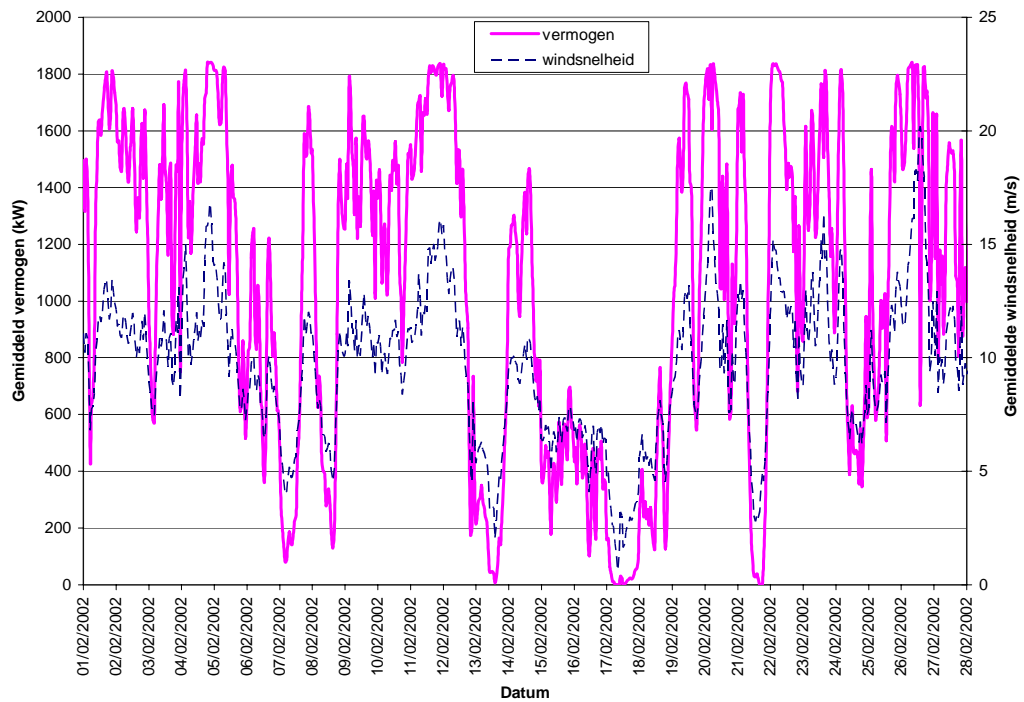
Maand	Gemiddeld vermogen (kW)	Maximum vermogen (kW)	Totale productie (kWh)	Eigenverbruik (kWh)
Juli 2001	218,1	1.917	163.312	437
Augustus 2001	270,4	1.915	203.582	355
September 2001	349,3	1.908	254.995	143
Oktober 2001	528,9	1.974	397.364	27
November 2001	344,1	1.973	250.798	109
December 2001	476,2	1.992	357.735	128
Januari 2002	663,2	2.012	497.281	102
Februari 2002	1063,6	2.033	718.673	45
Maart 2002	440,8	1.978	331.419	131
April 2002	436,8	1.975	318.195	99
Mei 2002	387,1	1.970	290.261	221
Juni 2002	235,3	1.881	171.264	107
Volledige meetperiode	451,1	2.033	3.954.879	1.904

Het eigenverbruik van de molen bedraagt minder dan 0,05 % van de totale productie van de Leidijkmolen, en wordt daarom in de volgende berekeningen verwaarloosd.

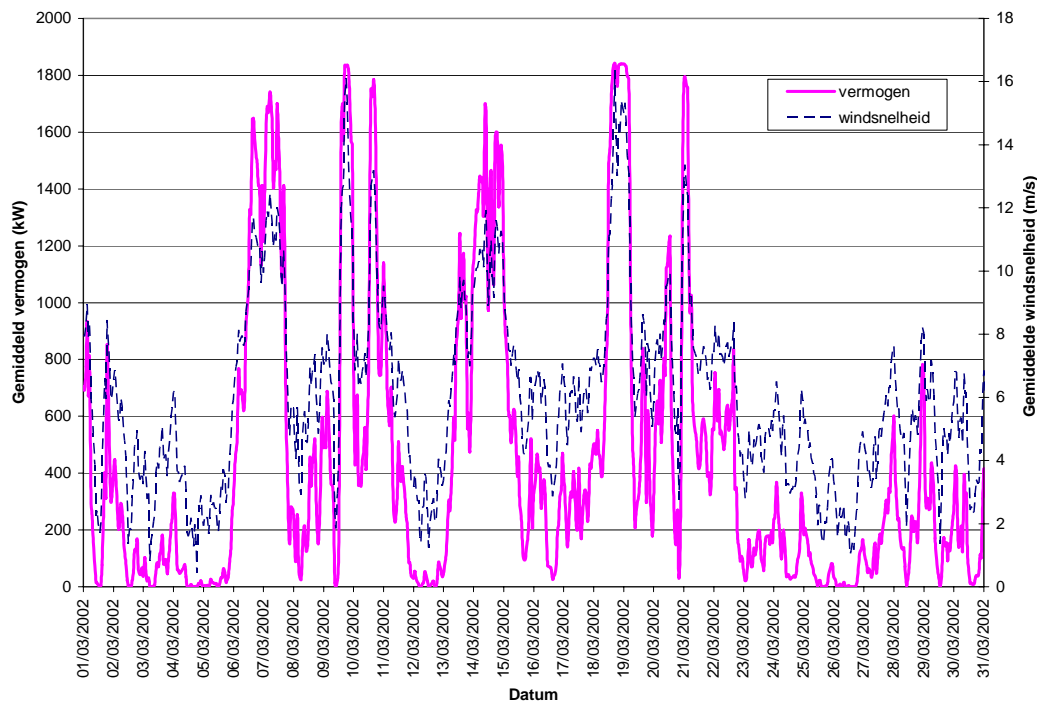
Het is opvallend dat in de kortste maand van het jaar, nl. februari, de grootste hoeveelheid elektriciteit geproduceerd werd, nl. 718.673 kWh. Deze elektriciteitsproductie is zelfs 144,5 % van de tweede grootste elektriciteitsproductie in de maand januari, nl. 497.281 kWh. De volgende Figuur 5, Figuur 6 en Figuur 7 tonen het gemiddelde vermogen en de gemiddelde windsnelheid op uurbasis voor de maanden juli 2001 met de laagste opbrengst, februari 2002 met de grootste opbrengst en maart 2002 met een tussenliggende waarde voor de opbrengst.



Figuur 5: Uurlijkse waarden van het gemiddeld vermogen en de gemiddelde windsnelheid (gestippelde lijn) in de maand juli 2001



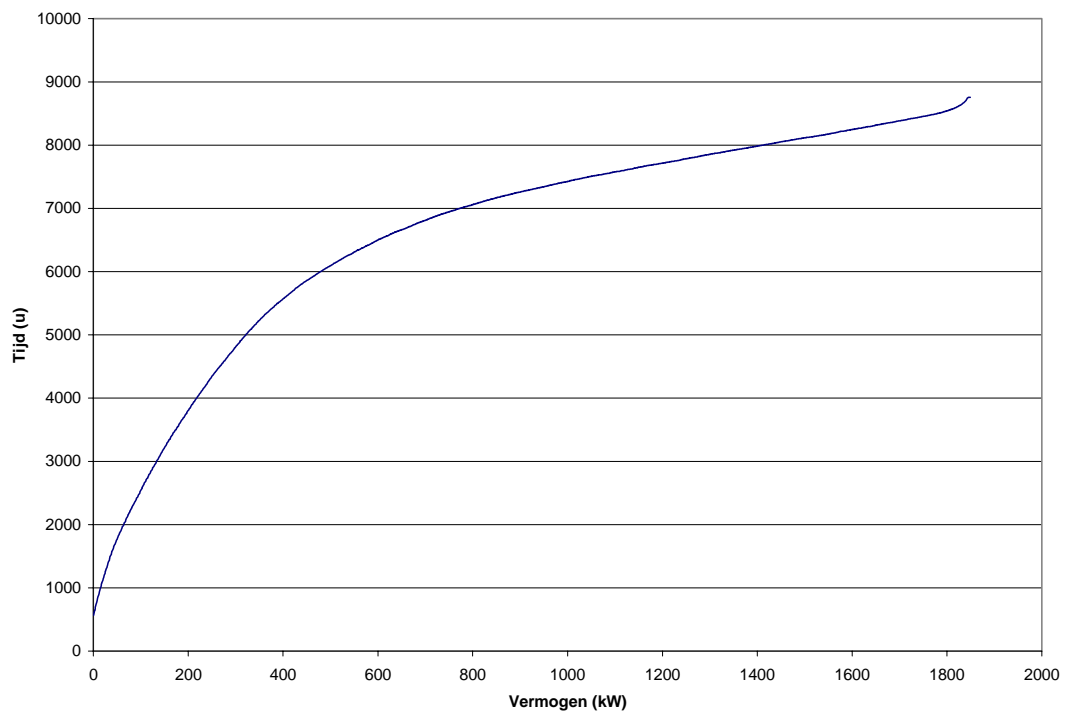
Figuur 6: Uurlijkse waarden van het gemiddeld vermogen en de gemiddelde windsnelheid (gestippelde lijn) in de maand februari 2002



Figuur 7: Uurlijkse waarden van het gemiddeld vermogen en de gemiddelde windsnelheid (gestippelde lijn) in de maand maart 2002

Men ziet telkens een gelijkaardig patroon in de curve van de windsnelheid en van de elektriciteitsproductie. Wanneer Tabel 2 en Tabel 3 met elkaar vergeleken worden, is een gelijkaardig verband tussen windsnelheid en vermogen zichtbaar.

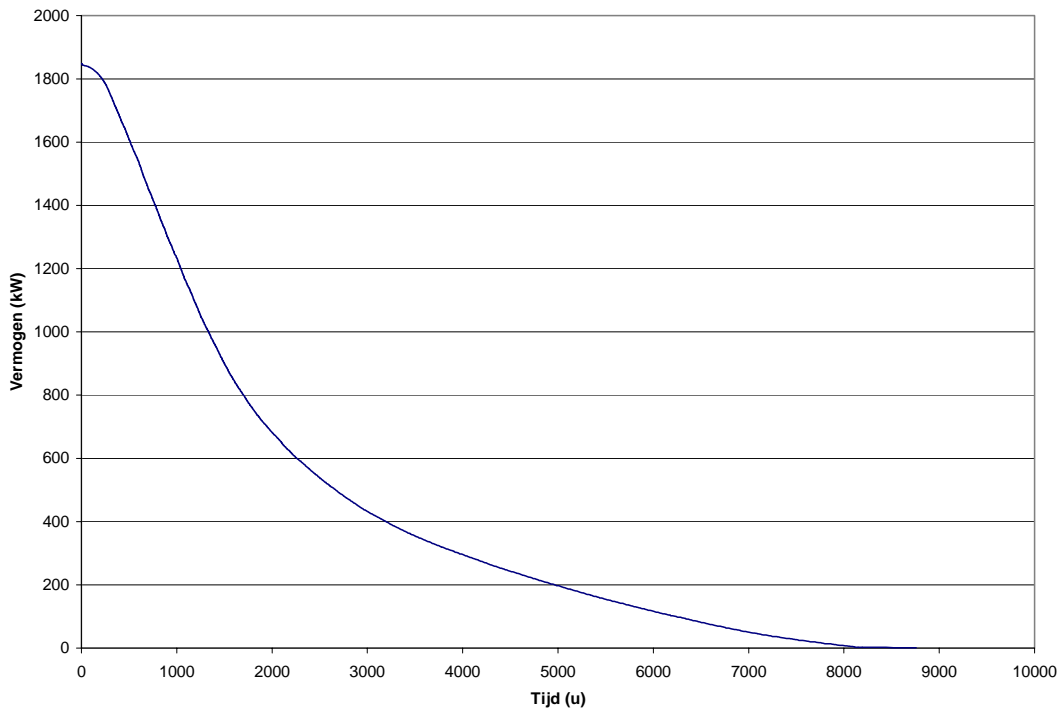
De volgende Figuur 8 geeft een beeld van het gemiddelde vermogen gedurende de meetperiode. Uit deze grafiek kan worden afgeleid gedurende hoeveel uur van de meetperiode een bepaald vermogen (of minder) werd geleverd.



Figuur 8: Voorkomen van het vermogen geleverd door de windturbine

Uit deze grafiek kan worden afgeleid dat gedurende de helft van het jaar (4.380 u) een gemiddeld vermogen op uurbasis wordt geleverd door de windturbine dat kleiner is of gelijk aan 254 kW. Gedurende 2/3 van het jaar (5.840 u) bedraagt dit vermogen 446 kW, wat nog steeds slechts 25 % is van het nominaal vermogen van de windturbine. Gedurende ongeveer 1.500 u wordt meer dan de helft van het nominaal vermogen (>900 kW) geleverd. Gedurende 8.539 u wordt een vermogen geleverd kleiner dan het nominale vermogen. Het nominaal vermogen van 1.800 kW wordt geleverd gedurende ongeveer 3 u, en gedurende 15,5 u wordt op uurbasis een groter gemiddeld vermogen geleverd dan het nominale vermogen van 1.800 kW. Het grootst voorkomende vermogen dat gemiddeld op uurbasis wordt geleverd bedraagt 1.849 kW.

De volgende Figuur 9 toont de belastingsduurcurve, die weergeeft gedurende hoeveel uur van de meetperiode een bepaald gemiddeld vermogen (of meer) op uurbasis werd geleverd.



Figuur 9: Belastingsduurcurve

De totale opbrengst gedurende de meetperiode bedroeg 3.954.879 kWh. In de haalbaarheidstudie die door de VUB werd gedaan voor de opstart van de windturbine, werd een jaarlijkse productie vooropgesteld van 3.076 MWh. De werkelijke productie bedraagt dus bijna 29 % meer dan wat werd voorspeld, desondanks het feit dat de werkelijke windkarakteristiek de voorspelde zeer goed benadert. De capaciteitsfactor van de Leidijkmolen bedraagt

$$C = \frac{\text{Opbrengst}}{P_{nom} \times 8760} = 25 \%$$

Een capaciteitsfactor van 25 % is goed voor een windturbine in Eeklo. De windturbine is namelijk ontworpen in overeenstemming met de IEC windklasse II, die specifiek van toepassing is voor windmolens die langs de kustlijn geplaatst worden, dus voor gebieden met een hogere gemiddelde windsnelheid dan in Eeklo het geval is. Het totaal aantal vollasturen bedraagt 2.197 u, wat eveneens hoger is dan de 2.000 u die vooropgesteld wordt om een rendabel project te hebben.

4.4 Rendement

De energie die gedurende het meetjaar aanwezig was in de wind op de hoogte van de as van de windturbine, wordt berekend met de volgende formule:

$$E_{wind} = \frac{\rho}{2} v^3 \frac{\pi}{4} D^2 h$$

waarbij: E_{wind} : energie aanwezig in de wind gedurende de meetperiode (kWh)
 ρ : dichtheid van lucht (kg/m³)
 v : windsnelheid (m/s)
 D : diameter van de rotor (m)
 h : totaal aantal draaiuren gedurende het jaar (u)

De volgende Tabel 4 geeft een beeld van de maandelijkse resultaten van de energie aanwezig in de wind en de energie geleverd door de windturbine. De derde kolom geeft telkens het rendement van de windturbine.

Tabel 4: Overzicht op maandbasis van de energie aanwezig in de wind op ashoogte, de elektriciteit geproduceerd door de windturbine en het rendement van de turbine

Maand	Energie in de wind (kWh)	Geproduceerde elektriciteit (kWh)	Rendement (%)
Juli 2001	363.220	163.312	45
Augustus 2001	392.648	203.582	52
September 2001	450.219	254.995	57
Oktober 2001	778.809	397.364	51
November 2001	495.349	250.798	51
December 2001	752.821	357.735	48
Januari 2002	1.214.992	497.281	41
Februari 2002	1.900.750	718.673	38
Maart 2002	698.500	331.419	47
April 2002	650.651	318.195	49
Mei 2002	554.108	290.261	52
Juni 2002	309.710	171.264	55
Volledige meetperiode	8.561.779	3.954.879	46

De windturbine heeft op jaarbasis gedurende de meetperiode een rendement gehaald van gemiddeld 46 %, wat zeer hoog is. De Betz-limiet stelt een theoretisch maximumrendement voor de rotor voorop van 59 % waarvan dan nog de generatorverliezen moeten worden afgetrokken om het totale turbinerendement te bekomen. Hierbij moet worden opgemerkt dat de energie die beschikbaar is in de wind, berekend werd op basis van de windmetingen die werden uitgevoerd met behulp van een windsensor op de gondel van de turbine, wat minder nauwkeurig is dan metingen op een afzonderlijke meetmast.

5 PRIMAIRE ENERGIEBESPARING EN REDUCTIE VAN DE CO₂-EMISSIE

De besparing van primaire energie en de verminderde CO₂-emissie wordt bepaald op basis van de door de windturbine geproduceerde elektriciteit.

5.1 Primaire energiebesparing

Voor de bepaling van de besparing op primaire energie worden volgende uitgangspunten genomen (eveneens gebruikt bij de economische evaluatie en vermindering van de CO₂-emissie):

- Het totaal geïnstalleerd vermogen is 1.800 kW. Het is duidelijk dat wanneer er een groter vermogen wordt geïnstalleerd de resultaten in positieve zin zullen wijzigen;
- De elektriciteit die door de windturbine wordt geleverd, wordt vergeleken met een situatie waarbij deze elektriciteit wordt opgewekt door een park bestaande uit thermische centrales met fossiele brandstoffen;
- Voor het rendement van het totale park van thermische elektriciteitscentrales gestookt met fossiele brandstoffen wordt 41 % aangenomen (Bijlage I).

Uit de meetgegevens kan afgeleid worden, dat de besparing op het primair energieverbruik die te danken is aan de Leidijkmolen in Eeklo 34.726 GJ/jaar bedraagt.

5.2 Vermindering CO₂-emissie

Voor de bepaling van de reductie van de CO₂-emissie wordt naast de veronderstellingen gemaakt bij de bepaling van de besparingen op primaire energie nog de volgende aanname gedaan:

- De CO₂-emissie voor de productie van elektriciteit in een centrale bedraagt 687 g CO₂/kWh_{el} (zie bijlage I).

Uit de meetgegevens wordt afgeleid dat de reductie van de CO₂-uitstoot die de windturbine van Eeklo teweegbrengt, 2.717 ton/jaar bedraagt.

6 ECONOMISCHE EVALUATIE

Voor de economische evaluatie dienen de investeringskosten afgewogen te worden tegen de gerealiseerde besparing op de elektriciteitsfactuur en de onderhoudskosten.

6.1 Investing

De totale investering bedraagt 1.757.475,90 € of 976 €/kW . Dit bedrag bestaat uit de prijs van de windturbine, inclusief fundering, transformatorstation, ... Ook de kosten voor de grondwerken, het stabiliteitsonderzoek, de netaansluiting, de informatiepanelen en het eigen werk van Ecopower zijn hierbij inbegrepen. Er werd een subsidie van 247.893,52 € toegekend.

6.2 Onderhoudskosten

Naast de investeringkosten voor het ganse project komt er nog een jaarlijkse onderhoudskost bij om de molen draaiende te houden. Ecopower heeft een onderhoudscontract afgesloten met Enercon, waarbij Enercon een garantieperiode geeft van 4 jaar gedurende dewelke het onderhoud gratis is. De volgende 6 jaar van het onderhoudscontract is de kost afhankelijk van de geschatte productie (dit is vergelijkbaar met een verzekering voor een bepaalde productie). Het jaarlijkse bedrag is dan ongeveer 28.000 €.

- voor jaar 1 t/m 4: 0 €/jaar
- voor jaar 5 t/m 10: 28.000 €/jaar

6.3 Gerealiseerde besparing

De gerealiseerde financiële besparing wordt bepaald door de hoeveelheid geproduceerde elektriciteit en het terugbetaal tarief dat door de elektriciteitsproducent wordt gehanteerd. Dit tarief is afhankelijk van een aantal factoren, meerbepaald het seizoen (winter – zomer) en het moment van de dag (piek- of niet piekmoment). Het hoogste terugbetaaltarief is er tijdens de wintermaanden.

De windturbine heeft gedurende het jaar 3.954.879 kWh elektriciteit geproduceerd, en bracht voor Ecopower een totaal bedrag op van 352.202,66 €. Dit betekent een gemiddeld terugbetaaltarief van ongeveer 89,1 €/MWh.

6.4 Rendabiliteit

Uitgaande van bovenstaande cijfers bedraagt de terugverdientijd van de windturbine inclusief het 10-jarig onderhoudscontract 5,2 jaar. Indien de subsidie van 247.893,52 € in rekening wordt gebracht, bedraagt de terugverdientijd nog 4,5 jaar.

Deze cijfers worden bekomen door de totale investeringskost te delen door het verschil van de vergoeding voor de teruglevering van de elektriciteit en de gemiddelde onderhoudskost:

Investering:	1.757.475,90 €
Onderhoud jaar 1 t/m 4:	0 €/jaar
Onderhoud jaar 5 t/m 10:	28.000 €/jaar

$$\text{Zonder ANRE steun} \quad \frac{1.757.475,90\text{€}}{352.202,66 \frac{\text{€}}{\text{jaar}} - \left(\frac{4 * 0 + 6 * 28.000}{10} \right) \frac{\text{€}}{\text{jaar}}} = 5,2 \text{ jaar}$$

$$\text{Met ANRE steun} \quad \frac{1.757.475,90\text{€} - 247.893,52}{352.202,66 \frac{\text{€}}{\text{jaar}} - \left(\frac{4 * 0 + 6 * 28.000}{10} \right) \frac{\text{€}}{\text{jaar}}} = 4,5 \text{ jaar}$$

7 ENERGETISCHE TERUGVERDIENTTIJD

Naast de besparingen op primaire energie en CO₂-uitstoot kan ook nog de energetisch terugverdiëntijd berekend worden. Om deze energetische terugverdiëntijd te berekenen wordt gebruikt gemaakt van een studie uitgevoerd door de Afdeling Toegepaste Mechanica en Energieconversie van de K.U.L. [2]

In een LCA-studie wordt een beeld geschetst van de benodigde primaire energie en van de CO₂-uitstoot zowel bij de bouw, het onderhoud als de afbraak van het betreffende object.

Om tot deze waarden te komen, wordt er hoofdzakelijk rekening gehouden met de inbreng van de materialen, dus met de PKA (Proces Keten Analyse). Hier worden de gebruikte materialen omgerekend naar hun energetisch- en emissie-equivalent, maar bepaalde stappen zoals bv. diensten, montage, engineering, ... kunnen niet door een hoeveelheid materiaal uitgedrukt worden.

Vermits een goede LCA-studie een gedetailleerde studie van alle gebruikte materialen vereist, waardoor het geheel zeer complex wordt, wordt er een kleine, niet ideale omweg gemaakt via de IOA (Input-Output Analyse). De IOA werkt met economische grootheden om een afgewerkt product voor te stellen, waardoor de berekeningen minder complex worden.

Al deze beperkingen in acht genomen volgt uit [2] dat voor een windturbine in het binnenland het primaire energieverbruik 350 kJ_{prim}/kWh_{el} bedraagt, terwijl de CO₂-uitstoot 28 gCO₂/Wh_{el} is. Bij het rapport [2] wordt aangenomen dat de levensduur van een windturbine 20 jaar (beperkt door de levensduur van de rotorbladen) en dat een windturbine in het binnenland gemiddeld 1.000 u/jaar op vollast draait, volgt hieruit dat een windturbine goed is voor:

$$350 \frac{\text{kJ}_{\text{prim}}}{\text{kWh}_{\text{el}}} \times 20 \text{ jaar} \times 1.800 \text{ kW}_{\text{piek}} \times 1.000 \frac{\text{h}}{\text{jaar}} = 12.333 \text{ GJ}$$

en

$$28 \frac{\text{gCO}_2}{\text{kWh}_{\text{el}}} \times 20 \text{ jaar} \times 1.800 \text{ kW}_{\text{piek}} \times 1000 \frac{\text{h}}{\text{jaar}} = 1.008 \text{ tonCO}_2$$

Vergelijken we dit met de berekende besparing op het vlak van primair energieverbruik en CO₂-uitstoot dan krijgen we voor deze turbine een terugverdiëntijd van

$$\frac{12.333 \text{ GJ}}{36.507 \frac{\text{GJ}}{\text{jaar}}} = 0,36 \text{ jaar} \text{ voor de primaire energie}$$

en van

$$\frac{1.008 \text{ ton}}{2.717 \frac{\text{ton}}{\text{jaar}}} = 0,37 \text{ jaar} \text{ voor de CO}_2\text{-uitstoot.}$$

8 MENING VAN DE EIGENAAR

8.1 Technische evaluatie

Technisch gezien functioneert de windturbine zeer goed. Na de eerste jaren ligt de beschikbaarheid hoger dan 98 %. Dat wil zeggen dat de windturbine bijna steeds klaar is voor productie. Het onderhoudscontract met de leverancier garandeert overigens 97 % beschikbaarheid.

Het eerste jaar – het jaar waarover dit rapport gaat – was er een zeer goede productie door de windturbine. Een stuk meer dan de verwachte productie (zowat 3,4 miljoen kWh) en dan de minimale productie zoals die voor de financiële analyse werd gebruikt (3,1 miljoen kWh). We zijn er natuurlijk niet zeker van dat ook de komende jaren een dergelijk mooi resultaat geven, maar dit rapport geeft toch aan dat de verwachte productie gemiddeld zeker zal worden gehaald.

Met de Enercon E-66 1.800 kW werd gekozen voor de op dat moment grootste beschikbare turbine. Bovendien heeft de firma Enercon zeer veel ervaring met dit soort turbines omdat ze reeds meer dan 500 gelijkaardige turbines van 1.500 kW heeft geplaatst. In elk aspect van het verloop van het project was die ervaring duidelijk voelbaar. Ook het bouwen en starten van de windturbine is zonder noemenswaardige problemen verlopen. Tot op heden draaien de turbines bijna zonder problemen en is de service steeds goed.

Het enige onverwachte element is de ijsvorming op de wieken op sommige momenten in de winter. Het gaat over gemiddeld 4 dagen per jaar waar de temperatuur rond het vriespunt schommelt en er een hoge luchtvochtigheid is. Er wordt dan ijs gevormd op de wieken. Dat vliegt er met een boog af als de zon op de wieken schijnt. Er werd aan de constructeur gevraagd om een ijs-detectiesysteem te installeren op de windturbine waardoor ze op deze momenten kan stilgezet worden en waardoor het ijs recht naar beneden valt en niet in een boog wordt afgeworpen. Er is nog geen verdere ervaring opgedaan met dit systeem.

8.2 Financiële evaluatie

Omdat het eerste jaar zo'n goede productie gaf, is ook het financiële resultaat na het boekjaar 2002 zeer goed. Daarmee kon Ecopower een mooie reserve aanleggen die een stabiele werking van het bedrijf in de komende jaren garandeert. Er is ook voldoende ruimte om nieuwe projecten te starten.

8.3 Maatschappelijke evaluatie

Ecopower is een financieringscoöperatie. Bij de investering in dit project werden zoveel mogelijk mensen betrokken. Aan de voet van de turbine staan infopanelen en kan de productie afgelezen worden. Eind 2002 waren er 656 aandeelhouders van Ecopower. Zowat de helft daarvan komen uit Eeklo of omgeving. De reacties bij de mensen van Eeklo liegen er ook niet om. De mensen zijn zeer positief over de windturbine en er zijn bijna wekelijks rondleidingen voor groepen, waaronder heel wat scholen. Dat zijn dikwijls groepen uit Eeklo, maar ook uit heel Vlaanderen. De windturbines van Eeklo worden door de bevolking als positief ervaren. Een getuige vertelt: “we hebben hier in Eeklo niet zoveel om trots op te zijn, maar onze windmolens, daar zijn we trots op”. De poëzie in de lokale krantjes en de zeefdrukken van de Van Artevelde Hogeschool bevestigen deze positieve uitstraling.

Ook in meer academische middens en beleidsmatig wordt het windenergieproject in Eeklo als een voorbeeld aangehaald. Heel wat gemeenten zijn reeds langsgekomen en zetten schuchtere stapjes om het project in Eeklo te herhalen. In de haven van Gent is project opgestart dat voor 20% open zal staan voor participatie van de bevolking. Ook in Zottegem is een project opgestart waar participatie van de bevolking centraal staat. In de Westhoek is de coöperatie BeauVent op een gelijkaardige manier aan het werk. En in het Waasland werkt de coöperatie Wase Wind ook aan een project waar participatie mogelijk is.

Jim Williame
Ecopower cvba

9 BESLUIT

Voor de betreffende windturbine met een nominaal vermogen van 1.800 kW, bedroeg de totale bruto elektriciteitsproductie tijdens de monitoringperiode 3.954.879 kWh/jaar, wat 29 % meer is dan wat werd voorspeld door de haalbaarheidstudie die voor de opstart van het project werd uitgevoerd door de VUB. Het eigenverbruik van de windmolen was slechts 1.904 kWh/jaar. De gemiddelde capaciteitsfactor bedraagt 25 %. Dit levert een totaal aantal vollasturen op van 2.197 u, wat hoger is dan de 2.000 u die vooropgesteld wordt om een rendabel project te hebben.

De windturbine heeft gedurende de meetperiode een gemiddeld jaarrendement gehaald van 46 %, wat zeer hoog is in vergelijking met de Betz-limiet die alleen al voor de rotor een theoretisch maximumrendement vooropstelt van 59 %. Hierbij moet worden opgemerkt dat de berekeningen van het rendement werden uitgevoerd op basis van windmetingen met een windsensor op de gondel van de windturbine, wat minder nauwkeurige resultaten geeft dan metingen met een afzonderlijke meetmast.

Uit de meetgegevens kan worden afgeleid dat de besparing op het primair energieverbruik die de windturbine van Ecopower met zich meebrengt, in vergelijking met een elektriciteitspark dat enkel bestaat uit met fossiele brandstoffen gestookte thermische centrales 34.726 GJ/jaar bedraagt.

Ook wat de CO₂-uitstoot betreft brengt de windturbine van Ecopower een besparing teweeg. Door de 3.954.879 kWh elektriciteit die de turbine jaarlijks produceert, bedraagt deze besparing 2.717 ton/jaar.

Uitgaande van financiële cijfers bedraagt de terugverdientijd van de windturbine inclusief het 10-jarig onderhoudscontract 5,2 jaar. Indien de subsidie van 247.893,52 € in rekening wordt gebracht, bedraagt de terugverdientijd nog 4,5 jaar.

De energetische terugverdientijd voor deze windturbine is 0,36 jaar voor wat betreft de benodigde primaire energie en 0,37 jaar voor wat betreft de CO₂-uitstoot. Hierbij is rekening gehouden met de totale nodige primaire energie en CO₂-uitstoot zowel voor productie, onderhoud als afbraak van de windturbine.

BIJLAGE I: RENDEMENT EN CO₂-EMISSIEFACTOR ELEKTRICITEITSPARK

- Voor het rendement van het park thermische centrales gestookt door fossiele brandstoffen in 2000 wordt 41 % berekend (gebaseerd op Energiebalans Vlaanderen 2000 [3]: de bruto productie van de thermische centrales bedraagt 72,9 PJ en de brandstofinput bedraagt 177,7 PJ).
- De CO₂-emissiefactor voor hetzelfde park bedraagt volgens [1] 0,687 kg/kWh.

Emissies van klassieke elektriciteitscentrales in België

Bij de productie van elektriciteit in klassieke thermische centrales treden een aantal emissies op. Hieronder worden enkele richtcijfers gegeven in verband met deze emissies.

Om de emissie per kWh elektriciteit te berekenen is de totale emissie gedeeld door de totale hoeveelheid (netto) geproduceerde elektriciteit in centrales die met fossiele brandstoffen gestookt worden.

CO₂-emissies

België		1990	1995	1996	1997	1998	1999	2000
CO ₂ -emissies (2)	kton	22.607	22.988	22.555	21.951	23.676	20.841	21.222
Netto-elektriciteitsproductie door centrales gestookt met fossiele brandstoffen (1)	GWh	23.119	27.322	27.094	26.219	31.456	30.125	30.883
	kg/kWh	0,978	0,841	0,832	0,837	0,753	0,692	0,687

SO₂-emissies

België		1990	1995	1996	1997	1998	1999	2000
SO ₂ -emissies (2)	ton	94.38 1	77.44 7	68.78 1	60.91 1	61.23 5	33.41 7	34.50 5
Netto-elektriciteitsproductie door centrales gestookt met fossiele brandstoffen (1)	GWh	23.11 9	27.32 2	27.09 4	26.21 9	31.45 6	30.12 5	30.88 3
	g/kWh	4,08	2,83	2,54	2,32	1,95	1,11	1,12

CO_x-emissies

België		1990	1995	1996	1997	1998	1999	2000
NO _x -emissies (2)	ton	59.18 3	53.41 2	50.62 3	44.92 5	46.83 4	32.53 7	39.16 9
Netto-elektriciteitsproductie door centrales gestookt met fossiele brandstoffen (1)	GWh	23.11 9	27.32 2	27.09 4	26.21 9	31.45 6	30.12 5	30.88 3
	g/kWh	2,56	1,95	1,87	1,71	1,49	1,08	1,27

emissie van stofdeeltjes

België		1990	1995	1996	1997	1998	1999	2000
Stofemissies (2)	ton	10.131	5.835	5.884	4.754	4.666	3.201	3.886
Netto-elektriciteitsproductie door centrales gestookt met fossiele brandstoffen (1)	GWh	23.119	27.322	27.094	26.219	31.456	30.125	30.883
	mg/kWh	438	214	217	181	148	106	126

productie van vliegias

België		1990	1995	1996	1997	1998	1999	2000
Emissies van vliegias (2)	kton	931	769	720	643	641	471	542
Netto-elektriciteitsproductie door centrales gestookt met fossiele brandstoffen (1)	GWh	23.119	27.322	27.094	26.219	31.456	30.125	30.883
	g/kWh	40	28	27	25	20	16	18

(1) Openbare producenten BFE (enkel fossiele brandstoffen), geen autonome producenten, geen zelfproducenten: milieureporten van Electrabel/CPTE

(2) Milieureporten Electrabel/SPE

© Vito, 2002. Voor de informatie op deze site gelden een [vrijwaringsclausule](#) en een verklaring betreffende het [auteursrecht](#).

Vito, Boeretang 200, B-2400 Mol, België, Tel. +32 14 33 55 11, Fax +32 14 33 55

Deze website werd ontworpen door Edge.be nv

[Privacy beleid](#)

REFERENTIES

1. <http://www.emis.vito.be/statistieken/index.asp?pageChoice=Statistiek&id=934>: emissies van klassieke elektriciteitscentrales in België (1990-2000).
2. Brouwers E., D'haeseleer W., "Indirecte emissies te wijten aan de levenscyclus van elektrische centrales", KUL, Leuven.
3. "Energiebalans Vlaanderen 2000: onafhankelijke methode", Vito rapport 2002/IMS/R/075